

【工業】談未來的能源技術

2018-11-13 13:20:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/119839154>

兩年多前，我在《永遠的未來技術》一文中，解釋了可控核聚變發電在工程上的困難。本月稍早，我又在《開發太陽系的經濟效益》一文中，提到了核聚變發電在經濟效益上的可疑之處。不過因為那篇文章的主題是星際旅行，所以沒有詳細討論這個話題，反而是在留言欄敘述得比較清楚些。我後來想一想，覺得未來二三十年，人類在能源技術上的發展，是一個很重要的題目，值得在這裏特別寫一篇正文來仔細分析。

人類在一萬年前發明了農業之後，有了形成高密度聚落的經濟和技術基礎，因此才有了文明。但是人均GDP的成長一直非常緩慢，而且有一個不怎麼高的上限（其實也隨主要科技而變，例如鐵器時代的上限就比銅器時代要高一些），每次能接近這個上限的帝國文明，都在突破它之前就因內憂外患而崩潰了。工業革命後，有了一波又一波的技術突破，才使得人均GDP能持續以指數增長。所以有經濟學家認為科技發展才是提高生產效率（嚴格來說，提高的是生產效率的上限，要達到或接近這個上限，必須投資到基建和生產設備）的主要決定性因素，我個人是同意這個看法的。

所以科技發展，整體來說是一件很重要的好事。對科技樂觀而支持的心態在新興的工業國，例如19世紀的歐陸和美國以及20世紀的東亞，也自然是非常普遍。但是科技發展的方向極多，同一個經濟目的又只能容許很少數幾個經濟效益最高的技術生根發展，所以絕大部分的新科技點子，後來都落入了歷史的垃圾堆裏。例如硅谷的風險投資業（Venture Capital）內部的經驗法則，是每十個投資有一個成功就算運氣不錯了。新興工業國因為可以摸著先進國家的經驗過河，沒有這種不確定性所帶來的浪費，自然可以全力埋頭苦幹，集中精力來追趕；這是為什麼新興國家對科技特別樂觀，也是為什麼後進國家的GDP成長率可以遠高於先進國家的主要原因之一。

但是一旦一個國家已經躋身先進工業的前列，面對著許許多多不確定而又昂貴的未來科技選項，是否能做出明智的選擇，就成為國運的決定性因素之一。十幾年前，日本的電子廠商們把賭注下在等離子體電視（Plasma TV）技術上，這個錯誤對日本電子工業的衰落有顯著的促進效應。在同一段時期，原本主宰全球手機工業的Nokia，也因為堅持小面屏、長待機的技術方向，而在幾年內就把市場額份敗得一乾二淨。這個轉折對芬蘭經濟的影響，不言而喻。

中國有一個獨特的優勢，就是它的體量。世界上只有中美歐三個洲級的工業經濟體，其中中國的工業產值又比其他兩者大了近一倍。至少在理論上，中國可以負擔得起大約兩倍於美國或歐洲在嘗試研發新技術上所需的投資；但是在實際上，中國的人均資本存量（Capital Stock，也就是應用成熟技術的既有投資）還顯著低於歐美，在尖端技術的開發上也還有許多處於第二或甚至第三梯隊、亟須補課的項目（例如大客機和各式各樣的渦輪發動機），這兩方面的投資都有100%確定的經濟效益，相比風險投資業資助的新技術，雖然後者一般只有3-5年的前瞻性，經濟效益的確定性已經降到10%以下，所以固然可以試圖兼顧，但是絕不能因為後者而犧牲前者。

在1960年代，噴射（Jet）客機還是新興的技術，領先的英美兩國都在積極為下一代產品佈局，但是因為資金和技術人力的限制，不可能面面俱到，於是英國把賭注下在速度的進一步提升，其結果是Concorde，而波音則專注在降低客戶的運行費用上。雖然Concorde在工程上是絕對可

行的，在技術上也是值得驕傲的獨步天下，但是它的飛行使用成本過於昂貴，根本競爭不過波音的產品，勉強由國家補助，由國有航空公司營運了少數幾架，結果年年虧損，直到退役，英國的客機工業也從此消失。

