

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

非糧原料轉換生質能生產製程之
水足跡與碳足跡評估

Carbon footprint and water footprint assessment of non-grain
feedstocks bioenergy production process

計畫編號：NL1060456

受委託機關(構)：台灣能資源永續與低碳經濟學會

計畫主持人：蘇美惠 秘書長

聯絡電話：03-8575765 / 0937-975438

E-mail address：maysu1009@gmail.com

研究期程：中華民國 106 年 05 月至 106 年 12 月

核研所聯絡人員：黃瓊芳小姐

報告日期：106 年 12 月 10 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的	3
參、研究方法與過程	5
一、纖維酒精碳足跡分析	5
(一)、目標及範疇界定	5
(二)、生命週期盤查分析	5
(三)、生命週期衝擊分析	6
二、纖維酒精水足跡分析	7
(一)、纖維酒精水足跡盤查方法建立	7
(二)、國內不同非糧原料栽植水足跡評估	9
(三)、國內不同非糧原料生產酒精之水足跡評估及比較	11
肆、主要發現與結論	12
一、纖維酒精碳足跡分析	12
(一)、能源盤查分析	12
(二)、能源平衡率分析	18
(三)、碳足跡分析	20
(四)、小結	30
二、纖維酒精水足跡分析	31
(一)、國內不同非糧原料栽植水足跡評估	31
(二)、國內不同非糧原料生產酒精之水足跡評估及比較	32
(三)、小結	33
伍、參考文獻	34

中文摘要

本研究以新茂公司馬來西亞廠所設計之生產製程為模擬標的，就馬來西亞廠內廢棄木片為原料產製生質酒精，並運回台灣之產品碳足跡進行分析，並與國內最大宗農業廢棄物稻稈產製纖維酒精之碳足跡分析結果，進行比較分析。研究結果顯示，馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣高雄港之生命週期能源平衡率約為 2.85，顯示利用馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣，在技術面已具備能源利用效益。與國內自產稻稈酒精進行比較，二者在製程端之總耗能相當接近；但若將副產品可提供的能源貢獻納入考量，發現稻稈酒精在製程端淨能資源投入為廢木片酒精製程的兩倍，明顯能源利用效率較低。

從整體生命週期碳足跡組成結構來看，馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣之生命週期碳足跡約 1.16 公斤 CO₂e，主要碳排放量仍來自於製程端，佔總生命週期排放量 97.8%；而製程端電力之碳排放量佔製程總排放量 99.9%。因此，製程中所使用的電力，若能以生質電力予以取代，則將可有效降低碳足跡。將廢木片與稻稈產製酒精之碳足跡進行比較，以馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣之碳足跡明顯較低。

針對國內具備發展潛力的非糧原料能源作物水足跡分析表現，生產每公噸作物所耗用的總水足跡以甘藷最低、甘蔗次之，稻稈為各項作物中最高者。從生產每公升酒精所耗用的水量分析，甘藷酒精為所有能源作物中總水足跡最低者，其次依序為玉米、甘蔗、狼尾草與甜高粱。至於稻稈酒精總水足跡為各項非糧料源中最高，為甘藷酒精 16.9 倍、甘蔗酒精 3.2~3.8 倍。

關鍵字：纖維酒精、生命週期評估法、碳足跡、水足跡

Abstract

The results show that the life cycle energy balance of Malaysian waste wood chip bioethanol manufactured and transported to Taiwan's Kaohsiung port is about 2.85. Show that this situation in the technical side has the energy efficiency. Comparison with domestic production of rice straw bioethanol, both in the total energy consumption of the production process is quite close. After the energy contribution of the by-product is included in the calculation, the net energy consumption of the rice straw bioethanol at the process end is twice that of the waste wood.

The life cycle carbon footprint of Malaysian waste wood chip bioethanol manufactured and transported to Taiwan's Kaohsiung port is about 1.16kgCO_{2e}. The main carbon emissions are still from the process side, accounting for the total life cycle emissions of 97.8%. While the process side of the power of carbon emissions accounted for the total emissions of 99.9%.

The total water footprint consumed per metric ton of crop is the lowest in sweet potato, followed by cane, and rice straw is the highest among the crops. The amount of water footprint consumed per liter of bioethanol, sweet potato alcohol is the lowest for all energy crops, followed by corn, sugar cane, papilion and sweet sorghum. The total water footprint of rice straw bioethanol is the highest among all sources. It is 16.9 times of sweet potato bioethanol and 3.2 to 3.8 times of sugarcane bioethanol.

Keywords : Cellulosic bioethanol, Life Cycle Assessment, Carbon Footprint, Water Footprint.

壹、計畫緣起與目的

貳、東南亞生質廢棄物潛能約 4 億噸，主要分布於印尼、越南與泰國，佔整個東南亞三分之二生質料源；其中稻稈廢棄物潛量約 2 億噸、蔗渣約有 1,418 萬噸、廢木片約有 1.3 億噸、棕櫚殼果串潛量約有 4,800 萬噸。而馬來西亞新茂公司已於 2016 年 5 月與核能研究所簽訂技術授權合約，規劃以新茂公司馬來西亞廠產生的廢棄木片為原料，於未來 2~3 年內在該公司合板廠旁「共構」建立涵蓋生質燃料及生質副產品之生質精煉廠。

生命週期評估法 (Life Cycle Assessment, LCA) 可以清楚描繪一個產品、活動或服務，所消耗和產出的各種資源組合，並評估其綜合環境影響的系統性分析方法；是一種從搖籃到墳墓 (Cradle-to-grave) 的衝擊評估方法，包含從物品的生產、使用、生命終結之處理、回收再利用及最後廢棄物處置，估算整體能源和原料的取得、運輸、產品使用與消耗，以評估整個生命週期中環境考量面與潛在環境衝擊。

由於目前國內外對於生質能源碳足跡之研究，仍以本土料原產製本土使用建立生命週期評估模型為主，然而由於系統疆界劃分差異、生命週期盤查數據的來源與時間週期不同、以及對於酒精工廠規模設定差異等，都將影響生命週期評估結果。因此，本研究擬以新茂公司馬來西亞廠所設計之生產製程為模擬標的，就馬來西亞廠內廢棄木片為原料產製生質酒精，並運回台灣之產品碳足跡進行分析模型建置，並與國內最大宗農業廢棄物稻稈產製纖維酒精之碳足跡分析結果，進行比較分析，做為後續相關研究進行地產地用或海外生產國內使用之碳足跡比較分析，以及製程改善、能源效率提升

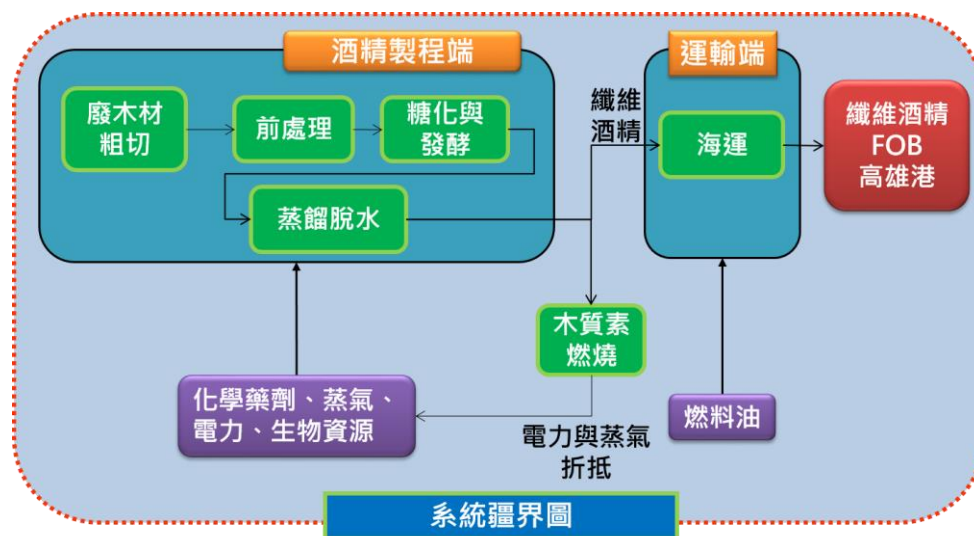
或生命週期評估模型建構之參考。此外，由於作物生長水資源扮演關鍵角色，本研究亦將針對國內具備發展潛力的非糧原料能源作物，建立水足跡分析模式，以評估各項料源之水足跡表現。

