

# 製糖產業中 資源與熱能的循環

翁鴻山

糖的產製是資源充分循環利用的良好範例，蔗糖是主產物，其他高價值的化學品及食物則是副產物，甚至廢棄物也能做為肥料與土壤的改良劑。另外，在製糖的過程中，水及熱能的循環利用也是循環經濟中值得效法的做法。

我們的日常生活中有許多與糖相關的製品。糖的甜味是人與生俱來的味覺，從小孩們愛吃的各式糖果、糖葫蘆，到居家料理調味用的砂糖，甚至是使用各式糖萃取物或發酵物等，「糖」是生活不可或缺的必需品。

台灣過往曾盛產蔗糖並仰賴其出口，是國家經濟一大支柱，「蔗糖王國」的名號因此聞名遐邇。而今，製糖業在台灣已不復過去的繁榮，多數糖廠已關閉，僅留二間仍在運轉，台灣糖業公司也轉型從事包括利用生物科技生產保健食品、酒精、酒品與美容保養品的事業。然而，民間對糖製品的需求不減反增，現代製糖技術在資源短缺與大量消費的當下，必定要有「循環生產」的思維，以避免有限資源過度的浪費。

## 蔗糖的製造及主要副產物

既然糖對民生如此重要，那麼就先從糖的化學性質了解起。醣類依化學結構可分為單醣（如：葡萄糖、果糖等）和雙醣（如：蔗糖、麥芽糖）兩類。蔗糖和甜菜糖屬雙醣類，分子式是  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ，含有葡萄糖和果糖兩個單醣成分。蔗糖和甜菜糖，顧名思義，前者的原料是在熱帶和亞熱帶生長的甘蔗，後者則是由生長在溫帶和寒帶的甜菜產製的。



成熟的白甘蔗，工作人員以簡易糖度計檢測它們的糖分。（圖片來源：高雄市立歷史博物館）

現代製糖技術在資源短缺與大量消費的當下，必定要有「循環生產」的思維，以避免有限資源過度的浪費。

台灣的糖當然是由甘蔗製造的。糖廠製造的蔗糖因不同的製法和是否精製，而分成黑糖、粗糖、白糖等。除製造黑糖只有蔗渣的副產物外，製造其他糖製品因為都歷經清淨和分蜜二個步驟，因此除蔗渣外都另有濾泥和糖蜜二種副產物。

甘蔗→蔗糖+蔗渣+糖蜜+濾泥

## 台灣糖業及相關產業發展概要

台灣何時開始種植甘蔗？較可信的記載是明朝萬曆年間（1572～1643年）由福建居民攜來種植。當時已有製糖場所（稱為糖廍）的存在，是用孔明鼎（一種大鐵鍋）熬糖。

荷蘭治台時期，為配合其糖業政策，規定田制，輸入農具及耕牛用以種植甘蔗，是台灣最早有計畫、有目的性的政策。製糖是以水牛拖拉石車榨取蔗汁，再以大鐵鍋煮糖。日本治台以前，都是沿用這種方式製糖。

1895年清廷把台灣割讓給日本後，三井物產株式會社於1900年成立台灣製糖株式會社，並於1901年在現高雄市橋頭區設立新式糖廠，利用從英國進口的壓榨機、分蜜機、法國製的蒸發罐，和來自沖繩八重山的新式機器開始運轉。不僅製糖效率大幅提高，糖的品質也顯著提升。並且興築搬運甘蔗的專用鐵路，載運甘蔗的小火車民間暱稱為「五分仔車」。

由於總督府不斷獎勵，吸引多家財團設立製糖會社，興建許多新式製糖廠，並逐漸改用新式機器。在這期間，糖業試驗所也致力於甘蔗品種的改良，因此甘蔗及蔗糖的產量大增，於第一間新式糖廠設立後十年內，增產十倍。

其後民間人士暨專賣局積極研究由糖蜜發酵製造酒精，於1911年獲得成功。

於1913年設置第一座由蔗渣製紙漿的工廠，雖然歷經品質欠佳、經濟不景氣等因素，最後也在1934年成功商品化，使得製糖業獲利率更高。此外，於1931年開始以熱壓法用蔗渣製造普通甘蔗板；1961年更進一步在蔗渣中添加黏合樹脂製造蔗渣塑合板。自1934年起，酒精、紙漿、酵母（註1）等副產品需求大增，副產品成為當時糖業會社主要的獲利產品。

