

國立政治大學

國家發展研究所

碩士論文

指導教授：許志義博士

熱泵熱水系統生命週期評估與淨能源分析之整合研究

**Integrated Studies on Life Cycle Assessment and Net Energy
Analysis of the Heat Pump Water Heater System**

研究生：郭乃瑛

中華民國一〇一年六月

謝 誌

這篇論文得以完成，首先要感謝指導老師許志義教授，還記得是因緣際會下許老師的一通電話，我才有機會一窺資源與環境經濟學的奧妙殿堂，老師在課業與論文方面展現的專業，讓修習課業的學生獲益良多。另在論文寫作期間，老師也親自帶著我們拜訪業界與熱泵協會，並在研究上詳加指導，讓本研究得以順利進展；平時老師也親切地關心學生的生活，尤其在遇到研究或課業上的瓶頸與挫折時，老師的鼓勵是支持完成學業與論文的重要動力，謹此向許志義老師致上最誠摯的感謝與敬意。

此外，也要感謝童振源老師、林師模老師、黃奕儒老師在百忙之中撥冗參與學生的口試，並細心給予指導與提供許多寶貴的建議，讓學生在進行研究與撰寫論文中受益良多，並使論文更加充實與完善。

感謝台灣熱泵協會林江財理事長、台灣熱泵協會陳建方秘書長、永續先進能源公司黃瑞湄特助、金弘利公司張鑫龍總裁，在研究過程中熱心給予協助，並提供熱泵熱水系統之相關實證資料以及熱泵技術指導，因為有您們的體諒及幫忙，使本研究能夠順利進行，且更完整而嚴謹，特此表達由衷感謝之意。

謝謝我的好友們，感謝家安在我低潮的時候，不時邀我出去散散心，聽我訴說煩惱，給我的關心與支持；感謝涵柔在我迷惘時，告訴我不要放棄，還給了我很多有用的建議；感謝燕婷在我不知道怎麼面對下一步時，開導我、給我信心與勇氣；感謝宛臻總是在關鍵的時候，對我的貼心加油與問候；感謝鎧安在一起值班期間，讓我對人生有不一樣的思考與啟發。很高興認識你們這群好友，一起出去玩、一起分享生活的甘苦，你們的陪伴讓我碩士生活更顯得絢麗多彩。

另外，感謝同門好友圍漢與嘉豪，互相切磋討論與鼓勵，在你們的幫助下研究路上一點也不孤單；感謝志景學長提點出論文中的小缺失，讓論文能更加嚴謹；感謝婉如總是不厭其煩的幫我校稿，不時給我意見與關心；感謝青春熱血籃球團的大家，週末的球聚總是特別開心，暫時拋開惱人的煩憂；也感謝每一個曾幫助與鼓勵我的朋友們，因為你們讓我能夠好好地完成論文。

最後，感謝爸爸和媽媽因為你們對家庭的付出，無條件的支持與關心，讓我無憂無慮的完成論文與學業；感謝妹妹明明不是自己的領域，卻總是被我逼著了解論文的內容，並要求你跟我討論、給我意見；感謝公公和阿嬤，平時對我的照顧和關心，總是讓我備感窩心。真的很感謝我最親愛的家人們，我愛你們！

郭乃瑛 謹誌

中華民國一〇一年六月

摘要

根據歐盟 2009 年發布之再生能源指令，定義熱泵系統所擷取之大氣熱能、水熱能以及地熱能為再生能源之選項，熱泵技術不受日夜與天候影響，且具安全、有低耗能、低排碳的優點，可應用在空調、暖氣、熱水等設備，備受歐美日本等先進國家重視，也是歐美各國政府極力推廣的項目之一。本研究針對台灣地區家戶住宅所使用小型空氣源熱泵熱水機組，透過環境資源及能源效率的角度，來探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性。

在研究方法上，針對國內熱泵個案廠商進行系統盤查分析，並且估算使用運轉過程中所需之能源投入，以計算熱水系統在製造過程與運轉使用過程中之環境影響。選擇生命週期評估軟體 SimaPro 7.3 做為評估工具，使用 Eco-Indicator 95、EPS 2000 兩種衝擊評估模式，來以生命週期評估探討熱泵熱水系統對環境之影響。並輔以淨能源分析法中能源投資報酬率與能源回收期，以及估算熱泵熱水系統生命週期 CO₂ 排放量，來衡量熱泵熱水系統之能源效率是否具有其效益。並進一步針對不同的再生能源發電比例與提升熱泵能源效率比例，探討不同方案的敏感度分析。

根據本研究分析結果顯示，熱泵熱水系統不管從 Eco-indicator 95 或 EPS 2000 衝擊評估模式下，運轉使用階段對環境衝擊較大，主要的衝擊項目為重金屬汙染，是因為熱泵熱水系統運轉所使用的電力消耗所致。使用熱泵熱水系統對環境衝擊程度遠較電熱水系統來得小，雖在 Eco-indicator 95 之衝擊評估模式下，瓦斯熱水系統較熱泵熱水系統環境衝擊程度較小，但以 EPS 2000 衝擊評估模式下，熱泵熱水系統對環境是最為友善的熱水系統。以淨效益估算熱泵熱水系統源投資報酬率 (EROI) 值為 1.45~5.55，能源回收期約為 0.22 年至 2.16 年，表示熱泵熱水系統從生命週期的角度來檢視能源效率是具有效益的。由於目前熱泵熱水系統對環境最大的負擔來源是電力的使用，若未來能提高再生能源發電比例、降低臺灣電能含碳濃度，或者提高熱泵能源生產效率，均能降低熱泵熱水系統對環境的負面影響。

關鍵字：熱泵系統、生命週期評估、淨能源分析、SimaPro、能源投資報酬、能源回收期

Abstract

The purpose of this study is to apply life cycle assessment (LCA) and net energy analysis to explore the environmental impacts of the heat pump water heater in Taiwan. In order to achieve this objective, domestic data inventory was gathered from local heat pump industry in Taiwan through questionnaires including input of energy, product output and waste, etc. The SimaPro7.3 program and two impact assessment methods including Eco-Indicator 95, EPS 2000 were utilized to evaluate the environmental impact of the heat pump water heater. Also, we used net energy analysis such as energy return on investment and energy payback time, and estimated the life-cycle CO₂ emissions to see whether if the heat pump water heater has its energy efficiency. In addition, the sensitivity analysis was performed by varying renewable energy generation portfolio and the heat pump energy efficiency ratio.

Empirical results of two impact assessment methods (Eco-indicator 95 and EPS 2000) show that the main impact on environment of heat pump water heater is from operation phase. When operating the heat pump water heater, it needs to consume electricity which is generated from fossil fuel and caused the environmental impact. Compared with the electric water heater, the environmental impact degree of heat pump water heater is much smaller. In Eco-indicator 95 method, gas water heater has less influence on the environment than heat pump water heater; however, heat pump water heater is the most environment-friendly system in EPS 2000 method. That is because gas is a kind of nonrenewable resource. From the viewpoint of resource stock, gas indeed influence “Depletion of reserves” of environmental impact. By utilizing net energy analysis, the estimated energy return on investment (EROI) of heat pump water heater is 1.45~5.55, and energy payback time is 0.22~2.16 years. It indicates that heat pump water heater has significant benefit from life-cycle perspective. The main impact to environment by heat pump water heater is essentially derived from electricity input. To mitigation this environmental issue, one can reduce environmental impact by increase the proportion of renewable energy generation, and reducing the electricity CO₂ emission. Furthermore, improving the energy efficiency of the heat pump would also helpful.

Key words: Heat pump water heater, Life-cycle assessment, Net energy analysis, SimaPro, Energy return on investment, Energy payback time.

目錄

第一章 緒論	1
第一節 研究動機與目的.....	1
第二節 研究步驟與流程.....	3
第三節 研究架構.....	5
第四節 研究範圍與假設.....	6
第二章 文獻探討	8
第一節 熱泵熱水系統.....	8
第二節 各國熱泵系統發展概況.....	13
第三節 生命週期評估相關研究.....	17
第四節 淨能源分析相關研究.....	21
第三章 研究方法與工具	23
第一節 生命週期評估架構.....	23
第二節 SimaPro 生命週期評估軟體.....	27
第三節 衝擊評估模式.....	29
第四節 淨能源分析.....	38
第四章 研究結果與討論	42
第一節 系統範圍與資料盤查.....	42
第二節 熱泵熱水系統生命週期評估.....	44
第三節 熱水系統生命週期評估之比較分析.....	54
第四節 熱泵熱水系統之淨能源分析與 CO ₂ 排放.....	63
第五節 熱泵熱水系統生命週期評估之敏感度分析.....	70
第五章 結論與建議	84
第一節 結論.....	84
第二節 建議.....	88
參考文獻	90
附錄	93

表目錄

表 3-1	生命週期衝擊評估之方法特色	30
表3-2	Eco-Indicator 95 環境衝擊類別	32
表3-3	Eco-Indicator 95常態化效應因子	33
表3-4	Eco-Indicator 95加權權重因子	33
表3-5	EPS 2000 環境衝擊類別	35
表3-6	EPS 2000 環境範疇對應表	36
表3-7	EPS 2000 評價加權因子	37
表3-8	本研究使用之衝擊評估模式與衝擊類別	37
表3-9	各能源技術之能源投資報酬率 (EROI) 估計值	41
表4-1	每台熱泵熱水系統生產過程之主要盤查資料結果	44
表4-2	熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 特徵化結果	45
表4-3	熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 常態化結果	46
表4-4	熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 評價加權與單一得點結果	48
表4-5	熱泵熱水系統之EPS 2000 特徵化結果	50
表4-6	熱泵熱水系統之EPS 2000 損害評估結果	51
表4-7	熱泵熱水系統之EPS 2000 評價加權與單一得點結果	53
表4-8	不同熱水系統之Eco-Indicator 95 特徵化比較結果	55
表4-9	不同熱水系統之Eco-Indicator 95 常態化結果	56
表4-10	不同熱水系統之Eco-Indicator 95 評價加權與單一得點結果	57
表4-11	不同熱水系統之EPS 2000 特徵化比較結果	59
表4-12	不同熱水系統之EPS 2000損害評估比較結果	60
表4-13	熱水系統之EPS 2000 評價加權以及單一得點比較結果	61
表4-14	每台熱泵機組主要投入原料及能源之總生產耗能	65
表4-15	熱泵熱水系統之能效係數 (COP)	65
表4-16	熱泵熱水系統使用15年總熱產量	66
表4-17	熱泵熱水系統EROI	66
表4-18	每台熱泵系統製造階段主要投入原料及能源之CO ₂ 排放量	68
表4-19	不同熱水系統之生命週期CO ₂ 排放量	69
表4-20	台灣近五年發電量表	70
表4-21	使用不同比例再生能源發電來源之Eco-indicator 95單一得點比較結果	73
表4-22	使用不同比例再生能源發電來源對環境之影響 (Eco-indicator 95)	73
表4-23	使用不同比例再生能源發電來源之EPS 2000單一得點比較結果	76
表4-22	使用不同比例再生能源發電來源對環境之影響 (EPS 2000)	76
表4-25	熱泵系統之能源效率提升Eco-indicator 95評價加權與單一得點結果	79
表4-26	熱泵系統之能源效率提升對環境之影響 (Eco-indicator 95)	80

表4-27 熱泵系統之能源效率提升EPS 2000評價加權及單一得點結果……………82
表4-28 熱泵系統之能源效率提升對環境的影響（EPS 2000）…………… 82



圖目錄

圖1-1 研究流程圖	4
圖1-2 研究架構圖	5
圖2-1 熱泵熱水系統原理	9
圖2-2 水對水熱泵系統	11
圖2-3 家庭用地熱型熱泵	12
圖2-4 雙熱源太陽能熱泵原理	12
圖2-5 歐洲熱泵系統銷售情形	14
圖2-6 歐洲熱泵系統各國銷售情形	15
圖2-7 歐洲市場各類熱泵系統銷售市占率 (2008)	15
圖2-8 日本ECO CUTE熱泵熱水系統銷售量統計	16
圖3-1 生命週期評估階段	23
圖3-2 生命週期評估步驟	24
圖3-3 Eco-indicator 95衝擊評估模式之圖示	31
圖3-4 能源回收期概念	39
圖4-1 熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 特徵化結果	46
圖4-2 熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 常態化結果	47
圖4-3 熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 評價加權結果	47
圖4-4 熱泵熱水系統之Eco-Indicator 95 單一得點結果	49
圖4-5 熱泵熱水系統之EPS 2000 特徵化結果	51
圖4-6 熱泵熱水系統之EPS 2000 損害評估結果	52
圖4-7 熱泵熱水系統之EPS 2000 評價加權結果	52
圖4-8 熱泵熱水系統之EPS 2000 單一得點結果	53
圖4-9 不同熱水系統之Eco-Indicator 95 特徵化結果	55
圖4-10 不同熱水系統之Eco-Indicator 95 常態化結果	56
圖4-11 不同熱水系統之Eco-Indicator 95 評價加權結果	57
圖4-12 不同熱水系統之Eco-indicator 95 單一得點比較結果	57
圖4-13 不同熱水系統之EPS 2000 特徵化比較結果	60
圖4-14 不同熱水系統之EPS 2000 損害評估比較結果	60
圖4-15 不同熱水系統之EPS 2000 評價加權比較結果	61
圖4-16 不同熱水系統之EPS 2000單一得點分數比較結果	62
圖4-17 台灣2010年發電來源比例圖	71
圖4-18 使用不同比例再生能源發電來源之Eco-indicator 95特徵化比較結果	72
圖4-19 使用不同比例再生能源發電來源之Eco-indicator 95常態化比較結果	72
圖4-20 使用不同比例再生能源發電來源之Eco-indicator 95評價加權比較結果	72
圖4-21 使用不同比例再生能源發電來源之Eco-indicator 95單一得點比較結果	72
圖4-22 使用不同比例再生能源發電來源之EPS 2000特徵化比較結果	75

圖4-23	使用不同比例再生能源發電來源之EPS 2000損害評估比較結果	……75
圖4-24	使用不同比例再生能源發電來源之EPS 2000評價加權比較結果	……75
圖4-25	使用不同比例再生能源發電來源之EPS 2000單一得點比較結果	……75
圖4-26	熱泵系統之能源效率提升Eco-indicator 95特徵化比較結果	……77
圖4-27	熱泵系統之能源效率提升Eco-indicator 95常態化比較結果	……77
圖4-28	熱泵系統之能源效率提升Eco-indicator 95評價加權比較結果	……78
圖4-29	熱泵系統之能源效率提升Eco-indicator 95單一得點比較結果	……78
圖4-30	熱泵系統之能源效率提升EPS 2000特徵化比較結果	……81
圖4-31	熱泵系統之能源效率提升EPS 2000損害評估比較結果	……81
圖4-32	熱泵系統之能源效率提升EPS 2000評價加權比較結果	……81
圖4-33	熱泵系統之能源效率提升EPS 2000單一得點比較結果	……81



第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

工業革命後，化石能源大量的使用帶動了經濟快速成長，而化石能源的使用導致溫室效應氣體快速累積，加速地球的暖化；尤其近年來氣候劇變、天災不斷，讓人不禁擔憂是否真如電影「2012」般世界將走向滅亡？是故，一個國家的發展除了關注在政治、社會、經濟等面向外，更應著重在兼顧能源、環境與經濟並重的永續發展；若沒有可永續生活的環境，談何其它的發展呢？而隨著經濟發展越趨穩定，在一定的生活品質下，人們開始追求更好的生活環境；環保意識的抬頭、綠色思維的崛起，更是希望能透過節能減碳的構想，讓賴以維生的地球，逐漸恢復至以往的樣貌。因此，永續經營將是未來最重要的課題。

此外人類的社會發展與能源使用有密不可分的關係，我們都知道能源是推動國家發展的原動力—它提供產業所需之燃料、原料及動力來源，是現代社會提高人民生活水準之必需品；又能源的使用是影響環境的主要因素，為了達到永續能源發展目標，提高能源使用效率，並落實節約能源將是最根本有效的策略。但台灣自有能源有限，99%以上依賴進口，使得台灣能源價格隨著國際能源市場價格波動，間接影響我國人民生活水準以及產業發展；因此，我國的能源政策除了積極開發無碳之再生能源外，穩定能源供應、提高自主能源比例、提高終端能源使用效率等，皆是我國能源政策重點發展項目（經濟部，2009）。

地球外的大氣層能夠吸收太陽能，加上溫室效應的影響，地表上充滿許多熱能，也可以說整個大氣中就是一個源源不絕的「熱源庫」；而根據熱力學第二定律，每種能量在轉換時，將使得有一些能量轉變成沒有用處的能源，以燈泡來說，我們將電能轉換成有用的光能，可是同時它也產生了沒有利用到的熱能；又例如，我們燃燒化石燃料讓汽車發動產生動能，卻同時也有大量的熱能散失，我們甚至還要使用散熱器等裝置來防止馬達燒毀（Hussen，2004）。生活中這些散失的能量通常沒辦法被利用，但若我們能將地球上到處充滿的熱能收集起來，並加以利用，即能大幅減少能量無謂的損失。此外台灣位處於亞熱帶地區，終年氣候溫暖，若能善用豐富的熱能資源，必定能改善我國能源使用的效率。

熱泵 (heat pump) 可以吸收大自然中之熱能或廢熱，進而使用這些熱能。它為一種「移熱」的裝置，就如同抽水馬達一樣，只不過抽水馬達抽得是水，而熱泵抽得是熱，根據歐盟 2009 年發布之再生能源指令，定義熱泵系統所擷取之大氣熱能 (aerothermal)、水熱能 (hydrothermal) 以及地熱能 (geothermal) 為再生能源之選項。且熱泵技術不受日夜與天候影響，具有低耗能、低排碳的優點，可應用在空調、暖氣、熱水等設備，備受歐美先進國家重視，也是歐美各國政府極力推廣的項目之一。

然而，縱使熱泵發展在國外已相對成熟，目前國外也已有許多熱泵系統相關文獻探討熱泵系統之經濟與環境效益，但我國之熱泵系統仍尚在發展階段。國內熱泵熱水系統全面推廣至今，已有數百件大型熱泵熱水系統案例，大都應用在學校、游泳池、醫院、旅館飯店等地，一般住宅用戶也有熱泵熱水系統，但案例較少 (綠基會，1996)。且國內對於熱泵系統相關研究，多數為探討熱泵熱水系統節能效益以及如何提升熱泵系統的能源效率；因此，本研究針對台灣地區家戶住宅所使用熱泵熱水系統，透過環境資源及能源效率的角度，來探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性。

生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一項受到國際重視的環境管理工具，國際標準組織 (ISO) 也將生命週期評估列入國際環境標準 ISO 14040 中，其概念為產品自原料取得，經過製造、成品使用階段，直至最終廢棄處置各階段的對整體環境生態之潛在衝擊，強調由科學方法盤查而得到量化結果，並提出改善的機會與建議。由於此觀念的引入，產品對環境影響有了不同的思維，因其全面性的考量，更受到國際間重視，歐盟各國也已開始要求某些電子電機產品進行生命週期評估，以達成環境永續發展的目標 (黃信凱，2003)。

國家的永續發展應重視多面向之選擇，減少不必要的社會成本損失，且為了避免鼓勵無效率的粗能源產出高，而卻無淨能源產出之技術，導致資源的加速耗竭，以及其他對環境之負面影響 (廖卿惠，2010)，本研究希望以生命週期評估之研究方法，來探討熱泵熱水系統生命週期中對環境之影響，並輔以淨能源分析法來計算熱泵熱水系統之淨能源產出，分別從環境面以及能源效益面來瞭解熱泵熱水系統對於我國是否具有相對優勢。

基於上述，本研究之目的如下：

1. 建立系統化之熱泵熱水系統環境評估整合分析方法：參考國內外對環境評估之方法，以生命週期評估及淨能源分析之整合模式探討熱泵系統，建立適當的環境評估分析法，作為本研究分析之用。

2. 比較熱泵熱水系統之環境評估分析結果：建立熱泵熱水系統本土性案例之環境分析，了解熱泵熱水系統對環境之衝擊，並與一般家庭常使用的電熱水系統以及瓦斯熱水系統相互比較，以探討熱泵熱水系統之相對環境影響效果。

3. 評估熱泵熱水系統之節能減碳淨效益：以淨能源分析方法中的能源投資報酬率與能源回收期，檢驗熱泵熱水系統之能源投入是否是具有淨效益。

4. 評估台灣地區應用熱泵熱水系統之適宜性：根據本研究分析結果，針對台灣地區未來發展熱泵熱水系統提出相關建議。

第二節 研究步驟與流程

本研究之流程如圖 1-1 所示。研究步驟首先確立研究目標及界定熱泵熱水系統產品生命週期之範圍；其次收集並整理國內外相關文獻，了解熱水系統發展現況、製程及其特性應用，同時使用生命週期評估軟體 SimaPro 7.3，以分析熱水系統之生命週期評估。製作問卷並發放至相關廠商，蒐集產品在製造過程中所需投入的原料及能源清單；待問卷資料蒐集後，利用 SimaPro 7.3 軟體，以生命週期評估分析熱泵熱水系統在製造與運轉過程中對環境造成的影響，並整合生命週期評估的資料進行熱泵熱水系統之淨能源分析。最後根據上述之分析結果，做出結論，並提出建議。

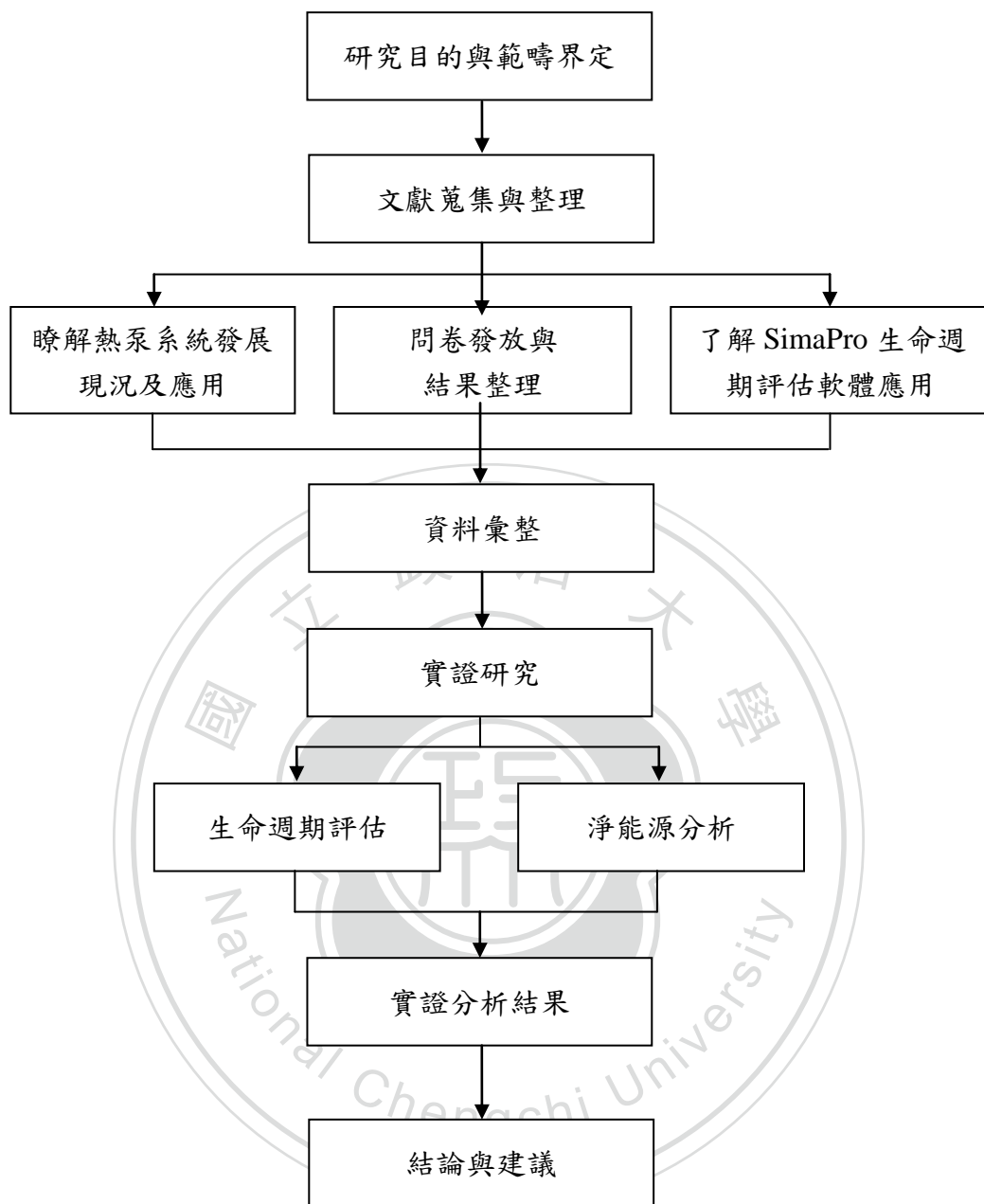


圖1-1 研究流程圖

第三節 研究架構

本研究之架構依上述研究流程分為五章，研究架構圖如圖 1-2，其各章主要內容分別說明如下：

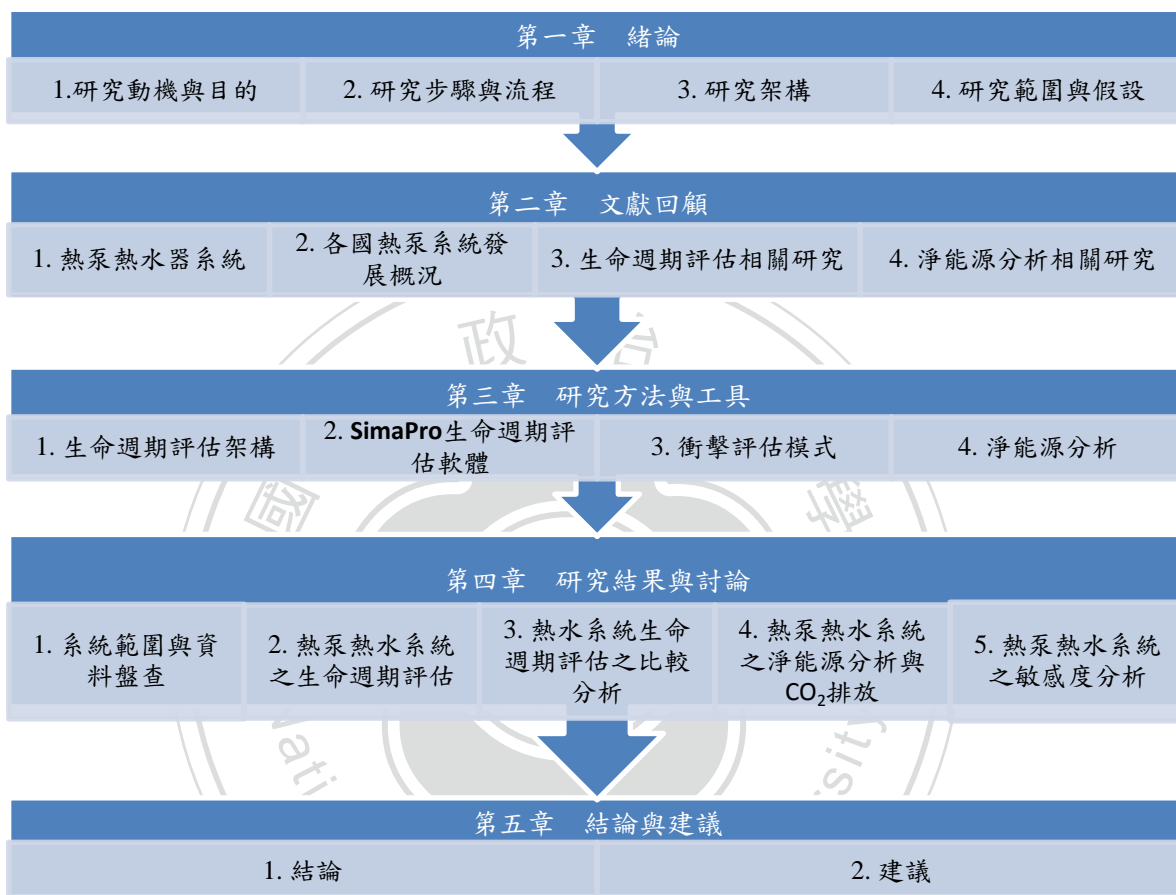


圖1-2 研究架構圖

第三章 研究方法與工具：本章旨在闡述研究方法、分析工具，說明生命週期評估與淨能源分析之發展概況、定義及架構，並探討生命週期評估軟體 SimaPro 7.3，以及生命週期衝擊評估模式 Eco-indicator 95 和 EPS 2000。

第四章 研究結果與討論：本章首先界定研究的目標及範疇，說明整體研究所可能涉及的內容及範圍；第二節使用生命週期評估軟體衡量熱泵熱水系統，在製造以及使用過程中對環境所造成的衝擊，並探討與比較不同模式的差異；第三節針對目前台灣地區之熱泵熱水系統、電熱水系統以及瓦斯熱水系統進行生命週期評估，估算其材料使用、能源投入與相關排放，以探討熱水系統在生產與運轉

的過程中，對環境造成的影響；第四節是利用生命週期評估結合淨能源分析，估算熱水系統之能源投資報酬以及能源回收期，也會估算不同熱水系統之生命週期CO₂排放量，以探討熱泵熱水系統之節能減碳淨效益與環境衝擊；最後以敏感度分析探討兩種情境，包含將再生能源電力使用比例提高，以及熱泵能源技術效率改善對環境改善之程度。

第五章 結論與建議：本章將彙整研究結論各章之研究結果，進行政策研析，並針對未來研究方向提出建議。

第四節 研究範圍與假設

本研究以生命週期評估技術及淨能源分析探討不同熱水系統對環境造成的衝擊，藉由問卷發放與廠商訪談的方式，以99年度的統計資料為主，並以個案廠商為主要研究對象。盤查範圍為熱水系統在製程中相關之原物料投入（包含原料開採）、能源資源消費及廢棄物排放狀況，並且估算使用運轉過程中所需之能源投入，以計算熱水系統在製造過程與運轉使用過程中之環境影響。此外因熱泵設備主機主要是由金屬組成（如鋼鐵及銅），90%以上可以回收，而本研究最主要的能源投入量皆由使用階段產生，此退役回收階段之能源投入量相對微小，故不列入本研究之能源投入及排放。

在研究對象上，由於本研究擬探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性，因此選用適合家庭所使用的小型空氣源熱泵機組做為主要探討對象。系統盤查範圍為熱水系統在製程中相關之原物料投入（包含原料開採）、能源資源消費及廢棄物排放狀況，並且估算使用運轉使用過程中所需之能源投入，以計算熱水系統在製造過程與運轉使用過程中之環境影響。

