

環境規劃管理類

染整廠能源供應模式更替環境評估之個案研究

施孟芬*、林俊德**

摘 要

紡織業在台灣屬於工業部門八大能源密集產業之一，其能耗率占總能耗的 3.9%。紡織業從原料到成品之製程繁複，染整為其中提高紡織產品價值鏈重要之中游製程，同時也是高度耗用能源與水資源之一段。染整廠主要能源除了電力外、主要為提供定型機蒸汽之鍋爐，其使用之燃料有煤、重油及天然氣。燃料之種類與用量直接影響溫室氣體與各種空氣污染物之排放量，基於能源轉型及固定空氣污染排放源管制加嚴之趨勢，目前傳統的化石燃料逐漸被淘汰為更環保經濟之替代能源。而水資源之耗用在近年缺水越來越嚴峻，亦為染整業面臨之緊急挑戰。本研究以尚○染整大園廠為分析個案，運用生命週期評估軟體 SimaPro(v.8.4) 及 Ecoinvent 數據庫 (v.3)，利用 IPCC 2013 GWP 100a、WDI(Berger et al., 2014)、CML-IA baseline 2000，以上 3 種衝擊評估方法，量化並分析該廠自 2017 年起逐漸淘汰化石燃料(煤及重油)為主能源供應型態之環境效益。該廠在 2020 年已全面使用大園工業區汽電共生廠配送之低壓與中壓蒸汽於所有染整製程(退漿、染色)上，成為紡織業能源轉型及綠色生產成功之案例。該廠之能源轉型，依 4 個年度之生產量與盤查資料，計算其相應之碳排放、水足跡以及對環境衝擊與資源耗損進行評估。結果顯示更替後的能供模式(2020 年)可讓全廠 1 年減少 19.2% 的碳排放及 33.2~100% 的硫氧化物與 27.7~100% 的氮氧化物，同時耗水

量降低 20.9%，紡織污泥排放量也降低 67.4%。該廠之能源轉型亦減少該廠之淡水中生物毒性 13.2%、海洋生態毒性 19.0%、陸地生物毒性 17.0%、優養化 12.2%、臭氧層破壞 6.8%、人類毒性 14.4%、光化學煙霧 26.8%、酸沉降 33.9%、資源耗損 14.4% 及全球暖化 19.2%，10 項特徵化環境衝擊。本研究將個案能源轉型之多重環境效益，具體量化各項友善環境指標，可提供使用鍋爐相關產業作為評估及規劃節能、減碳與企業永續發展之參考。

【關鍵字】染整廠、生命週期評估、碳排放、水足跡、鍋爐燃料、能源轉型

* 逢甲大學環境工程與科學學系永續奈米科技研究室 博士後研究員
** 逢甲大學環境工程與科學學系 教授

縮寫詞 (Abbreviation) 總覽

項目	縮寫詞	原文	中文 / 含義
評估工具	LCA	Life Cycle Assessment	生命週期評估
	SimaPro	由荷蘭 Leiden 大學開發的生命週期評估工具，於國際上普遍使用	
	Ecoinvent	由瑞士專研生命週期盤查之組織所建立的資料庫	
評估方法	IPCC 2013 GWP 100a	Intergovernmental Panel on Climate Change	以聯合國政府間氣候變遷委員會所提出之溫室氣體排放指南為標準的衝擊評估方法
	WDI	water depletion index	以 Berger 等人提出的耗水量指數評估方法
	CML-IA	以荷蘭 Leiden 大學所開發、包含生命週期影響評估之特徵因素資料庫的評估方法	
影響評估指標	FAETP	freshwater aquatic ecotoxicity	水中生物毒性
	MAETP	marine aquatic ecotoxicity	海洋生態毒性
	TETP	terrestrial ecotoxicity	陸地生物毒性
	HTP	human toxicity	人類毒性
	EP	eutrophication	優養化
	ODP	ozone depletion	臭氧層破壞
	POCP	photochemical oxidant creation	光化學煙霧
	AP	acidification	酸沉降
	ADP	abiotic depletion	資源耗損
	GWP	global warming	全球暖化

一、前言

自 50 年代開始，紡織工業已成為台灣僅次於食品工業的第二大工業；80 年代上半期更是到達了高峰。隨著時代變遷，產業轉型，紡織工業在台灣逐漸朝向以資本、技術密集與特殊功能導向的化學纖維為主的貿易與生產型態。在持續為台灣取得可觀的經濟效益同時，也消耗了大量的能源並帶來生態環境上的影響。其中紡織產業鏈中游階段之染整過程，在處理程序中消耗大量的能源，所帶來的環境衝擊與成本需要多面向謹慎評估。一般染整廠使用工業鍋爐燃燒大量燃料來產生蒸汽以提供製程所需，除了需要大量的水量和高耗電量，染料及助劑之使用亦帶來後續處理的問題 (Yin et al., 2015)。因此在進行評估時，需要考量相關之環境衝擊，例如對於水生與陸地生態毒性的影響、或是對人類的毒性傷害等。

