

The
Quest

Energy, Security, and
the Remaking of the
Modern World

能源 大探索

風 太陽 菌藻

1992年普立茲獎得主 暢銷書榜首作家 繼《石油世紀》後曠世巨作

丹尼爾·尤金 著

劉道捷 譯

Daniel Yergin

福島核災後，核能玩完了。
巴西甘蔗酒精車滿街跑了數十年。
柳稷枝與海藻，生質能新彗星。
電動車，節能減碳救主。

導讀 中央研究院地球科學研究所研究員 汪中和

鼎力推薦 商周媒體集團執行長 王文靜
呂張投資團隊總監 呂宗耀
台灣電力公司董事長 黃重球
經濟部能源局局長 歐嘉瑞
中華經濟研究院董事長 梁啟源

時報出版

next

本書榮獲英國金融時報《年度商業選書》

金融時報

在丹尼爾·尤金簡明、生動的書寫風格中，發掘諸多令人驚嘆的觀察與趣味

紐約時報

本書是對於能源發展的深入追蹤與「後石油時代」的洞見

經濟學人

《能源大探索》比《石油世紀》更宏觀、氣勢更壯闊…

全球重量級名人佳評如潮：

尤金是我鍾愛的作家之一，這本書提供一個重要基礎，使得形成我們能源未來的各方力量有積極對話的機會。

——微軟創辦人 **比爾·蓋茲** (Bill Gates)

世界聞名的能源專家尤金綜合安全與環境問題，解釋今日世界的能源系統分析未來的可行之道，要了解經濟和人類生活方式的前途，一定要捧讀這本書。

——《賈伯斯傳》與《愛因斯坦傳》作者 **華德·艾沙克森** (Walter Isaacson)

尤金的巨著《石油世紀》是權威之作，現在他擴大眼界，不但探討石油也擴及所有能源，凡是想了解二十一世紀經濟或政治的人，都應該精讀本書。

——前美國財政部長、前哈佛大學校長 **拉利·桑莫斯** (Lawrence Summers)

本書作者尤金是世界最有經驗、最有影響力的全球能源問題權威，本書很可能變成這個最複雜、最重要主題的經濟、科學與歷史定論之作。

——前美國國務卿、《論中國》一書作者 **亨利·季辛吉** (Henry A. Kissinger)

作者秉持前一本探討能源政治全球暢銷傑作《石油世紀》的經典風格，再度寫出一本攸關能源科學、經濟與地緣政治的權威巨構。

——《賓拉登化身》、《鬼界戰爭》作者 **史帝夫·柯爾** (Steve Coll)

凡是希望探索世界能源版圖、了解氣候變遷如何成為能源問題一環，洞悉人類如何規劃而途的讀者，都必須認真研讀本書。

——環境保衛基金會總裁 **弗瑞·克魯伯** (Fred Krupp)

這是一本深入、特出、精心寫作、探討現代最重要問題的好書。

——聯邦中央感董事長兼執行長 **菲特烈·史密斯** (Frederick Smith)

尤金以大師手法，把經濟與地緣政治力量、能源生產與氣候變遷複雜科學融為一爐，引領世人解開橫在眼前與重大能源前途之間的眾多謎題。

——麻省理工學院校長 **蘇珊·賀克菲** (Susan Hoekfeldt)

ISBN 978-957-13-5613-6

ISBN 978-957-13-5613-6 (554.68)



9 789571 1356136



時報
出版



BE0188

NTS 400

作者簡介

丹尼爾·尤金 Daniel Yergin

是世界能源天地中最有影響力的專家，也是備受尊敬的能源、國際政治與經濟權威，所著《石油世紀》曾經榮獲普立茲獎，並高居暢銷書排行榜第一名。他也是美國能源獎得主，獲獎原因是「在能源領域創造終生成就、拓展國際了解」。目前他擔任「劍橋能源研究公司」（IHS Cambridge Energy Research Associates）總裁，這家公司堪稱當今全球頂尖的能源顧問公司。他的其他著作包括《世界經濟之戰》（Commanding Heights）與《粉碎的和平》（Shattered Peace）。

譯者

劉道捷

台大外文系畢業，曾任經濟日報國際新聞中心主任。譯作包括《投機客養成教育》、《期貨新知》、《股票作手回憶錄》、《全球投資漫談》、《倪德厚夫的投機術》、《成功從轉型開始》、《基業長青》、《下一個社會》、《野蠻的下一個社會》、《猶太人致富金律》、《資本家的冒險》、《打敗大盤的獲利公式》等書。譯作曾獲中國時報、聯合報年度十大好書獎及其他獎項。

關於

next

這個系列，希望提醒兩點：

1. 當我們埋首一角，汲汲於清理過去的包袱之際，不要忽略世界正在如何變形，如何遠離我們而去。
2. 當我們自行其是，卻慌亂於前所未見的難題和變動之際，不要忘記別人已經發展出的規則與答案。

我們希望這個系列有助於面對未來。
我們也希望這個系列有助於整理過去。

*The
Quest*

Energy, Security, and
the Remaking of the
Modern World

能源 大探索

風 太陽 菌藻

丹尼爾·尤金 著

劉道捷 譯

Daniel Yergin



目錄

推薦序 I 掌握能源脈動，深入淺出

歐嘉瑞

0 0 7

推薦序 II 百年話題，全新視角

黃重球

0 0 9

導 讀 能源、環境與氣候：

我們充滿不確定的未來

汪中和

0 1 0

引言 福島核變與茉莉花革命

0 1 4

第一篇 電力時代

第一章 交流電

0 2 4

第二章 核子循環

0 3 9

第三章 談判破裂

0 5 8

第四章 燃料的選擇

0 7 6

第二篇 氣候與碳

第五章 冰河變化

1 1 0

第六章 發現的時代

1 1 1

第七章 前往里約

1 3 1

第八章 造市問題

1 4 8

第九章 全球性議題

1 6 4

第十章 尋找共識

1 8 1

第三篇 新能源

第十一章 再生能源的再生

1 9 8

第十二章 科學實驗

2 3 8

第十三章 煉光術

2 5 3

第十四章 神祕的風力

2 8 8

第十五章 第五種燃料——效率

3 0 4

丹尼爾·尤金

能源大探索

風、太陽、菌藻

第十六章 縮小節能差距

第四篇 未來的路

第十七章 碳氫人

第十八章 內燃機

第十九章 偉大的電動車實驗

結論 重大革命

3	3	3	3	3
9	7	5	3	1
9	6	3	0	5

推薦序 I

掌握能源脈動，深入淺出

歐嘉瑞

自十八世紀工業革命以來，煤炭、石油及天然氣等化石燃料逐漸成為人類賴以生存的主要能源，更是影響全球經濟發展與社會進步的重要因素，在人口及經濟快速增長發展下，大量消耗自然資源，引發各國為爭奪資源爆發衝突，其中中東、北非國家因石油蘊藏豐沛，長久以來即為各國兵家必爭之地（如兩次波斯灣戰爭），該地區在波斯灣戰爭後的數十年間，仍持續因政治事件與油田爭奪問題，在政治上呈現不穩定狀態，影響全球石油供應穩定與能源安全。

邁入二十一世紀，隨著環境意識抬頭及氣候變遷議題日益受重視，全球能源使用重心已逐步由傳統能源轉向再生能源與潔淨能源；近年美國頁岩油（氣）及加拿大油砂的開發，除改變北美能源市場的消費結構外，亦牽動全球能源產業之發展、帶動綠色產業的契機，甚而改變民眾消費型態，創造綠色消費商機，顯見若將能源、社會與經濟等重要因素有效連結，除可達永續發展之願景，更可創造出多贏綜效。

反觀我國因自主能源匱乏，長期以來極度依賴進口供應，進口能源依存度高達九九·二二%（二〇一一年），易受國際石油市場情勢變遷所影響，因此如何動態有效掌握國際脈動實屬關

鍵。作者丹尼爾·尤金之《能源大探索》系列對於近期國際政治發展變動、能源政策變革、能源安全及新能源發展潛力等議題，以宏觀前瞻角度進行深入淺出的描述，可供民眾瞭解國際石油市場發展之全貌，並作為能源領域專業人士之參考書籍。

（本文作者為經濟部能源局長）

推薦序 II

百年話題，全新視角

黃重球

本書從歷史、科技、政治、商業、環保、地球暖化、與國際政治力交互運作、未來發展趨勢預測等各種角度，探索了近百年來全世界不同能源種類發展與影響，不僅資料詳實客觀，也兼顧了能源專業的精確性與大眾閱讀的趣味性，非常值得對能源議題現代社經動態變化有興趣者、政府決策者、或從事能源之專業人士想使自己從不同而較寬廣角度去思索能源問題，予以詳細研讀。

其中於探討電業管理方面，作者從論敘早期交直流電發展歷史開始，漸次探索到電業獨占性的沿革與其本質，及後來歐美國家電業自由化實施後成與敗等之政經背景，此類分析，透過作者詳實文筆娓娓道來，讓讀者輕鬆獲得更寬廣的知識，並促使閱讀人從不同角度來思索主宰電業市場的政經力量，而不至於陷入偏頗於哪一方之觀點。本書後半冊則詳細討論到不同電力能源的特殊屬性與長期趨勢——包括核能、煤炭、石油、天然氣等等——堪稱立論札實，分析客觀，非常值得現代人閱讀的好書。

（本文作者為台灣電力公司董事長）

導讀

能源、環境與氣候：我們充滿不確定的未來

汪中和

時報出版社的新書《能源大探索》是一本難得的好書。當然作者響亮的名氣以及深厚的寫作功力是主要的因素，更重要的，他探討了一般人難以掌握的主題：能源、環境與氣候，並且能夠深入淺出的道出其中交錯複雜的關連，這是相當不容易的。

作者在這本書中，不但完整交代了能源供需在人類社會發展過程的起伏，也指出能源的安全及穩定是維繫現代社會最重要的課題。除此以外，一個新的因素——氣候變化，正以我們人類想像不到的方式，影響並改變我們的未來。

今年七月五日，日本國會福島核電廠事故獨立調查委員會公佈了長達六百四十一頁的報告書，明確的指出二〇一一年三月十一日東北大地震後所發生的福島核電廠輻射物質洩漏，主要是人為原因所致。也就是說，地震及海嘯誠然是天災，然而「人禍」更接續造成難以收拾的可怕後果。

日本國會福島核電廠事故調查委員會認為與福島核電廠有關的主事者及機構都犯了無法原諒的錯誤：無知和狂傲。這場災難原本是可以預見和避免的，但是卻沒有為這種規模超過以往事故的災難做好準備；如果事前採取更有效的人為因應措施，地震及海嘯後所造成的危害就會減輕很

多。調查委員會強調，儘管有機會採取措施，但監管機構和東京電力公司的管理階層卻一直拖延應有的作為，以致不完善的決策和行動機制在天災發生後，造成加成的效應，也帶來難以彌補的傷害。

日本國會福島核電廠事故獨立調查委員會的報告，不僅對日本政府是一個沉痛的教訓，對世界各國都是及時的提醒與殷鑑。這是一件典型的案例，藉著福島核電廠的教訓，可以讓我們深刻反省與檢討當前人類在「能源、環境與氣候」上所面臨的危機。

教訓之一：不要忽略及低估天災的風險及危害。

教訓之二：一定要有完善的防災及避災規劃。

教訓之三是：當災害一發生，救災的行動要迅速，指揮的系統要集中，資訊的傳播要完整。

教訓之四是：國家的重要政經設施必須要有嚴格的管理規範，並且與時俱進。

是的，「無知和狂傲」的態度，使得我們不斷追求經濟的成長，過去二百年來的能源毫無節制的使用，給地球環境帶來怵目驚心的傷害，也造成當前極端的氣候變化。

如今在地球的任何角落，任何一個國家，都可以感受到劇烈天氣變化所帶來的影響。隨著溫室氣體在大氣層的濃度快速攀升，地表熱能不斷累積，近年全球各地開始不停出現破紀錄的地震、海嘯、暴風雪、強烈颱風、嚴重乾旱、高溫酷暑、大洪水等環境急遽變遷現象，人類生存及社會穩定正面臨嚴峻的考驗，未來的發展也會受到重大衝擊。

上個月才在巴西里約熱內盧結束的第三次聯合國永續發展會議（又稱地球高峰會Rio+20），簽署了內容空洞且沒有具體目標及推動期程的協議，顯示國際社會對當前氣候變化會帶來的危

機，仍然欠缺前瞻性的認識，也在重蹈福島核電廠災難的第一個教訓。更不幸的，近期的環境變化非常快速，已超過科學家們先前的預估，我們可以因應的時間已大為縮短，採行的策略也必須改弦更張。

首先，美國海洋及大氣總署在六月初宣布，目前北極上空大氣層的二氧化碳含量已經突破四〇〇ppm（百萬分之一單位），是三百萬年來地球大氣層第一個超過四〇〇ppm的地區；這是一個令科學家們非常憂慮的指標，不但顯示大氣層暖化的趨勢在快速的演進，更說明情勢的惡化非常嚴重。

原先氣候學家們估計，要在二十一世紀前維持大氣層升溫的幅度不超過工業革命前攝氏二度的門檻，大氣層二氧化碳的濃度必須低於四五〇ppm。現在，北極地區已經率先突破了四〇〇ppm，若以當前每年平均二ppm的增幅計算，我們將在二十五五年內就邁過四五〇ppm的門檻。

更麻煩的是，北極地區不但大氣層的升溫幅度領先全球各地，北冰洋海冰的面積也正在加速的縮減。二〇一一年九月中旬，北冰洋的海冰面積已低於四百二十萬平方公里（暖化前是九百萬平方公里），這個觀測數據比原先聯合國政府間氣候變化委員會最悲觀的預估值（高於六百萬平方公里）還低了30%，並且發生的時間整整提前了三十年以上。

如今，暖化的影響不但使得北極區的海冰面積縮減，永久凍土帶約有二成的範圍也轉變為森林或灌木區。北極圈原是一個富含甲烷的地區，過去都冰封在低溫的冰天雪地中，新的科學觀測報告指出北極圈至少又出現了十五萬個甲烷逸出點，證實該區海冰及地表環境的變化，正導致大規模的甲烷不斷進入大氣層，進一步加速氣候暖化的速率；未來北極圈環境遽變所帶來的極端氣

候變化、快速海平面上升，極有可能將在十到三十年內開始衝擊全球各地。

這些現象都顯示，人類在環境開發和資源管理上的雙重失敗，從而使得地球正經歷一個劇烈變遷的時期，這是過去地球歷史所沒有的，也是人類自己所造成的錯誤，我們必須快速的回頭及改變。

能源的使用當然要加速更新、調整及改變，能源的安全與穩定也是不可忽視的課題。然而，認真妥善的面對氣候快速變化帶來的衝擊，做好防災、避災、救災的準備，更是每個國家及個人絕對不能逃避的任務，這是無悔的投資，也是保命的工作。

（本文作者為中央研究院地球科學研究所研究員）

引言

福島核變與茉莉花革命

兩件大事隔著半個地球同時爆發，同樣震撼全世界。

二〇一一年三月十一日，日本時間下午二時四十六分，海床底下二十七公里的地方，有兩塊板塊互相擠壓形成極大壓力，產生驚人隆起力量，引發歷來規模最大的地震，震毀東京以北地區大部分建築和基礎建設，切斷電力供應，福島第一核能發電廠的供電同樣中斷。五十五分鐘後，地震引發的驚人海嘯衝上海岸，淹死數萬人。福島第一核能電廠蓋在海邊，大海嘯衝過防坡堤，淹沒核電廠，也淹沒核電廠的備用柴油發電機，導致控制高熱核能反應爐所需冷卻用水中斷，隨後幾天，核電廠在幾次爆炸中損毀，輻射物質釋出，核能燃料棒嚴重熔毀。

因此形成的核能災變，是二十五年前烏克蘭車諾比爾（Chernobyl）核電廠爆炸以來最嚴重的核能事故。福島核電廠爆發災變，加上這個地區其他發電廠受損，導致缺電與輪流停電，顯示能源供應突然中斷可能輕易危害現代社會。影響所及不限於日本一國，日本工業生產中斷，破壞了全球供應鏈，打斷了北美與歐洲的汽車與電子產品生產，進而打擊全球經濟。福島事故也

為「全球核能復興」畫下大問號，很多人原本認為：全球核能復興是推動世界經濟成長的基本要素，這次核能事故動搖了他們的想法。

在世界另一邊，另一場大不相同的危機正在展開，危機引爆原因不是地殼碰撞，而是突尼西亞西迪布濟德市（Sidi Bouzid）一位年輕水果小販自焚。這位小販不滿市區警察一再騷擾、當地官員卻漠不關心，就在身上澆了油漆稀釋劑，在市政府前自焚抗議，他的故事和隨後引發的示威，透過手機、網際網路和衛星，傳遍突尼西亞、北非和中東。抗議風起雲湧，突尼西亞政權垮台。接著，抗議人士湧進開羅解放廣場，埃及政府跟著垮台。反對威權政府的示威蔓延整個地區，利比亞的抗議變成內戰，連北大西洋公約組織都捲入。

全球油價暴漲，原因不光是失去了利比亞的石油出口，也因為危機打亂了支撐中東幾十年的地緣戰略平衡。大家的焦慮升高，不知這場危機對供應世界四〇％石油的波斯灣、對全球石油顧客，可能有什麼影響。

兩大系列事件大不相同，遠隔重洋，卻同時發生，震撼全球市場，重新引發不確定、不安全，以及危機會加重的預期，凸顯了能源對世界極為重要的基本事實。

本書試圖解說這種重要性，介紹大家如何探索我們至為依賴的能源，也介紹能源創造的地位與報酬，以及能源提供的安全性。本書要解釋現代能源天地的發展過程，說明氣候與二氧化碳如何改變能源天地，預測未來的能源天地會有多大的不同。

這一切受三大根本問題影響：有沒有足夠能源滿足世界成長所需、成本高低、要運用什麼科技？如何保護全世界依賴的能源系統安全？包括氣候變遷在內的環境問題，對能源的未來會有什

麼衝擊、能源發展對環境會有什麼影響？

長久以來，害怕能源用完的問題就一直困擾世人。人稱凱文爵士（Lord Kelvin）的威廉·湯姆森（William Thomson）是十九世紀偉大科學家，他在一八八一年就任愛丁堡英國科學進步學會理事長，就職演說中就警告，英國的能源基礎岌岌可危，慘劇迫在眉睫。他擔心的不是石油，而是煤炭。煤炭創造了「蒸汽時代」，助長了英國的工業優勢，把「統治吧，不列顛！」變成世界權力舞台上的現實。凱文嚴肅的警告：英國偉大的日子可能屈指可數了，因為「世界地下煤炭蘊藏日漸耗盡，而且不是慢慢耗盡」，這一天很快就會來到，因為「煤炭所剩無幾」。他所能提出的唯一寄望是「某種形式的風車或風力機器會再度得勢。」

但是凱文爵士發出警告很多年後，由煤炭、石油與天然氣構成的碳氫化合物資源基礎，繼續巨幅擴大。

凱文演說七十五年後，另一位偉人預測「化石燃料時代」即將結束，這位偉人是「核子海軍之父」、核能工業之父美國海軍上將海曼·李高佛（Hyman Rickover），前美國總統卡特形容他是「有史以來最偉大的工程師。」

一九五七年，李高佛稱：「煤炭、石油與天然氣，供應了今日世界能源需求的九三%」，和僅僅一百年前的一八五〇年相比，這種情形是「驚人的逆轉，當時化石燃料占世界能源需求五%，人力和獸力占九四%。」懂得利用能源，使人類生活水準遠高於十九世紀中葉，但李高佛的重點是，化石燃料在西元二千年後會用光，最可能的時間是二〇五〇年前。

李高佛問：「全世界可以經濟開採的化石能源用光時，科學界一定能學會怎麼依賴再生能源，維持高生活水準嗎？」他懷疑這一點，認為風力、陽光、生質等再生能源，供應量永遠不會高於能源總供應量的十五%。當時核能仍然處在實驗階段，很可能可以取代煤炭用於發電。但李高佛說，原子能汽車非常不可能出現，他從策略性角度說明這一切：「做好面對汽車可能完全消失的準備，是相當明智的。能源消耗量很大，必將成為政治權力的必要條件。」他擔心這種情勢改變時，大禍就會臨頭。

事實證明，地球資源的蘊藏遠比李高佛想像的要多。今天的石油產量是一九五七年的五倍，再生能源也遠超過李高佛想像，確立了穩固的地位。我們仍然活在李高佛所說的化石燃料時代，今天石油、煤炭和天然氣占世界能源需求八〇%以上，今天能源供應之多，遠超過大家想像，但從供需規模可以簡單看出，世人要確保未來的能源供應，挑戰性遠高於凱文的時代，甚至遠高於李高佛的時代。資源是否足以助長現今年產值六十五兆美元的全球經濟，也足以助長二十年後可新高達一百三十兆美元的世界經濟？簡單來說，今天石油撐住全世界將近十億輛汽車，將來汽車總數增加到二十多億輛後，石油還能支撐這樣的世界嗎？

問這個問題，就反映了相當新穎的「能源需求全球化」事實。現在幾十億人融入全球經濟，所得和能源使用量增加，先進國家每人年平均石油用量為十四桶，開發中國家每人只用三桶。幾十億人從使用三桶增加到使用六桶時，世人要怎麼因應這種局勢？

本書的第二個主題是安全，安全起源於風險與弱點，也就是能源供應中斷與能源危機構成的威脅。二次大戰以來，很多危機都是在預料不到的時候，擾亂能源供應。

下一場危機會在什麼地方發生？可能發生在網路上所謂的「醜陋的新世界」裡。能源的產

銷系統十分複雜，是「重大基礎建設」中最重要的一環，因此系統中的數位控制設備，變成吸引網路攻擊的目標。破壞輸電系統不但會造成停電，也可能癱瘓整個社會。探討能源供應安全問題時，分析似乎總是會回歸波斯灣地區，因為這裡掌控了六〇%的傳統石油蘊藏。恐怖份子已經鎖定波斯灣的龐大能源基礎建設，希望拉下現有政府、推升油價，藉此造成西方「破產」。這個地區也面臨動亂，因為大量年輕人缺乏教育與就業機會，期望根本無從滿足。

此外，還有其他形式的風險與危險。為這些風險和危險做好準備，確保我們具有因應彈性，才不至於在事後像日本政府一樣，用慘烈的文字，發表福島第一核能電廠報告，斷定「持續一貫的準備根本不夠。」

第三個主題，環境。世人在解決傳統污染問題方面進步驚人。但幾十年前，大家鎖定排氣管釋出的污染物質時，想到的是煙霧，不是二氧化碳和全球暖化。一九七〇年第一個地球日以來，環境意識大幅提升，到了本世紀，氣候變遷變成重大政治議題，也變成未來能源前途的重點，這種變化未來可能使溫室氣體變成強而有力的因素，足以打壓碳氫化合物至高無上的地位，提高再生能源的角色。

大部分預測顯示，未來二十年內，能源需求會遠比今天大得多，其中高達七五%至八〇%的需求，還是會和現在一樣，要靠石油、天然氣和煤炭滿足，只是能源的運用效能會更好。凱文爵士認為一定會出現，但李高佛深表懷疑的變化會不會出現？世界會不會向新能源時代演進，變成運用不同組合的能源、變成十分依賴風力、太陽能與生質等再生與替代能源，甚至動用我們今天還看不出來的能源？什麼樣的能源組合能夠滿足世界能源需求，卻不會引發危機和對抗？

不管答案是什麼，創新都很重要，大家比過去更重視能源領域的全面創新，可能也不足為奇。這種情形可能像現代創投之父杜里奧特將軍（Georges Doriot）所說：帶來「應用科學」成功應用在能源方面的好處。

能源供應系統規模龐大、又十分複雜，因此前置時間可能很長。如果說現在是能源過渡時代，那麼六兆美元的全球市場就會變成「兵家必爭之地」，也就是說，目前供應大部分能源的既有石油、天然氣與煤礦公司，和生產風能、太陽能與生質能源的新進廠商之間，會爆發競爭，爭奪愈來愈大的市場占有率。如果發生這麼大規模的變化，對廢氣排放、整體經濟、地緣政治和國家地位，都會產生重大影響。

本書第一篇和電氣時代有關，自從愛迪生為他設在下曼哈頓的發電廠點火以來，世界的電化程度日益加深，已開發國家把電力視為理所當然，沒有電一切都無法運轉。在開發中國家裡，缺電影響人民生活與經濟成長。

今天從個人電腦、數位影音光碟機、智慧型手機到平板電腦之類的很多新機器設備，三十年前並不存在，這些設備所需要的電力、所需要的「新機瓦數」不斷增加。要滿足未來的電力需求，表示世人在選擇燃料、維持照明與電力流動時，要面對偶爾會非常困難的艱巨決定。

第二篇說明少為人知的氣候變遷故事，這個課題原本只有少數科學家感興趣，現在已經變成未來的重大問題。氣候研究始於一七七〇年代的阿爾卑斯山，動機純粹是出於好奇。十九世紀時，有些科學家開始有系統的思考氣候問題，原因不是他們擔心全球暖化，反而是害怕冰河時代再度降臨。一直到一九五〇年代末期與一九六〇年代，才有一些研究人員，開始計算大氣層中二

氧化碳水準上升的問題、測定這種情形對氣溫上升可能有什麼影響，他們斷定其中的風險不是全球冷卻，而是全球暖化。但是一直到二十一世紀，氣候變遷才開始對政治領袖、企業主管和投資人的決策，產生重大影響，甚至變成美國最高法院的判決課題。

第三篇說明新能源，就是「再生能源起死回生」的故事，也解釋科技的演進。再生能源產業的歷史充滿了創新、企業冒險、政治鬥爭、爭議、失望、絕望、起死回生與運氣。再生能源已經變成大型全球產業，卻也到達了考驗期，必須證明本身能否大規模商業化。

大部分人思考能源問題時，不會想到一種重要的能源。這種能源有時叫做節約能源，有時叫做能源效率。這種能源很難用觀念說明，也很難運用，卻可能對未來若干年內的能源平衡，做出最大貢獻。

這些主題全都回歸到運輸上，尤其是回歸到汽車上。情勢似乎已經絕對清楚的顯示：就在一百年前左右，汽車大眾市場的競賽已經決定勝負，內燃機獲得壓倒性勝利。今天電動車在電池的推動下，也在政府政策的鼓勵下東山再起，使這場競賽重新開始。這次，全面電動化的機器會獲勝嗎？如果電動車能證明其競爭力，或至少在某些情況中具有競爭力，競賽結果會重新改造能源天地。電動車不是唯一的競爭者，開發生質燃料的競爭——也就是「種植」汽油——而不是鑽探石油，也已經開始，這一切引發了一個極大問題：汽油現在是運輸領域之王，電動車或生質燃料會不會把汽油從王座上趕下來？

有一點可以確定，就是未來的歲月裡，新「驚奇」會打亂目前的共識、改變大家的觀點、重新引導政策和投資，影響國際關係。這些驚奇可能是政治動盪、戰爭、恐怖主義或經濟的突然變

化，可能是意外或天災的結果，也可能是無法預料的科技突破、開啟新機會的結果。

有一點我們可以相當確定：未來世界對能源的胃口會巨幅成長，因此而產生的價值十分驚人，不管未來情勢怎麼變化，能源和能源帶來的挑戰，將決定我們的前途。

第一篇
電力時代

第一章 交流電

電力是現代文明的基礎，「把燈點亮」這句話最能表現這種根本事實，因為照明正是電力的第一個主要市場，也一直是生活中必要的功能。今天這句話也代表電力無所不在、至為重要的事實，電力具有其他能源望塵莫及的準確性，用途幾乎千變萬化。

我們不敢想像沒有電力的世界：沒有冰箱、空調、電視和電梯，我們要怎麼過日子？所有工業製程少不了電力；新的數位世界依賴電力的精確性，驅動各式各樣以微處理器為基礎的電腦、電話、智慧手機、醫療器材、濃縮咖啡機；電力整合即時通訊、金融和貿易網路，塑造世界經濟。耗用能源的新設備都要用電，因此電力的重要性與日俱增。

電力無所不在，很多人把電看成稀鬆平常，認為石油比電還重要，因為車主每週都要開車到加油站加一、兩次油，用電時只要按一下開關就可以了。一般人每個月收到電費帳單，或在颱風天或輸電系統故障停電時，才會想到電的重要。

第一次撥開關開啟了電力時代。

門羅公園的天才

一八八二年九月四日下午，博學多聞的發明家愛迪生人在美國最有權勢的銀行家摩根的華爾街辦公室中，下午三點，愛迪生推動開關，一百盞燈大放光明，整個房間燈火通明，摩根的一位股東歡呼：「燈亮了！」。

附近《紐約時報》辦公室的五十二顆燈泡同時亮起來，《紐約時報》說：這種新電燈泡光線「柔軟，眼睛看起來很舒服……完全沒有閃爍，不會讓人頭痛。」燈泡用電是從愛迪生興建的珍珠街燃煤火力發電廠，經由地下管線送來，這座設在幾條街外、摩根參與出資興建的發電廠，開啟了電力時代，為下曼哈頓二·五平方公里區域提供電力。

珍珠街發電廠是美國第一家集中發電的電廠，對愛迪生和他的公司都是工程上的挑戰。廠中安裝的六座的巨型發電機各重二十七噸，根據一頭非洲巨象的綽號，取名「大傢伙」，巴納姆主持的馬戲團正帶著這頭大象在美國各地巡迴公演。

幾個月後的一八八三年一月十八日，發生另一件具有歷史意義的事情，安索尼亞銅業公司收到史上第一筆電費帳單，金額是五〇·四四美元。

愛迪生的團隊幾乎不眠不休的奮鬥十年，才開啟珍珠街的電力時代。才三十多歲的愛迪生因為發明電報和留聲機，已經變成美國最有名的發明家，據說也是世界上最有名的美國人，個人擁有一千零九十三項專利，創下個人取得最多美國專利的紀錄，一直到二十世紀後期，他仍然是報章雜誌民調中「最偉大、最有貢獻的美國公民」。

愛迪生除了幾年學校教育外，大部分靠自學，當過六年巡迴電報員，成就這麼大實在令人驚嘆。他有點失聰，個性孤獨，以自我為中心，因此特別專注、特別具有創造力。他靠著實驗、推理、果決判斷和「自己都無法說明的方法」工作，實驗室設在紐澤西州門羅公園市，希望「每天有一項小發明，每六個月左右有一項大發明。」

「分割光線」

愛迪生研究電力時，發現要達成這種發明速度並不容易。他想發明取代煤氣燈的東西，想「分割」光線，不僅點亮幾盞大型路燈，而是「把光線細部分割，讓家家裡也有燈光。」

很多人嘲笑愛迪生的偉大夢想，英國國會指定的專家不把愛迪生的研究當一回事，認為「這種研究只對大西洋另一邊的朋友有用，不值得重視實用和科學的人理會。」

為了證明英國人的錯誤和分割光線，愛迪生必須創造整套系統：燈泡、發電和送電方法。一位學者寫道：「愛迪生的天才在於有能力管理完整的過程，包括認識問題、解決方法、研究發展與應用。」他的目標不只是發明比較好的燈泡（當時大約已經有二十種燈泡），還要儘快引進整套商業照明系統。

愛迪生先從燈泡開始，想找到電流通過時發出柔和的光線，耐用時間不只一小時，而是許多小時的燈絲；他嘗試包括員工鬍鬚之類的各種材料後，終於找到一系列通過試驗、用不同素材製造的碳燈絲。

愛迪生和其他燈泡發明家進行多年激烈、昂貴的專利權訴訟，一八九二年美國上訴法院終於

裁決這場訴訟；英國法院卻判決英國科學家約瑟夫·史萬擁有專利權。愛迪生沒有和史萬繼續對簿公堂，反而和史萬合組公司，在英國製造燈泡。

開發新系統需要很多資金，創投基金的發明也可以歸功愛迪生和他的投資人。創投基金起源於紐澤西州的門羅公園，後來在加州矽谷發揚光大。一位替他作傳的作者指出：「結合實驗室和企業是愛迪生成功的原因。」

成本問題一直存在，成本一上升，壓力就出現，電線用銅價格不斷上漲，投資者相當緊張，以致愛迪生感嘆說：「實驗成本很貴；資方相當膽小。」

大金主摩根卻很高興，因為愛迪生拉了電線，接通摩根在紐約麥迪遜大道東三十號的義大利式大廈，裝上三百八十五個燈泡。大廈地下室裝了一座蒸汽引擎發電機，鏗鏘聲惹火鄰居和摩根夫人。這套系統每天需要一位技師從下午三時，值班到晚上十一時，效率不好。更糟糕的是，有一天晚上電線走火，引發摩根的書房火災，但摩根仍然冷靜自如，繼續專注目標，「希望愛迪生公司體會我拿房子做實驗的價值。」

直流電和交流電之爭

除了摩根大廈外，愛迪生還專心發展幾個中心發電站，以便供應紐約市部分地區用電，可惜他的系統有一個重大缺點：直流電因為電壓低，無法送到遠處。愛迪生的想法是城市中每平方英里都要設置一座發電廠，但這樣一定會壓縮經濟規模，電力流動速度也會變慢。

交流電是另一個選擇。匹茨堡工業家喬治·西屋取得塞爾維亞籍傑出、古怪發明家尼古

拉·特斯拉的交流電專利，利用變壓器，提高電壓，把電力透過電線，送到遠地的住宅，因此大型發電廠可以服務廣大地區，擴大經濟規模和降低成本。

愛迪生和西屋激烈爭戰，因為電力是網路系統，只有一位勝利者，贏家通吃。

愛迪生運用龐大的影響力，猛烈抨擊交流電，指責交流電不安全，可能造成人員觸電。當時報紙熱烈討論電刑處死，紐約州正在考慮使用電椅執行死刑。紐約州電刑專家暗中幫忙愛迪生，故意讓大家把交流電和觸電與電椅處死聯想在一起。愛迪生親自用交流電電死動物，證明交流電的危險性，甚至把電椅稱為「西屋椅」、把電椅處死稱為「西屋處死」。

交流電的優越性顯而易見，因此西屋的交流電系統勝出，奪取愛迪生的市場，建立大規模發電基礎。愛迪生因為執著技術，使公司在景氣困難時財務每況愈下。「愛迪生通用電氣」不得不與對手合併，拿掉愛迪生的名字，改名奇異電氣，愛迪生因此深感恥辱、難過。

一八九三年芝加哥世界博覽會的電力展示極受歡迎，六個月內，參觀人次超過美國三分之一人口，觀眾對電力用途的多样化大開眼界。世界博覽會整晚燈火通明，盛況前所未有，芝加哥因此得到「白色城市」的美名。奇異電氣在會場中心樹立「光之塔」，向愛迪生致敬。不過，博覽會也顯示西屋勝過愛迪生，因為西屋和特斯拉的交流電照亮會場的大部分燈泡。

電力成長的技術已經備便，但可行的商業模式是什麼？

計費錶

英薩爾十四歲時，開始在倫敦的英國《浮華世界》雜誌社當小弟，後來透過分類廣告應徵，

擔任愛迪生歐洲代表處祕書，因為表現出色，由總工程師推薦給愛迪生，一八八一年英薩爾移民美國，擔任愛迪生的祕書。英薩爾抵達門羅公園市當天，就工作到深夜，執行愛迪生指派的工作，隔天早上六點就又開始工作。一百七十七磅重的英薩爾不久就成為愛迪生公司的「發電機」。一八九二年愛迪生失去公司控制權後，英薩爾移居芝加哥，接管當地二十多家競爭激烈發電廠中的一家。

一八九〇年代初期電力還是奢侈品。用電按照家中或辦公室中安裝的燈泡數目收費。英薩爾的野心大多了，希望藉著降低電價，對更多人售電，使電力大眾化，擴大營業規模，按燈泡計費無法達成目標，應該怎麼做呢？答案就像很多新發明一樣，在偶然間找到。

一八九四年，英薩爾前往英國，因為行程緊湊，十分疲倦，在海濱勝地布萊頓稍事休息。夜幕低垂時，整個布萊頓都亮了起來，讓英薩爾大吃一驚，大大小小的店舖都亮著燈光，怎麼可能如此？原來當地發電廠廠長發明可以計算每個用戶用電量的電錶，這是新的營業模式：用戶按用量付費，再加上分攤發電廠部分成本。英薩爾後來說：「我們要老遠跑到歐洲去學習如何計算電費。」

英薩爾進口到芝加哥的電錶成為電力公司和用戶之間的介面，電力按照用量而不是燈泡的數量收費，這種方式使業務急速擴大，形成大規模用電。英薩爾積極行銷，安裝全世界最大的發電機，爭取快速成長的電車客戶，也以最低的價格爭取到最多的用戶，目的就是要擴大用電規模。一九一〇年英薩爾對其他電力公司主管保證，如果價格夠低，銷售量會大幅增加，「你們以後會明白電力的潛力大到無法想像。」

自然獨占業務

英薩爾運用金融業的重大發明——控股公司，締造自己的電力王國，由一家公司控制另一家或幾家公司的部分或全部股權，建立金字塔式的控股公司，每一層都擁有下一層的控制性股權，一直到最底層的發電廠，運用這種模式，透過控股公司，只要支出少數資金，就可以控制大量資產，獲取極大收益。

為了建立金字塔式的控股公司，英薩爾收購地區性電力公司，關閉沒有效率的小型發電廠，另行建設大多了的中心發電廠和輸電線路，服務不同地區。電費因為用電範圍擴大而降低，這種方式英薩爾的公司可以為幾百萬美國人供電。

這種新模式會受到不當競爭的威脅。電力公司要取得地方政府的特許權才能營業，地方政府可能核准特許權給幾家競爭公司。核准特許權很可能成為腐敗行為，因為地方政府核准一件特許權時，可能取消另一件特許權。

一八八二年到一九〇五年間，芝加哥市政府總共核准二十九件設立發電廠的特許權，另外核准十八件特許權併入芝加哥的小鎮。這些特許權中有三件涵蓋整座城市，也有的特許權範圍小到「西北角的幾個街區或老舊的第十二區」。芝加哥市議員和朋友另外合組一家電力公司，企圖強迫英薩爾高價購電，英薩爾卻還是能夠壓低價格。特許權的政治不確定性造成募集資金困難重重；但電力業卻需要巨額資本投資，擴充規模、提升效率、降低成本。

英薩爾面對這種險惡環境，推動一種不屬技術的政治創新方法，由政府出面管制、訂定協

議。因為電力業的投資金額龐大，是「自然獨占產業」，要合理經營，就必須獨占，如果兩家公司沿著同一條街，鋪設兩條輸電線和設置發電設備，競相提供電力給相同用戶，用戶的成本會提高而不是降低；反之，只由一家公司以獨占模式供電，電價反而會下降。

這是需要政府出面協商的地方。英薩爾知道現實的政治問題，他說：「如果電力業是自然獨占業務，政府應該介入管制」，州政府公用事業委員會更應該決定電價是否公平合理，因為電力業的「競爭是不健全的管制機制。」同業不認同他的看法，但電力業終究依照政府介入電價協商的方式運作。久而久之，政府管制性協商成為常態，自然獨占的電力業變成接受管制的產業，電價和利潤由公用事業委員會決定。一九一二年，最高法院法官小奧利弗·霍姆斯寫道：主管機關的責任就是「公正解釋協議內容。」

一九〇七年，威斯康辛州和紐約州政府率先成立公用事業委員會；一九二〇年代以後，美國各州都成立這種委員會，要求電力公司以合理的電價，提供穩定可靠的服務，送電到行政區域內的每一位用戶，否則就會喪失營運許可。

電力城市：跨海技術移轉

英薩爾使芝加哥大放光明，成為電力的世界櫥窗，芝加哥唯一的對手是世界聞名的電力城市柏林。

發明家維爾納·西門子和工程師埃密爾·拉特瑙，是推動柏林和德國電化的關鍵人物。拉特瑙取得愛迪生電力產品的德國代理權，一八八四年，他的公司協助柏林最著名街道菩提樹下大道

的鮑爾咖啡廳安裝電燈，一夕成名；他的公司後來成為德國奇異電氣公司（AEG）。

一九一二年時，柏林是「歐洲最重要的電力城市」；西門子和德國奇異是兩家規模龐大的公司，為爭取德國境內城鎮電化合約正面衝突。

二十世紀初期前後，電力代表進步。人口三百萬的柏林和人口二百萬的芝加哥因為已經電化，名氣遠勝過人口七百萬的世界最大、最重要城市倫敦。

芝加哥和柏林都有中央供電系統，倫敦的六十五家電力公司擁有七十座分散各地的發電廠，有七十種收費和計價方法。這些電力公司包括西敏寺電力，查林十字路電力，聖詹姆斯波邁公司。倫敦人早上用一家電力公司的電力烤麵包，用另一家電力公司的電力照亮辦公室，拜訪附近辦公大廈中使用第三家公司電力的同業，走路回家途中的路燈是由第四家電力公司供電。

倫敦因為缺乏統一的管制，落後其他城市，一九一三年，有一位著名的工程師感嘆倫敦市這麼大，却耗用「極少電力，真是荒謬之至。倫敦不僅落後其他城市，還可能一直落後下去。」多年以後依然如此。

一九二〇年代，英薩爾的巨型電力帝國從中西部延伸到東部，在美國採用令人讚嘆的商業模式，藉著集中、大量生產的規模，提供便宜電力給各種大用戶。芝加哥市大幅成長得力這種規模效應：一八八二年英薩爾接收愛迪生公司時，全市只有五千個用戶，按使用的燈泡數量計算電費，當時樂觀的看法認為「芝加哥最後大約會有二萬五千個電力用戶。」

到一九二〇年代，芝加哥九五%家庭都已經電化，按用電量計費。英薩爾的世界觀正是「每個家庭、每間工廠、每條運輸路線都由共同來源供電，因為這是最便宜的供電方式。」一九二〇

年代經濟繁榮期間，英薩爾是世界著名的企業家，也是資本主義的象徵、當代最偉大的企業政治家，言行像聖哲一樣受人敬重，「英薩爾主義」變成資本主義的未來。

邪惡資本主義的象徵

一九二九年，英薩爾的事業達到巔峰，控股和自營公司市值達數十億美元，控制美國三十二州的電力公司，擔任六十五家公司董事長、八十五家公司董事，十一家公司總裁，是名人也是大善人，出資興建芝加哥的公民歌劇院，是劇院的「護衛天使。」

「力爭上游」是英薩爾應記者要求，對社會新鮮人的忠告。

記者問他「人生最大的抱負」是什麼？

答案是「把名聲乾乾淨淨的傳下去。」

實際情況却非如此。

一九二〇年代晚期百業興盛時，英薩爾帝國以愈來愈高的價格，不斷併購新公司，強化自己的控股。一九二八年，他創設英薩爾公用事業投資公司，以每股十二美元公開上市，隔年夏末，股價飆到一百五十美元。

英薩爾必須不斷擴大規模，才能降低成本，提供便宜電力，增加用戶，確保利潤，為了應付擴張所產生的龐大的資本需求，英薩爾藉著大事發行股票，大事舉債，大肆擴張，甚至在一九二九年股市崩盤後，仍然不斷投資，肆意舉借更多債務，到了極度負債經營的地步。此外，他的做帳方法也啟人疑竇：他旗下公司相互以高價交易，提高帳面價值，完全不理會資產折舊。整個企

業的命運繫於持續募集巨資的能力，投資者卻不了解公司實際財務，英薩爾的時間不多了。

大蕭條愈來愈嚴重，股市繼續重挫，銀行開始要求英薩爾還款。現實令人難堪，因為股價暴跌，併購時舉借的債務遠高於股票擔保品的價值。英薩爾說：「我錯了，最大的錯誤是低估金融恐慌的效應。」

債務和複雜之至的公司結構促使英薩爾帝國在一九三二年崩潰。債權銀行在紐約市開會，告訴英薩爾，銀行不再寬限，還要抽回貸款，有人聽到英薩爾說：「真希望我現在就死了。」

《紐約時報》曾形容英薩爾具有「遠見和看法……是美國最傑出、最偉大的產業帝國締造者之一」，但是現在英薩爾顏面掃地。一位銀行家說英薩爾「已經完全破產，一文不名」，英薩爾從巔峰墜落速度和悲慘程度堪稱美國史上之最。

上萬散戶持有的證券價值只剩下百分之幾。聯邦政府、檢察官和大眾指控英薩爾是詐欺、流氓、挪用公款和騙子；他的優點已經完全為人遺忘。

英薩爾不但是大蕭條時期的代罪羔羊，也迅速變成邪惡資本主義的象徵，此時美國經濟極度疲弱，對資本主義的信心幾乎完全喪失。一九三二年羅斯福競選總統時，誓言要把所有的英薩爾「都揪出來」。

英薩爾逃離美國，包租一艘希臘貨輪，在地中海上航行，考慮是否擔任羅馬尼亞電力部長或尋求其他國家政治庇護，船停靠伊斯坦堡時，遭土耳其主管機關逮捕後，送回美國。個子矮小、滿頭白髮、已經七十四歲的英薩爾在武裝警察戒護下，轉交芝加哥法院，眾多令人畏懼的檢察官準備提出控訴。

陪審團只花了五分鐘，就做出判決，所有陪審員為了避嫌，用了很多計策拖延時間，包括外叫蛋糕和咖啡，為其中一人慶生後，才回到法庭，宣告英薩爾無罪。

英薩爾獲判無罪，卻認為在巴黎度過餘生比較好，這時他已經身無分文；連襯衫上的袖扣都成為訴訟標的。住巴黎時，他為了省錢，都搭乘地鐵。一九三八年，他在協和廣場站心臟病發去世，右手還握著地鐵車票。這位偉大的資本家和現代電力業締造者死時口袋裡只剩幾分錢，沒有留下財產，留下的是電力業事業模式。

新政：完成美國全面電化

大家對英薩爾和控股公司深惡痛絕，認為投機客和銀行家利用控股公司詐騙客戶、搶劫電力公司、昧著良心掠奪過高利潤。聯邦公平交易委員會用「欺騙、詭計、虛假揭露、不誠實、背信和壓迫」，批評英薩爾所代表的制度。

英薩爾的遠見使千百萬美國人享受電力，研究電力業的一位學者寫道：「大家容易忽視或忘記耗時數十年建立、涉及艱深觀念、高深技術、罕見經濟因素和複雜管理的電力系統。」英薩爾創造的帝國和商業模式讓美國人民在相當短的時間內，獲得物美價廉的電力。

羅斯福新政的優先任務是剷除英薩爾率先推動的控股公司制度，然而美國大部分電力公司仍然採用這種制度，新政實施期間，電力公司及其支持者和政府激烈抗爭。羅斯福宣稱：「我反對政府形式的社會主義，也堅決反對私人集權式的社會主義。」新政最後獲勝，一九三五年公用事業控股公司法規定電力業的法律結構，「消滅」英薩爾式的複雜控股網路。只有鄰近、實際部分

整合的電力公司才獲准互相持股。

美國的電力分成兩種形態，都市居民用電方便，電力公司屬於民間投資人或市政府；鄉村居民無法享用電力，民間電力公司因為成本太高、負載密度太低，不願把輸電線拉到鄉村。

農民因此陷入十九世紀式的漫長辛苦勞動，牛奶要用手擠，食物送到市場前沒有冰箱可以保鮮。農婦更苦，每天要照顧爐火好幾小時，在外面錘打衣服好幾小時。據估計，每座農場一年打水和提水要耗用六十三天（每天工作以八小時計算），半數農莊在戶外洗衣服、幫小孩洗澡，原因都是沒有電。

新政改變了一切，一次大戰期間，聯邦政府在阿拉巴馬州馬索修爾建了一座水庫，發電供生產炸藥之用。官方的田納西流域管理局歷經激烈政治鬥爭後，取得水庫管理權，另外打算興建約二十座水庫，供發電之用。

一九三六年羅斯福簽署法案，成立農村電化管理局，貸款農村合作社，鋪設輸配電線到各地孤立農村，對辛苦勞動，利用煤油燈照明的農民供電，有些合作社也設立發電廠。

其他立法設立了電力行銷機構，對農村合作社和市政府優惠行銷，供應聯邦政府在西北部邦尼維爾和大古力新建大水庫所發電力，也供應科羅拉多河上胡佛水庫的發電。農村電化管理局和合作社改變了美國農村的的生活。

電化生活真美好

一九五〇和六〇年代，美國變成全面電化社會。二次大戰結束後，幾百萬美國軍人復員回家，結婚和出生率升高，加上軍人調適法案協助退伍軍人購屋，新屋需求激增，住宅移到郊區，一九四五到一九五四年間，全美各地新建房屋超過一千三百萬戶，電力在美國家庭生活中扮演的角色愈來愈重要。一九五〇年代期間，電力需求年成長率高達一〇%（近年只有一%左右），住宅、辦公室和工廠的電力需求不斷成長。

一九五〇年代中期，奇異電氣「電化生活真美好」廣告最能表現這種情形，這則廣告獲得三百家電力公司支持，但是廣告需要代言人，奇異電氣因而找上好萊塢。

一九五〇年代初期，雷根的電影生涯並不順利，雖然出名，但不是重要角色，他擔任影視演員協會主席，在幕後磨練了政治技巧，卻無助於演藝事業。雷根和太太南茜育有一子，沒有演出機會，也沒有收入。經紀人在拉斯維加斯最後邊境酒店，找到表演脫口秀的工作，並且為歐洲人歌唱團體主持開幕儀式。雷根不會唱歌，也不會跳舞，但是酬勞不錯，而且兩週的演出門票已經賣完，所以雷根還是去了拉斯維加斯，不過雷根夫婦對賭桌都沒有興趣，覺得工作無聊。

經紀人後來提供一個更有吸引力的工作：就是主持「奇異劇場」，同時成為奇異電氣的巡迴大使，酬勞很高，年薪十二萬五千元（相當於現在的一百萬美元）。雷根接受這份工作，此後八年間，奔波各地的時間加總起來等於兩年，巡訪全美一百三十五處奇異電氣工廠，對二十五萬名員工發表演講。由於害怕飛行，雷根獲得通用准許改搭火車和汽車，奔波全國各地。（一九五五年雷根寫信給朋友說：「我是不搭飛機的史前人類。」）雷根為奇異電氣奔波各地時，養成「演說」能力：演說主題混合愛國主義、美國價值、對大政府和管制的批評、趣聞軼事和幽默，這種演說能力後來協助雷根當上加州州長、進而當選總統，不過這是後話。他主持的「奇異電氣

劇場」成為週日晚的熱門節目。

奇異電氣把雷根的洛杉磯寶馬山花園住宅變成完美的全面電化住家。雷根說：「我家是全美電化最澈底的房子。」南西說：「屋裡有用不完的冰箱、電爐和耀眼的燈具。」奇異電氣把一件又一件的新產品送來——彩色電視、冷藏酒櫃，還有令人驚訝的新發明電力垃圾處理機。由於用電量過高，雷根的住宅安裝了額外的電線，房屋旁邊設置一個重達三千磅的鋼櫃。雷根開玩笑說，家中的電線直通胡佛水庫發電廠。

早在雷根出任美國第四十任總統、推動全球自由和自由市場原則前，就是「全面電化住宅」的熱烈支持者，雷根夫婦在一系列電視廣告中，邀請觀眾進入他們的全面電化家庭，大力稱讚奇異電氣的各種產品，包括烤麵包機、真空吸塵器、薄餅烤模和手提電視機，他們還得意洋洋的把手提電視機提到院子或游泳池邊。

南茜說：「我的電力僕人什麼事都做。」雷根則在旁邊品嚐電咖啡機煮的咖啡。

笑容滿面的雷根說：「電力生活真美好。」

南茜陪同小女兒帕蒂參觀房子，認識家裡的電器後說：「電器用品使我們的生活大不相同。」對經歷過大蕭條時期城鄉生活匱乏的美國人來說，電化住家和電力僕人代表居家生活品質和舒適的真正革新。雷根露出慈祥的表情，輕輕搖頭總結說：「只有生活好一點，大家才能體會什麼叫做生活。」女兒帕蒂熱情的說：「那就是有電的生活！」

雷根住宅代表的是美國夢，也是未來的世界夢，代表全部電化或是逐漸電化的住家。美國電力耗用量急速成長反映電力確實使生活變好，不過怎麼發電才能滿足日增的用電量？

第二章

核子循環

利用這間俱樂部經理的小辦公室，對總統簡報世界所面臨的最可怕威脅，就地點而言，實在很奇怪。但是是艾森豪贏得一九五二年總統大選後，在喬治亞州進行高爾夫球之旅假期間，這個地方是奧古斯塔國家高爾夫俱樂部中，唯一可以用來進行簡報的地方。

那天早上艾森豪得知的事情非常嚴重，主題是核子戰爭的風險日漸增加。

七年前，兩顆原子彈在日本廣島和長崎上空引爆，突然結束了二次大戰。戰後短短的幾年裡，美國和盟友英國似乎壟斷了原子彈。但是蘇聯隨即在一九四九年，拋出令人震驚的震撼消息，蘇聯在諜報網的支持下，試爆第一顆原子彈的時間，遠比大家預期的早多了。

一九五二年十一月的那天早上，艾森豪一開始就問負責簡報的原子能委員會高級官員：在同一座廠房裡，同時生產民用核能發電燃料和武級燃料有什麼利弊。接著，負責簡報的官員回歸正題，從一個特大號的信封裡，抽出屬於最高機密的文件。文件的主题是新總統必須迫切獲知的訊息，就是核子武器的現狀、以及核子武器的毀滅性力量以可怕的速度增加的情勢。

其中一分文件指出，美國在一個星期多一點之前，試爆了「第一顆完整的熱核子裝置麥克」，

也就是威力比過去大很多、比原子彈大一百五十倍的氫彈。文件赤裸裸的指出，試爆「麥克」的太平洋小島現在「消失不見」，取而代之的是直徑將近一、六公里的水底圓形大洞。艾森豪立刻就了解其中的意義，他說，美國現在有了「足以摧毀一切的毀滅性力量」。他擔心大家認為這種武器「可以像其他武器一樣動用」的可怕誘惑力。

會議結束後，簡報官員做的第一件事情不是回到飛機上，而是燒掉這些秘密文件。

艾森豪擔任總統期間，核子衝突的危險深深印在他的腦海裡，二次大戰期間，他擔任歐洲盟軍最高統帥，知道美國核子武器的毀滅力量，已經超過二次大戰期間全部軍火的爆炸威力。俄國人當時也走在同樣的道路上。

難道沒有什麼方法，可以緩和武器競賽，把「原子」移用到比較和平的目的上嗎？一九五三年史達林去世時，這種機會可能出現過，但是蘇聯隨即在一九五三年八月，進行綽號叫做「老喬四號」的武器試爆，引發了新的緊張，因為試爆似乎顯示，蘇聯在發展氫彈方面，同樣有了長足的進步。美國政府對於如何放慢武器競賽速度的問題，有過極多的討論，包括提出一套代號為「麥片計畫」的建議案，艾森豪總統計畫就核子的危險性，對聯合國發表重要演說時，演講稿似乎經過無數次的改寫，艾森豪指示演講稿撰稿人，「我們不希望嚇死全國人民。」但是他決心採取主動，他在日記中寫道，「全世界正在向重大災難衝過去，大家必須採取行動，制止這種做法。」同時，原子能委員會在呈給總統的備忘錄中指出，創造「在經濟上具有競爭力的核能發電是我國的重要目標。」

一九五三年十二月，艾森豪對聯合國演說時，試圖描繪這一條不同的道路，表示這種做法可能成功、也可能失敗，但是大家必須試一試他所說的「原子能和平用途」；他摘要說明核子武器不斷增加的狀況，但是他也呼籲美蘇合作，放慢核武競賽的速度，決心為世人發展原子能的和平用途，這點主要表示利用核子的力量發電，他也許願「和平利用原子能發電不是未來的夢想。」

到了二十一世紀的今天，二次大戰後核能的發展方式，仍然影響核能目前和未來可能扮演的角色。這一切都要從設計開始談起，所有反應爐設計的焦點是反應爐的核心，放射性物質在反應爐核心中，進行受到控制的連鎖反應，釋出大量熱能。各種設計不同地方在於所採用的冷卻液，冷卻液在反應爐核心四周流動，防止核心過熱，同時又要熱到足以產生蒸汽、推動渦輪機，產生電力。加拿大的重水式反應爐利用重水，作為冷卻液——重水是普通水的另一種形態，但是自然界中難的一見；英國的設計採用氣體，而不是水，作為冷卻液。

美國開發出來的反應爐是最常見的設計，這種反應爐利用輕水——普通水的另一種說法——作為冷卻液，水在反應爐核心四周流動時，會加熱到能夠直接或間接產生蒸汽、推動渦輪機的熱度。目前世界上營運中的核子反應爐當中，大約有九〇%是輕水式反應爐，計畫建造的反應爐幾乎全都是輕水式。

不管採用哪一種冷卻液，通常都要談到核燃料的循環。以輕水式反應爐而言，這個循環從開採鈾礦開始，接著是把鈾送去濃縮，把鈾二三五同位素的濃度，提高到能夠維持受控制連鎖反應的水準。接著循環進到在反應爐中利用燃料棒，最後是以某種儲存或可能再利用的方式，處理使用過的燃料棒。

輕水式反應爐可以回溯到二次大戰後，美國海軍決心利用原子能作為潛水艇動力的計畫。

海軍能夠創造這番成就，要歸功於一位專心一致的工程師全心的努力，這位工程師是海軍上將李高佛，也是卡特總統口中所說「公認有史以來最偉大的工程師」。李高佛創造了幾乎前所未聞、積極服役六十年的事蹟，今天大家回憶他的時候，不但認為他是核子海軍之父，也是備受肯定的核電工業之父。

李高佛的功績

李高佛說過：「我一生中的一切都是某種巧合。」李高佛原名恰姆·李高佛，出生在沙皇統治波蘭時的猶太人聚落中的一座小村莊裡，村民後來大都遭到納粹殺害。李高佛六歲時，跟媽媽和妹妹一起移民美國，他父親是裁縫，已經先移民紐約，不知道他們已經來到美國，他媽媽的錢在船上遭人騙光，現在身無分文，和兒女一起遭到拘留。就在他們要遣返波蘭前，他父親意外得知他們困在移民局裡，最後和他們在艾利斯島上相見。李高佛一家定居芝加哥，家境極為窮困，因此才九歲的李高佛就做了人生的第一份工作，在機器工廠裡舉著一盞燈照明。念中學時，李高佛必須做夜班工作，在西聯電報公司裡，從下午三點工作到晚上十一點。一九一六年共和黨在芝加哥舉行黨員代表大會照的相片中，有一張顯示他穿著西聯公司的制服，像後來他穿著海軍制服一樣立正站著的樣子。後來他因為幸運之神眷顧，獲准進入安納波利斯的美国海軍官校就讀。

李高佛是猶太人，念海軍官校時，焦急、害怕失敗、又不是運動健將的他受到特別厲害的欺負，因此他時時刻刻都在努力讀書。就像他後來說的一樣，他當時「努力適應、努力活下去。」晚上圖書館關門後，李高佛甚至擠在沒有人使用的淋浴隔間裡，格外發奮讀書。李高佛可能不是

同班同學中最受歡迎的見習軍官，卻以優異成績畢業。然而，因為海軍裁軍條約的關係，包括李高佛在內的海軍官校畢業生，任職海軍的機會似乎不多，李高佛深感失望，就在英薩爾事業王國旗下主要企業芝加哥聯邦愛迪生公司裡，找到初級工程師的工作。但是隨後海軍出缺，李高佛先後上了兩艘潛水艇服役，其中一艘叫做四十八號潛艇，這艘潛艇極不完美、油煙滿布、十分危險，工程技術又令人厭惡，以至於在李高佛的腦海中，烙印下高水準的工藝水準至為重要的信念，影響他後來所做的每一件事情。

二次大戰期間，李高佛擔任造船局電氣部門主管，培養出追求卓越、極為注重精確的熱誠。他的最後考核報告中，說他是「能力傑出、善於組織的領袖，是美國最優秀的工程師之一」。這分報告中沒有提到他企圖心強烈、盛氣凌人、脾氣暴躁、難以相處、偶爾十分過敏、又自信之至的性格。這是他專心一致注重任務和極為苛求天性的另一面。這種個性結合在一起，會使某些人對他永遠忠誠，卻使其他人對他深惡痛絕，包括後來的大部分海軍高級軍官。他卻說：「我的職責不是在體制內工作，而是把事情做好，追求國家強大。」

李高佛晚年時，告訴新聞主播戴安·沙耶，「我具有花栗鼠的魅力，我從來不認為自己聰明，卻認為跟我打交道的人……很笨，包括你在內。」沙耶立刻答道，「被你叫笨，讓我非常高興。」

李高佛擁有特殊的才氣，很多人認為他是美國海軍中最高明的工程師。他曾經解釋說：「我相信我擁有獨一無二的特性，我可以在腦海中，看出機器運作的情況，我認為美國海軍裡，沒有哪個人像我這樣，擁有這麼多的工程經驗。」

核子海軍

二次大戰後，李高佛雖然招惹很多人的厭惡，卻在最後一刻，列入派往田納西州橡樹嶺秘密原子能研究城市的海軍軍官名單中。他們的任務是學習核能的秘密，了解核能用在和平的發電用途中，可能扮演什麼角色。

李高佛很快就看出核子海軍的戰略潛力，此後一直致力推動海軍核子化。他特別了解核子潛艇的航程和戰力，遠超過二次大戰期間的柴油潛艇。核能可以為困擾傳統潛艇的一個棘手問題，提供絕佳的解決之道，這個問題就是傳統電池受到限制，潛水艇在水下高速巡航的時間因此受到限制的問題。相形之下，一般認為，核子潛艇應該可以在水下全速巡航很多小時，很多天，甚至很多個月。

李高佛負起雙重任務，負責海軍和新設原子能委員會的核子動力計畫。這種兼職協助他克服艱巨的工程和官僚阻力，造出核子潛艇。據說他會寫信給自己，然後回信，確保海軍和原子能委員會的流程立刻可以結束。一九四九年，蘇聯進行第一次原子彈試爆，使美國的這個計畫迫切性更為增加。

製造原子彈是一回事，利用和控制核分裂連鎖反應發電，是大不相同的另一回事。包括科技、工程和知識在內，有太多的東西，必須從頭開始發明和發展。選擇壓水式輕水反應爐作為動力系統，是李高佛所做的決定。他也為「核能工業或除了他所主管機關以外的政府部門，制定了前所未聞的工程與技術紀律。」

為了達成目標，李高佛培養了一批技術高超、訓練優異的核子海軍軍官，還不斷的督促他們根據最高標準行動。如果這樣表示他要擔任監工和監察官，他的確是身兼這兩種身分。即使是小的疏忽，或稍微背離李高佛非常高的標準，都可能表示這樣的軍官會遭到「去核化」，意思是趕出核子海軍部隊。

李高佛甄選核子海軍成員時，為了讓來口試的人意外和考驗他們，會讓他們坐在兩隻前腿削短的椅子上，同時讓他們坐在陽光可以透過特別調整的活動百葉窗、直接照射接受口試人員眼睛的位置上。他解釋說，這樣「會在他們從椅子上往下滑的時候保持頭腦清醒。」

有一次，有一位年輕的潛艇軍官申請加入核子海軍，他驕傲的告訴李高佛，說他在海軍官校八百二十位同學的畢業班中，成績排名第五十九。李高佛尖銳的問他，是否盡了最大的力量。這位名叫詹姆斯·卡特的軍官嚇了一跳，猶豫片刻後，承認自己沒有盡到最大的力量。

「為什麼沒有？」李高佛問。

這個問題——為什麼沒有盡力？——幾十年後，變成卡特競選總統時競選自傳的書名。

李高佛孜孜不倦的製造核子潛艇、破除官僚阻力之際，讓很多上司十分惱火，以至於兩次錯過升為海軍上將的機會，要等到國會插手干預，才終於升為海軍上將。

李高佛的做法成果優異，核子潛艇科技的發展、工程和建造，全都在創紀錄的時間內完成。美國的第一艘核子潛艇鸚鵡螺號從一九五四年起開始服役。整個任務在七年內完成，而不是像別人所預測的二十五年。一九五八年，鸚鵡螺號在北極和極地冰帽下，潛航二千二百多公里，完成轟動一時、極為艱巨、又的確令人難以置信的任務，潛航期間，除了短暫困在龐大冰帽和淺海

底之間外，中途毫無停留。鸚鵡螺號返航後，艇長受邀到白宮，參加歡迎儀式，為製造鸚鵡螺號負最後責任的李高佛因為討人厭，遭到刻意排除，沒有參加典禮。

鸚鵡螺號艇長在另一次儀式中，送給李高佛一塊小心保存在潛艇冰箱裡的北極寒冰，李高佛終於露出下屬難得一見的笑容。到一九八六年李高佛終於退伍時，四〇%的美國主要作戰艦艇都是核子動力艦艇。

鸚鵡螺號是核能第一次運用在船舶動力上的例子。然而，一九五四年夏天，蘇聯廣播電台宣布「蘇聯科學」的另一個「第一」：世界第一個民用反應爐在莫斯科南方的科學城歐布寧斯克啟用，蘇聯新聞機構塔斯通訊社宣布，蘇聯「在原子能的發展上已經躍進，超越英美。」

但是歐布寧斯克反應爐很小，只能對當地集體農場、工廠和幾千位居民供電。這種反應爐也是蘇聯壓力管式石墨慢化沸水式反應爐，不幸的是，幾十年後，這種反應爐會變得聲名狼藉。

便宜到無法計算電費

鸚鵡螺號服役前，美國已經開始發展民用核能反應爐，民用反應爐的發展也由李高佛牢牢控制，是以海軍的設計為基礎，設計中具有潛水艇用反應爐的不少特性，但其中增加了中間的步驟。航空母艦用反應爐開始發展後，艾森豪政府認定這個計畫費用太高，斷定獲得核能的最快方法，是消除航空母艦核動力計畫中明顯的海軍特色，變成民用反應爐的基礎。

各界對原子能委員會宣布民用核能計畫的反應很熱烈，《時代雜誌》稱之為原子時代的「新階段」；《紐約時報》更進一步，宣布原子能電力時代已經來臨。這時各界表現出一片樂觀氣氛，原子能委員會主委路易斯·史特勞斯一九五四年話更是如此，他所說核電在十五年內，送出的電會「便宜到無法計算電費」的說法，變成了著名的預言。

美國的第一座核能電廠建在賓州裝運港，從一九五七年開始發電，只比鸚鵡螺號服役晚三年。英國凱德府核能電廠較早完工，一九五六年由英國女王主持落成啟用典禮，是世界第一座商用核電廠。但是凱德府核能電廠規模相當小，所用的設計現在已經過時。

相形之下，裝運港核電廠是「世界第一座規模完整的原子能發電廠」，設計和建造正是由李高佛負責，隨後的二十五年裡，他也負責這座電廠的營運監督。這座反應爐雖然是從航空母艦用反應爐的設計升級，但是為了發電，卻經過重新思考和重新設計，功能遠超過表面設計，營運期間幾乎沒有出過差錯，這點要歸功於李高佛一絲不苟的堅定信念和他召集的團隊。

商用核能發電真正的轉捩點在一九六三年出現，當時紐澤西州一家電力公司訂購一座商用核電廠，準備蓋在蠔溪，這座反應爐也是以李高佛監督、發展出來的設計為基礎。

核能大瘋潮

隨後幾年裡，電力公司競相跳進「核能大瘋潮」，訂購了大約五十座核電廠。這場熱潮再度變成愛迪生和西屋之爭，也就是奇異電氣和西屋公司用不同輕水式反應爐，爭奪市場占有率。西屋採用壓水式反應爐；奇異採用沸水式反應爐。有人預測，到二十一世紀第一個十年裡，原子能可能提供將近一半的美國所需電力。一位著名的科學家宣稱，「現在核子反應爐似乎是最便宜的能源」，可望「長期供應無所不在的便宜電力。」

結果核電一點也不便宜，成本上升，而且是飛躍上升，原因很多，又環環相扣。廠房和設計不夠標準化，很多電力公司沒有能力和經驗，進行規模遠比預期大很多、複雜性和管理困難程度也高很多的計畫。核電廠設備廠商輕易承諾，卻無法在期限內交貨，還有營運經驗不足的問題。

同時，「多安全才算安全」的問題變成急迫問題，核能風險和輻射曝露的風險有多高？聯邦和州發出執照和許可的時間，比預期長很多；日漸增強的環保運動、尤其是反核運動，經常造成評估、改變和主管機關的延誤。已經建好的水泥牆必須重建和加厚；管線必須挖出來重做，核能電廠興建期間，必須一而再、再而三的重新設計，表示成本會一再上升，遠超出原來的預算。

當時一般的通貨膨脹壓力和後來的高利率，也造成核電廠成本升高，電廠沒有在六年內興建完成，反而耗時十年，進一步拉抬了成本，原本認為二億美元可以興建完成的電廠，到最後要耗資二十億美元，有些核電廠的成本更是高多了。原子能委員會一位經濟學家有點低調的說：「成本的變化可以歸類為創傷經驗，而不是成功的經驗。」

「佛陀笑了」：核子擴散

另一個問題同樣急迫，就是有關核子擴散與核材料、核知識另作他用的問題。武器管制團體成員國把重心放在防止擴散上，增添了反核分子的聲勢。

很多年裡，各國深具信心，認為核子武器「俱樂部」成員國相當穩定，限制十分嚴格，只限於美國、蘇聯、英國、法國和中國五國。保證相互毀滅主義提供了美國和蘇聯之間嚇阻的穩定性。但是到了一九七四年五月，印度外交部長收到一通用密語電話：「佛陀笑了。」他知道這個

密碼的意思，印度剛剛在距離巴基斯坦邊界一百六十公里的拉加森沙漠，引爆了一具「和平用途核子設備」。五強壟斷核武器的狀況已經打破，核子進一步擴散的可能性非常大。

現在情況很清楚，「和平用途核電」和核武之間的關係密切。原子只有一個；發電的核電廠也可以從用過的燃料中，生產核武燃料鈾，印度就是這樣做。此外，濃縮設備可以用不斷濃縮的方法，把反應爐所用三到五%濃度的核電燃料，變成鈾二三五濃度八十或九〇%的武器及鈾燃料，用來生產原子彈。

美國和其他國家具有影響力的科學家 and 外交圈人士，開始質疑核電的推廣，質疑的原因不是基於安全，而是基於核武擴散的風險。二次大戰期間，以「吉斯坦」聞名的哈佛大學化學教授喬治·吉斯迪亞科斯基，是秘密的洛沙摩斯實驗所原子彈的主要設計者之一，後來他出任艾森豪總統的國家科學顧問。但是到了一九七七年，他的想法改變，說出，「在世界變得更好之前，我們必須抑制核電的大力發展，目前核電實在是太危險了。」

三哩島事件

不管擁護和反對核電人士之間的差異多大，有一件事情他們絕對同意：反應爐核心必須「經常供應大量的冷卻劑，消除核分裂所產生的熱」，否則就可能出問題。

這噩夢般的情境突然間似乎即將變成事實。一九七九年三月二十八日凌晨，賓州哈利斯堡附近薩斯奎漢納河的三哩島核電廠二號機出了大問題。這次連鎖反應事故從清晨四時開始，保持反應爐核心冷卻的多具供水幫浦關閉，控制人員起初把這些問題當成「正常的異常」處理，接著一

連串的進一步故障和操作錯誤接二連三的出現，有一陣子，儀器誤導操作人員，認為冷卻系統裡有太多水，而不是太少水。操作人員關掉緊急冷卻系統，也關掉負責讓水流動的幫浦，消除了機具把反應爐核心中的熱移除的能力，這一切引發一系列的事件，造成反應爐核心部分熔毀，迫使核電廠完全關閉，導致少量放射性蒸汽外洩，引發了大規模輻射外洩和完全溶毀的恐懼。

這次事件立刻引發恐慌。《時代雜誌》以大標題《核子噩夢》報導，《紐約郵報》的標題是《核子外洩失控》。成千上萬的人逃離家園，主管機關命令廣大地區的居民關緊窗戶、關掉空調，以防吸入遭到污染的空氣，將近一百萬人收到準備立刻撤離的通知。

事故發生幾天後，出身核子工程師的卡特總統坐著直升機，來到三哩島，從一部校車中觀察損毀的反應爐，然後和妻子羅斯琳視察核電廠控制室，鞋子上套著黃色塑膠套，卡特總統承諾「會親自負責告知美國人民」有關這次事故的詳情。當時正好有一部和核子熔毀有關的電影《大特寫》上映，進一步刺激了大家的恐懼，這部電影和其中的訊息轟動全美，助長了美國人的恐慌。

後遺症

三哩島核災吸引了全世界的注意，也導致安全管理的全面檢討，包括遠比過去更重視人性因素和預防操作錯誤。有誰比李高佛更了解什麼地方出了錯誤、需要怎麼改進？卡特請求老長官幫忙他進行調查。

李高佛寫了一封很長的私函給總統，「根據我自己的經驗，正確看待這個問題」，他在信中針對災變，提出歷久彌新的深入看法：

涉及人造設備的災變事故調查經常顯示：

- 一、事故的起因是一系列相當微小的設備故障和隨後的操作錯誤。
- 二、及時認知，立刻改正……可以預防事故惡化。
- 三、過去發生過類似的設備故障和操作錯誤，卻沒有引發變故，原因在於開始的狀況或事件的次序略為不同。如果注意過去的事故，立刻採取行動，矯正錯誤，後續的災變應該可以避免。
- 四、為了降低類似或更惡劣的災變再度爆發，必須建立和實施適當的技術標準，增加操作人員的訓練。

這種形態普遍表現在水庫崩垮、飛機失事、船舶沉沒、爆炸和工業火災等事故。

李高佛指出，調查顯示，三哩島核災「一如預期，顯示相同的形態。」李高佛接著指出很多問題，包括操作訓練、紀律不足到標準化不足等諸多弊端。「例如，三哩島一號機控制室和二號機控制室的設計大不相同，根本沒有道理，何況兩座反應爐都是由同一家廠商設計。」

李高佛警告卡特總統，不要依賴政府主管機關和核能工業之間的「警察抓強盜症候群」，主管機關人力絕對不夠，不能把事情做好。李高佛主張電力公司合作設立中央機構，提供「比較協調一致的专业技術知識與控制，推動商用核電計畫，而不是像現在一樣各自為政」——這是他提倡了多年的立場。

不久之後，核電業為了推動這種構想，設立了核電營運協會，變成核電業極為嚴格的監督

單位，各家電力公司彼此嚴格考核。所有公司都知道美國核電業處在生死存亡之秋，彼此命運一致，核電業不能再發生另一次核災，必須依據李高佛的標準營運。

三哩島事故為美國核電熱潮緊急煞車，最後有一百多座新核能反應爐的訂單取消，最後一座開始營運的核電反應爐是一九七六年訂購的。

隨後若干年裡，美國電力公司進入痛苦時期，若干電力公司破產，若干電力公司瀕臨破產，完工達九成的核電廠停工。長島的肖雷罕核電廠實際上已經完工，並且已經進行低水準的試運轉，但是在地方的反對下，這座造價六十億美元的核電廠只生產了少量電力，就永遠關閉，最後，以一美元的價格，賣給長島電力管理局。

然而，最後美國還是有百多座核電反應爐運轉、發電，只是成本遠超過原來的預期，建廠時間也遠比原定計畫久。這些核電廠成為美國電力供應的基礎負載，卻都遠低於全能運轉的水準。改善營運變成核電業的首要任務，要達成目標，必須依靠最明顯的人才庫，就是李高佛訓練的核子海軍人才，這些退休海軍軍官的任務是根據李高佛的標準，改善現有核電廠的運作狀況。

然而，核電業發展和壯大的速度仍然十分驚人，核電廠的設計和興建計畫到一九六〇年代初才開始，但是在短短二十多年裡，美國大約二〇%的電力需求是靠核電供應，而且就算在核電業突然緊急煞車後，仍然如此。

法國的轉型

其他國家的核電發展也陷入困境，早在三哩島核災前，歐洲就掀起普遍反對核電的聲浪。奧

地利在距離維也納三十二公里的茲文騰多，蓋好一座核能發電廠，卻根本沒有啟用，就一直閒置到現在。很多國家裡的政治僵局和猶豫不決，也延緩了野心勃勃的核電計畫。

法國是少數堅決推動核能發電的國家。一九七三年石油禁運後不久，負責能源的高級官員布蘭卡建議法國總統龐畢杜下定決心，擺脫對石油的依賴，在發電方面，更應該如此，法國的電力供應不能依靠可能遭到切斷的石油。布蘭卡對龐畢杜表示：「今後的情勢會大不相同，會變成轉型，而不是危機。」布蘭卡認為，法國要「依賴」中東的決策，「這種事情並不合理，我們必須追求分散能源的政策。」龐畢杜十分樂於接受布蘭卡的主張，龐畢杜雖然患了癌症，重病在身，而且因為治療的緣故，身體浮腫，仍然召集高級顧問，確認核電是讓法國電力擺脫石油、恢復法國能源自主地位的方法，核電、不是石油，應該逐漸成為法國能源供應的基礎，另外以恢復用煤、重新強調能源效率作為輔助。

然而，讓法國政府驚訝的是，核能計畫立刻引發全國的堅定反對。四百位科學家連署一項聲明，要求政府在解決所有安全問題前，暫停新建核能發電廠。

雖然全國掀起大規模的示威抗議，法國中央集權式的政治體系在法國政府高層著名的工程文化支持下，堅決推動核電發展，連社會黨的密特朗在一九八一年的大選中，當選總統，也沒有改變法國政府堅決推動核能發電的決心。工會和參加密特朗聯合政府的共產黨都支持這項政策，認為核能可以增加就業，促進能源安全。整個法國電力工業由國營法國電力公司經營，也大有幫助。法國能源管理委員會主席菲力·戴拉杜塞說：「大家信任法國電力公司，認為該公司是法國之光。」隨後的幾十年裡，法國興建了幾十座核能反應爐，法國堅決推動核電產生了驚人的成

續，變成全球核能供應產業的先鋒。

車諾比爾核災

蘇聯是另一個繼續推動核能發電的歐洲國家，一九六三至六四年間，蘇聯啟用第一座標準規格的民用反應爐，到一九八〇年代中期，蘇聯營運中的反應爐一共有二十五座。

蘇聯的民用反應爐形式當中，有一種極為類似西屋公司的壓水式反應爐，因此號稱「東屋」式反應爐。另一種設計是壓力管式石墨慢化沸水反應爐，這種反應爐的原型是設在科學城歐布寧斯克的第一座小型反應爐，而且是以生產武器級核燃料反應爐為基礎，經過修改，作為民用核能反應爐，若干蘇聯科學家曾經警告過這種反應爐不安全，堅決反對以這種反應爐作為民用核能發電反應爐。但是政治權威否決了科學家的意見，這種反應爐興建起來便宜多了，也變成了蘇聯核電業的基礎。

俄國人在蘇聯旗下烏克蘭共和國北部，距離首都基輔一百零四公里的小村莊普里皮亞村，興建了四座這種壓力管式石墨慢化沸水反應爐，但是這座核電廠比較為人所知的名字是車諾比爾核電廠，在烏克蘭文中，車諾比爾的意思是指這個地區常見的「黑色長柄草」。

一九八六年四月二十六日清晨，操作人員進行一項設計不佳的實驗，諷刺的是，實驗目標是要強化這座核電廠的安全。操作人員犯了一系列的錯誤，導致核電廠失控，最初的兩次爆炸炸毀了反應爐的頂部，引發火災，這些反應爐不像西方的標準反應爐，沒有設置圍阻體，防範這種災變。輻射雲釋出後，隨風飄到廣大的歐洲大陸，核電廠出了大問題的第一步跡象，是瑞典的偵測

器測出輻射性升高，消息迅速傳開，也傳回蘇聯。基輔火車站擠滿人潮，都是希望擠上過度擁擠的火車、逃離這個地區的人。整個蘇聯瀰漫恐懼和恐慌，因為沒有任何消息或資訊，謠言愈來愈盛動。

隨後的兩個多星期裡，蘇聯領導階層和媒體始終否認發生任何嚴重變故，表示一切都是西方新聞界編造出來的。蘇聯一位高級能源官員在莫斯科和西方人士會晤時，用拳頭拍著桌子，堅持核能災變的說法完全是西方報紙編造出來的故事。

接著到了一九八六年五月十四日，蘇聯領袖戈巴契夫做了蘇聯領袖從來沒有做過的事情，上電視用冷靜、嚴肅的語氣，試圖減輕西方媒體針對這項災變所做的聳動報導，談到這件事現在已經明朗化的災變時，稱之為「核能不受控制的不幸力量。」

這是歷史性的轉捩點，過去在蘇聯社會裡，根據教條，這種災變絕對不可能發生，因此戈巴契夫的宣布動搖了大家對共產制度的信心，也動搖了協助凝聚共產主義的神話。

例外

車諾比爾核災對西歐能源部門造成重大打擊，助長、強化了反核電的聲浪。義大利保證不再新建核能發電廠，最後要把核電產能關閉。瑞典和德國決定暫停發展核電，而且定出逐步廢棄核電產能的目標。英國的原子能委員會準備未來讓核電廠除役。車諾比爾核災對歐洲的影響，好比三哩島對美國的影響，打斷了新核電廠的發展。

歐洲國家當中，只有法國繼續推展能源計畫。戴拉杜塞說：「雖然碰到很多重大事故，法

國從來沒有重新考慮利用核能的決心，從一次大戰結束以來，能源獨立就一直法國的立國之道。「極多決策官員出身科技工程背景，更是強化了這種決心。」

核電在穩固政治基礎的支持下，變成法國電力供應中不可或缺的基本負載，五十八座核子反應爐供應法國電力所需的將近八〇%，法國也是世界最大的電力出口國，賣給鄰邦的電力是法國第四大出口項目。

日本也繼續興建核能發電廠，車諾比爾核災後，共有十多座核電廠啟用。但是日本和核電有關的文化遺澤比較複雜，日本是唯一受過核子攻擊的國家，核電政治可能在選民和政客心中，引發強烈的情緒反應。但是一九七〇年代的石油震撼造成嚴重創傷，隱然有破壞戰後經濟奇蹟的可能，以至於政治上支持核子計畫的意願一直都很強勁。

曾經擔任高級能源官員的內藤正久說：「日本和英美不同，別無選擇，幾乎所有化石燃料供應都依賴進口。」因此，日本認為核能是「負擔得起、穩定可靠的電力來源，對日本的能源安全至為重要。」日本沒有放棄核電計畫，而是強化安全規定，繼續推展核電，「消除」大部分的反對聲浪。到二〇一一年初，日本擁有五十四座營運中的核子反應爐，供應的電力占日本總供電量的三〇%，官方的目標是要在二〇三〇年前，把核電供電比率提高到五〇%。日本的決心似乎永遠不會改變、不會動搖。

但是日本和法國是重大的例外。

未來的燃料是什麼？

美國停止核能發展後，留下了一個大問題：如果不採用鈾，將來要用什麼燃料發電？美國因應一九七〇年代石油危機之餘，已經把石油趕出電力工業，天然氣是明顯的答案，唯一的例外是國會在一九七八年，基於一九七〇年代天然氣價格劇烈上漲、又認為天然氣供應不足，曾經禁止新發電廠採用天然氣作為發電燃料。當時的看法是天然氣太寶貴，不能當成發電廠燃料，應該省下來，用在比較重要的家庭取暖用途上；核電又根本不是一「便宜到無法計費」的電力，實際上還陷在暫停發展的困境中。

