

128 工業污染防治

溫室氣體

鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

..... 林素貞、鍾欣妤、李尚展、李炳崑、洪瑞均、呂鴻彬 1

廢棄物及資源化

都市下水污泥轉換能源技術之回顧與評析

..... 江康鈺、陳雅馨、葛家賢、呂承翰 31

廢清洗液無害化處理技術

..... 吳俊毅、吳重霖、段宇君、陳智成 65

還原渣做為水泥生料燒製環保水泥之研究

..... 林凱隆、羅康維 91

本期專題：節能技術與能源管理系統

政府推動能源管理系統輔導介紹

..... 潘建成、簡津浩、林冠嘉 115

ISO 50001 系列標準最新制定狀況及 EnMS 認證多邊承認協議

之發展 葉薇芬 139

ISO 50001 之最佳化能源管理資訊化系統介紹

..... 林冠嘉、吳哲仁、彭郁潔、曹永誠 153

發展節能技術與能源管理系統以提升能源查核制度之成效

..... 林文祥、王仁忠 169

隔熱塗料於建築節能應用之案例分析

..... 張裕成、張靜怡 185

翻轉屋頂之屋頂綠化創新工法

..... 王獻堂、黃世銘 197

溫室氣體

鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟 之關聯效應分析

林素貞*、鍾欣妤**、李尚展**、李炳崑**、洪瑞均**、呂鴻彬**

摘 要

鋼鐵業屬於技術、資本與能源密集的產業，亦是國內重要的 CO₂ 排放源。本研究以投入產出分析鋼鐵業產業關聯及對能源消費與 CO₂ 排放之乘數效應，並分析鋼鐵業能源密集度與 CO₂ 密集度之變動趨勢，其次，應用因素分解法分析影響鋼鐵業 CO₂ 排放量的重要因素。研究結果顯示，鋼鐵業的總關聯度排序皆位於產業前四名，故鋼鐵業為國內的關鍵性產業。乘數分析結果可看出，能源乘數有持續增加的趨勢，亦顯示鋼鐵業不止是能源密集度高，且為影響度相當重要的產業，故其帶動相關上游產業之增產所投入的能源需求頗大，若鋼鐵業的規模未來持續擴充，則將引發相關產業的 CO₂ 排放量大幅增加的乘數效應，不容忽視。另外，因素分析結果顯示，經濟成長為影響鋼鐵業 CO₂ 排放量的增量因素，而能源密集度為唯一的減量因素，顯示鋼鐵業在能源密集度已有部份改善。整體而言，鋼鐵業的燃料配比需要朝向低碳化，除了持續改善能源密集度及產品結構外，亦需加強鋼鐵業上下游產業鏈之節能與燃料結構，使其直接與間接之節能與減碳效益能夠一併提升。此外，相關單位亦需加強能源技術與管理輔導，並推動節能減碳誘因與機制，鼓勵鋼鐵業積極投資低碳、淨煤及再生能源之應用，以加速 CO₂ 減量成效。

【關鍵字】經濟與能源環境之關聯分析、CO₂ 排放、因素分解、投入產出分析

*成功大學環境工程系 教授

**成功大學環境工程學系研究所 碩士及研究生

一、前言及研究目的

近 20 年來氣候變遷與永續發展相關議題廣受國際所關注，雖京都議定書已於 2005 年正式生效，簽約國原設定於 2008~2012 年間達到將溫室氣體排放量降至 1990 年水準再減 5.2% 的目標，然大多數國家並無法如期達成。其中，經歷 2009 年在 COP15 達成「哥本哈根協議」，2010 年 COP16 會議達成「坎昆協議」皆未具約束力。2011 年南非德班 COP17 會議中，諸多氣候基金承諾充滿變數與困難。2012 年於杜哈舉行 COP18 會議，達成協議延長「京都議定書」效力至 2020 年。目前中國 CO₂ 排放量已位居世界第一，而印度及其他新興國家排放量亦快速增加，全球 CO₂ 排放量比 1990 年已多出 50% 以上。在 2013 年華沙 COP19 主要協議事項包括：各國同意於 2015 年 12 月前，提出 CO₂ 減量目標，以達成國際新氣候協議；達成「華沙國際機制」，期未來加強提供專業技術及金援協助開發中國家因應極端氣候造成的嚴重損害。

