

國立臺灣大學工學院環境工程研究所

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

基於深度優先搜尋的空間生命週期優化模型在產品服務系統
中管理高耗能產品：以台灣大學宿舍空調為案例研究

A Depth-First Search-Based Spatial Life Cycle Optimization
Model for Managing Energy-Using Products in Product-Service
Systems: A Case Study of Air Conditioners in NTU Dormitories

邱晨境

Chen-Ching Chiu

指導教授：馬鴻文 博士

Advisor：Hwong-Wen Ma, Ph. D

中華民國 113 年 6 月

June, 2024



口試委員會審定書



國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書 MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

基於深度優先搜尋的空間生命週期優化模型在產品服務系統中管理高
耗能產品：以台灣大學宿舍空調為案例研究

A Depth-First Search-Based Spatial Life Cycle Optimization Model for
Managing Energy-Using Products in Product-Service Systems: A Case
Study of Air Conditioners in NTU Dormitories

本論文係邱晨境(學號 R11541208)在國立臺灣大學環境工程學研究所
完成之碩(博)士學位論文，於民國 113 年 06 月 24 日承下列考試委員審查通過
及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Graduate Institute of Environmental Engineering on 6/24/2024
have examined a Master's Thesis (Doctoral Dissertation) entitled above presented by
CHEN-CHING, CHIU(R11541208) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

馬鴻文 陳必晟 閔蔭德
(指導教授 Advisor)

系(所、學位學程)主管 Director: 席行正

誌謝



兩年研究生活像是坐雲霄飛車，轉眼間就過去，回顧這段時間，在台大有多元嘗試和學習來增進我「研究主題系統邊界設定」、「設計研究方法」、「視覺化成果應用」等研究能力。找出自己有興趣的研究主題，規劃預期成果過程會感覺到前所未有的壓力，包含找不到合適的軟體工具滿足研究目標的需求、資料取得或轉化過程的難度、研究方法內一系列的輸入與輸出的串連方式等，掙扎、痛苦、疲憊、徬徨等交織情緒，常常使人無法好好入眠，面對最晚應口試的時間倒數，也會讓人不知所措。

記得距離口試倒數一個月，那時還沒決定口試時間，無法解釋的研究結果，一直很讓人想要摔電腦，一遍又一遍的錯誤和修正，不知道自己寫的模型到底還有哪裡設定錯誤，每跑一次模式時間又長達 6-8 小時，那時幾乎在研究室沒回宿舍，看著一遍又一遍的晨曦，也無法理解自己為何要做很難的題目，搞得那麼痛苦，還看到很多研究生進度很快，還能偶爾出去玩和放鬆時，近乎崩潰。但是，後來想到魷魚遊戲關卡中的槓糖，有人拿到困難的傘形(稍微困難一點題目)，有人卻拿到三角形(相對容易一點題目)，象徵人生在很多方面可能會不公平，但只要像主角一樣積極面對及尋求方法解決問題，不要自顧怨天尤人，無論絕境多困難都能夠成功。而且他們在其他時間付出努力，有時也不是表面上看到的樣子。秉持正向心態就努力堅持下去，幸運的是稍微有還不錯的成果能展現，便約了口試時間。當口試結束那一刻，快哭出來，一切都是咬牙切齒的辛酸血淚，雖然沒能獲得平均 A+ 的肯定，自己也知道還有很多不足，但在有限時間內已經盡力。

感謝馬老師兩年的諄諄教誨，定時舉辦小排，可以更了解自己同時，也認識到神還在人間時多麼辛苦但很喜樂地過日子。感謝闕蓓德教授和陳必晟教授口試時寶貴建議，讓我知道紙本論文論述及資訊不足之處。感謝秀靜學姊給予陳述一個研究故事框架和有效率操作電腦資料輸入和結果輸出的技巧。感謝培群學長在 Meeting 提出疑問之處，讓我回去多強化陳述的重點。感謝睿安學長在建置模型過程中的除錯及測試提供想法。感謝子維學長在研究過程當中，默默地加油打氣，工作、家庭百忙之中，親自來聆聽口試並記錄口委意見。感謝儷潔助理協助行政事務，例如借教室和核銷經費等。感謝召會的童忻、人豪、余兆、睿瀚等，不管是生病、

不順遂，您們都會為我代禱及言語上的關心，也陪我一同晨興或晚禱。感謝研究室每位夥伴，雖然研究方向不盡相同，但仍然有時會互相交流，一起為彼此打氣。特別感謝騏嘉，你總是很願意幫忙有時幫我買飯(雖然好像幾乎都是晚上八點半後才吃到)，機器學習期末專案，也是一肩扛起執行絕大部分的任務。

感謝太子學舍曾建世副理撥冗說明：宿舍安裝空調及維護保養時，和承包廠商的合作事項及審核流程。感謝曾建年弟兄和楊雅芬姊妹介紹嘉麒空調的許薺老闆，許薺老闆及員工們細心說明保養/維護、安裝空調的注意事項。感謝成美電器行讓學生觀摩實際安裝及拆除空調的現場。

最後壓軸留給我的家人、女友和其他人。感謝奶奶，每次回家都準備豐盛的晚餐，回來台北都帶便當、水果、水煮蛋等，和您一起煮飯是我很快樂的時光。感謝爸爸，帶我去爬山、運動，分享理財觀念與知識。感謝媽媽時不時就打電話關心我的狀況，回家總是把房間都事先整理好，工作忙碌分擔許多的家務。感謝小姑姑偷偷買許多優格、好吃的零食給我和妹妹，關心問候我的生活狀態。感謝大姑姑和二姑姑的支持與鼓勵，也買很多水果、營養品到家裡。感謝表姊邀請我到府裡作客，分享很多職場經驗。感謝妹妹時不時在我的手機偷拍搞笑照，讓我做研究覺得苦悶時，有時是一種調劑。感謝我的女友，忙碌這段時間有時無法好好陪妳，但妳總是可以諒解我的狀況，而且努力維繫著我們的感情。感謝我的朋友們，不管是一起吃飯、運動，為彼此加油打氣，一起勇敢地向前走。感謝過去所有指導我的老師、計畫合作夥伴、乾姊妹、同學們，與您們相處的點點滴滴，共創價值的經驗，造就現在的我。

因為有您們的支持，才能在遍滿荊棘的環境中，順利畢業，使研究臻至完善，我會帶著這兩年豐碩的學習經驗，為環境、社會開創新價值。

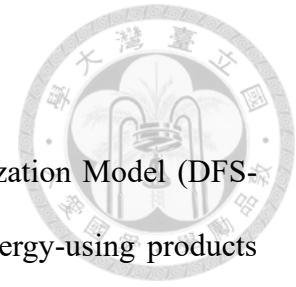
摘要



本研究提出了一個基於深度優先搜尋演算法的生命週期優化模型，應用於高耗能產品的產品服務化策略評估。該模型能夠在最小化或設定容忍度下的環境影響中找出產品在時間範圍內的循環途徑。模型考慮了空調使用者的主觀持有空調最少時間、安裝空間和空調壽命等三種限制條件，並利用過濾矩陣篩選合理的現況情境進行環境影響評估。本文以台灣大學三間宿舍總計六個空間的分離式冷氣為案例研究，結合建築能源評估模型獲取空間冷負荷條件。案例研究證實，應用產品服務化策略的分離式冷氣在環境效益上優於未實施的情況。此外，在不同的起始保養時間、保養間隔時間、產品原料與製造係數、能效遞減緩解因子和參與對象等變動的多種情境中，研究發現，原料與製造空調的係數變化是系統內總累積環境影響的重要因素，而更多空間參與產品服務化對整體區域的減排效果非常顯著。據我們所知，本研究提出的模型是文獻中首個同時考慮多產品、動態情境變動限制條件和產品服務化策略的環境影響優化與評估的模型。

關鍵字：產品生命週期優化、產品服務化、深度優先搜尋、建築冷負荷、空調

ABSTRACT



This study proposes a DFS-Based Spatial Life Cycle Optimization Model (DFS-SLCO) to evaluate product service system (PSS) strategies for energy-using products (EuPs). The model identifies the circular pathways of products within a given time frame while minimizing environmental impact or staying within a set of tolerance. The model considers three constraints: the minimum ownership duration for air conditioner users, installation space, and air conditioner lifespan. It employs a filtering matrix to screen for reasonable current scenarios to evaluate environmental impacts.

A case study involving split-type air conditioners in six spaces across three dormitories at National Taiwan University was conducted. The study integrated a building energy assessment model to obtain space cooling load conditions. The case study confirmed that split-type air conditioners applying PSS are more environmentally beneficial than those without it. Additionally, under various scenarios with different initial maintenance times, maintenance intervals, product material and manufacturing coefficients, efficiency degradation mitigation factors, and participants, it was found that changes in the coefficients of material and manufacturing air conditioners are significant factors in the total accumulated environmental impact within the system. Furthermore, increased participation in PSS leads to significant reductions in environmental impact across the entire area. To our best knowledge, the proposed model is the first in the literature to simultaneously consider multiple products, dynamic scenario-based constraints, and the optimization and evaluation of environmental impacts through PSS strategies.

Keywords: Life Cycle Optimization, Product Service System, Depth-First Search, Building Cooling Load, Air Conditioner

目次



口試委員會審定書	i
誌謝	ii
摘要	iv
ABSTRACT	v
目次	vi
圖次	viii
表次	x
Chapter 1 緒論	1
Chapter 2 文獻回顧	4
2.1 空調系統簡介與管理政策	4
2.1.1 零件組成、功能	4
2.1.2 空調管理政策	5
2.2 循環經濟策略於耗能相關產品之應用	7
2.3 建築能源評估與冷負荷計算	11
2.4 產品生命週期評估模型與應用	12
2.4.1 產品生命週期評估	12
2.4.2 生命週期環境及經濟影響優化	15
Chapter 3 研究方法	22
3.1 資料蒐集及處理	27
3.1.1 基本資料蒐集	27
3.1.2 參數變動處理	30

3.1.3	設定條件限制	31
3.2	特定年份(決策時間點)的生命週期環境影響計算	34
3.2.1	符號定義	35
3.2.2	環境影響計算之模式	37
3.3	深度優先搜索之妥協解	41
Chapter 4	結果與討論	42
4.1	能源模擬冷負荷	43
4.2	不同情境下之變因調整的累積環境影響及與基線比較環境影響結果 ..	44
4.3	不同調整變因對於系統決策影響	49
4.4	不同妥協率(解)，各情境下的環境影響變化分佈	53
4.5	系統環境影響的分類占比	54
Chapter 5	結論與建議	56
參考資料		58
附錄		62

圖次



圖 2- 1 應用於建築物空調的系統循環冷卻生產網絡框架(Palafox-Alcantar et al., 2022).....	5
圖 2- 2 家用空調更換的溫室氣體減排量和生態點數政策的減排成本(Nishijima et al., 2019).....	6
圖 2- 3 台灣廢家電收集管道(Xiang, 2020)	7
圖 2- 4 在產品生命週期中循環經濟可能保留資源價值選項(Reike et al., 2022)	8
圖 2- 5 循環經濟指標根據研究提及循環策略及測量範疇分類(Moraga et al., 2019)	10
圖 2- 6 新的生態設計流程，採用預測性 LCA 方法(Kuo et al., 2016).....	14
圖 2- 7 MCDES 雙層多目標協同最佳化模型框架(Liu et al., 2022)	16
圖 2- 8 以 B 取代產品 A 隨時間變化的影響示意圖(I 表示任一環境影響指標、t 表示時間)(Allwood et al., 2011).....	18
圖 2- 9 醫療保健產業、產品經銷商和維修中心之間的關係(Liao et al., 2021)	19
圖 3- 1 模型展示的目標對象相對位置	23
圖 3- 2 本研究之產品服務化涵蓋主要應用策略示意圖	25
圖 3- 3 研究方法流程架構圖	26
圖 3- 4 參與 PSS 的環境影響計算架構	40
圖 4- 1 簡化建築 3D 模型，以男一舍舉例	43
圖 4- 2 各建築空間於 SSP2-4.5、2036-2065 之台北市未來氣候年下的尖峰冷負荷	43
圖 4- 3 購買新機之不同情境參數於 2026 年至 2045 年累積環境影響	44
圖 4- 4 購買新機之不同情境參數相比基線於 2026 年至 2045 年累積環境影響差	44
圖 4- 5 2026~2045 年各年度 B8、G1 參與 PSS，在原料/製造排放係數與基礎情境 比值 = 1.03，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的棟別的環境影響	47
圖 4- 6 2026~2045 年各年度 B8、G1 參與 PSS，在原料/製造排放係數與基礎情境 比值 = 0.97 情況下，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的棟別的環境影響	47
圖 4- 7 假設於 2026 年購買 CSPF = 6.79、5.84、5.69 之新機，每 3 年進行維護保養	

的情況下，2026~2045 年的 CSPF 遞減趨勢.....	48
圖 4- 8 購買新機之不同起始維護保養的時間(第 1, 3, 5 年)決策表	49
圖 4- 9 保養間隔時間(1、3 年)決策表	49
圖 4- 10 原料/製造排放係數增加與減少 3% 決策表	50
圖 4- 11 產品服務化減緩效率遞減因子(0.1、0.5) 決策表	50
圖 4- 12 B1、G1 棟別多戶決策表	50
圖 4- 13 2026~2045 年各年度 B1、G1 參與 PSS，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的 棟別的環境影響	51
圖 4- 14 B1、B8 棟別多戶決策表	51
圖 4- 15 2026~2045 年各年度 B1、B8 參與 PSS，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的 棟別的環境影響	52
圖 4- 16 在 0.01、0.03、0.05 的寬容率，不同情境下的參與 PSS 的環境影響分佈圖	53
圖 4- 17 B8G1_3_2_MF103 情境下參與 PSS 的環境影響分佈，依照分類：(a)環境影 響來源、(b)不同空間型態.....	54
圖 4- 18 B8G1_3_2_MF103 情境下不參與 PSS 的環境影響分佈，依照分類：(a)環境 影響來源、(b)不同空間型態.....	54

表次



表 2-1 分離式空調主要元件與功能.....	4
表 2-2 循環經濟策略分類(Moraga et al., 2019).....	9
表 2-3 分離式空調單元更換原則.....	11
表 2-4 過去文獻於生命週期評估或環境或經濟影響優化之數學方法(本作者整理)	20
表 3-1 本研究之空調服務商、參與及不參與產品服務化的空調使用者模式設定.....	24
表 3-2 建築能源模型重要參數設定.....	28
表 3-3 基本情境的係數設定.....	30
表 3-4 每個空調使用者的空調決策情境原型.....	32
表 3-5 過濾矩陣(以 $X_{1,1}$ 為例).....	33
表 3-6 每個空調使用者決策選項的環境影響來源.....	35
表 3-7 環境影響情境對照記錄表(X、Y、Z、W 指的是環境影響).....	40
表 4-1 不同情境參數於 2026 年至 2045 年環境影響統整數據結果.....	45
表附錄 1-1 具有尺寸限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$, $X_{3,1}$ 為例).....	63
表附錄 1-2 具有冷負荷限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$, $X_{3,1}$ 為例).....	63
表附錄 1-3 具有最大空調技術壽命限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$ 為例).....	63
表附錄 1-4 具有最少持有空調時間限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$ 為例).....	63
表附錄 2-1 目標空間初始空調條件彙整.....	64
表附錄 2-2 新空調初始資料彙整(2023 年).....	65
表附錄 2-3 本研究之目標空間之間距離(km).....	66
表附錄 2-4 本研究之目標空間與服務商距離(km).....	66

Chapter 1 緒論

近年來，循環經濟（Circular economy, CE）概念越來越受到重視，並且在材料使用、設計、製造、運輸、消費和使用以及產品生命終結（EoL）階段都實施了 CE 策略，以確保可持續消費(Kalmykova et al., 2018)。對於空調、洗衣機、加熱器等在產品使用階段高能源密集度的產品(簡稱高耗能產品)（Energy using Products, EuPs），消費者應增加使用產品的年限或提前以更新、更節能的商品替換舊產品，來達到更好的環境效益，成為一個值得探討的問題(van Loon et al., 2021)。針對高耗能產品的最佳替換時間已被大量研究，對於空調來說，研究主要集中在優化能耗、消費者成本、溫室氣體排放(De Kleine et al., 2011; Hummen et al., 2023)或預測性維護計劃(Wu et al., 2021)。

由於普遍消費者並不清楚自己所屬空間中，例如房間、教室等，持有的高耗能產品之最佳替換時機，產品服務系統（Product Service System, PSS）可能是一種解方。近年來因為製造商透過製造和銷售高質量產品來競爭愈來愈困難，PSS 逐漸增多，許多製造商或經銷商利用其將商品轉化為服務銷售給客戶(Visnjic et al., 2017)由於在大多數市場中，產品變得越來越相似，產品差異化的空間有限(Tukker, 2015)，PSS 有助於產品策略包含產品性能監測、產品維護(預防性維護)、產品共享、回收/EoL 管理、優化環境、經濟等指標結果(非物質化)(Kjaer et al., 2019)。

儘管 PSS 通常被認為是一種旨在減少生產和消費環境影響的可持續商業模式(Mont, 2002)，但並非每種 PSS 配置都能達成這兩個目標(Tukker & Tischner, 2017)。開發 PSS 需要具體考量人事配置、物流、金流等實際執行細節，並不易保證經濟和環境效益的雙重成功。例如，PSS 的實施可能會導致勞動力或材料成本增加(Tukker & Tischner, 2017)，影響經濟效益。因此，對於環境保護政府機關、銀行、物流商、空調服務商、不同特性的空調使用者等利益相關者來說，評估環境可持續性、經濟有效益、行政程序可行性等相關評估是至關重要的，以確定是否建議實施 PSS 以及哪種 PSS 模式最為合適(Annarelli et al., 2016)。然而，專門針對在大都市

地區實施多產品服務系統的資源管理工具（即同類型多個高耗能產品，如空調）的研究仍然缺乏，現有最佳化替換研究只考慮單一產品的替換或繼續持有使用兩種選項，而忽略接收他人舊產品的第三選項。

在眾多高耗能產品當中，本研究目標展示對象以無風管的分離式空調為例。根據統計，2021 年台灣住商和服務業部門（以下合稱住商部門）溫室氣體排放量合計占比達 21.6%，僅次於工業部門(50.3%)(經濟部能源局, 2022a)，住商部門溫室氣體排放來源主要為使用電力使用，占比約 86%(王安強、黃國倉、黃瑞隆、林國華、楊忻婕, 2021)，全國住宅 2021 年用電量前三名的電器依序為「冷氣機」(29.46%)、「電冰箱」(11.98%)、「照明」(9.92%)(工業技術研究院, 2022)，非生產性質的產業亦有 55%以上電力流向為供暖、通風、空調（以下簡稱空調）設備(經濟部能源局, 2022b)，經上述估算無風管空調使用階段排放占我國排放約 5.5%；以 2021 年工業產銷存的非中央空調及工業總產值推算無風管空調在國內製造碳排占比約 6%(經濟部, 2021)，二者相加約 11.5%，具有優化減排的潛力。

因此，本研究主要目的是探索產品服務化策略，降低單一類型的多個高耗能產品在系統中一段時期中，僅考慮全球暖化潛力影響類別的總累積環境影響(kg CO₂e)（以下簡稱環境影響）的可能性，進而減輕高耗能產品在生命週期過程中造成的環境衝擊，因此發展考慮空間 (Spatial) 變化，將生命週期評估 (LCA) 結果，利用深度優先搜索 (Depth-First Search, DFS)，尋找每個高耗能產品於特定使用者在每個決策時間點(以年為單位)的最佳決策流程方法，以在一段時期 (2026 年-2045 年) 中，最小化與高耗能產品相關的累積生命週期溫室氣體 (GHG) 排放，並以台灣大學三間宿舍中的六個空間持有的分離式空調為案例應用。我們旨在提供高耗能產品相關的服務商提供模型，以幫助客戶和商家本身更好地進行日常高耗能產品管理。此外，本研究亦盼解決既有最佳化生命週期研究，限制條件往往被固定的問題，在考慮產品特性與空間條件等多限制下，動態更新各空間的情形，重新判斷產品流向的限制情況。最後，將模型延伸擴展評估系統邊界中，不同的服務對象參與 PSS、可



接受的累積溫室氣體排放上限比例中的多元可能路徑，來提供未來若有區域高耗能產品的環境管理者，對於特定產品的環境政策制定方向提供量化數值參考。本模型的每年決策選項包括保持使用舊產品、用更高效產品替換或用他人使用過的產品替換。

本文的其餘部分結構如下：第二部分為文獻回顧，第三部分為研究方法，第四部分為結果與討論，第五部分為結論與建議。



Chapter 2 文獻回顧

2.1 空調系統簡介與管理政策

本研究因考慮空調產品及服務生命週期的環境衝擊，對每個空調使用者進行保持舊產品、用更高效產品替換或用他人使用過的產品替換之決策，包含原物料取得、製造、配銷、使用、廢棄回收各階段，因本研究旨在建立產品服務化策略於多空調的評估系統，故在此節僅回顧空調基本要件、影響效率原因及空調管理政策。

2.1.1 零件組成、功能

生活中常見空調系統類型可分為中央空調、無管式迷你分離式空調(以下簡稱分離式空調)、窗式空調、便攜式空調、地熱供暖與製冷、混合空調等。本研究研究標的物為分離式空調，因為住宅、公寓、宿舍等住商部門常使用分離式空調，分離式空調系統組成為室內外單元，製冷重要零件與功能彙整如表 2-1。

