



5

太陽能資源的開發利用

太陽能是一種取之不盡、用之不竭而又沒有污染的超潔淨可再生能源。在當前石油價格高企、全球變暖加劇的情況下，開發和利用這種可再生能源，意義十分重大。

據計算太陽的輻射能每秒放射出相當於 3.75×10^{26} 瓦的能量，而其每秒抵達地面的能量亦高達 80 萬億千瓦，相當於 550 萬噸原煤的能量。地球每年接收的太陽能相當於目前地球上每年燃燒的固、液、氣體燃料的兩千倍左右。

在我國土地上的太陽輻射能約為 1.2 萬億千瓦，相當於十萬個發電量為 1200 萬千瓦發電廠的總和。如以高度現代化水平時人均裝機二千瓦計，則至 21 世紀 50 年代，當我國人口達到 15 億人時，全國總裝機約 30 億千瓦，僅相當於 1.2 萬億千瓦的 0.25%；可見太陽能的潛力和開發前景是多麼鉅大。

本文共分兩個部分，第一部分介紹美國的太陽世紀計劃，第二部分對我國利用和開發太陽能光熱資源的一個可能前景略作描述。

一、美國的太陽世紀計劃^①

太陽能潛力鉅大，40 分鐘內通過陽光抵達地球的能量，就相當於全球一年消耗的總能量。美國擁有的太陽能資

^① 本節的內容來自肯·茨魏貝爾等：〈太陽世紀〉，《環球科學》2008 年第 2 期。

源極為豐富，僅是西南地區就有 65 萬平方公里的土地，適合建造太陽能電站。這片土地每年接收的太陽能輻射超過 450 億億英熱單位（一英熱約等於 1055 焦耳），將其中 2.5% 的輻射轉化為電力，就能滿足 2006 年全美的能量需求。

目前的技術已經具備，肯·茨魏貝爾等三位學者因此制訂了一個宏大的計劃：到 2050 年，太陽能將為美國提供 69% 的電力和 35% 的總能量（包括交通工具耗能在內）。預計：這樣的電力能以每度電五美分的價格出售給消費者，與目前常規電力的電價相當。如果風能、生物質能和地熱資源都能得到開發的話，到 2100 年，美國所有的電力供應和所消耗能量的 90%，都將由可再生能源提供。

要實現這一計劃，美國政府要在未來 40 年內投入 4200 億美元。太陽能電站幾乎不需要燃料，每年能節省數十億美元。這些基礎設施將取代三百座大型燃煤電站和三百多座大型燃氣電站，將它們所消耗的燃料全部節省下來。

由於太陽能技術幾乎沒有污染，該計劃每年將減少 17 億噸原本由常規電站排放的溫室氣體。通過太陽能電網補給燃料的充電式複合動力汽車也將取代常規汽車，會另外再削減 19 億噸溫室氣體。到 2050 年美國二氧化碳排放量將比 2005 年降低 62%，為緩解全球變暖作出鉅大貢獻。

光伏電站

在過去幾年裡，光伏電池及其模塊的生產成本大大降低，這為光伏產業的大規模發展鋪平了道路。在現有的各種光伏電池中，由碲化鎘製造的薄膜電池最為便宜。為使太陽能發電成本在 2020 年降到每度電六美分，碲化鎘電池必須能將 14% 的太陽輻射轉換為電力，系統裝機容量的平均成本也必須降到每瓦 1.5 美元。目前，光伏模塊的光

電轉換效率只有 10%，裝機容量的平均成本約為每瓦四美元。但這項技術正在迅速發展：僅在過去一年裡，商業電池的效率就從 9% 提高到 10%。

按照該計劃，到 2050 年，光伏技術將提供近 30 億千瓦的電力。為此，美國必須建造 7.8 萬平方公里的光伏電池陣列。這個數字聽起來十分龐大，但不妨換一種思路：如把煤礦的面積也計算在內，燃煤電站產生一百萬度電力所需的土地，其實比美國西南地區太陽能產生相同電力所需的土地更大。美國西南地區可利用的土地資源非常充足，無須徵用環境敏感、人口密集或地形複雜的地區。光伏電站特有的優勢（如不需要水），可把人們對環境問題的擔憂減至最小。

在美國國家可再生能源實驗室，碲化鎘光伏電池的效率已達到 16.5%，並且仍在昇高，但目前商業電池的效率還達不到這一水平。但至少有一家生廠商——First Solar 公司已將光電轉換效率從 2005 年的 6% 提高到了 2007 年的 10%，並預計在 2010 年達到 11.5%。