參、研究方法與過程

一、纖維酒精碳足跡分析

(一)、目標及範疇界定

本年度目標為建構馬來西亞生產廢木片纖維酒精運輸回台使用之生命週期碳足跡評估模型，並與國內最大宗農業廢棄物稻稈產製纖維酒精之碳足跡分析結果，進行比較分析。研究範疇產品設定為濃度 99.5% 之無水酒精；由於酒精成品以公升數計算，故將功能性單位設定為每公升酒精。有關馬來西亞廢木片纖維酒精與台灣稻稈纖維酒精之生命週期評估系統疆界，分別如圖 1 所示。



資料來源：本研究整理。

圖 1、馬來西亞廢木片產製酒精生命週期評估研究範疇

(二)、生命週期盤查分析

盤查分析將針對製程端與運輸端所投入能資源逐一進行盤查，其中製程部分又包含前處理、糖化與發酵、蒸餾與脫水、

運輸等四大階段。前處理過程盤查甘蔗壓榨與蔗渣前處理之能源投入，包含所投入之化學藥劑與電力；糖化與發酵階段則含糖化與發酵等步驟所投入之酵母菌，及所產出之 CO₂；蒸餾與脫水階段則主要投入電力與蒸氣。副產品部分，為發酵後剩餘之木質素殘渣，將作為本系統汽電共生設備所需之生質料源，以提供系統所需電力。整體製程將利用核能研究所生質精鍊生產平台所進行之纖維酒精生產程序研究試驗，取得相關生產參數。運輸端參數，將依據新茂公司馬來西亞廠港口運輸至台灣最短距離之高雄港航行里程，再將海運貨輪之每公里之油耗量，依纖維酒精在該次運輸項目中之空間比重，進行分攤與盤查推估。

(三)、生命週期衝擊分析

表 1、本研究相關能資源之碳排放係數表

項目	熱值		投入項碳排放係數		單位熱值碳排放量		投入項碳排放係數資料來源
台灣電力	3.6008	MJ/度電	0.52900	kgCO ₂ e/度電	0.146911	kgCO ₂ e/MJ	我國 105 年電力排放係數
馬來西亞電力	3.6008	MJ/度電	0.7465	kgCO ₂ e/度電	0.20733	kgCO ₂ e/MJ	simapro 資料庫
蒸汽	-	-	0.2545	kgCO ₂ e/kg 蒸氣	0.000007	kgCO ₂ e/MJ	simapro 資料庫
硫酸	1.1000	MJ/kg 硫酸	0.0201	kgCO ₂ e/kg 硫酸	0.018276	kgCO ₂ e/MJ	simapro 資料庫
氫氧化鈉	21.3000	MJ/kg 氫氧化鈉	0.0014	kgCO ₂ e/kg 氫氧化鈉	0.000065	kgCO ₂ e/MJ	simapro 資料庫
纖維素酶	1,665.1	MJ/kg 纖維素酶	4.0894	kgCO ₂ e/kg 纖維素酶	0.002456	kgCO ₂ e/MJ	simapro 資料庫
水	0.0042	MJ/kg 水	0.0002	kgCO ₂ e/kg 水	0.039762	kgCO ₂ e/MJ	simapro 資料庫
重油	41.3573	MJ/kg 重油	3.1140	kgCO ₂ e/kg 重油	0.075295	kgCO ₂ e/MJ	歐盟排放係數

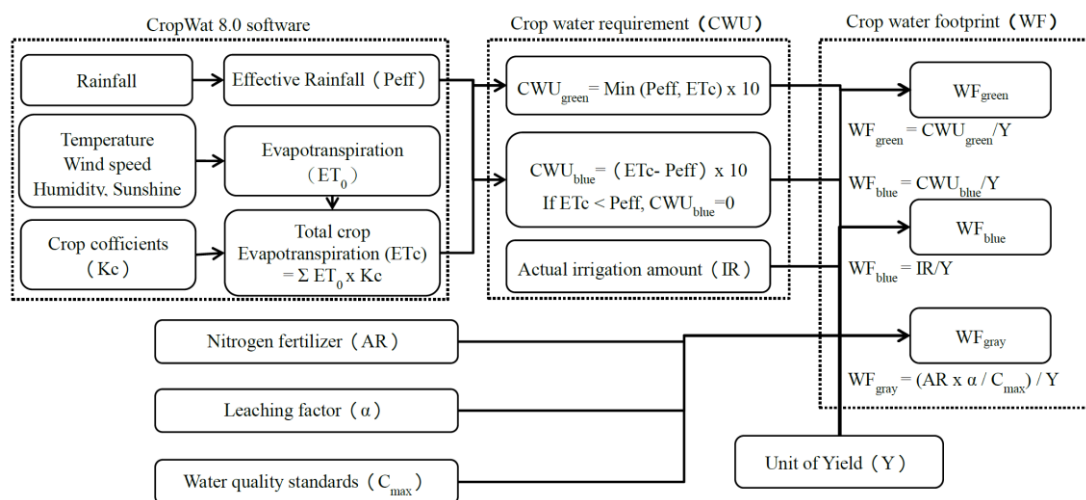
資料來源：本研究計算整理。

二、纖維酒精水足跡分析

由於作物生長水資源扮演關鍵角色，本研究亦將針對國內具備發展潛力的非糧原料能源作物，建立水足跡分析模式，以評估各項料源之水足跡表現。

(一)、纖維酒精水足跡盤查方法建立

本研究將依據 Hoekstra 等人(2009)撰寫之「Water Footprint Manual: State of the Art 2009」及 2011 年更新版本「The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard」(Hoekstra and Chapagain, 2011) 進行水足跡之計算。因生質酒精製程用水量相對於料源端比重相當低，且大部分為可重複使用的水量，製程端用水量比例佔整體用水量的比例約 1%，可忽略不計 (Gerbens-Leenes et al., 2008)。計算作物水足跡需計算作物的蒸發散量與有效降雨量，採用中央氣象局氣象數據帶入 CROPWAT 8.0 軟體進行計算；整體能源作物水足跡計算流程如圖 2 所示。



資料來源：Su, M.H. et al. (2015a).

圖 2、能源作物水足跡計算流程

灰色水足跡(WF_{gray})為淨化廢水達水質標準所需之水量，並非實際消耗水量為虛擬量。其中水體最大可承受濃度，採用台灣環境保護署的地下水水質標準氮肥含量水體最大可承受係數為 10 (行政院環保署, 2013)。本研究建構能源作物水足跡評估模型所使用參數整理如表 2。

表 2 水足跡評估模型參數表

模型參數	使用參數與資料來源
有效降雨量(P_{eff})	中央氣象局全球資訊網
蒸發散量(ET_c)	作物產地氣候；交通部中央氣象局全球資訊網
作物係數(K_c)	參考台灣學者對本土作物研究
實際灌溉量(IR)	台糖甘蔗為 2007-2011 年、玉米(嘉義)為 2009-2011 年、玉米(台南)為 2011 年、甘蔗(台南)為 2007、甘蔗(雲林)為
氮肥施用量(AR)	田野調查 (水稻數據為作物施肥手冊 2005)
水質標準(C_{max})	WHO 的水質標準氮肥含量為 10 mg/L
淋洗係數(α)	10% ; Hoelstra and Chapagain (2008)
單位面積產量(Y)	玉米、甘蔗(田野調查)；水稻(農業統計年報)

資料來源：Su, M.H. et al. (2015a)；本研究整理。

(二)、國內不同非糧原料栽植水足跡評估

為瞭解台灣能源作物對於水資源利用效率，及在水資源匱乏條件下能源作物生產的潛力，本研究將就稻稈與狼尾草等非糧能源作物之整體用水效率，與國內玉米、甘藷、甘蔗與甜高粱等，國內曾探討過之能源作物水足跡進行比較，比較不同作物間對於水資源的競爭性，從水資源角度探討能源作物生質酒精對環境友善性。評估生產每公噸作物之水足跡時，將以每公噸作物所耗用立方公尺 (m^3) 水量進行比較 (Hoekstra et al., 2011)。

每種作物適合的生長季節不盡相同 (表 3)，台灣玉米、甘藷一年可兩穫，但由於春作收穫不理想、蟲害較多，台灣南部多採取秋作玉米與甘藷，於每年十月種植屬於枯水期之旱季；甜高粱種植期短約四個月可收成，生長期間適合春作及秋作。甘蔗分為新植和宿根，新植甘蔗生長期約需 18 個月方可收穫，收穫後僅留下一小段做為未來抽芽繼續生長之用，即為宿根，宿根約需 12 個月才可收穫；因此一新植一宿根共需 2.5 年。