表 2-1 分離式空調主要元件與功能

組成	零件	功能
室外單元	風扇(fan)	把熱空氣釋放至環境大氣中
	冷凝盤管(condensing coil)	吸收冷媒所攜帶之熱能，藉由移除高壓氣態冷媒的熱量來降低冷媒溫度。
	壓縮機(compressor)	低溫低壓冷媒氣體轉化為具有高溫高壓冷媒氣體。
	製冷劑(refrigerant)	俗稱冷媒，由低壓液態變氣態，會吸收大量的蒸發潛熱，產生冷凍效果。
室內單元	送風機(blower)	抽出熱空氣並將冷卻後空氣送入室內空間。
	膨脹閥(expansion valve)	降低冷媒壓力、調整冷媒流量。將高壓常溫的液態冷媒，分流成低溫低壓的濕蒸氣。
	蒸發盤管(evaporating coil)	蒸發盤管中的壓力降低，來自家中熱量被蒸發盤管中的液態冷媒吸收，使液體冷媒轉化回氣體。
	過濾器(filter)	防止灰塵和碎屑進入建築物以確保高室內空氣質量的關鍵作用
	恆溫器(thermostat)	監測和控制室內空氣的溫度

由上述可得知，空調能耗主要零件為壓縮機、室內送風機及冷凝風扇。住宅空



調系統最常見會效率隨使用時間增加的兩個問題是冷媒灌注不當和蒸發盤管結垢導致低氣流問題(Fenaughty & Parker, 2018)。

2.1.2 空調管理政策

關於空調電力使用管理，從生產者角度，是從將更多永續的冷卻技術嵌入法規文件中(Carbon Trust, 2021)，包括被動冷卻（避免或減少對機械冷卻的需求，包括減少冷卻負荷、智慧控制和以人為本的設計和城市規劃等）(Limb, 1998)、高效空調設備及附屬設施，以及低全球暖化潛力（GWP）冷媒等。Palafox-Alcantar 等學者提出的框架(圖 2-1)，顯示了生產網絡的一個方面如何受到多個節點的影響。例如，製造商故意降低電器價格，導致銷售量大增，以致市場需要低成本技術，否則新競爭者很難進入冷卻供應鏈的行業。因此，研究空調相關產品創新緩慢原因與相對應在供應鏈的因應策略，以及政策是否鼓勵更有效使用空調，進而使空調產品在製造、使用等生命週期階段減緩環境衝擊是重要的(Palafox-Alcantar et al., 2022)。

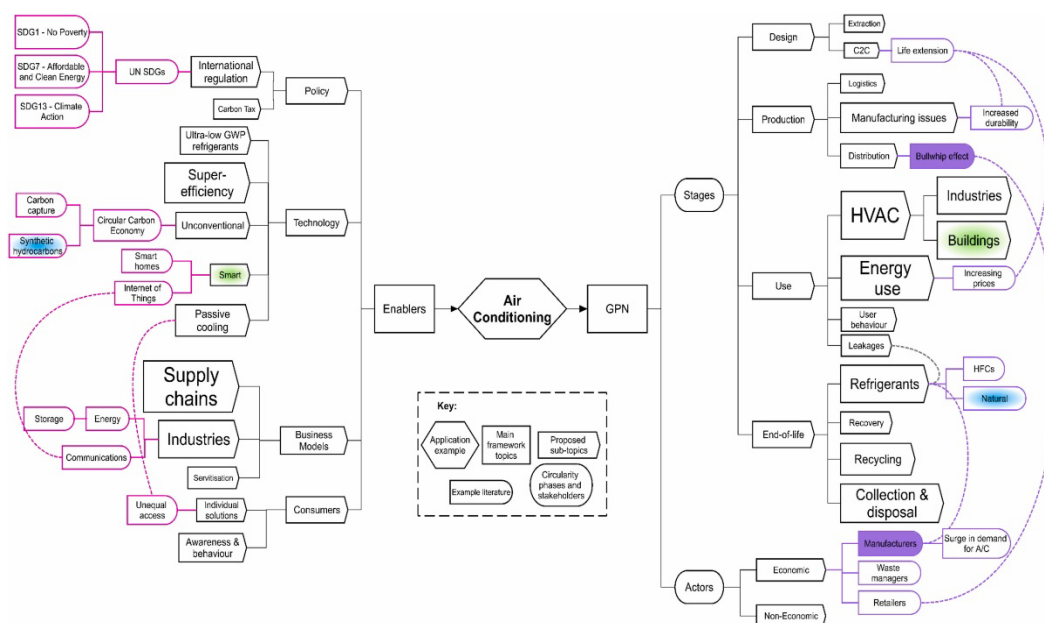


圖 2-1 應用於建築物空調的系統循環冷卻生產網絡框架(Palafox-Alcantar et al., 2022)

從消費者角度，則是建立產品汰換財政補助政策，希望促進消費者採取購買新的節能產品，來替代家電、汽車等耐用品，為了改進汰換方案的政策設計，Nishijima

等學者檢視 1995 年至 1999 年生產和 2005 年至 2013 年更換的家用空調，在 2009 年 5 月至 2011 年 3 月的日本家電生態點數計畫下，使用動態離散選擇和投入產出模型，來評估家用空調特定年份的更換率、單位成本下的溫室氣體的減排效果，如圖 2-2，發現家電生態點數計畫能使空調更換率可提高了 1.5%-1.9%，並減少了 28,516 tCO₂eq 的溫室氣體排放量。然而，每減少一噸 CO₂ 的成本約為 978 美元，這與過去研究替換方案的溫室氣體減排成本相比是相當高的(Nishijima et al., 2019)。

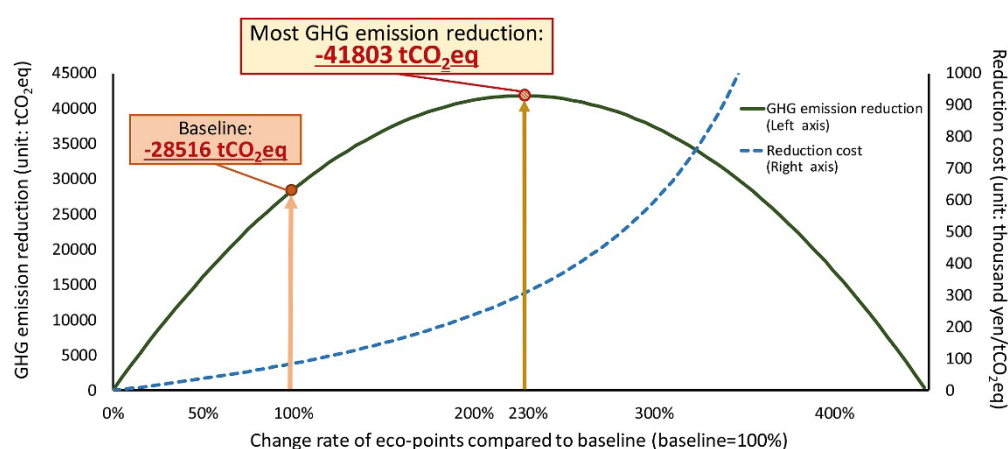


圖 2-2 家用空調更換的溫室氣體減排量和生態點數政策的減排成本(Nishijima et al., 2019)

從廢棄回收管理面，以台灣來說，從民國 87 年建立四合一回收計畫，整合社區居民、責任回收企業、地方政府和回收管理基金，對受管制可回收垃圾來回收。在 2017 年將廢棄電子電器設備（Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE）指定為受管制的可回收廢棄物之一，來推動合法的回收制度，以響應廢棄物管理和生產者責任延伸的國際趨勢，成功 WEEE 回收系統不僅可以減輕了衛生處理系統的壓力，還防止了固體廢棄物焚燒系統的危害物質排放風險。在台灣，WEEE 可以透過私人回收系統、供應商、地方政府城市固體廢物 (MSW) 回收人員、個體回收商和註冊回收設施，或直接從製造商和進口商（即負責企業）等管道回收(Tsai, 2020)。從消費者購買家電，使用、收集、處理流程，如，消費者使用完畢可回收

給零售商、清潔隊或社區收集中心，接著品質良好的產品或零件轉銷售至二手市場，而品質較差的剩餘部分則進入回收處理商，這些合法處理廠商則有回收管理基金的補貼(Xiang, 2020)。

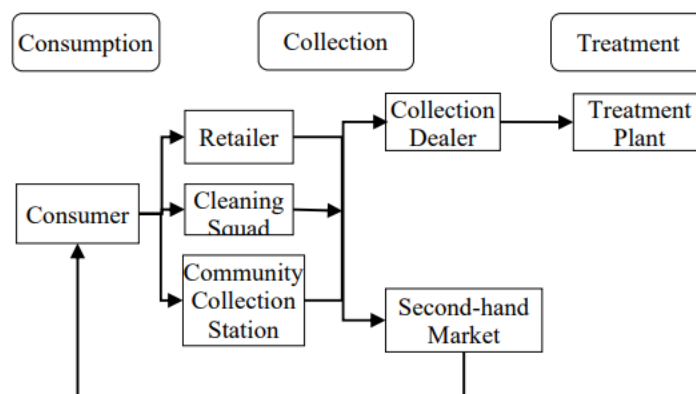


圖 2- 3 台灣廢家電收集管道(Xiang, 2020)

2.2 循環經濟策略於耗能相關產品之應用

循環經濟是一種維持(保護和增加)資源價值的經濟模式，旨在最大限度地減少環境負擔並持續促進經濟成長，以將經濟成長與自然資源使用脫鉤(Cullen, 2017)。有三個階段演進：1970-1990 年代，在歐洲、北美和日本透過「污染者付費」和「末端處理」等命令與控制廢棄物可能對環境造成的「污染」、1990-2010 年代，環境問題愈來愈被視為一種經濟機會，此時透過設計提高防治污染措施的效率成為顯學，減少殘留於可能污染環境的物質最終引導減少投入，連結生態效率的輸入(工業生態學、搖籃到搖籃等)和輸出側(例如：生產者延伸責任、產業共生等)的策略開始被討論、2010 年代以後，則發現在資源枯竭的時代宜最大限度地保留資源價值，包含二次資源應取代原始材料投入，依賴新商業模式激勵企業轉變。Reike 等學者曾說明 10 種持續維持資源價值的可能選項，如圖 2- 4，展示了從產品的初始生產到最終處置的各個階段，以及在每個階段如何通過不同的價值保留選項，包含 R0 拒絕(Refuse)、R1 減少(Reduce)、R2 再銷售、再利用(Resell, Reuse)、R3 修理(Repair)、R4 翻新(Refurbish)、R5 再製造(Remanufacture)、R6 重新利用(Repurpose)、R7 回收

材料(Recycle Materials)、R8 回收能源(Recover Energy)、R9 再挖掘(Re-mine)來延長產品的使用壽命和減少廢棄物。有助於理解在循環經濟中如何最大化資源利用並最小化環境影響(Reike et al., 2022)。

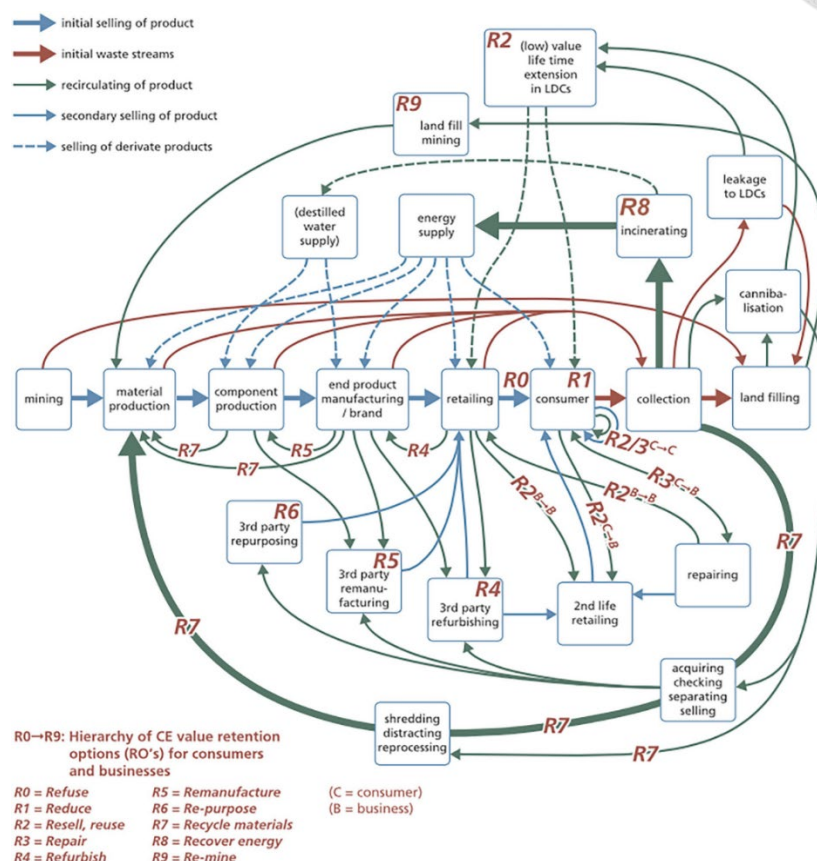


圖 2-4 在產品生命週期中循環經濟可能保留資源價值選項(Reike et al., 2022)

然而，實踐循環經濟須注意避免設定過於簡單化目標及需要重視系統性思考，即使是積極永續活動卻可能對環境產生非常負面的影響，例如在化石燃料的資源耗竭時代，對生物燃料的需求直接導致了數百萬英畝熱帶森林的消失，這些森林被用於生產生物燃料的大豆田所取代(Fargione et al., 2008)。系統性將經濟和管理措施，重新制定生態和社會模型，將對環境、經濟、社會等多面向可持續的商業模式有積極的貢獻(Murray et al., 2017)。

為了衡量循環經濟進展，依照循環經濟策略和測量範疇，發展特定指標是重要的，Moraga 等學者回顧既有研究發展的指標進行分類：首先，根據研究採用的循環經濟策略進行六大分組，前五組是保存資源價值的策略、最後一組是考慮參考場

景的基準，如表 2-2，再來，將指標考慮到生命週期思維(Life Cycle Thinking, LCT¹)、建模程度(產品技術週期及因果鏈²)分成三個測量範疇：(1) Scope0: 不採用 LCT 衡量技術週期中的物理特性，例如回收率；(2) Scope1: 採用全部或部分 LCT 方法衡量技術週期的物理特性，例如回收（材料）的潛在比率；(3) Scope2: 透過因果鏈模型衡量技術週期對環境、經濟和/或社會的正面或負面影響，例如對環境而言的必要收益率(Required Rate of Return, RRR)。將循環經濟策略及測量範疇交集如圖 2-5(Moraga et al., 2019)。

表 2-2 循環經濟策略分類(Moraga et al., 2019)

策略分類	內涵
功能	保留循環商業模式提供的產品或服務的功能，例如共享平台、產品服務化（以使用和結果為導向），或添加現有產品或系統額外功能。
產品本身	透過耐用性、再利用、修復、翻新和再製造等策略，透過延長使用壽命來保護產品。
產品組件	透過組件再利用、回收等來保護產品組件。
材料	將構成組件的材料進行升級或降級回收。
蘊含能源	透過能量回收，取得物質蘊含能源。
參考情境	衡量線性經濟作為參考情境，或缺乏保護策略，以顯示循環經濟的狀態是進步或退步。例如，一年中人均廢棄物產生量指標(Commission, 2018)顯示推廣循環經濟是否減少了廢棄物的產生。

¹ "Life Cycle Thinking"（生命週期思維）是一種旨在考慮產品、服務或系統在其整個生命週期中的環境影響和資源使用的方法。目的是在設計和決策過程中考慮從資源提取、製造、生產、分配、使用、直到最終處置的各個階段，以便最大限度地減少對環境的負面衝擊和資源消耗。

² "Cause-and-effect" 是指一種現象或事件（因）導致另一種現象或事件（果）的關係。這種關係通常用來解釋為什麼某些事情會發生，以及它們之間的相互影響。

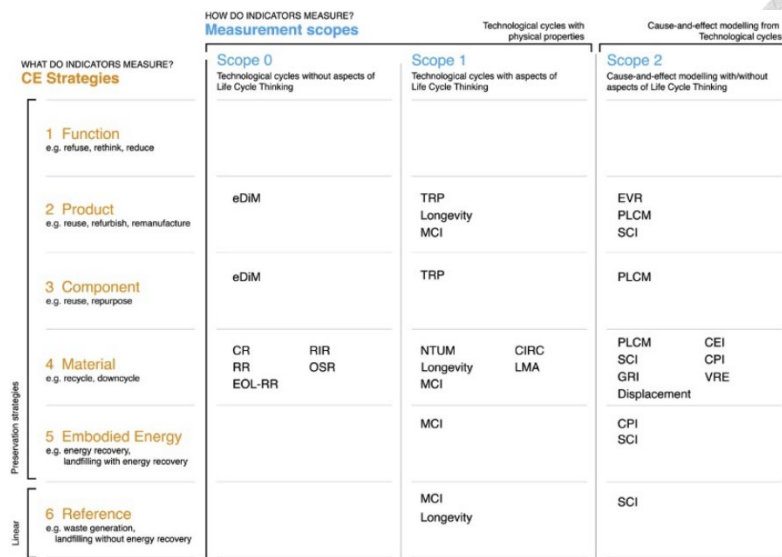


圖 2- 5 循環經濟指標根據研究提及循環策略及測量範疇分類(Moraga et al., 2019)

考慮不同層級的應用：在宏觀面(macro)，注重(國際)經濟環境之間物質交換；在結構或中觀(meso)層面，重點是工業系統中的物質流動，可能區分不同部門或產業類型；在微觀或商業層面，則關注公司及其產品(Peña et al., 2021)。在本研究中以微觀角度，以產品為單元，關注產品在不同空間流動狀況。

有諸多循環策略可以應用在耗能產品：(1) 產品使用中而言，透過消費者共享產品來降低減少對產品的總需求，例如自助洗衣店，來減少製造洗衣機的物料總需求(Bocken et al., 2016)；(2) 定期透過診斷僅更換部分零件，在表 2- 3 以下狀況，空調的冷凝裝置或蒸發盤管為了維持正常功能或避免極可能發生更大範圍的損壞情況下，是需要被汰換，但有些情況下應該考慮更換部分零件(Springer & Dakin, 2013)，但在本研究資料範圍內，無法很精確預測未來空調內的零件單元經使用後的品質狀況，故仍採取整組更換。有別於前幾者由製造商主導產品的維護或維修，Fairphone 可讓消費者自行拆解與更換零件，並提供更長的保固與零組件供應，延長手機壽命並推遲汰舊換新的速度產品；(3) 即將進入壽命終點前，持續及擴展產品價值，以製造商利用產品的剩餘價值為中心，並能夠透過再製造、維修、透過其他產品壽命延長設計策略，向客戶提供負擔得起的「新」產品，此通常是基於生產者延伸責任(EPR)和廢棄電子電機設備指令(WEEE)，例如升級機電系統、氣動系統

等設備的汽車(Bocken et al., 2016)。

表 2-3 分離式空調單元更換原則

	整組汰換	更換零件
冷凝單元	1. 系統使用超過 15 年。 2. 冷凝單元因為建築外殼隔熱進步(熱負荷降低)初始安裝設計冷氣噸過大。 3. 壓縮機通過電流高於額定標準或壓縮機失去功能或作動時太大聲。 4. 冷凝盤管損毀(遭侵蝕或壓縮變形)。	若壓縮機損毀，在考慮現有品質良好和大型的冷凝盤管下，只更換壓縮機(但仍為原始設計，而非新型)是具成本效益的。
送風機馬達	舊永久分離電容器(permanent split capacitor, PSC)更換為電子換向馬達 (electronically commutated motor, ECM) 有節能效益。	X

2.3 建築能源評估與冷負荷計算

冷負荷(Cooling load)指的是為保持空間乾球空氣溫度和濕度恆定而必須從空間去除顯熱和潛熱的速率(kW/m^2)，計算冷負荷以選擇適當冷風能力的空調設備以消除該區域的熱量(Khine, 2013)。建築設計、居住者、室外氣候條件、建築內部硬體設備等影響不同傳熱機制，造成有不同的建築冷負荷。ASHARE 手冊基本原理提到六種主要顯熱及潛熱來源：(1) 透明表面(例如窗戶)的太陽輻射；(2) 外牆和屋頂的熱傳導；(3) 天花板、地板和內部隔間的熱傳導；(4) 居住者、燈光、電器在空間產生的熱量；(5) 直接空間通風和室外空氣滲透進行能量傳遞；(6) 其他熱量(例如工廠生產機器散發的熱量)。不同區域和結構會導致上述因子對熱量增益貢獻比例不同，Speak 等學者，曾以不同氣候區畫分年冷負荷來源，比如在乾熱的氣候區，有約 30.4%、26.8%、23.1%分別來自直接熱輻射、內部(例如：電器設備、人、

