

基因改造植物研發之法規、風險及經濟效益分析

郭華仁¹、陳郁蕙²、詹滿色³、高文彥⁴

前言

作者等四人在 96 年 11 月 01 日至 97 年 08 月 31 日執行行政院科技顧問室委託，國家科學委員會補助的專題研究計畫「基因改造植物研發之法規、風險及經濟效益分析」(NSC96-3114-P-466-003-Y21)。該計畫由當時行政院農業委員會科技處黃子彬處長擔任計畫主持人，實際研究工作由作者等四人合作，並且邀請各方專家共同參與：(稻米)農試所陳治官研究員、農試所曾清山助理研究員、祥圃實業有限公司吳昆民董事長；(青花菜)台大園藝系曹幸之教授、中央研究院植微所陳榮芳副所長；(蝴蝶蘭)台大園藝系黃鵬林教授、台大蘭園賴本智總經理；(木瓜)台大園藝系張龍生副教授、台大植微系洪挺軒助理教授。

因篇幅所限，本文為計畫執行報告，作為完正報告的詳細摘要。

執行報告

一、目的與研究方法

1. 鑒於我國基因改造植物的研發對象常未先經成本、回收與風險的分析，經常導致各界對於這些研發的投資產生是否具有經濟效益，以及是否反而會危及傳統作物產業等的疑慮。本研究計畫擬在我國政府進行研發的基改作物中選擇四類，加以分析產業現況、基改研發投資及其生產成本、基改作物之可能利潤、以及種植基改作物之風險等，以作為決定公共投資研發方針的參考。
2. 本研究邀請兩位農經學者以及一位法規科學學者共同執行，經討論選擇產植酸酶水稻、抗輪點病木瓜、抗黃化青花菜、抗老化蝴蝶蘭等基改作物作為研究對象。各作物並邀請兩至三位專家協同分工進行。各研究人員除了自行研究外，並進行不定期團隊討論。

1, 2, 3, 4 分別為台灣大學農藝學系教授、台灣大學農經學系教授、海洋大學應用經濟研究所副教授、前衛生署高級研究員。

3. 抗輪點病基改木瓜因為已經有類似產品在夏威夷進行商業生產的多年經驗，而在我國則為發展進度較為前面的研發對象，因此得以進行經濟模型分析。產植酸酶水稻在國內研發的進度也較為前面；雖然國內外尚未有實際生產的經驗，但是其相對競爭性產品，即微生物生產的基改與非基改植酸酵素則已經廣為國內外養豬/家禽飼料業者所採用，因此亦用以進行經濟模型分析。青花菜與蝴蝶蘭兩項產業在國內研發的進度較慢，國內外也尚未有商業生產，因此僅能就已有的資料與數據加以整理研判。所有利益分析都限於國內市場，外銷市場暫不予考慮。

二、植酸酶米

4. 產植酸酶水稻(以下簡稱「植酸酶米」)尚未許可種植或上市，屬非市場財，因此僅能以傳統市場價量分析法來評斷其產業價值。本研究以現有實驗室與田間試驗之資料，根據基因改造植酸酶米、植酸酵素與磷酸二鈣之於飼料在用途方面與經濟上之相對替代性，利用機會成本法則評估植酸酶米在飼料產業價值鏈之經濟效益。在同效飼料配方之假設下，植酸酶米之直接經濟效益取決於，飼料業者原料成本之節省程度。成本則包含私人部門之研發成本、為合法上市所衍生之審查、與植酸酶米生產成本。在政府投資成本方面，政府用於植酸酶米研發之歷年研發預算包括，執行經費、從事研究與專利取得成果，以及預算執行年度之政府公債利率水準之資料，都納入本研究之估計範圍。因為若干資料無法取得，因此分析時作了如下的預設：
5. (1) 植酸酶米的植酸酶在動物腸胃的活性設定為 1000U/kg (實驗室理想狀況下，植酸酶米所含植酸酶有效活性最高達 6000U/kg，經打粒高溫等處理與動物餵食後實際活性假設為原有的 16%)；(2) 植酸酶米的處理費用成本不計 (中研院產品在試驗室的條件下，稻穀經發芽 6 小時以後植酸酶才達最高活性；稻穀的倉儲以及發芽、調製等處理因缺乏精算數據，因此這兩項費用暫設為 0)；(3) 種植植酸酶米避免基因混雜的種植隔距設定為 1.78 公尺 (我國稻米採種隔距標準為 3 公尺；基改標示門檻與我國同為 5%的日本，基改水稻種植隔距的農林水產省國家規定為 26 公尺，北海道縣地方規定為 300 公尺；無標示規定的美國政府，要求種植生產蛋白質、抗體等的基改水稻時，隔距則為 400 公尺，加上 15 公尺的休耕緩衝帶)。
6. 評估結果顯示，若飼料與無機磷市場全部被植酸酶米取代，假設飼料中該植酸酶有效活性為最樂觀的 6000U/kg，則植酸酶米之年產值為 4.05 億新台幣；當活性為 1000U/kg 則其對應之最高產值為 3.77 億/年，而

