

溫室氣體排放與潛在環境成本效益評估模型： 以TFT-LCD產業為例

蕭志同^{1*} 張瑞芬² 鍾宛蓁³ 張力元⁴ 歐嘉瑞⁵ 葉豐銘⁶

摘 要

自工業革命、電力應用、汽車與航空運輸等產業的崛起，人類的活動大量排放溫室氣體，導致地球暖化與氣候變遷，並對於全球經濟產生衝擊與損失。因此在因應京都議定書與因應氣候變遷的政策下，除全球政府逐漸制定相關溫室氣體排放與節能的法規外，在非政府組織的倡議下，「碳揭露計畫組織」邀請全球500大企業進行相關問卷調查，公開企業本身營運的溫室氣體排放。然而，此會影響企業持續發展的風險與營運成本之增加，使得企業作經營決策時更加困難。本研究透過系統動態學方法論，建構臺灣TFT-LCD製造業之產量成長與溫室氣體排放之成本效益分析模型。配合現有亞洲溫室氣體排放法規與臺灣、韓國、日本廠商之減量模式，進行情境模擬。以了解不同情境下之環境成本評估，增加學術界與實務界對於臺灣高科技產業之溫室氣體減量方案效果的了解。

關鍵詞：溫室氣體、碳稅、碳權、系統動態學、TFT-LCD產業

1. 前 言

自工業革命、電力應用、汽車與航空運輸等產業的崛起，人類活動大量排放溫室氣體，導致地球暖化與氣候變遷。2008年全球溫室氣體濃度已上升至385 ppm，並造成各地氣候異常，且對於全球經濟產生衝擊與損失。如2009年中國大陸華南大雪，衝擊華南地區相關企業營運與交通運輸；又如2011年的泰國水災，影響全球汽車零件與電腦硬碟供應。根據聯合國政府間氣候變遷問題小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)之評估報告指出：如再不採取因應措施，至2100年全球平均地面氣溫將比1990年增加1.4至5.8度(IPCC,

2001)。

從全球資金投資角度，碳揭露計畫組織(Carbon Disclosure Project, CDP)自2009年開始，每年度邀請全球前500大公司以及各主要國家與地區具影響力之企業，針對公司的溫室氣體管理策略、溫室氣體減量以及刺激方案、風險與機會、溫室氣體排放資訊進行提問，並按回覆問卷之內容，給予不同的評價分數與等級，鑑別回覆公司在於溫室氣體排放的管控與風險。此報告的評比會影響全球655個投資組織高達78兆美元的基金投資意願，另外，在公司回覆問卷的過程中，公司可針對問卷內容回饋到內部環境風險控管流程。因此來自碳揭露計畫的驅動力，均使得大企業逐漸關注溫室氣體

¹東海大學經濟學系副教授兼產業創新發展研究中心主任

²國立清華大學工業工程與工程管理學系特聘教授

^{3,6}國立清華大學工業工程與工程管理學系碩士

⁴國立交通大學管理科學系教授

⁵前經濟部能源局局長

*通訊作者, 電話: 04-23580934, E-mail: cthsiao@thu.edu.tw

收到日期: 2013年10月28日

修正日期: 2013年11月29日

接受日期: 2013年12月09日

排放與減量的議題，並執行鑑別與管理(PWHC, 2012)。

而電子產業公民聯盟(Electronic Industry Citizenship Coalition, EICC)從2009年亦提出碳問卷系統，使得會員可以使用相同的基準與工具，進行下游供應商的評估，並帶動整體產業鏈之環境責任。2011年共有289家供應商進行數據的回應，且以亞洲地區的供應商為主，代表亞洲地區的廠商已越來越關注溫室氣體之相關排放、減量與風險議題(EICC, 2012)。

2008年世界環境日當天臺灣通過「永續能源政策綱領」，致力於提高能源效率、發展潔淨能源、並確保能源供應穩定，期應用節能減碳科技，開發綠色能源，打造潔淨低碳島(經濟部能源局，2013年)。行政院環保署於2012年5月已公告，將二氧化碳等六種溫室氣體公告列為空氣污染物。且於2012年12月發布實施溫室氣體排放量申報管理辦法，其主要衝擊到電力供應業、鋼鐵、石油煉製、水泥以及半導體業與面板業。此外，在資訊與通訊科技(Information and Communication Technology, ICT)產業中，由於CDP與EICC在產業面的推動，使得品牌客戶對於供應鏈中的溫室氣體排放日益關注，要求上游供應商進行溫室氣體減量活動以及風險鑑別，而面板廠商身為ICT供應鏈中重要的一環，自然無法避免需進行溫室氣體排放量以及風險鑑別之揭露。

由於上述背景，本文嘗試以系統動態學建構企業溫室氣體排放與成本效益評估模型，配合四種減量目標的情境模擬，可協助政府與企業在於溫室氣體減量政策，做出較佳的決策，因此本研究目的如下：

第一、利用系統動態學建構臺灣TFT-LCD之溫室氣體排放與減量及潛在環境成本效益模型，分析企業溫室氣體減量政策效果。

第二、配合現有亞洲溫室氣體排放法規與臺灣、韓國、日本廠商之減量模式，進行情境模擬，以了解不同情境下之環境成本，增加學術界與實務界對於臺灣高科技製造業之溫室氣

體減量方案效果的了解。

2. 文獻探討

在文獻探討方面，本研究分兩個部分進行討論，分別是溫室氣體排放和臺灣TFT-LCD產業之環境廢氣管理之文獻：

2.1 溫室氣體排放與國際減量趨勢

隨著大氣中溫室氣體濃度日益升高，為降低地球暖化所帶來的氣候變遷，各國政府與私人企業關注及回應溫室氣體排放與減量議題。英國標準協會(British Standards Institution, BSI)於2008年10月29日頒布全球第一部產品碳足跡標準PAS 2050。目前企業永續發展協會(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)與世界資源研究院(World Resources Institute, WRI)首先起草有關供應鏈與產品碳足跡之盤查標準(英國標準協會，2011)。而國際標準化組織(ISO)擬定了ISO14064溫室氣體減量查核標準化程序相關規範。ISO 14064系列的規範，使全世界國家與各企業組織擁有一套完整的標準作業流程，以便各企業組織對盤查與溫室氣體減量方法有跡可循。而ISO 14064溫室氣體管理標準包含以下三個部分：