由於本研究針對國內熱泵熱水系統以生命週期評估之方式，探討熱泵熱水系統對環境之影響，故對國內熱泵廠商在產品製造階段進行系統盤查分析。在民國100年5月至100年7月間，對台灣地區熱泵熱水系統製造進行製程問卷發放，問卷時程為民國99年各廠商製造某特定熱泵熱水系統之全年資料，問卷回收後，比較各家廠商回收問卷的差異性，並選擇資料充分之個案廠商進一步以生命週期軟體模擬分析。

熱泵系統機組之評估過程必須建立許多條件或是數據估算之假設，例如：材料來源地點、運輸模式、處置過程及回收利用等。以下說明各項研究之範圍與假設：

1. 熱泵熱水系統可分為主要的熱泵主機及其他管線，本研究主要聚焦在熱泵機組的生命週期評估上，管線部分暫不列入研究範圍。

2. 熱泵系統製造所需材料經由國外進口至台灣，製造後運輸至運轉使用地點之過程，其能源投入及相關排放資料難以取得，故此部分之能源投入與相關排放也不予以記錄。

3. 熱泵系統機組之維修、保養及管理方面之資料，因需要長期追蹤，礙於本研究有時間及空間上的限制，因此在使用後之維護以及管理相關部分，亦不在本研究的範疇。

4. 由於我國尚未建立各種原物料、能源及相關物品生命週期評估之資料庫¹，本研究所採用的部分資料來源係取自 SimaPro 生命週期評估軟體中的資料庫，其中大部分屬於歐洲地區的盤查資料。因此，本文個案研究除了透過問卷調查取得第一手資料外，部分不足的資料（如：鋼鐵原料資源投入、鋼鐵之各種空氣水汙染物排放等），選取 SimaPro 資料庫的數據，補足實證研究之參數來源。

¹ 此資料庫包含各種原物料、能源及相關物品生命週期評估，可分別為方法資料庫、製程資料庫、處置百分比資料庫。方法資料庫儲存不同環境衝擊分類之相對指數，例如：各種污染物的溫室效應因子（GWP）、臭氧破壞潛能（ODP）之評估權重；製程資料庫包括物質、能源、運輸、製程、使用、廢棄物處理及處置等資料；處置百分比資料庫是包含產品使用後廢棄之焚化、資源回收及掩埋百分比。

第二章 文獻探討

本章主要內容為熱泵系統運轉原理，以及熱泵熱水系統的種類，包括空氣對水熱泵、水對水熱泵、地源熱泵和兼具太陽輻射源與大氣熱源之雙熱源型熱泵，並簡述目前世界各國應用熱泵系統之概況與發展情形，最後針對本研究所採用之研究方法「生命週期評估法」與「淨能源分析法」進行國內外相關文獻探討。

第一節 熱泵熱水系統

一、熱泵概述

熱泵（heat pump）依「新國際制冷詞典（New International Dictionary of Refrigeration）」定義為「以冷凝器放出熱量以供應熱的制冷系統」，從低溫熱源環境吸熱後放熱至高溫熱源（陳鈞華等，2009）。而黃秉鈞（2007）將熱泵解釋為「一種可以吸收大自然中的熱能或人為排放的廢熱，產生熱水或暖氣的高效能科技產品」。

簡單地說，熱泵是一種利用冷熱交換，將熱能從一個地方搬移到另外一個地方的系統，就如同家裡常用的水泵一樣，把水從地下室自來水池抽到頂樓水塔，而熱泵則是藉由電力吸取自然界的熱能，讓冷熱能源互換，使用這樣的系統裝置不需要透過燃燒，也不會產生多餘的廢熱以及二氧化碳。

其實我們經常使用的冷氣機和冰箱也是屬於熱泵，熱泵熱水系統原理與冷氣機相同，它們都是屬於一種移熱裝置，從低溫吸收熱能，並將熱能排入高溫環境，也就是說將熱能從冷氣房或冰箱裡移到大氣中，只是冷氣機與冰箱的需求端是冷能，利用凝結器排出熱到大氣之中；相反地，熱泵的需求端是熱能，它並非將熱能排到大氣之中，而是將這些熱能加以運用，如將往外排出的熱能排入一個水槽中，就可以製成熱水、而排入室內也可當作暖氣空調系統等，這些原本要排放的廢熱回收，就變成有用的能源。

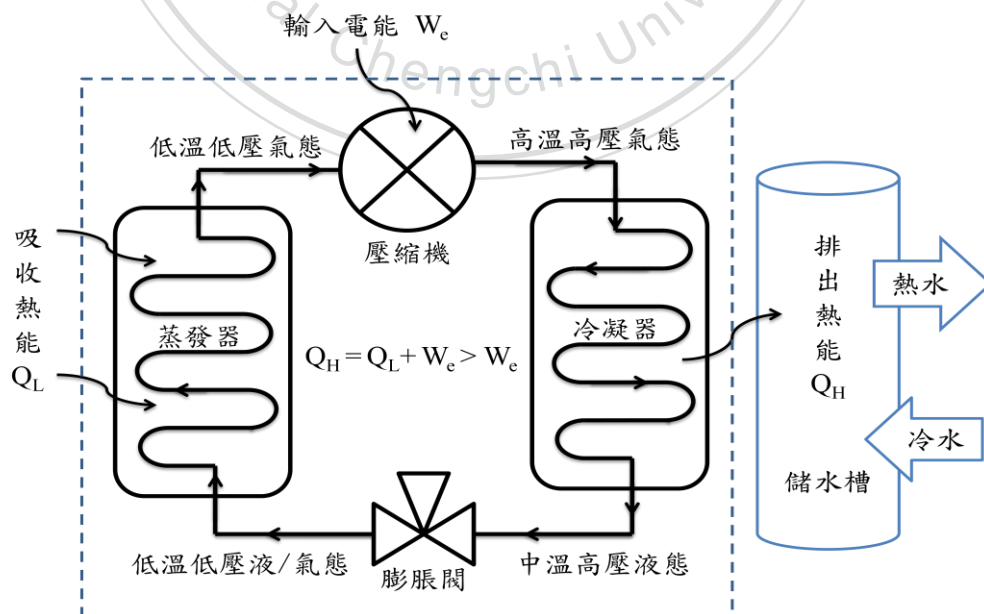
由於熱泵熱水系統是使用「壓縮原理」吸收空氣中，有別於鍋爐與瓦斯熱水系統，不需要柴油、瓦斯或是天然氣做為燃料使用，熱泵機組運行時無燃燒現象，可避免桶裝瓦斯一氧化碳中毒與氣爆危險，這種相對外部效益是許多飯店、旅館、學校宿舍等，都將原本高溫危險之鍋爐，陸續汰換成使用上較安全的熱泵設備。

我們消耗少量的不可再生能源，並應用熱泵轉換自然的熱能，可達到大量冷熱交換以供使用；其具有節能的優點，並同時具備環保與安全的特性，因此近年來普受各國重視，進而節約能源、減少碳排放，來實現環境永續發展之目的。

二、熱泵原理

「熱泵」利用壓縮機的熱力循環原理（朗肯循環，Rankine cycle）來產生移動熱能的作用，它主要由四個組件構成分別為壓縮機、冷凝器、節流閥或膨脹閥、蒸發器，另外還包括二氧化碳、氨或鹵化物之類的冷凍劑等。

圖 2-1 所示，整體零件內部充滿冷媒，冷媒以低溫低壓蒸氣的狀態進入壓縮機，藉由壓縮機輸入能量，轉換成高溫高壓蒸氣流入冷凝器。在冷凝器中冷媒蒸氣因排放熱量而液化成中溫、高壓液態冷媒，而其他欲加熱之物質（如：水或空氣）會因為吸收冷媒排放出的熱而增溫，使其溫度增高，如果為空氣並散發於室內就成為暖氣。當冷媒以高壓液態離開冷凝器後，被導入膨脹閥，在此過程中冷媒降低其本身壓力，以至於部分冷媒發生氣化現象，最後以低溫低壓液氣共存的狀態離開膨脹裝置，膨脹閥的功用則是藉蒸發器熱負荷的大小控制系統中冷媒的流量，使冷媒得到最佳的蒸發效果。液氣共存的冷媒經膨脹閥流入蒸發器後吸收外界熱量，轉化成低溫低壓飽和氣態，此蒸氣再被壓縮機吸入繼續進行壓縮，構成一循環迴路。簡而言之，整個循環的過程，熱能從蒸發器被吸收，然後在冷凝器處被排出，由此構成一個熱的移動過程。



資料來源：本研究整理繪製

圖 2-1 熱泵熱水系統原理

根據能量不減原理，排出熱能 (Q_H) 會等於吸收的熱能 (Q_L) 加上輸入的電能 (W_e)，即 $Q_H = Q_L + W_e$ 。而熱泵最後被排出並收集應用的熱能 (Q_H) 會高於輸入電能 (W_e)，因此可以達到節約能源的目的。

目前市面上的熱泵產品大多以電能驅動，熱泵空調排入室內的暖氣能量 (Q_H)，約為輸入電能 (W_e) 的二到三倍左右，而傳統的電暖爐，輸入 1 度電，頂多也只能獲得 1 度電的暖房能力。因此，採用熱泵來取暖，可以節省電力約五到七成，是值得大力推廣的綠色環保器具，而以熱泵熱水系統為例，其製造熱水的能源效率相較於瓦斯與電熱熱水系統，能源效率也高 (綠基會，1996)。

熱泵熱水系統的不利因素為價格較高，大型系統的節能與經濟效益較為顯著，因此已往主要應用於溫水游泳池、宿舍、旅館與醫院等，但是受到油價持續上漲與環保意識抬頭的影響，家用型熱泵熱水系統逐漸打入家用住宅市場 (鄭耀宗，2008)。

三、熱泵熱水系統之種類

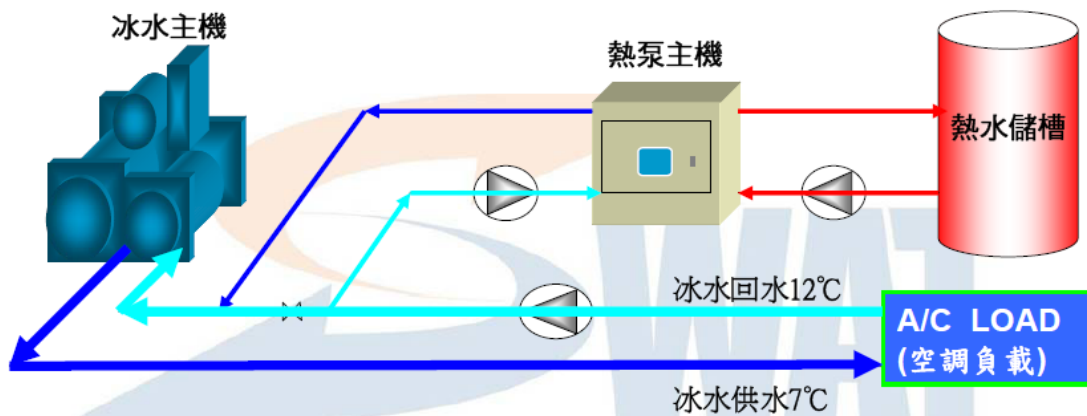
熱泵熱水系統與傳統冷媒冷氣機的運轉原理相同，只是運轉方向與使用功能相反。傳統冷氣機利用冷媒吸收室內空氣的熱量，並將此種熱量經由冷媒排到室外的空氣，至於冷媒的循環則使用壓縮機與膨脹閥形成迴路；熱泵熱水系統係利用冷媒吸收室外空氣的熱量，並將此種熱量經由冷媒傳遞製造熱水，且將熱水儲存於保溫型桶槽中，以供洗浴等用途。室外空氣也可改為自來水或地下水，因此熱泵熱水系統依據熱源之型態，可分成空氣源、水源、地熱源及太陽輻射源等四種熱泵系統 (綠基會，1996)。

(一) 空氣對水熱泵 (Air-to-water heat pump)

「空氣對水熱泵」也稱為「大氣取熱式熱泵熱水系統」是一種空氣源熱泵，其熱源是取自空氣中的熱 (例如：一般室內、室外空氣、製程燃燒廢熱、大氣熱源等)，熱能在蒸發器被冷媒吸取後，此時原有悶濕空氣被吸取熱量後，即轉變成乾冷之空氣，這就是日常生活中的冷氣，所吸取的熱能經壓縮機傳輸到冷凝器，在此排出熱能來提升水的溫度，產製溫熱水，以達到我們對熱水的需求，又因為冷氣和熱水都有很廣泛的應用，這類熱泵相當普遍。

(二) 水對水熱泵 (Water-to-water heat pump)

這類型的熱泵都以水做為熱傳遞媒介，其熱源取自於大自然的水（自來水、海水、山水、溪水、地下水井水或工業排放水等），一般常見的熱回收雙效式，不但產製冰水，供應冷氣空調使用，同時也將原本排到大氣中的熱能回收製造熱水，大自然的水資源熱能被吸取後，原常溫的水即變成 $7^{\circ}\text{C}\sim 12^{\circ}\text{C}$ 的冰水，原有被吸收的熱能經壓縮機傳輸轉換成溫熱水，此為水對水熱泵，其原理如圖 2-2 所示。



資料來源：承研能源科技

圖 2-2 水對水熱泵系統

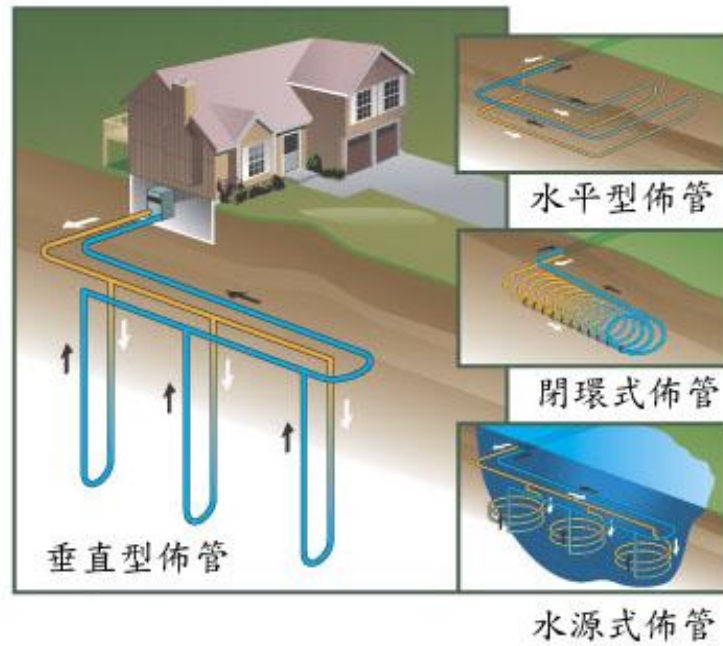
(三) 地熱源熱泵 (Geothermal heat pump)

地球蘊藏無限的地熱能源，除一般人所熟知的地熱（如溫泉）外，在離地表 20 公尺以下的地底層，終年溫度變化很小，約維持在 20°C 左右，也是一座巨大無比的蓄能庫，而地熱源熱泵主要是利用「地層」做為熱能的主要來源，在冬季時，可利用熱泵取得地底層的熱源製熱以供使用；夏季時，地表溫度高於地底，此時熱泵可用於冷氣空調，因此一年四季都可以使用熱泵，來達到調節室內溫度之目的。

(四) 太陽輻射源與大氣熱源型 (雙熱源型)

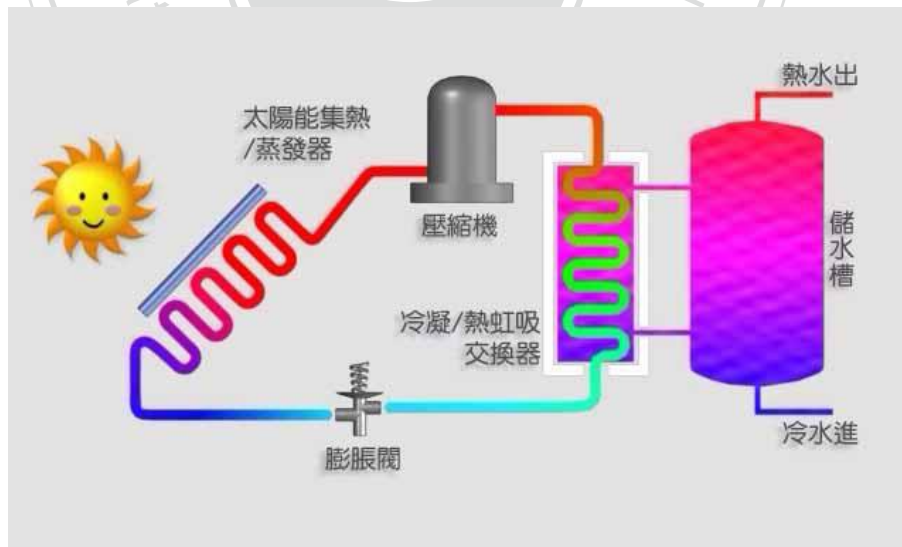
利用太陽能集熱板與蒸發器收集太陽能，至熱泵壓縮機透過冷凝/熱虹吸交換器，將熱能儲存至熱水儲槽。雙熱源型熱泵熱水系統可以同時利用空氣源和太陽能輻射能作為熱泵熱源，穩定性較高，晴天時同時從大氣與太陽取熱，而陰雨天與夜晚則全由大氣取熱，其運轉不受天氣變化影響（黃秉鈞，2007）。

家庭用的地熱型熱泵熱水器



資料來源：鄭耀宗，2008

圖 2-3 家庭用地熱型熱泵



資料來源：黃秉鈞，1996

圖 2-4 雙熱源太陽能熱泵原理

第二節 各國熱泵系統發展概況

熱泵作為供熱系統的使用在歐美地區較為普及，由其是在緯度高的國家，例如北歐、加拿大等，其居民的室內暖房需求也相對較高，熱泵空調主要作為室內暖氣供應的設備。由於熱泵的使用技術受限於國家地理與氣候環境之影響，南歐早期以發展熱泵熱水系統為主，而在瑞典與德國更發展出海水熱源熱泵系統，其他歐盟各國也都在積極推動熱泵熱水系統；從 2000 年開始，日本利用政府推廣熱泵熱水系統，熱泵熱水系統使用也逐漸普及，成為全球矚目的生產大國；至於中國大陸則從 2004 年起興起一股熱泵熱水系統的使用風潮。

各國受到油價持續上漲與 CO₂ 減量要求的衝擊，熱泵的使用已成為這些地區節能減碳的方案之一，由於熱泵可避免傳統鍋爐燃燒所帶來的二氧化碳排放，採用熱泵系統來取代較舊或低效率的鍋爐是減少燃油使用的優先選擇，因此熱泵的市場前景顯得相當亮麗。而各國也會因應其地理與氣候環境之不同，以最容易取得熱源的方式發展熱泵應用產品，使熱泵技術在各國呈現多元的發展。

一、美國

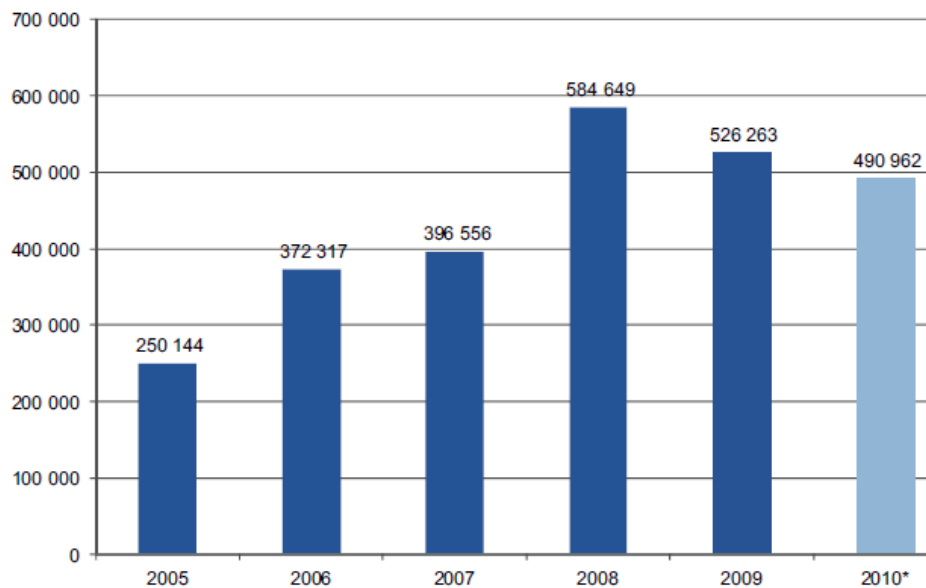
熱泵設備在北美洲是一成熟的技術而且增長的市場。70 年代起，房地產市場增加也給了熱泵銷售一個大助力，從此這類產品的銷售量平穩地增加成長。美國的熱泵市場每年約有 63 億美金，其中熱水加熱系統和室內暖氣供熱系統各佔有一半市場。目前美國熱泵發展的焦點主要集中在地源熱泵，官方估計全美國已安裝 60 萬台的地源熱泵，2008 年銷售數量為 12 萬 1 千台機組；產業界估計地源熱泵自 20~30 年前開始，目前累積已安裝 100 萬台（林育堯、翁黃燦，2009），但由於地源熱泵仍有些許市場障礙（施工難度與初期費用較高、大眾對熱泵技術的認知與信賴度、良好訓練的施工人員缺乏等）若能針對這些市場障礙加以克服，地源熱泵的運用比例將可大幅增加（李依霓，2010）。

在過去，電力業者很普遍會對安裝高效率的空調機或熱泵以替換其它燃料或替換較低效率的系統的顧客提供折扣，但政府減少電業管制干預的趨勢下，使得許多電力業者減少提供相關折扣，而美國政府透過能源之星計劃，促進對高效率設備的使用，以淘汰市面上較低效率的產品設備（鄭維嶽、韋宗樑，2008）。

二、歐洲

雖然美國一直都是熱泵技術領先的國家，但實際上熱泵在歐洲的銷量高出美國許多，由於東京議定書和歐盟禁止氟氣（F-gases）的規定，再加上能源價格不斷飆漲，促使歐洲地區熱泵空調機的發展，利用空調的室外機取代鍋爐，而室內則仍然使用地板加熱系統，這樣的系統近年來在歐洲越來越受歡迎，現今歐洲已成為全球熱泵空調機的重要地區（林育堯、翁黃燦，2009）。

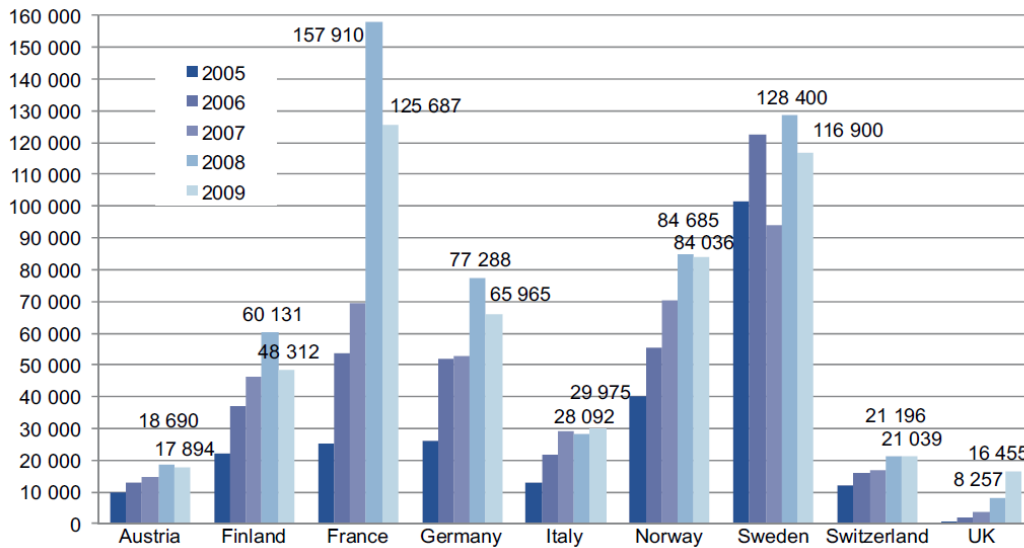
根據歐洲熱泵協會（EHPA）的統計資料圖 2-5、圖 2-6 歐洲熱泵系統銷售情形顯示，2005 年歐洲熱泵銷售總量（以奧地利、芬蘭、法國、德國、義大利、挪威、瑞典、瑞士與英國等九國銷售量）約為 25 萬台，2008 年就增加至 58 萬台，其中以法國 15.7 萬台最多，其次是瑞典、挪威，但 2009 年後受到金融海嘯之影響，熱泵銷售數目下跌，不過 2010 年市場下跌的狀況已經停止，預估未來市場前景更佳樂觀。



資料來源：EHPA Outlook 2010

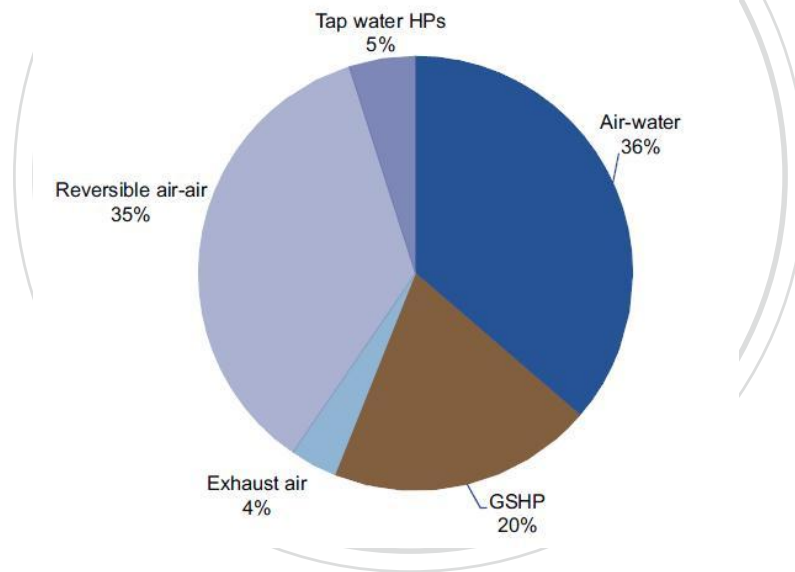
圖2-5 歐洲熱泵系統銷售情形

圖 2-7 為歐洲市場各類熱泵系統銷售市占率，以熱泵類型來看，空氣源熱泵仍是市場的大宗，主要以溫暖的南歐、中歐較普遍，但實際上北歐地區空氣源熱泵市場成長快速，瑞典主要利用熱泵熱水系統供應暖氣，同為斯堪地納維亞半島國家的芬蘭與挪威，也遵循同樣的發展型態（鄭耀宗，2008）。



資料來源：EHPA Outlook 2010

圖 2-6 歐洲熱泵系統各國銷售情形



資料來源：EHPA Outlook 2009

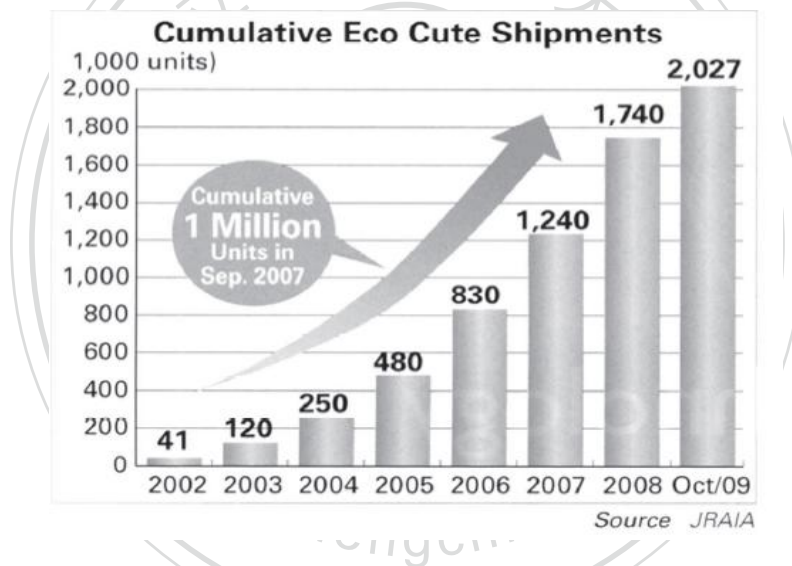
圖 2-7 歐洲市場各類熱泵系統銷售市占率（2008）

三、日本

相較於歐美地區，當我們談論人口密集又溫暖氣候亞洲熱泵市場，會以冷藏除濕的空調和熱水系統為主，日本早在 1986 年即成立日本熱泵技術中心

(HPTCJ)，推展熱泵技術與應用，政府亦提供補助以加速推廣家用熱泵熱水系統，目前其產能已經超過歐洲任一國家，儼然成為熱泵熱水系統的生產大國。

日本熱泵市場每年約 30 億美金，熱水加熱系統佔 75%，而室內暖氣供熱系統則佔 25%。日本熱泵熱水系統市場的主要產品為使用 CO₂ 冷媒的機種，稱為「ECO Cute」，原是關西電力公司的註冊商標，目前已經有 9 家日本電力公司同意將它作為統一的品牌名稱。該產品是使用天然冷媒 CO₂，對全球溫室效應的衝擊很少，而且比過去使用氟碳化物冷媒的熱泵具有更佳的能力，另外它利用深夜低價的離峰電力，運轉費用低廉，但影響熱泵熱水系統普及化的主要原因是價格太貴，日本政府自 2002 年起開始實施補助金措施方案，以期將熱泵熱水系統平順地導入商業市場。受此措施的影響，銷售量也逐漸增加(林育堯、翁黃燦，2009)。



資料來源：JARN, December 25, 2009

圖 2-8 日本 ECO CUTE 熱泵熱水系統銷售量統計

四、中國大陸

中國約在 90 年代開始出現熱泵產品，雖然熱泵技術與應用起步較晚，但隨著中國建設發展，熱泵成長快速，也逐漸形成完整的熱泵工業體系。美國能源部和中國科技部更於 1997 年 11 月簽署了中美能源效率及可再生能源合作議定書，其中主要內容之一是「地源熱泵」，擬在中國的北京、杭州和廣州 3 個城市各建立一座採用地源熱泵供暖空調的商業建築，以緩解中國對煤炭和石油的依賴程度，

進而達到能源資源多元化的目的。

目前在中國長江以南地區氣候溫暖，主要使用空氣源熱泵產品，廣東、廣西等地區銷量非常可觀，而長江以北地區受制於年平均氣溫較低，較不適用空氣源熱泵，北京地區已有不少商用、民用住宅都開始使用地源熱泵機型，但由於地源熱泵需要有足夠空曠的場地來埋設地下管道，因此目前還是以學校、企業、旅館、醫院等為主要市場（鄭耀宗，2008）。