損益平衡之植酸酶活性發生於 100U/kg，活性低於 100U/kg 之植酸酶米全無發展潛力。

7. 若植酸酶米的植酸酵素在飼料的活性為 1000U/kg，而無機磷全被植酸酶米所取代，則國內市場對植酸酶米之需要量為 5144.6 噸，所需之生產面積約為 930.3 公頃，隔離田與隔離成本 67.17 公頃與 63.4 萬元。若以直接研發成本與上市合法成本而言之，植酸酶米相關研究直接耗費為 410 萬元，另外，加計在 2005 與 2006 年間合法化植酸酶米之田間試驗花費 213 萬元，總和成本為 623.5 萬元，若合法化時程確定，預計植酸酶米 2008 年上市之首年益本比為 60.3。若以加入計畫主持人植酸酶米相關研究補助 4764.1 萬元，則首年益本比降為 7.86。若以植酸酶米上市時程言之，五年與十年上市首年益本比各為 6.25 與 4.97。但是若以美國、日本所採的隔距標準來計算，植酸酶米的益本比將會相當低。
8. 96 年原種田及採種田的設置面積約 3600 公頃，以小田區密集分部於台南以北，台中以南平原地區；東部較為稀疏。若未能有效採取預防措施，所採稻種受到污染情況將相當嚴峻。措施包括：(1) 嚴防機械混雜；(2) 嚴防生物學混雜，即取設置緩衝區或以綠籬隔離；(3) 建立良種繁殖專業區。

三、 抗輪點病木瓜

9. 我國木瓜之收穫面積以 1999 年的 3,687 公頃生產量 158,943 公噸為最高峰，其後各年收穫面積逐年減少，2006 年為 2,652 公頃，生產量 129,283 公噸，產地價格和零售價格分別為 37.41 元及 65.94 元。國產木瓜輸往日本從 2004 年後開始，2006 年有 36.416 公噸，出口平均價格每公斤台幣 153.6 元。
10. 自 1992 年我國開始進行基改木瓜研發以來，在 2003 年農委會同意進行田間試驗，但迄今尚未向衛生署提出申請基改木瓜食品安全評估。初步統計，政府投入基改木瓜研究計畫，迄今約一億七百萬台元。
11. 種植抗輪點病基改木瓜，若假設無其他病蟲害之虞，則無興建網室的需要，每公斤生產成本約可降低 30%。
12. 我國種植基因改造木瓜經濟效益分析之實證結果顯示，對消費者而言，若基因改造木瓜可銷往國外市場，則國內消費者福利沒有改變；若基因改造木瓜遭受國外市場的封鎖，而國內消費者接受基改木瓜，則消費者福利將會大幅提升；對基改木瓜之接受程度越低，則其所增加之福利亦

