

基因工程與作物品種改良

蔡奇助¹ 曾東海² 王強生³

¹ 行政院農委會高雄區農業改良場

^{2,3} 農業試驗所農藝組

摘要

地球的耕地面積有限，已無法負擔急速增加的世界人口。如何有效快速的改良作物品種，提高農業產量或產值，已成為農業研究的首要目標之一。傳統育種方法屬於雜交育種，品種改良主要受種原變異之限制，而不同物種 (species) 間之雜交頗為困難，育種成果難有大突破，「綠色革命」(green revolution) 很難再發生。利用基因工程技術進行作物品種改良，係指以遺傳工程 (genetic engineering) 技術，將特定基因或性狀導入缺乏此基因或特性之目標作物 (target crop) 的育種方法；因此利用基因工程技術進行作物品種改良，可以突破種原之限制及種間雜交之瓶頸，創造新性狀或新品種，亦即未來「基因革命」(gene revolution) 很可能迅速取代「綠色革命」。今後利用基因工程技術進行作物品種改良，可朝下列重點努力：創造高附加價值之轉基因作物品種；育成具環保特性之抗病、抗蟲及抗殺草劑等作物品種，減少農藥之施用；育成具耐旱、耐寒、耐熱及耐重金屬等具環境忍受性之作物品種；利用基因工程改造植物代謝途徑創造新花色或提高營養成分；利用植物做為生物反應器生產醫藥用化合物、疫苗或生物塑膠等，特殊高價值產品，提高農業產值。這些基因改造的作物品種，除具有較高產值外，更可申請品種、基因或產品專利，未來我們將進入「基因農場」(gene farming) 的時代，使農業真正邁入永續化。

關鍵字：基因工程、品種改良、基因革命、基因農場

前言

農業生產主要依賴土地、水分及空氣等環境因子，然而在全球環境急遽變遷下，加上土地沙漠化 (desertification)、空氣及工業污染等因素，使土壤、水分及空氣品質等農業生產所依賴之自然資源急遽耗損。因此未來的農業生產需較以往克服更多的土地、水分及空氣等自然資源之限制。

目前世界人口已超過 60 億，根據人口學家之估計，公元 2025 年時，人

口會增加至 80 億，到了公元 2050 年甚至超過 100 億。據估計在公元 2020 年前，全球糧食生產需維持每年 1.2% 的成長，方能滿足全球人口的成長。雖然在過去四十年中，由於作物育種及栽培技術的改進，糧食的成長尚足以因應人口的成長。但由於自然資源的耗損，與環境的破壞，水資源的流失，加上傳統育種技術與栽培技術已發展到目前的巔峰狀態，能夠增加糧食生產的方法是增加耕地面積。目前世界農耕總面積為六百萬平方英里，如果單位面積糧食產量沒有提高，至公元 2050 年需要一千五百萬平方英里耕地面積。然而，由於人類的耕作，造成土壤中累積的鹽分漸漸提高，造成鹽害。據估計，全球三分之一以上的灌溉土地均存在鹽害的問題，使得適合耕作的面積逐漸縮減中。此外，據調查，幾乎所有的科學家皆相信，在未來的 20 年，水資源的供應將會嚴重限制農作物生產。

以目前糧食生產狀況預估，傳統農業將受到土地、環境及經濟等因素之限制，屆時地球有限的耕地面積及農業生產體系，將無法負擔急速增加的世界人口。在可預見的未來，人類將會面臨重大糧食危機，生產足夠糧食對未來而言是一項挑戰，因此必須先未雨綢繆。

傳統農業產量之提高，主要依賴品種改良。育種時，可以選擇具有適當的性狀交配，以培育出具有優良特性的作物品種。1950 至 1960 年間，在菲律賓的國際稻米研究所 (IRRI) 及在墨西哥的國際玉米及小麥研究所 (CIMMYT) 的農業學家將矮性 (dwarf) 基因自台灣育成的日本型 (japonica) 水稻品種低腳烏尖，導入印度型 (indica) 水稻品種台中在來一號 (Taichung Native 1, TN1) 育成世界上第一個半矮性 (semidwarf) 的新品種 IR8。此外，在 CIMMYT 的農業學家，也育出半矮性的小麥品種。具半矮性株型的水稻及小麥品種，具有強稈、不易倒伏，對肥料反應敏感及株型佳、受光態勢良好等農藝特性，配合良好的施肥及水分管理栽培技術，可提高產量達 50%。作物育種與肥料、灌溉等技術大量運用，使得糧食的產量提高，造就農業史上的重大成就，稱為綠色革命 (green revolution)。

以小麥、玉米及水稻等世界三大穀類作物為例，雖然其平均年產量，自 1967 年以來每年均有小幅增加。然而，大多數的農藝學家及育種家均一致認為，這些作物已達到其產量潛能或生產瓶頸。目前產量的微幅增加，係因栽培技術改進及病蟲害控制得當所致，因此產量很難再有突破。在傳統作物育種及栽培技術改進在增加產量方面，已經到達一個瓶頸，亦即第二次綠色革命很難再發生。今後必須尋求新科技，結合傳統育種技術，方可能使糧食生產有新的突破。

「生物技術」被視為二十一世紀最重要的科技之一，如何應用此一新興科技，結合傳統育種技術，進行作物品種改良，提高農業產量及產值，以因應未來的糧食需求，已成為現階段農業研究的首要目標之一。