前面提到的幾個負面例子，都是工程上可行、經濟上可疑的失敗。但是它們和核聚變一比，在每個角度都強上千百倍。

首先，它們無一有工程上可能過不了的難關，純粹只是時間、資金和人才的投入問題；核聚變剛好相反，等離子拘束、強磁場發生、高能中子處理、承重結構感染放射性後的更換，都是史無前例的工程難題，每一個都可能成為無功而返的攔路虎。

其次，開發顯示器和手機技術所需的時間大約是兩年，客機大約是十年，它們的市場競爭對手都沒有明顯的時間優勢。相對的，研發商用核聚變所需的時間極難估計，但是沒有人敢說是在20年之內，實際上應該是50年以上，至少是到團隊主要成員的退休年份為止（這也是為什麼從40年前，研發核聚變所需的時間估算到現在一直沒變）。更大的問題是，既有的廉價發電手段已經很多了，在未來10-15年更會有下一代靠譜的技術（參見下文）加入實用，所以核聚變必須在效費比上顯著優於所有現存和未來的能源技術，才有經濟效益可言。

第三點，核聚變必然是極度昂貴的。開發核聚變的團隊常常吹噓它們所將用的燃料多麼地普遍，所以核聚變發電會是廉價到幾乎無限的，這是一個在各方面都算是明顯而無恥的謊言。核聚變用的燃料並不是氫，而是氫的同位素：氘和氚。氘還可以靠核濃縮從海水中提煉（即重水），氚卻在地球上沒有任何可開採的存量，必須靠人工合成（即核蛻變，Transmutation，這類似用人工把其他金屬轉換為黃金）。這還不算如果要改用氦三，那麼就必須到月球開礦的費用。不過我覺得他們的謊言最離譜的一點，還是只算燃料的費用；如果用同樣的邏輯，那麼太陽能和風電就真正是零成本了。

事實上，核聚變發電站必然會有的一個極大費用，是其反應器的壽命極短。因為從物理上就無法避免極大量高能中子的對反應器結構的持續照射，那麼就只有定期更換這一條路。核裂變也有中子，但是數量少很多，能級低7倍，而且只有燃料棒承受轟炸，必須定期更換；最新一代的反應器本身壽命從60年起算。核聚變不同，是整個反應器承受中子轟擊，包括承重結構和（幾乎無限昂貴的）超導磁鐵在內。所以運行了一段時間（可能短至6個月）之後，反應器的放射性開始接近福島的反應爐，然而承重結構已經弱化了，隨時有坍塌的可能；很顯然地，與其試圖在高放射性環境下施工拆換部件，不如像Chernobyl那樣直接用幾百萬噸水泥封存，然後再另建一個還比較便宜。這樣的運行，基本上是有意地去一再重複福島事件，能有什麼經濟效益，真是滑天下之大稽。

另一個必然極大的費用，是安全保障。核裂變反應器經過了70多年的運行經驗、幾個慘痛的教訓、好幾代的發展，總算有些安全性可言，但是價錢也水漲船高（因為不能在高放射性環境下進行維修，核裂變發電站所用的材料和工藝都是航天級別的），即使在中國也遠遠超過了十億美元這個量級。但是核聚變反應器先天就比核裂變還要不穩定得多，例如如果簡化到只看對反應器的電力供應（斷電正是福島事件的直接原因），核聚變的容錯裕度（Margin of Error）是小於一秒，而核裂變是大約一天。這主要是因為等離子體必須由強磁場來拘束，產生磁場的高壓電流稍有波動，拘束磁場就會崩潰，極高溫（高於一億度）的等離子體只能打到真空屏蔽上，把它瞬間蒸發，這是第一級爆炸。接下來的第二級爆炸有多麼強、因此散佈的放射性物質有多糟糕，必須有了反應器的設計細節才能計算。目前根本沒有實用化的反應器設計，也就無從估計起。就算我們假設永遠不會有放射性污染的泄露（其實不可能保證，尤其是新原理、新設計；所謂核聚變沒有放射性廢料，是另一個常見的謊言：核聚變反應器的高能中子就是有史以來可控條件下最强的放射性輻射，反應器的材料被照射之後，自然會核蛻變成爲其他放射性物質），至少整個反應器也報銷了，那麼我們又再次面臨了在高放射性環境下進行修理的問題，同樣的最合理的解決方案

