

本系列介紹一些有趣的科技大發現與發明故事，
這些靈機一動的突破思維常帶來創新的工具、
方法、理論等，也促進了人類的福祉。

電化學的應用 與發展—鋁的提煉 與燃料電池

■ 林天送

電化學是指由電子轉移（電流）所引起的化學反應，
利用電化學能從鋁礦提煉鋁金屬，電池也是利用電化學原理操作的。

小百科

電化學是指由電子轉移（電流）所引起的化學反應，平常有金屬離子與電解質溶液參與作用，電池就是利用電化學原理的操作。早在1832年，英國的法拉第就開始做電化學的實驗，並定下2個電化學原理。

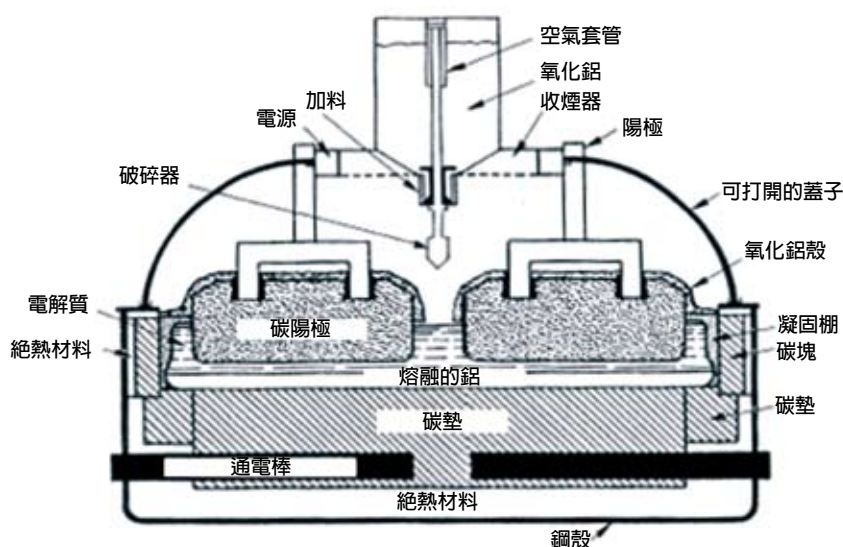
本文要報導的是，利用電化學從鋁礦提煉鋁金屬及燃料電池的發展。鋁金屬的特質是輕（比重只有2.7，大約是鋼鐵的1 / 3），能與別的金屬形成合金，其堅硬度不比鋼鐵遜色，且不易生鏽（在空氣中會產生一層氧化鋁的薄膜，而不會侵蝕整體），如飛機的骨架就以鋁合金建造。1903年，萊特兄弟第一次試飛的飛機，就是以鋁為架構及引擎。1886年，美國霍爾（Charles M. Hall）與法國埃魯（Paul Heroult）分別獨立研究用電解方法從鋁礦提煉鋁，同時申請到專利。

燃料電池（fuel cell）可以不斷地把一種燃料的化學能直接轉變為電能。燃料在電池的陽極產生電子，氧化物在陰極，燃料與氧化物是化學反應物，不斷地使溶在電解質溶液中的反應物流入反應槽（電池），就能把化學能直接轉變為電能。

如氫燃料電池是以氫為燃料，而來自空氣的氧是氧化物，即 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ，這是一個高放熱反應。這放熱反應的產物是水，而不是一般汽油燃燒釋放的二氧化碳，是一個提高能源應用效率又能減碳的反應。其他有機化合物如酒精或碳氫化合物，都可當作燃料電池的燃料。在能源危機及節能減碳的未來，燃料電池會是一項走紅的產業。



發明提煉鋁金屬方法的霍爾



提煉鋁金屬的電解槽設備

發明者

美國霍爾與法國埃魯分別獨立研究用電解方法從鋁礦提煉鋁。霍爾出生在俄亥俄州的譚姆遜（Thompson）小鎮，入歐柏林學院（Oberlin College）念化學，大學3年級才開始研究鋁的提煉，畢業後的一年半才找到「祕方」。

事先兩位發明者都不知道另外一方的研究，埃魯比霍爾早幾天提出專利申請，但霍爾有完整的實驗紀錄及文件證明他的發明不是抄襲的，因此二人同時得到專利。他們的年齡相仿，都是22歲發明鋁的電解提煉法，而且很巧合，他二人也都在1914年去世，享年51歲。