生物技術之重要性

「生物技術」為一應用科學。廣義而言，泛指經由人為操作的方式，控制生物生長、發育生產甚或產生變異等現象的技術。狹義的生物技術則是利用組織培養、基因工程及基因轉移等分子生物技術，進行生物品種改良及生產改進的技術。生物技術的應用範圍，涵蓋醫藥、食品、環保及農、林、漁、牧等產業，關係國民生計及人類福祉甚鉅，因此被公認為二十一世紀最具發展潛力的明星科技。歐、美、日等先進國家都競相投入大量人力、物力，積極進行生物技術之研究與開發。

目前栽培由傳統育種所育成的大多數作物品種，幾乎已達到其生產瓶頸，產量很難再提高。如何改良作物對各種環境逆境之忍受性、提高產量及改良品質等特性是利用基因工程進行育種之重要課題。

傳統育種法及其限制

傳統育種方法屬於雜交育種，每次雜交即將二親本所有好、壞基因型及性狀合併至子代，再經由世代選拔去蕪存菁，選出包含所欲改良的性狀之子代植株，因此品種改良主要決定於提供性狀或基因型之父本及母本。傳統育種方法係二親本染色體的重組。除基因突變發生外，二親本所沒有的性狀是無法出現在其雜交子代的，亦即子代性狀不會「無中生有」。因此傳統育種法之品種改良主要受種原變異之限制。雖然，育種所欲引進之性狀可由異種或異屬之種原取得，惟不同種、屬間進行「種間雜交」或「屬間雜交」頗為困難，其後代分離性狀難以掌握，更因遺傳拖地 (genetic drag) 現象導致所欲改良之性狀，不易固定、純化，或與其它不良性狀連鎖，或易於育種過程遺失等缺點，因此種、屬間雜交育種成果難有大突破。傳統育種方法的原理簡單，惟育種過程耗力費時，以一般禾穀類作物為例，通常自雜交開始至新品種育成，約需時八至十年，「綠色革命」的盛況很難再發生。親本種原限制及種、屬間雜交困難為利用傳統育種方法進行品種改良的主要限制因子。

基因工程育種法

利用基因工程進行作物品種改良，稱為基因工程育種或分子育種

(molecular breeding)，事實上基因工程育種是傳統作物育種之延伸，係指利用遺傳工程 (genetic engineering) 技術，將自生物體內 (*in vivo*) 分離，或在生物體外 (*in vitro*) 改造之特定基因(gene)，利用基因轉移技術 (gene transfer techniques) 導入缺乏此一基因目標作物 (target crop) 的育種方法。因此，基因工程育種係屬特定基因的嵌入 (insert)，每次基因轉移步驟只將一個，或少數個基因導入目標作物的染色體內，與傳統雜交育種之整個基因組 (genome) 的合併是不同的。利用基因工程育種法所育成之作物品種，統稱為遺傳修飾作物 (genetically modified crop, GM crop) 或轉基因植物 (transgenic plants)。

由於所有生物的基因，皆由 ATGC 四種核苷酸所組成的遺傳密碼排列而成。理論上，自任何生物，如魚類、昆蟲、微生物、甚至人類所選殖之基因，均可利用基因轉移技術，轉移至植物基因組，使其適當表現。因此，利用基因工程進行作物品種改良，可以突破種原之限制及種、屬間雜交之瓶頸，亦即基因工程育種法可以「無中生有」，創造出原來種、屬內所未有之新性狀或新品種。利用基因工程進行作物品種改良，因為可以僅將所選定之基因，或包含目標性狀之 DNA 片段嵌入目標作物的基因組內，因此準確性高，其結果更是可以預期的。

雖然，利用基因工程進行作物品種改良，初期需花費許多嘗試錯誤的時間、人力與金錢進行研發。由於基因工程育種每次僅改良少數性狀，若能選用現有優良品種為材料導入新性狀或基因，一旦基因工程育種系統建立完成，即可以縮短育種年限及選拔次數，新品種將可於短期內（單一品種約需三至五年）育成，且品種之更新速度，將遠較傳統育種方法快，所需花費亦遠較傳統育種方法低。

若傳統育種所造成之農業改革稱為「綠色革命」，則利用基因工程進行育種所產生之農業突破或成就，應可稱為「基因革命」(gene revolution)，目前我們已進入基因革命或利用基因工程育種的時代潮流。可以預見的，未來基因工程育種將迅速取代部分傳統育種所不能扮演的角色，以育成更符合人類整體需求的作物品種。

利用生物技術輔助傳統育種

隨著生物技術之迅速發展，產生許多具革命性的技術，可用來偵測基因型，以提供精確的育種選拔工具，使育種家能更有效率的選出優良性狀。例如，結合聚合酵素連鎖反應 (polymerase chain reaction, PCR) 及限制酵素片段長度多型性 (restriction fragment length polymorphisms, RFLP) 等多項分子生物技術所發展出的「分子標誌輔助選拔法」(marker-assisted selection, MAS)

，直接進行基因型選拔，可以高準確度的方式，成功的偵測基因型 (genotype) 並予選拔或淘汰。此一方法取代傳統育種方法之外表型 (phenotype) 選種，可顯著提高育種效率、縮短育種年限，迅速育成新品種。目前可供應用之分子標誌種類有：限制酵素片段長度多型性 (RFLP)；隨機擴大多型性 DNA (random amplified polymorphic DNA, RAPD)；定性序列擴增區 (sequence characterized amplified regions, SCAR)；連續重複片段數差異 (variable number of tandem repeat, VNTR)；簡單序列重複 (simple sequence repeats, SSR)及增殖片段長度多型性 (amplification fragment length polymorphism, AFLP) 等多種。