中國大陸的熱泵市場每年約有 29 億美金，熱水加熱系統佔 90%，而室內暖氣供熱系統則佔 10%。2007 年，中國能源局計畫熱泵補助，由財政部下達 2006 年可再生能源建築應用專項資金人民幣 10368 萬元，其中包含熱泵系統項目也可以申請補助，地源熱泵每平方米補助人民幣 50 元，水源熱泵每平方米補助人民幣 35 元（李依霓，2010）。

五、臺灣

熱泵技術在臺灣地區主要是應用在於大型的熱泵熱水系統，像是醫院、飯店、學校宿舍、安養院和游泳池等，超過百件安裝案例，目前年產值已超過十二億元。近年廠商也開始推廣家用熱泵熱水系統，但因為其正處於萌芽階段，市場能見度不高，再加上熱泵機組價格較其他熱水系統高，且一般民眾不了解此類產品等因素，市場仍然不易推動。

政府也在鼓勵推廣熱泵熱水系統，對能源用戶裝置「熱泵熱水設備」之相關獎勵補助政策有「投資抵減辦法」及「節能設備優惠貸款」，但這些政策並不適用於一般民眾，而國內針對熱泵系統也沒有統一的能源效率規範或安全檢驗標準，造成市場產品良莠不齊，使得熱泵產品推廣更為不利（綠基會，1996）。

第三節 生命週期評估相關研究

近幾十年來，各國政府與學者越來越關注環保議題，企業主在面對這樣的趨勢下，更應該要做好環境評估的工作，而每項產品從生產到實際運轉，至最後廢棄的過程中，所消耗的能源和所生產的廢棄物對生態環境有多少影響？

生命週期評估（Life Cycle Assessment, LCA）屬於系統分析方法之一，是用於評估與某一產品（或服務）相關的环境因素和潛在影響的方法，其為「對產品

系統自原物料的取得到最終處置的生命週期中，投入和產出及潛在環境衝擊之彙整與評估。」(ISO14040, 2006)。意即從產品的原料開採、能源使用、製造與運輸、運轉使用到最終棄置回收等各個階段對環境衝擊影響的程度，即為「從搖籃到搖籃」(Cradle to Grave)的整個生命週期中，評估對環境潛在衝擊。它是通過編製某一系統相關投入與產出的存量記錄，評估與這些投入、產出有關的潛在環境影響，根據生命周期評估研究的目標解釋存量記錄和環境影響的分析結果來進行的。

生命週期評估之概念應用，始於 1960 年代末期至 1970 年代初期，最早可追溯至 1969 年美國可口可樂公司，為了找出適合產品企劃又能兼顧環境處理成本的需求，委託中西部研究所 (Midwest research institute, MRI) 對其飲料容器材質之考量各項經濟因素，並估計不同材質容器在原料取得、製造過程和使用等各階段之能源投入，以及污染排放對環境衝擊的詳細資料等環境因素，來評估是否要運用寶特瓶飲料容器來替代原本的玻璃瓶。這個案例被視為生命週期評估商業應用之首例，此後生命週期評估的概念逐漸受到重視，這項評估技術持續的運用在飲料容器、尿布、毛巾等日常用品上。

環境毒理化學協會 (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)，在 1990 年提出 LCA 的定義與架構，而後國際標準組織 (International organization for standardization, ISO) 於 1996 年公布 ISO 14040 系列標準，訂定生命週期評估架構及步驟，提供給業界在環境管理上一套相關作業的依循標準。2002 年，世界高峰會所提出的促進永續消費及生產模式，聯合國環境規劃總署 (UNEP) 與環境毒理化學協會共同合作，推行為期十年的生命週期計畫 (Life Cycle Initiative)，使生命週期評估與生命週期思考 (Life Cycle Thinking) 能實際應用至產業生產及政府決策之中。

近年來，由於環保意識抬頭，再加上政府部門以及相關產業的支持，使國內外諸多研究單位和專家學者陸續將生命週期評估技術廣泛地應用在各項消費性產品、家電產品、汽車、廢棄物、再生能源等項目，以期能達到產品能真正達到與環境相容的目標。以下列舉國內外近年來，對生命週期評估的相關研究論文及其概況。

劉書宏 (2010) 使用生命週期評估探討建築物地源熱泵系統，以現實建築物之能源使用統計資料為參考值，針對其所需之空調及熱水能力進行換算，分析 7

種情境，其中包括標的使用中央空調和鍋爐之原始統計資料，和其他假設情境，評估結果為全部空調皆替換為地源熱泵空調在能源投入、CO₂ 減少排放量及使用階段能源費用等項目表現最佳，而所需的熱水量由 GSHP 空調系統提供再與原來中央空調以一定比例搭配，這樣的情況則在各假設情境中表現最差，但相對使用中央空調和鍋爐於而言，在 CO₂ 減少排放量、能源投入及使用階段能源費用等亦有相當程度之優勢。與原始統計資料相比較，使用階段之能源投入減少量約在 69,747~123,082GJ 之間；使用階段之 CO₂ 減少排放量則在 2,429~ 11,662Mt 之間；使用階段能源費用節省量為 5,260~8,680 萬之間，而地源熱泵空調機組之能源償付期分別為 0.10 至 0.16 年；排放償付期則為 0.10~ 0.12 年。

李雲婷（2009）使用生命週期評估軟體 SimaPro 7.1 中 Eco-indicator95 做為評估模式，量化雨水供水系統中之貯蓄系統於製程階段所產生的環境衝擊。研究結果顯示，單就製程部分，不銹鋼水塔之總 Pt 值為塑膠水塔的 3 倍左右。整體而言，不銹鋼及塑膠水塔的環境衝擊頗為一致，皆是以溫室效應、酸化、煙霧危害等衝擊類別為主。使用階段部分，不銹鋼水塔及塑膠水塔在使用 20 年後，在節水節能上均有很大的貢獻，且對環境之衝擊影響均為友善的，而桶容量越大其環境正面效益亦會隨之增大。

王景玟(2005)以鋼鐵業為實例，探討生命週期評估之技術應用，利用 SimaPro 5.1 中兩種評估模式，包括 Eco-indicator 95 及 Eco-indicator 99，分析鋼鐵產品在其製程階段所衍生之潛在環境衝擊，並進一步比較施行不同節能措施時對環境衝擊之差異，以及比較個案廠商在 89 年至 92 年期之生態效益。研究結果顯示，因鋼鐵產品製程之衝擊，主要反映在溫室效應、能源耗用、酸化/優養化、煙霧等項目，兩家鋼鐵業個案廠商之生態效益比較值，在 89 年至 92 年期間，並無大幅之增、減趨勢。

劉家豪（2004）利用生命週期軟體 SimaPro 5.1 與 GaBi 4，量化 IC 產品於製造階段所衍生的環境衝擊大小。研究結果發現，DRAM 在製造過程因為使用大量能源及資源，增加環境負擔，其所排放之污染物可能造成夏季煙霧危害、重金屬污染及酸化潛勢等衝擊。若考量環境化設計之概念，可從蝕刻與薄膜步驟著手，減低設備耗電量及用水量，並控制化學品的使用量及污染物之種類數目。

黃瓊儀（2003）以生命週期評估技術探討不同人造纖維產品之環境衝擊。使用 SimaPro 5.0，應用三種評估模式，包括 Eco-Indicator 99、EPS 2000 及 CML2，

並進一步針對不同的人纖業產品作產能及燃料結構之更換，探討不同方案的敏感度分析。研究結果顯示兩種人纖產品其衝擊來源主要為燃料（燃料煤）使用，其他來源則為聚酯纖維之主原料純對苯二甲酸；在模式分析中，主要衝擊為造成資源的耗損，其次衝擊為人體健康。在敏感度分析之結果顯示，藉由減少聚酯纖維產品的生產，可因原料純對苯二甲酸的使用減少而有效降低各項之環境衝擊，而若改變燃料結構，則人體健康及生態系統品質之衝擊將因燃料煤使用的配比減少而降低。

Rey et al. (2004) 透過生命週期評估建築物空調空氣對空氣熱泵，採用 Eco-Indicator 99 和 EPS 2000 兩種衝擊評估模式，並且與燃氣鍋爐做比較。結果顯示，在 Eco-Indicator 99 主要的影響是可吸入性無機物、致癌物以及氣候變化，而 EPS 2000 則是資源削減、壽命減損的類別。另外如考慮外部環境成本，熱泵相較於鍋爐則有更好的長期營利能力，就使用壽命及經濟收益比較熱泵也優於鍋爐，主要是因為鍋爐只能製造熱源，而熱泵在製造熱源同時也製造冷源，因此在夏季製冷上並不需要額外的投資需求。

Shah et al. (2007) 針對美國境內四個不同之地區（Minnesota、Oregon、Pennsylvania 及 Texas）各進行了三種不同空調系統（暖氣爐、熱水爐及空氣源熱泵）的生命週期評估，此研究使用了評估軟體 SimaPro 5.0 以及衝擊評估模式 Impact2002+ 來進行，研究結果發現在三種空調系統中以熱水爐在製造上對於環境帶來的衝擊是最有關連的，衝擊分為四項，人體健康、環境品質、氣候變遷及資源使用。由於熱泵是使用電力，四個地區中唯獨 Oregon 採取再生能源發電，熱泵在此區的環境衝擊最低，其餘區域都是暖氣爐表現較好。

Blum et al. (2009) 針對了德國西南部熱泵空調系統的二氧化碳排放量與傳統供熱做比較分析，其結果發現依照電力結構來源的不同，使用熱泵系統大約可節省 35% 或 72% 之 CO₂ 排放量，與傳統空調系統比起來平均每年最少可節省 2000 噸的 CO₂ 排放量。若可增加安裝熱泵機組的數量，並增加再生能源發電比例，是將可大大避免加熱過程的二氧化碳排放。

Rey et al. (2010) 使用生命週期評估軟體 SimaPro 7.1 評估半間接陶瓷蒸發冷卻器（semi-indirect ceramic evaporative cooler, SIEC）和熱泵比較兩者環保特性，兩者主要對環境的衝擊在於非生物資源，其次是人體健康。研究並指出熱泵系統生命週期中，電是主要的環境負擔，其次是熱泵組件，包括壓縮機，外接

電池，外部風扇等具有最高的影響。半間接陶瓷蒸發冷卻器在內陸乾旱的地區在環保與經濟上較熱泵具效益，另外，研究也顯示熱泵比較適合氣候潮濕的城市。

以上討論可得知，生命週期評估所要探討的不僅包括實體產品，亦包括服務系統，因此需考量之環境衝擊通常包括資源使用、人體健康及生態影響等，以較多元的角度來分析熱泵熱水系統。由於本研究以環境面之角度來探討熱泵熱水系統對環境之影響，故使用生命週期評估為本研究之研究方法。

第四節 淨能源分析相關研究

在消費一項最終資源前，這項資源一定經過開採、運輸、使用等過程，因此在評估能源是否可以永續性發展，除了考量直接性的能源投入外，我們必須同時考量其生產過程、運輸、建造過程的間接能源投入，直接與間接投入之和是否大於其能源產出，來判斷此能源生產是不是符合效益。在 1970 年代能源危機以後，各國積極尋找可以替代化石能源的新能源，淨能源（Net Energy）之概念也同時被提出。

由於尚未有熱泵系統淨能源分析之相關文獻，以下回顧以淨能源分析方法以及熱水系統淨能源分析之相關文獻。

Bailey (1981) 使用淨能源分析探討八種將能源轉換成家用熱水的方法，包括使用電力（發電來源分別有煤炭、核能、太陽能衛星、太陽能發電塔）、天然氣、石化燃料、太陽能集熱器等。結果顯示電熱水系統的能源投資報酬率較太陽能集熱熱水系統高，因為同時考慮了成本、能源的品質以及金屬的消耗，但若只考慮了能源因素，化石燃料是最不被鼓勵使用於家用熱水，因為這些燃料應該保留給需要效能更高的能源需求上。從淨能源觀點來看，使用電力熱水系統還是比太陽能熱水系統來得有吸引力，但就整體經濟因素以及使用能源效率來考量作者還是鼓勵大家使用太陽能熱水系統。

Crawford et al. (2004) 利用淨能源分析比較澳洲墨爾本的太陽能熱水系統與傳統的熱水系統，作者選用了五組系統包括電力輔助太陽能熱水系統、瓦斯輔助太陽能熱水系統、貯備型電熱水系統、貯備型瓦斯熱水系統和瓦斯即熱型熱水系統，皆可提供一家四口家庭所使用；結果顯示太陽能熱水系統與傳統的電熱水系統、瓦斯熱水系統在機組耗能表現上沒有明顯的差異，且電力驅動太陽能熱水系

統與電熱水系統相比能源回收期為 0.5 年，而瓦斯驅動太陽能熱水系統與瓦斯熱水系統相比能源回收期為 2 年。

廖卿惠 (2010) 認為在重點發展能源的選擇上，淨能源與環境成本分析亦應並重，以避免不必要之社會成本損失，作者以臺灣之風力能源為例，進行其生命週期中之淨能源指標能源報酬 EROI 與二氧化碳排放分析臺灣三個地方的風力機組。結果顯示，臺灣風力發電之能源投資報酬 (EROI) 分別為麥寮 13.74、中屯 22.24、春風 19.74，表示臺灣風力發電系統發電能源效率為其投入之 13 倍以上，與國際水準相較之下並不遜色，但作者仍建議可改善過低之發電效率以提升臺灣風能之淨能源投資報酬，並且將淨能源作為能源政策之基礎以更接近永續能源發展之目標。

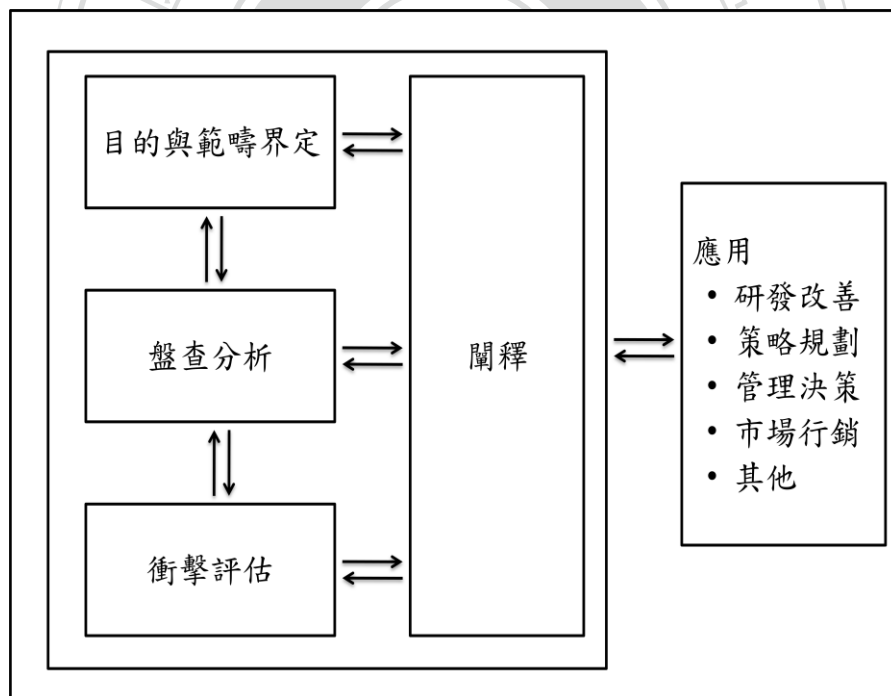
本研究針對台灣地區家戶住宅所使用熱泵熱水系統，透過環境資源及能源效率的角度，來探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性，為評估熱泵熱水系統是否可以在台灣永續性發展，必須考量直接與間接投入之和是否大於其能源產出，故本研究使用淨能源分析來探討熱泵熱水系統之能源效率是否具有其效益。

第三章 研究方法與工具

本章旨在闡述研究方法、分析工具，以生命週期評估與淨能源分析為主要研究方法研究熱泵熱水系統生命週期中對環境造成的衝擊大小，透過生命週期評估軟體 SimaPro 7.3將盤查資料進行分析，以衝擊評估模式Eco-indicator 95和EPS 2000為衡量指標，以了解此產品的對環境負荷大小。

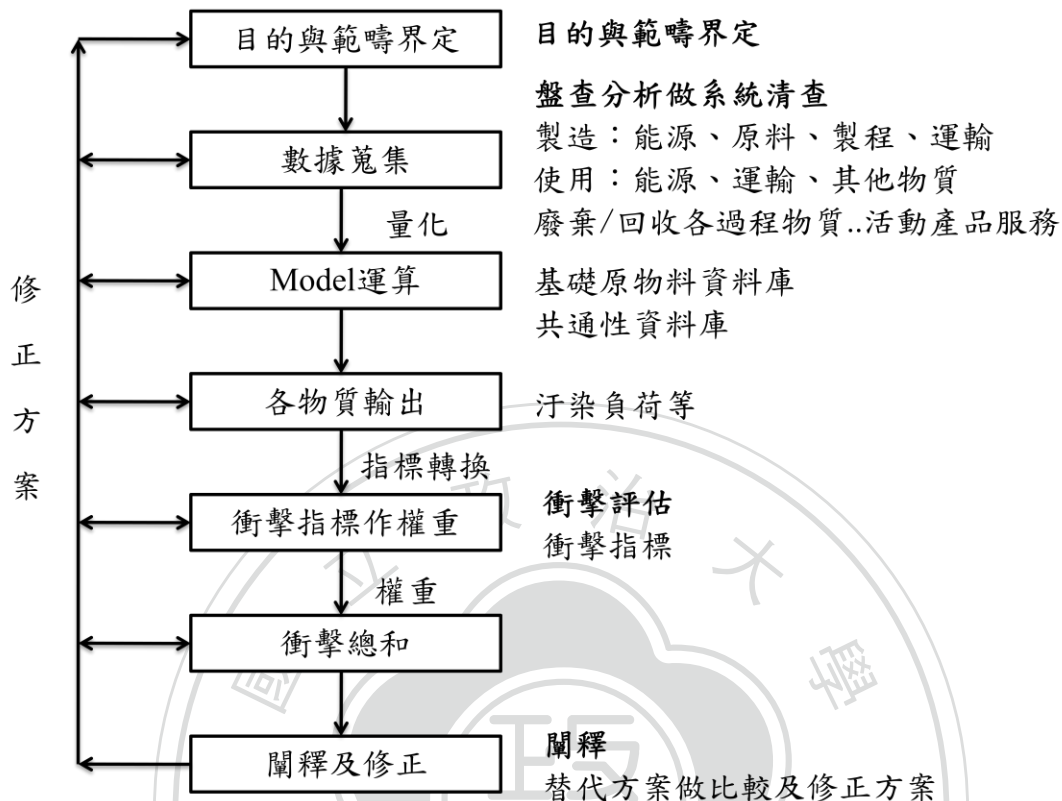
第一節 生命週期評估架構

根據國際標準組織（International Organization for Standardization, ISO）之國際標準ISO14040生命週期評估標準之原則性規範，內容闡述評估階段間相互的關連架構及名詞定義，其流程主要包含四個部分：目的與範疇界定、盤查分析、衝擊評估及結果之闡釋，如圖3-1及圖3-2所示。



資料來源：ISO 14040:2006, 2006

圖3-1 生命週期評估階段



資料來源：江玄政等，2001

圖3-2 生命週期評估步驟

以下詳細說明生命週期評估流程步驟：

(一) 目標與範疇界定 (Goal Definition Scoping)

執行生命週期評估，目標與範疇的界定是首要的工作，此階段須先釐清生命週期評估的目的和理由，以及要評估的對象，在明確定義跟描述所要評估的產品，即可進行相關產品生產過程與其使用狀況，原料的取得、能源的投入、及廢棄後處置之盤查，以建立起評估系統可能影響的範圍及環境影響。

在目的與範疇界定中，有一個重要的元素是功能單位，所謂的功能單位，是武斷賦予的一標準化參數，且必須是最後產出的實用單位。定義功能單位後，各項環境負荷環境衝擊才有計算標準的基礎，且當比較不同產品，也有一項客觀比較的基

準。(丁執宇, 1997)

事實上, 整體生命週期評估研究是一項反覆的過程, 隨著蒐集的資料與資訊增加, 為符合最初的研究目的, 評估範疇得視情況修改, 認定的研究範圍也可能有所改變。

(二) 盤查分析 (Inventory Analysis)

在完成目的與範疇界定後, 就是進行盤查分析的階段, 此階段要依照研究者所定義的目的與範疇, 進行產品相關資料的收集, 包括各個生產階段的能源材料投入、廢棄物汙染物排放等資料清單和數量值, 以及將這些投入與排放量化成可使用的數據, 例如: 電力、石油和原物料(鋼、鐵、木材)的投入量, 廢氣(CO₂、NO_x、SO_x)、廢水、固體廢棄物的排放量等。此外在此階段中所有之投入、產出數據需依功能單位進行標準化(normalization), 以利後續生命週期衝擊評估、闡釋之應用。

由於生命週期盤查清單所需資料太多、太細, 且數據來源需求龐大, 為了減少複雜及龐大人力、時間、經費投入, 可將盤查範圍細分成一系列的階段過程, 針對單個或多個階段進行盤查, 以簡化程序。而盤查分析相關的資料來源可從已公布的資源或商業資料庫中, 搜尋所需的資料; 並實地訪問相關產業廠商或發放問卷至相關產業, 請業者填寫, 以取得資料(劉家豪, 2004)。

(三) 衝擊評估 (Impact Assessment)

根據前一步的盤查分析的數據, 在此階段就使用分析得到的資料進行衝擊評估, 所謂的衝擊評估, 簡單的說, 是運用盤查所得的數據結果, 來評估潛在的環境衝擊程度, 它是依據盤查項目對環境影響參考因子所佔的比例, 進一步量化轉換成實際或可能形成對環境影響的指數。進行衝擊評估的目的主要有兩個, 其一, 盤查的資料轉換成潛在環境衝擊資訊後, 會更加明確; 另外, 透過衝擊評估轉換後的資訊, 對於決策者而言, 更容易納入決策管理中(丁執宇, 1997)。評估過程通常包括分類(Classification)、特徵化(Characterization)、常態化(Normalization)、評價(Evaluation)與標示指數(Indicator), 以下分別對五項生命週期衝擊評估過程作簡要說明。

1. 分類 (Classification) :

分類主要目的在於將盤查分析中得到的數據，根據可能造成的環境衝擊類別與以歸納整合。進行分類時，要確定所關心的環境類衝擊類別，並依據其對生態系統造成的環境負荷或排放汙染因子類別，對應歸類到相關的環境衝擊類別下。

盤查所得的資料數據通常包含了許多種不同的排放物和汙染物，不同的參數因子可能引發相同的環境衝擊，例如：CO₂和CH₄都被歸類為「全球暖化」(Global warming)的類別中，而相同的因子也可能導致不同種類的影響，像是SO₂可以歸於「人體健康」(Human health)或是「呼吸疾病」(Respiratory diseases)的衝擊類別(Goedkoop, 2010)。依據SETAC(1993)建議，環境衝擊類別主要可分為生態健康、人類健康、資源耗損和社會福利等四大類環境衝擊類別。

2. 特徵化 (Characterization) :

特徵化主要目的是將資料模式化，並評估每一個類別的影響，將資料用量化的方法，將不同負荷或排放因子轉換成相同的單位，以確定產品對環境的衝擊大小，並加以分析。影響最大者以100%為其影響值，再按比例權重分配其他影響類別。例如：將不同溫室效應氣體之排放量，轉化為CO₂當量來表示全球暖化之程度等。特徵化應用於單一類別物質含量多寡對環境衝擊項目所佔的百分比，因此在本階段僅能比較不同產品對同一項衝擊項目之貢獻，不同的衝擊項目無法做比較；以塑膠袋和紙袋的製程為例，可以針對塑膠袋或紙袋，在溫室效應項目上衝擊的貢獻，但並不能比較這兩項研究產品間，對於溫室效應和重金屬汙染何者衝擊較大(江玄政等，2001)。

3. 常態化 (Normalization) :

常態化是將各項不同環境衝擊類別，依其輸出物質的真實含量，以相對應之環境情境作為基準(如：每人每年所接受特定汙染物累積量)，不同環境類別給予環境指標值的相對比較值，也就是說，透過常態化的步驟，可以進一步比較不同產品的對單一個環境衝擊類別的差異，例如：紙袋在「溫室效應」的環境衝擊貢獻項目大於塑膠袋(江玄政等，2001)。

4. 評價 (Evaluation)

由於不同的環境衝擊類別之間沒有特定關聯，評價則是將各輸出物質依照衝擊項目之重要性乘上比重係數 (Weighting Factor) 給予加權，加總後得到整合性的衝擊指標，使決策者在決策的過程中，能得到不同面向的環境衝擊以及較完整的資訊。較常用的評價方式，如願付價格法 (willing to pay)、分析層級程序法 (analytic hierarchy process) 等，上述的方法涉及到人為主觀價值的判斷，在不違背理性和邏輯思考的原則下，賦予相對價值的權重。但由於評價牽涉到主觀價值判斷，因此在應用上需要謀求最大的共識 (江玄政等，2001)。

5. 標示指數 (Indicator)

標示指數為各項環境衝擊類別之加總，得到產品生命週期對整體環境的衝擊指標。指標值可比較不同產品或同一產品的總衝擊量值大小。

(四) 闡釋 (Interpretation)

這個階段為生命週期評估結果闡釋，此步驟中須將盤查分析和衝擊評估後所觀察到的結果，進行整合性分析敘述，此結果必須與「目的與範疇」相互呼應，並清楚交代研究應用方向和使用限制，最後所得結論可提供決策者參考，以進一步提出減少環境衝擊或改善方法之建議。ISO 14043提供了一套系統性的方法與程序來闡釋有關生命週期盤查分析與衝擊評估之結果，其中包含了三個要件：

1. 重大議題的鑑別：由生命週期評估盤查分析和衝擊評估所得的結果與資訊來鑑別重大議題，例如能源、排放、廢棄物、資源消耗、全球暖化等議題。

2. 評價：要建立生命週期評估的信賴性和可靠性，須考量完整性檢察、敏感度檢查及一致性檢查。

3. 結論：提出結論與建議之內容，將盤查分析與衝擊評估的結果加以分析解釋，將結果正確的回報給預期讀者，提供決策者做為未來生產投入與產出時的參考。

第二節 SimaPro 生命週期評估軟體

「生命週期評估」就是將產品的生命週期中所投入的原料、產生的汙染物排放、

資源的消耗等環境衝擊因子，以科學的方法探討產品對環境的影響，其概念簡單易懂，但由於生命週期評估盤查時會有大量的數據以及繁瑣的運算，在實際執行時有高度的複雜性，必須有賴電腦軟體與以輔助，而 SimaPro 軟體就是因應此目的設計而成的，SimaPro 軟體是再 1990 年由荷蘭 Leiden 大學開發出來，在生命週期評估的領域中，屬於國際上相當普遍使用的軟體，現今已發展至 SimaPro 7.3 的版本。

SimaPro 為資料庫最豐富的 LCA 軟體之一，其特色為製造階段資料庫最為詳盡，而且使用者操作簡便，除了應有的生命週期盤查資料外，也有環境衝擊評估，以利使用者比較不同原物料及製造過程中對環境所產生的衝擊大小，軟體除了針對環境衝擊來建立指標外，並以樹狀圖表示每個輸入的原物料及能源的分支，和投入這些原物料及能源帶來的環境負荷，且會呈現類似溫度計的圖型表達方式，讓使用者快速判斷這項產品對環境的衝擊性。

SimaPro 軟體主要有五個資料庫，包括：方法資料庫、製程資料庫、處置百分比資料庫、物質資料庫、單位換算資料庫。方法資料庫儲存不同環境衝擊分類之相對指數，例如：各種污染物的溫室效應因子（GWP）、臭氧破壞潛能（ODP）之評估權重；製程資料庫包括物質、能源、運輸、製程、使用、廢棄物處理及處置等資料；處置百分比資料庫則是包含產品使用後廢棄之焚化、資源回收及掩埋百分比；物質資料庫是依空、水、廢及物料之名稱及單位分類儲存；單位換算資料庫提供各種度量行單位換算之功能（呂穎彬，1998）。

SimaPro 具有以下特色（呂穎彬，1998）：

1. 可結合不同製程或產品之生命週期，找出一個產品之生命週期。
2. 可以將產品進行分解，並就每個分解的零件是否回收做環境上之考量。
3. 可研究不同廢棄物處理策略對環境之影響。
4. 對於環境衝擊評估可利用不同的特徵化、標準及權重的方法。
5. 可以分析所得之結果以不同的方式呈現並自動進行單位間的換算。
6. 同時由多人建構，也可以進行分開保存多個不同的檔案。
7. 可以建立多種環保法規資料庫，目前內建有歐盟、美國及 ISO 等規範。

SimaPro 同時也具有以下之優缺點，經整理如下列各項（江政玄等，2001）：

（一）優點：

1. 使用操作容易，採用選單式的指令，初學者易上手。
2. 對於不是環保專家的設計工程師而言，單純化的 Eco-point 有助於判斷其產品是否可稱為「對環境友善」。
3. 資料來源清楚，各資料庫之間的數據可以互相交換而不互相干擾。
4. 盤查項目可因計畫需求隨時增加。
5. 盤查數據可自動作單位換算。
6. 可用多種圖形表達分析結果，其中製程樹狀圖因可用類似溫度計的指標來表現環境負荷，具參考價值。

（二）缺點：

1. 製程資料庫是否定期更新不得而知。
2. 不同環境衝擊類別的相對指數，雖然有一定程度的科學根據，但仍有不確定性存在。
3. SimaPro 尚未能以科學的方法來量化二次環境衝擊的資料，如溫室效應引起的海平面上升及生態的破壞。

SimaPro 是一套協助生命週期分析的工具，雖然其計算嚴謹程度及資料完整性並非最佳，但對於整體生命週期評估交代完整，足以符合一般使用者的需求，同時是初學者入門生命週期評估的好教材。

第三節 衝擊評估模式

生命週期盤查分析所獲得的資料，包括原物料耗用、能源與電力使用、以及環境污染物，如：空氣污染、水污染及廢棄物處理等，可儲存於電腦化資料庫中。這些數據再經由各種模式進行計算，包括特徵化、常態化的動作，即能將結果轉換成對各種環境類別之衝擊量，或針對某種特定環境之負荷。

本研究應用生命週期評估軟體SimaPro 7.3作為評估工具，在此軟體中有許多不同的衝擊評估方法，其中包括CML、Eco-indicator、EPS、Ecopoint 等生命週期評估模式，各衝擊評估方法特色如表3-1所示。

表3-1 生命週期衝擊評估之方法特色

生命週期衝擊評估方法	方法特色
Eco-indicator 95	利用致命性、生態品質及人體健康三個方向來描述衝擊影響。
Eco-indicator 99	利用資源、生態品質以及人體健康三個方向來描述衝擊影響。
CML 92	較簡化的特徵分析，分析過程中並不執行宿命分析與暴露分析。
Ecopoints 97	指標分析對象以瑞士政策為主，有部分資料來自CML92的簡化。
EPS 2000	以願付價格的概念執行權重化分析。