高密集的能源使用量是紡織業品製造過程中碳排放主要貢獻。在製程中，如何減少能源使用以及降低溫室氣體排放，已成為全球製造業在環境、社會和企業治理 (Environmental、Social、Governance，ESG) 的必要訴求與主要行動方案。Huang 等人 (2016) 指出全球經濟衰退加劇了在節能、綠色能源，以及零污染技術的需求，透過例如廢棄物或廢熱、廢能回收與再利用技術，將成為減少溫室氣體排放、降低資源浪費的有效解決方案 (Zhang et al., 2013)。此外，全球工業水污染的 20% 以上來自於紡織業，其製程所使用的化學藥劑超過 8,000 種，使得紡織廢水成為造成環境退化與人類疾病的原因之一，特別是其中可能包含的已知致癌物質。水資源使用的水足跡評估包含 2 大類，分別為水資源可用量 (water availability) 和水質惡化 (water degradation)，其有助於了解人類活動或生產過程中消耗的水資源對環境的潛在影響 (ISO, 2014)。該評估結果可協助企業與決策者了解產業製程可能帶來的水源風險，提高水資源效率並了解其對環境的影響。

本研究分析個案為尚○染整加工大園廠，該公司自 2011 年接受經濟部中小企業節能減碳輔導計畫輔導以來，透過內部能源結構調整與監測，逐步建構企業節能減碳執行藍圖。在應對全球氣候變遷議題之下，跨國貿易企業相繼對高耗能、高排碳產業所帶來的迫切減碳需求，亦加速該企業能源轉型速度，於 2019 年完全淘汰使用廠內

所有工業鍋爐，成為全台第一個全面改用蒸汽動力能源的紡織染整廠。本個案研究旨在評估染整廠於更換蒸汽供應來源之期程前後，於碳足跡、水足跡，與環境影響評估各方面的變化與表現。所得結果可供產業背景相近者參考。

二、研究背景與評估執行方法與工具

2.1 評估盤查範疇與邊界說明

本研究分析個案位於台灣北部，負責業務為紡織中游的染整階段，包括前處理、染色、定型、整理等多個單元。2017 年至 2020 年期間，透過廠內能源轉型規劃，將原本使用化石燃料的工業鍋爐逐年更替為蒸汽動力能源。紡織廠 2017 至 2020 年平均年產量為 4,368 公噸功能性布匹，主要原物料為尼龍和聚酯纖維 2 種胚布。表 1 所示為 4 年間主要的投入與產出盤查清單，製程中所使用的化學品，例如退漿使用的助劑、精練劑，染整需要的染劑與助劑等，也包含在評估盤查清單中。紡織廠從 2017 年到 2018 年逐步淘汰了工業鍋爐使用的常規化石燃料，如煤與重油。同時，從 2018 年至 2020 年，使用蒸汽以低壓與中壓的形式分別於製程各階段，逐漸取代原本使用的化石燃料和鍋爐。此外，4 年間淡水和電力的平均消耗量分別為 574,015 立方公尺和 8,203 千度。除產品外，產出包括硫氧化物 (SOx) 和氮氧化物 (NOx) 排放 (僅 2017 和 2018 年)、廢水排放 (平均 533,706 立方公尺)、紡織污泥 (平均 37 公噸)、紡織廢料和一般廢棄物 (平均 19 和 24 公噸)，亦列在表 1 的盤查清單中。

評估的邊界屬於“搖籃到大門” (cradle-to-gate)，包括原物料輸入、染整廠完整製程至完成品產出。此外，廢水排出的廠內前處理也做了計算，但不包括最終的廢棄物處理，也不包含成品完成後的運輸。本研究的評估範疇與系統邊界於圖 1 中表示。評估功能單位以該染整廠每年的年產量為基礎，功能單位 (functional unit) 為“每生產 1 公斤完成品”為比較單元。

表 1 染整廠 2017~2020 年投入與產出之物資與能源盤查清單

	內容	年度	2017	2018	2019	2020
		單位				
投入	胚布 (尼龍)	公噸	3,008.9	2,781.1	2,928.3	2,576.5
	胚布 (聚酯纖維)	公噸	2,269.9	2,275.5	2,300.8	1,790.4
	液鹼	公噸	646.5	571.9	570.2	451.6
	精練劑	公噸	252.6	216.4	223.1	165.0
	染色助劑	公噸	413.3	328.9	362.3	234.3
	酸性染劑	公噸	61.4	55.3	64.3	53.4
	分散性染劑	公噸	46.3	45.1	50.7	36.8
	定型用助劑	公噸	97.8	78.2	100.8	91.3
	三米煤 *	公噸	3,948	2,276	-	-
	低硫重油	公秉	170	35	-	-
	低壓蒸汽	公噸	45,919	43,727	54,467	32,700
	中壓蒸汽	公噸	-	8,978	22,202	20,577
	用水量	立方公尺	628,787	617,439	552,139	497,694
	用電量	度	7,904,328	8,726,560	9,402,868	6,779,131
產出	完成產品	公噸	4,586.5	4,485.4	4,657.5	3,742.1
	硫氧化物 (SO _x) 排放	公斤	8,352.2	5,583.3	-	-
	氮氧化物 (NO _x) 排放	公斤	9,483.2	6,854.1	-	-
	廢水排放量	立方公尺	582,210	566,550	507,539	478,523
	紡織污泥 (R0906)	公噸	76.4	22.8	24.9	24.4
	紡織廢料 (D0899)	公噸	25.9	14.7	16.8	17.6
	一般廢棄物 (D1801)	公噸	23.8	25.4	27.5	17.8