分子標誌於作物遺傳育種之應用尚有下列多項：製作遺傳圖譜；基因標定與分離；數量性狀基因座 (QTL) 之釐定；遺傳與分子遺傳研究；輔助育種選拔進行分子育種；引進基因之追蹤；品種鑑定與專利；偵測遺傳性差異；作物親緣關係研究；作物系統分類分析；作物基因組演化研究等，其它可能的應用領域正迅速發展中。分子標誌及相關技術之開發與在作物遺傳育種之應用，說明其在未來作物育種扮演重要角色。

基因工程育種步驟與實例

利用基因工程進行作物品種改良之主要步驟如下：

(一) 目標基因 (性狀) 之選殖與改造

利用基因工程進行作物品種改良與傳統育種方法相同的是，需先決定所要改良作物之目標性狀，尋找具有此一特性之生物 (可能為作物或其它生物) 做為基因來源，利用基因標記 (gene tagging)、據圖選殖 (map-based cloning)、功能選殖 (functional cloning) 及差異表現法 (differential display) 等分子生物技術選殖目標基因。

(二) 基因轉殖載體 (vector) 之構築

所選殖之目標基因利用各種基因操作技術，接上啟動子 (promoter)、促進子 (enhancer)或調節子 (regulatory element) 等 DNA 片段，使目標基因更易於控制與表現後，構築於含有適當選拔標誌 (selection marker) 或基因之轉殖載體，即可進行基因轉移。

(三) 將基因轉殖至目標作物

將構築於質體 DNA 的基因送入植物細胞的方法有多種，簡要敘述如下：

(1) 農桿菌轉殖法：

自然界中之植物農桿菌 (或稱腫瘤菌，*Agrobacterium* spp.)之細胞內

含有會使植物產生腫瘤之質體，稱之 Ti 質體 (tumor inducing plasmid)。這種質體的特定 DNA 區域會在農桿菌感染宿主植物時嵌入植物的染色體 DNA，達成穩定的基因轉移。因此祇要將 Ti 質體中會造成植物產生腫瘤的基因去除，並將目標基因插入 Ti 質體可以轉移的 DNA 區域，再將此 Ti 質體置回農桿菌中，即可用來感染植物細胞，以達到基因轉殖之目的。

(2) 電穿孔法 (electroporation)：

此技術乃將植物組織浸於大量目標 DNA 溶液中，通以瞬間高電壓之直流電，此時細胞即很容易吸收大量外來的 DNA。但進行此技術時，需先將植物之細胞壁除去，以原生質體的形態進行，待轉殖成功再利用組織培養使之再生成植株。

(3) 花粉管導入法：

本方法係於 1983 年中國科學院周光宇教授首創，利用注射針將目標 DNA 直接由柱頭注入使進入子房中，再篩選種子，即可得轉殖成功之植株。

(4) 粒子槍導入法：

將載有外來基因的質體核酸裹以高密度的鎢粒子或金粒子 (直徑約 1 μ m)，使之成一微小物體，再用粒子槍 (particle gun) 高速打入植物細胞核染色體中，經抗生素篩選及組織培養再生，即得轉基因植株。

(5) 微量注入法 (microinjection)：

此法係在顯微鏡觀察下操作，使用毛細管將外來基因直接注入去除細胞壁的植物細胞即原生質體中，經抗生素篩選及組織培養再生，即得轉殖植株。

(四) 轉基因植株之基因表現與遺傳分析

經過抗生素篩選、聚合酵素連鎖反應 (PCR)、南方 (Southern)、北方 (Northern) 及西方 (Western) 型雜交等各種篩檢步驟與方法，選出含有目標基因及表現正常之轉基因植株。由於目標基因屬外來基因，可能嵌入目標作物的基因組之任一位置，可能影響原有基因之正常表現。因此，含有目標基因之轉基因植株需經數代的基因表現分析、基因穩定性測試及遺傳分析，以確定此一外來基因可於世代間穩定表現，方為成功的基因轉移。

(五) 轉基因品種之育成與上市

基因轉殖的作物品種經常包含一個或數個外來基因，屬非自然生成作物品種。因此世界各國對轉基因植株之育成及其產品上市過程均有嚴格之規定

，以維護現有作物品種之安全與生物多樣性，除避免轉基因 (transgene) 在自然界隨意擴散，更要保障消費者之安全。

一般言之，轉基因品種從育成至上市需經過多層政府認可單位及主管單位之隔離溫室試驗，隔離試驗田之田間觀察，田間試驗，及多年、多地點之性狀、產量試驗及環境風險評估等冗長安全評估過程方可通過命名。此外，生技產品更必須通過衛生管理單位如衛生署之檢驗證實對人畜無害，方可獲准上市。除此之外，基因工程產品更須通過消費者，尤其是保守的衛道人士層層之考驗，方能被大眾接受。

