

夸父追日

美國聯邦政府即將支出數十億美元，
用於可再生能源。
我們特別深入探討聯邦獎勵法案，
解析這筆支出將對太陽能發電的未來
造成什麼樣的衝擊。

文 羅特曼 (David Rotman) 譯 羅耀宗

本刊獨家取得美國麻省理工學院

Technology Review 期刊圖文授權

Technology Review, Published by MIT.

TECHNOLOGY REVIEW

Internet URL: www.technologyreview.com

Technology
PUBLISHED BY MIT
Review

遠在芝加哥南邊 (South Side)，一塊廢棄的工業用地，看起來不可能蓋起大型太陽能發電廠。別的不說，芝加哥並不是陽光亮麗的城市。而這塊地本身，曾經是戰後的生產中心，卻已經荒廢35年之久，長滿了樹木和雜草，附近是一堆老舊的房舍。但美國最大的電力公司之一艾索倫 (Exelon) 表示，到年底，希望將39英畝的土地開發成全國最大的都市太陽能發電廠。要是得償所願，加州聖荷西 (San Jose) 的太陽能發電產品製造商太陽動力 (SunPower)，將生產和安裝一排排約33,000片的矽太陽板，覆蓋在那塊土地上，產生

1,000萬瓦特的電力，足供1,200到1,500戶家庭使用。

不過，這個都市變貌的設想情境，前頭帶著一個很大的「如果」。如果艾索倫得到今年聯邦獎勵法案承諾的可再生能源計畫高額貸款保證，上面所說的事情才會發生。就艾索倫這項太陽能發電計畫而言，80%需要靠聯邦獎勵法案的承諾。有了貸款保證，以及聯邦和州其他幾筆補貼才勉強可行的這座太陽能發電廠，需要斥資6,000萬美元，少了政府的助力，根本經營不下去。艾索倫負責新業務開發的資深副總裁湯瑪斯·歐尼爾 (Thomas O' Neill)，在距芝加哥市區約20



圖 Chris Strong

夢想之地

芝加哥南邊一大塊荒蕪的土地，可能將是美國最大的都市太陽能發電廠的廠址。芝加哥的艾索倫電力公司計畫在這塊以前的工業用地，以最先進的光致電太陽能板，鋪滿39英畝的地面，產生足夠1,500戶家庭使用的電力。成本：6,000萬美元。



哩，48樓的辦公室接受訪問，坦率談起這座太陽發電廠的經濟面。

「如果我們無法取得貸款保證，這項計畫就做不下去，」他說。

歐尼爾說，就算有聯邦的補貼，太陽能發電廠還是沒辦法提供大型能源計畫的投資人通常要求的兩位數報酬率。建廠生產1瓦特的電力需要6美元的成本，而風力和天然氣發電廠1瓦特的成本各為2美元和1美元左右。而且，10個百萬瓦特的電力和艾索倫龐大的發電容量36,000個百萬瓦特相比，根本是小巫見大巫。但歐尼爾

說，這項計畫是為了獎勵方案中，歐巴馬總統提出的一些目標「量身訂做」的，它將創造就業機會（建廠需要用到250人），而且將證明太陽能發電廠可以「引進到中西部和舊城區」。

芝加哥計畫中的這座電廠，只是2月中旬聯邦獎勵法案通過後，許多可能推動的可再生能源計畫中的一項而已。美國能源部仍在選擇將獲得貸款的計畫，同時決定其他新提撥的補貼要怎麼花。不過，眼見可能有龐大的利益存在，中西部的風力電場、內華達

州西南部沙漠龐大的太陽能發電廠，以及西北部的地熱發電廠計畫紛紛出籠。根據能源部所屬獨立機關能源資訊管理局（Energy Information Administration；EIA）最近的分析，獎勵法案將使可再生來源的發電容量，從今天的1,140億瓦特，增為2015年的1,560億瓦特；如果沒有這項法案，可再生能源的發電容量只會增加到1,180億瓦特。

可是EIA的報告也指出叫人憂心的現實：增加使用可再生能源，對二氧化碳排放量的長期影響很



崇拜太陽

亮源能源 (Brightsource Energy) 正在距以色列耶路撒冷60公里的沙漠，測試太陽熱能技術。試驗廠利用1,600片玻璃鏡片，把太陽能集中到60公尺高的中央高塔，其上方是鍋爐，能夠產生400到600萬瓦特的電力。加州的莫哈維沙漠 (Mojave Desert) 計畫興建的商業化發電廠，規模將有一百倍大，產生400個百萬瓦特的電力。