因此，本研究對於玉米與甘藷水足跡之計算，將以秋作資料進行分析；甘蔗則將計算完整一新植一宿根生長期；甜高粱台灣仍處於試種階段，2007 年為秋作數據，2008 年為夏作數據。水稻以二期作水稻之水足跡進行分析，至於狼尾草新植一年可以宿根 4 年，每年收穫 3-5 次。

表 3 作物種植期間、肥料用量與產量

Crop	Cultivation schedule	Growth period	Nitrogen fertilizer (kg/ha)	Period yield (ton/ha)
Corn	Autumn: October – February	5 months	160-171	4.5-8.7
Sweet potato	Autumn: August – December	5 months	80-88	14.5-41.0
Sugarcane (New planting)	July – December (of the following year)	18 months	40-44	82.0-106.2
Sugarcane (Ratoon)	January – December	12months	100-256	57.6-80.4
Sweet sorghum	Spring: June – October	5 months	88	40.0-55.5
	Autumn: October – January	4 months	80	40.0
Pennisetum	January – December	12 months	240	180
Rice	Autumn: July – October	4 months	105	3.7-7.5

資料來源：Su, M.H. et al. (2015a)；本研究整理。

(三)、國內不同非糧原料生產酒精之水足跡評估及比較

對於生產每公升酒精所耗用水量分析時，考量不同作物其所可產製的生質酒精產量不同，必須以相同的基準點來進行比較與分析，一般以 $L_{\text{water}}/L_{\text{ethanol}}$ 表示；透過酒精轉換率（假設為 f_{ethanol} ）之換算，將以每公升酒精（ L_{ethanol} ）所耗用公升水量（ L_{water} ）進行評估；各項料源酒精轉換率如表 4。

表 4 各項料源酒精轉換率

料源	酒精轉換率 ($L_{\text{ethanol}}/\text{ton}_{\text{crop}}$)
玉米	370
甘藷	122
甘蔗	70
甜高粱	55
狼尾草	205
稻稈	226

資料來源：本研究整理。

肆、主要發現與結論

一、纖維酒精碳足跡分析

本研究以新茂公司馬來西亞廠所設計之生產製程為模擬標的，就馬來西亞廠內廢棄木片為原料產製生質酒精，並運回台灣之產品碳足跡進行分析模型建置，並與國內最大宗農業廢棄物稻稈產製纖維酒精之碳足跡分析結果，進行比較分析。

(一)、能源盤查分析

由於新茂公司馬來西亞廠纖維酒精所使用的料源，為廠內廢木片，因此，料源端無能源投入，碳足跡盤查分析可以分為製程端與運輸端兩個部分進行。酒精產製端包含料源粗切、前處理、糖化與發酵及蒸餾脫水等製程，所投入的能源與資源包含化學藥劑、電力、蒸汽及生物資源；至於運輸端部分，係指將纖維酒精透過海運運回台灣，所投入的能源以燃料油為主。

1 製程端盤查分析

酒精工廠規模設定為一年工作天 300 日，日進料 1,000 噸廢木片，年產 82,500 公秉酒精，酒精轉換率為每公噸廢木片產出 275 公升酒精。酒精產製端操作程序為將廠內廢木片進行粗切小塊，再送進前處理單元。

廢木片產製纖維酒精在製程端每公升酒精能源總投入量為 36.34MJ(表 5)，以「前處理」所需能源比重最高約 14.49MJ，佔整體製程能源投入 39.9%，「糖化與發酵」及「蒸餾與脫水」次之，能源投入量分別為 10.06MJ (27.7%)與 9.19MJ (25.3%)，「公用系統」約 2.47MJ (6.8%)，「料源粗切」所需能源投入最低約 0.14MJ (0.4%)。副產品包含木質素汽電

共生所提供之電力與蒸氣，約可提供製程所需能源共 28.86MJ，因此，製程端所需的淨能源投入每公升酒精約 7.48MJ。

表 5、廢木片與稻稈製程端能源投入分析

單位：MJ/Lethanol

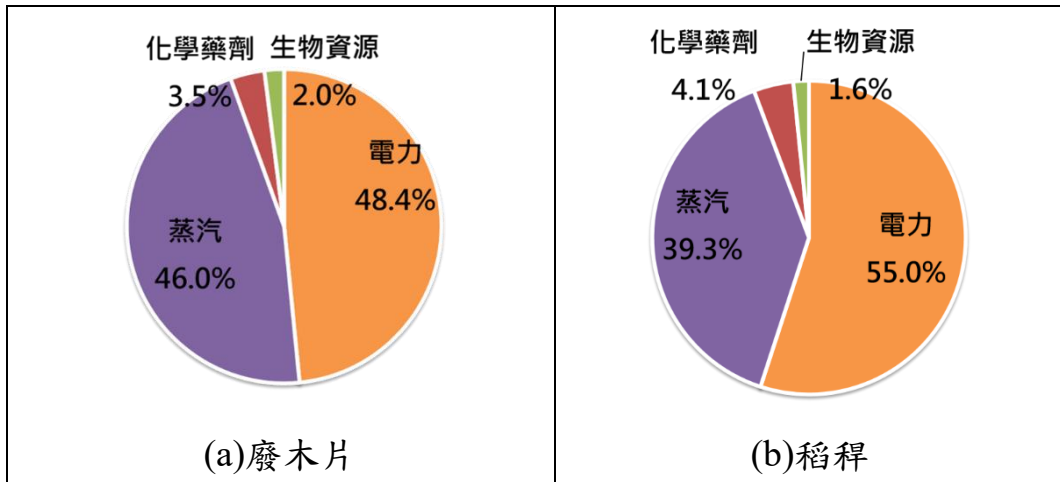
項目		廢木片	稻稈
酒精轉換率(公升/公噸料源)		275	226
製程端	料源粗切(電力)	0.14	0.17
	前處理	14.48	16.13
	電力	2.59	3.17
	蒸汽	10.61	11.41
	硫酸	0.10	0.12
	氫氧化鈉	1.18	1.43
	糖化與發酵	10.06	11.99
	電力	9.33	11.38
	纖維素酶	0.06	0.06
	酵母菌(種菌)	0.67	0.55
	蒸餾與脫水	9.18	11.18
	電力	2.95	3.60
	蒸汽	6.12	7.45
	廢水處理(電力)	0.11	0.13
	公用系統	2.48	2.99
	電力	2.48	2.99
	副產品(氣電共生)	-28.86	-23.47
	電力扣抵	-12.13	-8.61
蒸氣扣抵	-16.73	-14.86	
製程端總能源投入		36.34	37.82
製程端淨能源投入		7.48	14.35

資料來源：核能研究所生產試驗推估，本研究計算整理。

將廢木片與稻稈製程能源投入依生產程序進行比較分析(表 5)，生產每公升酒精二者在製程端之總耗能相當接近，廢木片約 36.34MJ，稻稈則略高約為 37.82MJ；但若將副產

品可提供的能源貢獻納入考量，則廢木片製程端淨能源投入每公升僅約為 7.48MJ，稻稈則約 14.35MJ。分析二者在副產品貢獻的高度差異，主要來自於廢木片酒精轉換率較高，且木質素含量較高，發酵後所殘餘的木質素在作為汽電共生原料後，可提供之生質電能與熱能也較稻稈產製酒精為高。

另一方面，若從各項能源消費的結構進行分析(圖 3)，二者皆以電力與蒸氣的能源投入為主；稻稈製程消耗的電力高達製程總能源消費量的 55%，廢木片製程電力消費則約佔其製程之 48.4%。