1980 年代陸續有基因轉殖植物的論文發表，到了 1994 年，在美國就有大豆、玉米、棉花、蕃茄、馬鈴薯及瓜類等 29 件案子申請上市。1996 年，由孟山都公司 (Monsanto) 所育成第一個轉基因作物為抗殺草劑嘉磷塞 (glyphosate) 之大豆品種 Roundup Ready 正式商品化上市。此品種經基因轉殖、田間試驗、殺草劑抗性評估及安全評估等測試程序，至通過美國 FDA、EPA 等單位，產品安全性及環境評估等過程，前後共歷時 14 年。目前美國轉基因品種之育成技術已臻成熟階段，並成為各農業基因工程公司之經常性工作，育成新品種現僅需五至八年，至今每年都有數十個新品種問世，預計未來將會大量佔有市場。

國內外作物基因工程的成果

(一) 抗蟲基因之轉殖：

自然界中有些物種原本對昆蟲即有抗性，這些物種的抗性來自其內在的抗蟲基因。若能將之分離、選殖，並轉殖於農作物上，可以降低殺蟲劑的使用，既節省成本，又可減低對環境的污染。如蘇力菌的殺蟲基因，此係蘇力菌 (*Bacillus thuringiensis*, Bt) 在產孢時期會產生結晶毒蛋白 (crystal proteins)，這類結晶蛋白在經過昆蟲腸道內鹼性環境下，會分解成前毒素 (protoxin)，進一步再被蛋白質酵素水解成 65-75 kDa 的毒蛋白時，即會與昆蟲腸道上皮細胞 (epithelial cell) 上的接受器 (receptor) 結合，造成腸道穿孔，殺死昆蟲。而且這種結晶毒蛋白對人體並不會造成傷害，因此自 1990 年後，蘇力菌的結晶毒蛋白基因已大量被轉殖於作物上，以增強作物之抗蟲性。1987 年，最早的轉 Bt 基因菸草成功，往後的十幾年來，陸續有大豆 (soybean)、番茄 (tomato)、棉花 (cotton)、玉米 (maize)、水稻 (rice)、甘蔗 (sugarcane)、甘藍 (broccoli)、馬鈴薯 (potato)、茄子 (brinjal)、高糧 (sorghum) 等轉 Bt 基因作物被成功報導。

此外，藉由破壞昆蟲蛋白質消化的代謝過程，也可以抑制昆蟲的族群。

有許多昆蟲(尤其是鱗翅目)在最初消化蛋白質時,需要絲氨酸蛋白酶 (serine protease)的參與。目前已有許多的蛋白酶抑制劑 (serine protease inhibitor, SPIs) 之基因已被選殖,並轉殖作物中。因此,昆蟲若吃了這類轉基因作物,即會因不能分解蛋白質加以利用而死亡。由於上述蛋白酶抑制劑經煮熟後即可破壞,因此亦是一種有效,且可供應用的抗蟲基因。1994年,蛋白質抑制劑基因被初次轉入甘藍,後來陸續在菸草、甘藷、水稻等作物均有轉殖成功的報導,甚至對於轉殖 Bt 基因無效的玉米螟也能有效控制。

另外,還有一些酵素基因也被應用在作物抗蟲基因轉殖上,如幾丁質分解酵素(chitinase)。由於昆蟲的外骨骼主要是由幾丁質所組成,因此可以利用此基因來抵禦昆蟲的危害。1998年,轉殖幾丁質分解酵素基因的菸草,能夠有效抵禦鱗翅目昆蟲的危害。此外,膽固醇氧化酵素 (cholesterol oxidase) 基因、多酚類氧化酵素 (polyphenol oxidase)及過氧化酵素 (peroxidase) 等基因也有成功抑制昆蟲危害的轉基因作物的報導。

(二) 抗病基因之轉殖：

抗病毒基因的分離、選殖之進步極為迅速,其中較常利用的是反義 (antisense) RNA 基因技術,與植物病毒交互保護理論之配合使用等。反義基因乃經轉入外源基因於植株中,鎖住病原體所產生的 mRNA,使之形成雜種 (hybrid) 雙股 RNA,以抑制病原體的基因表現。而植物病毒之交互保護是利用植物若受一種病毒感染,其它病毒即無法感染的特性行之。因此,我們僅需將會產生病毒鞘蛋白的基因轉入植株中,此植株即因植物病毒之交互保護而產生抗病性。如抗胡瓜嵌紋病毒、抗木瓜輪點病毒等基因之轉殖,目前已有許多成功的例子。最早是1986年菸草轉 TMV 的蛋白質外鞘 (coat protein, CP) 基因,能達到對 TMV 病毒產生抗性。其它如轉基因水稻抗 rice tungro spherical virus (RTSV)。此外,也有利用抗體 (antibody) 為目標基因,將會由病毒感染而誘發表現的抗體基因轉殖進入作物中,會降低病毒感染所造成的傷害。

在抗真菌基因方面,目前已選殖出一些基因能有效的抵禦真菌的危害。這些抗真菌基因的產物可能為蛋白質、多肽鏈或抗微生物混合物,能直接對真菌病原體造成毒害,或降低它們的活性。例如有一些能分解真菌細胞壁的基因,例如幾丁質酵素 (chitinase) 及醣解酵素 (glucanase) 等基因,可以對抗真菌的侵害。這方面基因轉殖成功的作物有菸草、水稻、苜蓿、油菜等作物。此外,還有一些會加強植物本身對真菌抵禦能力的基因,如可以產生水楊酸 (salicylic acid)、乙烯 (ethylene)、細胞分裂素 (cytokinin) 等物質的關鍵基因,當植物體內的上述基因產物含量高時,植物本身會產生對真菌有毒害的植物防禦素 (phytoalexins),因此對抗真菌的侵害能力也會增強。