這一來只剩下唯一的選擇，就是煤炭，煤炭再度變成大部分新發電廠能的主要燃料。煤炭在國內生產、蘊藏豐富、供應安全、可靠，但是這種情形能夠維持多久？新產能的成本應該會引發電力業基本管理辦法變化的折衝，同時再度引發有關燃料的決策辯論，受到最大影響的地方應該是加州。

談判破裂

民主黨的蓋瑞·戴維斯在一九九八年的加州州長選舉中，以多得將近一百五十萬票的壓倒性優勢，擊敗共和黨對手，創下加州州長選舉史上勝負最懸殊的紀錄。因為加州十分重要，這次勝選自然引發戴維斯將來可能出任總統的話題。戴維斯是加州首府沙加緬度的職業政治家，一九七〇年代曾經擔任布朗州長的幕僚長，然後辛苦的在政治階梯上努力爬升，事實上，戴維斯和加州政治的關係密切之至，以至於他當選州長後，一位助理開玩笑說，戴維斯從擔任幕僚長以來，花了「二十三年的時間，才走完通往州長辦公室的五公尺距離。」

戴維斯擔任州長一百天後，受歡迎程度就超越相同時間架構內的老上司兼老州長布朗，甚至超越加州最著名的老州長雷根。戴維斯擔任州長有一個主旨：就是不採用激進政策，這樣做的確有道理，加州經濟陷入嚴重衰退後，正在急速成長。

同時，加州的電力需求也急速成長，雖然很少人了解其中的含義，所產生的衝擊卻很快的就震撼加州、也會震撼美國和世界其他國家，同時造成電力基本現實變得十分戲劇化。

一九九〇年代以前，管制性協商是美國電力業務行之已久的基礎，實施時間超過半個世紀。

電價不是由市場決定，而是由各州的公用事業委員會，依據當初由英薩爾提倡的模式訂定，做法是容許電力公司把供電成本，轉嫁在用戶費率上，也就是把一切的成本，包括電廠、燃料和營運成本，加上核定的利潤。然後由公用事業委員會決定用什麼方式，把成本分配在住宅、商業與工業等不同類別用戶繳交的電價上。

電力公司身為這種協商的另一方，必須以合理的成本，供應可靠而普及的服務，也必須確保不間斷的照明。如果暴風雨吹斷電力纜線，或暴風雪破壞供電系統，造成停電，查線員必須在修護車可以開動時，立刻出門維修，電力公司也必須以最快的速度恢復供電。這種情況完全是以自然獨占的觀念為基礎，競爭的確不是協商中的一環。

電費震撼

但是變化即將出現。多年來，美國的電價一直急劇下降，一九三四到一九七〇年間，電價下降八六%，十分驚人，代表規模、科技和大量會降低成本的影響。但是到了一九七〇和一九八〇年代，電價突然開始回升：不論是核能電廠還是燃煤火力發電廠，新電廠的建廠成本都很高，有時候還非常高；一九七八年的公用事業管理政策法也推升了成本，這項法律強迫電力公司，以偏高的「避免」成本，向風力與小型水力發電廠構成的小型再生能源發電廠購買電力。

避免成本的觀念很有趣，是計算同量電力由燃煤或天然氣發電廠生產時，成本應該是多少的估計數字，不是實際的價格，而是未來一段期間內的預期價格。當時的避免成本經常根據極高的油價訂定，但是到了一九八〇年代，油氣價格下跌，代表依法訂定的避免成本電價遠高於實際成

本。這一切表示美國很多地方的用戶遭到「費率震撼」打擊，也就是新核能電廠、燃煤火力發電廠和依法售電發電機組的成本，轉嫁在用戶每月的電費單上，形成電費費率急劇提高的打擊。

住宅用戶即使對電費單據不滿，卻幾乎無可奈何，只能更小心的用電。但是費率震撼打擊工業用電大戶的成本，他們的競爭力因此不如電費較低各州的企業，他們必須採取行動，壓低必須繳交的電價，他們的對策是提倡叫做「解除管制」或「調整結構」的對策，設法向其他電力公司，購買比較便宜的電力，而不是向本地電力公司，購買比較昂貴的電力。這種做法產生了歷史性變化，促使電力費率變成由市場決定，而不是由公用事業委員會決定，換句話說，競爭出現在到當時為止大家認定的自然獨占狀態中。然而，爭取電力解除管制並非易事，畢竟連競爭性市場都不是完全自由化，而是極為依賴電力業者依據的經營法規決定。

發電燃料出現變化，使解除管制變得更為迫切。因為新的核能電廠開始服役，核電占發電總量的比率上升，升到占全國總供電量的二〇%。但是發電用煤的成長最大，一九七〇年代中期發生天然氣供應不足的問題後，發電用煤的消耗量幾乎倍增，發電量占到全美發電總量的五五%上下。煤炭的重大優勢是供應豐富、又是國產燃料。

但是現在天然氣的供應也變得十分豐富，天然氣也是國產燃料，非常適於用在解除管制後的電力事業中。天然氣解除管制後，出現長期供應過剩泡沫，價格因此變得十分便宜。經濟條件既然已經改變，再禁止使用天然氣發電，顯然已經不合理，禁令因此遭到撤銷。同時，新一代的高效能複循環氣渦輪機開始上市，這種機器是以專門為噴射機設計的引擎為基礎，結合利用「廢熱」運轉的氣渦輪機，採用這種氣渦輪機的發電廠興建起來，成本遠比燃煤和核能發電廠低，又

可以在比較短的時間內建成，而且和煤炭相比，天然氣是比較乾淨的燃料。

因此，和一九七〇年代興建的核能發電廠相比，燃氣火力新發電廠的電力比較便宜，也比一九八〇年代燃煤火力發電廠便宜，但是現有的管制體系讓用戶不能輕易獲得成本較低的電力，至少當時還不能如此。

市場傾向

當時世界各國有關政府與市場所扮演角色的思維，出現決定性的變化，大家對市場愈來愈有信心，引發了追求解除管制與民營化運動。一九七〇年代美國解除金融服務業管制後，證券經紀商可以隨心所欲，對客戶提供較低的費率。參議員愛德華·甘迺迪、參院幕僚（後來的最高法院法官）史蒂芬·布瑞爾和管制經濟學家艾佛瑞·卡恩，合力推動航空業解除管制，因此，聯邦政府不再管制從機票成本、到飛機上所供應三明治大小之類的一切事情。前面指出，石油和天然氣價格管制也在一九八〇年代廢止。同樣的變化在其他國家表現的更明顯：西歐的國營企業紛紛民營化；蘇聯和東歐的共產主義崩潰；中印兩國對世界經濟開放。

但是美國所走的路線起源於英國。英國首相奈契爾夫人推動的民營化市場革命中，規模最大的是中央發電局的革命。英國在二次大戰後，把電力工業收歸國營，目的是為了結束浪費的支離破碎狀態，推動電力工業現代化，讓每個國民幾乎都可以享受電力。中央發電局達成了所有目標，中央發電局是工程導向的機構，宗旨是「不計成本維持照明」，壞處是這樣做累積了龐大的虧損，還經常和工會發生激烈爭執。

英國發電業從一九九〇年開始民營化。首相余契爾夫人說：「我一再堅持不管我們創造的結構是什麼，都必須提供真正的競爭。」英國政府把中央發電局的發電部門拆散，成立三家公司。三家公司互相競爭，也和新設的獨立發電公司在躉售電力市場中競爭。至於電力零售市場，英國政府把負責輸配電力到國內特定地區的「地區發電局」，變成獨立企業，然後逐漸在這些企業當中，引進競爭機制。

英國的方法變成在電力事業中引進市場競爭的全球模範，美國也是學習這種強而有力、令人信服的模式，聯邦能源管制委員會委員前往英國考察，對原本龐大的國營獨占事業能夠變成競爭性事業、價格隨著供需因素不斷變化的情況，大感嘆服。聯邦能源管制委員會決定儘快開放美國電力事業，引進競爭。當時的聯邦能源管制委員會主席伊莉莎白·摩勒說：「英國對初期改革成功的熱誠，的確鼓舞我們推動改革，我們從美國天然氣改革和英國的做法中努力學習。」美國電力業的其他成員也到英國考察，得到類似的結論，這種情形似乎是電力業的新未來。

商用發電業者進場

美國聯邦和州的政策現在開始走向解除管制，最大的變化是讓新競爭者加入發電事業，對電力公司和終端用戶銷售電力。因為電力是一種無法差異化的商品，新進業者必須靠價格競爭，背後的重要思維是透過競爭壓低成本，而且新進業者在這種過程中，決心駁斥英薩爾所說競爭是「不健全的經濟管制機制」的名言。

一九九二年聯邦能源政策法明白規定：新進業者可以向受到聯邦法律管制的跨州輸配電線售電，新法為這些新進業者取名「發電商」，因為新進業者沒有自己的電線和輸配電系統，必須向擁有電線與輸配電系統的業者售電。發電商可能是獨立公司，也可能是美國某地公用事業旗下的子公司，不管他們的身分如何，都是興建了新電廠或向電力業者購買現成電廠的業者，都對以秒計算的電力市場售電。聯邦能源管制委員會為了實施一九九二年能源政策法的競爭精神，鼓勵業者「輸送電力」，讓美國某地的地方公用事業，接觸另一個地方價格較便宜的發電商，並且透過涵蓋全美的電線，輸送比較便宜的電力。

發電商和傳統公用事業都知道，新發電廠採用便宜的天然氣作為燃料，可以提高競爭力，這點引發了全美「搶用天然氣」的狂潮，從一九九八到二〇〇四年，短短六年裡，美國新增的發電產能極為驚人，增加幅度等於一八八二年愛迪生設立王子街發電廠以來所有裝置產能的四分之一！新增的產能中，超過九〇%以天然氣為燃料。當時大家沒有看出這股狂潮的玄機，搶用天然氣狂潮，其實也代表大家豪賭將來天然氣價格會繼續維持低檔，這股狂潮造成過度建設，產生了遠超過必要水準的發電產能。

但是到了一九九〇年代末期，廉價天然氣消失，價格開始再度劇烈上漲，結果豪賭天然氣維持低價的做法代價高昂，很多這樣豪賭的獨立發電商陷入困境，其中有一些發電商破產，沒有一個地方的天然氣豪賭像加州這麼嚴重，產生這麼悲慘的結果。

加州的詭異改革

二〇〇〇年，加州爆發缺電危機，全州陷入一團亂局，引發重大經濟與政治風暴，也震撼全

美國的電力系統。加州發生的輪流停電和遭遇的經濟傷害，原本應該發生在苦苦掙扎的開發中國家，而不是發生在迪士尼樂園的故鄉，不是發生在具體代表科技與創新的矽谷誕生地。畢竟如果把加州當成獨立國家計算，加州是世界第七大的經濟體。

加州爆發的變故清楚說明了管制制度設計錯誤的危險，也是顯示短期政治可能壓倒健全政策需要的個案研究。

根據廣為流傳的說法，這場危機是外州乖戾、狡猾電力交易商加工和炒作的結果，最糟糕的交易商是休士頓天然氣與能源業者恩龍公司。大家指責恩龍和其他公司交易員採用一大堆複雜的策略，製造和利用這場危機。有些交易員的確公然利用、甚至非法利用加州的電力系統，使加州電力系統的缺點更為突出，但是這種說法忽略了這場危機的根本原因，因為這時加州的系統已經遭到嚴重破壞。

加州的危機起源於三個基本因素：第一個原因是加州採用的部分解除管制做法行不通，加州的新制度明確拒絕採用正常的電力市場穩定機制，卻納入不穩定因素，無助於避免危機、或至少減輕危機。第二個原因是供需出現劇烈而不利的反轉。第三個原因是希望得到電力增加的好處，卻不願意負擔成本的政治文化。

加州原本不應該陷入這種困境。一九九四年，加州推動大家通常稱之為改革的解除管制，當時加州經濟情勢不佳，失業率達到○%，不動產市場陷入衰退，移出加州的人比移入的人多，支持加州經濟的主要產業國防工業支出，因為冷戰結束而大減，加州政府累積了龐大的赤字，電價居高不下是加州經濟衰退的原因之一，也是製造業公司紛紛離開加州，同時帶走就業機會的原因

之一；同時，大家不太擔心電力需求增加的問題，畢竟一九九三年的需求毫無成長。

一般認為，競爭應該會壓低電價，協助振興加州經濟。加州式的解除管制是在納入利害關係人民主的情況下，透過複雜的談判和重大妥協，擬定出來的政策，但是利害關係人對電力市場運作的了解卻大不相同。重大妥協在政治上運作十分完美，一九九四年，解除管制法案在沒有半張反對票的情況下，在州議會中順利通過，經過共和黨籍州長彼得·威爾遜簽署後，成為法律。

根據加州的改革方案，擁護消費者權利的團體可以得到比較低的價格；大型工業用戶也可以得到比較廉價的電力。但是在解除管制的市場中，傳統電力公司必須承擔依據公用事業管制政策法所訂電力供應合約的遺留成本，也必須承擔興建其他新電廠的超高成本——例如設在加州中部海岸的魔鬼谷核能電廠因為陷在管制困境中，最後建廠成本高達一百一十五億美元上下，這種成本使傳統電力業者無法競爭。解除管制法送給投資人擁有的電力公司所需要的救濟，用各種方法，讓這些業者擺脫所謂「套牢成本」的負擔，這些新進發電商也贊成改革，因為其中有兩大好處，一是能夠對龐大的加州市場售電；二是有機會購買州政府強烈「鼓勵」電力公司出售的發電廠。後來出任加州電網公司董事長的梅森·威爾力奇說：「每一個主要團體都得到他們最想要的東西，但是沒有人釐清其中的關係。」

這種改革獲得極為熱烈的政治支持，全體加州州議員簽署了一封信，敦促聯邦能源管制委員會會不要利用聯邦權限，干預這個計畫；各種政治勢力在這種計畫上達成極為完美的平衡，任何變動都可能造成這種宏偉的改革結構崩潰。

改革的目標是破除傳統電力的自然獨占。經濟學家保羅·喬斯科說，新制度是「世界上最復

雜的躉售市場制度，大家對這種制度都沒有實際經驗。」新制把解除管制和管制綁在一起，有人把這種制度比喻為用共識設計的橋樑，這種橋樑後來崩潰，會讓大家學到難得一見的教訓。

鐵幕

躉售市場解除管制，同時發電商對擁有輸配電網路電力公司售電的市場也解除管制，表示在這兩種市場中，價格會配合供需，自由浮動。但是傳統零售市場，也就是電力公司和住宅用戶、工廠、辦公室和其他用戶之間的市場，沒有解除管制，表示這些用戶受到保護，不受漲價影響，畢竟他們才是可以投票選舉州長和州議員的選民。

結果是在躉售和零售市場之間，建立一道最後會造成毀滅性影響的經濟鐵幕。躉售市場會配合供需的變化，出現變化，但是這種變化不會成為價格訊號，流入零售市場，讓用戶感受到。因此消費者沒有誘因，得不到警告，不能像正常狀況一樣，配合價格上漲，進行調整（購買效能比較高的冷氣機、加強牆壁的隔熱效果），用戶得不到這種訊息，是因為訊息沒有傳播給他們。

加州為了讓躉售體系像競爭性市場一樣運作，下令本州電力公司放棄大量設在州內的發電廠，賣給其他發電商，讓發電商在公開市場出售這些電廠所發的電。英薩爾發明的垂直整合電力公司傳統模式，也就是一家電力公司涵蓋發電、輸配電的方式就此破滅，很多新發電商都是外州企業，都是在解除管制期間設立的。

解除管制的其他關鍵要素使問題更嚴重。第一個問題是解除管制方案沒有考慮容量問題。電力和其他商品不同，石油可以存在儲槽中；穀物可以存在穀倉中；天然氣可以儲存在地下洞穴裡，但是電力是瞬間存在的商品，一秒前還在，一秒後就消失了，電力業經營的是幾乎沒有庫存的事業。

因此，電力業需要「備載容量」，備載容量是穩定機制，是高於預期尖峰負載的額外發電產能，隨時可以投入發電，以便避免缺電。維持備載產能是電力業經營的基本規則，整個電力系統不但必須大到足以滿足平均需求，也要大到足以滿足極端需求，加上額外的負載產能，因應事故或設備故障。像加州這樣依賴水力發電滿足部分電力需求的州，大約需要二〇%的備載容量，也就是二〇%的額外發電產能，以便因應熱浪或乾旱造成水力發電減少引發的需求激增。然而，加州的新制度中不包括任何誘因或獎勵措施，確保電力業擁有便於解除管制運作的足夠備載容量。缺電危機的若干時間裡，加州的備載容量低到只有一%，低的嚇人，實際上等於毫無備載容量。

有一點是加州為了制訂解除管制法律而妥協的地方，就是禁止加州電力公司和發電商簽訂長期供電合約，這一點的確是重大缺陷。電力公司掌握很多供電合約，有些合約有效期只有幾個月，有些合約有效期可能有好幾年，這樣做是電力業的標準做法，實際上也是很好的做法。這種合約組合有助於提供緩衝力量，對抗發電容量緊俏時造成的市場價格大幅暴漲。但是因為加州的模式認為價格會永遠維持低落狀態，不准電力公司簽訂合約價格偶爾會高於現貨價格的長期合約，沒有考慮到如果現貨價格暴漲時，長期合約會為用戶提供一層保障。

加州三大電力公司之一的南加州愛迪生公司母公司執行長約翰·布萊森說：「我們必須賣掉可靠電力系統心臟的旗下電廠，卻又不能簽署長期合約，電力公司有服務用戶的義務，但是現在我們不能從現貨市場以外的其他地方，獲得電力。」

加州的改革切斷了躉售與零售市場之間的關係，又禁止對抗價格上漲的緩衝機制存在，表示加州在無意之間，把極為大量的風險，納入美國人口最多的加州供電新制度中。一九九七年，的確有一分報告發出警告，指出這種系統「可能因為供應短缺和過剩的關係，導致長期低價和長期非常高價的情形交互出現，價格波動無助於加州順利轉型為競爭機制。」但是沒有什麼人注意這種警告。

只要供需平衡沒有重大變化、價格低落，也就是只要加州陷在經濟衰退中，這種制度就會順利運作，但是市場的變化何其快速。

加州式的解除管制從一九九八年起正式啟動，這時加州經濟已經開始復甦，不動產市場再度發燒，網際網路開始起飛，大大刺激了灣區經濟。這一切都反映在電力消耗和供需平衡的急劇變化上。加州經濟在這六年期間成長了二九%；電力消耗增加了二四%，新發電裝置容量卻沒有大幅增加，事實上，一九九七年後，因為效能不佳的老舊電廠除役，加州的發電裝置容量其實是不增反減。

加州可說是美國各州中，最難設立新電廠的地方，建廠流程曠日持久、成本高昂，環境評估過程毫無限制，當地社區的反對通常都可以得到最後勝利。因此加州為了取得所需要的額外電力供應，必須仰賴美國西部其他各州和加拿大卑詩省，把這些地方變成某種龐大的能源農莊，餵飽加州本身不斷成長的經濟。只要外州電力供應豐富、價格低廉，一切就會平安無事，但是亞歷桑納等州也快速成長，消耗的自產電力愈來愈多。一九九九年是美國西北部和卑詩省水力發電的豐收年度：冬天氣候溫和、夏天氣候涼爽，雨量很多，這一切都表示廉價的水力發電供應豐沛。

大家都瘋了

二〇〇〇年卻大不相同，美國西北部和加拿大發生旱災，水力發電的供應減少。同時，加州的電力需求激增，原因包括炎熱的夏季和經濟成長。加州必須加強天然氣發電，天然氣供應卻出現緊俏現象，價格開始上漲，表示用天然氣發電提供的電力價格也開始急劇上漲。

二〇〇〇年炎熱的夏季裡，加州電網管理機構的員工瘋狂搶購額外電力。一位經理說：「我們的電話根本打不完，市場變成了土耳其式的市集，大家瘋了。」這時加州開始經歷電力實質短缺的初步震撼。布萊森說：「電力公司必須以每小時為基準，尋找電力供應，誰也不知道下一小時電價會喊到多高。」

很多企業訂有「可斷電」合約，換取較低的費率，表示如果電力供應不足，電力公司可以切斷這些用戶的供電。洛杉磯東部的一家鋼鐵廠過去十五年內，只停電一次，到了二〇〇〇年，卻停電十八次，每次停電都是在十五分鐘前通知，用戶只有這麼短的時間可以關閉所有作業。這家公司的總裁宣稱，「我們不能這樣經營事業。」電力傳輸基礎設施的限制、尤其是北加州和南加州之間傳輸的限制，使情況更為惡化，整個系統顯然已經完全損壞，但是州政府仍然沒有反應。

隨著時間過去，危機惡化，電力公司花在躉售市場上購買電力的時間，是花在對零售用戶售電所花時間的五倍，這種情況顯然無法長久維持，電力公司卻無可奈何。州政府當然不准他們漲價，南加州愛迪生電力公司七次向加州公用事業委員會申請，要求委員會准許該公司簽訂長期供電合約，以便獲得保障，七次都遭到拒絕。

海盜與搶劫：加州茫然若失

二〇〇一年開始時，加州陷入全面電力危機，現在每一個人都很清楚，電力市場已經完全破壞。危機展開之際，考察團遠從比利時和北京前來加州，希望了解什麼地方出了問題。問題的確很多，電力公司蒙受數百億美元的虧損，州長戴維斯宣布：加州陷入「能源噩夢」中，這是「外州奸商」把加州當成「人質」，大肆進行「價格詐欺」的結果。他認真的呼籲加州人民不用電腦時，讓電腦處在「休眠模式」中，以便節省電力。他也威脅要把發電商收歸州有，自行興建發電廠，還宣稱發電商「害加州淪落到停電邊緣。」

不止是電力供應不足，政治領導與政治意志也供應不足，無法凝聚加州人民，適應大家所說剛剛開始實施的「極為複雜又沒有經過考驗的制度」。有一個答案很明顯，就是准許價格信號發揮作用，至少准許家庭用電費率稍微上漲。戴維斯自己很了解這種現實，有一段時間裡，他表示，「相信我，如果我希望提高電價，我可以在二十分鐘內解決這個問題。」但是他很堅持，不願意這樣做。

結果他把責任歸咎於每一個人，歸咎於從電力公司到聯邦政府的所有機構。但是他最不滿總公司設在外州、尤其是設在德州的企業，這些企業買了很多發電廠，同時進行電力交易。他說，這些公司是大肆「搶劫」的海盜發電商。

這種環境不利於協調合作和解決問題，危機因此惡化，電力平均現貨價格漲到一年前的十倍，州主管機關開始實施電力分配，也就是開始輪流停電。同時，隨著躉售電力價格上漲，加州

電力公司的財務更形惡化。因為解除管制後的躉售市場和接受管制的零售市場之間存在鐵幕，電力公司購買躉售電力時，必須付出每千度高達六百美元的價格，但是對零售用戶售電時，因為費率受到管制，每千度只能賣六十美元。一位分析師說：「電力公司售電愈多，虧損愈大。」

加州亂成一團，經濟也遭到傷害。二〇〇一年四月，供電北加州的加州最大電力業者太平洋瓦斯電力公司經營階層，聽到州長戴維斯威脅要沒收電力公司的話後，認定自己別無選擇，只能聲請破產保護。聖地牙哥瓦斯電力公司岌岌可危，瀕臨破產邊緣。加州主要電力公司之一的經營階層，匆匆完成一分和都市崩潰有關的分析報告，為停電真正失控時可能出現的痛苦、社會崩潰和可能的暴行預做準備。這家公司預測可能出現暴動、搶掠、大肆破壞，州民人身安全可能遭到威脅。

但戴維斯仍然堅決拒絕做一件應該會立刻改善這種情勢的事情——讓零售價格上漲，卻領導州政府，插手有效期最多長達二十年的長期合約談判，而且在談判中，顯示州政府極為缺乏商業頭腦，居然在市場到頂時，投入四百億美元，購買將來很可能只值二百億美元的電力。這一來，加州就把電力公司的財務危機，轉移到州政府身上，把預測會有八十億美元預算剩餘的加州，變成負債幾百億美元的州。

精心設計的危機

很多人跟著戴維斯，指責電力市場和發電商是危機的元兇禍首，指責業者利用各種交易和喊價策略，從危機中占便宜，而且故意讓發電廠停機，以便推升電價。但是聯邦能源管制委員會進

行檢討後，得到的結論是「沒有發現任何證據，顯示」發電商藉著安排大修或切斷供電，意圖影響價格，反而似乎採取一切必要措施，儘快恢復電廠發電。此外，該委員會發現，公營的市級電力公司在洛杉磯水電局的領導下，反而用最高價售電。

危機後進行的調查顯示，在發電商和電力公司之間擔任仲介的能源交易員相當貪婪，恩龍公司的營業員尤其如此，他們用「肥哥」、「跳彈」和「死亡之星」之類意思鮮明的名字，當成他們所採用交易策略的代號。電話記錄顯示他們在危機期間推動這種交易策略時的激動談話；記錄也顯示，至少有若干交易員刻意操縱電力流入或流出加州，以便推升電價。後來有三位交易員認罪，承認串通犯下電信詐欺罪。這時恩龍公司早已倒閉，倒閉原因很多：包括負債將近四百億美元，無力償還；利用會計詐欺與做假帳，隱瞞真正財務狀況，依賴高股價避免公司淪落；偏愛過度投資卻不善於管理；以及個人自肥。二〇〇一年十二月，恩龍公司聲請破產保護，締造美國史上金額最高的破產案記錄。

這場危機對交易員有什麼影響？研究這個問題的專家、史丹佛大學的詹姆斯·史文尼斷定，「其中動用的市場力量多少並不清楚，這個問題會引起激烈辯論。」但是他補充說，如果加州准許零售價格上漲，也准許電力公司簽訂長期合約，在非常緊俏的市場中，操縱市場力量的能力會大為降低。交易員顯然試圖利用加州的政治與管制崩潰狀態，從中獲利賺錢，但是同樣清楚的是，交易員不是這場危機的根本原因，危機的原因是加州在供需變化的情況下，設計的電力市場改革方案大有問題。

事實上，加州發生的問題正是所謂的「精心設計的危機。」

到二〇〇一年夏天，危機開始減輕，州主管官署終於向經濟現實屈服，容許零售電價略為上漲，結果預期的情況出現：消費者減少用電量；此外，和前一年相比，氣候也變得比較溫和，同時新發電產能開始加入供電系統。

但是一直到二〇〇三年十一月，戴維斯州長都沒有正式宣布危機結束，這時他自己的政治生涯也已經結束，加州選民在一場特別選舉中，把他趕下台，使他變成美國史上第二位這樣下台的州長，接替他出任州長的是阿諾·史瓦辛格。

這位電影上的魔鬼終結者當選州長，他的就任典禮轟動全球，共有六百五十位新聞記者參加，史瓦辛格繼承了二百五十億美元的赤字，其中大部分都是電力災害造成的直接和間接後果。他宣誓就職後表示：「加州已經陷入危機，加州的信用評等是美國各州中最差的一州。」但是他回想起自己身為舉重冠軍的日子，堅決宣稱：「我們總是比自己所知道的還強壯。」

戴維斯針對這場危機提出自己的看法：「我在能源危機期間行動緩慢。」他離職時，難過的說出一句老生常談：「時機不利時當政真倒楣。」

後續發展

加州危機爆發將近十年後，聯邦能源管制委員會主席提出自己的看法：「加州危機不是市場的挫敗，是管制的挫敗。」

然而，受到加州電力危機的影響，美國其他地方都重重踩下煞車，停止推動解除管制，造成美國出現「無意間形成的混合制度」。看看美國地圖，就會發現各州形成不同的區塊，美國大

約有一半電力公司受到傳統的管制，另一半接受不同程度的市場競爭，後面這種電力公司在自己的供電區內，只擁有少量或完全沒有自有發電產能，而是經營輸配電業務，因此必須向發電商購電。今天這種混合式制度的特性表現在若干電力公司擁有若干發電廠，若干電力公司在接受管制的市場中經營，另外一些公司則在競爭性市場中經營。接受零售電力市場競爭的州集中在美國東北部、中西部和德州，美國東南部大致是接受傳統管制的市場。

過去十年來，躉售電力市場的競爭急速擴大，雖然加州的制度以失敗收場，其他市場卻證明設計良好的電力市場，實際運作十分順利。PJM互聯電網公司的供電範圍就是這種市場的實例，PJM互聯電網的供電範圍涵蓋從賓州、華盛頓、一直到芝加哥、以及美國十五個州的全部或部分地區，是世界最大的競爭性電力市場，為五千一百萬人服務。PJM的歷史源遠流長，可以回溯到一九二七年賓州和紐澤西州設立聯合供電機構、強化地區性供電穩定的時代。今天PJM在自己的供電區內，經營高壓輸配電系統，同時經營競爭性的躉售電力市場，以及時的方式，聚集買賣雙方造市。

加州繼續維持躉售電力市場的競爭，容許簽訂長期合約。二〇〇九年，獨立系統調度公司經過多年研究後，推出新的市場設計，納入PJM公司和其他系統的經驗，也納入加州舊制度的痛苦教訓；公司董事長威爾力奇把這種教訓，稱為一九九〇年代加州舊制度「問題多多市場」的教訓。新設計意在更適當反映電力的真正成本，包括輸配電網輸電壅塞成本，新設計中要具有適當的市場監督機制，因此可以提供競爭的好處，卻不會設計和製造危機。

今天和電力有關的主要問題不再是市場設計問題，不再是管制和解除管制之爭的問題，而是

燃料選擇的問題。不管美國不同地區採用的制度有什麼不同，美國和很多其他國家一樣，在未來供電方面，都要面對相同的問題，就是興建哪一種發電廠的問題。燃料選擇之爭不但和滿足今天的需要有關，也和如何滿足預期的需求成長、符合新環境目標有關。煤炭、核能和天然氣都是美國和世界各國電力規劃中的一環，然而，每一種燃料都有其限制。

第四章

燃料的選擇

成長可以道盡二十一世紀的電力展望。從一九八〇年以來，世界和美國的用电量增加了一倍，預期到二〇三〇年前，全球用电量會再度倍增。因為全球用电量的計算基礎遠比過去大多了，這次倍增的絕對值會極為龐大。這種規模的成長不但驚人，成本也很高昂，根據目前的估計，興建新的發電裝置容量，滿足這種成長，大約要耗資十四兆美元，而且這個數字還在上升。但是要支持將來產值高達一百三十兆美元的世界經濟，的確需要這麼大規模的擴建。

這麼龐大的數字產生了非常重大的問題和激烈的爭執。要興建哪一種發電廠？要用什麼方法興建？問題的關鍵是燃料的選擇，燃料選擇涉及能源安全、實際安全、經濟安全、環境、碳排放、氣候變遷、價值觀與公共政策的複雜爭論，還涉及基本的可靠性要求，也就是不但要維持照明，還要保證數位時代的一切都維持開機狀態。電力至為重要，以至於燃料選擇和滿足未來電力需求的問題，變成全球經濟最根本的問題之一。

開發中國家所得和都市化程度提高，提升了電力的需求。二〇〇六到二〇一〇年間，中國的電力系統實際上增加了一倍，未來幾年內，可能再度倍增。二〇一〇到二〇三〇年間，印度的電

力消耗量可望增加五倍。開發中國家的挑戰是提高可靠性、確保電力供應配合經濟成長，避免限制經濟成長的缺電。另一個挑戰是供電給十六億完全無電可用、只能利用煤油、尋找柴火或收集糞便的人。另外還有幾十億人每天只獲得部分供電，又經常困於缺電和停電，日常生活和經濟成長也連帶受害。

工業國家用電日增，主因是電腦、伺服器和高科技電子產品的角色擴大。這種過程極為普遍，以至大家視之為理所當然。舉一個簡單的例子，三十年前要寫書，要在手動打字機上打字，用複寫紙備分；研究表示要到圖書館去，在書架之間尋找，現在大家用電腦寫書，用電子印表機印出很多分文稿，在網際網路上進行大部分研究，而且最後產品的閱讀愈來愈像看書一樣，用電子方式閱讀。

預期美國的用电量每年會成長大約一·四%，和今天若干開發中國家的成長率相比，似乎微不足道，和一九五〇年代雷根在廣告中宣揚「全面電化家庭」時將近〇%的成長率相比，似乎也是這樣。但是以這種水準成長二十年，就表示需求成長率絕對值大約等於三三%，等於必須新建約一百五十座核能反應爐，或是新建將近三百座標準規格的燃煤火力發電廠，每一座新電廠都表示必須針對燃料做出抉擇，也表示這樣做時會爆發一場爭論。

發電

電力不但在利用方式上很有彈性，在生產方式上也很有彈性。電力和石油、天然氣或煤炭不同，不是初級能源，而是靠著轉換其他資源而得的能源，電力的生產方式非常多元化，可以靠著

煤炭、石油、天然氣和鈾發電，也可以靠著水的落下或流動、風的吹襲和陽光的普照發電，甚至可以利用垃圾和舊輪胎發電。

電力是典型的長期事業，今天新建的電廠可能要運轉六十到七十年。電力也是需要投入巨額資金的事業，事實上，電力是美國最資本密集的主要產業，美國所有的資本投資中，整整有三分之一投入發電廠、輸配電線、變電所、電線桿和電線構成的電力基礎設施中。一座新的燃煤火力發電廠造價可能高達三十億美元，前提是能夠克服環保人士的反對，解決和碳排放管制有關的不確定性，開始興建。新核能電廠的造價可能是兩倍，高達六十億或七十億美元以上。假設核電廠能夠順利通過核可過程，取得執照，也要花十到二十年的時間，選定廠址和興建，運轉壽命最後可能會延到下一個世紀。

但是法規、政治形勢和期望不斷變化，產生了經濟學家勞倫斯·馬科維奇所說的「困境」。電力業仍然受制於公共政策潮流的變化，也受制於市場和輿論的劇烈起伏，導致電力業的方向出現重大而突然的變化，大家對氣候變遷愈來愈關心，對新建電廠也愈來愈反感，不止是新建燃煤火力發電廠或核能電廠的規劃，會招來環保人士的反對，風力發電機和新傳輸電線也可能招來地方民眾的惡感。

在這種情況下，電力業要怎麼滿足需要，拉近公眾期望和實際上可以興建哪種電廠之間的落差？風力和太陽能仍然必須證明本身能夠形成系統性的規模（這兩個問題稍後會再深入討論。）效能和智慧電網可以減少或拉平成長曲線。

目前的燃料組合適於作為討論的起點，以美國為例，一度占發電燃料將近五五%的煤炭，已經降到大約四五%。天然氣是第二重要的燃料，目前所占比率為二三%，而且這個比率還在上升；核能占二〇%，水力占七%，風力占將近二%；太陽能所占比率還沒有記錄。過去幾十年內，石油所占比率已經從超過十五%，降到只剩一%。難怪大家經常說，除非大家普遍採用能夠利用電網充電的電動車，否則增加再生能源或核能，對石油的用量不會有什麼影響。

其他已開發地區對煤炭的依賴沒有這麼重。以歐洲來說，核能、煤炭和天然氣所占的比率不分軒輊，都是二五%，水力占十五%，風力和石油幾乎並駕齊驅，分別占四%和三%。以日本而言，煤炭占二八%，核能也占二八%，其次是天然氣占二六%，石油占八%，水力占八%，風力微不足道。到目前為止，太陽能在這三個地區的統計中，似乎都還不具意義。

世界人口最多的中印兩國，煤炭消耗量分別排名第一和第三，美國排名第二，中國大約八〇%的電力靠煤炭生產，印度的這個比率為六九%，水力發電占中國發電總量的十六%，占印度發電總量的十三%。

燃料組合的選擇由地區、地理限制和天然條件決定，因此，巴西超過八〇%的電力靠水力發電。燃料的選擇也受科技、經濟、供應狀況影響，還受政策、政治和輿論構成的所謂三P因素影響。

總之，從全球性的角度來看，煤炭、核能和天然氣這三大燃料至少在未來二十年內，一定還是主要的發電燃料，然而，展望更久遠的未來時，可以看出再生能源的成長，也可以看出燃料組合會比較不明確，引發的爭論也會多多了。

煤炭與碳

今天世界電力總供應量中，有四〇%來自燃煤發電。煤炭蘊藏豐富，美國擁有超過二五%的世界已知蘊藏，從煤炭蘊藏的角度來說，美國的地位媲美沙烏地阿拉伯在石油蘊藏方面的地位。在高溫高壓下運作的新一代超超臨界發電廠已經加入發電行列，和一代以前興建的發電廠相比，這種發電廠對環境有利多了，而且因為這種發電廠效能較高，生產同量電力排放的二氧化碳，可能比幾十年前興建的發電廠少四〇%。今天大部分的情境規劃都以全球煤炭用量成長為基礎。

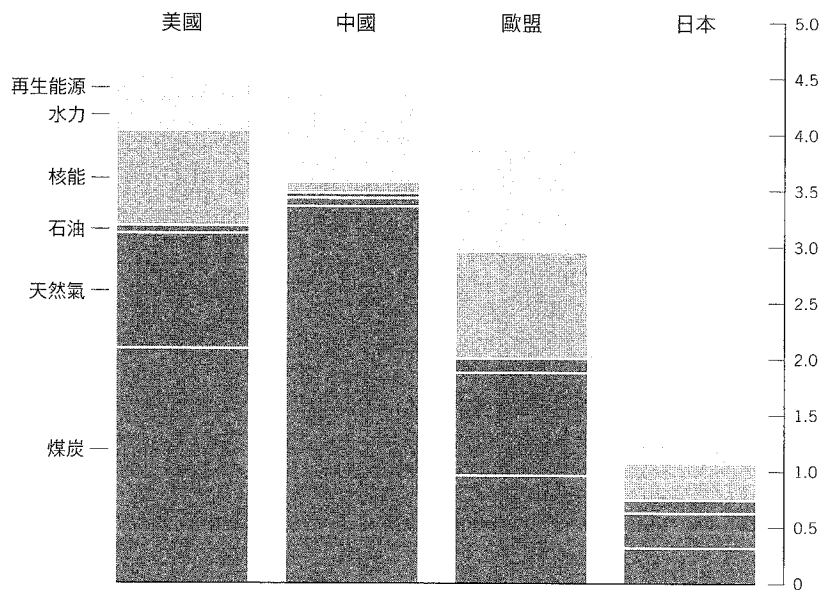
一九七五至一九九〇年間，美國靠燃煤發電生產的電力增加一倍，這段期間裡，政府政策限制替代能源，煤炭變成可靠的發電燃料。政策也把煤炭當成安全的能源，和不受政治動亂影響的能源一起推廣。對很多國家來說，現在情形仍然如此，但是在碳排放已經變成重大問題的歐美兩地並非如此。因為煤炭和天然氣的化學結構關係，也因為複循環氣渦輪機的效能較佳，每生產一單位的電力，煤炭產生的二氧化碳比天然氣多出兩倍以上。

二〇一一年內，美國在建的燃煤火力發電廠大約有二十五座，但是因為全球暖化的關係，煤炭在政治和監督管制方面，遭到的反對聲浪升高，到了很難新建傳統燃煤電廠的程度。在建燃煤電廠的許可遭到挑戰，很多新燃煤電廠計畫不是取消，就是延誤，即使已經進入發展後期，仍然如此。若干環保團體把反對興建新燃煤電廠當成最優先任務。

同時，二氧化碳以外排放和用水影響健康的疑慮，導致主管機關訂定新法規，新法規會大幅提高既成燃煤電廠的營運成本。預期遵循這種新環保法規的代價高昂，可能促使很多美國燃煤電

圖 4-1 燃料組合

2009年不同燃料的發電量（單位：百億度）



資料來源：IHS CERA

廠加速退休，但是速度如何，可能引發很多爭辯。這些新環保規定為新電廠計畫申請核准過程，設下難以克服的重重難關。

碳回收

因此，煤炭和碳之間的衝突要用什麼方法化解？這種挑戰引起大部分電力業者的嚴重關注。二十年來，電力業和發電設備供應業在管制法規與市場機制的督促下，在消除污染方面，創造可觀的成就。新燃煤電廠已經消除大約九九·九%的微粒排放、九九%的二氧化硫排放、九五%的氮氧化合物排放，但是談到燃燒煤炭釋出二氧化碳的碳排放數量時，卻是截然不同、極為麻煩的問題。

今天最主要的解決之道是碳回收封存，也就是把碳回收之後隔離起來。要把什麼東西「封存」起來，意思是把東西和其他物品隔離開來，或是另外放置；碳回收封存的觀念就是把碳回收後，埋在地下，使碳不排入大氣層。麻省理工學院的《煤炭未來》研究報告指出，「碳回收封存是減少二氧化碳排放，同時促進煤炭用量高於今天水準的未來關鍵科技選項。」

有幾種方法可以在煤炭燃燒前或燃燒後，回收二氧化碳。唯一可能用在現有燃煤電廠的方法，是在煤炭燃燒後回收二氧化碳。其他方法應該會極為昂貴、極為複雜，以至於乾脆把現有的電廠拆掉、另建新廠，應該還會比較便宜。

不論用什麼方法分離二氧化碳，都要把回收的二氧化碳壓縮，變成「超臨界狀態」，這樣二氧化碳會變成像液體一樣，可以利用管線運輸，送到可以安全埋在穩固的地下地質構造位址中，

這樣二氧化碳會封固在裡面，然後再把啟封的鑰匙去掉——應該是永遠去掉。

這種科技原則上可行，畢竟現在已經有很多種處理廠負責回收多種氣體；業者已經利用管路運輸二氧化碳，再打進舊油田和天然氣田中，協助提升產量。但是考慮一切問題後，可以看出兩者類似之處很有限，目的不同、地質狀況不同、需要的監測方法不同，而且規模小多了。

名義中的碳回收封存體系成本高昂、十分複雜，不論是涉及的科技、還是有關的聯邦與州政治狀況和複雜的監管程序，都是如此。

碳老大

這裡談到的規模應該會非常、非常龐大，實際上就像創造一個平行的宇宙、創造一個逆向運作的新能源工業。做法不是從地下把資源開採出來、運送出去、再加以改變，然後用來燃燒，而是在用過的二氧化碳資源散入大氣層前回收，再加入改變和運輸，最後放回地下，這種做法使整個過程變成真正的來回旅程。

事實上，這種新的碳回收封存產業的規模，應該類似現有的各種能源產業。如果今天美國燃煤電廠產生的二氧化碳中，只有六〇%回收、壓縮成液體、運輸、再注入儲存場，這樣每天處理的液體數量大約應該等於美國每天消耗的石油數量，也就是一千九百萬桶。想到現有石油體系的建立耗時一百五十年、耗資很多兆美元，就會知道碳老大的問題艱難之至。

二氧化碳是自然環境中正常的一環，但是二氧化碳濃度很高時卻有毒性。科學界的共識是二氧化碳可以儲存，幾乎沒有或完全沒有外洩的風險。麻省理工學院的報告指出，「用地質方法封

存碳可能是安全、有效的方法，和很多其他方法比較起來，也具有經濟上的競爭力。」但是這份報告補充說：「要大規模的成功運用這種科技，需要很多年的發展和證明。」二氧化碳外洩會有什麼後果？誰應該負起補救的法律責任？誰應該負起法律責任？事實上，真正擁有二氧化碳的是什麼人？誰負責管理和監督？用什麼方法監督？住在儲存場址上方的人會有什麼反應？誰負責制訂所需要的法律和法規？最重要的是，光是公眾的接受、不是徹底贊成，是否就足以作為基礎，建立和經營龐大的碳回收封存體系？

當然還有成本的問題，以目前實驗性計畫為基礎的估計顯示，碳回收排放可能使燃煤電力價格提高八十到一〇〇%。要這麼大幅度的提高電價，可行之道是利用回收交易制度或稅負，為碳定出高昂的價格。這種碳價應該會推升沒有碳回收設備傳統燃煤電廠的成本，使擁有碳回收設備燃煤電廠所發的電力，可以和傳統燃煤電廠所發的電力競爭。

然而，可以「即裝即用」的大規模碳管理系統還是空中樓閣，有一些把碳回收封存和現有電廠整合在一起的先導計畫正在進行。麻省理工學院教授約翰·德意志說：「進行腳步還是不夠快。」碳回收封存要開始商業化，要花費幾十億元的研究經費，要經過很多項大規模的展示計畫，和至少十五年的時間。這種做法是工程上的挑戰，需要耐用、大規模的處理工程……必須從大規模的化工廠中極力壓縮成本、改善功能。

如果碳回收封存仍然是未來的商業構想，在構想實現前的這段期間裡，大家會新建燃煤電廠嗎？這種電廠或許可以用「準備回收」的方式設計，但是現在還不清楚哪種科技和系統應該列入準備名單中。然而，碳回收封存最後可能變成電力業解決碳問題方案中的一環。

同時，和乾淨煤炭有關的創新要求會非常強烈。或許大家會另外發展出一些科技，為碳問題提供不同的解決之道，而且這種解決之道可能會比較便宜、比較不複雜。大家或許會找出方法，把燒煤產生的廢棄物變成具有價值和用處的東西；換句話說，就是把二氧化碳從問題變成有價值的商品，其中的確有這方面的誘因。

回歸核能

在大家的碳意識高漲的世界上，核能不但具有燃料多元化和自給自足的傳統重大優勢，也是唯一大規模、技術完善、目前普遍採用、便於取得、卻不會排碳的唯一的發電資源。

核能電力像一九八〇年代一樣，大約繼續占美國總發電量的二〇%。但是怎麼可能會這樣？從一九八〇年以來，美國的電力消耗量幾乎增加了一倍，但是過去三十多年來，美國沒有啟用任何新的核能發電廠，而且今天美國運轉中的核能發電廠數目和一九八〇年代中期相同，核能發電怎麼可能在大多了的發電總量中，維持原有的二〇%比率？

核電原來的市場占有率能夠維持，靠的是運轉急劇改善。一九八〇年代中期時，以年為基礎計算，運轉問題造成核電廠停機頻繁，以至於核電廠的運轉比率低落，大約只占額定總發電產能的五五%。今天，因為大家擁有幾十年經驗，也因為大家十分注重績效的關係——包括招募李高佛核子海軍中的老手幫忙，目前美國核電廠的運轉比率超過九〇%。營運效能的改善影響非常重要，幾乎可以視為電力的一種新來源，就像實際上沒有興建新的核能電廠，核能電廠的數目卻增加一倍一樣。

新壽命

除了營運與經濟記錄大幅改善外，美國核電業還獲得另一種非常重要的鼓勵，如果沒有這種鼓勵，核電業應該已經開始走下坡。核電廠必須取得許可才能營運，這種過程涉及很多年的申請、評估和挑戰（根據估計，今天申請新核電廠許可的成本高達五億美元。）營運許可由核子管制委員會（其前身為原子能委員會）發給，許可有效期四十年。核子管制委員會說，訂出這樣的期限，是「基於經濟和反托辣斯考慮，不是基於技術限制。」四十年期限結束時會有什麼變化，對核能發電多少都是重要的轉捩點，應該會決定核能發電在美國是否還有前途。

一九九五年，出身貝爾實驗室物理學家雪麗·傑克遜出任核子管制委員會主任委員，核電廠效期變成她施政的優先事項。很多核電廠四十年效期結束的問題迫在眼前，隨之而來的是一大堆核電廠必須關廠、除役的景象，除非核子管制委員會延長這些核電廠營運許可二十年，核子管制委員會會來得及這樣做嗎？

傑克遜後來說：「有些核電廠的組件已經耗損，需要換掉，如果核電廠營運許可有效期即將結束，再投資的誘因會減少，這樣實際上可能導致核電廠提早關閉。簡單的說，我們可能喪失大量電力。」

核電業的運轉記錄顯然大幅改善。事實上，很多公司基於效能提高，到核子管制委員會申請許可，以便把發電量提高到高於最高發電量。核子管制委員會基於支持延長許可的原因，推出一項重要的新計畫，利用新工具和技術能力，更新規範核電業的安全系統。

到目前為止，美國一百零四座商用反應爐中，約有一半已獲得核子管制委員會核准，可以延長運轉期限。如果核電廠沒有獲得延長運轉期限，美國應該已經進入關閉核電廠的程序中。然而從未來成長的角度來看，即使核電廠的運轉年限延長，仍要面對力保市占率二〇%的問題。答案之一是把現有電廠的發電容量，提升到高於核定產能，但是美國也必須興建新核能電廠。

我們必須重新開始

二〇一〇年二月，歐巴馬政府宣布，對南方公司及其母公司提供貸款保證，協助該公司興建美國幾十年來的頭兩座新核能電廠。歐巴馬政府根據〈二〇〇五年能源政策法〉，這項法律對二〇二〇年前投產的最初六百萬瓩核能發電裝置容量，不但提供聯邦貸款保證，也提供稅務優惠。

這兩座機組要蓋在喬治亞州佛格特現有核電廠區內。白宮能源「沙皇」保證：「我們要重新啟動美國的核能工業。」最初的六個核電計畫也有資格獲得幾億美元的聯邦資金，彌補核電業者因為「管制過程問題」或訴訟所蒙受的損失。能源政策法中訂出這條新法條，目的是要抵消管制過程和訴訟問題拖延幾十年，巨幅推升核電廠成本的問題。事實上，美國政府已經向核電廠業者提出保證，確保業者不會受到政府其他部門行動的干擾，不會因此造成毫無節制、代價高昂的延誤。

這套政策為美國的核電前途提供了新動力。業者大約提出興建三十座新反應爐的計畫，其中二十座已經擬定廠址和反應爐形態，都會蓋在現有的核電廠內，和目前正在運轉的反應爐並列。後來其中很多計畫無疾而終，停擺的原因是管制和成本環境仍然十分艱難，不易應付。

新設計的一個重要目標是納入更多被動安全功能，另一個目標是推動反應爐設計標準化。現

任核子管制委員會主席葛萊哥里·賈克索說：「現有核子反應爐錯過的最大商機，是沒有在有限的設計中，達到標準化的目標。從管制或運轉觀點來說，這種做法沒有效率。」

可能的解決之道是設計新型的中小型反應爐，這種反應爐因為規格的關係，原則上應該便於選定廠址，而且這種反應爐設計簡化，利用模組單位構成，應該可以降低成本，縮短建廠時間。事實上，這種設計的目的不是要靠著傳統反應爐的規格，達成經濟規模，而是要靠著以模組化的方式，生產比較大量的中小型反應爐，達成規模經濟。同時，中小型反應爐應該可以降低財務風險，降低隨著大型反應爐開發和興建而來的問題。但是中小型反應爐的技術可能還要經過好幾年才能成熟，才能證明本身的經濟存活能力。

地底深處儲存場

如何處理燃料循環結束時的核廢料，是存在多年的問題。美國早在一九八七年，就提議要在內華達州尤佳山地底深處設立儲存場，但是經過幾十億美元的支出和二十年的研究後，這座儲存場的開發仍然陷於停頓狀態。二〇一〇年，歐巴馬政府正式決定取消尤佳山儲存場計畫。法國是把用過的核能燃料再處理，從核廢料中回收可以再利用的鈾和鈾，再把用剩的高放射性廢料製成玻璃，儲存起來，以便日後處理。

很多年來，核廢料似乎是幾乎無解的問題，至少在美國政治上是這樣。但是從比較的觀點來看，核廢料問題就會不同。必須儲存的核廢料數量只占碳廢料總量的一小部分，又不像碳廢料一樣，需要用龐大的碳儲存計畫管理、注入地下。整個民用核能計畫產生的所有核廢料堆積成

九·一公尺（十碼）高，所需要的儲存場地還比一座足球場小。相形之下，一座燃煤電廠釋出的二氧化碳經過壓縮後，大約需要六百個足球場大小的地方儲存——而且這還只是一年排放的二氧化碳而已。

此外，和建立「深處地質儲藏場」標準有關的思維已經改變，這種儲藏場是儲藏一萬年沒有風險的地下儲藏場，說的明白一點，這種標準表示住在這種儲藏場附近的人，在未來一萬年內，每年吸收的輻射不超過十五毫侖目，等於三趟洲際來回飛行所接受的輻射量。但是一萬年很長，比人類文明興起還早幾千年。

這個問題沒有別的解決方法嗎？實際上，核廢料頭一次產生時，是儲藏在現場水池中好幾年，等待冷卻，現在大家得到共識，認為比較好的方法是把核廢料裝在水泥箱子裡，儲藏在受到控制的特殊儲藏場，儲藏時間以一百年為一期，這樣應該會有時間，讓大家找到比較長期的解決之道，或是找到安全的方法，再度利用這些燃料。

但是核廢料和另一個比較麻煩的問題息息相關。

核子擴散

二〇〇三年十月，一艘名叫BBC中國號的貨輪在波斯灣的杜拜港裝貨後，穿越荷姆茲海峽，駛入蘇伊士運河，再進入地中海，前往目的地利比亞首都的黎波里。這趟航程看來一路平安無事，但是這艘船遭到嚴密監控，貨輪駛入蘇伊士運河後，船長突然收到改變航向的命令，把船開往義大利南部的一個港口，在那裡接受檢查，結果發現這艘船秘密載運了製造核子彈的設備。

這次封鎖行動加快了這一年較早時開始的一種程序，促使利比亞在二〇〇三年底，開始和美國與英國關係正常化，同時促使利比亞重新融入全球經濟（到二〇一一年利比亞爆發內戰為止。）利比亞在這樣做的過程中，宣布放棄追求大量毀滅武器，也就是放棄核子武器，同時交出已經收到的設備和製造原子彈的詳細計畫，利比亞也賠償在蘇格蘭洛克比上空汎美客機爆炸案罹難者的家屬。

手寫的注釋十分清楚的說明這些核子知識從何而來。卡恩經營的網路曾經承諾，要提供利比亞一套完整的核武系統，換取一億美元的酬勞。卡恩以巴基斯坦原子彈之父聞名，巴基斯坦人也視他為國家英雄，他在荷蘭一家公司服務時，偷竊了離心機的設計，回到巴基斯坦後，他負責監督巴基斯坦從全球灰色市場中，取得核子武器生產設備和額外的知識，促使巴基斯坦在一九九八年試爆第一具原子武器，變成核武國家。但是隨著時間過去，卡恩也變成世界聞名的連續核子擴散分子，他組織的網路會把核武能力賣給任何買家，他的國際網路在協助伊朗和北韓追求核武方面，扮演重要的角色，他和他的網路在伊斯蘭馬巴德舉行的研討會中，會非常公開的宣揚自己的能力，甚至會在國際軍事專業展中，設立推展攤位。

BBC 中國號貨輪遭到攔截後，巴基斯坦政府相當難堪，設法和卡恩保持距離。卡恩遭到逮捕，被迫上電視不太有誠意的道歉：「事後知道我致力為我國提供安穩之至國家安全的終身成就，可能因為我基於善意、卻也基於判斷錯誤而從事的行為，遭到嚴重危害，讓我覺得難過。」他遭到軟禁，幾年後獲得赦免。

卡恩可怕的陰影變成困擾全球核子經濟的東西，因為他不但鮮活的證明核子武器製造能力的秘密全球市場存在，也顯示核能發展可能變成發展核子武器的機制和方便的幌子。

談到核子擴散，民用核能可以在兩個重要的地方，過渡到核子武器。第一個地方是濃縮過程，離心機可以把鈾濃縮到鈾二三五同位素占九〇%的濃度，以便製造原子彈；伊朗目前似乎就是走這條路。另一個有風險的地方是用過的核燃料再處理過程，再處理會大幅減少必須儲藏起來的高階核廢料數量，也會把鈾從用過的燃料中分離出來，然後重新當成反應爐燃料使用。然而，鈾也是武器級的材料，可以像一九七〇年代的印度一樣，改用來製造核子設備，或是遭到希望自製原子彈的人偷竊。

贊成再處理的人提出絕佳的理由，說再處理可以加強利用一定數量的鈾，因而展延核能燃料的供應時間。反對的理由是，再處理會擴大核子擴散與恐怖主義的風險。這種風險為避免再處理，卻把用過的燃料放在臨時儲藏所裡，爭取時間，等待下一世紀發展出更好的科技解決之道，提供了有力的理由。何況天然鈾也不短缺。

總之，情勢很清楚，核能要在全球擴張，需要更強而有力的反擴散機制。國際原子能總署實施的禁止核子武器擴散條約，是以防護與檢查為基礎，但是伊朗核子武器計畫的進展，顯示這種機制需要改善，也清楚顯示談判新的機制會極為困難。

安全應該是核心考量，大家都承認世界某個地方發生核子事故，或是恐怖主義分子破壞核電廠，可能再度引發大眾的反對，打斷核能的發展。最新一代的核子反應爐，是希望以比較簡單的設計，甚至以被動式的安全功能，達成強化安全的目標。這種反應爐的另一個目標是降低核子擴散的風險，減少必須儲存的核廢料數量。下一代的反應爐，是以進一步提升這些目標為依據。

核子復興

今天核電占世界電力供應總量十五%。二十一世紀以來，很多新的核電裝置投入生產，而且不只是美國和歐洲如此而已。三十九座在二〇〇〇至二〇一〇年間啟用的核電廠中，大部分都設在亞洲。事實上，目前在建的六十座核能機組中，大約五分之四是在中國、印度、南韓和俄羅斯四國興建。中國開始推動快速發展，希望在二〇二〇年前，把核電產能提高四倍以上，而且希望在二〇二〇年前，擁有和美國幾乎一樣多的核能電廠。印度和南韓也訂出大幅成長目標。

核電也列在其他國家的施政項目中。阿拉伯聯合大公國面對電力需求快速成長，又擔心沒有足夠的天然氣可以發電，在二〇〇九年十二月，和南韓企業集團簽訂價值二百億美元、興建四座核子反應爐的合約。成本不是唯一的原因，過去幾年內，南韓企業興建的核子反應爐超過任何國家，也是原因之一。阿拉伯聯合大公國希望這四座反應爐能夠在二〇一七年開始運轉。

這種擴張現在號稱「核子復興」。歐洲的反對聲浪從各國綠黨崛起、車諾比爾核災爆發時開始，一直都能夠成功的封鎖核電，但是現在連歐洲的反對聲浪似乎都已經減弱。芬蘭正在波羅的海中的一座小島上，興建一座新的反應爐，這座反應爐也是芬蘭的第五座反應爐，不過成本超支已經變成重大爭議。但芬蘭已經表示，會繼續推動兩座新反應爐的計畫。英國的氣候變遷和北海天然氣供應減少，引發了興建多達十座新核電廠的公共討論。保守黨首相大衛·卡梅倫領導的聯合政府重申支持前任政府利用核電的承諾，不願聯合政府中次要夥伴、具有綠黨傳統的自由民主黨的反對。瑞典輿論現在把二氧化碳視為比放射性廢料還大的威脅，瑞典已經關閉兩座核電廠，

但是還有十座仍然繼續運轉，而且還提高發電裝置容量。雖然核電廠的「除役」仍然正式列在記錄中，實際上這種事情根本不可能發生。瑞典一位高級官員說：「除役仍然是官方的政策，但是進一步的除役很可能要三十年、或三百年後才會發生，而不是在三年內。」

連德國似乎都準備轉向。一九九九年，德國社會民主黨和綠黨聯合政府決定「淘汰」德國十七座核能反應爐。十多年後，德國仍然正式支持淘汰核電的政策。核電目前供應德國電力需求二五%以上，但基督民主黨籍的總理梅克爾表示堅決支持核能發電，而且把淘汰說成是「絕對錯誤」。二〇一〇年，德國制定新法，把德國核能反應爐的使用期限，平均延長十二年，反對黨誓言要在法院中挑戰這種做法，但梅克爾強力重申她認為核電應該是德國電力組合中的一環。

法國正在興建超大的新反應爐，法國的核電發電容量大約占歐洲核電裝置容量的一半，而且看來在某些情況下，核電是好到不能放棄的東西。義大利和德國一樣，已暫時停止推動新的核電計畫。兩國雖正式反對核電，卻從世界最大的電力出口國法國，進口大量核電廠發的電力。

法國之外，日本是另一個堅決支持核電的主要工業國家。日本的目標是在二〇二〇年前，把核電占電力供應的比率提高到四〇%，到二〇三〇年前，進一步提高到五〇%。日本是堅決支持核電的國家。

這也是核電復興的一環。

福島第一核電廠

接著爆發了地震。二〇一一年三月十一日，日本外海的兩塊地球板塊碰撞，引發了日本有史以

來最強烈的地震和超乎想像的大海嘯，巨浪沖毀日本東北海岸的防坡堤，造成慘重的人命損失。

四十年前福島第一核電廠開始運轉時，大家當然想像不到這麼驚人的大海嘯。核電廠在地震中夷然無損，地震一發生，反應爐就像應有的情況一樣緊急停機、自動關閉。這個地區大部分地方都停電，核電廠的用電也一樣，因此陷入危險的「電廠停電狀態」中，到這時為止，核電廠都依據計畫反應，備用電力系統理當啟動，但是海嘯的高度遠超過防坡堤，淹過了核電廠，備用發電機也淹在水裡，無法運作，這點表示控制室裡沒有燈光，看不到控制數據，設備不能運作，最重要的是，幫浦動彈不得，不能把水送到反應爐中。

備用電力是安全邊際。二〇〇五年，卡翠娜與麗塔颶風重創美國墨西哥灣沿岸的電網時，備用柴油發電機維持多座核能電廠正確運作，到外來的供電恢復為止。但是大海嘯後，停電使福島核電廠的幫浦無法運作，反應爐失去重要的冷卻水，無法降低連鎖反應發出的熱。

冷卻水喪失是引發核災的主因，隨後幾週裡，核電廠發生氫氣爆炸，圍阻體屋頂炸飛，輻射散逸，發生火災，最重要的是，反應爐核心部分熔毀。員工穿著輻射防護衣，只靠著手電筒照明，聽著氫氣爆炸的聲音，把水灌進反應爐中，抽乾遭到輻射污染的水，恢復緊急供電和控制設備運作，附近數萬居民撤離。這次核災原本評定為四級，幾個星期後提高為五級，再提高為最高等級的七級，和二十五年前發生的車諾比爾核災同級，但是實際散出的輻射少多了。然而，這次核災程度極為嚴重，以至於一般估計，需要六到九個月，才能達到所謂的「冷停機」狀態。部分或全部反應爐應該已經損壞到無法修復，必須報銷。

同樣受損的是全球發展核能電力的希望。福島核電廠結構的完整性順利逃過地震的考驗，

安然無恙，核災是巨大天災造成的結果，也是不了解海嘯的可能威力、廠址保護不周和備援電力系統位置不當等差勁決策造成的結果。如果福島核電廠沒有遭到水淹，這場核災幾乎可以確定一定不會發生。此外，日本的政府體系試圖處理這場核災時遭到挫敗。政府的一分核災報告指出，「為嚴重事故所做的持續一貫準備根本不夠。」

但是核災爆發、恢復控制困難，又需要時間應付的事實，動搖了世界各國政府和民眾在車諾比爾核災後二十五年間，針對核電所建立的信心結構。

日本要面對高達三千億美元的災後重建成本，面對歷來最高昂的天災損失。核電業的信用受到嚴重傷害，但是核電應該還是日本能源組合中的一環，不過未來若干年內，新電廠的廠址選定會更為困難，而且現有電廠的運作會受到更嚴密的監督，核電站供電五〇%的目標幾乎一定會放棄，對進口液化天然氣的依賴會加重，也會更強調效能和再生能源，尤其是太陽能，也可能強調地熱，同時研究發展會加強。

德國的變化最激烈，福島核災爆發三天後，德國總理梅克爾就否定利用核電的政策，下令七座核能發電廠至少暫時關閉，不再支持現有核電廠延長運轉期限。她說，日本的核災「改變了德國的一切，我們都希望儘快廢除核電，改為利用再生能源。」幾星期後，德國政府正式下令：德國所有核電廠必須在二〇二二年前關閉。

歐盟呼籲各國對所有核電廠進行「壓力測試」，其他國家的反應比較低調，英國表示會准許新核電廠繼續施工，法國重申高度支持核電，同時推動廣泛的安全檢查。

中國是最積極推展核電發展的國家，福島核災爆發後，北京下令暫停核准核電計畫，這樣

做強化了中央政府控制核電發展的權力。北京對各省飛快推展核電已經憂心忡忡，關切相關的安
全與執行問題，這樣可能導致北京改變做法，加強利用具有更多內建更多安全性能的第三代核電
廠。不過中國可能維持現狀，在二〇二〇年前，增建六十到七十座新核電廠，以便核電廠的數目
趕上美國。

美國核子管制委員會推動安全評估，卻也在福島核災後幾星期內，延長一座核電廠的營運執
照，批准喬治亞州新核電廠的下一階段發展。歐巴馬政府說會繼續支持核電，同時設法把從福島
核災學到的教訓，納入管制規範中。但是這場核災卻造成美國核電業重新思考相關計畫，核災爆
發一個月後，美國大型發電業者NRG公司宣布，準備撤銷在美國興建最大核電廠的計畫。NRG
執行長大衛·克萊恩說：「看看我們的情況，二〇〇五年，我們因應聯邦的獎勵，採取行動，卻
無法前進，毫無成就，只是連續五年月復一月的繼續花錢。」

這次災變再次顯示核災可能衝擊全世界，這次核災雖然沒有打斷核電的發展，但是近年內，
大家可能不會再聽到「核能復興」的說法。影響之一應該是大家會傾向發展設計更先進的核能電
廠，納入緊急冷卻不需要備用柴油發電機所發電力之類的被動安全功能。很多國家決定能源組合
時，仍然會基於各種原因，把核能納為其中一環，原因包括二氧化碳零排放、能源獨立、需要基
載電力、避免輪流停電和停電造成的高昂成本。但是經濟因素也很重要，早在福島核災發生前，
美國就出現一樣東西，使核電的競爭力展望遭到更嚴厲的挑戰，這樣東西就是便宜的非傳統天然
氣供應激增。

電力與頁岩氣

天然氣是發電燃料選擇中的另一種明顯選擇，非傳統天然氣、尤其是頁岩氣方面的突破，
凸顯了非常大量天然氣會以相當低的價格、供應市場的希望，改變了和電力燃料有關的選擇與
計算。頁岩氣開始供應，改變了美國最大核電業者艾斯龍公司執行長約翰·羅烏的計算。他說：
「廉價天然氣可以生產比較低廉、比較乾淨的電力，如果你和廉價天然氣對賭，你會賭輸。」這
種觀點和期望的改變，可能促使電力業者興建大量天然氣發電產能。

這種可能性或許會提醒某些人，想到一九九〇年代末期，電力業者競相採用天然氣作為燃
料，卻碰到供應緊俏、氣價上升、陷入困境，聲請破產的往事。但是非傳統天然氣出現，預告未
來幾十年內，甚至未來一個世紀以上，天然氣價格都會維持低檔，供應豐富。另外還有一點和十
年前不同，就是現在業者急於找到較低排放量的解決之道。天然氣也獲得一種新角色，就是作為
支持再生能源的輔助燃料，再生能源在大家想要利用或最需要時，並非總是隨手可得，風平浪
靜、日月無光時，天然氣發電就可以上場。

基於所有這些原因，天然氣發電占發電總量的比率幾乎一定會上升。但是會上升到多少？有
人認為，現有天然氣電廠可以取代排碳比較密集的煤炭，一大部分天然氣電廠必須備便，在負載
尖峰需求激增時利用，平衡整體電力流動，應付類似下午六點大家回家，打開一切的情況，或是
應付熱浪侵襲，冷氣用電突增的狀況。如果沒有這種彈性，整體輸電系統的穩定性會遭到破壞，
造成輪流停電，也可能引發災難性的停電。

但是應該新建純天然氣電廠嗎？看來不太可能。因為電廠的資金成本龐大，也因為今天興建的電廠壽命很長，興建電廠時必須瞻望幾十年。在科技、預期燃料成本、管制監督、輿論和風險排名偶爾可能突然加速變化時，在一種方法上過度投資風險太大。應付不確定性和意外變化時，基本策略是推動多元化。此外，雖然天然氣碳排放量較低，卻不是完全不排碳。因此短中期內，天然氣有助於大幅降低排放，但是在幾十年內，連天然氣都可能遭到壓力，除非碳回收封存技術除了能夠用在燃煤發電外，也可以用在燃氣發電上。

然而，美國電力業應用的天然氣仍然可能大增，如果電力需求激增、如果效能和再生能源不能達成預期目標，電力公司需要採取迅速行動，天然氣的應用會更為增加。燃氣電廠是最可能的默認選項，不只是美國如此而已，如果歐洲、中國和印度的非傳統天然氣開發成功，這些地方的天然氣發電也會大幅成長。

未來若干年內，電力業會為應該興建什麼電廠、關閉什麼電廠、以及困難之至的燃料選擇問題煩惱不已。

但是燃料選擇決策不但要以能源方面的考慮為基礎，也要根據愈來愈重要的氣候變遷因素。關心氣候似乎是最近的發展，事實上，對大氣層及其運作方式的關注是源遠流長的事情。

第二篇 氣候與碳

第五章

冰河變化

一八五六年八月十七日早晨，第一道曙光照亮遠處純白色錐形峰頂時，約翰·丁達爾離開瑞士旅遊小鎮因特拉肯附近的旅館，獨自穿過峽谷，往山上爬去，抵達冰河邊緣，眼前是「生平從未見過的原始壯麗景色」，然後，他愈來愈興奮，揮汗爬上冰河，獨自站在白色曠野上。

他站在冰河上，目瞪口呆，只有「陣陣風聲，或融冰碎片偶爾掉下的奇怪擦撞聲」間歇性打破寂靜，突然間，巨大崩落聲響徹天空，他隨即知道是雪崩。他張大眼睛，瞪著「上方上千公尺高的白色斜坡」，遠方的冰崩塌時，他呆住了，不久又是一陣奇異的安靜，但另一次雷聲般的雪崩隨即撼動天際。

一八四九年，在德國研究所攻讀化學的丁達爾第一次旅遊瑞士時，瞥見過冰河，到一八五六年才重回瑞士，進行冰河研究，踏上成為十九世紀英國偉大科學家之途，得出對人類了解氣候具有決定性影響的研究成果。

一八五六年丁達爾在因特拉肯停留的幾個星期裡，看到的景觀令他一再震懾不已，感受到一望無際、宏偉、巨大、神祕冰河令人驚駭到近乎恐懼的感覺。冰河像夢魘一樣吸引他一再重回瑞

士，冒著生命危險去測量、探測和了解。

他在愛爾蘭出生，父親是警察兼鞋匠，他到英國是為了想當土地測量員，因為無法在英國得到適當的科學教育，他才在一八四八年，帶著所有積蓄，前往德國，跟隨發明本生燈的化學家羅伯·本生學習，吸收他所說的「實驗語言」精華。回英後，靠著科學研究獲得讚譽，成為英國皇家科學研究所的名人。他有很多偉大成就，包括解答天空為什麼是藍色之類的基本問題。天空為什麼是藍色之類的基本問題。

他幾乎每年都會到瑞士研究地形，套著繩索登山，在高處緩慢前進，爬上喜愛的冰河，有一年，他幾乎登上馬特洪峰，眼看就要成為第一位攻頂的人，但是因為突然發生暴風雪，嚮導禁止他冒險再爬最後上百公尺，而功虧一簣。

他掌握到冰河的幾個要點：冰河會移動、不會停頓下來、不會凍成萬古玄冰。他曾經在某個山谷，「觀察古冰河運動對岩石和高山的影響——古冰河曾經填滿整個山谷，比現在高出三百多公尺。」但現在冰河不見了。此後，冰河移動、增長和萎縮就變成了他的主要研究項目。

十九世紀有些科學家認為，瑞士的冰河足以解答有沒有冰河期的問題，如果有，為什麼結束了？更嚇人的問題是冰河期會不會再來？這些問題是丁達爾迷上冰河研究的起因，他還提出溫度和大氣層的問題，再尋找答案，在大氣層運作方式上，獲得突破性了解，由於這項成就，他變成十八世紀末到今天氣候學家中的關鍵人物。

氣候變遷為什麼會從丁達爾之類科學家研究的問題，變成主導現代能源議題、攸關能源前途的問題？

新能源問題：碳排放增加

能源問題一向圍繞著價格、供應、安全和污染等問題打轉。政府如何分配能源、資金、來源和能源引發的地緣政治衝突風險等因素，使整個問題變得更為複雜。

氣候變遷和地球暖化現在影響所有能源政策，有些人的反應是劇烈改變能源系統，以便大幅降低人類燃燒煤炭、石油、天然氣、木材和其他易燃物、取得能源時，排放的二氧化碳和其他溫室氣體。

這是艱鉅挑戰，因為今天美國和世界所需超過八〇%的能源，靠化石燃料供應。簡單的說，炭氫化合物是二百五十年來工業文明的基礎。

二氧化碳、甲烷、氮氧化物等溫室氣體和其他氣體構成厚達一百公里的大氣層，把地球和太空隔開。氧、氮兩種氣體占大氣層的九八%，二氧化碳和其他溫室氣體占大氣層的比率很低，卻扮演平衡大氣層的重要角色。陽光中的紫外線穿透大氣層所有氣體到達地球後，地球會把太陽的熱能送回太空，把短波的射線改變成長波的紅外線，留在地球上。

如果沒有二氧化碳和其他溫室氣體，紅外線會射回無垠的太空，地球在晚上會成為沒有生命的冰冷星球。溫室氣體和水氣的分子結構能夠防止紅外線全部射回太空，把一部分紅外線熱能散布在大氣層中。溫室氣體形成的平衡使大氣層溫度保持在一定的範圍，既不太熱也不太冷，地球因此成為可以居住的地方，更重要的是，成為適宜生命生存的地方。

氣候變遷的中心問題是平衡。如果二氧化碳和其他溫室氣體大量增加，大氣層內會保留太

多熱量，大氣溫室內的地球會變得太熱，氣候就可能產生劇烈變化，地球上的生命會受到激烈影響。平均溫度只要上升二或三度，地球恐怕就慘了。

碳的濃度以曲線圖表示，自從工業革命以來，碳的濃度一直上升。大氣層中大部分的碳是自然形成的，但人類燃燒燃料提升了碳的濃度。

碳濃度增加有兩個主要的人為因素，第一是人口增加：一九五〇年以來，全世界人口幾乎成長三倍，人愈多，消耗的能源愈多，碳排放量愈多。第二個原因是所得增加：一九五〇年以來，世界國內生產毛額也成長三倍，所得增加導致能源消耗上升。父母親那一代必須穿著厚重衣服禦寒，現在的人有暖氣設備；在濕熱的熱帶地方，父母親那一代滿身是汗，現在的人有空調設備；祖父母那一代難得離開老家，現代人卻旅行全世界；兩代以前的人根本想不到的商品，今天在地球的某個地方生產後，飄過海洋、穿過大陸、送到全球各地顧客手中。這一切都要靠挖掘和燃燒埋藏在地下千百萬年的燃料，結果原來埋在地下的碳就釋放到大氣中。

森林有回收和儲存碳的功能，大規模砍伐和燃燒森林是釋放碳的另一個主要途徑。同樣的，全球性貧窮也助長碳排放量，因為窮人爭著燃燒生質，把黑煙送上天空。牲畜會排放甲烷和氮氧化物，種稻也會產生大量甲烷。但以量來說，最重要的溫室氣體還是二氧化碳。

科學家喜歡把排放二氧化碳叫做「試驗」，以前科學家會用好奇而非恐懼的中性說法，就像丁達爾說的「實驗語言」一樣，現在卻改用可怕的說法警告大家，人類對大氣層的試驗會像聖經啟示錄說的一樣，徹底改變氣候，無法挽回，造成冰帽融化、人口眾多的海岸線淹沒、肥沃地區變成死寂的沙漠、物種消滅、嚴重害人的狂風暴雨，以及再多保費也無法補償的經濟巨災。

有些科學家看法不同，表示自然界的反應並不明顯，氣候一直在改變，大部分二氧化碳是自然生成的。氣候變遷不是大氣層中二氧化碳濃度增加造成的，而是另有其他原因，如太陽的劇烈變動或地球軌道變化。不過，他們屬於少數。

為何不會太熱或太冷？

這裡討論的是氣候、不是天氣；天氣是每天早上和藹的電視氣象主播播報的日常氣象變化；氣候的範圍大多了、影響深遠多了，也抽象多了，時間長達幾十年、甚至一百年。

為何這麼複雜、抽象、只能推論無法直接體驗的氣候，會影響能源的未來和人類的生活方式，也成為國際重要政治問題？說來話長。

從開始有科學研究到現在南極冰河融解，大塊浮冰跌落海中，為什麼冰河的增減一直是研究氣候變遷的中心？今天冰河就像預測氣候凶兆的東西一樣，冰河是活歷史，像時光機器一樣，可以協助現代人回到二千年前。

十八世紀末和十九世紀一系列相關謎題，促使學術界開始探討氣候變遷。其中一個謎題是地球溫度由哪些因素決定。簡單的說，為什麼生命能在地球發生？為什麼白天太陽照射時地球熱，晚上又變冷？另一個問題是大家擔心，現在溫和的氣候和過去冰河期的極端氣候不同。

這些難題產生兩個令人注意的問題：氣候變遷的原因是什麼？冰河是否可能再來？是否可能像令人害怕的巨大原始動物，摧毀沿路的一切、也消滅人類文明？

下面的故事發生在瑞士阿爾卑斯山上的冰河，時間在丁達爾初次看到冰河前五十多年。

阿爾卑斯山的「熱箱」

科學家賀拉斯·索緒爾是日內瓦學院教授，喜好攀登高山和探險，終其一生致力於了解瑞士高山的一切，他在經典傑作《阿爾卑斯山之旅》中，發明「地質學」一詞，描述他的志業，他對熱度和高度深感興趣，還做出測量山頂和湖底溫度的儀器。

他在瑞士群山中遊蕩時有個問題令他困惑：為什麼晚上地球的熱量不會逸入太空中？一七七〇年代他設計出「熱箱」，尋找答案，熱箱是迷你型汽缸，箱子周圍和底部用黑色軟木蓋住，頂部是玻璃。熱和光進入熱箱後就留在裡面，箱內溫度就會上升。索緒爾想，大氣層的功能好比玻璃，蓋著地球表面，形成巨型溫室，光可以進入，但保留部分熱量，所以太陽下山後地球還是溫暖的。

法國數學家約瑟夫·傅立葉迷上索緒爾的實驗，讚譽他是「著名的旅行家」。傅立葉是拿破崙的朋友，曾經擔任埃及總督，對熱量的流動研究頗深，相信索緒爾的看法正確，認為，大氣層的作用多少和蓋子或底部，可以留住熱量，否則，地球晚上的溫度應該在零度以下。

但是要怎麼證明？一八二〇年代，傅立葉想用數學求證，但因為太難和極不精確，計算不出結果，深感挫折，感嘆找不到「規律的數學理論」，解釋大氣層如何影響地球平均溫度」。因此他放棄研究，把問題留給別人解決。

其後數十年間，另外有科學家再回歸索緒爾和傅立葉的方法，尤其是索緒爾的熱箱理論或「溫室」效應，說明大氣層如何留住熱量，卻不知道個中詳情和原因。

大片冰河

瑞士科學家路易·阿加西也迷上冰河，放棄絕種魚類化石研究，以便專心研究冰河，一度甚至到阿亞亞冰河上蓋了冰屋，住在裡面，就近監測冰河運動。

阿加西比丁達爾早十多年見到冰河，一八三七年，他提出令人震撼的革命性見解，宣稱，過去另有一個冰河時代，「大片冰河就像現代覆蓋格陵蘭的冰河一樣，覆蓋歐洲大部分地區」，當時全世界終年為「西伯利亞式的冬天」籠罩，「死亡覆蓋了自然界的一切」。

阿加西認為，冰河期起源於溫度因不明原因驟降，這種周期性溫度變化可追溯到地球形成初期。冰河向北方撤退後，山谷、高山、峽谷、湖泊、峽灣、巨石和碎石都留下移動紀錄。

阿加西的大胆主張大受懷疑。有一位同事勸他不要研究冰河，應該專心研究「他喜愛的魚類化石」。

阿加西不為所動，在後來的研究中，提出冰河移動的進一步證明，冰河就是他所說「上帝的大犁頭」。阿加西後來移民美國，擔任哈佛大學教授，曾經組織探險隊前往大湖區，證明這些湖泊由冰河前進和後退在地球表面蝕刻而成，這是冰河期存在的另一個證據。阿加西因為證明地球經歷過不同溫度的時代，是真正發明氣候觀念的人。

大氣層好比水庫

丁達爾依據前輩的成果進行研究。他對歐洲冰河的移動深感興趣，希望知道大氣層能否留住

熱氣、如何留住，如果找到答案，就可以開始了解冰河背後所代表的氣候變遷。

為了尋找答案，丁達爾在倫敦雅寶街皇家科學研究所地下室實驗室，設立新的分光光度計，測量氣體能否回收熱和光。他首先試驗大氣層中最多的氮和氧，結果令他失望，因為氮、氧都是無法回收熱氣的透明氣體，光能夠直接穿透，因此他只好另外尋找解釋。

還有什麼氣體可以試驗？答案是實驗室的煤氣。煤氣是燃燒煤炭所產生的甲烷，由倫敦照明公司用管路打到他的實驗室供點燈用。丁達爾把煤氣放到分光光度計後，發現眼睛看不到的煤氣是不透明氣體，能使光線變暗。他找到證據了：煤氣能夠回收紅外線，接著他嘗試水和二氧化碳，這兩種材料也不透明，因此也能回收熱氣。

這時丁達爾快要崩潰了，因為他每天在實驗室都連續工作十小時，還吸入「連倫敦空氣中都沒有不自然氣體」。不過沒有關係，他十分欣喜。一八五九年五月十八日丁達爾快樂的在日記中寫著：「我做了整天實驗，已經找到答案了！」三星期後，他在皇家科學研究所公開演講，以實驗證明發現溫室效應，並說明這項發現的重要性。維多利亞女王王夫亞伯特親王也在場。丁達爾在倫敦皮卡迪里街旁的雅寶街，「第一次公開說明溫室效應存在的實驗」。

丁達爾說：「大氣層像屏障一樣擋住紅外線，使地球表面溫度上升，就好像河上的水庫會升高河流水位一樣。如果沒有大氣層，冰凍的氣溫確定會摧毀所有植物……大氣層容許太陽的熱氣進入地球，防止熱氣返回太空，熱氣就會在地球表面不斷累積。」

丁達爾利用實驗，解釋溫室效應、氣候如何形成、以及大氣層成分變動「一定會造成氣候變化。」他把成就歸功於索緒爾和傅立葉，也肯定阿加西的冰河期理論。大氣層各種氣體的平衡如

果發生變化，「就可能產生地質學家所說的氣候突變。」

後來丁達爾在科學上做出其他重要貢獻，因此聲名大噪，直到晚年都會定期回到瑞士攀登高山，帶回冰河樣品。丁達爾死於一八九三年，享年七十三歲，他一生喜好登山，曾經多次冒險登山，多次幾乎發生山難。他患嚴重失眠，有一次太太意外給他服用過量安眠藥，他倒下來前喃喃自語：「親愛的，你殺死老公了。」

阿列紐斯：氣候溫暖好處多多

一八九四年，丁達爾去世後一年，瑞士化學家斯萬·阿列紐斯繼續這項研究，想知道當時稱為碳酸的二氧化碳增減對氣候有什麼影響，也想評估冰河期對氣候有什麼作用，冰河期指冰河的前進或後退，也就是他說的「地質氣候學上的某些時期。」

阿列紐斯的求學過程並不順利，要從烏普薩拉大學取得博士學位就費盡千辛萬苦。但是現在他已立足於斯德哥爾摩，要在每星期六舉行的科學討論會中，談論有關冰河期的看法。阿列紐斯因為離婚，又失去兒子的監護權，心情鬱悶，時間很多，所以一個月又一個月的忙於煩瑣的計算，有時候一天工作長達十四個小時，一個緯度又一個緯度的用手計算碳濃度變化的影響。