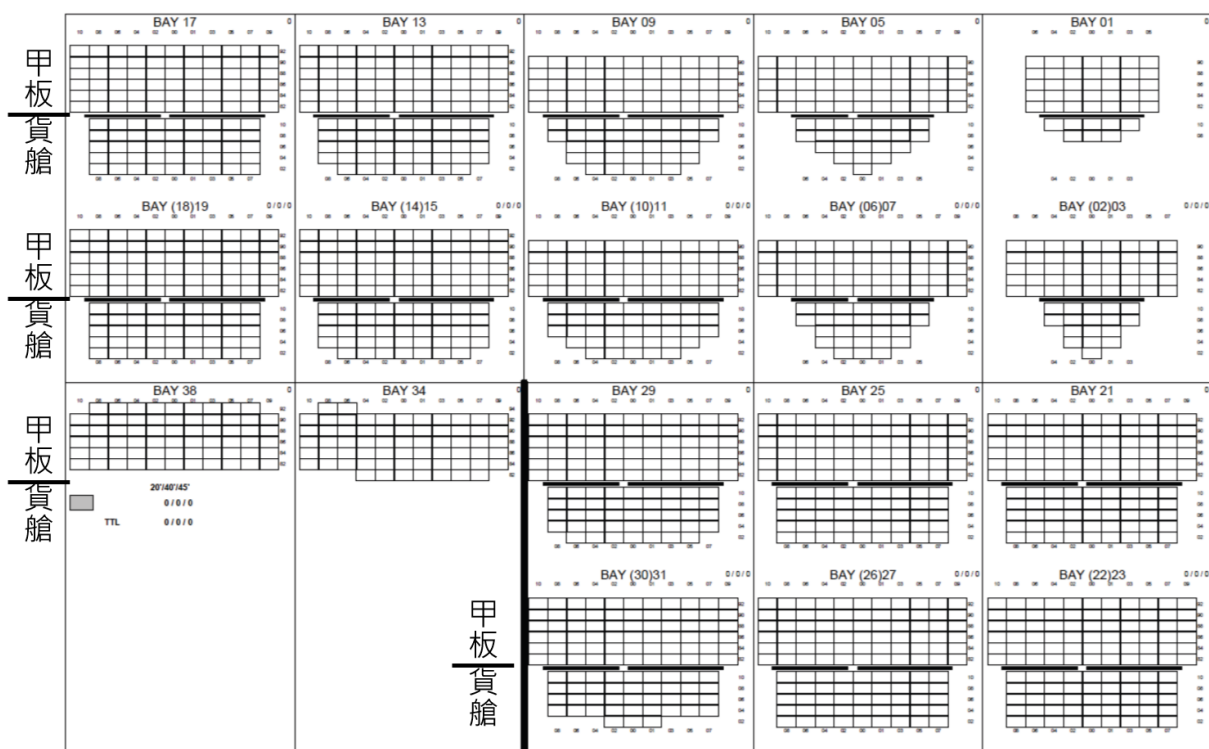


資料來源：本研究計算整理。

圖 3 製程端能源消費結構分析

2 運輸端盤查分析

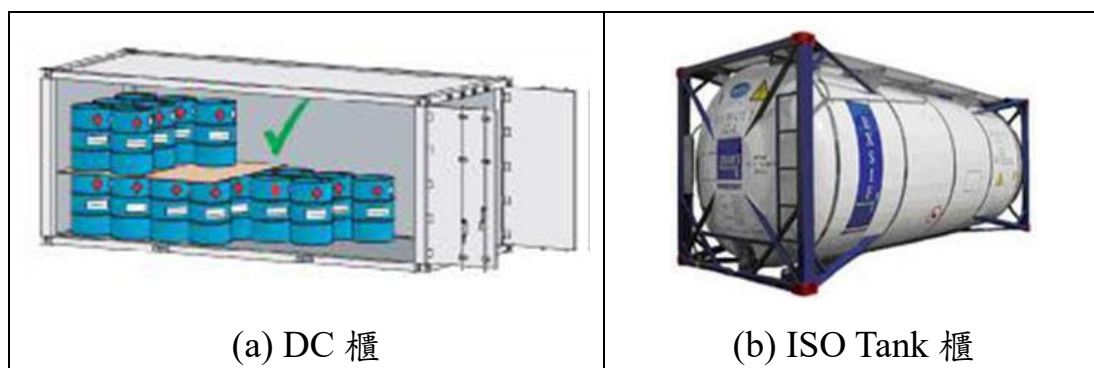
本研究透過訪談陽明海運公司，以該公司 I-type 船舶為例，進行馬來西亞運輸生質酒精至台灣之海運碳排放盤查分析。I-type 船舶甲板最大可裝載的貨櫃數為 1,216 個 20 呎標準貨櫃(Twenty-foot Equivalent Unit; TEU)，貨艙可裝載的貨櫃數為 589 TEU；詳如圖 4。



資料來源：陽明海運提供。

圖 4、陽明 I-type 船舶一般性貨櫃艙位圖

酒精之海運裝載方式一般而言有兩種形式，一種為透過 200 公升裝油桶，以乾櫃(Dry Container; DC)方式載運(如圖 5a)，一般用於單批酒精數量較少時。另一種則採用油罐櫃 (ISO TANK)型式(如圖 5b)裝載酒精，用於單批酒精運送數量較大情況。



資料來源：陽明海運提供。

圖 5 載運酒精之各型式貨櫃

以 DC 櫃為例，每貨櫃可裝載 80 個 200 公升油桶，以酒精密度 g/m^3 推估每貨櫃約可裝載 12.62 公噸酒精；再加上貨櫃本身重量及油桶與棧板重量，裝載酒精後單一貨櫃總重量約 15.94 公噸。至於 ISO Tank 櫃，裝載量約 24.3 公秉(約 18.79 公噸酒精)，再加上貨櫃本身重量，裝載酒精後單一貨櫃總重量約 27.65 公噸(詳如錯誤! 找不到參照來源。)

由於酒精屬於國際海運危險貨物規則(International Maritime Dangerous Goods Code ; IMDG)中的危險品(IMDG code 3.2)，此類貨物僅能裝載在甲板上不可放置於貨艙中。考量甲板的負重，因此甲板上的空間全部裝載酒精貨櫃；推估約可裝載 576 個 DC 櫃(約 9,216 公秉酒精)；若裝載 ISO Tank 櫃，則約可裝載 384 櫃(約 9,145 公秉酒精)。假設貨艙載送物品的重量符合規範，且貨艙裝載處於滿載，並可滿足適航性；在 DC 櫃型式下，則全船包含甲板與貨艙合計最大可滿載之貨櫃量，約可裝載 1,165 貨櫃。

以 I-type 船速油耗進行分析，在船速 16 節條件下，主機每天耗油量約 36.6 公噸，發電機則約 4 公噸，合計每日總油耗量為 40.6 公噸；詳如表 6。

表 6、I-type 船速油耗表

船 速	主機(公噸/天)	發電機(公噸/天)	總油耗量(公噸/天)
船速 16 節	37	4	40.6
船速 17 節	44	4	47.9
船速 18 節	52	4	56.2

註：以船速 10%~15% 誤差率推估。

資料來源：陽明海運提供。

由於新茂公司馬來西亞廠位於 Kuala Terengganu，該港口與台灣各大港口之距離，如表 7 所示；距離最近者為高雄港，約 1,473 海浬。以船速 16 節情境進行計算，I-type 船從馬來西亞 Kuala Terengganu 行駛至高雄港之耗油量約為 155.74 公噸。

表 7、Kuala Terengganu 港至台灣各港口之油耗量

港口	距離 (海浬)	行駛時間 (小時)	行駛日數 (天)	耗油量 (公噸)
高雄港	1,473	92.06	3.84	155.74
台中港	1,558	97.38	4.06	164.73
基隆港	1,667	104.19	4.34	176.25

註：1.以船速 16 節情境進行計算；2.每 1 節等於每小時行走一海浬的速度。

資料來源：陽明海運提供；本研究計算整理。

將全船耗油量以全船可載送最大貨櫃量進行分攤，平均每個貨櫃消耗重油約 0.13 公噸。由於每個貨櫃酒精裝載量為 16,000 公升，分攤後每公升酒精消耗重油約 0.0084 公斤；詳如表 8。

表 8、運送單位酒精耗油量分析

全船耗油量	155.74	公噸重油/船
全船裝載貨櫃量	1,165	櫃/船
每個貨櫃分攤耗油量	0.13	公噸重油/櫃
每個貨櫃酒精裝載量	16,000	公升酒精/櫃
每公升酒精分攤耗油量	0.0084	公斤重油/公升酒精

資料來源：本研究計算整理。

根據「105 年能源統計手冊-能源產品單位熱值表」，燃料油熱值每公升為 9,600 千卡，以每卡 4.187 焦耳換算，每公升燃料油熱值為 40.2MJ。參考中油船舶鍋爐燃料之密度每公