燈光等)、管道³的貢獻(Speake et al., 2023)。

建築冷負荷預測方法一般可分為兩類。一是統計方法，基於大量能耗資料的收集和分析。資料的統計分析方法包括線性迴歸、機器/深度學習(例如：類神經網路、支援向量機等)，而此方法對於具有相似天氣、功能、規模和年齡的建築物的能源使用情況是有效益的，然而此類方法對於現今建築物和氣候的巨大差異和多樣性卻有限制，並非所有現有建築資料集都直接適用於規劃的新建築(Chow et al., 2004)，例如 Colelli 等學者便發現當能源使用僅由收入和人口因素驅動，而不是由不斷變化的氣候條件和隨後不斷增加的適應氣候需求驅動時，預測低估了建築部門的能源需求，並且說明在氣候變暖情境下，製冷(供暖)需求會增加(減少)(Colelli & Cian, 2020)。此外，需要大量建物聯網感測器來進行監測，需要大量的投資和管理裝置。另一種是利用建築能耗模擬程式來預測冷負荷，例如 DOE-2、Energy-Plus、TRNSYS 等，這些工具通常是應用於系統設計，把不同類型建築或建築特性(例如幾何形狀、材料等)進行比較分析，這些程式可以廣泛應用於大量的不同型態建築，可缺點是模擬本身的複雜性被納入一般設計實務有一定難度(Ellis & Mathews, 2001)。

2.4 產品生命週期評估模型與應用

2.4.1 產品生命週期評估

對於洗衣機或冷暖氣系統等「使用期間高耗能產品」(Energy using Product, EuP)，會出現透過延長產品的使用壽命來實現更大的環境效益，或者相反，透過儘早更換更節能的產品來實現更大環境效益的問題，整體評估對於避免負面影響

³ 管道：熱傳導和空氣洩漏進入到空調區域的管道，例如管道材料（通常是金屬）具有導熱性，會傳導熱量。如果管道內的空氣溫度低於管道外部的環境溫度，熱量會從外部通過管道壁傳導進來。

和促進永續消費至關重要(Hummen et al., 2023)。

要評估以上問題，需先從產品生命週期造成的環境影響開始檢視。國際標準組織 (ISO) 在 ISO-14044 中定義了執行生命評估評估 (Life Cycle Analysis, LCA) 的架構(Finkbeiner et al., 2006)。此方法包括四個階段：(1) 目標和範圍定義(Goal and Scope Definition)，指定義 LCA 的範圍，包括系統邊界、功能單位、研究對象的詳細描述以及所採用的方法和假設；(2) 生命週期清單分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)，收集並量化與系統相關的所有輸入和輸出數據，包括原材料消耗、能源使用、排放到空氣、水和土壤中的物質等；(3) 生命週期影響評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)，對 LCI 階段收集的數據進行分析，評估其對環境的潛在影響。LCIA 包括選擇影響類別(如全球暖化潛力、酸化、富營養化等)，並將清單數據轉換為這些影響類別的指標值；(4) 解釋與闡述(Interpretation)，對 LCA 的結果進行分析和解釋，確保結果的一致性和準確性，包括說明 LCA 結果的結論、限制因素和建議。基於環境影響評估的 LCA，生命週期成本評估(Life Cycle Cost, LCC)亦是常見的，考慮產品或系統全生命週期中，(1) 購置：與購買或建造資產相關的初始成本，包括購買價格、安裝和測試；(2) 營運：營運資產所需費用，例如能源消耗、勞動力和其他資源；(3) 維護：資產維持在正常工作狀態所產生的成本，包括日常維護、修理和保養；(4) 處置：與資產使用壽命結束時的處置或退役相關的費用，包括拆除、回收等成本；(5) 其他：培訓、升級相關成本，以及生命週期中可能出現任何無法估量的費用等成本，以上計算之成本可提供購買或重大投資決策時財務影響。

關於 LCA 的延伸應用方法，Kuo 等學者利用針對環境影響有重大影響的產品模組或產品組件，配合深度優先搜尋(Depth First Search, DFS)演算法、相似度閾值(Similarity threshold)之資料檢索、多屬性函數(Multi-attribute function)之資料分析的綜合結構方法，發展預測性 LCA 方法，將相似產品的屬性與新產品進行匹配，計算新產品環境影響，來解決新設計的產品或系統，資料取得、計算等困難且耗時的

生命週期評估 (LCA) 之問題(Kuo et al., 2016)，包含四大主要步驟：(1) 確定產品的屬性；(2) 現有設計若已有環境影響數據，從現有設計中匹配新設計的產品屬性；(3) 計算無法匹配屬性或與現有設計不相似的新設計的環境影響；(4) 從資料庫中提取新設計的生命週期評估 (LCA) 結果。DFS 是一種用來遍歷或搜尋圖(Graph)或樹(Tree)資料結構的演算法。DFS 從一個起始節點開始，沿著每一條分支一路走到底，直到達到葉節點或沒有未訪問的鄰接節點為止，然後回溯到上一個節點，繼續探索其他未訪問的鄰接節點。上述過程會一直重複，直到所有的節點都被訪問過為止。使用 DFS 在此研究提供的預測性 LCA 優點是，在產品相似圖建立之後，如果有新的設計添加到資料庫中，系統只需要透過在新設計和其他先前設計之間添加新節點，來擴增現有的相似圖，系統不需要再次處理任何相似分組的演算法。

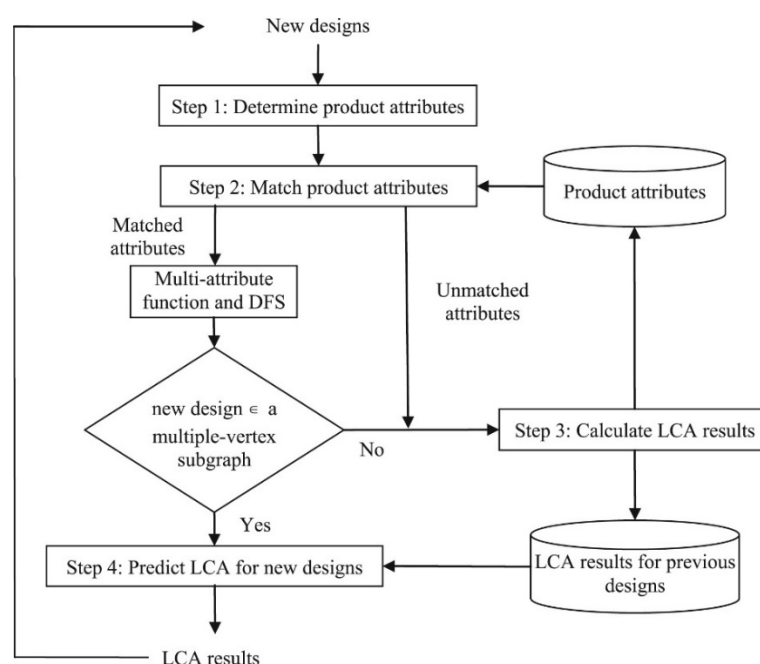


圖 2-6 新的生態設計流程，採用預測性 LCA 方法(Kuo et al., 2016)

以空調而言，進行幾項 LCA 和 LCC 的研究，考慮不同氣候、產品設計和環境之空調系統的生命週期評估，包含探討功能單位的選擇(DeMarco & Fortier, 2022)、不同永續技術，例如地源熱泵和空氣源熱泵、機械通風和熱回收等空調系統(Finnegan et al., 2018)、探討定風量和變風量空調系統的生命週期成本分析(Aktacir

et al., 2006)等。即使有不同技術都在生命週期評估方法下被探討，但平均而言，幾乎所有與電網相連的蒸汽壓縮冷媒(Vapor-compression refrigeration)冷卻系統產生的溫室氣體排放都發生在運作(Operation)階段(~90%)、太陽能熱吸附(Thermal solar sorption)冷卻系統在運作(Operation)階段(~70%)、以太陽光電結合冷卻系統(AC systems powered by PV panels)則在預運作階段(即運作階段前)和運作階段(~53%)(Litardo et al., 2023)。

2.4.2 生命週期環境及經濟影響優化

利用生命週期評估結果，結合對關鍵各階段環境、經濟影響結果的參數，對未來預測或利用過去歷史資料評估系統或產品設計、配置、運作、替換等環境、經濟問題之優化。

多能互補分散式能源系統 (Multi-energy Complementary Distributed Energy System, MCDES)⁴的優化涉及容量配置、結構設計以及設備在單位時間內的運作協調，以解決負載削峰填谷的問題。然而，建造和運作 MCDES 不可避免地會對環境產生一定的影響。Liu 和 Wang 等學者指出，從社會發展和環境保護的角度來看，人們更傾向於減少能源活動產生的污染物排放。但系統建設者或投資者更關注經濟成本。因此，MCDES 的規劃與運作涉及不同決策者的多重目標，形成典型的雙層多目標最佳化問題(Liu et al., 2022)。在雙層多目標最佳化問題中，上層決策者透過自己決策來引導下層最佳化。同時，下層決策者將上層決策作為參數輸入或限制條件，使其能夠在指定範圍內做出獨立決策。上下層資訊交流具有及時性與反饋的功能作用，示意如圖 2-7。

⁴ 多能互補分散式能源系統：一種整合多種能源資源的能源供應系統，通常包括風能、太陽能、生物質能、水能和儲能技術等。這種系統的目的是通過多種能源的互補特性來提高整體能源系統的可靠性、穩定性和效率，並減少對單一能源的依賴。

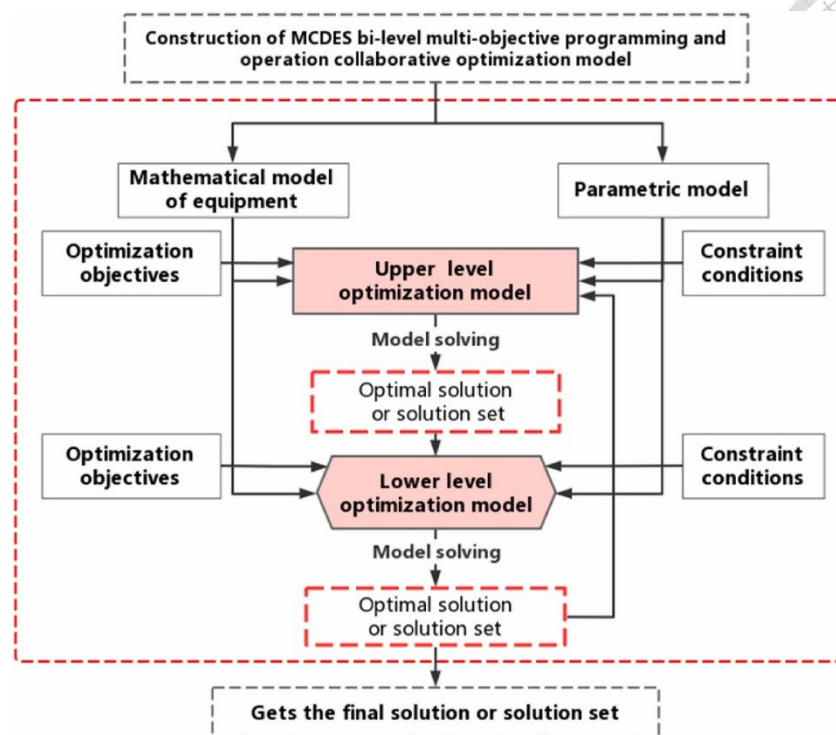


圖 2- 7 MCDES 雙層多目標協同最佳化模型框架(Liu et al., 2022)

Abdallah 等學者發展基於三種標準 LCA 方法(IMPACT、CML 和 ReCiPe)的多準則(Multi-Criteria)評估框架，開發兩階段的單目標最佳化模型，將三種廢棄物（可生物降解的、可回收的和不可回收的）分配給選定的廢棄物增值設施(Waste Valorization System)⁵，以盡量減少對各種 LCIA 類別的環境影響。第一階段的單目標模型最小化每個環境影響類別的影響，達到帕雷托最適(Pareto optimality)，再利用層級分析法(AHP)，將不同方法的影響類別局部重要性權重，納入第二階段的單目標最佳化過程，最小化每個單目標模型的最佳化值與 Pareto 前緣之間的變化 (Abdallah et al., 2024)。

Kiss 等學者採用非支配排序遺傳演算法（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA）(Deb et al., 2002)，對不同建築設計方式（如窗牆比、玻璃類型、

⁵ Waste Valorization System 是一種將廢棄物轉化為有價值產品或能源的系統。這種系統的目的是通過各種技術，例如利用微生物進行厭氧消化有機廢棄物，產生沼氣。將不同類型的廢棄物資源化、再利用或轉化為能源，從而減少環境污染。

遮陽、框架類型、絕緣)進行環境及經濟多目標最佳化,旨在最小化建築物的生命週期全球暖化潛力影響和生命週期成本,這種多目標最佳化的求解法優點是可以同時處理多個目標,不需要將多個目標轉換為單一目標,並能有效地逼近和覆蓋帕累托前沿(Pareto Frontier),提供多個妥協解供決策者選擇(Kiss & Szalay, 2023)。

針對高耗能產品的替換問題,利用情境評估法,Boldoczki 等學者考慮效率提高、使用時間和電力結構的變化,對重複使用和每個能源效率等級的新產品進行量化影響評估,描述最大使用持續時間和節能潛力(Boldoczki et al., 2020);利用消費者行為分析,消費者感知價值(即功能價值、社會價值和情感價值)的因素在產品壽命延長或替換具有高度影響力,並解析設計師、生產商和行銷人員等供應商提供關於價格、品質、產品設計和產品意義、售後服務(例如維修服務)如何影響消費者對產品的理解,進而延長產品壽命(Shi et al., 2022)。利用優化方法,Hummen 等學者討論不同更換產品的特性:(1) 新生產相同產品:但改進的技術、相似的產品特性和相同的功能單位;(2) 再製造:將用過產品恢復到至少新產品,效率與新產品相同且效率遞減曲線與原來產品相同;(3) 升級再製造:產品被重新製造並更換了磨損的零件。再製造和升級過程中造成的影響介於再製造和新生產之間;(4) 技術切換:不同技術但相同功能單位,優化在影響損益平衡時的平均影響率,圖 2-8 展示以 B 取代 A 產品合適時間點示意圖,在 $t = 0$ 因購買 A 產品而生產及廢棄回收舊產品而造成 $I_{P,E,A}$, I_A 表示隨著使用階段的时间累積環境影響,當在 $t = t_1$ 更換 B 產品,若 B 產品在使用階段有更低的環境影響率($\frac{\Delta I}{\Delta t}$),在 $t = t_2$,當持續使用 A 產品與中途更換 B 產品的環境影響平衡時,B 產品的技術壽命時間還未到,因此 $I_{P,E,B,remaining}$ (即一部分的 $I_{P,E,B}$ 在剩餘的使用階段)因為本屬於持續使用 B 產品的環境影響而被減少,因此該模型藉由最小化 $I_{t_2}(\frac{t_2}{t_2})$,來取得更低系統內的環境影響(Hummen & Desing, 2021);Hummen 等學者考慮分析新產品效率提高和持有產品效率下降的重疊效應、能源基礎設施(發電結構)等多種可能情境,利用動態生命週

期評估來評估高耗能產品的最佳環境壽命 (OEL)(Hummen et al., 2023)。

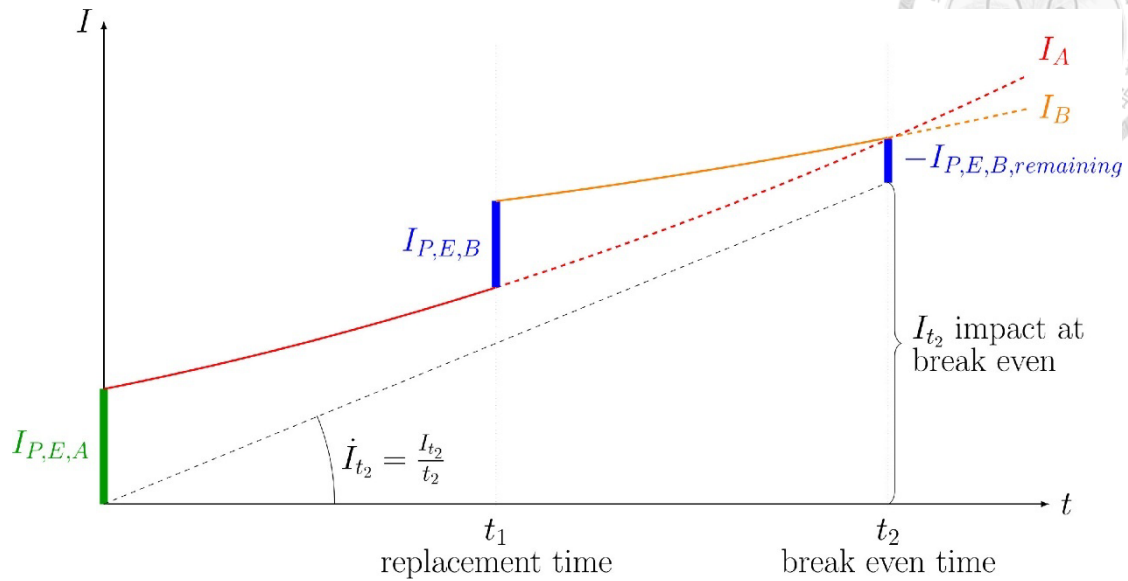


圖 2- 8 以 B 取代產品 A 隨時間變化的影響示意圖(I 表示任一環境影響指標、t 表示時間)(Allwood et al., 2011)

Liao 等學者開發基於離散時間馬可夫鏈 (Discrete-Time Markov Chain, DTMC) 數據驅動的馬可夫決策過程 (Markov Decision Process, MDP) 框架，作者評估系統具有不確定及隨機性，並蒐集醫療設備維修和維護資料集計算是否維修或替換等狀態之轉移機率，來優化醫療設備最佳維修或更換時間。圖 2- 9 顯示醫療保健產業、產品經銷商和維修中心之間流程。醫療保健商是此模型的主要決策者。情境是假設收到損壞的產品，故障原因會記錄在資料庫中。如果產品在保固期內發生故障，經銷商將免費提供新的更換產品。否則，醫療保健商需要決定維修和更換。此模型主要是基於最大化經濟利益進行決策分析(Liao et al., 2021)。

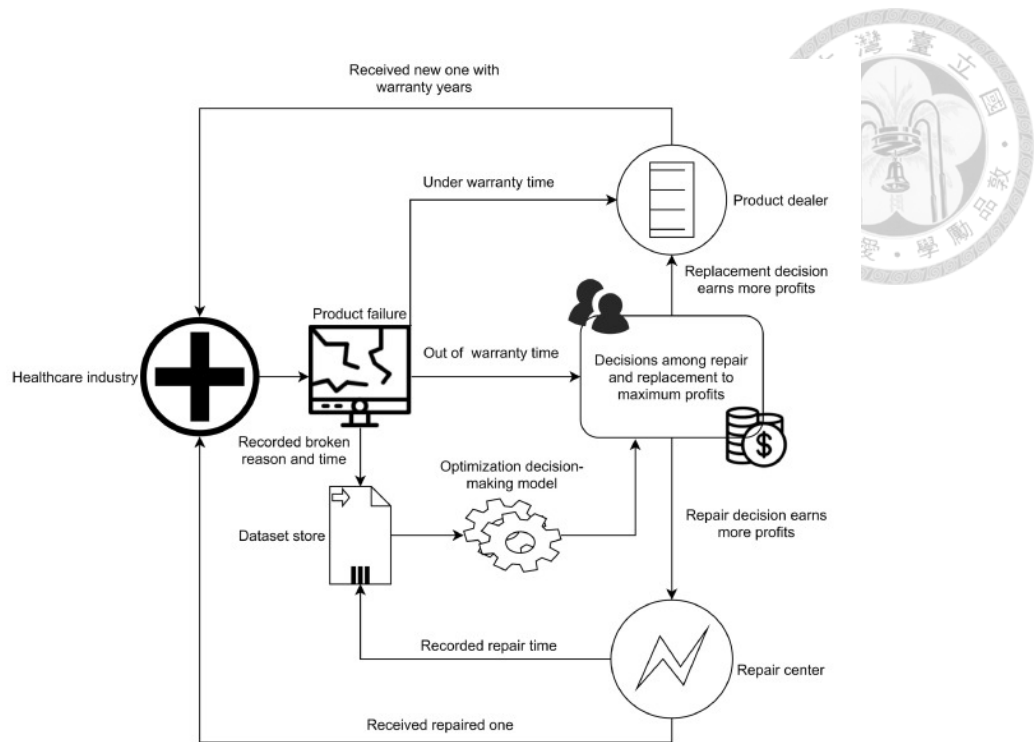


圖 2-9 醫療保健產業、產品經銷商和維修中心之間的關係(Liao et al., 2021)

綜合比較上述生命週期評估或環境或經濟影響優化中的數學方法進行比較分析，整理如表 2-4，由於本次研究主題鎖定系統總累積環境影響為最小化之單目標，故淘汰 NSGA、MCDA。目標研究對象(台大宿舍)並未有過去實際同時考慮替換、接收他人空調(移機)、持續使用之決策與影響因素的大量資料集，無法確認狀態轉移機率，故淘汰 MDP。現有文獻的利用 DP 絕大部分是求最佳解，然而，本研究希望可以在最小化環境影響下設置上限，來包含更多元產品循環途徑，提供給空調服務商使用，如欲利用 DP 求妥協解，則需要兩步驟進行，先求最佳解再加入額外的約束條件來限制解的範圍。相較 DFS，儘管既有文獻利用 DFS 進行生命週期環境及經濟優化較少，但本作者發現可善用 DFS 有向樹狀圖的特點，設定起始、每個彼此連接(可能路徑)節點、結尾節點，雖然一次的深度搜尋只能找到由起始節點到結尾節點的一條路徑，但因為能避免重複訪問節點，並儲存當前路徑的累積加總數值(即累積環境影響)，能快速完成一次搜尋時間，記錄多個路徑計算的累積環境影響，亦可滿足提供更多元產品循環途徑之研究目標，故本研究最後選取 DFS 求最佳及妥協解。