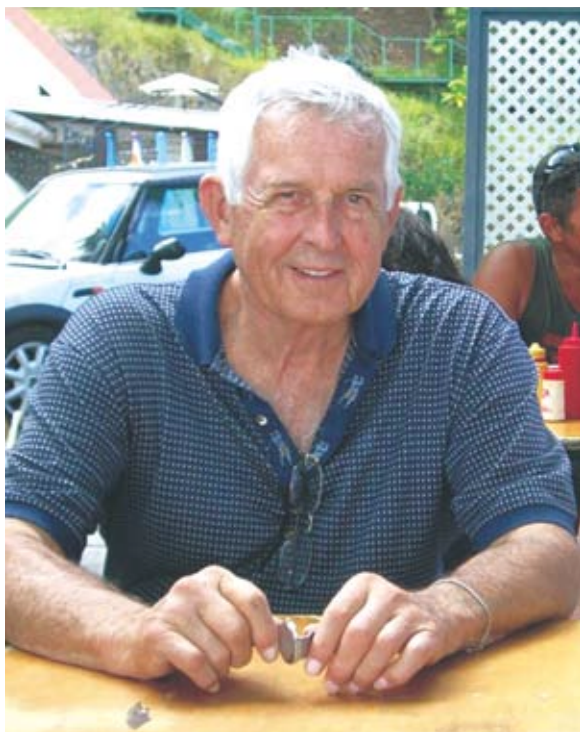
燃料電池的原理早在1838年就由德國的蕭白恩（C. F. Schonbein）提出，但真正有商業實際應用是由加拿大的巴拉（Geoffrey E. H. Ballard, 1932-2008）研發出來的。巴拉於1983年創建巴拉能源系統，主要產品是質子交換薄膜燃料電池，因此巴拉常被稱為「燃料電池工業之父」。巴拉出生在尼加拉瀑布的加拿大邊境，念完加拿大的皇后大學，入石油公司工作，爾後從華盛頓大學（聖路易市）的地質系獲得博士學位（1963年）。

靈機一動

鋁的英語拼寫有一段小故事。1807年，英國的德衛（Sir Humphry Davy）稱它為aluminium，而後改稱為aluminum，字尾的-ium是為附和當時所發現的其他金屬元素，如sodium、potassium等，歐洲人到目前仍然維持aluminium的稱呼。但是美國的霍爾經常寫錯成aluminum，把-ium省寫為-um，爾後美國人就以霍爾的寫法為正式拼寫，並一直保留下來。

先來看美國霍爾的發明故事，它比較有戲劇性。當霍爾念到大三時，有一天他的化學老師吉威（Frank F. Jewett）在課堂上展示一塊發亮的鋁金屬，並說：「鋁是一個非常特別也非常重要的金屬，但到目前為止，它的產量很少，我們只能以貴重金屬看待，地球含有8.3%的鋁，誰能從鋁礦大量提煉出鋁，就會是個大富翁。」下課後，霍爾對他的朋友說：「我會是那個發明的人。」

聽完老師一堂課後，霍爾就開始找吉威老師談，也開始找有關資料，初步商討得到一個研究方向—用電解方法，老師也答應讓他在學校的實驗室做實驗，後來他在家屋的後院蓋了一個小木屋做為



使燃料電池真正有商業實際應用的巴拉

實驗室。他先用電池做電源，試用各種不同方法、材料、溫度等，也經常請教吉威老師。他的姐姐朱立亞（Julia）也是歐柏林學院化學系的畢業生，經常給他鼓勵與幫忙。

1885年，他大學畢業，但仍鏗而不舍，日夜都在實驗室努力。有一天他利用鋁礦轉變成氟化鋁鈉複合物（cryolite, $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ ），加高溫（約攝氏1,000度）電解，終於於1886年2月16日在陰電極上找到發亮的鋁金屬，吉威老師也進一步驗證它是鋁金屬。

接著來看燃料電池的發明。巴拉拿到博士學位後，就進入陸軍當文官。1973年美國面臨石油危機，聯邦政府成立能源維護研究署，生逢其時，他以專長及善於管理而被任命為研究署的第一位主持人。但巴拉很快就發現能源的開發與維護必須有長期的計畫，並不是一蹴可成的，因為理念不同與政治因素，巴拉很快就辭職，自己成立公司開發能源。

能源維護研究署的一個方案是利用傳統的鉛電池當電動汽車的能源，但鉛電池的使用期短，而充一次電只能走一百多公里。又早期巴拉曾經在石油公司工作過，後又做能源的研究工作，長期以來就以「淘汰內燃引擎」為使命，因為內燃引擎轉變能量的效率低，浪費太多能源，於是他開始研究燃料電池的可能性。