Courtesy of Brightsource

小。即使1,560億瓦特，也只能滿足美國能源需求的一小部分。還有，就像能源部長朱棣文(Steven Chu)經常表示的，現有的可再生能源技術，不能大量提供具有成本競爭力的能源，顯著降低這個國家對石化燃料的倚賴，而石化燃料會排放溫室氣體。

在朱棣文的領導之下，能源部開始大量挹注資金，研究新的可再生能源技術。今春能源部宣布5年動用7.77億美元，資助46座新的能源研究中心，另外提撥2.8億美元給8個「能源創新中樞」，以及4億美元啟動先進研究計畫署—能源計畫(Advanced Research Projects Agency-Energy)。這是仿效1960年代的ARPA計畫推動的；ARPA做了很多事，包括催生網際網路(Internet)。

針對現有的技術提撥研究資金和補貼，對太陽能產業來說，可能格外要緊。許多物理學家和化學家表示，找到效率更高的方式利用太陽能，是取代石化燃料，以及顯著減低溫室氣體產生，唯一可行的長期選項。「我們沐浴在這些量子粒子之中，從太陽而來，如雨點般打在我們身上的每顆粒子，都帶有約兩電子伏特的能源，」勞倫斯柏克萊實驗室(Lawrence Berkeley Laboratory)的代理主任，以及它的太陽能研究中心主管保羅·艾利維沙托斯(Paul Alivisatos)說。「那是能源

所在的地方。」但是太陽能現在只占美國發電容量1,000個十億瓦特的1%，主要原因在於成本太高。

像艾索倫將使用的矽電池，是用電腦晶片使用的那種高級矽做成的。已安裝的光致電容量，絕

要取代石化燃料，顯著減低溫室氣體產生，找到效率更高的方式利用太陽能，是唯一可行的方式。但太陽能現在只占美國發電容量1%，主因在成本太高，因此，針對現有的技術提撥研究資金和補貼，對太陽能產業來說，可能格外要緊。

大多數都是採用這種矽電池，卻還是比傳統的電力來源貴上約五倍，很難競爭。比較新型的太陽能電池是用半導體材料薄膜，取代單晶矽，生產起來可能比較便宜，效率卻差了一截。使用大量的鏡片陣列，蒐集陽光，產生蒸汽，驅動渦輪機，這種集中太陽熱能的方法，成本可能比較接近石化燃料，可惜設施興建成本貴，而且需要在日照異常充足的地方找到大片土地才行。事實上，目前的太陽能技術，政府不加補貼的話，無一具有競爭力。這表示，政府的政策，以及制定政策的人所做的選擇可能說變就變，所以太陽能發電的命運也就前途難卜。

太陽王

阿諾德·葛曼(Arnold Goldman)最清楚州和聯邦政府的能源決

策，對太陽能產業的影響有多深遠。1980年代初，他的公司魯茲國際(Luz International)在加州莫哈維沙漠(Mojave Desert)中間蓋了9座大型太陽熱能發電廠，總發電容量是354個百萬瓦特。魯茲那

時的發電廠供應的太陽能發電量占全球的90%。他們使用的技術，是根據一套獨創的設計，用上數十萬片鏡片，散布在地面上，集中陽光到上方的管子網路，管子裡面含有合成油，熱油將水加熱，產生蒸汽，驅動渦輪機，進而產生電力。

第一組太陽能發電設施1984年上線運轉，因為聯邦和州政府慷慨的獎勵辦法，而具有經濟上的可行性。1979年，卡特總統訂下2000年之前美國的電力應有20%來自可再生能源的目標(今天這個數字仍然只有約2%)。卡特和國會通過的獎勵措施中，可再生能源計畫的投資人可以申報很高的扣抵稅額，1978年通過的公共公用事業管理政策法(Public Utility Regulatory Policies Act)，對替代能源的生產者提供進一步

的優惠辦法。

可是葛曼談起往事說，到了1990年底和1991年初，一切都變了。卡特政府訂立的扣抵稅額，到了雷根總統任內「縮水」。但最後的一擊，來自加州稅制叫人不解的轉變。州政府本來豁免可再生能源設施的物業稅，魯茲最大的設施價值超過10億美元，所以每座發電廠的免稅金額高達2,000萬到3,000萬美元之間。接近1990年底，加州州長否決物業稅繼續停徵之議。1月間，新州長上任，魯茲那時每個月支出2,000萬美元興建第十座發電廠，賭他會很快改弦易轍；但不幸的，新州長並沒有立即恢復免稅優惠，