第一部分：詳細說明企業組織層面溫室氣體(GHG)排放清單的設計、開發、管理及報告之原則、要求與移除之量化及報告的指引規範。第二部分：集中說明為減少GHG排放量或增加GHG移除量特別設計的GHG項目基準線情景與監測、量化及報告與該基準線相關的項目活動的原則和要求。第三部分：為實施GHG資訊核證和核實的組織提供了原則、要求和指南。確保組織或項目的GHG聲明是完整、正確、一致、透明且未有實質性前後矛盾。第一部分包括確定營運範疇、量化氣體排放量及移除量，以及識別公司為改善溫室氣體GHG管理，採取具體措施或活動要求。同時為溫室氣體排放盤查清單品質管理、報告、內部稽核與

組織核實義務，制定了要求並提供指南。第二部份重點在於設計降低溫室氣體排放的專案，並為待核證(validate)和核實(verify)的GHG項目提供了基礎；如使用風力發電、能源效率改善、發展碳捕捉與碳儲存等方案，並比較實施專案的成效。第三部分則是驗證上述兩部分的流程，通常為第三方單位實施驗證(Reed, 2007)。

碳揭露組織於2009年開始進行供應鏈領袖聯盟計畫，邀請國際知名的企業參與計畫，要求企業的下游供應商須於碳揭露問卷中，揭露該公司的溫室氣體排放量以及面對氣候變遷的政策與機會。隨著氣候變遷議題持續受全球關注，加入計畫的廠商也逐年上升，因此計畫中邀請的供應商也從原有的1,402家廠商上升至2012年該組織邀請6,215家廠商，2012年有2,415家進行回應，由此可知企業界對於氣候變遷議題的關注程度。

2.2 臺灣政府溫室氣體減量政策

臺灣在2008年世界環境日通過「永續能源政策綱領」，而行政院環保署則於2012年5月公告，將二氧化碳等六種溫室氣體公告列為空氣污染物，並於2012年12月發布實施溫室氣體排放量申報管理辦法(行政院環保署，2012)。

由於臺灣自然資源不足，環境承載有限，永續能源政策三大願景期將有限資源作有「效率」使用，開發對環境友善之「潔淨」能源以及確保持續「穩定」的能源供應，目標如下所示：

- (1) 提高能源效率：未來8年每年提高能源效率2%以上，使能源密集度於2015年較2005年下降20%以上；並藉由技術突破及配套措施，2025年下降50%以上。
- (2) 發展潔淨能源：全國二氧化碳排放減量，於2016年至2020年間回到2008年排放量，於2025年回到2000年排放量；發電系統中低碳能源占比由40%增至2025年之55%以上。
- (3) 確保能源供應穩定：建立滿足至2016年之經

濟成長6%及2015年每人年均所得達3萬美元經濟發展目標的能源安全供應系統。

2.3 臺灣TFT-LCD廠商之溫室氣體減量行動

從1980年代末期，日本廠商掌握著STN LCD的主要生產技術，開始進行大規模的生產，使LCD產業獲得快速發展。臺灣於1997年自日本三菱公司進行技術移轉，獲得TFT-LCD的量產技術，至2013年整個面板廠產業集中在日本、韓國、臺灣與中國大陸等。依據Display Search資料，2011年全球面板出貨市場占有率南韓為第一名，最高達49.6%，臺灣為第二名達38.0%。

因全球溫室效應受到重視，臺灣自2004年至2013年，共進行兩階段的官方與業者溫室氣體減量協商。第一階段是2004年環保署開始與TFT-LCD廠商進行自願性溫室氣體減量協商。經多次會商，於當年8月簽訂溫室氣體之全氟化物排放減量合作備忘錄，業者經過4年多投入了近20億元經費的努力後，2008年其排放強度(每平方公尺基板之排放量)減量成效已達70%，且其全氟化物去除設備之安裝率亦達80%，遠高於日本及韓國之70%與10%，約減少1900萬噸之二氧化碳當量。

2011年臺灣TFT-LCD業界兩家代表性廠商的溫室氣體排放內容如表1，從數據統計可以觀察TFT-LCD業者製程氣體排放量比例相當高。在TFT-LCD生產流程中，會排放大量溫室氣體。其中廠內排放源可依循ISO14064-1規範分為範疇一排放與範疇二排放。範疇一排放主要來自於使用氫氟化物氣體作為製程氣體，其全球暖化潛勢為二氧化碳的萬倍以上。範疇二的溫室氣體定義為間接能源使用排放，其中包含自電力公司購入的電量，外部購入的蒸氣使用量以及廠內汽電共生的排放量，占範疇二溫室氣體排放比例為82%以上，亦占總體排放量10%以上。鑒於上述含氟製程氣體為TFT-LCD產業的特殊溫室氣體排放類型且GWP值較高，

表1 2011年TFT-LCD業者臺灣廠區溫室氣體排放量

TFT-LCD業者		群創光電	友達光電
範疇一排放量(噸CO ₂ 當量)		470,000	350,935
範疇二排放量(噸CO ₂ 當量)		2,576,000	2,323,246.38
製程含氟氣體	排放量(噸CO ₂ 當量)	421,000	288,714.94
	占範疇一比例(%)	89.57%	82.27%
	占總排放比例(%)	13.8%	10.8%

資料來源：群創光電、友達光電(2012)

因此2004年業者針對製程氣體進行自願性減碳協議之簽訂，並為保障產業發展空間，此減量協議的簽訂所採單位為每平公尺米玻璃基板的PFC排放量。在主要業者於目標年度2010年達到減量70%的目標協定後，於2011年經濟部工業局邀業者進行第二階段的減量協議簽訂。

事實上，廠商溫室氣體減量效果受其產量、能源效率改善方案、溫室氣體減量目標、電力系統電力排放係數等多重因素交互作用。換言之，是由多項因素互為因果的交叉影響，因此需以整體觀點來分析企業的減碳政策，故本研究以系統動態學作為研究方法，進行臺灣TFT-LCD產業溫室氣體排放動態模型的建構，並做結果分析與模擬。