表 2-4 過去文獻於生命週期評估或環境或經濟影響優化之數學方法(本作者整理)

	動態規劃 (Dynamic Programming, DP)	馬可夫決策過程 (Markov Decision Process, MDP)	非支配排序遺傳演算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)	多標準決策分析 (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA)	深度優先搜索 (Depth First Search, DFS)
適用範圍 (或特點)	- 適用於分解為多階段決策問題 - 通過求解子問題來解決整體問題 - 使用遞推(Forward induction or Backward induction)方式計算最優解	- 適用於決策過程中存在隨機性的問題 - 基於狀態轉移(即某狀態採取某行動轉移到另一狀態)機率和回報函數(每個狀態和行動對應的獎勵)進行優化	- 適用於多目標優化問題 - 基於遺傳演算法的選擇、交叉和變異操作進行搜索	- 適用於需要考慮多個標準或目標的決策問題，可歸納 - 可利用客觀(例如熵權法⁶)、主觀(專家)決定目標或標準之權重	- 遍歷或搜索樹或圖的演算法 - 優先探索到達最深處的節點
優點	效率：對於結構化問題，能顯著降低計算成本	處理不確定性：能夠處理決策過程中的不確定性和隨機性。	多目標處理：能同時處理多個互相衝突的目標，逼近 Pareto 前沿	靈活性：適用於多種決策場景，可以考慮定性和定量標準	內存記憶體利用率低：只需要存儲當前路徑上的節點(但當有龐大可能路徑組合利用率仍高)
缺點	- 狀態空間：需要存儲分解子問題大量的狀態信息，可能導致記憶體不足 - 僅適用於可以分解為子問題且具有最優子結構性質的問題	- 轉移概率估計：需要準確估計狀態轉移概率，這在實際應用中可能困難(需要大量且經驗證的資料集) - 計算複雜度：對於大狀態空間問題，計算複雜度很高	參數敏感性：該演算法對參數設置較為敏感，需要進行調參	標準權重：需要對不同標準進行權重分配，可能涉及主觀判斷	運算速度：需要找到底層，若底層太深，因此可能會搜尋較慢

⁶ 熵權法利用數據的熵值來確定每個標準的信息量，熵值(變異性)愈大，該標準的信息量愈小，其權重愈小。這是一種基於數據變異性的客觀方法。



本研究先後回顧文獻，了解：(1) 空調系統基本簡介及管理政策：建立空調運作原理、能耗受損概念和管理政策中在既有研究切入角度；(2) 循環經濟策略於耗能產品之應用：包含透過耗能產品使用率提高，減少隨時間推移環境因素對產品損耗、透過維修/維護使產品價值持續延伸等；(3) 建築冷負荷評估主要可分成統計和能源軟體等兩種主流方法；(4) 產品生命週期環境及經濟評估及優化：包含設定不同產品或環境情境，利用動態規劃、多標準決策等數學方法，來決定系統配置、產品替換決策等應用問題。

然而，作者也從既有文獻發現，除了替換、持續使用之外的取得他人空調之決策選項、產品特性與空間條件等空間現況更新、基於現實服務需要非單一最佳的多元產品循環途徑，並未在評估方法或模式當中被納入考慮。因此，本研究建立以下的研究方法以突破這些限制。



Chapter 3 研究方法

本研究提供基於深度優先搜尋演算法的空間性生命週期優化模型(DFS-Based Spatial Life Cycle Optimization Model, DFS-SLCO)，如圖 3-3，主要可分成(1) 約束條件建立；(2) 建立經過篩選約束條件後每個決策時間點的決策矩陣；(3) 計算每個決策時間點系統內的環境影響；(4) 深度優先搜尋演算法尋找最佳及妥協解。

- (1) 約束條件建立：建築能源模型建立建築空間冷負荷、蒐集空調技術壽命、安裝空間大小、使用者最少持有時間等資訊(參考 [3.1.3](#) 節)。
- (2) 根據各個空調使用者於決策時間點(年)之現況建立過濾矩陣，並從所有可能的決策組合篩選數個決策矩陣(參考 [3.1.3](#) 節)。
- (3) 根據決策時間點(年)引入排放係數，計算系統內的環境影響，並將參與產品服務化使用者的總環境影響以有向之樹狀圖表示(參考 [3.2](#) 節)。
- (4) 考量服務商實際服務對象時在某些年份會發生配合困難等問題、讓決策途徑並非只有唯一一種，利用深度優先搜尋演算法尋找最佳及妥協解，在最小的累積環境影響之一定比例內的決策途徑組合都可以納入考量(參考 [3.3](#) 節)。

本研究發展的 DFS-SLCO 模式，其展示的目標對象如圖 3-1 的黃色座標的宿舍空間、紅色座標的服務商假定是位於新北市五股區的某空調工程公司，將產品服務化應用於模式中的產品策略，包含維護/保養、回收/EoL 管理、優化環境影響指標。策略之模式設定如表 3-1，並將運作流程及空調效率、冷媒洩漏率之參數預期趨勢結果範例呈現如圖 3-2。空調服務商根據模式產出的每台空調每個決策年處理決策進行空調產品的資源管理，例如於 2030 年，在 A 空間購買新空調、B 空間取得 A 空間之空調。而模式可根據不同區域或空間的基礎條件，包含不同區域的空間參與，提供區域規模的環境管理者在有限經費及特定族群(例如餐飲業)下，欲推動產品服務化策略進行空調管理，來選擇適當特定空間參與 PSS 的環境效益。

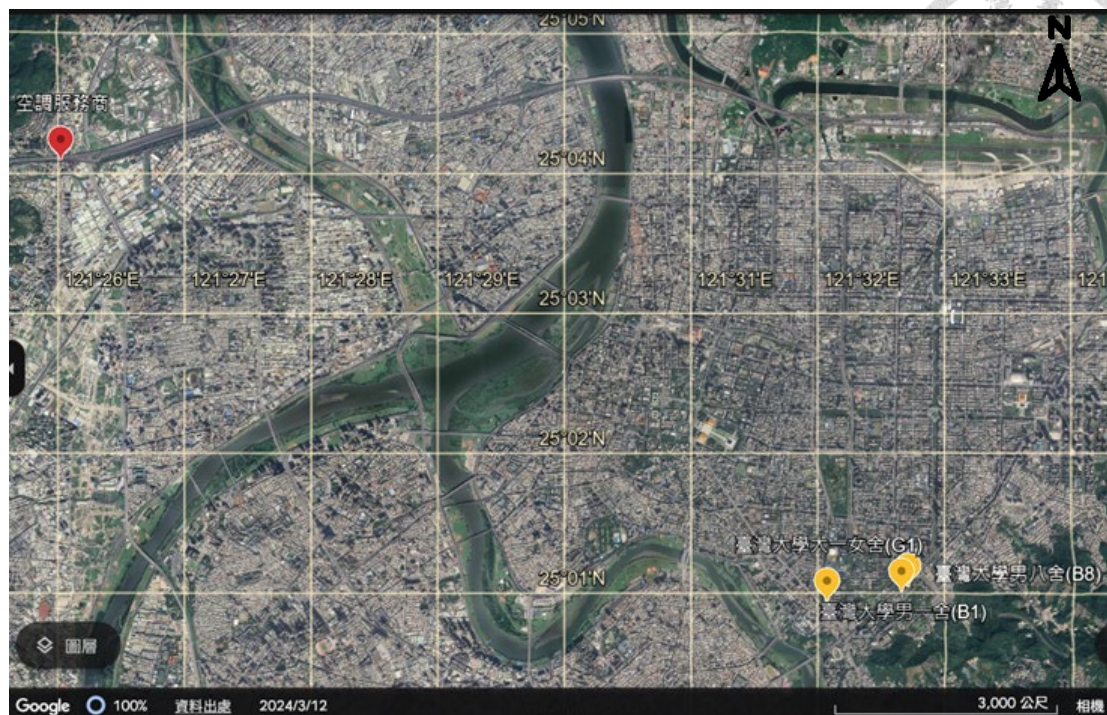


圖 3-1 模型展示的目標對象相對位置



表 3-1 本研究之空調服務商、參與及不參與產品服務化的空調使用者模式設定

	空調服務商	參與 PSS 的空調使用者	不參與 PSS 的空調使用者
空調權利	參與 PSS 的空調使用者之空調所有權 (可支配空調去向及處置方式)	使用權	所有+使用權
保養服務	提供冷媒洩漏等整理檢查、室內機濾網、室外機風機清洗等	與空調服務商簽訂定型化契約，空調使用時間多久後進行保養、保養之間隔多久 ※保養期間具有能源效率遞減減緩、冷媒洩漏率降低之效果	自行決定保養週期(在本研究設定與 PSS 相同) ※保養期間具有冷媒洩漏率降低之效果
產品管理	決定各參與 PSS 的空調使用者，何時替換或配置空調流向，使總系統累積環境影響最小化	配合空調服務商	無

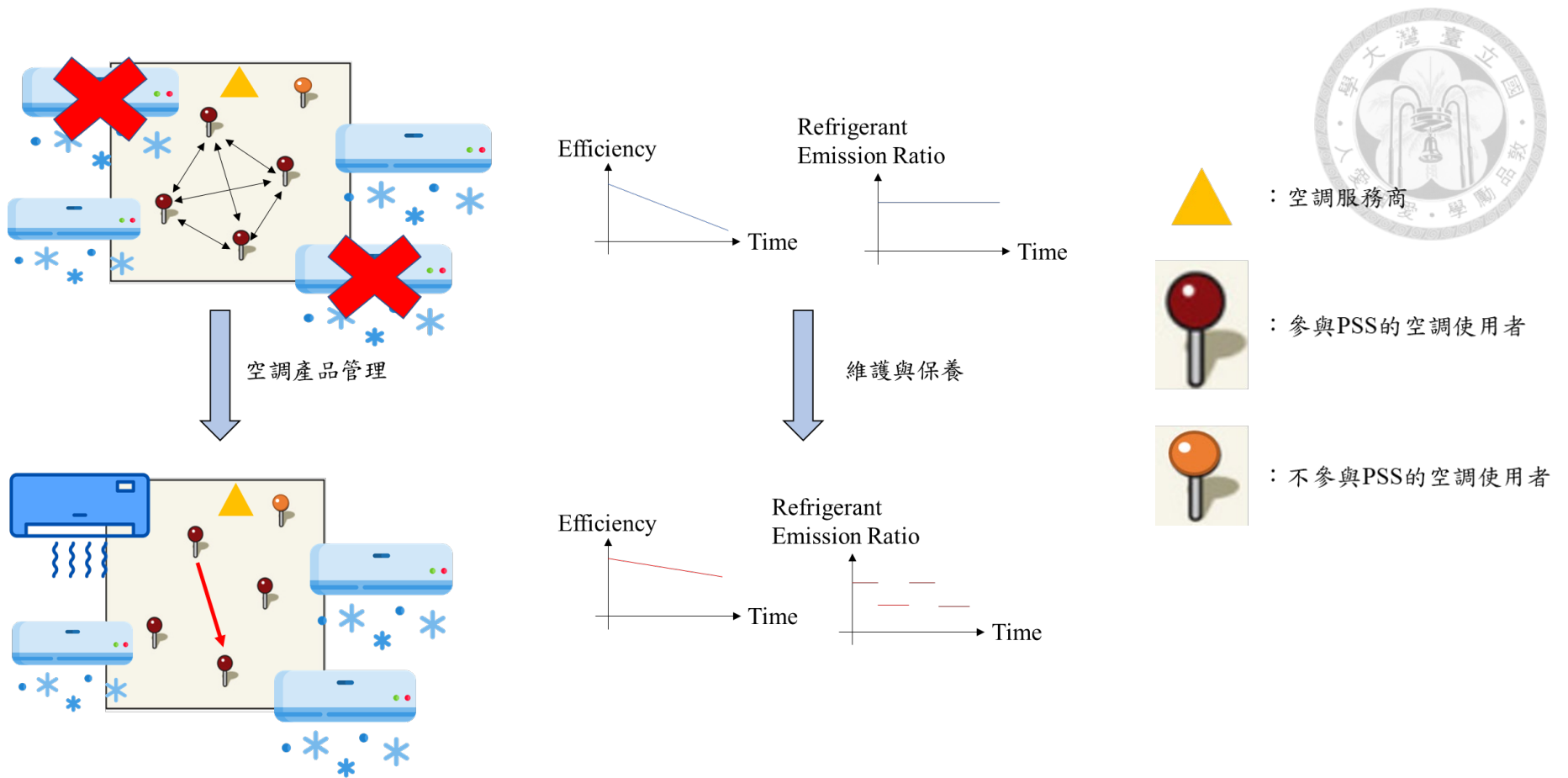


圖 3-2 本研究之產品服務化涵蓋主要應用策略示意圖

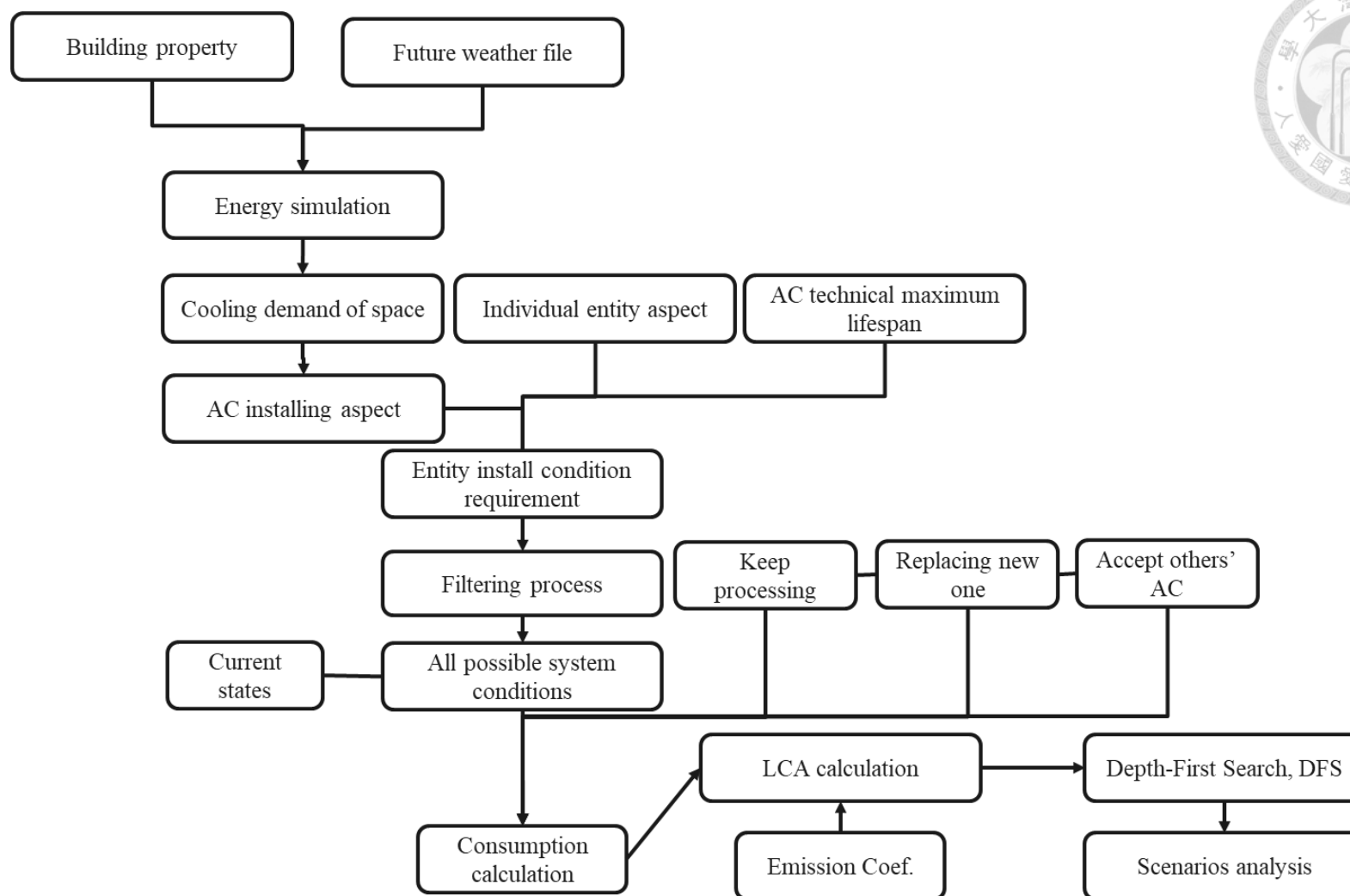


圖 3-3 研究方法流程架構圖



3.1 資料蒐集及處理

3.1.1 基本資料蒐集

由於不同冷氣使用者的冷房能力、品牌等非常多元，為了簡化多元空調生命週期各階段環境影響的計算，本研究將功能單位定義為具有 1 kW 平均冷房能力。為了確定計算建築空間空調系統的冷負荷需求，分別使用 Rhino 建立三維建築模型及 Grasshopper 建立建築能源分析模型。本研究取得台北市 TMY3 的氣候年資料，並利用未來氣候年產生器，來製作 SSP2-4.5、2036-2065 之台北市未來氣候年 (Rodrigues et al., 2023)。根據台灣大學的男生第一、八宿舍、大一女生宿舍建築圖，繪製僅有一樓的建築空間，儘管白天中午時段愈高樓層冷負荷需求較高，但對於宿舍、高樓層公寓等住宿類建築多半此時都在外，所以冷負荷需求集中在晚上，而在晚上愈高樓層外氣溫度降低，進而減少冷負荷需求 (Yu et al., 2022)，本研究為了在有限電腦運算時間最大化展示模型應用，因此主要針對六個晚上冷負荷需求較高的低樓層空間，進行案例說明。另，本次目標對象選取學生宿舍空間，故僅說明與宿舍空間有關的重要設定參數，如表 3- 2，此研究假設建築至 2045 年空間格局及裝修大致不變。取得六個空間的未來氣候年的最大冷負荷需求後，乘上 2 倍安全係數，保守估計至 2045 年前的最大冷負荷需求。將之放入各空間安裝限制條件，該空間取得的空調之冷氣能力至少需大於或等於各空間的最大冷負荷需求。



表 3-2 建築能源模型重要參數設定

項目	參數	數值	單位	來源
宿舍空間基本設定	建築專案範本(Building Programs)	2019::MidriseApartment::Apartment	略	ASHRAE 90.1 2019 IECC 2015)
空調	開啟時間	21~09	略	略
	設定溫度	24	°C	略
其他冷負荷設定	人口居住密度	0.23	capita/m ²	4 人/空間面積
	電器設備密度(Equipment Power Density)	517	W/m ²	(王榮進, 2022)
	照明密度(Lighting Power Density)	6	W/m ²	(林國華, 2023)
外牆材料	厚度(thickness)	20	cm	Honeybee Standard Library(ASHRAE 90.1)
	熱傳導係數(Thermal conductivity)	0.72	W/m-K	
	密度(density)	800	kg/m ³	
	比熱(Specific heat)	831	J/kg-K	
窗戶材料	熱傳透率(U-factor)	2.2712	W/m ² -K	Honeybee Standard Library(ASHRAE 90.1)
	日光輻射熱取得率 (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)	40	%	
	可見光穿透率(Visual Transmittance, VT)	31	%	



新替換空調的備選名單，因空調類型多且性能差異大，本研究將 2023 年 Hitachi 的空調型錄抽取冷氣能力、CSPF、製品重量、外型尺寸等資訊整理成清單後，上述方式在既有文獻也被利用(Li et al., 2021)。本研究利用台灣「無風管空氣調節機節能標章能源效率基準與標示方法法規無風管空氣調節機」制定的能源效率基準值進行線性迴歸，比例取得 2026-2045 年的 CSPF 更新變化，根據 CSPF 理論極限值約為 8.1~9.5 kWh/kWh(ITRI, 2013)，本研究迴歸估計得出的 CSPF 皆沒超過此值，其他空調性質資訊假設不變。冷媒原始填充量則是 0.8 kg/RT 進行估算(ITRI, 2005)。

案例宿舍空間的空調現況，則是由台灣大學永續辦公室整理出的空調清單，其中台灣小型空調機至 2016 年起採用 CSPF 能效標準，針對 2016 年以前的定頻機和變頻機則乘以 1.05 及 1.2 倍，將 EER 換算成 CSPF(ITRI, 2013)。其餘單位轉換在此省略不贅述。

本研究環境影響僅考慮歐盟環境足跡 EF3.1 的 16 項衝擊指標中的溫室效應，並使用排放係數法計算排放造成的環境影響，因此需要整理係數庫。基本情境的係數蒐集來自於空調生命週期過程定義的排放量種類，為簡化運算環境影響，僅考慮主要材料/製造、包裝、冷媒洩漏、交通運輸、電力使用、廢棄處理等六大類別。係數來源參考表 3-3。

表 3-3 基本情境的係數設定

類別	係數名稱	數值	單位	來源
材料/製造	空調材料與製造	206.99	kgCO ₂ /kW	(da Costa Garcia et al., 2021)
包裝	AB flute carton (two layer)	1.19	kgCO ₂ /m ²	產品碳足跡資訊網
交通運輸	Light truck (business usage, diesel)	0.587	kgCO ₂ /tkm	產品碳足跡資訊網
冷媒洩漏 ⁷	R410a	1725	kgCO ₂ /kg	溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版
	R32	650	kgCO ₂ /kg	溫室氣體排放係數管理表 6.0.4 版
電力使用	電力排碳係數	0.415(2025 年)	kgCO ₂ /kWh	(Wang & Lee, 2024)
廢棄回收	空調廢棄回收	10.51	kgCO ₂ /kW	(da Costa Garcia et al., 2021)