資料來源：魏鈺峰，2005

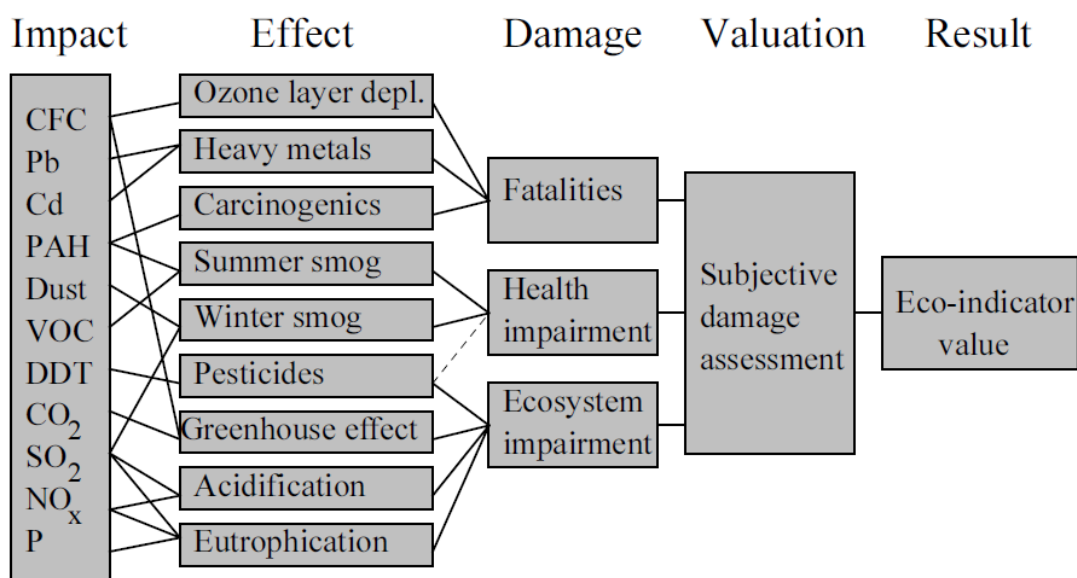
由於每個評估方法目的不盡相同，本研究探討熱泵熱水系統對環境之影響，故選擇以損害評估為導向Eco-indicator 95和為企業使用之產品工具設計的EPS 2000，主要原因Eco-indicator 95在設計時已經盡可能包含了所有對環境損害因子，因此較不會忽略重要的環境影響，而EPS 2000之權重概念係採取願付價格法（Willingness to pay），較能反映市場。以下是其特色與方法：

一、衝擊評估模式 Eco-indicator 95

Eco-Indicator 95 是由荷蘭所發展一種以產品設計為導向之評估方法，該模式能提供更多環境化設計之參考資訊工具，並能將生命週期評估結果以易於了解的方式呈現，儘管其並非最新，但是廣為研究人員所引用的評估方法之一，該模式主要是以溫室效應、臭氧層破壞、酸化、重金屬、冬季及夏季煙霧、優養化、致癌物質觀點進行一系列之衝擊評估，相較於其他方法更易於了解與溝通。

Eco-indicator 95在計算環境衝擊時，僅對人體健康有危害與環境生態有影響才

被納入評估，也就是說資源消耗、廢棄物的空間需求與對當地影響並不直接納入計算，而是以資源開採、廢棄物焚化等過程所造成之污染排放，造成人體健康與自然生態之危害才納入考量 (Goedkoop, 1996)。如圖3-3 Eco-Indicator 95結構流程概念圖所示，Eco-Indicator 95 有4項分析步驟，分別為特徵化、常態化、評價加權及單項得點，首先，將盤查到的各項物質歸類為不同的環境衝擊，如溫室效應、酸化、優養化等，此即為特徵化 (Characterization)，再將不同的衝擊效應，歸為三種不同的損害類別：致命危害、健康損害、生態破壞，這個步驟稱之為常態化 (Normalization)，接著由常態化的結果進行損害評估，藉由評價加權 (Weighting) 能將損害評估的結果相加總，以得到綜合性的環境影響效應，稱之為單一得點 (Single Score)，並對此結果做闡釋，以下將對這四個步驟做詳細的說明 (郭紋秀，2008)。



資料來源：Goedkoop M., 2001

圖3-3 Eco-indicator 95衝擊評估模式之圖示

(一) 特徵化

將不同物質依對環境不同的衝擊加以歸類，以計算系統對於環境衝擊類別與影響程度，表即為Eco-indicator 95 評估模式中的11項衝擊類別。

表3-2 Eco-Indicator 95 環境衝擊類別

	名稱	概述
1.	溫室效應 (Greenhouse effect)	溫室效應氣體濃度增加導致地表溫度升高，氣候變化加劇，造成生態系統衝擊。
2.	臭氧層破壞 (Ozone layer)	危害來自大量臭氧層破壞物質排放至大氣，造成地表遭受過量紫外線輻射，對生態及人類健康都造成傷害。
3.	酸化 (Acidification)	酸化物質造成大面積的土壤、地下水、地表水、有機體、生態系統及素材（建築物）的衝擊。
4.	優養化 (Eutrophication)	氮、磷類之營養原過多，使陸上植物物種單樣化，水中藻類大量繁殖，形成嚴重生態破壞。
5.	重金屬污染 (Heavy metals)	重金屬排放對生態及人類健康的衝擊，主要分成空氣與水的排放。易造成神經系統、血壓及腎臟等方面的危害。
6.	致癌物 (Carcinogens)	化學物質如多氯聯苯，會造成致癌毒性，對人類及動植物產生影響。
7.	冬季煙霧 (Winter smog)	造成人類呼吸器官問題，主要是落塵量（SPM）與SO ₂ 的指標。
8.	夏季煙霧 (Summer smog)	空氣中超量的臭氧等，對人及動植物皆有傷害，造成經濟作物嚴重損害。
9.	能源消耗 (Energy resources)	地球上化石燃料及核能鈾礦的存量是有限的，再生能源成本高，目前數量低，因此能源的消耗被視為衝擊。
10.	固體廢棄物 (Solid waste)	人類活動伴隨產生大量廢棄物，面臨無法處置的問題。
11.	殺蟲劑 (Pesticides)	殺蟲劑與農藥等物質產生生態問題主因是飲用的地表水毒性提高及土壤中生物活動力降低。

資料來源：劉家豪，2004

（二）常態化

常態化，是針對各環境衝擊類別，根據1990年度歐洲地區平均每人每年所承擔的某環境負荷之環境情境作為基準，先將特徵化所得到的衝擊大小轉化因子，再依其中所缺少的數據以能源使用量進行推估，經由無因次化的步驟，就能更進一步的比較各環境衝擊類別的大小差異。

表3-3 Eco-Indicator 95常態化效應因子

Impact category	factor
溫室效應 (Greenhouse effect)	0.0000765
臭氧層破壞 (Ozone layer)	1.08
酸化 (Acidification)	0.00888
優養化 (Eutrophication)	0.0262
重金屬污染 (Heavy metals)	18.4
致癌物 (Carcinogens)	92
冬季煙霧 (Winter smog)	0.0106
夏季煙霧 (Summer smog)	0.0558
能源消耗 (Energy resources)	0.00000629
固體廢棄物 (Solid waste)	0
殺蟲劑 (Pesticides)	1.04

資料來源：Simapro 7 Database Manual, 2008

(三) 評價加權

將常態化後無因次的值，依照不同衝擊類別影響的重要性給予不同的權重，Eco-indicator 95的權重架構以“Distance-to-Target”的原則為基礎，為現值和目標值的差異，若影響效應的現值與目標值之間差距愈大，其影響愈為嚴重，權重也越大。而目標值的選定，通常是根據區域、國家政策或世界標準來考量，例如：各國政府政策、OECD、WHO 等等。

表3-4 Eco-Indicator 95加權權重因子

Impact category	Weighting set
溫室效應 (Greenhouse effect)	2.5
臭氧層破壞 (Ozone layer)	100
酸化 (Acidification)	10
優養化 (Eutrophication)	5
重金屬污染 (Heavy metals)	5
致癌物 (Carcinogens)	10
冬季煙霧 (Winter smog)	5
夏季煙霧 (Summer smog)	2.5
能源消耗 (Energy resources)	0
固體廢棄物 (Solid waste)	0
殺蟲劑 (Pesticides)	25

資料來源：Simapro 7 Database Manual ,2008

(四) 單一得點

經由前面特徵化、常態化、評價加權等三個步驟，將各環境影響效應的加權結果相加總，這樣就可了解在生命週期各階段此產品之環境衝擊總和，即為單一得點，決策者由此考量比較產品或製程是否環境友善。

二、衝擊評估模式 EPS 2000

EPS 2000 (Environmental Priority Strategies in product design) 評估模式是在1989年，由瑞典環境研究機構 (Swedish Environmental Research Institute, IVL) 所發展，並以損害為導向的生命週期評估方法，主要是採用金融貨幣為單位，來衡量將健康損害、環境衝擊恢復至安全防護 (Safe Guard) 水準的願付價格 (willingness to pay)，由此可以反映社會對環境損害的願付價值，以及對環境的重視程度，這種評估指標單位為ELU (Environmental Load Unit)，此方法最終目的在於提供業者以社會經濟的角度來衡量產品設計生產過程中對環境是否友善。

EPS2000 包括四項分析步驟，特徵化 (Characterization)、損害評估 (Damage Assessment)、評價加權 (Weighting) 及單項比分 (Single Score)，值得注意的是這裡並沒有常態化的應用，以下針對這四個步驟做詳細的說明。

(一) 特徵化

EPS 2000 在特徵化的階段，將環境衝擊類別分為十三項如下表3-5所示。

(二) 損害評估

EPS 2000損害評估階段，將整合上述十三項環境衝擊類別歸納為五項環境保護範疇，分別為人體健康 (Human Health)、生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)、無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)、生物多樣性 (Biodiversity)、文化與觀光價值 (Cultural and recreational values)，但最後一項文化與觀光價值難以用一般指標表示，因此僅作定性上的敘述與定義，不列入模式中的計算。下表3-6為 EPS 2000 環境範疇對應表。

表3-5 EPS 2000 環境衝擊類別

	名稱	概述
1	壽命減損 (Life expectancy)	引起壽命減損，為DALY (Disability Adjusted Life Years) 生命損失年數 (年/人)
2	嚴重病態 (Sever morbidity)	重病及痛苦、挨餓的年數 (年/人)。
3	病態 (Morbidity)	造成如感冒及氣管炎，為生命損失年數 (年/人)
4	嚴重影響健康 (Sever nuisance)	通常會造成反應以避免令人不適的事物 (年/人)
5	影響健康 (Nuisance)	令人不適但無直接反應 (年/人)
6	作物生產力 (Crop production capacity)	估算收穫重量 (kg)
7	木材生產力 (Wood production capacity)	木材乾重 (kg)
8	魚/肉生產力 (Fish and meat production capacity)	動物的全重 (kg)
9	土壤酸化 (Soil acidification)	H ⁺ 莫耳當量
10	灌溉水生產力 (Production capacity of irrigation water)	可作灌溉用途的水量 (kg)，必須注意持續性有毒物質之影響
11	飲用水生產力 (Production capacity of water)	符合WHO 標準之飲用水 (kg)
12	資源削減 (Depletion of reserves)	礦物及化石燃料儲存量的消耗
13	物種滅絕 (Species Extinction)	生物多樣性的衝擊為物種滅絕，表達為NEX

資料來源：楊智凱，2005

表3-6 EPS 2000 環境範疇對應表

環境範疇	環境衝擊類別
人體健康 (Human Health)	壽命減損 (Life expectancy)
	嚴重病態 (Sever morbidity)
	病態 (Morbidity)
	嚴重影響健康 (Sever nuisance)
	影響健康 (nuisance)
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	作物生產力 (Crop production capacity)
	木材生產力 (Wood production capacity)
	魚/肉生產力 (Fish and meat production capacity)
	土壤酸化 (Soil acidification)
	灌溉水生產力 (Production capacity of (irrigation) water)
飲用水生產力 (Production capacity (drinking) of water)	
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	資源削減 (Depletion of reserves)
生物多樣性 (Biodiversity)	物種滅絕 (Species Extinction)
文化與觀光價值 (Cultural and recreational values)	

資料來源： Goedkoop, et al. , 2001；劉家豪，2004；楊智凱，2005

(三) 評價加權

此步驟將損害評估的結果，依不同的影響重要性給予不同的權重，以「願付價格」反應社會願意負擔「免於傷害」的金額，來表示產品在五項環境保護範疇上所造成環境衝擊，加總後的指標單位為ELU (Environmental Load Unit)，表3-7為EPS 2000 評價加權因子。

表3-7 EPS 2000 評價加權因子

環境範疇	加權因子
人體健康 (Human Health)	1
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	1
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	1
生物多樣性 (Biodiversity)	1

資料來源： Goedkoop, et al. , 2001；劉家豪，2004；楊智凱，2005

(四) 單一得點

經過先前特徵化、損害評估、評價加權三個步驟後，將各衝擊類別值予以加總，可得到以貨幣為單位的總衝擊，透過這階段，可以得知產品或製程在生命週期中對環境衝擊大小，而決策者透過此指標以社會經濟層面來分析，此產品是否環境友善。表3-8為本研究所使用之衝擊評估模式與衝擊類別。

表3-8 本研究使用之衝擊評估模式與衝擊類別

Eco-indicator 95	EPS 2000	
環境衝擊類別	環境範疇	環境衝擊類別
溫室效應	人體健康	壽命減損
臭氧層破壞		嚴重病態
酸化		病態
優養化		嚴重影響健康
重金屬污染		影響健康
致癌物	生態系統生產力	作物生產力
冬季煙霧		木材生產力
夏季煙霧		魚/肉生產力
能源消耗		土壤酸化
固體廢棄物		灌溉水生產力
殺蟲劑		飲用水生產力
	無生命資源存量	資源削減
	生物多樣性	物種滅絕

資料來源：本研究整理

第四節 淨能源分析

所謂的淨能源 (Net energy) 為經濟學淨值定義之延伸，是衡量能源產出以及生產過程中包含資源開採、處理、運送等總能源消耗的差值，意即粗能源產出減去能源生產過程中所需之所有能源投入之淨值即為淨能源產出。

$$\text{淨能源產出 } Net\ Energy\ Output = Gross\ Energy\ Output - Energy\ Input$$

淨能源的定義雖然簡明，但衍生出許多不同的指標，例如：能源投資報酬 (Energy Return on Investment, EROI)、能源回收期 (Energy Payback Time, EPT)、能源效率 (Energy Profit Ratio, EPR) 等。

本研究採用淨能源分析，並以熱泵熱水系統之生命週期所需投入與產出之能源，來估算其能源投資報酬率與能源回收期，由於國內之熱泵熱水系統之原料為國外進口，因此在此參考國外之能源使用相關數據來計算其排放以及投入。利用各單位材料生產消耗初級能源數據，再與廠商所提供的熱泵投入材料使用量進行估算，可求得熱泵熱水系統所需之生產製造過程所需能源投入量。

一、 能源投資報酬

能源投資報酬 (Energy Return on Investment, EROI) 最早是在 1986 由 Cleveland、Hall 和 Kaufmann 提出，為能源生產過程中，能源產出和能源消耗的比值，其中能源消耗包含了能源生產過程中的直接投入與間接投入。供給過程中使用的能源成本在計算過程中會被換算成熱量 (British thermal unit, Btu) 來表示，計算方式如下：

$$EROI = \frac{\text{Quantity of Energy Supplied}}{\text{Quantity of Energy Used on Supply Process}} = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

E_{out} = 能源總產出能量

E_{in} = 能源投入能量

EROI 可視為能源投入產出率指標，分子與分母皆為正數，EROI 產出必大於零。EROI 可解釋為能源投入產出指標率，當 $EROI > 1$ ，則表示能源有效率，產出品質越高；反之，若 $EROI < 1$ ，則表示能源產出品質較差，能源使用較無效率，若該能

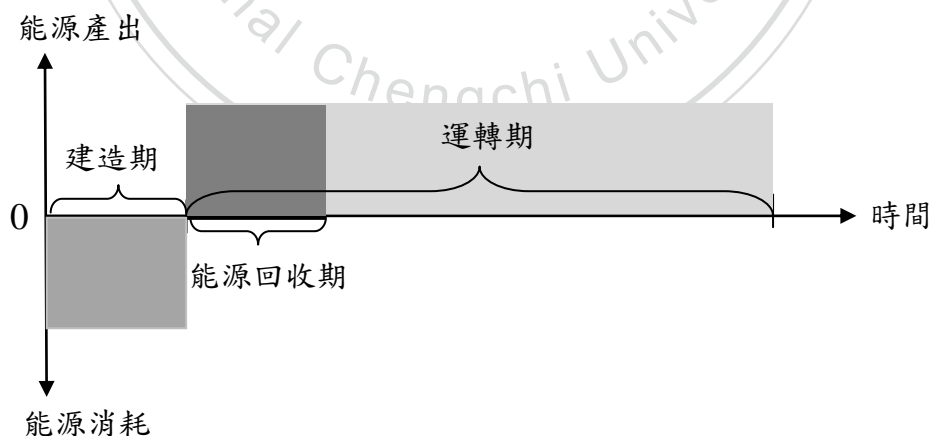
源大量產出，則會加速能源的耗竭。

表 3-9 為各能源技術之 EROI，如表所示，可發現石油、天然氣與煤這類現今廣為人們所使用的非再生能源都明顯高出於其他能源，但石油生產的 EROI 在 1970 年代為 23 左右，可是在 1997 年時已降低了 42% (Cleveland, 2005)，顯示新油源生產行動的能源投資報酬率越來越低，若 EROI 值達到 1 時，任何石油的探勘生產行動將不再具有經濟效益。而再生能源技術中的乙醇、太陽能都偏低，甚至有可能能源投入大於能源產出 ($EROI < 1$)，但隨著時間的演進、技術的進步，再生能源技術之 EROI 值也會提高。

由於許多再生能源技術之 EROI 高低相差懸殊，若 $EROI < 1$ 的技術不僅不能達成節約能源的目的，反而會加速能源之耗竭，因此，決策者在推行或獎勵再生能源技術時，應要以淨能源分析來了解技術之能源投入是否小於能源產出，以避免獎勵無效率的能源技術。

二、 能源回收期

能源回收期 (Energy Payback Time, EPT) 用來衡量能源技術需要運行多少時間才能產生足以彌補其製造及興建過程所耗用之能源，意即系統運轉產生之能源至可補足用在生產、運轉等期間所消耗之能源量所需要的時間，概念如圖 3-4 所示。



資料來源：本研究整理繪製

圖 3-4 能源回收期概念能源回收期

能源回收期計算出來所得之數字越小越好，常見的定義為低於兩年者方可算是優良之再生能源生產方式。本研究計算公式如下所示：

$$EPT = \frac{\text{Life-cycle Energy Input}}{\text{Net Energy Output}} = \frac{E_{in}}{E_{out} - E_{use}}$$

其中 EPT 表示其能源回收期； E_{in} 表示熱泵熱水系統生命週期之能源投入； E_{out} 表示熱泵熱水系統之產出熱量； E_{use} 表示熱泵熱水系統為產出熱量所需耗用之能量。



表 3-9 各能源技術之能源投資報酬率 (EROI) 估計值

能源技術	1984	近年研究結果
非再生能源		
石油與天然氣		
1940' s	探勘 > 100	--
1970' s	開採 ~ 23.0 探勘 8.0	--
2000' s	--	20
煤炭		
1940' s	80.0	80
1970' s	30.0	25
石油焦	0.7~13.3	3~5
煤炭氣化	0.5~8.2	1
地壓氣	1.0~5.0	4
再生能源		
乙醇		
甘蔗	0.8~1.7	3.83
玉米	1.3	0.74~1.65
玉米殘渣	0.7~1.8	--
甲醇 (木材)	2.6	--
太陽能		
平板式太陽能收集器	1.9	--
聚焦式太陽能收集器	1.6	--
電力生產		
煤		
美國平均	9.0 (27.0)	15
西部煤 無 Scrubbers	6.0 (18.0)	11
Scrubbers	2.5 (7.5)	5
水力	11.2 (33.6)	45
核能 (輕水式)	1.0 (12.0)	5~20
風力	--	5~80
太陽能		
太陽能發電衛星	2.0 (6.0)	5~7.5
太陽能發電塔	4.2 (12.6)	10~12
太陽能光電池	1.7 (5.1) ~ 10 (30.0)	2~4
地熱		
濕式 (液狀)	4.0 (12.0)	--
乾式 (岩熱)	1.9 (5.7) ~ 13.0 (39.0)	--

註：括號內的數字是以熱耗率 2636 kcal/kwh 為基礎的質量評價。

資料來源：Cleveland et al., 1984；廖卿惠，2010；林益豪，2007；本研究整理

第四章 研究結果與討論

本章係首先針對研究的目標及範疇作界定，說明整體研究可能涉及的內容及範圍；第二節使用生命週期評估軟體衡量熱泵熱水系統，在製造以及運轉過程中對環境所造成的衝擊，並探討與比較不同模式間的差異；第三節針對目前台灣地區之熱泵熱水系統、電熱水系統以及瓦斯熱水系統進行生命週期評估，估算其材料使用、能源投入與相關排放，以探討熱水系統在生產與運轉的過程中，對環境造成的影響；第四節生命週期評估結合淨能源分析，估算熱水系統之能源投資報酬、能源回收期，以及熱水系統生命週期 CO₂ 排放量，以探討熱泵熱水系統之節能減碳淨效益與環境衝擊；最後以敏感度分析再生能源發電比例提高和熱泵熱水系統技術效率提高，對環境衝擊之程度。

第一節 系統範圍與資料盤查

本研究係引用生命週期評估架構以及淨能源分析兩種研究方法，對於熱泵生產期與使用運轉期間的生命週期進行盤查分析，須先確立系統範圍，以建立資料盤查清單。

一、目標與範圍

目前國內常見的熱泵熱水系統主要可以分為醫院、學校、泳池所使用大型熱泵機組，以及一般可擺放在住宅家庭陽台的小型熱泵機組。若依照熱泵熱源種類來區分，熱泵系統有空氣對水熱泵、水對水熱泵、地熱源熱泵、太陽能與大氣源型熱泵系統，一般市面上所常見的小型熱泵機組，大多都是空氣對水的空氣源熱泵機組。本研究探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性，因此選用適合家庭所使用的小型空氣源熱泵機組做為主要探討對象。

功能單位 (Function Unit, FU) 是生命週期研究中，用於分析與比較的基礎單位。本研究所採用的功能單位為「一台」可提供一家四口每日每人 50 公升熱水之熱水系統，探討每「一台」提供一家四口每日 200 公升熱水之熱泵熱水系統，在生產及運轉過程中，對環境造成的影響，並且也是以「一台」為單位，比較生產及使用熱泵熱水系統、電熱水系統以及瓦斯熱水系統，對環境衝擊貢獻程度之

差異性。所有原物料、能源、污染物等盤查資料，皆轉換為以功能單位為基礎之負荷，投入計算。

系統盤查範圍為熱水系統在製程中相關之原物料投入（包含原料開採）、能源資源消費及廢棄物排放狀況，並且估算使用運轉使用過程中所需之能源投入，以計算熱水系統在製造過程與運轉使用過程中之環境影響。由於國內熱泵機組大多是近年安裝，欠缺回收階段之能源投入與廢棄物排放之資料，此外，熱泵設備主機主要是由金屬組成（如鋼鐵及銅），皆有 90% 以上可以回收。此階段對環境之衝擊影響能源投入量相對微小，故在此不討論回收退役階段之能源投入及排放。

二、資料盤查分析

由於本研究針對國內熱泵熱水系統以生命週期評估之方式，探討熱泵熱水系統對環境之影響，故對國內熱泵廠商在產品製造階段進行系統盤查分析，盤查分析的方式為對國內熱泵熱水系統的製造特定廠商，針對製造過程投入的原料以及消耗的能源進行問卷調查。在民國 100 年 5 月至 100 年 7 月間，對台灣地區熱泵熱水系統製造進行製程問卷發放，問卷時程為民國 99 年熱泵熱水系統廠商製造某特定熱泵熱水系統之全年資料，問卷回收後，比較各家廠商回收問卷的差異性，並選擇資料充分且具有代表性，一家個案廠商進一步以生命週期軟體模擬分析。為了達到本土化案例之評估研究，在軟體中引用能源資料時，選取與本個案相符之各種能源與原料投入種類的數據，作為實證研究之參數來源。

本研究之盤查清單包含熱泵熱水系統產品製造過程之能源、原物料投入以及廢棄物排放。盤查清單係參考國內外相關文獻，作為盤查清單建立之輔助依據，各盤查項目如下所列，盤查清單格式如附錄所示。

- （一）基本資料：產品種類、年產量與產值。
- （二）原料投入部分：主要投入原料種類與使用數量
- （三）能源使用部分：使用能源種類、數量及來源。
- （四）用水及廢水處理部分：用水數量與事業廢水水質狀況等。
- （五）空氣污染物排放現況：空氣污染物主要來源、成分濃度。

(六) 廢棄物處理現況：事業廢棄物之種類、數量與處理現況。

以下表 4-1 為熱泵熱水系統生產過程主要之盤查資料結果，由於問卷內容涉及個案廠商商業機密，故僅具製程中主要原料及能源投入。

表 4-1 每台熱泵熱水系統生產過程之主要盤查資料結果

盤查項目	項目	使用量
原料投入	鋼鐵	6 kg
	鍍鋅鋼鐵	10 kg
	銅	2 kg
	鋁	1.5 kg
	水	150 kg
能源使用	電力	12 kwh

資料來源：本研究調查

第二節 熱泵熱水系統之生命週期評估

本研究使用生命週期評估軟體 SimaPro 7.3 做為評估工具，研究選擇 Eco-Indicator 95、EPS 2000 這兩種評估模式來衡量熱泵熱水系統，在製造以及使用過程中對環境所造成的衝擊，並探討與比較不同模式的差異。

熱泵熱水系統的製程直接採用個案廠商所提供之資料，其中包含了熱泵熱水系統製造過程中所投入的原料、能源使用以及生產過程中產生的廢棄物；本研究將熱泵熱水系統使用年限定為 15 年，每日提供一家四口之每人 50 公升（共 200 公升）55°C 熱水，熱泵熱水系統耗電量 700W，每日使用熱泵熱水系統加熱以及保溫的時間估計 4.2 小時，每日耗電量約 3 度電，使用 15 年共計總耗電量為 16,425 度電

一、衝擊評估模式 Eco-indicator 95

Eco-indicator 95 改良自 CML 1992 Guide 的架構，權重衡量則以“Distance-to-Target”的原則為基礎，主要作為提供環境化設計參考資訊之工具，是較多人使用的生命週期評估模式。Eco-indicator 95 包含四項分析步驟，特徵化（Characterization）、常態化（Normalization）、評價加權（Weighting）及單一

得點 (Single score)。

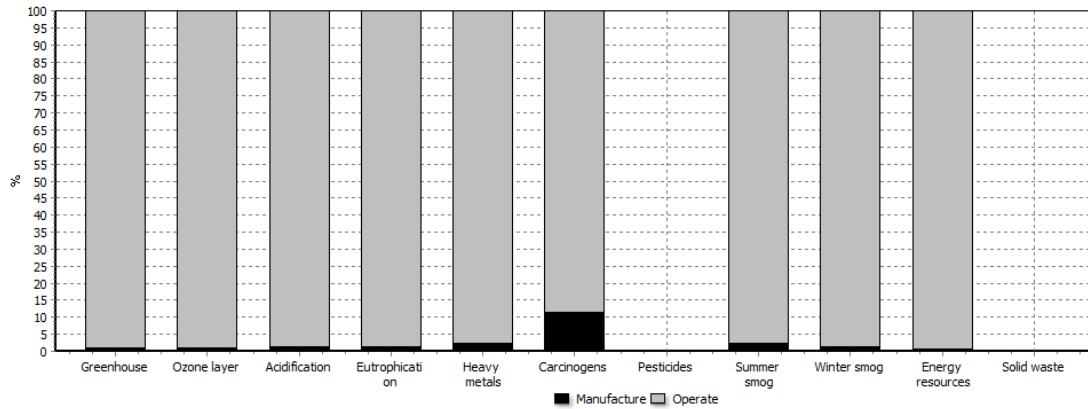
Eco-Indicator 95 模式特徵化 (Characterization) 之目的在於，將對於環境衝擊項目有不同貢獻量的各個物質，量化成同一單位，使其易於在同一環境衝擊項目中進行計算與加總，根據分析結果可以比較單一或多個廠各階段、製程在同一衝擊類別項目下所占的比重。

表 4-2、圖 4-1 為使用 Eco-Indicator 95 模式之特徵化結果，由圖中可以看出在 Eco-Indicator 95 的 11 項環境衝擊類別中，以熱泵熱水系統整體生命週期(15 年) 運轉階段之電力使用為主要衝擊來源，製造階段造成的環境衝擊影響較小。

表 4-2 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 特徵化結果

Impact category	Unit	Total	Manufacture	Operate
溫室效應 (Greenhouse effect)	Kg CO ₂	9013.6	63.6	8.95E+03
臭氧層破壞 (Ozone layer)	Kg CFC11	0.00038045	2.45E-06	0.000378
酸化 (Acidification)	Kg SO ₂	40.586	0.386	40.2
優養化 (Eutrophication)	Kg PO ₄	28.272	0.272	28
重金屬污染 (Heavy metals)	Kg Pb	0.6846	0.0146	0.67
致癌物 (Carcinogens)	Kg B (a) P	0.001358	0.000719	0.000639
冬季煙霧 (Winter smog)	Kg SPM	31.867	0.367	31.5
夏季煙霧 (Summer smog)	Kg C ₂ H ₄	0.7775	0.0145	0.763
能源消耗 (Energy resources)	MJ LHV	202973	973	2.02E+05
固體廢棄物 (Solid waste)	Kg	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	Kg act.subst	0	0	0

資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

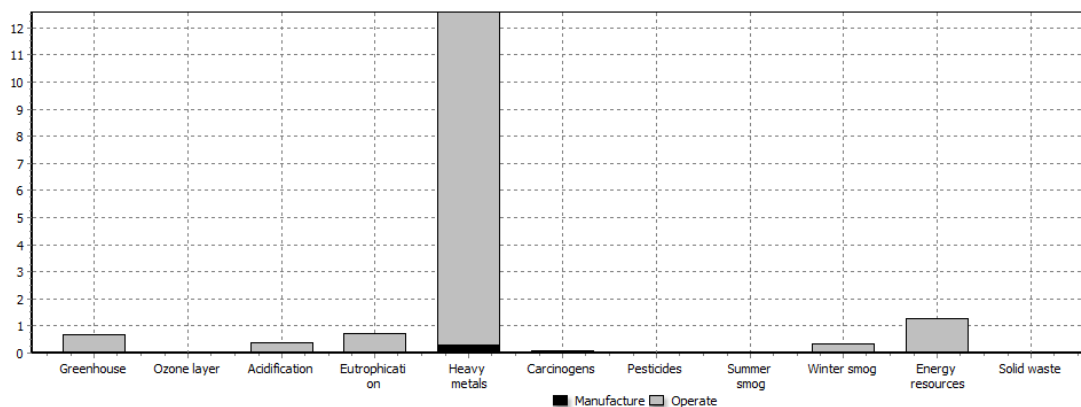
圖 4-1 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 特徵化結果