升為 0.9719 公斤¹，換算每公噸燃料油熱值約為 41,357MJ。因此，推估每公升酒精在運輸端，重油之能源投入量為 0.35MJ。

(二)、能源平衡率分析

分析廢木片生命週期能源投入，由於使用的料源為廠內的木材加工剩餘之廢木片，因此料源端並無能源投入；製程端能源總投入量每公升酒精約 28.86MJ，在扣除副產品可提供之生質電力及熱能約 7.48MJ 後，製程端能源淨投入量約 7.48MJ；至於從馬來西亞運送酒精至高雄港之海運運輸則約 0.35MJ。因此，馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣高雄港之生命週期能源投入量，約為每公升酒精為 7.82MJ；詳如表 9 所示。

濃度 99.5%無水酒精熱值為 22.3MJ，故推估馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣高雄港之生命週期能源平衡率約為 2.85，顯示利用馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣，在技術面已具備能源利用效益。

稻稈酒精在料源端之能源投入則僅有國內稻稈收集與運輸之能資源投入，每公升約為 1.82MJ。此外，稻稈酒精在製程端淨能資源投入約為 14.35MJ，將近是廢木片酒精製程的兩倍，因此，利用台灣稻稈產製酒精之生命週期能源平衡率約為 1.38，雖然亦具備技術可行性，但與馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣相較，明顯能源利用效率較低(詳如表 9)。

¹ 中油石油產品規範(201706)，
<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5O8Uhl3VseIJ:https://new.cpc.com.tw/division/mb/product-text.aspx%3Fid%3D4+&cd=1&hl=zh-TW&ct=clnk&gl=tw>。

表 9、能源平衡率分析(單位：MJ/L_{ethanol})

項目		廢木片	稻稈
酒精轉換率(公升/公噸料源)		275	226
料源	料源端	0.00	1.82
	集運與處理	-	1.82
製程端	料源粗切(電力)	0.14	0.17
	前處理	14.48	16.13
	電力	2.59	3.17
	蒸汽	10.61	11.41
	硫酸	0.10	0.12
	氫氧化鈉	1.18	1.43
	糖化與發酵	10.06	11.99
	電力	9.33	11.38
	纖維素酶	0.06	0.06
	酵母菌(種菌)	0.67	0.55
	蒸餾與脫水	9.18	11.18
	蒸餾與冷卻(電力)	2.95	3.60
	脫水(蒸汽)	6.12	7.45
	廢水處理(電力)	0.11	0.13
	公用系統	2.48	2.99
	電力	2.48	2.99
	副產品(氣電共生)	-28.86	-23.47
	電力扣抵	-12.13	-8.61
	蒸氣扣抵	-16.73	-14.86
	製程總能源投入	36.34	37.82
製程淨能源投入	7.48	14.35	
運輸	海運	0.35	0.00
	重油	0.35	-
總能源投入		36.69	39.64
淨能源投入		7.82	16.17
酒精能源產出		22.30	22.30
製程端能源平衡率		2.85	1.38

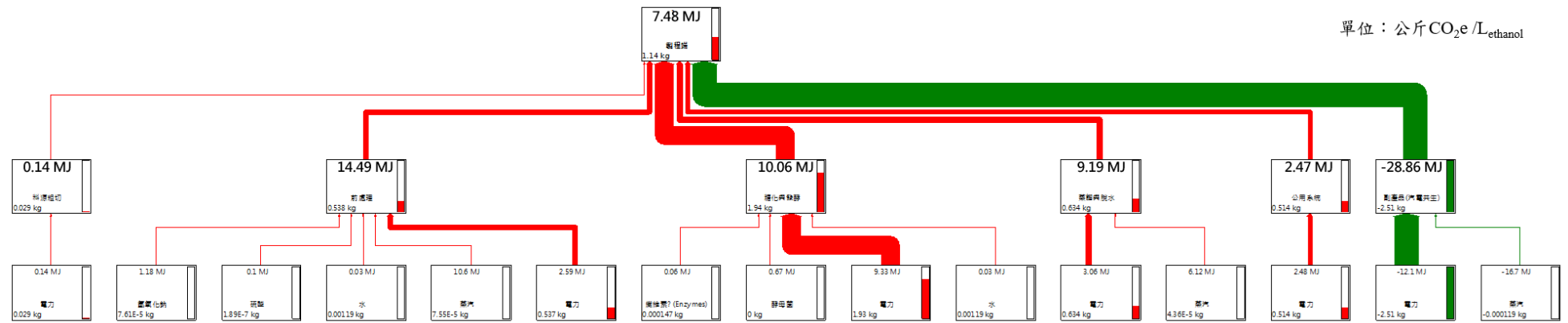
資料來源：本研究計算整理。

(三)、碳足跡分析

本研究將利用 Simapro 軟體進行馬來西亞產製廢木片酒精運回台灣使用之生命週期碳足跡計算，並將其結果與台灣產製稻稈酒精結果進行比較分析。

1 製程端碳足跡分析

廢木片產製纖維酒精在製程端每公升酒精總碳排放量為 3.65 公斤 CO₂e(表 10)，以「糖化與發酵」所排放之二氧化碳量最高約 1.93 公斤 CO₂e，佔整體製程碳排放量 53%，其次為「蒸餾與脫水」約 0.64 公斤 CO₂e (約佔 17.4%)，「前處理」與「公用系統」製程之碳排放量相當接近，分別為 0.54 與 0.51 公斤 CO₂e，「料源粗切」碳排放量最低約僅 0.03 公斤 CO₂e。副產品包含木質素汽電共生所提供之電力與蒸氣，所提供的生質電力與熱能具備因碳中和效益，可折抵製程中電力及熱能之碳排放量約 2.52 公斤 CO₂e；因此，製程端的淨碳排放量每公升酒精約 1.14 公斤 CO₂e，詳如圖 6。



資料來源：本研究計算整理。

圖 6、馬來西亞廢木片產製酒精製程端碳排放分析

將廢木片與稻稈製程能源投入依生產程序進行比較分析(表 10)，製程端總碳排放量以廢木片製程較高，生產每公升酒精約 3.65 公斤 CO₂e，稻稈酒精則僅 3.7 公斤 CO₂e；但若將副產品可提供的碳排放扣抵納入考量，則廢木片製程端淨碳排放量每公升僅約 1.14 公斤 CO₂e，稻稈則 1.80 公斤 CO₂e。分析主要差異，仍來自於木質素含量較高，發酵後所殘餘的木質素在作為汽電共生原料後，可提供之生質電能與熱能也較稻稈產製酒精為高，故可折抵之碳排放量較為顯著。

另一方面，若從各項能源消費的碳排放結構進行分析(表 11)，二者皆以電力消費所產生之碳排放量為主；稻稈製程因電力所產生之碳排放量占總製程 99.6%，廢木片製程電力消費消費之碳排放量更高達 99.9%(如圖 7)。

表 10、廢木片與稻稈酒精製程端二氧化碳排放分析

單位：公斤 CO₂e /L_{ethanol}

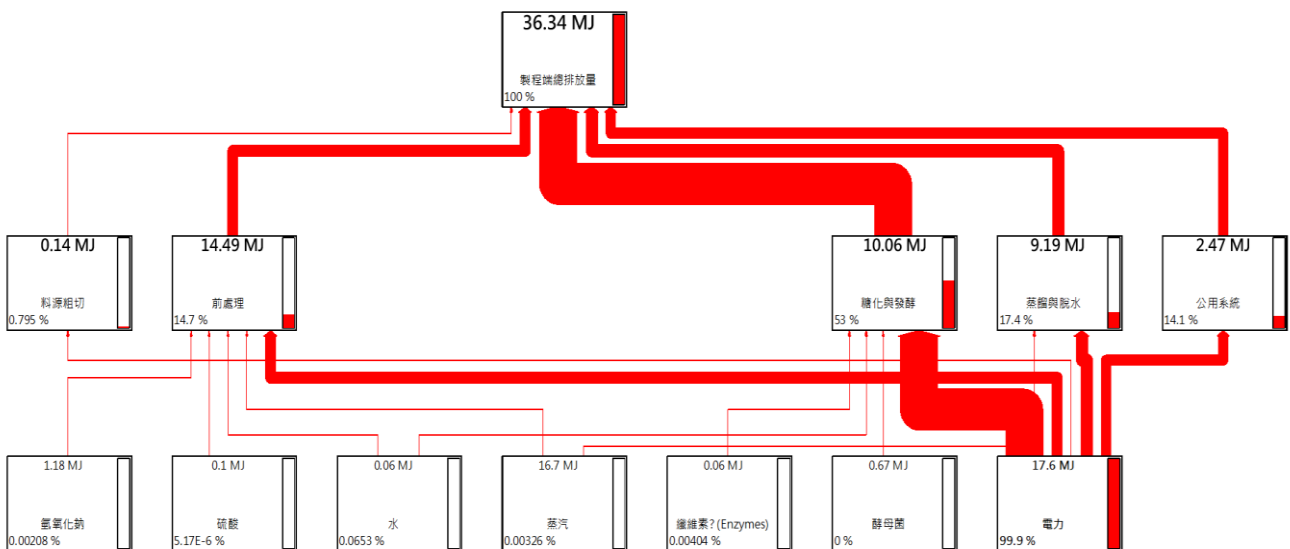
項目		廢木片	稻稈
酒精轉換率(公升/公噸料源)		275	226
製程端	料源粗切(電力)	0.03	0.03
	前處理	0.54	0.48
	電力	0.53863	0.46552
	蒸汽	0.00008	0.00006
	硫酸	0.00183	0.00222
	氫氧化鈉	0.00008	0.00009
	水	0.00129	0.00797
	糖化與發酵	1.93	1.67
	電力	1.93355	1.67164
	纖維素酶	0.00015	0.00015
	水	0.00126	0.00154
	蒸餾與脫水	0.64	0.45
	蒸餾與冷卻(電力)	0.61374	0.43489
	脫水(蒸汽)	0.00004	0.00004
	廢水處理(電力)	0.02281	0.01910
	公用系統	0.51	0.44
	電力	0.51146	0.43907
	副產品(氣電共生)	-2.52	-1.26
電力扣抵	-2.5159	-1.2643	
蒸氣扣抵	-0.0001	-0.0001	
製程總碳排放		3.65	3.07
製程淨碳排放		1.14	1.80