一年後，阿列紐斯獲得結果，引用丁達爾和傅立葉的論文說：「大氣層吸熱氣對氣候的影響已有很多論述」，接著他提出計算結果，顯示如果大氣層中的碳量減半，地球溫度會降低攝氏四至五度。額外的研究顯示，如果碳量加倍，溫度會上升攝氏五至六度。阿列紐斯當時沒有超級電腦或先進的運算機器協助，卻不在乎冗長的計算過程，用手算出上述預估數字，結果和現代用超

級電腦算出的結果相近。

阿列紐斯可能是第一位預測地球暖化的人，認為大氣層二氧化碳增加一倍，需要三千年，二氧化碳濃度增加，可以防止新冰河期形成，容許人類「長期享有更平均、更好的氣候，在地球比較寒冷的地區」尤其如此，生產「比現在更多的糧食，有利於快速增加的人口。」對孤單的瑞士化學家來說，這種情形不是壞事，因為他很清楚年復一年度過漫長、黑暗、寒冷的冬天的滋味。

阿列紐斯的孫子古斯塔夫·阿列紐斯是出色化學家，他說：「我祖父的研究引起大家共鳴，當時這件事讓大家極感興趣，認為二氧化碳增加沒有什麼危險，反而是好事。」古斯塔夫認為「北部氣候區」溫度上升是好事，再說，農作物因為受二氧化碳刺激可能長的更好。不過令人難過的是，要過很久，才能看到明顯效果。」

後來大家的注意力逐漸脫離碳和氣候，阿列紐斯也轉向其他題目，一九〇三年獲得諾貝爾化學獎——對一位差點拿不到化學博士的人來說這真是一件好事。

隨後幾十年，世界愈來愈工業化，不管發電或工廠，煤炭都不可或缺。煤炭燃燒產生更多的碳酸——二氧化碳，但沒有什麼人注意到這件事和氣候的關係。

一九三〇年代初期大蕭條期間，乾旱侵襲美國中西部，農民拙劣的耕作方式使表土鬆散、暴露在外，強風把表土吹上天空形成巨大的風塵暴，有時候大到遮天蔽日，耕地變成不毛之地。摧毀經濟，迫使幾十萬農戶捲起鋪蓋，開著福特T型車，像約翰·史坦貝克小說《憤怒的葡萄》中，住在「灰塵滿天土地上」的周德家一樣，奔往加州。

但是這種乾旱是「天氣」不是「氣候」，幾十年來幾乎都沒有人討論氣候了。

卡倫達效應：計算碳量

業餘氣象家蓋·卡倫達是蒸汽工程師，不是專業科學家，一九三八年，他送交一分論文給倫敦皇家氣象協會，論文是針對阿列紐斯的理論提供新的佐證，一開始就承認二氧化碳的理論有過一段「歷史起伏」。但他自有定見，一直思考二氧化碳對氣候的影響，有空就收集、分析氣候型態和碳排放資料，他只是業餘人士，但收集的資料比誰都完整、都有系統。他的努力證實了阿列紐斯的理論，顯示大氣層中的二氧化碳確實不斷增加，可能導致氣候變化——尤其是地球暖化。

卡倫達對這種結果深感興趣，卻和阿列紐斯一樣，毫不擔心，認為世界會更好、更舒適，對人類更有利人類，對農業尤其有益，另一個好處是「可怕的冰河期會無限期延遲。」

不過卡倫達只是業餘人士，當天晚上皇家氣象協會的專家並不重視他的論點，因為他只是蒸汽工程師而已。

但是卡倫達所說「二氧化碳在氣候變遷中的角色」，後來以卡倫達效應廣為人知。一位科學史專家說：「卡倫達的論點使地球暖化重新受到學術界的重視。」但是好景不常，隨後若干年裡，大家不再重視全球暖化。一九五一年，一位著名的氣候學家指出，二氧化碳導致氣候變遷的理論「並未廣受接納，已經被人放棄。」大家似乎再也不當一回事。

第六章

發現的時代

羅傑·雷維爾晚年回憶科學生涯說：「我不是很稱職的科學家，卻有很多想像力。」他的想像力放在二氧化碳上，時間長達數十年；這一點對了解氣候和能源前途都十分重要。

不過雷維爾有點過度貶抑自己，他是在一九九〇年布希總統頒給他美國科學界最高榮譽——國家科學獎、獎勵他對科學的深遠影響時，說了這段話。

雷維爾身材高大、很有個性，是科學家，也是博物學家、海洋探測家、制度建立專家、促成基礎研究和政府政策密切結合的先驅。學術界反對他的人譏笑他研究學問的好奇心是「衝動熱情和宗教狂熱。」

布希頒獎時特別指出：「雷維爾在二氧化碳和氣候修正的成就，遠超過預測板塊結構的海洋探測、海洋環境幅射對生物的影響、人口成長和食物供應研究的成就。」

雷維爾曾跟隨探險船，研究太平洋中沒有探測過的深海。事實上，他對大氣層中碳的角色、人對碳平衡的影響的研究也很重要。他耗費數十年時間，利用愈來愈強的電腦，探測海洋、冰河、高山、深海、甚至外太空，把氣候變遷和還不為人知的全球暖化，變成政治議題。

他說，他能夠得到國家科學獎，原因是一我是研究溫室效應的始祖。」

他最初研究地質學，但懼高症使他害怕爬山，因此改為研究海洋。海洋學原先是有錢人業餘從事的娛樂，經由雷維爾和其他人的努力，才變成重要科學。二次大戰期間，他是美國海軍首席海洋學家，戰後協助創設國家科學基金會前身的海軍研究局，資助戰後美國大學，從事和國防有關的大部分科學研究。他把設在聖地牙哥北方拉霍拉的斯克里普斯海洋研究所，從只有一艘船的小研究站，擴大成配備很多船隻、經常探索海洋新知識的巨型研究機構。他也把這個地方變成美國最重要的碳循環研究中心。

二次大戰後，他率領歷史性探險隊，航行好幾個月，進入不為人知的中南太平洋，探測世界最深的海域。他回憶說，這些探險是「探測地球的重大行程……每次只要出海，就會有意外發現：我們認為對的事情，沒有一件是對的，我們都想不到的事情却是對的，一切都是前所未見。」當時大部分地質學教科書都說，深海底是「平坦、無奇的平面。」他和其他人却發現海底有很深的海溝，還發現深海中的中太平洋山脈。這些發現對形成各大洲和地球表面移動的板塊結構理論十分重要。他推動成立聖地牙哥加州大學，也提升聖地牙哥的文化生活。他問道，如果都市「最著名的文化設施」是動物園，怎麼能吸引一流學者？他也協助設立人口研究科系，並且研究第三世界經濟發展。

同時，他也開始研究氣候變遷。

雷維爾對二氧化碳感興趣，起源於在波莫納學院當研究生時學到的事實——海洋中二氧化碳含量是大氣層的六十倍。一九三六年，他在博士論文中指出，海洋吸收人類燃燒所產生的大部分

二氧化碳。因此，人類活動釋出的碳對氣候幾乎沒有影響，因為海洋是巨大的污水池，可以回收大部分的碳。此後數十年，大家都同意這種觀點。

大規模地球物理學試驗

雷維爾偶爾會想到卡倫達效應——卡倫達認為，二氧化碳濃度增加會導致地球溫度上升。雷維爾依據自己博士論文的理論，認為卡倫達可能錯了，因為卡倫達不知道海洋會吸收大氣層中的二氧化碳。不過到一九五〇年代中期，雷維爾在研究六、七十年核子武器測試後改變想法。

二次大戰後，海軍徵召雷維爾，協助了解試爆對海洋的影響，請他設計測量爆炸所產生波浪和水壓的技術，以便追蹤海浪中的幅射擴散。他領導的團隊工作時，發現不同深度的水溫出現「劇烈、突然」的變化，海洋的運作和他們的認知不同，令人驚訝。照他的說法，海洋是「一副紙牌，是一層溫水蓋在一層冷水上，不太容易混合。」因此海洋吸收二氧化碳的能力受到限制。一九五〇年代中期他和同事漢斯·休斯合撰報告，敘述這項見解，樹立氣候學上的里程碑。

報告題目說明文中的討論內容：「大氣層和海洋間二氧化碳的交換與幾十年來大氣層中二氧化碳增加的問題。」這份報告引用阿列紐斯和卡倫達的論點，不過也有曖昧的地方。其中一部分認為海洋會吸收大部分的碳，和雷維爾的博士論文內容一樣，也就是說，碳的增加不會引發地球暖化。但是另一段的敘述正好相反：海洋會吸收二氧化碳，但大都只是暫時吸收，由於海水的化學現象，以及溫水層和冷水層缺乏交流，海洋中的二氧化碳會再滲入大氣層。換句話說，海洋吸收二氧化碳的量，遠比先前估計的少很多。如果二氧化碳不在海洋中，就一定會再進入大氣層

中，表示大氣層中二氧化碳的濃度一定要上升。這種看法是雷維爾後來追加上去的，打在另一種紙上，再貼在原稿上。

雷維爾寄出報告前，又附上一個看法：「如果人類繼續燃燒工業燃料，未來幾十年二氧化碳可能大增；人類正在進行過去沒有、未來也不會有的大規模地球物理學試驗。」最後這句話後來一再為人引用，次數多到雷維爾無法想像。事實上，這句話幾乎已經成為預言，「引用次數超過所有和地球暖化歷史有關的說法。」

不過這句話比較不像警告，比較像是想法，因為雷維爾像六十年前阿列紐斯試圖量化二氧化碳對大氣層的影響一樣，並不擔心，認為二氧化碳濃度增加沒有危險，反而是有趣的科學主題。他的同事說，「他一點也不緊張，他喜歡大規模的地球物理學試驗，認為這是研究大氣層和海洋二氧化碳含量增加對海洋有什麼影響的重大實驗。」（因此到了十年後的一九六六年，羅維爾仍然主張，「人類活動造成大氣層二氧化碳上升這件事，大家應該覺得好奇，而不是憂慮。」）

雷維爾正忙著籌劃規模空前的全球性地球研究計畫，以便了解氣候變遷的若干問題，這就是國際地球物理年。

國際地球物理年的意外影響

國際地球物理年的誕生，是基於希望把二次大戰以來出現的新科技，包括火箭、雷達、早期電腦科技，運用在探索迄今仍然無法觸及、會導致「金屬熔解、橡膠破裂、柴油變成像蜂蜜一樣黏滑」的領域，以便更了解地球的運轉以及地球和太陽的交互作用。這個跨領域網路後來納入

七十多國幾千位科學家，形成組織，進行複雜多了的、一貫多了的數千次全球性探測，以便了解包括地心、海床和大氣層在內的地球各個層面，其中一部分試驗需要十分艱難的技術和耐心。

國際地球物理年自一九五七年七月延續到一九五八年十二月，這段期間剛好太陽黑子活動劇烈。這項全球性探測活動產生極多新知識，包括：深海海水流動、海床狀態、包圍地球上空的高緯度幅射。索緒爾、丁達爾以降科學家熱衷的冰河，也是其中一個重要的主題。

氣象的戰略重要性

氣象也是重要課題。國際地球物理年集合前所未有、大量的專家研究氣象，除了純科學研究以外，還有戰略上的考量。二次大戰十年前才剛結束，在戰爭時期，氣象一直是戰場上決定勝負的重要因素，納粹部隊包圍列寧格勒、進攻史達林格勒時，卻遭到俄羅斯西部的酷寒摧毀。

沒有一場戰役像一九四四年六月六日諾曼第登陸一樣，凸顯氣象的戰略重要性，這一天號稱「最長的一日」，這一天之前是「最長的小時」。英格蘭南部海岸的聯軍總部經歷無數小時的痛苦壓力、不確定和恐懼、無數小時猶豫不決的簡報，氣象成為「攻擊與否」的唯一決定性因素。

聯軍統帥艾森豪將軍憂心忡忡，在等待下一次簡報時抱怨說：「英國的天氣根本無法預測。」稍早預測天氣惡劣，十七萬五千位軍人怎麼可能在這種可怕的天氣中去冒險？氣象預測的可信度頂多只有兩天；但是英吉利海峽的暴風雨天氣使可信度降為十二小時。因為天氣不穩定，原定六月五日的攻擊行動最後宣布延緩，在德軍發現前召回已經出海的船團。

最後，到了六月五日早晨，氣象預報主任說：「我有好消息告訴你們」，氣象預測指出，會

出現短暫的好天氣。艾森豪靜靜坐了三十、四十秒鐘，心中盤算著成敗和判斷錯誤的風險。最後他站起來發出命令：「好，我們出發！」一九四四年六月六日，世界史上最大的艦隊在差強人意的天氣中發動攻擊。幸運的是，德國氣象預報員沒有發現會出現短暫的好天氣，向德軍統帥隆美爾保證不會有入侵行動。

十年後，艾森豪已經出任美國總統，同意推動國際地球物理年，因為沒有人比他更了解氣象知識進步的戰略重要性。

國際地球物理年的目的在於增進氣候和氣象知識。雷維爾指出，「國際地球物理年的主要目的」之一，是更深入了解氣候變遷，了解「冰雪黑暗時代」冰河期出現和消失的原因，得到預測未來氣候變遷的能力。

研究人員的確已經發現並證實地球上若干最重要的氣候調整周期，包括海洋和空氣傳遞熱量造成的影響，但溫室氣體之類的其他因素也影響氣候系統。有人推測，地球可能「接近人為的溫暖期，原因是人類的工廠每年向大氣層，釋出幾十億公噸二氧化碳！」

伍茲霍爾會議

雷維爾擔任國際地球物理年海洋學小組主席，他為了保證二氧化碳的影響「在國際地球物理年期間留下足夠記錄」，和三位麻州伍茲霍爾研究中心的科學家，訂定一分全球性的研究議程。古斯塔夫·阿列紐斯是瑞士諾貝爾獎得主斯萬·阿列紐斯的孫子，他記得伍茲霍爾的討論是一劃時代的事件。「他們決定國際地球物理年的目標之一，是確實測量古斯塔夫祖父五十多年前想求

證的事——二氧化碳對大氣層的影響。

但是二氧化碳含量可能用數字適當的表達嗎？有人在伍茲霍爾的會議上，聽說加州理工學院「一位有前途的年輕研究員」，正在研究如何測量二氧化碳，或許可以請他來斯克里普斯。

基林曲線

查爾斯·基林不想讀經濟學，他父親是經濟學家，家中經常談論經濟學，所以他想盡辦法不攻讀經濟學；他上伊里諾大學時放棄主修化學，因為攻讀化學必須懂經濟學，他後來改讀文科，但還是設法在西北大學攻讀化學博士。他研讀化學時，偶然讀到對他影響很大的《冰河地質學和洪積世》。他回憶說：「我想像一面爬山、一面測量冰河的物理特性。」基林和丁達爾一樣迷上冰河，曾經爬上華盛頓州「冰河覆蓋的」喀斯開山脈，後來，他在化學之外，輔修地質學。

他希望結合喜愛的化學和地質學，進行博士後研究，加州理工學院新開的地質化學課程正符合需求。他的重心是碳的研究，因此設計一種裝置，把自己固定在加州理工學院的建築物屋頂，測量空氣中的二氧化碳。因為當地空氣污染嚴重，測得的數據很不規律。為了尋找比較乾淨的空氣，基林轉往北加州海岸具有海洋美景的城市大蘇爾。他喜歡待在野外，「為了測量，我晚上要從睡袋爬出來好幾次。」

但大蘇爾也不是好地方，他發現森林中的二氧化碳含量每天波動，為了取得二氧化碳真實的數據，他需要在穩定的「大氣層環境」中測量，此外，他也需要資助。

這時雷維爾伸出援手，請基林到斯克里普斯工作，還提供研究款項。雷維爾承認這種做有風

險，但他認為基林鍾情二氧化碳顯然是加分。雷維爾後來說：「基林想盡辦法測量二氧化碳，了解二氧化碳的一切，他最感興趣的就是二氧化碳，別的東西他都沒有興趣。」

基林前往斯克里普斯工作，把所學的全部科學知識，「用來探討二氧化碳分子的所有細節。」基林回憶說：一切都是為了科學，「沒有想到危險，只是渴望獲得知識。」

氣象局提供基林研究的「地點」位在夏威夷的新氣象觀測站，標高三千三百九十四公尺，離莫納羅亞火山口很近。這裡空氣純淨，既不受城市污染，也不受森林植物每天周期變化影響，能夠提供基林觀測所需要的穩定大氣環境。基林的另一個測量儀器送往南極的小美國研究站。

莫納羅亞山頂觀測站累積的觀測結果令人驚訝。一九三八年卡倫達在倫敦皇家氣象協會發表論文時，職業氣象學家可能對他嗤之以鼻，但是基林證明他正確無誤，卡倫達效應確實存在。基林的研究出現明顯趨勢：大氣層的二氧化碳逐年增加中。一九五九年的平均濃度是百萬分之三一六；一九七〇年，增為百萬分之三二五；一九九〇年為百萬分之三五四。這條上升曲線就叫基林曲線。依據基林發現的趨勢，到二〇五〇年，大氣層中二氧化碳含量會加倍。但是碳含量增加對氣候有什麼影響？

國際地球物理年提供了一個類推的解答。金星過去一向是像《嚇人科幻小說》之類科幻雜誌的領域。但科學家從國際地球物理年有關金星的研究中，得知溫室效應最極端的情況是什麼，金星大氣層的溫室氣體含量較高，所以表面極熱，高達攝氏四百六十六度，氣候變遷失控的下場就會像金星一樣。

基林年復一年，繼續測量，和小組成員沈迷其中，改進準確度，注意細節，一點一滴累積大氣層中碳的記錄。雷維爾回憶說，基林的研究成果是「有史以來最美好、最重要的地質化學測量美好的紀錄。」斯克里普斯研究所的人都知道基林沉迷於測量。有一次，古斯塔夫·阿列紐斯急著要把陣痛的太太送到醫院，基林在斯克里普斯研究所內揮手攔下車子，跟阿列紐斯討論測量二氧化碳的困難細節。最後阿列紐斯太太打手勢說痛的受不了了，阿列紐斯才打斷討論，說：「抱歉，內人要生產了，幾分鐘內就要生了。」基林才終於了解，揮手讓他們離開。

基林的工作成果是氣候科學的大轉捩點。測量大氣層中碳含量不再是探測過去的工作，不再用來解釋過去幾千年中神秘冰河期和冰河伸縮，而是變成探測未來的主題。一九六九年，基林信心十足的警告碳含量上升的風險。他說，三十年內，「如果現在的趨勢不變，我敢斷言，人類世界會比今天更危險。」

由於基林對大氣中碳含量的研究，影響重大的基林曲線取代不為人知的卡倫達效應。基林的研究成為討論氣候變遷和改變能源系統的基礎。事實上，基林曲線成為「溫室效應的主要象徵」，華府國家科學院牆上刻了一幅基林曲線。

「地球冷化」：下一個冰河期？

這些年來，大家日漸關心氣候變遷，原因有好幾個。國家安全部門的人擔心氣候改變是戰略威脅，擔心蘇聯會因為軍事利益，有意或無意的改變氣候，如迫使河流改道，或是在白令海峽築壩之類的「輕率」想法。

決策單位開始參酌基林有關碳的研究成果。一九六五年，詹森總統的科學顧問委員會公布一

分「環境污染」報告，其中二十二頁的附件是由雷維爾和基林等人撰寫。報告中強調，「人類燃燒化石燃料，正不自覺的進行重大地球物理學實驗」，幾乎一定會改變溫度。

一九六九年，後來擔任參議員的尼克森總統顧問丹尼爾·莫乃漢看到這些研究報告，寫了一份備忘錄，主張尼克森政府「應該」處理氣候變遷問題，「氣候變遷顯然是大問題，連不關心災變研究的人都會注意。」研究報告指出，到二〇〇〇年，大氣層二氧化碳增加會使平均溫度上升四度，海平面上升三公尺。他說：「社約再見，華盛頓再見，幸好我們沒有西雅圖的資料。」

雖然如此，但是全球冷化和暖化的論述幾乎一樣多。白宮科技署副主任回函莫乃漢說：「我愈了解這件事，就愈發現有兩派災難預言家，有一派說我們會變成在雪地上行走的乳齒象，另一派說由於二氧化碳導致溫度上升，我們要長鯨才能適應海水不斷上升。」

很多人和一百年前的阿加西與其他科學家一樣，擔心冰河會再出現。一九五〇年代末期，後來以《女性奧秘》一書成名的貝蒂·弗里丹用通俗文字，把這些理論寫成《冰河時代來臨》一文，弗里丹說：「如果人類無法轉動冰河恆溫器、避開新的冰河期，撒哈拉沙漠可能出現房地產熱潮。」一九七〇年代初期，美國中央情報局開始研究地球冷化對地緣政治的影響，包括「千、百萬人死亡和社會不安」。一九七二年，《科學雜誌》報導，地球科學家在布朗大學開會，得到的結論是「目前冷化特別明顯，地球冷化和相關環境快速變化大幅超越人類史上經歷過的起伏。」同時，多位參加國防部氣候分析的科學家致函尼克森總統，希望政府研究新冰河期即將來臨的風險，其他科學家警告說，大氣層中愈來愈高的煙霧含量可能「多到足以觸發冰河期。」幾年後，美國國家科學委員會提出報告，指出過去二、三十年的紀錄呈現冷化趨勢。《科學雜誌》的內容顯示，

圖6-1 基林曲線：大氣層二氧化碳濃度

莫納羅亞觀測站資料

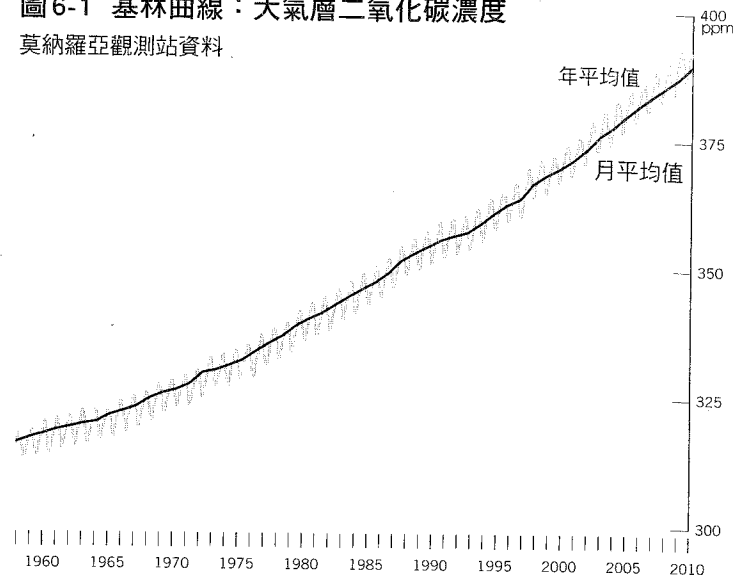
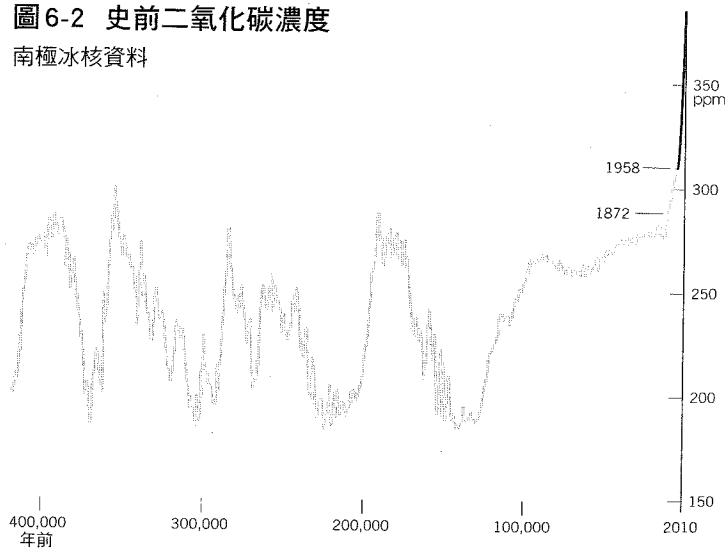


圖6-2 史前二氧化碳濃度

南極冰核資料



資料來源：NOAA Earth System Research Laboratory、Carbon Dioxide Information Analysis Center

這絕非片面論點。一九七五年，一位科學家抨擊注意「數十年來」氣溫下降、「沾沾自喜」的科學家，因為他們「低估燃燒化學燃料所產生二氧化碳造成的暖化效應。」

大家對氣候變遷愈來愈關心，表示更多經費流入氣候研究，有兩位學者表示，「推動氣候研究的動力是氣候冷化，不是氣候暖化。」

大眾媒體也同樣關心這個問題。一九七五年，《新聞週刊》報導，「地球歷經七十五年的極端溫和氣候後，似乎正在逐漸冷卻。」氣象專家對冷卻的「原因」和「程度」意見不同，卻「幾乎一致」認為，類似一六〇〇年至一九〇〇年間的「小冰河期」、甚至另一個「大冰河期」正在形成。一九七六年，《國家地理雜誌》對地球是「冷卻中」或暖化「無法逆轉」問題，給予同樣分量的報導。同一年，《時代雜誌》報導，氣象專家對地球未來會再出現冰河期或暖化期看法仍然不同，冰河期會帶來大規模的饑荒和燃料短缺，暖化會使南北極的冰帽溶化，淹沒海岸城市。

一九八〇年代初期，地球冷化新論點「殘酷」核子冬天」出現：美蘇核子戰爭會引發極端冷化，原子彈爆炸引起的巨大煙塵會隔絕陽光，使地球一片黑暗，連夏天溫度也降到「零度以下，嚴重威脅人類生存。」天文學家卡爾·沙岡熱烈支持核子冬天威脅論，沙岡年輕時，因為發現金星的極端溫室大氣層而聞名，後來又因為主持公共電視台的《宇宙》系列節目，聲名更噪（他的名言「億萬又億萬顆星星」廣受模倣）。

雖然有核子冬天的恐懼，一九七〇年代末期到一九八〇年代初期，氣候變遷研究潮流明顯轉變——從冷化變為暖化。從陸海空直接觀察到的基林曲線漸漸受到科學界重視，最重要的是電腦模擬氣候模型突飛猛進。

氣候模型

兩項科技進步提昇了解氣候的科學基礎。第一項是人造衛星，美國在一九六〇年發射第一枚氣象衛星，不但可以全面觀察地球，也持續獲得更多資料。人造衛星促進政府資助的氣象改造研究，最初的目的為了減輕颱風威力，增加世界乾旱地區降雨量。甘迺迪總統一九六一年在聯合國演說時，呼籲「世界各國合作進行氣象預測、控制氣象。」氣象改造後來沒有人再討論，衛星促進人類認知氣象的貢獻却一再增加。

第二項進步是電腦功能進步驚人，使氣候模型製作成為科學。電腦會誕生，大致要歸功於二次大戰期間，馬里蘭州亞伯丁陸軍試驗場旁的鐵路月台上的一場臨時會。年輕數學家赫曼·戈德芬看到科學和數學名人約翰·馮紐曼，「冒然」主動搭訕，馮諾曼雖然名聞遐邇，為人却友善，使戈德芬大感意外。戈德芬告訴馮紐曼，自己正在幫忙發展「每秒可以運算三百三十三次的電子計算器」，原本「輕鬆的談話突然變成像數學博士學位口試。」

馮紐曼出生於布達佩斯，原名亞諾士·紐曼，一九三〇年移民美國，和愛因斯坦一樣，是普林斯頓大學高等研究院第一批院士，也是二十世紀最特殊、最有創意的人，是傑出數學家兼物理學家，對現代經濟學也有極大影響（據說他發明的博奕理論「改變了經濟分析方式」）。不僅如此，大家經常說他是「電腦之父」和核子嚇阻理論發明人。（一九五六年，馮紐曼臨終時，國防部長、副部長，陸軍、海軍、空軍部長和所有參謀首長都前往華特里德醫院，在他的病牀邊站著，等著聽他的「最後建言。」）馮紐曼也發明現代氣候模型數學分析，成為分析全球暖化基本

工具。這一切成就都在一九五七年，他以五十三歲英年早逝前完成。

馮紐曼具有特殊能力，能夠以光速在腦裡做複雜運算，六歲時，有一次看到媽媽瞪著眼睛，看著天空、做白日夢，就問媽媽「在算什麼？」長大後，他能夠在睡覺時讓潛意識解決數學問題，凌晨三點醒來後，就得到答案，同時他能夠用全新方式觀察事情。數學家史坦尼羅·烏拉姆是馮紐曼的密友，指出馮紐曼的思考過程使用很多類推方法。他會和馮紐曼交換數學心得和難懂的猶太笑話。烏拉姆嘲笑馮紐曼過於實際，想把數學應用在所有問題上，有一次，烏拉姆說：「或許只有到數學應用在牙科上時，你才不會再應用數學。」

經濟學家保羅·薩繆森說，馮紐曼是他見過計算能力最快的人。英國國家物理實驗所所長說「他是全世界最聰明的人。」很多同事說：「馮紐曼無疑是我見過最接近天才的人。」

一九四四年八月的亞伯丁車站月台會議使馮紐曼成為「電腦之父。」過去計算不是機器，只是職業：「計算者」指從事瑣碎、必要計算各種研究、潮汐或天體運行資料。馮紐曼一直在尋找機械式計算機器，用在原子彈研發時所需要的驚人計算工作；二次大戰期間，美國在新墨西哥州洛薩摩斯秘密實驗所研發原子彈。洛薩摩斯實驗所科學家努力把連鎖反應理論變成可怕武器時，也發明「現代數學模型設計」，但需要機器才能應用。

就在月台會議後不久，馮紐曼運用擔任戰爭最高級顧問的地位，積極參與、推動剛萌芽的電腦計畫。一九四五年六月，馮紐曼撰寫一篇後來成為世界電腦工業科技基礎的論文，文長一百零一頁，而且立刻在普林斯頓大學高等研究所設計新的電腦原型。

電腦會用在什麼地方？馮紐曼想把電腦最先用在重大科學主題「湍流現象」上，也就是氣象

預測上。他知道原子彈爆炸模擬和氣象預測十分相近，都是流體力學中的非線性問題，需要大量極快速的運算。

氣象十分複雜，急需馮紐曼喜愛的嚴謹數學分析，只有電腦能夠做複雜的氣象分析，戰略重要性使這件事更為急迫。他喜愛這種智慧方面的挑戰，卻擔心蘇聯把氣象改造為武器，對美國發動「氣候戰爭」。他比較喜歡用更完美的氣象知識，「稍為搖搖地球」，也就是修正氣象，改造出比較溫暖的亞熱帶氣候。坦白說，他認為大家會比較喜歡這種氣候。

馮紐曼尋求快速運算和氣候研究資金時主張，高速運算「在七、八天前就可準確預測氣象。」後來他監督建造數學分析、數字統合電腦。《紐約時報》稱之為「巨型電子腦。」

一九四八年，數字氣象學計畫已經開始推動。新手朱爾·查尼是數學家兼氣象學家，率先想出結合氣候模型和電腦的數學公式。他想做的是把大氣層中的熱量和溼氣用電腦算式計算，解決問題，表達物理法則。一九五〇年代初期，查尼和同事開始用電腦製作最早的氣候模型預測圖。到了一九六〇年代，普林斯頓大學進行的計畫，已經變成隸屬國家海洋大氣管理局的地球物理流體力學實驗所，現在，該局是發展氣候變遷模型預測的先驅。

馮紐曼想了解平流層流動和大氣湍流，因此產生地球大氣層如何運作的精密模擬圖——空氣環繞地球的模型圖，也就是通稱的大氣環流模型。因為地球只有一個大氣層，這些模型一定涵蓋全球。模型製作者為了更了解地球運作狀況，經常改進模型，使之更接近實際情況，模型因此愈來愈複雜。

氣候模型是很先進的東西，難以製作。真鍋淑郎是全球頂尖氣候模型製作專家，原來是東京

大學氣象學教授，後來加入地球物理流體力學實驗室。他回憶說：「如果把所有條件都放入氣候模型中，電腦往往無法處理。我在現場看到氣候模型總是因此失效。」

真鍋淑郎和理察·衛舍拉德是普林斯頓大學實驗所成員，兩人早在一九六七年，就在一篇著名的論文中，假設如果二氧化碳增加一倍，全球溫度會上升三到四度。他們在無意間發現這個事實。真鍋說：「我想看看氣候模型對陰天、水氣、臭氧和二氧化碳有多敏感。所以我就改變溫室氣體、雲……自得其樂。我知道二氧化碳很重要，我改變正確的變項，就中了大獎。當時沒有人關心地球暖化，有些人還認為冰河時代快來了。」

真鍋認為「我一生中就以這篇論文寫的最好。」但是一九七〇年代中期，他又在氣候模型上創造重大突破。近年來，衛星資料提供測試愈來愈複雜模型準確與否的基準，在地球暖化的爭論中，一九六七年的假設「二氧化碳增加一倍會使地球平均溫度上升三到四度」已經成為全球暖化爭議中的導火線。

氣候行動主義興起

地球暖化研究團體的成員日增，和第一代氣候活躍分子結合，他們不重視科學實驗、而是重視政治行動。

一九七三年植物學家喬治·伍威爾在耶魯大學老校區發表地球暖化演講，聽眾中的大學生弗雷德·克虜伯當時自言自語說：「哦，如果這是真的，我們就麻煩大了。」十一年後，三十歲的克虜伯擔任環境保衛基金會總裁，極力鼓吹降低碳排放。

幾年後的一九七八年，華府環保團體地球之友主席拉飛·波莫南士閱讀一篇環境研究報告時，注意到如果增加煤炭用量會使地球暖化的句子。波莫南士說：「這一點不正確。」他開始研究這個問題，隨即發現名叫戈登·麥唐納的科學家，曾任職尼克森總統的環境品質委員會。波莫南士和麥克唐納會談兩小時後說：「如果我在市內辦理簡報，你可以幫忙嗎？」麥唐納同意，不久他們就在華盛頓特區四處舉行簡報。

簡報使國家科學院院長大為感動，因此設立專案小組，由查尼負責。查尼已經離開普林斯頓大學，加入麻省理工學院，成為美國最出色的氣象學家。查尼委員會在一九七九年提出報告，宣稱地球暖化的危機千真萬確。另外幾篇研究報告也有類似結論，其中一篇由傑森委員會提出，該委員會由著名物理學家和其他科學家組成，擔任國防部與其他部會的顧問，這篇報告的結論說：「證據明確顯示人類造成大氣層的變化。」這些科學家說，海洋「這個巨大、笨重的地球氣候系統飛輪」，可能延緩可見的氣候變遷。走著瞧的策略表示後果不堪設想。」

地球之友的簡報促使很多人參加一九八〇年四月的參議院聽證會。聽證會上最出風頭的是基林曲線。委員會主席麻州參議員保羅·桑加斯看完見證人提供的地圖，上面顯示美國東岸為海水淹沒，帶著諷刺的語調說，「這就表示邁阿密再見，科珀斯克里斯蒂再見、波士頓再見，紐奧良再見，查爾斯頓、薩瓦納，諾福克再見。從好處想，我們可以在國會大廈外面划船，在白宮南草坪釣魚。」

另一位參加聽證會的是美國環境品質委員會主席古斯·史佩斯。史佩斯要求一份報告摘要，準備送給政府決策部門。報告作者都是研究地球暖化一時之選，包括基林、雷維爾、伍威爾和麥

唐納，四人提出警告，「除非立即採取緩和措施，未來幾十年世界氣候會有嚴重暖化現象，短期內的氣候變化對人類沒有好處。」他們的看法和認為氣候暖化有好處的阿列紐斯與卡倫達不同。四人提出一個四點計畫：確認問題、節約能源、重新造林、低碳燃料，最後一點是指用天然氣取代煤炭。

史佩斯把報告送交白宮和能源部，遭到冷落。卡特政府困於第二次石油危機、伊朗革命和天然氣短缺，不僅限制使用天然氣，還鼓勵多用煤炭。

史佩斯並不灰心，在一九八一年環境品質委員會年報中，強調這個問題。不過故事到此暫告結束，因為競選連任的卡特敗給雷根。這時，有些環保團體開始把氣候變遷作為訴求主題。

雷根政府減少氣候研究經費，基林比誰都清楚這件事。雖然政府補助不穩定，位在夏威夷莫納羅亞的碳偵測計畫仍舊繼續進行，因此資金雖然受限，氣候研究並未中斷。

一九八〇年代中，因為從格陵蘭和沃斯托克地表下取得冰核，氣象變遷的科學研究獲得突破；沃斯托克是俄羅斯的南極研究站，因為實在太遠，一年只能補給一次。這些冰核是時間機器，也是氣候變遷理論的重要證據。冰核中的少量氣泡保留幾千年前的空氣，經由放射性碳分析可以判定其年代。辛苦的研究似乎證明一件事：工業化時代以前碳含量較低，在百萬分之二七五至二八〇間，一九七〇年是百萬分之三三五，一九九〇年是百萬分之三五四。

雷維爾自我放逐

聖地牙哥加州大學新成立時，雷維爾似乎是第一任校長的不兩人選。雷維爾是斯克里斯普斯海

洋研究所所長和基林的導師，一直主張成立這所大學，也打定主意想當校長。但他有強力對手，其中一位是頗具影響力的校務委員，這位委員阻撓雷維爾出任校長，這件事可能是雷維爾事業生涯中最大的挫折，所以他不想留在原有崗位上，決定像朋友所說的一樣，自我「放逐」。

這種放逐幾乎毫無不快，因為他出任哈佛大學教授，開了很受歡迎的一門課，就是大家戲稱「搖滾樂」、正名叫「自然科學二一八：人口和自然資源」的課程。

一九六八年秋天雷維爾告訴學生，「人類開採和燃燒化石燃料，只是把碳和氧恢復原有形態而已。只要再過短短幾個世代，人類會耗盡無數地質世代形成的物質，今天的二氧化碳濃度可能比過去幾十億年都高。」他說，未來人類如果繼續燃燒化石燃料，大氣層中會增加大量二氧化碳，結果可能是溫度升高、「地球氣候受到很大影響。」

不過，雷維爾考慮整個氣候系統，也提到「併發因素」，就是可能的補償效果。例如，高溫蒸發水分，形成陰天，「減少太陽能進入大氣層，因此溫度可能降低。」

他的結論和他一九五七年的論文類似：「大氣層中二氧化碳濃度升高，可以視為全球人類無意中進行的巨型實驗，這樣我們才能更深入了解氣候變化過程。」

雷維爾是很有吸引力的老師，能夠對環境問題提出很清楚的全球觀點。他的課程中有位學生叫做小亞伯特·高爾，是田納西州參議員亞伯特·高爾的兒子。如果說雷維爾對基林的二氧化碳濃度研究影響深遠，足以對氣候科學產生重大的影響，他的課也會對氣候政治造成深遠影響。高爾後來在書中寫到，「雷維爾博士是我唸哈佛時的傑出老師，讓我明白地球暖化問題，他的話意義深遠，像所有傑出老師一樣，影響我後來的人生。」

當時是一九六十年代末期。二十年後，到了一九八〇年代，高爾和其他國會議員決心把氣候變遷變成政治問題。一九八六年，高爾和另七位參議員在一封信中指出，二氧化碳對氣候變遷的影響使他們「深感不安。」他們希望看到真正的行動，而不是更多的學術研究。

第七章

前往里約

一九八八年六月二十三日是典型的華盛頓夏天，天氣不只是熱，而是很熱，氣溫接近攝氏三十八度，熱的讓人幾乎受不了。幾個月來，美國各地氣溫都很高，官方宣布一半國土出現旱災。報導指出：「乾旱已經變成中西部的生活方式。」這種情況代表新聞媒體會關注氣候報導。總之，六月二十三日是最適合參議院舉行地球暖化聽證會的日子。

這些聽證會顯示，氣候變遷已經成為政治問題。當天的聽證會主席是科羅拉多州參議員提姆·沃斯。沃斯和助理人員早在半年前的一九八八年一月，就開始思考怎麼找到一個大熱天，舉行氣候變遷聽證會。他問助理一年裡那一天最熱，有位助理認為六月底是不錯的選擇。（為了再次確認，這位助理打電話問哈佛大學某位經濟學家，這位經濟學家說不懂這個問題，但建議助理去查農民曆。）

後來大家傳說聽證會前一天晚上，會議室窗戶大開，空調關閉，確保聽證會當天會議室十分悶熱。沃斯後來說他故意「安排」，簡報室果然極為悶熱，證人額頭不停冒汗。此外，兩排電視攝影機燈泡擠在一起，保證會議室會熱的讓人汗流浹背。沃斯引用一句政治諺語說，「聽證會有

教育作用；有一台電視攝影機在的聽證會很有用；有兩排電視攝影機在的聽證會美妙之至。」對氣候變遷這種天氣問題，那天的情況真是妙極了。

沃斯聽證會的開場白說：「科學證據十分明確，國會現在必須考慮如何緩和或阻止暖化趨勢。」有幾位證人很有資格談論氣候變遷；第一位證人的發言內容最引人注目。大氣物理學家、太空總署紐約戈達德太空研究所所長詹姆斯·韓森說，氣候變遷不再是「學術」問題。韓森是著名氣候模型專家，氣候預測很準確。在悶熱的會議室裡，電視攝影機的燈光使溫度升高，韓森擦著額頭的汗，告訴在場參議員，大家期待已久的氣候變遷「訊號」已經出現，地球溫度的確正在上升，一切都符合電腦模型的預測。韓森說：「我們可以信心十足的說，溫室效應和已知的溫度上升之間存在因果關係。」後來他把交給《紐約時報》的證詞簡化為：「早就不該胡扯了。」《紐約時報》頭版刊載他的證詞和聽證會的故事。

另一位證人是氣候模型先驅真鍋淑郎，他回憶說：「大家對說日本腔英語的我沒有什麼印象，對韓森印象深刻。」

沃斯說，聽證會「變成大事件，很多人從沒見過這種情形，這次聽證會確實引起很多人的注意。」有位科學家總結說：「我沒見過過環境問題一夕從科學問題變成政治問題的事情。」

沃斯的聽證會顯示科學家和決策者之間加強互動。此外，全世界科學家針對大氣層建立的跨領域研究和網路也愈來愈多。雷維爾對這種改變感覺有趣，在一九八八年指出，「過去十年間討論溫室效應的論文多的難以想像；基林開創這項研究時，這個領域好比家庭工業，只有基林一位老闖兼員工；現在已經變成大企業，員工成千上萬。」

一九八五年，沃斯舉行聽證會三年前，一群科學家在奧地利阿爾卑斯山中的菲拉赫集會，證明全球氣候變遷科學網路已經出現。從超級電腦模型到冰河期空氣含碳量較低的一系列證據，使科學家相信氣候變遷對人類沒有好處，而且可能很快就會發生。他們的結論是「科學家和政治家對溫室問題的了解已經充分，因此應該主動展開合作。」他們提出的五百頁報告呼籲國際簽署控制碳排放量協議。

臭氣層破洞：行為榜樣

一九八七年的蒙特婁會議旨在處理大氣層遭受破壞的問題，會中達成新的國際協議，如果早個幾年，這種協議根本無法簽定。這種國際環保合作模式提供了有力的前例。

溫室氣體種類不少，不是只有二氧化碳而已，也包括甲烷和氮氧化物，還有一系列一九二〇年代末發展出來、名叫氟氯碳的人造氣體，氟氯碳在大氣層中的濃度很低，卻可以回收熱量；據估計，以分子作為比較，氟氯碳回收熱量的能力是二氧化碳的一萬倍，用量逐年增加，從噴霧罐中的壓縮氣體到冰箱中的冷卻劑，都要用到氟氯碳。

一九八五年，英國南極調查團研究人員運用美國太空總署的衛星資料時，發現一件令人驚訝的事情：南極上空臭氧層開了一個「破洞」。氟氯碳正在吞噬臭氧，使臭氧層變薄、變少。

威脅迫在眉睫。臭氧能夠吸收致命幅射線紫外線。臭氧一旦消失，世界各地會發生大量皮膚癌，地球上的動植物也會遭受毀滅性傷害，十分可怕，因此二十四國一九八七年就有以空前未有的速度，簽署限制使用氟氯碳的蒙特婁議定書。

蒙特婁議定書直接衝擊氣候變遷運動，確認溫室氣體濃度升高危害環境，促使大家相信人類活動可能傷害地球大氣層，也證明各國可以迅速合作，避免危害環境的共同威脅。對氣候激進份子來說，這只是地球暖化的預演而已。不過，兩者之間明顯不同，氟氯碳的範圍小多了，全球生產氟氯碳的公司不到四十家，其中兩家的產量占了一半，但是全球都在燃燒化石燃料。複雜的全球暖化問題到一九八八年夏變成政治問題。蒙特婁議定書的作法似乎是最可能的範例。

韓森的「金星併發症」

一九八八年六月那個大熱天的聽證會讓韓森變成科學界名人，對後來的氣候辯論產生重大影響。對很多政治人物和公眾人物來說，韓森變成科學界討論氣候的代言人，其他氣候科學家卻對他不滿，認為韓森格局過小。美國科學促進會發行的《科學雜誌》刊出一篇文章，取名《韓森和世人對溫室威脅的歧見》，指出「困擾韓森同事的是，韓森無法為自己的結論提供適當的證明，反映氣候模型科學不精確。」

聽證會後幾週，參議員沃斯寫信徵詢雷維爾的意見。雷維爾的回信和聽證會當天韓森等人的說法大相逕庭，重點是要謹慎，不要急著下結論。雷維爾說：「在暖化速度和程度變清楚前，我們要慎重其事，不要造成恐慌。今年夏天的高溫、乾旱是全球性氣候變遷造成，還是由於氣候反覆無常，原因並不清楚。我認為，再等十年預測會比較準確。」雷維爾致函另一位國會議員，說實際上可能要再等二十年，才能了解溫室效應是好是壞，「不管溫室效應是否發生，人類都應該採取行動。」他建議的措施包括加強運用核能發電、擴大森林面積，因為樹木會吸收空氣中多餘

的碳。他在寫給沃斯的傳說中說：「大量植樹可以迅速把排碳量降到相當安全的水準。」

韓森和雷維爾依據不同背景和觀點，處理暖化問題。雷維爾是地質學家，韓森先攻讀外太空星球、轉攻氣候。韓森的物理博士論文題目是金星大氣層，他利用一九七六年發射的環繞金星人造衛星進行研究時，正好一位博士後研究生請他幫忙，計算幾種種溫室氣體對大氣層的影響。韓森後來說：「溫室問題讓我著迷。」他把研究轉為地球大氣層和氣候模型圖繪製，也進行太陽系中其他行星的研究。

幾十年來，科幻作家都想像地球附近的其他星球有生命，但是透過望遠鏡觀察和無人衛星探測，證實火星和金星上的大氣層不可能容許生命存在。火星大氣層很薄、極為寒冷；金星大氣層充滿二氧化碳，極為炎熱，表面溫度高達攝氏四百八十二度。金星和火星研究有助於了解地球氣候。一九七八年，韓森和研究人員寫道，「如果同時研究地球和其他星球的氣候，我們會得到很多新知。」幾十年後他說，火星和金星大氣層的差異「正足以證明地球上溫室效應存在的事實。」金星扮演更直接的角色，金星大氣層充滿二氧化碳，地面上的火熱高溫正好是「地球溫室效應失控後」無法挽回的比喻。韓森把這種情形稱做「金星併發症。」這種比喻很有說服力。

炎夏和白宮效應

沃斯舉行聽證會後幾天，大氣層變化世界會議在多倫多舉行。這是眾多科學家、決策官員、政客和行動分子第一次帶著使命感和急迫感，集會討論氣候變遷。會中呼籲世界各國協調政策、大量降低二氧化碳排放量。

酷熱使大家更重視多倫多會議和沃斯的聽證會。

氣候變遷是長期現象，但韓森發現的現象在一九八八年夏天一再出現：極端的熱浪、普遍的乾旱、農作物歉收、美西森林大火、水位降低、流航行困難，一切似乎是聖經上的災難不斷發生。電力供應勉強滿足愈來愈多的空調需求……一切使更多的人擔心環境惡化。

九月一日的波士頓港可以感受到這種焦慮。一九八八年總統大選中，民主黨籍麻州州長麥可·杜凱基斯在民調中大幅領先副總統布希。杜凱基斯以環保主義者身分競選，布希想在麻州迎擊杜凱基斯及其中心議題。布希搭著遊艇繞行波士頓港，在記者和攝影機圍繞下，愉快的指著港內漂浮的大量垃圾，說這是杜凱基斯州長不盡職的表現（杜凱基斯回應說，垃圾是雷根政府拖延撥付清除費用所致。）布希宣稱自己是「共和黨的羅斯福」，承諾要當環保總統，他的政見中有一句名言，「認為我們無力解決溫室效應的人，可能忘了白宮效應。我打算改善溫室效應。」這是美國總統大選中，首次有總統候選人把溫室氣體和氣候變遷當作競選議題，布希還答應號召國際合作、共同處理問題。

高溫成為頭條新聞，不過熱浪和乾旱一向都是熱門新聞。一九二三年八月《時代週刊》報導：「另一波熱浪侵襲歐洲，阿爾卑斯山巨型冰河開始溶解，引發多次雪崩。」一九三四年六月《時代週刊》報導：「炎陽照射美國三分之一的國土，好像在燒烤、烘焙、燃燒，中西部熱到不可、乾到極點。」一九三九年六月《時代週刊》報導：倫敦「天氣熱到不行，下院的露台餐廳不得不增加十位服務生，提供冷飲給流汗等著用餐的顧客，柏林凱旋大道的柏油熱到發軟，禁止坦克車或履帶車行走。」一九五五年八月《時代週刊》報導：「一九五五年美國東部可怕的夏天會

讓很多人難忘，歷來最惡劣的乾旱、熱浪使整個地區萎縮。」

一九八〇年代末期以後，大家寫到熱浪和乾旱造成嚴重損害時，也會提到二氧化碳和氣候變遷與全球暖化的相關性和警訊。隨後的幾個月裡，《時代週刊》、《新聞週刊》、主要財經雜誌都報導地球暖化，連《運動畫報》都刊出「死亡氣候」的標題，美國人終於注意地球暖化問題。

但是，一九八八年的炎夏過後，大家就淡忘氣候異常的急迫性。布希坐船巡視波士頓港後不久，《紐約時報》科學記者為一九八八年的炎夏做出結論，指出韓森的「訊號」不像六月二十三日聽證會上說的那麼清楚，一九八八年熱浪侵襲的夏天不是最熱的，在有紀錄的五十八年中只排名第十一熱；一九八八年也不是最乾旱的年度，最乾旱的是沙塵暴肆虐的一九三四年，當時中西部北半部號稱「新的美國撒哈拉沙漠。」這位記者引用氣候科學家的話說，「短期內我看不到氣候的重大變化，也不覺得我們應該打包移居加拿大曼尼托巴省。」聯合國大會九月討論氣候變遷時，有代表說，「很多人仍然認為氣候變遷好像科幻小說。」

余契爾夫人

這年九月，討論氣候變遷更重要、更驚人的聲音出現了。主要工業國家領袖中，最先對這個問題提出政策演說的是英國保守黨首相余契爾夫人。余契爾夫人是牛津大學化學系畢業的政客，氣候變遷問題相當吸引她。她從政前，曾經擔任萊昂斯食品公司化學研究員，研究蛋糕糖霜為數年，科學背景使她很快就了解氣候變遷問題。

兩年前，余契爾夫人曾經和左派煤礦工會進行殊死戰，煤礦工會想切斷煤炭供應，造成停

電、癱瘓英國。這次鬥爭是她擔任首相十二年中的決定性時刻，她的勝利打破造成英國經濟長期癱瘓和衰退的產業關係僵局。使用北海含碳較少的天然氣發電，可以確保煤礦工會再也無法控制能源、癱瘓英國經濟。

一九八八年九月二十七日，她在倫敦魚販會館對皇家協會發表有關氣候變遷的演說。她認為氣候變遷的演說會引起眾人注意，成排電視攝影機的燈光可以照亮陰暗的魚販會館，讓她可以看講稿。但她既失望又驚訝，現場連一台電視攝影機都沒有，會場暗到她無法看講稿，最後，有人拿來一盞燭台，才解決問題。

一切就緒後，余契爾夫人開始演講，她說：「好多世代以來，我們認為人類的努力可以穩定世界系統和大氣層，但是由於世界在短期內發生劇烈變化（人口、農業、化石燃料的使用），人類無意間對地球進行了大規模的實驗」，影響如何還無法斷定。她警告：「我們無法在實驗室內進行受控制的試驗。很多事情還不清楚，無從做決定，但是我們需要密集的研究計畫和很多有用的科學。」余契爾夫人信守諾言，提高英國政府研究氣候的經費。

首相演講居然沒有電視台採訪，的確顯示氣候變遷不是民眾關心的議題。

政府間氣候變遷委員會和不可或缺的要人

但一九八八年結束前的十一月，一群科學家在大眾不太注意的情況下，採取會左右今天大家看待氣候變遷觀點的決定性行動，在日內瓦成立政府間氣候變遷委員會（IPCC）。國際間很多委員會、會議和計畫，政府間氣候變遷委員會的成立可能不為人知。不過隨後二十年裡，這個委員

會逐漸由沒沒無聞，變成引導各國討論氣候問題的機構。這個委員會出自世界氣象組織和聯合國開發計畫署，實際上不是一般的委員會，而是自治組織，是由跨領域的科學家利用比較低廉、比較進步的通訊科技組成。

政府間氣候變遷委員會確實有一位「協調長」，就是瑞士籍氣象學家伯特·布林。布林連續將近五十年，長期主導成長中的國際氣象組織，是氣候研究上「不可或缺的要人」。布林集召集人、發言人、會議主席、編輯、作家、裁判、調解人、科學政治家、國際政策企業家等職務於一身。他原本是數學家，專門研究大氣層環流，一九五〇年代期間，他在普林斯頓大學，為馮紐曼和查尼撰寫最早的氣象預測電腦程式，回瑞士後，他改研究地球化學，成為二氧化碳和碳循環專家。一個研究委員會孳生另一個單位，又催生另一個單位，單位名稱一個接著一個，愈來愈長，布林幾乎每個單位都參加，對難解的術語也運用自如。他在準回憶錄中寫道：「身為CAS主席，我提交ICSU一份報告，供IUGG緊急、仔細評估之用，再由ICSU送交協辦研討會的WMO、WMO未來在創設GARP時扮演重要角色。」

設立政府間氣候變遷委員會的計畫早在一九八八年春天就敲定，韓森的證詞和多倫多會議卻使布林大吃一驚，他認為證據應該仔細評估，政策不該走在已知事實之前。善於協調與凝聚共識的布林說：「很多科學家熱烈討論韓森的證詞，大都強烈反對韓森的說法。顯示地球升溫的資料沒有經過審查，也沒有足夠證據顯示溫度極端上升增多。我覺得，如果不先建立評估現有知識的嚴謹方法，科學家和民眾的討論可能亂成一團。」布林也擔心多倫多會議降低排碳的建議「不切實際」，他輕描淡寫的說：「我們顯然需要更確實的評估。」

政府間氣候變遷委員會透過討論會、論文、對話和一再檢討，設法了解已知和未知的氣候現象。丁達爾和基林單打獨鬥式大氣科學研究的時代已經過去，科學研究是多方面、跨學科、跨國界的工作，布林現在是研究氣候的中心人物。

這個委員會必須配合聯合國大會開會時間，在一九九〇年提出第一份報告，準備的時間所剩不多。這年美國新任國務卿貝克在華盛頓舉行的聯合國預備會議中致開幕詞，呼籲為氣候變遷建立「不後悔」的政策，也就是說，即使風險還不明朗，國際社會仍應謹慎行動，以免風險成真。布林樂於聽到貝克的言論，卻認為不該「急忙採取行動。」

吵鬧的松茲瓦爾

政府間氣候變遷委員會要提出報告真是困難重重。一九九〇年八月下旬，政府間氣候變遷委員會提交聯合國報告必須交出前，科學家和決策官員在瑞士北部的松茲瓦爾市開會，展開一週困難重重的激烈討論，連個別字眼都有爭議。例如，「安全」是什麼意思？到了週五下午，歧見仍然存在。如果大家意見不一致，政府間氣候變遷委員會就無法在聯合國大會中提出具體建議。

讓大家意外的是，一個重大危機可能破壞他們的會議進度：下午六時，聯合國翻譯人員不想加班，逕自下班。如果沒有翻譯人員，各國代表無法溝通，會議會中斷，氣候變遷報告和決議會無法提報聯合國大會。原本堅持整星期都說法文的法國籍會議主席，同意改說英文，大家才發現他的英文十分流利。

會議改以英文繼續進行，但是進度緩慢。俄羅斯代表抽著菸，皺著眉頭，一言不發，好像很

生氣，如果他不同意，總結報告會出不來，他也沒有參加討論的意思。

最後美國代表團一位懂俄語的科學家跟他談話後，才發現這位俄國科學家不懂英文，不可能在不了解的內容上簽字。於是這位美國科學家充當譯員，最後俄國科學家同意文件內容，協議終於達成。政府間氣候變遷委員會總算在限期內提出報告。

一九九〇年十月，政府間氣候變遷委員會把首次評估報告送交聯合國。明確回答地球是否暖化的重要問題，肯定地球正在暖化。暖化是人類造成的嗎？報告說，暖化「大致和人為溫室效應的氣候模型圖相同。」問題是，暖化與「氣候自然變化」也大致相同。因此，人類大概需要十年以上的時間，才能「經由觀察，發現是否有明顯的人為溫室效應。」第一分政府間氣候變遷委員會報告指出，現在還無法判定人類是否造成暖化。

這種結論留下一個重大風險：布林指出，一旦問題釐清，未來恐怕要付出更大的力量，才能解決氣候變遷問題，問題也會更難處理。

聯合國大會針對政府間氣候變遷委員會的第一份報告，要求各國達成限制溫室氣體、主要是限制二氧化碳的協議，為未來召開地球高峰會做準備，地球高峰會的正式名字是要在里約舉行的聯合國環境暨發展會議，隨後複雜、爭議多端的國際協商變成扣人心弦的緊張故事。

開發中國家第一次認真參與氣候討論，但是不接受限制排碳量，以免能源使用和經濟成長受限。工業國家長期燃燒煤炭、石油和天然氣，應該為大氣層中人為排放的碳負責，也應該負責改善問題。為什麼開發中國家不能獲得成長的機會？開發中國家激烈反對把大量排碳的森林砍伐列入會議事項，因為這樣會限制開發中國家的行動自由和發展。

已開發國家壁壘分明。以歐洲國家為主的國家以不能浪費時間為由，主張訂出降低排放量的具體時間表和目標；有些國家卻希望慢慢進行，提供注意事項，卻不設定具體目標，這些國家在一九九〇年代初期的衰退期間，更不希望經濟發展受到影響。

美國大致主張慢慢進行，因為布希政府內部就有歧見。氣候變遷已經從科學問題成為政策問題。未來一、二十年內，布希政府的內部爭論會變成固定模式。

去不去里約？

布希總統去不去是大問題。他是否參加一九九二年六月在里約舉行的地球高峰會，或是留在國內？布希依照競選諾言，已經把溫室氣體問題帶到白宮。但是「白宮效應」不如意料，反而在布希政府中激起劇烈爭論。

威廉·賴利是環保局長，從擔任保育基金會和世界自然基金會主席以來，擔心氣候變遷的問題已經十年，積極主張設定減排目標，更強烈要求布希前往里約。賴利認為，布希年競選時承諾要把溫室氣體問題帶到白宮，是「重要大事，布希說過這種話，這是政府的政策」；賴利還說：「我常常應邀赴宴談論這個問題。」

但白宮其他官員告訴布希，減碳會使衰退中的美國經濟承受「龐大風險」。總統經濟顧問委員會主席警告，總統可能拿「美國的經濟作賭注。」美國關於適應氣候變遷代價的討論就是從這時開始。反對布希去開會的人強調，溫度改變既不确定、也缺乏足夠證據，無法支持地球暖化的假設。政府內部的批評者指出，精密電腦模型圖只是電腦圖而已，政府間氣候變遷委員會的報告

也指出，人類是否要為氣候變遷負責尚無定論，如何設定減碳目標？有人把氣候問題當作反資本主義和反市場系統的共產主義，就像一位批評者所說：「氣候問題是長了紅色樹根的綠樹。」

政府裡的主要反對人士是白宮幕僚長約翰·蘇努努。蘇努努曾經擔任三屆新罕布什爾州州長，曾經為了西布魯克核電廠，和反核行動分子發生號稱「美國最激烈的反核電鬥爭」，他認為，氣候變遷行動分子起源於一九七二年的羅馬俱樂部報告，是「反成長、反發展群眾」，但這分根據模型推測情境的著名報告預測錯誤，誤以為經濟成長會因為人口過多和自然資源缺乏而消失。

蘇努努是麻省理工學院工程博士，他後來說：「從政以前，我靠製作電腦模型圖為生，你要什麼模型圖都辦得到。如果有人認為模型圖準確，這個人腦筋一定有问题。」蘇努努懷疑電腦模型圖發出的訊號，還說，電腦模型圖沒有涵蓋海洋是嚴重缺點。蘇努努支持大量增加經費，進行氣候研究，卻在布希政府中帶頭反對氣候變遷理論，也最反對布希前往里約。

氣候變遷根本不是布希政府最大、最迫切的問題。布希大部分任期中充滿重大危機，包括東歐共產主義瓦解、蘇聯崩潰、伊拉克入侵科威特和波灣戰爭。布希和團隊展現高超技巧，結合盟邦，度過所有危機。波灣戰爭於一九九一年三月結束；蘇聯於一九九一年十二月解體。

布希重視盟邦，但歐洲盟邦也對他施壓。英國首相奈契爾夫人要求內閣官員上一整天氣候變遷課程；歐盟環境執行委員因為布希對碳排放標準和時間表「懷有敵意」，公開指責布希；德國主張美國應該接受「穩定排放碳的承諾。」

里約的冗長會議

里約會議的日期快到了，布希尚未決定是否參加。

記者在記者會中問布希：「你因為推銷自己是環保總統而當選，如果你不參加里約會議，不會覺得難堪嗎？」

布希答說：「我認為問題總是可以解決。我希望會前獲得協議，以免會議議而不決。」

一九九二年四月，溫室氣體會議協議終於定案，呼籲穩定溫室氣體，但是沒有設定目標。美國可以接受這分協議，布希要前往里約，另外還有一些迫切理由。布希自認是環保人士，希望效法共和黨的羅斯福。他也明白，其他協助他完成諸多重大事功的主要盟邦領袖也會前往里約，布希不想讓他們失望。此外，國內政治因素也是原因之一。一年多前的一九九一年三月，由於波灣戰爭戰勝，布希在民調中獲得最高九〇%的滿意度。不過，經濟衰退導致布希聲望直線下降，他不再是果斷的戰爭領袖，只是「高高在上」的總統。

一九九二年春天，里約會議即將召開，十一月的總統大選也快來到，布希每天都遭受兩位對手的猛烈攻擊，一位是從事資料處理業的億萬富豪、獨立候選人羅斯·裴洛，另一位是緊追在後的民主黨候選人、阿肯色州州長柯林頓。布希的環境政策每天都遭受攻擊，柯林頓宣稱布希對環境犯了「嚴重錯誤，獨自阻撓環境改善。」如果布希不參加里約會議，攻擊只會更加嚴重，他自稱是共和黨的羅斯福的話也會全部破功。

這時布希政府內部發生變化，一向反對布希前往里約的蘇努努離職。

外交大混戰

因此布希前往里約，參加規模龐大的里約高峰會，加入大家所說的「十二天吵鬧外交大混戰」，加入一百六十多個國家和國際組織領袖、一萬名政府官員、二萬五千位活躍分子、非政府組織人士、企業領袖和記者的行列。很多非政府組織也參與談判、開創先例，有人同時舉行類似的地球高峰會，有人在會場外抗議，有些活躍分子在俯瞰里約的塔糖峰懸掛巨型橫幅標語，指責會議出賣人類利益。

會中少不了長篇大論的演說，如果根據鼓掌和熱烈氣氛判斷，最受歡迎的國家領袖是古巴總統卡斯楚，他展現自己擅長的長篇大論演說，指責資本主義和消費主義是環境災難的根源，把自己和聽眾的情緒鼓動到如癡如狂，不顧鐵幕崩潰後，東歐和前蘇聯環境嚴重惡化。

布希試圖回應這些長篇大論，反擊說：「美國的環保立場絕對不輸任何國家，我不是來這裡道歉的。」不過，他的話不管用，《紐約時報》報導，大家認為布希是「里約會議的黑武士達斯維德。」布希不是唯一遭受這種待遇的人，贊成簽署氣候條約的美國官員賴利抵達里約時，當地報紙刊登他的相片，標題是「魔王降落里約。」

從地球高峰會第二天到最後一天期間雖然吵吵鬧鬧，各國還是簽署氣候變遷框架公約。第一位簽署人是布希，另有一百五十三國領袖也在公約上簽字。幾個月後，美國參議院批准公約，成為第一個批准公約的主要工業國。現在幾乎所有國家都遵守這項國際公約，氣候變遷問題已經變成全球要務。

框架公約正式運作

氣候變遷框架公約目標遠大，可能遠比簽署人了解的還遠大。公約的目標是「穩定大氣層中溫室氣體濃度，防止人類危險行為干擾氣候系統。」公約特別強調溫室氣體起源於人類燃燒木炭、石油、天然氣和砍伐森林。

公約規定，已開發國家須承諾控制溫室氣體排放；開發中國家只要密切注意排放即可。已開發國家同意「額外提供新財源」，協助開發中國家降低排放。公約中也引進「聯合執行」的觀念：各國應敦促國內企業和其他國家類似企業合作。總之，這分公約強調處理氣候變遷需要很多年，甚至幾十年時間。公約的執行顯示國際協商性質已經改變，非政府組織獲得認可，在會中多少擁有保障席次。

美國政府專家估計，透過新的節約能源方案和環境工程技術，二〇〇〇年美國的排放量可以控制在一九九〇年的水準。賴利說：「這點不對，我們不能期望再看到一九九〇年代的驚人成長，一九九〇年代的排放量增加了十一%。另一方面，如果當時已經有目標，我們會立法使美國更有效的降低排放量。」

里約的氣候變遷框架公約是重大成就，原因不是這項公約定出減排目標，因為除了規定二〇〇〇年排放量降為一九九〇年水準的「目標」之外，各國並沒有制定其他目標，而是因為談成公約本身是重大成就。四年前，氣候變遷問題還沒納入美國政治議程中，很多國家也一樣。但不到十年內，原本只是科學界沒有定論的看法，已經變成國際社會公認影響人類和地球的迫切重大挑戰。

戰。

通往里約之路確實因難重重；二百多年前，氣候問題發軔於瑞士阿爾卑斯山，只是少數研究人員對冰川和神祕冰河期的熱衷，現在註定會成為未來重要的能源問題。

造市問題

創造市場的想法應該遭到道德譴責。要創造交易污染的市場？准許企業像出售商品一樣出售污染「配額」？為環境惡化訂出價格？真是匪夷所思！

很多環保組織、學者和其他人對這種革命性想法，對利用市場交易機制，解決環境問題的想法，都有這樣的反應。

一位傑出政治理論家用哲學術語，表達反對，說：「把污染變成可以買賣的商品」，等於免除污染的「道德惡名」；某個環保組織首腦說的更直接：「經濟學是先進的腦病形式。」

一九八〇年代末期到一九九〇年代之間，利用市場機制控制污染的爭論達到最高峰，上述說法正是當時多數人的反應。經濟學家討論如何運用經濟法則解決污染問題時，產生了這種「腦病」的想法。包括經濟學家、環保分子和官員在內的少數「政策企業家」，基於傳統辦法僵硬、無效，市場機制或可解決問題，想利用市場、處理氣候變化的構想。這種市場機制深入叫做排污權交易，是處理氣候變遷問題「比較好的」重要工具，而且不會令人討厭。

大家對排污權交易期望很大，希望這種交易改造能源市場，改造每個人日常生活中利用的

能源性質和每天所做的很多選擇。這一切如何產生？原來這種想法起源於經濟學家凱恩斯所說的「三流學究」，政治人物、國會議員和一般人他們的想法影響，卻不知道自己正在傳播無名小卒的思想。

學究頭頭

羅納德·柯斯是這些學究的首腦，但他其實最不可能擁有這個頭銜。柯斯一九一〇年出生，從小罹患雙腿「無力症」，別人却認為是小兒麻痺症，因此一開始進入殘障班就讀，靠著學習藥瓶上的標籤識字。父親是郵局職員，十一歲時，父親帶柯斯去看顯相學家，這個人為增強柯斯的信心說：「你可能低估自己的能力。」這句話產生效果，隔年柯斯轉入正常班級。他用功讀書，彌補已經浪費的時間，最後獲得倫敦經濟學院的博士學位，一九五一年移民美國。

四十年後的一九九一年，柯斯八十一歲時，因為兩篇極有影響力的論文，獲得諾貝爾經濟學獎。就諾貝爾經濟獎得主的作品來說，兩篇論文除了簡單的算術外，明顯缺乏數學運算，但論點有力。其中一篇是一九三七年出版的《企業性質》，柯斯在文中處理一個非常基本的問題：為什麼大家在市場經濟中要成立公司、而不選擇當個體戶？他說原因是「交易成本」，公司的成本較低，工作比較容易完成，效率也比較高。

第二篇文章「社會成本的問題」是柯斯和米爾頓·傅利曼討論後寫成，刊在《法學與經濟學刊》。這篇文章是經濟學史上最多人引用的文章，久而久之，也成為運用市場力量解決環境問題的基礎。柯斯的想法出自研究國營公司及其規章和差勁積效的心得，主張市場和訂價制度效率

高於政府直接介入和控制。柯斯引用外部效應作為理由，所謂外部效應就是他所說的「有害結果」，也就是經濟活動產生的無用污染。

外部效應問題就是不好的副作用或結果，長久以來，經濟學家一直致力解決這個問題。二十世紀初，經濟學家亞瑟·皮古主張，處理外部效應（單價內未包含外部效應成本）最好的方法是由政府出面介入，對外部效應課稅，把這種稅當做過失稅。一包香煙一美元的稅或汽油課徵五十美分的稅就是皮古式稅收。柯斯認為皮古的方法全部錯了，因為過度相信政府的智慧，也不了解資產的角色。

柯斯的例子集中在污染法律問題上，其中有幾個例子可以上溯到中世紀。例如，中世紀地主為了獲取兔皮和兔肉，在自己的土地上飼養「家兔」，如果兔子鑽入鄰居土地，任意繁殖，破壞鄰居土地，或鄰居燒煤造成的「煙害」，如何處理？這些都是鄰居會提出的產權和相關價值問題。柯斯認為，解決之道不是透過管制或租稅，而是透過市場。柯斯寫道：「所有解決方法都有成本，政府直接管制的效果，不見得會勝過透過市場或企業解決問題。」

柯斯其實從來沒有說過交易污染權，但文章中存在這種想法。別人會把他的想法用在環境問題上。加拿大經濟學家約翰·戴爾斯一九六八年出版的《污染、資產和價格》一書中指出，清除五大湖污染最好的方法是「買賣污染權的市場。」戴爾斯用英文提出論點；幾年後，哈佛大學博士生大衛·蒙哥馬利用數學方程式提出類似觀點。兩個人都得出相同結論，都問道：如果溫室氣體排放比照貨幣、石油、股票、債券或不動產交易，當成財產或準財產一樣買賣，會不會比較可行、處理起來比較有效率、成本比較低廉？

一九六〇年代末期和一九七〇年代初期，污染問題愈來愈受政治人物重視，經濟學家逐漸把注意力一度不受關心的污染問題上。一九七〇年，尼克森政府成立環保署，領導美國進行「反污染戰爭」代表更嚴格的環境管制時代來臨。這種管理通常採取行政控制和微管理形式，具有詳細標準、命令和條件，對特定技術詳細規定和嚴格監督，例如，規定每台機器每小時最高可排放的廢氣量。這種方法稱做「命令和控制」管制，類似蘇聯和附庸國中央計畫、沒有效率又蠻橫的「計畫經濟」

一九七〇年代末期，美國聯邦政府和若干州開始進行以市場為基礎的小規模實驗。

我比較老，記得……

一九八〇年代初期，因為鉛有毒性，汽油中逐漸不添加鉛。早期的引擎一直苦於「敲擊聲」，聲音偶爾大到令人無法忍受，嚴重傷害引擎。經過多年研究，一九二〇年代引進四乙基鉛作為汽油添加劑，終於解決爆震問題。一直到一九六三年，大家還讚揚四乙基鉛「無疑是二十世紀最重要大技術革新之一。」

不到二十年內，大家認為鉛威脅人類健康，不管鉛對引擎多有價值，都不能再用。雷根政府時期，有一次內閣會議的主題是如何儘快禁止用鉛，雷根搖頭說，他十幾歲時，大家讚揚四乙基鉛大力提升汽油和汽車性能。不過他環顧大家時，閣員露出茫然、無法理解的眼神。雷根聳肩說：「我想這裡只有我年紀大到還記得這件事。」

在含鉛汽油逐漸退出市場的計畫中，煉油業者彼此可以交易「用鉛許可證」，讓提早不加鉛

的業者獲得經濟上的獎勵，而不是為業者訂出詳細的規定，這是以市場為基礎的解決之道。無鉛汽油方案完成時間遠比預期快。計畫進行五年後的一九八七年，含鉛汽油消失，耗費的成本比預期低很多。未來降低污染計畫似乎可採用無鉛汽油模式，這種市場方法或許值得借鏡。

一九八八年美國總統大選中，兩位參議員都把改善環境的「新想法」，納入競選活動中。自由派民主黨員提姆·沃斯是一九八八年地球暖化聽證會主席，約翰·亨氏是溫和派共和黨員，都是本黨環境問題的領導人物，兩人合力推動「八八計畫」，聘請哈佛大學年輕經濟學教授羅伯·史達文斯，擔任專案經理。史達文斯說：「他們需要新的意見，因此聘請經濟學家，以便得到經濟方面的意見。」

「八八計畫」認定：很多環境和能源問題「用市場力量解決問題」比較進步，「經濟獎勵法」比「強制技術解決之道」便宜、效果較快、較好。氣候變遷是目標表中的一項。

酸雨的嚴峻考驗

「八八計畫」可能已經提出利用價格和市場方法的概念，隨後一九八八年的總統大選結束，涵蓋酸雨的嚴峻考驗即將出現。今天倡導建立氣候變遷政策的人最常引用的故事，就是酸雨處理的故事。

酸雨指燃煤發電廠排放的二氧化硫進入大氣層，形成硫酸。酸雨在歐洲若干地區是重大問題，據說酸雨摧毀了德國黑森林中一半的樹林。

美國东北部和加拿大東部把酸雨視為重大空氣污染問題。酸雨不是一般地方性污染，不能用地方性標準處理。美國中西部燃煤發電廠高聳的煙囪，把二氧化硫送大大氣層，飄過州界和國界，摧毀森林，使湖泊酸化，害死魚類，腐蝕建築物。雷根政府末期，七十多項酸雨法案送交國會，但不管這些法案差異多大，沒有一項立法成功。因為酸雨問題，美加兩國嚴重摩擦；加拿大總理開玩笑說要對美國宣戰。杜凱基斯和布希在大選期間都明確保證要降低二氧化硫排放量。

布希當選總統後不久，總統顧問伯伊登·葛瑞邀請史達文斯，從哈佛大學來到白宮，商討如何實施市場方法，防止酸雨。葛瑞讀過「八八計畫」報告，樂於把市場方法應用在環境問題上，以便降低成本。葛瑞在雷根政府時代，曾從事淘汰含鉛汽油的工作。除了經濟學家的著作外，葛瑞也受利用市場方法降低污染的法律學者影響，其中最有名的是布魯斯·艾克曼、和曾擔任環保基金會主席的理察·斯圖亞特。

成本最低的解決之道

葛瑞組成顧問小組，成員包括預算管理局的羅伯·葛瑞迪，總統經濟顧問委員會經濟學家羅伯·哈恩——他在加州理工學院攻讀時，博士論文主題是以市場方法解決洛杉磯的霾害。這個小組決心設計成本最低、容許公用事業交易廢氣排放量的系統。葛瑞後來回憶說：「美國四分之一廢氣管制費用是清潔空氣法案造成的，讓美國人降低成本，最好的方法是降低守法成本。」

怎麼做政府才會接受？

主張應用市場方法解決西部缺水問題的葛瑞在《華爾街日報》上，看到環境保衛基金會總裁弗瑞·克虜伯寫的一篇文章，因而邀請克虜伯參加酸雨討論會，告訴克虜伯，如果環境保衛基金

會擬出通過過國會的方案，他會把這種方案送交總統。克虜伯後來又引進兩位同事，一位是律師約瑟夫·高夫曼，另一位是鼓吹市場方法的經濟學家丹尼爾·杜德克。

不過反對聲浪高張。阿帕拉契山和中西部（工會礦工開採高含硫量煤炭）的眾議員、和西西部（非工會礦工開採低含硫量煤炭）的眾議員對峙十年，為了是否清除酸雨僵持不下。何況除了環境保衛基金會外，幾乎所有重要環保團體都堅決反對排放交易，認為排放交易是「污染許可證」，是違背常情、異端、不道德、旁門左道、完全不能接受的作法。環境不應該「出賣」。

另一個重要反對團體是官僚體系。葛瑞的副手約翰·史密茲回憶說，環保署「並不熱心，環保署官員已經摸清中西部每一家大廠的底細，知道每家電廠需要什麼技術……我們主張完全不同、由市場決定的觀念。」但由市場決定表示「決定權由官方移轉到民間」，主管官署不必決定技術，要求電廠遵守規定，應該報告監督市場。

葛瑞和小組成員確信市場導向解決方法會容納極大的創新自由，和命令與控制方法最大的差異，在於擬議中的法案會訂出績效和結果，卻不規定特定技術和程序。高夫曼和杜德克指出，市場導向法會「駕馭複雜、分散、不斷改變的資訊」，獲得最好、「最省錢」的結果。

酸雨立法證明跨黨派合作可以成就大事，因此是重要經驗。對共和黨總統布希和參院多數黨領袖、民主黨的喬治·米契爾來說，酸雨法案都是最重要問題，不過，法案立法前，兩黨之間的較勁仍然相當激烈。

重大政策考驗

一九九〇年十一月十五日，布希簽署清潔空氣法修正案。該法第四篇規定降低酸雨的廢氣交易系統，這是重大勝利，因為一年前，社會還無法接受這種逐漸降低排放廢氣上限、逐年降低排放廢氣限額或許可，使許可證愈來愈少、愈來愈貴，獎勵工廠減排的做法。很多人把這種系統叫做廢氣排放許可交易，比較樂觀的人認為這是「重大政策試驗。」

廢氣排放許可交易辦法緩慢地步後，變成電力事業的標準做法，創造可觀成果。和管制相比，交易使排放量大減、速度大增、成本大降。到二〇〇八年為止，廢氣排放量比一九八〇年大約減少六〇%。廢氣急速減少還帶來肺病減少、健保費用大為節省的其他好處。

這種成果對解決環境問題影響很大。麻省理工學院研究小組斷定：「美國沒有一種改善環境計畫能夠創造這麼多成果；其他命令暨管制式計畫也不可能創造類似成果。」柯思的理論發揮功用：證明市場方法可行。短短十年內，利用市場方法解決污染的做法由不道德、異端邪說，變成幾乎人人認可的明智作法。總之，氣候變遷政策出現爭論時，大家就會一再引用二氧化硫排放管制的成功案例，作為佐證。

廢氣配額交易現在改名為排污權交易。

二氧化硫計畫為氣候變遷排污權交易提供可信度並非偶然。支持者認為，一九九〇年的酸雨計畫是未來改善氣候變遷的「典範」。酸雨計畫成功，成為愈來愈多環保團體說服國會通過氣候變遷政策的依據。高夫曼說：「我們會在幾年內，完成清潔空氣法立法，然後加速推動一九九〇

年代的氣候變遷政策。」

高夫曼又說：「我們用這個信念維持土氣。」

一九九〇年代初期，二氧化碳硫廢氣排放交易正在推行，跨政府氣候變遷委員會忙著準備第二套五年氣候變化科學「評估報告」。準備流程包括蒐集所有研究報告，由全球科學家檢查、檢討，理解和討論。第二套評估報告多達二千頁，參考的科學論文有一萬篇。

瑞典氣象學家布林再次負責準備這份報告，他小心翼翼，確保結論不會超出已知事實。他說：「我們很難知道對未來變化的預測究竟多可靠」，他擔心會產生誤會。例如，對大眾或政客談論氣候變遷問題時，「預測」一詞可能「傳遞錯誤印象」。

有些科學家打算宣稱「人類對氣候的影響可觀」，但布林必須堅持立場，他提議改用「影響看的見」。因此，跨政府氣候變遷委員會一九九五年的第二份報告宣稱，「大部分證據顯示，人類對全球氣候的影響看的見。」這句話後來成為名言。這份報告也預測，照目前的情形發展下去，迄二一〇〇年，地球溫度會上升攝氏二度。

針對跨政府氣候變遷委員會的報告，《科學雜誌》以「這是官方報告」做為標題指出，這份報告已經發現「人類引起氣候變遷的新證據」。

已開發國家對上開發中國家

跨政府氣候變遷委員會可能增加幾分信心和知名度；卻也意味爭論增加。第一個爭論就是已開發國家與開發中國家之間的「南北對抗」死灰復燃。一八六〇到一九九〇年間，七五%二氧化碳

碳累積排放量出自工業國家，但工業國家人口只占世界人口二〇%。因為碳排放限制愈來愈可能成真，開發中國家對使用碳氫化合物的使用限制和經濟成長可能受限的後果發出反對的聲浪。中國發函布林，忿怒指責限制開發中國家排碳造成衝擊。中國宣稱：「中國對這種缺乏公平、公正的科學評估，感到遺憾。」因此這份報告進行部分修正，希望緩和開發中國家的情緒。

一九九五年各國在柏林開會，檢討里約會議的成果，制訂「規定」，做為即將舉行的京都會議討論基礎，會中已開發國家和開發中國家的衝突變成重要問題。會議主席安吉拉·梅克爾幾年來只是東德物理化學家，從來沒有想過未來職業會有變動，一九九〇年德國突然統一，使她躍入政界，旋即成為基督教民主黨主席；柏林圍牆倒塌五年後，出任德國環境部長。她在柏林會議開幕式上致辭，強調工業國家「應帶頭證明，願意承擔保護地球氣候的責任。」

這就是柏林會議的結論：工業國在第二階段全球氣候管制接受特定目標，開發中國家可以免除責任。這種「差別責任」會變成全球氣候變遷政治中更重要的戰場。

第二個爭論是布林所說政府間氣候變遷委員會流程兩極化問題。氣候變遷已經成為政治問題，該委員會評估的影響愈來愈大。依照該委員會的建議，世界經濟的能源基礎必須徹底改變，這樣做可能嚴重衝擊經濟成長與人類福祉。科學界、能源業和能源消費者的批評者一向認為，氣候變遷科學、自然和人為力量對氣候的相對衝擊中的不確定性，遠比政府間氣候變遷委員會認定的不確定性大多了。批評者指出，該委員會報告中綜合意見和摘要意見的看法並未代表眾多研究結果。有人質疑主要參與者在科學上不夠客觀，也質疑整個流程的合理性。有些人甚至說，二氧化碳排放量增加對人類有益，因為農作收成會增加，花草會更茂密。有人質疑人為因素占碳排放