依據國際能源總署 IEA/OECD(2013)能源使用二氧化碳(CO₂)排放量統計資料顯示，台灣在 2011 年能源使用 CO₂ 排放總量為 264.66 百萬公噸，占全球排放總量的 0.84 %，全球排名第 23 位；每人平均排放量為 11.31 公噸，遠高於日本、韓國及 OECD 平均值，排名占全球第 21 位。雖然，我國並非 UNFCCC 的會員國，亦未簽訂京都議定書，但身為地球村之一員，依據 UNFCCC 公約精神，我國宜承擔共同但差異之責任，並以成本有效的途徑來調適近年來快速的氣候變遷現象。由於鋼鐵業屬於技術、資本與能源密集產業，其產業關聯度高，與汽車、營建、航空、造船、機械、電機、國防等關係相當密切，有工業之母之稱，數十年來我國經濟成長及產業發展對鋼鐵的需求量亦持續穩定成長。根據台灣能源平衡表資料顯示，鋼鐵業在根據台灣能源平衡表資料顯示，鋼鐵業在 1995 至 2012 年間的能源消費由 248 萬 $\times 10^7$ Kcal，增加為 395 萬 $\times 10^7$ Kcal，年均成長率為 3.30%，而全國總能源消費由 3,694 萬 $\times 10^7$ Kcal，增加至 5,088 萬 $\times 10^7$ Kcal，年均成長率約 2.10%，顯示鋼鐵業能源需求成長率高於全國能源消費之成長率。本研究室資料亦顯示鋼鐵業在 1995 至 2012 年間的 CO₂ 排放量由 13.50 百萬公噸碳當量(MMTCE)，增為 24.12 MMTCE，年均成長率為 4.37%，而全國總 CO₂ 排放量則由 151.08 MMTCE，增為 247.18

MMTCE，年均成長率約 3.53%；鋼鐵業 CO₂ 排放佔全國總排放量的比例已成長到 2012 年之 9.76%。以上資料顯示鋼鐵業為我國主要的 CO₂ 排放。

綜合上述，由於鋼鐵業是我國重要的工業，也是主要的 CO₂ 排放源，故探討鋼鐵業之產業能源與環境關聯效應及如何因應後京都議定書為重要的課題。本研究的重點包括，以投入產出分析鋼鐵業產業關聯及探討對能源消費與 CO₂ 排放之乘數效應，分析鋼鐵業能源密集度與 CO₂ 密集度之變動趨勢。其次，應用因素分解法分析影響鋼鐵業 CO₂ 排放及 TSP、SO_x 及 NO_x 排放量的重要因素。研究成果期能提供我國相關部門與業界作為規劃鋼鐵業邁向低碳及因應後京都議定書國際情勢發展之策略參考。

二、研究方法

1. 投入產出分析

投入產出分析又稱產業關聯分析，為經濟計量分析方法的一種。Leontief and Ford^[9]首次以投入產出分析產業污染排放之研究，他以美國 1963 年的經濟結構資料及污染係數，推估各產業的單位污染排放量，探討產業最終需求變動對污染排放之影響。林素貞、呂信賢^[27]利用投入產出法的乘數分析及群落分析法為架構，以我國石油消費結構為例，分析我國產業結構中油品耗用與環境污染的相關性。Hawdon and Pearson^[7]以投入產出模式，分析各部門間能源、環境及經濟的相互關係，並探討因政策因素、最終需求及進口稅等外在條件變動對整體產業結構產生的影響。林素貞、張翊峰^[28]運用投入產出模式分析台灣地區 1991 年產業能源消費結構與污染物排放間的關聯性，並探討產業發展對能源及環境品質產生的衝擊影響。Nishimura 等^[17]則是將日本 405 部門的投入產出資料與製程物流相結合，估算不同原料每單位個別產品所產生的直接與間接 CO₂ 排放係數。Wier^[21]亦採用投入產出法，分析丹麥的能源消費結構與 CO₂、SO₂、NO_x 3 種污染物間的相關因素。Easterling^[6]以乘數分析，探討產業規模縮減對區域性氣候變化趨勢的衝擊影響。林素貞、李正豐^[31]利用投入產出與乘數分析，分析歷年來台灣石化產業的

4 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

關聯效果對能源耗用及 CO₂ 排放量的乘數效應，研判石化業的產業經濟與能源效益及 CO₂ 排放特性。Moffatt and Hanley^[15]基於永續發展的前提，分別利用動態系統與投入產出模式探討污染排放與資源使用的趨勢，以及經濟政策與結構改變對污染排放的影響。Llop^[13]利用投入產出分析探討 1995-2000 年西班牙的污染物乘數變動趨勢，結果顯示污染物乘數變動可分為排放密集度改變及經濟結構改變所造成的影響，若排放密集度降低或經濟活動減少，均可降低污染物乘數。Madlener and Koller^[16]以投入產出分析探討奧地利 Vorarlberg 地區增加生質能系統的使用對經濟及 CO₂ 減量的影響，結果顯示生質能系統的投資及操作對總體經濟及 CO₂ 減量有顯著影響。Dhubháin 等^[5]以投入產出分析及乘數效應研究愛爾蘭林業及木材製品業之直接與間接的市場價值。Wiedmann^[20]以複合投入產出分析法計算英國風力發電部門的間接溫室氣體排放量。結果顯示，IO-LCA 對於建立具體技術製程到環境經濟的架構模式為一個實際且有效的方法，有助於獲得經濟層面的溫室氣體排放量之估計。Lin 等^[12]以投入產出方法分析台灣電力部門之產業關聯效果與對能源耗用及 CO₂ 排放之乘數效應，研究結果顯示電力部門為國內最主要的 CO₂ 排放源，且人纖業、煤製品、水泥業及陸上交通為相關產業中之高 CO₂ 密集度之產業。