3. 研究方法與步驟

系統動態學(System Dynamics; SD)於1950年代由美國麻省理工學院Forrester教授所創立，系統動態學發展至今，應用相當的廣泛(Ford, 1997；Forrester, 2003；謝長宏，1980；陶在樸，1999；蕭志同等，2010)。其中應用在環境相關議題的研究亦甚廣，Meadows等學者於1972年發表鉅著<成長的極限>，利用SD研究全球經濟成長與人口、環境汙染、資源的交互作用(Meadows, 1972)。Wang *et al.* (2008)則認為城市交通系統是個非線性回饋環路，包含交通、社會、經濟、環境等因素間之影響，故提出一動態回饋環路的系統結構。Jin *et al.* (2009)用SD模擬都市政策之生態碳足跡效

果。Trappey *et al.* (2012)則利用SD建構低碳島的綠色運輸系統碳排放量模擬。Ansari & Seifi (2013)則以SD分析產業的能源消費與碳排放量之關係；同年Shin *et al.* (2013)將SD應用在能源安全的研究。根據上述文獻，系統動態學應用於環境衝擊以及溫室氣體政策效益評估方面，已有相關研究文獻，故本研究亦運用系統動態學方法，針對臺灣TFT-LCD之溫室氣體排放減量與潛在環境成本間之因果關係，進行系統思考分析，再建構量化模式，並模擬不同情境下溫室氣體排放的效果。

研究方法主要分為三大步驟；第一步驟，定義TFT-LCD產業的溫室氣體排放與因應公司減量目標改變的溫室氣體排放因果循環關係。第二步驟，依循上述的因果循環關係，設定方程式與變數參數，進行系統動態模型的建構。第三步驟，配合四種模擬情境，進行系統動態行為模擬，並進行討論，如圖1所示。

4. 案例研究

在TFT-LCD製程中，使用大量含氟溫室氣體(Perfluorocarbons, PFCs) HFCs及SF₆。此外，TFT-LCD之主要生產環境都是在恆溫恆濕的無塵室中進行，且為24小時機台自動化生產，因此為確保生產的基礎需求，需全天候耗用大量電力來維持穩定的生產環境。總結上述的主要溫室氣體排放源，可知TFT-LCD產業排放大量的溫室氣體；所以中華民國臺灣薄膜電晶體液晶顯示器產業協會(Taiwan TFT LCD Association,

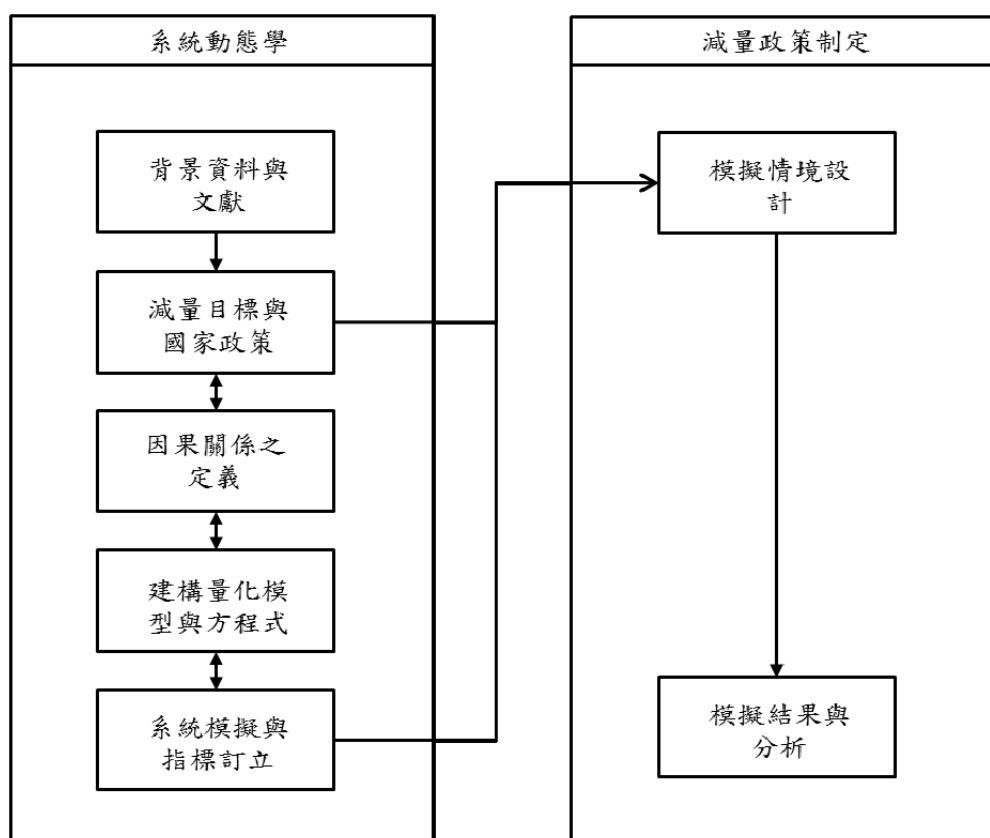


圖1 研究設計與流程

表2 臺灣TFT-LCD業者過往協定目標與成效

	業者	群創光電	友達光電
基礎資料	英文全名	Innolux Corporation	AU Optonics Corporation
	資本額	新臺幣910億元	新臺幣962億元
	員工人數	全球約9.3萬人	全球約4.5萬人
	2012營業額	約新臺幣48.1千億元	約新臺幣37.8千億元
2004~2010年 第一期減量協議	目標範疇	含氟化物排放強度	全廠區排放強度
	目標值	33.5 kg CO ₂ e/m ²	89.4 kg CO ₂ e/m ²
	達成狀態	2010年實質狀態為 9.4 kg CO ₂ e/m ²	2010年實質狀態為 69 kg CO ₂ e/m ²
2012~2015年 自願減量協議	目標範疇	尚未發布	降低25%、51.8 kg CO ₂ e/m ²
	目標值		降低25%、51.8 kg CO ₂ e/m ²
	達成狀態		進行中

資料來源：群創光電、友達光電(2012)

TTLA)與客戶已開始進行相關減量協議以及數據揭露。本研究進行量化模擬以及數據預估，均以群創光電公司(Innolux Corporation)公開揭露的數據，做為基礎。因其2013年產值為全球第三大及臺灣第一大的液晶面板製造企業(群創