量比率不太，不可能成為決定全球氣候系統的重要決定因素。

參與該委員會會議的人反擊批評者是無知的騙子、工業駭客和「垃圾科學」家。布林一向謹慎，卻毫不掩飾心中的鄙視與憤慨之情，指責「懷疑者缺乏處理氣候變遷問題的科學知識，所做的膚淺分析幾乎總是採用不適當的科學方法」。不久之後，這些「懷疑論者」會遭到進一步的指責，變成「氣候變遷否定論者」。很多人經常認為，麻省理工學院氣象學教授理察·林仁是這種否定論者，林仁讚揚政府間氣候變遷委員會的科學研究，卻堅持大家無法證實人類應為溫室效應負責，而且大家對雲霧之類氣候要素的認識太少。二〇〇七年，布林寫道，林仁的研究符合「正統科學方法」，卻表示「我們都知道不能僅憑觀就預測未來，他的若干基本程序和次級回饋的描述仍然不夠清楚。」

如果該委員會仲裁氣候變遷與風險的信譽和影響持續增加，上述爭議幾乎一定不可能出現。該委員會第二次評估後來成為京都會議的架構；規模驚人的京都會議依據一九九二年里約地球高峰會的承諾，制訂執行計畫，代表氣候變遷已經從少數官員、科學家和有興趣人士討論的題目，變成全球政治問題。京都後來成為全球氣候變遷政策的同義詞。

歐洲和美國在京都開戰

一九九七年夏天，京都會議開會前幾星期，美國國務院主管經濟、商業暨農業事務的國務次卿斯圖亞特·艾森史塔接到通知，要率領美國代表團參加京都會議。艾森史塔認真、專注、邏輯清楚、能夠瞬間掌握簡報內容，以善於解決問題和談判聞名。但是他聽完一九九七年十二月京都

之行簡報後，發現此行會變成他後來所說有生以來「最複雜、困難、耗神」的談判。

京都日本千年古都，京都國際會議中心蓋在湖上，四周丘陵環繞，處處林園。京都會議要為溫室氣體減量設定有約束力的目標和實施機制。京都會議像五年前的里約高峰會大馬戲團一樣，與會人員多達一萬人，包括官員、專家、非政府組織人員、產業代表、記者。這些人要參加眾多會議、談判、討論會、政策會、秘密會議，聽到各種有關代表團和主要團員的傳言。很多人第一次拿著像鞋子一樣大的第一代「機」，設法了解談判的轉折、掌握每個謠言。

主辦會議的日本人員故意調低會議中心的暖氣，藉以顯示環境問題十分棘手，但十二月的京都已經很冷，主辦單位打算發毛毯給與會代表，由於毛毯不夠，還特別舉行協調會，討論每個代表團應該分配多少毛毯。

各國顯然都無法達成里約高峰會設想的各國自主減排目標，因此京都會議要設法制訂具有約束力的強制目標，但是這項任務顯然極為艱鉅。因為同年七月亞洲國家爆發金融風暴，多數國家經濟崩潰，這時訂定強制目標，並非最適當時機。

二氧化碳減量的第一個大問題使美國和歐盟在京都會議上，陷入對立僵局。歐盟希望美國加強減量，但美國拒絕接受。由於歷史帶來好運，歐盟國家得以比美國更快超越一九九〇年的目標：一九九〇年東、西德統一後，東德老舊的煤炭發電廠已經淘汰。至於英國，由於余契爾夫人打敗左翼煤炭礦工，發電廠逐漸停用煤炭，改用北海的天然氣發電。美國副總統高爾抵達京都後十六小時內打破這個僵局。

白宮西廂副總統辦公室舉行京都行前會議時，高級顧問敦促高爾不要把政治資本浪費在可

能失敗的萬哩之旅。但是對高爾來說，這是他全心投入的問題，決定毅然前往。高爾抵達京都時說：「我一直想來，卻費了一番功夫才使幕僚登上飛機。」高爾的演講對京都會議產生驚人影響，他向各國代表保證美國「真心」關注氣候變遷問題。高爾的身打破了僵局，結果美國、歐洲和日本大致達成相同目標：二〇〇八年十二月前，各國二氧化碳排放量與一九九〇年相比，必須減少六至八%。

開發中國家對上已開發國家

京都會議的第二個大問題是：開發中國家是否答應二氧化碳減排，答案是完全不同意。兩年前的柏林規定不要求開發中國家減排，因此現在各國毫無讓步意願。艾森史塔回想和開發中國家代表開會時說：「我參加過的討論會中，沒有一次的待遇比這次冷漠。」

回顧二氧化碳排放歷史，開發中國家不減排的主張很有道理。但是如果瞻望未來，開發中國家經濟成長之餘，也應該為自己日增的二氧化碳排放量負責。當時是世界經濟關鍵時刻，只是一時還不明顯；以中國、印度和巴西為首的開發中國家即將進入急速經濟成長階段，但這時亞洲深陷金融風暴，很難想像會有這種發展。十年前大家根本不擔心開發中國家二氧化碳排放問題，尤其中國才剛剛要脫離毛派分子的控制。十年後，各國卻不得不正視這些國家的排放問題。

如果開發中國家不受減排目標約束，京都議定書要很難變成美國參院批准的公約。這年七月，參院剛剛通過勃德—哈格爾決議案，有人認為，這個決議案代表參院會否決京都議定書。不過，實際情形不是這樣，因為早在京都會議前幾個月，參院就已經批准勃德—哈格爾決議案。嚴

格說，勃德—哈格爾決議案是在警告大家：如果某一公約「嚴重傷害」美國經濟，或是免除開發中國家減排責任，破壞美國工業競爭力，美國不會接受這種公約。哈格爾後來回憶說：「將來中國溫室氣體排放量會超越美國」，因此不應該免除減排責任。參院以九十五票對零票，通過勃德—哈格爾決議案，明確宣示美國的立場。

但是京都會議中沒有出現讓步，開發中國家沒有理由讓步。最接近妥協的事情是設立「清潔發展機制」，讓已開發國家可以在開發中國家投資「清潔能源」計畫。京都議定書無法要求排碳愈來愈多的開發中國家，承諾減少排碳，註定無法通過美國參院的審議，如果參院不批准，美國不可能接受京都議定書。

成本、成本、成本

京都會議的第三個大問題是如何執行減排。歐盟希望採用規定和直接干預，把這種方式稱為政策措施，實際上卻是命令與管制。美國堅持採用酸雨模式的交易機制，美國要創造涵蓋大約一千家燃煤電廠的交易系統，比其他國家創造化石燃料發電廠交易系統容易，歐洲國家堅決反對，他們本來就懷疑市場方法，認為排放交易可能是若干教授希望偷偷推銷的學術實驗，甚至是詭計。很多歐洲國家認為，出售排污權近乎不道德，這種看法一九九〇年環保團體對清潔空氣法案的看法如出一轍。因此，歐洲國家指責出售排放權的想法是「吹牛」。

因為二氧化硫計畫成就斐然，柯林頓政府官員因而相信排放權交易是唯一可行方法。艾森史塔說：「解決氣候變遷有三個問題：就是成本、成本、成本。」如果不採用市場交易方法，減輕

氣候變遷問題，沒有一個國家可以負荷所需費用。

排放權交易問題還是很難協商，京都會議即將結束，協議還沒有達成。人人精疲力倦，時間愈來愈少，會議時間其實已經超過規定，會場通風系統已經關閉，翻譯人員已經離開，所有代表都聽到木匠敲敲打打，為下一個會議布置會場。

會議主席要求艾森史塔和歐盟首席談判代表英國副首相約翰·普瑞斯科特，跟他進入鄰近的綠色房間。這時會議只剩下排放權交易問題。普瑞斯科特堅守歐盟的立場，主張排放權交易頂多只是次要輔助工具；艾森史塔說美國不會讓步，也不是口出空言。

艾森史塔說：「事情很簡單，如果沒有排放權交易，美國不會簽署，十五天的會議都白開了。你真的想沒有達成協議就返回歐洲嗎？」

艾森史塔接著說：「或者我們可以達成歷史性協議。」

普瑞斯科特知道艾森史塔不會讓步，勉強同意排放權交易，因此，京都議定書終於談成。木匠可以繼續工作，後續會議可以移到走廊去開。

就這樣，京都會議最後一天，大家在這間綠色小會議室裡，把「市場」和氣候變遷結為一體。柯斯的理論經過戴爾斯修正後，變成「排放權市場」，再變成國際性政策。如果要尋找「三流學究」影響不知情小民的證據，京都會議和綠色房間裡達成的協議，正是絕佳範例。

京都議定書真假

布林後來寫道，京都議定書代表「各國共同創造一種體系，防止人類引發氣候變遷的初步行

動。」布林又說，但是其中有一個問題，「京都議定書通過時，在政治上已經不實際。」

京都議定書要在美國參院中獲得六十七票，才能成為美國法令。勃德－哈格爾決議案要求任何氣候條約必須維持美國的競爭力，而且所有主要排放國都要納入。但是京都議定書的排放減量並未納入開發中國家，這個致命缺點註定京都議定書無法通過參院表決。一位與會人員後來說，「布希政府或參院都沒有積極處理京都議定書。」布希政府一直沒有把京都議定書送交參院批准。

擁有管轄權的參院小組委員會主席哈格爾說：「我很訝異，我以為他們會把京都議定書送審。」

但是柯林頓政府可以已京都議定書送交參院審議。

全球性議題

二〇〇五年，八大工業國領袖在蘇格蘭歷史悠久的葛倫依戈大飯店，舉行一年兩次的高峰會，酒店中的高爾夫球場是世界最美的球場。主人是英國首相布萊爾。布萊爾面對國內強大反對聲浪，還是和布希結盟，進行反恐戰爭，在二〇〇三年三月入侵伊拉克。但布萊爾在氣候變遷方面，帶頭把這個議題列入高峰議最優先事項中，讓布希政府略感驚訝。

布萊爾心情愉快，因為他剛剛得知倫敦打敗巴黎和馬德里，獲得二〇一二年奧運會主辦權。高峰會為期二天，第二天各國元首圍著會議桌，準備討論氣候變遷問題時，布萊爾却不見影。前一天布萊爾和中國國家主席會談時，接到助理的便條後，匆匆趕回倫敦。原來當天早上上班交通尖峰期間，四位倫敦出生——其中至少三位曾經前往巴基斯坦恐怖分子基地受訓——的伊斯蘭聖戰士，在倫敦地鐵引爆炸彈，造成慘劇，另外還炸毀一輛紅色雙層巴士，早上上班的正常通勤狀態變成恐怖景象，五十二人死亡，七百人受傷。倫敦陷入恐怖、震驚狀態，全市全面戒備，擔心第二波攻擊行動。

英國首相不在場，但布萊爾視為最高優先的葛倫伊戈氣候高峰會繼續舉行。在場的人除了各國領袖外，還有一位名叫尼可拉·史登的經濟學家，他寫了一份非洲國家也準備進行氣候變遷對話的報告。大家進行和氣候有關的討論時，史登環顧會場，驚訝的發現：各國領袖的肢體語言顯出懷疑、沒有興趣、毫不迫切的樣子。史登認為，有些人「看來顯然很厭煩」。

氣候變遷會成為全球最重要的問題，和經濟、恐怖主義一起成為各國談判的三大要務。新的氣候變遷政策打算根本改變支撐世界經濟的能源基礎；這種改變影響深遠，好比世人由燒材改成燒煤、又改用石油和天然氣一樣。這麼徹底的改變表示世界經濟也會改頭換面。

新的氣候變遷總目標是大量降低二氧化碳排放量，在若干方案中，未來幾十年內，二氧化碳排放量在會減少八〇％以上，不過，氣候問題不容易處理。包括石油、天然氣和煤炭在內的碳氫化合物，占目前所用能源的八〇％以上，預估未來二十年內，全球能源的需求會再增加四〇％，在這種情況下，還要減少排碳，令人百思不解。總之，這麼大的改變十分困難。

京都

二〇〇〇年美國總統大選期間，候選人對環境問題著墨不多。布希競選團隊的一位環境顧問回憶說：「環境根本不是二〇〇〇年大選的問題。沒有人對環境有興趣。」高爾當然提過京都議定書，不過著墨不多。高爾的對手布希在一九九〇年代擔任德州州長時，因為雄心勃勃倡導發展再生風能，號稱「風能州長」。二〇〇〇年大選期間，布希宣稱「我們應該正視地球暖化問題」，呼籲強制減少「四種主要溫室氣體」，二氧化碳是其中第四種。布希的有關評論雖然不多，但是大家以為，一旦他當選，就會處理氣候問題。

他當選後的兩項高級官員任命，的確讓人會有這種看法。新任環保署署長克里絲汀·惠特曼曾任紐澤西州州長，二〇〇一年三月，她在送交布希的備忘錄中說：「我強烈建議你繼續認定地球暖化是嚴重的實際問題。」她也指出：「我們必須關心地球暖化問題，把京都議定書從討論變成行動。」新任財政部長是歐尼爾擔任美國鋁業公司執行長時，曾在股東年報中，強調氣候變遷是重要問題。歐尼爾在布希政府就任後的某次內閣會議中，在會議室裡分發他所寫和氣候變遷有關的小冊子，這分小冊子警示地球暖化帶來的危險。有些官員看到財政部長居然在內閣會議中，分發一家企業印製的小冊子，覺得有點困惑。歐尼爾是心直口快的實業家，在寫給布希的備忘錄中指出，布希政府應該組織起來，「用有科學根據的方案修正或取代京都議定書。」

不過，實情並非如此。二〇〇一年三月十三日，惠特曼晉見布希總統，敦促他支持京都條約，布希的反應出乎她的意料。布希表示對京都條約已有定見，接著把準備送交一群參議員的信函內容告訴她。布希在信中宣稱，雖然他的政府「嚴肅面對氣候變遷問題」，但是堅決反對京都議定書，因為議定書未包括世界八〇%人口，「無法公正、有效處理地球氣候變遷事情。」他也提到很多人擔心的事情：訂出排碳限額會促使發電從燒煤改成利用天然氣，當時加州爆發能源短缺問題，顯示全美國即將面臨天然氣供應不足的困境。

很多人覺得布希政府已經排斥氣候變遷問題。二〇〇一年五月國務院的一項就職典禮反映了布希政府的態度：副國務卿波拉·杜布里揚斯基在國務卿鮑爾的監督下宣誓就職。鮑爾查看她的職務表時，看到其中一項是氣候變遷，停了一下，尷尬的露著牙齒，笑出聲來，還開玩笑般的把手放在嘴上，露出淘氣表情。

二十一 一個問題

面對二〇〇一年的經濟衰退，討論氣候變遷的聲浪消失。二〇〇一年九月十一日發生恐怖攻擊後，美國更是不再討論氣候變遷問題。但是，對少數重要的人口階層來說，氣候變遷是有象徵意義的重大問題。對不滿二〇〇〇年選舉結果另一些人來說，京都議定書成為檢驗布希政府環保政策的試紙；擁護高爾的人認為高爾就等於京都議定書。布希政府拒絕簽署京都條約，激怒了環保團體和很多反對者，也在歐洲引起激烈的反對和批評。前商務部長唐·伊凡斯回憶說：「我記得二〇〇一年訪問歐洲時，當地人因為布希政府打算忽視京都條約，而對我們大吼大叫。」

不過事情並未停擺。美國支出的氣候變遷研究預算占全世界總金額的一半，布希任內，這種經費還會增加。柯林頓政府留下來的這種支出分散在十三個機構，顯的雜亂無章。伊凡斯督導其中一個重要的氣候研究機構，他說：「總之，十三個機構的預算總額大約是五十五億美元，但是每個機構不相連絡。我們能夠做的事情就是排出優先順序，知道我們需要知道什麼事情、擁有什么資訊，才能制訂合理政策。」

因此，伊凡斯請詹姆斯·馬奧尼，擔任主管海洋與大氣層事務的商務部助理部長兼國家海洋暨大氣管理局副局長。馬奧尼大學攻讀氣候模型學，獲得麻省理工學院流體力學博士，指導教授是氣候模型學鼻祖查尼，曾經擔任美國氣象學會會長，《應用氣象學刊》總編輯。

馬奧尼負責重組大約二十億美元的政府研究計畫，集中力量，進行協調一致的「氣候變遷科學計畫」。他後來解釋說：「如果你要協調幾千位科學家，一定需要一套完整的體系。」這項研

究由二十一個問題所組成，問題涵蓋的範圍廣泛，包括低大氣層氣候有什麼變化？北極和高緯度地區氣候變化歷史模樣如何？氣候模型的優缺點為何？「氣候突然變化」的風險為何？而且，為了密切配合政策，「如何把不確定的科學結論納入決策」？布希政府委託國家科學院進行兩項氣候變遷研究，作為整個檢討工作的一環。同時，能源部另外推動耗資三十億美元的氣候科學技術計畫。

但是從一開始，布希政府內部就出現激烈爭論，就像馬奧尼說的一樣，政府內部有關對氣候計畫的歧見很深，兩派看法不同。一派主張「在科學上要站的住腳，另一派認為，還要等多少年，才能提出令人信服的科學證據？」言外之意是如果科學提不出證據，大家是不是什麼事都不必做？

馬奧尼說：「科學追求的目標是完成統一的地球氣候系統模型。不過話說回來，很多決策分析和政策發展一向就是在不確定狀況下敲定？但是很多人反對這樣做。重要的科學問題很多，其中很多都已經得到答案，不過整個地球體系還有很多不確定的地方，真的很難說。」

口蹄疫恐慌

布希政府認為氣候變遷問題需要更多科學研究，國際上主張處理氣候變遷問題的責任落在英國人肩上，尤其是英國政府肩上。但是英國如果沒有爆發牲畜流行病，情況可能會不一樣。

二〇〇〇年十月劍橋大學化學教授大衛·金恩出任布萊爾的科學顧問。一開始，金恩的新工作重點是為未來籌劃低碳環境。二〇〇一年二月，英國爆發世界史上規模最大的口蹄疫情，成群

得病牛羊遭火銷毀；全國各地鄉下焚燒病畜的柴火捲起滾滾濃煙，把英國人嚇的目瞪口呆。隨後六個月，金恩成為分析和處理這場流行病的政府代表，其他科學問題都暫時擱置。金恩以高明手法處理口蹄疫情，贏得布萊爾的信任，因而成為布萊爾的心腹，關係密切。布萊爾說，請金恩處理這件事是「妙招」，他的成就「無法估量」。

金恩因此成名，應邀在二〇〇二年的朱克曼講座發表演講；朱克曼講座是討論英國科學政策最有平台。金恩的講題是「氣候變遷科學：適應，減輕或是忽略？」他顯然不希望忽視氣候變遷問題。金恩提出警告，如果放任不管，愈來愈高的二氧化碳濃度終將導致「全球冰山融化，英國濱海城市消失。」

金恩的演講內容後來變成英國的政策。布萊爾在一次內閣會議後告訴金恩：「你應該環遊世界，說服世界各國，因為英國無法獨力解決這個問題。」二〇〇七年金恩卸任後前，在英國和世界各地至少發表了五百場有關氣候變遷的演講。

二〇〇四年一月，金恩在美國發表演講前，在《科學雜誌》上撰文，擊布希政府不處理氣候變遷問題。他也寫道：「氣候變遷是我們面臨的最嚴重問題，即使比恐怖主義威脅嚴重。」

這樣說大大觸怒布希政府。美國和英國十個月前才聯手發動伊拉克戰爭，是領導反恐戰爭的主要國家，布萊爾又把外交政策押在他和小布希的關係上，美國的忿怒反應使他為難。此外，在議會的每週首相答詢時間，有位自由民主黨議員週復一週質詢布萊爾，是否同意金恩所說氣候變遷比恐怖主義威脅嚴重。布萊爾因此煩惱不已。

雖然有這些爭議，金恩繼續努力。英國是島國，一定要關心氣候變遷引發的海洋和河流水位

昇高的威脅。金恩的辦公室推出一份報告，預測地球暖化可能使百年一遇的大水災今後每三年就會發生。不久之後，英國每年就花費五億英鎊，加強海岸和內陸的防洪措施，預防洪水和海平面升高。

布萊爾決心把氣候變遷問題列為葛倫伊戈八大工業國高峰會中心議題。參加會議的不只八大工業國領袖，因為八大工業國高峰會已經擴大，納入中國、印度、巴西、南非和墨西哥領袖。

雖然倫敦發生爆炸事件，葛倫伊戈高峰會把氣候變遷問題納入世界大事架構中，和其他重大問題平起平坐，變成各國領袖應該處理的重大問題。

製造碳市

京都議定書必須經過五十五國批准後才會生效。二〇〇五年二月，葛倫伊戈高峰會召開前幾個月前，普亭簽字後，俄羅斯成為簽署京都議定書的第五十五個國家。普亭並不相信氣候變遷風險，事實上，他一直在想，西伯利亞氣溫升高幾度，可能有助於俄羅斯農業，皮裘衣帽需求也會減少。大家把俄羅斯簽署京都議定書，視為俄羅斯加入世界貿易組織的交換條件。此外，俄羅斯工業產出減少，可以出售碳權，獲得可觀收入。

因此京都議定書現在可以開始運作了，但是如何設立真正的市場、結算碳交易？實際上，碳交易的原型市場已經存在十多年了。

理察·桑多爾是經濟學家、企管顧問和美國西北大學兼任教授，曾參加一九九二年里約地球高峰會。桑多爾有創造全新市場的能力，一九七〇年代內，他曾參與創造利率期貨業務，這種業

務最初只是一個奇怪的概念，現在每天交易額高達數兆美元。他的想法並非都很成功，他也寫過和合板期貨市場有關的論文。他到里約參加會議，目的是為了討論創設金融市場與設立碳排放期貨市場。他說，他聽過幾次討論後，「相信十賭九輸的說法。不管勝算多大，如果情勢不利會讓人大敗虧輸，就絕對不要下注。如果氣候變遷的結局是災難，為什麼要冒這種風險？」

某一天下午，桑多爾坐在著名的伊帕內瑪海灘上，盤算如何設計碳市場。他自言自語說：「這件事行得通。」

桑多爾回到芝加哥後，決心設立碳權的交易所，這就是後來的芝加哥氣候交易所。交易所成立後前十年不好過，所有資金幾乎用光，最後他找到外界投資者北加州耶穌會投資一百五十萬美元，撐過掛牌上市前的苦日子。桑多爾找了以企業為主的十四個成員，但也納入芝加哥市，共同成立交易所，互相進行碳權交易，證明碳交易可行。但這種作法頂多只是練習和原型。因為美國不打算簽署京都氣候條約，為了維持交易所的營運，桑多爾另外成立歐洲氣候交易所。這樣做很有道理，因為氣候變遷交易的重點在歐洲，不在美國。

歐盟是最堅決支持京都議定書原則的實體。歐盟在京都會議中激烈反對碳權交易，會後卻熱烈擁護交易的構想。二〇〇三年，布魯塞爾正式創設排污權交易系統，名叫歐盟排放交易計畫(ETS)。二〇〇五到二〇〇七年交易初期，碳的價格波動驚人，但是運作機制逐漸確立，交易所設在倫敦，支撐這個機制的交易場所、經紀人、公司交易檯、金融基礎設施逐漸完全。同時母公司芝加哥氣候交易所和中國石油天然氣公司合資，在距離北京一百四十五公里的天津，成立中國交易所。

二〇〇八年，歐盟訂出雄心勃勃的目標：要在二〇二〇年前，把以二氧化碳為主的全球溫室氣體排放，比照一九九〇年的水準，減量二〇%。為了達成目標，破權交易必須成為龐大業務。多大呢？桑多爾說：「破市可能成為世界最大的商品市場，比原油市場還大。」這是簡單的計算，因為「除了石油，煤炭、天然氣和其他製程也會排放破。」

二〇一〇年，桑多爾旗下兩個交易所的母公司芝加哥交易所公司，由紐約商業交易所在石油交易方面的主要對手洲際交易所以六億美元併購。

影像威力

同時，美國的政治環境逐漸改變。二〇〇三年，共和黨參議員約翰·馬侃和民主黨參議員約瑟夫·李伯曼在參議院提出排污權交易法案，獲得四十三張同意票，成果好的出奇，卻沒有獲得廣泛共鳴，法案本身似乎也有點抽象。

二〇〇五年發生的事情就不抽象了，這年卡翠娜和麗塔颶風蹂躪美國墨西哥灣沿岸，新聞媒體刊登颶風毀滅性衝擊的影像——巨蛋中絕望的人群、從紐奧良水災逃難的難民，都為颶風帶來毀滅亂象提供證據，暗示更可怕的氣候會愈來愈常見。

隔年另一種不同的媒體教育出現，由幻燈片剪輯而成的紀錄片《不願面對的真相》問世，這部紀錄片原本相當不可能問世，是根據美國前副總統高爾一九九〇年以來播放的環保幻燈片剪輯而成，其中若干鏡頭令人目瞪口呆，冰河融化後，巨型冰塊墜入海中的影像尤其如此，這種意象很可能吸引丁達爾和十九世紀其他氣候變遷研究先驅注意力。高爾本來不願意把幻燈片變成影

片，但是禁不住電影製片人的要求，只好同意。影片放映時成為全球電影界盛事，對民眾造成重大影響。英國政府把影片發送到全國各中學。二〇〇七年二月這部影片獲得奧斯卡金像獎，就由幻燈片轉製的影片來說，的確是驚人成就。

同一個月裡，跨政府氣候變遷委員會準備公布第四次評估報告。這份報告最複雜的計算是利用美國能源部的超級電腦完成，全世界只有這些電腦才能處理這種運算。新報告是到目前為止最直言無諱的報告。科學界從二〇〇一年第三份報告發布後創造的重大進展，表現在報告脈絡一貫的主題上：人類「非常可能」——可能性超過九〇%——要為氣候變遷負責。

這一切只是一個隱約出現威脅的前奏：二氧化碳排放量如果增加一倍，地球溫度很可能提高攝氏二度至四·五度。但是報告加上不祥的預測，指出「大幅超過四·五度的可能性無法排除」。報告認幾個「重要不確定原因」：例如，「雲對全球氣候變遷應負什麼責任仍然不確定。」大體上，第四次報告的自信和明確性高於前幾份報告。

此外，報告中充斥「氣候突然變遷」這個更可怕的幽靈。政府間氣候變遷委員會說，因為沒有適應時間，沒有緩和時間，這種後果可能具有毀滅性。卡翠娜颶風中成千上萬人逃命的景象可能在孟加拉，中國沿海或佛羅里達重演，但是規模會大多了。

這份報告出版前幾個月，出現另一分有影響力的研究報告《氣候變遷經濟學的史登評論》。葛倫伊戈高峰會結束後幾個星期，英國政府請經濟學家史登領導一個小組處理氣候變遷問題，得出這分厚達一千頁報告，斷定不處理氣候變遷的代價十分重大，相形之下，減輕氣候變遷的代價反而不會高的離譜。史登用經濟學家的語言宣稱，氣候變遷是有史以來最大的「市場失敗」。

史登報告的影響遠超過大家的預期。《經濟學人週刊》用稍微淡化的文字，總結大家的反應：「難得有一份滿是圖表和方程式的報告這麼轟動。」

史登報告在經濟學家中引起激烈爭論。批評者認為史登的折現率——二一〇〇年一美元相對二〇〇六年的價值——太低，報告的結論就是選擇這種偏低折現率做成。私下不認同這份報告的其他經濟學家礙於同儕壓力，不願公開批評。史登回答說，批評者不知道這不是正常經濟情勢，因此「不了解科學家希望確認的風險規模。」但是不管經濟學家之間爭論什麼，史登報告對決策官員、政客和環保人士，都造成響重大影響，歐洲尤其如此。這份報告填補原先的真空，建構一套經濟學體系，可以補強政府間氣候變遷委員會愈來愈廣泛的研究報告。

綠色標章

很多公司開始出示綠色標章，表示注意氣候變遷問題，針對即將到來的碳排放管理時代，設想調整業務的方法。是英國氣象局前局長約翰·霍頓共同領導若干人，用科學方法評估政府間氣候變遷委員會已經發行三份報告。一九九〇年代中期，霍頓開始和英國石油公司對話，有一次，他拜訪英國石油倫敦總部，和高級主管開會。「你能證明嗎？」的同樣問題一再出現，霍頓說自己不能證明，這個問題永遠沒有徹底結論。但是現有證據就已經具有壓倒性說服力。

霍頓說服的主管中，有一位是英國石油公司執行長布朗。布朗深受政府間氣候變遷委員會報告影響，決定英國石油應該正視氣候變遷問題、採取行動。一九九七年五月，布朗在史丹佛大學發表演講，表示「氣候變遷問題愈來愈令人擔心，忽視這個問題不僅愚蠢，還有潛在危險，我們

應該集中力量，處理可以做、也應該做的事情，這樣做不是因為我們可以確定氣候正在變遷，而是因為這種可能性不應忽視。」

這是石油工業、也可能是整個能源工業中，首有重要人物公開宣示這種立場。其他石油公司說：「英國石油開始主張環保」，這句話因為英國石油把商標的意義擴充到有點神祕的「石油以外」，而獲得佐證。這場演講促使英國石油採取若干自主行動：降低二氧化碳排放量；開發替代能源；公司內部建立二氧化碳交易制度。這場演講也促使荷蘭皇家殼牌石油公司舉出最新的年報，作為證據，證明他們公司才是國際石油公司中，第一家看出氣候變遷是風險的公司。

這時，美國多數能源公司在氣候變遷問題上，仍然和全球氣候聯盟（GCC）站在經濟部陣線上；繼續駁斥政府間氣候變遷委員會的科學觀點，在國會中遊說反對降低溫室氣體排放。全球氣候聯盟主張，急速減少美國的溫室氣體排放，很可能「造成嚴重失業問題，降低美國產品競爭力，引起嚴重經濟混亂。」

二十一世紀初期，美國很多公司開始注意氣候變遷問題。奇異公司的產品廣泛，涵蓋氣渦輪機、核子反應爐、火車頭到電燈泡。奇異公司最近獲得一項風力發電機業務。二〇〇四年，通用執行長傑夫·殷梅特，在紐約克洛頓的公司訓練營，邀請電力公司主管和環保人士開會，討論重要的能源問題。前一年殷梅特一再聽到主管反映：愈來愈多客戶提到需要「乾淨」或環保的解決方案。他召集克洛頓會議，希望了解能源產品的現況、將近會有什麼變化。

會議安排成類似可以自由參加的學術討論會，殷梅特坐在階梯式教室高處，立刻投入討論。在講堂中，「環境」雖然是最主要議題，氣候卻顯然變成討論重點。這一天的會議幫助奇異公司

推動廣泛的「環境想像力」活動，並且促使奇異公司加速集中力量，推展環保和氣候相關業務。

很多公司的策略確實正在改變，環境也成為很多公司企業策略的一環。到二〇〇七年，為了促進氣候立法，英國石油、奇異公司等九大工業公司與公用事業，上四個環保團體集會，組成美國氣候行動夥伴聯盟（USCAP），到二〇〇九年，會員總數增加到二十五家公司；同時，一向反對任何氣候立法的全球氣候聯盟，面對會員退出和傾軋，已經解散。

諾貝爾獎

二〇〇七年十二月十日，挪威國會的一個委員會在奧斯陸市政廳，把諾貝爾和平獎頒發給共同得獎人高爾和政府間氣候變遷委員會，最能凸顯氣候變遷已經成為全球性問題。

高爾在受獎演說中說：「我們必須把共同拯救地球環境，當作世界一體的核心信念。」他宣稱，世界已經面臨「全球性緊急狀態」。

從奧斯陸傳來的照片中，大家一眼就看的出誰是高爾，但是站在高爾旁邊的人是誰？這個人穿著尼赫魯裝，看來有些突兀，一頭黑色長髮和黑混雜的鬍鬚分不開來，自稱是政府間氣候變遷委員會的鬍鬚公。

他是委員會主席、印度經濟學家兼工程師拉金德拉·帕喬里，代表這個委員會受獎。帕喬里主持這個複雜的國際性網路，運用四百五十位頂尖作家、二千五百位科學審查專家，八百位特約撰稿人，代表一百一十三個國家，委員會的報告至少要得到各國政府代表和這些人的默許。

帕喬里擔任政府間氣候變遷委員會主席，表示開發中國家逐漸支持這個委員會。帕喬里從印

度鐵路機械暨電力工程學院畢業後，擔任工程師，設計柴油火車頭；取得北卡羅萊納州大學工程和經濟雙博士後，他的研究轉向能源經濟。一九八二年帕喬里擔任特力的所長，特力是印度重要的研究單位。

不久之後，帕喬里開始研究氣候變遷問題，一九八八年擔任國際能源經濟協會會長，發表就職演說時宣稱：「溫室效應不再是抽象理論，如果我們不再深入探討這個問題，難免要冒著偏狹和短視的危險。」帕喬里後來說，大家不了解他說的話，更糟糕的是「大家都認為我瘋了」。此後幾年，他成為印度政府著名環境問題顧問，也是國際上氣候變遷問題的活躍分子。

帕喬里說，諾貝爾獎「確實已經為氣候變遷發出警報」。諾貝爾獎也使世人更加認識政府間氣候變遷委員會並且鞏固政府間氣候變遷委員會的國際角色。頒獎典禮後不久，帕喬里在休斯頓的能源會議上說，政府間氣候變遷委員會的警告並非「基於理論和假設，這是根據實際資料分析後所得的結論。這些資料範圍廣泛，內容千真萬確，不容置疑。」

麻州對上環保署：最高法院的判決

美國的政治情勢也在改變，不少州通過本州的排放目標，有些州制訂區域性排碳權交易計畫。加州通過州議會三十二號法，要求加州在二〇二〇年前，把排碳量降到一九九〇年的水準。

二〇〇六年，民主黨十二年來首次控制美國參眾兩院。民主黨領袖決心通過氣候變遷立法。新任眾院議長南西·裴洛西也是美國史上第一位女性眾院議長，宣稱氣候變遷是她「最重要的議題」，她成立新的能源獨立暨全球暖化特別委員會，希望落實這個想法。

幾個月後，到二〇〇七年春天，美國的立法環境改變。

早在一九九八年，卡羅·布朗納和多數黨領袖共和黨的湯姆·狄雷在國會聽證會中爭辯，布朗納曾經擔任柯林頓總統的環保署長（後來出任歐巴馬總統的能源暨環境沙皇）。狄雷強調，你正打算制定溫室氣體法律。布朗納回答說，沒有，我們只是在研究而已。這樣子你來我往一陣子後，狄雷坦率質問布朗納：「你是否認為清潔空氣法案允許你管制二氧化碳排放？」

布朗納回答，「清潔空氣法案已經充分授權我們這樣做。」

迪萊反駁說：「可以告訴我法律上如何解釋嗎？」

布朗納說：「好。」

布朗納後來回憶說：「我回去後請律師研究，他們研究後，寫了一張便條：「我們很可能有法律授權。」

二〇〇一年上任的布希政府堅決不同意，認為這種解釋可能不對，最初的清潔空氣法中甚至從來沒有提到二氧化碳。二〇〇一年布希大致肯定的說：「依據清潔空氣法，二氧化碳不是溫室氣體。」事情似乎告一段落。

但是事情並未結束，麻州州政府和其他單位控告環保署，沒有制訂汽車溫室氣體、尤其是二氧化碳排放法規。上訴法院判決麻州等原告敗訴，最高法院卻同意審理本案。

二〇〇六年十一月，最高法院舉行口頭辯論。麻州助理檢察長主張，環保署因為沒有管制新車二氧化碳排放，可能促進全球暖化，導致海平面上升，淹沒麻州沿海地區。布希政府反駁說，清潔空氣法案未授權環保署管制二氧化碳，麻州無權提出告訴，因為氣候變遷是全球性問題，麻

州只是美國的一州而已。

法庭上言辭交鋒激烈。麻州助理檢察長語帶辛酸告訴安東寧·斯卡利亞法官，他把同溫層和對流層搞混了。斯帝芬·布瑞耶法官說，雖然管制排氣管的廢氣無法證實可以防止溫室效應，但是這樣做再加上其他措施，「這些措施的功效果積起來，你瞧！鱈魚角半島就不會淹沒了。」

二〇〇七年四月二日，最高法院做出「有史以來關於環境的最重要判決。」最高法院以五票對四票判決麻州勝訴，理由是氣候變遷造成暴風雨和沿海地區為海水淹沒，麻州「遭受的危險真實而且迫在眉睫。」

最高法院判決的重點說，燃燒碳氫化合物和動物呼吸都會產生二氧化碳，但是二氧化碳的確是溫室氣體，「可能危害大眾健康和幸福」。最高法院判決的多數票確切指出，環保署不立法管制廢氣排放的立場「既武斷又任性，是不符合法律的行為」。

最高法院的判決影響深遠；如果美國國會不立法管制二氧化碳，那麼環保署有權揮動立法機制管制二氧化碳。聯邦政府多數機構現在堅決認為政府應該加速控制二氧化碳。

布希政府必須想辦法回應最高法院的判決。這時，馬奧尼的氣候變遷科學計畫的二十一個不同研究計畫的答案逐漸浮現。前能源部長山姆爾·博德曼回憶說：「多數答案都顯示暖化問題很嚴重。」在國際上，英國首相布萊爾和德國總理梅克爾持續施壓給布希，請他解決問題。

因為上述原因，氣候變遷顯然又成為布希政府的政治議題。布希在二〇〇七年的國情咨文中宣稱，美國應該「面對全球氣候變遷的嚴重挑戰。」但是美國會用其他方式取代京都議定書和聯合國這種麻煩的方法；美國會召集全世界十七個大量排放二氧化碳的國家組成一個團體，命名

為：主要排放國。

助理國務卿多布里揚斯基說，「但是，我們發出邀請函後，這些國家希望大家不要稱呼他們是「排放國」。」

這是合理要求，畢竟，這些國家認為「排放國」是負面名詞，後來「主要排放國」改成「主要經濟國」。二〇〇七年九月有十七個國家在美國國務院開會，這些國家的生產毛額加總起來占全世界的八〇%，消耗全世界八〇%的能源，排放全世界八〇%的二氧化碳，是世界上最有影響力的國家。此外，由於中國、印度、巴西等國家參加這個新組織，已開發國家和開發中國家之間的爭議也有協商的地方。

這種立場和布希政府七年前的立場大為不同，不過，布希政府在任的時間很快就要結束了。

第十章

尋找共識

歐巴馬就職後的週末，白宮匆匆用電話和電子郵件，邀請來賓參加下星期一在白宮的首次演講。星期一寒冷清晨在白宮東門排隊的人，仍然籠罩在就職典禮後的幸福感中，以為自己要參加一場活力十足的活動。實際上，白宮東廳的會議和決定能源政策的和氣候變遷有關。

歐巴馬說：「白宮辦事拖拖拉拉的日子已經過去，美國不可能成為暖化星球的人質。」總統的重點已經很清楚，有了總統的支持，眾議院民主黨領袖打算把排碳權交易變成美國的法律。

這項任務掌握在亨利·韋斯曼和愛德華·馬基手中；韋斯曼是能源暨商業委員會主席，馬基是眾院議長裴洛西兩年前設立的能源獨立暨全球暖化特別委員會主席。

馬基兼任能源小組委員會主席，在國會已經服務三十三年，一直關心氣候變遷問題，他的辦公室牆上，掛著一幅用框子框著、已經關門的《華盛頓星報》頭版新聞，時間是一九七六年十一月七日。右邊頭條新聞的標題是「計畫減少供應天然氣」；左邊頭條新聞是賓州大學一位教授的專訪，警告大家隱約出現的各種世界危機，其中一項是「世界氣候變遷」：氣候變遷的原因有兩個，一個是人類排放二氧化碳，另一個是冰河周期的自然循環。

版面中間是年方三十、頂著蓬亂頭髮、生平第一次前往華府擔任新科國會議員的馬基照片。標題下面寫著「新的史密斯先生來到華府」，新聞把他比喻成電影中由詹姆斯·史都華飾演的「滿腦子幻想鄉巴佬」新科議員；一九三九年，這部由弗蘭克·卡普拉導演的電影轟動華府。史密斯先生在電影達到高潮時說：「我有幾件事要對這個團體說。」新科議員馬基擔任國會議員三十三年後，也有很多事要說：主題從衍生性金融商品、核電安全、核能擴散到開放電信業等，但能源是他最關注的項目。他在一九八〇年民主黨代表大會的黃金時間演講中，呼籲美國在二〇三〇年前「變成真正的太陽能社會。」一九八七年，他為電器產品制定第一個全國的能源效率標準，並且繼續努力追求「太陽能／風能的未來」，只是現實距離他的目標還很遠。到二〇〇九年，因為歐巴馬坐鎮白宮，民主黨又控制國會，馬基才能夠配合韋斯曼，推動排碳權交易制度，改造美國經濟的一大部分。

蘿蔔和棍棒

但是要怎麼改造這麼多部門、包括能源、汽車、運輸工具、建築物、製造業構成的經濟結構？韋斯曼和馬基的策略分成兩部分。第一部分是利用排碳權交易制度，免費津貼某些工業，而不是拍賣排碳權；這種做法是蘿蔔，價值高達幾十億美元。

第二部分是棍棒：環保署。馬基說：「這樣是立法對上管制。」如果環保法案立法不成功，那麼環保署依據最高法院的判決，可以恢復清潔空氣法實施前的做法，採用命令和控制的方式管制二氧化碳。環保署和國會不同，不能提供獎勵或緩和措施，沒有蘿蔔、只有棍棒，或像某家電

力公司執行長說的一樣：「只有刺刀。」

馬基和韋斯曼密切配合，一九九〇年清潔空氣法修正案和由此產生的二氧化硫減量，是他們推動排碳權交易的模型。他們說排碳交易的效果是：成效快、成本低、影響力大。但是馬基心裡還有另一個故事：如何用數位革命改變美國經濟，他支持的法案因為鼓勵有線電視和電信工業競爭，產生數位革命。他說：「我們排除所有障礙，每個人都可以隨心所欲經營，我們創造了寬頻數位革命。」一九九六年柯林頓簽署電信法案時，美國沒有一個家庭有寬頻線路，現在已經完全改觀。「政府的工作是創造達爾文式的市場競爭條件，然後資本主義就會生長、壯大，此時政府就可以放手不管。獎勵措施會釋出創新。」

寬頻革命已經創造約一兆美元的新產值，他估計，規模大多了的氣候變遷相關能源業如果採用達爾文式無情競爭，會刺激全新的產業和創造好幾兆美元的新產值。

碳排放交易法由委員會送交最後審定委員會時，頁數由六百頁增加到一千四百多頁。法案的目標是大量減少二氧化碳排放量，以二〇〇五年的排放量為基準，到二〇五〇年，排放量要減少八十三%，表示今後美國能源投資的重點是減碳。除非美國能夠大量發展符合經濟效益的碳隔離技術，石油業、天然氣業和煤炭業大都會消失，利用這種燃料的所有產業也會改變。新能源體系不是目前美國人和美國經濟所能了解的样子。蘿蔔的規模非常大：美國很多產業未來會得到二、三兆美元補助。此外，依據一九九〇年清潔空氣法修正案，碳排放交易法會剝奪環保署管制二氧化碳的大部分權限。刺刀已經抽回。

有些人認為，二氧化碳無法在短時間內急遽減量，而且能源工業比電信工業複雜，資本支出

更龐大，回收時間更久，改變時間要更久，他們不相信新技術能夠及時發展出來，碳回收隔離技術需要很久的時間，才能證實有用。很多人對碳排放交易的複雜和規模抱持懷疑態度，認為直接課稅比較簡單、比較直接。另外有人指出，碳排放交易只是另一種複雜的課稅型式，把碳排放交易叫做「排放稅」。他們認為情況可能很混亂，費用嚴重低估，以煤炭發電的中西部會遭受嚴重打擊，農業也一樣。

美國國會即將在「大衰退」這一年裡，創造規模遠超過現有其他市場的全新、龐大碳市場，碳會變成一種「資產」，一種「通貨」。批評者警告說，碳排放交易對環境不利，在金融市場和金融機構名聲一敗塗地之際，只對爾爾街和想利用碳市交易和賭博的人有利。

二〇〇九年六月二十六日傍晚，碳排放交易法以二一九票對二一二票通過，四十四位民主黨眾議員投反對票，八位共和黨眾議員投贊成票。不過，這項法案還必須通過參議院，才能送交總統簽字，成為法律。

中國：雙贏策略

二〇〇七年時，中國的二氧化碳排放量已經超過美國，有人說，如果不加以控制，到二〇三〇年，中國碳排放量會超過經濟合作發展組織會員國的總排放量。中國也因為排放量增加，面臨國際愈來愈多的批評。

北京用三個理由回答外國的批評，首先，如果用人均用量當比較基礎，中國的用量只是美國和歐洲用量的一小部分而已。第二，中國強調自己還是貧窮國家，正在蛻變為幾十年前的歐洲、

北美和日本，別人不應該否定中國追求已開發國家生活水準的機會。因此，中國把已開發國家的排放稱做「奢侈排放」，開發中國家的排放稱做「謀生排放」。第三，中國的能源消耗和排放成長這麼快，原因是歐洲和北美經濟逐漸轉移到服務業和消費，把大部分耗用能源產品委外到中國生產。中國國家發展和改革委員會前主席指出，「中國能源耗用增加的數量中，大部分是『代替』其他國家和地區消耗。」

如果中國沒有參與，國際上就沒有氣候變遷管理體系。但是，中國的立場也在改變。二〇〇六年，中國政府公布《國家氣候變遷評估報告》，評估工作耗時四年，有二十個政府部門參與，大致上符合政府間氣候變遷委員會的架構。

二〇〇七年世界環境日前一天，中國政府公布第一版「國家氣候變遷策略報告」，報告中警告：「未來中國氣候變遷趨勢會進一步惡化。」報告中強調應該節約能源、提高能源效率、改變不同燃料比率、保護生態系統、森林面積回復到全國土地二〇%、發展世界級能源科技。新的天然氣來源和進口液化天然氣管線會取代北京、上海和其他城市傳統的燒煤方式。

中國對氣候變遷的態度改變，是基於科學和現實兩種理由。乾旱和洪水突出氣候變遷的危險，地球暖化影響中國水源供應和西部的「亞洲水塔」——中國大型河流水源的喜馬拉雅山和西藏高原上的冰河和積雪——一直是中國科學家和領袖擔心的事情，中國沿海創造大部分的國內生產毛額和經濟成長，但低窪地區卻受到海平面升高的威脅；旱災、沙漠化、極端天氣和農業生產不穩定，很可能都是氣候變遷的後果。

氣候變遷問題在中國國內的用處不應低估：在處理迫在眉睫的地方與地區嚴重空氣和水污染

方面，氣候變遷是非常有用的理由；空氣和水污染影響中國極大多數地區，逐漸變成嚴重的國內政治問題。氣候變遷也是非常方便的工具，可用來推動更高的經濟效率，尤其是能源使用效率。

還有其他實際問題，中國已經深深融入全球國際貿易和金融體系，這種關係變成一九七九年以來中國成長的基礎。中國幾乎在每個經濟會議上，都會碰到氣候變遷問題，重要貿易夥伴因為中國不願減排，威脅要限制貿易，讓中國大為緊張。美國和其他國家若干選民高聲呼籲，要求對中國之流不願簽署國際氣候管制的國家課徵邊境稅，這種情緒中有一部分其實是變相的保護主義，因為中國大部分出口都是低碳產品。不過中國領袖不想妨礙國際氣候合作，更不願意承擔可能的成本。中國斷定接受氣候變遷政策是和歐美維持友好關係、緩和政治和貿易緊張的要素。二〇〇九年秋天，胡錦濤在聯合國扼要說明這種立場，呼籲已開發國家和開發中國家對氣候變遷問題，採取「雙贏」策略。

印度：氣候不可知論者

印度和中國經常相提並論，好像兩國具有相同觀點。喜瑪拉雅山「水塔」是供應中印兩國大河水源地，也是兩國共同關心的地方。印度的情況和中國差異很大，印度用煤炭生產大部分電力，也燃燒很多生質燃料，不過，印度產生的二氧化碳只占全球的五%，中國占二三%；就這一點來說，印度經濟能力只有中國的四分之一。印度用老套方法，應付國際氣候變遷談判，就是重覆強調自己是非常貧窮的開發中國家，追求經濟成長之際，不應該因為工業國家二百年來的排碳而受罰。此外，環境部長賈蘭·拉梅什說，印度政客要是同意美國或歐盟的氣候變遷政策，

「一定會完蛋」。

印度進一步融入世界經濟體系時，觀點改變。印度總理辛哈任命拉梅什擔任環境部長時說：「印度沒有造成地球暖化，但是努力協助解決暖化。」

後來印度的說法改變。拉梅什在國會中說：「印度是世界最容易因氣候變遷受害的國家，我們依賴的季風是國家命脈……如果季風沒有來，我們會非常難過，如果季風來的時候對，我們會非常高興。氣候變遷對季風造成的季節不確定，對印度絕對是應該優先處理的問題。」

第二個弱點是冰河狀況。拉梅什說：「喜瑪拉雅山冰河狀況會決定我國用水安全。」但冰河後退是因為地球暖化，還是因為「自然的周期變化」，現在尚無定論。

就環境部長而言，拉梅什提出一個少見的觀點：「氣候天地有三種人：氣候無神論者、氣候不可知論者和氣候福音派信徒。我是氣候不可知論者。」用他的話來說，和生活「息息相關」的國內水源和空氣污染問題，「遠比氣候變遷問題更重要、更急迫。」

二次大戰後，號稱四強的美、英、法、蘇努力達成戰後的協議。談到國際氣候管理問題時，美國、歐盟、中國和印度號稱新四強，巴西也變成愈來愈重要。二〇〇九年十二月哥本哈根舉行氣候會議時，這種情形更趨明顯。

「希望哈根」

有人把哥本哈根會議稱為哥本哈根十五國會議，這次會議本來要承續京都會議的使命，因此，很多人非常期望在會議中達成全球新協議。京都會議後的十二年間，各國動用數十億美元經費，

研究氣候。但是有關氣候變遷問題的共識並沒有擴大。美國新任總統的能源政策建立在氣候變遷問題上；美國眾議員通過排碳交易法案；歐盟澈底認同氣候變遷的嚴重；中國、印度和其他開發中國家也在國內推動認識氣候變遷運動。難怪有人在籌備階段，把哥本哈根會議冠上「希望哈根」的綽號。

總共有一百一十三位國家元首前來哥本哈根，光是運送所有代表的運籌作業，就是惡夢一場，此外，還要應付幾萬名非政府組織活躍分子。會議廳可以容納一萬五千人，卻有四萬人報名參加，最後有二萬七千人獲准參加。

各國耗費精神準備哥本哈根會議，但會前很多基本問題並未達成協議。美國參議院還沒有通過氣候法案，代表美國顯然無法在哥本哈根簽署具有法律效力的條約。開發中大國顯然也不同意列入已開發國家。如果是這樣，要讓美國參議院同意氣候法案就難多了。

眾多代表團、過多的群眾、南轅北轍的意見、在在使哥本哈根會議雜亂無章。時間一天、一天過去，與會人員的挫折感愈來愈嚴重，會議可能無法達成協議。

會議結束前幾天，美國總統歐巴馬飛抵哥本哈根，計畫當天稍晚離開，歐巴馬一抵達，國務卿希拉蕊就告訴他，「哥本哈根會議是我從初中學生會以來所參加過最糟糕的會議。」

歐巴馬和多國領袖結束一場雜亂無章的會議後，告訴幕僚人員，想立刻和中國總理溫家寶見面。幕僚人員回答溫家寶已經前往機場，不久後又有消息傳回，溫家寶還在會議中心某處，歐巴馬和幕僚人員急忙前往。時間緊迫，因為歐巴馬計畫在幾小時內離開，希望趕在暴風雪襲擊華府前返抵美國。

歐巴馬在中國代表團所在辦事處的長廊盡頭外，遇到一位驚訝的安全人員，安全人員慌張阻攔，歐巴馬把他推開，闖入屋裡。讓歐巴馬驚訝的是，除了溫家寶，基礎四國領袖也在場：巴西總統魯拉、南非總統祖瑪、印度總理辛哈；他們聚在一起，希望找到共同立場。美國總統突然出現，也讓這四國領袖吃驚，不過，他們不會把人打發走。歐巴馬坐在魯拉旁邊，面對溫家寶。溫家寶從錯愕中回神後，把正在討論的草稿遞給歐巴馬，歐巴馬很快看了一遍，說內容很好，只是想加上「幾個要點」。

接著是一段擬稿時間，歐巴馬大致變成書記官。中國的首席氣候談判代表一度強烈反對歐巴馬的說詞，但是溫家寶下令不要翻譯他的插話。

最後，經過一番場面偶爾相當激烈的討價還價，各國領袖達成協議：哥本哈根會議不會簽訂公約，也不會擬訂具有法律約束力的目標，但已開發和開發中國家都要承諾沒有約束力的減排。同樣的，開發中國家進行的「緩和氣候變遷的行動」也應該「接受國際評估、報告和確認」。這項協議也具體實現防止氣溫上升超過攝氏二度的主要目的。基礎四國要求歐巴馬，和西德總理梅克爾、法國總統沙克吉、英國首相布朗等歐洲領袖協商接受這項協議。這三國領袖本來希望獲得更有約束力的協定，卻只好勉強接受這項協議。歐巴馬隨即冒著風雪搭機飛返華府。哥本哈根的暴風雪繼續下個不停，全體會議人員一致「讚賞」這項協議，很多代表團顯得意興闌珊，甚至有點生氣，大會也沒有接納這項協議。

哥本哈根協議不是清楚的國際協定，只是維持現狀的做法；這種結果充分說明為什麼聯合國無法制訂改善氣候行動計畫。要解決這種困境，只能採用國際關係中「可變結構」模式，也就是

把某個問題具有共同利害關係、也有能力採取行動的國家集合在一起；氣候變遷的「可變結構」就是把國內生產毛額很高、同時也是溫室氣體排放量最多的少數國家，集合在一起。這種做法和二〇〇七年美國總統布希推動的主要排放國、後來改名主要經濟體的模式類似——當時布希曾經召集幾個主要國家在華府開會，試圖找出比透過聯合國推動還可行的方案，處理氣候變遷問題。

對希望能夠大規模改善氣候狀況的人來說，哥本哈根不是唯一令人失望的地方，美國國會氣候立法失敗是第二個令人失望的地方。美國參議院比眾議院更難通過氣候法案，主因是反對票居多。眾院投票贊成韋斯曼——馬基法案的議員中，有四分之一來自傾向自由主義的紐約州和加州——兩州居民大都贊同自由主義。但是紐約州和加州在參議院中各只有兩票而已。此外，根據參議院的投票規定，一百票中要有六十票贊成才能通過法案。出身大量燃煤和生產能源各州的參議員對氣候法案並不熱衷，很多參議員面對嚴重衰退和景氣復甦緩慢，擔心氣候法案可能衝擊經濟；此外，部分參議員看到華爾街崩潰，沒有興趣新設一個巨大的碳交易金融市場。二〇一〇年共和黨成為眾議院多數黨以後，氣候法案要想立法，就變得更不可能。

喜馬拉雅山冰河情況

哥本哈根會議進行時，政府間氣候變遷委員會的信用却逐漸受到侵蝕，發生「氣候門」事件：有人入侵英國東安格利亞大學氣候研究中心的電子郵件，這個地方是支援政府間氣候變遷委員會氣候研究工作的重要研究中心。很多氣候科學家和氣候行動分子認為，這些郵件遭到竄改，內容嚴重扭曲。其他人卻認為，有些著名科學家故意變動郵件內容，以便獲得想得到的結果，藉此毀謗和孤立抱持異見的人。引發最大爭議的伎倆是把互相矛盾的資料混合在一起，編造出氣溫逐漸上升的氣候圖。但是事後的幾次調查雖然提出批評，卻認為參與的研究人員沒有責任，指出他們處理資料的方式沒有違反「學術界可以接受的做法」。

但是這件事已經造成軒然大波，二〇〇七年出版的政府間氣候變遷委員會第四次報告成為攻擊目標。該委員會之父布林曾經制訂謹慎小心的原則，要求所有結論都必須有證據，不過，協調氣候研究「不可或缺的人布林」已經在二〇〇七年去世。有人發現最新的政府間氣候變遷委員會報告中，供制訂政策參考的摘要比整個報告的結論語氣還明確。此外，報告中也出現一些明顯錯誤：安地斯山脈冰雪融化的消息來源，只是一本進行雜誌採訪登山導遊的報導；最大的爭議是斷言喜馬拉雅山的冰河和恆河源頭的冰河融化很快，「最晚」會在二〇三五年消失，這是政府間氣候變遷委員會第四篇報告中最「嚇人」的預言之二。

印度環境部委託印度科學家進行研究，挑戰這種說法，他們的報告指出，很多冰河正在融化，卻還有一座冰河繼續向前推進；「喜馬拉雅山冰河正在後退」，不過「這種認為相當平常」。這篇報告提出令人注目的評論：一九七七年恆河源頭的冰河後退的最快，現在「幾乎完全靜止不動」。

印度政府的報告引發抗議。政府間氣候變遷委員會主席帕喬里指責這篇報告「狂妄自大」，好比「否定氣候變遷和幼稚科學」的「巫毒科學」。後來發現，二〇三五年並不是仔細研究後的結果，只是一九九九年某家英國雜誌社用電話採訪一位印度科學家時得到的數字，後來某一個環保團體和政府間氣候變遷委員會的影響評估報告，逕自引用這個說法。

印度環境部長拉梅什說，喜瑪拉雅山冰河健康與否當然值得關心，「但是政府間氣候變遷委員會報告中說冰河會在二〇三五年消失的說法，完全沒有科學依據。」一九九九年接受電話訪問的那位科學家，現在也說他的意見「純屬猜測」，他也沒有提到時間，因為他不是「占星家」，不過特別指出，冰河的「情況很差」。

過了一陣子，政府間氣候變遷委員會提出更正，並表達歉意。

後續報告肯定這個委員會的工作範圍和任務，但是這個委員會製作報告流程的準確性已經受到傷害，因此，二〇〇九年秋天以前資料的準確性令人存疑。有一段時間裡，各國民意調查顯示，大家不再那麼關心地球暖化，也不認為這是急迫問題，對氣候變遷政策也不那麼支持。

極端天氣

民意對氣候的態度像天氣一樣善變，二〇一〇年夏天，決策官員和民眾心中已經不再區分天氣和氣候；短期、變化很大的是天氣，幾十年、幾百年甚或幾千年才會表現出來的是氣候。有些政策領袖開始把注意力從氣候變遷風險，轉移到氣候突然惡化的危險。世界各地極端天氣頻傳，美國若干地區乾旱成災，若干地區卻大雨傾盆，東岸氣溫異常炎熱，考驗大家的脾氣和供電系統的能力。暴風雨在巴基斯坦和中國西部造成前所未見的超大洪水；光是巴基斯坦，流離失所的人民就多達二千萬人，迫切需要食物、飲水和安置。炎陽日復一日照射，幾乎把俄羅斯大部分地區曬焦，溫度持續維持攝氏三十八度以上，火災肆虐各地，滾滾煙霧掩蓋整個莫斯科，紅場從上百公尺以外看來仿若灰濛濛的剪影，俄羅斯三分之一的小麥歉收，迫使政府禁止穀物出口，國際市

場小麥價格一飛沖天。俄羅斯總統麥維德夫說：「過去五十到一百年間，我國沒有發生過這種熱浪，不幸的是，這一切都證實地球氣候已經發生變遷；我國歷史中從來沒有這種天氣；這一切都警告我們要改變過去的工作方式和做事方法。」

麥維德夫又說：「現在大家都在談論氣候變遷問題。」

俄羅斯總理普亭也表達同樣的看法，他曾經說過，氣候變遷後，俄羅斯人可以少買皮大衣。二〇一〇年八月，普亭訪問俄羅斯北部某個科學研究站時說：「氣候正在改變中，今年國內氣溫升高，引發多起火災，我們必須正視這個問題。」不過，普亭又說，他不知道氣候變遷是人類活動造成的結果，還是「地球自然運轉的結果」。

坎昆的諾言

哥本哈根會議結果令人失望，有些人覺得這次會議根本就是一場災難。一年後在坎昆舉行的會議似乎使制訂氣候規則的努力恢復正常，相形之下，坎昆會議比較成功，原因之一是有沒有抱過高的期望。

大約有一百九十三個國家經過一年艱辛談判後，簽署坎昆協議，協議重點是採納美國、歐盟和基礎四國在哥本哈根同意的做法：各國明確承諾減排。協議內容也包括設立監測和排放查核程序。依據這套系統，利用國內資源造成的排放，減排措施會在國內監測；利用國際資源造成的排放，減排措施要接受國際監測。為了提高國內行動的透明度，每兩年會進行國際諮詢和分析，因此獲得的資訊會在有技術專家參與的國際討論會中分享。坎昆協議的另一項重點是再度確認控制

溫度上升的目標，是要把上升控制在攝氏兩度以內，不過很多人認為這個目標過於樂觀。

但是坎昆協議仍然留下許多懸而未決的問題，其中最重要的是，是否延長二〇一二年到期的京都議定書期限。京都協議書規定的已開發和開發中國家責任差異很大，已開發國家愈來愈覺得這種差異不合理，開發中國家卻堅持應該有差異的看法。解決之道是擬訂取代京都議定書、雙方都可以接受的新協議。新協議必須根據歷史排放量、區分已開發國家和開發中國家，另一方面也正視兩種陣營中都有排放量很大的國家，因此應該各有合理的減排分攤。簡單的說，在完成新架構前，還有很多認為要做。

美國環保署的責任

依據坎昆協議，美國承諾以二〇〇五年為標準，在二〇二〇年前，減排十七%。因為排碳權交易法擱淺在參議院，短期內無法立法，於是歐巴馬政府放棄蘿蔔，改拿棍棒，或是像某些人說的，改拿刺刀，改由環保署推動管制行動。二〇〇九年，環保署依據二〇〇七年麻州控訴環保署的判決，發布調查報告，指出溫室氣體排放威脅大眾健康和福祉，因此環保署根據清潔空氣法，有權管理溫室氣體排放。

環保署發布危險報告後，花了幾年時間，公告減排標準，包括汽車和貨車等移動源的排放量、以及發電廠和煉油廠之類固定源的排放量。就移動源排放量而言，排放標準採取高省油標準，這些標準由環保署和交通部在二〇一〇年共同公告。

二〇一一年一月，環保署採取行動，發布許可規定，管制固定源的二氧化碳排放量。根據規定，發電廠或煉油廠新建或更新時，工廠所有人應購置最好的控制排放設備，環保署計畫在第二階段管制中，推出未來若干年適用的發電廠和煉油廠排放標準。這種標準遠比許可規定的影響廣泛，雖然具體作法還沒有定案，但是環保署可能要求發電廠每發一度電，只能排放多少二氧化碳。

但是環保署進一步規定固定源排放量時，却遭遇反彈，國會和各州都反對環保署設定溫室氣體排放標準。反對環保署規定二氧化碳排放量的人說，環保署已經越權，違反人民意志、傷害經濟。眾院多數黨共和黨議員提議刪除環保署執行二氧化碳計畫的預算；有十幾個州政府向法院控告環保署溫室氣體的管制規定。德州州長利克·斐利甚至拒絕遵守環保署二氧化碳排放量管制的命令，他說：「我們和環保署的爭論顯示，華府有關環境的命令式官僚作風，正在摧毀聯邦主義和個人自行做成經濟決定的能力。」

眾院能源暨商業委員會主席福瑞德·厄普頓說：「我們不容許白宮執行未經立法的條例。」他建議經常邀作證的環保署長麗莎·傑克遜，最好在國會山莊有自己的停車位。

二氧化碳排放量管制的爭論結果如何，要看未來五年美國國會的結構、由那一黨控制、問題的性質如何、未來氣候變遷的國際體制是否存在、結構如何而定。

冰河的遺產

十九世紀少數科學家和博物學家提出氣候變遷問題以來，這個問題已經變得幾乎完全不同。這些學者對冰河從那裡來、到那裡去感到好奇，過去的世界是否比較寒冷、是否處在冰河期中？

冰河是否可能再來、摧毀人類文明？他們也想了解大氣層，了解為什麼大氣層白天不會酷熱、晚上不會嚴寒？大氣層是不是像地毯一樣，隔離地球和外太空，因此生命得以在地球上生長茁壯？

十九世紀中葉，丁達爾在阿爾卑斯山上跋涉時，冰河的「原始壯觀」使他目瞪口呆，巨大的冰塊使他先是讓他「驚奇」、接著讓他「害怕」。這種害怕的感覺引導丁達爾去了解大氣層怎麼保留太陽的部分熱量，穩定地球溫度。

一九五八年，基林初次爬上夏威夷莫羅亞氣象觀測站，獨自一人進行研究，測得大氣層二氧化碳含量大約是百萬分之三一五，五十年後，大氣層二氧化碳的濃度增加為百萬分之三三七。氣候變遷成為成千上萬科學家的研究題目，研究經費高達數百億美元，也是政策和政客注目的焦點。為了避免氣候變遷造成可怕後果，總體目標是控制二氧化碳濃度不超過百萬分之四五〇。有人警告，二氧化碳持續上升，可能已經造成「無冰的世界」，人類即將面臨無冰時代。

有人說不確定性很大，氣候運行的知識仍然有待開發，氣候的特徵就是變化多端。也有人說，百萬分之四五〇的目標不實際，就像想從化石燃料急速改用其他燃料一樣不實際：化石燃料目前大約占世界能源需求的八〇%。

但是不管科學和政策如何爭論，氣候變遷速度加快、控制排碳的作法正在改變能源政策和市場、刺激投資、開創很多新科技的研究。這一切都促使大家追求更高的能源效率、低碳或無碳的能源、促進再生能源的誕生。

第三篇 新能源

再生能源的再生

一九七九年六月二十日，美國總統卡特和夫人蘿莎琳踏上白宮屋頂，隨從和記者緊隨在後，為一套太陽能熱水器舉行落成典禮，這是白宮有史以來第一次，也是在有一次在白宮屋頂舉行的記者會，卡特說：「沒有人可以禁止太陽照射。」太陽能熱水器的成本是二萬八千美元，如果能源價格一直居高不下，這項投資七到十年間就可以回本。卡特又說：「從現在開始，一個世代以後，美國人進行駕駛太陽能的至為精彩冒險中，太陽能熱水器只是其中很小的項目。」他說，到時候，這台熱水器可能已經成為「古董，可以放進博物館」。

卡特站在白宮屋頂上，訂出宏偉的目標：到公元二〇〇〇年，美國二〇%的能源要來自太陽能。他答應白宮隔年會動用十億美元推動這項工作。

一九七九年卡特舉行記者會時，利用太陽能（後來改稱再生能源）已經是世界能源思想中的趨勢。一九七〇年代初期阿拉伯的石油禁運，接著爆發伊朗革命，不僅造成石油供應中斷，也促使大家十分擔心世界未來的石油供應。這些原因加上愈來愈明確的環保意識，促使永不枯竭的太陽能和再生能源，變成解決問題的方法。再生能源乾淨、穩定、取之不盡、用之不竭，美國政府

推出各種獎勵措施，推動再生能源工業，隨著研究經費流入，技術人員、創業家、活躍分子和熱心人士都投入太陽能的開發。

但是太陽能占全部能源二〇%的目標從未實現。相反的是，最初大家一窩蜂投入太陽能，產生幾十年的失望、幻滅、倒閉和一籌莫展的結果。到一九九〇年代，日本和德國政府強力資助，建立再生能源產業後，美國的再生能源產業才逐漸復甦，到二〇〇四年或二〇〇五年，才具備規模。不過，到二〇一〇年，再生能源只占美國全部能源供應的八%，和一九八〇年相同。如果把多年來供應穩定的水力發電、生質能源（主要是乙醇）扣除，二〇〇九年再生能源只占美國能源總供應的一·五%，其他國家也是如此。

但今天大家認為再生能源是愈來愈重要的能源，足以解決能源供應、能源安全和氣候變遷的三大挑戰。中國國家主席胡錦濤說，中國「在新回合的全球能源革命中，必須掌握主動出擊的機會。」歐盟進一步表示，到二〇二〇年，再生能源會占歐盟全部能源供應的二〇%。英國首相卡梅倫宣稱：「我希望英國成為有史以來最環保的國家，英國能源政策保證會有核電問世以後所僅見的戲劇性變化。」二〇一一年，德國總理梅克爾為德國設定新目標，再生能源發電會由二〇一一年的一七%，增加到二〇二〇年的三五%。

歐巴馬開美國總統的先例，強力敦促美國政府投入能源系統的再造，並且推動再生能源。事實上，他認為美國的命運繫於再生能源的發展，他說：「領先其他國家開發新能源的國家，會稱霸二十一世紀的全球經濟。」一般企業和投資人都認為，再生能源在全球龐大能源市場中會愈來愈重要。

供應全球經濟的現有能源系統十分複雜、規模龐大，寄望再生能源提高市場占有率並非易事。今天的政策和政治主張會決定再生能源的前途，近年來再生能源成本大幅降低，卻仍然無法和傳統能源競爭，世界各國致力訂出碳價、不管是課徵碳稅還是推動排碳權交易，都會提高再生能源對抗傳統能源的競爭力。

不過，再生能源發展就算停頓二十五年，仍然注定會變成重要能源。

再生能源是什麼？

再生能源很有吸引人，是取之不竭、對環境友善的能源，從語法上來說，再生能源指很多互不相關的技術：

- 一、風能——風可以推動精密機器產生電力，是快速成長的能源。
- 二、陽光——經由太陽能電池、鏡片或其他聚集光線轉化成電流的科技。
- 三、生質燃料——乙醇、生質柴油或先進生質燃料（來自水藻、纖維素和其他材料）都可以取代汽油、柴油或噴射燃油。
- 四、生質——經處理後送入發電廠燃燒的木材或其他植物材料；開發中國家人民取暖或烹飪用的木材或糞便。
- 五、地熱——用抽水機抽取地下熱水或熱蒸汽，用來推動發電機發電。
- 六、水力——利用落下或加壓的水推動發電機發電；不過，水壩因為環保原因日漸遭受批

評，在很多國家不易興建。

七、被動式太陽能——現在也叫綠色建築，利用自然環境、降低能源消耗。

此外還有包括潮汐發電在內的其他科技，如果把垃圾回收當作再生能源，那麼垃圾發電也算其中一種。上面談到的都是現在最熱門的再生能源，這些科技有什麼共同特性？這些都是無限的資源、分布廣泛、不會增加碳的濃度，也比較不會產生碳足跡。

電動車的電池也可以列入，如果這種電池充電的電源是風能或日光能產品，算是再生能源。

地球日

一九五一年杜魯門總統指派佩利委員會，調查韓戰期間的物質短缺，委員會的報告警告將來可能有石油短缺和依賴中東石油的問題。報告宣稱：「直接利用太陽能，可能是科技對解決物質短缺所做的最重大貢獻。」一九五五年，艾森豪公布「總統發展太陽能咨文」，稱讚「更廣泛利用幾乎永不枯竭的太陽能」。但是隨後十五年幾乎沒有什麼進展。

一九七〇年四月二十二日是美國人關心環境、確認環境影響政治的日子——地球日。

丹尼斯·海斯是哈佛大學甘迺迪政府學院研究生，為了創設地球日休學一年。這個橫跨美國東西兩岸演出的「事件劇」，目的是要喚起國民良心，估計美國有二千萬人參與這項活動，參與者示威、遊行、參加研討會和宣導會，在製造污染的工廠外面抗議，從河中撈起輪胎和舊器具，埋葬汽車、表示反對霾害。地球日的主要目標是骯髒的空氣、污染的河流和海洋、有毒廢棄物、

化學殺蟲劑、露天採礦、噪音、石油漏油事件和人口過剩（送給準父母的鈕扣很受歡迎，上面寫著：「兩個恰恰好」。）國會休會，好讓議員回家。（有位國會議員說：「我遇到的每個人都在發表演說。」）

美國人在地球日以後改變觀念，幾個月以後，第一部清潔空氣立法、尼克森總統成立環保署，《時代雜誌》把「環境」封為「年度最重要問題」。

但是回想起來，地球日忽略的東西令人驚訝。一九七〇年四月地球日討論過能源的生產和消費，議事表上卻不包括能源。海斯回憶說：「大家談論石油、天然氣、煤炭、核能和水力發電，就是沒有人討論能源。」

一九七三年石油禁運前，能源就只是一種產業，或是幾種不同的產業。一九七三年後，能源變成人人關心的事情。

你早晚會知道

能源忽然間從沒沒無聞，變成華府的頭號議題，原因是一九七三年的石油禁運造成汽油價格一飛沖天，汽車在加油站前大排長龍。紐約參議員傑可布·賈維茲是「自由派共和黨」名人，一九七三年底第一次石油危機後不久，在華府加油站前排隊等了九十分鐘，氣的一肚子火，一回到國會山莊，就衝進辦公室，質問那位幕僚負責能源。答案是沒有人負責能源，賈維茲更為難過，請人把年輕助理史考特·史克拉請過來，連頭都沒有抬，就請史克拉當「能源」助理。史克拉客氣的抗議，說自己不懂能源，因為他念研究所時主修中蘇關係，現在的工作是軍事問題。史克拉

特意走到走廊邊，把電燈開關打開又關掉，說：「參議員，我不知道這種材料是怎麼來的。」

賈維茲笑著說：「孩子，你早晚會知道。」

一九七四年第一項太陽能法案立法完成，聯邦政府提供的研究經費大幅增加；現代再生能源工業大約也在這時誕生，兩件事同時發生並非偶然，太陽能成為大多數再生能源的概括說法。

一九七五年是福特擔任總統的第二年，這一年大約有五千人前往華府，參加太陽能工業會議。《紐約時報》聲稱：「太陽能突然間名聲大好，只不過三年前，美國還視之為環保怪人熱衷的題目。」

一九七〇年代中期，環保運動的重心是能源：反對核能，主張用太陽能取代核能。環保運動主要成員中，聰明的阿莫利·羅文斯畢業於哈佛大學物理系，曾經在環保組織「地球之友」服務。羅文斯曾經為《外交事務》雜誌寫過一篇很有影響力、討論「軟質能源」的文章，主張能源效率和再生能源，比石油、天然氣、煤炭和核能等「硬質能源」省錢、生產力又比較高。一九七七年地球日發起人海斯的新書《希望之光：過渡到後石油世界》出版當天，正好碰上紐約大停電。

一九七七年一月有一位政治界新人抵達華府，再生能源因他而獲得最大助力。

等同戰爭

卡特擔心依賴外國石油和發生另一次能源危機，把能源當成新政府最大的挑戰，因此煤炭和節約能源變成解決問題的兩個答案。中情局剛剛完成的報告警告，世界石油供應十年內會逐漸

少，這篇報告更促使卡特擔心能源安全。他一九七七年就職後不到兩星期，穿著傳統中間開扣的米色運動衫，坐在火爐旁邊，進行首次白宮「爐邊談話」，說明美國的最迫切要務之一是制訂國家能源政策，他的談話普受美國人歡迎。

兩個月後，卡特從總統辦公室對全國談話，提醒美國人「我的談話不會令人愉快」，因為除了預防戰爭外，「這是美國人一生中即將面臨的最大挑戰。」卡特說，能源問題「在二十世紀結束前會愈來愈惡化……我們正逐漸用盡石油和天然氣，因此必須做好改變的準備——嚴格節約石油和天然氣用量，重新利用煤炭，還要開發像太陽能這種永恆的再生能源。」他的結論是，這種困難度「等同戰爭」。

無論供需平衡的具體方案是什麼，卡特為美國和全世界設計了長期能源的努力目標，表明美國和世界市場注定要結合在一起。

卡特在日記中寫道：「觀眾對我在電視上發表的能源訊息，反應應該還好。」但是觀眾並不喜歡他的演講，卡特的尖銳聲調和悲觀論調，內容強調犧牲個人享受、避免道德弱點、預期能源會永遠匱乏，這一切構成了一篇好壞參雜的演講。幾十年後，卡特的資深能源顧問走過白宮旁邊的舊行政大樓時說：「卡特的運動衫仍然在各個走廊上飄來飄去。」

卡特請史勒辛格負責在九十天內，完成一個全國能源緊急計畫；史勒辛格曾經在尼克森和福特手下擔任中情局長和國防部長，善於處理複雜事務和官僚政治，還把五十個和能源有關的部門合併成新的能源部。

史勒辛格把卡特政府延續支持太陽能的作法總結成一句話：「大眾對太陽能寄予厚望。」卡

特政府和國會在那幾年裡，為今天的再生能源工業奠定基礎，提供稅務優惠、補助、法規、成立太陽能銀行和研發資金。卡特政府也在科羅拉多州落磯山下的哥爾登，設立一所專門研究太陽能的國家研究所。史勒辛格請一向批評卡特政府沒有快速發展太陽能的海斯擔任所長，這樣做很有道理：支持核能的人主持核能計畫，支持煤炭的人主持煤炭計畫，支持再生能源的人主持再生能源計畫不就順理成章嗎？

「公用事業管制政策法」電廠

另一個政策十分重要，就是一九七八年公用事業管制政策法二一〇條，這條法條最初並不引人注目，後來却成為再生能源工業誕生的重要基礎。

電力公司必須向合格電廠簽約購電。這些電廠大都是汽電共生電廠或利用水力或風力發電的小型再生能源電廠。電力公司支付合格電廠的費率由各州制定，依照有點神祕的「避免成本」概念計算電價。電力公司保證依照未來理論上的油價和未來建造新電廠成本，計算購電價格。避免成本通常是以市場最高成本估算，在加州等地，條件非常優惠。保證高價的市場足以促使很多人投入。但是，很多這種電廠後來號稱「公用事業管制政策法電廠」，因為如果不是因為「避免成本」電價偏高，這種電廠根本沒有競爭力。

除了創造市場以外，這種電廠還有另一種影響。因為政府規定電力公司向非自有電廠購電，等於採取初步行動，打破七十多年來電力自然獨占的局面，進一步刺激再生能源。

這幾年裡，太陽能政策和獎勵措施的性質激起極多辯論。有人認為這種系統設計過當、過於

昂貴，也太複雜。太陽能工業協會推廣經理喬治·譚納抱怨說：「顧客只要福斯汽車，我們卻生產凱迪拉克轎車。」（多年後，譚納出任中央情報局局長）。不過，這股動能沒有衰退，到一九八〇年，太陽能工業協會會員多達一千家以上，其中少數是新公司，但也有一些大公司，例如格魯曼飛機公司、波音、美國鋁業、通用汽車和埃克森石油。

再見！陽光

好景不長，太陽能工業才出生就收攤了。伊朗革命造成石油市場一片混亂、油價急遽上升、新天然氣管線和第二次石油震驚，卡特政府逐漸瓦解。一九七九年七月，卡特在白宮屋頂宣布大膽的太陽能目標後幾個星期，發表一篇號稱「病態演講」的演說，警告美國面臨信心危機和「喪失美國精神的危機」。他處理危機的方式是更換大多數閣員，宣稱工作重心是把大部分力量和數十億美元經費，開發用煤炭或油頁岩提煉的合成燃料，以便擺脫能源危機。

美國人的信心並沒有恢復，一九八〇年十一月，雷根打敗卡特，當選總統。卡特的再生能源政策隨同卡特一齊垮台。

卡特多年後說：「我確信在四年總統任期內，我的努力是人類的最大極限。我沒有吹牛，我發表八到九篇有關能源的演說，後來大家都聽膩了。」卡特又指出，他的顧問說：「總統，請不要再談論能源，你正在以頭撞牆。」卡特自己評估這件事的政治成本太高，「能源嚴重削弱我在國內的影響力。」卡特自我反省後，扼要的說：「這種感覺就像啃岩石一樣。」

生產、生產、生產

如果說卡特是能源悲觀主義者，預言大難即將臨頭，警告美國人要改變生活方式；雷根就正好相反，是樂觀主義者、自信的燈塔、「美國、早安」的倡議者。

雷根政府一九八一年就職後，決心讓市場原則和價格主導能源市場，因應尼克森十年前匆促實施石油和天然氣價格管制造成的市場扭曲、官僚惡夢和無休無止的訴訟，卡特政府為了這種管制，付出相當大的政治代價，同時逐漸撤銷物價管制，雷根政府很快就結束物價管制制度。

美國的物價管制政策保持一部分連貫性，再生能源的情形卻完全不同，成為政治意識型態的考驗，是卡特政府和雷根政府主要的分歧。麥克·哈爾布提是雷根政府能源轉移小組負責人、德州成功的野貓鑽井業者、休士頓佳勒里亞大型購物中心和酒店大樓開發商。他對能源部的訪客宣稱，雷根政府的國內石油和天然氣能源政策真言很簡單，就是「生產、生產、生產」。

再生能源在這種情況中幾乎毫無地位，很快就無足輕重。就雷根主義分子而言，再生能源幾乎代表卡特總統的一切努力，更糟的是，也代表加州州長布朗。布朗接替雷根，擔任州長，但他是反雷根的自由主義分子，綽號叫「月光州長」，是美國最積極擁護風能和太陽能的人。

此外公用事業管制政策法電廠還有實際問題：電廠有新技術、有誇大的地方、也有值得批評的事情。很多公用事業管制政策法電廠不具備經濟效益，事實上其中一部分電廠沒有實用價值，只是累贅。有些小電廠從來就沒有好好運轉。雷根執政後，大幅刪減或完全刪除再生能源的資金和獎勵（卡特政府幾十億美元的合成燃料計畫也遭刪除），上級主管突然召喚太陽能研究所所長

海斯前往丹佛機場會面，告訴海斯，研究所的經費會大幅刪減，四〇%的人員會立刻開除，於是海斯當場辭職。

由於市場因素，太陽能 and 再生能源面臨相當動盪的局面，一九八〇年代初期，對抗通貨膨脹政策導致利息飛升和嚴重衰退，民眾停止消費，房地產陷入不景氣，太陽能產品滯銷，屋頂熱水器尤其如此。

太陽能產業已經褪色。一九八一年，埃克森出售太陽能集熱器部門，埃克森太陽能集熱器總裁施來爾回憶說：「我們對太陽能的看法已經改變，要推廣太陽能產品，需要更久的時間，而且推廣愈來愈難。成本沒有下降，科技開發速度不夠快。」雷根當選後，卡特想在二十世紀結束前，把太陽能發電增加到總發電量二〇%的草率目標已經破滅。其他大企業結論也大致相同。

一九八六年，由於世界市場石油供過於求，油價由每桶三十四美元陡降至每桶十美元，這種情勢摧毀了剛剛萌芽的太陽能產業。油價太低造成太陽能電價完全失去競爭力。一位太陽能業者起初認為自己的「對手」是石油輸出國組織，後來發現如果油價太低，他的事業就完了。

墓誌銘？

一九八六年油價下跌時，白宮屋頂的太陽能熱水器破了一個洞，但是沒有修理就遭到拆除。熱水器設計公司後來解釋，白宮幕僚長唐納·黎根「覺得這套設備只是笑柄，下令拆除。」拆除的設備後來送給緬因州一所大學，生產熱水，給自助餐應用，但後來還是故障，在二〇〇六年再遭拆除，其中一部分送給亞特蘭大的博物館展覽，正如二十七年前卡特在白宮屋頂上的預言一

樣，剩下的其他部分交給卡特總統圖書館。

太陽能的「希望之光」在美國暗淡下來，只剩下些許微光。《紐約時報》指出：「再生能源只是個遙不可及的希望。」有的太陽能企業倒閉，或完全消失，太陽能活躍分子和創業者轉進其他行業。《經濟學人週刊》把一度活躍的太陽能工業，形容成「環保夢想家的商業墓地」。就萌芽中的再生能源工業來說，後來大家把一九八〇年代和一九九〇年代這二十年稱做「死亡之谷」，很多太陽能公司只能掙扎活命。