壓縮儲能

太陽能的最大局限是：陰天和夜晚幾乎發不了電。因此，陽光明媚時生產出的多餘電力，必須儲存起來以供夜晚使用。然而，電池之類的大多數儲能系統都十分昂貴，且效率較低。

壓縮空氣儲能方式是一種相當成功的替代方案。用光伏電站產生的電力來壓縮空氣，將空氣泵入地下空洞、廢棄礦坑、含水土層和廢棄的天然氣井中。需要時，再將壓縮空氣釋放出來，通過燃燒少量天然氣加以輔助，便能推動渦輪產生電力。德國亨托夫市的壓縮空氣儲能站早在

1978年就開始運行，至今仍安全可靠地提供電力；美國麥金托市的同類電站也從1991年運行至今。目前，壓縮空氣儲能站消耗的天然氣，只有傳統燃氣電站的40%。如採用更好的餘熱回收技術，該數還可降至30%。

美國電力研究所的研究顯示，現有壓縮空氣儲能成本約是鉛蓄電池的一半；研究還指出，這些設施的成本分攤到電價上，將使2020年時美國的太陽能電價增加3~4美分，達到每度電8~9美分。

美國西南地區光伏電站生產的電力，將通過高壓直流輸電輸送到全國各地的壓縮空氣儲能站，那裡的渦輪發電機再不分晝夜地生產電力。美國電力研究所和天然氣業界共同繪製的地圖顯示，地質構造適合建造壓縮空氣儲能站的地區佔美國國土面積的四分之三，而且往往靠近大都市。實際上，這種儲能系統與美國天然氣存儲系統非常類似。天然氣業界在四百個地下貯存庫中存儲的天然氣總量達2300億立方米。預計到2050年，美國將需要150億立方米的存貯空間，來容納壓強為75個標準大氣壓的壓縮空氣。儘管技術開發仍有難度，但可供選擇的地下貯存庫數量豐富，天然氣業界投資壓縮空氣儲能網絡也是理所當然的事。

聚光太陽能電站

在計劃中，太陽電力中有五分之一將由另一項技術提供，即「聚光太陽能發電」技術。其中，長長的金屬反射鏡槽把陽光聚焦在一根充滿液體的管道上，如一個鉅大的放大鏡那樣加熱液體，熱液穿過一個熱交換器，產生蒸汽推動渦輪旋轉發電。

為了儲存能量，被加熱的液體沿著管道流經一個鉅大的隔熱容器，容器充滿了熔鹽——它們可以有效保持熱

量。這些熱量在夜晚被提取出來，產生蒸汽。儲存的熱量要在一天內提取出來用掉。

美國有九座聚光太陽能電站已安全運行多年，總裝機容量達 35.4 萬千瓦，但它們不具備儲熱功能。第一座具備儲熱功能的商業化電站正在西班牙建造，這個五萬千瓦的電站配有可持續放熱七小時的熔鹽儲能裝置。世界各地都在建造類似的裝置。在此計劃中，這種電站需配備可維持 16 小時的儲能裝置，讓電站能 24 小時不間斷地發電。

現有的電站證明，聚光太陽能電站是可行的，但必須降低成本；而規模經濟和進一步的改進研究都會對此有所幫助。最近的一份評估報告指出：如四百萬千瓦的太陽能電站能夠建成，到 2015 年，聚光太陽能電站的發電成本就有可能低於每度電十美分。提高熱交換液體的溫度，可提高發電效率；專家還在研究如何將熔化鹽本身用作熱交換液體，來減小熱量損失，這樣也可降低投資成本，但此需要更耐腐蝕的管道。

上述兩種太陽能發電技術都還沒有完全發展成熟，因此，該計劃在 2020 年以前，對它們同時進行大規模開發。多種太陽能技術的組合使用或許更符合經濟學的要求。

2100 年的遠景

按照該計劃，到 2100 年，包含交通耗能在內的全美能量總需求將達到 14 億億英熱，發電裝機容量將是目前的七倍。在採取了最保守的策略後（如假設從 2020~2100 年，在太陽能利用方面沒有出現任何技術改進和成本降低），美國將用以下方式滿足能量需求：光伏電站產生的電力，29 億千瓦直接併入電網，另外 7.5 億千瓦用於壓縮空氣儲能；聚光太陽能電站產生 23 億千瓦的電力；分散式光伏發