資料來源：本研究計算整理。

表 11、製程端二氧化碳排放結構分析

項目	廢木材		稻稈	
	排放量 (公斤 CO ₂ e /Lethanol)	比重 (%)	排放量 (公斤 CO ₂ e /Lethanol)	比重 (%)
電力	3.65	99.9%	3.06	99.6%
蒸汽	1.19E-04	0.0%	1.06E-04	0.0%
化學藥劑	1.90E-03	0.1%	2.32E-03	0.1%
水資源	2.56E-03	0.1%	9.51E-03	0.3%
生物資源	1.51E-04	0.0%	1.48E-04	0.0%
製程總碳排放量	3.65	100.0%	3.07	100.0%

資料來源：本研究計算整理。



資料來源：本研究計算整理。

圖 7、馬來西亞廢木片產製酒精製程端碳排放結構圖

2 運輸端碳足跡分析

以船速 16 節情境進行模擬分析，I-type 船從馬來西亞 Kuala Terengganu 行駛至高雄港之耗油量約為 155.74 公噸重油，參考歐盟公斤重油碳排放量約為 3.114 公斤 CO₂e，則全船之碳排放量約為 484.97 公噸。由於全船約可裝載 1,165 個 DC 櫃，因此平均每個 DC 櫃分攤之碳排放量約為 0.42 公噸 CO₂e，分攤後每公升酒精碳排放量則約 0.026 公斤 CO₂e；至於 ISO Tank 櫃，分攤後每公升酒精碳排放量則約 0.021 公斤 CO₂e；詳如表 12。

表 12、Kuala Terengganu 港至台灣各港口之碳排放量

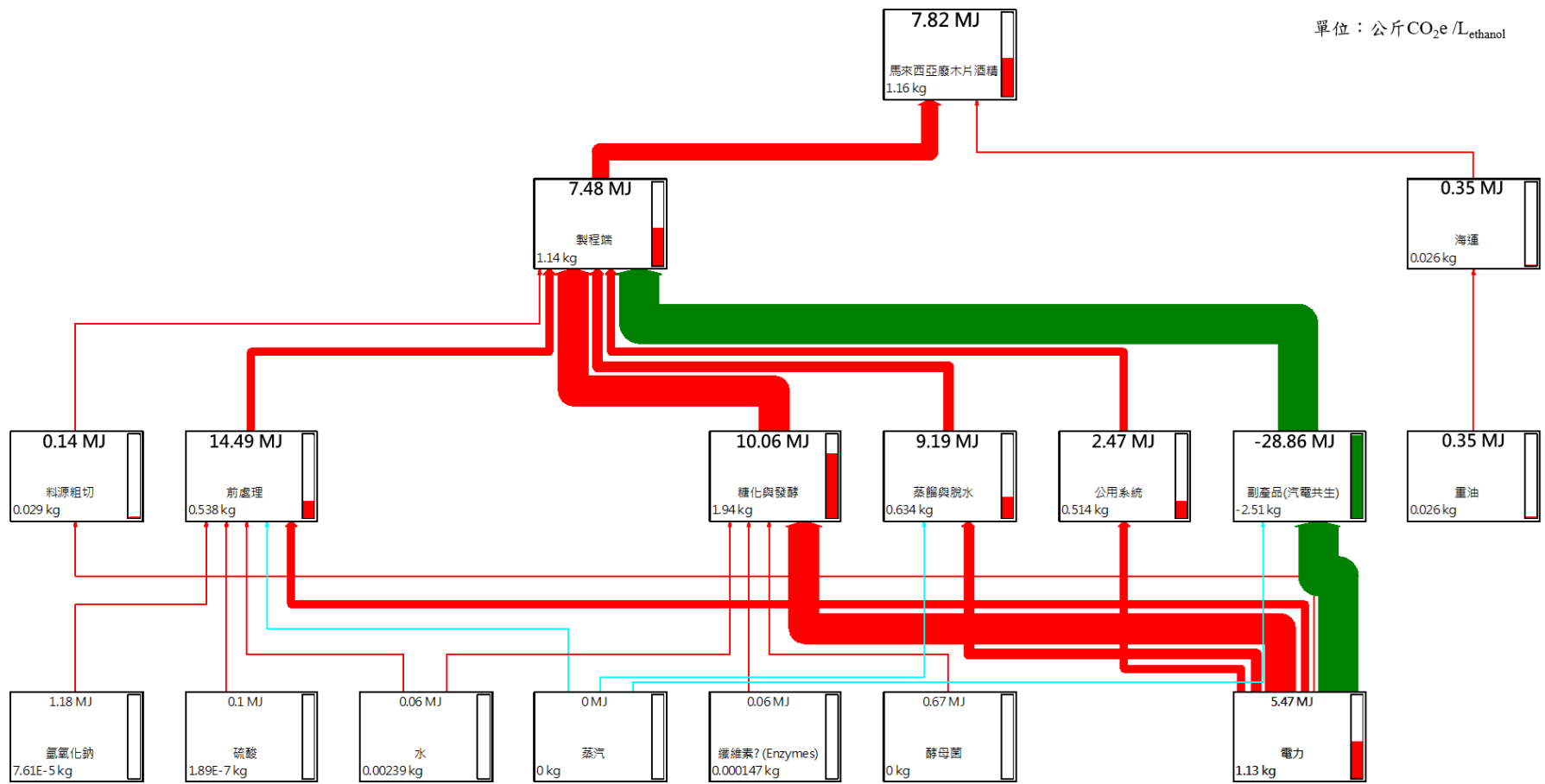
港口	距離 (海哩)	耗油量 (公噸)	碳排放量 (公噸)	DC 櫃		ISO Tank 櫃	
				每貨櫃 排放量 (公噸 CO ₂ e)	酒精碳足跡 (kgCO ₂ e/L)	每貨櫃 排放量 (公噸 CO ₂)	酒精碳足跡 (kgCO ₂ e/L)
高雄港	1,473	155.74	484.97	0.42	0.026	0.50	0.021
台中港	1,558	164.73	512.96	0.44	0.028	0.53	0.022
基隆港	1,667	176.25	548.84	0.47	0.029	0.56	0.024

註：1.以船速 16 節情境進行模擬分析;2.重油碳排放係數以歐盟重油碳排放量 3.114 公斤 CO₂/公斤重油計算。

資料來源：本研究計算整理。

3 生命週期碳足跡分析

從整體生命週期碳足跡組成結構來看(圖 8)，主要碳排放量仍來自於製程端；而製程端電力之碳排放量為關鍵因素。因此，製程中所使用的電力，若能以生質電力予以取代，則將可有效降低碳足跡。



資料來源：本研究整理。

圖 8、馬來西亞廢木片酒精運送回台灣 LCA 碳足跡(能源別)