賈維茲參議員的前助理史克拉拉此時擔任太陽能工業協會主席和太陽能工業說客，他清楚記得當時的心情。他說：「我們真的很憂鬱。」

日本：設法生存

美國「太陽能美夢」破滅，似乎就是再生能源之路走到盡頭。如果全球科技研發龍頭美國打算放棄再生能源，有那一個國家還會堅持下去？答案是日本。

一九七〇年代初期，池口小太郎是日本有權有勢的通商產業省年輕官員，前途一片光明，奉派到能源和礦產部門任職，大為吃驚的發現日本過度依賴中東石油，卻對其中的風險毫無感覺，要是石油供應中斷，日本的下場會很慘。

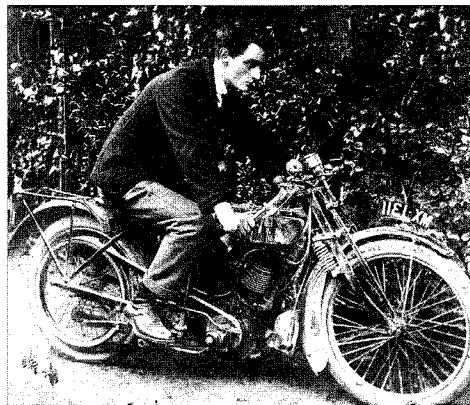
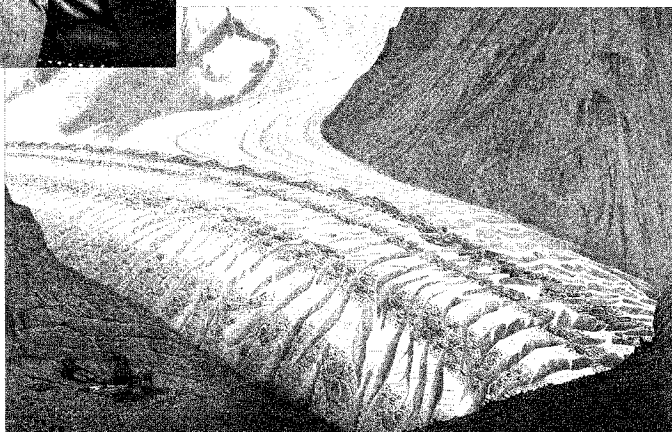
但是池口無法促請別人重視這個問題，因為一九六〇和七〇年代的中東石油促成日本經濟快速成長，這種趨勢應該不會改變。

池口為了紓解焦慮，決定寫一部小說，希望喚醒官員和民眾了解日本的弱點。他假想的危機



丁達爾是19世紀的偉大科學家，也是愛山的登山家，他解答了「天空為什麼是藍色」。他對瑞士冰河的熱愛，促使他發現大氣層如何保留熱能的「溫室效應」。

1837年，阿加西在瑞士冰河上露營，研究冰河期曾經侵襲歐洲的理論，他的研究證明氣候會變化。



1938年，喜歡破舊立新的蒸汽工程師卡倫達主張：大氣層中的二氧化碳可能影響全球氣候，遭到氣象專家嘲笑。

是中東發生戰爭，導致日本的石油進口中斷，主角是誰？正好就是一位行動和思想敏捷、卻非常務實、非常了解日本過度依賴中東石油弱點的通產省官員。池口是現任官員，因此使用筆名堺屋太一，筆名大意是「世界屋頂上的大人」。

但是池口找到出版商前，真實的事情發生了，他的小說變成了事實。一九七三年石油危機解釋，日本人突然擔心經濟成長成果可能化為烏有。日本人正為真實的能源短缺所苦時，池口把小說放進抽屜，認為這時不應該出版。

池口像小說中的主角一樣，由政府徵召，協助政府處理能源危機。池口主持日本的陽光計畫，研究如何減少依賴中東石油、分配補助款、在各種科技投資案中促成企業合作研究、改善政府研究機構的官僚作風。

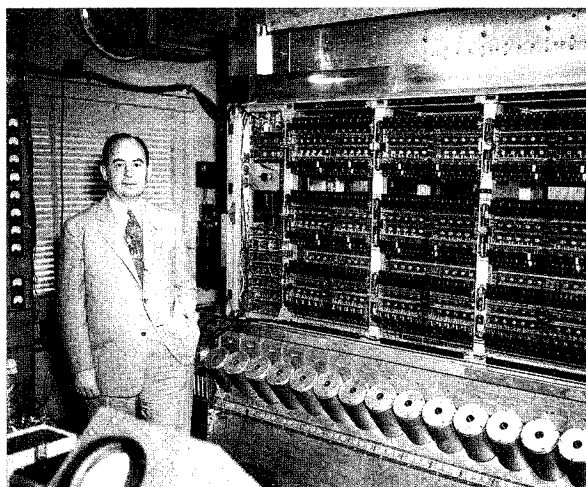
兼職小說家的官員

第一次石油危機過後，池口取出抽屜裡的草稿，於一九七五年出版，書名為《油斷》，意思是「切斷」或「冬天的飢荒」。這本書極為暢銷，銷售量超過一百萬冊。後來他以筆名堺屋太一著稱於世，他很多產，繼續寫作各種題材，作品包括一篇極有影響力的論文《知識價值革命》，預言今天資訊經濟來臨；還有四冊有關成吉思汗的小說。有一家日本刊物形容他「與眾不同」，是「兼職小說家的官員」。一九七九年第二次石油危機發生後，日本政府再度徵召他，籌設「新能源產業技術總合開發機構」，這個政府機構有專用預算和職員，負責繼續推動日本再生能源的研究，然而，當時包括美國在內的其他國家，對再生能源已經失去興趣。

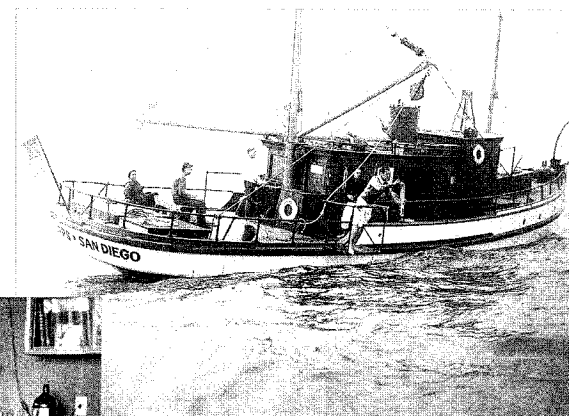


1980年代，斯萬·阿列紐斯計算碳水準提高對溫度的影響，他用手計算出來的模型，和現代超級電腦算出的結果相近。號稱氣候模型之父的他歡迎全球暖化，因為這樣會「帶來產量大多了的作物大豐收」。

1944年6月，歐洲盟軍最高統帥艾森豪訪視即將發動諾曼地登陸的士兵，「根本無法預測」的天氣迫使他延後發起登陸。他出任美國總統後推動研究，希望改善氣象預測。



馮紐曼是20世紀最傑出的天才之一，在數學、生理學和經濟學方面，開創了革命性的研究。圖為他站在1950年代初期研製的電腦旁。他被尊為電腦之父，也用電腦模擬核子反應與氣候。



雷維爾（左圖與上圖中靠船欄者）在現代的大發現時代出海航行，測繪大洋海底，改變世人對大氣層的了解，擘劃氣候變遷的研究方向，提出「人類正在進行大規模地球物理學試驗」的警告。

基林在夏威夷一座火山頂上，測量大氣層中的二氧化碳。他希望「想盡辦法測量二氧化碳的一切」，他提出顯示大氣層中碳水準上升的基林曲線。

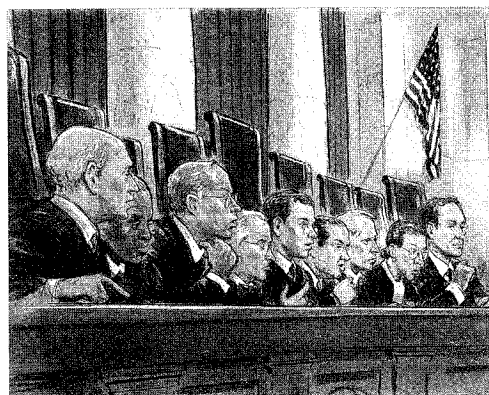




號稱學究頭頭的柯斯獲得諾貝爾經濟學獎，證明市場可以解決環境問題。



美國眾議員馬基在1980年的民主黨全國代表大會上，呼籲美國努力在2030年前，變成「真正的太陽能社會」。



美國最高法院聽取辯論後，在2007年4月判決二氧化碳是汙染物質。大法官布瑞爾認為控制二氧化碳可以避免全球暖化，而且「鱈魚角就安全了」。



2007年，高爾和帕喬里因為在氣候變遷方面的努力，共同獲得諾貝爾和平獎，帕喬里並非以個人身分獲獎，而是以他所說的「政府間氣候變遷委員會鬍鬚公」的身分獲獎。

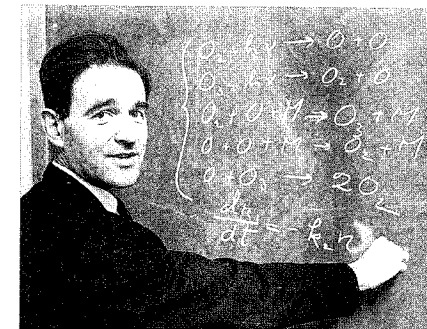
沃斯參議員的全球暖化聽證會日期落在1988年6月23日，並非巧合，這一天是1988年最熱的一天。氣候模型先驅真鍋淑郎（圖左）說，大家對明星證人韓森（圖右）「印象深刻」。



奈契爾夫人從政前是食品化學家，出任英國首相後，成為第一位針對氣候變遷發表演說的重要世界領袖。



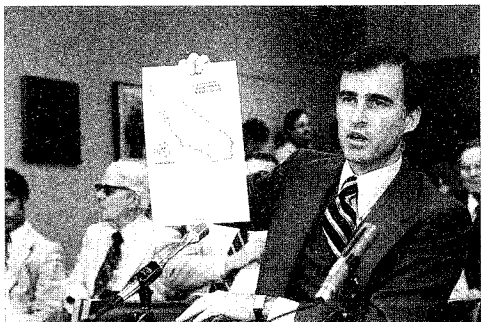
瑞典科學家布林是氣候研究上「不可或缺的要人」，建立了氣候研究的國際合作架構。



老布希1988年競選美國總統時，承諾要用「白宮效應」對抗溫室效應，但布希（圖中）和他的環保署長賴利（圖右）參加1992年里約地球高峰會時，分別遭到攻擊，說他們是「黑武士達斯維德」和「魔王」。



布朗州長在1979年的一場聽證會中作證，他是推動加州風力發電業的功臣。

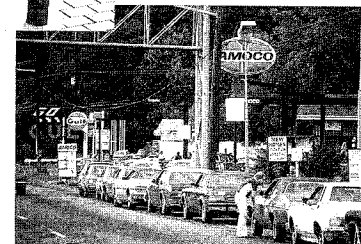


加州錯誤的解除管制引發2000年電力危機，為州民和州長戴維斯帶來災難。戴維斯遭到罷免後說：「時機不利時當政真倒楣。」

布朗初次當選州長37年後，再度當選，後來他簽署法案，規定2020年前，加州三分之一的電力必須來自再生能源。



1979年6月，第一位推動再生能源的卡特總統登上白宮屋頂，啟用新的太陽能熱水器，表示這具熱水器會「推動美國人進行至為精彩的冒險」，或變成「博物館的展覽品」，結果這台熱水器進了博物館。



1970年代石油短缺時，憤怒的美國車主排隊加油。



1970年，研究生海斯創設地球日，結果變成轟動全美的「事件」，也推動一整個世代的環保行動主義。



兼職小說家的官員堺屋太一寫作小說《油斷》，探討癱瘓日本的石油危機，1970年代石油震撼後，他負責籌設一個推廣再生能源的新官僚機構。



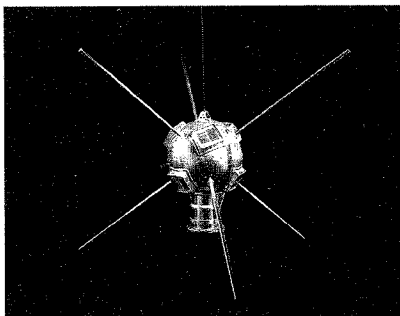
1905年，愛因斯坦擔任瑞士專利局員工時，用10週時間，提出5篇改變世界的論文，其中一篇釋放了核子的潛力，另一篇後來成為光電池和太陽能發電業的基礎。



“VAST POWER OF THE SUN IS TAPPED BY BATTERY USING SAND INGREDIENT”

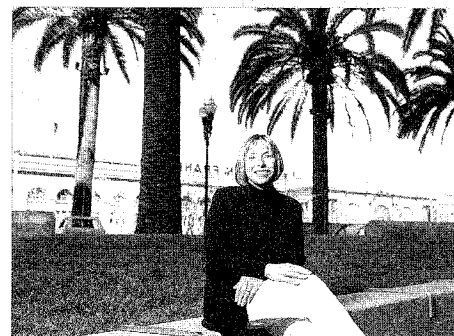
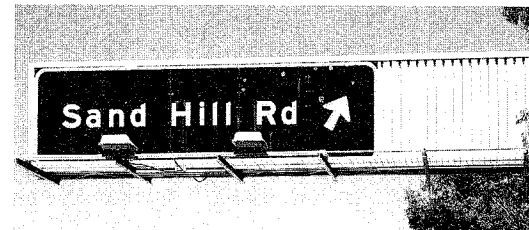
—New York Times, April 26, 1954

1953年，紐澤西州貝爾實驗室的科學家發現矽的光電潛能，1954年4月，發表「能夠生產有用電力」的太陽能電池。



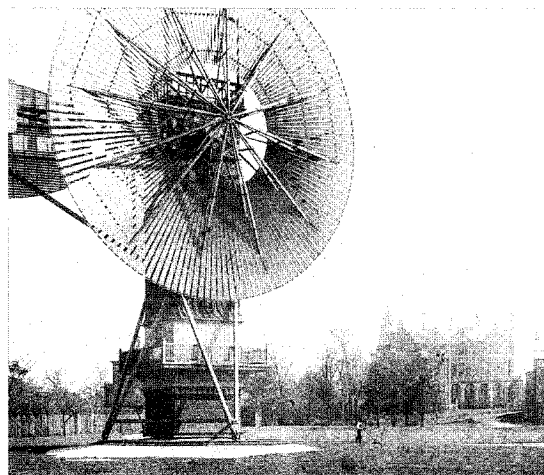
1958年，太陽能電池在美蘇太空競賽中，證明了本身的價值；美國的先鋒人造衛星發揮全部功能後失效，載運的太陽能電池繼續發電多年。

1949年，杜里奧特將軍（下圖）成為美國《商業週刊》封面人物，他在哈佛商學院教授著名的課程「製造業」（右圖）。二次大戰期間，他主導美國陸軍的創新研發，戰後開創了創投業。

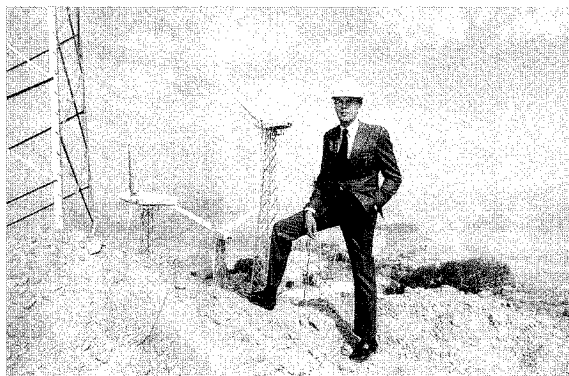


傅洛依德是率先成立清潔能源創投基金的先驅之一，她說，她1990年代募集第一檔基金時，好像「推大石頭上山一樣」。

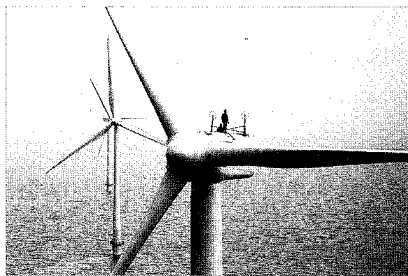
沙丘路和創投基金是同義字，矽谷動力來源的創投基金遲至2000年代中期，才踏進能源領域。



1887年，克里夫蘭「百萬富翁街」一戶豪宅後院中，出現第一台大型發電用風車。

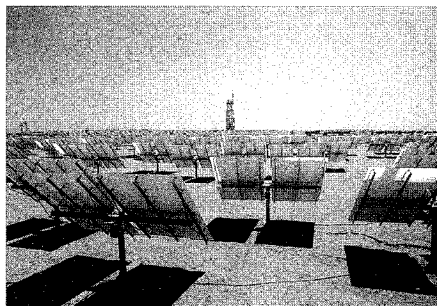


1986年，戴爾森到南加州特哈查比隘口，視察他所擁有的勝利花園風田。他結合丹麥堅固耐用的硬體、加州的獎勵和自己的毅力，協助創造了現代風力發電工業。



今天全球風力發電工業移到海上，追求更大的規模與風力資源。

1998年，長期擁護太陽能的史克拉致贈柯林頓總統一塊太陽能屋瓦。



太陽能集光塔利用集光鏡海，集中陽光，產生超熱蒸汽，推動渦輪機發電。

蒙古犛牛牧人歡迎太陽能電池發的電力，光學電池為世界上沒有電網連接的地方帶來電力。

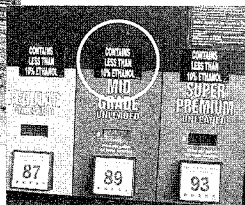


施正榮從澳洲回到中國，創設尚德太陽能電力公司，成為世界最大的光電池製造商。

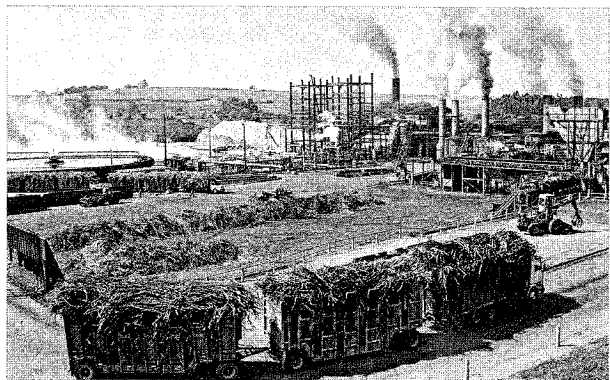
參議員拜赫把一瓶伏特加酒，倒進停在國會山莊空地上的古董車油箱裡。



2011年，美國酒精供應幾乎占汽油供應量的一成。



1979年，處境艱難的農民聚集3,000部拖拉機，組成「拖拉車隊」，在華盛頓示威遊行，要求政府承諾採用酒精燃料。

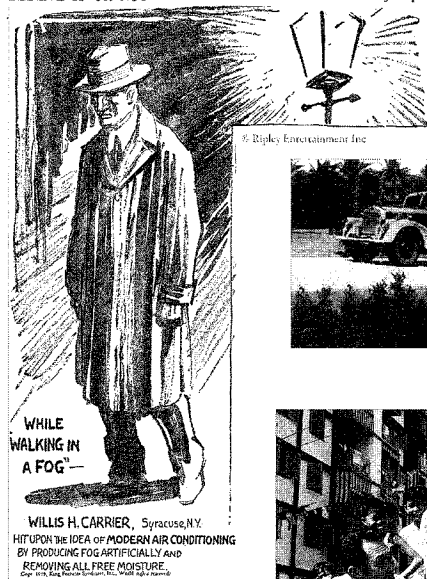


甘蔗送到巴西的精煉廠，等待加工成酒精或砂糖。現在巴西汽車消耗的酒精超過汽油。

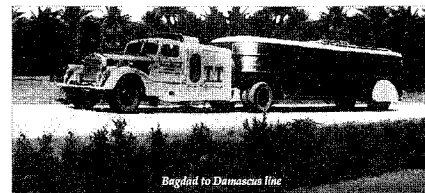
THE CHATTANOOGA TIMES: CHATTANOOGA, TENN., TUES.

BELIEVE IT OR NOT

By Ripley

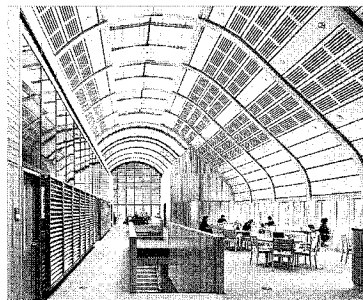


開利（圖左）在濃霧籠罩的火車站月台上靈光一閃，想到冷氣機的構想。到1930年代，美國國會、電影院、百貨公司都已經裝設空調設備，連往返巴格達和大馬士革的巴士都裝了冷氣機（圖下）。

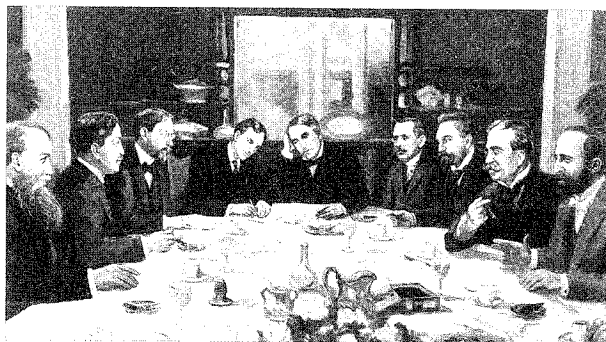


新加坡國父李光耀推崇冷氣機是「20世紀最重要的發明」。

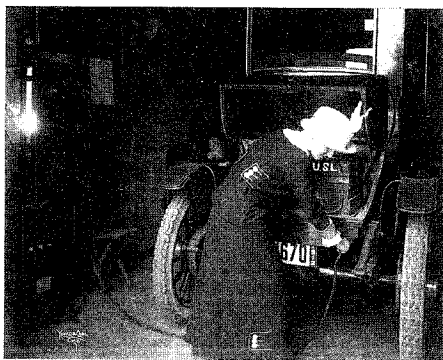
2009年，耶魯大學森林環境研究學院柯倫廳啟用，耗用的能源只有同類建築的一半，是超級省能的建築。



節能減排的標語今天在中國處處可見。



愛迪生（中）告訴福特（中左），應該堅持汽油和內燃機的研發，愛迪生後來改變看法，花了很多年時間，努力開發電動車用電池。

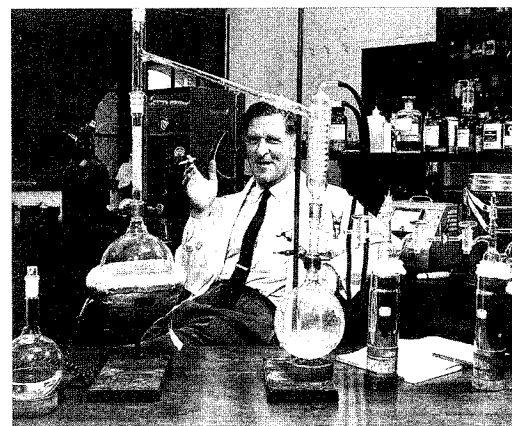


20世紀初期，
電動車數量超過
汽油動力車。

相隔一世紀後，電動車在環保憂慮與政府政策支持下，重回競賽場。2010年，日產與雷諾汽車公司執行長卡洛斯·高恩為純電動車LEAF充電。



1950年代，霾害不斷肆虐洛杉磯，灼人雙眼、侵入肺部，影響呼吸道。下圖為1954年當地一社團，在集會時戴防毒面具以示抗議。



加州理工學院化學家哈根史密斯解開了洛杉磯霾害之謎，發現霾害大致是由汽車排放廢氣造成。他後來擔任今天電動車主管機關的加州空氣資源委員會主席。



堺屋回憶說：「當時我認為石油時代已經過去，接著是知識革命時代。」

通產省曾經嘗試利用地熱，但因產生地熱的地方都是環境敏感地區，因而作罷，改嘗試太陽能。矽是半導體和太陽能電池的主要材料，日本製造半導體的經驗可以用在太陽能電池生產上。日本政府認為如果生產成本能夠大幅降低，太陽能電池會有競爭力，可以成為基本能源來源。

政府補貼消費者購買太陽能板，加上世界最高的家庭電價、驟降的成本、經濟規模帶來的效率、日漸增多的競爭等因素，促成日本太陽能市場起飛。二十一世紀初期，日本是太陽能產品重要製造國，著名公司包括夏普、京瓷和三洋。

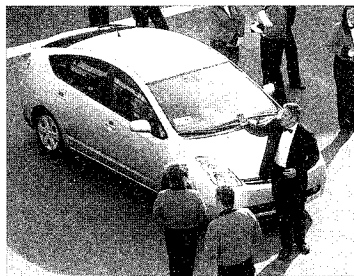
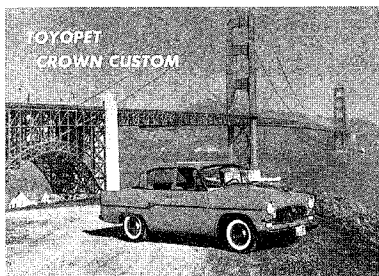
通產省原本希望透過堺屋太一，創造具有出口潛力的新型知識產業，但在目標似乎即將達成之際，再生能源主要生產國却大移轉到另一國。

德國的固定電價制度

柏林圍牆的東德衛兵受命防止東柏林人，從共黨統治的東柏林逃往民主的西柏林。一九八九年時，這些衛兵愈來愈緊張，蘇聯對東歐的控制力減弱，柏林圍牆位在東西對抗前線，東德人企圖破壞圍牆，都會遭到東德衛兵當場射殺。

一九八九年十一月九日晚上，幾十萬東柏林人聽過東德領袖模稜兩可的電視記者會談話後，湧向柏林圍牆，要求打開柏林圍牆。困惑的圍牆衛兵不知如何是好，最後還是打開圍牆，改變歷史。人群湧過邊界，分裂的德國已告統一，不久冷戰也將結束。

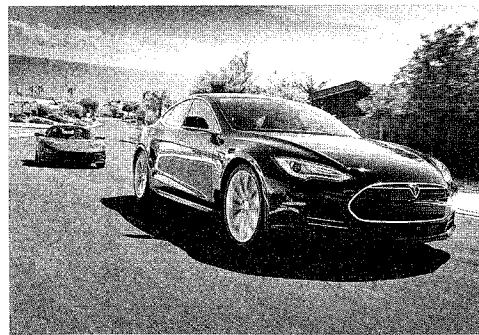
此後整個德國全神貫注於困難的統一工作，花費逾兆美元，把搖搖欲墜、殘破不堪的東德融



豐田汽車公司輸入美國的第一款車皇冠車款，樣子既不流行，品質也不高明。但時移勢變，豐田普銳斯汽車現在變成熱門綠色科技的標準，包括喬治·庫隆尼在內的明星（上右），都乘坐普銳斯油電混合動力車，抵達奧斯卡金像獎頒獎典禮會場。



歐巴馬總統試駕美國第一款全電動車雪佛蘭伏特車，他說，他大概只開了30公分遠，因為秘密勤務局幹員「近來不希望我多開車」。



特斯拉公司的路斯達車款證明電動車也可以變成超級車，該公司正在研製純電動的豪華轎車S車款。但現在仍然太早，看不出電動車的前途如何。

入生活水準高很多的西德。

西德電力公司全力整合東德電力系統，把利用褐煤發電的東德電廠電代化。之際，代表新運動的聯盟悄悄的推動再生能源法，在「近乎意外」的情況下通過立法，結果柏林圍牆倒塌也為德國再生能源工業，開創領先全球的地位，奠定今天全球再生能源產業的基礎。

環保聯盟中最重要的是一九七〇年代末期出現的綠黨，綠黨抗議德國經濟奇蹟帶來的惡質環境，如河川污染、空氣惡化、尤其是森林生態受到的傷害。環保運動的共同目標是反對核能發電，但也納入新左派、反資本主義和反美人士。

一九八〇年代初期，美國為制衡蘇聯新增的飛彈，在歐洲部署新式核子武器，再在德國部署美國飛彈，促發綠色運動轉化成綠黨。雷根總統成為攻擊對象，德國各地大量反雷根、反美示威促使綠黨變成真正的政治力量。

一九八六年四月，車諾比爾發生恐怖核能電廠災變，風從烏克蘭向西吹，帶著放射性物質飄向中歐，造成德國和其他國家恐慌和反核電行動。德國前總理施洛德記得一九八六年是全面反核電的真正轉捩點，他說：「車諾比爾核災是反核的轉捩點，媽媽不讓小孩上幼稚園，反核需要社會力量支持，我們得到支持了。」車諾比爾事件後，綠黨信譽大增，一九九〇年首次獲得聯邦議院席次。

綠黨最重要的目標是再生能源，不過他們並不孤單。社民黨環保領袖赫曼·席爾曾經擔任核能燃料循環研究員，多年後，《時代雜誌》稱讚他是「綠色世紀的太陽能鬥士」。他反對核能發電的理由是，世界不應該依賴「一種不容許出現重大故障的電力來源」。他的目標是「把新模式

納入能源政策」，首先是制訂新能源法。

一九八〇代末期，不少城市開始嘗試利用固定電價制度，這種制度和公用事業管制政策法一樣，訂出補助再生能源發電業者的電價，也是現代再生能源產業的經濟基礎，促使德國再生能源產業規模超越日本。

高中物理教師漢斯·約瑟夫·費爾是哈美爾堡的先驅，他相信一九七二年羅馬俱樂部《成長的極限》報告中所說世界資源即將用光的說法。費爾說：「很多人認為固定電價制度的電費太貴，這種制度很快就會失敗。我們的理由是市場和民間資本都不可缺少。」

一九九〇年費爾和綠黨其他人士當選聯邦議員；他們和席爾、席爾所屬社民黨的派系合作，擴大固定電價制度，為了這樣做，還和代表巴伐利亞小型水力發電業者的保守派聯邦議員結盟，這些業者為了不能把電力賣給電力公司覺得困擾。席爾和費爾利用全國關注東、西德合併問題的機會，把他們的計畫制訂為法律。

席爾說：「德國電力公司全心關注東德，想不到我們的計畫會成功，不重視我們，想反對時卻為時已晚。」

固定電價制度有二點值得注意，一是這種制度可以幫助再生能源產業，其次這是一九九一年元旦東、西德合併前西德議會通過的最後一個法案。席爾說：「柏林圍牆倒塌間接促使這個法案通過。」

固定電價制度參考美國公用事業管制政策法制定，規定德國電力公司須以高很多的固定費率向再生能源發電業者購電，再把這種成本攤到整體電力成本中，補貼原本沒有競爭力的再生能源

電力，讓再生能源業者有利可圖。

到一九九三年，風電機組在德國各地出現。一九九八年全國選舉後，綠黨從反對黨變成和社民黨合組聯合政府。綠黨堅持再生能源是兩黨聯盟協議中的重要一環，聯合政府總理施洛德說：「我必須說，綠黨促使社民黨了解德國需要再生能源，這件事已經討論了十年。」

二〇〇〇年，聯合政府推動更積極的再生能源法，電價因為運用的科技不同而有差異，太陽能電力價格最高，甚至高達傳統電力的七倍，這種成本都納入整體電力成本中，由電力公司把額外成本轉嫁給用戶。

施洛德說：「由於法律支持再生能源，我們強迫電力公司接受再生能源，這是主要步驟。」兩年後，聯合政府基於綠黨創黨理念和車諾比爾核災的教訓，計畫逐步廢除核能電廠，目前核電占德國電力的四分之一，比率很高，再生能源的發展更見迫切。

風力發電占再生能源電力的九〇%，是固定電價制度的最大贏家。但德國目前也是世界最大的太陽能電力市場。有一位太陽能電池公司主管說，固定電價是一大激勵。其他國家的固定電價制度，也同樣刺激再生能源發展，西班牙尤其如此。

批評者指出，固定電價制度的補貼過高，如果補貼再生能源的金額增加，最後會引起用戶反彈。批評者認為，不同型態的再生能源電力費率不同，或相同類別的不同發電方式費率不同，不合經濟原則。事實上，用戶對這種作法已經有所反彈。

西班牙特別大力補助再生能源電力，最後完全失控，新增裝置容量遠超過目標，所需補助遠超過原訂金額，最後，財政吃緊的政府根本無力負荷。二〇〇八年西班牙大量降低固定電價，二

〇一〇年因為政府債務過重預算緊縮，固定電價再次降低。

但是利用固定電價法律、建立再生能源電力產能，速度的確快多了。費爾說：「二〇〇〇年時，沒有人能預料未來如何。」大量補貼和市場保證提供非常有力的誘因，二〇〇九年再生能源電力占德國全部電力的十四%，超過二〇一〇年的目標，因此政府調高二〇二〇年再生能源電力的目標比率。

德國的固定電價制度也非常受外國歡迎，尤其是中國，因為這個制度使德國變成中國快速成長的光電產業最大出口市場之一。

太陽能改名為「再生能源」

一九九〇年代初期，美國太陽能產業逐漸復甦，環保主義變成確定的政治力量。一九九〇年的地球日是第二十年慶，活動經費是第一個地球日的二十五倍，全美三千六百個社區和另外一百四十國都有慶祝活動，世界各地約有二億多人參加一天的慶祝活動。一九九〇年通過的清潔空氣修正法案更有直接的效果，促使大家關心環境問題。布希政府恢復某些再生能源的稅務優惠，太陽能再度變成重要項目。

「太陽能」也改名「再生能源」，變成意義廣泛的用辭。當時的太陽能產業協會主席史克拉說：「雷根時代真心反對太陽能，導致用詞改為再生能源，特定產業為了避免貼標籤也改名。」風能產業希望有專用名字，地熱和乙醇也如此。太陽能無法代表這些產業，再生能源就足以代表。布希政府不僅撥款給太陽能研究協會，也把協會名字改為國家再生能源實驗所。

上述改變更受柯林頓政府歡迎。某個炎熱的夏日，柯林頓要在白宮草坪宣布一項環保計畫，太陽能產業協會主席史克拉應邀在場。天氣很熱，史克拉的凸頭看來就像太陽，他決定載著裝有太陽能風扇的特製帽子到場，對白宮警衛費了一番唇舌，才能入內。柯林頓看到賓客中有人載著這種新玩意很感興趣，走到史克拉前面，問他這是什麼東西。史克拉解釋了一番，柯林頓也想要一頂這種帽子，拿出名片給史克拉，如果還有這種帽子，請他務必來一趟白宮。

各州就是實驗室

再生能源重生最重要的原因之一來自州政府，這種情形正好印證最高法院法官路易斯·布蘭代斯的話：州可以變成民主的實驗室。如果沒有幾個州採取再生能源組合標準這種創新，二十一世紀以來美國再生能源能否成長還是問題。

再生能源組合標準規定電力公司在特定日期前，要包括一定比率的再生能源電力。愛阿華州和明尼蘇達州率先實施這個標準，到一九九〇年代末期和二十一世紀初期，很多州也開始實施，原因是愈來愈多人關心氣候變遷。

德州的情形不同，德州故意不討論氣候變遷，是因為擔心電力不足、希望電力來源多元化、擔心德州若干城市空氣品質不好。一九九九年，德州州長布希簽署再生能源組合標準法律，極為有效的促進風力發電發展，引發德州風電熱潮。德州風力資源充沛，需求鼓勵規模擴大，聯邦租稅優惠強化風力發電競爭力（事實上，過多風力發電使新輸電設備成本增加變成大問題。）

到二〇一一年，全美二十九州和華府都已經實施再生能源組合標準，增加發絕大部分屬於風力發電的裝置容量。若干州訂定很大的目標：紐約州希望在二〇一五年前，把再生能源電力比率提高到二九%。伊利諾、奧勒岡和密蘇里州希望在二〇二五年前，達到二五%。二〇一一年當選加州州長的布朗簽署法律，要把再生能源由目前的二〇%提，高到二〇二〇年的三三%。布朗簽署法案時說：「我不怕別人說我是月光州長，行事奇怪、離經叛道、有趣、突如其來。我的外號月光州長其來有自。」

再生能源組合標準標準會促使美國再生能源電力持續增加，也會把高成本的再生能源電力，併入電力總成本，有人預測用戶會抗議偏高的再生能源電力。

清潔科技

二〇〇三年至二〇〇四年間，能源價格開始上漲，促使美國再生能源加速成長、獲得大眾支持，縮短再生能源和傳統能源的成本差距，氣候變遷變成能源政策中重要多了的因素，再生能源的投資迅速增加，創投資本開始投資號稱「清潔科技」的再生能源，投資銀行確認再生能源變成主流能源，設立「清潔能源」小組，發送清潔能源報告。

二〇〇八年的大衰退嚴重打擊再生能源，資金取得愈來愈難，即使後來價格從二〇〇八年的低點反彈，再生能源仍然比較沒有競爭力。

不過，這次和一九八〇年代不同，再生能源產業沒有進入死亡谷，再生能源現在是擁有很多支持者、政策持續支持、規模大多了的國際產業，例如得到二〇〇五年和二〇〇七年美國的能源立法支持，確實已經變成全球產業。

電氣三兄弟

日本依然比其他國家擔心依賴石油問題。現稱經濟產業省的通產省在主導日本工業政策方面，仍舊扮演重要角色，為再生能源推動明確目標，這些目標就是通產省副部長上田高行所說的「電氣三兄弟」。

日本把燃料電池、太陽能電池和一般電池都稱做「電池」。通產省要完成三項工作：一、確保日本工業具有競爭力；二、透過多元化，改善日本能源安全；三、處理氣候變遷問題。通產省認為這三種電池都可達成三項目標，每一種電池都需要新材料和製造技術，才能提高效率和降低成本。上田說：「有一天我國會全部利用再生能源發電。」

日本公司正按部就班，努力實現這個夢想，也依靠通產省減少二氧化碳排放的假設減排八〇%。上田說：「如果沒有上面三種科技，根本無法完成。電氣三兄弟對日本和世界都非常重要。」

綠龍

近年中國熱情擁抱再生能源，在市場、製造和競爭方面，都居於領導地位。一九七三年，中國推出農業法案，要求發展太陽能和風力發電。一九八八年，西部第一座風力發電廠接上輸配電網，但是多年來，大家大致認為再生能源是協助鄉下窮人的脫貧措施。到了二十一世紀，再生能源開始受重視。中國也體認到，要發展再生能源，首先要優先獲得科技知識，還要資助創業家。

二〇〇五年再生能源法帶來決定性改變，推動中國再生能源發展。很多因素突然間凸顯再生能源的重要：經濟快速成長，尤其是重工業快速成長，導致能源需求快速增加；中國剛剛經歷內部能源危機，電力需求超過煤炭和電力供應，造成電力供應瓶頸和輪流停電；進口石油增加、油價上漲，變成能源安全變成國家領袖擔憂的迫切問題，不久之後，中國也需要進口煤炭。國家能源局總工程師說：「照目前的用量估算，我國的化石能源蘊藏無法支持經濟發展。中國已經變得太大，因此中國決心加速發展再生新科技。我國需要經濟成長的黃金動能，也需要清潔能源的綠色動能。」「清潔的部分」很重要，污染是中國的普遍問題。氣候變遷，尤其是燃燒煤炭造成二氧化碳排放，逐漸演變成重大國際爭議。再生能源似乎是具有成長潛力的全球產業，中國希望領先其他國家。

二〇〇五年中國公布再生能源法後，又在二〇〇七年，公布再生能源中長期發展計畫，目標之一是在二〇二〇年以前，把再生能源發電達到全部發電量的十五%。根據上述政策，加上全球金融危機期間大力刺激消費，中國再生能源產業進入高速發展。二〇〇五年到二〇〇九年間，風力發電產能每年都倍數成長。

中國認定清潔科技是二十一世紀的主要成長產業，利用再生能源，拉抬清潔科技產業。中國總理溫家寶說：「我國會加速發展低碳經濟和綠色經濟，希望在國際工業競爭中爭取有利地位。」中國企業利用製造成本低落、中央和地方政府強力支持、國營銀行優惠融資等優勢，主宰太陽能板市場，在風力發電機市場也大有斬獲，中國另外堅持風力設備組件自製率必須達到五〇%——後來提高為七〇%。二〇〇九年自製率規定取消，卻已讓中國風力發電機廠商有時間擴大規模，提

升營運，獲得製造成本優勢，足以在國內外市場和外國廠商競爭。

中國大力支持再生能源產業，卻也面臨挑戰。目前再生能源中水力發電所占比率最高，預期這種情形也會維持不變。風力和太陽能發電成長速度勝過水力發電，但到二〇二〇年，占中國總發電量的比率還是只有五%。中國再生能源發電容量急速擴增，化石燃料發電容量也急速增加，因為中國必須快速增加發電量，應付每年成長〇%的電力需求，能夠提供大量電力的燃煤電廠因此獲得優勢，這也是中國提撥很多資金研究清潔煤炭的原因。

中國會強化再生能源的發展，但是「新興能源政策」不但包括再生能源，也包括煤炭與石油以外燃料，如核能和天然氣。二〇一一年公布的第十二個五年計畫強調這項政策，七大戰略性新興產業中，節能環保、新能源和新能源汽車三項和能源有關。中國在短短幾年內，不但變成世界最大的風力發電市場，也是世界最大的太陽能電池製造國和出口國。

最適合創新的地方

歐巴馬政府最優先的能源政策是推動再生能源。美國政府實施大規模經濟刺激計畫，因應金融危機和隨後的經濟衰退，其中有一大部分用於再生能源和清潔科技。其他國家急於透過財政刺激方案或政府支出，支持搖搖欲墜的經濟，其中也包括建立再生能源部門。

美國能源刺激方案號稱是最大的能源法案，再生能源變成經濟復甦的重要主題。刺激方案的重要一環是提供綠色和清潔科技就業機會。和卡特相比，歐巴馬更集中力量改變美國能源體系，他在二〇一〇年國情咨文中告訴國會：「我們應該鼓勵美國人創新，能源是最適合創新的地方。」

再生能源規模可以用美元表示。二〇〇九年全球再生能源產能投資總金額為一千五百億美元，約為四年前的四倍。再生能源發電裝置只占世界總發電裝置容量的三%，但二〇〇七至二〇〇九年間新增發電裝置中，將近五〇%是再生能源發電裝置。總之，再生能源逐漸變成重要產業，茁壯速度比再生能源誕生時的想像慢。

一九七〇年以微薄力量推動第一個地球日，後來擔任太陽能研究所所長的海斯有點傷感的說：「現在再生能源規模大概等於我過去預估一九八五年就應該有的規模。我們預估的時間沒有錯，卻錯估了執行這項工作的政治程序。」

再生能源發展和成熟需要幾十年時間，此外，有關的規模和成本問題仍然有待研究。再生能源是很受歡迎的國際產業，沒有時間落差，也沒有意識形態歧見。二〇〇三年太陽能悄悄回到白宮，白宮一棟叫做小馬棚的建築物上面安裝了太陽能電池。二〇一〇年，歐巴馬政府宣布，要在白宮官邸屋頂，也就是一九八六年卡特的太陽能熱水器遭到拆除的地方，安裝太陽能板一個太陽能熱水器。

如果世人大規模改用再生能源，不管從地緣政治、經濟或環保觀點來看，重要性就像二十世紀世界依賴石油一樣。不過，這種過程是漫漫長路，歷史上能源轉換時間都需時數十年。

即使再生能源快速成長，到二〇三〇年仍然不可能成主要能源，其角色和市場比率會由政策、經濟狀況和創新決定。再生能源的未來不會只有一種腳本，因為再生能源是由多種差異極大的科技組成，每種科技都各有故事和明確的前景和挑戰。

科學實驗

有些街道具有象徵意義，大家只要提起街名，就是一段故事、想起整個文化：華爾街、賓夕凡尼亞街大道、香榭大道、白廳大道、還有羅迪歐大道。此外還有從史丹佛大學西側往下走的沙丘路。沙丘路一邊是進行高等核能實驗的史丹佛大學直線加速器中心；另一邊是一部分為闊葉樹遮蔽、沿著山邊向下排的三、四樓建築物。

沙丘路可能沒有其他街道有名，但是對知道來歷人來說，沙丘路和矽谷、創新以及改變世界的科技是同義字，因為早期催生矽谷新事業、後來催生全世界新事業的很多創業者，總部就設在沙丘路上，沿著這條路走向下，碰到大學街後再向上走，例會找到更多創投公司。不管這些公司規模大小，他們通常都從退休基金、校產基金、基金會和富裕家庭募得投資基金，再投資新創企業家。最終目的是在五、六年內或更短的時間內，為投資人賺到原始投資金額幾倍的獲利。

創業者能夠成名，是因為投資科技業成功，為投資人創造獲利，創投業的投資對象主要是資訊科技、電腦、軟體、通訊和生物科技。但是近年來很多創投公司認為，下一個投資標的不見得屬於上述領域，他們當然還是會繼續熱衷投資這些標的，但新領域是「清潔科技」。

大泡沫

創業者並不孤單。今天的能源創新清湯中，有一個從來沒有過的「大泡沫」，這種情形出現在傳統能源、再生能源、替代能源、提升能源效率等所有項目中。事實上，能源產業從來沒有這麼重視創新和科技變化，誰是改變的動力？突破從何而來？誰會把實驗室的突破推到市場上？有多少突破能夠變成新產品？

能源一向是科學和科技產業，很多現有能源公司的確是這種。石油和天然氣產業由眾工程師主導，其中很多人手裡有碩士或博士學位。但是整體能源產業科技革新主要集中在傳統燃料，如石油、天然氣、煤炭和核能。這種進步是不斷改善，拓展科技領域過程中的一環，有時候，有些突破可能劇烈改變能源供應展望。

傳統能源公司也在開發替代能源，大家大致都忘了美國很多大石油公司早就在開發太陽能電池，今天有些大石油公司是風力發電重要業者，但是大石油公司把重點放在可以流進管線、幫浦和汽車引擎，和現有設施相當相容的先進生質燃料上。

創業者可能正在尋找這種創新，卻也在尋找哈佛商學院教授克雷·克里登森所說能夠改變遊戲規則的「破壞性創新」。遠大目標是尋找、資助、開發能源中的「Google」，然後撤資，他們也樂於尋找投資報酬率不如Google的投資標的。創業者大都不想自己創造新科技，只想尋找、資助，指導擁有構想的發明家和生產新科技產品的新創企業，帶領他們進入市場。

不只是純科學研究

但是新科技從何而來？能源的改變最可能來自基礎科學和研究發展，來自科學家、工程師、以及有創意、有毅力、有點固執、喜歡破舊立新發明家的研究成果。

二次大戰後的幾十年裡，民間部門是從事基礎研發的主要部門。一九八〇年代前，貝爾實驗室、西屋、美國無線電、奇異等大企業的實驗室都投入基礎研究。年輕物理學家經常覺得企業實驗室甚至比大學更適合做基礎研究。美國能源部長朱棣文曾在貝爾實驗室工作九年，他回憶說：「貝爾實驗室的經營階層提供我們經費，保護我們不受無關的官僚作風干擾，要求我們不要只滿足於純科學研究。」

貝爾實驗室全盛時期有一萬六千人，其中有一千多人從事做基礎科學研究。耶魯大學化學教授約翰·塔利曾在貝爾實驗室工作二十五年，他說：「我們的研究目的是追求更透澈的了解，興奮是重要因素，興奮真的具有傳染性。」他們的研究流程順暢多了，原因是「研究經費會自動撥付，經費不夠時，不需要提出一堆文件去申請新經費。」

一九八〇年代美國電話電報公司拆成幾家公司後，投資圈要求每季績效的壓力增加，公司研究經費遭到縮減。大家認為基礎研究和多數企業的近期迫切需要比較無關。前能源部次長雷蒙·歐巴赫說：「民間企業的耐用性降低。」久而久之，大部分大企業的實驗室裁撤，貝爾實驗室也愈變愈小。塔利說：「你必須在比較短期內證明你的研究成果。」二〇〇八年，貝爾實驗室的新老板阿爾卡特朗訊公司指出，貝爾實驗室會完全退出基礎研究。

民間企業的研究減少，逐漸由過去七十年科學進步最大動力和最大金主美國政府接手。

創投公司不會參與科學實驗，科學實驗都是進步主因，朱棣文在諾貝爾獎頒獎典禮受獎時說：「實驗是最終仲裁者」；因為研究發展是基礎，對其他的一切至為重要。今天美國基礎研發的動力是政府，除了醫藥以外，能源和其他一切的研發都由政府推動。

聯邦政府鼓勵創新的作法可以追溯到獨立之初，研發的目的是國防。一七九四年，喬治·華盛頓不滿毛瑟槍的性能，設立一系列國家兵工廠，推動美國政府的第一個研發發展計畫，計畫目標是大大簡化流程、提高製造速度，生產零件可以互換的來福槍，取代工匠用手工辛苦打造的槍械。零件可以互換的創新方法後來稱作美式製造系統；這種系統是美國變成工業強國的最重要原因。

不過美國政府要到二次大戰後，才負起支持基礎研究和研發工作的廣大責任。

公眾利益

一般人通常認為，花錢進行研發是政府的責任，因為這樣做符合公眾利益。除了民間投資者期望的報酬外，研發帶來的好處包括經濟成長、生活品質提升、促進國家安全。麻省理工學院經濟學家羅伯·梭羅接受諾貝爾經濟學獎時強調創新——科技「從實驗室移轉到工廠」——對經濟成長十分重要。

能源研發需要處理的特殊挑戰包括：能源供應、利用、安全、環境衝擊和氣候變遷。一般企業有每季獲利壓力、投資基金希望五年內獲利投資，無法承受能源創新太長的投資期間。例如，

要除掉火力發電用燃煤中的二氧化硫，一共花了四十年時間、研發四代的煤氣滌氣器，才達成目標。要利用煤層中的甲烷，一共花了十五年的研究和展示。投資期間太長，會導致投資資金舉棋不定或投資成本太高，從而喪失機會。

美國能源部資助各種研究發展計畫，包括洛薩摩斯與橡樹嶺國家實驗所、再生能源國家實驗所、大學的科學家、民間包商和公司。光是能源部的十七所國家實驗所就僱用一萬二千位全職博士科學家，是世界僱用最多少科學家的單位。總之，能源部一直是物理學的「科學部」，資助全美國大約半數物理學研究計畫，涵蓋一百一十一位諾貝爾獎得主的研究計畫。

美國政府的能源研發經費大致隨著油價起伏而增減。第二次石油危機前後的卡特政府時代，研究經費大增；一九八〇年代油價下跌後，研究經費減少。一九九一年波灣戰爭結束以後，能源安全的憂慮消退，一九九〇年代內，一份探討能源研發的報告指出，國家優先要務是「減少研發計畫數量、降低預算赤字」。能源部研發經費的低點出現在一九九八年油價崩盤時。新世紀以來經費又開始增加。如果拿能源和安全面臨的挑戰，跟創新的需求比較，能源的研究發展經費一向都相當低。二〇〇八年全年的能源研發經費只等於伊拉克戰爭兩星期的開銷。

創業者市場

一位創業者說，四、五年前，創業者甚至不知道「能源的英文怎麼拼寫」。

創投指投資新創企業，打賭創業家和創新者會成功。有人認為創投可以追溯到很久以前。資深創業者威廉·杜雷伯說：「西班牙伊莎貝拉女王曾經資助哥倫布，可算是早期創業者。」

她相信哥倫布領導的管理團隊。「她要做的事就是注視哥倫布的眼睛，確定他真的會航行到某些土地，帶回一些珠寶。」一八七〇年代和一八八〇年代，摩根資助愛迪生新設立的電力公司，確實是雛型的創業投資。

近代創業投資的樣貌在二次大戰前出現，惠特尼公司是開創風氣的創投公司，投資組合包括美粒果柳橙汁、彩色印片公司和電影《飄》。據說惠特尼公司一位合夥人把對這種新型投資方式稱為「民間投機資本」，但這個名字不好聽，過於冒險、甚至有點魯莽，負責的受託者怎麼會拿別人託付的錢去「冒險」？後來為了簡化和表示這是誠實行為，改名「創投資本」。

杜里奧特：新創企業國度的預言家

現代科技導向創業投資的誕生可以歸功於杜里奧特，他是哈佛商學院的教授，為人嚴厲，卻很有魅力，也叫做杜里奧特將軍。他父親是標緻汽車創辦人之一，一次大戰一結束，他從法國移民美國，就讀剛成立的哈佛商學院，後來擔任哈佛商學院教授長達四十一年。

杜里奧特開的課是著名的大二課程「製造業」，上課方式不是哈佛商學院的個案研究方式，而是「杜里奧特演講」，完全由他一個人講授經營企業的問題。杜里奧特喜好格言和智慧珠璣，要求學生每天早上看《紐約時報》的訃聞，以便從「偉人」的生平中學習。他甚至為全屬男生的班級講授怎麼擇偶。

二次大戰的備戰任務把杜里奧特變成創投業先驅。他是軍需部門研究發展主管，負責「找出士兵尚未滿足的需要、監督開發新產品，滿足這種需要。」杜里奧特監督開發的東西包括防雨

衣、歐洲戰場需要的長筒靴、應急口糧、海軍陸戰隊在太平洋戰事中用防彈塑鋼。他在合成橡膠的發明中也扮演重要角色，日軍攻占東南亞橡膠產地後，合成橡膠變成急需物資。這一切事為杜里奧特上了一堂基礎課程，他說：「現代戰爭其實是科學的戰爭。」二次大戰後，杜里奧特把這些心得應用在民間企業中。

戰爭結束後，杜里奧特回到哈佛商學院，利用戰時的經驗，創設美國研究發展公司。他的同事後來說：「杜里奧特最早認為有系統資助創業家這一行有前途。」杜里奧特說，創業者是在有資源卻無力創新的大企業、以及有創意卻沒有經費的學者或發明家之間，擔任仲介。

杜里奧特一直在哈佛商學院教書，他經營的美國研究發展公司却推動麻省理工學院發展的科技商業化。麻省理工學院和其他大學不同，不怕讓實驗室、教室和市場接軌。大多數長春藤名校是神聖的大學殿堂，但是麻省理工大學一八六一年創校特許狀上指出，成立該校是為了促使「科學實際應用在商業上」。

杜里奧特的管理相當專制，卻能吸引很多人才，包括年輕的麻省理工學院博士、多年後出任能源部長的薩姆爾·博德曼。博德曼回憶說：「杜里奧特的個性大不相同，他很迷人、很親切、很聰明，有時候却咄咄逼人、很不客氣。」

這家公司新成立的創投公司經營不易。杜里奧特的一句名言是「如果你想安穩過日子，切勿從事創投事業。」每一種行業，不管最後多成功，似乎都要經歷一、二次危機或災難，杜里奧特指出，「有時候半夜兩點，電話響起，有人告訴你發生了人為事故。」

一九六〇年代，從麻省理工學院和哈佛大學所在的大劍橋區，沿著一二八號公路往北和往西

向外輻射，變成美國最早的新科技育成中心。

美國研究發展公司只介入能源事業幾次，其中一家是剛從耶魯大學畢業的喬治·布希創立的薩帕塔海域石油公司，不過這幾次投資是例外。博德曼回憶說：「能源領域需要的資金太大，創投業根本無法介入，能源是大企業的天地，小公司介入有點可笑。」

西進

杜里奧特的美國研究發展公司開創了典範，但另一個更大的創投中心會在其他地方成長、茁壯，這個地方就是史丹佛大學，史丹佛大學工學院院長菲特烈·特曼創造了這番成就。他是麻省理工學院博士，後來出任副校長，他知道結合研究型大學和市場的價值。史丹佛大學的聖克拉拉谷八千英畝校園中散布很多果園，特曼決心從這些果園中創造高科技產業，把這個號稱心靈快樂之谷的地方變成矽谷。特曼建立史丹佛工業園區，把史丹佛大學和企業界。兩位史丹佛大學畢業生透過特曼認識，其中一位是威廉·惠利，另一位是大衛·帕卡德，兩人合組的惠普公司最後變成世界最大的電腦公司。

特曼的遠見催生深具特色、關係緊密的矽谷生態系統，涵蓋史丹佛大學、柏克來加州大學；沙丘路、大學街和舊金山的創業者；以及創業者周邊的科學家、工程師和創業家。一九七二年創立的克萊納柏金斯公司是早期塑造矽谷的創投公司，最早的合夥人是尤金·克萊納和湯姆·柏金斯；克萊納和家人為逃避納粹逃離維也納，後來加入早期的一家矽谷新創企業；柏金斯是麻省理工學院畢業的工程師，也是哈佛商學院的畢業生，杜里奧特製造課程班的學生，兼惠普

公司資深員工。

柏金斯決心進一步改善創投商業模式，以便有別於傳統的企業融資和傳統的研發，這點表示直接介入一切，包括經營管理、策略、科技改善與招募人才。這種方式變成創投業的標準事業模式。某些案例的流程包括把需要和科技概念化，再尋找科技人才和創業家執行計畫，整個過程的特點是讓商品快速上市。摧毀新創企業創投案最快的方法是說案子是「科學實驗」，這個道理今天仍然適用，創業者「在各大學實驗室鑽來鑽去」，儘量避開有科學實驗味道的事情。這是創業投資和研發之間最大的差異，因為研發就是「科學實驗」。

基因科技、蘋果電腦、奧多比、Google、電子灣、YouTube 和臉書都是矽谷生態系統的後代，另外還有很多名氣不大的公司，但是這些公司的產品的確使現代世界變得更好。

自毀前途

多年以來，創業者對能源沒有什麼興趣，能源是貝爾實驗室、大企業旗下大型實驗所、國家實驗所、研究機構和大學之類大單位關心的項目，絕不是屬於創投公司的項目。

南西·傅洛依德是少數例外，成立第一家以能源為標的的創投公司。她曾在佛蒙特州電力事業主管機關服務，是早期在加州開發風能的業者，也曾穿著防響尾蛇服裝，爬上阿爾塔蒙特山隘。一九八〇年獨占電話業務的美國電話電報公司分拆為多家公司後，傅洛伊德協助設立的電信公司後來賣給IBM。她回憶說：「我看過新科技怎麼摧毀原本接受管制的行業。」

一九九〇年代電力業解除管制似乎提供了類似的機會，因此，到了一九九四年，傅洛伊德決定成立N次方創投公司，利用這種新商機。可是世界不會停下來等她或她的公司。她奔波世界各地三年，拜訪幾百位投資人，結果大部分人都沒有興趣。因為資金愈來愈少，傅洛依德開始投宿一晚三十九美元的旅館，但是她不能適應，她說：「我不是住三十九美元旅館的女生。」

但是傅洛伊德靠著「成功創業家共同特質」的毅力堅持下去。到一九九七年，終於向幾位投資人募集到第一筆基金，但是情勢沒有好轉，前幾年就像「推大石頭上山一樣。」

另一位早期能源投資人是科技夥伴公司合夥人艾拉·伊倫普雷。一九九〇年末期，伊倫普雷首次投資一家能源科技公司。他說：「我大半生在資訊業服務，資訊業依據摩爾定律，下一代產品每十八個月就超越上一代的產品。但是出任這家能源公司董事長後，我和公用事業打交道，才知道能源的創新需時數十年。」伊倫普雷在創投業裡很孤單，他回憶說：「我的創投同行覺得我失去理智，好友擔心我自毀前途。」

六兆美元商機

現在大家都把傅洛依德和伊倫普雷視為先驅，因為到了在二〇〇三和二〇〇四年，創業者發現了能源和清潔科技，原因之一是能源價格上升，但還有其他原因，包括追求美國能源獨立與處理全球暖化的急迫性，以及克萊納柏金斯公司合夥人雷伊·連恩說明的原因：「我們現在擁有一九九九年所沒有的科技。」能源領域規模十分驚人，依據克萊納柏金斯公司的分析，資訊科技市場一年的商機大約是一兆美元，能源市場是六兆美元。

流入清潔科技的創投資金從涓滴細流變成濤濤洪流。美國清潔科技產業的投資金額從二〇〇

一年的二億八千六百萬美元，暴增至二〇一〇年的三十七億美元，增加十倍以上，這些資金中有十七%投入清潔科技。

麻省理工學院研究能源

羅伯特·梅卡夫是資訊業傳奇人物，他發明乙太網路，使辦公室和住宅的區域網路可以連結，他也是開發簡報軟體PowerPoint的公司董事，曾經獲頒美國國家科技獎，他是麻省理工學院畢業生，離開矽谷後，加入波士頓創業者北極星公司。

二〇〇五年五月六日，梅卡夫參加神經生物學家蘇珊·霍克菲爾就任麻省理工學院第十六任校長的典禮。典禮在面向查理士河的基利安廳舉行，他聽到霍克菲爾宣稱，每個科系都研究能源問題是麻省理工學院身為「學術機構的責任」。梅卡夫像杜里奧特一樣，是緊盯麻省理工學院研究趨勢的創業者，霍克菲爾的意思很清楚，當天下午他回到辦公室告訴同事：「霍克菲爾說麻省理工學院要研究能源，我們也要跟著做。」北極星公司後來變成清潔科技的早期投資人。

但是沸騰的創新活動會產生「破壞性科技」嗎？或是至少會產生對能源組合影響深遠的新公司嗎？著名清潔科技創業者維諾德·柯斯拉說，創投資本未來對能源產業的影響，就像影響過去由IBM獨占的電腦產業和美國電話電報公司獨占的電話產業一樣，會破壞現有基礎穩固的公司，改寫商業模式，培養很多大型的新對手。（美國司法部的確以控告這兩家公司的反托辣斯案，促成「破壞」這兩家公司的效果。）

但別人看法不同，梅卡夫預知綠色科技和防止全球暖化產品的泡沫有可能破滅，但縱觀全局時，這種情形會加速新科技的發展。梅卡夫說：「泡沫會推動創新加速。」實際的經驗好壞參半；某些能源資產的策略性出售和著名的公開上市案，媲美網路或資訊創企業上市案，但是創業者大都認為，和他們從其他行業獲得的經驗相比，能源創投之路比較難走；能源業創業者也有同樣的看法。

以時間、金錢和規模來說，能源產品和其他高科技產品不同。連恩說：「數位世界和能源天地沒有什麼共同的地方；能源天地沒有摩爾定律，有的是熱力學、物理關係、化學反應和生物系統之類不同的定律。投資人必須了解，能源業容易受政策左右，是低成本、成熟、資金密集的產業。我建議大家忘記在資訊業學到的大部分東西。」能源業需要的前置時間長多了，需要的資金比典型資訊科技或軟體新企業多多了，需要好幾回合巨額資金的挹注，每個階段都要一再確認，還要應付料想不到的延遲和成本激增。產品銷售的對象通常對新科技把持謹慎態度，因為他們擔心新科技在生產、運銷過程中出問題的成本和風險。此外，能源生產設備壽命通常很長，不會快速汰換。消費者可能每三年就換電腦，每二年就換手機，但是發電廠可以營運五、六十年。

總之，一切都需要更久的時間。創投業三到五年內就會有一個循環，能源業在這麼短的時間內，通常不會有重大變化。主管科學的能源部次長、加州理工學院前副校長庫寧指出，「即使能源加速變化，也需要幾十年的時間。」系統整合的複雜性更增加了難度，為智慧電網整合三、四十種科技，遠比想出iPhone的新應用程式難多了，耗用的時間也多了。

能源涉及重要民生必需品的流通，受到很多管制，相關問題經常引起爭議。因此，麻省理工學院能源計畫負責人、前能源部長次長恩內斯特·莫尼斯教授說，能源具有很高程度的「政治

利益，光是看創新、推出和評定新科技所需要的時間，就知道能源非常重要。」

當然，像 Google 這樣的能源公司可能出現，也許現在就已經出現，但五年內可能仍然不為人知。畢竟，一九九八年時，有多少人聽過 Google？但是能源大不相同。Google 創造的是全新的搜尋產業，不是從經濟命脈所繫的現有商品化產品廠商手中，搶奪市場占有率。

唯一突破之道

二〇〇九年歐巴馬政府上任後，決心把能源研發費用提高到空前程度。歐巴馬任命勞倫斯柏克來國家實驗所所長朱棣文擔任能源部長，表示他重視能源創新的重要；朱棣文因為雷射方面的研究傑出，獲得諾貝爾物理學獎。

歐巴馬政府推動緊急刺激經濟方案，提供經幾百億美元，用在能源產業和效率改善方面，還進一步提供稅務優惠，鼓勵清潔能源投資，也表示政府在短期內大規模增加研發費用。

大部分經費用在氣候變遷的改善上，但是朱棣文請大家注意超越現有能源系統的困難，光是開發低碳能源並無法解決問題，更重要的是這些能源要能通過市場競爭的考驗，另外新科技的開發速度要加快。整個企業受一套「創新鏈索理論」規範——最初是經由基礎科學到實驗室試驗產生新知識誕生，接著是利用原型產品和展示推動商品化，最後是商品上市，參加其事的人包括理論物理學家、新創企業、創投資本家、大企業和最後的裁判人顧客。

但是正如美國總統科技顧問委員會強調的一樣，這不是直線流程，不是說東西一發明，就可以送到市場。事實上，從發明到上市，每個階段都相互影響，經由「做中學」和「用中學」可以

獲得重要的回饋。馬修·羅傑斯是能源部刺激經濟計畫的負責人，他說，政府扮演的角色是「加快新產品發明後到上市之間的整個流程。大家認為清潔能源是高成本的能源，降低成本唯一的方法是提出創新的做法。」依據杜里奧特在二次大戰期間的說法，為了達成這種目的，可行的方法就是把「應用科學」商品化。

新的創新目標經過重組後，分成十項，其中重要的如汽車電池、太陽能發電、生質燃料、碳的回收和儲存、輸配電網的電力儲存等。每個領域的目的都是提高性能和降低成本。每個領域中同時進行五到十個計畫，彼此之間因為相互競爭，可以提高成功的機會，因為事先不知道任何計畫的成敗，研發和創新工作的性質就是如此。朱棣文說：「投資研發就像擲骰子一樣，可能失敗，也可能打出全壘打。」

有三個方案比較特別，第一個方案是在大學和國家實驗所大約設立五十個能源新領域研究中心，處理的重大能源問題；第二個方案規模比較大，是設立新研究中心，處理基本問題，涵蓋從基礎研究到科技轉移市場的大部分創新鏈索。

第三個方案是成立能源高級研究計畫署 (ARPA-E)，這個方案由國會提議，由歐巴馬政府負責經理人，能源高級研究計畫署仿效國防高級研究計畫署 (DARPA)。DARPA 是國防部的單位，負責尋找重要的新需要與挑戰，擬定「傑出的計畫」，然後長期資助這些計畫。電腦的很多最重要進步、全球定位系統和網際網路都起源於國防高級研究計畫署，不過網際網路從最初確定問題，到解決問題後產生重大影響，前後一共經過了三十年。

目前聯邦政府每年的能源研發經費大約是五十億美元，占美國國內生產毛額的比率遠低於日

本、南韓、法國和中國的類似比率。由於現在和一九九〇年代一樣，再度重視聯邦支出和赤字問題，能源研發費用可能成為刪減的對象，這種會造成真正的損失。如果未來幾年能源研發資金和政府的關心程度不變，重要的成果會出現，出人意的解決方案也很可能出現。

試驗的本質

創投資本的戒律之一是「你不能從事科學試驗」。事實上，創投資本和更深入參與能源研究活動的其他人，都是在從事一個範圍很大的實驗，希望解答一個大問題，就是今天六十五兆規模的世界經濟，將來是否有足夠的能源，應付二十年後會成長到一百三十兆的世界經濟？依賴碳燃料提供八〇%能源的世界經濟，改用其他能源的可能性有多大？答案如何，目前還看不出來。

這種實驗不會留到將來才進行，事實上，實驗已經以各種方式開始進行，例如：掌握風力、駕馭陽光、利用地下能源、改善能源的效率、重新設計各種車輛。

第十三章

煉光術

愛因斯坦的智慧足以重新認識宇宙。一九〇〇年夏季，他大學畢業後急著找工作，他原本希望在在大學任教，卻事與願違。教授都不願意積極推薦他，因為他的畢業論文寫的不好；而且他像一位教授說的一樣，是「懶豬」。不管他是否懶散，這位叛逆型學生不僅具有數學和物理天才，還能夠加以整合，獲得重大突破，但這樣不足以幫他找到工作。

愛因斯坦邊找工作，邊當數學和物理家教，養活自己，甚至在當地報紙上刊登廣告，提供「極為完整」課程的試聽。愛因斯坦家裡並不富裕，不太能資助他，卻顯然很擔心他，他父親甚至囑著他，寫信向一位化學教授求助：「大子非常不快樂，認為事業已經脫軌，找不到熟人幫忙。想到我們家並不富裕，他變成家裡的負擔，使他更為難過。」

時來運轉，愛因斯坦在瑞士專利局找到工作，一九〇二年六月，他前往火車站附近的新郵電大樓專利局報到。對天性好奇的年青物理學家來說，檢查專利申請書不是累人的工作，要緊的是，這份工作提供他需要的保障和時間。

愛因斯坦非常適合專利辦公室的工作，對實用和理論都感到興趣，對和電力有關的事情特別

感興趣，畢竟他父親是工程師，和弟弟賈克布經營一家電力公司，他父親是第一代創業家，從事愛迪生發明的電力事業，等於從事今天的高科技工作。他們和西門子之流的公司，競爭歐洲城鎮的照明合約。很不幸赫曼和賈克布無法取得照亮慕尼黑市中心的合約，事業也一直沒有起色。但是至少不用擔心兒子的工作。

十個星期撼動世界

愛因斯坦安穩的在專利公司上班，有很多時間可以研究心中的很多問題，一九〇五年夏天，他的驚人創意與分析能力勃發，只花了十週時間，提出五篇論文，改變人類對宇宙和地球的認知。其中一篇是：「物體的質量是否可以度量其能量？」這篇論文提出最有名的方程式 $E=mc^2$ ，奠定了發展原子彈與和平發電用途的核子反應理論基礎。

另一篇論文題目晦澀難懂：《對光的生成及轉化的啟發式觀點》。愛因斯坦在寫給朋友的信中說：「這篇論文探討幅射和光線的能量特性，具有創新看法。」愛因斯坦在論文中提出假設，物質和幅射只有透過獨立的能量「量子」交換，才能互相作用。他證明這項假設可以解釋很多現象，包括「光電效應」。

這篇論文提供的理論基礎在一個多世紀後，促成太陽能電池產業快速成長，很多人認為這種產業是再生能源的未來。一百多年後，太陽能電池產業一位主要科技專家扼要總結一九〇五年夏天那篇論文的重要。

他說：「愛因斯坦已經解釋一切。」

太陽能電池

今天的再生能源中，風能獲得大量投資，但吸引最多人研究的是，直接利用陽光的太陽能電池。

太陽能電池在很多方面，是再生科技最純粹的理想形式。陽光幾乎是世界各地都有的豐富資源，電池做好後，不需要複雜的工業設備操作，只花幾小時，就可以在屋頂上裝好，甚至不需要輸電線，就可以把陽光直接轉變成電力。

這種變化聽起來好像中世紀鍊金術士宣稱點石成金一樣神奇，這種現代鍊金術和中世紀術士的魔術不同，是千真萬確的事情：光線穿透一層表面後變成電力，是基本的物理學，也是愛因斯坦的偉大見解。

從二〇〇〇年代中期以來，太陽能電池市場巨幅成長，但是和風力發電市場相比仍然小多了。太陽能是大家寄望最高的再生能源，太陽能電池尤其如此，其中的道理十足，因為太陽能可以節省好幾億年時光，也就是省下把有機物質轉化成化石燃料所需要的時間。麻省理工學院教授莫尼斯說，大家相信太陽能最後會變成「帳篷中最高的木桿」，也就是電力的最終來源。但是要等多久？此外，太陽能電池能否徹底改變整個電力系統？電力系統會不會從現在的輪配電網形式，變成每棟房屋和辦公室都是迷你發電廠的樣子，不用煤炭、天然氣、核能、甚至風力，就能自行發電？用太陽能板發電的新型電廠會不會變得很常見？

不管用什麼方式發電，都要克服規模的障礙。要獲得規模，讓太陽能板普及全世界的屋頂，

必須降低成本，降低成本要靠創新。太陽能的成本可能已經下降了，卻仍然高於其他傳統電力，還沒有降到真正規模化要求的水準。

太陽能電池在沒有輸電網送電的地方具有競爭力，例如外太空或遙遠的叢林村莊。在電價高、太陽能來源豐富的地方，太陽能電池可能也有競爭力，否則就需要政府的強力支持和補貼。德國政府對太陽能價格的補貼高達傳統電力成本的五倍，使太陽能電池從小型產業變成大型產業。整個太陽能產業的重點只有一個：進一步降低成本。

詳細研究

一九〇五年愛因斯坦撰寫論文前，科學家和工程師已經發現光電效應，知道光線在某些情況下會產生電荷，只是不知

道怎麼解釋這種現象。有些科學家和工程師把硒元素暴露在太陽光、甚至燭光下，產生電流。西門子工程公司創辦人維爾納·西門子宣稱「光能直接轉化成電能是全新的物理現象，需要詳細研究。」這個問題要等愛因斯坦來解釋。

過去物理學家堅持光線是在以太之間移動的波，以太是充滿宇宙、卻看不見的物质。愛因斯坦的看法不同，他在討論光電效應的論文中說，光線是由很小的量子組成；量子也叫做光子，移動速度每秒鐘二十九萬九千三百公里，肉眼看不到。

這篇論文建立了解釋光電反應原理的科學。陽光照射太陽能電池時，光子取代半導體中的電子，使電子沿著微小的管道，從矽中流出，形成電流，就像水從運河流出一樣。光子是一種能量，電子是另一種能量。

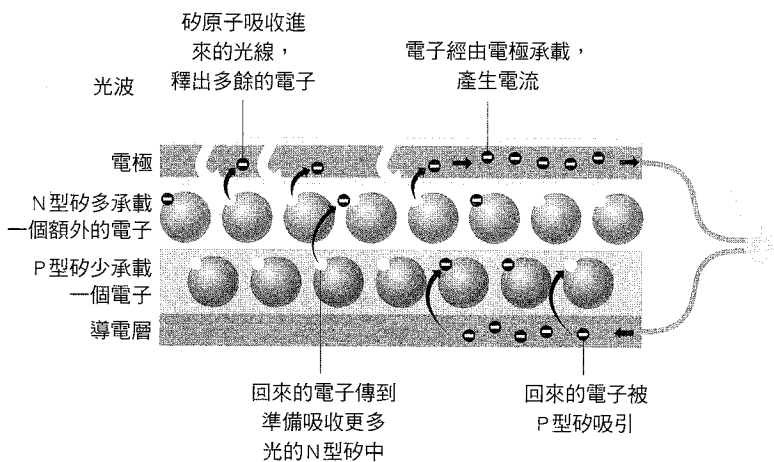
一九二二年，愛因斯坦獲得諾貝爾獎，得獎原因不是奠定核能基礎的論文，而是討論光子和量子力學的論文，用諾貝爾獎委員會的話來說，「愛因斯坦是因為發現光電效應定律」而得獎。

不過理論是一回事，愛因斯坦的論文從理論到實用大約花了五十年時間。一九五三年，科學家吉拉德·皮爾遜和卡爾文·傅勒，在紐澤西州美國電話電報公司的貝爾實驗室裡，設法改良其他同仁幾年前發明的通訊電晶體時，驚訝的發現，矽面板加上鍍元素後，產生愛因斯坦論文中描述的的神祕反應，把光線變成電力。

貝爾實驗室進行多次試驗，才在一年後宣布「第一個能產生有用電力的太陽能電池。」一九五四年，貝爾實驗室科學家向國家科學院簡報，為了生動說明這項發現，由太陽能電池向一台無線電發報機提供電力，不過這只是太陽能電池的開端而已。貝爾實驗室宣稱這種新型太陽能電池

圖 13-1 從光到電

太陽能電池示意圖



資料來源：美國能源部（US Department of Energy）

會「深刻影響生活方式」。《紐約時報》報導「利用矽成分的電池開發無限的太陽能」，這項發明「可能開創新時代，實現人類最珍視的夢想：控制幾乎無限的太陽能，供人類文明利用。」不過，商業化的第一步却比較務實：為喬治亞州的阿美利克斯提供農村電話線電力。

這種太陽能電池效率不高，成本却很高，除了為農村電話線供電外，還有那些用途？

太空競賽

一九五七年十月，蘇聯火箭攜帶第一顆人造衛星史潑尼克號呼嘯進入太空，震驚美國。史潑尼克的俄文意思是「旅伴」。把衛星送入軌道是蘇聯政治和軍事上的驚人勝利，却是美國戰略上的大災難。蘇聯不僅在科學新領域上超越美國，更糟糕的是，粉碎了美國無懈可擊的信心，兩大洋已經無法保護美國，因為蘇聯武器可以在外太空繞過美國上方。

對蘇聯領袖赫魯雪夫來說，史潑尼克號正足以投射蘇聯強大的印象、掩飾蘇聯的弱點。不過，美國的看法並非如此。蘇聯的成就對「美國新聞界、政客和民眾」造成「類似歇斯底里的反應」。參議院多數黨領袖林登·詹森宣稱：「控制太空的國家會控制世界。」物理學家、氫彈之父愛德華·泰勒在白宮的會議中提醒艾森豪總統，史潑尼克號對美國的挫折比珍珠港事變還厲害。一個高階全國委員會敦促政府，建造足夠的核子彈避難所，保護每個美國人。國會緊急通過法案，以國防為名，補助大學研究外語。

同時美國政府推動很多促進科技進步、影響深遠的計畫：一九五八年國防部設立國防高級研究計畫署，同年太空總署成立；政府對科學和研究的補助大致都激增。

面對史潑尼克衛星的挑戰，艾森豪總統似乎是全美最冷靜的人，他在史潑尼克衛星升空五天後說：「就衛星來說，我一點也不擔心。」這一年美國經濟衰退，他比較擔心怎麼避免預算支出「像野豬亂竄般失控」。他擱置研製核子動力飛機的建議，也拒絕建造核子太空船登陸月球的提議，他說：「我想知道月球背面有什麼，但不想在今年出錢去找答案。」

艾森豪心情平靜，因為他知道美國也有飛彈和衛星計畫，而且不同軍種還提出相近的計畫。不管艾森豪對國民提出什麼保證，他很清楚最重要的事情是迅速把人造衛星送上太空。一九五七年十二月，美國第一次發射衛星，火箭在發射兩秒後爆炸，衛星炸成一團火球，令人難堪，這顆衛星以「卡波尼克」之名永遠流傳，波尼克的意思就是「壞掉的衛星」。一九五八年一月，第二顆衛星「探險家一號」發射成功，進入軌道，不過這只是非常簡單的衛星，美國仍然需要發射一顆受人重視的衛星，也就是必須加速推動先鋒計畫，發射民用研究衛星進入軌道，聲援一九五八年的國際地球物理年。

但是先鋒計畫激起嚴重、尖銳的內部爭論：先鋒號進入軌道後要依賴什麼動力？負責這個計畫的海軍想用傳統化學電池。替軍方從事通訊研究的漢斯·齊格勒反對，他是德國科學家，二次大戰後，美國軍方把他請到美國，後來成為美國公民。他在太陽能電池發明後不久，曾經拜訪紐澤西的貝爾實驗室，受到這項新技術的吸引，他相信人類的最終能源一定是太陽，因此極力遊說軍方和國會「儘快讓人類享用這項發明。」

海軍不願意讓自己的第一顆衛星電源，利用尚未證實的「非傳統、不確實可靠的」新發明。不過齊格勒說服政府的一個重要小組，先鋒號上的化學電池只能用幾星期，但是先鋒號上的實驗

「如果能夠繼續進行幾個月，價值會大多了。」

最後，齊格勒設法讓太陽能板裝上一九五八年三月發射的先鋒號，先鋒號在軌道上運行，有助於美國人恢復科學領先的信心。

先鋒號證明太陽能電池功效絕佳。先鋒號升空後十九天，《紐約時報》的標題證明這項驚人成就：「先鋒號無線電失效／化學電池電力耗盡／太陽能組件繼續運轉。」一年後，齊格勒和通信小組同事舉杯慶祝，因為軌道上的太陽能電池繼續發電。事實上，在大氣層上方的這具太陽能電池會繼續發電好幾年，愛因斯坦的論文《對光的生成及轉化的啟發式觀點》在外太空獲得鮮活證明。

此後，太陽能電池成為衛星標準配件，衛星是太陽能電池第一個主要市場。齊格勒對這項科技寄予更大期望，認為太陽能電池是「電力的重要來源」，展望「未來城鎮建築屋頂上都裝設太陽能電池。」可惜太陽能電池還是極為昂貴，表示這種電池只有在外太空一個地方具有競爭力。

回歸地球

一九七三年八月一日是太陽能電池回歸地球的關鍵日子，這一天，太陽能X公司（SOLAREX）在華府附近的馬里蘭州羅克維爾創業。逃離匈牙利共黨統治的兩位難民合創這家公司：其中一位是傑出物理學家約瑟夫·林邁亞；另一位是高明化學家彼得·法拉迪，兩人都在一九五六年匈牙利爆發反抗蘇聯統治革命時逃出匈牙利。

十二年後的一九六八年，兩人在通訊衛星公司服務時認識：通訊衛星公司是準民營企業，

擁有美國政府送上太空的商業衛星所有權。林邁亞負責公司的物理實驗室，法拉迪負責化學實驗室，林邁亞的重要工作是改善太陽能電池的效率和可靠性。兩位歐洲大陸來客喝義式濃縮咖啡（大家把這種咖啡當成奇特的歐洲飲料），會討論太陽能電池在地球上發電的可行性。他們知道，太空用的太陽能電池是在真空狀態下製造，以確保高品質，用在地上會太貴。林邁亞反覆思考，和法拉迪徹底探討，還在馬里蘭州比塞斯大家裡的地下室，試驗完全不同的方法。據說他曾經在廚房烤箱裡，用可口可樂塗布早期的太陽能電池。

他們建議公司生產陸上用的太陽能電池，遭到負責公司經營的退役空軍將官否決，指出這個提議和他們的太空任務無關。

兩位科學家說，為什麼不自行成立公司？他們是工作穩定的難民，對經營事業一竅不通。法拉迪後來說：「我們想過待遇優厚的科學家為什麼會愚蠢到想要創業，我們沒有技術、沒有產品、沒有市場、也沒有錢。」

不過，他們還是向親朋好友湊足了資金，公司要取名字。林邁亞不在乎取什麼名字，只要名字最後一個字母是X就好，因此取了太陽能X公司的名字。

太陽能X公司成立後才幾個月，就發生兩件大事：第一件是公司成立後幾星期，原來的僱主通訊衛星公司控告他們竊取智慧財產權，但是通訊衛星員工看過他們的設備後，勉強承認林邁亞發明全新製程，撤銷告訴。第二件是公司成立後十一週，阿拉伯石油禁運點燃一九七三年的石油危機，整個世界都變了。

法拉迪後來說：「我可以告訴你我們預見石油危機，才開這家公司，但這樣是說謊，我們絕

不知道會發生石油危機。石油危機對我們影響很大，我們知道自己在從事不得了的事業。」

兩人分配公司的工作，林邁亞負責科學和科技，法拉迪志願負責業務，法拉迪說：「既然我還沒有獲得諾貝爾化學獎，我應該脫離化學，從事其他領域。」這個領域就是業務。但是業務並不好做。法拉迪說：「我們的營運計畫完全錯誤，我沒有賣過別人想買的東西，但是我常識豐富，也善於記憶數字。」他剛剛脫離衛星業務，他說：「我不是從事火箭科學，是賣大家想要的東西。」的確如此，他們公司創業一年內就開始獲利，是第一家商用太陽能電池新創企業。