註：為廠商提供之燃煤名稱，屬高等發熱量 (5,500~5,800kcal/kg) 之燃煤。

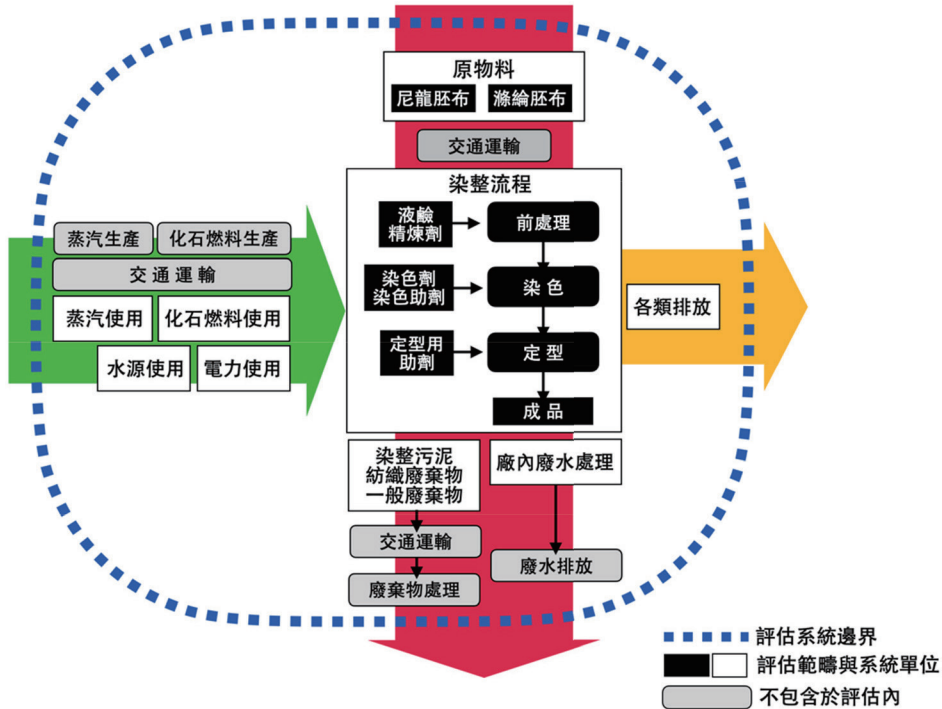


圖 1 本研究生命週期評估之系統邊界與範疇說明

2.2 生命週期評估方法

考量紡織業對環境所帶來的潛在影響，本研究採用的衝擊評估方法包括評估碳足跡 (carbon footprint) 的 IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013)；水足跡 (water footprint) 包含 Berger 等人提出的耗水量指數 (WDI) (Berger et al., 2014)；CML-IA(2016) 中的淡水與海洋生態毒性 (FAETP/MAETP) 與優養化 (EP) 則用於評估水質惡化情況。環境衝擊評估則採取 CML-IA baseline (Guinée et al., 2001) 方法，評估面向包估：資源耗損 (ADP)、臭氧層破壞 (ODP)、人類毒性 (HTP)、水中生物毒性 (FAETP)、海洋生態毒性 (MAETP)、陸地生物毒性 (TETP)、光化學煙霧 (POCP)、酸沉降 (AP)、優養化 (EP)，亦包括全球暖化 (GWP) 等 10 個與紡織染整業密切相關的特徵化項目。對於水資源與能源鏈結 (Water-energy Nexus) 則以 ReCiPe2016 Endpoint (Huijbregts et al.,

2017) 方法加權評估後結果作為分析依據。所採用的 LCA 工具為本研究室已建置的工具 SimaPro Software v.8.4(Prè Sustainability Consultant, 2017) 與 Ecoinvent 數據庫 v.3(Weidema et al., 2013)。

三、評估結果與討論

3.1 碳足跡評估

評估結果發現，採用新措施之後，研究個案在 2017 至 2020 年間，碳排與總燃料消耗相對比率逐年降低，而年度產能關鍵績效指標 (KPI) 達成率仍能平均維持 96% 以上 (表 2)。值得一提的是，2019 年為該廠第一年完全淘汰使用工業燃料鍋爐，燃料消耗的相對降低比亦較前一年 (2018) 降低 8.5%，結果表明該年生產能力不僅沒有受到影響，甚至有所增加。雖然用電量 (表 1) 較前一年 (2018) 略增加約 7%，但由於完全淘汰使用化石燃料，2019 年的整體碳足跡比 2018 年減少了 10%，每生產 1 公斤產品約減少了 2.7 公斤二氧化碳當量 (kg CO₂ eq)，按 2019 年產品總量計算，該年減少了碳足跡約 1.26 萬噸二氧化碳當量。該廠透過製程所需之能源供應模式的轉型，在同時維持產能的要求下，仍可達到降低碳排的需求。相關數值計算式說明如下：

碳足跡降低比 (%) =
(該年碳足跡排放量 ÷ 基準年 (2017) 碳足跡排放量)×100 [1]

燃料消耗相對降低比 (%) =
(該年燃料總消耗熱值量 ÷ 基準年 (2017) 燃料總消耗熱值量)×100..... [2]

產能目標達成率 (%) = (該年度實際產品產量 ÷ 該年度產量目標)×100 [3]