電設備還將輸出 13 億千瓦的電力。除此之外，風力電站將提供十億千瓦的電力，地熱電站提供二億千瓦電力，生物質燃料提供的能量相當於 2.5 億千瓦電力。這個模型中還包括五億千瓦地熱泵，直接給建築物加熱或者冷卻。所有的太陽能設備將佔地 50.5 萬平方公里，仍然小於美國西南地區適宜開發太陽能的土地面積。

到 2100 年，美國所有的電力供應和所消耗能量的 90%，都將由可再生能源提供。在春季和夏季，太陽能基礎設施將產生足夠的氫，除了滿足 90% 的交通燃料需求以外，還將取代在壓縮空氣渦輪中起到輔助作用的少量天然氣。此外，480 億加侖的生物質燃料將補足餘下 10% 的交通能量需求。與能量有關的二氧化碳排放量將比 2005 年減少 92%。

二、中國的太陽能利用前景

到 21 世紀 50 年代末，我國將實現高度現代化，屆時人口達 15 億人，人均用電量約六千度，總用電量約九萬億度。

其中，各種電能的供應結構大體如下：水電四億千瓦，年利用 4500 小時，供應電能為 1.8 萬億度；可設核電提供的電能佔總電能的 20%，則其供應電量 1.8 萬億度；風能裝機五億千瓦，年利用三千小時，年發電量為 1.5 萬億度；利用生物質能 4.5 億噸（約合三億噸標煤），年發電量一萬億度；以六億噸標煤（約合原煤 8.4 億噸）用於發電，年發電量兩萬億度。

以上五項總計 8.1 萬億度，其餘約一萬億度的電量由太陽能提供，如設年利用 1500 小時，則太陽能電站需裝機約六億千瓦。太陽能提供能源主要分成以下三種方式：一種為集中式的光伏電站，一種為集中式的聚光電站，一種為利用

房頂面積的分佈式供能裝置。下面對此分別略加討論。

我國太陽能資源的分佈類型

我國各地太陽能輻射年總量大致在每年80~200千卡/平方釐米之間。每年140千卡/平方釐米的等值線的走向和森林與草原分界線大體一致，它將全國分為西北與東南兩大部分，西北高於東南。這是因為西北受乾旱大陸性氣候影響，降水少，晴天多，所以其接受的太陽總輻射較東南為高。

根據我國各地太陽能資源的多少，可把全國劃分為以下五種類型區。

第I類地區：全年日照時數2800~3300小時，太陽能資源每年160~200千卡/平方釐米，每年一平方米所接受的太陽熱量相當於燃燒285公斤標煤：寧夏北部、甘肅北部、新疆東南部、青海西部、西藏。

第II類地區（指標同上，下同）：3000~3300小時，140~160千卡/平方釐米，228公斤標煤：河北西北部、山西北部、內蒙、寧夏南部、甘肅中部、青海東部、西藏東南部、新疆南部。

第III類地區：2200~3000小時，120~140千卡/平方釐米，兩百公斤標煤：山東、河南、河北東南部、山西南部、北疆、吉林、遼寧、陝西北部、甘肅東南部、雲南、廣東南部、福建南部。

第IV類地區：1400~2200小時，100~120千卡/平方釐米，171公斤標煤：湖北、湖南、廣西、江西、浙江、福建北部、廣東北部、陝西南部、江蘇南部、安徽南部、黑龍江。

第V類地區：1000~1400小時，80~100千卡/平方釐米，143公斤標煤：四川、貴州。

從上述我國太陽能資源的類型看，太陽輻射的年總量在分佈上差異很大，這主要是受太陽高度角的變動、雲量的變化等因素的制約，從而形成各地分佈不均的狀況。但是，總的來看，我國太陽能資源十分豐富的地區佔全國總面積的三分之二以上。^②

我國各地根據不同條件，已發展了太陽灶、熱水器、製冷取暖、溫室、發電等利用方式，節省了一定數量的燃料，其中尤以太陽能熱水器最為普遍，年產熱水器面積一千多萬平方米，累計已達兩億平方米左右，目前我國是世界上生產太陽能熱水器最多的國家。

但太陽能的大規模利用，由於受各種因素的限制，長期以來發展緩慢。不過，由前述第一節的介紹可知，近十年以來，在大規模集中利用太陽能的技術方面，進展很快，已離根本性的突破相距不遠。對此，我國與世界先進水平的差距很大，特別是在工程放大和產業化方面，差距尤為明顯。例如，目前世界上已有數百座高溫太陽爐，在20世紀80年代，最大的一座在法國，它的聚光鏡有九層樓高，中心溫度可達攝氏四萬度，輸出功率約一千千瓦。再如，前述第一節提到國際上各種太陽能利用設施，在我國均未見諸報道。因此，如何儘快縮小這種差距，實乃亟待考慮和解決的戰略性課題。