光電，2013)。群創光電成立於2003年，2010年與其他公司合併後，在臺灣有14個廠，擁有3.5到8.5世代的完整產線，且是全球唯一擁有完整大、中、小尺寸LCD面板製造公司及觸控面板製造廠的顯示器提供者(友達光電，群創光電，

2012年)。

4.1 模型建構

因應國家氣候變遷的對應減量政策，在國家與產業面也提倡相關的減量目標以及碳稅徵收。在減碳稅收部分，環保署已公告將二氧化碳、二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、六氟化硫及全氟化碳等七種溫室氣體列為空氣污染物，並在溫室氣體申報管理辦法中，要求溫室氣體排放量較高的產業於2013年與2014年進行申報。

根據友達光電以及群創光電的企業社會責任報告書公開資料，範疇二主要的排放量是由電力公司購入的電量。因此在於範疇二的溫室氣體排放量將與台電公司公告之電力排放係數具強相關性。另溫室氣體排放量的變化隨著產能而變動；在產能逐漸上升過程，製程氣體的使用量與電力使用量均會逐漸上升。將依據過去企業的實體溫室氣體排放量、產能、及範疇一與範疇二的排放數據計算，設計範疇一與範疇二的排放係數，用作計算溫室氣體排放量，並將原始範疇一與原始範疇二的排放數值相加等同生產製造的溫室氣體排放量。其關係如圖2左方因果環路呈現。

圖2的整體因果關係圖中可知，臺灣TFT-LCD廠商溫室氣體排放行為與政策，是受到三個關鍵環路影響。第一個環路是整體產業目標與溫室氣體排放量的差距。若排放量低於產業目標則可以有碳權收益，反之須付出碳稅。若有碳權收益則公司資金會增加，公司就能投資於能源效率改善，進一步使製程氣體降低，而整體溫室氣體排放量將再減少，碳權收益更多，形成一個正性環路。第二個環路是負性調整環路，當公司資金投入能源效率改善時，成本增加，資金減少，就無法投資在能源效率的改善，最後達到系統穩定平衡。第三個環路是公司製程氣體目標與實際製程氣體的調節環路，目標與現況有差距時，則投資能源效率的改善，降低製程氣體排放量，達到目標就停止投資，形成一個負性因果環路，如圖2。

本模型所建構的系統動態模型之內部效度，經由長期研究減碳議題研究學者以及SD專家學者的檢視，認為模型具有相當高之解釋能力。

依據上一節對於製造溫室氣體排放、減量投資金額、溫室氣體減量的關聯運作模式，本文使用SD方法論中的Group Model Building approach與Vensim軟體，建構企業溫室氣體減

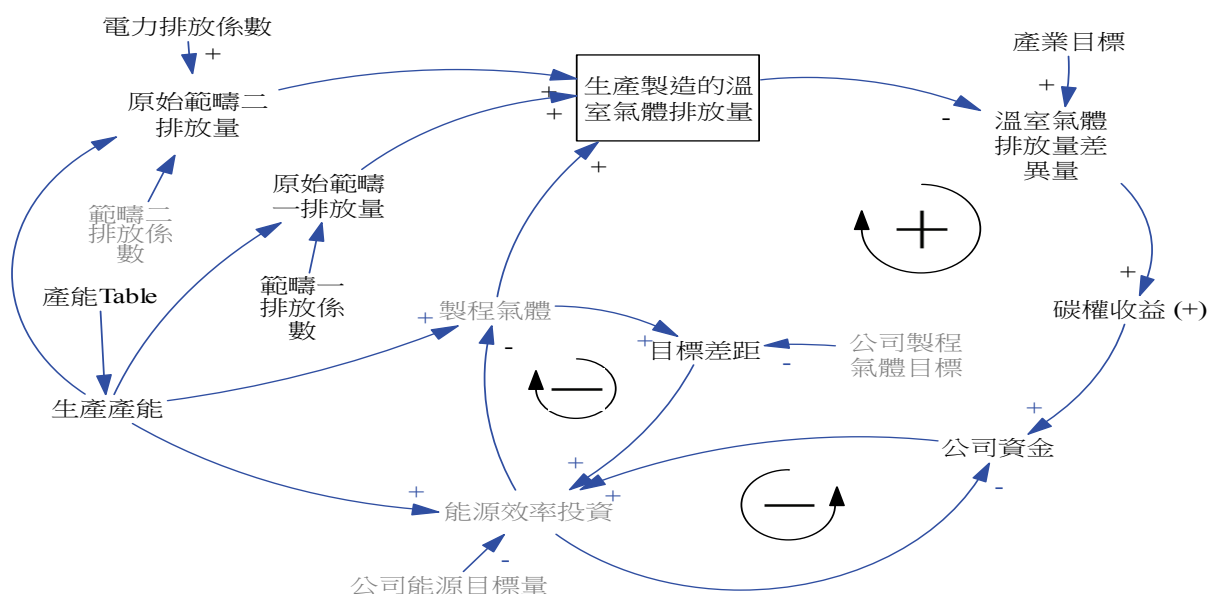


圖2 臺灣TFT LCD溫室氣體減量政策整體因果回饋圖

量政策之SD量化模型。以下將針對此模型重要變數之方程式與參數進行說明：

(1) 低碳能源與電力係數

行政院所核定之「能源發展綱領」中的一項重要框架為發展潔淨能源：全國二氧化碳排放減量目標為2020年間回到2008年排放量，於2025年回到2000年排放量；發電系統中之低碳能源占比由2008年之40%增至2025年的55%以上。因此在低碳能源部分的數值推估，係假設其低碳能源占比從2011年之46.1%，逐年採固定比例成長至2025年政策設定之55%。當國家發電政策朝向低碳能源發展時，台電公司的電力排放係數將會降低。當計算溫室氣體範疇二的排放時，需統計廠內的用電量並乘上台電公司的電力排放係數，做為當年度能源用電的溫室氣體排放量(經濟部能源局，2013年)，並計算整體附表如表3。

(2) 產能估算

在群創光電的歷史財務年報[8]中使用玻璃基板的投入片數作為公布之生產量值，故本研究亦使用玻璃基板投入片數作為產能計算。另隨著2010年原奇美電子合併案，因此在2009-