在抗細菌性病害的基因方面，amphipathic protein-1 (AP1) 為選殖自甜椒 (sweet pepper) 的基因，可以引發植物(如菸草)產生類似過敏性反應的機制，以抵抗細菌性病害的侵襲。AP1 蛋白質所引發植物過敏性的保護在於過敏反應早期，可以抑制細菌的生長，使病害不致擴大。此外，也有一些分解細菌細胞壁的溶解酵素 (lysozyme) 可以加以應用。目前已應用在抗馬鈴薯軟腐病。

(三)延緩採收後老化基因之轉殖：

植物老化影響作物品質與貯藏期限甚鉅。這種老化現象是一種衰敗過程，會受到生長期及植株體內基因的調節與控制。據估計，作物因採後不耐貯存而造成之損失可高達 40%。植物老化在基因的層次上，主要受到可以產生乙烯 (ethylene) 及細胞分裂素 (cytokinin) 等物質基因的調控，其中乙烯會促進老化；細胞分裂素可以防止老化。目前認為造成採後農產品快速老化的因子是農產品產生內生性乙烯，乙烯的形成加速農產品的成熟、老化。現今由於乙烯整個生化合成途徑已相當了解，因此有許多抗乙烯合成基因已被分離、選殖，如 ACC 合成酵素基因 (ACC synthase)、ACC 氧化酵素基因 (ACC oxidase)，我們僅需將 ACC 合成酵素基因的反義基因轉入植株中，由於此基因的表現，抑制了植物體內正常 ACC 合成酵素基因的表現，使乙烯無法生成，而延緩農產品老化。或者可以增加細胞分裂素的基因表現，如 isopentenyl transferase (*ipt*) 基因。目前已有不少轉基因作物能得延緩老化的例子，如番茄、康乃馨等，其中番茄也是最早在美國上市的轉基因作物。

(四)花色、花形基因之轉殖：

花色常常是決定花卉作物價值的重要指標之一。目前市面上商品化的花卉，皆經自然界中原生花卉改良、培育而來。若某類花卉的原生種源之花色基因種類少，即會限制該類花卉培育各式花色潛力，因而影響該花卉普及化。由於基因工程之快速發展，目前已有許多色素合成基因已被分離、選殖，如 *CHS*、*CHI*、*CHR*、*DFR*、*F3'H* 及 *F3H* 等基因。基因轉殖在改造花色上，不僅可以用來導入一個新的基因，以表現出新的花色，而且可以一個正義 (sense) 或反義 (anti-sense) 的型式導入植株已存在的基因 (endogenous gene)，以抑制花色的生合成，來達到改造花色的目的。目前已被應用於花色基因之轉殖上，成功地創造出新的花色品種，如矮牽牛的磚紅色品種之育成，即轉入一外源花色基因而來。其它如菸草、洋桔梗、矮牽牛、康乃馨及菊花等也都有花色基因轉殖成功的例子，轉基因藍色康乃馨已在日本花卉市場成功的推出。另外，在花形的改造方面，已有許多控制花形的基因被發現、選殖，如有個稱之為 *AGAMOUS* (*AG*) 的基因，在植物中若此基因失去功能，其花朵之雄蕊與雌蕊皆會變成花瓣，因此，就變成重瓣花。以百合花為例，雖具艷麗色彩，明顯的花形，但雄蕊之花藥常常困擾著消費大眾，因此若能改

造出沒有雄蕊且又重瓣之百合花，應可受消費者青睞。

(五) 控制開花之基因轉殖：

植物都有其特定的開花時間，而此時間受外界環境因子，與內在基因所調控。植物可能因某個基因失去功能，即造成開花時間提早或延遲。目前已有許多影響開花時間的基因被選殖出來，如 *LEAFY (LFY)*、*APETALA1 (API)* 及 *TERMINAL FLOWER1 (TFL1)* 等基因，這些基因最早皆由阿拉伯芥中被選殖出來，其中 *LFY* 及 *API* 可以促進開花提早；*TFL1* 基因會延遲開花。將 *LFY* 基因轉殖於白楊樹中，並大量表現，使原本需十幾年才會開花的白楊樹，縮短至六個月就開花。轉殖 *API* 基因，也可使轉基因柑橘提早好幾年開花結果。因此，若能善用調控開花時間之基因，我們就可以從事產期調節或花期調節，降低產銷失衡的情形。

(六) 耐逆境基因轉殖：

耐熱、耐旱、抗寒等逆境基因也是作物基因轉殖的重要目標基因，植物在遭受上述逆境下，除了會影響生長發育外，嚴重時甚至會致死。因此對於土地沙漠化及耕地鹽化漸趨嚴重的環境而言，農作物抗逆境基因轉殖不失為一種極佳的策略。目前已知的抗逆境基因，如超氧歧異酵素 (SOD) 在抗寒害及抗早上皆有不錯的表現。如苜蓿轉 *Fe-superoxide dismutase (SOD)* 基因，可以提升耐寒的能力。另外一些可以提高細胞滲透壓的物質，如肌醇 (inositol)、甜菜鹼 (betaine) 及脯胺酸 (proline) 的衍生物，在細胞內濃度提高後，也可以產生抗旱及耐鹽的效果。目前已有許多成功的例子，如抗寒的菸草及阿拉伯芥，耐鹽的菸草、水稻及番茄等。