大規模集中式的太陽能發電設施

先看太陽能光伏電站。我國大規模光伏電站的首選場地應為騰格里沙漠。它位於雅布賴山與賀蘭山之間，面積約4.3萬平方公里（其中3.3萬平方公里位於內蒙，其餘一萬平方公里分屬甘肅和寧夏），南臨黃河，北至中蒙邊

② 陳國新主編：《地學基礎手冊》，測繪出版社1984年。

界。該區地勢平坦，降水量 100~150 毫米；全年 10℃ 的積溫在 3300~3400℃，屬於我國第 I 類和 II 類光照條件最好的地區。

根據前述第一節所提供的參數：美國南加州地區 7.8 萬平方公里的沙漠面積可提供近 30 億千瓦的電力。據此，則只需在騰格里沙漠開闢出兩萬平方公里的面積，就可使其光伏電站的裝機達到 7.7 億千瓦；如年利用 1500 小時，則總發電量為 1.16 萬億度。如向西拓展至巴丹吉林沙漠（4.4 萬平方公里），還可開闢出不少於兩萬平方公里的面積；在總計四萬平方公里的沙漠上可裝機 15.4 億千瓦，年發電總量 2.3 萬億度。

這個大面積光伏電站的選址還有以下幾大優點：其一，它與我國蒙寧陝晉的煤炭、油氣基地和火電基地相毗鄰，較易解決貯能問題。其二，可以就近利用我國西電東送的北線，不需建設新的高壓輸電線路。其三，它位於我國陸上風能最佳區域南緣——世界上最佳的北緯西風環流帶，可實現風光互補發電。其四，如需建設太陽能聚光電站，使用蒸汽輪機發電，可就近從黃河取水，水源有充分保障。

關於儲能問題可作如下考慮：由第一節的描述可知，為解決 30 億千瓦光伏電站的壓縮空氣儲能問題，需配置 150 億立方米的存儲空間，即每億千瓦的光伏電站要配有五億立方米的存貯空間。那麼，上述 7.7 億千瓦的騰格里光伏電站，需配有約 40 億立方米的存貯空間；就現有的資料可知，僅山西省就已累計採出煤炭數十億噸，其已廢棄的礦井就夠壓縮空氣存貯空間的大半之用。如展望未來二、三十年，這就更不成為問題。^③

③ 目前陝北蘇里格氣田已探明的天然氣儲量達五千億立方米，現已向華北（包括北京）年輸氣數十億立方米。隨著這些天然氣的開發，那些採空的氣井均可作存貯壓縮空氣之用。

關於風光互補問題：在上述北緯西風環流帶內的我國諸省區，十米以下高度內的可開發風能約有 2.5 億千瓦，如展高至 40~50 米的高度，其可開發的風能將超過五億千瓦。內蒙古中西部是我國唯一連成一片的太陽能 and 風能都豐富的地區。這一區域太陽月總輻射量最小值出現在 12 月，最大值出現在 6~7 月。9、10 月冷空氣開始南侵，每 7~10 天就有一次，每當冷空氣過境，就有 5~6 級以上的大風，所以冬半年風大。夏半年冷空氣勢力減弱，地面為熱低壓佔據，由於水平氣壓梯度小，風力不大。故而兩種能源出現的最大和最小值的時間是相反的，恰好補充了兩者各自的不足，是我國綜合利用太陽能~風能最優越的地區。^④ 如此，電網的供電負荷將更為均衡，同一單位的存貯空間，可供兩種能源貯能之用。

再看太陽能聚光（熱）電站。由前述可知，新疆的東南部是我國太陽輻射的最高值區，在吐~哈盆地、羅布泊一帶至少可闢出不少於四萬平方公里的面積，建立太陽能聚光（熱）電站。由前面相應的參數可知，其總裝機可達 15 億千瓦，年利用 1500 小時，發電量為 2.3 萬億度。

由於塔里木盆地下面貯有數萬億立方米的地下水（大部分為苦鹹水，但最近有報道稱，在羅布泊下面發現了數百億立方米的淡水資源）；因此，用太陽能電站抽取地下水，作為儲能介質和冷卻用水，應無問題。另外，在發電的過程中，可利用蒸汽餘熱及周邊的太陽能光熱資源聯產淡水，為種植高品質作物提供水源，並兼收改造沙漠之效。