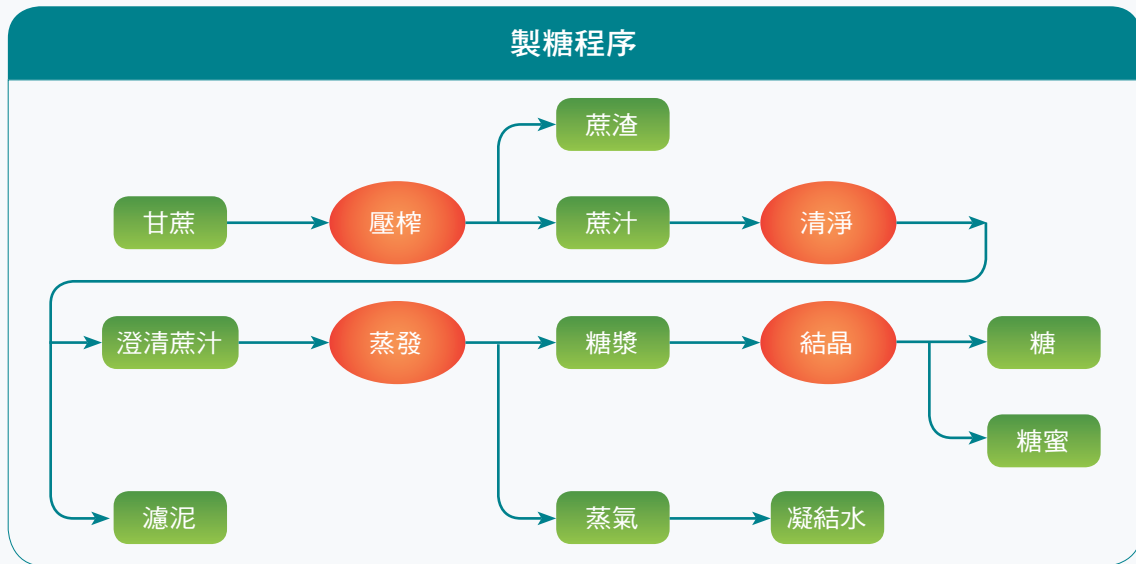
1941年，太平洋戰爭爆發後，勞力缺乏，蔗園管理不週，糖產量急速下降。戰爭末期，甚至不惜以砂糖做為酒精原料。台灣糖廠又慘受美國軍機轟炸，全省42座糖廠中，損毀者達34座。

戰後，台糖公司全力修復生產，政府靠著砂糖賺取外匯度過艱難時期。1990年代起，因製糖成本過高，無法與其他國家競爭，糖廠被迫陸續停止生產，甚至關閉，部分則拆遷到東南亞。台糖公司也配合政府政策調整經營結構，進行多角化經營。

## 蔗糖的製造程序

由甘蔗產製蔗糖，以其副產物製造高價值的化學品及食物，並把最後的廢棄物用作肥料與土壤改良劑，是資源充分循環利用的最佳範例之一。而在製糖程序中，水及熱能的循環利用也是值得學習的做法。

台灣在新式糖廠設立之前，壓榨甘蔗後，蔗汁並未經過清淨手續除去雜質，因此生產的糖多是黑糖。當時，甘蔗在壓榨前，已經把根與葉清除得很乾淨，因此所製得的黑糖是可以放心食用的。其後因為蔗汁經過清淨步驟，製造出來的糖雜質較少稱為粗糖。若要獲得更純淨的白糖，需把粗糖溶解，復經移除雜質及再結晶的步驟。下面以粗糖為例說明其製造程序。