(七) 提升營養成分基因轉殖：

將具營養價值的基因導入作物中，以增加作物的經濟效益。黃金米的出現是一個典型成功的範例，將選殖自喇叭水仙 (daffodils) 的兩個基因，以及一個來自微生物的基因同時導入水稻中，這三種基因的搭配會增加 β -胡蘿蔔素的生合成，而 β -胡蘿蔔素是維他命 A 的前驅物，因此育成一種富含維他命 A 的基因改造稻米，由於外觀呈金黃色，所以稱為黃金米。因為維他命 A 可以預防「夜盲症」等疾病，因此本稻米除了可以提供做為糧食外，可以預防「夜盲症」，這對糧食缺乏的貧困國家而言是一大福音。其它如轉殖 *serine acetyltransferase (SAT)* 基因於馬鈴薯中，可以提升馬鈴薯 *cysteine* 及 *glutathione* 的含量，增加馬鈴薯的營養成分。

(八) 抗殺草劑基因轉殖：

雜草控制是農作物生產中相當繁雜的一項工作。殺草劑的發明與應用大

大的減少勞力的付出。由於殺草劑在防制雜草上的優越性，使殺草劑成為目前使用量最多的農藥。然而這些效果佳的殺草劑多為系統性且不具選擇性的，因此也會造成農作物的危害，造成使用時不方便。目前抗殺草劑的基因轉殖研究主要是轉殖可以分解殺草劑的基因，例如 *bar*, *pat*, *pcd*, *tfdA* 等基因，或改造殺草劑所能辨識攻擊的標的酵素，以達到防禦殺草劑的危害，例如 *aroA*, *sull*, *psbA* 等基因。目前已有相當多轉殖抗殺草劑基因成功的例子，例如大豆、玉米、棉花、油菜、蕃茄、小麥、菸草及馬鈴薯等作物。

基因工程品種之特性

基因工程產品具有高產量、高產值、高利潤，低生產成本，含高或特殊營養價值，格外新鮮、耐儲運等優點。此外基因工程品種更因具抗病、抗蟲特性，可減少農藥施用次數、低農藥殘留，因此較為乾淨。生技產品依作物產品特性及其使用方式，其受益人由生產者到產品上市，可分為作物栽培者（即農民），食品加工業者，及消費者等三個層次來說明。

對農民而言，基因工程產品之優點為：1.減少施藥次數與劑量，降低曝露於農藥之危險性，2.基因工程品種具有對各種環境逆境、病蟲害及殺草劑等之忍受力，對環境之對抗能力較高，為「人定勝天」產品，作物因栽培失敗之損失較少；3.栽培基因工程品種，減少投資成本，且因多收或產值較高，使農作物生產較具效率。在 1997 年調查結果，有 90% 以上栽植轉基因玉米的農民，新的生技品種表示滿意，並願意於將來繼續種植基因工程育成的品種。

對加工業者而言，基因工程產品之優點如下：1.生產較高品質之有效成分 (active ingredient)，2.生產較多、較高純度之有效成分，3.生產較少毒性成分之產品及 4.生技產品具有較新鮮、耐儲運等優點，故可降低加工、純化及儲藏之成本提高收益。

對消費者而言，基因工程產品具有 1.新鮮、全年均可購買得到，2.含較少農藥殘毒，因此安全、品質高及 3.特殊健康或療效之天然產品等優點。此外，栽培基因工程產品更可因減少殺菌劑、殺蟲劑及殺草劑等農藥之施用，對環境危害降低，間接達到對環保之貢獻，不但可使有機栽培較為可行，更可使農業永續經營。所以基因工程產品可視為「環保產品」。

雖然基因工程產品優點頗多，然而目前已知基因工程產品至少有下列缺點：1.大量栽培基因工程品種容易導致生物多樣性 (biodiversity) 降低，使未來有用種原 (germplasm) 減少，2.大量栽培生技品種會迫使昆蟲、病原菌及雜草基因快速演變，產生抗藥性或成為超級變種，3.部分生技品種可能將人工改造基因傳遞至其它相近物種，造成對環境及微生物等之危害，4.生技產品

可能改變作物原有代謝途徑或生產出未知的成分，對體質易過敏的消費者造成傷害，5. 大量栽培生技產品，可能改變動植物之生態相，影響自然界之生態平衡。

轉基因作物之生物安全性問題

美國康乃爾大學研究人員最近發現，一種在 1996 年經美國環保署核准栽種的基因改造含蘇力菌抗蟲基因的玉米，會導致一種保育類的帝王蛭蝶之幼蟲死亡，而引起科學家、環保人士及社會大眾的恐慌及高度重視。但該玉米品種的生產商 Monsanto 公司堅稱該玉米安全無虞。全美目前大約有一千四百萬英畝農地栽培轉基因抗蟲玉米品種，幾佔全美玉米產量四分之三。

美國政府在五年前核准大量栽植基因工程改造的番茄以來，在當今的美國超市貨架上，有超過六成的食品含有基因工程有機體 (genetically modified organism, GMO)，生物科技業者更打算在未來使基因改造食物取代目前的傳統食品。據統計，目前全球約有 60% 的大豆及三分之二的玉米是基因改造食品 (GMO)。因此基因改造食品已經與我們的日常生活息息相關。雖然目前並無科學證據顯示，基因食品會危害人體健康，而且美國食品藥物管理局 (FDA) 也以確認幾十種的基因轉殖作物的安全性無虞。然而大眾對知的權利呼聲日益高漲，因此對基因改造食品的標示問題遂成為各國討論的焦點。