3.1.2 參數變動處理

本研究電力使用的排放係數，根據 ISO 14067 應使用電力碳足跡，但因為係數至本研究完成(2024/06/05)為止，僅更新至 2021 年，因此為更準確評估隨時間變動的係數變化，使用電力排碳係數(Wang & Lee, 2024)，而因該文獻是每五年進行預測評估，中間年份使用內插法進行補值。

持有空調隨著使用時間增加，CSPF 發生遞減的情況，透過保養與維護可適度維持，式 3-1 修改文獻的經驗迴歸式(Fenaughty & Parker, 2018)，引入 $\phi(\psi(t))$ 作為 PSS 的能效減緩遞減因子，愈小代表能減緩能效的效果愈好，若不保養則為 1。而該年度空調耗電量為冷風能力(kW)/CSPF(kWh/kWh)*使用時間(1200 hr/yr)。

⁷ 已考慮溫室氣體的 GWP(全球暖化潛勢)

$$CSPF(t, l) = CSPF(t, 0)$$

$$\times [1 - (0.0370074 + 0.0032956(l)) \times \varphi(\psi(t))]$$

t 和 l 分別指的是第 t 年購買的空調，由一位以上的空調使用者累積使用時間(單位：年)

φ ：PSS mitigating efficiency decay factor($0 < \varphi \leq 1$)

$\psi(t)$ ：1 或 0，分別代表要或不要維護保養(後面會說明判斷邏輯)

冷媒洩漏，依照 ISO 14064，會依據銘牌原始冷媒填充量(RF)乘上逸散率(LK)，但因為既有宿舍空間的空調銘牌可能發生掉落的現象、網站查找型號也沒有顯示原始填充量的資訊，故使用冷氣能力(kW)估計原始填充量(ITRI, 2005)。逸散率若有無經過保養與維護，分別 1%和 5%代入(Dario Abramskieh, 2019)。

利用空調室內、室外機的長寬高，各加上 4 cm 來估算紙箱所需的表面積，進而計算運送包裝造成的環境影響；交通運輸則是假設本研究訪問的合作新北空調服務廠商為設定的空調服務商的案例地點，利用 Google map 估算特定棟別至空調服務商的距離，並利用蒐集新空調資料中的重量，即可計算運輸排放造成的環境影響。

3.1.3 設定條件限制

條件限制判斷主要分成兩種，分別是決策篩選矩陣，及特定空調是否進行維護保養。

首先第一部分是建立決策篩選矩陣，本研究有必要為每個決策時間點，區域內的空調使用者定義一個合理的決策矩陣。這裡有兩個階段，第一階段在表 3- 4 中列出，同時滿足式 3- 2 到式 3- 6，並自動生成所有矩陣組合。式 3- 2 代表了針對特定的空調使用者，所有可能選項的總和，包括接受或拒絕來自其他人的空調、是否繼續使用它；式 3- 3 代表了空調使用者將空調選擇給他人（稱為空調提供者）或留給自己(持續使用)的選項總和；式 3-4 確保在給定每年決策時間點，針對特定空調使用者，空調決策選項的總和必須也只能等於 1，原因是研究假設在同一空間，

並不會不裝或裝兩台以上的空調，這些選項包括繼續使用、從他人那裡獲得空調或在市場上購買現有的空調；式 3- 5 代表現持有的空調可以持續使用，或可以給他人，以上兩者之總和為 1；或直接進入廢棄回收，則總和為零；式 3-6 表示每個選項只能是存在或不存在，分別代表 1 或 0。

表 3- 4 每個空調使用者的空調決策情境原型

Giver Acceptor	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	...	$X_{m,n}$	B
$X_{1,1}$	$Y_{1,1_1,1}$	$Y_{2,1_1,1}$	...	$Y_{m,n_1,1}$	$B_{1,1}^{New}$
$X_{2,1}$	$Y_{1,1_2,1}$	$Y_{2,1_2,1}$	...	$Y_{m,n_2,1}$	$B_{2,1}^{New}$
...	...	...	...	...	...
$X_{m,n}$	$Y_{1,1_m,n}$	$Y_{2,1_m,n}$	...	$Y_{m,n_m,n}$	$B_{m,n}^{New}$

$$\sum_{f'}^{F'} \sum_{y'}^{Y'} Y_{f'y',f_y} = y_{f_y_Acceptor} \quad \text{式 3- 2}$$

$$\sum_{f'}^{F'} \sum_{y'}^{Y'} Y_{f_y,f'y'} = y_{f_y_Giver} \quad \text{式 3- 3}$$

$$y_{f_y_f_y} + y_{f_y_Acceptor} + B_{f_y}^{New} = 1 \quad \text{式 3- 4}$$

$$y_{f_y_f_y} + y_{f_y_Giver} \leq 1 \quad \text{式 3- 5}$$

$$Y_{f'y',f_y}, y_{f_y_f_y}, y_{f_y_Giver}, y_{f_y_Acceptor}, B_{f_y}^{New} \in \{0,1\} \quad \text{式 3- 6}$$

$$\forall f_y, f'y', \text{ in study region } f \neq f', y \neq y'$$

第二階段涉及實際安裝工程、空調技術條件和空調使用者的主觀條件。這三類條件對決策矩陣的變化施加了約束。在每個決策時間點，會生成一個過濾矩陣，其中「Unk」設定為 α ， α 是一個顯著大於 1 的值。從多種不同條件的組合中減去過濾矩陣。如果所得矩陣中沒有 1 或 -1，則保留該決策場景矩陣可能性；否則，則將



其刪除。

以表 3-5 為例，在過濾條件下，假設 $X_{2,1}$ 的空調交給 $X_{1,1}$ ，且 $X_{2,1}$ 被迫購買新空調，透過將表 3-5 和表 3-4 中的個別決策組合，相減得到的矩陣進行篩選檢查。如果該矩陣包含 1 或 -1，則該個別決策場景矩陣會被丟棄。這個過程旨在篩選出符合指定條件的所有可能決策場景矩陣。關於安裝工程、空調技術條件、空調使用者的主觀條件和其他條件的詳細信息，請參閱附錄 1：約束條件決定過濾矩陣。

表 3- 5 過濾矩陣(以 $X_{1,1}$ 為例)

Giver Acceptor	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	...	$X_{m,n}$	B
$X_{1,1}$	0	1	0	Unk ⁸	0
$X_{2,1}$	0	0	0	Unk	1
...	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{m,n}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk

第二部分是空調保養維護，每年進行保養與維護並不一定是最優解，例如，經過最佳化後，於特定決策時間點，冷氣必須進行替換才能使整個系統有較小的環境影響，於該時間點或前數年保養維護反而可能增加運輸通勤等排放造成額外的環境影響。因此，本研究分別引入 $\psi(t)$ ， $\psi(t) = 1$ 或 0，分別代表要或不要維護保養，該函數由：空調至第一位購買至第 n 位($n \geq 1$)持有為止的間距時間(Age)、特定空調距離上次保養時間($t_{\text{LastMaintain}}$)、購買新機起始保養($t_{\text{StartMaintain}}$)、保養間隔時間($t_{\text{GapMaintain}}$)等四個考慮因子決定，條件判斷如下：

1. 當空調使用者在某個決策場景需替換空調，且該空調如若未給予其他空間使用，則代表該空調進行廢棄回收階段，不考慮進行保養維護， $\psi(t) = 0$ ，但針對該購買的新空調，建立初始值 $\text{Age} = 1$ 、 $t_{\text{LastMaintain}} = 0$ 。

⁸ Unk refers to Unknown needed to be decide during optimization process.

- 
2. 當空調使用者在某個決策場景需替換空調，且該空調如給予其他空間使用。針對給予其他空間的該空調；或當空調使用者在某個決策場景繼續持有空調，針對該空調，若 $Age \geq tStartMaintain$ 且 $tLastMaintain \geq tGapMaintain$ ，則進行維護保養， $\psi(t) = 1$ ，一旦進行保養，該空調的 $tLastMaintain$ 令為 0、Age 加 1，否則 $tKeep$ 、 $tLastMaintain$ 各加 1。

3.2 特定年份(決策時間點)的生命週期環境影響計算

模式假設包含以下(1) 空調使用者優先選購，在相同的冷風能力下，能源效率佳的空調，目標讓耗電量(kWh/yr)最低，而不考慮新機價格因素，這個假設是基於相關研究(Rapson, 2014)；(2) 空調使用者於服務期間皆可以接受交換得到的空調，無主觀要求條件；(3) 確定交換空調拆卸及安裝的間隔時間短，無貯存。

整個系統特定年份的僅考慮全球暖化潛力影響類別的生命週期環境影響(kg CO₂e)，受到每個空調使用者的決策選擇，透過不同決策矩陣把系統內環境影響進行分配，根據三個決策選項，本研究將環境影響區分成以下來源，如表 3- 6：

表 3-6 每個空調使用者決策選項的環境影響來源

	購買新空調	保留現有空調	獲取他人使用過的空調
環境影響來源	1. 新空調原材料和製造 2. 配送包裝和運輸 3. 空調電力使用 4. 冷媒洩漏排放 5. 舊空調廢棄處置(若無他人接收)	1. 空調電力使用 2. 冷媒洩漏排放 3. 維護保養過程(需判斷參數設定是否需保養)	1. 空調提供者與接受者之間的配送包裝和運輸 2. 接受空調電力使用 3. 維護保養過程(需判斷參數設定是否需保養) 4. 舊空調廢棄處置(若無他人接收)

3.2.1 符號定義

1. 上下標(Subscripts)

$f/f', F/F'$ ：分別代表 family 及 families，也就是研究區域中的空調使用者及所有空調使用者之集合

$y/y', Y/Y'$ ：分別代表接受產品服務化空調使用者的空調使用空間編號及其集合

n, N ：分別代表不接受產品服務化空調使用者的空調使用空間編號及其集合

i, I ：分別代表某年度第 i 種的動態決策情形及其集合

sc, SC ， sc 包含空調生命週期各階段的類別排放， SC 指的是階段排放

t ：代表研究的時間(year)

以下表示空調生命週期中：

MA ：原料階段

MF ：製造階段

$TP\ of\ B - U$ ：製造商(B)配銷空調給空調使用者(U)的運輸階段



TP of package：運輸中的包裝

Use of Elect：使用階段的空調耗電

Use of RF Leak：使用階段的空調冷媒洩漏

Use of Maintain：使用階段的維護保養

TP of G – A：空調使用者給予方(G)將空調給空調使用者接受方(A)的運輸階段

End of Treatment：廢棄回收階段的最終處置

$f_y, f_y/f_n, f_n$ ：某空調使用者(f)編號(y or n)持續使用空調

$f'_{y'}, f_y$ ：某空調使用者(f')編號(y')的空調給另一空調使用者(f)編號(y)

$f_y_Acceptor$ ：參與計畫的其他空調使用者編號空調給空調使用者(f)空間編號(y)的代稱

f_y_Giver ：空調使用者(f)空間編號(y)的空調給參與計畫的其他空調使用者空間空調的代稱

2. 決策變數(Decision variables)

$y_{f_y, f_y/f_n, f_n}$ ：當空調使用者(f)空間編號(y or n)持續使用空調，則為 1，否則為 0

$Y_{f'_{y'}, f_y}$ ：當空調使用者(f')空間編號(y')的空調給至空調使用者(f)空間編號(y)的位置(或繼續持有)，則為 1，否則為 0

B_{f_y/f_n}^{New} ：當空調使用者(f)空間編號(y or n)購買新空調，則為 1，否則為 0

3. 其他代號(Others)

$El_{all}(t)$ ：研究區域中於時間 t ，參與服務和非參與者(all)的環境影響總和(kg CO₂e)

$El_{f_y}^{Join}(t, i)$ ：於時間 t ，參與產品服務化空調使用者(f)空間編號(y)第 i 種的動態決策情形之空調環境影響總和(kg CO₂e)

$El_{f_n}^{NoJoin}(t)$ ：於時間 t ，不參與產品服務化空調使用者(f)空間編號(n)的空調環境影響總和(kg CO₂e)

$C_{fy/fn}^{sc}(t)$ ：於時間 t ，空調使用者(f)空間編號(y or n)的空調於類別 sc 的環境影響
(kg CO₂e)

$EF_{fy/fn}^{sc}$ ：空調使用者(f)空間編號(y or n)的空調於類別 sc 的排放係數(kg CO₂e/unit)

$CS_{fy/fn}(sc)$ ：空調使用者(f)空間編號(y or n)的空調於類別 sc 中的各項目計算的活動強度(unit)，依照不同 sc 可能有不同公式設定

3.2.2 環境影響計算之模式

將表 3- 6 透過式 3- 7、式 3- 8 分別來表示系統內的有參與及不參與 PSS 的環境影響，將式 3- 7 經過深度優先搜尋演算法最小化累積環境影響後與式 3- 8 結果加總，如式 3- 9，即為該年度系統邊界內的環境影響，式 3- 10 是環境影響主要計算式，其中活動強度計算會根據類別 sc 公式會有所變動，例如耗電量和冷媒排放的活動強度計算不相同。



$$EI_{f_y}^{Join}(t, i) =$$

$$\begin{aligned}
& B_{f_y}^{New} \left[C_{f_y}^{MA/MF}(t) + C_{B-f_y}^{TP\ of\ B-U}(t) + C_{f_y}^{TP\ of\ package}(t) + C_{f_y}^{Use\ of\ Elect}(t) \right. \\
& \quad + C_{f_y}^{Use\ of\ RF\ Leak}(t) + C_{f_y}^{TP\ of\ U-R}(t) + (1 \\
& \quad \left. - \sum_{f'}^{F'} \sum_{y'}^{Y'} Y_{f_y, f'_{y'}} C_{f_y}^{End\ of\ Treatment}(t) \right] \\
& \quad + \sum_{f'}^{F'} \sum_{y'}^{Y'} Y_{f'_{y'}, f_y} \left[C_{f'_{y'}, f_y}^{TP\ of\ G-A}(t) + C_{f_y}^{TP\ of\ package}(t) \right. \\
& \quad + C_{f_y}^{Use\ of\ Elect}(t) + C_{f_y}^{Use\ of\ RF\ Leak}(\psi(t)) \\
& \quad + \psi(t) C_{f_y}^{Use\ of\ Maintain}(t) + C_{f_y}^{TP\ of\ U-R}(t) + (1 \\
& \quad \left. - \sum_{f'}^{F'} \sum_{y'}^{Y'} Y_{f_y, f'_{y'}} C_{f_y}^{End\ of\ Treatment}(t) \right] \\
& \quad + Y_{f_y, f_y} \left[C_{f_y}^{Use\ of\ Elect}(t) + C_{f_y}^{Use\ of\ RF\ Leak}(\psi(t)) \right. \\
& \quad \left. + \psi(t) C_{f_y}^{Use\ of\ Maintain}(t) \right] \forall t = [1, N], \ t \in \mathbb{N}
\end{aligned}$$

式 3- 7

$$EI_{f_n}^{NoJoin}(t) =$$

$$\begin{aligned}
& B_{f_n}^{New} \left[C_{f_n}^{MA/MF}(t) + C_{B-f_n}^{TP\ of\ B-U}(t) + C_{f_n}^{TP\ of\ package}(t) + C_{f_n}^{Use\ of\ Elect}(t) \right. \\
& \quad + C_{f_n}^{Use\ of\ RF\ Leak}(\psi(t)) + C_{f_n}^{TP\ of\ U-R}(t) \\
& \quad \left. + C_{f_n}^{End\ of\ Treatment}(t) \right] \\
& \quad + Y_{f_n, f_n} \left[C_{f_n}^{Use\ of\ Elect}(t) \right. \\
& \quad \left. + C_{f_n}^{Use\ of\ RF\ Leak}(\psi(t)) + \psi(t) C_{f_n}^{Use\ of\ Maintain}(t) \right] \forall t \\
& \quad = [1, N], \ t \in \mathbb{N}
\end{aligned}$$

式 3- 8

$$EI_{all}(t) = DFS \left(\sum_{sc}^{SC} \sum_f^F \sum_y^Y EI_{f_y}^{Join}(t, i) \right) + \sum_{sc}^{SC} \sum_f^F \sum_n^N EI_{f_n}^{NoJoin}(t) \quad \text{式 3-9}$$

$$C_{f_y/f_n}^{SC}(t) = EF_{f_y/f_n}^{SC} \times CS_{f_y/f_n}(sc) \quad \text{式 3-10}$$

綜合上述，本研究繪製圖 3-4，說明如何利用限制條件，來刪除不必要的決策矩陣，減少運算時間，同時將不同決策矩陣計算環境影響，系統化整理至某年度各種可能發生決策情境的環境影響。

首先，我們把某個空調使用者其中一個空間中的空調，如紅色框，繪製成橫軸是可能發生的情境(例如：購買、持續使用、取得第二空調使用者第一空間的空調(21)、取得第三空調使用者第一空間的空調(31)等等，直到參與 PSS 的第 M 空調使用者第一空間的空調(M1))，縱軸是決策以一年為間隔時間單位的決策時間(例如：1 代表 2025、2 代表 2026，直到 N 代表某個結束年份，本研究結束年份 2045 年)。

再來，現有各空間本來持有空調指的是 First product，進入計算環境影響前，會考慮所有空調使用者的各空間，也就是以紅框為單元，往右延伸數個參與 PSS 的空調使用者的交互關係，將欲計算決策時間點的環境影響根據空調特性、安裝條件等現況，透過表 3-5 和表 3-4 篩選條件，將不可能發生情境刪除後，將計算得到的環境影響，逐一記錄成 $\theta_{N,\omega}$ 代表第 N(2026~2045)年第 ω 情境的環境影響，此時這個情境環境影響，會被以如表 3-7 儲存下來，並且這個發生情境，將成為下一個決策時間點的現況，此時現況則是父節點、被篩選後可能情境組合，則為子節點。

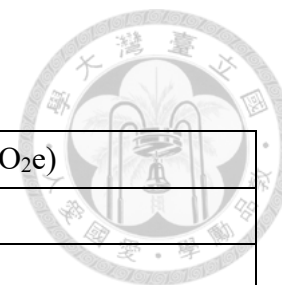


表 3-7 環境影響情境對照記錄表(X、Y、Z、W 指的是環境影響)

$N-1, \omega_i$	N, ω_l	$\theta_{N, \omega_l}(\text{kg CO}_2\text{e})$
2025_0(初始)	2026_1	X
2026_1	2027_1	Y
2026_1	2027_2	Z
2027_1	2028_1	W
...	...	...