隨之降低。對生產者而言，除非基改木瓜的上市，木瓜仍保有出口市場才能獲得經濟效益。生產者失去國外市場而造成福利的損失，相對而言，較消費者所獲得之福利來的小，換言之，若無法出口至國外市場，則國內總福利仍呈現上升。

13. 抗木瓜輪點病毒之基改木瓜雖然能夠有效抑制輪點病的發生，但經推廣種植後亦可能產生新型輪點病毒，導致原基改木瓜失效。我國田間試驗已顯示，基改木瓜誘發次要病毒流行，可能威脅國內單抗基改木瓜的商業化。
14. 抗輪點病的基改木瓜對其他非目標生物，包括授粉昆蟲、保育類昆蟲、土壤昆蟲、蟎類及鳥類產生不利影響的風險極低，番木瓜在台灣屬於外來物種，因此也少有基因轉移到近緣植物上的問題。但是基改木瓜花粉或產銷鏈造成污染，對非基改木瓜之所衍生的經濟與社會問題較值得討論，這包括失去外銷市場、市場接受度低，以及基改木瓜與非基因改造木瓜種植區域分隔不易等不可逆的環境影響等，須在風險管理上深入研究。
15. 我國基改木瓜的風險評估事件，在法規科學上有若干問題。主要是研發者將風險評估以轉殖項(event)為對象誤認為以品種(variety)，以致於實驗數據無法使用，造成風險評估的延遲。其他的缺失還包括沒有完成應有的花粉基因流散試驗、木瓜營養組成數據證明 21 項結果半數有統計上顯著差異的實質等同問題、轉殖項基因體沒有定序、轉殖項專一性的檢驗方法尚未製備等。

四、 基改耐老化蝴蝶蘭

16. 我國 2006 年時蝴蝶蘭的外銷金額達 12.79 億元，為台灣外銷農產品的四大「旗艦產品」之一。相對於中國與荷蘭蝴蝶蘭的崛起，臺灣的優勢在於育種與研發新品種的能力。除傳統育種外，以基改技術培育出抗老化、抗病毒、抗軟腐病、改良花型、花色及增添香味等基改蝴蝶蘭已成為研發的主流方向。
17. 本耐老化基改蝴蝶蘭的研發，已經證明外來之反義 ACC 合成酶基因確已嵌入蝴蝶蘭轉殖植株的基因組中。另外，去雄後轉殖株切花之乙烯生成高峰，較未轉殖之切花晚七天出現。後續的世代穩定性仍待觀察，也尚未進入生物安全評估階段。
18. 研發經費實驗室轉殖階段依國內經驗，一般為 1000 萬元。將來田間選

拔經費，預估一個品種一個世代約 24000 元，若到 F5 階段則為 12 萬元。但就我國 91~96 年三個蝴蝶蘭基因群體計畫，共投資 9,883 萬元。若合計其他主要生技相關研究計畫，政府總投資額應該超過 160,121 仟元。

19. 基於國外少數針對觀賞用基改作物的安全評估，其幅度較一般農作物為低。蝴蝶蘭特殊的花器構造、人為溫室隔離及地理分佈的區隔，使花粉不易流佈造成生態污染，因此其安全評估所花費的經費預期將比玫瑰、康乃馨更少。
20. 但是歐盟食品安全總署雖然認知切花不供食品為目的，由於「無法排除花瓣被誤食之可能」，仍需針對食品安全包括過敏性與毒性實驗等加以審查。
21. 蝴蝶蘭的市場相對固定，因此品種間具有取代性。基改耐老化蝴蝶蘭的利潤取決於其市場的接受度。市場接受度越高，佔有率越強，則利潤越高。然而蝴蝶蘭的品種相當多樣，而且品種上市壽命較短，因此單一個基改耐老化蝴蝶蘭轉殖品種的利潤可能有限。
22. 針對蝴蝶蘭育種者的問卷調查，蝴蝶蘭育種者普遍認為抗病性的基改蝴蝶蘭較耐老化者更為有用；而普遍認為基因改造的費用由政府負擔。
23. 在生物安全評估方面，蝴蝶蘭特殊的花器構造、人為溫室隔離及地理分佈的區隔，使花粉不易流佈造成生態污染，因此在生物安全評估流程與法規，應與食用性的糧食作物有所區隔，以降低研發與監測的成本，讓低風險性的基改蝴蝶蘭在市場上可以有流動的空間。惟基改蝴蝶蘭的初期研發成本較高，對中小型的蘭園負擔較重，宜透過產、官、學的合作與技術轉移平台的建立，有效的達成垂直分工鏈的建立。