這種模式的開發還可拓展至塔里木盆地的其他地區，如臺特瑪湖一帶、盆地南緣，在用太陽能聚光（熱）發電

^④ 朱瑞兆等：《中國太陽能、風能資源及其利用》，氣象出版社 1988 年。

的過程中，聯產淡水，可實現對沙漠的大規模改造，其前景未可限量。^⑤

分佈式的太陽能利用

展望 21 世紀中葉，我國農村居民的生活和生產方式也將實現高度現代化，屆時農村人口約為三億人（其中農業人口約為兩億人左右），居住在縣級市及其以下的小城鎮人口約為五億人左右。

對於三億農村人口而言，如以人均住房建築面積 60 平方米及樓層不超過兩層來計算，則其屋頂面積不少於 90 億平方米。對後一部分的五億城鎮人口而言，人均住房建築面積 50 平方米，樓層平均為五層，則其屋頂面積約 50 億平方米。兩者之和為 140 億平方米。

根據工程院院士翁史烈提供的參數，^⑥ 如在 140 億平方米的房頂上安裝太陽能熱水系統，則可替代約 24 億噸標煤。140 億平方米等於 1.4 萬平方公里，以前述每萬平方公里裝機 3.85 億千瓦的一半和年利用一千小時來計算，如在太陽能熱水系統上面相隔兩米再裝一層光伏發電系統，則 140 億平方米的面積可裝機約 2.7 億千瓦，年發電量 2700 億度。

若以高度現代化水平時人均消費能源四噸標煤來計算，則上述八億人口需消費的能源總量為 32 億噸標煤（包

⑤ 參見本書第 10 篇〈塔里木盆地光熱土水資源綜合利用構想〉。

⑥ 翁史烈認為：中國現有建築屋頂面積為一百億平方米，如果 20% 的屋頂（20 億平方米）安裝太陽能熱水系統，則可替代 3.4 億噸標煤；如果 20% 的屋頂面積和 2% 的沙漠面積安裝光伏發電系統，發電量將達到每年 2.9 萬億度，相當於目前全國全年的用電量（翁史烈：〈我國可開發風能超過十億千瓦〉，《經濟參考報》2008 年 4 月 23 日）。

括生活和生產的全部用能)。上述雙層分佈式太陽能屋頂設施所提供的約 25 億噸標煤 (2700 億度電折合約一億噸標煤)，佔 32 億噸標煤的 78%。若再加上數十億噸的畜禽糞便所提供的沼氣、數億噸秸稈和分佈式的風電系統，則居住在縣域八億人口的現代化能源消費量便可全部由可再生能源來滿足。^⑦

三、小結

展望未來 50~100 年，我國大規模集中式的太陽能電站面積可逐步發展到八萬平方公里以上，總裝機 30 億千瓦，年發電量約 4.6 萬億度，佔總用電量九萬億度的一半以上。在這個過程中，煤電和核電可逐步收縮至一定規模，以完成電能來源的可更新化。

通過分佈式的太陽能利用設施，可實現對 25 億噸標煤的替代，這為生活在縣域的八億人口 (含三億左右的農村人口)，可提供現代化水平的全部生活用能以及相當一部分生產用能。如再利用由畜牧業提供的沼氣能源、部分秸稈資源和分佈式的風能系統，這八億人口的現代化生產和生活的能源供應將全面實現可更新化。

2008 年 8 月 6 日

⑦ 這是從能量總量上來說的，對於具體的用能形態而言，現代技術的進展也提供了相應的解決方案。例如，太陽能熱水系統的出水溫度只要達到 60℃ 以上時，便可用溴化鋰作介質實現直接製冷，不需發電這一環節；而美國的空調用電量達到總用電量的 15~17%。又如，通過秸稈汽化製合成氣，經過催化可成二甲醚，後者是超清潔的交通運輸工具的燃料。

附錄：

太陽能——替代常規能源的主力

2008年6月16日下午，鄧英淘、薛玉煒在濟南市山東省科學院新材料研究所，座談黑瓷複合陶瓷板太陽能利用技術及前景，此項技術由新材料研究所原所長曹樹梁教授發明，山東省科學院副院長姜笛、院科研處處長霍蘭、院辦公室主任崔雷、新材料研究所所長王緒科、黨委書記李蔚、原所長曹樹梁教授、科研科科長張新恩、研究員許建華、山東省委政研室蘇道年參加。其後，參觀了此項技術的試驗室及其生產車間，並冒雨觀看了已安裝在屋頂上的黑瓷複合陶瓷太陽能板集熱器。為方便起見，以下不再註明具體發言人，簡稱「新材料研究所」。本文根據錄音、筆記和資料整理，未經本人審閱，錯誤遺漏之處由編者負責。