電廠，合計發電容量超過40億瓦特。這些發電廠將使用魯茲過去所用技術比較新的一種，可以達到遠高於從前的溫度；而且，不再將油管網路加熱，而是利用數十萬片鏡片，將陽光集中到約100公尺高塔上方的中央鍋爐。亮源預期第一座商業化設施——400個百萬瓦特，世界最大的太陽能發電廠之一——將於2011年底在加州伊凡帕（Ivanpah）開始運轉。

可是和芝加哥的太陽能發電廠一樣，政府提供的獎勵措施，攸關將需要約20億美元資金的這項計畫能否存活。聯邦政府的貸款辦法由美國財政部直接放款，可以用來支應60%的成本；所以這

活運用這些數字。「一切都要靠資金，」他說。發電廠的運轉成本很低——「也許一年2,000萬美元就夠了。」但在去秋商業性貸款和債務市場崩跌之後，幾乎不可能找到20億美元來支應建廠成本。他說，現在唯一可行的找錢方法，是和聯邦貸款掛鉤。投資人受到政府獎勵措施的鼓舞，才有可能掏錢。

但是任金斯-史塔克很快又表示，聯邦政府的錢帶有很多風險。這筆貸款當然遲早得還。而且，雖然有了聯邦政府的獎勵措施，找到願意拿出幾億美元來冒險，利用新技術興建巨型太陽能發電廠的投資人，現在「容易得多」，他說，「卻還是很難。」

葛曼樂於接受這樣的挑戰。上一次的太陽能帝國破產，並沒有叫他心灰意冷。葛曼現在準備在內華達、加州、新墨西哥、亞利桑納廣大的土地上，蓋起龐大的太陽熱能發電廠。不過，這一次，葛曼可能搞得更大。單單在加州，新的太陽熱能發電容量，計畫中就有約60億瓦特。不過，葛曼說：「我們需要一個能夠預測的政策環境。」

捕捉一些光線

大概在1980年代中期，也就是葛曼忙著在莫哈維沙漠鋪設鏡片的同一時間，當時史丹福大學（Stanford University）的電機工程教授理查·史旺森（Richard

計畫能否存活，一切都要靠資金，
現在唯一可行的找錢方法，是和聯邦貸款掛鉤，
投資人受到政府獎勵措施的鼓舞，才有可能掏錢。
但是，這其中還是有很多風險。

結果魯茲賭輸了。「我們估算錯誤，」葛曼說，「錢用光了，只好結束經營。」

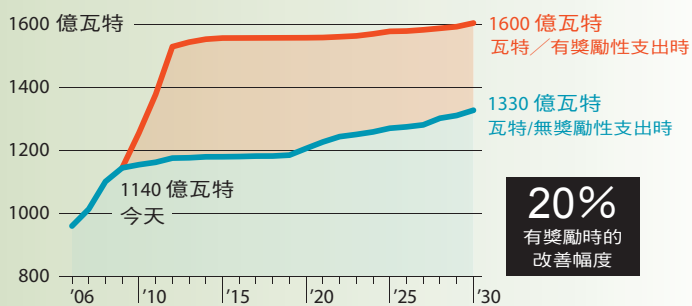
現在，加州和聯邦政府再次端出可再生能源的優渥獎勵辦法，葛曼又回來了，而且這次野心更宏偉。2006年，他在加州奧克蘭（Oakland）創立亮源能源（Brightsource Energy）；向創業投資公司和企業投資人募集到1.6億美元之後，計畫興建一系列發

家公司只需要向投資人募集8億美元，投資人又得以享有6億美元的可退稅扣抵稅額（可再生能源的投資扣抵稅額，早在獎勵辦法出爐前就存在，但是法律有個關鍵性的調整：現在允許投資人選擇收到相當於投資金額30%的直接補助，而以前必須將扣抵稅額用於沖抵稅負）。