一九七〇年代內，太陽能X公司只有兩位大敵，都是石油公司的轉投資公司。一家是大西洋富田石油（阿科石油）投資、立志成為「太陽能產業通用汽車」的阿科太陽能，另一家是埃克森石油一九七五年設立的太陽能電力公司。今天世界各地生產的太陽能電池，大都是應用林邁亞在比塞斯大地地下室開發的製程。

林邁亞夢想和傳統電力競爭，事實上卻不可能，太陽能電池太貴了。不過，太陽能電池至少在偏遠地區，掌握到需要電力、輸配電網卻無法到達的一些潛在利基市場。

太陽能公司最初的市場是美國政府，包括氣象局，以及監管聯邦政府所有荒山野地的土地管理局。太陽能X公司大部分業務屬於通訊供電：例如，遙遠山區的傳輸設備、海岸防衛隊的海上浮標，浮標上的太陽能電池附有小型備用電池。

另一個市場是石油業。送電到輸油管或海上石油平台很難、費用又高昂，太陽能電池的電力可以防止輸油管內壁腐蝕，為石油平台安全標誌和警報器提供萬無一失的電力，警告船隻不要和平台相撞。

第三個市場是第三世界的偏遠地區和小島。世界銀行協助非洲村莊裝置太陽能電池，取代柴油發電機，為燈泡、抽水幫浦等設施提供電力。

太陽能電池還有一個意想不到的市場。美國和加拿大各地油氣管線都發生太陽能電池組件遭竊案，太陽能電池是非常特殊的商品，要脫手會引起注意，因此竊賊盜取的動機令人難以了解。加拿大皇家騎警後來破案後才發現：非法大麻種植者知道，如果在室內利用燈泡種植大麻，警方根據用電量激增，可以查到他們，如果利用太陽能電池，不用電力公司的電力，可以避免用電量激增、遭到警方破獲的危險。最後，油氣管線業者為了防止失竊，只好把太陽能電池焊接在管線上難以接近的位置。同時，別名「地下農業」的大麻種植成為加州太陽能電池早期的大市場。

研究計畫

不過這些早期市場仍然很有限，最大的障礙是成本和效益。太陽能電池成本能否降的夠低，不但能夠在偏遠地區和柴油發電機競爭，也可以在普通地方和電力公司競爭？

一九七〇年代中期，美國政府聘請物理學家保羅·梅科克，主管某個部門的太陽能計畫，這個部門後來變成能源部。梅科克在德州儀器工作時，迷上太陽能電池，很快就把政府的計畫發展起來，開始對太陽能研究提供大量資金。梅科克從能源部的預算中，撥款購買卡特政府時期裝在白宮屋頂上的太陽能熱水器，不過，太陽能電池才是發展重心。梅科克回憶說：「太陽能電池無疑是很可靠、成本效益很高、不需要輸配電網的電力。」降低太陽能電力成本、提高效益，以便和傳統電力競爭，是其中的難題。梅科克說：「我們完成降低成本的完善計畫。」因為補貼的關

係，大小企業都衝入這個領域，研究提高效益的各種方法。

到一九八〇年代初期，雷根政府刪減三分之二的太陽能預算。梅科克說：「我得取消各地的合約。」他隨即辭職，專心研究太陽能產業。能源價格下跌使推廣太陽能電力的夢想失色。

由於油價下跌和聯邦政府削減研發經費，埃克森石油為了節省支出，結束太陽能電力公司的經營。阿科石油公司認為太陽能是應付高油價的保護手段，努力經營，到一九八〇年代末期，變成世界最大的太陽能板製造商，不過阿科石油也認為，太陽能電池的業務規模太小，不會變成像石油、天然氣、煤炭和石化產品等公司的核心業務，前途來不看好，因而在一九九六年，把太陽能電力公司賣給德國西門子公司。

這段期間裡，太陽能X公司繼續獲利，銷售額成長，資金需求跟著增加。一九八〇年代，林邁亞和法拉迪把公司賣給美國大石油公司阿摩科（阿摩科和英國石油合併後，太陽能X公司變成英國石油太陽能公司。）不懂業務的兩位科學家讓投資者獲利很多倍，績效相當優異。

美國的太陽能業務原地踏步，規模很小，只對偏遠利基市場銷售，展望並不樂觀。

陽光計畫

一九八〇年代初期，美國太陽能計畫的補助劇減之際，日本確保了太陽能產業能夠以足夠規模繼續生存的希望。日本人覺得一九七〇年代能源危機是無法克服的問題，只能勉力管理，日本和美國不同，幾乎沒有天然資源，甚至不敢奢望能源獨立。日本通產省副大臣說，日本人對依賴波動劇烈的世界石油市場「深感憂懼」。

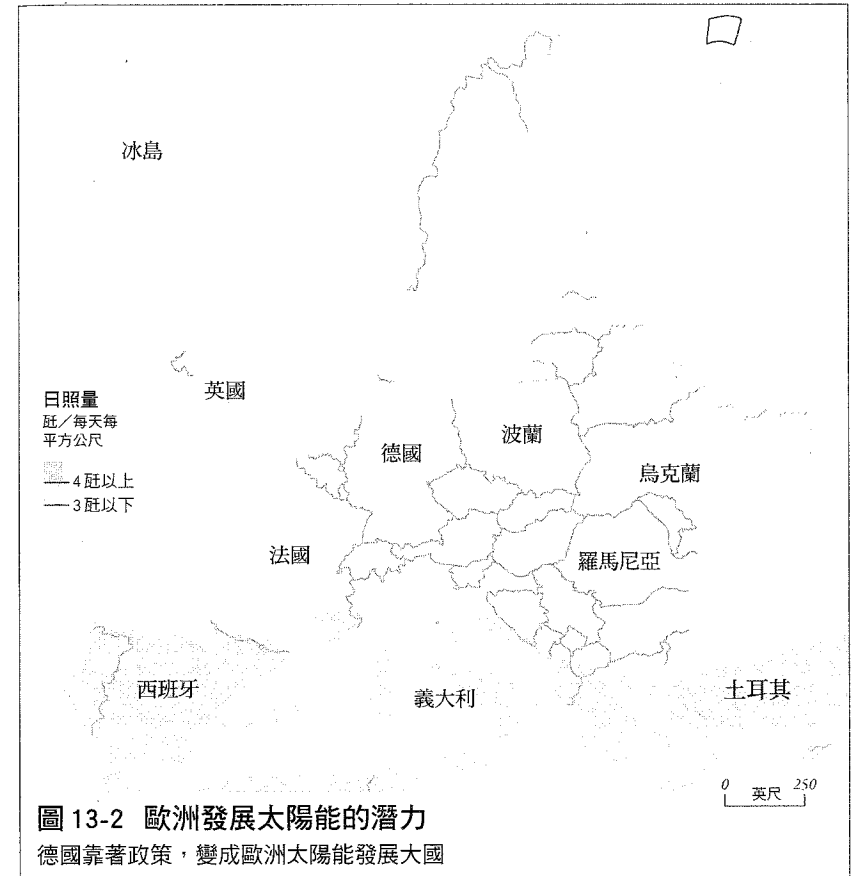
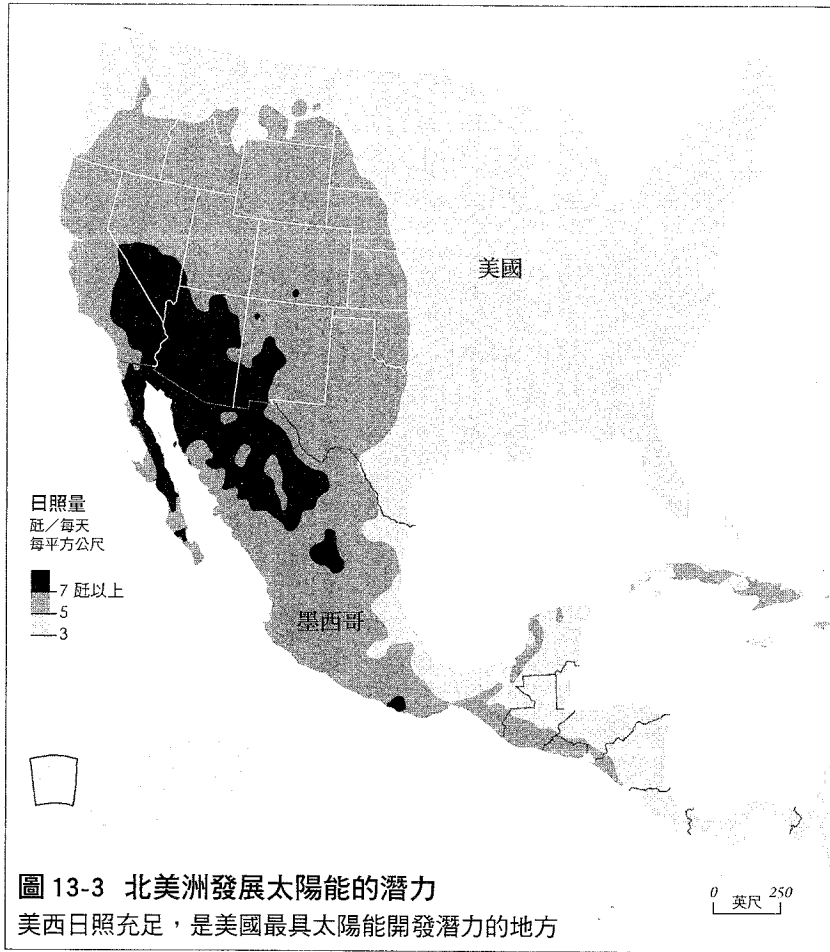
伊朗革命後，第二次石油危機爆發，日本政府下令以夜生活聞名的銀座，關閉部分燈光，凸顯日本人的這種恐懼。

當時日本設立「新能源產業科技總合開發機構」，由政治驚悚小說《油斷》作者堺屋太一領導，負責開發能夠替代石油的新能源，也希望取代燃油發電，這種全國性行動以陽光計畫的名義，利用政府資源進行研究，意在推動和補助太陽能電池的發展，結果把日本變成全球太陽能電池發展中心。日本太陽能產業的發展具有日本特色：主要業者在國家策略目標上協調合作，彼此卻又激烈競爭。

不久之後，日本生產的太陽能電池遍布各地，但不是當成家庭用電，而是變成耗電不多產品所用的「電池」，例如用在電子錶中，但最著名的用途是裝在夏普公司發明、價格日低、無所不在的太陽能計算機中。

一九九〇年代，夏普、京瓷和三洋等公司開始生產屋頂太陽光電池系統，日本政府在新陽光計畫的名義下，大力補助民眾購買這種太陽能系統。補助加上世界最高的電價、大規模生產的效率和低廉的成本，使日本變成世界最大的太陽能生產國。到二〇〇一年底，全日本有七萬七千五百零三個「太陽能屋頂」。

日本已經把太陽能電池市場從特殊用途，擴大到大量消費市場。一九九〇年代末期，美國一家太陽能電池公司主管訪問日本，參觀夏普高度自動化的太陽能電池廠時說：「這家工廠十分先進，讓我大吃一驚，美國在生產方面似乎落後日本一代。」日本已經把部分太陽能電力普及到都市地區，即使沒有補助，幾乎也能夠和傳統電力競爭。



太陽能電力只占日本電力的一%上下，即使日本能夠在二〇二〇年以前，在七〇%新屋屋頂都裝上太陽能電池，太陽能電池仍然不是正常的電力來源。一位日本官員說：「太陽能發電很重要，卻不夠多。」

德國的太陽能熱潮

日本從一九八〇年代初期到二十一世紀初期，在太陽能方面領先世界。一位資深太陽能產業主管說：「二〇〇四年以前，日本人領導太陽能產業，不知道德國緊追在後，推動規模大多了的計畫。」

德國從一九八〇年代開始實施固定電價制度，確保再生能源投資能夠獲利。一九九九年，新當選的社民黨和綠黨聯合政府提倡再生能源，重新擬定德國能源政策，這時德國工程師萊納·雷蒙納帶著新設太陽能公司的企劃書，和經營策略顧問安東·米爾納接洽。雷蒙納說，再生能源興起有兩個原因：一是擔心污染，二是創新科技。在還沒有人從太陽能電池上「賺到錢」的情況下，他計畫靠著迅速提高規模和積極降低成本獲利。雷蒙納接著說：「我們公司由兩位科學家 and 一位工程師組成，銀行甚至不願跟我們洽談，我們沒有錢，沒有支付能力。」

米爾納當天晚上看了企劃書後，覺得內容相當有說服力，因此加入這家小公司，擔任執行長，而不是擔任顧問。這時網路熱潮末期已經接近，他們還是募集到部分資金，也得到德國政府的補助，條件是工廠要設在景氣低迷的德東。到二〇〇一年，這家公司開始生產，員工總數十九人，公司名叫Q電池公司，Q代表高性能、高「品質」。這時世界真正的太陽能市場在日本，但德國

即將實施更有效的新固定電價制度，政府要以傳統電價的五倍，補貼再生能源。

隨後幾年，Q電池公司重新設計製程，推動自動化生產，成本降低五〇%之多。二〇〇三至二〇〇四年間，Q電池公司像所有電池製造商一樣業務開始起飛，到二〇〇七年，變成世界最大的太陽能電池製造商。幾年後，米爾納說：「接受補貼的太陽能電池銷售良好，你可以賺大錢，我們的任務是改變這種情況，使太陽能電力在沒有補貼的情況下，能夠和傳統電力競爭，我們還沒有達成目標。」

但是Q電池公司產品不敵德國以外國家低價產品，市場占有率下降，總市值下跌，從二〇〇七年的一百五十億美元，降到二〇一一年中的五億美元。

中國加入戰局

中國已經變成全球太陽能產業重心，擁有世界最大的太陽能模組產能，超過一半的矽晶型太陽能模組產量；矽晶型太陽能模組是最受歡迎的太陽能模組。施正榮在中國發展太陽能模組產業上，扮演最重要的角色。施正榮說，他變成太陽能大亨，純粹是「偶然，我們這一代沒有選擇自由，別人給什麼都得接受。」

施正榮一九七九年上大學，幾年後，得到前往美國深造的獎學金，非常高興，但是因為行政機關作業錯誤，只得前往澳洲。他回憶說：「我想追求美國夢，學的是美式英文，因此覺得有點沮喪。」

到澳洲就學後，施正榮向老師馬丁·格林教授爭取額外工作。格林是研究太陽能電池的傳奇人

物，給了施正榮研究獎學金，施正榮獲得博士學位後，在格林實驗室衍生的公司擔任研究主任，而且在取得澳洲國籍後，開始購買房地產，沒有多久，就擁有三棟房屋，他以為自己會在澳洲度過一生。

有一天，他和友人在雪梨吃飲茶午餐時，從中國來的友人說中國正在改變，正在發展民間企業。二〇〇〇年施正榮返回中國，各種快速變化使他大為感動，就在幾天內，擬好在中國設立太陽能電池公司的二百頁營業企劃書，十個月後，才從地方政府募得六百萬美元，成立尚德太陽能電力有限公司，和Q電池公司一樣，在二〇〇一年開始營業。

施正榮說：「我沒有想過會回中國，更沒有想過會當生意人，我的生涯規劃很清楚，我想當教授。」

施正榮著重「低成本擴充」和「降低製造成本」。他購買二手設備，尋找最便宜的原料，理由充分時，會採取倒退一步的做法，把部分製程「去自動化」，改用人工生產，因為某些製程由低成本的中國工人生產，會比昂貴機器生產便宜。施正榮說：「再生能源的唯一障礙是成本，降低成本是最重要、最迫切的事情。成功是三〇%的科技加上七〇%的製造效率。」

尚德成立四年後，在紐約證券交易所上市。二〇一〇年尚德的營業額超過三十億美元。

施正榮能夠成功，原因之一是在再生能源產業國際化的結果。尚德不是靠中國內銷市場成長，而是得力於歐洲的固定電價和日本的電價補貼，尚德和中國其他公司靠著成本低廉，搶到業務。施正榮特別感謝德國的固定電價制度，他說：「我很幸運，德國在二〇〇四年創造了世界市場。」今天尚德和中國英利綠色能源公司九五%營收來自國際市場。

施正榮說：「中國有很大的動能，我們以前追尋美國夢，現在人人追尋中國夢。尚德在國內有一大堆競爭對手，世界變得非常競爭，不兢兢業業，就會落後，我們必須不斷創新。」

中國除了有製造成本低廉的優勢外，還有政府的獎勵措施；獎勵措施一方面和歐美日一樣，是要刺激國內市場需求，另一方面也獎勵生產和出口，結果促使外國廠商把產能逐漸移往中國，以便保持競爭力，政府的支持已經變成中國和西方之家間新的貿易問題。

薄膜電池

太陽能電池產業東移到中國出乎大家意料。美國亞歷桑納州的第一太陽能是世界最大、成本最低的太陽能面板廠商之一，一九九〇年代末期，約翰·華頓是該公司最大股東，他是沃爾瑪創辦人山姆·華頓的兒子，也是華頓家族財富的繼承人之一。

第一太陽能擁有薄膜科技的創新製程，又經過多年改進，能夠用很低的成本生產太陽能電池。太陽能X公司早年發明的晶矽太陽能電池是業界最常用的製造科技，薄膜電池利用非矽原料大量生產，效能比晶矽電池低，但是生產成本也低多了。

第一太陽能能夠把成本壓到比某些傳統發電方式還低，因為全球太陽能電池需求增加，第一太陽能在三大洲都有生產線，母廠設在俄亥俄州托雷多；另一個廠設在德國；規模最大的廠設在馬來西亞。

第一太陽能以製造太陽能電池的核心業務為基礎，擴及規劃、推動太陽能電廠計畫。二〇〇九年，第一太陽能獲得合約，要在內蒙古建造表面積約二十五平方英哩（比曼哈頓略大）、發電

裝置容量高達二百萬瓩的世界最大太陽能電場，當時擔任執行長的邁可·艾亨說：「這項計畫規模媲美核能發電廠。」該公司可望在中國設廠，供應這座電場所需的太陽能電池，這座電場預定二〇一九年完工。

各種太陽能電池

一百多年前，愛因斯坦在蘇黎世專利局上班期間提出光電原則，不過太陽能光電要到二十一世紀，才開始應用到並不偏遠的一般地區。

二〇〇三年太陽能電池市場規模為六十萬瓩，由於成本下降、產能增加和政府的補貼，二〇一〇年成長至二千萬瓩，到二〇一〇年，已經設置的太陽能發電裝置容量是四千萬瓩，其中大部分產能是最近幾年才設置。光是二〇一〇年內，世界各國投資在太陽能發電業的金額就高達七百五十億美元，未來太陽能發電能否成長，端視政府支持的程度如何和太陽能電池成本能否進一步降低而定。太陽能發電產業的成長變化無常，遠超過其他再生能源，獎勵措施的引進、修改或取消，會嚴重影響太陽能廠商和投資者的意願。

太陽能產業茁壯之際，創投業的投資興趣跟著提高，投資金額急劇增加。今天既有業者和創投業資助的新創企業之間競爭激烈，各自擁有降低成本、提高效率的不同科技。

太陽能電池科技種類繁多，各有長短，簡單的說，就是成本與效益的對比。有些太陽能電池製造成本較低，但是把陽光轉化為能源的效率較差，有些太陽能電池製造成本較高，轉換效率也較高。

有一種太陽能電池所用的半導體是以矽晶為基礎，這種矽晶太陽能電池又分為單矽晶和多矽晶兩種主要製程，兩者都類似太陽能X公司的製程。

此外還有利用薄膜半導體製程製造的薄膜太陽能電池，成本至少可以大幅降低。有一種製程和利用矽晶的製程不同，稱為非晶矽太陽能電池，但是和其他製程相比，效率較低。另一個主要薄膜科技完全不利用矽，而是利用碲化鎘，這種製程是用塗布含有碲化鎘薄膜的玻璃，產生光電效應，第一太陽能電池公司就是利用這種方法，生產太陽能電池。第三種薄膜科技是銅銦銻硒太陽能電池，可以生產軟質材料，便於和建築材料結合，目前這種科技的投資正在增加。

科學家正在研究製造太陽能電池的最新製程：有些科學家嘗試利用奈米科技，提升材料的效率，使材料能夠像墨水或染料一樣運用；另一個研究重心是把太陽能電池和屋頂建材，甚至和牆壁建材合為一體的科技。

各家公司和各種科技競爭的目的都一樣，就是像英國石油太陽能公司首席科學家大衛·卡爾森所說的：「以較低成本獲得較高效率。」一九七四年，卡爾森在美國無線電公司實驗室發明非晶矽薄膜，因此對這些問題的見解與眾不同，他說：「建立基礎需要時間，太陽能電池不像電腦和積體電路，不會根據摩爾定律，每十八個月速度加快一倍。太陽能電池比較複雜，有更多、更有效率利用陽光的方法，沒有明顯的贏家。一般人低估全新製程定案的時間，首先要有科學依據，其次是工程基礎，最後是整體基礎建設。」

開發不同科技的科學家和工程師彼此競爭劇烈，相信自己的製程勝過對手。一位創業者說，為了緩和兩家公司的競爭，他曾安排兩家公司的執行長見面，表面上會議中和和氣氣，會後

兩人都對這位創業者表示，對方的科技註定要失敗。

集光型太陽能發電

太陽能電池不是利用太陽能的唯一方法，另外有人投資集光型太陽能發電。這種發電方式和傳統發電方式類似，好比傳統發電廠，不過燃料不是煤炭、天然氣或鈾，而是陽光。集光型發電利用各種大型鏡片聚集陽光，加以聚焦，使管中液體加熱蒸發，推動發電機產生電力。一九八四年，美國根據以色列的設計，在莫哈維沙漠建造第一座利用拋物面反光鏡聚集光線的集光型發電廠，可惜這時能源價格下跌，天然氣價格下跌尤其厲害，以致大家對集光科技興趣缺缺。

集光型太陽能發電後來復甦，有多種不同設計，包括利用整組大片槽型鏡片，加熱管子中液體的槽式聚焦發電系統；把太陽光集中在塔上，使其中的液體溫度加熱到很高溫度的集光塔；利用把圓盤反射的陽光，轉動圓盤中心小型引擎的斯特靈引擎系統；以及利用集光型設備，把陽光集中到一大排太陽能電池上的混合系統。集光型太陽能有一點勝過太陽能電池，就是可以儲存，熱量可以儲存在熔鹽中，用來持續發電，滿足負載高峰的需求。

在北非推動的「沙漠科技」是規模大多了的集光型發電計畫，業界計畫在撒哈拉沙漠，建造巨型太陽能發電場，把產生的電力跨過地中海，送往歐洲市場。這個計畫規模很大，成本很高，資金的融通就是重大障礙，因此到現在還沒有發電。集光型太陽能發電成本比傳統發電廠高很多，是另一個障礙；政治局勢不穩定是第三個障礙。

集光型太陽能電廠面臨的困難包括：土地、通道、電力輸送和成本。這種電廠只能設在陽光普照的炎熱地區，需要大量用水，但是最適合建廠的地方通常又熱又乾。

近年來加州沙漠興起搶地風潮，流行占地興建集光型太陽能發電廠，或巨型太陽能板發電廠，不過環保人士為了保護少人居住的沙漠地區，反對開發大規模太陽能發電廠。

電價比較

二〇〇〇至二〇〇一年間，很多人相信太陽能電價最後會低於傳統電價，或至少價格相當，現在目標已經在望。不過要計算電價是否相等並不容易，太陽能發電設備一次性投資和每個月的電費帳單如何比較，的確有困難。

電價比較很複雜：必須計算太陽能電池製造成本、安裝費、目前和未來的電價。日照是重要問題：每季日照天數多少？太陽能面板一年發電幾小時？義大利每年日照時數大約是德國的兩倍，光是這個因素，就足以影響電價比較。

另外有一個難題：太陽能電力不是傳統發電廠的可調式電力。太陽能電力和風能電力都不是連續電力。陰天時太陽能發電廠發電量減少，晚上完全無法發電。太陽能電力優於風電的地方是出太陽的大熱天，這時電力需求升高，太陽能電力可以供電，電力公司為需求尖峰建設的發電裝置容量因此可以減少。

太陽能電力供電間斷影響投資條件。晚上或沒有陽光的時候，太陽能發電設備無法運轉，百萬瓦太陽能發電產能和百萬瓦燃煤或核能發電產能不同，因此討論太陽能和風力發電時，裝置容量和實際發電量應該區分。利用集光塔太陽能發電系統，可以解決供電斷斷續續的問題。

有人擔心電價比較只考慮用戶的直接成本，並未考慮整個供電系統成本：由於太陽能電力供電斷斷續續，業者必須另行投資備用發電設施和輸配電網。電價比較也沒有考慮補貼和優惠措施成本。研究報告顯示：燃料（日照或風能）雖然免費，但是電力系統整體成本「必須由市場、最後由納稅人負擔。」

電價比較和另一個觀念有關：淨電表流量。安裝太陽能發電用戶計算電費時，是以電力公司的供電量減去太陽能電力匯入輸配電網的發電量。從用戶的觀點來看，在電價高的市場中，太陽能電力和傳統電力的價格相差不大。卡特政府時代負責太陽能計畫的梅科克說：「和電網連接的市場都有補助，只要有補助就不是真正的市場。」

屋頂都鋪上太陽能電池？

漢斯·齊革勒強烈支持太陽能電池，贊成一九五八年的先鋒衛星利用太陽能電池，他五十年前說過，「未來所有城鎮建築物屋頂」都應該裝設太陽能電池，這樣說不僅時機未到，坦白說，也有點誇張。不過五十年後，他的願景或是部分願景，已經成為美國、歐洲和亞洲很多重要投資的基礎。很多人認為，未來太陽能發電成長和產能增加的機會都很大，有人認為，到二十一世紀中期，太陽能發電會變成世界重要電力來源。

太陽能電池似乎是煉金術，可以把陽光化成電力。但考慮世界電力系統的規模和目前的太陽能電池成本後，會發現太陽能不是魔術。奇怪的是，發展太陽能電池經驗豐富的專家梅科克卻多少抱著慎重的態度，他長期支持太陽能電池的發展，四十多年來，都「靠著太陽能電池謀生」，

但是他說：「一九七〇年代我們在能源部進行的計畫現在都已經實現，只是晚了幾十年。」但是他很「害怕大家認為太陽能電池是唯一的綠色能源，事實上綠色能源有八、九種。」

梅科克說：「如果太陽能電力在二〇五〇年前，能夠占全球電力的一〇%，就是重大成就。理論上，即使太陽能電力的儲存科技沒有重大突破，最後這個比率都應該提高到十五或二〇%，要達到十五%，未來的投資會高達幾兆美元，對目前年產值只有六百億美元的產業來說，這是非常龐大的目標。」

神祕的風力

菲立普·馬羅從經驗中得知，要注意從沙漠吹進洛杉磯盆地的風。

「那天晚上這裡吹起沙漠風，也就是吹過山口，既熱又乾的聖安娜風，這種風會使你的頭髮捲起來，讓你緊張、皮膚發癢。吹聖安娜風時，什麼事都可能發生。」

但是小說中的偵探馬羅或是作者雷蒙·錢德勒沒有想到，加州的風居然可以推動一項全球產業。加州的大風促使風力變成今天世界最大、成長最快的再生能源。美國的風力發電十年成長十倍；十年來，德國風力發電設備大約占再生能源總產能的六〇%。

風力發電已經變成大型產業，規模卻還很小，只占全美國總發電量的二%。風力發電也比其他發電方式貴，不過成本已經逐漸下降。

風力發電未來發展的希望還是很高，美國能源部的目標是在二〇三〇年前，把風電提高到占美國總發電量的二〇%。另一項研究預測，二〇三〇年前，風力發電可能占全球發電量的二二%，這麼遠大的目標可能達成嗎？

風力發電碰到幾個問題。風力發電愈成功，占電力系統中的發電量愈多，就愈難和現有的

發電系統整合。風不會吹個不停，風的力道時強時弱，因此風力發電會斷斷續續，我們需要電時不見得能夠供電，結果，風力發電和太陽能發電一樣，都不適合提供不間斷的基礎負載發電。風力不強時，另三分之二時間需要不同的電源。為了補足風力發電的不足，需要另行投資傳統發電方式，因此產生額外的成本。風力發電斷斷續續，也為管理整套電網和平衡不同電源製造很多困擾。此外，風力發電廠經常分散在遠離人口密集的地方，因此需要新建大量輸電系統。

今天的風力發電機很龐大，一座二十五層樓高的風力發電機，電子設備、電腦控制和工程可能很複雜，但基本原理並不複雜。大自然免費提供原料——風力，地球轉動和陽光照射會產生風，原因是地球表面凹凸不平（高山深谷和海洋造成這種情況）；陽光照射時，空氣會膨脹變輕，向上飄浮，造成真空，比較冷的空氣會急速衝進來，填補真空，這種流動可能像微風一樣溫柔，也可能像暴風雨一樣猛烈。陽光直接影響空氣溫度，所以風力發電可以當成是一種太陽能。

傳統風車捕捉風的動能，再轉化為機械能，機械能由發電機轉化為電力，大型風力發電機就像一座小型發電廠。風是免費的，但電力系統無法免費；電力系統利用風力大量產生電力，透過輸配電網把電力送給用戶。整套系統要花多少錢？其他備用投資金額要多少錢？這些限制是否侷限了風力發電？這些問題都值得討論，也是神祕風力發電的一環：風力發電可以大到什麼程度？在滿足未來電力需求方面，能夠扮演多大的角色？

免費風力

人類最早用風力吹動船帆，補充划槳手的人力，使船在水面上航行。陸上的風車可以追溯

到一千多年前，目的是提供機械能，以便研磨穀物，推動包括抽水、灌溉和排水在內的水資源管理，大量減少耗時、費力的舂打穀物和搬運用水的勞動。

西元十世紀前，原始的風車已經在波斯出現，後來傳到伊斯蘭世界、中國和歐洲。在中世紀的英國，風車代表農村的創業者希望逃避當時當權者的控制，貴族和教會小心翼翼守護河岸使用權，推動碾磨穀物的水車。這種壟斷是財富和權力的來源，因為婦女如果能從水車取得穀物，就不必每天耗費好幾小時，辛苦、單調的舂打穀物。

十二世紀時，英國沙福克郡伯里聖艾德蒙茲修道院可怕的參森方丈，控制附近的河岸，只有他的水車可以運轉。一位名叫赫伯特特的老教士為了避開參森的壟斷，建造了一座早期的風車。參森因為有人膽敢挑戰他壟斷碾磨穀物的權力，下令拆除風車。赫伯特義正詞嚴的反駁說：「每個人都應該享受免費的風的好處。」唉！可惜這句自由的吶喊更激怒參森方丈，把赫伯特特的風車夷為平地。

但是科技不會靜止不動，風車在英國各地像雨後春筍般冒出來，數量多達幾千個，後來遍及歐洲各地。雖然隨從桑丘·潘沙告訴唐·吉訶德「那些東西一定是風車」，唐·吉訶德還是拿著矛，向「三十多個可怕的巨人」進攻，塞凡提斯筆下高貴的騎士因此跌倒在地球上，流下「攻擊風車」的說法。

風車後來變成荷蘭自然風景中常見的一部分，風車不僅用來碾磨穀物，也用來抽乾沼澤和湖泊裡的水，在新建堤防後面開闢很多可耕地。歐洲的風車有很多工業用途，如榨橄欖油、製造火藥、推動鼓風爐的風箱。一位歷史學家寫道，風車和水車廣泛利用，「表示人類依賴動物或植物取得動力的傳統方式崩潰，隱約宣告工業革命的來臨。」從十四世紀到十九世紀蒸汽和煤炭出現的幾百年當中，估計全歐洲工業能源的四分之一來自風力。

風力發電

一八八三年，愛迪生的珍珠街發電廠開張才一年，大家就開始思考風力是否比煤炭更適於發電。《科學人》寫道：「風是現成又有力的自然力量，人類居然完全不利用，真是難以想像。」不過風「缺乏一致性，時而狂暴、時而完全平靜，總是不穩定又反覆無常。」《科學的美國人雜誌》指出一個非常重要問題，就是風力斷斷續續又不穩定：「我們如何儲存白天或晚上、週日或上班日產生的電力，把不需要的電力儲存起來，供有需要時利用，問題就在這裡。」《科學人》問：「誰能解決這個問題？」

這個人是愛迪生的勁敵查爾斯·布拉士，戶外照明用的布拉士弧光燈一直是愛迪生燈泡的主要競爭者，一八八〇年時，約有六千個布拉士弧光燈照亮全美城市，布拉士因此變成富翁。

一八八七年，布拉士在克里夫蘭歐幾里德大街住家的後院，也就是世界最著名石油大亨洛克斐勒住的「百萬富翁街」下，開始解決風力和電力問題。布拉士建造一座高十八·二九公尺的風車，接上地下室的發電機和一組電池，把他的豪宅照的燈火通明。布拉士的機器是第一次真正由風力產生的電力。《科學的美國人雜誌》一面稱讚布拉士，一面提醒讀者，不要以為風力免費，產生的照明就會「很便宜，實際上，風力發電廠成本太貴，根本不是免費的東西。」最後布拉士向現實屈服，接上對手愛迪生的發明——比較方便的城市集中發電電力系統，但布拉士證明風力可

能成為電力的來源。

城市中發電的電廠快速成長，不表示風力發電沒有市場，孤立的美國農莊和牧場還是需要風力發電。

為了滿足這些人的需求，工程師兼創業家發展出小型發電風車，並配備儲存電力的電池。傳統風車主要用於抽水，發電風車功能比較多，可以提供農場和牧場家庭照明，減輕辛苦、重複的體力工作。

北達科他州農村男孩賈可布兄弟拔得頭籌。會開小飛機的馬塞勒斯·賈可布觀察小飛機上的螺旋槳運轉後，設計出風車葉片。他們的廣告宣稱：「風力！世界最便宜電力，每座農場都可以利用。」他們也行銷包括電冰箱、威化餅乾製造機之類的賈可布牌家電，他們大約賣了三萬台風力發電機，其他廠商賣了數十萬台。

羅斯福的新政最後摧毀了美國農場和牧場上的很多風車。一九三〇年代末期，農村電氣化管理局支持農村電氣合作社，把電線和輸配電網拉到各地，提供優質電力，此後二十年裡，風力發電不再是美國農場和牧場的電力來源。

風車爬上圓丘

一九四一年春冬之際，一隊又一隊的卡車準備把五百噸重的設備和零件，包括兩個各重八噸的葉片，送上爺爺圓丘，車附著力沿著陡峭的泥土路面緩慢向上爬，髮夾彎處幾乎寸步難行。爺爺圓丘離佛蒙特州拉特蘭市約二十公里，工人在這座獨立山頭費盡心力，興建一座可以產生一千

五瓩電力的風車，這種發電量當時堪稱大到無法想像。

負責建風車的人是普特南出版社創辦人的孫子帕爾默·普特南。小普特南畢業於麻省理工學院，當過一陣子出版社總經理後，發現自己喜好工程，因此跑到比屬剛果擔任地質學家，後來在鱈魚角蓋了一棟房子，卻發現「風速和電費都超高」，解決之道顯而易見，就是風力發電。

普特南找來一流團隊，包括美國若干最傑出的科學家和一流公司，其中奇異電氣負責準備電力裝置。爺爺圓丘地處偏遠，難以接近，入選的原因是風力品質一流。

一九四一年秋天，山上五三·三四公尺高的風車已經開始發電，像火力發電廠一樣，送電到佛蒙特州中央公共服務公司的輸配電網，而不是對單一農場供電。普特南的重要貢獻是發現風電可以匯入輸配電網，不必獨立運作，可以融入現有系統，不必互相競爭。

這座風車運轉順利，到二次大戰中期，才因機械故障，停止運作，當時普特南正在為諾曼地登陸設計兩棲登陸艇，擬定太平洋戰場的兩棲作戰戰略。他的風車到一九四五年才修好，不過幾星期後，一片八噸重的葉片掉到山腰，風車發電的故事告一段落，此後風車再也沒有修好。

不過幾十年來，棄置在爺爺圓丘上五三·三四公尺的高塔已經變成明燈，證明風力發電可行。一九七四年，有一位科學家對國會某個委員會解釋：「這座風力發電機」是今天風力發電的先驅」。

現代產業

一九七〇年代中期，石油禁運結束後，大家忙著尋找替代能源，風力發電變成重要話題，但是風力產業會誕生，除了和石油禁運有關，也要歸功丹麥的農業機械業和加州的租稅抵減，如果

這些因素沒有湊在一起，今天就不會有風力發電產業。不過，一開始時，情形並非如此。

一九七三年石油危機後，聯邦政府開始資助風能的研究發展。大型機器才能說服電力公司相信風力發電可靠，政府因此找大型國防承包商協助，如果這些廠商能夠生產噴射機、轟炸機、直升機和螺旋槳飛機，當然可以建造附有類似螺旋槳葉片的風力電塔，於是波音、麥道、聯合科技、奇異、美國鋁業等公司開始研究這個問題。不過這些早期風力發電機功能大都不好。一位政府研發經理斷定：「風車已經運用一千多年，我們誤以為風力發電科技已經存在，只要把風力發電帶到二十世紀就夠了。」

雷根總統主政時大幅刪減研究計畫，聯邦政府資助的風力發電計畫因而中止。

加州風力發電熱潮

聯邦政府的研發支出在有效推動風力發電前停止，卻還有管制與租稅之類的其他政策可以利用。首先是前面提過的公用事業管理政策法，依照這項法律，電力公司必須向小發電商購電。此外還有相當優惠的聯邦租稅抵減，加州也一樣，適用發電量很少或沒有發電的廠商。加州州長布朗獨力推展風力發電，發揮極大作用。投資廠商的風力發電資產可以加速折舊，因此投資幾乎沒有風險。依據加州慷慨的管理法，加州風力發電業者可以依據很高的「避免電價」，把再生能源電力賣給電力公司。

結果加州出現罕見的風力發電熱潮：熱心的風力擁護者、認真的開發商、技術工程師、務實的梦想家、荒唐的推廣者、鼓吹避稅的仲介、想發橫財的人，全都投入風力發電。現代風力發電

業就此誕生。

這股狂熱帶來重要的創新，新風力發電機名叫風電場，和普特南的單一巨型機器不同，是由幾個較小發電機用電腦網路連結成的機器。這種方式另有好處，連接的發電機中如果有幾台故障，整個系統還是可以運轉，大部分電力還是會流入輸配電網。

加州有三個蘊藏龐大風力資源的巨型風場，可說是風力發電的沙烏地阿拉伯。其中一個是北加州聖華金谷和舊金山灣區之間的阿特蒙山口，第二個是貝克斯菲爾德南邊的特哈查比山口，第三個是棕櫚泉附近的聖戈爾戈尼歐山口。

風力發電開發商競相取得設置地點，很多最好的地點却難以到達，必須運用巧思、勇氣和加倍努力，才能開發，開發商開始安裝機器時，才發現當地的風猛烈之至、無法預測、極難掌握。

風力發電機每天要依據實際情況調整，一位工程師說：「風整天錘打你，永不停歇，吹的眼睛都痛了……你簡直可以背對著風往後倒，風強的可以把你托起來。」強風把很多發電機的葉片吹垮或吹走，吹倒風車，吹壞電子設備。大部分風車的發電量遠比製造廠承諾的低，機器的可靠性和性能變成最大問題。

風力發電出現前，棕櫚泉西邊十六公里處的卡巴松小社區裡，有一家哈德利水果店很出名，旅客從沙漠回來、口渴難耐，都會來這裡吃店裡著名的菓子冰沙。卡巴松居民對風力發電園區寄予厚望，因為卡巴松位在莫哈維沙漠和洛杉磯盆地交界的聖戈爾戈尼歐山口。卡巴松的發電機根本還沒有發電，幾乎立刻就遭到強風吹毀，剩下「一堆礙眼、破碎、扭曲的葉片」。

詹姆士·戴爾森是堅決發展風電的最重要先驅之一，他把公司命名為「榮德」(Zond)，這

個名字一部分是指從安地斯山向下吹過阿根廷的風，一部分來自德文的「探索」。

戴爾森發現，自己和加州風電經營者一樣，經濟效益一部分來自租稅抵減。一九八一年除夕，他和同事冒著強烈風雪，在特哈查比隘口的某個危險山脊上，想在新年前，架好風力發電機，以便適用這一年的租稅抵減。

他說：「發電機一起動就解體，第二天我們只檢到機器碎片。我們的結論是最好趕快找到比較好的科技。」

堅強的丹麥人

戴爾森決定到歐洲尋找科技，因此前往荷蘭。芬·韓森是丹麥工程師，家族經營偉思特農機製造廠，聽說戴爾森要買荷蘭的發電機，趕緊駕著自用小型螺旋槳飛機，去荷蘭接戴爾森到丹麥參觀自家工廠。

幾年前，韓森決定利用家族企業的技術，生產發電機，延續丹麥人十九世紀結束以來對風力發電的興趣。丹麥在兩次大戰中，利用海上強風發電，供應大部分電力，克服戰時材料短缺造成的傳統能源發電中斷困境。二次大戰後，風力發電無法和便宜的傳統電力競爭，不過一九七〇年代的石油危機再度引發大家的興趣。一九七九年，偉思特生產第一部風力發電機，丹麥其他企業也開發自己的風力發電機。丹麥風電產業起源於農機業，最初的多家風電設備廠商是鐵匠公會會員，丹麥的設計強調農機業重視的耐用和堅固可靠。

里瑟國家實驗所設在離哥本哈根六十五公里的峽灣上，丹麥人在這裡進行重要大事。二次大戰期間，丹麥的諾貝爾物理學獎得主尼爾斯·波爾曾在美國洛薩摩斯國家實驗室工作，是原子彈發明者之一，戰後波爾回到哥本哈根，創立並主持里瑟實驗所，推展波爾「推動原子能和平用途、增進社會福祉」的願望。

一九七〇年代中期，丹麥支持核能研究的人大減，里瑟實驗所反應爐部門部分員工轉而研究風力發電，研究範圍廣及風力動能到繪製丹麥風力資源地圖，後來還擴大到繪製歐洲風力資源地圖，最重要的是測試新的風力渦輪機。里瑟實驗所對丹麥風電產業的提升大有貢獻，丹麥政府的補貼也一樣，但丹麥大部分市場最初都由「住在集體農場的長髮活躍分子和替代能源農民組成。」

戴爾森訪問丹麥後改變了這種情況，他和韓森走進野地，檢驗正在運轉的偉思特機器，認定這些機器足以抵擋加州山脊上的狂風，幾乎當場就訂購一百五十台發電機，數量遠超過偉思特到當時為止的總產量，隨後十年裡，偉思特的產品幾乎全部賣給宗德公司。戴爾森協助創造的規模市場，對丹麥風電產業助益極大，戴爾森也和加州其他開發商訂購丹麥堅固的風力發電機，重建風力發電的信用。到一九八七年為止，加州安裝的風力發電機九〇%向丹麥購買。

這就是加州變成近代風力發電產業發源地的來龍去脈，一九八〇年代中期，美國九六%的風電投資、世界九〇%的風電投資，都是在加州投資。

不過問題逐漸出現，葉片旋轉威脅鳥類和蝙蝠，引發環保人士和保護動物人士的反對，他們撰寫日誌，記錄包括金雕在內、撞上阿特蒙山口風電機死亡的猛禽。其他人反對風電，是出於風車發出惱人的噪音，或是風車看來刺眼、有礙自然景觀，遭到強風吹倒的機器尤其如此。旅遊勝

能產業有史以來最重要的科技進步。」變速科技利用先進的電子發電科技，使發電機配合很低或每一件風能投資案，有穩定的現金收入，「可以撐到下一個階段。」

戴爾森回憶說：「情況真的很慘，我們命若懸絲。」他的宗德公司能夠撐過去，原因是入股前身為美國風能公司的肯尼德公司是美國最大、最有名的風能上市公司，業務涵蓋阿根廷、紐西蘭和烏克蘭。一九九六年肯尼德宣告破產，似乎為美國風能產業敲響喪鐘。

戴爾森回憶說：「情況真的很慘，我們命若懸絲。」他的宗德公司能夠撐過去，原因是入股前身為美國風能公司的肯尼德公司是美國最大、最有名的風能上市公司，業務涵蓋阿根廷、紐西蘭和烏克蘭。一九九六年肯尼德宣告破產，似乎為美國風能產業敲響喪鐘。

戴爾森回憶說：「情況真的很慘，我們命若懸絲。」他的宗德公司能夠撐過去，原因是入股前身為美國風能公司的肯尼德公司是美國最大、最有名的風能上市公司，業務涵蓋阿根廷、紐西蘭和烏克蘭。一九九六年肯尼德宣告破產，似乎為美國風能產業敲響喪鐘。

衰退

好景不常，一九九〇年初期，加州風力發電熱潮破滅。布朗不再擔任州長，聯邦租稅抵減過期。因為租稅優惠騙局很多，租稅抵減變成抨擊對象，加州一位國會議員怒氣衝衝的說：「這些地方不是風電場，只是避稅土地。」能源價格崩潰，利用風力發電的理由消失，電價降低，利潤很高的「避免成本」購電合約也成為歷史。

地棕欄泉居民不滿風車擋住視野，棕欄泉市長、藝人波諾（雪兒的前夫）反對在棕欄泉上方的聖

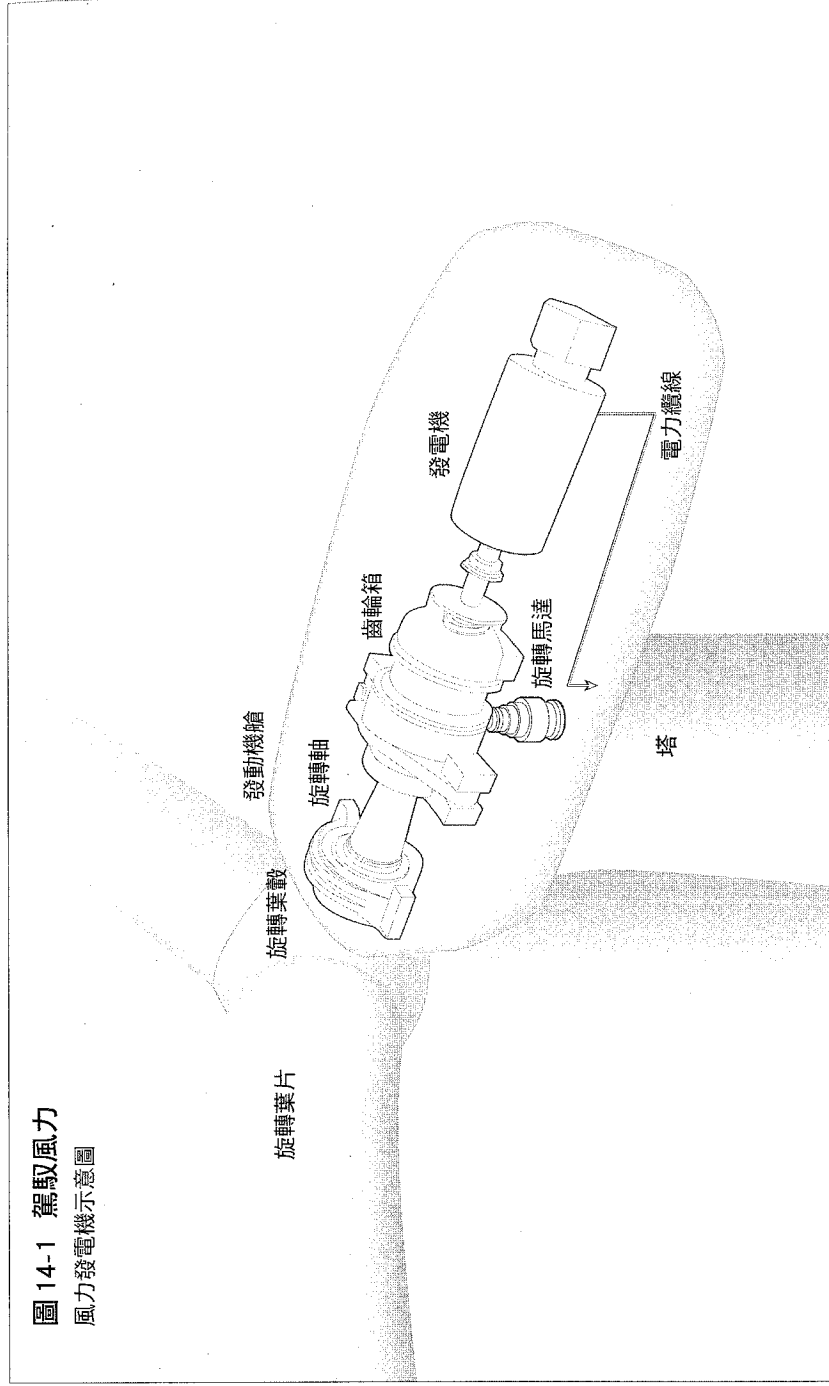
戈爾戈尼歐山口，新建風力發電機，他宣稱要飛往華府，「像唐·吉訶德一樣對風車宣戰」。不

過，他在棕欄泉預算緊縮時改變心意，和鄰近的沙漠溫泉市爭著要把附近的風電場，併入轄區，

以便增加財產稅收入。

圖 14-1 駕馭風力

風力發電機示意圖



很高的風速運轉，生產穩定的電力，有助於維持輸配電網的穩定。

風力發電復甦

一九九〇年代中期風能產業似乎即將崩潰之際，前景開始好轉。科技創新提高了機器的效率和可靠性；環保意識湧現，風能的優點是不排放二氧化碳。一九九一年波灣戰爭結束後，華府出現一股力量，準備在能源方面「採取行動」，還通過一九九二年能源政策法，其中一項條款是恢復租稅抵減，但是其中有一個重大差異，新的再生能源租稅抵減和舊辦法不同，不獎勵投資設立新的發電機，而是獎勵設備實際發電的時間。一九九〇年代末期，若干州實施再生能源組合標準，規定本州電力來源中要包括一定比率的再生能源。

恩龍公司是風能發電起死回生的功臣，經營天然氣和電力業務的恩龍公司野心勃勃，是能源業中的創新公司。西點軍校畢業生、哈佛大學經濟學博士羅伯·凱利經營恩龍歐洲分公司五年後，返回休士頓，不知道何去何從，就和恩龍執行長肯尼斯·雷伊討論了一下午。凱利說：「我們想判定下一個機會是什麼，我們基於某些原因，說為什麼不試試再生能源？我覺得再生能源確實有潛力。我親眼看到多難把天然氣送到我們的英國發電廠，此外，還有全球暖化問題，風能也便於防止天然氣價格暴漲。」恩龍買下宗德一部分股權，用凱利的話來說，「我們把宗德從懸崖邊救回來。」

主流科技

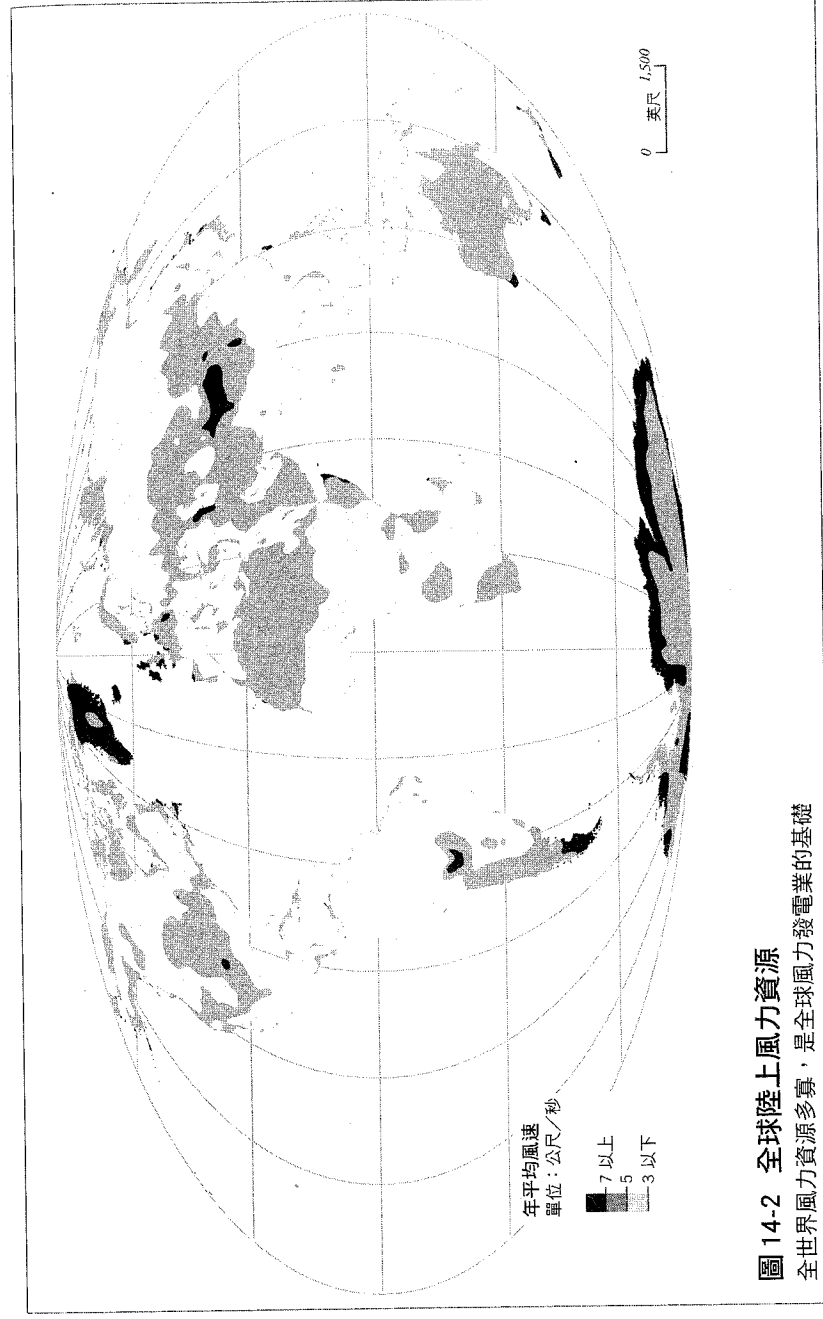
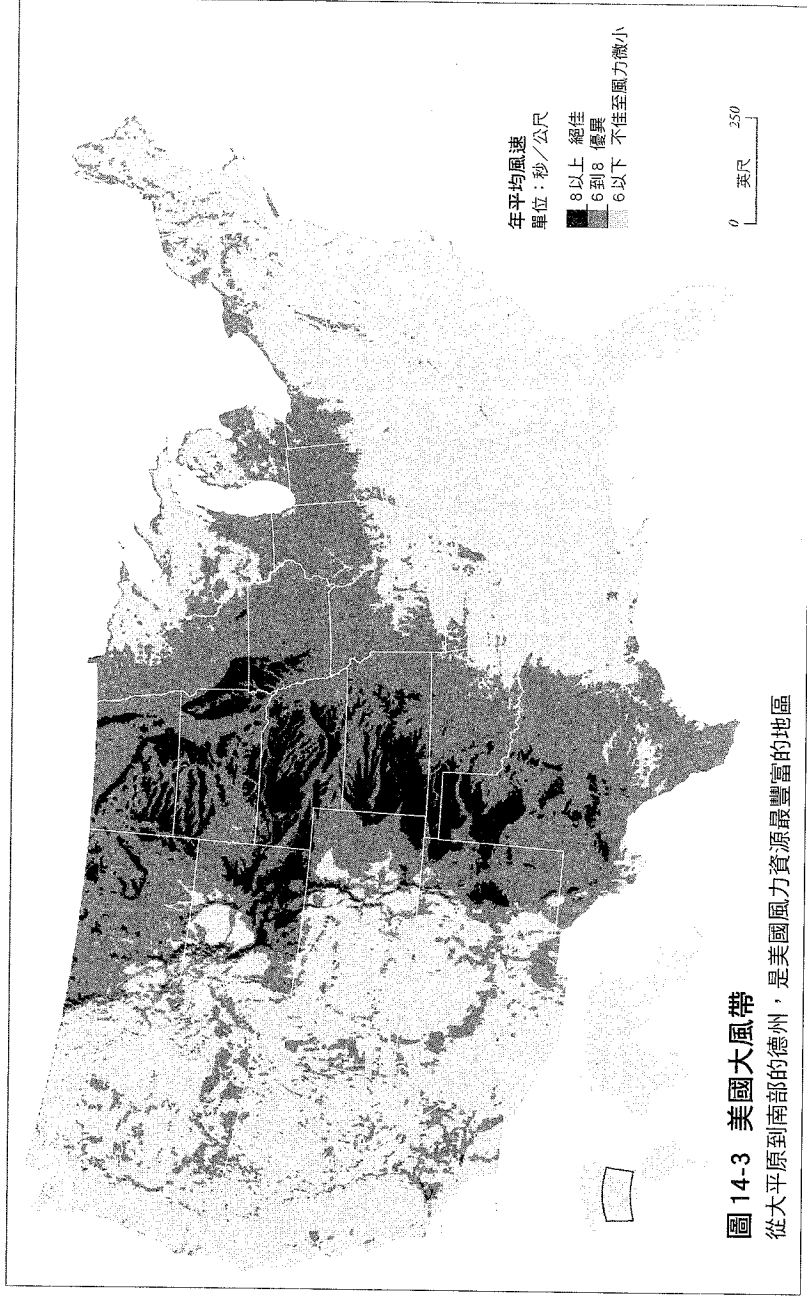
幾年後恩龍買下宗德剩餘股分，也買下德國一家擁有變速箱科技的公司，這些能力加在一起，使恩龍風能公司能夠製造更大、運作更順暢的風力發電機，改善風能經濟效益，變成主要風能公司。但後來恩龍涉嫌做假帳，股價狂跌，最後在二〇〇一年秋天財務全面崩潰，爆發規模驚人的破產案。

二〇〇二年，奇異公司出手，以三億二千八百萬美元買下破產的恩龍風能部門，但這筆錢只能算是頭期款，因為奇異還要投入更多資金和製造科技，才能把發電機品質提升到符合奇異嚴格的標準和品質。奇異風力發電發展部門主管維特·阿巴特回憶說：「風力發電產業基本上已經毀壞，我們要徹底檢查，努力重新設計，才能變成主流的科技。」經過一番努力後，奇異大幅提高風力的發電係數。

這時歐洲風力發電產業振翅待飛，歐洲二〇〇〇年的風力發電產能是美國的五倍，美國却還在爭論是否延長租稅抵減。德國和西班牙是歐洲風力發電大國，兩國實施優惠的固定電價制度，二〇〇五年時，兩國占歐洲風力發電產能的七〇%。

二〇〇五年，美國推動再生能源組合比率發展標準，風力發電加速發展。二〇〇五到二〇〇九年間，風力發電裝置容量每年約成長四〇%，以絕對值計算，增加的裝置容量約等於二十五座核電廠（但實際發電量約等於九座核電廠）。

中國比較晚發展風力發電，但新增裝置容量最多，未來風力發電成長率最高，在風電領域



中已經躍升到第一。中國國家電網公司董事長劉振亞說：中國計畫興建幾座「三峽級風力發電廠」，意思是中國決心擴大風力發電，容量遠超過三峽大壩的巨型風力發電廠。

中國努力推動風力發電，是因為需要極大量新電力，同時政府決心推動清潔能源部門的成長，藉以降低對煤炭的依賴、減少污染。中國的風力資源足以達成這項目標，包括內蒙古在內的西北地區尤其如此。中國國家能源局官員吳貴輝說：「中國很多地區深受強風之害，過去人民認為強風是災，現在卻視之為非常可貴的資源。」

從財務和實際規模來看，風力發電已經在全球各地變成重大的成長產業。二〇〇九年世界風力發電設備的銷售總金額為六百四十億美元，今天一座標準風力發電機的發電量是一九八〇年的一百倍。

偉思特和奇異是全球領導廠商。奇異是美國最大廠商，幾乎占有一半市場，偉思特在世界其他地區領先。西方國家其他重要廠商包括西門子、西班牙嘉美薩、德國愛納康、日本三菱，和戴爾森後來經營的克里伯風電，戴爾森的公司在一〇一〇年由聯合科技公司收購。此外，開發中國家也有幾家重要公司。

圖爾西·坦尼特在印度北部的古吉拉特邦經營工廠，生產縫製莎麗服和女裝所用的聚酯紗，一九九〇年某一天，他在岳父家中翻閱雜誌時，看到一張從來沒有看過的風力發電機照片，大感興趣，隨後就忘了，卻忘不了印度供電經常不穩定、影響工廠經營的大問題。一九九三年他想起這張照片，擔心事業前途，就對幾位兄弟說：「我們來投資發電機！」他們向偉思特經銷商買到一台發電機，卻發現必須自行安裝機器，再把機器融入自己的系統，因此從中學到很多東西。

坦尼特看到對印度其他工廠供應風電的商機，這些工廠和他的工廠一樣，白天時常因為停電而停工，結果必須反映在價格上的老問題。一九九五年他成立蘇司蘭公司，後來買下德國一家公司的部分股份，不久就為幾百家紡織廠供應、安裝發電機，讓這些工廠把多餘電力賣給電力公司，也遊說印度政府同意這些工廠的租稅抵減。最後他認為，製造發電機勝過生產莎麗和女裝原料，因此在二〇〇〇年退出紡織業。到二〇一一年，蘇司蘭產品銷售三十二國。他說：「風電的妙處在於規避電力成本的問題。」談到蘇司蘭的發展時，他解釋說：「最好的想法總是在碰到壓力時出現。」

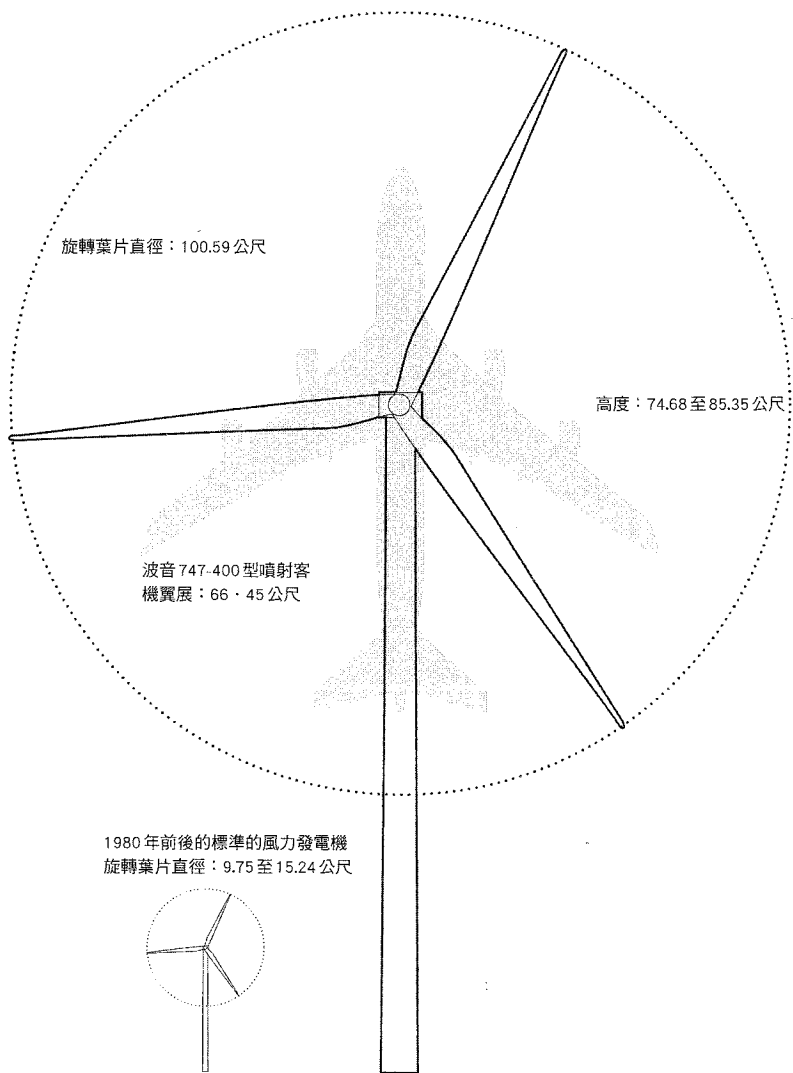
世界五大風力發電公司中有兩家在中國，分別是金風科技和華銳風電。中國風電業者從事國際競爭時，擁有政府大力補貼和生產成本低落的優勢。中國政府規定風電設備自製率必須達到七〇%，進一步刺激國內風電業的成長。西方國家對手擔心中國業者可能在幾年內，像太陽能產業一樣，變成低成本的全球供應商，但中國現在還不是主要出口國，中國風電業者雖然相當重要，卻必須和西方國家業者一樣，在全球建立信用可靠的名聲和服務網。此外，風力發電機可能重達幾百公噸，不易裝運。

瀕臨崩潰

製造發電是一回事，開發風力發電場、取得地點、獲准設立、購買發電機、和電力公司談判購電合約是另一回事。世界四大風力開發商中的三家是西班牙伊維爾德羅拉、葡萄牙安迅能源與EDP再生能源。

圖 14-4 風力發電的商業規模成長

2,500 瓩的風力發電機



北美最大、世界第二大風力開發商是新紀元能源公司，新紀元原名佛羅里達電力，是佛州最大傳統電力公司，供電區域涵蓋邁阿密，新紀元的風力發電業務涵蓋美國二十六州及加拿大幾省。新紀元投入風力發電業務原因不明，因為佛羅里達堪稱美國風力資源最貧乏的地方，新紀元投入風力發電純屬意外。

一九八〇年代末期，佛羅里達電力公司為推動多元化，貸款風力發電投資案，後來風力發電業務急遽衰退，若干投資案破產，佛羅里達電力驚訝的發現，自己變成好幾個風電場的業主，也發現這些風電場可以賺錢，因而發展出管理風電所需的技術能力。

一九九〇年結束時，幾乎沒有人希望經營風力發電業務，熱門投資項目是燃氣火力發電廠，新紀元相當晚才加入投資，財務長路·海伊三世回憶說：「公司的風力開發部門快窒息了，認為自己即將崩潰。」但是海伊進行策略檢討後，結論是天然氣發電很難賺錢，風力發電前景反而比較好。

不久，天然氣發電狂潮崩潰，很多電力業者倒閉，幸好新紀元很晚才投入天然氣發電，大致上沒有什麼損傷，只煩惱怎麼處理大約三十具奇異天然氣發電機的訂單。但新紀元時機湊巧，奇異剛剛併購恩龍風電部門，正在尋找風力發電客戶，海伊因此得以說服奇異，把天然氣發電機改為風力發電機，這樣做其實是幫助奇異，因為奇異才開始生產風力發電機，就有了大訂單。

新紀元這時更決心推動風力發電業務，已經出任執行長的海伊說：「和其他公司相比，我們從事風力發電業看來確實奇怪，華爾街分析師也抱著懷疑態度，投資人一再問我們在幹什麼。」海伊十分氣惱投資人一再問：「這種投資是不是嗜好？」新紀元變成美國最大的風力發電業者，

到二〇一〇年，占美國風電裝置容量的二〇%。對新紀元來說，風電除了不會產生二氧化碳和空氣污染外，也是合乎經濟原理的優良事業，就像海伊說的一樣：「燃料免費」。這句話讓人想起十二世紀的風力先驅英國教士赫伯特。

風力發電有多大？

但是風力發電規模可能變成多大？如果二〇三〇年時，風力發電占總電量的二〇%，就會等於今天核能發電的貢獻。美國確實擁有很多優異風力資源，有些人設想美國中西部出現一條巨型風力走廊，一九三〇年代強風吹襲這條走廊，吹走表土，造成沙塵暴，使幾百萬人一貧如洗、流離失所。今天很多人認為，要是傳輸設備，這種風就是重要自然資源、是有待利用的大自然贈禮。但規模是一大挑戰。業者持續追求更高、更寬的風力發電機，因為機器愈大，產生的電力愈多。

光是把大型發電機送到安裝地點，就是大問題，太大的發電機不適用於卡車運送，二十五層樓高的發電塔側放在卡車上，由警車沿路護送並不容易。把發電機吊到定點安裝是另一項挑戰。如果發電機變得太大，運送時經過的道路必須補強。此外，巨大葉片和其他組件的是否耐壓，也值得擔心。典型風力發電機的發電量是二千五百瓩，很多人認為，光是考量運籌因素，陸上發電機的發電量就不能超出三千瓩太多。今天大家努力的目標是改善葉片設計、電力電子設備、提高整體效率、開發和利用較輕、較堅固的材料。

成本是另一項限制。為了利用品質較差的風力資源，方法之一是降低發電機成本，方法之二是找到加強利用這種風力的科技。風力不用花錢，但風力發電系統需要成本。把風電輸送給顧客的成本可能很高，如果再考慮備用發電設備的成本，風電可能比其他電源昂貴，因此風電電價仍然需要補貼。

供電「斷斷續續」問題

出現這種差異的原因之一是電力需求和風力之間的相互影響。電力需求總是起伏伏：電燈、電腦開關關閉；工廠啟動馬達；氣溫上升、冷氣開始運轉。為了即時反應，電網要求發電廠電力可供調遣，也就是電廠立刻送電，多數發電廠的調遣配合度為九五%。

但是風無法調遣，風力時斷時續，無法和其他電源相比。一千瓩的風力發電產能類似太陽能電池，實際產出比不上一千瓩的火力發電廠，風力發電機因為時開時關，實際產出電力大約只有產能的三分之一。即時在風力資源優異的地方，風力發電機發電時間通常只有三十至四〇%，少數地區或許可以提高到五〇%。而且，風力情況和整體電力需求不見得能夠搭配。很多地方晚上和春秋風力最強，但是需求高峰在白天和冬夏。例如，某次熱浪侵襲加州，加州能源委員會發現風力發電量只有產能的六%。

風力時有時無，是未來風力發電成長必須克服的一大挑戰。科羅拉多公共服務公司是阿克賽爾能源公司的子公司，風力發電占全部發電量將近十五%，是全美比率最高的公司，該公司發現藉著改變火力發電之類其他電源的運作，可以把風力發電融入現有電網，不必另建備用設施。不過，科羅拉多優異風力離人口中心不遠，也是能夠這樣做的原因之一。

有人認為，建造更多風電場，無法解決風力時有時無的大問題。加州一家電力公司主管扼要指出：「晚上風很強，我們卻用不著，天氣熱時風也不吹。」很多電力公司認為，每一千瓩新風電需要很多其他備用發電設施。美國一套風電系統通常需要搭配一套天然氣發電系統，成本因而大增。中國的風力發電日漸成長，風力時有時無會變成重大挑戰。中國國家電網公司董事長劉振亞認為，即將興建的幾個「三峽大壩級風電廠」必須搭配天然氣、煤炭和核能發電設備。

統合成本是第二個高昂成本。風電場分散各個偏遠地區。一家大型發電機公司主管說：「懷俄明州風力素質優異，但是全州人口只有五十萬人，距離加州很遠。」因此，為了把風電送到輸配電網、再送給用戶，必須投資大量額外輸配電網，需要投資數千億美元，辦理很多申請手續，爭取輸電線地權，解決不同輸配電線所有權人的爭吵。

經營輸配電網的頭等大事是保持穩定，否則輸配電網會故障、很多地區會停電。風電不是穩定的電源，把風電納入輸配電網會產生額外問題，解決這種問題會產生額外成本。

不過，有人認為，透過擴大、改善和彈性調整輸配電網，善用分散各地的優質風力，可以有效解決時有時無和整合問題。戴爾森說：「風力分散各地會提高可靠性。」聯邦能源管制委員會主席喬恩·魏林霍夫指出，「沿著海岸裝設風力發電機，表示可以提供跡近穩定的風電。」

環保方面的反對是另一項限制。很多環保團體強力支持風力發電，也有很多環保團體反對，不希望風電場設在聯邦土地和荒野地區。地方居民也反對，不希望風力發電塔妨礙生活或景觀，也不希望聽到風電機葉片的噪音。

地方人士反對風電是國際現象。德國對設置風力發電機一向維持開放態度，英國卻不是這

樣。英國在歐洲國家中擁有最佳風力資源，英國人卻以景觀和噪音為由，反對在陸上設置風力發電機。一位歐洲風電開發商說：「五年來，我想在英國推動風力發電計畫，却吃足了苦頭。」

有人擔心太快推動風電，風電（和其他再生能源）可能使電費高漲，引發強烈反彈。有些國家和西班牙一樣，因為高額補貼再生能源發電，遭遇高昂電費費率衝擊。

當然成本可能因為創新而降低，今後會有更多的創新。課徵碳稅對風力發電一定有幫助，有些國家為了生產更多無碳電力，應該採取差別費率，但是無碳電力不等於免費電力。

海上風力發電

考慮「海上風力發電」的新方式時，上述成本問題會顯的更突出。風力發電機放置在海上可以獲得強勁、持續的風力。海上沒有障礙物阻擋風的流動；沒有山丘、深谷、建築物 and 樹林。歐盟為了達成二〇二〇年前再生能源占全部電力二〇%的目標，樂於見到海域風力發電擔當主要角色。二〇一〇年時，世界最大海域風電場開始在英國肯特郡海域發電，這個計畫耗資十二億美元，包括一百座風力發電機，總產能三十萬瓩。目前海域風電只占歐洲風電產能的一小部分，但是未來的目標很大，英國希望在二〇二〇年前，把風電產能擴增為三千三百萬瓩，德國希望達到一千萬瓩。

海域風力發電機不必利用道路運輸，可以做的很大，可以像石油平台一樣，先在船塢組裝，再用駁船拖到海上。因此，三千瓩可能是陸上風電機的極限，海域風電機可以大到七千或一萬瓩，若干規劃中的風電機大到要在上面準備直昇機降落平台。

歐盟的目標是艱鉅挑戰。海域風力發電成本是陸上的二到三倍。而且，海上環境極為惡劣，海域風力發電技術會難上很多倍。

把這些龐然大物固定在海床上並不容易，為了要在海上運轉，發電機必須重新設計以便「海上化」，必須足以抵抗各種連續不斷的巨大壓力，包括潮汐、海浪、鹽分和海風的壓力。暴風雨也會無情的侵襲發電機，腐蝕是大問題，海水透過通風口，進入發電機，損害電子設備是另一個問題。修理海域設備難多了，在洶湧的海上修理固齒齒輪箱可能要耗時六週，發電量可能嚴重損失。一位發電機製造商說：「我們尋覓風力最強的地方裝設風力發電機，卻要等到風力降低、天氣變好，才能修理，說來實在諷刺。」組裝費用也很高，要用特別耐用的電纜線，連結每座發電機和變電站，再接到陸上。這種電纜線比陸上用的電纜線堅固多了，整合費用因此增加。

海域風電業要師法海域油氣業，學習怎麼在惡劣的海域環境中作業，數十年來，這兩種產業已經學會怎麼抵擋風力、海浪和暴風雨的侵襲，建造海域風電場的新型船隻下水前，建造海域石油平台的船隻可以拿來代用。

海域風電場第一波營運經驗顯示挑戰極大，但歐洲國家還是會繼續推動海上風力發電，陸上適合風力發電的地點愈來愈少，因此，歐洲為達成處理氣候變遷問題的目標，只好求助於海上風力發電，但是歐洲要在設定的期限內、達成海上風力發電目標也不容易。為了推動海域風力發電，政府應該訂定優惠的固定電價制度、其他補貼措施和管制政策。一位長期從事風力發電的歐洲開發商說：「政府的意志可以推展海域風力發電。」

美國的海域風力發電前景比較不確定，鱈魚角風力園區的爭論就是明證；鱈魚角風力園區位在鱈魚角、瑪莎葡萄園島和南塔基特島之間的南塔基特灣，預訂裝設一百三十座風力發電機。兩派人馬在麻州和華府為了這個計畫已經爭執十多年，其中一派是地主、船員、印地安部落和當地居民，另一派是開發商、清潔能源提倡者等，環保團體分居兩個陣營。已故麻州參議員愛德華·甘迺迪一直反對這個計畫。二〇一〇年麻州資深參議員凱利宣稱，鱈魚角風力園區會「為麻州提供工作機會和清潔能源」；麻州資深參議員史考特·布朗擔心這個計畫「可能危害對鱈魚角經濟十分重要的很多產業，影響飛航安全，影響這個區域裡的印地安部落權利。」

目前海上風力發電主要集中在歐洲。

風電已經發展三十多年，要變成可以成長的產業為時尚早。由於政府和民眾追求無碳電力，風力發電的占有率一定會成長，也是今天就可以運用的替代能源。新的計畫正在研究如何開發新科技、改善營運與生產、提高輸配電網彈性、降低成本。

風力發電已經發展很久，變成電力業的一環，不再是「替代能源」，對某些先驅來說，這種結果是間接的稱讚。風力發電逐漸變成「傳統」能源，目前規模還小，還要面對各種限制與挑戰，但在電力業中的地位愈來愈重要，也開始走上快速成長的道路。

第五種燃料——效率

有一種能源的影響力可能最大，至少未來幾年如此，就合理性來說似乎再簡單不過，卻也最難讓人理解。畢竟這種能源不像管線裡流動的液體，也不像在線路上移動的電子，無法發動車輛或儲存在槽裡。種能源既沒有像二十五層樓高的風力發電機那麼壯觀，也不像發電廠那麼堅固，更沒有電動車那麼拉風，還欠缺能夠再生的長期保證。

有人稱之為第五種燃料，很多人根本不認為這種東西是燃料或能源。但就影響力而言，它當之無愧，只是有不同的名稱，包括節約能源、能源效率、能源生產力，甚或能源創新——也就是運用更多情報資訊來消耗能源，更了解能源使用狀況——在減少消耗量的同時，仍得到相同或更大的效果。不論其名稱為何，在所得增加、交通便捷、人口增長的世界，這種東西是優質能源，但要取得並不容易，更不是免費，需要花時間和金錢去投資才行。

多年來，大家有時候把節約能源視為懲罰、節制、降低生活水準、自我犧牲或所費不貲。開發中國家還質疑節約能源是狡詐的方法，讓他們沒有機會改善國民生活水準。但如今一切都已改觀，全球對能源效率的關鍵角色及其規模，逐漸形成強烈的共識，這是一百八十度的大轉變。

以往強調節能無非是為了因應成本和高價，以便增加能源，並減少對環境的衝擊。唯有好的工程科技，才能提高效率。

近幾年出現兩個迫切的新問題，使外界對能源效率的態度為之不變，第一是氣候變遷，如果能夠更有效使用能源，碳排放就會愈少。第二是經濟成長，新興市場國家的經濟突飛猛進，意味著全球能源消耗激增，從而導致能源需求有增無減。而今最新的共識是提高能源效率，這樣一方面可維持經濟成長，又不會導致全球能源供應無以為繼，業者也能夠及時進行投資。

這些因素使全球都發生巨變，中國政府把能源效率列為優先政策，以提高能源效率一倍為目標；歐盟規定在二〇二〇年前，能源效率要增進二〇%；俄羅斯總統麥維德夫也明定，二〇二〇年時，能源密集產業占俄國經濟的比重要減少四〇%；美國歐巴馬政府則視能源效率投資為帶動經濟成長的引擎。歐巴馬總統說：「經濟要更強健、更乾淨的捷徑就是要提高效率。」

真正的好處

我們對能源效率的潛力深具信心，是因為很多目標早已達成，遠超出很多人的認知。現在美國每單位國內生產毛額消耗的能源只有一九七〇年代的一半，其中很大一部分要歸功於效率提升，一九七〇年代一輛新車每加侖燃料約可行駛二一·七公里，反觀今日，就平均車型而言，新車每加侖得跑四八·六公里才算合格。今天新屋的隔熱效果也比幾十年前好。這些實質好處也反映出美國經濟結構的轉變，套句葛林斯班的話，美國經濟已「更輕巧」。他說：「今天要製造一單位的產出，所需投入的材料比幾十年前少很多。」能源密集的製造業占經濟的比重愈低，經

濟就會更有效率。現在服務業、資訊科技和輕工業占經濟的比重愈來愈高，其中很多行業在一九七〇年代根本不存在。經濟結構改變也代表能源密集的製造業外移到成本較低的國家，這三十年來，美國的鋼鐵生產實際上已減少一半。

不同的研究報告顯示，能源比率中有一半到三分之一的轉變代表實質效率增加（相較於經濟結構性轉變而言），換言之，如果能源創新愈多，要完成特定的活動諸如運輸群眾、家庭取暖，或是把碳氫化合物製成化學品和塑膠，耗用的能源反而減少。

這是全球化的現象。起步較早的日本已在同一期間內，把能源效率提高了一倍；歐洲也有長足的進步，雖然歐洲進步的幅度不及美國，但歐洲和日本一樣，原本就是效率比較高的地區。

已躋身為全球第二大經濟體的中國，卻面臨截然不同的挑戰。在經濟改革的前二十年，中國能源效率愈來愈高；然而在本世紀初，隨著大陸迅速變成世界工廠，當地企業加班趕工出貨給全球市場，能源效率反而降低。加上能源消耗不斷增加，中國政府特別把節能列為當務之急，為確保經濟決策者與社會大眾重視此一目標，溫家寶總理甚至以此為題，發表「高度重視、狠抓落實，進一步加強節能減排工作」的演說。

節能減排

二〇〇四年中國領導階層接獲一分令人吃驚的統計報告，內容顯示，如果中國消耗原油的速度和美國一樣，二〇三〇年時，消耗量將超過當今全球產量，這代表提升能源效率已刻不容緩。北京當局在二〇〇六年推出第十一個五年計畫時，提出節能減排的口號，視其為經濟發展的重要

支柱，並設定遠大的目標。於是在地鐵、公車、電視和報章雜誌上，隨處可見節能減排的標語。但能源消耗還是以飛快速度持續增加，二〇〇七年中國能源需求比二〇〇〇年多出一倍以上。

一位批評者對此感到憂心忡忡，他慎重指出：「高耗能高汙染的行業增長過快，經濟發展與資源環境的矛盾日益尖銳，民眾對環境汙染怨聲四起。」

這些話正是出自溫家寶本人。其實，要求改革的壓力來自四面八方，從能源需求攀升、進口原油增加、汙染日益嚴重、國際社會對排碳的批評聲浪，以及擔心社會動亂，都使日益壯大的中產階級與共黨高幹愈來愈重視這個問題。

北京當局同時推出減緩能源需求與減少汙染的政策，套句溫家寶的話，這是為了達成節能目標，也為「新產業體系」奠定基礎，這個以低碳科技為主，具有競爭力的新產業，會讓中國成為綠色能源的領導者。

中國希望二〇二〇年時，經濟規模是二〇〇〇年的四倍，但能源需求只成長一倍。這個高瞻遠矚的目標要靠很多方法來達成，像「前一千大計畫」就規定，耗能最多的大型企業必須提出能源效率改善計畫，這一千家企業占中國能源消耗的三分之一。如今在車輛能源效率標準方面，中國比美國嚴格。

不過，北京當局對於利用物價機制來降低需求相當謹慎，一位高級官員答覆中國為何還管制汽油零售價格的問題時，只簡單扼要的回答：「農民、軍隊與計程車司機。」換句話說，北京當局想減輕鄉村居民的生活負擔，以免引發民怨或暴動，當地鄉村很多民眾生活貧困，處在所得分配的末端。

軍方當然也不希望能源成本增加，至於計程車司機只是一種隱喻，意味著北京當局擔心高油價會引起都市居民抗議。因此中國對解除物價管制是採取漸進且片面的做法。當局擔心通貨膨脹，不准電力公司因煤價上漲而調高電費，導致斷電事故頻傳。