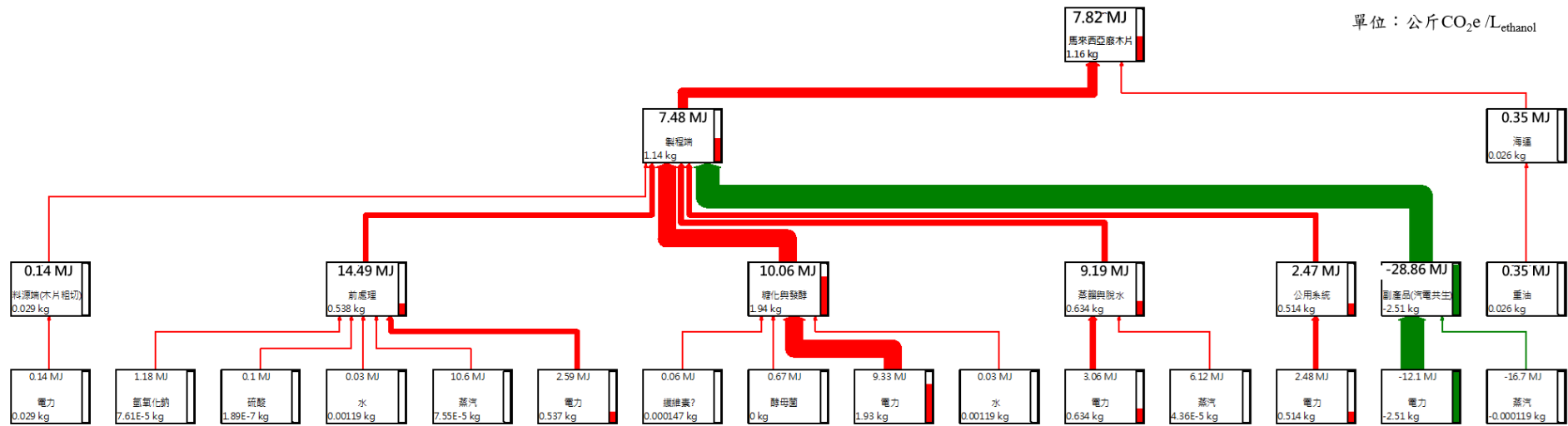
馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣之生命週期碳足跡，包含製程端淨排放量約為每公升酒精 1.14 公斤 CO₂e 與海運運輸端約 0.02 公斤 CO₂e，合計總淨碳排放量約 1.16 公斤 CO₂e(如圖 9)。至於利用台灣稻稈產製酒精之生命週期碳足跡，包含料源端之集運排放量約 0.25 公斤 CO₂e，製程端淨排放量約 1.18 公斤 CO₂e，合計總淨碳排放量約 2.06 公斤 CO₂e。將廢木片與稻稈產製酒精之碳排放量進行比較，以馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣之碳足跡明顯較低(詳如表 13)。

表 13、廢木片與稻稈生命週期碳排放量分析

單位：公斤 CO₂e /Lethanol

項目		廢木片	稻稈
酒精轉換率(公升/公噸料源)		275	226
料源	料源端	-	0.25
	集運與處理	-	0.25200
製程端	料源粗切(電力)	0.03	0.03
	前處理	0.54	0.48
	電力	0.53863	0.46552
	蒸汽	0.00008	0.00006
	硫酸	0.00183	0.00222
	氫氧化鈉	0.00008	0.00009
	水	0.00129	0.00797
	糖化與發酵	1.93	1.67
	電力	1.93355	1.67164
	纖維素酶	0.00015	0.00015
	水	0.00126	0.00154
	蒸餾與脫水	0.64	0.45
	蒸餾與冷卻(電力)	0.61374	0.43489
	脫水(蒸汽)	0.00004	0.00004
	廢水處理(電力)	0.02281	0.01910
	公用系統	0.51	0.44
	電力	0.51146	0.43907
	副產品(氣電共生)	-2.52	-1.26
	電力扣抵	-2.5159	-1.2643
	蒸氣扣抵	-0.0001	-0.0001
製程總碳排放	3.65	3.07	
製程淨碳排放	1.14	1.80	
運輸	海運	0.03	0.00
	重油	0.0260	-
總碳排放		3.68	3.32
淨碳排放		1.16	2.06

資料來源：本研究計算整理。



資料來源：本研究整理。

圖 9、馬來西亞廢木片酒精運送回台灣 LCA 碳足跡(生產程序別)

(四)、小結

馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣高雄港之生命週期能源平衡率約為 2.85，顯示利用馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣，在技術面已具備能源利用效益。將廢木片與稻稈產製酒精之能源平衡率進行比較，生產每公升酒精二者在製程端之總耗能相當接近；但若將副產品可提供的能源貢獻納入考量，發現稻稈酒精在製程端淨能資源投入約為 14.35MJ，將近是廢木片酒精製程的兩倍，明顯能源利用效率較低。分析二者在副產品貢獻的高度差異，主要來自於廢木片酒精轉換率較高，且木質素含量較高，發酵後所殘餘的木質素在作為汽電共生原料後，可提供之生質電能與熱能也較稻稈產製酒精為高。

廢木片產製纖維酒精在製程端每公升酒精能源總投入量為以「前處理」所需能源比重最高約 14.49MJ，佔整體製程能源投入 39.9%。若從製程中各項能源消費的結構進行分析，皆以電力與蒸氣的能源投入為主，廢木片製程電力消費則約佔其製程之 48.4%。

從整體生命週期碳足跡組成結構來看，馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣之生命週期碳足跡約 1.16 公斤 CO₂e，主要碳排放量仍來自於製程端，佔總生命週期排放量 97.8%；而製程端電力之碳排放量佔製程總排放量 99.9%，為關鍵因素。因此，製程中所使用的電力，若能以生質電力予以取代，則將可有效降低碳足跡。將廢木片與稻稈產製酒精之碳足跡進行比較，以馬來西亞廢木片產製酒精運送回台灣之碳足跡明顯較低。

二、纖維酒精水足跡分析

(一)、國內不同非糧原料栽植水足跡評估

將綠色、藍色與灰色水足跡加總，各項非糧作物中生產每公噸作物所耗用的總水足跡以甘藷最低、甘蔗次之，顯示台灣種植甘藷與甘蔗對水資源的消耗相對較低，而水稻則為各項作物中最高者(圖 10)。每公噸甘藷總水足跡約 96~118 m³ 最低，台糖甘蔗與蔗農甘蔗次之，玉米總水足跡高達 669~704 m³，主要因灰色水足跡偏高使得總水足跡表現明顯增高。

水稻總水足跡約 1,521~3,288 m³/ton 明顯高於能源作物種植所需耗用的水量。水稻因種植過程所消耗的綠色與藍色水足跡皆高，而使整體水足跡表現大幅高於能源作物，且種植每公噸水稻之總水足跡約為甘藷 13 倍、甘蔗 8.8~10.4 倍。

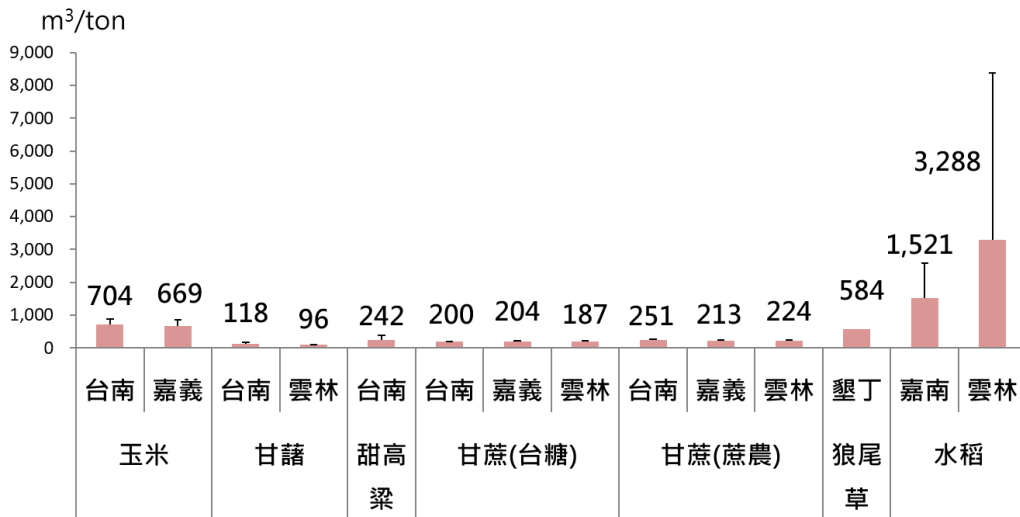


圖 10 台灣潛力能源作物總水足跡分析

(二)、國內不同非糧原料生產酒精之水足跡評估及比較

各種不同非糧原料生產酒精之綠色水足跡以甘藷酒精為最低，玉米酒精次之；玉米酒精因酒精轉換率每公噸作物可產製 370 公升酒精高於其他作物，因此，從生產每公升酒精所耗用的綠色水足跡分析，其耗水量明顯較低。藍色水足跡仍以甘藷酒精為最低，台糖甘蔗酒精次之；稻稈酒精為所有料源中最高。灰色水足跡以台糖甘蔗酒精灰色水足跡最低，玉米酒精灰色水足跡最高。