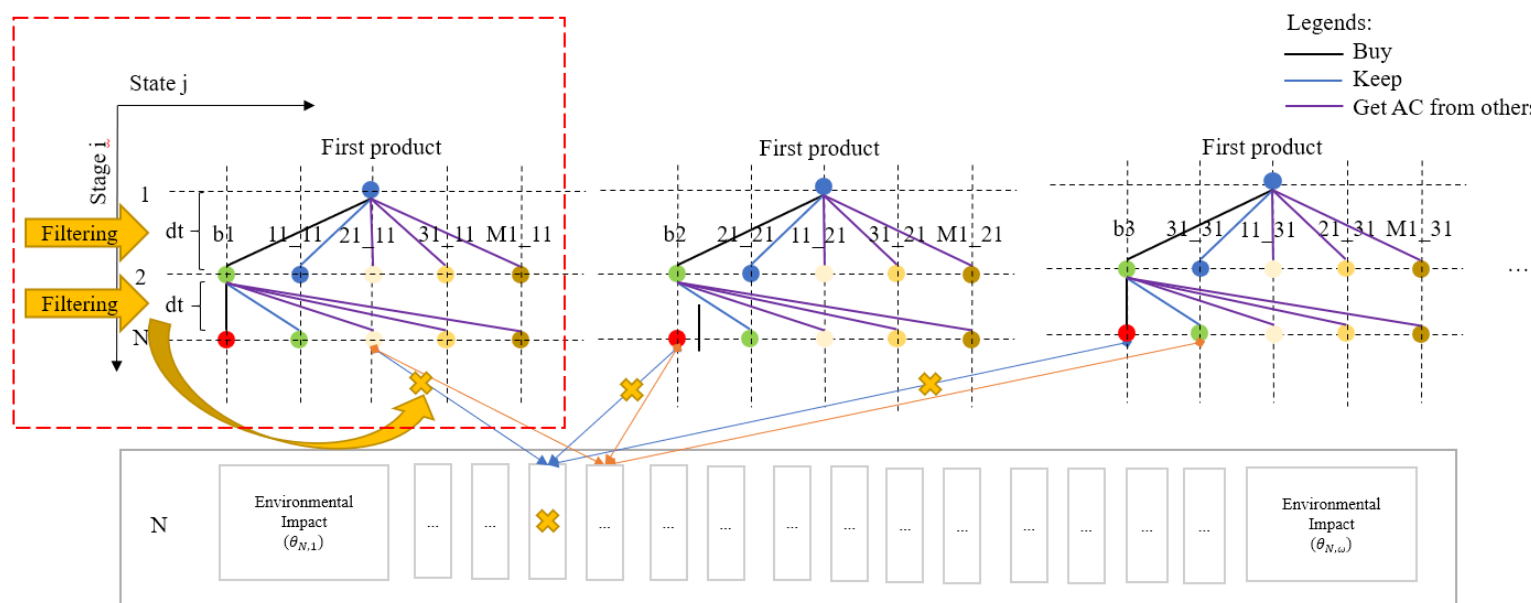


圖 3-4 參與 PSS 的環境影響計算架構



3.3 深度優先搜索之妥協解

計算完各年度各種情境的環境影響，接著透過深度優先搜索（Depth-First Search, DFS）來找到妥協解，步驟如下：

1. 定義變數和參數

- $G = (V, E)$ ：有向圖，其中 V 是父節點集合， E 是子節點集合
- $Impact = (u, v)$ ：從父節點 u 到子節點 v 的影響值
- end_node_prefix ：終止節點的前綴，也就是 2045_ (任何 2045 可能的情境)
- all_paths ：從起始節點到終止節點的所有路徑及累積影響量的集合，利用 $(P, Impact(P))$ 來表示
- P ：一條路徑，表示為一系列節點 $P=(v_1, v_2, \dots, v_n)$
- $Impact(P)$ ：路徑 P 的累積影響值，定義為路徑上所有邊的影響值之和
- $tolerance$ ：容忍度

2. 收集所有路徑

使用深度優先搜索 (DFS) 從起始節點 s 收集所有直到以 end_node_prefix 開頭的終止節點的路徑 P 。

- 1) 從起始節點 s 開始遞迴搜索
 - 2) 對於每個當前節點 v ，如果節點名稱以 end_node_prefix 開頭，則將當前路徑和其累積影響值添加在 all_paths 中
 - 3) 否則，遞迴搜索每個相鄰節點，更新當前路徑和累積影響值
3. 計算最小影響值和可接受範圍

從所有路徑中找到累積影響值的最小值，並計算容忍範圍。

$$\text{Minofimpact} = \min_{P \in all_paths} Impact(P)$$

$$\text{Acceptable_range} = \text{Minofimpact} \times (1 + \text{tolerance})$$

4. 篩選可接受路徑

$$\begin{aligned} \text{acceptable_paths} = \{ & (P, \text{impact}(P)) \mid P \in all_paths \text{ AND } Impact(P) \\ & \leq \text{acceptable_range} \} \end{aligned}$$

Chapter 4 結果與討論



結果與討論會分成以下幾個部分：

1. 能源模擬冷負荷：展示簡化 3D 建模，說明如何選擇展示模型選取的目標對象，觀察目標對象的尖峰冷負荷結果。
2. 不同情境下之變因調整的累積環境影響及與基線比較環境影響結果：本研究在整個系統邊界下，討論調整「參與對象」、「購買新機時不同起始保養年」、「保養間隔時間」、「產品服務化減緩效率遞減因子」、「空調原料製造之排放係數」變因對於累積環境影響及與基線比較環境影響之效果。
3. 不同調整變因對於系統決策影響：不同調整變因對於最後各建築空間的空調流向的影響。此外，多空間的情境最佳化決策效果，將累積排放量，拆解成 2026~2045 年各年度的環境影響輔助說明。
4. 不同妥協率(解)，各情境下的環境影響變化分佈：現實實際狀況往往不一定都有辦法順利按照一張的最佳化決策表執行，將會以不同妥協率觀察情境下，不同累積環境影響變化。
5. 系統環境影響的分類占比：環境影響累積效果是原料、製造、冷媒、包裝等其他來源造成；抑或以空間觀點，占最多是哪個棟別。以環境影響最大的 B8G1_3_2_0.3_1.03 情境為例，結果進行比較分析。

4.1 能源模擬冷負荷

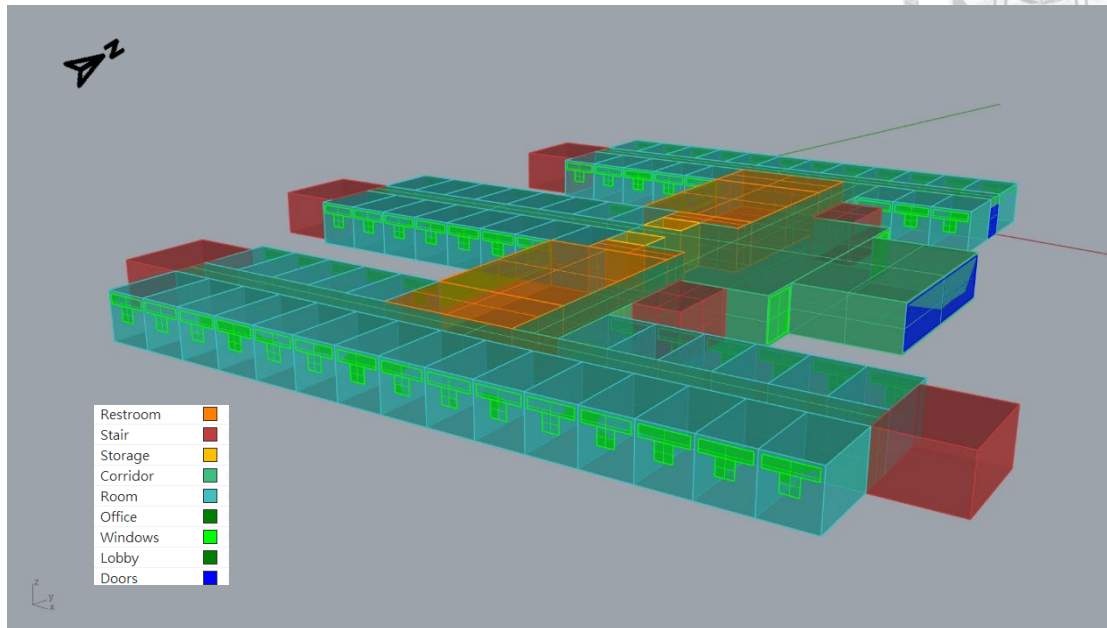


圖 4-1 簡化建築 3D 模型，以男一舍舉例

圖 4-1 根據台大男一舍的建築平面及立面圖簡化繪製，宿舍除了房間外，尚有儲藏室、階梯等非空調區，房間的四人房空間長、寬、高大小約為 5.3 m x 3.2 m x 3.4 m，其坐落方向為北偏東 10 度。

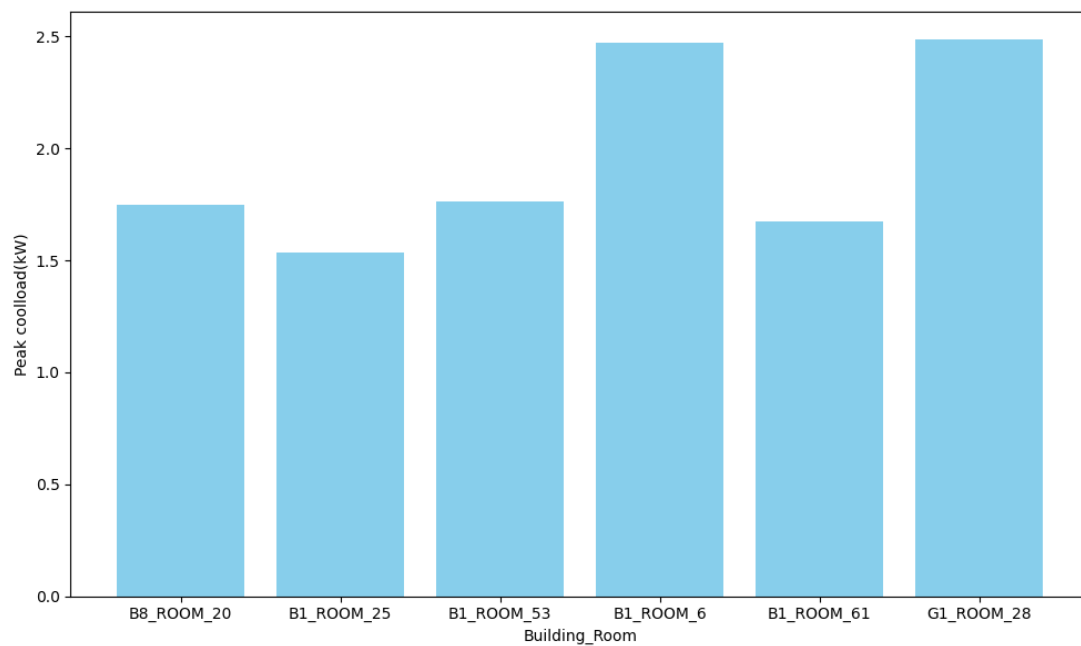


圖 4-2 各建築空間於 SSP2-4.5、2036-2065 之台北市未來氣候年下的尖峰冷負荷

因考慮模式運算時間長，為了更快速展示在不同情境下的模式結果，依照各棟別(男一舍(B1)、男八舍(B8)、大一女舍(G1))的房間數量比例，分配四、一、一個空間分別給男一舍、男八舍及大一女舍。男一舍依照結果輸出，挑選第 20、40、60、80 百分位數的空間、男八舍和大一女舍則挑選中位數。圖 4-2 為利用 Rhino-Grasshopper 建築能源分析的結果，顯示 B1 棟的 ROOM 6 冷負荷最高、B1 棟的 ROOM 25 的冷負荷最低。

4.2 不同情境下之變因調整的累積環境影響及與基線比較

環境影響結果

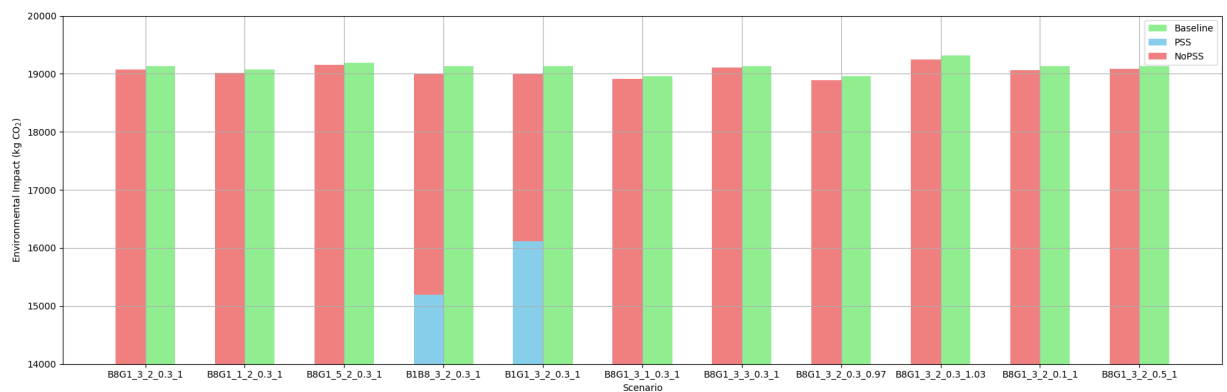


圖 4-3 購買新機之不同情境參數於 2026 年至 2045 年累積環境影響

(Scenario 之 A_B_C_D_E: A 參與建築棟別(B8G1、B1B8、B1G1); B: 不同起始維護保養的時間(第 1, 3, 5 年); C: 保養間隔時間(1、2、3 年); D: 產品服務化能效遞減減緩因子(0.1、0.3、0.5); E: 原料製造排放係數(0.97、1(不變)、1.03))

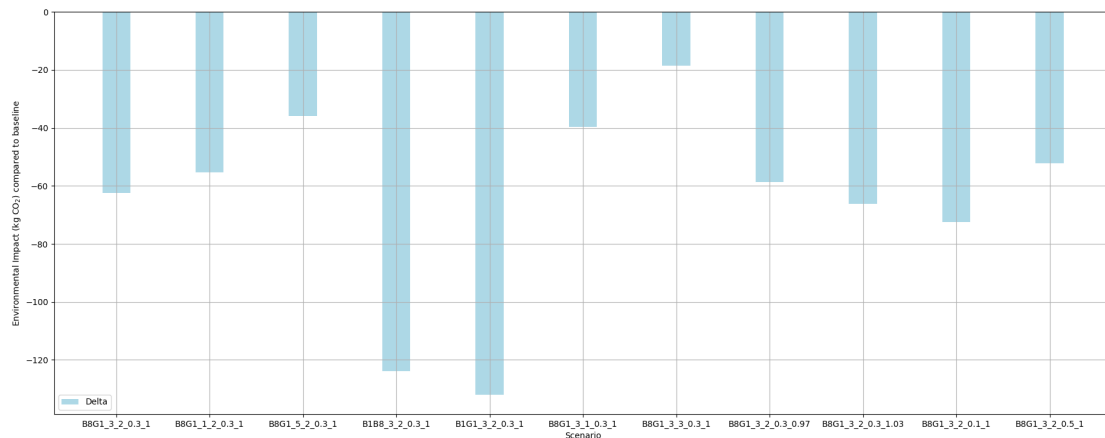
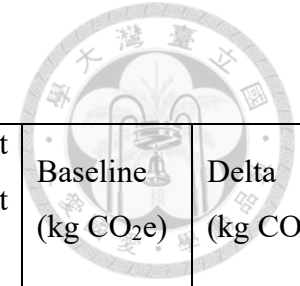


圖 4-4 購買新機之不同情境參數相比基線於 2026 年至 2045 年累積環境影響差

表 4- 1 不同情境參數於 2026 年至 2045 年環境影響統整數據結果



PSS building participants	nStartMaintain (year)	Gapmaintain (year)	PSShelprate (Unitless)	EF_MF ratio(Unitless)	PSSimpact (kg CO ₂ e)	NonPSSimpact (kg CO ₂ e)	Sum of PSSimpact and NonPSSimpact (kg CO ₂ e)	Baseline (kg CO ₂ e)	Delta (kg CO ₂ e)
B8G1	3	2	0.3	1	6636.5	12432.4	19068.9	19131.4	-62.5
B8G1	1	2	0.3	1	6624.5	12396.5	19021.0	19076.4	-55.4
B8G1	5	2	0.3	1	6684.6	12472.9	19157.6	19193.5	-35.9
B1B8	3	2	0.3	1	15192.5	3814.9	19007.4	19131.4	-123.9
B1G1	3	2	0.3	1	16115.2	2884.1	18999.3	19131.4	-132.1
B8G1	3	1	0.3	1	6597.9	12316.9	18914.7	18954.4	-39.7
B8G1	3	3	0.3	1	6680.4	12432.4	19112.8	19131.4	-18.6
B8G1	3	2	0.3	0.97	6578.2	12315.6	18893.8	18952.5	-58.7
B8G1	3	2	0.3	1.03	6694.9	12549.1	19244.0	19310.2	-66.2
B8G1	3	2	0.1	1	6626.5	12432.4	19058.9	19131.4	-72.5
B8G1	3	2	0.5	1	6646.8	12432.4	19079.2	19131.4	-52.1
No one	>20	>20	NA	1	0.0	19405.0	19405.0	NA	NA

圖 4- 3、圖 4- 4、表 4- 1 展示模型不同的參數設定下，環境相關影響結果，PSS、NoPSS 影響，分別代表系統目標空間中，參與及不參與產品服務化的棟別在設定參數下的環境影響，二者相加就是總系統內的環境影響、Baseline 指的是所有棟別都不參與產品服務化的環境影響。以下進行探討分析：

- 不同棟別(G1、B8、B1 兩兩棟別組合配對：B1B8、B1G1、B8G1)

由圖 4- 3，B8G1、B1G1 累積環境影響分別是最大和最小。注意到隨著參與 PSS 空調使用者的空間增加，愈能加強 PSS 發揮的效果。而在 B1G1 和 B1B8 的空間數相同情況下，B1G1 比 B1B8 能有更小的累積環境影響推斷原因是，G1_ROOM_28 比 B8_ROOM_20 的冷負荷還高，因此需要獲得更高的冷氣能力的空調滿足空間需求，此時產品服務化的施行，來減緩空調能源效率遞減的作用於耗電量而言，發揮在 G1_ROOM_28 比 B8_ROOM_20 的效果還更顯著。

- 距離購買新機之不同起始維護保養的時間(nStartMaintain = 1, 3, 5 年)

由圖 4- 3、圖 4- 4，可以發現起始保養愈早開始維護保養，儘管可能有較小的總累積環境影響效果，但不見得有相對基線較小的總累積環境影響差。例如：B8G1_1_2_0.3_1 和 B8G1_3_2_0.3_1 情境來比較，B8G1_1_2_0.3_1 情境擁有最低的總累積環境影響，但 B8G1_3_2_0.3_1 情境卻有最大的相對基線減排效果，其原因推斷是模式基礎設定仍讓不參與 PSS 的空調使用者空間，在維護保養時有冷媒洩漏相對排放較少的比例(5%→1%)。換句話說，B8G1_1_2_0.3_1 情境相對比 B8G1_3_2_0.3_1 情境，Baseline 之間的環境影響差距，大於 PSS 之間的環境影響差距。

- 不同原料/製造排放係數(0.97、1(不變)、1.03))

由圖 4- 3，對於原料/排放係數增高，可以發現累積排放影響有上升，其主要原因可參考圖 4- 5 和圖 4- 6，當把 B8 和 G1 棟別的空間，同時把更換空調時間點如紅框處分析，伴隨空調使用者決策購買新機時，B8G1_3_2_0.3_1.03 情境比 B8G1_3_2_0.3_0.97 情境更大的環境影響。然而，若施行產品服務化，由圖 4- 4 購買新機之不同情境參數相比基線於 2026 年至 2045 年累積環境影響差可發現，其相對減排的效果是最佳的，也就是更應要施行 PSS。

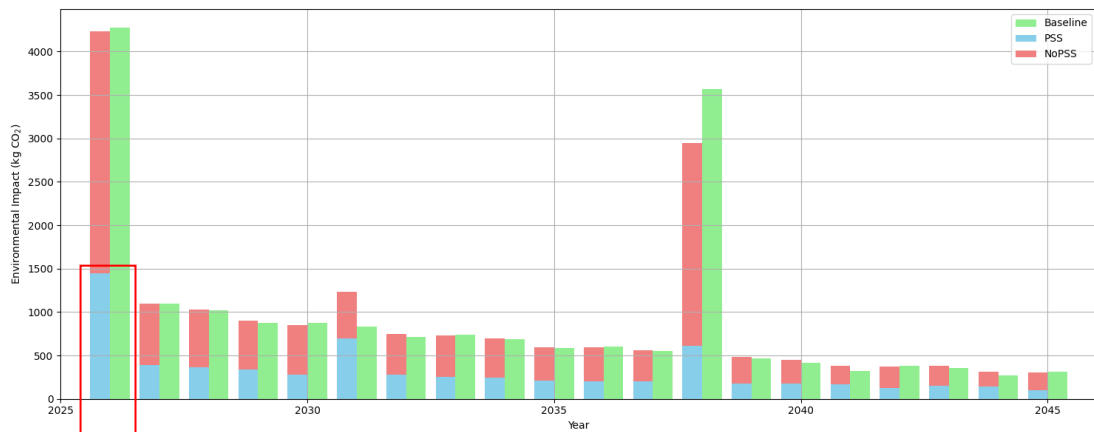


圖 4- 5 2026~2045 年各年度 B8、G1 參與 PSS，在原料/製造排放係數與基礎情境

比值 = 1.03，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的棟別的環境影響

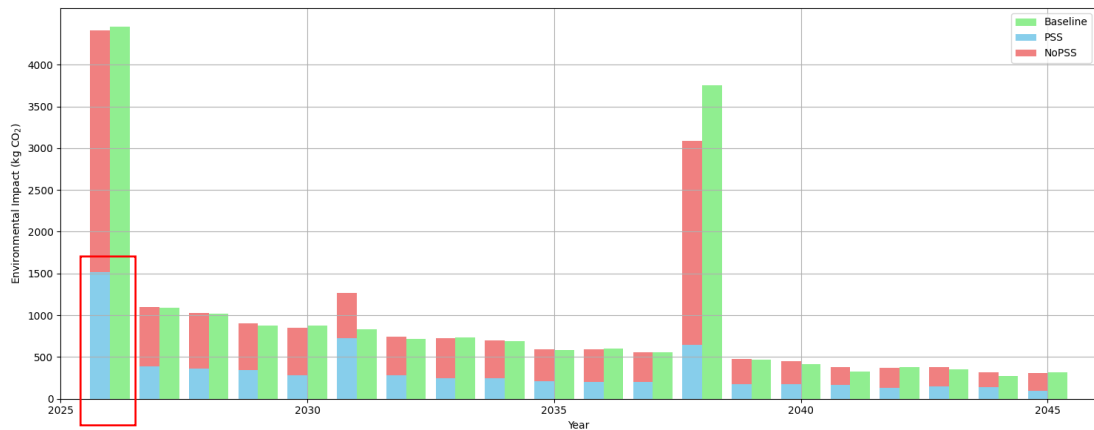


圖 4- 6 2026~2045 年各年度 B8、G1 參與 PSS，在原料/製造排放係數與基礎情境

比值 = 0.97 情況下，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的棟別的環境影響

● 不同產品服務化能效遞減減緩因子(0.1、0.3、0.5)

在模式中，愈小減緩因子可讓能效遞減的下降比率降低，在圖 4- 7 可以獲得驗證，因此在冷氣能力固定的情況下，CSPF 愈高，耗電量愈低，所造成的環境影響愈小。因此，B8G1_3_2_0.1_1 情境比 B8G1_3_2_0.5_1 情境的累積環境影響更小及減量排放效果更大。