Eco-Indicator 95 模式特徵化結果經常態化因子轉換後成為無因次的數值，各衝擊類別間可以相互比較、分析。以下表 4-3、圖 4-2 為熱泵熱水系統使用 Eco-Indicator 95 模式之常態化結果，常態化之目的在於進行各衝擊類別間的比較，因此將原來之特徵化的數值經常態化因子後變成無因次的數值，經由 Eco-Indicator 95 常態化因子的轉換之後，顯示此熱泵熱水系統不管是在製造過程中亦或是運轉階段上，以重金屬污染所造成之衝擊效應最高，在製造階段上由於銅、鋁、鋼鐵等金屬使用所造成的影響。

表 4-3 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 常態化結果

Impact category	Total	Manufacture	Operate
溫室效應 (Greenhouse effect)	0.68986	0.00486	0.685
臭氧層破壞 (Ozone layer)	0.00041045	2.45E-06	0.000408
酸化 (Acidification)	0.36043	0.00343	0.357
優養化 (Eutrophication)	0.74012	0.00712	0.733
重金屬污染 (Heavy metals)	12.569	0.269	12.3
致癌物 (Carcinogens)	0.06606	0.00736	0.0587
冬季煙霧 (Winter smog)	0.33789	0.00389	0.334
夏季煙霧 (Summer smog)	0.043407	0.000807	0.0426
能源消耗 (Energy resources)	1.27612	0.00612	1.27
固體廢棄物 (Solid waste)	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	0	0	0

資料來源：本研究整理

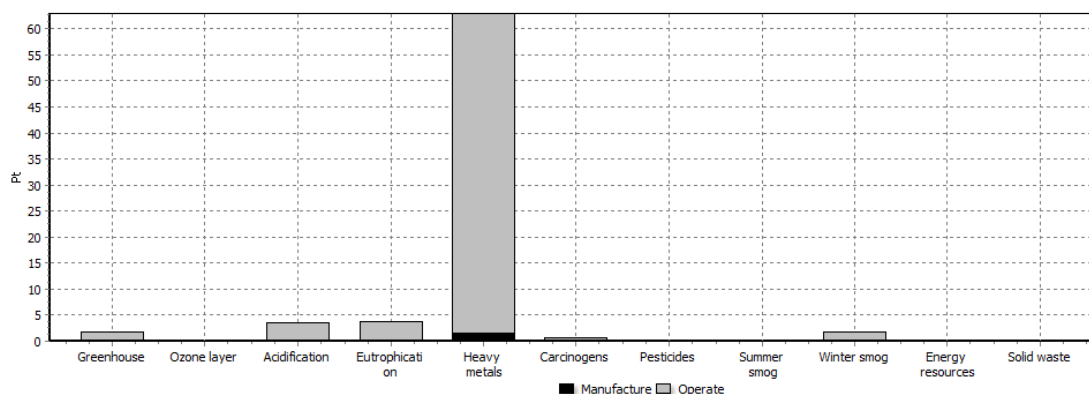


資料來源：本研究整理

圖 4-2 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 常態化結果

將常態化後的數值乘上 Eco-Indicator 95 模式中對不同環境影響類別的重要性而產生的權重，就是 Eco-Indicator 95 模式之評價加權 (Weighting)。下圖 4-3 為 Eco-Indicator 95 模式之評價加權結果，此一結果為將常態化後的數值乘上不同環境影響類別的重要性而給予的權重，由圖中可以得知經評價加權後影響最高仍是對重金屬的衝擊類別，接著依序為優養化、酸化、溫室效應、冬季煙霧、致癌物。

和常態化結果不同的是，對於能源消耗與溫室效應的影響減弱，取而代之的是酸化與致癌物等的影響被突顯，其主要原因為 Eco-Indicator 95 模式認為酸化與致癌物等對環境影響的重要性較能源消耗、溫室效應的部分為大，而給予的權重較多所導致。



資料來源：本研究整理

圖 4-3 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 評價加權結果

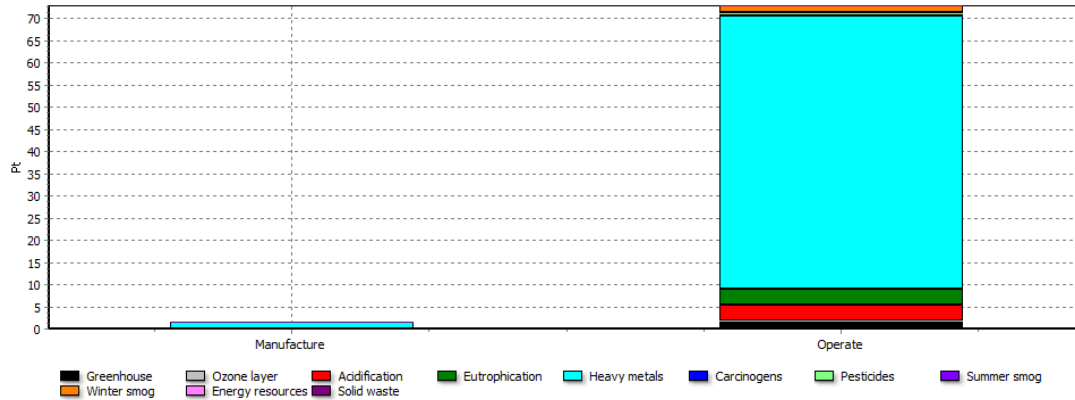
單一得點 (Single Score) 之目的為可瞭解單一或多個廠在產品製造的各階段對於環境的總衝擊。以下表 4-3、圖 4-4 是使用 Eco-Indicator 95 模式之單一得點結果，結果顯示熱泵熱水系統在 Eco-Indicator 95 模式十一項衝擊評估中，重金屬污染最嚴重，其次則為優養化、以及酸化；而其中又以運轉使用階段導致之環境衝擊較大，達 73 Pt，其中主要之衝擊效應為重金屬污染 (61.6 Pt)，佔製造過程之環境影響的 84.44%，其次為優養化 3.67 Pt、酸化 3.57 Pt；在製造熱泵熱水系統的過程中對於環境的影響為 1.5 Pt，其中重金屬污染的衝擊最高 1.34 Pt，佔製造過程之環境影響的 88.62%，其次是致癌物 0.07Pt、優養化 0.035 Pt。

形成此現象原因在於製造階段上由於銅、鋁、鋼鐵等金屬使用，造成製造階段重金屬污染較高的影響；而在使用運轉階段，因主要使用電力，而電力在發電所需的煤礦投入所致。

表 4-4 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 評價加權與單一得點結果

Impact category	Unit	Total	Manufacture	Operate
溫室效應 (Greenhouse effect)	Pt	1.7222	0.0122	1.71
臭氧層破壞 (Ozone layer)	Pt	0.041064	0.000264	0.0408
酸化 (Acidification)	Pt	3.6043	0.0343	3.57
優養化 (Eutrophication)	Pt	3.7056	0.0356	3.67
重金屬污染 (Heavy metals)	Pt	62.94	1.34	61.6
致癌物 (Carcinogens)	Pt	0.6606	0.0736	0.587
冬季煙霧 (Winter smog)	Pt	1.6895	0.0195	1.67
夏季煙霧 (Summer smog)	Pt	0.10802	0.00202	0.106
能源消耗 (Energy resources)	Pt	0	0	0
固體廢棄物 (Solid waste)	Pt	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	Pt	0	0	0
Total	Pt	74.5	1.5	73.0

資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

圖 4-4 熱泵熱水系統之 Eco-Indicator 95 單一得點結果

二、衝擊評估模式 EPS 2000

EPS 2000 是由瑞典所發展的一種生命週期評估方法，以損害為評估導向，其權重依據主要是採用金融貨幣為衡量單位，使用願付價格的方式來呈現健康損害、環境衝擊恢復至安全防護水準之標準，以反應一般社會大眾對環境損害的願意付出的價值，來看出社會對於環境危害的重視程度。EPS 2000 的指標單位為 ELU (Environmental Load Unit)，其評估流程為特徵化 (Characterization)、損害評估 (Damage Assessment)、評價加權 (Weighting)、單一得點 (Single Score)，此方法最終目的在於提供業者以願付價格之經濟角度來衡量產品在設計的過程中對環境是否友善。

EPS 2000 模式特徵化 (Characterization) 將不同的物質量化成同一單位，使其易於在同一環境衝擊項目中進行計算與加總，根據分析結果可以比較不同階段在同一衝擊類別項目下所占的比重。表 4-5、圖 4-5 為使用 EPS 2000 模式特徵化之結果，由圖表可知基本上是以運轉階段之電力使用為主要之衝擊來源，結果顯示熱泵熱水系統對於環境衝擊的貢獻包括：資源消耗為 3952 ELU、作物生產力為 19.235kg 等，其中，木材生產力與魚/肉生產力均為負值，此一結果表示熱泵熱水系統對於森林植物的生產力與魚肉類的生產力所造成的影響為負面的，換句話說，每一台熱泵熱水系統的製造以及運轉會造成魚肉類生產力下降 0.55 kg、森林植物生產力 400.92 kg。

在 EPS 2000 模式中可將 13 項衝擊類別分為四大項，包括人體健康 (Human Health)、生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)、無生命資源存量

(Abiotic Stock Resource)、生物多樣性 (Biodiversity)。

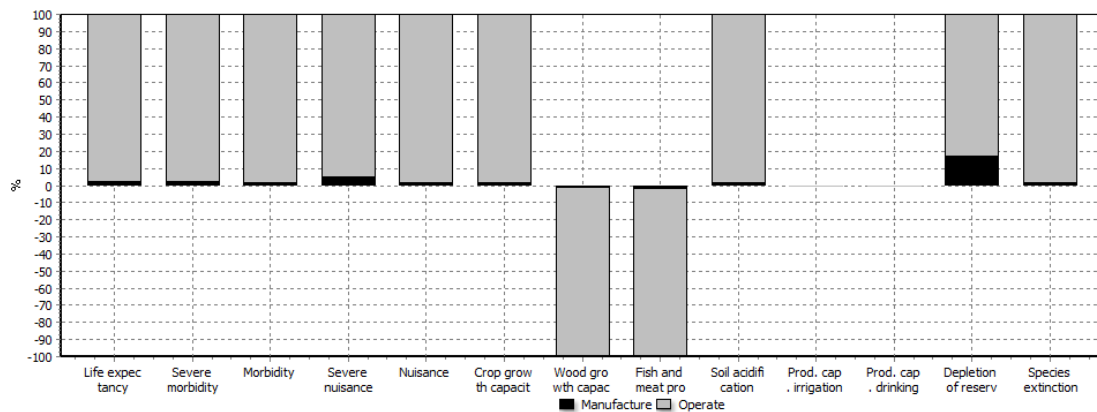
表 4-5 熱泵熱水系統之 EPS 2000 特徵化結果

Impact category	Unit	Total	Manufacture	Operate
壽命減損 (Life expectancy)	PersonYr	0.012314	0.000214	0.0121
嚴重病態 (Sever morbidity)	PersonYr	0.0031843	4.43E-05	0.00314
病態 (Morbidity)	PersonYr	0.00647481	4.48E-05	0.00643
嚴重影響健康 (Sever nuisance)	PersonYr	0.002234	0.000104	0.00213
影響健康 (nuisance)	PersonYr	0.24348	0.00248	0.241
作物生產力 (Crop production capacity)	Kg	19.235	0.135	19.1
木材生產力 (Wood production capacity)	Kg	-400.92	-2.92	-398
魚/肉生產力 (Fish and meat production capacity)	Kg	-0.55096	-0.00796	-0.543
土壤酸化 (Soil acidification)	H+eq	63.593	0.593	63
灌溉水生產力 (Production capacity of (irrigation) water)	Kg	0	0	0
飲用水生產力 (Production capacity of water)	Kg	0	0	0
資源削減 (Depletion of reserves)	ELU	3952	652	3.30E+03
物種滅絕 (Species Extinction)	NEX	2.182E-10	9.52E-11	1.23E-10

資料來源：本研究整理

EPS 2000 模式損害評估 (Damage assessment) 之目的為將數個衝擊類別指標合併成為一個損害範疇。表 4-6、圖 4-6 為熱泵熱水系統使用 EPS 2000 模式之損害評估結果，結果顯示運轉階段在這四項類別上為主要的衝擊來源，其中以無生命資源存量的類別上衝擊最大，運轉階段占了此類別的 83.5%，製造階段占

了 16.5%，探究原因是由銅和鋼鐵等重金屬物質影響所造成；而對人類健康的影響則為第二高，主要是因為運轉階段所造成的衝擊，占了 98.4%，由於運轉階段必須投入電力，而在發電、配電、輸電過程對環境造成的影響，另外，熱泵熱水系統對於對生態系統生產力與生物多樣性的影響則相對較小。



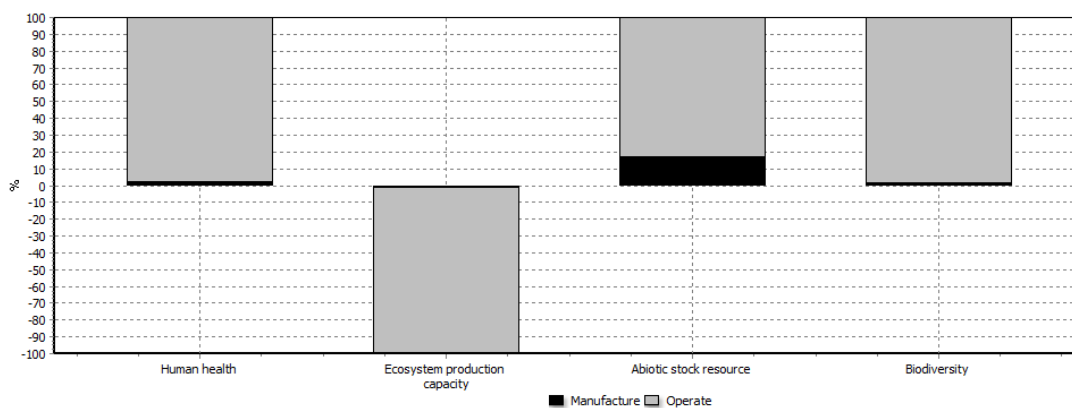
資料來源：本研究整理

圖 4-5 熱泵熱水系統之 EPS 2000 特徵化結果

表 4-6 熱泵熱水系統之 EPS 2000 損害評估結果

Impact category	Unit	Total	Manufacture	Operate
人體健康 (Human Health)	ELU	1484.3	24.3	1.46E+03
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	ELU	-13.1	-0.0958	-13
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	ELU	3952.0	652	3.30E+03
生物多樣性 (Biodiversity)	ELU	13.7	0.105	13.6

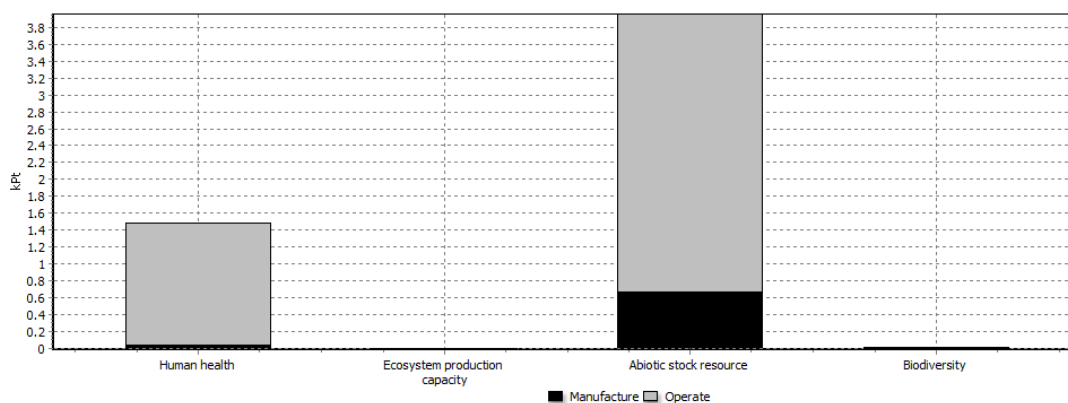
資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

圖 4-6 熱泵熱水系統之 EPS 2000 損害評估結果

將常態化後的數值乘上 EPS 2000 模式中對不同環境衝擊類別的權重，得到的是 EPS 2000 加權後的結果，此結果反應社會對於這四項環境範疇的重視程度。以下表 4-7、圖 4-7 為使用 EPS 2000 模式評價加權後的結果，將上述的損害評估結果乘上 EPS 2000 對應之權重因子轉換後，結果顯示在此熱泵熱水系統製造過程中，各項環境衝擊類別中，以無生命資源存量的衝擊效應最高，在製程上主要是因為使用銅、鋁和鋼鐵等金屬類，對於 13 項衝擊類別中的「資源削減」影響較高；而在人類健康的衝擊相對較少，最後則為生態系統生產力與生物多樣性。



資料來源：本研究整理

圖 4-7 熱泵熱水系統之 EPS 2000 評價加權結果

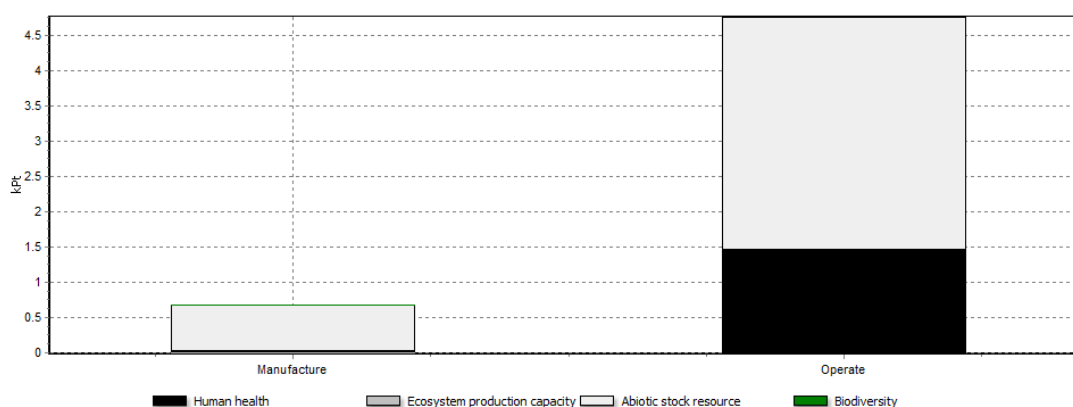
表 4-7、圖 4-8 使用 EPS 2000 模式之單一得點的結果，由圖表可知，熱泵熱水系統對環境衝擊影響最鉅為無生命資源存量，其次則為人類健康；其中又以運轉階段對環境造成較大的衝擊，以無生命資源存量為主要衝擊效應(3,300 Pt)，

其次為人類健康效應 (1,460 Pt)。衝擊效應之來源為熱水系統運轉 15 年所使用的電力及電力之生產、分配、輸送，其因為電力生產所需的煤礦投入，以及纜線所使用的銅等金屬所導致總體資源消耗而致；而在製造階段也是以無生命資源存量為主要的衝擊類別，主要原因是因為以熱泵在製造過程中鋼鐵、銅等金屬資源耗用為主。

表 4-7 熱泵熱水系統之 EPS 2000 評價加權與單一得點結果

Impact category	Unit	Total	Manufacture	Operate
人體健康 (Human Health)	Pt	1484.3	24.3	1.46E+03
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	Pt	-13.1	-0.0958	-1.30E+01
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	Pt	3952.0	652	3.30E+03
生物多樣性 (Biodiversity)	Pt	13.6	0.015	13.6
總計 (Total)	Pt	5347.0	677	4.67E+03

資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

圖 4-8 熱泵熱水系統之 EPS 2000 單一得點結果

此研究結果與 Rey et al. (2004、2011) 使用 EPS 2000 探討熱泵熱水系統之生命週期評估研究結果相符，皆是以運轉電力使用階段為主要的衝擊來源，且衝

擊項目影響最大的為無生命資源存量中的「資源削減」，其次為人體健康中的「壽命減損」。

以熱泵熱水系統之生命週期來看，運轉使用階段對環境之衝擊較大，在 Eco-Indicator 95 模式中，主要之衝擊效應為重金屬污染，其次則為優養化及酸化，另外以 EPS 2000 之衝擊評估模式來看，無生命資源存量是主要衝擊效應，其次為人體健康。

推估原因是熱泵熱水系統在製造過程中，主要投入的原料皆是鋼鐵等金屬類，而熱泵熱水系統運轉 15 年所使用的電力對環境衝擊影響最大，主要原因是生產電力所需要煤礦投入以及輸送電力的電纜以銅等金屬為主，因此對重金屬之污染以及資源耗用等衝擊項目影響較大。

第三節 熱水系統生命週期評估之比較分析

為進行熱泵熱水系統以及電熱水系統、瓦斯熱水系統之生命週期衝擊評估比較分析，電熱水系統的製程直接採用 SimaPro 資料庫 (Ecoinvent database) 之資料，包含了電熱水系統製造過程中所投入的原料以及能源使用；而在運轉階段上之能源投入為每日提供一家四口之每人 50 公升 (共 200 公升) 55°C 熱水，每日需要 6000 kcal，根據電熱水系統有效熱值 817 kcal/kwh 估算，每日使用電熱水系統加熱耗電量約 7.3 度電，使用 15 年共計總耗電量約為 42,442 度電。

瓦斯熱水系統製程亦採取 SimaPro 資料庫 (Ecoinvent database)，中所提供的製程資料該模組包括生產時重要的材料，它也包括這些材料生產所需的能源和水；而在瓦斯熱水系統使用階段上，以天然氣瓦斯有效熱值 9,951 kcal/kg，估算每日提供一家四口之每人 50 公升 (共 200 公升) 55°C 熱水需要 6,000 kcal 之熱量，故每日需使用 0.6 Kg 之天然氣，15 年共計使用天然氣瓦斯約 3,301 Kg。

以下進行研究選擇 Eco-Indicator 95、EPS 2000 這兩種評估模式來比較熱泵熱水系統 (HPWS)、電熱水系統 (EWS) 以及瓦斯熱水系統 (GWHS)，對環境所造成的衝擊差異。

一、衝擊評估模式 Eco-Indicator 95

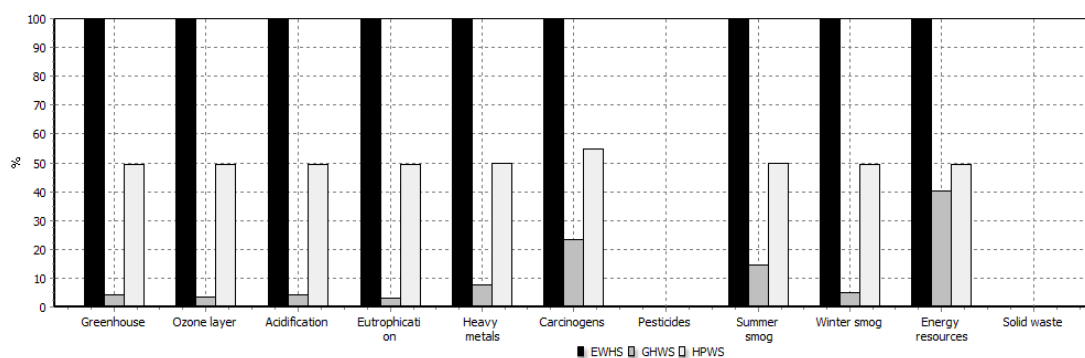
表 4-8、圖 4-9 即為不同熱水系統使用 Eco-Indicator95 模式之特徵化結果，

根據結果發現，電熱水系統在十一項衝擊類別中影響都是最大的，其次為熱泵熱水系統、瓦斯熱水系統。造成此一結果推測為，電熱水系統在生命週期評估中還是以運轉階段所使用的電力為主要的衝擊來源，又電熱水系統之耗電量比熱泵熱水系統高出許多，故電熱水系統之環境衝擊較其他熱水系統來的高。

表 4-8 不同熱水系統之 Eco-Indicator 95 特徵化比較結果

Impact category	Unit	EWHS	GWHS	HPWS
溫室效應 (Greenhouse effect)	Kg CO ₂	18300	746	9010
臭氧層破壞 (Ozone layer)	Kg CFC11	0.000771	0.0000264	0.00038
酸化 (Acidification)	Kg SO ₂	82.1	3.61	40.6
優養化 (Eutrophication)	Kg PO ₄	57.1	1.72	28.3
重金屬污染 (Heavy metals)	Kg Pb	1.37	0.107	0.684
致癌物 (Carcinogens)	Kg B(a)P	0.00131	0.000307	0.000719
冬季煙霧 (Winter smog)	Kg SPM	64.3	3.15	31.9
夏季煙霧 (Summer smog)	Kg C ₂ H ₄	1.56	0.229	0.777
能源消耗 (Energy resources)	MJ LHV	413000	166000	203000
固體廢棄物 (Solid waste)	Kg	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	Kg act.subst	0	0	0

資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

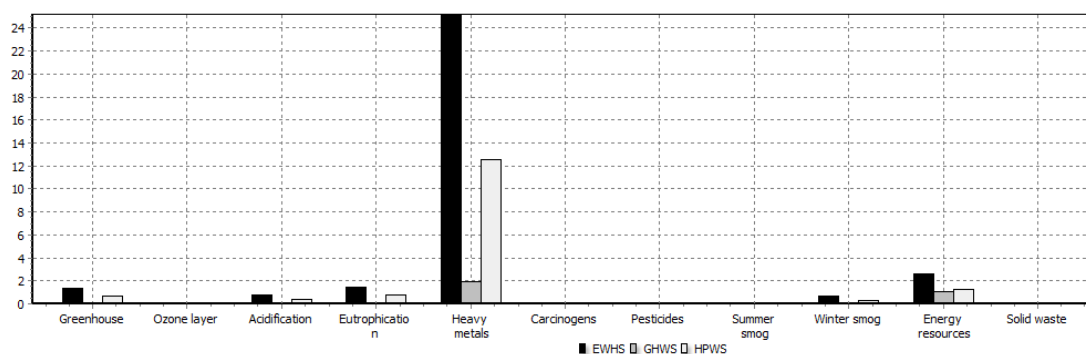
圖 4-9 不同熱水系統之 Eco-Indicator 95 特徵化結果

表 4-9、圖 4-10 為不同熱水系統使用 Eco-Indicator 95 模式之常態化結果，電熱水系統與熱泵熱水系統生命週期中，對重金屬污染、能源消耗、優養化及溫室效應類別的衝擊效應較高，推估是在電力使用上，發電的過程造成對環境的衝擊。

表 4-9 不同熱水系統之 Eco-Indicator 95 常態化結果

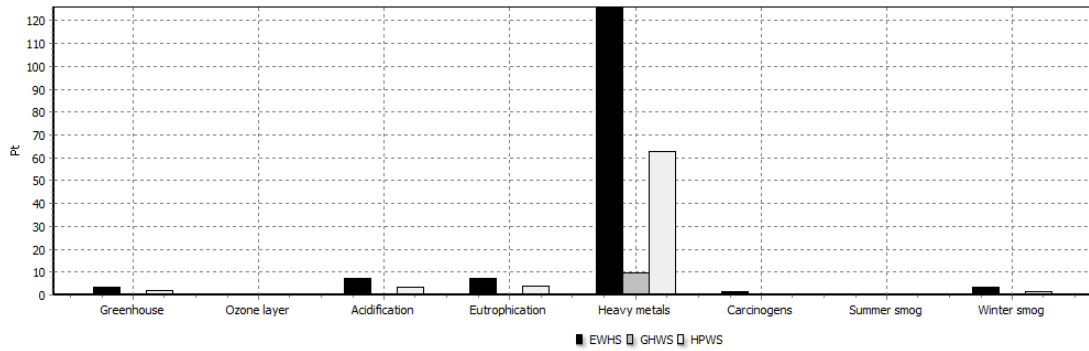
Impact category	EWHS	GWHS	HPWS
溫室效應 (Greenhouse effect)	1.4	0.0571	0.689
臭氧層破壞 (Ozone layer)	0.000833	2.85E-05	0.000411
酸化 (Acidification)	0.729	0.0321	0.361
優養化 (Eutrophication)	1.5	0.045	0.741
重金屬污染 (Heavy metals)	25.2	1.97	12.6
致癌物 (Carcinogens)	0.121	0.0283	0.0661
冬季煙霧 (Winter smog)	0.681	0.0334	0.338
夏季煙霧 (Summer smog)	0.0869	0.0128	0.0434
能源消耗 (Energy resources)	2.6	1.05	1.28
固體廢棄物 (Solid waste)	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	0	0	0

資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

圖 4-10 不同熱水系統之 Eco-Indicator 95 常態化結果表 4-10、圖 4-11 為不同熱水系統使用 Eco-Indicator 95 模式之評價加權結果，可以發現電熱水系統的在每一個衝擊項目下影響皆是最大，熱泵熱水系統其次，最後為瓦斯熱水系統。而在不管哪一種類的熱水系統，對環境之影響還是以重金屬污染為主，以電熱水系統對重金屬污染最高，達到 126 Pt，而熱泵熱水系統對重金屬的污染也有 62.9 Pt，瓦斯熱水系統 9.87 Pt。依照盤查分析顯示，電熱水系統與熱泵熱水系統之重金屬污染來源，主要來自於運轉階段電力的使用上，而瓦斯熱水系統的來源則是製造過程中原料的投入。