課題組：曹教授，我們是在《科技日報》的一篇報道上得知，說你們研製出一種鈮鈦黑瓷複合陶瓷太陽能板，可以使太陽能的利用成本降到目前的十分之一以下。如果真是如此，那可稱得上是太陽能利用上的一次革命，很想瞭解你們是怎樣做到這一點的。

新材料研究所：這可以從以下幾個方面來分析。首先是材料的來源、開採；其次是從加工到製造的工藝和過

程；再次是安裝、使用、維修的全壽命期間的費用。目前，一噸普通瓷質實心毛板的價格約六百元，鑄鐵三千元（一噸），鋼材 4500 元，鋁材 2.4 萬元，銅材七萬元，平均來看，前者與後者的噸成本相差五倍至幾十倍。瓷質材料價格低廉是由於原料儲量大、分佈廣泛、平均運距短，燒成溫度約攝氏 1200 度，燒成時間短、加工工藝簡單。金屬材料價格昂貴是原料儲量少、有效含量低、平均運距遠、冶煉溫度約攝氏 1600 度或需電解冶煉、加工工藝複雜。製造玻璃真空管的硼硅玻璃是特種玻璃，溶解溫度高於攝氏 1600 度，加工工藝複雜，氧化硼售價每噸約二萬元。利用太陽能的目的是為了節約和替代常規能源（煤、石油和天然氣等），其中的關鍵是能量的得失，即在熱收集器壽命期間得到的太陽能與收集器製造、銷售安裝及壽命期間使用維護中消耗常規能源的能量的比值，稱此為 A 值。初步估算玻璃真空管型熱水器的 A 值為 2.16~0.864，金屬平板型熱水器的 A 值為 1.44~0.48，太陽能電池的 A 值為 0.1 左右。黑瓷複合陶瓷板太陽能收集器的 A 值可能達 5~10，甚至更高。這因為無白度要求的普通陶瓷材料是最廉價的工程材料之一，與金屬、硼硅玻璃等相比，本質上是採用廉價原料，以燒結取代了冶煉、熔製和電解，因此在材料和製品的製造能耗大幅度下降，同時使生產工藝和產品結構大為簡化。

現在我國的太陽能熱水器年產約 1500 萬平方米，我國的房頂面積粗略估計也在一百億平方米以上；每年新建房屋面積約 20 億平方米，房頂面積五億平方米，也需要 30 多年的生產能力。

課題組：依此計算太陽能的利用要想進入億萬百姓家將永無時日。

新材料研究所：這還不僅僅是太陽能的熱水利用，如果包括取暖、製冷、發電等方面的利用，那將是遙遙無期了。而用我們的黑瓷複合陶瓷太陽能板，其年生產能力可以達到 10~30 億平方米。這種鉅大的反差來源於成本和 A 值的比較。現在的太陽能板集熱器，使用壽命只有 15 年，在這個期間，它的集熱效率還會衰減；而我們的陶瓷太陽能板集熱器，可以使用 50~100 年，在這個過程中，它的集熱效率基本不衰減，這是它的材料和製造工藝所決定的。另外，太陽能利用主要是靠房頂，我們的陶瓷集熱板可以和房頂共用保溫層、防水層，這樣在建造和安裝上又可省下一筆費用；而玻璃管太陽能熱水器做不到這一點，平板式太陽能熱水器雖可做到這一點，但材料太昂貴（銅材）；我們的陶瓷太陽能板最易和建築一體化。建築物的壽命要求至少在 50 年，乃至 70~100 年，在這個期間，其他的太陽能集熱器要更換 4~7 次，而我們的板可以和建築同壽命，且集熱效率基本不下降，如以一百年計，我們的陶瓷板集熱器的 A 值可以達到 38~72。這就比其他的 A 值高出了幾十倍。

課題組：你們的這些理論和實踐，在太陽能的利用方面是具有顛覆性的進展和突破，用你們的陶瓷板集熱器獲得的熱水，能用來發電嗎？

新材料研究所：可以！廣州能源所搞了一個地下熱水發電，裝置的功率是幾百千瓦，用 91℃ 的熱水，熱效率 6%，自用 2%，輸出 4%，已運行了 30 年，現在還在運行。現在美國人用 70℃ 的水來發電。目前用地下熱水發電存在以下幾個問題：第一，要打一千米的深井，第二，有腐蝕性，第三，資源分佈不普遍、不均勻。因此，你的熱水獲得的成本足夠低，量又足夠大，那麼 4% 的淨效率就