五、 基改耐黃化青花菜

24. 我國青花菜和花椰菜種植面積在 2006 年合計為 3,110 公頃，總產量 75871 公噸；主要供應國內的市場需求，外銷地區為香港，但所占比例並不多。進口花椰菜和青花菜則逐年增加。
25. 一般青花菜置室溫 25°C 下 2-3 天黃化，基改青花菜具有延遲黃化效果。本轉殖系可延至 4-5 天；如置 4°C 儲存一般 1~2 星期左右，本轉殖系可放置 4 至 6 星期左右甚或更長。該 ipt 基改系青花菜經 T5 代的自交選拔，已篩選出二個生長勢強、分枝性較少、結球性好、結球期早晚不同等優良園藝性狀之中、晚生優良轉殖青花菜自交系可供後續雜交育種改良之用。

26. 基改青花菜研發經費：實驗室轉殖階段經費約 4,730,000 元；田間固定選拔經費約 1,300,000 元；田間風險評估經費約 2,000,000 元；食品風險評估經費約 9,900,000 元。全部研發經費至目前為止為 1,793 萬元。預期全部結束後研發成本還會上升。
27. 問卷調查結果顯示，當種子因特殊性狀而提高價格時，農民可以接受增加 6 成甚至一倍的價格，即傳統種子每粒種子 0.15 元計，農民可接受的基改青花菜種子價格為每粒 0.30 元。假設國內消費者完全接受基改青花菜，而且青花菜與花椰菜種植面積各半，而每公頃播種量以 40000 粒計算，青花菜全部採用基改種子，獲利(每粒多出 0.15 元計)每年為 933 萬元。
28. 本地傳統青花菜品種有 45 天青花菜、70 天青花菜、75 天青花菜及 80 天青花菜等。假設本基改青花菜僅瓜分 1/4 的栽培面積，則每年獲利為 233 萬元。若要佔所有栽培面積，則需要進行多個回交育種，其成本更會提高。
29. 青花菜花期在 11 月中到 2 月底之間。雖然一般青花菜在蕾期採收，但是在很小的機會下，可能放任部分植株到開花，而恰好花粉傳到其他十字花科採種株，在很小的機會下造成基因移轉。若能在青花菜良好農業規範 (TGAP) 中加入抽苔前清除青花菜植株，將可以把基因污染降到最低。

六、 國外市場及法規科學的考慮

30. 以抗蟲基改作物生物安全試驗為例，美國環保署的法規科學費用成本可高達\$2,833,588 美元。依據公司內部資料，綜合估計法規科學履行成本每件約在\$6,060,000–15,000,000 美元之間。此高額度對小型生技創業公司、中小型種子種苗公司、公部門研發單位而言太高。小公司通常無法負擔專業的法規事務人員，以推動與 EPA 長期且複雜的技術審查程序，因此互動上經常產生障礙。公部門補助大學或研究機構進行產品研究，不僅在開發發中國家產化表現欠佳，成果有待市場驗證。在先進國家的美國，以大學為研究基地，似乎也沒有成功案例。
31. 即使在美國，法規審查許可程序通常極為緩慢耗時。諸多法規不確定因素，加以是否能夠順利通過上市，面臨種種限制條件，曠日費時後，廠商常無以為繼半途而廢，製造了不少「孤兒」產品，成為新科技產品商業化過程中最沉重的障礙。