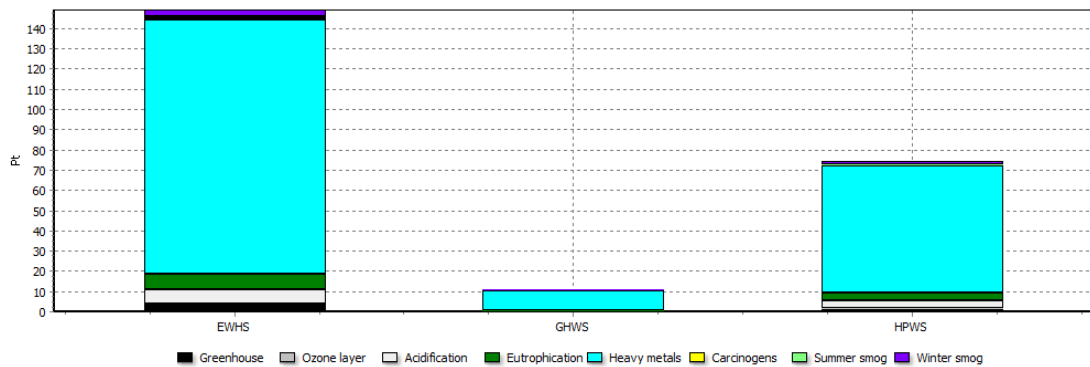
資料來源：本研究整理

圖 4-11 不同熱水系統之 Eco-Indicator 95 評價加權結果

表 4-10 不同熱水系統之 Eco-Indicator 95 評價加權與單一得點結果

Impact category	Unit	EWHS	GWHS	HPWS
溫室效應 (Greenhouse effect)	Pt	3.49	0.143	1.72
臭氧層破壞 (Ozone layer)	Pt	0.0833	2.85E-03	0.0411
酸化 (Acidification)	Pt	7.29	0.321	3.61
優養化 (Eutrophication)	Pt	7.48	0.225	3.7
重金屬污染 (Heavy metals)	Pt	126	9.87	62.9
致癌物 (Carcinogens)	Pt	1.21	0.283	0.661
冬季煙霧 (Winter smog)	Pt	3.41	0.167	1.69
夏季煙霧 (Summer smog)	Pt	0.217	0.0319	0.108
能源消耗 (Energy resources)	Pt	0	0	0
固體廢棄物 (Solid waste)	Pt	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	Pt	0	0	0
總計	Pt	149	11	74.5

資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

圖 4-12 不同熱水系統之 Eco-indicator 95 單一得點比較結果

圖 4-12、表 4-10 為不同熱水系統使用 Eco-Indicator 95 模式之單一得點的結果，電熱水系統在整個生命週期中對環境的衝擊最高，總計 149 Pt，其中又以重金屬污染、優養化、酸化等為主要衝擊效應，造成環境衝擊的來源 99% 是來自運轉階段的電力使用。其次是熱泵熱水系統（74.5 Pt），衝擊項目也是以重金屬污染、優養化、酸化等為主，至於瓦斯熱水系統單一得點分數僅 11 Pt，但其製造階段對環境衝擊達到 10.8 Pt。

會造成此項主要原因是電熱水系統與熱泵熱水系統，在運轉上皆是以電力為主要的能源投入，又電熱水系統在運轉階段的耗電量較熱泵熱水系統多，故電熱水系統在 Eco-indicator 95 衝擊評估模式下之環境衝擊是最大的，而瓦斯熱水系統運轉使用階段的天然氣相較於其他化石燃料，是屬於一種較低污染的化石燃料，因此對環境影響較小。

經由以上結果我們可得知，在 Eco-indicator 95 衝擊評估模式下，對環境最友善的是瓦斯熱水系統，其次則為熱泵熱水系統以及電熱水系統。

二、衝擊評估模式 EPS 2000

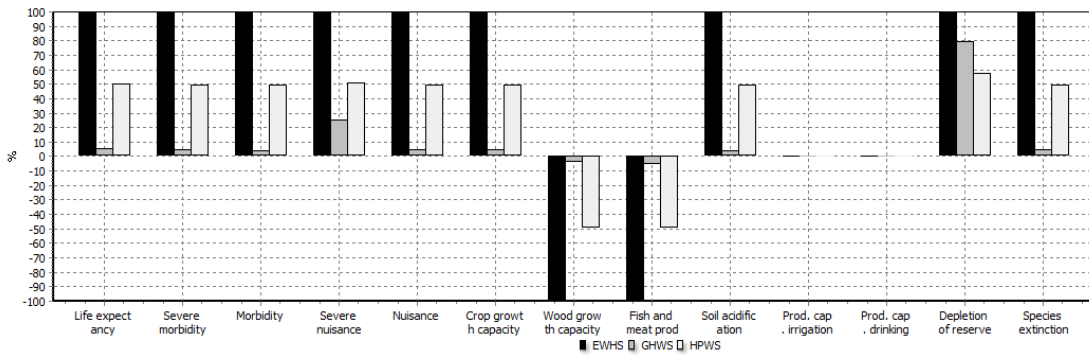
以下為使用 EPS 2000 衝擊評估模式來比較不同熱水系統對環境的衝擊與影響。圖 4-13、表 4-11 為不同熱水系統使用 EPS 2000 模式之特徵化結果，可發現在十三項衝擊類別中，電熱水系統對環境的衝擊的貢獻幾乎都是最高的，其次是熱泵熱水系統，最後則是瓦斯熱水系統，但值得注意的是，瓦斯熱水系統在其他項目所占的比例不高，卻唯獨在資源削減（Depletion of reserves）上占較高的比例，天然氣瓦斯在機組製造以及運轉上皆對資源消滅上有相當的貢獻，根據「世界能源統計」報告（2009）中提到天然氣估計可使用 60 年，意即若從資源存量的角度來看，顯示天然氣的使用對於自然資源的減少確有貢獻（郭紋秀，2009）。

圖 4-14、表 4-12 為不同熱水系統使用 EPS 2000 模式之損害評估結果，在人體健康、生態系統生產力及生物多樣性類別中，呈現相同的情況，皆以電熱水系統之影響最大，其次是熱泵熱水系統，而瓦斯熱水系統所造成的衝擊最小。但在無生命資源存量的部分，則以瓦斯熱水系統對資源削減的影響最反而比熱泵熱水系統還大，主要原因是瓦斯熱水系統在機組製造過程中以及運轉階段的天然氣投入，對資源削減都有相當的貢獻。

表 4-11 不同熱水系統之 EPS 2000 特徵化比較結果

Impact category	Unit	EWHS	GWHS	HPWS
壽命減損 (Life expectancy)	PersonYr	0.0248	0.00144	0.0124
嚴重病態 (Sever morbidity)	PersonYr	0.00641	2.92E-04	0.00319
病態 (Morbidity)	PersonYr	0.0131	5.47E-04	0.00647
嚴重影響健康 (Sever nuisance)	PersonYr	0.00436	0.00111	0.00223
影響健康 (nuisance)	PersonYr	0.492	0.0225	0.244
作物生產力 (Crop production capacity)	Kg	39	1.86	19.3
木材生產力 (Wood production capacity)	Kg	-813	-34.5	-401
魚/肉生產力 (Fish and meat production capacity)	Kg	-1.11	-0.0594	-0.551
土壤酸化 (Soil acidification)	H+eq	129	5.61	63.6
灌溉水生產力 (Production capacity of (irrigation) water)	Kg	0	0	0
飲用水生產力 (Production capacity of water)	Kg	0	0	0
資源削減 (Depletion of reserves)	ELU	6.87E+03	5.40E+03	3.96E+03
物種滅絕 (Species Extinction)	NEX	2.52E-10	1.12E-11	1.24E-10

資料來源：本研究整理



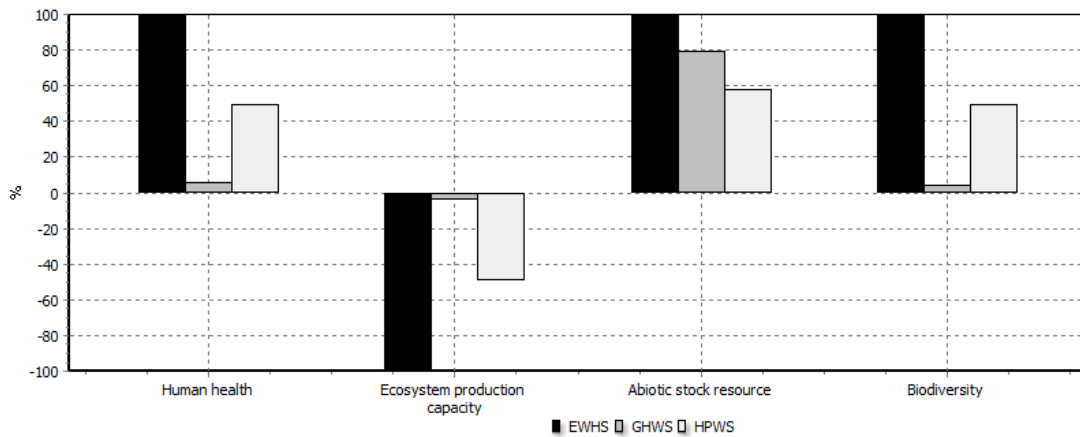
資料來源：本研究整理

圖 4-13 不同熱水系統之 EPS 2000 特徵化比較結果

表 4-14 不同熱水系統之 EPS 2000 損害評估比較結果

Impact category	Unit	EWHS	GWHS	HPWS
人體健康 (Human Health)	ELU	2970	170	1480
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	ELU	-26.5	-1.11	-13.1
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	ELU	6870	5470	3960
生物多樣性 (Biodiversity)	ELU	27.7	1.23	13.7

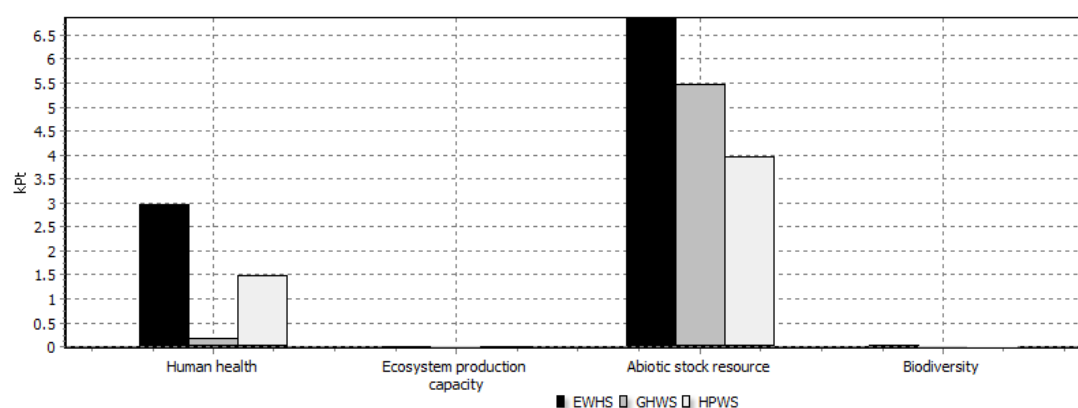
資料來源：本研究整理



資料來源：本研究整理

圖 4-14 不同熱水系統之 EPS 2000 損害評估比較結果

圖 4-15、表 4-13 為不同熱水系統使用 EPS 2000 模式之評價加權結果，由結果可得知三種不同的熱水系統最主要的環境衝擊都在無生命資源存量，其次是人體健康，探究原因是因為熱水系統在製程上所投入主要為金屬類原料所造成的，在運轉過程中，瓦斯熱水系統所使用之天然氣在資源削減的衝擊類別貢獻最大，而熱泵系統和電熱水系統所使用的電力，在資源削減的項目也是影響最大的，除此之外，電力的使用也會造成壽命減損，這也是熱泵系統和電熱水系統造成人體健康類別影響之主要因素。



資料來源：本研究整理

圖 4-15 不同熱水系統之 EPS 2000 評價加權比較結果

表 4-13 熱水系統之 EPS 2000 評價加權以及單一得點比較結果

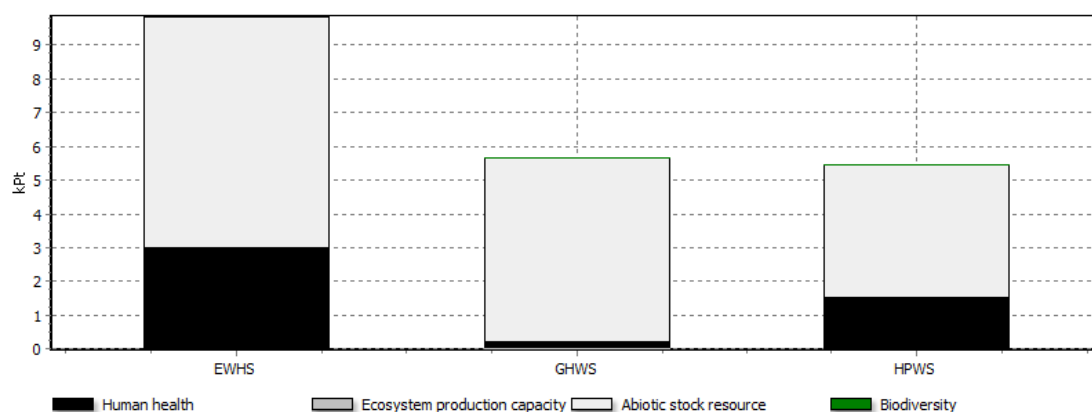
Impact category	Unit	EWHS	GWHS	HPWS
人體健康 (Human Health)	Pt	2970	170	1480
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	Pt	-26.5	-1.11	-13.1
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	Pt	6870	5470	3960
生物多樣性 (Biodiversity)	Pt	27.7	1.23	13.7
總計	Pt	9840	5640	5440

資料來源：本研究整理

圖 4-16、表 4-13 為三種熱水系統使用 EPS 2000 模式之單一得點的結果，顯示在整個研究的生命週期中，電熱水系統對環境衝擊最高達到 9840 Pt，對環

境的影響主要反應在無生命資源存量以及人體健康這兩項衝擊項目，分別達到 6870 Pt 以及 2970 Pt；其次是瓦斯熱水系統 5640 Pt，對環境最友善的是熱泵熱水系統 5440 Pt，這三者皆以無生命資源存量為主要衝擊效應。

最主要原因應為這三種熱水系統在製造過程皆是以鋼鐵、銅等金屬物質為主要的投入原料，這會造成對於無生命資源存量項目有較多的影響，而在運轉過程中電熱水系統與熱泵熱水系統是以電力為主要的投入需求，電力生產所需的煤礦等都是影響生命資源存量的主要原因，而瓦斯熱水系統在運轉階段所使用的天然氣，雖是屬於一種低污染的化石燃料，但其儲存量相較於煤炭等其他化石燃料少，故無生命資源存量為瓦斯熱水系統最主要的衝擊項目。



資料來源：本研究整理

圖 4-16 不同熱水系統之 EPS 2000 單一得點分數比較結果

由以上討論可以發現，一樣的三種熱水系統在不同衝擊評估模式下會造成不一樣的結果，Eco-indicator 95 衝擊評估模式下，對環境最友善的是瓦斯熱水系統，其次是熱泵熱水系統，最後則是電熱水系統。然而，在 EPS 2000 衝擊評估模式下，對環境最友善的是熱泵熱水系統，其次是瓦斯熱水系統，而電熱水系統在 EPS 2000 衝擊評估模式下之環境衝擊是最大的。

造成不同結果出現的原因，是因為 Eco-indicator 95 衝擊評估模式在計算環境衝擊時，對人體健康有危害與環境生態有影響納入評估，也就是說資源消耗、廢棄物的空間需求與對當地影響並不直接納入計算，因此瓦斯熱水系統所在運轉階段使用之天然氣是屬於一種低污染的化石能源，故與使用其他化石能源發電為

主的電熱水系統和熱泵熱水系統相比，對瓦斯熱水系統對環境衝擊影響較少。

至於 EPS 2000 衝擊評估模式中，除了人體健康和生態系統等衝擊項目外，更考量了資源消耗等無生命資源存量的問題，而天然氣是一種不可再生能源，其資源存量與煤炭相比，在自然界的儲存量更少，因此若從資源存量的角度來看，使用天然氣的瓦斯熱水系統，對環境的衝擊會比使用電力需求量較小的熱泵熱水系統來的高。

探究電熱水系統、瓦斯熱水系統以及熱泵熱水系統之生命週期對環境的衝擊，以人體健康和生態環境的角度來看，使用瓦斯熱水系統對環境是最友善的，其次則是熱泵熱水系統；若納入資源消耗的考量下，使用熱泵熱水系統反而是對環境最友善的；但不管在何種情形下，是用電熱水系統，對環境的衝擊影響都是最大的。

第四節 熱泵熱水系統之淨能源分析與 CO₂ 排放

一、淨能源分析

在 1970 年代能源危機以後，各國開始意識到能源的耗竭性以及其對環境的迫害，開始轉而尋找可以替代化石能源的再生能源，隨著溫室效應造成全球氣候變遷，許多國家政府積極推廣再生能源技術，以減緩耗竭性化石能源的使用，降低 CO₂ 的排放，以及其所造成的環境問題。但實際上，如果使用無效率的再生能源技術，不但不能減少二氧化碳的排放，也會加速化石能源的耗竭，讓原本已經存在的環境問題，變得更加嚴重。再生能源的生產與轉換需要能源的投入，在製造生產再生能源的機具時，也需要能源的開採與使用，若只單看粗能源產出作為標準，似乎忽略了再生能源通常擁有較低的能源投資報酬率，也意味著再生能源的淨能源產出普遍較石化能源低。

所謂的淨能源 (Net energy) 為經濟學淨值定義之延伸，是衡量能源產出以及生產過程中包含資源開採、處理、運送等總能源消耗的差值，意即粗能源產出減去能源生產過程中所需之所有能源投入之淨值即為淨能源產出。

$$\text{淨能源產出 } Net\ Energy\ Output = Gross\ Energy\ Output - Energy\ Input$$

淨能源的定義雖然簡明，但衍生出許多不同的指標，例如：能源投資報酬

(Energy Return on Investment, EROI)、能源效率 (Energy Profit Ratio, EPR) 能源回收期 (Energy Payback Time, EPT) 等。

本研究採用淨能源分析，並以熱泵熱水系統之生命週期所需投入與產出之能源，來估算其能源投資報酬率與能源回收期，而由於國內之熱泵熱水系統之原料為國外進口，因此在此將參考國外之能源使用相關數據來計算其排放以及投入。利用利用 SERT (Sustainable Energy Research Team of the University of Bath) 所公布之各單位材料生產消耗初級能源數據，再與廠商所提供的熱泵投入材料使用量進行估算，即可求得熱泵熱水系統所需之生產製造過程所需能源投入量。

(一) 能源投資報酬

能源投資報酬 (Energy Return on Investment, EROI) 即為能源生產過程中，能源產出和能源消耗的比值。

$$EROI = \frac{\text{Quantity of Energy Supplied}}{\text{Quantity of Energy Used on Supply Process}} = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

E_{out} = 能源總產出能量

E_{in} = 能源投入能量

分子與分母皆為正數，EROI 產出必大於零。EROI 可解釋為能源投入產出指標率，當 $EROI > 1$ ，則表示能源有效率，產出品質越高；若 $EROI < 1$ ，則表示能源產出品質較差，能源使用較無效率，若該能源大量產出，則會加速能源的耗竭。因此，決策者在推行或獎勵再生能源技術時，應要以淨能源分析來了解技術之能源投入是否小於能源產出，以避免獎勵無效率的能源技術。

在熱泵製造過程中，依據廠商所提供的資料，已知製造每一台熱泵熱水系統所投入的原料重量以及能源消耗量，再依照每一物質之單位初級材料能源消耗量，計算出熱泵系統在生產過程中，所需的總能源投入，又因公布資料中沒有鍍鋅鋼鐵的材料能源消耗數據，故以材料接近之鋼鐵取代。依照計算結果我們可得知製造每一台熱泵熱水系統所投入的原料以及能源總生產耗能為 792.1 MJ。如表 4-14 所示。

為計算熱泵熱水系統在運轉過程中之總能源消耗量，本研究將熱泵熱水系統使用年限定為 15 年，每日提供一家四口之每人 50 公升(共 200 公升)55°C 熱水，

熱泵熱水系統耗電量 700W，每日使用熱泵熱水系統加熱以及保溫的時間估計 4.2 小時，耗電量約 3 度電，使用 15 年共計總耗電量為 16,425 度電，故熱泵熱水系統在使用上共耗能 59,130 MJ。

表 4-14 每台熱泵機組主要投入原料及能源之總生產耗能

	投入原料 (kg/kwh)	單位能源消耗 (MJ/kg) (MJ/kwh)	投入原料能源耗能 (MJ)
鋼鐵	6	24.4	146.4
鍍鋅鋼鐵	10	24.4	244
銅	2	48	96
鋁	1.5	155	232.5
電力	12	3.6	43.2
用水量	150	0.2	30
Total			792.1 MJ

資料來源：本研究調查整理

表 4-15 熱泵熱水系統之能效係數 (COP)

入水溫度 環境溫度	10°C	15°C	20°C	25°C
35°C	5.62	5.35	5.19	4.96
30°C	4.95	4.72	4.54	4.32
25°C	4.12	3.91	3.74	3.53
20°C	3.95	3.76	3.58	3.39
15°C	3.35	3.19	3.03	2.87
10°C	2.82	2.67	2.52	2.35
5°C	2.44	2.29	2.16	2.07
0°C	1.82	1.70	1.58	1.47

資料來源：工研院熱泵產品能效檢測報告

註：本表數值為測試熱泵熱水系統由各入水溫度加熱至 55°C 之能效係數

而熱泵熱水系統依照其環境溫度以及入水溫度有不同的能效表現參數，本研究是採用某國內業者家用熱泵熱水系統產品，送交工研院能效檢測之數據。本研究根據該份檢測報告進行延伸的能效係數計算，檢測及計算結果如表 4-15。

配合不同的環境溫度以及入水溫度下的 COP 值，可計算出熱泵熱水系統 15 年總熱產量，所得值約在 86,921.10 MJ 至 332,310.6 MJ 之間，如表 4-16 所示。

表 4-16 熱泵熱水系統使用 15 年總熱產量

入水溫度 環境溫度	10°C	15°C	20°C	25°C
35°C	332310.60	316345.50	306884.70	293284.80
30°C	292693.50	279093.60	268450.20	255441.60
25°C	243615.60	231198.30	221146.20	208728.90
20°C	233563.50	222328.80	211685.40	200450.70
15°C	198085.50	188624.70	179163.90	169703.10
10°C	166746.60	157877.10	149007.60	138955.50
5°C	144277.20	135407.70	127720.80	122399.10
0°C	107616.60	100521.00	93425.40	86921.10

資料來源：本研究調查整理

表 4-17 熱泵熱水系統 EROI

單位：MJ	COP=1.47	COP=5.62
Life-cycle Energy Input		
Macufacturing	792.1	792.1
Operating	59130	59130
Total	59922.1	59922.1
Life-cycle Energy Output		
Heat	86921.1	332310.6
Total	86921.1	332310.6
EROI	1.45	5.55

表 4-17 為熱泵熱水系統之 EROI 值，本研究估算所得熱泵熱水系統在生產過程之能源投入為 792.1 MJ，根據能源熱值換算為電力之度數（1kWh=860 kcal=3.6 MJ），運轉過程使用電力之能源投入 59130 MJ，兩者相加共計熱泵熱水系統之生命週期能源投入為 59922.1 MJ。另外，在產出方面，熱泵熱水系統 15 年總熱產量，所得值約在 86921.10 至 332310.6 之間。依照 EROI 公式，計算出熱泵熱水系統之 EROI 如下表所示，能源效率表現最高之熱泵熱水系統(COP=5.62) 所得之 EROI 值為 5.55，而能源效率表現最低之熱泵熱水系統（COP=1.47）的 EROI 值也有 1.45，在不同的入水溫度及環境溫度下熱泵熱水系統之投資報酬皆大於 1，能源效率甚至為其投入之 5 倍以上，表示熱泵熱水系統從生命週期的角度來檢視能源投資報酬是有效率的。

（二） 能源回收期

能源回收期（Energy Payback Time, EPT）用來衡量能源技術需要運行多少時間才能產生足以彌補其製造及興建過程所耗用之能源，意即系統運轉產生之能源至可補足用在生產、運轉等期間所消耗之能源量所需要的時間，能源回收期計算出來所得之數字越小越好，常見的定義為低於兩年者方可算是優良之能源生產方式。本研究計算公式如下所示：

$$EPT = \frac{\text{Life-cycle Energy Input}}{\text{Net Energy Output}} = \frac{E_{in}}{E_{out} - E_{use}}$$

其中 EPT 表示其能源回收期； E_{in} 表示熱泵熱水系統生命週期之能源投入； E_{out} 表示熱泵熱水系統之產出熱量； E_{use} 表示熱泵熱水系統為產出熱量所需耗用之能量。

本研究估算所得熱泵熱水系統生命週期之能源投入為 59922.1 MJ，熱泵熱水系統產出之熱量 E_{out} 為 86921.10 MJ 至 332310.6 MJ 之間，而為產出熱能所需耗用之能量為 59130 MJ，經計算結果可得熱泵熱水系統之能源回收期約為 0.22 年至 2.16 年，約為 2.64 個月至 2 年又 2 個月左右，意即表示建造熱泵機組所投入之能源，可在熱泵運轉後約個 2.64 個月至 2 年又 2 個月回收，表現還算不錯。

由以上討論可發現，熱泵熱水系統就能源效益面來看是表現不錯的，依照不同的環境溫度及入水溫度所得之 EROI 值在約在 1.45~5.55 之間，臺灣屬於海島型國家氣候終年溫暖潮濕，環境溫度及入水溫度都偏高，這樣的情況下熱泵熱水

系統的能源投資報酬率較好，另外依據淨效益估算熱泵熱水系統能源回收期約為 2.64 個月至 2 年又 2 個月，表現良好。因此由淨能源分析熱泵熱水系統，以能源效益面的角度來檢視熱泵熱水系統是有效率的一套熱水系統。

二、熱泵熱水系統 CO₂ 排放

從 CO₂ 排放表現上，來比較熱泵熱水系統與其它熱水系統對環境的相對影響，熱泵熱水系統在製造過程之 CO₂ 排放，亦是依據其生產製造階段之主要投入原料以及能源使用量為基準，並利用 SERT 所公布之各單位材料生產製造過程之單位 CO₂ 平均排放量為參考依據，電力能源之 CO₂ 排放量是參照台灣電力公司所公布之 99 年度電力排放係數²，而在瓦斯熱水系統所需使用的天然氣 CO₂ 排放量，則是參考經濟部能源局所公布之「99 年度燃料燃燒及電力使用之二氧化碳排放係數」³做為本研究參考之依據。

表 4-18 為每台熱泵機組生產階段主要投入原料及能源之 CO₂ 排放量，由於 SERT 公布的資料中沒有鍍鋅鋼鐵之生產製造過程之 CO₂ 排放量數據，故以與其材料接近之鋼鐵取代。根據計算結果，可得知熱泵機組在生產階段碳排放量約為 82.99 Kg，而熱泵機組運轉 15 年所消耗電力約為 16,425 kWh，依據 99 年度電力排放係數約為 0.612 kg CO₂/度，得出運轉階段約排放 10,052.1 Kg 的二氧化碳，生命週期 CO₂ 排碳量約為 10,135.09 kg。在生產階段的 CO₂ 排放量占生命週期 CO₂ 排放量約 0.8%，運轉階段占了大部分的 CO₂ 排放約為 99.2%。

表 4-18 每台熱泵系統製造階段主要投入原料及能源之 CO₂ 排放量

	投入原料 (kg/kwh)	單位 CO ₂ 排放量 (kg)	投入原料 CO ₂ 排放量 (Kg)
鋼鐵	6	1.77	10.62
鍍鋅鋼鐵*	10	1.77	17.7
銅	2	3.01	6.02
鋁	1.5	8.24	12.36
電力	12	0.612	7.34
用水量	150	0.193	28.95
總計			82.99 Kg

資料來源：經濟部能源局；Geoff Hammond, Craig Jones, 2008；本研究整理

² 99 年度電力排放係數約為 0.612 kg CO₂/度，台灣電力公司

³ 99 年度天然氣排放係數約為 2.09 kg CO₂/M³，經濟部能源局

另外，比較熱泵熱水系統與電熱水系統、瓦斯熱水系統生命週期 CO₂ 排放量多寡，電熱水系統與瓦斯熱水系統製造階段採用 SimaPro 資料庫 (Ecoinvent database) 之資料，並計算主要投入原料及能源使用之 CO₂ 排放量。經計算後結果可得知，每台電熱水系統在製造過程之 CO₂ 排放量約為 3.41426 Kg，而其運轉 15 年所使用的耗電量約為 42,442 度電，得知運轉階段的 CO₂ 排放量為 25,974.50 Kg，此排放量占生命週期總排放量 99.9%，使用電熱水系統所造成的二氧化碳排放，幾乎是由運轉階段所使用的店裡所造成的。

另外，瓦斯熱水系統方面，每製造一台瓦斯熱水系統的所造成 CO₂ 排放量約為 384.39 Kg，占整體生命週期 CO₂ 排放的 3.8%，而運轉階段天然氣的使用約為 3,301Kg，99 年度天然氣排放係數約為 2.09 kg CO₂/M³，經計算瓦斯熱水系統之運轉階段排出 CO₂ 共約 9,662.59 公斤⁴，整體生命週期 CO₂ 排放量 10,046.98 Kg。不同熱水系統之生命週期 CO₂ 排放量如表 4-19 所示。

表 4-19 不同熱水系統之生命週期 CO₂ 排放量

	熱泵熱水系統	電熱水系統	瓦斯熱水系統
製造階段 CO ₂ 排放量	82.99	3.41	384.39
運轉階段 CO ₂ 排放量	10,052.1	25,974.50	9,662.59
總 CO ₂ 排放量	10,135.09	25,977.91	10,046.98

資料來源：本研究自行整理

由以上分析可得知，瓦斯熱水系統生命週期 CO₂ 排放量在不同熱水系統是表現最為理想的，總生命週期 CO₂ 排放量為 10,046.98 公斤，再者才是熱泵熱水系統以及電熱水系統，分別為 10,135.09 公斤以及 25,977.91 公斤。造成此種結果最主要的原因是，使用電力造成的二氧化碳排放較高。在使用熱水系統的過程中，為了提供相同溫度的熱水量，使用電力的熱泵熱水系統與電熱水系統，對 CO₂ 排放量的貢獻也相對較高。電熱水系統在運轉過程所使用的電力，相較於熱泵熱水系統高出許多，因此電熱水系統對於臺灣 CO₂ 排放量貢獻最多，以一台熱水設備使用 15 年來看，使用電熱水系統 CO₂ 排放量大約是使用熱泵熱水系統的 2.5 倍，對環境影響甚鉅。另外，以熱泵熱水系統和瓦斯熱水系統在運轉階段對二氧化碳排放量的差距是比較微小的，使用 15 年約多排放 88.11 公斤的 CO₂，以 99

⁴ 天然氣密度約為 0.714 kg/m³，故瓦斯熱水系統運轉使用階段消耗天然氣約 4623.25 m³。

年度台灣的電力排放係數約為 0.612 kg CO₂/度，若未來再生發電能源比例增高，每度電之 CO₂ 排放係數也會下降，使用熱泵熱水系統對於 CO₂ 排放量貢獻也會改善。

第五節 熱泵熱水系統生命週期評估之敏感度分析

由於熱泵熱水系統在運轉階段最大的能源投入是電力，對環境衝擊主要貢獻也是因為電力的使用所導致的。本研究透過敏感度分析探討在不同的背景假設下，住宅部門裝設熱泵熱水系統對環境衝擊之影響，主要分析兩種情境，分別為再生能源發電比例提升，以及熱泵能源效率提升。