地方官員負責執行中央的政策，是調整能源需求結構的關鍵人物，對經濟型態具有舉足輕重的影響，他們的仕途就取決於當地的經濟成長與就業狀況。但現在又多了提高能源效率與加強環境保護等評鑑指標，一位轄下有八百萬居民的市長表示：「現在市長的壓力很大」，他比全球其他國家的市長肩負更多責任，不僅要創造就業，還得提高市民的生活水準、薪資所得、縮小貧富差距，唯有加速經濟成長才能達成上述目標。他說：「我在促進經濟成長的同時，還得設法減少能源消耗。」但他可藉由「行政措施」來達到目的，例如他下令把當地三百多家造紙廠整併成二十家，以提高能源效率。

二〇一〇年溫家寶矢言要以「鐵腕手段」提高能源效率，中央隨即下令關閉二千多家能源效率最差的鋼鐵廠、水泥廠和其他工廠，並通令各省政府取消能源密集產業所享有的優惠電價。有些地方的工廠還被強制每週必須停工幾天，以確保達成節能目標。二〇一一年三月通過的第十二個五年計畫，更進一步提高節能目標。

節能可輕易達成嗎？

歐洲、日本與北美經濟體中，工業是組織結構最適合提高能源效率的產業，美國工業消耗全美三分之一能源。主要原因之一是公司都努力了解並管理成本，把投資報酬量化，能源密集的大

型公司尤其如此，他們投入大量心力，把原料製成工業產品，再變成民眾願意購買的商品。不論就規模、組織或急迫性而言，這些公司都想管控像能源之類的大筆開銷。小型工廠無法專注於能源使用狀況的說法並不成立，即便是耗能較少的公司，也非常在意能源效率問題。

其實數十年來，工業能源效率已有大幅進展。先是從一九七〇年代的油價震撼開始，接著電腦系統的普及提高企業的管理效率，減少耗能，二〇〇〇年初隨著國際油價走高，使能源再度成為各界關注焦點。

雖然工業的能源使用效率有改善，節能方面卻有待加強，例如科技不斷進步，新科技總會創造新契機，先進的感應器與電腦控制系統帶來的變化，「在一九八〇年時幾乎只能全憑想象」。

改變運作與維修方式，或許再加上一點投資，就能得到降低成本的好處；其他節能做法需要花大筆錢買新器材、新設備或重新整修廠房，也就是所謂的現代化或升級。整體工業的效率很可能提高，但價格波動才是真正的挑戰。企業如果相信價格會對成本和純益產生重大影響，就比較可能投資做好節能，並貫徹到底。

有夢最美

陶氏化學提供一個可行的範例，這家美國最大化學公司也是全球數一數二的高耗能業者，每年花在能源與原料的費用多達三百億美元，相當於每天用掉一百萬桶原油。一九九五年到二〇〇五年，陶氏在全球製造的產品每磅耗能減少二五%。這個數目很大，節省下來的能源足供加州居民用電超過一年，從陶氏公司的觀點而言，這項投資可謂本小利大，只花了十億美元就省下九十

億美元。究竟陶氏怎麼辦到的？

一九九〇年代中期，陶氏管理高層定出十年內要減少能源使用二〇%的目標，執行長安德魯·李佛里斯說這是期望值，亦即未經仔細計算的目標，但這個原本只是要傳達「想出辦法來」的訊息，「卻讓每個部門都受惠，也激勵工程人員、工廠工人與車輛管理人員找出節能方法，這種情形變成我們的基因之一。」

但在推動新政策之初，公司面臨兩大障礙，第一是組織架構方面，能源效率本身必須受到應有的重視，而非維修保養得宜的副產品，所以得進行組織改造，陶氏先指派一名全球效率領導人出任科技長，授權他推動積極的節能計畫，並協助公司內部的小組或團體，找出機會再付諸執行。工廠必須負起達成目標的責任，公司也大力推廣「能源效率心態」。

第二個障礙是公司缺乏測量能源使用情形的一貫方法，所以得想出共同量尺，負責陶氏公司能源計畫的理查·威爾斯說：「透過大家的腦力激盪，最大的收穫就是沒有萬靈丹，一切都得從基本功做起。」

每磅產品耗能減少二五%是藉由多項計畫才得到的成果，包括興建大型汽電共生廠，同時供應熱能與電力，以提高能源效率，減少能源需求；有些則是聚沙成塔的結果。

陶氏在製造化學品時會用到很多蒸汽，威爾斯指出：「只有一個疏水閥（汽阱）漏汽不是什麼大事，但列出所有會漏汽的疏水閥就是很可觀的數目，修好這些閥門是大功一件。」

如今陶氏訂下二〇一五年前能源效率再提升二五%的目標，威爾斯說：「未來十年會需要更多科技，變革要深入到秋毫之末。」

訂出上述目標的李佛里斯說：「你必須把目標制度化，變成言行舉止的一部分。總之，一旦有信心就可能發生奇妙的事情。」

國際能源署分析過全球工業部門，指出這個部門消耗全球三分之一的能源，占全球排碳量的三六%，如果能利用「已知科技與最佳做法」，將可有效減少四分之一的工業耗能，相當於減少全球十二%的二氧化碳排放量，省下的能源會等於日本全國消耗量的一倍半。但這份研究報告忽略了尚未廣泛應用的新科技，這代表工業耗能減少二五%，應該是「製造業利用科技進行節能減碳最起碼的預估目標，在世界其他地區，實際成效可能更好。」

打破成規

航空業一心一意希望節能，過去幾年來，燃料一直是業者最大筆開銷，占經營成本的二五%到三五%，也占票價的最大比率，在在促使這個利潤微薄的行業想要嚴格控制成本。

美國聯合航空公司執行長傑弗瑞·史密謝克說：「提高噴射機燃油效率對我們而言非常重要，我們的購油支出比人事費用高出很多，人事是第二大開銷，油價波動會整死我們，我們沒辦法為波動定價。」

航空業從一九七〇年代起，致力於提高燃油效率，如今噴射機的燃油效率已提升一倍，也就是用相同油量，飛機的載客與貨運量卻比以前多出一倍。效率改善的原因有很多，像是機翼翼尖帆的問世，減少了風阻、達到省油的效果，加裝機翼翼尖帆的波音七三七型客機，航程可以多出六%。航空業者依法在紐約—邁阿密、達拉斯—邁阿密、洛杉磯—坎昆等航線增添救生衣等逃

生設備，就不須沿著海岸線飛行，可改飛越洋直航路線，也能省油。油價飆漲時，載重稍微增加一點對業者都很傷，所以現在飛機上都減少運載飲用水，改用較輕的餐飲推車，縮減報紙雜誌份數，甚至停止供應。更平滑的機身外殼也有助於降低風阻，外表塗料改用淺色可加強散熱，節省冷氣。連續降落法的新著陸方式也減少耗油。目前美國還使用一九五〇年代的航管系統，預料到某個時間，會動用六〇〇億美元以上，全面汰換成二十一世紀的新系統。現在飛機必須走鋸齒狀的迂迴飛行路線，接受地面雷達站的指揮引導，新系統則是透過衛星導航，不但能縮短飛行距離，減少飛機著陸前在空中盤旋的時間，達成省油的目的。上述方法都可以節能，但下一代飛機對節能的貢獻會最大。

省時或省油？

波音公司決定打造下一代飛機時，邀請五十九家航空公司代表，到西雅圖進行票選。波音設計研發兩種機型，號稱都可以提高二成的效率，但方法截然不同。一款是音速巡航機，飛行速度直逼音速，比現有機種快二〇%；一種是七E七型客機，燃油效率可提升二〇%。也就是說，音速巡航機強調省時，七E七側重省油，意味著在營運經濟方面將有重大進展。

這場在新英格蘭市政廳舉行的集會，採公開投票方式，議場兩側分別展示兩款新機種的模型，每家航空公司代表把企業識別標誌貼在自己屬意的機型，結果音速巡航機無人問津，七E七囊括所有選票，亦即省時訴求不敵省油訴求，燃油效率以五十九票大獲全勝。

票選結果決定七E七型客機的誕生，雖然複雜的供應鏈問題造成波音一再延後交機，但七八

七若正式服役將是燃油效率最高的大型客機。

機身材質不同是燃油效率改善的主因，一九五〇年代起，商務客機都是鋁製機身，如今改採重量較輕卻更堅固的碳纖維複合材料，重量輕當然就省油。碳纖維是網球拍的材料，但做球拍與造飛機是兩碼事，科技上必須要有重大突破，才能用碳纖維打造出一架二百七十人座、總載重量達五十四萬磅的飛機。

七E七夢幻客機是航空業者想追求成長的利器，航空旅遊市場快速成長，特別是國際旅遊領域，目前全球共有一萬八千二百架商務客機提供服務，預估二〇二六年時，將倍增至三萬六千四百架。民眾所得增加，全球化與市場進一步開放，是航空旅遊業欣欣向榮的主因，也凸顯出提高燃油效率的需要迫在眉睫。但正如史密謝克所言，油價本身就會決定航空旅遊市場的規模，「如果燃料成本增加，我們就會改用較小型的飛機，縮減航線網。如果成本下降，自然會採用大型飛機，並擴大服務範圍。」

廉價航空的崛起固然增加民眾出外旅遊的機會，但也產生一些副作用，有些人以飛機會造成全球暖化的「道德」理由，反對航空旅行。這種反對聲浪以英國最強烈，指南旅遊出版社(Rough Guide)創辦人除了自己減少坐飛機的次數，保證暑假時絕不出國旅遊，要改坐火車之外，還信誓旦旦的表示，未來會增加新書系列，專門討論「飛航的負面影響」。該出版社的競爭對手孤獨星球隨即跟進，英國國教倫敦大主教也表示支持，宣稱搭飛機度假是一種「罪行」。

全球約二%到三%的二氧化碳來自民航業，所以燃油效率不光是能源策略，也是減碳策略。空中的飛機數量愈來愈多，國際社會相繼提出減碳計畫時，節能顯得格外重要。不過，飛機製造

商最大的壓力來自消費者，不只是一般乘客，更是直接購買並經營機隊的航空公司，對航空業者而言，燃油效率是經濟問題，不單涉及營運，也攸關生存。

少了喜氣的紅彩帶

隨著能源效率標準提高，建物、車輛、設施或工廠進行翻修時，也必須強化效率。節能會成爲一種競爭性能源，很多案例都顯示，節能的經濟效益讓人刮目相看。儘管如此，能源效率仍有兩大劣勢，一是缺少有力的支持者與代言人，再者這種效率看不見也摸不著。

安里斯·皮巴格在蘇聯時代是物理學家，蘇聯解體後，他成爲獨立的拉脫維亞共和國的外交官，後來獲選爲歐盟能源委員，等於是歐洲的能源部長，任職五年期間，他負責協調歐盟二十個成員國錯綜複雜的能源政策。

有一次，他到美國華府參加在華盛頓會議中心舉行的再生能源會議，與會人數多達三千人，整個會場瀰漫著熱切與樂觀的氣氛。會後他應邀到歐盟大使官邸吃晚飯，在餐前酒的閒聊中，有人請他談談再生能源為何比能源效率受歡迎。他回答：「再生能源屬於供給面，會提供新能源，當然比較受歡迎，能源效率得花好幾年才看到成效，牽涉到很多核心問題、誘因與法規。」

節能或許是解決成本與環保問題的方法之一，但「少了剪綵儀式」，沒有拍照做宣傳的機會，也不會舉行開幕典禮，不能請政府官員和企業主管剪綵、對著鏡頭微笑合影留念，再宣布新廠正式啟用。他憑著自己在國際政壇打滾多年的心得，不由得點頭說：「剪綵是很重要的事。」

第十六章

縮小節能差距

十九世紀鄉村居民大量湧入都市時，熱浪也造成嚴重的傷亡。一八七八年美國部分地區遭熱浪襲擊，「唯恐引發瘟疫」、「今日艷陽高照、酷熱難當」全都成了報紙的頭條新聞。一九〇一年的熱浪造成美東和中西部地區成千上萬人死亡，當地的醫療院所根本調派不出馬車救治傷患，因爲連拉救護車的馬兒全都熱到中暑。這場前所未見的熱浪，迫使紐約證券交易所同意會員在交易廳可以脫掉外套。

建築物一向是用來滿足人類需求，提供遮風躲雨、避寒避暑與照明等功能，像美國德州的阿拉莫堡，就利用泥磚牆來隔熱與保暖；城市裡有些石材建築會做凹窗以防日曬，並利用中庭設計來加強室內房間的照明與通風。隨著都市居民愈聚愈多，建築愈蓋愈高，工業知識不斷增進，能源使用也日趨複雜與多元，才能同時提供冷暖氣、照明與電力，把建築物變成適合居住與生產的環境，繼而讓城市發揮應有功能。

今天美國的住宅與商業部門占全美能源消耗的四成，用掉四分之一的電力，排放大量二氧化碳。其他國家的比率更高，英國住宅與商業部門消耗五成的能源；中國的住宅耗能占比雖然較

低，但從新屋每年增加至少一千萬戶來看，情況很快就會改觀。所以眼前的挑戰不是如何蓋出適合居住的房子，而是如何更有效利用建物裡的所有能源，這點代表大家必須解決潛在能源效率與實際之間的性質與差別，也就是節能落差問題。

冷氣機的誕生

整個十九世紀，發明家與企業家都絞盡腦汁，想找出控制熱度與濕度的辦法，以免打斷製程。到了十九世紀末的最後十年，有「世界屠宰場」之稱的芝加哥，利用簡陋的冷藏系統，增進肉品包裝業的衛生安全。一九〇一年的熱浪過後，紐約證交所終於想出脫掉外套以外的消暑方法，決定購買一個龐大的冷卻系統，可惜效果不佳，空氣變得濕冷，讓人覺得不舒服。顯然光是室溫下降還不夠，還得控制濕度，這該怎麼辦？

二十五歲工程師威利斯·開利出身紐約州安哥拉市，是數學天才，對機械工程有強烈直覺，善於解決疑難雜症。他在布法羅富吉公司服務時，幫一家雜誌印刷廠找出控制濕度的辦法，克服色彩套印異位的問題。

但開利不以此為滿足，一直在思考如何準確控制空氣中的水蒸氣含量，有天晚上他在濃霧籠罩的匹茲堡火車站月台候車時，注意到四周雖然霧氣瀰漫，但空氣卻是乾的，一想到霧的特性，頓時讓他靈光一閃。

專利字號八〇八八九七的空調器，就是開利靈光乍現的具體成果，這項新發明的原理是藉由把水加熱或冷卻來控制溫度與濕度，讓空氣變得乾淨。當時有人戲稱空調器是「人造天氣」，公

司也擔心萬一新發明不可靠會損及聲譽，所以特別為這位首席工程師另外設立一家子公司，名字就叫開利空調公司。

但八〇八八九七證明可行，成為現代冷氣機的始祖，解決了日常生活最棘手的問題。大家把開利一九一一年發表的理想濕度計算公式，譽為空調業的大憲章。一九二二年，洛杉磯葛勞曼大都會戲院率先安裝開利空調系統；底特律的百貨公司領先同業，在一九二四年安裝空調系統，以免在換季大拍賣期間，顧客因人潮擁擠，室內溫度太高而昏倒。一九三〇年時，麥迪遜花園廣場、參眾兩院、紐約到華府的火車餐車，都已加裝空調設備。一九二〇年代晚期，德州聖安東尼奧市出現全球第一棟空調辦公大樓。一九三七年時，往返大馬士革和巴格達的公車也有空調設備。二次大戰結束後，休士頓靠空調才能擺脫酷熱的溽暑，成為「世界石油之都」和美國第四大城市。一九五〇年代晚期，空調已是美國南方家庭的標準配備。要是沒有空調，今天眾所熟知的太陽帶根本不存在。

二次世界大戰後六十多年來，如果沒有研發出大型冷暖氣系統，全球各地的摩天大樓根本無法住人，只有大型空調系統才能使整棟建築得到新鮮空氣循環。

空調設備的普及改變全球的經濟發展路徑，擴大經濟規模。新加坡國父、前總理李光耀推崇冷氣機是「二十世紀最重要的發明」，熱帶居民因為有冷氣吹才有生產力；新加坡環境部長說的更白，要是沒有冷氣，當地人「可能還在椰子樹下幹活，而不是在高科技廠房上班。」

能源與電力帶動住宅與商業部門的發展，只要大家毋需擔心成本、能源取得或溫室氣體等，一切就都沒問題，但情況已經改變。

若干預估顯示，建築物的能源效率可再提升十五%到二〇%，有些人甚至認為所有建物都可再提升二五%，從成本效益來看，新建築的能源效率甚至可提升五〇%。不過這些都不是一蹴可幾。

二十年前在麻省理工學院創辦建築科技系的李昂·葛立克斯曼教授說：「很多人相信簡單輕鬆的事情早就做完了，有些人認為已解決所有問題，沒有必要再做更多。這是我所見過最保守的產業，研發少的可憐，人人各行其是，很難團結，許多人不了解根本沒有一勞永逸的解決方法。」

不過，整個建築業確實改變很多，不僅建築工法受到影響，我們的生活方式可能也受到影響。

蔚為主流

真正的改變是從一九七〇年代開始，中東石油危機造成能源供應中斷，國際油價暴漲，促使民眾紛紛在冬季時調低恆溫器，在夏季時調高恆溫器，很多家庭也加裝禦寒窗，聯邦與地方政府則透過租稅優惠、增修法規與行政命令等措施，鼓勵提高能源效率。

加州在這方面是先驅。一九七三年的石油危機重創加州，不只因為加州非常依賴汽車，也因為當地公用事業燃燒大量石油，州長雷根認為應該節約用電，減少浪費，因此不顧幕僚反對，在隔年同意設立加州能源委員會，授權委員會制訂嚴格的能源效率法規，結果變成全國楷模，引起各州相繼仿效。

公用事業開始利用各種資訊管道，鼓吹節能觀念，派遣稽查員，挨家挨戶檢查頂樓的隔熱狀況與地下室的暖爐設備。這些做法後來擴大成公用事業的需求面管理計畫，協助屋主與業主管理耗能。同時製造商也按照新規定，推出能源效率更好的產品。最後各州雜亂無章的法規終於整合為全國統一標準。聯邦政府也開始對節能超過平均水準的產品，給予能源之星的標章。建商關注更有效率的設計，史丹佛大學教授李·席柏指出：「節能變成主流，三十年前建商還不知道窗戶可以裝兩層或三層，現在大家都這麼做。」

吃電的小裝置

節能雖然成了主流，美國住宅耗能反而比一九七〇年代增加四〇%，商業建築耗能甚至激增一倍，為何如此？答案是房屋變多與新產品不斷問世。獨棟房屋大幅增加，裝有冷氣的房子變多，房屋占地也變大，短短四十年內，占地平方呎增加七成。一九九三年以來，每台冰箱的耗能減少五成，可是每戶家庭的冰箱耗能幾乎沒有變化，因為很多家庭現在都有兩台冰箱。

小家電變多也是家庭耗能不減反增的原因，這些小裝置在一九七〇年代尚未問世，如今占家庭耗電的比率愈來愈高。四十年前，爐灶、照明、冰箱、冷凍櫃、熱水器、冷氣機和電暖器等七大類用品，占家庭耗電的九一%，其他項目只占其餘的九%。

如今其他項目的耗能占比竄升到四五%，這些東西包括一九七〇年代相當普及的電視機與洗碗機，以及日常生活中不可或缺的小家電，例如電腦、印表機、錄影機、傳真機、微波爐、電話、平面電視、光碟機、智慧手機、平板電腦、和需要充電的一切手持裝置等。

辦公大樓也因為管線密布、愈來愈高科技，對能源與電力需求有增無減，資訊科技業還孕育出新型態的園區——由伺服器組建而成的資料庫，目前全球伺服器超過一千五百萬部，預估二〇二〇年將增至一億二千萬部。資料庫必須耗用大量的電力才能使處理器、記憶體和其他電腦設備維持運作，並適時讓伺服器散熱降溫。

能源經濟學家羅倫斯·馬可維奇說，建築物潛藏的能源效率就是一種節能落差，但要了解節能潛力並不容易，不像車輛，每十二年就可以換新，建築物可能要過五十年、七十五年或百年以上才會整修，而且只能做到某種程度的整修；價格也會影響屋主何時進行整修，願意花多少錢來改善能源效率。這些投資牽涉到報酬率與機會成本。世界經濟論壇一篇報告指出：「能源效率投資的選擇與權衡問題，很少和其他資產配置比較；能否得到投資級評等攸關能源效率的吸金能力，既然是一種投資，就得和其他選項競逐資金。」

能源效率也面臨金錢以外的障礙，一是建商與最後買主兩者的利益毫無關連。建商是按照設計圖施工，決定牆壁厚度、窗戶材質與室內設施，他們只想壓低成本，增加銷售。新屋買主才是每個月真正要繳能源費用的人，如果能源效率提高，他們是最大的受惠者，但到那個時候，建商早就不見人影，可是業者當初的決定卻影響所有住戶。同樣的，房東可能也不想採購節能的家用用品，因為真正繳帳單的是房客。

屋主希望馬上看到投資能源效率的成效，但缺乏相關知識是個老問題，究竟有多少屋主真正了解強化隔熱或調低溫度能夠節省多少能源？有些問題可以透過修法、節能標示或宣傳簡易常識來解決。商業建築如果能夠專注於此，精心檢測，會有意想不到的結果。

賽門地產集團是全美數一數二的購物商場經營者，旗下知名賣場包括加州的史丹佛購物中心、拉古那商場、德州的休士頓加勒里亞商城、華府附近的五角市和紐的威徹斯特商場。該集團能源效率部門主管卡拉海爾透露，從二〇〇三年到二〇〇九年，集團的耗能減少二五%，其中六成是靠最佳實踐，運用常識，處處留心。「像是隨手關燈，關好門窗，賣場不要冷氣全開，基本上就是告訴賣場經理人去做以前長輩教我們做的事情。」他說，最佳實踐也包括「不容易看到」的事情，例如正確維修冷暖氣系統。

其餘四成則來自投資，比如採購新的照明設備、效率更好的冷卻系統與管控系統。投資事項很多，有大到巨型的新設備，也有小到重新調整罐裝飲料販賣機之類的瑣事，這樣一到晚上賣場打烊後，機台便可暫停保冷。

效率設計

利用設計提高效率已是建築施工的一部份，綠建築一開始只是少數人的想法，如今卻成主流，不但改變興建方式，也刺激建築業注意長期所忽略的研發任務。

一九八〇年代一些組織為鼓勵提高能源效率與節能，開始設計出建築物對環境影響的評估方法，其中最著名的首推美國綠建築協會及其提倡的能源與環境設計先鋒（LEED）計畫，這個計畫並衍生出一套對新建築和改建物的環保準則和認證制度，採記分方式，把認證等級區分為「銀」、「黃金」、「白金」三種標準。

但設計一套建物內在與外在的環評制度並不容易，例如評估重點是否只以耗能和排碳為主，

需要包含林木永續、有毒廢棄物處理、都市擁擠程度嗎？地理位置也使評鑑更複雜，例如亞歷桑納州與緬因州的水資源評估就不該一視同仁。總之，能源與環保帳目很難算得清楚，所以有些專家質疑這個計畫之類的評鑑方法。

在各自為政的建築業，整合設計如今成為進一步提高能源效率的方法，也就是建築師、開發商、工程師與顧問群一起合作，從最初的草圖設計到最後的竣工落成都必須全程參與，這樣才能確保建築物的牆壁、冷暖氣系統、通風與照明都整合完善，發揮最大的節能效果。例如一座高效能的外牆可以省去在窗台附近加裝獨立暖氣系統，縮減中央空調主機的體積。

其實今天建築物裡一些最重要的創新是取法古人，靈感來自二十世紀之前的建築原理，只是運用方式更先進，利用當年所不知的技術、工具、科學與工程知識。今日建築外牆的吸熱物質，原理就和古代的石牆一樣，白天吸熱，晚上散熱。

麻省理工學院教授葛立克斯曼說：「就某方面來說，這些都是經驗累積而成的解決之道，只不過現在多了高科技版。一棟建築的年限有五十年或一百年，有些設施第一年用起來可能沒問題，但接下來卻不管用，會發生什麼狀況？如果你試了新辦法卻不滿意，無疑是一大風險。

住戶的心態會決定建築如何使用能源，日本就是最好的例子，節能不光是政策有明文規定，也落實在民眾的日常生活裡。

彌足珍貴、不能浪費

日本在能源使用最佳化方面，從一九七〇年代以來始終領先全球。這是危機帶來的體認，

當年的中東石油危機令日本相當震驚，不但高速的經濟成長突然中斷，東京當局也警覺到國家在能源方面的弱點，結果促成了全國大團結。通產省副大臣天谷直弘在日後回想起當年情況時說：「大家一起行動，日本人對地震、颱風等天災習以為常，能源危機的確是一大衝擊，我們也準備調整政策，但我們寧可利用手上的資源，而不是地下的資源。」

這是日本推動節能的開始，桃太郎充分發揮能源工程與技術上的才能，設法從每單位能源獲得更多價值。當然並不是每個想法都有用，一九七〇年代中期，日本為了降低夏季時對冷氣的需求，特別針對男性上班族設計短袖西裝外套，雖然由首相本人親自示範，但這款節能裝根本推廣不起來。

然而日本在提高能源運轉過程中的效率卻十分成功，其他國家做起來可能會比較困難，因為這牽涉到節儉的傳統文化背景，以及土地與資源有限所形成的歷史經驗。這種體認與地大物博的美國截然不同。

曾任環境大臣、外務大臣的參議員川口順子還記得以高中交換學生身分，第一次赴美留學見到的景象，「耶誕節時，很多家庭打開禮盒後就把包裝紙丟掉，我非常驚訝，在日本，我們都會把包裝紙小心折好以便下次利用，美國人真是 *mottainai*。」

她說，*mottainai* 這個字很難譯成英文，正因為太難翻，日本外務省特別為此開會，希望找出最貼切的詞句，最後公認最好的譯法是「彌足珍貴、不能浪費」。

川口表示：「日本從來就不是物產豐富的國家，所以一千多年來，我們對待萬物都秉持彌足珍貴、不能浪費的態度，我們必須智慧的利用資源，每個家長都會教導子女，碗裡不能留下一粒

米，意思就是彌足珍貴、不能浪費。」

日本對於能源效率也是出自此一想法，一九七九年，日本正式通過節能法，一九九八年增修法條，引進領跑者計畫（Top Runner）。這項計畫是先選出能源效率最好的家庭用品或汽車，做為同業標竿，並規定若干年內，上述所有產品都必須超越這些領跑者。這等於創造出永久競賽的機制，不斷鞭策業者追求更高能源效率，結果確實成效卓著，一九九七年到二〇〇三年，卡匣式錄音機的平均能源效率提高了七四%，電視機提高二六%。國會後來又繼續修法，規定工廠和建築物必須改進能源率，並採用效率計畫。

政府也利用各種稅賦優惠獎勵投資，對未達節能目標者給予處罰，美國不太可能接受這種罰金制度，但價值觀、資源有限性與政治體系，都使這些政策在日本行得通。

日本對節能的種種努力在二〇一一年夏季遭到新考驗，福島第一核電廠爆炸事故造成日本東北部嚴重缺電，在這種情況下，「彌足珍貴、不能浪費」不是選擇而是義務。

智慧電網

節能落差可以靠科技來彌補，或者說是要靠各種科技、知識與用戶行為的互動來彌補。節能聯盟主席卡特利·卡拉漢說：「一般能源需要管線、傳輸線這類的硬體設備，但提升能源效率需要單獨一套基礎建設，像是公共政策的支持、教育、公眾意識以及創新的財務工具。」當然，這套基礎建設也需要整合科技技術。

法令規範應該提供足夠的誘因，讓電力業者想要節能的動機和增建電廠一樣強烈，也就是杜克能源公司執行長詹姆士·羅傑斯說的：「我們需要創造一套商業模式，同等看待減少耗電與增加發電的投資效應。」

但這也需要採用一、二十年前還很罕見，甚至根本不存在的科技技術。從源頭的發電廠到終端的家庭、辦公室與工廠等用戶，整套系統都必須現代化，這一切用「智慧電網」就可一語概括，這個名詞現在無所不在，極受歡迎，備受鼓吹。畢竟，誰會反對「智慧電網」、支持「愚蠢電網」呢？但「智慧電網」的定義並不明確。就像羅傑斯說的一樣，「智慧電網的概念非常豐富、複雜，甚至令人困惑。」畢竟，這智慧電網表的是一整套科技，而非單一科技。但基本而言，智慧電網涉及的應用範圍涵蓋數位科技、雙向溝通、監測系統、資訊科技與網際網路。智慧電網也是一種產業運動，得到聯邦政府、電力業者、工業用戶以及投資人的大力支持與贊助。

智慧電網最廣為人知的一環是先進監測網路，或稱智慧電表。現有的電流量表可說是從電力祖師爺英薩爾時代留存至今，大致是每個月抄錄一次。

反觀智慧電表具有雙向溝通功能，不需抄表，可直接把用電狀況即時傳回電廠，不但使發電廠能夠詳盡掌握用電狀況，用戶也能即時得知自己用電的多寡。除了每戶得知各自的用電量，智慧電表還可以細分到每台家電的用電量，它可內建在電視或電冰箱，直接回報用電。詳細用電資訊可顯示在控制器、網路或手機上，方便用戶從遠端調整，甚至關掉電器來節電。

智慧電表還可以在供電吃緊時，讓電廠減少家庭的用電量。例如熱浪來襲，家家戶戶狂吹冷氣時，電廠（若經用戶同意）可透過智慧電表，調高家中的溫度設定，例如從攝氏二十度調高到二二·七度，從而減少用電。（有些電廠已朝此方向努力，會「傳訊」給空調系統，讓冷氣每開

四十五分鐘就停機十五分鐘。)一旦電動車普及，智慧電表也會扮演關鍵角色，自動把車輛的充電時間從尖峰時段轉移到用電量最少的深夜離峰時段。智慧電表還能精確掌握用戶的節能效率，如果電廠願意提供省電「獎勵」措施，智慧電表會變成不可或缺。

這些措施都是為了達成兩個目標：第一是分散尖峰用電，讓增建昂貴新電廠的需求降到最低。第二是提高整體能源效率，既節能又減碳。

聽來很吸引人，但實際應用卻困難重重。在這方面最積極的國家是義大利，率先在二〇〇六年完成「智慧電表1.0」的基礎建設，在八〇%的用電設施上做好智慧節電。義大利所以起步最早，一是為了管理用電需求，其次是要阻止民眾偷電。但義大利的經驗顯示，整合這些新科技相當複雜，而且費用昂貴，得有人買單。

接下來關鍵的是訂價機制。要從安裝智慧電表中獲得最大的投資效益，消費者必須在尖峰時段減少用電才能省錢，這就要有浮動的電價計費方式，也就是說不同的時段有著不同的費率。

在浮動計價方式下，你在晚上十一點使用洗碗機的電費，會比晚上七點便宜。不過，消費者到底是喜歡變動費率，還是偏好容易計算的單一費率，並不清楚，這點是智慧電表的一大挑戰。

隱私也是問題。消費者會願意讓電廠知道多詳盡的用電細節？這些記錄又該由誰掌握？消費者會願意讓電廠或第三方直接控制家電嗎？也許電廠提供費用補貼可以誘使消費者提供用電資訊，消費行為將是決定智慧電表影響力的關鍵。

從發電廠傳送高壓電到各個變電所，美國的輸配電網路並不「愚蠢」。美國擁有全世界最先進的輸配電網路之一，只是這些網路東一塊、西一塊，花了好多年才架設完成，受到聯邦與各州

政府疊床架屋的法令規範，連業主也各不相同。

但如果要廣泛應用再生能源，輸配電網就必須更靈活、更智慧。傳統的燃煤、核能或天然氣發電，發電量很穩定，易於掌控。再生能源卻變動很大，端賴當時的風力或陽光有多強，所以智慧電網必須能夠隨時適應再生能源不斷變動的發電狀況，這樣需要架設新的輸配電網路，擴增計算能力，才能把大量的再生能源發電量，均勻的整合到配電網中，維持電壓穩定，避免斷電。德國計畫在二〇二〇年把再生能源發電量增至總電量的三五%，智慧電網就是最迫切的挑戰。

智慧電網另一個重要目標就是增加供電的穩定性。智慧電網將有「自我治療」的機制。冰風暴或颶風來襲時可能造成斷電，但在某些狀況下，只是小小的運轉問題，也可能產生骨牌效應，造成整個電網癱瘓。現在電力公司往往是在用戶抗議電話蜂擁而至時，才知道供電出了問題。

智慧電網可以改變現狀，這種電網擁有即時的偵測感應器，能立即發現問題，即使人工修復時，也能獲得電腦監測的協助，使供電網的終端用戶與發電站技術人員能夠雙向溝通。加強電廠對情況的掌握有助於縮短停電時間，降低衝擊；電廠也更能應付恐怖份子等外來攻擊。總體而言，智慧電網可以加快反應時間，減少人員出勤次數，因為很多問題在中控室就能搞定。

智慧電網最重要的影響，包括改變電廠管理輸配電網的方式，改變與用戶互動關係，以及電廠的營運模式。這也是運用科技提高建築節能的重要一步。然而要把新科技整合到既有的輸配電網路，不但複雜，風險也很高。電廠採用新科技時遭遇技術困難與成本超支的狀況，屢見不鮮。

設計新電網時特別要審慎評估一項風險。在建造更複雜、更具互動性、更仰賴國際網路與資訊科技的輸配電網時，必須確保電網不會遭駭客攻擊或敵國資訊戰的威脅。網路攻擊的威脅確實

存在，一項研究指出，電力公司和其他依賴資訊科技的重要服務，在網路安全方面普遍不足，不但進展緩慢，防護機制遠落後於駭客的攻擊能力。

整體而言，新科技可以改善發電廠的營運，提昇建築物的用電效率，但整體成效要一段時間才會顯現。科技、政策、經濟與人類生活進行複雜的互動時，往往會出現意想不到的答案，就如同一九〇二年開利在霧氣迷濛的火車站月台，靈光乍現的那一刻。

第四篇

未來的路

第十七章

碳氫人

一九七八年五月某一個令人昏昏欲睡的下午，一位研究人員坐在麻州劍橋的研究室裡，電話響了起來，助理的聲音傳了過來：「李高佛海軍上將來電。」片刻之後，李高佛的聲音傳來，他剛剛看完這位研究人員的一篇文章，有話要說。

「木材是未來的燃料。木材！」他的語調就像不習慣有人反駁的人一樣。「未來的燃料！」核能海軍之父兼核電先驅李高佛沒有多說，就突然掛電話。

那天下午，李高佛說的是生物能源和生質材料的潛力，也就是利用植物和其他資源，而不是利用化石燃料或鈾產生能源。美國剛剛熬過一次能源危機，又瀕臨另一次石油危機。在創紀錄時間內創造美國核子海軍的李高佛，宣布了「種植」燃料的前途。

今天眾多科學家、農民、企業家、農企業經理人和創投專家會用「乙醇」、「纖維素」和「生質」，不會用「木材」這個字眼，但是他們和李高佛一樣，都看到種植燃料的遠景。

最著名的農業燃料是乙醇：首先就是從玉米或砂糖製造出來的酒精。從科技觀點來看，這樣做和釀造啤酒或生產蘭姆酒幾乎沒有什麼不同。超過這一點後，就是大家追求的「聖杯」——纖維

素酒精，也就是大規模利用農業、都市廢棄物或特定植物發酵、蒸餾而得的酒精。另一種農業燃料是用大豆、棕櫚油、甚至速食店剩餘油脂，生產的生質柴油。有些人認為，更好的選擇是丁醇之類的其他生質燃料，還有功能像小小自然煉油廠的海藻。

生質燃料遠景

不管什麼方法占優勢，生質燃料都顯示新時代可能來臨，大家可能運用生物學和生物科技，運用大家對基因組（有機體整套去氧核糖核酸定序）的了解，生產能源。生質燃料崛起，為能源研究團隊增加了新成員——生物科學家；一直到過去十年，生物學才開始有系統的運用在能源上。

同一期間裡，生質燃料在美國創造了龐大的政治影響力，首先受到影響的當然是生質燃料的傳統支持者，也就是農民和農民的政治盟友，因為他們總是把酒精視為農業市場多元化、創造額外營收、提升農田所得和農村發展的方法。但是生質燃料也有新支持者，包括環保人士（至少若干環保人士）、汽車廠商、矽谷億萬富翁、好萊塢大亨，還有擔心中東和石油地緣政治權力均衡，希望減少石油進口的國家安全專家。最近有兩個力量極為強大的支持者加入支持陣營，就是美國海軍和空軍，他們正在提倡生質燃料發展，希望改善戰鬥能力、提高彈性和燃料多元化，減少對石油的依賴。美國空軍正在試驗綠色噴射燃料，海軍也訂出目標，希望在二〇二〇年前，半數液體燃料改用生質燃料，而且描繪出「綠色大艦隊」的遠景。

這種廣泛政治支持創造了數量驚人的計畫、補貼、獎勵、以及聯邦與州希望強力發展生質燃料工業的目標。其中最重大的計畫是規定在二〇二二年前，要把和交通燃料混合的生質燃料數

量，幾乎提高三倍。從二〇一一年的每天一百萬桶，提高到二〇二二年的二百三十五萬桶。這樣大約等於美國所用汽車燃料的二〇%，也等於在世界石油供應中，再增加一個委內瑞拉或奈及利亞。推動生質燃料是全球性的現象，歐盟規定二〇二〇年前，運輸部門至少必須利用〇%包括生質燃料在內的再生能源。印度提出的目標更遠大，希望在二〇一七年前，把生質燃料的利用率提高到二〇%。但是巴西遙遙領先各國，今天巴西的汽車燃料中，有六〇%是酒精。

從生質燃料的遠景來看，生產化石燃料的過程，就是有機質在地下深處經過數億年高壓和高溫後變成石油的過程，可以縮短為若干季。世界運輸燃料中，會有愈來愈高比率靠著栽種而來，而不是靠著鑽探。二十世紀這個石油世紀典型象徵的碳氫人，到了二十一世紀，會逐漸讓位給碳水人。如果這種遠景實現，今後數十年內，生質燃油會從傳統以石油為基礎的燃料手中，奪取龐大的市場占有率，結果會改寫全球經濟與政治，農業美元應該會和石油美元競爭。

酒精的運用大幅成長已經變成事實。目前每天混在汽油中的酒精接近九十萬桶，以數量計算，幾乎等於美國每天汽油（包括混合酒精的汽油）消耗量的〇%。然而，以數量計算，酒精的能源價值只有傳統汽油的三分之二左右，因此從能源的角度計算，今天每天的酒精消耗量等於六十萬桶汽油。

未來幾年內，酒精在美國所占的比率可能成長，不過酒精首先必須解決汽油中可以加入多少酒精、讓汽油動力汽車使用的「大問題」。大家擔心利用含有高比率酒精的汽油，對不是為利用生質燃料而設計的引擎，可能造成損害。

現在已經有一種酒精含量七〇%到八五%的E85燃料，但是這種燃料只能用在彈性燃料車

上，和汽油輪流使用，或是用在經過特別設計，可以使用這種燃料的純酒精燃料車上。目前這種車輛只占美國汽車總量的三%。

很多人可能認為這一切都很有趣，但實際上絕非如此。

第一輛彈性燃料車

亨利·福特不太喜歡城市，說過「百萬人的城市帶有一些野性和威脅性，五十公里外快樂、知足的農村很清楚都市的瘋言瘋語。」他並不是對農村生活有什麼幻想，「我在犁頭後面辛苦耕作多時，知道其中的苦悶。」汽車應該變成「信差」，變成解放工具，把農地和農村跟廣大的世界結合起來，拖拉機應該會克服農事工作的苦悶，讓農民過著勝過「勉強糊口」的日子，大大提高生產力。福特說：「現在拖拉機可以完成六倍的工作，還叫人跟在行動緩慢的馬匹後面，耕作好多小時和好多天，實在是浪費之至！」

福特十分偏愛利用農民生產的酒精，作為汽車燃料，希望藉著把農村和城市結合在一起，建立類似社會契約的互相依賴關係。「如果我們工業家希望美國農民變成我們的顧客，我們必須設法變成農民的顧客。」

但是酒精的發展之路上有一個重大阻力，就是價格。美國南北戰爭期間，政府對每加侖酒精徵收二·〇八美元的稅，作為國庫歲入來源。二十世紀開始前後，德州和奧克拉荷馬州發現大量石油後，汽油掌握了決定性的成本優勢，至少在美國如此。歐洲並非如此，歐洲的賽車引擎發汽車應該用酒精還是汽油燃料的競爭，法國和德國政府利用關稅和命令，鼓勵酒精燃料。到一九〇六

年，美國老羅斯福總統為了救濟因於穀物價格低落的農民，簽署廢除酒精稅的法案，一位眾議員（後來的眾院議長）預測：「用玉米桿」生產的酒精，很快就會成為「現代文明中關係最密切的因素之一。」

福特為了完成他和美國農民之間的社會契約，至少在推出T型車時，確保這款車可以用酒精或汽油作為燃料，這種車是第一款彈性燃料車。後來他推出可以燒酒精、也可以燒汽油的福特森牌拖拉機，雖然如此，因為汽油的價格只有酒精的三分之一，汽油還是主要的車輛油料。

然而，一次大戰結束和隨後的幾年裡，汽油供應再度短缺，造成油價暴漲。電話發明人貝爾稱讚酒精是「奇妙的乾淨燃料……可以用農作物、農業廢棄物生產，甚至可以用垃圾生產。」通用汽車一位科學家警告說，原油「迅速耗竭」，很快就會用光，解決之道是酒精燃料，他說，酒精燃料是「我們所知用最直接的方式，從能源源頭的太陽，變成適於作為燃料的途徑。」

然而，酒精隨即碰到幾乎無法克服的障礙。一九一九年一月十六日，美國通過憲法第十八修正案，禁酒變成法律，美國開始禁售酒精性飲料。禁酒的目的是要消除醉酒、酗酒和不道德，保護家庭免於受暴力和四分五裂威脅，卻也促使千百萬美國人觸法，強力鼓勵酒類走私、私釀、非法販賣、非法產銷、詐騙和組織犯罪興起。

禁酒封死了酒精燃料的發展之路。新憲法修正案禁止人喝的「蒸餾烈酒」，不禁止可以加在汽車裡的燃料，但是不管酒精是摻在「蒸餾烈酒」中，還是混在燃料裡，酒精就是酒精。此外，農民實際上要怎麼利用酒精，也不得而知。

但是大蕭條導致商品價格崩潰、全美農民家破人亡之際，酒精似乎變成了農業救濟中的關鍵因素，酒精能夠擴大農產品市場，同時讓農民在燃料方面自給自足。反對者指責這種說法，一位批評者說：「強迫大家在汽車燃料中使用酒精，會使每一座加油站和每一台加油機，變成可能非法賣酒的地方。」但是一九三三年小羅斯福出任總統後，大家公認名叫「重大試驗」的禁酒是重大挫敗，憲法第二十一修正案廢止了禁酒法案。

酒精業務恢復生氣。到一九三〇年代末期，美國中西部至少有二千座加油站出售混合若干酒精、名叫「農業混合」的汽油。但是整體規模相當有限，穀物價格上漲破壞了酒精在政治上的支持。福特的一位助理私下承認：酒精燃料在經濟上和汽油無法競爭的殘酷事實。

酒精汽油誕生

二次大戰後，酒精再度銷聲匿跡。農業所得增加，政治壓力消失，但是一九七〇年代的石油震撼和隨之而來的經濟困難，使農民遭到沉重打擊。很多農民苦苦掙扎，很多農民破產，農產品價格隨著經濟衰退倒地不起，同時，農民的重要生產因素，包括拖拉機用柴油、利用碳氫化合物製造的肥料價格暴漲。

一九七七年卡特總統推出國家能源計畫時，隻字不提當時叫做酒精汽油的酒精。但是農業州出身的參眾議員迅速在政治上，支持酒精汽油，也找到很多方法，表達支持，包括在華盛頓上演街頭劇場，在一九七七年上演的一次表演中，印第安納州參議員拜赫站在國會山莊的空地上，打開一瓶伏特加，得意洋洋的把酒直接倒進一部舊車的油箱裡，汽車引擎立刻發動，圍觀的群眾欣喜異常。政治支持變成立法上的支持，酒精得到每加侖四十美分的補貼，也得到額外的獎勵，鼓

舞大家投資酒精生產設備，酒精的供應開始增加。

酒精不再是農民的家庭工業，若干農業企業也擁抱酒精。世界最大農產品廠商之一艾德蒙公司（ADM）的支持，發揮了決定性影響。艾德蒙公司很快就變成美國最大的酒精製造商，也變成酒精最有效的政治支持者。

一九七〇年代末期第二次石油危機爆發後，要求聯邦政府加強支持酒精的政治壓力升高。一九七九年二月初，華府街頭出現最不尋常的景象：由三千部拖拉機組成的「拖拉車隊」，在獨立大道上遊行，最後遊行到國會山莊，形成圓形，把國會包圍起來，最後停在國家廣場一整天。開拖拉機的農民十分憤怒，也相當絕望，他們希望凸顯自己需要協助的窘境，他們提出的訴求十分一致：希望國家承諾採用酒精。

一九七九年十二月，和酒精有關的政治壓力更為強大。這一年聖誕夜，蘇聯入侵阿富汗，卡特總統除了發表卡特主義、保證波斯灣安全外，也宣布停止美國穀物對蘇聯出口，禁止美國農民十分重視的美夢穀物貿易。但是他對憤怒的農民承諾要提供高額補助補助，推動重大的酒精汽油新計畫，吸收一部分過剩的玉米。副國務卿克里斯多福解釋說：「我國農民寧可為解決美國的能源問題種植穀物，也不願意為蘇聯的牲口種植。」接著卡特競選連任，和雷根苦鬥之際，做了一件對美國製酒精長期有利的事情，開徵巴西酒精關稅，以免巴西酒精和美國酒精競爭。

看來酒精在美國確實已經走上欣欣向榮的道路。到一九八一年，出售酒精汽油的加油站已經達到一萬處；能源部專案小組指出，僅僅幾年內，大家對酒精汽油的懷疑消失，代之而起的是熱情擁抱，能源部專案小組十分有利的情境報告預測：到二〇〇〇年，再生能源的酒精燃料可能提

供美國所需汽油的一百%以上。

但幾年後油價崩潰，酒精失勢，一九八六年，農業部指稱，用酒精汽油補貼增加農業所得，是「非常無效」的方法。一九九〇年代初期，用在生產酒精的玉米數量極少。

酒精熱潮形成

但是幾乎在同一時間裡，酒精在法規上獲得救濟，一九九〇年清潔空氣法修正條文規定，美國供應的大部分汽油必須添加額外的氧，以便改善燃燒、減少污染。添加含氧劑的汽油叫做新配方汽油。起初，業界愛用的含氧劑是從石油中提煉出來的甲基第三丁基醚。但是到了一九九〇年代末期，這種添加劑可能從地下油槽中漏出，污染地下水的疑慮升高，唯一便於取得的替代添加劑是酒精，酒精取代甲基第三丁基醚後，需求開始再度上升，原名酒精汽油的東西得到乙汽油的新名字（這種汽油含有九〇%的汽油、一〇%的酒精。）

支持酒精的政治力量再度凝聚。曾經擔任律師、為破產農民辯護的湯姆·威爾薩克當選愛阿華州州長後，決心協助農民提高所得，把愛阿華州變成美國酒精的實驗所。不少著名的參議員、包括印第安納州參議員理察·魯加、內布拉斯加州參議員恰克·哈格爾和南達科他州參議員湯姆·達希爾，都提議立法，為美國汽車燃料中所含酒精比率，制定必須達成的目標。二〇〇一年的九一一恐怖攻擊為酒精提供了進一步的刺激，因為現在酒精會取代部分石油，尤其是取代中東的石油。魯加說：「我們碰到了國家經濟與戰略問題。」酒精有助於加強燃料組合多元化，因此對安全有益，酒精也可以取代傳統的農業補貼與管制制度，協助農民和另一個市場建立關係，活

化農村地區。

二〇〇五年通過的能源政策法為酒精提供了實質鼓勵。首先，該法禁止甲基第三丁基醚，強迫酒精的主要對手退出市場。第二，該法制定了再生燃料標準，規定二〇一二年前，美國的汽車燃料組合中，每天必須納入五十萬桶酒精。這點表示酒精的產量會倍增，但是酒精的生產成本比汽油高，因此，該法的第三個重點是確認每加侖酒精中，可以獲得最有吸引力的稅賦抵減。此外，巴西酒精的關稅繼續維持，防止大量巴西酒精進入美國。

美國酒精熱潮於焉出現，各色人等都投資生物精煉廠，包括中西部的農民和農業合作社、著名企業家、推廣商和開發商、生物科技企業家和投資基金。

但最著名的支持者是布希總統，布希的事業生涯從「小型石油公司」起家，是獨立石油業者。二〇〇五年秋季，卡翠娜與麗塔颶風侵襲墨西哥灣地區，使當地的石油停止生產好幾個月，汽油價格暴漲，造成政治風暴，布希政府因此被迫採取守勢。同時，伊拉克的情勢惡化，布希愈來愈傾向於認為依賴進口石油、是美國世界地位的弱點。

有一次，布希到加州去，擔任過總統科學顧問委員會共同主席的一位創投專家告訴布希，再生燃料現在是創業者之間「熱門的新投資專案」。不久之後，布希訪問巴西首都巴西里亞，在巴西總統魯拉的農莊上，進行布希所說的「美好舊式巴西烤肉午餐會」，聽魯拉談到酒精占巴西汽車燃料市場中的比率多大。事實上，就像魯拉自己說的一樣，他「對生物燃料極為熱衷，以至於布希幾乎吃不下飯，因為我滔滔不絕的討論生物燃料。」同時，美國國會大力宣揚酒精的好處，酒精變成了國家策略，是布希對國會所發表二〇〇六年國情咨文中的主題之一。布希在演說

中宣稱，美國人「對石油上癮」，他本來打算點到為止，但是他知道提到上癮，會引起美國人民的注意。布希後來說：「我發表國情咨文時，原本打算嚇一嚇美國同胞，我說石油害我們上癮，我們必須擺脫石油，對某些人來說，聽到我這個德州佬說這種話，似乎違反直覺。」

酒精現在變成了主流，整個美國農業帶上，出現興建生物煉製廠狂潮，農民匯集儲蓄，在本地興建自己的生物精煉廠，人口不斷流失的農村地區出現新的就業機會，農民所得提高，中西部土地價格上漲的速度比紐約市的合作社價格還快。碳水化合物經濟變成願景和美夢已經超過一個世紀，現在美夢成真了嗎？如果是這樣，美夢有多大？

巴西酒精

聖保羅東北方大約三百二十公里的里貝朗普雷圖市外，道路縮小成兩線道，沒有一部車能夠開快，因為大家別無選擇，只能跟在笨重的貨車和一些拖車後面慢慢開，貨車和拖車都高高堆滿了甘蔗，滿到幾乎要滾下來。最後貨車轉彎，開進精煉廠，在一塊空地上，排成大弧形，排隊等候，再慢慢向一堵牆開去，然後車斗會升起、向後傾斜，數以噸計的甘蔗會像瀑布一樣滾下去，落在輸送帶上，送進精煉廠壓碎、處理，得到的液體經過發酵，變成酒精，流進蒸餾塔、再流進儲槽。接著酒精開始新的旅程，這次是利用化學槽車和管線，輸送到全國各地的車主手中。

這種景象一再在巴西內陸上演，巴西現在是世界能源市場的一環，但是十年前，很少人能夠預測到這種情形，酒精已經變成巴西源組合的核心，巴西也已經站上世界舞台的中央，成為追求生物燃料國家的模範。巴西是世界最大的砂糖出口國，巴西的地理環境、經驗、種植農作物的能

力——都使巴西可能變成全球能源市場的新供應國。但是巴西的地位中特別吸引人的地方，在於巴西是世界成本最低的酒精生產國，原因是巴西的原料不是玉米，而是在生物圖譜中極為接近生產酒精的砂糖。

幾百年來，酒精一直是巴西的重要作物，一九三〇年代大蕭條期間，糖價崩潰，政府為了因應困局，下令汽車燃料中必須加入五%的酒精，以便為嚴重供應過剩的作物創造額外的需求，協助提高農民所得。但是二次大戰後，廉價石油供應大增，衝垮了巴西的酒精市場。

到一九七〇年代，巴西經濟蓬勃發展，進口所需石油的八五%，但一九七三年的石油危機突然打斷了大家所說的巴西經濟奇蹟，油價暴漲四倍，對巴西經濟形成毀滅性的震撼。軍政府用自己所說的「戰時經濟」對策，因應巴西的能源危機。根據當時大家一致的看法，巴西絕對沒有找到石油的可能性，唯一的能源選項是甘蔗。政府在煩惱之至的蔗農強力敦促下，建立了全國性的愛用酒精計畫，作為「戰爭行動」的一環，還用「團結一致、生產酒精」的標語，支持這項計畫。為了提供額外的誘因，過去週末關門的加油站獲准週六和週日開張，以便銷售酒精，而不是銷售汽油，酒精消耗量急劇增加。酒精最初是加在汽油裡，但是到一九八〇年，大汽車廠商的巴西分公司配合政府的堅持，同意生產完全以酒精為燃料的車輛。政府的對策是對汽車廠商和消費者提出重要的承諾，保證絕對會有足夠的酒精。當時酒精的實際生產成本是汽油的三倍，但是消費者不知道，因為汽油稅為酒精支付了金額驚人的補貼。

到一九八五年，巴西銷售的所有新車中，九五%完全以「酒精」為燃料。然而，一九八〇年代中期油價崩潰，和汽油相比，酒精的價格嚴重偏高。此外，砂糖價格上漲，蔗農停止生產酒精，恢復產製砂糖。一九九〇年代後五年，酒精產量劇減，供應嚴重不足，觸怒了擁有只能燒酒精汽車的所有車主，嚴重破壞酒精的信用，摧毀大家對酒精供應的信心，政府的絕對保證變成空談，更難堪的是，巴西必須從美國進口酒精，協助解決供應不足的問題。

但是從二〇〇〇年起，三件事情促使酒精在巴西起死回生。第一件事是油價上漲，第二件事是三十年的經驗和持續研究，急劇降低了酒精的生產成本。

第三件是推出彈性燃料汽車，這種汽車裝有車用電腦，可以「聞出」——其實是感測出——燃料是汽油、汽油與酒精混合燃料，還是大部分是酒精，再根據感測到的資料調整引擎。二〇〇三年下半年起，彈性燃料汽車進入巴西市場。備受尊敬、曾經當過政府官員、巴西酒精發展先驅之一的聖保羅大學教授約瑟·高登柏格認為，彈性燃料車具有極大的改造力量，是價格低廉的突破，能夠恢復車主的信心。只要花費大約一百美元，車子就可以改造成混合燃料車，讓車主不但可以完全依賴酒精，也消除了車子開到一半、回不了家的風險。而且大約在這時，高登柏格也做了一份很有影響的分析，提出「高登柏格曲線」的說法，顯示沒有補貼的巴西酒精現在比汽油便宜。

說彈性燃料車「風行」不足以形容其盛況。二〇〇三年，巴西大約賣出四萬輛彈性燃料車，二〇〇八年，激增到略為超過二百萬輛，大約占新車銷售量的九四%。這點表示車主到加油站時，可以看當天哪種燃料比較便宜，再決定加哪種燃料；因為一九九〇年代酒精短缺的記憶猶新，這點也表示即使酒精價格再度暴漲，車主也總是可以回頭再用「舊式」汽油。巴西已經不再補貼酒精，但是巴西酒精在國內外市場上，仍然具有高度競爭力。事實上，今天大家公認巴西用甘蔗製造的酒精，是世界上唯一具有長期競爭力的生質燃料。

和以玉米為基礎的燃料相比，甘蔗還有另一種成本優勢，蔗渣可以產生熱和發電，消除製造時所需要的化石燃料，降低成本。蔗農還有一層額外的保護，增加擴大生產的誘因，蔗農不再只依賴一個市場，可以比較蔗糖和酒精的價格，進行最適當的生產。即使如此，酒精工業的擴張對投資人來說，仍然是起伏不定。

酒精在巴西的確重新建立了穩固地位，事實上，汽油現在變成了「替代」燃料，因為從二〇〇八年起，酒精的銷售已經超過過汽油。巴西已經達成能源獨立的終極目標，一九七〇年代時，巴西八五%的能源需求要靠進口，現在變成自給自足，而且是石油淨出口國。

有些美國人問：為什麼美國無法達成同樣的目標，因為兩國面臨的挑戰規模不盡相同，整個巴西汽車燃料市場大約只等於美國汽油市場的〇%。事實上，美國目前生產的酒精大約比巴西多七五%，美國要達成巴西這種酒精普及率，每天需要的酒精幾乎等於五百萬桶，以量來說，超過沙烏地阿拉伯以外的石油輸出國組織任何會員國。

此外，認為巴西完全靠著酒精達成能源獨立的目標是誤解。一九七〇年代時，大家認為巴西幾乎完全沒有石油資源，實際結果證明這種想法是重大錯誤，巴西今天是世界上石油產量成長最快的國家，生產的石油大約是酒精的五倍。

總之，巴西的酒精工業正處在快速擴張階段，巴西還很多土地，而且不需要砍伐雨林（甘蔗無法在雨林式的狀態中生長。）甘蔗本身、酒精生產設施和運籌還有很大的進一步創新潛力，如果世界市場有需要，巴西可以帶頭發展出很大的全球出口市場。

食物與燃料之爭

生質燃料脫穎而出後，引發了有關傳統酒精與其他生質燃料前途的辯論，這種辯論可以概括說成是「食物與燃料之爭」，也可以說成是「淨碳足跡」之爭。生產酒精要投入大量能源，但是和投入的能源數量相比，「產出」的能源是否比較多、比較少、還是一樣多？能源平衡問題、也就是用多少能源獲得多少能源的問題，很有爭議性，又不容易衡量。

能源要靠能源生產，生產傳統酒精所需要的能源，包括耕作用拖拉機所需要的柴油、製造肥料所需要的石化原料、採收玉米所需要的燃料、蒸餾所需要的熱量、把這種燃料從內陸小鄉鎮運到市場所需要的車輛燃料。和上述所有因素有關的假設改變，得到的答案就會不同。目前大家一致認為，玉米酒精的淨能源平衡率為偏向正值，但是實際平衡如何，絕大部分要看生產與運輸酒精所需要的燃料與成本而定。此外，建廠經驗增加、試驗規模擴大後，這種平衡應該會略為改善。而且投入酒精生產的能源當中，有一大部分是煤炭和天然氣之類的非石油燃料，事實上，酒精生產增加，為天然氣創造了一個重要的新工業市場。

但是可以種植生質燃料作物的土地是否有限制？以耕作面積計算，玉米現在是美國最大的農作物，玉米生產極為熱絡，以至於號稱「小麥州」的堪薩斯州，玉米產量都已經超過小麥。但是玉米的用途和大多數人的想像不同，大約只有一%的玉米直接作為人類的食物，另一部分玉米經過加工，變成包括高果糖玉米糖漿之類的食物。牲口間接消耗的玉米比率大多了，大約占玉米產量的一半。一九九五到二〇〇九年間，美國玉米投入酒精生產的比率增加了七倍，從一九九五年

的六%，提高到二〇〇九年的四一%。因此以美國玉米來說，「食物與燃料」之爭其實是一「動物飼料與燃料」之爭。

玉米價格上漲對玉米農是好消息，對依賴玉米飼養牲口的畜牧業和乳製品業卻是壞消息。玉米價格上漲也會造成軟性飲料、早餐麥片之類消費產品價格上漲，因為這些產品要使用高果糖玉米糖漿（玉米價格上漲也會鼓勵農民轉作，從種植大麥，改為種植玉米，以至於造成啤酒價格上漲）。玉米價格透過動物飼料價格的形式，影響全世界食物價格上漲，造成很多國家的通貨膨脹和政治緊張。

墨西哥因為玉米價格上漲，爆發一場危機。美國玉米價格上漲後，進口美國玉米、生產玉米烙餅的墨西哥玉米價格跟著上漲，因此，二〇〇七年內，墨西哥玉米烙餅價格突然暴漲，為以極少票數贏得大選的卡德隆總統，帶來了第一次政治危機。危機發生時，墨西哥能源部長說：「我們是吃玉米烙餅和豆子的國家。」墨西哥若干地區玉米烙餅價格上漲三倍，引發七萬人走上墨西哥市街頭，抗議價格上漲，迫使政府實施玉米烙餅價格管制。

農業經營技術進步驚人，從一九五〇年到現在，每一畝單位玉米產量增加了四倍，但是即使土地生產力提高，酒精的擁護者仍然認為，耕作面積會限制玉米酒精的發展。

生質燃料也碰到從環境觀點出發的反彈，重點放在第一代生質燃料的淨碳足跡問題上，美國生質燃料煉製廠在農業區獲得強力支持，反對者卻不滿其對空氣品質與交通造成的影響。

用水、土地與增產肥料造成溫室氣體排放增加，引發了更廣泛的批評。生質燃料在歐洲引發相當嚴厲的批評，從馬來西亞和印尼進口的棕櫚油遭到的批評特別嚴厲，因為這兩個國家焚燒

雨林，釋出土地，種植棕櫚油作物，排出二氧化碳，干擾生物多樣性。因此，歐盟正在針對生質燃料，推動大量保護措施，例如對生質燃料的二氧化碳含量，實施「井口到駕駛盤」限制，禁止砍伐森林。考慮所謂的間接土地利用變化因素時，有關土地利用的規定會更棘手，對歐盟來說，生質燃料對土地利用的「後續」影響，是特別熱門的問題，例如，「間接」利用是指生質燃料作物取代食物作物時，農民會尋找新的可耕地，種植食物作物，導致森林砍伐，也可能釋出大量的碳，這種情形如何評估？由誰評估？

傳統酒精與生質柴油無法滿足美國對生質燃料的期望，二〇二二年前，計畫每天混合在美國汽車燃料中的二百三十五萬桶生質燃料中，超過一半必須是先進的第二代生質燃料。其中大部分應當來自實驗室和新創企業所提供，但還沒有商業化大規模生產的纖維素酒精。

有希望的菌類

二次大戰期間，南太平洋爆發過激烈之至的戰鬥，盟軍逐島打退日軍時，必須應付艱巨、意外的叢林作戰。有一種最神祕、令人驚訝的叢林腐菌會吞噬美軍的帳篷、軍服、背包、靴子和皮帶。盟軍最後大約收集了一萬四千種這類有機體的樣本，送到麻州波士頓西方的納提克陸軍實驗所。其中有一種最有希望的菌類叫做綠色木黴菌，這種黴菌是從新幾內亞帶回來的腐朽彈夾袋中分離出來。納提克的生物學家李奧·史班諾從這種菌類中，培養出突變種，他把突變種放在含有磨碎樹葉的水溶液中，三十六小時後他回來時，發現突變種發揮了奇妙的作用，把樹葉變成葡萄糖。他看著葡萄糖，認為自己看到了新的未來。他後來說：「我知道一種微小的酶可以改變我們

所知道的世界，如果人類能夠引導、改善一種酶，酶這種化合物可以把有毒廢棄物吃光，變成有用的物質。」

一九七三年石油危機後，史班諾的研究吸引更多廣泛的注意。美國陸軍部副部長諾曼·奧古斯丁一九七五年在納提克所舉辦的研討會中，宣稱「我們轉而求助低等的黴菌」，解決能源、資源與食物問題。奧古斯丁後來說：「讓我印象十分深刻的是，我們似乎可以用得到科學基礎支持的全新方法，創造驚人的進步。」大企業和新創企業開始實驗纖維素酒精。

但是一九八〇年代油價下跌，然後崩盤，大家不再注意纖維素酒精，長期研究發展資金消失，零零星星的若干業者仍然繼續研究這種科技。一九七〇年代加拿大艾歐基公司靠著濃厚的希望成立，現在靠著發展出若干酵素，把雞、豬飼料變得更容易消化，勉強維持經營。

二十一世紀開始後，若干情勢匯集在一起：包括大家對生質燃料恢復支持、訂定野心勃勃的計畫、能源安全、對氣候變遷日漸重視，促使世人對纖維素酒精恢復了濃厚興趣。

柳枝稷是什麼？

二〇〇六年前，聽過柳枝稷的美國人很少，但是南非出身的大衛·布蘭斯比當然聽過，他是阿拉巴馬州奧本大學教授，他的博士論文是以草原科學為題，然後他又花了幾十年時間研究牧草，其中一種是二、三公尺高，長成一團亂草般的柳枝稷。但是在學術領域之外，很少有人注意他，後來阿拉巴馬州參議員傑夫·賽辛斯到他種植柳枝稷的田裡參訪，對柳枝稷可能成為能源、而且可能勝過玉米的潛力大為驚歎。二〇〇六年布希總統發表「對石油上癮」國情咨文前，賽辛

斯在白宮的一場會議上，大力推薦柳枝稷，美國政府急於尋找新能源，因此接受他的建議。

二〇〇六年布希發表國情咨文時，你可以肯定的說，幾千萬收聽這場演說的美國人當中，幾乎所有的人聽到布希談到柳枝稷時，一定都覺得一頭霧水，布希呼籲發展「先進方法，用木片、植物莖桿或柳枝稷，生產酒精。」木片當然可以用，但是柳枝稷可以用嗎？柳枝稷到底是什麼東西？布蘭斯比的反應有點不同，他後來說：「我在客廳裡看到這一幕時，差一點從椅子上摔下來。」

大家偶爾把纖維素酒精和其他先進生質燃料，當成尋尋覓覓的「聖杯」，如果達成目標，這種生質燃料可能急劇改變供需平衡，同時大幅降低運輸排放的溫室氣體。先進生質燃料和電動車不同，不需要全新的基礎建設，對車主或航空公司之類的終端用戶來說，其中的改變基本上是無形的轉變，一切都不會改變，但是從能源生產方式、生產廠商和營收流動的角度來看，生質燃料會改變整個能源系統。

各界已經大力投入生質燃料的發展，也把生命科學納入能源事業，政府、企業家、創投基金和私募基金公司也以前所未見的方式，投入支持資金。

此外，過去幾年內，國際大石油公司大力支持各種先進生質燃料的研究，有些公司投資金額很大。英國石油公司提供五億美元，交給柏克來加州大學、勞倫斯柏克來國家研究所、和伊利諾大學合組的能源生物科學研究所應用。埃克森美孚提供六億美元，和人類基因圖譜研究先驅克雷·溫特創立的合成基因組公司合作。雪夫龍、殼牌、康菲、道達爾和挪威國家石油公司，全都成立和生質燃料有關的合資事業；巴西國家石油公司也積極從事這方面的研究，同時，創業者

投資很多家新創企業。

這些事業規劃採取不同的路線，但是目標相同，就是找到具有競爭力、能夠大規模商業供應、不需要全新基礎建設的新運輸燃料來源。

現有的知識技術可以把植物材料和農業廢棄物分解，變成酒精，其中重大的挑戰是以經濟可行的大規模方式生產。一九七〇年代初期創立的早期纖維素酒精公司一位高級經理人說：「我們總是知道你可以利用酶處理纖維，把木材變成糖，這點不是問題，成本高低和如何在工業規模的環境中快速完成，才是問題。」

這些不確定性起源於問題的本質，研究專家挑戰的是植物本身的解剖結構，設法從植物和其他物質中，取出這些有機物質本來就不輕易放棄的東西。

要生產酒精，基本問題是如何讓可以發酵、蒸餾為酒精燃料的糖釋出。利用甘蔗作為原料時，這種過程幾乎已經完成，玉米需要經過磨碎、處理，才能釋出糖分。纖維素酒精更複雜，就像纖維素酒精名字所顯示的一樣，必須從纖維素與半纖維素構成的碳水化合物複雜分子鏈中，取出深藏在裡面的糖分，纖維素和燃料之間的距離更遠，工程技術十分艱難，畢竟纖維素、半纖維素和木質素好比植物的牆壁，是植物構造緊實的原因，也是樹木能夠直立生長的原因。

如何破壞保護糖分的護身盔甲，就是主要問題就在，要製造酒精，必須把纖維素和半纖維素跟木質素分離，然後分解成適於發酵為酒精的糖分。這種過程可以透過特殊的酶，進行酶轉化過程完成，專家必須對酶進行更多的研究，讓酶更有效能。

纖維素酒精的原料很便宜，可能是植物殘渣或農業廢棄物，例如枯乾的玉米殘株、麥桿或發酵過程產生的蔗渣，也可能是其他農業殘渣、木屑、甚至是某些種類的垃圾，也可能是貧瘠土地上生長的各種雜草，例如前面提過的柳枝稷，或是芒草或高粱。

但是處理成本仍然很高，根據估計，要興建一座生產纖維素酒精的工廠，成本可能是以玉米酒精廠的四倍。

被遺忘的挑戰

還有一個「艱巨運籌問題」，大家稱之為「被遺忘的挑戰」。和石油相比，生質的能源密度很低，因此必須收集很多生質，收集、運輸和儲存生質的成本很高。油的能源密度極高，值得耗費成本，運輸到半個世界以外。相形之下，生質具有一般所說的「地區性天生特質」，根據某些人的估計，生質運輸的最大半徑是八十公里。以日產六千桶的纖維素工廠來說，一年所需原料可能需要半拖車運輸五萬次。

精煉廠也需要穩定的原料供應，如果原料一年收成一、兩次，就必須儲存原料，形成另一種運籌問題。原料會腐朽敗壞，造成成本增加，最後還有原料價格的問題。

除非這些運籌問題能夠解決，否則纖維素酒精產業不可能開始大規模發展，解決這些問題的方法之一是從上游、也就是從植物本身著手，改變原料。

難度超出預期

啟迪會以很多種形式出現，對理察·漢彌爾頓來說，啟迪是在一九八〇年十月他念高一時，

以《新聞週刊》基因科技公司公開上市案報導文章的形式出現，這是新生物科技產業的第一件公開上市案，也象徵生物科技全新時代的開始。

基因科技的故事激發了漢彌爾頓的想像。他上大學時，有人問他希望做什麼，他都會胸有成竹的回答說：「生物科技」。大家會茫然的看著他，畢竟這時還是生物科技發展的初年。

漢彌爾頓獲得分子生物學博士學位後，花了一年時間，在哈佛大學進行博士後研究，探討利用生物科技與遺傳工程，創造、設計植物的理念。一九九七年，他協助創立一家名叫喜瑞，專門從事植物基因的企業。但是他要到二〇〇四年酒精熱潮出現後，才專心一致，利用生物科技，創造經過特別設計的燃料原料植物，因應纖維素產業成長帶來的運籌挑戰。事實上，漢彌爾頓和這個領域中的其他人從新的生物角度，為生質燃料引進了新的觀點。

他說：「很多人把重點放在精煉科技上，比較不擔心原料，但是在業者設法規模化時，這種情形會改變，因為運籌的關係，高產量密度是重要的協助因素。」總之，纖維素酒精已經證明這種產業比很多人預期的還困難。最大的挑戰是活的有機體生命周期決定的時間軸線，我們現在得依靠季節的流逝，才能看到研究成果。

「我們的作物不是從神秘伊甸園裡蹦出來的，是經過人類培育和改善而來的。」漢彌爾頓伸出手，指著指甲說：「世界上第一個玉米穗只有這麼大，人類務農已經有一萬年歷史，但是一直到一九四六年，人類都不知道去氧核糖核酸是遺傳物質。一九六〇年代開始的綠色革命，是人類最先把現代生物學用在植物改善上的例子。」

很多人把得自人類基因組定序的知識，應用在這個領域中，把名叫生物資訊學和資訊生物學的新領域，用在一般稱為高產量的實驗中，希望找出特定基因及其功能。他們的目標是加速進化過程，選出若干生物特性，使芒草和柳枝稷之類長在不能種植食物貧瘠土地上的長草，能夠變成有效率的能源作物。這點表示選擇的特性包括快速成長、容易取得糖分、耐旱、需要較少的肥料等特性，最後目標是大幅提高「每英畝燃料」的產量。

還有其他做法，其中一種是把生質加熱到很高的溫度，產生合成氣體，在類似把酶變成液體的製程中，轉變成液體燃料。另一種方法是利用水解法，把水和酸結合在一起，在壓力和高溫下，把生質分解為酒精。

精煉科技愈來愈重視「可取代分子」或「綠分子」，目標是利用觸媒，把糖轉化為碳水化合物，同時性能與成分和汽油、柴油、噴射燃油等傳統碳氫燃料，幾乎完全相同的。這種做法如果能夠大規模推動，表示這樣得到的產品可以無縫接軌，融入現有的燃料供應系統中，基礎建設幾乎完全不必改變。目前酒精和汽油必須分別運輸與儲存，因為酒精非常容易和汽油管線與儲槽中的少量水分結合。

海藻是小小煉油廠

另一種可能的生質燃料來源是海藻，海藻長在海洋、湖泊和池塘中，是食物鏈底部的單細胞植物，也是小小煉油廠，會吸收陽光與二氧化碳，產生氧氣（大約占世界氧供應量的四〇%）和生質油脂，從分子的角度來看，這種油脂很適於生產汽油、柴油和噴射燃油。理論上，海藻也很有效能，海藻在陸地上、微鹹的池水中或人為控制比較嚴格的生物反應器中，每英畝燃料產量大

約是棕櫚園的三倍、玉米田的六倍。

有些研究小組利用自然培育的不同種類海藻，進行能源生產試驗，有些小組希望把基因組科學應用在海藻中，發展出功能完整、對全球能源供應可能產生重大衝擊的海藻。

所有海藻研究都有一個艱難的基本挑戰，就是找出最有生產力的海藻品種，再維持海藻數量的穩定，然後以商業化的方式生產。

生質燃料的可能性

纖維素酒精和其他先進生質燃料的商業化時間表如何？會造成什麼衝擊？有關的問題引發很多爭辯，有人說商業化幾乎已經觸手可及；有人認為商業化還是重大的研究問題。出身矽谷的人習慣軟體與電腦短促的生命周期，可能預測生質燃料可以在兩、三內商業化；如果預測參考依據是生物科技，那麼預測的時間表可能是五到十年。如果預測的人出身傳統油氣工業，習慣很長的開發循環，對流通系統的複雜性和規模有經驗，那麼預測的時間可能是十五到二十年。

最後可能如何？史蒂文·庫寧提出大膽的評估，他認為，生質燃料最後可能以對環境負責的方式，供應全球汽車燃料需求的二〇%。庫寧是理論物理學家，曾經擔任過加州理工學院院長、英國石油公司首席科學家，目前擔任美國能源部主管科學的次長。

這種遠景的確驚人，代表碳氫化合物會逐漸讓步給碳水化合物和其他生質能源。然而，要達成目標，還很多和科技、價格、規模與環保有關的問題有待解決，然後世界各國的公路上，碳水化合物才能夠真正的開始取代碳氫化合物。

第十八章

內燃機

十九世紀結束時，愛迪生擁有極多的發明，不但是世界上最著名的美國人，也影響了一般所說愛迪生時代的大部分事物。他當然也是美國電力業的始祖，因此一八九六年八月，愛迪生照明公司經理人在紐約舉行年會時，閉會貴賓是愛迪生本人，一點也不足為奇。

主桌的談話繞著當時的大問題電池和汽車打轉，有人招呼下首的底特律愛迪生公司總工程師福特，他剛剛造出他所說的「四輪車」，但是這種車子的動力是汽油，不是電池。

三十三歲的福特換位置，坐到重聽的愛迪生身旁。福特回答愛迪生的很多問題時，在餐單背後畫出設計，愛迪生對於車子載著他所說的「碳氫化合物」燃料，大為驚歎。愛迪生說，電動車的問題是「必須放在供電站附近」，而且不管怎麼說，電池都太重了。愛迪生告訴福特堅持汽油和內燃機的設計，愛迪生為了強調這種看法，拳頭重重的敲在桌子上，告訴福特：「你找到正確答案了，要堅持下去。」

福特後來說：「對我而言，他在桌上捶的那一下具有莫大價值。」這一下是祝福，因為福特認為愛迪生是「世界上最偉大的人」。福特說，現在「世界上最了解電的人說，以這種目的而

言，我的汽油引擎比較好用，何況這時所有電機工程師都認定一個確定的事實——凡是不靠電力推動的東西，都不可能是有價值的新事物。」

福特自己也覺得懷疑，他補充說：「我有點擔心自己可能是在浪費時間。」但是得到愛迪生的稱讚後，「我工作的速度至少是應有速度的兩倍。」

但是個人行動能力的競賽還沒有結束，事實上，兩年後的一八九八年，《紐約太陽報》刊出驚異的報導，指出現在紐約市某一個忙碌的街道上，「可以看到由五種不同推動方法驅動的汽車」時，以汽油為動力的汽車甚至還排不上名。

但是大約在十年內，到一九一〇年前後，這場競爭大概就快要結束了，配備內燃機的汽車獲勝，從此以後，汽車決定了個人的行動能力，跟熱、光與空調一樣，變成現代生活的基本特性。

未來的燃料

從石油提煉出來的燃料能源數量驚人，可以方便的以穩定、便於利用的液體形式儲存。如果說石油是至高無上的國王，道路運輸就是石油表現至高無上地位的地方。但是隨著新興市場國家人民所得提高，買得起車的水準時，全世界對行動能力的需求一定還會出現驚人成長。

這種需求要靠什麼燃料推動？

十年前，答案似乎相當明顯，就是更多同樣的東西。當時看來，運輸會繼續依賴石油，現在看來並非如此。運輸前途的新競爭已經開始，結果會決定二、三十年後大家會開什麼樣的汽車，石油會不會繼續在路上和天上保持優勢地位。車輛會不會還是像大家熟悉的那樣，靠燃燒汽油或

柴油的內燃機驅動，只是內燃機效能提高而已？現有和新生質燃料的重要性會不會提高，排擠石油在能源組合中的地位，但是汽車本身的變化卻相當少？車輛會不會變成由天然氣驅動？會不會變成油電混合動力車，結合內燃機和另一套電動傳動系統，以便大幅提高效能？會不會出現更激進的情勢，真正的贏家會不會完全由電力驅動、不在加油站加油，而是在家庭插座上充電的電動車？更久之後，是否可能出現氫電池汽車？

另外還有一種可能性，就是出現新的運輸系統，挑戰大家對個人行動方式現有的看法，新系統可能是因應迫在眉睫、可能癱瘓世界極多超大城市極端擁塞的必要對策。

但是我們的確知道，全世界汽車總數不會出現快速變化，汽車總數太大，現有汽車的汰換率太低——汽車的平均壽命為十二到十五年。先進國家的情形確實是這樣，但是在快速成長的新興市場國家中，本來沒有車的人現在紛紛買車，情形會有點不同，甚至可能大不相同，因為這些國家沒有大量需要淘汰的舊車。

競爭會重新開始，原因有好幾個，首先是大家愈來愈擔心能源安全、中東衝突、全球供應體系風險和油價震盪。第二個原因是永續能力。一個多世紀前，汽車首次出現時，立刻提供了解決之道，解決快速成長城市所碰到的永續能力挑戰，解決了可能窒息城市、威脅人類健康的重大環境、污染與健康問題，也就是解決了十九世紀末期，人類利用大批馬匹拉各種車輛、穿行愈來愈大的城市，造成大量馬糞不斷增加的問題。汽車崛起取代了街上的所有馬匹。

今天汽車業在排放廢氣的清潔方面大有進展，但是廢氣排放仍然是世界很多城市的問題。此外，引擎燃燒汽油或柴油時，會排出二氧化碳，大家對氣候變遷的疑慮，促使業界努力尋找不會

增加碳存量的引擎。新競賽的另一個起因純粹是規模問題，也就是大新興市場創造經濟成長時，世界石油供應無法滿足因此而來的額外石油需求。

這場競賽的目標遠大：汽車業者希望改變汽車車隊，改變支持汽車的基本設施，同時以車主和社會願意支付的價格，提供具有車主所期望功能的汽車。這項任務非同小可，新競賽涉及的利益龐大，包括未來汽車燃料、未來運輸形態和全球政治與經濟權力，贏家的利益高達數兆美元。

蒸汽機

一七一二年，牛頓發明第一部蒸汽機，用來抽取煤炭中的水。幾十年，蘇格蘭發明家瓦特大幅改善蒸汽機的設計和效能，使蒸汽機像一位歷史學家說的一樣，「變成經濟體系所有部門都可以運用」的機器，結果催生了「蒸汽時代」。

大約在同時，瑞士工程師尼古拉斯·丘尼歐在法國國王路易十五的資助下，開發出一種以蒸汽為動力的車輛，能夠以每小時接近八公里的速度，在戰場上運輸大炮和四位成員。丘尼歐的機械怪獸表現差勁，穿越法國鄉下時，不平衡的程度令人困擾，路易十五最後對丘尼歐死心，切斷了金援。

十九世紀裡，蒸汽機進步驚人，不但成為工業革命中磨坊和工廠的動力，也成為鐵路和船舶的動力。到十九世紀末葉，蒸汽機已經變成發展完善、把世界結合在一起的機器，但是這時競爭者出現。

奧圖先生

一八六四年，三十一歲的企業家尤金·藍根來到德國科隆市蓋瑞安斯瓦街的一座小工廠前，聽到「古怪的擊打聲」。藍根走進工廠，發現尼古勞斯·奧圖正在實驗自己設計的汽油引擎，藍根聽說奧圖正在做一些有趣的事情，覺得很好奇，想認識奧圖，看看這位身兼德國發明家和工匠的奧圖，怎麼利用燃燒所產生比蒸汽機更有效能的能源。

奧圖的家境並不富裕，還要靠著賣茶葉和糖，加上兼差打零工，才勉強維持收支平衡，他沒有受過正式技術訓練，卻擁有敏銳的直覺，「醉心研究各種引擎」。他債台高築，因此渴望獲得突破。藍根和奧圖沒有什麼共同的地方，藍根是投資人，才三十出頭，就創立了好幾家不同的事業。藍根對奧圖的實驗很感興趣，決定投下若干資金。

奧圖在三年內獲得突破，設計出效能大為提高的引擎，奪得一八六七年巴黎博覽會的金牌獎，也激發外界對這種初期引擎極高的需求。藍根和奧圖最後以科隆一處郊區的地名為名，創設杜意茲汽油引擎製造公司，也聘用新員工，包括聘用兩位聰明的工程師高德烈·戴姆勒和威廉·麥巴赫。然而，這家新公司的前途並不確定，他們雖然努力研發，引擎出力卻無法突破當時似乎無法超越的三馬力障礙。

這些工程師激烈辯論未來的發展方向，奧圖希望研發新型的內燃機，戴姆勒卻深表懷疑。同時，和他們競爭的投資人與工程師忙於另外創造突破，藍根的朋友法蘭茲·路勒斯教授警告他，在他們猶豫不決之際，競爭者已經超越他們。路勒斯主張他們應該推動奧圖的內燃機構想。他宣

稱，「研發這個構想，奧圖先生必須提起後腳，戴姆勒先生必須提起前腳。」

奧圖的機制是利用閥門，把空氣和燃料吸到汽缸裡，加以壓縮，再點燃壓縮後的油氣混合物，用四個衝程把利用過的混合物質排出。現在擔任這家小公司首席科技專家的戴姆勒繼續反對，認為奧圖的構想是「浪費時間」。

但是藍根支持奧圖，戴姆勒沒有看出奧圖設計中提高馬力和效能的意義，六個月內，他們就製造出原型引擎，這種引擎的效能不但超越當時的所有引擎，也打破了三馬力的障礙，是成功的商業傑作。