從生產每公升酒精所耗用的水量分析，甘藷酒精為所有能源作物中總水足跡最低者每公升酒精約 572~687 L_{water} ，玉米酒精因轉換率較甘蔗酒精高出許多，使得其總水足跡明顯低於甘蔗酒精、狼尾草酒精水足跡；甜高粱酒精也因酒精轉換率較低，使得其水足跡表現偏高。至於稻稈酒精因對於綠色與藍色水足跡偏高，使得其總水足跡高達 6,730~14,548 L_{water} ，詳如圖 11。

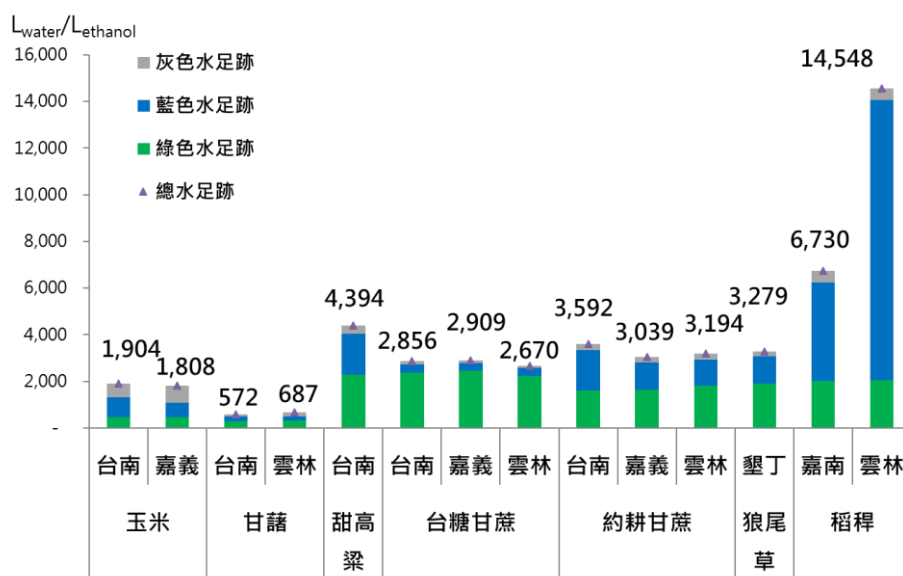


圖 11 台灣潛力能源作物產製酒精總水足跡分析

(三)、小結

各項非糧作物中生產每公噸作物所耗用的總水足跡以甘藷最低、甘蔗次之，顯示台灣種植甘藷與甘蔗對水資源的消耗相對較低，而水稻(稻稈)則為各項作物中最高者。稻稈因種植過程所消耗的綠色與藍色水足跡皆高，而使整體水足跡表現大幅高於能源作物，且每公噸水稻所耗費之總水足跡約為甘藷 13 倍、甘蔗 8.8~10.4 倍。。

從生產每公升酒精所耗用的水量分析，甘藷酒精為所有能源作物中總水足跡最低者，玉米酒精因轉換率較甘蔗酒精高出許多，使得其總水足跡明顯低於甘蔗酒精與狼尾草酒精；甜高粱酒精也因酒精轉換率較低，使得其水足跡表現偏高。至於稻稈酒精因其綠色與藍色水足跡偏高，使得其總水足跡為各項非糧料源中最高；且為甘藷酒精 16.9 倍、甘蔗酒精 3.2~3.8 倍。

伍、参考文献

1. Aldaya, M.M. and A.Y. Hoekstra. 2010. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agric. Syst.* 103: 351-360.
2. Babel, M.S., B. Shrestha, and S.R. Perret. 2011. Hydrological impact of biofuel production: A case study of the Khlong Phlo Watershed in Thailand. *Agricultural Water Management* 101: 8-26.
3. Erwin T.H. Vink, David A. Glassner, Jeffrey J. Kolstad, Robert J. Wooley, Ryan P. O'Connor. 2007. The eco-profiles for current and near-future NatureWorks® polylactide (PLA) production. *Industrial Biotechnology*. Vol. 3, No.1.
4. Galli, A., T. Wiedmann, E. Ercin, D. Knoblauch, B. Ewing, and S. Giljum. 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*. 16: 100-112.
5. Gerbens-Leenes, P.W., A.Y. Hoekstra, and T.H. van der Meer. 2008. The water footprint of bioenergy: Global water use for bio-ethanol, bio-diesel, heat and electricity. *Value of Water Research Report Series 34*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
6. Hernandez, T.A.D., V.B. Bufon, and J.E.A. Seabra. 2014. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. *Biofuels. Bioproducts and Biorefining* 8(2): 241-252.
7. Hoekstra, A.Y. and A.K. Chapagain. 2008. *Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing, Oxford. UK.
8. Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, and M.M. Mekonnen. 2009. *Water Footprint Manual: State of the Art 2009*. Water Footprint

Network. Enschede. the Netherlands.

9. Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, and M.M. Mekonnen. 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London, UK.
10. Humbird, D., R. Davis, L. Tao, C. Kinchin, D. Hsu, A. Aden, P. Schoen, J. Lukas, B. Olthof, M. Worley, D. Sexton, and D. Dudgeon. 2011. Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Technical Report TP-5100-47764.
11. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories reference manual 3. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. Switzerland.
12. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. IPCC fourth assessment report: climate change 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. Switzerland.
13. ISO (International Organization for Standardization). 2006. ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO. Switzerland.
14. Kongboon, R. and S. Sampattagul. 2012. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 40: 451-460.
15. Larson, E.D. 2008. Biofuel production technologies: status, prospect and implications for trade and development. UNCTAD. UN.
16. Su, M.H. and C. T. Tso. 2011. Life cycle assessment of environmental

- and economic benefits of bio-ethanol in Taiwan. *International Journal of Global Warming*. 3(4): 339-354.
17. Su, M.H., C.H. Huang, W. Y. Li, C. T. Tso, H. H. Lur. 2015(a). Water Footprint Analysis of Bioethanol Energy Crops in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 88. pp. 132-138.
 18. Su, M.H., C.H. Huang, W. Y. Lin, C. T. Tso, H. H. Lur. 2015(b). Multi-years analysis on the energy balance, green gas emissions, and production costs of the first and second generation bioethanol. *International Journal of Green Energy*. Vol. 12. NO. 2. pp148-159.
 19. Shapouri, H., J. Duffield, A. McAloon, and M. Wang. 2004. The 2001 net Energy balance of corn-ethanol. *Proceedings of the Conference on Agriculture as a Producer and Consumer of Energy*. June 24-25. VA. USA.
 20. Su, C.L. and Y.M. Lee. 2009. Development status and life cycle inventory analysis of biofuels in Taiwan. *Energy Policy*. 37(2): 754-758.
 21. Tilman, D., J. Hill, and C. Lehman. 2006. Carbon-negative biofuels from low-input highdiversity grassland biomass. *Science*. 314: 1598-1600.
 22. Tsai, W.T., H.F. Lan, and D.T. Lin. 2008. An analysis of bioethanol utilized as renewable energy in the transportation sector in Taiwan. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 12(5): 1364-1382.
 23. USDOE (U.S. Department of Energy). 2011. Biomass Multi-year program plan.
 24. 施嘉昌、曹以松、徐玉標、甘俊二。1982。「灌溉排水原理第三版」。中央圖書出版社。

25. 施嘉昌、張本初。1993。「滴水灌溉方法探討高粱需水量之研究」。農業工程學報。39：13-25。
26. 施嘉昌、黃成達。1994。「玉米蒸發散係數之研究」。農業工程學報。40：1-15。
27. 楊純明。2010。「因應氣候變遷水資源短缺情境下之水稻田灌溉策略—論通氣式及乾濕交替式水稻栽培策略」。作物、環境與生物資訊，7（3）：212-220。