表 2 2017~2020 年紡織廠年度碳足跡排放率 (基於 2017 年排放量)、產能達成率 (基於年度產量 KPI 目標)、燃料消耗相對減少率和供應方式對照

年度	碳足跡降低比 (%)	燃料消耗相對降低比 (%)	產能目標達成率 (%)	燃料採用比例以及供應方式				
				工業燃料鍋爐	三米煤 *(5,800 kcal/kg)	低硫重油 (9,200 kcal/kg)	低壓蒸汽 (435 kcal/kg)	中壓蒸汽 (27 kg/cm ²)
2017	100	100	97.6	有	40%	10%	50%	-
2018	90.7	18	94.4	有	23%	2%	50%	25%
2019	80.8	25	101.4	無	-	-	50%	50%
2020	83.5	47.9	114.1	無	-	-	50%	50%

* 註：為廠商所提供之燃煤名稱，屬高等發熱量之燃煤。

3.2 水足跡評估

水足跡評估方面，耗水量指數與碳足跡評估結果呈現符合的趨勢：耗水足跡逐年下降；減少率約為 18%。從圖 2(a) 中的年度耗水量、廢水排放量和耗水指數之間的關係可以看出逐年下降的趨勢。此外，與水質惡化足跡評估相關的化學藥劑消耗和紡織污泥排放在圖 3(b) 中也顯示出類似的趨勢。2018 年以來所有化學藥劑用量和紡織污泥排放量均呈下降趨勢。其中，從表 1 可以看出，在 2017~2020 年之間，精練劑、染色助劑、酸性染劑、分散性染劑和定型用助劑在 2019 年出現用量高峰，平均增長約 12%。隨後，2020 年各項用量再次下降，但水質惡化相關指數，如水中生物毒性 (FAETP)、海洋生態毒性 (MAETP)、優養化 (EP) 在 2020 年反而呈現小幅上升。與 2019 年相比，染色階段的助染劑和分散性染劑分別在使用量減少的幅度最大，均減少 31%。預處理階段的精練劑次之，減少了 23%。然而與 2019 年相比，2020 年在定型階段的整理助劑用量雖然減少了 10%，但仍比 2018 年增加了 13%。對應水質惡化評估結果，推測 2020 年在製造過程中所使用的定型助劑可能是提高數值的主要因素之一。總體而言，水質惡化足跡在施行新措施之後，平均減少 15%。