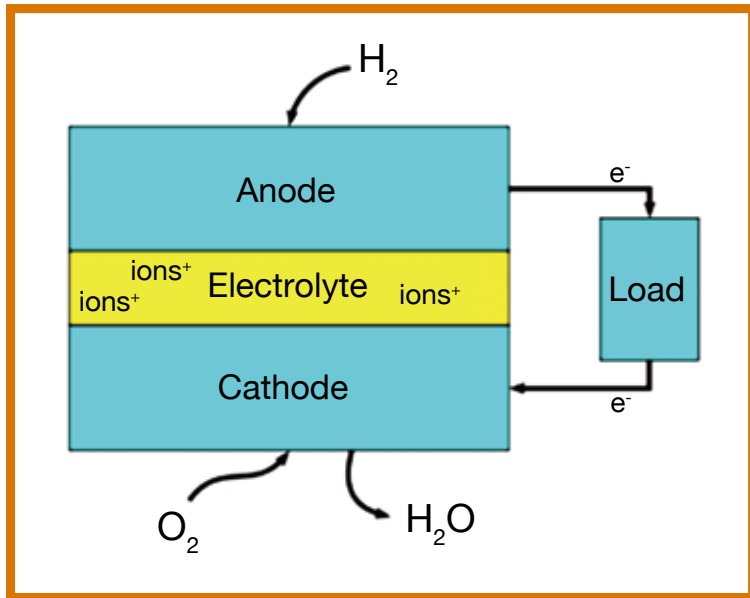
燃料電池的研發

1970年代後期，巴拉離開能源維護研究署後，先與史瓦滋（Ralph Schwartz）及普拉特（Keith Prater）研發鋰離子電池。普拉特是德州大學化學教授，他的研究發現二亞硫酸化鋰能當鋰電池的原料，很快地普拉特的實驗室也順利完成鋰化合物的合成，就開始成立美國能源公司做鋰電池的產業。

後來巴拉把公司賣給史瓦滋搬回加拿大。1980年代初期，巴拉申請到加拿大國防部能源研究部的計畫，目標是開發低成本的燃料電池，尤其是研發固體聚合物燃料電池，於是成立巴拉能源系統公司專門研究燃料電池。

但巴拉本人及公司的研究人員對燃料電池並不甚了解，當時普拉特教授有熟人在美國拉薩拉莫國家實驗室（Los Alamos National Laboratory）做聚合物燃料電池的研究工作，普拉特就專程去一趟拉薩拉莫學習並帶回一些樣本，同時根據加拿大的官方資料，才摸索到方向，而申請到第一個50萬元的研究計畫。1986年就研發出聚合物燃料電池，其性能比那時的任何燃料電池高出4倍。

1993年，巴拉推出一輛完全用燃料電池做為能源的公車，開始到世界各地的能源展展示推銷他的燃料電池，美國福特及德國的大恩拉



以氫與氧氣做為燃料的燃料電池簡圖

耳—克萊斯拉（Daimler-Chrysler）並投資7.5億美元買巴拉能源公司的股票。2000年，巴拉開始研究氫氣的製造、貯存及其在燃料電池中的應用問題。

掌聲回響

霍爾由於化學老師吉威的一句話，使他大學還沒有畢業就雄心勃勃要發明提煉鋁金屬的方法，有良師及姐姐的指導與輔助，使他很幸運地找到「祕方」而順利申請到專利。他找到投資者並成立匹茲堡還原公司，後來改名為美國鋁公司（Aluminum Company of America，簡稱Alcoa）。要由實驗室的成果工業化而大量生產，並不是一件簡單的事，不僅是工程單元問題，資金來源及產銷細節都是關鍵問題。經過一些挫折，霍爾終究成了大富翁，他曾訂過婚，但沒有多久，未婚妻古娣（J. Cody）就離開他，他也就終身未婚。

霍爾逝世後，捐贈大約三分之一的遺產及Alcoa的股票給母校歐柏林學院，學校也在化學系館塑造一座鋁質遺像以茲紀念，但質輕的鋁遺像常常不翼而飛，後來就把鋁像嵌在鋼筋水泥上。學

校把吉威教授的舊房改成歐柏林傳統中心，展示當年鋁電解實驗設備以表揚霍爾與吉威的重要貢獻。

霍爾一生曾經得過無數的榮譽，如美國化學協會的柏金獎（Perkin Medal），獲選為美國礦冶科學院的院士，當過美國電化學協會的副主席。

巴拉於1999年榮獲世界科技網獎，同年被美國《時代》雜誌推選為「衛護地球的英雄（Hero for the Planet）」，2000年獲瑞典古丁堡國際環保獎，2002年被《科學美國人》（*Scientific American*）

選為「年度產業領導者」。他在一次世界氫氣能源大會上說了一句很中肯的話：「要從汽油經濟改變為氫氣經濟，必須依賴學界、工業界及政府的多方合作才能推動達成。」

林天送

美國華盛頓大學（聖路易市）化學系

深度閱讀資料

Norman C. Craig (1986) Charles Martin Hall: The Young Man, His Mentor and His Metal. *Journal of Chemical Education*, 63(7), 557.

<http://www.alcoa.com>

http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Martin_Hall

http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell

http://en.wikipedia.org/wiki/Geoffrey_Ballard