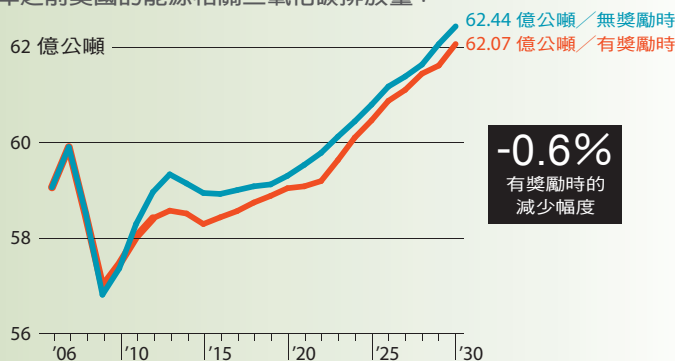
亮源的財務長傑克·任金斯-史塔克（Jack Jenkins-Stark）負責靈

增產電力

2030年之前美國的可再生能源發電容量預估值



2030年之前美國的能源相關二氧化碳排放量*



資料來源／美國能源資訊管理局 * 包括可再生能源和能源效率的提升

Swanson)，也自創公司太陽動力。兩人都有遠大的願景，想在沙漠裡蓋滿大型的太陽能發電廠；但葛曼打算把太陽能轉化為蒸汽，然後產生電力，半導體和微電子專家史旺森，卻想利用從精密製造的矽晶圓做成的太陽能電池。

史旺森在太陽動力聖荷西公司總部後面一塊塵土飛揚的地面，展示該公司的技術；如果一切進行良好，艾索倫將在芝加哥安裝太陽動力的技術。一排大型太陽能板裝在會轉向的機關上，每隔幾分鐘就略微傾斜，讓太陽能板繼續朝向太陽；每一塊板子有幾十個高效率的太陽能電池。這種太

陽能電池，正是史旺森在史丹福開發出來的。靠太陽能驅動的馬達，轉動板子時輕輕發出啾啾響聲；到了晚上，馬達把板子轉向朝東，等候隔天的日出。

史旺森的電池，是商業化供應的光致電技術形式中，效率最高的，它們把射來約22%的陽光轉化成電力（芝加哥的太陽能板產生的電力，將是陽光比較充足地區的三分之二左右）。但是太陽能板和啾啾作響的馬達，也深切提醒我們：矽光致電技術要做到夠便宜，能和比較傳統的電力來源競爭，有多困難。

史旺森說，現在有30%的投

資扣抵稅額優惠，日照充足地區太陽能發電廠的能源成本，在尖峰時段和化石燃料產生的電力相較具有競爭力。但這是太陽能發電最好的可能情境。在日照較少的地區，以及每天中午以外的時間，當電價很高，而且太陽能電池效率最高的時候，光致電技術產生的電力仍太過昂貴。

近年來有數十家新創公司相繼冒出頭來，每一位創辦人都希望他們所用的技術，成本效益比別人高，但史旺森覺得，把目標放在這裡，其實是努力錯地方了。他說，隨著業界的快速成長，從矽光致電技術產生的電力，每年成本減低5%到8%；5年內，由於現有的技術改善，以及製造商實現規模經濟，就算沒有聯邦政府的獎勵措施，它也會具有競爭力。

「我們不需要突破，」史旺森說，「等待（光致電技術）下一個大突破，除了腳下長蘚，什麼事也不會有。」他補充說，「我們有一張地圖，可以很清楚看到如何將成本減為今天的一半，這就足以引發爆炸性的業界成長。」

轉個彎

太陽能產業或許不需要什麼突破，也能繼續維持穩健的成長率。但是許多科學家表示，少了急劇性的進展，太陽能永遠無法供應所需數量龐大的電力，終有一天取代石化燃料。

能源部長4月底宣布的46座新
能源研究中心，24座正在研究和
太陽能有關的技術，未來5年每
年各獲得200萬到500萬美元的
資金。同樣的，能源部的8個新創
新中樞，有2個將聚焦於太陽能
技術：一個研究電力，另一個研
究以燃料形式儲存太陽能源的技
術。根據能源部2010年的預算草
案（在獎勵法案過關後短短幾個
月提出），大部分新能源技術的
增幅都不大，太陽能的研究預算
卻增加將近一倍。

不少研究的重點放在克服光
致電技術的根本難題：成本和效
率如何權衡取捨。傳統的太陽能
電池效率高，因為製造它們用到
的矽，是以單晶的形式生成，成
為有序排列完美的分子結構；當
半導體吸收陽光，光的能量激發
電子，使之絲毫不受阻礙地行經
這個晶體結構，脫離原子而產生
電流。但是用單晶矽生產所需的
裝置，相當困難且昂貴。比較新
的光致電技術使用的材料，有序
結構較差，也能以薄膜的形式沉
積；它們製造起來比較簡單和便
宜，效率卻也較差。