是直接報廢掩埋。

所以即使沒有時限，核聚變能取代核裂變的機率，也是千中無一。但是核裂變已經不是一個很好的能源技術：它雖然沒有碳排放，但是十分昂貴（幾乎為燃煤的兩倍，這些費用主要來自建廠、營運和安全管理，而不是因為燃料），而且總是有一點安全隱患，如果不是因為過去70多年Chernobyl和福島附近居民已經為人類付了學費，考慮它的經濟效益時就還要加上相當的風險溢價（Risk Premium），那就真的是定價高到脫離市場（Priced Out of The Market）的地步了。

中國還在繼續投資核裂變發電技術的主因，是燃煤雖然便宜、方便、而且自主可控，但是遠近兩個層次（遠是全球暖化，近是煙塵和硫化物）的空氣污染都有很大的社會成本。太陽能和風電雖然和核裂變一樣沒有碳排放，而且經過幾十年的發展，成本已經基本與燃煤相當，但是它們有兩個很大的毛病：1）它們一般遠離人口中心；2）它們的供電都是斷斷續續，不穩定的。第一個問題在中國這樣大的國土上，總還是找得到地方來安裝，然後可以靠超高壓長途電網來運送電力（但是並不容易，也不便宜，中國早已有所需的技術，但是仍然沒有建成足夠的電網），第二個問題目前只能靠所謂的Base Load（基本負荷）發電產能來彌補。核裂變的真正經濟價值就在於它是Base Load的主要選項之一。

然而在可見的未來（2025-2035之間，絕對遠在核聚變能實用化之前），必然會有幾個重要的技術突破，從而改變經濟效益的計算方程式。首先，中國已經在積極建設智能電網，一旦連接了全國（也有連接周邊國家的計劃，不過那會需要更長的時間）的電力生產和消費中心，就會有規模效應，局部過多或過少的現象會自然互相抵消。

其次，小型核裂變反應器（大約100MW，比傳統反應器小一個數量級）和我以前談過的高溫氣冷堆（參見前文《高溫氣冷堆》）也會實用化，有相當的可能性（亦即機率大於10%）會比傳統核裂變更便宜、更安全。

但是我覺得，最便宜、最可靠、最安全、最有可擴展性的新技術，還是儲能，也就是把多餘的電力儲存起來，到需要的時候再釋放出來。

電力供應傳統上是幾乎完全沒有時間上的餘裕的，這一秒多出來的電不能留給下一秒用。現有唯一的例外是水電，可以在供過於求的時候，反轉渦輪，把水打回水庫裏。但是大部分國家（包括中國在內）的水電存量都遠遠不足以滿足消費，而且反轉渦輪的效率不好，再加上水庫的存放水決定往往受其他因素（例如灌溉、乾旱或泄洪）影響，所以水電不可能是最終的答案。

因此我們說儲能，最後還是要靠電池。不過現有常見的鋰電池是為隨身使用而優化的，它很輕便、能量密度高，但是這不是電網儲能的需要。電網儲能的要求是1）便宜；2）可以幾乎無限擴充；3）可以幾乎無限循環；4）安全，不會爆炸；5）儲能的效率高。鋰電池在前四方面都很糟糕，所以不用考慮。

目前有兩個技術很有希望，我尤其喜歡全鈮氧化還原液流電池（Vanadium redox battery）。它滿足所有前述的五項要求，而且在物理和工程上都是很簡單而無重要障礙的。目前所需要的，是為商用做最後一些實用化細節的微調和優化，如果有足夠的政策支持，幾乎可以確定在2025年前能搞定。可惜在中國我只知道一個小團隊在做，預算也只有核聚變的零頭（絕對小於1/10，可能小於1/100）。這種資源的錯誤配置，才是我會在這個話題上反復大聲疾呼的動力。畢竟科幻小說可以是好的娛樂，甚至可以是藝術，但絕不適合做為能源政策或治國方針。