情境一：再生能源發電比例提升

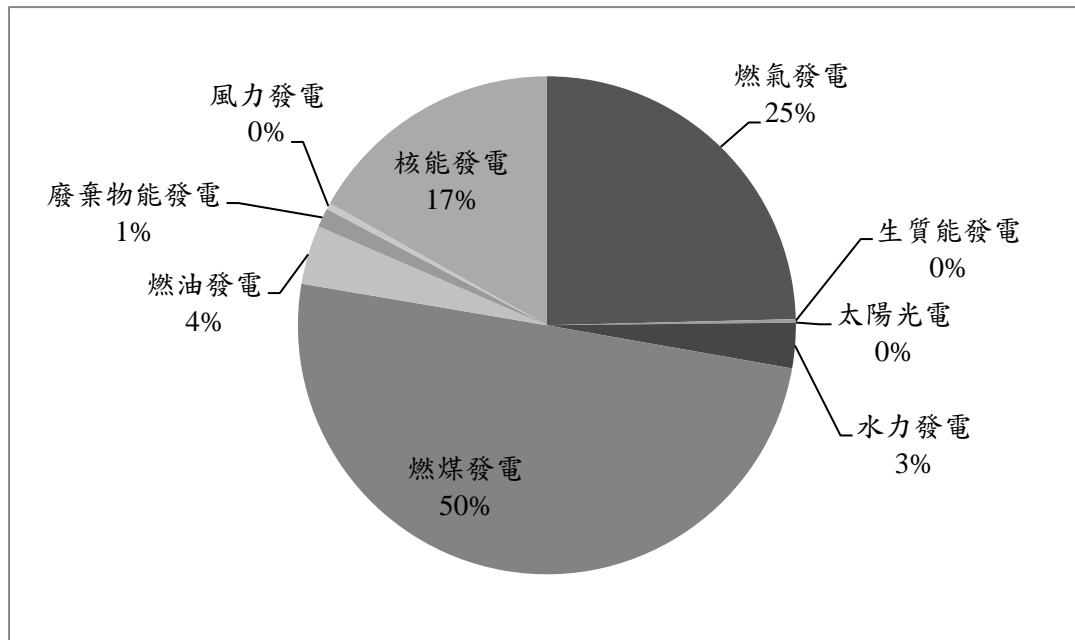
根據經濟部能源局所發布的「中華民國 99 年能源統計手冊」中顯示，台灣近五年發電比例如下表 4-20 所示，可得之現今電力大部分還是使用化石燃料發電，再生能源發電比例不到 5%，以下使用敏感度分析探討在使用再生能源發電之電力下，熱泵熱水系統對環境之衝擊影響，以推測未來再生能源發電比例提高，使用熱泵熱水系統對環境衝擊的影響是否會減少。

表 4-20 台灣近五年發電量表

年代	燃煤發電	燃油發電	燃氣發電	核能發電	風力發電	水力發電	太陽光電	生質能發電	廢棄物能發電	總計
2006	53.49	7.69	16.97	16.93	0.12	3.40	0	0.16	1.23	100
2007	53.62	6.18	18.42	16.67	0.18	3.43	0	0.25	1.24	100
2008	52.02	5.61	20.29	17.13	0.25	3.26	0	0.20	1.23	100
2009	53.25	3.31	20.35	18.10	0.34	3.07	0	0.22	1.27	100
2010	49.91	3.83	24.61	16.85	0.42	2.94	0.01	0.22	1.23	100

資料來源：經濟部能源局

單位：%



資料來源：經濟部能源局

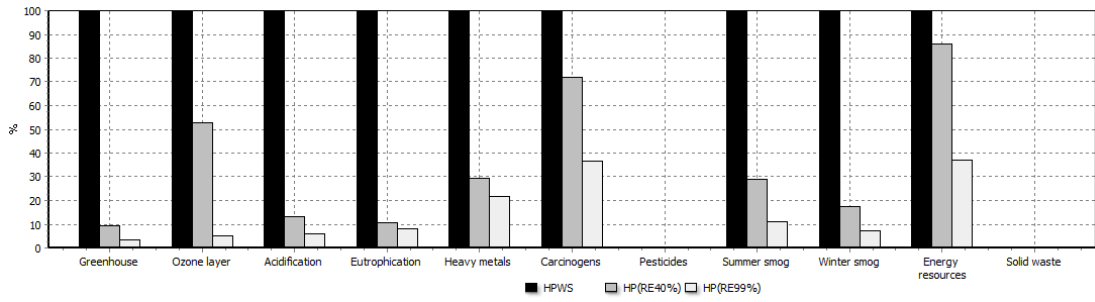
圖 4-17 台灣 2010 年發電來源比例圖

在其他條件不變下，將熱泵熱水系統運轉過程所使用的電力發電來源中，再生能源發電比例調高至 40%（如丹麥）與 99%（如挪威），重新計算 Eco-indicator 95 與 EPS 2000 衝擊評估模式之所得結果。

一、衝擊評估模式 Eco-indicator 95

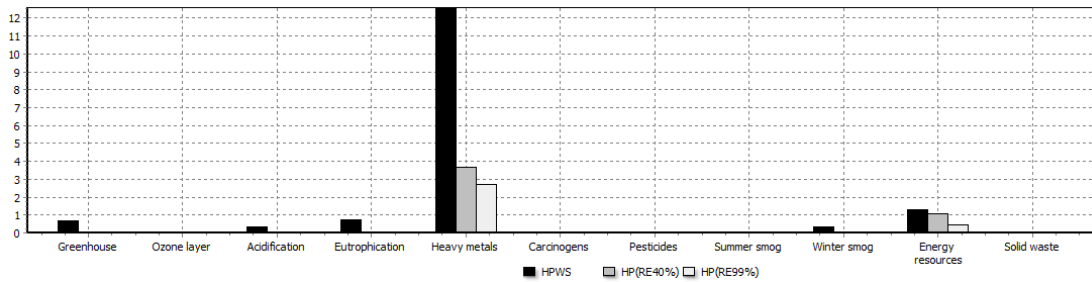
圖 4-18、圖 4-19 分別為運轉過程使用再生能源發電之 Eco-indicator 95 特徵化結果及常態化比較結果。由結果看出在各類衝擊類別中，都較原始資料環境衝擊貢獻程度少，尤其是在重金屬污染上，更是大大地減低環境的負擔，因不再使用原本發電所需的煤礦等，改以環境污染較少的再生能源發電，由常態化結果可知，使用再生能源發電的熱泵熱水系統之環境衝擊，還是以重金屬污染為主。

而依據圖 4-20 評價加權與圖 4-21 單一得點之結果顯示，雖然不管使用哪一種電力方案，熱泵熱水系統在 Eco-indicator 95 十一項衝擊項目中還是以重金屬污染為主要衝擊效應，推估原因是由於製造過程中金屬原料的投入，以及使用電力時必要的纜線等設備造成的。表 4-21 中可發現，若採取若發電來源 99% 為再生能源，對環境衝擊單一得點分數由原本的 74.5 Pt 下降至 14.5 Pt，除了在重金屬污染環境貢獻程度降低外，熱泵熱水系統使用綠色電力在酸化、優養化等其他衝擊項目都有明顯的改善，在由此可看出熱泵熱水系統使用綠色電力方案將有效降低整體環境的衝擊。



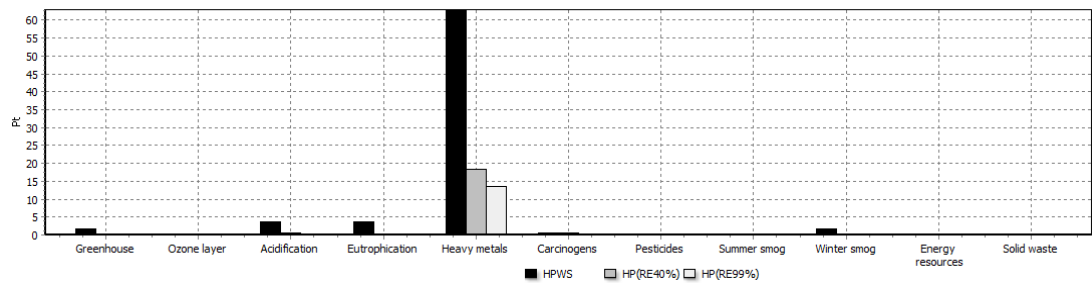
資料來源：本研究整理

圖 4-18 使用不同比例再生能源發電來源之 Eco-indicator 95 特徵化比較結果



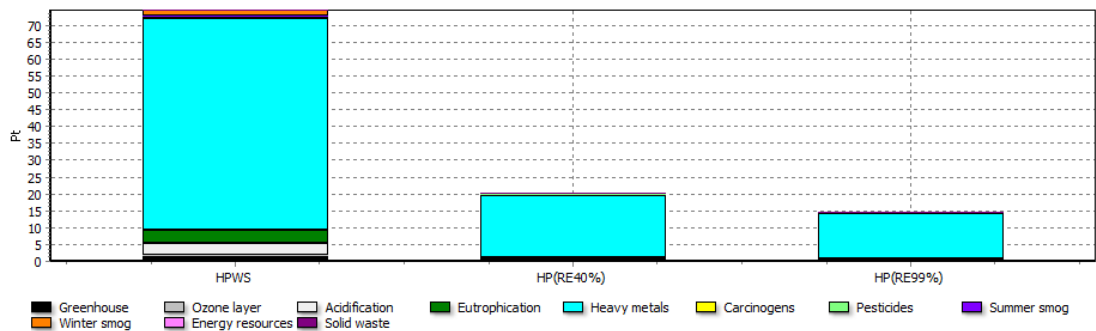
資料來源：本研究整理

圖 4-19 使用不同比例再生能源發電來源之 Eco-indicator 95 常態化比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-20 使用不同比例再生能源發電來源之 Eco-indicator 95 評價加權比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-21 使用不同比例再生能源發電來源之 Eco-indicator 95 單一得點比較結果

表 4-21 使用不同比例再生能源發電來源之 Eco-indicator 95 單一得點比較結果

Impact category	0%	40%	99%
溫室效應 (Greenhouse effect)	1.72	0.163	0.0619
臭氧層破壞 (Ozone layer)	0.0411	0.0216	0.00204
酸化 (Acidification)	3.61	0.479	0.215
優養化 (Eutrophication)	3.7	0.288	0.295
重金屬污染 (Heavy metals)	62.9	18.5	13.6
致癌物 (Carcinogens)	0.661	0.475	0.241
冬季煙霧 (Winter smog)	1.69	0.292	0.125
夏季煙霧 (Summer smog)	0.108	0.0315	0.0121
能源消耗 (Energy resources)	0	0	0
固體廢棄物 (Solid waste)	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	0	0	0
總計 (Total)	74.4	20.3	14.6

資料來源：本研究整理

表 4-22 使用不同比例再生能源發電來源對環境之影響 (Eco-indicator 95)

Impact category	40%	99%
溫室效應 (Greenhouse effect)	-90.52%	-96.40%
臭氧層破壞 (Ozone layer)	-47.45%	-95.04%
酸化 (Acidification)	-86.73%	-94.04%
優養化 (Eutrophication)	-92.22%	-92.03%
重金屬污染 (Heavy metals)	-70.59%	-78.38%
致癌物 (Carcinogens)	-28.14%	-63.54%
冬季煙霧 (Winter smog)	-82.72%	-92.60%
夏季煙霧 (Summer smog)	-70.83%	-88.80%
能源消耗 (Energy resources)	0.00%	0.00%
固體廢棄物 (Solid waste)	0.00%	0.00%
殺蟲劑 (Pesticides)	0.00%	0.00%
總計 (Total)	-72.79%	-80.45%

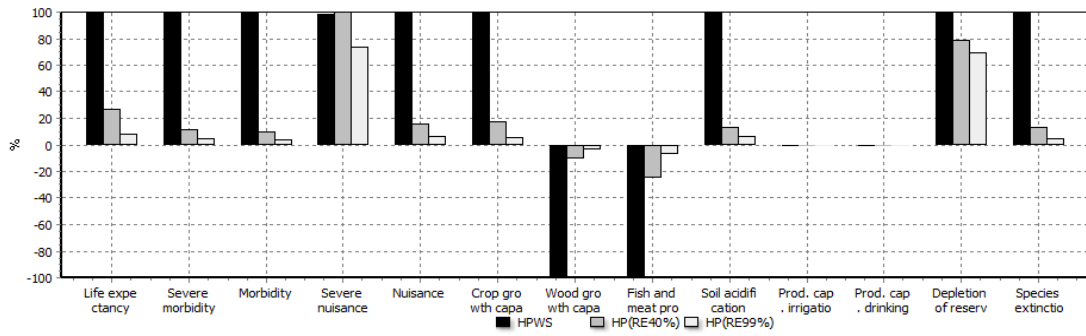
資料來源：本研究整理

表 4-22 為使用不同比例再生能源發電對環境的影響，由表中可發現使用綠色電力後，各衝擊項目都有明顯地減少環境負面衝擊程度，尤其在優養化、溫室效應、酸化等項目中，在使用 40% 再生能源發電的情境下，對環境改善程度分別高達 92.22%；90.52% 以及 86.73%。而若使用 99% 再生能源發電電力，環境衝擊減少程度就更為明顯了，包括溫室效應、臭氧層破壞、酸化、優養化和冬季煙霧等，都有超過 90% 的改善程度。在 Eco-indicator 95 模式下，熱泵熱水系統使用綠色電力以整體影響來說，若發電來源 40% 為再生能源，環境衝擊程度會較使用現行的電力減少 72.79%；若發電來源 99% 來自再生能源，則會減少 80.45%。

二、衝擊評估模式 EPS 2000

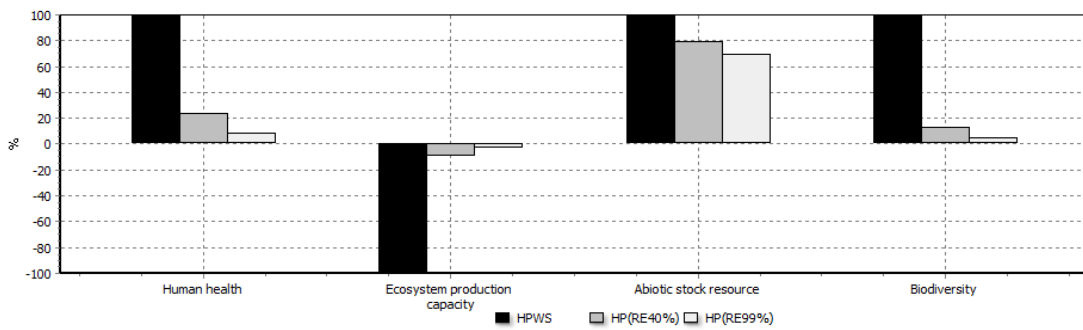
圖 4-22 為熱泵熱水系統使用不同比例再生發電來源之電力，EPS 2000 衝擊評估特徵化結果，在十三項衝擊類別中，使用再生能源電力之熱泵熱水系統，對於環境衝擊程度都比原始資料有明顯地來得少；與圖 4-23 之損害評估結果可發現，在四個損害範疇中，包括人體健康、生態系統生產力、無生命資源存量與生物多樣性，相較於使用原始電力資料的熱泵熱水系統，對環境衝擊都明顯的改善，另外圖也顯示使用綠色電力之熱泵熱水系統對環境衝擊最大的來自於無生命資源存量，主要是由於電力輸配送過程所需的纜線設備所致，在發電過程對環境衝擊程度較少。

而依據圖 4-24 評價加權與圖 4-25 單一得點結果顯示，在 EPS 2000 衝擊評估模式中顯示，使用再生能源發電之電力的熱泵熱水系統與使用原始電力之熱泵熱水系統相比，使用再生能源發電對環境衝擊貢獻程度較低，若以 99% 再生能源發電比例來看，生命週期環境衝擊之單一得點分數由使用原始電力的 5440 Pt 下降至 2880 Pt，使用原始電力資料的熱泵熱水系統在人體健康上單一得點分數為 1480 Pt，而使用 99% 再生能源發電之電力，在人體健康項目上單一得點分數為 123 Pt，而在無生命資源存量的衝擊項目上，單一得點分數也由 3960 Pt 下降至 2760 Pt，結果顯示熱泵熱水系統運轉的電力來源若為 99% 再生能源發電電力，那麼對環境衝擊程度都有明顯的改善。



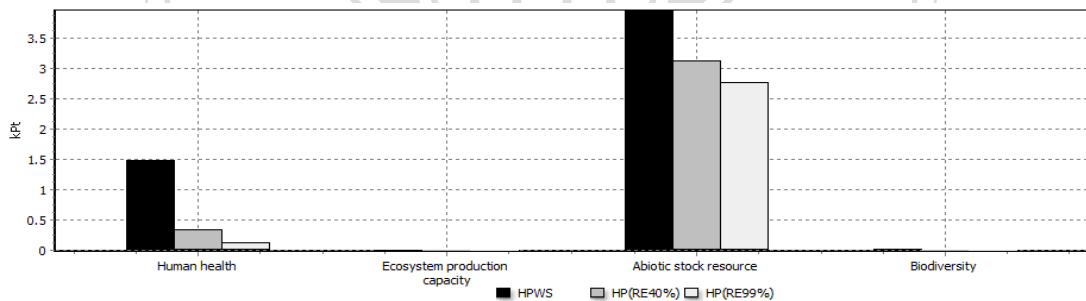
資料來源：本研究整理

圖 4-22 使用不同比例再生能源發電來源之 EPS 2000 特徵化比較結果



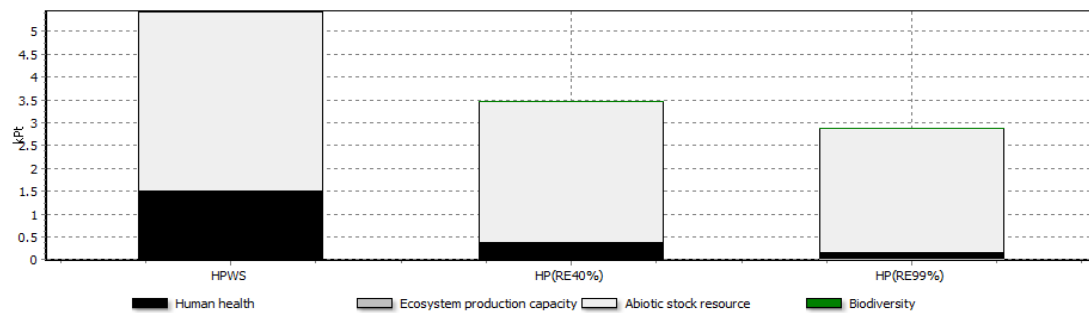
資料來源：本研究整理

圖 4-23 使用不同比例再生能源發電來源之 EPS 2000 損害評估比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-24 使用不同比例再生能源發電來源之 EPS 2000 評價加權比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-25 使用不同比例再生能源發電來源之 EPS 2000 單一得點比較結果

表 4-23 使用不同比例再生能源發電來源之 EPS 2000 單一得點比較結果

Impact category	0%	40%	99%
人體健康 (Human Health)	1480	350	123
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	-13.1	-1.25	-0.444
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	3960	3120	2760
生物多樣性 (Biodiversity)	13.7	1.78	0.691
總計 (Total)	5440	3480	2880

資料來源：本研究整理

表 4-24 使用不同比例再生能源發電來源對環境之影響 (EPS 2000)

Impact category	40%	99%
人體健康 (Human Health)	-76.35%	-91.69%
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	-90.46%	-96.61%
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	-21.21%	-30.30%
生物多樣性 (Biodiversity)	-87.01%	-94.96%
總計 (Total)	-36.03%	-47.06%

資料來源：本研究整理

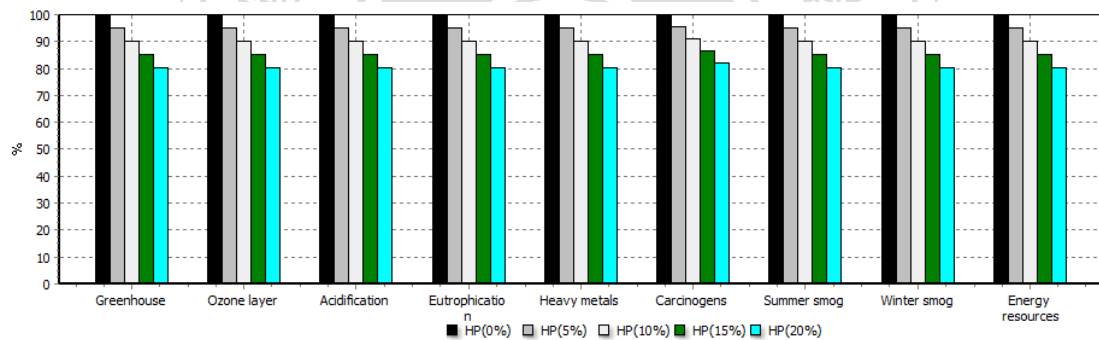
表 4-24 為使用 EPS 2000 評估模式探討不同比例再生能源發電對環境的影響，是熱泵熱水系統在運轉過程使用綠色電力後，環境負面衝擊減少程度。除了無資源生命存量外，使用再生能源發電電力都能有效地在環境上的負擔；若發電來源 40% 為再生能源，環境衝擊程度會較使用現行的電力減少 36.03%；若發電來源 99% 來自再生能源，則會減少 47.06%。

情境二、能源效率提升

當未來熱泵製造技術的逐漸提升，使熱泵系統之能源效率得以不斷改善，能源效率提升的效果反應在熱泵系統運轉時用電量的減少，而熱泵系統改善能源效率之利益，除了讓使用者可以有效地節約用電外，更能減少熱泵系統對整體環境的衝擊影響，本項目之分析，假設熱泵系統之能源效率較現有技術水準提高 5%、10%、15%、20%，並與現行技術水準做比較，以了解其環境效益之效果。

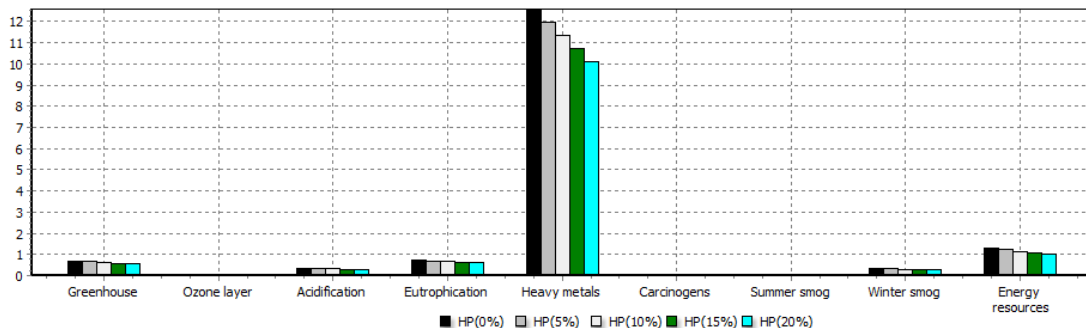
一、衝擊評估模式 Eco-indicator 95

為評估熱泵系統之能源效率提升對環境的影響為何，0%項目代表現行技術水準，5%、10%、15%、20%則分別代表能源效率相較於現行水準提升之比例。圖 4-26、圖 4-27 為熱泵熱水系統能源效率提升之特徵化與常態化結果，由圖中可知每當能源效率提升 5%，熱泵系統對各項環境衝擊影響約為- 5% 左右，而環境衝擊項目還是由重金屬汙染為主。



資料來源：本研究整理

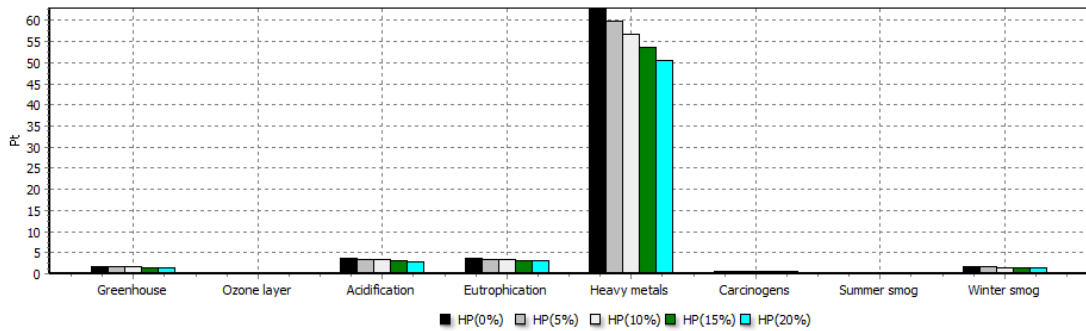
圖 4-26 熱泵系統之能源效率提升 Eco-indicator 95 特徵化比較結果



資料來源：本研究整理

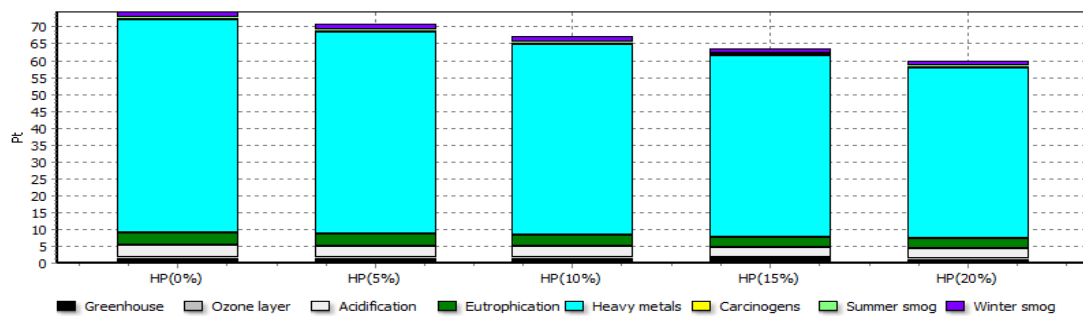
圖 4-27 熱泵系統之能源效率提升 Eco-indicator 95 常態化比較結果

圖 4-28 與圖 4-29 為熱泵系統之能源效率提升 Eco-indicator 95 評價加權和單一得點結果，若熱泵熱水系統能源效率提升 5%、10%、15%、20%，而單一得點的分數會由原本的 74.4 Pt，分別降低至 70.9 Pt、67.2 Pt、63.5 Pt、59.9 Pt；主要是因為電力消耗減少進而降低重金屬汙染對環境的影響。



資料來源：本研究整理

圖 4-28 熱泵系統之能源效率提升 Eco-indicator 95 評價加權比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-29 熱泵系統之能源效率提升 Eco-indicator 95 單一得點比較結果

熱泵系統之能源效率提升對環境衝擊之影響，可如表 4-26 所示，由表中可得知每當能源效率提升 5%，熱泵系統對環境衝擊影響約為 -5% 左右，也就是說若熱泵使用能源效率提高 5%，對環境負面衝擊減少約 5%。此外，若能提升熱泵熱水系統能源效率，對於冬季煙霧衝擊項目的改善效率最佳，其次為臭氧層破壞。

表 4-25 熱泵系統之能源效率提升 Eco-indicator 95 評價加權與單一得點結果

Impact category	Unit	提升 0%	提升 5%	提升 10%	提升 15%	提升 20%
溫室效應 (Greenhouse effect)	Pt	1.72	1.64	1.55	1.47	1.38
臭氧層破壞 (Ozone layer)	Pt	0.0411	0.039	0.037	0.0349	0.0329
酸化 (Acidification)	Pt	3.61	3.43	3.25	3.07	2.89
優養化 (Eutrophication)	Pt	3.7	3.52	3.34	3.15	2.97
重金屬污染 (Heavy metals)	Pt	62.9	59.9	56.8	53.7	50.6
致癌物 (Carcinogens)	Pt	0.661	0.632	0.602	0.573	0.544
冬季煙霧 (Winter smog)	Pt	1.69	1.6	1.52	1.44	1.35
夏季煙霧 (Summer smog)	Pt	0.108	0.103	0.0978	0.0924	0.0871
能源消耗 (Energy resources)	Pt	0	0	0	0	0
固體廢棄物 (Solid waste)	Pt	0	0	0	0	0
殺蟲劑 (Pesticides)	Pt	0	0	0	0	0
總計 (Total)	Pt	74.4	70.9	67.2	63.5	59.9

資料來源：本研究整理

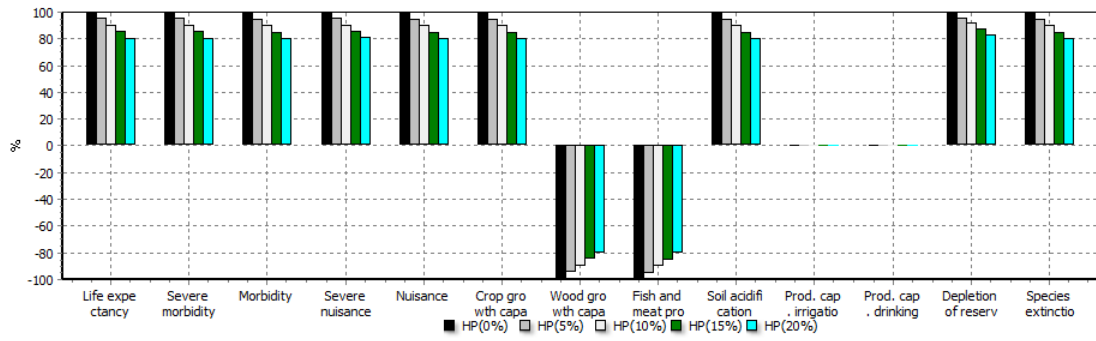
表 4-26 熱泵系統之能源效率提升對環境之影響 (Eco-indicator 95)

Impact category	提升 5%	提升 10%	提升 15%	提升 20%
溫室效應 (Greenhouse effect)	-4.65%	-9.88%	-14.53%	-19.77%
臭氧層破壞 (Ozone layer)	-5.11%	-9.98%	-15.09%	-19.95%
酸化 (Acidification)	-4.99%	-9.97%	-14.96%	-19.94%
優養化 (Eutrophication)	-4.86%	-9.73%	-14.86%	-19.73%
重金屬污染 (Heavy metals)	-4.77%	-9.70%	-14.63%	-19.55%
致癌物 (Carcinogens)	-4.75%	-9.34%	-13.92%	-17.70%
冬季煙霧 (Winter smog)	-5.33%	-10.06%	-14.79%	-20.12%
夏季煙霧 (Summer smog)	-4.63%	-9.44%	-14.44%	-19.35%
能源消耗 (Energy resources)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
固體廢棄物 (Solid waste)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
殺蟲劑 (Pesticides)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
總計 (Total)	-4.79%	-9.72%	-14.64%	-19.58%

(資料來源：本研究整理)