圖片製作：蔡宛芳小姐

從原料（甘蔗）製成粗糖，須經過下列 5 個步驟：

甘蔗 → 壓榨 → 清淨 → 蒸發 → 結晶 → 分蜜 → 蔗糖

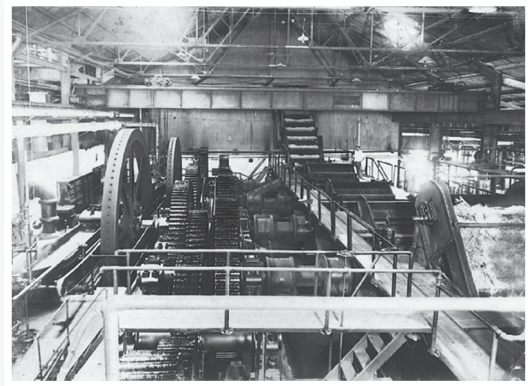
副產物：蔗渣 + 濾泥 + 糖蜜

**壓榨**—甘蔗依次經過切段、撕裂、壓榨，把蔗汁從甘蔗的碎片中壓榨出來，再用少量的水把蔗渣中留存的蔗汁洗出來。

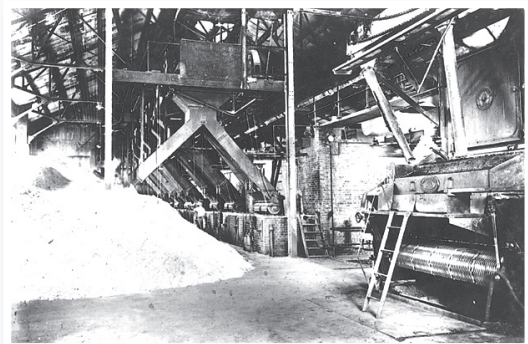
**清淨**—這個步驟是把蔗汁加熱，並加入石灰（註 2）（石灰法），和蔗汁中的雜質作用產生沉澱，再經沉澱槽把沉澱物（濾泥）排出，就變成澄清汁。如果要使蔗汁脫色，以便直接製成白糖，就要經過二氧化碳處理（碳酸法）或二氧化硫處理（亞硫酸法）。

**蒸發**—接著把澄清汁送入多效蒸發罐（註 3）的第一個蒸發罐，逐罐把澄清汁中的水分蒸發掉，最後一個蒸發罐的澄清汁就濃縮成為糖漿。

**結晶**—再把糖漿送入結晶罐，同時投入晶種使其長晶（產生結晶體）。結晶罐應抽成真空狀態，讓糖漿中的水繼續蒸發



蔗渣壓榨室（圖片來源：高雄市立歷史博物館）



用蔗渣為燃料的汽電共生場地（圖片來源：高雄市立歷史博物館）

濃縮，糖粒結晶體漸漸長大，同時使糖漿變成糖膏。

分蜜一待結晶完成後，把糖膏送入分蜜機（高速離心機），開動後糖蜜流出機外，把機內的糖粒結晶體取出，經過乾燥步驟便成為砂糖。

## 副產物的利用

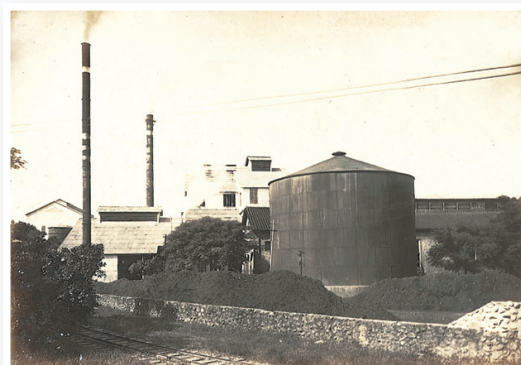
**蔗渣** 早期蔗渣僅用為燃料，後來製成蔗板用作天花板和隔音板。1930年代更進一步用為紙漿的原料。

利用燃燒蔗渣產生的熱能直接加熱蒸煮蔗汁；或把水加熱生成蒸氣，用於加熱蒸煮蔗汁及推動機械和發電。蔗渣的灰燼可用為肥料。若要發電，則需先產生高壓蒸氣推動發電機，再把排放的廢蒸氣引入蒸發罐或其他設備，這一方式就是汽電共生。

蔗渣因富含纖維質（約50%），所以可用以製造紙漿進而造紙。早期也用熱壓法製造普通甘蔗板，用於家畜床墊、天花板和隔音板。後來更進一步在蔗渣中添加黏合樹脂製造蔗渣塑合板和纖維板，用於建築物的隔音和絕熱及家具。