「談到光致電技術，你不是享
有高效率，就是享有低成本，但
我們迫切需要的是兼而有之，」
加州理工學院（Caltech）的物理
學和材料科學教授哈里·艾特華
特（Harry Atwater）說。「太陽能
面對的挑戰之一，是如何以合乎



動力角度

太陽動力公司生產的光致電面板安裝在追蹤裝置上，白天移動太陽能電池，跟著太陽跑。在加州聖荷西太陽動力公司總部展示的這些面板，是靠太陽能驅動的馬達轉動。這家公司表示，它的太陽能電池是曾任教於史丹福大學的創辦人理查·史旺森所設計的，是效率最高的商業化光致電產品。

圖 Erik Pawassar

成本效益的方式，從幾百個十億
瓦特增加到一兆瓦特的電力。」
他說，要做到這件事，可能需要
用到「非常不同於我們今天所
用」的技術。

艾特華特將領導加州理工學

院由能源部提供資金的一個能
源研究中心。科學家將在這裡研
發能讓薄膜光致電技術以更高
的效率吸收陽光材料，這些材
料也許可以用不同種類的半導
體做出來，它們的微結構設計能

以新方式和光互動。艾特華特說，光線射到用這些材料做成的太陽能電池，可以迫使它們「轉個彎」，並行進到薄膜的表面。因此，和光線垂直通過表面比起來，太陽能電池有機會吸收高出許多的光線。

其他地方的研究工作者，則希望克服光致電電池使用無序材料一定會遭遇的挑戰。當光線射擊這種材料中亂成一團的分子，被激發的電子和它們脫離後留下的電子「洞」，會形成粒子般的配對，稱做激子 (excitons)。麻省理工學院 (MIT) 的電機工程教授馬克·波爾多 (Marc Baldo) 說，植物透過光合作用，用來捕捉能量的過程中，激子扮演某種角色；此外，有機發光二極體 (organic light-emitting diodes) 也用它們來產生光。而且，他說，也許有可能在奈米的尺度操縱這些激子，以改善無序材料的光致電特質。波爾多領導能源部資助、專門研究激子的一個能源研究中心，其中網羅了來自麻省理工學院、哈佛大學 (Harvard University)、布魯克海文國家實驗室 (Brookhaven National Laboratory) 的研究工作者。

不過，利用陽光來產生電力，終究無法充分供應我們需要的能源：目前的太陽能技術畢竟只能在白天產生電力，而電力的儲存不容易。所以我們必須找到方法，

利用陽光來製造氫之類的燃料。氫的儲存容易且便宜，可以先存起來，需要使用的時候再用。

學習如何以很高的效率，直接從太陽製造這些燃料——這個過程稱做人工光合作用，因為目的是模仿綠色植物的自然流程——「仍要耗上二十到三十年的光陰，」加州理工學院的化學家哈里·葛雷 (Harry Gray) 說。他也是一個太陽能研究協作團隊的領導人，有來自多所大學的科學家共同參與。雖然研究工作者 (包括他的團隊成員) 在人工光合作用的若干層面取得「不錯的成果」，許多困難的問題仍然尚待解決。「需要很長的時間來摸索出眉目，」他說。

**談到光致電技術，
你不是享有高效率，就是享有低成本，
但我們迫切需要的是兼而有之。**

矽光致電技術在相當長的一段時間內，仍會是主流的太陽能技術，葛雷說。「如果一切進展順利，我們會有比較便宜的太陽能電池，不用單晶矽，而是例如採用有機光致電技術。但是 (過渡到比較便宜光致電技術) 不會走得那麼快。」

丟番茄

我們急需過渡到效率更高的技術，獎勵法案能給我們一把助力

嗎？塞維林·波倫斯坦 (Severin Borenstein) 表示懷疑。波倫斯坦是加州大學 (University of California) 能源研究所所長，他說，獎勵法案提撥資金的問題，在於面對現有的技術時，能源部需要挑選它要支持哪些計畫。「所以這叫人擔心政府可能投資到錯誤的技術，」他說，挑選技術贏家，「一向不是它非常擅長的。」他相信，要促進可再生能源的成長，遠比這有效的方法，是透過碳稅或者總量交易管理 (cap-and-trade) 辦法，給二氧化碳排放量訂個價格。這兩個方法，都能經由市場提供運用可再生能源的誘因，而且會是比較有效率的方法，政府的政策也能保