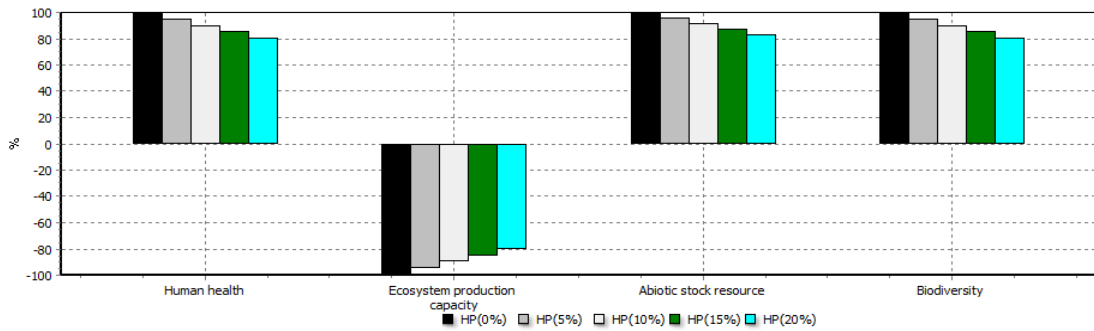
二、衝擊評估模式 EPS 2000

在 EPS 2000 衝擊評估模式中，能源效率提升，對 EPS 2000 衝擊評估項目影響約等比例下降，由評價加權及單一得點結果來看，若熱泵熱水系統能源效率提升 5%、10%、15%、20%，單一得點的分數會由原本的 5440 Pt，分別降低至 5230 Pt、4963 Pt、4720 Pt、4490 Pt。熱泵系統之能源效率提升對環境衝擊之影響，可如表 4-23 所示，由表中可得知每當能源效率提升 5%，熱泵系統對環境衝擊影響約為 -4% 左右，也就是說若熱泵使用能源效率提高 5%，對環境負面衝擊減少約 4%，對環境負面影響減少的值隨能源效率提高而遞減。此外，若能提升熱泵熱水系統能源效率，在環境方面對於人體健康、生態系統生產力以及生物多樣性等衝擊項目，都會得到正面的改善，尤其在生態系統生產力上改善最為顯著，可推論若能提升熱泵系統能源效率，進而減少電力使用量，會降低電力使用對作物生產力、木材生產力和魚/肉生產力的環境衝擊。



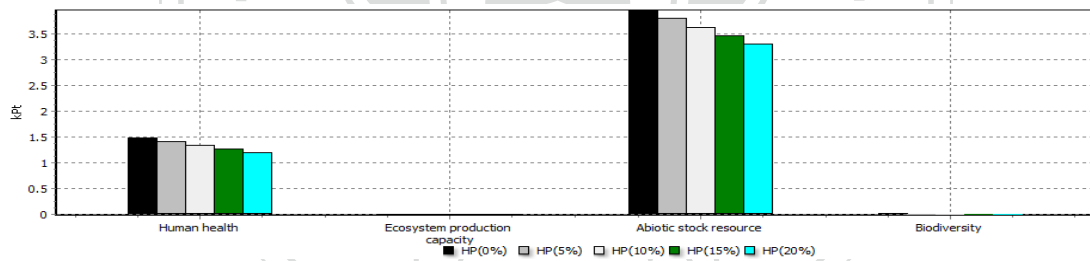
資料來源：本研究整理

圖 4-30 熱泵系統之能源效率提升 EPS 2000 特徵化比較結果



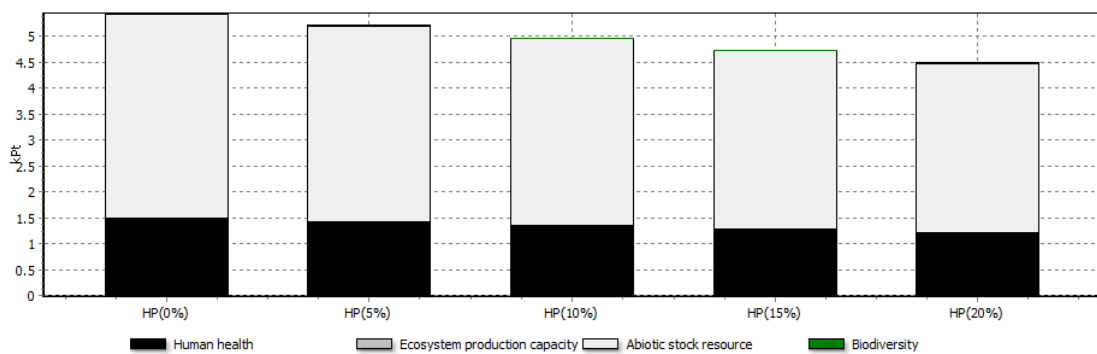
資料來源：本研究整理

圖 4-31 熱泵系統之能源效率提升 EPS 2000 損害評估比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-32 熱泵系統之能源效率提升 EPS 2000 評價加權比較結果



資料來源：本研究整理

圖 4-33 熱泵系統之能源效率提升 EPS 2000 單一得點比較結果

表 4-27 熱泵系統之能源效率提升 EPS 2000 評價加權及單一得點結果

Impact category	提升 0%	提升 5%	提升 10%	提升 15%	提升 20%
人體健康 (Human Health)	1480	1410	1330	1260	1190
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	-13.1	-12.4	-11.8	-11.1	-10.5
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	3960	3790	3630	3463	3300
生物多樣性 (Biodiversity)	13.7	13	12.3	11.6	11
總計 (Total)	5440	5230	4963	4720	4490

資料來源：本研究整理

表 4-28 熱泵系統之能源效率提升對環境的影響 (EPS 2000)

Impact category	提升 5%	提升 10%	提升 15%	提升 20%
人體健康 (Human Health)	-4.73%	-10.14%	-14.86%	-19.59%
生態系統生產力 (Ecosystem Production Capacity)	-5.34%	-9.92%	-15.27%	-19.85%
無生命資源存量 (Abiotic Stock Resource)	-4.29%	-8.33%	-12.55%	-16.67%
生物多樣性 (Biodiversity)	-5.11%	-10.22%	-15.33%	-19.71%
總計 (Total)	-3.86%	-8.77%	-13.24%	-17.46%

資料來源：本研究整理

本節敏感度分析探討在使用不同再生能源發電比例之電力以及熱泵能源效率提升下，熱泵熱水系統對環境之衝擊影響，由以上討論可得知，在運轉使用過程階段之電力投入，再生能源發電比例若達 99%，使用兩種衝擊評估模式熱泵熱水系統單一得點結果，可知在 Eco-indicator 95 評估模式下，單一得點分數由原始電力的 74.5 Pt，若改採 99% 的再生能源發電單一得點分數將下降至 14.5 Pt，減少環境衝擊比例達 80.45%，而在 EPS 2000 中，也由原始資料 5440 Pt 下降至

2880 Pt，對環境衝擊影響減少 47.06%。在 Eco-indicator 95 中的十一項環境衝擊項目裡，包括溫室效應、臭氧層破壞、酸化、優養化、冬季煙霧、夏季煙霧等，EPS 2000 裡的四大項環境衝擊，除了無生命資源存量外，其餘在人體健康、生態系統生產力以及生物多樣性上，環境負面影響都會得到明顯地改善，由此可以推論若再生能源發電比例提高，使用熱泵熱水系統會降低對環境的影衝擊程度。

另外在熱泵系統之能源效率提升對環境衝擊之影響方面，若熱泵熱水系統能源效率提升 5%、10%、15%、20%，在 Eco-indicator 95 模式下分別可以降低 4.79%、9.72%、14.64% 及 19.58% 等環境衝擊；以由 EPS 2000 衝擊評估模式來看每當能源效率提升 5%，熱泵系統對環境衝擊影響約為 -4% 左右。此外，若能提升熱泵熱水系統能源效率，在 Eco-indicator 95 十一項衝擊評估模式中，對於冬季煙霧衝擊項目的改善效率最佳，其次為臭氧層破壞；而在 EPS 2000 衝擊評估模式中，人體健康、生態系統生產力以及生物多樣性上，都會有對於環境負面衝擊得到明顯地改善。因此，由以上討論可以推論若熱泵熱水系統能源技術提升，使用熱泵熱水系統用電量因技術提升而減少，會降低對環境的影衝擊程度。

第五章 結論與建議

本研究針對台灣地區家戶住宅使用之熱泵熱水系統，從環境資源及能源效率的角度探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性。本章將彙整各章節研究討論之結果提出結論與政策研析，並對未來後續研究提出建議。

第一節 結論

根據歐盟 2009 年發布之再生能源指令，定義熱泵系統所擷取之大氣熱能（aerothermal）、水熱能（hydrothermal）以及地熱能（geothermal）為再生能源之選項，熱泵技術不受日夜與天候影響，且具有低耗能、低排碳的優點，可應用在空調、暖氣、熱水等設備，備受歐美日本等先進國家重視，也是歐美各國政府極力推廣的項目之一，但由於熱泵系統在我國尚處於發展階段，國內對於熱泵系統相關研究，較多是探討熱泵熱水系統節能效益和如何提升熱泵系統的能源效率。故本研究針對台灣地區家戶住宅所使用熱泵熱水系統，透過環境資源及能源效率的角度，來探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性。

本研究就環境面以及能源效益面來瞭解熱泵熱水系統對於我國是否具有相對優勢，故在研究方法上選擇以生命週期評估，來探討熱泵熱水系統生命週期中對環境之影響。並輔以淨能源分析法評估其直接與間接投入之和與其能源產出，來考量熱泵熱水系統之淨能源產出，以及生命週期 CO₂ 排放量，來探討熱泵熱水系統之能源效率是否具有其效益。最後以敏感度分析探討在不同的背景假設下，分別為再生能源發電比例提升，以及熱泵能源效率提升，對於對環境衝擊之影響。

選用適合家庭所使用的小型空氣源熱泵熱水機組做為主要探討對象，針對國內熱泵個案廠商進行系統盤查分析，盤查範圍為熱水系統在製程中相關之原物料投入（包含原料開採）、能源資源消費及廢棄物排放狀況，並且估算使用運轉過程中所需之能源投入，以計算熱水系統在製造過程與運轉使用過程中之環境影響。

研究使用生命週期評估軟體SimaPro 7.3 做為評估工具，選擇Eco-Indicator 95、EPS 2000兩種衝擊評估模式來衡量熱泵熱水系統對環境所造成的衝擊，以淨

能源分析方法中的能源投資報酬率與能源回收期，並估算熱泵熱水系統生命週期 CO₂排放量，檢驗熱泵熱水系統之能源投入是否是具有效益，各分析結果重要結論如下：

1. 在Eco-Indicator 95 模式十一項衝擊評估項目中，熱泵熱水系統主要之衝擊效應為重金屬污染，其次則為優養化、以及酸化；其中又以運轉使用階段導致之環境衝擊較大，因熱泵熱水系統主要使用電力，而主要原因是在發電過程中的煤礦投入所致。

2. 以EPS 2000之衝擊評估模式來看，熱泵熱水系統對環境的影響，無生命資源存量是主要衝擊效應，其次為人體健康；在運轉使用階段對環境衝擊較大，同樣因為熱泵熱水系統運轉所使用的電力消耗所致。

3. 探究電熱水系統、瓦斯熱水系統以及熱泵熱水系統之生命週期對環境的衝擊，以人體健康和生態環境的角度來看，使用瓦斯熱水系統對環境衝擊最小，其次則是熱泵熱水系統；若多考量資源存量消耗，使用熱泵熱水系統是對環境最友善的，其次則是瓦斯熱水系統；但不管在何種情形下，是用電熱水系統，對環境的衝擊影響都是最大的。

4. 以淨效益估算熱泵熱水系統之能源投資報酬率 (EROI)，所得之EROI 值為1.45~5.55，顯示在不同的入水溫度及環境溫度下熱泵熱水系統之投資報酬皆大於1，能源效率甚至為其投入之5倍以上，表示熱泵熱水系統從生命週期的角度來檢視能源投資報酬是具有效益的。

5. 以淨效益估算熱泵熱水系統之能源回收期約為0.22年至2.16年，約為2.64個月至2年又2個月左右，意即表示建造熱泵機組所投入之能源，可在熱泵運轉後約個2.64個月至2年又2個月回收，表現良好。

6. 瓦斯熱水系統生命週期 CO₂ 排放量在不同熱水系統是表現最為理想的，再者才是熱泵熱水系統以及電熱水系統。造成此種結果最主要的原因是，使用電力造成的二氧化碳排放較高，在熱水系統的運轉過程中，為了提供相同溫度的熱水量，使用電力的熱泵熱水系統與電熱水系統，對 CO₂ 排放量的貢獻也相對較高。

7. 由敏感度分析可得知，在運轉使用過程階段之電力投入，再生能源發電

比例提高，（如歐盟國家丹麥、挪威等），若改採 99% 的再生能源發電單一得點分數在 Eco-indicator 95 評估模式下，由原始電力的 74.5 Pt，將下降至 14.5 Pt，而在 EPS 2000 中，單一得點分數也由原始資料 5440 Pt 下降至 2880 Pt。由此可以推論若再生能源發電比例提高，使用熱泵熱水系統會降低對環境的衝擊程度。

8. 若提高再生能源發電比例，在 Eco-indicator 95 中的十一項環境衝擊項目中，包括溫室效應、臭氧層破壞、酸化、優養化、冬季煙霧、夏季煙霧等，對於環境衝擊都有減少。而在 EPS 2000 裡的四大項環境衝擊，除了無生命資源存量外，其餘在人體健康、生態系統生產力以及生物多樣性上，都會有環境負面影響都會得到明顯地改善。

9. 由敏感度分析可得知，若熱泵熱水系統能源效率分別提升 5%、10%、15%、20%，在 Eco-indicator 95 模式下分別可以降低 4.79%、9.72%、14.64% 及 19.58% 的環境衝擊；由 EPS 2000 衝擊評估模式來看，每當能源效率提升 5%，熱泵系統對環境衝擊影響約為 -4% 左右，亦即隨著能源效率提升對環境的負面影響減少約 4% 左右。由以上討論可以推論若熱泵熱水系統能源技術提升，使用熱泵熱水系統用電量因技術提升而減少，會降低對環境的影衝擊程度。

10. 若能提升熱泵熱水系統能源效率，在 Eco-indicator 95 十一項衝擊評估模式中，對於冬季煙霧衝擊項目的改善效率最佳，其次為臭氧層破壞；而在 EPS 2000 衝擊評估模式中，人體健康、生態系統生產力以及生物多樣性上，都會有對於環境負面衝擊得到明顯地改善。

根據本研究分析結果顯示，臺灣地區是適宜使用熱泵熱水系統的，從環境面的角度來看，使用熱泵熱水系統對環境衝擊程度遠遠較電熱水系統來得小，雖在 Eco-indicator 95 之衝擊評估模式下，以人體健康和生態環境的角度來看瓦斯熱水系統較熱泵熱水系統環境衝擊貢獻程度較小，但若多考量資源存量的 EPS 2000 衝擊評估模式下，熱泵熱水系統對環境是最為友善的熱水系統。

雖說在不同的衝擊評估模式下，臺灣對於瓦斯熱水系統與熱泵熱水系統對環境之影響有異，但瓦斯熱水系統運轉所使用的是天然氣，是屬於一種不可再生的化石能源，而熱泵系統是否屬於一種再生能源一直備受爭議，主要原因是熱泵在運轉階段的主要投入能源為電力，但同時也是汲取大自然的熱能並加以應用，大自然的熱能是否為一種再生能源逐漸引起討論。由於目前熱泵熱水系統對環境最

大的負擔來源是電力的使用，但若未來能提高再生能源發電比例，將能大大降低熱泵熱水系統對環境的負面影響，以現今再生能源發電比例來看，熱泵系統運轉尚未能完全仰賴再生能源提供電力。但若未來再生能源發電比例逐漸提高，或以熱泵系統合併家用之小型太陽能、風力發電等再生能源發電設備，都有助於熱泵系統成為更充分的再生能源利用設備。

另外，就能源效益的角度來看，臺灣屬於海島型國家，氣候終年溫暖潮濕，環境溫度及入水溫度都偏高，這樣的情況下熱泵熱水系統的能源投資報酬率較好，另外依據淨效益估算熱泵熱水系統能源回收期亦有不錯的表現，因此由淨能源分析熱泵熱水系統一套有能源效益的熱水系統。另外，熱泵熱水系統有別於燃油鍋爐或瓦斯熱水系統，不需要柴油、瓦斯或是天然氣做為燃料使用，而是使用「壓縮原理」吸收空氣中熱源，機組運轉時無燃燒現象，可避免桶裝瓦斯一氧化碳中毒與氣爆危險，這種相對外部效益是許多飯店、旅館、學校宿舍等，都將原本高溫危險之鍋爐陸續汰換成使用上較安全的熱泵設備。

由以上討論可得知，不論從環境面亦或是能源效益面的角度來看，熱泵熱水系統對於我國都是一套環境友善且具有能源效率的良好熱水系統，更何況臺灣的自然條件更是適合發展熱泵熱水系統，但因一般民眾不了解熱泵系統，再加上熱泵機組價格較高，而政府的獎勵措施幾乎都是針對使用大型熱泵系統之業者，因此熱泵熱水系統在市場的能見度並不高，若政府能對一般家庭購置熱泵熱水系統實施補助政策（如政府在 2012 年推行購買國產節能家電，每台補助 2000 元），對於我國熱泵系統之發展必定有正面助益。

熱泵熱水系統對環境最大的衝擊來源是運轉過程電力的使用，本研究也透過敏感度分析發現，若運轉過程所使用的電力再生能源發電比例提高，會有效改善環境負面的影響，因此，未來也應積極推動再生能源發電，減少化石燃料發電之比例，將可降低其電力投入總量對環境之衝擊。此外，官、產、學、研也可透過積極合作，共同開發出適合台灣地區所使用的熱泵熱水系統，或者結合冷氣空調與熱水系統，一方面產生熱能，另一方面同時製冷，具有雙重功能，可以提升熱泵熱水系統之能源轉換效率，進一步減少環境負面衝擊。

再者，政府也應積極推動國內產業產品環境管理，未來國內業者在推行新產品時，若能針對其產品進行生命週期評估，除了解產品對環境的衝擊影響並試圖改善外，還可以為企業建立良好的環保企業形象，也能針對節能減碳等環境議題

之提出建議。另外，為了避免無效率的能源產出，有關單位也應採用淨能源分析作為能源政策獎勵綠色能源投資之依據，而非以粗能源產出，方符合社會整體效益。

第二節 建議

本研究針對台灣地區家戶住宅所使用熱泵熱水系統，透過環境資源及能源效率的角度，來探討熱泵熱水系統對於台灣住宅部門的適用性，基於目前研究限制及本研究過程心得，對後續研究提出以下建議：

1. 本研究標的為家用空氣源熱泵熱水系統，除了空氣源熱泵外，也有水對水熱泵及適合地熱豐富地區的地熱型熱泵。此外，國內也有開發適合高雄屏東日照充足地區，所使用的太陽輻射源與大氣熱源的雙熱源型熱泵熱水系統，以及結合冷氣空調與熱水系統的多功能熱泵機組，這些不同熱源來源的熱泵熱水系統對環境衝擊影響，可能會受到生產組件的不同及運轉上電力消耗的多寡有所差異，因此，未來可以考慮針對不同熱源之熱泵機組，包含水對水熱泵、地熱型熱泵、太陽輻射源與大氣熱源的雙熱源型熱泵熱水系統或是結合空調與熱水系統之熱泵機組，為其生命週期對於環境之影響，做更進一步的研究與探討。

2. 本研究熱泵熱水系統生命週期盤查分析資料主要來自於個案廠商問卷訪談所提供的實際資料，若可以得到國內熱泵熱水系統各種不同生產技術廠商之生產數據，更可以精確了解各熱泵熱水系統的環境衝擊差異。故本研究建議，後續研究可針對國內不同品牌的熱泵熱水系統進行生命週期評估，以進行跨技術或跨品牌的橫向比較分析。

3. 再生能源發電是未來的趨勢，本研究也透過敏感度分析發現熱泵熱水系統在其生命週期運轉過程中所使用的電能，其發電來源之再生能源比例若能相對提高，將可有效改善對環境負面的衝擊影響。準此，未來台灣再生能源發電比例逐年提高的趨勢下，使用熱泵熱水系統將更具相對效益。換言之，熱泵熱水生命週期 15 年，每年所使用的發電結構比例的資料皆不盡相同，若能將運轉所需的電力資料逐年改變，以得到更精確的熱泵熱水系統生命週期評估。至於如何進行此一動態再生能源發電比例逐年提高的熱泵熱水系統生命週期運轉模式，是一個未來值得研究的課題。

4. 熱泵熱水系統是一套對於環境友善且具有能源效率的良好熱水系統，以臺灣的自然條件更是適合發展熱泵熱水系統，本研究也透過敏感度分析發現，熱泵能源效率技術提升，對於環境也有正面的影響，若未來政府能對於熱泵熱水系統之研發補助，對於我國熱泵系統技術發展必定有幫助，也能改善環境之衝擊。至於一般民眾對於熱泵技術提升，進而改善環境之願付價格為何，有待後續研究做進一步的調查分析。



參考文獻

- 丁執宇，1997，ISO 14040 生命週期評估架構之探討與應用，中興大學資源管理研究所碩士論文。
- 王景玟，2005，結合生命週期評估及生態效益之分析研究—以鋼鐵廠製品為例，國立成功大學環境工程學研究所碩士論文。
- 朱圃漢，2011，台灣住宅部門熱泵系統之成本效益分析，國立政治大學經濟學研究所碩士論文。
- 呂穎彬，1998，資料庫應用與比較，工業技術研究院化學工業研究所。
- 李育明，2010，再生能源發展之生命週期評估，綠能生命週期評估與產業發展效益研討會會議論文。
- 李依霓，2010，熱泵產業設計服務策略之研究，國立交通大學管理學院碩士在職專班管理科學組碩士論文。
- 李雲婷，2009，利用生命週期評估方法評估雨水貯蓄材質對環境之影響，國立臺灣海洋大學河海工程學系研究所碩士論文。
- 宋炎明，2005，熱泵系統應用於溫室內游泳池之節能分析，國立台北科技大學冷凍空調工程學系碩士論文。
- 林益豪，2007，再生能源經濟政策工具之研究，國立政治大學經濟學研究所碩士論文。
- 林育堯、翁黃燦，2009，節約能源產業產品標準、安全及性能檢測技術先期研究及導入委辦計劃。
- 江玄政等，2001，ISO 14000系列—生命週期評估技術與應用手冊，經濟部工業局。
- 黃秉鈞，2007，我國熱泵發展現況與未來趨勢，中華水電冷凍空調，第6期，88-90頁。
- 黃瓊儀，2003，人造纖維產品之生命週期評估研究，國立成功大學環境工程學研究所碩士論文。
- 曾詠恩，2005，台灣地區風力發電之潛力分析與生命週期評估，國立臺北大學公共事務學院自然資源與環境管理研究所碩士論文。
- 經濟部能源局，2010，中華民國99年能源統計手冊，經濟部能源局。

- 綠基會，2006，熱泵熱水系統Q&A 節能技術手冊，財團法人台灣綠色生產力基金會節約能源中心。
- 廖建順、韋宗楸，2009，小型空調機市場發展趨勢簡介，冷凍空調&能源科技，第57期，44-59頁。
- 廖卿惠，2010，台灣永續能源發展之潛勢分析，國立台灣大學環境工程學研究所博士論文。
- 鄭維嶽、韋宗楸，2008，北美洲熱泵市場的概況，中華水電冷凍空調，第22期，56-62頁。
- 鄭維嶽、廖建順，2008，亞洲和太平洋地區熱泵技術概況，中華冷凍空調，第24期，54-63頁。
- 鄭維嶽、林師培，2009，歐洲熱泵的現況和趨勢，中華水電冷凍空調，第26期，25-35頁
- 劉家豪，2004，IC 製造業產品生命週期分析，國立成功大學環境工程學研究所碩士論文。
- 劉書宏，2010，建築物地源熱泵系統之生命週期評估，國立臺北大學公共事務學院自然資源與環境管理研究所碩士論文。
- Angela Arpk, Neil Hutzler, 2006. Domestic Water Use in the United States, A Life-Cycle Approach. *Journal of Industrial Ecology*, Volume 10, P 169-184
- Arif Hepbasli, Yildiz Kalinci, 2009. A review of heat pump water heating systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, P.1211 - 1229
- Blum, Philipp., G. Campillo, W. Münch, T. Kölbl, 2009, "CO₂ savings of ground source heat pump systems – A regional analysis", *Renewable Energy*, 35, p122-127.
- Cutler J. Cleveland, Robert Costanza Charles A. S. Hall, Robert Kaufmann, 1984. *Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective*. Science Vol. 225 no. 4665 p. 890-897
- C. Montagud, J.M. Corberan, A. Montero, J.F. Urchueguia, 2011. Analysis of the energy performance of a ground source heat pump system after five years of operation. *Energy and Buildings*, 43, P. 3618 - 3626
- F.J. Rey, J. Martin-Gil, E. Velasco, D. Perez, F. Varela, J.M. Palomar, and M.P. Dorado, 2004. Life Cycle Assessment and External Environmental Cost Analysis of Heat Pumps. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, Volume 21.

- F.J. Rey Martinez , E. Velasco Gomez , C. Martin Garcia , J.F. Sanz Requena b, L.M. Navas Gracia ,S. Hernandez Navarro, A. Correa Guimaraes, J. Martin Gil, 2010. Life cycle assessment of a semi-indirect ceramic evaporative cooler vs. a heat pump in two climate areas of Spain. Applied Energy, 88, P. 914 – 921
- G. Tsilingiridis, G. Martinopoulos, N. Kyriakis,2004. Life cycle environmental impact of a thermosyphonic domestic solar hot water system in comparison with electrical and gas water heating. Renewable Energy, 29, P. 1277 – 1288
- Geoff Hammond, Craig Jones, 2008. Inventory of Carbon & Energy (ICE) version 1.6a, Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering, University of Bath.
- Goedkoop M. , An De Schryver, Michiel Oele, Sipke Durksz, Douwe de Roest, 2010. Introduction to LCA with SimaPro 7, PRé Consultants.
- Goedkoop M., Michiel Oele, An de Schryver, MarisaVieira , 2008. Simapro 7 Database Manual, PRé Consultants.
- Goedkoop M., 1995, The Eco-indicator 95 Final results.
- Goedkoop M. ,1996 ,The Eco-indicator 95 Manual for Designers.
- HPC, 2011. IEA Heat Pump Center website,
<http://www.heatpumpcentre.org/en/aboutheatpumps/howheatpumpsachieveenergysavings/Sidor/default.aspx>
- International Standard , 2006, ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, ISO 2006.
- International Standard , 2006, ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, ISO 2006.
- Fulvio Ardente, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura ,Valerio Lo Brano, 2004. Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances. Renewable Energy, 30, P. 109 – 130
- Robert H. Crawford, Graham J. Treloar, 2004. Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia. Solar Energy ,76 ,P. 159 – 163
- Viral P. Shah, David Col Debella, Robert J. Ries, 2008. Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States. Energy and Buildings, 40, P.503–513

附錄

熱泵熱水系統生產過程資料盤查問卷

貴公司您好：

首先感謝您撥冗填寫此份問卷，這是一份學術性問卷。本問卷目的在於探討熱泵熱水系統之生產過程中，相較於其他供熱系統對環境負面衝擊之減少程度；以下各題項主要在於了解熱泵熱水系統之製程所需要投入的原料、能源，以及廢棄物之排放。

煩請 貴公司填寫此問卷，您的協助將對本研究產生莫大助益。您所提供的資料僅供學術研究之用，絕不涉及商業用途，請您安心作答。最後，再次謝謝您的幫助！

敬祝您 鴻圖大展、事業順利

國立政治大學

指導教授：許志義博士（經濟學系兼任教授）

研究生：郭乃頊（國家發展研究所）

E-mail：98261016@nccu.edu.tw

民國 100 年 6 月 28 日

一、基本資料

公司名稱：_____

廠址：_____

填表人：_____ 職稱：_____

連絡電話：_____ 傳真：_____

E-mail：_____

熱泵熱水系統型號_____

99 年產量 _____ 個 產值 _____ 元

二、原料投入部分

1. 請問貴廠 99 年度生產此熱泵熱水系統所**主要投入原料**種類與使用狀況（以下請打☑，可複選）。

鋼鐵 _____ Kg/年

鍍鋅鋼鐵 _____ Kg/年

銅 _____ Kg/年

玻璃纖維 _____ Kg/年

其他（請註明） _____

（ ） /年

其他（請註明） _____

（ ） /年

其他（請註明） _____

（ ） /年

三、能源使用部分

1. 請問貴廠99年度熱泵熱水系統使用**能源種類**及使用狀況（以下請打☑，可複選）

煤及煤產品 _____ 公噸 煤油 _____

公秉

車用汽油 _____ 公秉 液化石油氣 _____

公秉

天然氣 _____ Km³ 燃料油 _____

公秉

柴油 _____ 公秉 液化天然氣 _____

Km³

再生能源（請註明） _____

（ ）

其他（請註明） _____
（ ）

2. 請問貴廠99年度熱泵熱水系統生產用之**電力總消費量**為_____kwh

其中由 電力公司購入 _____kwh

自行發電 _____kwh

自行發電的方式為 汽電共生 _____kwh

柴油發電 _____kwh

其他 _____kwh

四、用水及廢水處理部分

1. 請問貴廠99年度生產熱泵熱水系統**用水量**為_____噸

2. 請問貴廠99年度生產熱泵熱水系統產生**廢水**為_____噸

廢水水質狀況（以下請打，可複選）

BOD（生化需氧量） _____mg/L COD（化學需氧量） _____

mg/L

重金屬（請註明） _____（ ）

重金屬（請註明） _____（ ）

重金屬（請註明） _____（ ）

其他（請註明） _____（ ）

其他（請註明） _____（ ）

五、空氣污染物排放現況

1. 貴廠99年度生產熱泵熱水系統**空氣污染物總排放量**_____（請圈選適當單位， m^3/min 、 m^3/hr 、 m^3/day ）。

2. 貴廠99年度生產熱泵熱水系統**空氣污染物排放狀況**（以下請打可複選，並

圈選適當單位)。

- TSP (總懸浮微粒) _____ m³/ (年、季、月、日)
- THC (總碳氫化合物) _____ m³/ (年、季、月、日)
- CO (一氧化碳) _____ m³/ (年、季、月、日)
- SO_x (硫氧化物) _____ m³/ (年、季、月、日)
- NO_x (氮氧化物) _____ m³/ (年、季、月、日)
- VOC (揮發性有機物) _____ m³/ (年、季、月、日)
- 其他 _____ m³/ (年、季、月、日)

六、廢棄物處理部分

1. 請問貴公司 99 年度生產熱泵熱水系統所有無產生之事業廢棄物?

- 否 是 (請填以下表格)

廢棄物名稱	廢棄物之產生量 (Ton)	廢棄物處理方式	年處理量 (Ton)

問卷到此結束，非常感謝您的協助！