**糖蜜** 含糖的物資可在酵母催化下發酵生成酒精。日治以前及日治初期，台灣民間就有人以蔗汁製造食用酒；後來更有會社以糖蜜製酒，稱為糖蜜酒，或稱蘭姆酒（rum）。民間也有人用糖蜜做為肥料和飼料的添加物。

日本治台初期，就有日籍人士開始研究以糖蜜製造酒精，後來由台灣製糖株式會社接手研發，終於成功製成藥用酒精和工業酒精。其後，台灣製糖株式會社在橋頭設置第一個新式糖廠後，新式糖廠陸續設立，舊糖廠也紛紛採用新式設備，因而糖蜜產量劇增，以糖蜜製造的酒精產量大增。由於價格便宜大量外銷日本，原以馬



糖廠附設酒精工廠（圖片來源：高雄市立歷史博物館）



酒精發酵槽（圖片來源：高雄市立歷史博物館）

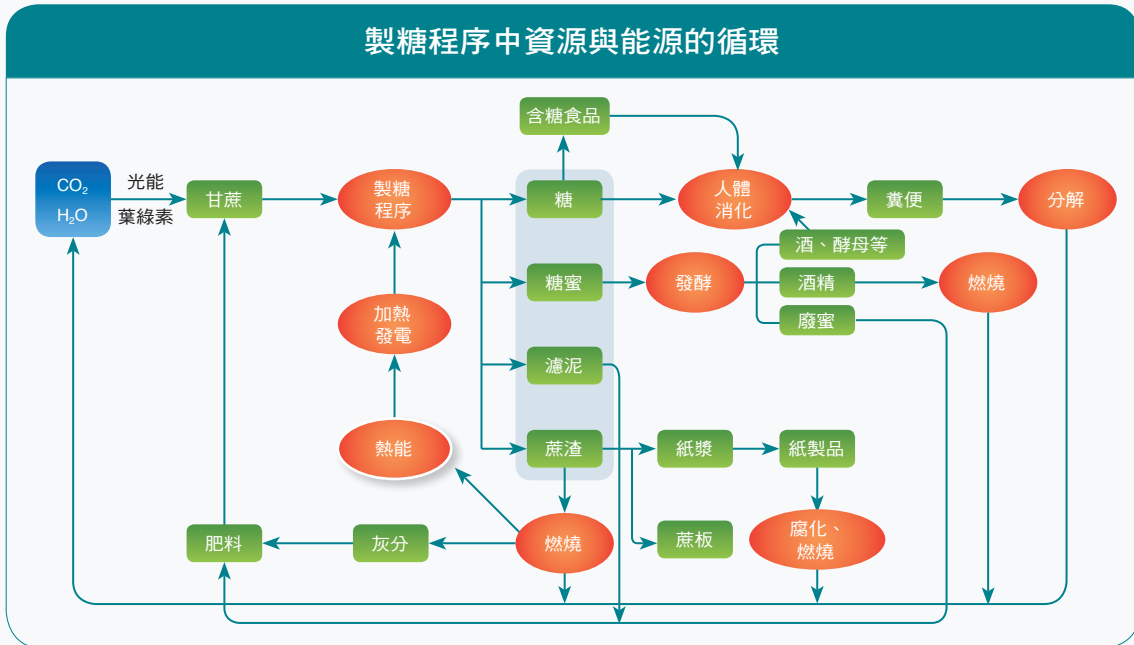
鈴薯和番薯為原料的日本本土酒精工業，無法跟台灣競爭便轉製燒酒。

第二次世界大戰期間，日本除以工業酒精做為代用燃料外，也積極研究以發酵法由糖蜜產製丁醇（註4），獲得成功。

戰後台灣糖業公司於1957年創設新營副產品加工廠，以糖蜜發酵製造酵母；1960年台灣開始利用糖蜜生產味精。

**濾泥** 濾泥因含有糖分和纖維質，早期及日治初期，民間就有人用以釀酒，稱為濾仔酒。

濾泥也因含有蛋白質、磷、鉀等多種物質，所以用途甚廣，可用作飼料、肥料和土