2011年的數據使用CSR報告書中的投入玻璃總體積數據，在2012年以後的數據採產能利用率資料進行推估，2013年至2025年的數據以2012年的產能利用率為基底，參採IMF公告之2012年推估全球經濟成長率，後逐年增加之勢，相關推估數據如表4。

(3) 產業目標值推定

因政府目前尚未開徵碳稅，因此在此部分的估算主要以中華民國臺灣TFT LCD產業協會(TTLA)與友達協定之2015年其氟化物之溫室氣體排放量較2010年減量30%為基礎，且衡量過往排放基數，2000-2011年的排放目標，將以企業本身之原始排放量為目標值，2012-2014年的排放目標，則以2015年的減量目標依比例下降而設定，其推估數據如表5。

4.2 情境模擬與結果分析

為檢驗模型外部效度，所以採關鍵之製造溫室氣體排放量模擬值與實際值的趨勢線作比對。將實際值與情境一(企業主張無變化時)模擬值進行趨勢線比對，可以看出圖3中兩條線的趨勢大致吻合，表示此模型的數據模擬貼近實

表3 低碳能源結構表

年份	低碳能源(%)				年份	低碳能源總計值(%)
	燃氣	核能	再生	總計		
2000	9.57	20.83	3.46	33.86	2013	47.28
2001	10.89	18.82	3.96	33.67	2014	47.88
2002	13.21	19.89	2.88	35.98	2015	48.48
2003	13.58	18.60	2.90	35.08	2016	49.10
2004	16.58	18.08	2.94	37.60	2017	49.72
2005	17.11	17.58	3.20	37.89	2018	50.35
2006	16.97	16.93	3.25	37.15	2019	50.99
2007	18.42	16.67	3.49	38.58	2020	51.64
2008	20.29	17.13	3.49	40.91	2021	52.29
2009	20.35	18.10	3.46	41.91	2022	52.96
2010	24.61	16.85	3.57	45.03	2023	53.63
2011	25.84	16.7	3.56	46.1	2024	54.31
2012	46.68				2025	55.0

資料來源：能源局，2013 / 本研究整理

表4 生產產能表

年度	產能(片)	產能(立方公尺)	利用率	年度	產能(片)	重量	利用率
2000	921,022	--	--	2013	417,841,220*	--	96.069*
2001	2,251,665	--	--	2014	431,629,980*	--	99.239*
2002	5,488,305	--	--	2015	434,938,658*	--	100*
2003	7,588,222	--	--	2016	434,938,658*	--	100*
2004	13,609,028	--	--	2017	434,938,658*	--	100*
2005	23,596,787	--	--	2018	434,938,658*	--	100*
2006	34,106,415	--	--	2019	434,938,658*	--	100*
2007	52,633,879	--	--	2020	434,938,658*	--	100*
2008	171,225,731	26,500,000	--	2021	434,938,658*	--	100*
2009	247,469,641*	38,300,000	--	2022	434,938,658*	--	100*
2010	316,606,069*	49,000,000	--	2023	434,938,658*	--	100*
2011	335,990,114*	52,000,000	77.25	2024	434,938,658*	--	100*
2012	404,492,952*	--	93*	2025	434,938,658*	--	100*

*預估值

資料來源：公開資訊觀測站、群創光電網站

表5 產業管控目標值

年度	產能 (基板片數)	產業管控目標 (CO ₂ 噸)	年度	產能 (基板片數)	產業管控目標 (CO ₂ tonnes)
2000	921,022	95,650*	2013	417,841,220*	4,454,710*
2001	2,251,665	233,685*	2014	431,629,980*	4,544,095*
2002	5,488,305	567,553*	2015	434,938,658*	4,520,866*
2003	7,588,222	785,635*	2016	434,938,658*	4,520,866*
2004	13,609,028	1,403,931*	2017	434,938,658*	4,520,866*
2005	23,596,787	2,430,860*	2018	434,938,658*	4,520,866*
2006	34,106,415	2,834,085*	2019	434,938,658*	4,520,866*
2007	52,633,879	3,832,879	2020	434,938,658*	4,520,866*
2008	171,225,731	3,498,120	2021	434,938,658*	4,520,866*
2009	247,469,641*	3,239,179	2022	434,938,658*	4,520,866*
2010	316,606,069*	4,885,910	2023	434,938,658*	4,520,866*
2011	335,990,114*	3,682,188	2024	434,938,658*	4,520,866*
2012	404,492,952*	4,366,398*	2025	434,938,658*	4,520,866*

*預估值

資料來源：本研究整理

際狀態，可見模型外部效度高，因此所進行的相關情境模擬結果之信度亦高。

情境一：企業主張維持現況，僅有台電公司電力排放係數降低，除前期已完成的減量方案措施會持續依產能進行減量外，並依據台電公司的減量模式，逐年減低電力排放係數，故

將會連帶影響範疇二的溫室氣體排放量降低。在2000-2010年的上升趨勢主要來製造產能的擴張，隨著產能的增加以及擴廠，企業於2005年開始持續投入減量計畫。因應國家低碳政策，台電公司的電力排放係數會逐年下降，將會連帶影響範疇二的溫室氣體排放量降低；假設