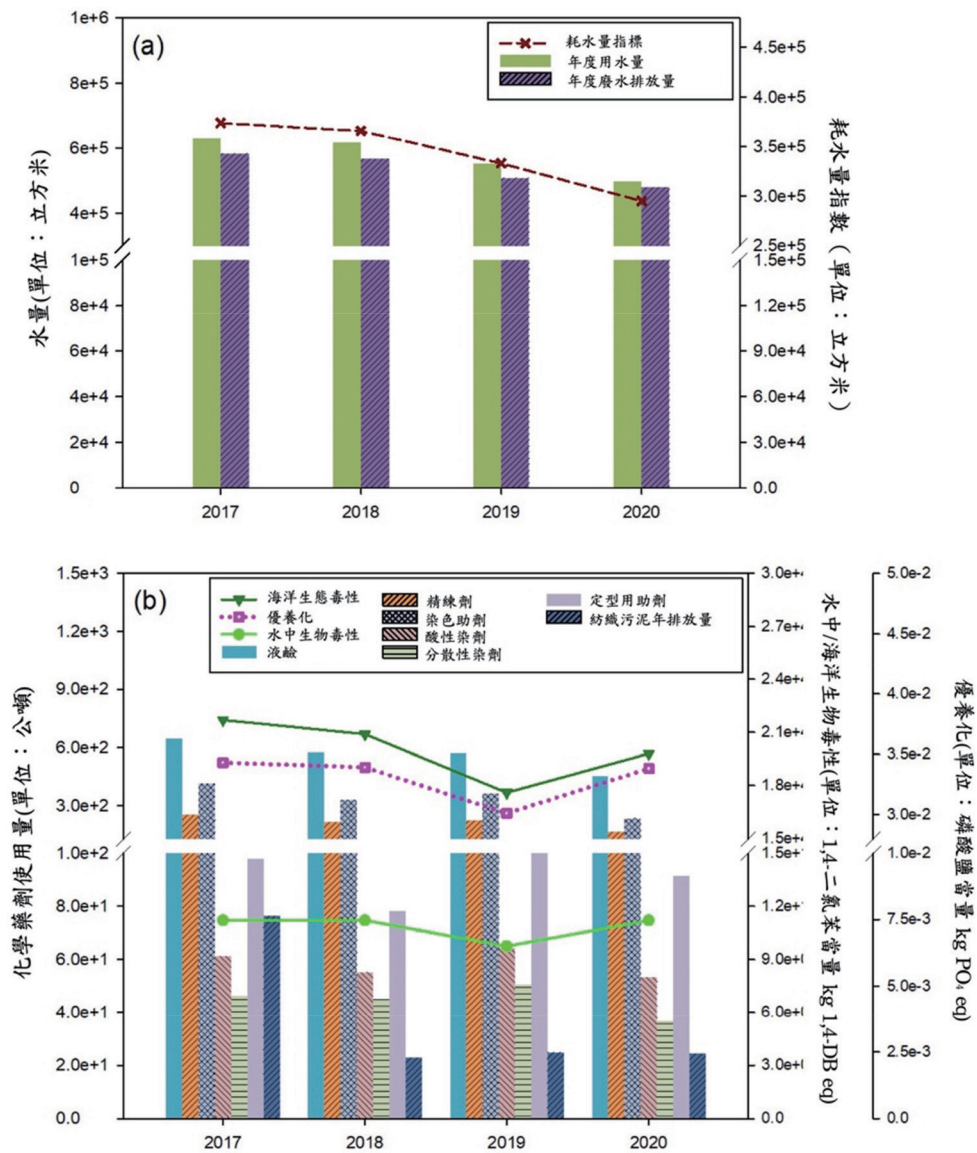


圖 2 紡織廠 2017 年到 2020 年每年水資源可用量和水惡化情況

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

圖 3(a) 至 (c) 個別顯示了 3 種與水質惡化有關的評估項目 (即 FAETP、MAETP 與 EP) 與產品製程中主要階段 (預處理、染色與定型) 的相互關係。圖 3 顯示各評估項目受到製程個階段影響的比例, 呈現與圖 2(b) 相似的趨勢。在前處理與染色階段的影響比例自 2017 年之後逐年下降, 而 2019 至 2020 年在定型階段的影響比例則在 2018 年之後呈現上升現象。因此得知, 透過將製程中能源供應方式更替, 直接以汽電共生廠提供蒸汽, 取代原本透過鍋爐燃燒產生蒸氣的方式, 對於水量耗損方面都能帶來改善。然而不可避免的在製程中使用的化學物質所造成的水質惡化影響仍需注意。除了定型助劑之外, 預處理階段所使用的化學藥劑一直是製程中對環境影響占比最大的。

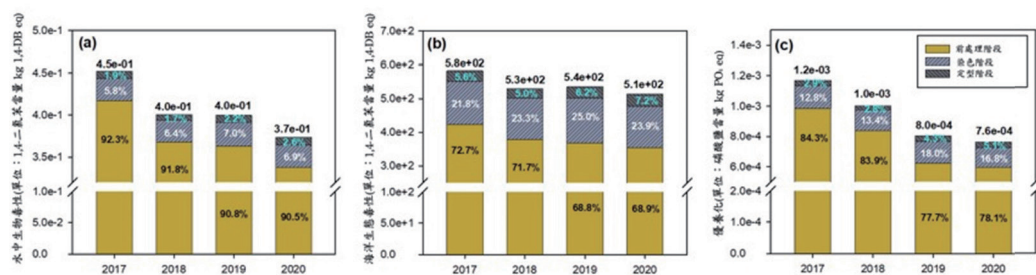


圖 3 製程中主要階段對 3 種水質惡化評估項目影響比例：
(a) 水中生物毒性 (b) 海洋生態毒性 (c) 優養化

3.3 環境衝擊評估

圖 4 以盤查範疇對每個環境影響項目的百分占比, 顯示 2017 年至 2020 年染整廠對環境的影響。各項目由左至右, 依次為 2017 至 2020 年的數值。本研究環境衝擊評估, 包括從原物料的輸入至廠內前處理階段, 與後續加工過程至最終產品之所有環節, 其中也包含了廢水在排放前的處理, 涵蓋以下部分: 原物料、生產製造、燃料使用、用水量、用電量、廠內廢水處理、能源回收再利用等 7 個部分。經評估結果得知, 原物料部分在化石資源耗損 (ADP-fossil fuel)、全球暖化 (GWP)、陸地生物毒性 (TETP)、光化學煙霧 (POCP) 和酸沉降 (AP) 等項目影響占比最高; 而在資源耗損 (ADP, 非化

石燃料) 項目則僅次於生產製造部分的占比。該廠因更換主要製程所需的能源供應方式, 當停止使用化石燃料以及完全淘汰鍋爐後, 在減少碳排以及水資源耗損上, 確實有所助益, 然而關於生產最終產品所需要的主要原物料(胚布), 以及處理過程必須使用的助劑等, 仍對環境造成衝擊性影響: 該結果與作為主要原物料的人造纖維(尼龍及聚酯纖維) 胚布, 不可避免地使用化石燃料原料有很大的關聯, 評估結果確實顯現了後續加工過程帶來的聯動效應。生產製造部分對資源耗損(ADP) 的影響最大, 其次是陸地生物毒性(TETP), 再者是臭氧層破壞(ODP), 這與生產過程中使用的多種化學藥劑有關, 例如前面提及的染整劑和各種助劑。ODP 評估可顯示物質對臭氧層可能帶來的破壞, 而 GWP 則常使用於衡量化學物質對全球暖化的影響, 因此同時觀察有助於評估化學物質對環境的影響。從整體評估結果看來, 生產製造階段對於 GWP 的影響占比極小, 而是與水質惡化方面有較高的關聯性, 此部分在後述廠內廢水處理的部分也可得見。燃料使用部分則在 AP、POCP、GWP 和 ADP-fossil fuel 類別中顯示出較為明顯的比例, 並且從結果明確地顯示自 2018 年後, 染整廠徹底汰換了化石燃料與工業鍋爐, 使得此部分原本對環境衝擊影響降至最低。這意味著新的蒸汽供應方式確實為減少環境損害帶來了良好的效果。廠內廢水處理是另一個在環境衝擊評估具有極大占比的部分, 特別是在人類毒性(HTP)、FAETP、MAETP、TETP 和 EP 中的占比明顯高於廠內其他部分, 並且大部分與水質惡化有密切關聯。值得注意的是, 能源回收再利用部分從評估結果顯示出其在減少環境影響方面的優勢。應證染整廠利用汽電共生廠直接提供的回收蒸汽, 替代鍋爐燃料並淘汰鍋爐使用, 可有效減少對環境的破壞, 特別是在 ADP-fossil fuel、GWP、POCP 和 AP 等項目, 效果顯著。然而對於 HTP、FAETP、MAETP, 與 EP 則無明顯影響。得知, 此部分對於化石燃料相關項目確實有直接影響, 而對廠內化學藥劑使用相關項目, 則沒有直接效益。