圖片製作：蔡宛芳小姐

壤改良劑；又因含有粗蠟，所以可提取蔗蠟，用於製造蠟燭、蠟紙、蠟筆、凡士林等。

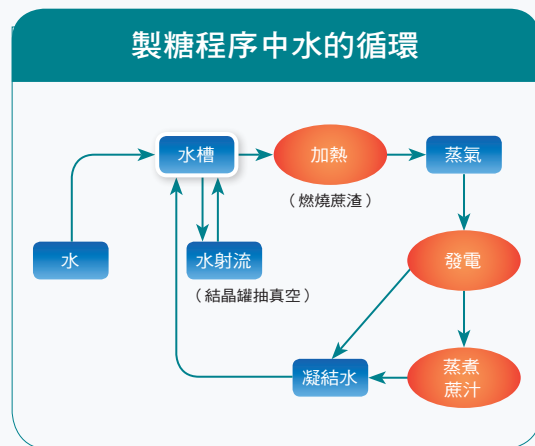
### 製糖相關資源的循環

甘蔗和甜菜跟一般的植物一樣，都是吸收空氣中的二氧化碳和土壤中的水分，在陽光照射下，藉葉綠素催化而生長，其中的糖分也是經由光合成反應形成的。

糖在人體的消化過程中轉化為葡萄糖和果糖兩種單醣後被吸收。在人體中，會分解為二氧化碳和水並產生熱能；若轉化為其他物質隨糞便排出人體後，也會分解。

### 水與蒸氣的循環利用

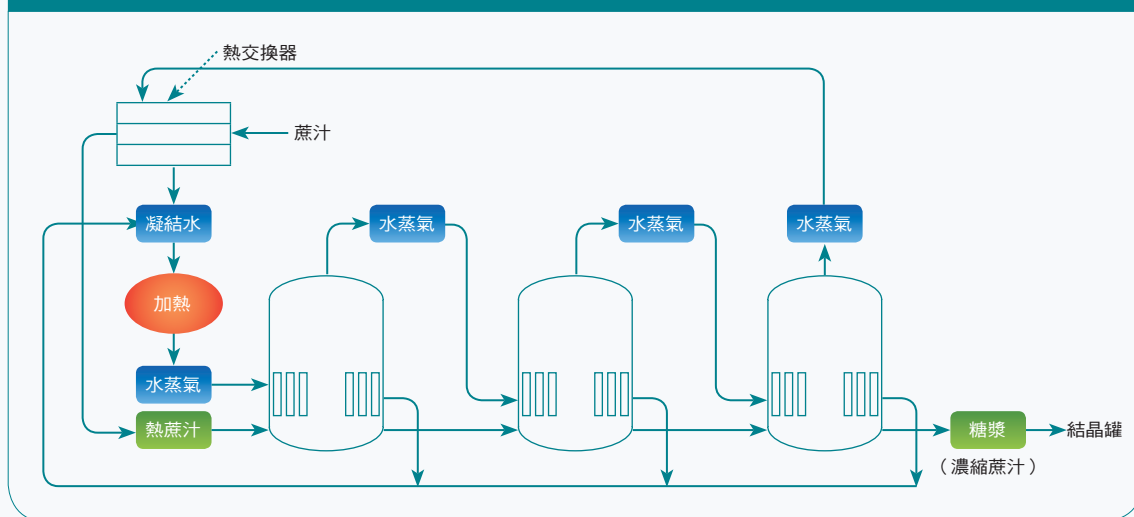
糖廠的電力可由上述汽電共生供應，汽電共生需要以水為介質；若使用汽輪機做為動力來源，也需要用水蒸氣帶動。



圖片製作：蔡宛芳小姐

具體做法是把蔗汁從甘蔗壓榨出來，使用甘蔗切段機、撕裂機和壓榨機。水蒸氣是動力來源，汽輪機本身也需用大量的水冷卻。另外，蒸發罐需以水蒸氣加熱，

## 製糖程序中的熱能循環



圖片製作：蔡宛芳小姐

而結晶罐也要持續利用水射流真空泵（註5）以抽成真空狀態；並用水把糖膏冷卻，以促進糖晶的成長。上列的水與蒸氣有的要加熱，有的要冷卻，糖廠會把這些水與蒸氣透過熱交換有效地循環使用。