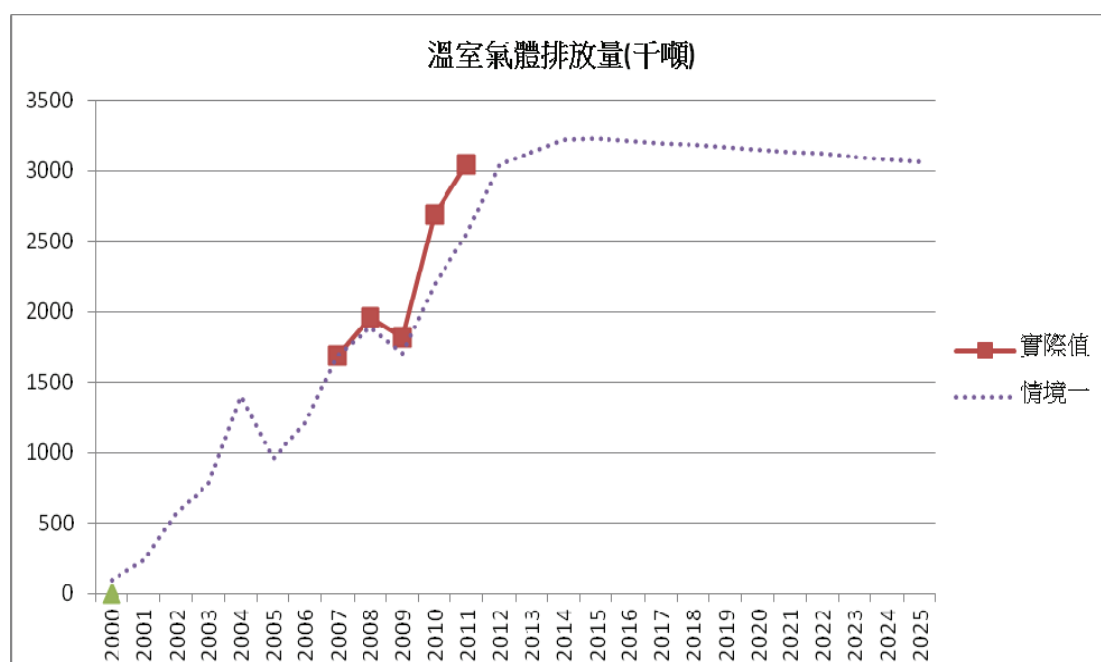


圖3 溫室氣體排放量之模擬值與實際值比較圖

2015-2025年因預估產能已達極限，所以範疇二的溫室氣體量逐漸下降，並假設2015年的碳權效益主要來自於企業體自身減量數值，並開始徵收碳稅。

情境二：參考與TFT-LCD特性類似的半導體大廠(台積電)作為減碳政策設定，2015年能源類別排放較2010年降低2%，將範疇一的減碳計畫排放計算係數於從2012年開始增加，並期望於2020年的排放量可較2010年低30%。範疇二也變更相關減量係數，使2015年能源效率較2010年低。經由模擬後可以看到整體減碳效益較原始顯著，碳權收益較上升，整體碳稅資產狀況也較為良好。

情境三：參考日本的TFT-LCD製造大廠SHARP的減碳政策設定，即2013年-2015年整體每年度削減3%，從2013-2020年每年能源部分降低1% (MEJ, 2012)。將範疇二的減碳計畫排放計算係數於從2013年開始增加，並每年降低1%，經由模擬後可得知，整體減碳效益較情境一又更顯著。

情境四：參考韓國之全球第一大TFT-LCD製造大廠的減碳政策設定，Samsung公司擬於

2015年將其溫室氣體排放量/銷售金額較2008年減量24%。將範疇二的減碳計畫排放計算係數於從2012年開始進行減量，並期望於2015年的排放量降為2008年的24%。經由模擬後可得整體減碳效益較情境二與情境三不顯著。

綜合比較四種減量情境模擬結果，可觀察到四種情境於模擬數值及差異(圖4-6)。當情境一僅以過往的投資減量進行預估，所以後續碳權收益投入較其他三種情境少，在最終碳權資產累積較少。因各企業的不同減量方案所帶來的效益以及投入金額已初步納入研究的系統邊界內，因此建議以情境三作為臺灣TFT-LCD公司考量的方案，雖在2013年每年度的下降幅度僅有3%，並自2015年開始下降1%。但因持續減碳計畫，因此其預估碳權收益約達到新臺幣6千8百多萬元(2025年)，若後續能將相關效益持續投入更積極的減量計畫，將可使得企業在減量目標可持續且獲得越來越大的效益。