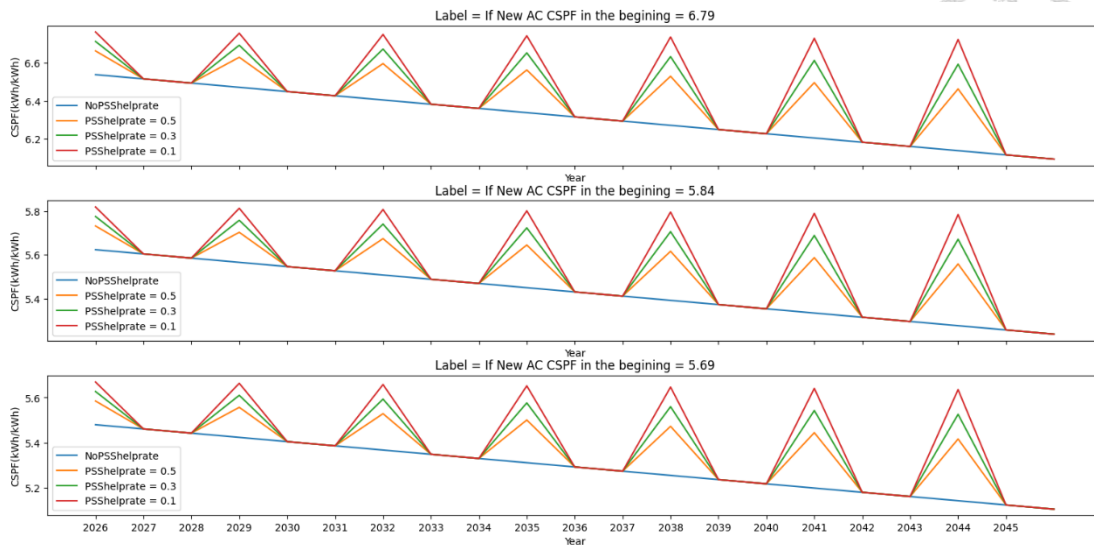


圖 4- 7 假設於 2026 年購買 CSPF = 6.79、5.84、5.69 之新機，每 3 年進行維護保養的情況下，2026~2045 年的 CSPF 遞減趨勢

● 綜合交叉比較

總累積環境影響最小、最大發生在 B8G1_3_2_0.3_0.97 和 B8G1_3_2_0.3_1.03 情境，而減排幅度最大、最小發生在 B1G1_3_2_0.3_1 和 B8G1_3_3_0.3_1 情境當中，可說明原料與製造空調的強度(kg CO₂/kW)的變化是系統內總累積環境影響很重要的因素，而愈多的空間參與 PSS，對整體區域中的減排幅度效果是非常顯著的。

4.3 不同調整變因對於系統決策影響

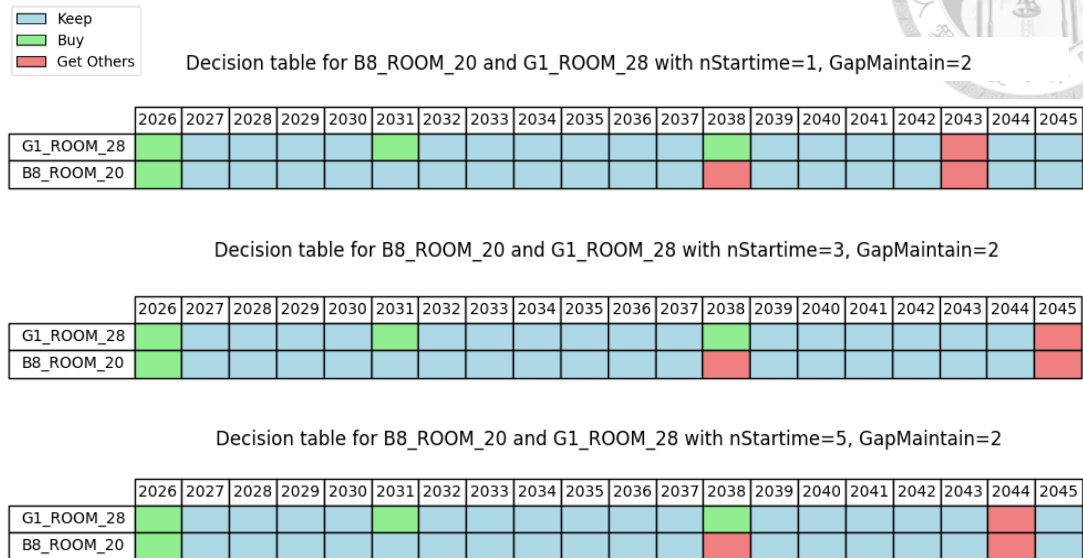


圖 4- 8 購買新機之不同起始維護保養的時間(第 1, 3, 5 年)決策表

圖 4- 8 顯示隨著購買新機起始維護保養的時間變化的影響各空間空調的處置決策變化。三張決策表相似趨勢顯示 G1_ROOM_28 於 2026、2031、2038 年更換新空調；B8_ROOM_20 於 2026 年更換新機、2038 取得來自 G1_ROOM_28 的空調更換表。差別在於 2038 至 2045 這段時間中，購買新機分別於第三年、第一年開始進行維護保養，兩個空間互相取得彼此空調的時間是最晚及最早的。

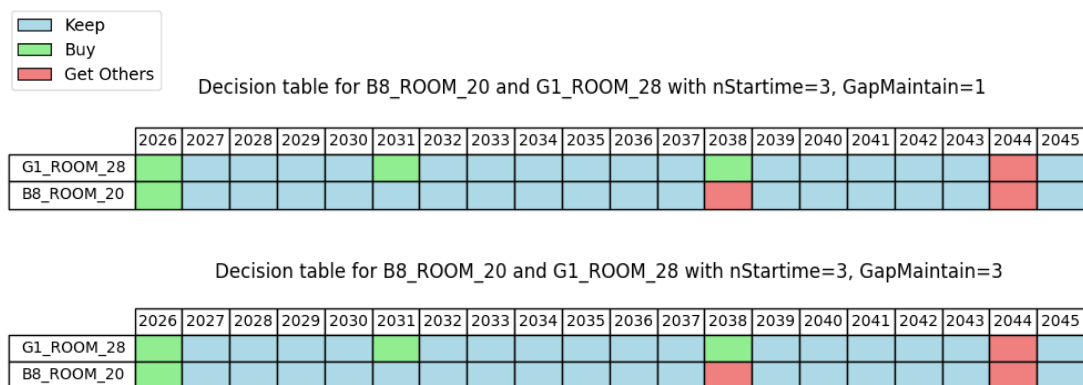


圖 4- 9 保養間隔時間(1、3 年)決策表

圖 4- 9 顯示保養間隔時間等於一年和三年時，有別於保養間隔時間等於兩年時，於 2045 年 B8_ROOM_20 和 G1_ROOM_28 才互相取得彼此空間的空調，於 2044 年(提早一年)，B8_ROOM_20 和 G1_ROOM_28 便會互相取得彼此的空間。



Decision Table for B8 ROOM 20 and G1 ROOM 28 with 3% Decrease in MF Coefficient

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
G1_ROOM_28	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep
B8_ROOM_20	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others

Decision Table for B8 ROOM 20 and G1 ROOM 28 with 3% Increase in MF Coefficient

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
G1_ROOM_28	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others
B8_ROOM_20	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others

圖 4- 10 原料/製造排放係數增加與減少 3% 決策表



Decision Table for B8 ROOM 20 and G1 ROOM 28 with PSS mitigating efficiency decay factor = 0.1

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
G1_ROOM_28	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others
B8_ROOM_20	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others

Decision Table for B8_ROOM_20 and G1_ROOM_28 with PSS mitigating efficiency decay factor = 0.5

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
G1_ROOM_28	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others
B8_ROOM_20	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Get Others

圖 4- 11 產品服務化減緩效率遞減因子(0.1、0.5) 決策表

圖 4- 10 和圖 4- 11 顯示在本研究所設定的原料/製造排放係數和產品服務化減緩效率遞減因子變動，並未影響到最佳化後的替換結果，皆和基礎情境 (B8G1_3_2_0.3_1)擁有相同的決策時間表。



Decision Table for Muple rooms in B1 and G1 building with nStartMaintain = 3, GapMaintain = 2
Path 1

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
B1_ROOM_25	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_25	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_13	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	G1_ROOM_28	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_6	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Buy
G1_ROOM_41	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Buy
G1_ROOM_28	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_25	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep

Path 2

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
B1_ROOM_25	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	G1_ROOM_28	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_13	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_25	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_6	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Buy
B1_ROOM_41	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Buy
G1_ROOM_28	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_25	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep

圖 4- 12 B1、G1 棟別多戶決策表

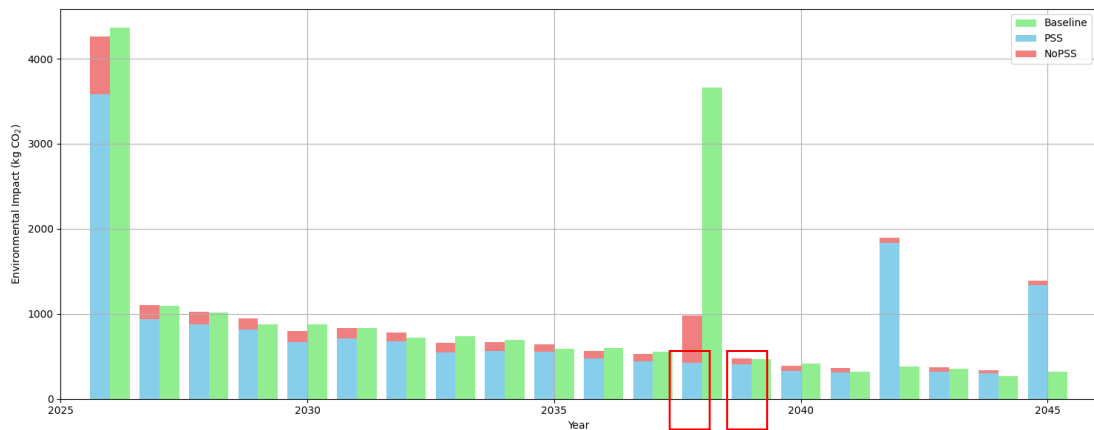


圖 4- 13 2026~2045 年各年度 B1、G1 參與 PSS，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的棟別的環境影響

圖 4- 12 是探討多空調使用者參與 PSS 的交互影響效果，發現比較只有兩個參與 PSS 空調使用者的決策表，多了兩種相同環境影響的決策路徑，整體第二次及第三次購買空調時間延長至 2042 及 2045 年，2026 年與 2042 年期間有大量的取得其他空調使用者的空調選項。

又可以發現特定使用者之間有分群取得他人空調的現象，例如 B1_ROOM_61 與 B1_ROOM_6；B1_ROOM_25 與 B1_ROOM_53 與 G1_ROOM_28，顯示模式展現特定空調因為冷負荷滿足的限制條件下，只能轉手到特定空間。而也可以注意到，圖 4- 13，當轉移空調時，例如 2038 年產生包裝及運輸排放，會使得整體該年的環境影響略大於全部空調持續持有的 2039 年。

Decision Table for Mutiple rooms in B1 and B8 building with nStartMaintain = 3, GapMaintain = 2

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
B1_ROOM_25	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_53	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_53	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B8_ROOM_20	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_6	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_61	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Buy
G1_ROOM_61	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_61	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Buy
B8_ROOM_20	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_25	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep

Path 2

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
B1_ROOM_25	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B8_ROOM_20	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_53	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_25	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep
B1_ROOM_6	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_61	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_61	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Buy
B1_ROOM_61	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_6	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Buy
B8_ROOM_20	Buy	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	Keep	B1_ROOM_53	Keep	Keep	Keep	Buy	Keep	Keep	Keep

圖 4- 14 B1、B8 棟別多戶決策表

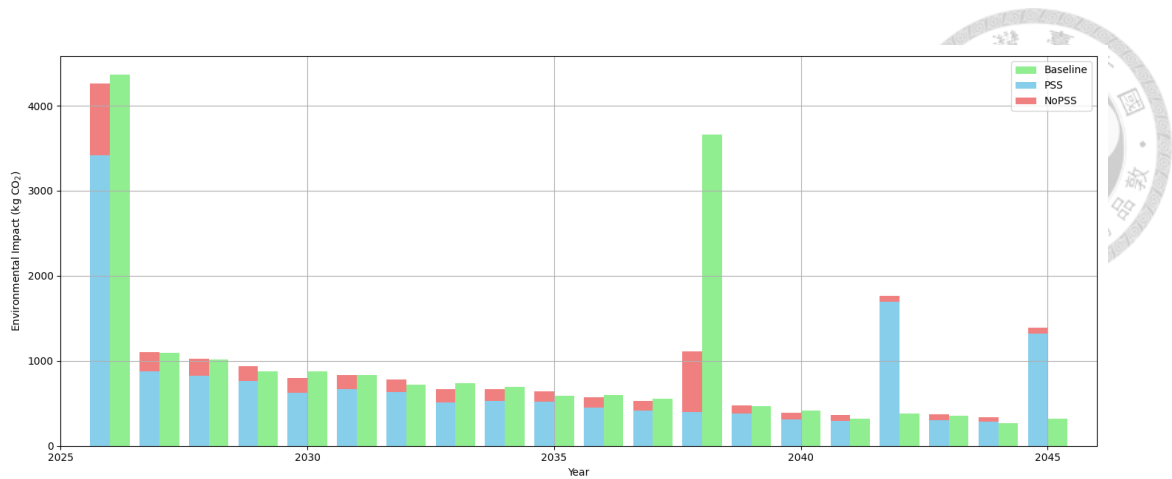


圖 4- 15 2026~2045 年各年度 B1、B8 參與 PSS，基線、參與 PSS 與不參與 PSS 的棟別的環境影響

圖 4- 14 顯示與圖 4- 12 有相似趨勢，差別主要在於 B1_ROOM_25 與 B1_ROOM_53 與 G1_ROOM_28 為一群組變成 B1_ROOM_25 與 B1_ROOM_53 與 B8_ROOM_20 為一群組，B8_ROOM_20 取代 G1_ROOM_28 為 B1_ROOM_25 與 B1_ROOM_53 的空調提供者之一。

4.4 不同妥協率(解)，各情境下的環境影響變化分佈

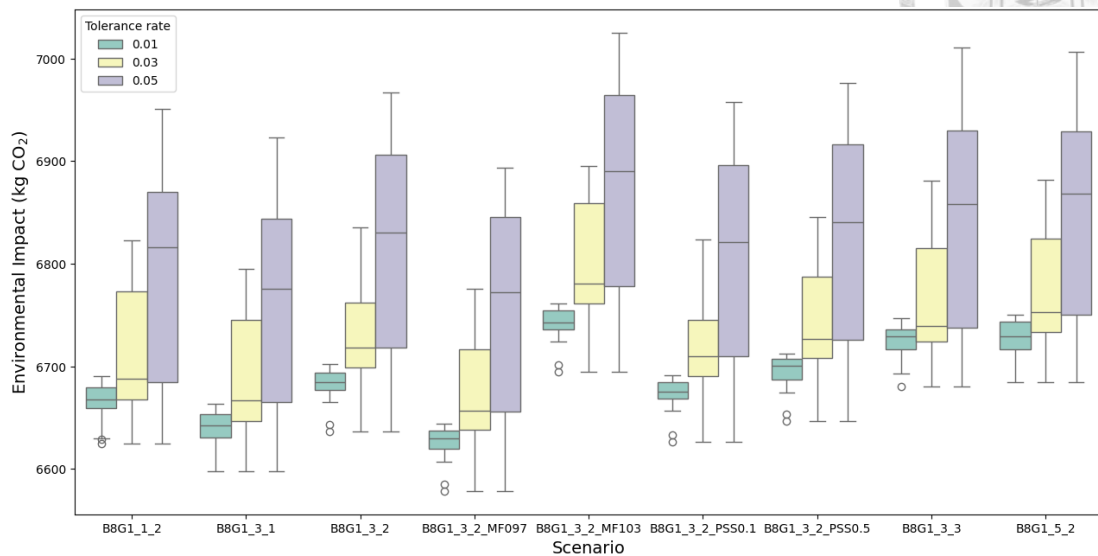


圖 4- 16 在 0.01、0.03、0.05 的寬容率，不同情境下的參與 PSS 的環境影響分佈圖

從圖 4- 16，隨著寬容率從 0.01 至 0.05 變化，所有情境中的環境影響中位數和變異性大體都會增加，容忍率為 0.01 (綠色)和 0.05 (紫色)的情境，分別具有最低、最高的中位數環境影響和最小、最大的變異性。此說明使用模式時要注意到容忍率的設定，儘管有多樣化的選擇路徑，但愈高的容忍率最終不同決策路徑產生的環境影響變異性更大，可能超過預期環境管理者的總量目標設定。把情境進行交叉比較，B8G1_3_2_MF097、B8G1_3_2_MF103 情境在所有的容忍率範圍當中，擁有最低和最高的中位數，此和表 4- 1 有相同的趨勢。

又可注意到有些情境在容忍率為 0.01 時，例如：B8G1_3_2、B8G1_1_2，存在離群值，表示在這些情境下的環境影響，這些離群值明顯低於大多數數據，代表當環境管理者在模式設定 0.01 容忍率時，最佳化路徑(累積環境影響最小的路徑)需要更重視，空調服務商盡可能要說服目標對象的空間配合，因為一旦選擇其他路徑時，大部分累積環境影響的分布範圍，不但大於最佳化路徑的累積環境影響，而且是相對超出很多。

4.5 系統環境影響的分類占比

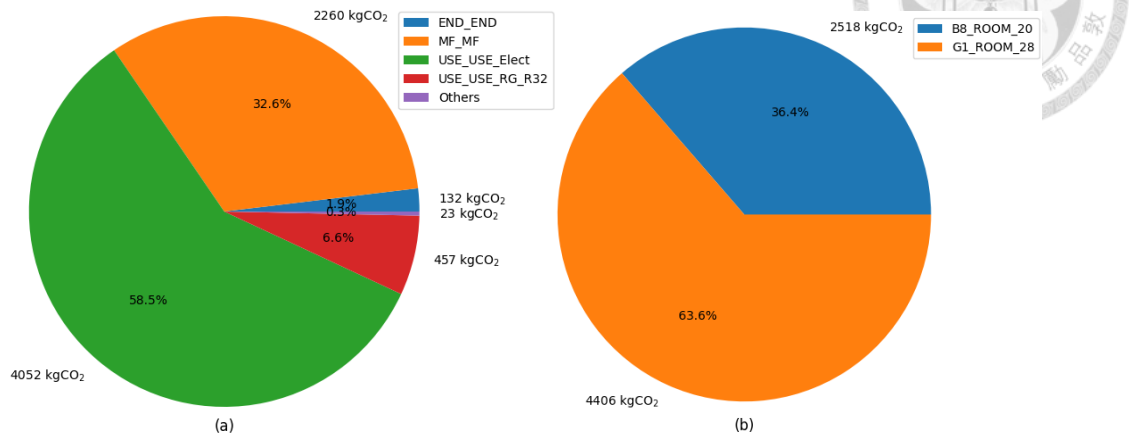


圖 4- 17 B8G1_3_2_MF103 情境下參與 PSS 的環境影響分佈，依照分類：(a)環境影響來源、(b)不同空間型態

圖 4- 17 剖析 2026~2045 年參與 PSS 對象中，總累積環境影響的來源和貢獻對象，可以發現最佳化下，前兩名貢獻來源為空調的使用電力及原料/製造，占比分別約 58.5%及 32.6%，與功能單位為 2.5 kW 的分離式冷氣使用 10 年、氣候條件接近的單一空調的生命週期評估結果為使用階段佔 81.9%、預使用階段(即使用階段前)佔 9.5%相比(Ross & Cheah, 2017)，明顯可發現有將環境影響轉移至預使用階段。而 G1_ROOM_28 比 B8_ROOM_20 的環境影響貢獻高的原因推斷是 G1_ROOM_28 擁有較高的冷負荷，因此所持有的空調冷氣能力較高(G1_ROOM_28：2.8 kW VS. B8_ROOM_20：2.2 kW)，耗電量也較高。

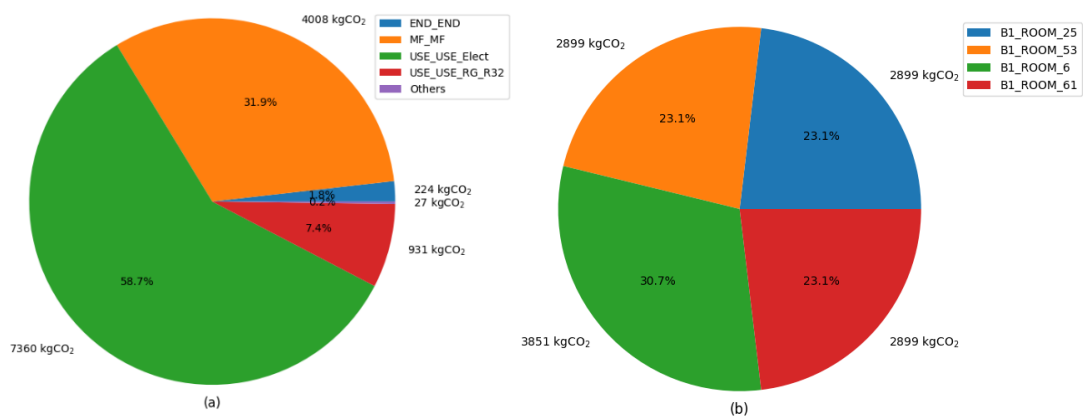


圖 4- 18 B8G1_3_2_MF103 情境下不參與 PSS 的環境影響分佈，依照分類：(a)環境影響來源、(b)不同空間型態

圖 4-18 剖析 2026~2045 年沒參與 PSS 對象中，總累積環境影響的來源和貢獻對象，可以發現與圖 4-17 對比，空調使用電力的貢獻比例增加、而空調原料/製造貢獻比例降低。而主要貢獻對象是 B1_ROOM_6 原因是擁有較高的冷負荷，因此所持有的空調冷氣能力較高，耗電量也較高。