「奧圖循環式」引擎在一八七六年開發出來，代表現代內燃機出現，這種引擎結合閥門、曲柄軸、火星塞和容納燃料與空氣的單汽缸，形成的系統可以掌握燃燒所產生的能源、能源損失又大為減少，因而效能大為提高，此外，這種引擎也比較可靠。

到一八九〇年，德國已經創立以內燃機為基礎的汽車工業。奧圖和卡爾·賓士都是德國汽車工業先驅，賓士利用奧圖的專利，製造出自己的第一部三輪車；戴姆勒也離開奧圖創業，到一八九〇年代中期，戴姆勒甚至透過鋼琴製造商威廉·史坦威公司，在美國銷售自己生產的汽車。到了二十世紀，戴姆勒和賓士的公司合併，成為戴姆勒賓士公司，但是兩人顯然從來沒有見過面。

競賽

德國和法國至少在十年裡，是領導世界汽車運輸的國家，法國擁有阿曼·普傑與路易·雷諾之流的工程師，居於領導地位。

英國雖然擁有優異的工程技術，汽車工業的發展卻慢多了，鐵路業的「朋友」在國會裡推動紅旗法的立法，保護鐵路運輸專營權。根據紅旗法，汽車這種「道路火車頭」在都市裡行駛，最高速度不得超過三·二公里（行人以每小時四·八公里的速度前進，都比汽車快）；在農村地區，駕駛人最高可以把汽車加速到每小時六·四公里。為了增加額外的安全性，駕駛人必須由走在前方五十五公尺處的人引導，這個人白天會揮舞紅旗，天黑後會提著一盞燈。紅旗法嚴重限制了汽車的速度和用途，這點表示英國人比較沒有開車的誘因。

汽車也開始在大西洋對岸的美國街頭出現，但主要是蒸汽動力車或電動車。一八九二年，有一家報紙報導「昨天芝加哥街頭出現一部由電力驅動的新型馬車……這部車開了二十二分鐘，車主基於交通狀況和難以突破的大批圍觀群眾，覺得這麼長的時間值得重視。」

根據《科學的美國人》雜誌對戴姆勒所生產汽車的描述，第一部由汽油驅動的汽車到一八九三年，才在美國出現。此後愈來愈多發明家受到內燃機的吸引，其中很多人住在大湖區的底特律一帶。對汽車比較醉心的人當中，有一位是出身密西根州迪波恩市、喜歡機械、對東西如何運作具有天生直覺的農村男孩，他就是底特律愛迪生照明公司年輕的總工程師福特。

電動車或汽油車？

一八九九年，福特趁著愛迪生的祝福仍然縈繞耳際時，離開底特律愛迪生公司，把全部時間投入研發內燃機驅動的汽車。

但是蒸汽動力車和電動車仍然掌握領先優勢，一八九九年，美國第一部警車在俄亥俄州艾克

隆上路，這部車就是電動車（艾克隆警察局長認為，電動車比買一群馬和馬飼料便宜，這部警車的第一次任務是逮捕酒醉鬧事的一位公民。）一九〇〇年，報導指出，紐約市、波士頓和芝加哥街頭一共有二千三百七十輛汽車，大部分是史丹利蒸汽汽車之類的車子或電動車，靠汽油驅動的車子遙遙落後。

包括「淑女」在內，很多人喜愛電動車，後來必須出診的醫生也喜歡電動車。電動車安靜、乾淨、容易控制、不會排黑煙，而且不像內燃機一樣，不需要搖動曲柄才能發動，車主不必累個半死，一再重複很容易傷害手腕的動作。

但是奧圖最先開發出來的內燃機經過加強和改進，在馬力和可靠性方面，開始超越電動車和蒸汽動力車。

電動車受到成本、行駛里程和充電三大問題困擾。以一九〇二年的輝騰車款為例，行駛里程不到三十公里，最高時速不超過二二·四公里。蒸汽動力車的問題是效能低落，需要很長的時間熱車，又需要大量清水。此外，蒸汽動力車加一次水後，行駛里程甚至比電動車還少，就必須重新加水。內燃機只需要燃料，行駛里程比較長，而且和電動車與蒸汽汽車相比，產生的馬力大多了，缺點是必須搖動曲柄才能發動。

這時還看不出來哪種引擎會得到最後勝利。

大自然的秘密

到一九〇〇年，愛迪生換了想法，斷定電動車應該會比汽油動力車受歡迎，新看法和他告訴

福特的話牴觸。愛迪生抱怨燒汽油的車子聲音吵雜、會發出臭味、會冒黑煙，又不可靠，不可能是未來的車輛。他認為他可以用輕量、可靠、儲存足夠電力的新設計，解決電池問題，提供優越的替代能源。愛迪生寫信告訴朋友：「如果人類熱心探索，我認為大自然不會這麼不仁慈，繼續緊緊守住蓄電能力良好電池的秘密。」他已經征服照明、發電、錄音和電影等領域，為什麼不能征服運輸領域？

一九〇四年，愛迪生經過多方努力後，推出十分轟動的E型電池。新聞界的報導指出，這種電池「開啟了電力天地的革命」。一向善於表演的愛迪生承諾要為「每一個家庭帶來一台迷你發電機……為每一個家庭帶來一部汽車。」但是E型電池的功能沒有愛迪生承諾的那麼好，又容易漏電，愛迪生覺得沮喪，卻仍然不屈不撓，重回實驗室，加倍努力研究。

這段期間裡，汽車運輸的確像破壞性科技常見的遭遇一樣，遭到批評，而且批評不止是來自跟「馬匹有關的利益團體」。有人認為汽車是短暫的流行，一本流行小說中的角色說，汽車是「沒有用的討厭東西」。批評最嚴厲的人是普林斯頓大學校長威爾遜。一九〇六年，威爾遜出任美國總統前七年，宣稱汽車是「財富傲慢的表現」，而且「美國沒有什麼東西比汽車的使用，更善於造成社會主義式的情緒蔓延。」

但是這種反對無法壓制大家的熱情，美國掀起一位買主所說的「無馬馬車狂熱」。一位作家宣稱「汽車是現代的寵兒……擁有汽車的男性除了享受旅行之樂外，也會獲得路人的奉承」，更好的是，會變成「女性心目中的神」。但是這種新的神祇會開哪一種車，卻還不清楚。

有一個人在这種擾攘聲中，清楚看出運輸應有的樣子。一九〇六年，福特寫道：「今天最需

要的是輕巧、低價、配備最新引擎、具有充足馬力，用最好材料製造的汽車。」他決心生產這種汽車。

一九〇八年，福特推出第一款T型車，這種車款輕巧、堅固、有力，訂價只有八百二十五美元（這是基本價格；大燈、擋風玻璃和車頂要另外計價。）幾年後，他在生產方面，推出革命性的變革，引進生產線，大量生產T型車（這種觀念來自觀察家所說的芝加哥屠宰場牛隻「切割分解線」。）每九十二分鐘，就有一部新的T型車從生產線上推出來，T型車的價格下降達三分之二之多，有一陣子裡，價格低到只有二百六十美元。

愛迪生不屈不饒，不打算放棄電動車，一九一〇年，他推出A型電池，重返戰場，他保證這種電池充一次電可以跑九十六公里，一次充電只要七小時。汽車廠商把這種電池裝在底特律電動和貝克奔馳等車款上，賣給百貨公司，當成送貨用的小型商用車。愛迪生相信電池應該會變成未來運輸的重要因素，一九一〇年，他得意洋洋的寫信告訴電力大亨英薩爾，承諾電力會有一個重要的新市場，愛迪生說：「你的大型電力母豬會增加很多電力小豬。」但是愛迪生太晚了，福特的T型車在快速成長的市場中，奪得的市場占有率快速成長，很快的就變成極為成功的車款。此外，電動點火方式發明後，車主不再需要搖動曲柄、發動車子，抵消了電動車的一種決定性優勢，也確定了內燃機的最後勝利。福特實現諾言，不但為富人生產汽車，也為「大多數人和賺到優渥薪水的人」生產汽車，他把汽車從奢侈品變成大眾商品。

到一九二〇年，全世界的汽車有一半是T型車，到T型車停止生產時，賣出超過一千五百萬輛，這個記錄一直維持了四十五年才打破，這時內燃機早已變成現代汽車的心臟和靈魂。

新燃料

這些汽車用什麼燃料？答案是汽油。內燃機也拯救了石油業，石油業出現的頭四十年裡，一直都是經營照明事業，主要產品煤油倒在燈裡、照亮全世界。洛克菲勒靠著經營照明事業，變成世界首富，但是到了二十世紀開始之際，電力迅速發展，開始奪取大部分照明市場。

汽車正好即時開上場。

到當時為止，汽油大致上是沒有用的產品，是煉油過程中產生的具有爆炸性易燃物，沒有多少用途。但是汽車時代開始後，大家發現汽油倒進內燃機裡時，會變成很有效的能源。到一九一一年，汽油已經取代煤油，變成數量最大的油品。一九〇一年一月，德州波蒙特附近斯品德他一座鑽井發生井噴，開啟了美國西南部發現重大新油田的序幕，確保美國會有充足的石油供應。

但是還有另一個流通的重大問題有待解決，就是怎麼把汽油送到車主手中，汽油大都裝在罐子裡，由雜貨店或一般商店銷售，相當不方便。一九〇七年，《國家石油新聞》刊出一篇文章不多、又不重要的報導，指出「聖路易汽車汽油公司試驗一種直接銷售汽油的新方法，據報導相當成功。」標題是「車主棧場」。有一個人把這種棧場叫做「堆積場」，這個地方很可能是美國的第一處加油站。到一九二〇年代結束時，美國發展出由幾十萬座加油站構成、和道路一樣重要的網絡，石油變成了這種行動能力的燃料。

美好時光

二次大戰後的一九五〇和六〇年代裡，美國變成真正的汽車王國，郊區的開發、新高速公路和道路系統的建設、汽車的普及環環相扣，汽車是美國人生活中念念不忘的大事，新車是否暢銷，要看式樣、馬力、性能決定，也多少要看性吸引力決定。燃油效率持續下降，但是這一點不重要，因為汽油每加侖只賣二十五美分，每一個商業化的路口似乎都會設立加油站。

一九七三年石油危機爆發後，一切都改變了。華府為了規範汽車能源效率立法案，爆發激烈的政治爭執，美國過去從來沒有規範過這種事情，帶頭反對這種立法的是號稱「三大」的通用汽車、克萊斯勒和福特汽車公司。

一九七五年，通用汽車總裁在國會一場聽證會中宣稱，「我們不要施捨、不要稅負、不要管制，我們不喜歡這種事情。」業界主管認為汽車業怎麼生產車子，應該完全由市場決定；也就是說，應該由消費者自行決定要買什麼樣的車子。此外，用很快的速度，準備生產比較小型的車子，要花費鉅資，汽車業者擔心如果消費者改變心意，重新愛上比較大型的車子，汽車業者的情況會很慘，會留下停擺的生產線，龐大的停車場上會停滿賣不出去的小型車。

底特律在一九七〇年代狂熱的能源政治情勢中，輸掉這場戰爭，一九七五年，國會制定新的統合平均燃油效率標準，規定汽車公司必須在一九八五年前，把汽車的燃油效率提高一倍，從當時每加侖跑二一·七公里，提高到四四·三公里。

幾年後，亨利·福特的孫子福特二世承認「在達成節約能源目標方面，由法律規定提升汽車能

源效率，比競爭性的自由市場力量還有效。」然而，他還是呼籲華盛頓，在一九八五年後，「放棄」提高能源效率標準的做法。

遭到包圍

管制經常像這個例子一樣，會取代市場的角色。從經濟學家的觀點來看，用比較偏向以市場為基礎的方法調節需求，也就是提高汽油稅，會比較有效，也是遠勝過法律規定的做法。這種稅會發出明確的信號，深深烙印在汽車買主腦海中，歐洲的情形就是這樣，今天歐洲每加侖汽油的稅捐可能超過四美元，相形之下，美國的汽油平均稅捐大約只有〇·四美元（其中十八·四美分是聯邦稅）。所得較低的人可能要負擔比較沉重的稅負，但是稅負會使汽車廠商比較有信心，知道汽油價格再度下跌時，自己可以重新調整生產線，生產燃油效率較高的汽車，不會碰到大量高效能汽車停滿停車場、賣不出去的困境；課稅也是比較簡單的做法，比較不可能造成扭曲，也會提供業者繼續創新的誘因。相形之下，法律規定的目標會變成上限，一旦達成目標，就沒有強烈的誘因繼續推進。

至少經濟學家大致上是這樣看待問題，然而，經濟學家不常競選國會議員；而且經濟學家認定的理性解決之道，在政客看來，卻可能是競選時的票房毒藥。

菲利浦·夏普永遠忘不了自己的一次經歷，夏普在美國國會服務二十年，曾任眾議院小組委員會主席，目前領導非政府組織未來資源機構，他回憶說，他投票贊成把聯邦汽油稅提高五美分後，在某一個星期六早晨，「回到自己的選區，走進郵局時，遭到憤怒的選民包圍。」

政客競選連任時，當然不希望碰到選民的這種反應（不過夏普連任多次。）相形之下，法規管制雖然有缺點，卻有一項重大優勢，就是看起來不像租稅。

換句話說，至少從經濟學家的觀點來看，管制可能是次佳的解決之道，從政治觀點來看，卻比較可行的方法。一九七五年燃油效率法的確就是這樣，隨著汽車的更新，汽油消耗上的節省會不斷累積，變成驚人的節省，就像「在底特律地下發現大油田」一樣。到一九八〇年代中期，和一九七三年的平均消耗量相比，燃油效率標準等於每天大約節省二百萬桶石油，和阿拉斯加北坡油田巔峰日產量相當，效果和美國能源政策在這段歲月的這項重大突破相同。能源效率標準對世界汽車工業也產生重大影響。

日本車開進美國

一九五〇年代末期，洛杉磯和舊金山居民在街頭上，可能看到一種奇怪又陌生的汽車一閃而過，這種車是豐田生產的皇冠S三〇車款，是第一款正式進軍美國市場的日本車。皇冠車款是東京很受歡迎的計程車，到了美國卻沒有好的開始；頭兩部車甚至爬不上洛杉磯四周的山丘，據說運交到舊金山的第一部車送去檢驗途中，在碰到的第一個山丘上熄火。舊金山一家汽車經銷商為了促銷皇冠車，派人開著這款車，繞著公共圖書館，倒車繞了一百八十圈，卻完全沒有效果，訂價一九九九美元的皇冠車根本不暢銷，隨後四年裡，一共賣出一千九百一十三輛。日本其他汽車廠商也開始對美國出口，但是銷售量仍然極低，大家認為日本車相當便宜，卻很不可靠、很怪異，是屬於首次開車族可能想買的汽車（沒有當時熱門進口車福斯金龜車那種活力和時髦。）

但是在一九七〇年代油價暴漲，促使大家開始注重燃油效率，為外國車、尤其是為日本車，打開了進口之門，因此，這種效能高超的小轎車突然間受到重視，開始風行，久而久之，日本車開始向高檔市場爬升，逐漸建立了品質良好、耐用可靠的名聲。

到一九八〇年代中期，石油和汽油價格崩盤，美國家庭油料支出占家庭預算的比率大幅下降。新車買主再度像過去一樣，不再注重價格、性能和可靠性，反而理所當然的注重汽車的樣式，燃油效率在考慮因素中的地位急劇下降，甚至完全不列在考慮因素之列。但是美國汽車廠商仍然必須達成燃油效率目標，同時，外國汽車廠商、尤其是日本廠商，現在擴大訴求，證明自己有能力滿足廣大民眾的需求。外國汽車廠商開始深耕美國市場，推動降低「外國」風味的策略。日本汽車廠商開始在美國生根，在美國設立工廠、研發發展中心和設計部門，也在美國各地成立合資事業，種種做法都有助於消除三大汽車公司和汽車工會激烈的反對。

新熱情

底特律依據美國的汽車法規，在後面苦苦追趕，生產比較小型的高效能汽車，以便符合美國的燃油效率標準之際，卻把重心逐漸轉移到一種叫做「輕型貨車」的較大型車輛上，尤其是一種過去並不存在的車輛上。

這種轉變從一九八〇年代開始，克萊斯勒推出一款新型的輕型貨車，這種車在開發期間叫做「T一五」，但是很快的就以迷你箱型車聞名。這時燃油效率標準實際上已經扼殺了旅行車這種主要汽車類型，旅行車是一九七三年前美國郊區生活的代表性交通工具，但是燃油效率標準使傳

統旅行車失去生存空間，因為傳統旅行車比一般汽車重，使用比較多的汽油，汽車廠商如果要符合燃油效率標準，就必須把旅行車排除在外。

然而，迷你箱型車屬於完全不同的類別，屬於輕型貨車類，因此在計算燃油效率時，具有重大的優勢，對燃油消耗也產生重大的影響。一九七五年美國制定燃油效率法規時，為輕型貨車訂定的目標標準比較低——每加侖要跑三三·三公里，汽車的標準卻是四四·三公里。事實上，大家不太重視輕型貨車，因為這種車的市場占有率小，美國銷售的新車當中，汽車占的比率超過八〇%，小貨車和箱型車大致上是農民和商人開的車，底特律廠商心裡幾乎沒有考慮過迷你箱型車和休旅車的構想。

現在迷你箱型車可以提供車主喜愛的很多功能，事實上，迷你箱型車可以提供超越旅行車的功能，卻不致造成汽車廠商無法符合燃油效率標準，以至於遭受懲罰。箱型車原本是送貨員、水管工人和電工開的車子，現在變成了大家喜愛的家庭車，這種新型的迷你箱型車空間夠大，可以容納父母親、子女、朋友、運動器材、行李和寵物，又具備對家庭友善、對父母親有用的功能，例如右邊的滑動式車門和咖啡架。用競爭者的話來說，克萊斯勒的迷你箱型車打出了「全壘打」。

克萊斯勒從現在已經關門的美國汽車公司手中、購買吉普汽車公司時，也打開了另一種新型車輛的大門，吉普車原本是戰時發展出來的堅固耐用軍車，現在變成了「休旅車」。一九九〇年，福特推出四門的探險家休旅車，休旅車的需求開始起飛。除了迷你箱型車和休旅車外，連根本不需要貨卡車的人也開始購買貨卡車，所有這些車輛，包括迷你箱型車、休旅車和貨卡車都屬

於「輕型貨車」。美國人紛紛搶購，到一九九〇年代中期，大家十分樂觀，談到「美國汽車的新黃金時代」。幾年前，克萊斯勒瀕臨倒閉，現在變成了「世界最成功的汽車廠商。」

福特探險家車款迅速變成最受歡迎的休旅車，福特的大敵通用汽車大感意外；通用在一九九〇年代初期，設想未來石油和汽油價格都會上漲，因此消費者應該希望購買效能較高的汽車，獲得比較高的燃油經濟。但是面對福特探險家車款和其他休旅車的龐大需求，通用被迫轉向，開始追趕，推出雪佛蘭先鋒車款，銷路卻不夠好。

通用汽車前執行長利克·華戈納說：「有時候，一種車子會毫無道理的風行起來。」休旅車和迷你箱型車變得很風行，華戈納回憶說：「需求超過供應，我們每天早上醒來，進入市場，都會發現我們沒有足夠的產品。我們根本沒有足夠的產能，生產這種比較大型車輛所需要的較大引擎。每次開董事會，我們都問同樣的問題：『為什麼我們沒有更多的貨車產能？』」

輕型貨車甚至界定了郊區「足球媽媽」這種新的人口階層，到一九九六年總統大選時，足球媽媽已經變成隱秘的重要階層，兩黨都向她們招手，但是不只有足球媽媽而已，也有足球爸爸和年輕成人。到一九九〇年代末期，美國人對汽車的傳統愛情變成了對休旅車的瘋狂熱愛。

從汽車迅速移愛貨車，對美國的燃油使用產生重大影響，因為新迷你箱型車或休旅車的燃油效率比新汽車低二五%，而且輕型貨車的數量快速增加。

但是熱情背後也有代價，十年極為便宜的汽油催生了休旅車和貨車，汽油價格極為低落，以至於消費者幾乎沒有感覺；事實上，一九九八年汽油支出占美國家庭支出的比率，比一九五〇年代和六〇年代還低。實質汽油價格降到有史以來的最低水準。

從一分比較歐美兩地的研究報告，可以看出價格的影響，因為稅負的關係，歐洲的燃油價格高多了，結果汽車採用的新科技當中，有五〇%是以提高燃油效率為目標，但是美國汽車業者一旦達成能源效率目標後，汽車採用的新科技當中，只有二〇%的目標是改善燃油效率，另外八〇%的新科技目標鎖定性能、安全性、大小、配件、功能和大家所說的「豪華配備」上，例如，一九八七到二〇〇七年間，汽車的馬力提高了八五%。

到二〇〇〇年，美國能源效率較差的輕型貨車銷售量超過傳統汽車，同時，不管是哪一種車，行駛里程都大為增加。從一九八五到二〇〇三年間，每輛汽車每年平均行駛里程大約增加了三〇%，從一九八五年的一萬五千里，提高到二〇〇三年的一萬九千七百公里。隨著美國經濟和人口成長，車輛總數也跟著增加。因為上述所有原因，一九八五至二〇〇三年間，美國的汽油消耗量增加了將近五〇%。

總之，汽車市場逐漸出現某種分工，底特律集中龐大火力，生產比較大型的休旅車和箱型車，日本、韓國和其他國家廠商靠著愈來愈多在美國生產的汽車和進口車，奪得愈來愈高的市場占有率。休旅車的利潤較高，能夠協助美國汽車廠商，應付和外國廠商競爭時碰到的不利因素，這種不利因素就是所謂的「遺留成本」，包括員工健保和退休成本，這種成本都是美國廠商在景氣很好的歲月裡，和美國聯合汽車工會談判時增加的成本，外國公司不必負擔。根據估計，每輛車的這種成本高達一千五百到二千美元，超過每輛汽車所用鋼材的成本。在這種情況下，美國汽車廠商幾乎沒有什麼誘因，因此不願意冒險投資十億美元，耗費五年的時間開發產品，為比較少的顧客生產燃油效率較高的新車款。日本人的想法不同。

汽車的再造

一九八〇年代末期，日本出現經濟大泡沫，領導豐田、創造數十年驚人成長的豐田公司會長（董事長）豐田英二，開始擔心席捲日本的滿足和自滿情緒，也擔心豐田可能受到這種情緒感染。隨後的幾年裡，他不斷思考汽車的未來，探討環境意識和能源安全對汽車工業的未來會有什麼影響，然後責成公司，推出適合二十一世紀的車款，新車款的效能要勝過豐田最暢銷的可樂娜車款，同時切合環境意識，而且要以「彌足珍貴、不能浪費」的日本文化價值觀為基礎。日本幾乎完全沒有蘊藏，能源供應岌岌可危一再困擾日本的情形，是美國汽車廠商無法想像的事情，一九九一年的波灣戰爭凸顯了日本依賴石油的風險。

所有這些因素都納入新車設計任務中，負責研發的小組叫做「G二二小組」，意思是「二十一世紀全球車小組」。

然而這項任務仍然極為含糊不清。G二二小組從成本和品質的角度考慮，得出一個重要的結論，就是電動車和燃料電池車實在是太遙不可及。到一九九四年，這個小組鎖定的構想是把兩種平行的傳動系統結合在一起——一種是汽油驅動的系统，另一種是靠電池驅動的系统。小組把這種車叫做「油電混合動力車」，油電混合動力車的設計中有一個吸引人的地方，就是要應用現有的基礎建設，同時利用液體化石油料的動力密度。小組考慮了一百多種不同的形態後，才決定基本的設計。公司裡有些人認為，這種車成功的機率只有五%，有些人甚至質疑小組推出的車到底是「不是」真正的汽車，或是認為這種車不該叫做油電混合動力車，比較適當的名稱應該是突變版

汽車。

這種車後來定名為普銳斯車款，普銳斯在市區裡走走停停時，會利用車上的電動機，但是需要額外的推力時，一種小型、高效能的內燃機會啟動。高速行駛時，完全由內燃機負責驅動。電池的充電一部分要靠汽油引擎負責，一部分要靠回收到的動能負責，也就是回收汽車煞車時排出的熱能，再把熱能轉變為電力（事實上，內燃機產生的能源中，大約三分之二以熱能或廢氣的形式排出）。小組把這種過程叫做再發電煞車，利用這種方法，一向是廢氣的熱能會轉變成為有用的電力，體現熱能「彌足珍貴、不能浪費」的精神。

要實現這種觀念很難，因為工程師必須接受兩種不同的引擎系統，讓兩種系統毫無差錯的運作。此外，研發小組必須在一九九七年前，準備好這種車款，配合這一年舉行的京都氣候變遷會議，因此承受極大的壓力。小組以超快的速度，設計全新的車款，勉強符合期限、達成任務。

但是市場是否接受普銳斯車款，仍然有待觀察，事實上，本田汽車在美國市場上壓倒豐田，率先在一九九九年，推出油電混合動力車英塞車款。本田採用不同的策略，是用本身著名的喜美車款，製造出「混合動力車」，而不是設計出全新的汽車。相形之下，普銳斯是全新的車款，二〇〇〇年才在美國開始銷售。

頭幾年裡，豐田或本田的油電混合動力車在美國市場中，都沒有什麼進展，一直到二〇〇三年前後，大家對氣候變遷和汽油價格上漲的疑慮升高，比較大型、比較有力的第二代普銳斯車款，才引起大眾的注意，變成油電混合動力車時代的模範車款。

普銳斯和其他油電混合動力車的銷售開始快速增加，油電混合動力車仍然比類似車款貴上

好幾千美元，而且這種車子要多開多少里程，才能賺回兩者之間的價差，也引發若干辯論。《消費者報導》雜誌從省錢的觀點，把車輛和油料成本列入考慮，質疑油電混合動力車是否確實優於能夠跑高里程的汽車，不過這點不是重點。雖然官方定出租稅獎勵，鼓勵大家購買油電混合動力車，但是這種車款不止是關乎獎勵和經濟考慮而已，駕駛普銳斯也是對別人和自己表態，表明車主關心環境、氣候變遷和對石油的依賴。隨著時間過去，油電混合動力車獲得認可，變成和環境意識有關的聲明，電影明星坐在由司機駕駛的普銳斯汽車上，抵達奧斯卡金像獎頒獎典禮會場。

備用計畫是什麼？

新世紀開始後，汽油價格上漲，汽車買主再度感覺到油價的壓力，更為休旅車車主帶來油價上漲的痛苦壓力。對底特律來說，這種情形是噩夢的開始，休旅車和其他輕型貨車開始攻占市場後，到二〇〇四年，市場占有率首次下降。但是美國汽車廠商其實沒有真正的備用計畫。輕型貨車是汽車廠商賺錢之道，似乎也是買主真正想要的東西，但是情勢已經改變，休旅車的銷售隨著油價攀升而滑落，為美國汽車廠商帶來壓力。廠商藉著降價、退款和提供零利率汽車貸款，設法爭取時間，希望情勢好轉。

政治形勢也出現變化，汽油價格上漲助長大眾的怒火。此外，部分民眾對石油進口和全球暖化的擔心，也開始發揮影響。這一切匯聚在一起，促使大家團結起來，主張採取三十年前不可能採取的行動，也就是提高能源效率標準。

底特律因為員工人數萎縮、很多工廠關門、活動減少，失去了原有的政治影響力。現在從豐

田、日產或本田設廠生產汽車各州出身的參議員不太擔心通用、福特或克萊斯勒的命運。豐田宣布要投資十三億美元，在密西西比州設立組裝廠、創造數千個就業機會後，密西西比州參議員特倫特·羅特宣稱：「我們現在是代表你們的戰士。」

同樣重要的是，大家在技術方面逐漸凝聚共識，認為現有內燃機的能源效率大有改善餘地，到二〇三〇年前，可以提高四〇%到五〇%。國家理事會代表美國國家科學院和國家工程院，以在政治上有點令人討厭的婉轉語氣，提出提高能源效率的主張，指出：「迫使汽車廠商改善新車能源經濟，和堅持低落的實質汽油價格之間，有著明顯的矛盾。」

新標準

二〇〇七年下半年，油價衝向每桶一百美元的高峰，中東衝突持續不斷，反對提高能源效率標準的政治力量消失。國會制定二〇〇七年能源安全獨立法，完成三十二年來的第一次壯舉，也提高了能源效率標準，目標是在二〇二〇年前，達到每加侖汽油可以跑五十六公里的目標。新目標同時適用汽車、休旅車和其他輕型貨車，和過去的標準相比，新標準可能表示每天可以節省多達二百萬桶的石油。新法也首次推動管制大貨車能源效率的過程，同時規定二〇二〇年前，美國每天必須使用二百三十萬桶的生質燃料。

布希總統簽署這項法案時，把這項法案稱為「減少我國對石油的依賴、對抗全球氣候變遷、擴大再生燃料生產，使美國更強大、更乾淨和更安全的重大步驟。」

這項法案立法之路接近盡頭時，出現意外的障礙，國會通過新標準後，法案仍然需要總統簽署，才能變成法律，因此實際上，必須有人開車經過賓州大道，把法案送到白宮。二〇〇七年十月十九日，國會職員執行這項通常相當標準的平凡送件程序，只是送件車是日本豐田公司生產的省油普銳斯油電混合動力車，讓美國汽車廠商極為不滿。豐田不但是通用汽車的大敵，當時豐田即將取代通用，變成世界最大的汽車廠商。不是每個人都相信用普銳斯送件只是意外，密西根州一位眾議員憤怒的譴責用普銳斯送件，是刻意「打美國每一家汽車廠商一大巴掌」。

雖然這件難堪的事情確實是意外，卻似乎象徵世界已經改變，普銳斯的銷售起飛，到了美國豐田公司首腦稱之為「我們所有過最暢銷汽車」的程度。市場赤裸裸的顯示消費者需求的轉變，顯示市場已經從一個汽車時代轉變到另一個時代。二〇〇七年內，美國人購買的普銳斯數量，超越過去最暢銷的福特探險家車款，探險家車款是十年來美國休旅車的象徵，也是美國汽車廠商熱情擁抱輕型貨車的象徵，但是現在小型、省油、有人斥之為突變版汽車的油電混合動力車，意外的推翻了勢力強大的休旅車。

第十九章

偉大的電動車實驗

哈根史密斯是沈迷於植物的園藝狂，他任職加州洛杉磯郡巴沙迪納的加州理工學院，主要研究植物生理學，特別是植物氣味所產生的化學作用。這位荷蘭出生的教授以植物荷爾蒙方面的研究享譽全球，他不但找出葡萄酒、洋蔥、大蒜的味道成分，還發現大麻的有效成分。

一九四八年，哈根史密斯埋首在自己的興趣裡：鑽研鳳梨味道的化學成分。有天下午他走出實驗室，打算休息一下，吸口新鮮空氣，但空氣一點都不新鮮，周遭全是刺鼻的味道，那是「每到下午就瀰漫在空中的惡臭煙塵」，他覺得肺部快喘不過氣來，禍首就是經常籠罩在南加州的煙霾，這種煙已成為洛城司空見慣的景象。

當時學界對煙霾的成因爭論不休，究竟是工業汙染造成？還是一百五十萬戶人家在後院焚化爐燒垃圾的結果？或有其他因素，例如車輛數目暴增？哈根史密斯憑著微量化學的專長，斷定「應該不難找出煙霾真正成因」，於是他把心愛的鳳梨暫擱一旁，開始在試管裡製造煙霾。

哈根史密斯的判斷沒錯，找出原因的確不難，事後他說：「我們第一次下注就中了頭獎。」哈根史密斯證明，真正的元凶是汽油燃燒不完全，從車輛排氣管排放出來的廢氣，以及從

儲油槽與汽車油箱飄散出來的氣體。這項發現與日後他對防治空氣汙染所做的貢獻，使哈根史密斯被譽為「煙霾之父」，不過他對這個頭銜一點也不興奮，他會問如果他是「之父」，那「之母」是誰？

哈根史密斯或許找到煙霾的成因，當局卻花了很多年才解決，且過程混淆不清、複雜難解、經常充滿爭議。他第一次公布研究結果時，批評家戲稱他是「科學版的唐吉軻德」，有些人則相當驚訝，原來塑造出南加州生活方式的汽車，竟是痛苦的根源。有市民在震驚之餘，投書到《洛杉磯時報》：「我們建造出全國最好的高速公路網，如今赫然發現我們也製造出一隻怪獸。」

對某些人來說，哈根史密斯在一九四八年的發現，終將導致福特T型車問世以來最重要的交通變革；二十世紀業界費了九牛二虎之力，把二十世紀初從街頭上消失的車種再找出來，那就是根本沒有排氣管的電動車。

比賽恢復

石油稱霸運輸領域將近一個世紀，地位似乎無可動搖，不過二十一世紀初期，民眾開始質疑這種情況會持續多久？但直到二〇〇七年時，關於未來汽車運輸的辯論，焦點都集中在生質燃料，電動車只是次要話題。

然而幾年之內，電動車將躍居為主要議題，支持者宣稱，電動車可以擺脫石油對運輸的限制，駕駛人不會受到石油出口國動亂的干擾，也不必忍受高油價；電動車還有助於減少汙染，降低碳排放，減緩氣候變遷。世界如何容納從十億增加到二十億的車輛？電動車可望對這個大謎團

提供強而有力的解答。電動車的電力來源很多，但沒有一樣需要石油，或許比起其他科技，電動車對全球能源體系來說，代表未來截然不同的選項。

電動車的前景如此看好，以至於世人對電動車的期望，遠超過實際銷售數字所帶來的真正影響，至少未來十年或二十年是如此。儘管電動車賣的很少，但早在銷售數字產生影響之前，就會改變世人對石油與汽車的態度。往後數十年，電動車的影響可能更大，但也出現兩個大哉問：電動車的售價能否如業者所保證，是民眾負擔得起的嗎？消費者會選擇讓電動車成為主流車種，而不是冷門商品嗎？

同時，電池與內燃機之爭、電力與石油之爭，這種原本該在一個世紀前就該分出勝負的競賽，如今又捲土重來，且吸引大筆資金押注，比賽結果對經濟與地緣政治都將具有重要影響。

愈來愈多人相信電動車會形成偉大的「新產業」，是清潔科技的典範，邁向全球汽車業領導地位的方法。對企業、創投業與投資人而言，這是千載難逢的機會。但這不光是搶占市場的機會，法國一位部長級官員揚言「電動車之戰已經開打」，歐洲某位經濟領袖也說：「電動車是工業革命的未來與推手。」二〇一〇年時，歐巴馬政府提供五十億美元的補助與貸款擔保給電池製造商、創業者、各大車廠與設備供應商，以扶植電動車產業及發展該產業所需的基礎建設。歐巴馬宣稱：「美國已創造一個嶄新的產業。」

這的確是一場國際競賽，對中國和南韓等新興國家而言，電動車是在關鍵成長產業中爭取主導地位的良機；反之，美國、日本與德國等傳統汽車大國，如果還想保持既有優勢，非得在電動運輸產業告捷才行。如果電池是「新石油」，那麼贏家的電池專業技能與生產，將在全球經濟占有舉足輕重的地位，可以坐享其成。

煙霧圍城

早在第一個西班牙殖民者抵達南加州之前，當地的印第安人就以「煙霧谷」來稱呼此地，因為自然的排放物加上柴火冒出的飛煙，形成障礙視線的灰霧。南加州的地形像個碗，一側靠海，另一側被群山圍繞，形成特殊的「逆溫」現象，也就是海洋上方的冷空氣被谷地較暖的空氣所覆蓋，造成空氣無法對流，也製造更多汙染，汙染物移動到上方的暖氣層時，被太陽一曬，就會經由光化學作用變成煙霾，滯留在盆地上方。

洛杉磯在二次大戰期間，遭遇現代第一場霾害，當時各地工廠都卯足全力趕工，以滿足動員需求。洛杉磯為了因應霾害，一九四五年設立煙塵管理局，但成效不彰，戰爭結束後，霾害愈來愈嚴重，受災範圍持續擴大，證明煙霾非但沒有受到控制，反而變本加厲。

一九五四年十月一日，霾害在毫無預警下席捲整座城市，長達數週之久，造成這次霾害的天候堪稱完美的組合，天乾物燥、空氣沈悶、連一點風都沒有，洛杉磯盆地頓時籠罩一層灰藍色的濃霾，民眾開始覺得肺部疼痛，每次呼吸都很痛苦，喉嚨灼熱，眼睛因受到刺激而發癢、流淚與腫脹，甚至造成永久性的呼吸道疾病。

能見度異常低，即便在正午時刻，駕駛人行駛在高速公路上都得打開車頭燈，行車速度有如蝸行牛步，意外事故變成當地特有的風土病。洛杉磯國際機場被迫關閉，班機必須改道，學校也取消戶外的體育課程與休假，學生全部留在教室裡。

整個洛杉磯變成一座圍城，人心惶惶，運作停擺，警察局的電話塞爆，但警方也愛莫能助，《洛杉磯時報》的頭版頭條新聞變成「憤怒的市民向霾害宣戰」，應法院傳喚出庭作證的洛城市長告訴大陪審團，除了宣告「停駛汽車，下令市民回家」，他已無計可施。家庭主婦戴上防毒面具，走上巴沙迪納街頭抗議空氣汙染，企業人士仍照例參加樂天派俱樂部的集會，但防毒面具確實妨礙他們用餐，他們背後的牆上掛著一張大海報寫著：「何須等到一九五五年，我們或許已不在人世」，這個惱人的問題一定要設法解決。

到了十月底，說也奇怪，倏忽而至的灰霾卻在瞬間消失的無影無蹤，《洛杉磯時報》特別報導「全市盡情享受沒有灰霾的好天氣」，數天後報紙宣告戰勝灰霾：又看到「晴朗的天空了」。這次霾害總算結束了，但只是暫告一段落。

空氣資源局

一九五四年的霾害是歷來最嚴重的一次，卻也是個轉捩點。如果要消除塵霾，政府主管機關必須對汽車排放物進行持久戰，這是一場漫長的戰爭，隨後的十年裡，洛杉磯每年發布的灰霾警報都超過一百天。有一回霾害嚴重到連加州州長雷根都上電視呼籲民眾「除非萬不得已，否則請勿開車出門。」新移民不斷湧入使霾害問題變得更棘手，一九五〇到一九八〇年，加州人口增加一倍，使該州成為「全球汽車最密集之地」。

一九六七年，雷根州長簽署設立新機構的法案，加州空氣資源局就此誕生，這個簡稱為CARB的新組織取代煙塵管制局，雷根任命的首位局長，正是「煙霾之父」哈根史密斯博士。他不再是的形容他是汽車業的「法官兼裁判」，之後加州空氣資源局便一直扮演這個角色。

加州嚴重的汙染問題及其快速增加的政治影響力，使國會在同一年授予加州特別的權限，允許州政府自行規範廢氣，只要其排放標準高於聯邦的規定。

加州空氣資源局的權限也擴大到加州以外地區，因為國會同意其他州政府可自行選擇，看是要遵守聯邦的規定，或遵守加州空氣資源局設定的標準，這等於讓加州首府沙加緬度成為中央級的空氣品質把關者，與華府平起平坐。

最後加州空氣資源局變成實質的國家級機構，這是情勢使然，加州占全美汽車市場的十二%，其他州政府，特別是新罕普什爾與佛羅里達，都以加州空氣資源局馬首是瞻，導致加州空氣資源局能夠規範全美三分之一新車的廢氣排放量。如果有三分之一的新車遵守加州空氣資源局的規定，其餘的三分之二也會跟進，畢竟汽車製造商很難為相同的車款打造不同的規格。所以如果加州空氣資源局發布的命令足以左右汽車的設計，就等於是準聯邦機構。再者，以美國市場的規模而言，世界其他國家也會受到影響，就如同加州空氣資源局主管在二〇一一年謙稱的：「加州空氣資源局是有點撈過界了。」

加州空氣資源局與南部海岸空氣品質管理局為減少廢氣排放，引進強制性的科技導向規定，強迫業者在特定時限內想出解決辦法。等一段時間後，就會出現技術性突破，其中最重要的首推觸媒轉換器，確保汽油可以完全燃燒，從而減少會形成塵霾的廢氣排放。一九九〇年代，加州每年發布的灰霾警報已銳減至十天以下，一九九〇年代末期，新車排放的廢氣只有一九七〇年代的

一%，其餘的九九%都消失了。

強制性的科技導向規定有效解決灰霾問題，加州空氣資源局想依法行政，消除所有汽車排放物，於是下令實施零排放汽車（ZEV），目的無非是尋找內燃機的替代品，或促使業者著手研發替代燃料。一九九〇年加州空氣資源局發布最具前瞻性的法規，等於重新為電動車打開門戶。新規定要求一九九八年時，加州銷售的新車必須有一%是零排放汽車，二〇〇三年時，此一比率將提高到一〇%，零排放意味著汽車排氣管不能有排放物，換句話說就是省掉排氣管，沒有內燃機。

大型汽車製造商決定照辦，投入大筆投資資金，但下場淒慘無比，有部紀錄片提出「誰殺了電動車」的問題，探究通用汽車公司製造的電動車一號（EV1）為何鐵羽而歸，電動車一號的設法完全符合加州空氣資源局的嚴格規定，通用也為此砸下十億美元的經費。這部影片把罪魁禍首指向汽車業，但答案並非如此，加州空氣資源局一名委員說：「真正的元凶是電池」，當時汽車電池可行駛距離與時間都很短，根本無法滿足民眾需求。

另一個原因是缺乏大眾支持，一些車廠開辦出租電動車業務，像豐田不但出租，還設法銷售小型休旅車RAV4的電動車款，同時上市的還有油電動力混合車普銳斯，結果市場對普銳斯的反應非常熱烈，銷售數量是RAV4的好幾倍。

豐田一位主管回憶說：「我們一直聽說電動車的 demand 受到壓抑，事實證明初期的需求約五十輛。」之後儘管RAV4猛打廣告，豐田也得到政府大筆補助，這環保車一週只能賣出五輛，一年頂多賣掉二百五十幾輛，對製造商來說，新車款一年至少要賣十萬輛，才說得上是超越「利基」型產品的大量銷售車種。電動車吸引不了買氣，加州空氣資源局雖然心不甘情不願，只能被

迫收回成命，但只是暫時讓步。

電動車敗部復活

隨著新世紀的來臨，多項因素同時匯聚起來，讓電動車「死而復生」。

汽車廢氣造成的環境汙染，不但令民眾苦惱，也成為美國公共政策的主要議題，隨後十多年裡，從墨西哥市到北京等都會區，都面臨相同的困境，也想解決空汙問題。如今又多了氣候變遷這個新理由。雖然交通運輸只占全球二氧化碳排放的十七%，但絕對數量很大，而且可能變得大多了。油價節節上漲也讓民眾對電動車重燃興趣，因為電動車可以讓消費者免受油價波動的威脅，淡化油價震撼的衝擊。

另一項發展也得到民眾支持，油電混合動力車對開車族的心理產生重大影響，有點像是一座心理橋樑，讓民眾願意接受電池驅動的汽車，表示電力在交通運輸上可以扮演更重要角色。

這些因緣際會使電動車離開汽車博物館，重新開上大馬路。和上一個世紀相比，現在有兩大類電動車問世，一是直接承襲愛迪生的想法，純粹由電池驅動的汽車（EV），完全仰賴電力，而且要從插頭充電；另一種是變型版的插電式混合電動車（PHEV），這種車源自油電混合動力車，但比普通更接近電力車，必須接上主要的燃料——電力，不過等靠電力行駛一段距離，電池的蓄電量減少時，就改由內燃機接手，為電池充電或直接驅動引擎，或兩者同時進行。

其實，業界研發插電式混合動力車已長達數十年，但幾乎不受重視，直到二〇〇七年情況才改觀。通用汽車公司在當年底特律車展推出雪維伏特插電式混合動力車（PHEV Chevy Volt）概

念車，一亮相就博得滿堂彩，於是通用決定正式量產伏特車款。短短一年內，伏特車款就把公眾的注意力從生質燃料轉移到電動車。

一位政治觀察家說，二〇〇八年總統大選時，「底特律的插電式混合動力車成為競選人必備的政見」，儘管通用汽車財務告急，兩大黨提名的總統候選人歐巴馬與馬侃，都爭相拉攏這輛車；馬侃得意的說：「現在全世界都在看伏特」，他的對手歐巴馬也在選戰中發下豪語，承諾二〇一五年時，會有一百萬輛類似的混合動力車與電動車上路。

發展藍圖

此後，世界各國紛紛推出鼓勵混合動力車與電動車的 policy，同時，拜政策之賜，與能源有關的技術也出現大量創新，經濟前景看好，科學與科技上的精益求精，也產生推波助瀾的效果。

美國非政府組織支持的政策企業家對電動車影響甚鉅，二〇〇九年成立的電動車聯盟為電動車擊劃出藍圖後，民主與共和兩黨照單全收。

聯盟主席、同時也是聯邦快遞公司創辦人兼執行長史密斯表明，聯邦快遞有意採用電動車來遞送包裹，不僅如此，他還說：「我們不能讓電動車變成用途有限的利基型產品，不能變成只是環保與科技人士的愛用品，為了讓國家的投資值回票價，更重要的是為了對抗對石油的依賴，我們必須帶頭製造數以千萬計、數以億計的電動車。」

就像史密斯所見，在汽車數量可能倍增的情況下，光想靠石油滿足民眾對交通的需求，不但充滿挑戰，更是一大冒險，所以燃料來源必須多元化，不斷改良的電池使電動車看起來最切合實際需要，充電不是難以克服的障礙，「你得幫車子充電，每晚我幫黑莓機充電，是因為它提供寶貴的价值。」

通用汽車公司與克萊斯勒宣告破產，得靠美國政府挹注數十億美元拯救，讓歐巴馬政府找到更好的理由推廣電動車。對抗美國經濟衰退所推出的振興方案，也同樣適用於汽車業。大衛·桑德羅獲得提名出任歐巴馬政府的能源部副部長之前，出版過兩本書，描繪出電動車普及化的藍圖。這兩本書分別是《擺脫石油》以及《插電電動車：華府該扮演的角色》。美國國會隨後推出的電動車推廣法案，幾乎是照著這兩本書的內容依樣畫葫蘆，包括電動車製造商可獲得租稅減免；電動車的買主，以及家庭或公共充電站的投資人可享有租稅扣抵。

在這個新世紀裡，加州空氣資源局更關注對抗全球暖化問題，於是又搬出零排放汽車的老規定，只修改了時限，要求二〇一二年時，所有汽車廠商都必須在加州推出零排放的車輛。加州空氣資源局一開始把目標訂的很低，且零排放也包含使用燃料電池的汽車在內，不只是電動車而已。但接下來的推廣速度會很快，促使車廠得趕緊設法生產出全電動汽車。

不過，電池的老問題仍未解決，當年零排放汽車就是卡在電池才無疾而終。

電動車的 core 技術在於電池，推廣電動車需要電池技術的大幅躍進。基本的鉛酸電池技術可以回溯到十九世紀後半葉，其他電池技術陸續推出，但鉛酸電池仍舊是汽車產業的主流。

到了一九七〇與八〇年代，埃克森實驗所的科學家研究出方法，讓鋰這種輕金屬可以製造新一代的充電電池。一九七〇年代的石油危機，以及對石油持續短缺的憂慮，使電動車再度受到青睞。一九七六年，美國國會通過立法，對「電動車與油電混合車」的研究提供補助。同一

年裡，《富比世雜誌》報導說：「電動車的重生，就和我們必須戒除對進口石油的依賴，同樣不容置疑。」好幾家車廠都投入研發電動車。到了一九七九年，正值伊朗石油危機之際，《財星雜誌》宣告「電動時代降臨」。不料隨後油價開始下跌，全球石油供應無虞，導致電動車熱潮再次消退。

不過，鋰電池後來由另一種產品善加利用。一九九一年，索尼公司（SONY）率先推出使用鋰電池的消費電子產品。這種電池體積更小、效率更佳，可以讓筆記型電腦在充電後續航更久，跑的更快。鋰電池也催生了另一種科技產品，使行動電話手機可以大幅縮小體積，造就了手機革命。理論上，鋰電池的儲電密度集中，加上成本下滑，更適合電動車使用。鋰電池的效果比第一代油電混合車使用的鎳氫電池，或者現代汽車必備的鉛酸電池都好。但這一切備止於理論，還沒有上路接受實際考驗。

電動車動力大

在推展電動車方面，主管機關位在一端，另一端是發明家、工藝家、企業家和少數醉心電動車的熱心人士，其中很多人住在加州。

阿爾·柯可尼是其中一位，他曾經參與設計通用汽車命運多舛的電動車一號，從中得到啟示，再根據這種車的理念，製造出名叫零時間的超級電動車，可以在短短四·一秒內，從靜止加速到一百公里。

二〇〇三年，柯可尼和剛剛退出網路熱潮的兩位矽谷企業家接觸，其中一位是貝寶（PayPal）

共同創辦人艾龍·穆斯克，穆斯克賣掉貝寶的股權後，創設太空公司，經營商用太空梭業務，希望藉此達成自己更大的願望，促成人類殖民火星。另一位企業家馬丁·艾伯哈德投資柯可尼十五萬美元，要他實驗一種由極多鋰離子電池構成的不同電池包。柯可尼接受這筆投資，做了一些修改，結果車子只要花三·六秒，就可以從靜止加速到一百公里。

不久之後，艾伯哈德和穆斯克聯手，推動運用柯可尼所研發科技的授權業務，他們看出鋰離子電池電動車的潛力，希望把這種電動車推展成主流車種，這種鋰電池重量較輕、能源密度較大，可能改變電動車觀念的遊戲規則。

電動車在經濟效益上根本沒有競爭力，不過，穆斯克和艾伯哈德推想，這種車在對加州至關緊要的矽谷具有競爭力，又符合矽谷業者的風格、活力、性能和喜好宣傳的特質。這種車結合普銳斯車款和跑車代表的價值，看來不像超大的高爾夫球車或搬貨車，比較像是偶像級電動跑車。兩人把這種車取名特斯拉車型，為的是紀念十九世紀的怪才發明家特斯拉，西屋就是利用特斯拉想出來的交流電，打敗愛迪生發明的直流電。

兩人座的特斯拉路斯特車款採用蓮花汽車的艾麗斯車款底盤，加上額外訂製的配備後，變成昂貴而時髦的跑車，訂價高到只有不太在乎價格的車主才買得起。如果這款車暢銷，一定會成為踏腳石，引出另一世代比較莊重、比較具有經濟競爭力的電動車。

生產特斯拉車款並不容易，必須把將近七千個筆記型電腦用的現成鋰離子電池併在一起，變成極為強而有力的超級電池。這種新車種的工程技術和設計問題十分艱鉅，公司在設計、生產上錯過一個又一個目標，特斯拉公司科技長史特勞貝爾指出，「我們極為了解其中的挑戰，這款車

幾乎每個主要系統，包括車身、暖氣空調、馬達、動力電子、傳輸、電池包等系統，都必須重新設計、重新開模或改找新供應商。」路斯特的生產在科技和資金兩方面，都面臨重大挑戰。

然而，特斯拉車型對汽車工業提供了一些重要啟示，包括鋰電池可以用在汽車上，使電動車變得實用多了。通用汽車前副董事長羅伯·魯茲說，這點代表「突破困境的關鍵」。第一部特斯拉汽車在二〇〇八年交車，二〇〇九年，特斯拉公司獲得美國政府四億六千五百萬美元的貸款保證，後來公司引進投資人兼合夥人戴姆勒與豐田兩家公司。二〇一〇年六月，特斯拉公司公開上市，是一九四六年福特汽車公司公開上市以來，美國汽車工業的第一件公開上市案，公開上市後，該公司的市值為二十億美元，這時公司大約已經賣出一千輛路斯特車款，不到一年後，公司在華府離白宮六條街外的地方，設立展示銷售據點。

特斯拉路斯特車款從靜止加速到一百公里，花的時間不到四秒，開起來可能很刺激，車價即不大眾化，入門車款要價十萬九千美元，扣除聯邦政府七千五百美元的租稅抵減後，「只要」十萬一千五百美元。此外，用一百一十伏特的電流為電池充電，大約需要三十二小時，用二百二十伏特的電流充電，要花四個半小時，不過公司承諾未來充電可以加快。大家把路斯特車款視為「限量版汽車」，將來公司會推出特斯拉S車款豪華轎車，取代路斯特車款。

不論特斯拉未來商業展望如何，都已創造重大成就，特斯拉顯示電動車根本不是只能搬貨、不是只能在高爾夫球場上開，特斯拉更顯示環保車也可能是超級車。

同時，其他企業家也加入戰局，設法用不同的事業模式，尋找不同的利基。半屬加州、半屬中國的科達達汽車公司正設法推出級數不如路斯特車款，但很多人買得起的平價電動車。

年輕軟體工程師夏伊·阿加西根據大不相同的事業模式，推動自己的電動車觀念。他的公司不生產汽車，而是擁有租給車主的電池，他的公司也要在加油站內，找地方設立新的「電池站」，讓車主在車上電池電力耗盡時，開來換電池，服務人員會取下車上的電池，換上重新充電過的電池。

二〇〇七年，阿加西正式創設更好地方公司，到二〇一〇年，公司已經募得七億美元資金，計畫和法國雷諾汽車公司合夥，在以色列與丹麥設立充電網路，雷諾汽車已經設計新車款，配合這種充電系統。然而，這種作法會碰到很多挑戰，其中之一是電池規格沒有標準化。電池驅動電動車和插電式混合電動車可能在大小、重量和電池行駛里程方面競爭，起動汽車工程的鉛酸電池用了幾十年，到現在都還沒有標準化。

理論上，更好地方公司希望車主來更換電池，在功能方面，好比體驗開車到加油站加油的經驗，只是更換電池沒有自助式服務。

領先群倫

今天所有大車廠都設法推出電動車，彼此之間只有信心方面的差異，所有汽車廠商當然都樂於找出方法，減輕高油價對汽車廠商的傷害，但是國際大汽車廠中，沒有一家像日產雷諾公司這麼熱衷開發電動車，也沒有人像日產雷諾執行長高恩這麼直言無隱。

擔任這家全球公司主管的高恩極盡國際化之能事，高恩在黎巴嫩和巴西成長，在法國接受高等教育，曾經經營美國米其林輪胎公司，然後出任雷諾汽車公司高級經理人，雷諾和日產汽車公

司結盟後，高恩出面拯救負債二百億美元、瀕臨崩潰的日產汽車，把日產從險境中救活，一戰成名後，出任兩家公司的執行長。

豐田汽車產銷油電混合動力車普銳斯車款，本田汽車產銷性能優越、燃油效率高超的汽車引擎，以「引擎公司」聞名，相形之下，日產以開發「全電動」汽車的作法，奪得明顯的優勢，但這一點是日產碰到財務困境時意外出現的商機。

一九九九年高恩抵達日本後，幾乎大砍每個部門的成本，但是砍到電池計畫時，看到一些東西，卻停手不砍，高恩說：「日產研究電池已經有十八年，我和這些工程師見面時，確實受他們感動，他們認為電動車或許可行，大家可能也買得起，我不知道，但是我對他們的熱情深為感動。」日產財務十分艱難，電池計畫卻沒有遭到刪砍。高恩補充說：「有時候，你要到事後才想得通。」

到二〇〇二年，日產在鋰離子電池科技上有了突破。高恩說：「二〇〇三年後，日產已經起死回生，但是，讓我十分訝異的是，我們因為沒有油電混合動力車，遭到極多批評，我自問大家為什麼對這種車這麼熱心，知道大家極為關心環境。同時，油價上漲，加州即將推出非常強而有力的環保法規，如果沒有某種新科技，我們就不符合規定，我們必須突出奇兵，立刻開始生產電動車是唯一的解決之道。沒有環保車，你不可能把銷售額從八億五千萬美元，提高到二十億美元。」日產擁有旗下工程師認定的真正電池科技，高恩因此下令全面動員，發展新型的全電動車。

公司內部的反應分歧，有些人覺得困惑，質問公司為什麼不試產可以和其他車廠競爭的油電

混合動力車？有些人樂於看到公司努力設法在新科技上爭取領先地位。

日產也會生產自己的油電混合動力車，但高恩只把這種車看成過渡性科技，高恩說：「如果你擁有效能高超的油電混合動力車用電池，為什麼不直接用來生產全電動車？生產零排放的車輛？」

因此日產計畫動用數十億美元，開發全新的全電動車。高恩說，這種車子「沒有排氣管，不用半滴汽油，而且不只是放在汽車展中展示而已，而是大家買得起的大眾車。」二〇一〇年秋天，日產推出Leaf車款，Leaf代表領先（Leading）、對環境友善（Environmentally friendly）、平價（Affordable）和家庭（Family）。車上裝有重二百七十二公斤（六百磅）的鋰離子電池包，日產承諾這種電池的平均行駛里程大約為一百四十四到一百六十公里（九十到一百英里），最高時速為一百四十四公里。日產預期到二〇二〇年，電動車銷售會占日產總銷售量的一〇%。高恩說：「唯一短少的東西是真正的規模，為了達成規模，我們必須降低電池的成本。」

高恩宣稱：「真正的零排放競爭已經開始。」對他來說，這是加州空氣資源局描繪的真實世界。他說：「這種車不是賭博，和零排放有關的問題是什麼時候開始實施？我們要從現在開始，還是五年後才開始？我們的競爭對手看法可能不同。」但日產相信「現在就是開始的時候。」

電力從何而來？

過去二十年的大部分時間裡，先進電池世界的中心落在亞洲、日本和南韓。美國雖然努力推進，日本和南韓企業卻加倍努力，畢竟，通用伏特車款用的電池就是南韓樂金化學公司的產品。

樂金化學為了因應美國的新政策，急忙在密西根州創設了一座工廠。

美國汽車工業在政府的強力獎勵和支持下大力擴張，歐巴馬政府預測，到二〇一五年，美國大約會擁有世界先進汽車電池產能的四〇%，遠超過歐巴馬就職時的二%。

但電池只是公式中的一半，另一半是充電，是可靠、快速、方便的把電充進汽車裡。日本公司已經組成聯合企業，公司名稱是「至少喝點茶」的雙關語，意思是充電時間應該加快到不超過喝一杯茶的時間，目前雪維伏特車充電需要四到十小時，是喝很多杯茶的時間，但很多專家正在努力找出方法，希望把充電時間降到少於喝一杯熱茶的時間，也就是等於加一次油所需要的時間。

目前電動車的一般理論都是利用夜間電力需求最低時充電，這樣會為電力公司創造新市場，同時平衡電力負載。這個市場會很大，夜裡為一輛汽車充電，需要的電力大約等於兩棟房子二十四小時的用電量。換句話說，如果到處都是電動車時，電力公司的住宅供電幾乎會倍增，卻不必新建多少發電裝置容量。

過去幾年裡出現一種令人興奮的新展望，風電和太陽能發電會產生新電力，然後利用大為擴大的現代化電網長途傳輸，送到人口密集都會區的智慧電網，再配送到住宅或充電站，充進電動車電池裡。有人甚至進一步擴大這種展望，想像電動車會扮演儲存系統的角色，成為「流動」電池，在不必放電時，把電力回饋到電網中。

但是，這種情形和今天既有的電力系統大不相同，目前再生能源只占電力系統總供電量的二%不到。史丹佛大學教授席柏認為，很多電動車會變成他所說的「在異地排放」的汽車，也就是和運輸有關的排放與溫室氣體不會從排氣管排出，會變成可能從為電動車充電的燃煤火力發電

廠煙囪排出。因此，大家也必須考慮發電方式，看看發電燃料是鈾、煤炭、風力，還是其他燃料？燃料會不會用天然氣？因為天然氣排放量大約只有煤炭的一半，而且因為世界性頁岩氣的生產突破，天然氣的供應十分充沛。最後這種可能性也提供了用天然氣取代石油，當成大眾汽車燃料的展望。天然氣其實應該當成汽車燃料來用，卻間接用來生產最後充進電動車電池裡的電力。

電動車多快能夠打開前途？根據不同情境的預測，估計到二〇三〇年，全球兩種電動車新車年銷售量所占的比率，會介於十到三二%之間。根據最樂觀的情境預測，電動車的全球普及率應該會提高到十四%。

政府政策會變成實際結果如何的決定性因素，因為由管制、獎勵和補貼構成的政策是今天推廣電動車發展的依據，也是目前電動車計算經濟效益的基礎。創新可能像福特T型車一樣，改變這種計算，壓低成本，這是今天實施各種政策、獎勵與補貼的主要原因，目的是要刺激更大的規模，鼓勵大幅壓低成本的創新。因此隨之而來的重要問題是：目前把電動車變成主流汽車的這種政策有多穩定？畢竟歷史顯示，過去的能源政策具有鐘擺效應的性質，會從一邊盪到另一邊，再盪回來。

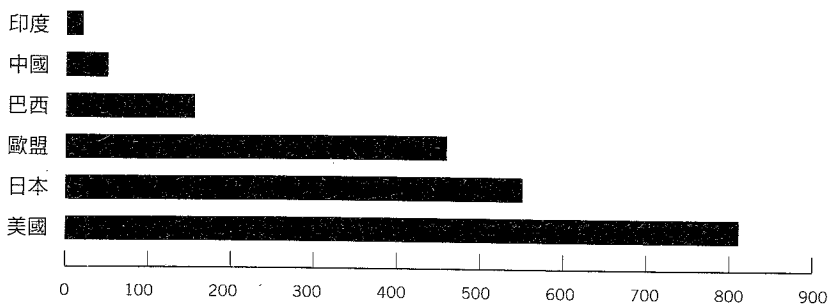
熱失控？

電動車已經開始生產銷售，但是從大眾市場產品的角度來看，電動車還是一種重大實驗，前面還有不少重大障礙有待克服。

電池需要變得更小、更輕、充電更快、充電一次能夠使用更久，也必須證明不怕一再充

圖 19-1 汽車擁有率落差

2010年每千人汽車車主比率



電、放電，仍然耐用，還必須證明不會發生破壞性過熱的「熱失控」問題。電池除了要推動汽車外，也必須擁有足夠的電力容量，以便驅動車主所期望的所有其他配備，如動力方向盤、空調、行動娛樂中心。成本也必須大幅下降，除非政府有能力、也樂於繼續提供大規模的補貼。

為了解決這些問題，電池現在是全世界投入充分資金、進行密集研究的焦點。整個研究的競爭也十分激烈，事實上，整個研究已經變成全球性的「電池競賽」，同時各國也在為電池科技的「學習曲線」處在什麼位置、多快會降下來辯論不休。

基礎建設是第二個挑戰，今天的汽車系統能夠順利運作，靠的是經過多年建立起來的綿密加油站網路，數量龐大的電動車隊需要類似的充電站網路，社區裡的一部電動車可以輕鬆的用延長線充電，同一條街、下一條街和下三條街的每一個人都決定同時充電時，電力系統中的變壓器會變成什麼樣子？

此外，汽車廠商在預訂車主和早早駕駛電動車的駕駛人之外，也必須打動其他車主。通用汽車前執行長華戈納說，一九九〇年代內，通用汽車「拚命補貼電動車一號，但是，如果顧客不想買，汽車廠商就難過了。」電動車必須吸引大量車主，為了達成這種目標，都會區和鄉下都必須廣建方便、可靠的充電站，確保車主不會陷入動彈不得的困境。

政府能夠實施的管制、獎勵和補貼一定有限制，買主必須找到合乎自己意願的價格、功能、性能和可靠性，這種事情需要時間證明。明白的說，所謂的「里程焦慮」——擔心電池電力用光、車子動彈不得的恐懼——會變成顧客實際購車時的主要考慮因素。

解決之道可能是針對這種需要，根據不同車種、不同目的，進行分析。大家可能利用都會小型電動車通勤、滿足地區性的需要，長途旅行或度假時，就開比較大型、以汽油為燃料的汽車或油電混合動力車。同時，任何新車推出時，總是會有意外的操作或性能風險，對大眾的電動車接受度產生不利影響。

最後還有電力供應問題，大家通常認為，電力公司擁有充足的未利用發電裝置容量，可以應付大量電動車的用電需求，夜間尤其如此。實際情形可能是這樣，但如電動車大幅成長，會形成非常龐大的新電力需求。如果大家不在夜間為電動車充電，電力公司要怎麼辦？如果大量車主決定在負載巔峰時充電，可能引發什麼問題？電力系統要怎麼應付？

另外還有新出現的問題，內燃機除了運動和排放外，也會產生噪音，一開始時，安靜是電動車和油電混合動力車的一大賣點，但是對駕駛人、行人和自行車騎士來說，聲音是安全感和情況意識中的一環，實際上，殘障團體已經表示擔心安靜無聲汽車的危險，日本汽車廠商已經依據有關安靜油電混合動力車與其他車輛對策考慮委員會的規定，開始製造成引擎聲，美國和歐洲也必須採納這

種安全上的必要措施。

應該採用什麼樣的聲音？日產汽車執行長高恩已經針對車聲問題發聲：「這種聲音應該像電動車的車聲，聽起來舒服、不太大聲，卻又夠大聲。」

亞洲第一

考慮所有問題後，大家或許會問：電動車的第一個大市場在那裡？

亞洲若干超大城市具有便於推廣電動車的環境，這些城市還在興建實體基礎建設，因此和歐美比較老舊的都會區相比，更適於開發充電站和其他設備構成的「綠色地帶」。同時這些城市的空氣汙染可能令人窒息、咳嗽，不滿的居民已經對政府施壓，要求改善空氣品質。

亞洲國家中，首次（或第二次）買車的居民比率遠高於歐美國家，也是有利因素，這點可能表示，他們對汽車應有模樣、大小和性能的成見，可能比先進國家購車族少。此外，亞洲開發中國家、尤其是中國超大城市居民中，有很多人乘坐過電動車，至少有坐過兩輪電單車。

中國一位高級官員說：「大家希望家人坐在車子裡，政府不能阻止這種趨勢，不過是什麼樣的車子，的確是非常重要的問題。」中國現在推行把北京變成清潔城市的新政策，希望把更多的汽車變成電動車。

中國政府已經把「新能源汽車」列入經濟發展七大戰略部門，還動用高額補貼，使購買電動車更可行、更有吸引力，以便支持這種新政策。此外，中央與地方政府都擬定購買電動公務車的計畫，確保電動車有市場。

雖然中國的國家角色比美國明顯，但是，至少在國際上，中國最著名的電動車廠商是名叫比亞迪公司的民營企業。一九九五年，二十九歲的化學系畢業生王傳福創設比亞迪，生產環保電池中的鎳鎘電池，然後轉型為生產鋰電池，和日本三洋與索尼公司的產品競爭。二〇〇二年，公司創立七年後，躋身世界四大手機用充電電池廠商之一，贏得中國「電池王」的美譽。比亞迪這麼出名，靠的是極力追求技術的精進，在成本上打敗日本廠商，以及像王傳福所說的「很多嘗試與錯誤」，王傳福還補充說：「我這一代的中國人把工作擺第一，生活擺第二。」

二〇〇三年，比亞迪買下一家政府放棄的國營汽車公司，到二〇〇八年，比亞迪已經生產出中國最暢銷的轎車，同一年裡，巴菲特拿出二億三千萬美元，買下比亞迪〇%的股權；比亞迪也開始銷售公司所說第一款大量生產的插電式混合電動車，但是銷路很小。兩年後，比亞迪推出全電動車，也訂出目標，希望像電池一樣，不但征服中國市場，也要征服全球市場。二〇一一年，比亞迪把EDM插電式混合電動車款送到美國，進行打入美國市場的驗證程序，這款車也在巴菲特的波克夏公司股東會上展示。

氫電池公路

但電動車不是唯一零排放的選項，理論上，燃料電池是很有吸引力的東西，燃料電池和電池類似的地方，在於都是從化學物質中，抽取以電力形式表現的能源，也沒有會動的零件。然而，燃料電池和充電電池不同，不能利用其他地方發出的電力充電，燃料電池也和只能使用一次的化學電池不同，燃料電池通常是利用車上載的氫氣自行發電，有點像是自備油箱的電池，燃料電池

用電子化學方式，結合氫氣和氧氣，因此，燃料電池只會排放電力和水，重要的是，燃料電池可能可以提供足以媲美液體燃料的動力密度。

一九九〇年加州制定零排放法令後，氫和燃料電池首次得到汽車業重視，本田、豐田和通用一直熱心支持燃料電池；早年老布希政府還推展過燃料電池汽車的研究，稱之為「自由汽車」。燃料電池一直面臨重大挑戰，燃料電池可以把氫或另一種化學原料變成電力，本身就是相當昂貴的東西，需要大量投資和突破，才能夠商業化，業界的估計指出，燃料電池價格必須降到二十分之一，大致才符合經濟效益。

如果說燃料電池很貴，目前煉油廠和石化廠中用來製造高品質產品的氫也很貴，氫無法以自然形式單獨存在，必須利用某種東西生產出來，今天氫的生產原料主要是天然氣，但是，也可以用核電生產出來。把氫儲存和運輸出去、供車主利用的科技很複雜、很昂貴。氫氣動力車像電動車一樣，需要加氫站，興建加氫站和興建電池充電基礎建設一樣，需要龐大的投資，因此推展以氫為動力的車輛時，需要投下巨資，興建加氫站基礎設施。

阿諾擔任加州州長時，曾經大張旗鼓，推動加氫站網路，稱之為「加州通往未來環境的氫氣高速公路」。但是，這條特別的高速公路通不了多遠，到二〇一〇年，整個加州出售氫燃料的加氫站，頂多只有二十幾處。

另一個可能性是以天然氣，而不是以氫為動力的燃料電池，也就是所謂的固態氧化物燃料電池。然而，有些人認為天然氣燃料電池比較適於定點使用，例如用在電網無法到達的地方發電，不適用於當成汽車電源。

結論：

重大革命

身為軍人兼科學家的拿破侖戰爭部長之子沙迪·卡諾認為，英國在十九世紀初期的拿破侖戰爭中能夠獲勝，原因之一是英國掌握了能源，尤其是蒸汽機的秘密。卡諾決心扳回劣勢，對蒸汽機又極為好奇，就進行深入研究，並在一八四二年出版《炮火動力的反思》。讓他失望的是，這本書出版後，幾乎沒有人注意。幾年後，卡諾在一場霍亂流行中去世，得年三十六，不知道自己著作將來會有深遠的影響。他的著作幾乎可以確定是第一本有系統分析人類如何掌握能源的書籍，對熱力學第二定律的形成有極大的貢獻，「卡諾循環」會變成工程學上的要素。

但卡諾從來不懷疑自己這番分析的廣泛影響，他知道自己描述的不僅是引擎內部的變化，也說明了人類事務的轉變。用他的話來說，發明「熱力引擎，利用可燃物，似乎在文明世界中促成了一場重大革命」。除了基本風力和水力外，人類似乎打破了加在人類和動物肌肉上的枷鎖，這樣的確是重大革命。卡諾去世一百多年後，李高佛嘗試量化人類的成就，指出「每一位火車頭工程師利用的能源，等於十萬人的力量，每一架噴射機利用的能源，等於七十萬人的力量。」今天這種能源的力量應該大多了。

這樣利用能源是造就今日世界的主因，好處幾乎可以用我們日常所做的一切事情來衡量，但是，我們可以賭未來還會這樣嗎？

今後數十年內，世界能源需求的成長會非常龐大，光是需求增加的部分，就會超過一九七〇年的世界能源消耗總量，這種成長其實是成功的表徵，代表全球經濟更繁榮、生活水準上升、數十億人脫離貧困。以石油來說，北美、歐洲和日本的需求已經到達高峰，因為人口分布、效能增加和取代的關係，這些地方的石油消耗量會走平或減少。

由於需求繼續全球化，新興市場的故事會截然不同，未來數十年內，大約占世界人口四分之一的二十億人會大幅「加薪」，每人每年國民所得會從不到一萬美元，提高到一萬美元到三萬美元之間。即使未來能源使用效率大增，這些人的所得提高會反映在能源需求激增上，這種需求要如何滿足？什麼樣的能源組合能夠應付這種情況，卻不會造成危機和衝突？答案如何攸關未來。

和供應有關的安全問題會繼續變成基本疑慮，經驗一再顯示，可靠性與供應安全的威脅可能意外出現，誰想得到墨西哥灣的颶風，會造成美國史上最嚴重的供應中斷事件，必須依賴歐洲與日本火運運輸石油供應救急？隨著經濟狀況和科技變化，安全問題也展現新面貌，十年前，美中關係在全球能源安全中不是重要因素。網際網路提高了能源體系的風險，尤其是升高了大家至為依賴的電網風險，網際網路本身運作的風險也隨之提高。

巨量能源從中東與北非流出，從波斯灣流出的數量尤其龐大，使這個地區成為石油與天然氣供應安全的核心要素，北非與中東的動盪改變了這個地區的政情，也改變了各國政府與人民之間的關係，同時至少嚴重衝擊支撐穩定狀態的一部分地緣平衡。這點表示，資源極為集中的這個地

區前途，新增加了更大的不確定性，這種不確定性、可能的政治動盪和可能的危機風險，使危險性與能源安全隱憂升高，風險升高的認知會轉變成較高的石油風險溢價，反映這個地區不斷演變的新地緣政治狀況。

和能源利用與生產有關的政策，可能嚴重衝擊投資的及時性和供應的多寡，從而嚴重影響能源安全，政策可能限制能源的供應與利用，卻也可能帶來有利的影響，鼓勵投資與科技進步。多年來，大家習於說美國進口「三分之一」的所需石油，但今天美國頂多只進口一半的石油，這是汽車燃油效率提高、本國海域石油與「緻密油」產量成長、生質燃料運用增加的結果。科技進步把北達科他州變成美國第四大的產油州，美國進口石油的最大來源加拿大油砂，一九七〇年代時根本不存在。

環境問題和能源的互動會繼續影響更大的市場，最大的問題是氣候變遷和排碳，超過八〇%的世界能源供應，繼續依賴卡諾所說以碳為基礎的「可燃物」，預期今後二十年內，大約七五到八〇%的世界能源仍然會以碳為基礎，氣候變遷問題日漸重要，使這種比率保證大家在致力推動能源脫碳之際，會在政治和科技上碰到嚴峻挑戰。

氣候是超大問題，另外很多環境問題也會影響供應，燃煤發電供應世界所需要的四〇%電力，煤炭現在卻也因為排放其他氣體的關係，面臨挑戰。對能源安全特別重要的最重要創新，也就是油砂、頁岩氣和緻密油中的兩種，已經碰到堅決的反對。有些人希望改變這些能源的生產方式，有些人希望完全停止生產這種能源。這些問題怎麼解決，對於能源的供應的多寡和安全，都會有決定性的影響。福島第一核電廠災變已經促使各國重新思考核能發電，同時加速推動新設計

與被動安全功能。

擺脫卡諾所說「可燃物」的行動已經開始，但我們仍然處在轉型期的初步階段、或至少還處在調整能源組合的初階，這一點代表我們從以碳為基礎的燃料，轉變為採用非碳基燃料，但這種調整還有第二層意義，就是代表我們轉型到能源使用更精簡、能源使用效率大為提高的世界。這種變化在運輸方面、在每加侖里程和油電混合動力車科技的拓展方面，已經表現的相當明顯。生質燃料的地位可能上升，但仍然必須進步到第二代，才能掌控更高的市場占有率。至於電動車的前途如何，現在時間還太早，無法評估電動車在全球汽車市場中會有多大、多快的進展。

從未來成長來看，發電部門顯得相當突出。未來二十年內，世界電力消耗量幾乎可能倍增，多年來，以水力發電型態表現的再生能源，一直都扮演一定的角色，但是，水力發電在很多國家裡，已經碰到環保方面的反對，成長受到限制或停步不前。地熱發電是另一種現有的發電科技，地熱發電利用地球深處熱能產生的蒸汽，推動渦輪機發電，地熱在某些地區雖有重要貢獻，卻受到地質和地下正確「熱岩」的有無限制。

風力和太陽能是兩大新的非碳發電來源，從一九七〇年代和一九八〇年代初期的「希望之光」時代以來，這兩種科技都已經有長足的進步，科技也成熟多了，進一步的進步還有待發展，才能降低成本。目前這兩種科技都是重要產業，但在發電業中的規模仍然很小，仍然需要展示競爭力，證明本身能夠提供大規模的穩定電力，否則社會必須決定是否願意透過補貼和碳稅，為這兩種科技付出額外的成本。這些電力來源成長後，如何融入整體電網，會變成更迫切的問題。

我們是否面臨能源「重大革命」的新時代？歷史顯示，能源的轉換通常要花很長的時間才能完成，石油花了將近一百年時光，才取代煤炭，變成最大的能源。

科技進步的速度不是影響轉型速度的唯一要素，另一個要素是漫長的前置時間，發電廠的壽命可能長達六十年以上，主要新油田從探勘到生產第一批原油，所花的時間可能超過十年。雖然每年生產的新車款影響我們的觀感，其實車隊的變化並沒有這麼快，開發新車型可能要耗時五年，一般年度內，汽車的汰換率大約只有八%。

但是情勢可能快速變化，頁岩氣花了二十年時間才打進市場，打進市場後，卻只花了幾年時間，就劇烈改變天然氣、核電和風力發電的經濟計算。

到二〇三〇年，全球能源消耗量可能比今天多出三五%到四〇%，碳氫化合物大約會占總供應量的七五%到八〇%，我們可以想像到一大堆因素——從政治動盪、軍事衝突、全球經濟重大變化、訂價和管制的變化、到重大科技突破——都可能造成情勢出現更具決定性的變化。但是漫長前置時間的法則仍然存在，事實上，到二〇三〇年後，創新和科技進步發揮充分影響後，能源體系可能變得大不相同。

同時，有很多因素影響能源的前途，這些因素的互動相當複雜，偶爾也令人相當困擾，大家的利益相當不同，觀點相當歧異，這一切使規劃脈絡一貫的「能源政策」變得很難。事實上，「能源政策」經常受到看來不是以能源為重點的政策左右，但歷史顯示，若干原則在未來做決定時會很有用。

第一個原則是要從認識能源基礎的規模、複雜性和重要性開始，不論世界經濟規模是今天的六十五兆美元，還是二十年後的一百三十兆美元，能源都是世界經濟所依賴的基礎。用統一的方

法，認識一系列能源選項的貢獻，確實是重要大事，邱吉爾有關供應的銘言「分散、只有分散」的說法仍然十分有力，油源的分散必須擴大到能源來源的分散、擴大到涵蓋傳統能源和「新」能源，這點代表我們必須知道我們沒有毫無風險的選項、知道風險可能以很多形式出現。

對成長中的世界經濟而言，能源使用效率仍然是當務之急，大家在這方面已經創造可觀的成果，但過去數十年不存在的科技和工具現在已經備便，不論是在已開發國家還是開發中國家，真正的進步會具體表現在行為與價值觀上，特別是表現在投資上，例如投資新製程、新工廠、新建築、新車輛上。有很多障礙橫在眼前，從融資到效率，通常都在沒有良好「攝影機會」、「沒有剪彩儀式」的情況下出現。

永續能力現在是社會的基本價值觀，環保的當務之急必須繼續融入能源的生產與消費中，這些優先事項應該從衝擊、規模和成本效益分析的角度，進行評估和分析，確保大家可以獲得能源，同時保證附帶適當的環保保障。

卡諾重大革命觀念的全部發展過程——從十八世紀瓦特的蒸汽機新創企業、十九世紀德瑞克上校的石油新創企業、到從沙丘路擴散出去的清潔科技新創企業、以及目前在實驗室中出現的任何創新，都顯示能源的進步是創新和信念的結果。開發新知識和「應用科學」必須付出代價，但是整個創新鏈索如果沒有得到持之以恆的長期支持，世界要付出的代價會太多了。

就像我們在書中看到的一樣，需要探索的地方很多，但是，支持一切的根本要務，是尋找可以推動科技進步與創新的知識。卡諾寫下和「重大革命」有關的文字時，掌握了一種卓越的真理，但他寫下這些話時，這種能源企業還處在非常早期的階段，因此他的話比較像是預測，大家

都想像不到未來會有這麼重大的成就。應付未來幾十年的能源需求、確保資源供應源源不絕、友持世界經濟成長的挑戰看來似乎十分艱鉅，考慮其中的規模時，更是令人覺得這種挑戰的確艱鉅。要因應這種挑戰，必須負責、有效的利用能源、需要健全的判斷與持續一貫的投資、需要政治家的領導與協調合作、需要長期思維、也需要把環境思維周到的融入能源策略中。

但是最重要的人力資源供應日增，是讓大家建立合理信心的最重要原因，一位著名的地質學家說過：「石油是在人心中發現」。我們可以補充說，二十一世紀能源解決之道會在全世界的人心中找到，而且人力資源的基礎日益擴大。

需求全球化可能影響明天的需要，卻也會和創新全球化同時出現，知識的產生和科學的應用愈來愈帶有世界一體的性質，各種關係和互動在不斷增加的資訊和通訊系統支持下，促使人類創造成就的速度與衝擊加快了很多倍，這點表示知識與創意資源的基礎正在擴大，這樣會助長睿智與巧思，發現新的解決方法。

這種想法絕非盲目的信仰，大家不能保證會產生重大影響的創新時機何時來臨，不能保證足夠的投資會及時投入，也不能保證政府會明智的推動政策。前置時間的確可能很長，成本一定會變化。就像本書所說的一樣，衝突、危機和中斷風險是固有的風險，情勢可能爆發嚴重差錯，造成可怕影響。因此，培養創意能夠蓬勃出現的環境很重要，因為這種資源至為重要，可以應付挑戰、確保能源安全與永續供應、創造繁榮與成長的世界，這一點是整個探索的重心，是和探索人類精神與科技一樣重要的大事，這就是探索永遠不會結束的原因。

NEXT叢書 0188

能源大探索：風、太陽、菌藻

作者——丹尼爾·尤金 (Daniel Yergin)

譯者——劉道捷

主編——鄭真

特約編輯——郭政皓

美術設計——優秀視覺

執行企劃——鍾岳明

董事長——孫思照

總經理——莫昭平

總編輯——陳蕙慧

出版者——時報文化出版企業股份有限公司

10803 臺北市和平西路三段二四〇號三樓

發行專線——(〇二)二二〇六六八四二

讀者服務專線——〇八〇〇三二一七〇五·(〇二)二三〇四七一〇三

讀者服務傳真——(〇二)二三〇四六八五八

郵撥——一九三四四七二四時報文化出版公司

信箱——台北郵政七九〇九九信箱

時報悅讀網——<http://www.readingtimes.com.tw>

電子郵件信箱——big@readingtimes.com.tw

法律顧問——理律法律事務所 陳長文律師、李念祖律師

印刷——盈昌印刷有限公司

初版一刷——二〇一二年七月二十七日

初版三刷——二〇一二年十月一日

定價——新台幣四〇〇元



○行政院新聞局局版北市業字第第八〇號
版權所有 翻印必究
(缺頁或破損的書，請寄回更換)

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

能源大探索：風、太陽、菌藻 / 丹尼爾·尤金 (Daniel Yergin) 著；
劉道捷譯。-- 初版。-- 臺北市：時報文化，2012.07
面；公分。-- (NEXT叢書；188)
譯自：The quest : energy, security and the remaking of the modern world
ISBN 978-957-13-5613-6 (平裝)

1. 能源 2. 再生 3. 全球化

554.68

101013209

The Quest

Copyright © Daniel Yergin 2011

First published in 2011 by The Penguin Press, a member of Penguin Group(USA) Inc.
Published by arrangement through Andrew Nurnberg Associates International Limited
Complex Chinese translation © 2012 by CHINA TIMES PUBLISHING COMPANY
All rights reserved

ISBN 978-957-13-5613-6

Printed in Taiwan