目前美國政府並未要求食品製造商，將食物內所含的基因改造食物告知消費者。歐盟(EU)十五國環境部長在 1999 年 6 月 25 日通過一項行政命令草案，將加強規範基因改造有機體的買賣。2000 年一月，在加拿大蒙特婁召開的生物安全會議，簽訂「卡塔黑那生物安全議定書」，來規範基因轉殖產品。可以預料的是，此一課題並將成為歐美未來在世貿組織 (WTO) 新回合談判的重要議題。歐盟將加強基因改造食品上市前的風險評估，並訂出基因改造產品之檢測、標示及運送的全球性標準，以保障民眾安全並避免危及全球環境與動植物的安全。因此轉基因植物產品的生物安全性的問題，是未來從事基因工程育種者所必須考慮的，以免歷經多年研究發展的產品無法被社會大眾所接受。

國外之基因工程育種現況

1986 至 2001 年已有超過 142 種農作物之轉基因植株育成，在全世界 74 個國家，共進行 32,000 次以上之田間試驗。可見基因工程育種是如何的蓬勃發展，雖然如此，80% 以上之轉基因植株乃種植在美國。1996 年美國正式核

准田間種植轉基因植株，而至 1997 年許多轉基因作物，如含 Bt 基因之抗蟲玉米，抗殺草劑之棉花、大豆，含 CP 基因之抗病毒木瓜、馬鈴薯及南瓜等作物，不需規範就可種植於田間。1998 年在美國進行田間試驗之轉基因植株，主要可分為下列五項：1. 殺草劑忍受性，佔 29.6%，2. 昆蟲抗性，佔 23.8%，3. 品質改良，佔 20.2%，4. 抗病性，佔 14.6%，其中抗病毒，佔 9.9%；抗真菌，佔 4.7%，5. 其他農藝性狀改良，佔 4.8%，6. 另有 6.9% 屬於其他性狀之改良。目前已經商品化之轉基因作物有 1. 抗殺草劑作物：大豆、玉米、棉花、馬鈴薯；2. 抗病毒作物：蕃茄、馬鈴薯、南瓜；3. 抗蟲作物：玉米、棉花；4. 延遲成熟作物：蕃茄；5. 改良性狀作物：油分品質改良之油菜及雄不稔玉米品種等。近年來，世界基因轉殖作物急速增加，至 2002 年，全球約有五千二百萬英畝的轉基因作物田。

基因轉殖未來的潛力難以估計，全球在西元 2000 年時的基因轉殖作物及基因改造食品的生產總值達 40 億美元以上。而且會持續以驚人的速度成長，據估計，到了 2005 年，將會有 200 億美元的產值。基因轉殖所帶來龐大的商機，使得世界各國皆不能置身度外，發展基因轉殖技術各國的重點科技。

國內之基因工程品種改良狀況

國內正積極開發基因工程，鼓勵學者利用基因工程開發新品種，以因應未來農業產業之需求。行政院農委會亦選定利用基因工程開發新作物品種為目標，支持國內學術界發展農業基因工程，計畫重點有：「作基因轉移技術之開發應用」，利用基因轉殖技術育成新作物品種；及「重要基因與相關分子標誌之選殖」，進行重要作物基因圖譜之建立及與抗病、抗蟲相關分子標誌之篩選與選殖；後來更選定以「利用基因工程育成高附加價值之水稻品種」計畫為重點目標，希望能於短期內利用基因工程育成具有高附加價值之水稻品種。另外，由農委會、國科會及中央研究院共支持的「農業生物技術國家型計畫」也積極整合國內農業生物科技各領域的人才，以加速國內農業生物科技的腳步。

國內利用基因工程育種最具成效的為，中興大學植病系利用農桿菌轉移木瓜輪點病毒之鞘蛋白基因，所育成之抗輪點病毒之轉基因木瓜植株。目前已達田間試驗階段，轉基因植株之抗病性效果顯著，木瓜產量高、果實品質極佳，待通過衛生署「食品衛生管理法」後即可命名上市。

以目前國內基因工程發展現況，預期今後將陸續有：耐儲運之木瓜品種；延緩切花老化及抗病毒之蘭花品種；抗真菌病害之番茄及蕃椒品種；可生產高附加價值 (value-added) 成分之水稻品種；各種抗病、抗蟲、耐冷、耐熱

之蔬菜品種；具新花色、新花型及新株型之花卉品種，及具特殊木材品質之林木品種等轉基因作物品種之育成。

未來基因工程育種的發展方向

今後利用基因工程進行作物品種改良，可朝下列重點努力：創造高附加價值品種(high-added-value-variety) 之轉基因作物，或利用植物做為生物反應器 (bioreactor) 生產高附加價值產品；育成具環保特性之抗病、抗蟲、抗殺草劑及耐重金屬等作物品種，減少農藥之施用；育成具耐旱、耐寒、及耐熱等具環境忍受性之作物品種，減少栽培作物之損失；育成快速生長的作物品種，以提高單位面積的產量。未來基因工程可以「整株利用型品種」(whole-plant-use-variety) 為育種目標，方能有效提高作物生產效率，解決糧食短缺危機。未來基因工程之育種應以育成「整株利用型品種」(whole-plant-use-variety)、具高附加價值品種、具環保特性品種及具環境忍受性品種為目標。