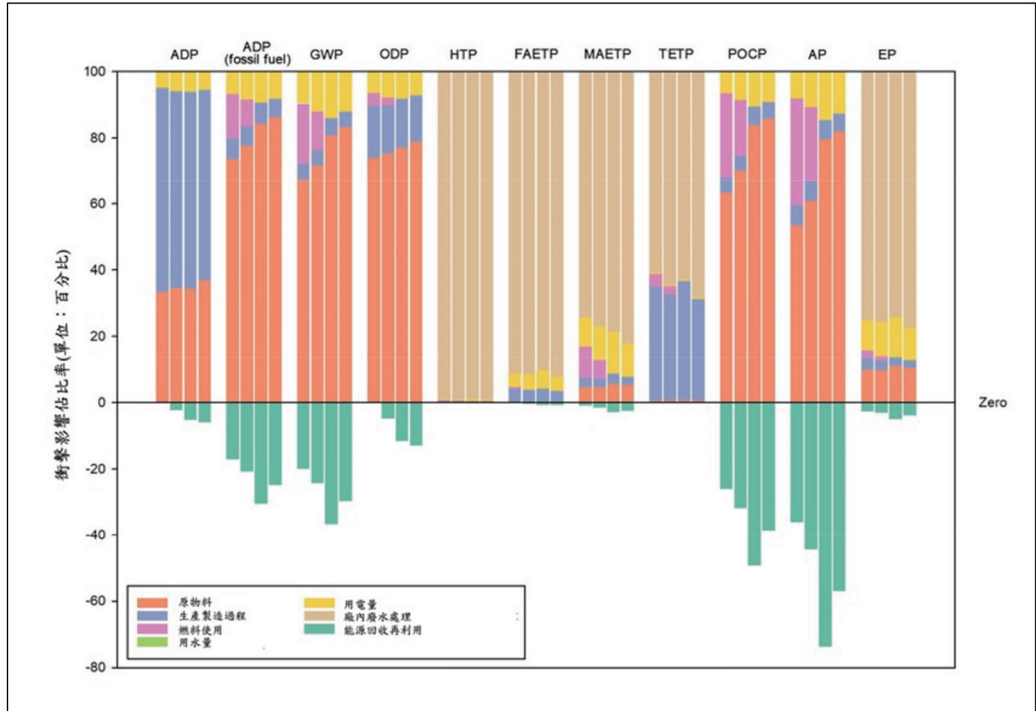


圖 4 染整廠各部分在各環境衝擊影響項目中的占比評估
(每個項目由左至右依序為 2017 至 2020 年)

圖 5 顯示了正規化 (normalized) 後的評估結果，可見新措施執行後，環境衝擊項目的影響數值大致呈現逐年下降的情形，除了 2020 年在 HTP 項目上，相較 2017 年還增長了 0.23% 外。就整體生命週期評估來看，染整廠在 ADP、HTP、FAETP、MAETP 等項目帶來較明顯的衝擊影響。與圖 4 對應，ADP 的影響主要來自原材料和生產製造部分。2017 年至 2020 年的評估結果確實驗證了改變鍋爐燃料與淘汰工業鍋爐使用對減少環境損害有所助益。但是，在 HTP、FAETP 和 MAETP 的影響仍有限，因來自於生產製造過程所使用的化學藥劑，以及後續也對廠內廢水處理部分產生了影響。4 年評估當中，2019 年在所有項目中的數值皆為最低，而產量最高 (圖 5、表 1)。除去可能因潛在的外部因素迫使生產項目與過程必須改變的 2020 年，2019 年的評估結果證明了使用汽電廠直接供應的回收蒸汽取代舊有的化石燃料使用與供應方

式，所帶來有效減少環境影響與破壞的效益，尤其在降低 AP(34%)、POCP(27%)、GWP(19%)、MAETP(19%)、TETP(17%) 等項目，更具效果。