持「技術中立」。在此同時，他說，政府資助研究新的可再生能源技術十分重要。

波倫斯坦表示，從經濟學家的觀點來說，只有在「市場失靈」之處，政府提供補貼才有可為。所謂市場失靈，是指市場並沒有分配足夠的資源，去追求對社會有利的目標，例如減低溫室氣體排放。所以政府的獎勵措施要支持財務風險高，卻可望造福公眾的努力。他說，在這種情況下，公共

資金用於研究新的太陽能技術，說起來就很有道理——但是補貼目前的商業化技術，尤其是光致電，立論依據便「很薄弱」。他說，即使和風力、太陽熱能等其他的可再生能源相比，現有的光致電技術也很昂貴，而且它們不見得會帶來比較便宜的技術。「你顯然需要鋪設（太陽能）板子，但那會產生持久的效益嗎？它會幫助你建立太陽能產業嗎？我想答案可能是不會。」

波倫斯坦說，政府直接補貼，支持目前的光致電技術，其實可能反而阻礙了效率更高的技術開發。「當你投資目前的技術，毫無疑問會有經濟學家說的『選擇價值』（option value）失去的問題，」他說。「如果技術就要變得很好很多，而且是因為和發揚光大目前的技術無關的理由，而是因為科學會進步而變得很好很多，那麼等候是有道理的。現在投資，就會排擠未來的投資。錢最好花在五年後的新科技上。」

卡內基美隆大學（Carnegie Mellon University）工程與公共政策系的研究工作者在最近的一篇論文中，調查頂尖的太陽能專家的意見，探討光致電技術的未來，結論不只指出這種技術遠比風力，甚至太陽熱能等其他的可再生能源要貴，而且未來40年「可能很難有經濟競爭力」。「這個結果叫人洩氣，」卡內基美隆的

工程教授兼系主任格蘭傑·摩根（Granger Morgan）說。

摩根表示，短期內補貼風力和太陽熱能，可以幫助它們變得更加便宜，足以和傳統的電力來源競爭。「可是矽光致電技術真的很不一樣。依目前的技術來看，我看不出會有那樣的事發生。」他懷疑，目前的光致電技術使用量就算增加一倍或者兩倍，也沒辦法急劇拉低價格。

「當然了，」他說，「如果你開會時站起來說這種話，番茄馬上開始飛過來。」

其實，許多專家相信現有的光致電技術扮演吃重的角色，能藉以促進太陽能新形式的誕生。勞倫斯柏克萊實驗室的艾利維沙托斯堅稱，以更大的規模開發它們，將「為下一代的技術鋪路」。他說，由於這個理由，光致電技術在市場上站穩腳跟是很重要的。一件事。「有個現在就能上線運轉的產業是有道理的，」他說，「未來數十年，那個產業可望吸納新的發展，以及推出更新的产品。」

加州理工學院的葛雷同意他的看法。他表示，我們需要儘快安裝儘可能多的太陽能技術。說這話時，他語氣中的迫切性明顯感受得到。「我們需要現在就投資已有的技術，那就是矽光致電技術，」葛雷說。「我們應該儘可能在每個地方設置（太陽能發電



設施），好讓人們看到果然不一樣。我們不能坐著等突破發生，我們需要讓人看到太陽能有可為之處。」

光致電技術能夠扮演什麼樣的角色，言人人殊，而這只是政府的政策應該鼓勵舉國轉向清淨能源，用什麼方式最好，更大辯論中的一環。我們就要在全國各地看



到這幕戲上演。

能源部可能很快就會對艾索倫興建芝加哥太陽發電廠的貸款申請做出決定。即使動工興建，這座設施只占全美總太陽能發電容量的一小部分，也只占艾索倫的電力組合很小的一部分。但葛雷有一點肯定是對的：這種設施，位在美國的一個大都市，將有如

太陽能的門面，大家都在看，它的命運攸關重大。

幾家公司表示，能源部正不厭其詳，審查它接到的數百件貸款申請，嚴格評估申請人的財務是否健全，以及計畫興建的設施有多大的市場潛力。不過，判斷艾索倫能不能在芝加哥南邊設廠時，不能輕忽政治因素。畢竟，歐巴

馬總統的家就在十三哩外，而且當地政壇人士多年來奔走呼籲，希望重振周邊地區的活力。

政治一直扮演舉足輕重的角色，能夠左右美國未來的能源走向，尤其是在談到太陽能的時候。不信，去問葛曼就知道。

Copyright © 2009, David Rotman.
All Rights Reserved. 