另一個技術用的是氫氣。電力供過於求的時候，電解水來產生氫，供不應求的時候，再用燃料電池（Fuel Cell）來發電。我以前解釋過，氫氣化學活性非常高，很容易爆炸，所以它的安全性是有問題的，但是因為這裏只須要儲存氫氣而不須要運送，還是有可能剋服這個安全問題。效率上還可以，尤其是如果和高溫氣冷堆結合，後者可以先把水加熱到900°C（目前的中國技術）或者

甚至1100°C（如果改用氫氣直接推動渦輪），那麼電解所需的電力更少，效率會更高，可以高於100%（並不違反熱力學定律，因為高溫氣冷堆提供了額外的能量）。我對它的保留態度，主要源自於技術上的相對不成熟，氫氣儲存、結合高溫氣冷堆的電解和高效燃料電池都會比全鈳氧化還原液流電池更複雜、更花時間、更危險。但是這些仍然是工程上可以解決的問題，所以氫儲能做為一個技術備份，準備在2035年左右商用普及化，還是很值得投資的一個選項。

【後註】有讀者在留言欄問了一個很好的問題，我才注意到正文最後兩個段落可能引起一些誤解。首先，我絕對不是說只有這兩個技術才值得投資，而是在我個人所知的範圍內他們是最應該投資的，實際上必然還有我不知道的新研究方向，尤其是還在實驗室裏醞釀的主意，除了研究團隊自身以外，基本沒人會聽說過。這是商業應用的研發，連學術期刊都不一定會找得到。

其次，我對成功機率是以物理學人的態度來做估算，也就是只要求到數量級級別的精確。換句話說，是分類為：。。。99%，90%，50%，10%，1%，0.1%。。。全鈳氧化還原液流電池是我所知唯一在50%那一級的，氫儲能則是在10%那一級。我說在2035年之前電網儲能技術會有大的突破，正是因為我相信還有許多在10%或1%級別的技术會被嘗試，所以整體來看，至少有一個成功的機率是在90%級別的。

6 条留言

南山臥蟲

2018-11-14 14:36:00

//全鈳氧化還原液流電池（Vanadium redox battery）。它滿足所有前述的五項要求，而且在物理和工程上都是很簡單而無重要障礙的。目前所需要的，是為商用做最後一些實用化細節的微調和優化// 要突破這個實用化 / 商業化的瓶頸，王兄估算大概要砸多少銀子？

“

一億，人民幣。

oboe

2018-11-15 02:16:00

抱歉，我知道下面的問題有些歪樓，如果王先生覺得不合適，懇請直接刪除。王先生提到：「然而在可見的未來（2025-2035之間.....必然會有幾個重要的技術突破」但我個人的經驗是，我很難準確評估何時能得到突破性的結果。有時想要合成某物質，結果做了幾年都做不出來；有時終於合成出來，但指標卻不如預期。所以申請計畫經費時都像是在用自己的名譽去賭博，為了避免開天窗，常常是先做出研究成果，再拿去申請項目。只有不需要技術突破，只需要重複既有技術的項目，才比較有把握。請問，對於技術突破的時間點，人們是怎麼預測的？謝謝！！

“

很好的問題。在一個技術被實用之前，的確不可能預見所有的攔路虎，我們只能估計他的機率。就連全鈳氧化還原液流電池這樣非常簡單、有前景的技術，實際上成功的機會也不過是略大於50%。它之所以應該被優先投資、嘗試，是相對性的，因為別的科技成功的機率只是略大於10%，那麼它自然應該被另眼相看。氫儲能就是成功機率在10%左右的一種技術，但是至少比起核聚變那種 $10^{(-n)}$ 的不靠譜忽悠，有質的不同。我並不是說到2035年之前，只有這兩種儲能技術應該被嘗試。其他不知名、還在實驗室被慢慢摸索的技術，至少以百計。而且科技進步的道路，往往是在失敗中學習。如果全鈳氧化還原液流電池因為某種未預見的因素而不能實用，了解這個因素就會幫助研究團隊選擇一個代替的方案，或許把鈳換成其他的配方。所以我說在2035年之前，儲能的問題會在原則上被解決，並不是基於對正文中所提的兩個技術特例的信念，而是從整個挑戰的困難度（並不是很高）和人類社會的努力程度（正在逐漸正視這個問題）來做的估計。