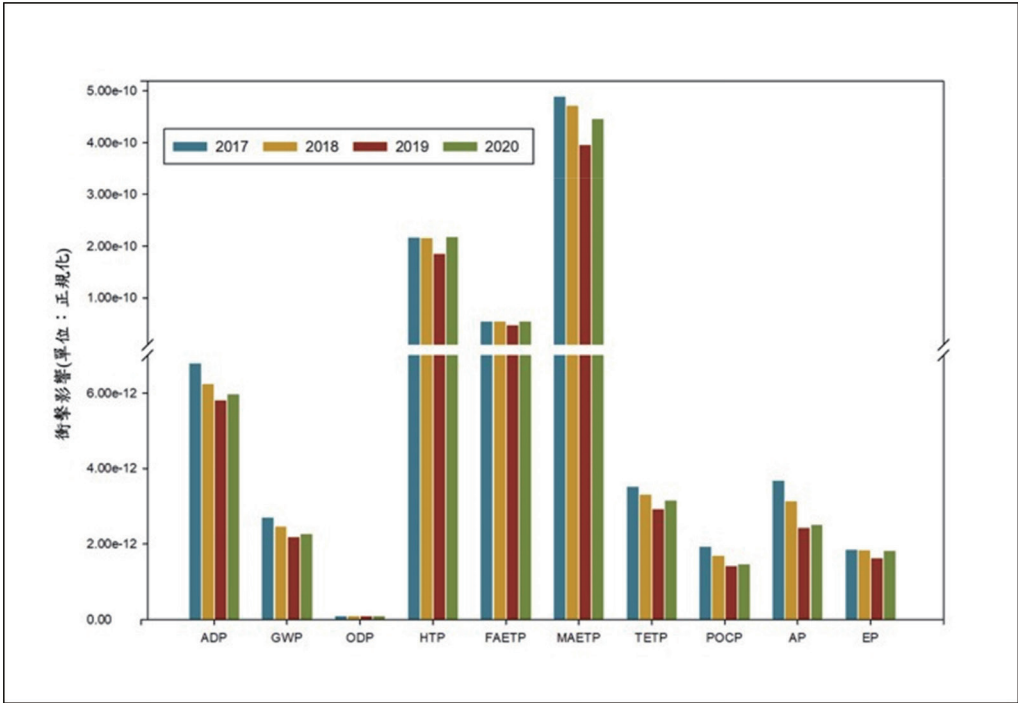


圖 5 2017 年至 2020 年，每個環境衝擊影響項目的正規化評估結果

本研究評估之結果顯示，相較於以傳統化石燃料使用，鍋爐燃料類型採用汽電共生廠所提供之蒸汽，對於減少大部分的環境衝擊影響確實有所助益。它有效的協助製程中減少甚至無化石燃料燃燒後所產生的污染物，並且因提供回收蒸汽的汽電共生廠即位於同一工業區，直接輸入的回收能源發揮了很好的能源效率，協助該染整廠更順暢的淘汰鍋爐之使用。總體的效益包括逐步實現年度減碳目標，降低燃料成本，以及因能源效率提高而促進生產效能。圖 6 顯示了原物料消耗、年產量、固定污染源空氣污染物排放、碳排放和年度燃料成本的關係趨勢；可見，隨著燃料種類和供應方式的逐年變化，燃料成本和碳排放指數也隨之下降。總體而言，本研究的評估結果，對於發展製造產業的綠色生產、區域能源網絡的未來建構規劃，具有啟發意義與可實踐性。

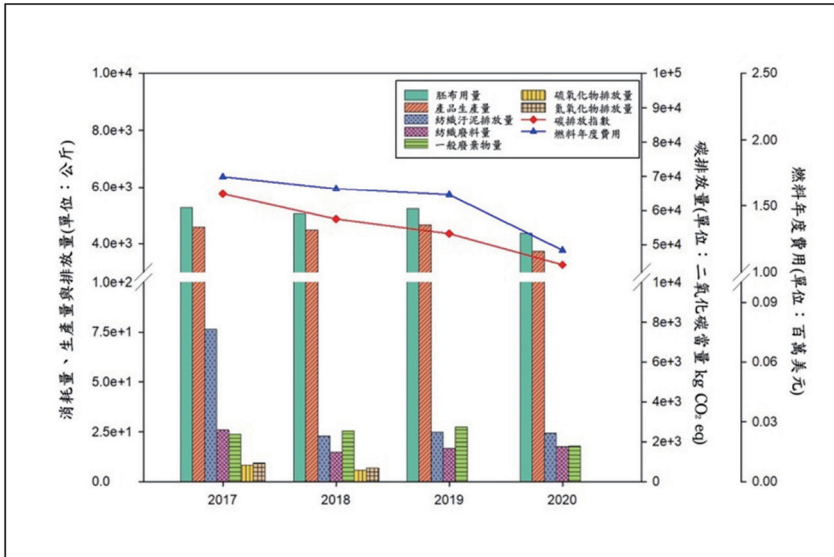


圖 6 原物料消耗量、產品年產量、固定污染源空氣污染物排放量、碳排放指數與年度燃料成本關係與趨勢圖

3.4 水資源與能源鏈結觀察

Robert White 於 1994 年提出工業生態學 (White, 1994) 觀點，對工業活動中原物料與能源的流動，以及經濟、政策、社會資源等轉換現象，之於環境的影響提出相關探討。水 - 能關係屬於雙向鏈結關係，包含供水耗能至產能需水，自然資源開發所需之廢水處理技術與管理，甚至碳與水資源價格評估，皆屬此討論範圍。本研究所使用的 ReCiPe2016 Endpoint 方法，將特徵項目加權化之後，以相關質量單位顯示該項目的損害程度與關聯性。生態系統質量單位為物種與時間年 (species x year) 的關係呈現，意味評估區域物種隨著時間推移的損失。資源缺稀化單位則以未來礦產與化石資源開採所產生的額外費用 (additional cost) 為準。研究個案在 4 年間水、電、燃料資源消耗與衝擊項目損害指標之相互關係，於圖 7 呈現評估結果。以 2017 年使用量與造成的衝擊指標數值為基準，年度用水量呈現明顯逐年下降之趨勢；以生產製程所需燃料總熱值計算，隨著個案逐年減少化石燃料使用量以及最終淘汰鍋爐之步驟，此數