很可觀了。這裡的關鍵是要能夠獲得大量的廉價熱水，只有我們的陶瓷板可以做到這一點；特別是中國西北地區有上百萬平方公里的沙漠，陽光又特別充足。

現在在太陽能利用上，有很多炒作。例如青島奧體中心採用進口平板太陽能集熱系統，每平方米六千餘元；太陽能電池每瓦售價約 25 元；目前太陽能發電成本約每度五元。如以他們的 A 值計算，實際上是得不償失的。

課題組：必須從全過程的角度看能量的產投比。從太陽能給家庭取暖來看，是個什麼樣的參數。

新材料研究所：可以這麼看，一平方米的房頂集熱器可以帶動一平方米的取暖面積。但其中的關鍵還是 A 值，即全過程的能量收支。現在消耗大量的常規能源只取得少量的可再生能源，這條路是走不通的。

陶瓷材料的製作是燒結，它取代了冶煉，這在材料加工上的能耗比冶煉降低十分之九以上，這是事物性質的根本。另外，陶瓷原料來源分佈廣泛，中國的陶瓷生產能力每年有 40 億平方米，相當於熱水器面積 1500 萬平方米的三百倍。到目前為止，中國的陶土資源還根本看不到枯竭的跡象。而富鐵礦石要從澳大利亞、巴西運過來，中國的鐵礦石含鐵量只有 30%，富集過程要消耗大量的能源。陶瓷燒成只需 1200℃，時間很短、反應熱很少，這就是陶瓷板太陽能集熱器革命性突破的來源；而且這種材料不老化、不褪色、不衰減。因此，用它取得的廉價熱水來發電可以做到比用煤發電還便宜，這是完全可能的。

簡單的計算表明：十萬平方公里的沙漠用來發電可以供全世界的電能消耗。十萬平方公里相當於一千億平方米。中國的陶瓷業一年的生產能力是 40 億平方米，25 年就把十萬平方公里鋪滿了；如果擴產的話，可達到年產

一百億平方米。1982年，西德搞了一個風道發電的試驗裝置，近來澳大利亞提供了一個大規模的利用風道煙筒發電的設想，可以達到幾十萬乃至上百萬千瓦的功率，煙筒的高度一千米，直徑130米，長處是利用大面積的溫室搞出了人造風，克服了風力的間隙性，缺點是效率低，只有不到2%的效率，另外一千米高的煙筒在工程上沒有先例。把這個設想拿出來，用我們的陶瓷板來做地面溫室，靠山的斜坡建風道，我們的風道發電效率可以達到5%左右。這種設計可以在西北沙漠裡做試驗。

水泥承插接口、超薄（一毫米）向陽面壁、槽型板、自保溫多層槽型板、無機材料儲水箱，這五項技術一旦取得突破，那就不得了，這就完成了太陽能利用材料的全部無機化，這就為大規模利用太陽能打好了基礎。目前一年一、二千萬平方米的利用面積，在全局上沒有多少意義，太陽能是面能源，每年利用面積只有達到幾百平方公里、上千平方公里，才在宏觀上具有顯著性。

課題組：用黑瓷複合陶瓷板加熱水後用來發電，每平方米發電有多少？

新材料研究所：一平方米陽光能量的上限是一千瓦，平均利用率大約是5%，即50瓦/平方米，折合白天黑夜平均30瓦/平方米，然後乘以當地全年日照小時，如全國平均為2300小時，最大的為3300小時，就是全年的發電量。因此，這個約束還是挺大的，所以必須採用最廉價的材料，才能使所得大於所失，否則一定是得不償失。在人口密集的地區搞太陽能發電，肯定是得不償失；例如現在太陽能路燈一盞要2~3萬元，這有些概念炒作的味道。以如此高昂的代價，獲得那麼一點可再生能源，怎麼能持續呢？這裡面有一個本質的判別，即A值的大小。

說到底，這是一個成本問題，現在大家的一個共識是：太陽能的利用如能解決成本問題，那也就解決了人類大部分能源問題。而成本問題又歸結為：材料、工藝和結構。有人說，隨著常規能源越來越貴，太陽能的利用可能就合算了，實際上，常規能源貴了，相當於 A 值的分母增大了，水漲船高，你的分子即便有所增大，但 A 值並沒變，還是不合算。要知道冶煉、熔融所需的能源要比燒結的多出十倍以上；還有我們的陶瓷板是擠壓成型，而金屬、玻璃是擠壓不出來的。