台灣快選舉了，都忙着湊熱鬧看“韓流”。先問個簡單的傻問題 - - 為甚麼那些富豪（例如，一億剛好是小目標的王健林），沒有人砸錢下來搞這些技術呢？

“

因為私人資本在完全無風險的情況下，每年還指望5-8%的報酬率。有風險的時候，自然要再加上溢價。儲能技術，從國家觀點來看，十幾年內做出來是十拿九穩，又有極大的好處，投資是應該的。私人資本，對十幾年後才可能有回報的計劃，卻根本就不可能有興趣，因為兩三年就可以翻牌的投資項目太多了，每兩年賺30%，17年是130%的8.5次方=930%，這種長期工業技術開發根本不可能有這麼高的回報（因為大部分的利益，被整個國家社會分享了），而且8.5個不同的投資項目，風險自然抵消一部分（中心極限定理），多餘的風險溢價讓這個短期投資策略更加有利。臺灣的問題，根本在於體制，偏偏大家還是每隔兩年就指望一個新的救世主。就算韓國瑜真是個聖人，又能怎麼樣？Renzi當到總理，還不是鎩羽而歸，何況區區一個市長？

nthu.cs.晉陽彭城客

2018-12-01 11:12:00

CCTV 全鈳氧化還原液流電池 <https://www.youtube.com/watch?v=AQuOuCOYTqw> @18:06

“

很好的節目。一般行內人都是報喜不報憂，這裏的氫能源研究者也是如此，但是至少他們稍稍提到了運輸氫氣的安全隱患。全鈳液流電池已經實用化；現在的發展重點在於量產上降價和品管的進一步改善，所以我才說它成功的機率遠大於其他的技術。

南山臥蟲

2018-12-05 10:37:00

對於各項科技成果：實驗室（科研行為） - - 量產可行（國家行為） - - 商業普及（市場行為）資本及國家是如何判斷的？不時見到有些資本是投錯了地方的（故曰：風投），國家亦如是。又，若果有真正的慈善家想造福社會，其實不必到處捐錢，只須在幾個有較大成功機率的重點項目上，砸下銀子，就起碼可以收回成本了，（簡單而言）可以這樣說嗎？若然，為甚麼沒有人做呢？

“

從實驗室到實用是最大的關頭，必須要是耐用、符合用戶規格、品質一致可靠、價格合理有競爭性。至於國家或私人，這是投資報酬率的問題，私人資本一般不在乎社會收益，也不願意做太長遠的投資。慈善家投資到長期工業項目，在美國已經有前例，Gates就是TerraPower背後的主要金融推手。這個技術叫做Traveling Wave Reactor，是快滋生反應器的一種變型，中核已經同意在福建建造一個原型機。在核聚變方面，也有不少小公司拿了富豪的半慈善資助，不過那些人沒有Gates的經驗，不知道它們有多不靠譜。

游客 越雷

2019-01-16 20:11:00

王先生在三楼终于解开了我的疑惑，因为我看来有介绍中美经济的文章三十篇左右了，不论是公知带路党还是当代红小将写的，都提到了一件事：美国基建已经老化但是无力更新（当然公知说美国有马斯克的真空铁路之类的“黑科技”很快又要超过中国云云，小粉红就说美国走下坡路了）。我之前就知道一个事实：国企一定会去建设基建，私企几乎不会在一切为零时主动搞道路啊，电路的（都是捞现成的），原来是基建的福利会被社会大众所稀释啊。所以王先生，希望您能写篇文章，大致讲一讲国企和私企应该在国家不同阶段（比如中国，改开到1989欧美制裁一个阶段，到中国入世贸组织第二阶段，之后到现在又是一个阶段）应该发挥什么作用，国家资源怎么分配（从国有为主，私有为辅到现在要大力支持民企）。（如果这些问题太大了，还麻烦指出来，我好像有些不知天高地厚了）

“

題目的確是太大了，你有空自己看看林毅夫的著作好了。我知道這些經濟學的文章比起我博客的科普要長得多、也難讀得多，但是我寫簡短科普的能力是有極限的，並不是所有複雜的議題我都能在一頁的空間裏討論完畢。

[返回索引页](#)