Chapter 5 結論與建議



案例研究顯示：一，原料與製造空調的排放係數(kg CO₂/kW)變化是系統內總累積環境影響數值波動的重要因素之一，而愈多空調使用者參與 PSS，對整體區域中相對不實施 PSS 減排幅度效果貢獻是顯著的。二，調整不同變因於 B8 和 G1 棟別，系統決策表變化結果發現，大致趨勢是於 2026 年同時更換新機；2031 年 G1_ROOM_28 更換新機、2038 年 G1_ROOM_28 更換新機、B8_ROOM_20 取得 G1_ROOM_28 的空調；2044 或 2045 年互相取得彼此空調。三，容忍率為 0.01 和 0.05 的情境，分別具有最低、最高的中位數環境影響和最小、最大的變異性，且在 B8G1_3_2_MF097、B8G1_3_2_MF103 情境在所有的容忍率範圍當中，具有最低和最高的中位數環境影響。四，以 B8G1_3_2_MF103 參與 PSS 情境而言，空調的使用電力及原料/製造，系統總累積的環境影響占比分別約 58.5%及 32.6%。

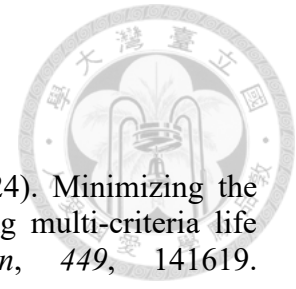
由上述案例研究可知，除了高耗能產品應該有明確的使用年限被評估，而不僅僅只是盡可能延長產品壽命的單一原則外，更重要的是，高耗能產品不應只有持續使用或替換回收兩種選項，取得他人的空調舊產品的路徑選項應也被考量，且愈多的高耗能產品使用者加入產品服務化，除了讓產品發揮更多元價值，也能在系統中取得相對較低的環境影響，在本研究透過分離式冷氣的案例研究，已獲得驗證。

本研究提供基於深度優先搜尋演算法的空間性生命週期優化模型(Depth-First Search-Based Spatial Life Cycle Optimization Model, DFS-SLCO)，並偕同建築能源評估模型(Building energy analysis)來評估空間冷負荷需求，適合未來邁向循環經濟社會，產品所有權從消費者轉向產品服務商或製造商，對同一類多個的高耗能產品(EuPs) 進行環境管理。雖然在此案例研究中，為了簡化未考慮整體技術轉換或產品額外價值利用，比如熱泵空調，空調和熱水只需要一套設備，不需額外的電熱水器等設備，但該方法仍提供模型使用者多種可能設定的動態情境，例如起始保養時間、保養間隔時間、保養服務減緩效能遞減效果、原料製造產品強度、不同服務對象；此外，模型尚可以添加空調技術、消費者主觀、持有空調的空間等限制條件，確保滿足冷負荷、空間裝設條件、消費者最少持有產品時間等需求。這對於無法透過初步分析，例如單一產品的生命週期評估方法，來確認最佳循環經濟路徑的產品特別有益，比如在使用階段環境影響重大的高耗能產品。

然而，本研究尚有諸多不足之處：首先，更完整的空調生命週期環境影響應該被考量，例如：冷媒在空調使用期間會適當被補充、保養過程尚有自來水沖洗濾網、保麗龍等包裝。再來，目前的年耗電量估計是由使用時間、空調之冷氣能力及能效指標計算，但應可結合能源分析軟體的 API，掌握氣候條件下比較精確的年耗電量。此外，當空調被維護保養後，效率實際改善量化情況。

為了提升高耗能產品使用效率、同時兼顧整體生命週期環境影響，優化替換決策是重要的，但要同時具有經濟有效性，創新的商業模式、政策支持、經濟與環境綜合優化的評估模式，才能讓高耗能產品服務化推動更順利。因此，本研究認為加速發展高耗能產品服務化的多利害關係者經濟、系統環境等多目標模型是必要的，唯有這樣，才能有助於更好地理解系統，以找到最佳(或最適)的解決方案。這些解決方案評估除了環境或經濟影響的數值外，加強發展不是只強調循環性和資源效率的指標是重要的，此指標應要同時將產品最佳壽命及資源循環性一起納入被考量。

參考資料



- Abdallah, M., Rahmat-Ullah, Z., Hosny, M., & Alsmadi, S. (2024). Minimizing the environmental impacts of waste valorization systems using multi-criteria life cycle optimization. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141619. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141619>
- Aktacir, M. A., Büyükalaca, O., & Yılmaz, T. (2006). Life-cycle cost analysis for constant-air-volume and variable-air-volume air-conditioning systems. *Applied Energy*, 83(6), 606-627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.002>
- Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E. (2011). Material efficiency: A white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 362-381.
- Annarelli, A., Battistella, C., & Nonino, F. (2016). Product service system: A conceptual framework from a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1011-1032.
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308-320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Boldoczki, S., Thorenz, A., & Tuma, A. (2020). The environmental impacts of preparation for reuse: A case study of WEEE reuse in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119736. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119736>
- Carbon Trust, K. C. E. P., Cool Coalition, Oxford University & Race to Zero. (2021). *CLIMATE ACTION PATHWAY Net-Zero Cooling*. <https://www.carbontrust.com/resources/the-climateaction-pathway-for-net-zero-cooling>
- Chow, T. T., Fong, K., Chan, A. L., Yau, R., Au, W., & Cheng, V. (2004). Energy modelling of district cooling system for new urban development. *Energy and Buildings*, 36(11), 1153-1162.
- Colelli, F. P., & Cian, E. D. (2020). Cooling demand in integrated assessment models: a methodological review. *Environmental Research Letters*, 15(11), 113005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb90a>
- Commission, E. (2018). Measuring progress towards circular economy in the European Union—Key indicators for a monitoring framework. In: European Commission Strasbourg, France.
- Cullen, J. M. (2017). Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine? In (Vol. 21, pp. 483-486): Wiley Online Library.
- da Costa Garcia, L., Martins, D. D., Barbosa, R. R., & Carvalho, M. (2021). Greenhouse gas emissions associated with two air-conditioning systems for a university building. *Environmental Challenges*, 5, 100371.
- Dario Abramskiehn, M. R. (2019). *Cooling as a Service (CaaS) LAB INSTRUMENT ANALYSIS*.
- De Kleine, R. D., Keoleian, G. A., & Kelly, J. C. (2011). Optimal replacement of residential air conditioning equipment to minimize energy, greenhouse gas emissions, and consumer cost in the US. *Energy Policy*, 39(6), 3144-3153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.065>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective

- genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- DeMarco, M., & Fortier, M.-O. P. (2022). Functional unit choice in space conditioning life cycle assessment: Review and recommendations. *Energy and Buildings*, 255, 111626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111626>
- Ellis, M. W., & Mathews, E. H. (2001). A new simplified thermal design tool for architects. *Building and Environment*, 36(9), 1009-1021. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00052-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00052-4)
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, 319(5867), 1235-1238.
- Fenaughty, K., & Parker, D. (2018). *Evaluation of Air Conditioning Performance Degradation: Opportunities from Diagnostic Methods*.
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H.-J. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 80-85.
- Finnegan, S., Jones, C., & Sharples, S. (2018). The embodied CO_{2e} of sustainable energy technologies used in buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 181, 50-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.037>
- Hummen, T., & Desing, H. (2021). When to replace products with which (circular) strategy? An optimization approach and lifespan indicator. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105704. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105704>
- Hummen, T., Hellweg, S., & Roshandel, R. (2023). Optimizing Lifespan of Circular Products: A Generic Dynamic Programming Approach for Energy-Using Products. *Energies*, 16(18).
- ITRI. (2005). *Establishment and Updating of the National Greenhouse Gas Emission Inventory*.
- ITRI. (2013). *Air conditioning technical report*. <https://km.twenergy.org.tw/Content/Files/Board/20139119439.pdf>
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 190-201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Khine, Z. M. (2013). NONRESIDENTIAL COOLING AND HEATING LOAD CALCULATIONS. In.
- Kiss, B., & Szalay, Z. (2023). Sensitivity of buildings' carbon footprint to electricity decarbonization: a life cycle-based multi-objective optimization approach [Article]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(7), 933-952. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02043-y>
- Kjaer, L. L., Pigosso, D. C. A., Niero, M., Bech, N. M., & McAloone, T. C. (2019). Product/Service-Systems for a Circular Economy: The Route to Decoupling Economic Growth from Resource Consumption? *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 22-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12747>
- Kuo, T.-C., Smith, S., Smith, G. C., & Huang, S. H. (2016). A predictive product attribute driven eco-design process using depth-first search. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3201-3210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.005>
- Li, Y., Nian, V., Li, H., Liu, S., & Wang, Y. (2021). A life cycle analysis techno-economic assessment framework for evaluating future technology pathways – The residential air-conditioning example. *Applied Energy*, 291, 116750.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116750>
- Liao, H.-y., Cade, W., & Behdad, S. (2021). Markov chain optimization of repair and replacement decisions of medical equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105609. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105609>
- Limb, M. J. (1998). *An Annotated Bibliography: Passive Cooling Technology for Office Buildings in Hot Dry and Temperate Climates*.
- Litardo, J., Gomez, D., Boero, A., Hidalgo-Leon, R., Soriano, G., & Ramirez, A. D. (2023). Air-conditioning life cycle assessment research: A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement. *Energy and Buildings*, 296, 113415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113415>
- Liu, C., Wang, H., Wang, Z., Liu, Z., Tang, Y., & Yang, S. (2022). Research on life cycle low carbon optimization method of multi-energy complementary distributed energy system: A review. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130380>
- Mont, O. K. (2002). Clarifying the concept of product–service system. *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 237-245.
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., Van Acker, K., de Meester, S., & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 452-461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of business ethics*, 140, 369-380.
- Nishijima, D., Kagawa, S., Nansai, K., & Oguchi, M. (2019). Effects of product replacement programs on climate change. *Journal of Cleaner Production*, 221, 157-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.220>
- Palafox-Alcantar, P. G., Khosla, R., McElroy, C., & Miranda, N. (2022). Circular economy for cooling: A review to develop a systemic framework for production networks. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134738. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134738>
- Peña, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Pires, A. C., Weidema, B., Mieras, E., Wang, F., Fava, J., Canals, L. M. i., Cordella, M., Arbuckle, P., Valdivia, S., Fallaha, S., & Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), 215-220. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>
- Rapson, D. (2014). Durable goods and long-run electricity demand: Evidence from air conditioner purchase behavior. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(1), 141-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.04.003>
- Reike, D., Vermeulen, W. J., & Witjes, S. (2022). Conceptualization of circular economy 3.0: Synthesizing the 10R hierarchy of value retention options. *Towards a Circular Economy: Transdisciplinary Approach for Business*, 47-69.
- Rodrigues, E., Fernandes, M. S., & Carvalho, D. (2023). Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. *Building and Environment*, 233, 110104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104>
- Ross, S. A., & Cheah, L. (2017). Uncertainty Quantification in Life Cycle Assessments:

- Interindividual Variability and Sensitivity Analysis in LCA of Air-Conditioning Systems. *Journal of Industrial Ecology*, 21(5), 1103-1114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12505>
- Shi, T., Huang, R., & Sarigöllü, E. (2022). Consumer product use behavior throughout the product lifespan: A literature review and research agenda. *Journal of Environmental Management*, 302, 114114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114114>
- Speake, A., Wilson, E. J. H., Zhou, Y., & Horowitz, S. (2023). Component-level analysis of heating and cooling loads in the U.S. residential building stock. *Energy and Buildings*, 299, 113559. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113559>
- Springer, D., & Dakin, B. (2013). *Measure Guideline: Air Conditioner Diagnostics, Maintenance, and Replacement*. <https://dx.doi.org/10.2172/1069186>
- Tsai, W.-T. (2020). Recycling Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and the Management of Its Toxic Substances in Taiwan—A Case Study. *Toxics*, 8(3), 48. <https://doi.org/10.3390/toxics8030048>
- Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy—a review. *Journal of Cleaner Production*, 97, 76-91.
- Tukker, A., & Tischner, U. (2017). *New business for old Europe: product-service development, competitiveness and sustainability*. Routledge.
- van Loon, P., Diener, D., & Harris, S. (2021). Circular products and business models and environmental impact reductions: Current knowledge and knowledge gaps. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125627>
- Visnjic, I., Jovanovic, M., Neely, A., & Engwall, M. (2017). What brings the value to outcome-based contract providers? Value drivers in outcome business models. *International Journal of Production Economics*, 192, 169-181.
- Wang, C.-K., & Lee, C.-M. (2024). Power System Decarbonization Assessment: A Case Study from Taiwan. *Energies*, 17(4), 859. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/4/859>
- Wu, Y., Maravelias, C. T., Wenzel, M. J., ElBsat, M. N., & Turney, R. T. (2021). Predictive maintenance scheduling optimization of building heating, ventilation, and air conditioning systems. *Energy and Buildings*, 231, 110487. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110487>
- Xiang, N. (2020). The management practice and its experience for the collection and treatment of waste home appliances in Taiwan, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 508(1), 012092. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/508/1/012092>
- Yu, C., Du, J., & Pan, W. (2022). Impact of window and air-conditioner operation behaviour on cooling load in high-rise residential buildings. *Building Simulation*, 工業技術研究院. (2022). 2021 家庭用電資訊百科.
- 王安強、黃國倉、黃瑞隆、林國華、楊忻婕. (2021). 住商部門溫室氣體減量策略成本效益之研究. 2.
- 王榮進. (2022). 綠建築評估手冊-建築能效評估系統.
- 林國華. (2023). 建築空間照明用電密度調查之研究 [台灣大學]. 臺灣博碩士論文知識加值系統. <https://hdl.handle.net/11296/yj7ebg>
- 經濟部能源局. (2022a). 110 年度 我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析.
- 經濟部能源局. (2022b). 2022 非生產性質行業能源查核年報.

附錄



1. 約束條件決定過濾矩陣

在已知與安裝、空調技術問題及空調使用者條件相關的約束下，經訪問空調安裝服務提供商和文獻回顧後，確認了某些空調使用者的決策。相關規則如下：

- 安裝條件：

1. 尺寸限制：空調室內機和室外機的尺寸（長、寬、高）在空調使用者室內和室外安裝位置必須符合特定限制。

舉例：如果空調使用者 A 的空調任一尺寸大於空調使用者 B 相應尺寸，則空調使用者 A 的空調不能轉移到空調使用者 B。例如，如果 $X_{3,1}$ 當前持有的空調的任一尺寸（長、寬、高）大於 $X_{1,1}$ 的任一尺寸，則在過濾表（表附錄 1-1）中，提供者 $X_{3,1}$ 和接受者 $X_{1,1}$ 的交叉欄將填寫 0。

2. 冷卻負荷限制：空調的冷卻能力必須滿足每個空調使用者的冷卻負荷限制。

舉例：如果空調使用者 A 的空調當前冷卻負荷小於空調使用者 B 的冷卻負荷，則空調使用者 A 的空調不能轉移到空調使用者 B。例如，如果 $X_{1,1}$ 的冷卻負荷小於 $X_{3,1}$ 的冷卻負荷，則在表附錄 1-2 中，提供者 $X_{1,1}$ 和接受者 $X_{3,1}$ 的交叉欄將填寫 0。

- 空調條件：

1. 最大技術壽命：空調的最大技術壽命有限制。

舉例：如果空調的最大壽命為 15 年，且 $X_{1,1}$ 當前持有的空調壽命為 15 年，則在表 10 中，提供者 $X_{1,1}$ 和接受者 $X_{1,1}$ 的交叉欄將填寫 0，表示 $X_{1,1}$ 不能保留自己舊的空調（表附錄 1-3）。

- 空調使用者條件（主觀）：

1. 最短擁有期：購買新空調或從他人獲得空調時，空調使用者必須擁有該空調至少 n 年。

舉例：不論是自購還是從他人處獲得，空調需擁有至少 3 年，如果 $X_{1,1}$ 的空調新使用時間少於 3 年，則在表附錄 1-4 中，提供者 $X_{1,1}$ 和接受者 $X_{1,1}$ 的交叉欄將填寫 1，表示需要繼續擁有該空調，而其他交叉欄將設置為 0。

表附錄 1- 1 具有尺寸限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$, $X_{3,1}$ 為例)

Giver Acceptor	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{m,1}$	B^{New}
$X_{1,1}$	Unk	Unk	0	Unk	Unk
$X_{2,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{3,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
...	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{m,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk

表附錄 1- 2 具有冷負荷限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$, $X_{3,1}$ 為例)

Giver Acceptor	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{m,1}$	B^{New}
$X_{1,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{2,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{3,1}$	0	Unk	Unk	Unk	Unk
...	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{m,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk

表附錄 1- 3 具有最大空調技術壽命限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$ 為例)

Giver Acceptor	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{m,1}$	B^{New}
$X_{1,1}$	0	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{2,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{3,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
...	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{m,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk

表附錄 1- 4 具有最少持有空調時間限制的過濾矩陣範例(以 $X_{1,1}$ 為例)

Giver Acceptor	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$	$X_{m,1}$	B^{New}
$X_{1,1}$	1	0	0	0	0
$X_{2,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{3,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
...	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk
$X_{m,1}$	Unk	Unk	Unk	Unk	Unk

2. 本研究部分初始資料

表附錄 2- 1 目標空間初始空調條件彙整

Property	Unit	B1_ROOM_25	B1_ROOM_53	B1_ROOM_6	B1_ROOM_61	G1_ROOM_28	B8_ROOM_20
I_Length	mm	210	210	210	210	210	230
I_Width	mm	810	810	810	810	810	1100
I_Height	mm	295	295	295	295	295	295
O_Length	mm	300	300	300	300	300	300
O_Width	mm	800	800	800	800	800	800
O_Height	mm	555	555	555	555	555	730
Age(空調已使用時間)	year	12	12	12	12	12	11
NewUseTime (某空調使用者使用該 空調使用時間)	year	12	12	12	12	12	11
CP_Old	kW	2.97	2.97	2.97	2.97	2.8	4.13
CSPF_BG	kWh/kWh	4.716	4.716	4.716	4.716	5.16	4.38
CSPF_USE	kWh/kWh	4.354969	4.354969	4.354969	4.354969	4.764978	4.059126
Weight	kg	45.8269	45.8269	45.8269	45.8269	45.5	48
Weight_R410a	kg	0.67716	0.67716	0.67716	0.67716	0.6384	0.94164
GAP_Maintain (距離上次維護/保養之 時間)	year	0	0	0	0	0	0

表附錄 2- 2 新空調初始資料彙整(2023 年)

Property	Unit	RAS- 22HQP/RAC- 22HP	RAS- 28HQP/RAC- 28HP	RAS- 36HQP/RAC- 36HP	RAS- 40HQP/RAC- 40HP	RAS- 50HQP/RAC- 50HP	RAS- 63HQP/RAC- 63HP	RAS- 71HQP/RAC- 71HP
Brand	NA	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Hitachi	Hitachi
Year	year	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023
I_Width	mm	735	735	840	840	940	1110	1110
I_Height	mm	315	315	315	315	315	315	315
I_Length	mm	270	270	270	270	270	280	280
O_Width	mm	825	825	825	825	886	954	954
O_Height	mm	560	560	600	600	685	790	790
O_Length	mm	290	290	290	290	300	315	315
I_Weight	kg	11	11	12	12	14	16	16
O_Weight	kg	31	31	36	36	48	55	55
Weight	kg	42	42	48	48	62	71	71
Age	Year	0	0	0	0	0	0	0
CP_New	kW	2.2	2.8	3.6	4.1	5	6.3	7.2
CSPF_BG	kWh/kWh	6.7	6.19	6.03	5.75	5.9	5.75	5.6
Cost	NTD	28000	32200	39400	41900	48700	57600	63000
Pipe	NA	(2/3)	(2/3)	(2/3)	(2/3)	(2/4)	(2/4)	(2/4)
Weight_R32	kg	0.5016	0.6384	0.8208	0.9348	1.14	1.4364	1.6416



表附錄 2- 3 本研究之目標空間之間距離(km)

	B1_ROOM_25	B1_ROOM_53	B1_ROOM_6	B1_ROOM_61	B8_ROOM_20	G1_ROOM_28
B1_ROOM_25	0	0	0	0	0	1.5
B1_ROOM_53	0	0	0	0	0	1.5
B1_ROOM_6	0	0	0	0	0	1.5
B1_ROOM_61	0	0	0	0	0	1.5
B8_ROOM_20	0	0	0	0	0	1.5
G1_ROOM_28	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0

表附錄 2- 4 本研究之目標空間與服務商距離(km)

Acceptor	Distance
B1_ROOM_25	18.8
B1_ROOM_53	18.8
B1_ROOM_6	18.8
B1_ROOM_61	18.8
B8_ROOM_20	18.8
G1_ROOM_28	19.8