由上述四種情境模擬可得知，如早期執行減碳目標時，其執行成果將隨著時間拉長，可累積整體溫室氣體減量，並持續性影響。另積極的減碳政策可在碳權上獲得效益，並回饋至

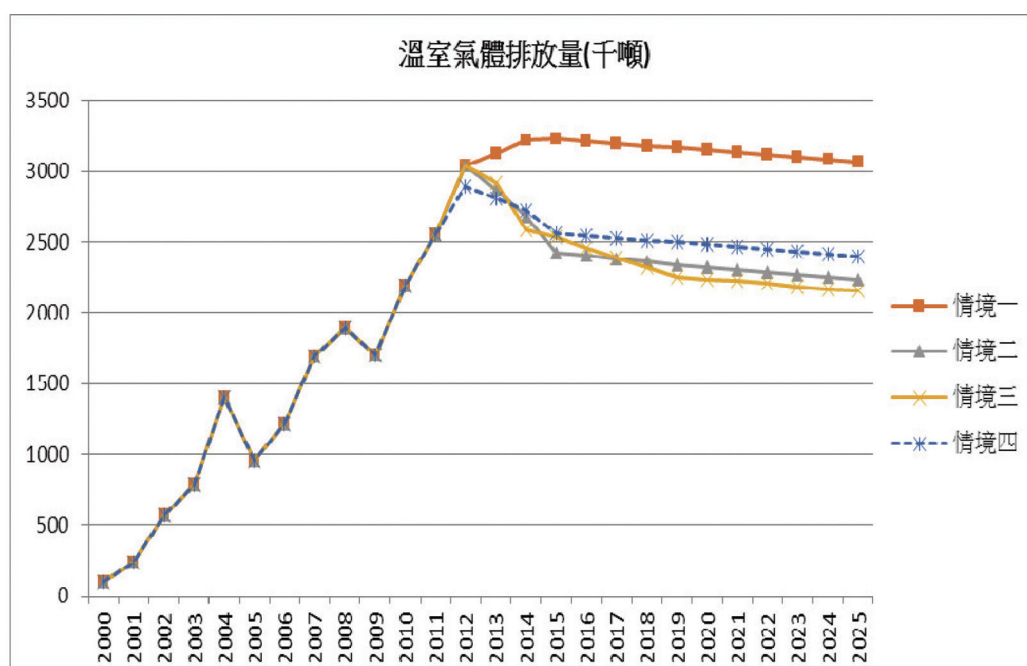


圖4 生產製造溫室氣體排放模擬圖

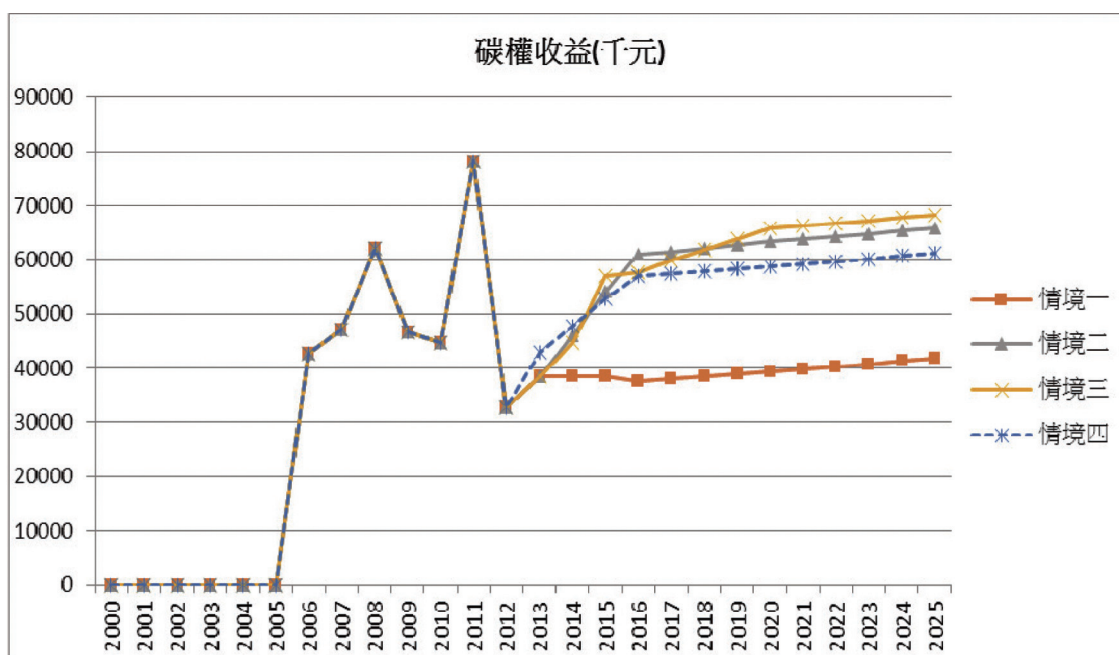


圖5 碳權收益模擬圖

碳權資產中，使得早期投入減量的技術預算能獲得長期攤平，相關比較如表6。

5. 結 論

本研究使用系統動態學方法論，建構臺灣

TFT-LCD產業溫室氣體排放成本效益之評估模型，預估企業未來可能面臨的環境衝擊，分析四種決策方案之減碳政策的成本效益。其中臺灣廠商若參考日本TFT-LCD製造大廠SHARP的減碳決策模式，將範疇二的減碳計畫排放計算係數從2013年開始增加，並於2020年的排放量

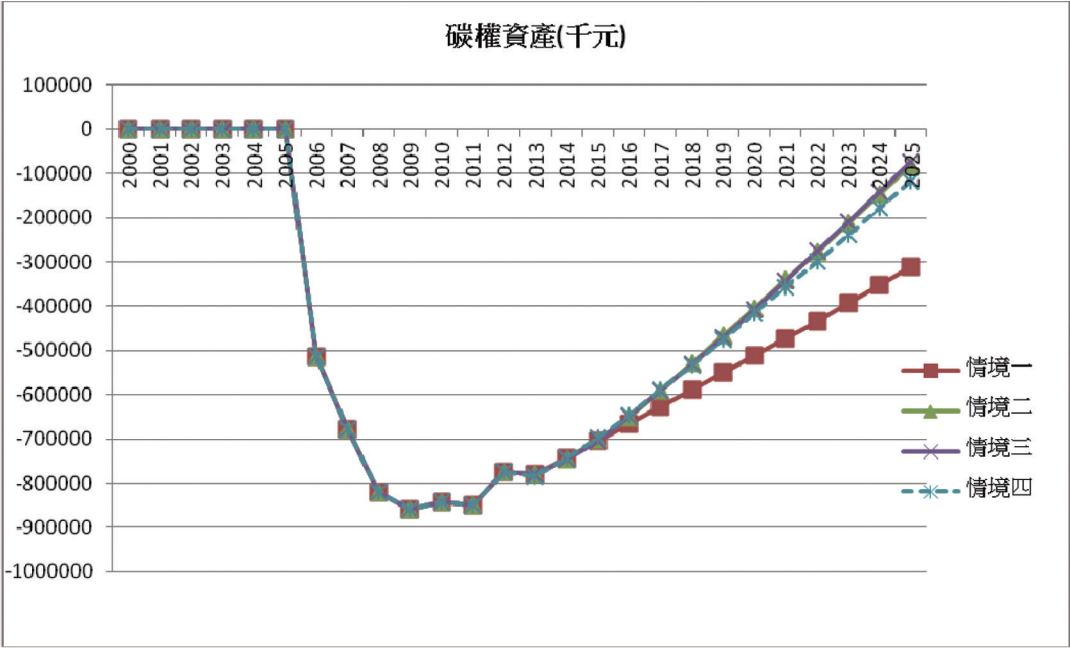


圖6 碳權資產模擬圖

表6 情境模擬綜合比較表

模擬情境	減碳政策	碳權資產 (單位-新臺幣，2025年)	分析說明
情境一	維持現況，僅有台電公司電力 排放係數降低。	碳權資產累計約-3.11億 元	無需投入任何資金，但需較 其他方案多耗費時間才能攤 平過往投資。
情境二	2020年的氟化物氣體排放量較 2010年降低30%，2015年能源 類別排放較2010年降低2%。	碳權資產累計為約-0.82 億元	長期的減碳投入使得從碳權 收益或資產分析均為次佳建 議方案。
情境三	2013年-2015年整體每年度降 低3%，從2013-2020年每年能 源降低1%。	碳權資產累計為約-0.74 億元	長期的減碳投入使得從碳權 收益或資產分析均為最佳建 議方案。
情境四	2015年溫室氣體排放量/銷售 金額較2008年減量24%。	碳權資產累計為約-1.17 億元	無需投入任何資金，但需較 其他方案多耗費時間才能攤 平過往投資。

年年降低1%，可知整體減碳效益最為顯著。若要使模型更一般化，考慮全球需求面景氣的衝擊，模型中可再加入全球GDP成長率、全球人口成本以及需求增長等之變數，或大陸市場對臺灣產業的影響，以了解全球或大陸相關變數的衝擊。最後本研究提出減碳政策之評估方法，能幫助決策者在不同減碳政策下作成本效益評估，亦適合應用於其它複雜溫室氣體排放之研究議題，期望此研究模型能提供給產、