值呈現與用水量接近的下降趨勢。值得注意的是，水資源使用損害指標在 2018 年以 10.6% 與 2019 年以 10.1%，出現降幅曲線些微停滯情形，而資源缺稀指標曲線則呈現 2018 年以 1.9% 微幅下降後於 2019 年上揚 0.2% 的趨勢，此現象呼應了在 2018 年 9.4% 與 2019 年 15.9% 略為增長的年度用電量。此 2 年之間，正逢研究個案在新舊措施交接階段，同時，2019 年產品生產總量為 4 年間最高。此現象呈現用電量與水資源運用及資源耗損相關損害指標的直接鏈結關係。若針對廠內各部分用電模式與量能，能做更詳盡的單位監管，則更能將資源有效的運用與分配，具體模擬不同情境的資源供需情況，評估整體系統的乘載力與回復力，有助優化提升在水 - 能鏈結的協同效益 (synergistic benefits)。

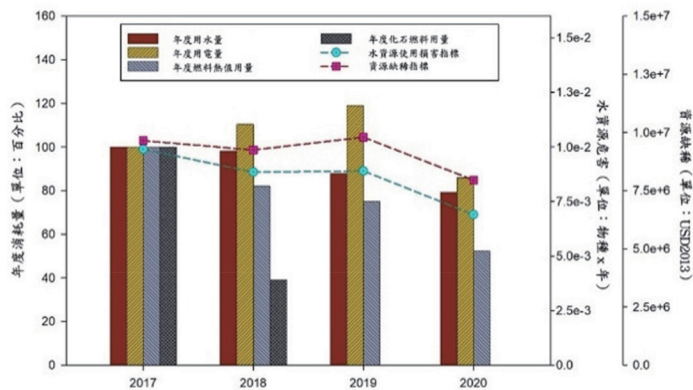


圖 7 水資源與能源鏈結關係圖

四、結論

本研究個案透過汽電共生廠回收之蒸汽以低壓與中壓蒸汽方式直接提供廠內製程使用，取代長期倚賴的化石燃料與工業用燃料鍋爐，經生命週期評估後發現，碳足跡、水足跡、環境衝擊影響等結果均有所改善：年度碳足跡可減少 19% 的排放率，水資源耗損足跡和水質惡化足跡則可以分別減少 18% 和 15% 的損耗率。在染整廠所有評估範疇中，原物料輸入的部分對環境的影響較大的原因來自於該人造織物原料與化石燃料的高度關聯性。此外，製程中所使用的化學物質則對水質惡化造成了很大的影響，其中預處理階段是其中影響最大者。最後，在停用化石燃料，改以直接輸入的蒸汽後，

燃料部分不再為環境帶來衝擊影響。在評估能源回收再利用的結果發現，該措施對於減少環境損害、降低年度燃料成本，與空氣污染防治具有相當的優勢，並具有轉型綠色產業發展前景、符合經濟面考量且容易施行，適合現行使用燃料鍋爐於製程的產業作為參考。

參考文獻

- Berger M., van der Ent R., Eisner S., Bach V., Finkbeiner M. (2014), Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. *Environmental science & technology*, 48(8), 4521-4528.
- CML-Department of Industrial Ecology (2016). CML-IA Characterisation Factors, Institute of Environmental Sciences, Leiden University: Leiden, The Netherlands.
- Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Helias A., de Haes H.A.U., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J., Lindeijer E., Roorda A.A.H., van der Ven B.L., Weidema B.P. (2001), *Life Cycle Assessment-An Operational Guide to the ISO Standards: Characterization and Normalization*. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Centre of Environmental Science, Leiden, The Netherlands.
- Huang R., Riddle M., Graziano D., Warren J., Das S., Nimbalkar S., Cresko J., Masanet E. (2016), Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135(1), 1559–1570.
- Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M.D.M., Hollander A., Zijp M., van Zelm R. (2017), ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147.

- International Organization for Standardization (ISO) (2014), 14046-Environmental Management-Water Footprint-Principles, Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- PRè Sustainability Consultant, 2017. SimaPro v.8.4 software, PRè Consultant: Amersfoort, The Netherlands.
- Weidema B.P., Bauer C., Hischier R., Mutel C., Nemecek T., Reinhard J., Vadenbo C.O., Wernet G. (2013), Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen, The ecoinvent Centre, Switzerland.
- White R. (1991), The Greening of Industrial Ecosystems. Allenby, B.R. and Richards, D.J., (Eds.). National Academy Press, Washington DC.
- Yin H. and Guo H.(2015), Energy and exergy analyses of finishing process in cotton textile production. *International Journal of Exergy*, 18(3), 251–274.
- Zhang N., Smith R., Bulatov I., Klemes J. (2013). Sustaining high energy efficiency in existing processes with advanced process integration technology. *Applied Energy*, 101, 26–32.