### 熱能的循環利用

在糖廠中，為了能回收利用廢熱，許多製程都透過熱交換的方式回收熱能，其中蒸發罐提供了最多的回收效益。

在蔗汁蒸發程序中，常常使用3個串聯的蒸發罐，蔗汁依序送入蒸發罐後，會被加熱濃縮成糖漿。為了充分利用熱能，第一個蒸發罐使用由鍋爐產生的蒸氣加熱罐中的蔗汁，由其內蔗汁蒸出的蒸氣引入

第二個蒸發罐當作熱源，用於加熱罐中的蔗汁。同樣地，由第二個蒸發罐蔗汁蒸出的蒸氣被引入第三個蒸發罐用於加熱。第三個蒸發罐中被蒸出的蒸氣可使用熱交換器預熱送入第一個蒸發罐的蔗汁；而被引入第三個蒸發罐加熱的蒸氣，其冷凝液回收到水槽中，再送到鍋爐產生蒸氣。

日治時期與戰後初期，台灣的重要產業是以農作物、植物及海鹽為主要的原料，不僅製造出主產品，也充分利用副產物製造出高經濟價值的產品，且使用廢棄物為肥料。日治時期，製糖、酒精和樟腦工業曾是台灣生產比重超過日本本土的3種重要產業。戰後初期，砂糖也曾為政府賺取了巨額的外匯。後來因製造成本過高，在國際市場上無法與他國競爭而式微。

未來化石資源等非再生能源，若因枯竭或因減碳獲得共識而減少或不再開採，以農作物及植物為原料的產業勢必再興起。

未來化石資源等非再生能源，若因枯竭或因減碳獲得共識而減少或不再開採，必須回歸使用再生資源。如此，以農作物及植物為原料的產業勢必再興起。在這之前，為減碳及善用資源，必須重視生產過程中副產物的利用。

本文以台灣糖業及相關產業為例，說明以甘蔗為原料的製糖與副產物，以及製程中水與熱能的循環利用。其實，在日治時期曾風光一時的樟腦產業，由樟腦油萃取高價值的香料也是副產物利用非常典型的例子。此外，以高皮質纖維的芒草產製紙漿，則是利用自然界可再生資源的範例。上面的例子都是善用可再生資源與能源，值得大家深思參考。

註 1：酵母菌可在有糖分的場所迅速繁殖，它可用於以發酵法釀酒、製造酒精，本身可供製造健素糖、醫藥品、發粉和飼料。

註 2：是使用生石灰（CaO）在蔗汁清淨步驟中做為清淨劑；也可使用二氧化碳或亞硫酸當清淨劑。生石灰是煨燒石灰岩製得，加入蔗汁分離後，混在濾泥中可用做土壤改良劑，回歸自然界。

註 3：多效蒸發罐至少有 2 個蒸發罐（製糖通常至少用 3 個），是利用高壓蒸氣的熱能把蒸發罐中溶液的水分有效地蒸出的設備。蒸發罐中的溶液被引入套鍋的蒸氣加熱而沸騰，其逸出的蒸氣被引入下一個蒸發罐當作熱源。

註 4：可經由二個丁醇分子的脫水反應製造辛烷值很高的異辛烷，當液體燃料使用。

註 5：水射流真空泵是一種高速水流抽真空的器具。在特殊造型的管內，水高速流動時可牽引空氣，因而在其周圍造成真空狀態。

---

翁鴻山  
成功大學化學工程學系

---

#### 深度閱讀資料

山根嶽雄原著，袁炎基、廖霖霖合譯（民 54），甘蔗製糖法，台灣糖業公司，台北。

高淑媛（民 101），第一篇：臺灣近代化學工業史，第四章：臺灣糖業與近代酒精工業、第六章：糖業資本主義與蔗渣製紙工業，載：臺灣化工史（總編輯翁鴻山），台灣化學工程學會，台北。

李世明（民 101），第十章 製糖工業，載：第二篇：臺灣現代化學工業史—發展期（謝俊雄、徐英傑主編），臺灣化工史（總編輯翁鴻山），台灣化學工程學會，台北。

蔣耀賢、陳明發、施瑞昌、許晉榮（民 90），橋仔頭糖廠一人文生態導覽，社團法人高雄縣橋頭鄉橋仔頭文史協會，高雄。

黃育徵（民 106），循環經濟，天下雜誌公司，台北。