因應二十一世紀農業需求，無論各階層之農業研究人員，均需學習如何將基因工程納入自己工作領域，應用基因工程提高研究效率或加速研究成果，方能符合時代潮流。利用基因工程進行作物品種改良已是一必然趨勢，而如何利用基因工程及整合傳統育種技術，乃基因工程育種能否成功之關鍵。此外，利用基因工程進行作物品種改良必須注意：如何提高基因工程產品之生物安全性 (biosafety)，如何維持現有作物之生物多樣性(biodiversity)，避免生物遺傳變異的流失；及如何降低生技產品對農業環境與生態之衝擊，方能使地球農業能永續經營。經基因工程改良的作物品種，除具有較高產值外，更有品種專利、基因專利或產品專利之保護，應予尊重。在基因工程引導下未來我們將進入「基因農場」(gene farming) 的時代，使農業真正邁入永續化，值得大家拭目以待。

參考文獻

1. 林俊義、王強生. 2000. 應用生物技術進行作物品種改良. 永續農業第一輯 (作物篇)專書. 台中. 台灣.
2. 葉錫東. 1999. 轉基因作物應用於植物保護之現況. 植物保護學會會刊. 4 : 87-106.
3. Cai, D., Kleine, M., Kifle, S., Harliff, H. J., Sandal, N.N., Marcker, K. A., KleinLankhorst, R. M., Salentijn, E. M. J., Lange, W., Wyss, U., Grundler, F.

- M. W., and Jung, C. 1997. Positional cloning of a gene for nematode resistance in sugar beet. *Science* 275:832-834.
4. Chen, C.H., H.J. Lin and T.Y. Feng. 1998. An amphipathic protein from sweet pepper can dissociate harpin (PSS) multimeric forms and intensify the harpin (PSS)-mediated hypersensitive response. *Physiol. & Mol. Pl. Pathology* 52: 139-149.
 5. Gressel, J. 1997. Burgeoning resistance requires new strategies. *Weed and Crop Resistance to Herbicides*, Dordrecht; Boston, Mass., Kluwer Academic pp. 3-14.
 6. Huang, J., Pray, C., and Rozelle, S. 2002. Enhancing the crops to feed the poor. *Nature* 418: 678-684.
 7. Jorgensen, R.A. 1995. Cosuppression, flower color patterns, and metastable gene expression states. *Science* 268: 686-691.
 8. Lin, W., Anuratha, C. S., Datta, K., Potrykus, I., Muthukrishnan, S., and Datta, S. K. 1995. Genetic engineering of rice for resistance to sheath blight. *Bio/Technology* 13:686-691.
 9. Liljegren, S. J., Gustafson-Brown, C., Pinyopich, A., Ditta, G. S., and Yanofsky, M. F. 1999. Interactions among *APETALA1*, *LEAFY*, and *TERMINAL FLOWER1* specify meristem fate. *The Plant Cell* 11: 1007-1018.
 10. Losey, L. E., Rayor, L. S., and Carter, M. E. 1999. Transgenic pollen harms monarch larvae. *Nature* 399:214.
 11. Mann, C. C. 1997. Reseeding the green revolution. *Science*. 277:1038-1043.
 12. Mann, C. C. 1999. Crop scientists seek a new revolution. *Science*. 283:310-314.
 13. Miflin, B. 2000. Crop improvement in the 21st century. *Journal of Experimental Botany* 51: 1-8.
 14. Potrykus, I., Bilang, R., Futterer, J., Sautter, C., Schrott, M., and Spnagenberg, G. 1998. Genetic engineering of crop plants. In "Agricultural biotechnology" Altman, A. ed., pp.119-159. Marcel Dekker, Inc. NY, USA.
 15. Sharma, H. C., K. K. Sharma, N. Seetharama and R. Ortiz. 2000. Prospects for using transgenic resistance to insects in crop improvement. *Journal of Biotechnology* 3: 1-20.

16. Ye, X., Al-Babili, S., Klotti, A., Zhang, J., Lucca, P., Beyer, P., and Potrykus, I. 2000. Engineering the provitamin A (beta-carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm. *Science* 287: 303-305.

Genetic Engineering and Crop Improvement

Tsai, Chi-Chu¹ Tseng, Tong-Hai² Wang, Chang-Sheng²

¹Kaohsiung District Agricultural Improvement Station

²Taiwan Agricultural Research Institute

ABSTRACT

Since an arable land is limited in the world, it is of difficulty to feed the great increase of human population. One of the most important goals of agricultural research is the improvement of crop varieties and quality, as well as the increase of growers' incomes. The cross hybridization is one of principal traditional breeding. Breeding among species is restricted and has great barrier to overcome. Therefore, the historic "green revolution" is difficult to happen again. Genetic engineering has been used in crops improvement over the last decade. Several specific genes or desirable characteristics could be transferred into target crops. Biotechnology, therefore, could be used to overcome the species barrier for breeding crops with new characteristic. Various new transgenic plants have been bred through using these techniques. All of these achievements will be considered as gene revolution. In respect of biotechnology, several researches through using genetic engineering, such as enhancement of high economic value of transgenic plants, crops with virus, disease and pest resistance as well as herbicide resistance, tolerance or resistance to environmental stress, creation of new flower color, high nutrition transgenic crops, using plants as bioreactors for producing medical compound, vaccine etc., are important approaches for molecular breeding. Era of gene farming will be coming and the goal of sustainable agriculture can be achieved in the near future.

Key words: genetic engineering, crop improvement, gene revolution, gene farming