課題組：用你們的板，搞熱水發電的成本是多少？

新材料研究所：現在火電的成本是每度電 0.3 元，賣到老百姓手裡是 0.7 元左右。我們如在全國 I 類太陽能地區搞太陽能熱水發電，可以使成本達到目前常規能源的一半左右，即一度電 0.15~0.2 元。在寧夏、青海等地，幾十平方公里搞一座電站，周圍半徑五百公里就可以抵達我國人口密集區。在人口密集區裡搞大規模的太陽能電站是有問題的。

課題組：在大中城市裡，高層建築多，人均屋頂面積就小了，人均可利用的太陽能也變小了。

新材料研究所：20 層的樓房，足夠太陽能熱水器用了。因為一般的太陽能熱水器是一臺一臺的，無效面積很大，而我們的陶瓷太陽能板是全房頂鋪設，戶均有兩個平方米（20 層樓房），就可為每家每戶提供足夠的洗澡熱水。另外，每人還有向陽牆面八平方米，這也可以高效利用。

課題組：如果是 20 層的樓房，給每戶冬季供暖恐怕不夠吧？

新材料研究所：不夠！不能把太陽能變成神話。人均八平方米向陽牆面可以作為一個輔助熱源。但在農村地區，用太陽能作冬季取暖熱源是完全可以自給的。在農村，一戶四口之家，有一百平方米房頂，它的全部能量就都可以自給了。

課題組：夏天的空調製冷呢？

新材料研究所：一般說來，一平方米集熱面積可以解決一平方米房間的空調製冷問題，室溫在 25~26℃。高水平可做到 1 比 1.5，最好的示範是五百平方米集熱面積可帶動一千平方米的房間空調製冷，按 1 比 1 來計算，是有一定餘度的。

課題組：家庭用能的 60~70% 是以熱的形態利用的，其中第一位是取暖，現在夏季的製冷大概要排在第二位了，洗澡用熱水可能要排在第三位。按您剛才的說法，是不是可以這樣來理解：即人均有 25 平方米的房頂或向陽牆面，即可解決冬季取暖、夏季製冷及全年的洗澡熱水。

新材料研究所：應該差不多。最近，我們做了一系列的對照試驗：一個是我們的集熱器（每平方米二百元），一個是玻璃真空管（每平方米 1300 元），一個是平板式的（每平方米 2500 元），情況如下：從早上放水進去，到中午時分，真空管的溫度還沒有我們的高；平板式的溫度比我們高 3~4℃，但它有 10% 的熱水放不出來，到了晚上自然冷卻，溫度都損失了；而我們的水可以都放出來，每平方米比它多得 17 公斤熱水，因此從綜合效率上看，我們的陶瓷集熱板是最高的。如果從更長時間尺度來看，結果更為明顯：以 70 年計，1300 元一平方米的太陽能熱水器要

更換七套，即每平方米投入 9100 元，陶瓷集熱板與建築同壽命，無需更換，且不老化、不衰減，每平方米仍是二百元，前者相當於後者 45 倍。在幾十年裡，我們和他們比平均效率，優勢很明顯。另外，用陶瓷板把水加熱到 65℃ 後，放到我們陶瓷水箱裡，經一天一夜後，溫度只降低了三攝氏度；也就是說，把水箱加大後，我一天的熱水可以供應你洗三天、甚至一個星期，你用不鏽鋼做一百公斤的水箱，我可以做五百公斤的陶瓷水箱，因為陶瓷材料非常便宜！

課題組：從您講的情況看，有了黑瓷複合陶瓷板，大規模的太陽能利用已經不再是遙遙無期的事了，而是觸手可及，這確實令人感到鼓舞啊！展望未來 50 年，大約有三億人口在農村，這部分人口的熱利用問題已可以用太陽能自給了；另外還有五億人口居住在縣級市及小城鎮，如樓層為五層，人均建築面積為 50 平方米，則人均房頂有十平方米，如採用雙層陶瓷板，則人均房頂為 20 平方米，再加上人均向陽牆面八平方米，則這五億人口的冬季取暖、夏季空調、洗澡熱水也可用太陽能自給了。八億人口現代化時，人均能源消費以四噸標煤計，總量約 32 億噸標煤，其中生活用能約佔一半，即為 16 億噸標煤，如其中的 70% 以生活用熱的形式存在，即為 11.2 億噸標煤。如再開闢三萬平方公里的沙漠集熱場，用陶瓷板加熱水來發電，並用壓縮空氣儲能，則年發電總量約三萬億度，折標煤九億噸，二者相加約 20 億噸標煤。這就是說，太陽能的大規模利用，至少可替代 20 億噸標煤。這可就派上大用場了！

2008 年 9 月 19 日