官、學各界參考。

致 謝

本研究部分經費由教育部邁向頂尖大學計畫(計畫編號：101N2074E1, 102N2074E1)，暨國科會補助之專題研究計畫所支持，特此致謝。

參考文獻

- 友達光電公司，2012年，企業社會責任報告書，Retrieved from <http://auo.com.tw>
- 行政院環保署，2012年，溫室氣體排放量申報管理辦法，<http://www.epa.gov.tw/>
- 行政院節能減碳推動會，2010，國家節能減碳總計畫。
- 黃世傑，2006年，「京都議定書」生效之後，中興工程，第92期，96-98頁。
- 經濟部能源局，2013年，101年電力排放係數，<http://web3.moeaboe.gov.tw>
- 經濟部能源局，2013年，永續能源政策綱領 http://verity.erl.itri.org.tw/EIGIC/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=3
- 群創光電公司，2012年，企業社會責任報告書，<http://www.innolux.com/>
- 群創光電公司，2012年，群創光電年報，<http://mops.twse.com.tw/index.htm>
- 陶在樸，1999年，系統動態學，臺北：五南圖書出版有限公司。
- 謝長宏，1980年，系統動態學-理論、方法與應用，臺北：中興管理顧問公司。
- 蕭志同、戴俞萱、柳淑芬，2010年，決策分析與模擬，臺北：台灣東華書局。
- Ansari, N., Seifi, A., 2013, "A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO₂ emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios," *Energy Policy*, Vol. 58, pp. 75-89.
- Electronic Industry Citizenship Coalition, 2012, "EICC 2011 Annual Report," Retrieved from <http://www.eicc.info/index.shtml>
- Ford, J.W., 1997, "System dynamics and the electric power industry," *System Dynamics Review*, 13(1), pp. 57-85.
- Forrester, J. W., 2003, "Dynamic models of economic systems and industrial organizations," *System Dynamics Review*, 19(4), pp. 331-345.
- Green Growth Korea, 2012, "An Update on Korea's Green Growth : Progress and Prospects," <http://www.unep.org>
- IPCC, 2001, "IPCC third assessment report," Retrieved 22 November 2010 from <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/index.htm>.
- Jin, W., Xu, L.Y. and Yang, Z.F., 2009, "Modeling a policy making framework for urban sustainability: Incorporating system dynamics into the ecological footprint," *Ecological Economics*, Vol. 68, (12), 2938-2949.
- Meadows, D. H., Randers, J., Meadows, D., 1972, *The Limits to Growth*, Universe Books, 1972.
- Ministry of the Environment Japan, 2012, "Japan's Climate Change Policies," Retrieved from <http://www.env.go.jp>
- Price water house Coopers, 2012, "CDP Global 500 Climate Change Report 2012," Retrieved from <http://www.cdproject.net>
- Reed, P., 2007, "ISO 14064 Environmental Standard," IRCA Ezine, Retrieved 5 October 2010, <http://www.irca.org/inform/issue15/ISO14064.html>
- Shin, J., Shin, W.S., Lee, C., 2013, "An energy security management model using quality function deployment and system dynamics," *Energy Policy*, Vol. 54, pp. 72-86.
- Trappey, A.J.C., Trappey, C.V., Hsiao, C.T., Ou, J.R., Li, S.J., Chen, K.W.P., 2012, "An evaluation model for low carbon island policy: the case of Taiwan's green transportation policy," *Energy Policy*, 45, pp. 510-515.
- Wang, J., Lu, H. and Peng, H., 2008, "System dynamics model of urban transportation system and its application," *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), pp. 83-89.

An Evaluation Model for TFT-LCD Industry Green House Gas Emissions

C.-T. Hsaio^{1*} Amy J.C. Trappey² W. C. Jhong³ Charles V. Trappey⁴
Jerry J.R. Ou⁵ Mike F. M. Yeh⁶

ABSTRACT

The industrial revolution signaled the start of the emission of large amounts of greenhouse gas which over the centuries has led to global warming and climate change. The Kyoto Protocol has introduced adjustment policies to reduce climate change, control greenhouse gas emissions, and save energy consumption for the signatories of the agreement. Globally, there are more than 500 companies, surveyed by the Carbon Disclosure Project, that report their corporate operational greenhouse gas inventories and promote carbon disclosure practices to downstream suppliers. However, the new greenhouse gas emissions regulations and taxes impact sustainable development and also increase enterprise risks and operating costs. In addition to economic risks, enterprises face environmental risks caused by climate changes (e.g., severe global weather changes) that make business operations more challenging. In this study, data are collected to model the existing industrial product demands and greenhouse gas emissions data for the Taiwan TFT-LCD industry. System Dynamics (SD) models are used to forecast the business sector growth and related greenhouse gas emission. The case analysis aligns with the scenarios of carbon emissions regulations and taxation as well as Asian competitors' carbon reduction plans. The SD simulations assess the viability of investment plans for greenhouse gas reduction programs. The TFT-LCD industry is the focus of study since it is a critical sector of Taiwan's export manufacturing industry. Normal operations from the TFT-LCD industry provide benchmark data for the SD model. The scenario simulation model is adapted to mimic the reduction plans of similar industries in Taiwan, Korea and Japan. The simulated scenarios are evaluated in terms of their potential environmental impacts and costs. Finally, the assessment of greenhouse gas emission programs is used as a reference to support regional emission reduction policy decision making in the TFT-LCD manufacturing sector.

Keywords: Greenhouse Gas, System Dynamics, TFT-LCD Industry

¹ Associate Professor, Department of Economics, Tunghai University

² Distinguished Professor, Department of Industrial Engineering and Engineering Management, National Tsing Hua University

^{3,6} Graduate Student,, Department of Industrial Engineering and Engineering Management, National Tsing Hua University

⁴ Professor, Department of Management Science, National Chiao Tung University

⁵ Bureau Chief, Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs

* Corresponding Author, Phone: 886-4-23580934, E-mail: cthsiao@thu.edu.tw

Received Date: Oct. 28, 2013

Revised Date: Nov. 29, 2013

Accepted Date: Dec. 09, 2013