32. 孟山都抗蟲基改玉米 MON810 在菲律賓上市，經六年的溫室試驗、歷隔離田間試驗、與多地多次田間試驗，花費約 1,327,000 美元，加上商業推廣活動約 1,280,000 美元，不計在美國的研發，光在菲律賓合計的成本高達 8000 萬台幣。
33. 開發中國家研發基改作物，另一個問題是專利權，對產業化形成嚴重障礙。例如中國四個轉基因水稻研發過程中就涉及 5-12 項國外專利。
34. 相較於先進國專業生技公司，我國研發投資額落差太大。更嚴重的是投資計畫遠較為分散。我國至今沒有產生私營專業農業生技公司，難以進入產業化門檻，更不易與國際市場競爭。政府公共投資研發，執行上計畫分散、欠缺整合，成功率難以期望。
35. 目前農委會規定，法定田間試驗僅限於隔離試驗，並未規劃多次多地試驗，以及大規模商業試驗(環境開放)，同時，也沒有準備上市後輔導計畫的相關規範。
36. 鑒於前面的分析顯示四種基改作物若僅著眼於國內市場，其獲利皆不高，因此拓展國外市場為合理化投資基改作物研發的必要手段。基改產品的外銷需要受到外銷市場所在國家的管制，因此符合該國關於基改作物的生物安全評估，仍然不可避免。
37. 比較國內食品安全與環境風險的評估方式，與國外若干國家相較，嚴謹度相差甚多。因此國內相關的評估投入，將面臨無法讓外國採納的困境。若要重新進行外國認可的評估計畫，應付極度不協調且複雜的各國規定，須要引進符合國際慣例的風險評估機制，建立相關法規科學，成立專業法規科學實驗室，以及法規事務機構，修訂相關法源基礎與技術性規定，平衡兼顧國際規範與我國特殊利益，並充分國際透明化，則研發經費勢必大幅度升高。
38. 我國目前不是 OECD 成員，但 OECD 國家是基改作物主要的生產國，與我貿易關係緊密。如果我國修訂技術規定，採納 OECD 共識文件方式，做為基改產品環境風險安全評估基準，並且透明公開，可直接有助於達到國際接軌的功效，也會減少國內有限資源的浪費，有效建立我國生物安全體系。

七、綜合評估與建議

39. 由於以上的分析，所根據的數據頗多為預設值或者推估值，因此四種基改作物之間難以進行絕對的比較。

40. 相對而言，以非量化統計推估，基改作物之基因混雜風險/益本比座標圖結果可能為：就益本比而言，由高而低依次為植酸酶米、抗輪點病木瓜與抗黃化青花菜、抗老化蝴蝶蘭。就風險而言，植酸酶米與抗輪點病木瓜最高，抗黃化青花菜其次，抗老化蝴蝶蘭最低。其相互關係比，有待進一步嚴謹研究分析證實。
41. 本計畫針對基改作物研發進行經濟學評估，因為時間短暫以及若干資訊不易得到，因此仍有努力空間。建議在此基礎上進行持續的研究，以累積經驗，期能提供研擬新產品開發時的預估依據。
42. 經濟學評估應以不同轉殖項別而非作物別進行評估。以蝴蝶蘭為例，抗老化基改蝴蝶蘭與抗病蟲害的基改蘭花，其評估的結果可能有所不同。此外基改作物專區生產所導致的成本與效益改變，也將有所不同，宜另外加以探討。
43. 本計畫之評估在外銷方面僅將基改產品納入外銷上的考慮，但是整體基改科技的產出除了產品外，仍需考慮種苗外銷、技術外銷、與技術代工等面向。此三方面的經濟評估有待進行。
44. 鑒於國內外消費者對於基改產品的接受度會影響評估結果，而消費者的接受度有可能發生改變而導致經濟學評估結果的不同，因此基因改造科技的持續投入研究，以維持我國科技能力，仍屬必要；然而基因改造作物成品的研發，因涉及產業實際面，牽涉範圍相當廣泛，非單獨研究人員所能負責，因此宜由農委會主動評估選定後組成上中下游研發推廣團隊來進行。