投入產出分析的基本架構可分為 5 個部分，分別為技術交易矩陣(X_{ij})、最終需求矩陣(F_i)、原始投入矩陣(O_j)、總需求矩陣(T_i)與總投入(X_j)或總產出(X_i)矩陣。原始投入可顯示各產業對國內生產毛額或國民所得的相對貢獻，以及國內生產毛額的來源與分配；中間投入可呈現各產業部門在生產技術上的比例關係；最終需求則表現出民間與政府部門在整體經濟結構上消費、投資與輸出之關係。假設 X_j 為 x_{ij} 之線性函數，定義投入係數(input coefficient)為 $a_{ij}=x_{ij}/X_j$ ，又稱作技術係數(technological coefficient)，代表 j 產業每單位產值，所需直接向 i 產業購買的投入金額。故依均衡理論，投入產出表的橫列關係可以下式表示之(林素貞 等^[27])

$$[W_i] + [F_i] = [P_i] + [X_i] = [T_i] \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} + F_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i = P_i + X_i \quad (2)$$

$$X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + F_i - P_i \quad (3)$$

將式 3 以矩陣表示，可得

$$X = AX + (F - P) \quad (4)$$

$$X = (I - A)^{-1} (F - P) = B(F - P) \quad (5)$$

式中 X 為 $n \times 1$ 的總產出向量， A 為 $n \times n$ 的技術矩陣， F 為 $n \times 1$ 的最終需求向量(含進口品)， P 為 $n \times 1$ 的輸入向量， I 為 $n \times n$ 的單位矩陣， $B = [b_{ij}]$ 為 $n \times n$ 之 $(I - A)^{-1}$ 矩陣， b_{ij} 為矩陣中元素。 $(I - A)^{-1}$ 為李昂提夫逆矩陣(Leontief inverse matrix)，或產業關聯矩陣，矩陣中 b_{ij} 表示生產第 j 產業一單位最終需求，對 i 產業的總需求影響，包含直接與間接需求所引起之波及效應，故每一係數 b_{ij} 均大於相對應之直接投入係數 a_{ij} 。

2. 關聯效果分析

根據李昂提夫(Leontief)的理論，在一經濟體系內，物品生產並非單純的階段性關係，而是各種生產因素相互依存的結果，因此投入產出表又可稱為產業關聯表。一般而言，關聯效果有「向前關聯效果」(forward linkage effect)及「向後關聯效果」(backward linkage effect)兩種，前者是指由於某產業的增產，使得其他產業利用此產業的產品作為原料投入，因而產生支持這些產業發展的效應；後者則是指由於某產業的增產，需要更多其他產業的原料投入，遂產生帶動其他產業發展的效應。簡述如下：

(1) 向前關聯效果

表示當所有產業之最終需求變動一單位時，某一產業對所有產業供給的總變動量(包括直接及間接效果)或稱某一產業受感應的程度，其定義如下所示：

$$FL_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (6)$$

式(1)中 FL_i 表示 i 產業之向前關聯效果， b_{ij} 為李昂提夫逆矩陣中之元素；而 FL_i 值越大者，表示該產業對支持其他產業發展的貢獻越大。

(2) 向後關聯效果

表示當對某產業之最終需求變動一單位時，各產業所必需配合增(減)產的總量(包括直接及間接效果)或稱某產業對所有產業的影響程度，其定義如下所示：

6 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

$$BL_j = \sum_{i=1}^n b_{ij} \quad (7)$$

式(2)中 BL_j 表示 j 產業之向後關聯效果， b_{ij} 為李昂提夫逆矩陣中之元素；而 BL_j 值越大者，表示該產業對帶動其他產業發展的貢獻越大。

3. 乘數分析

Miller and Blair^[14]利用投入產出理論，引進能源及環境污染乘數觀念，分析經濟發展與能源使用的相關性及經濟與環境污染間關係。一般所謂「乘數效果」有產出乘數、所得乘數與就業乘數 3 種，亦可將其應用在能源、生態資源、水資源等之乘數效果分析。本研究目的之一即是將能源及環境的考量引入的投入產出分析架構中，以逆矩陣 $(I-D)^{-1}$ 為基礎，探討鋼鐵業之「能源乘數」及「CO₂ 乘數」效果。以下就能源及污染乘數效果的定義及算法簡述如下。

(1) 能源乘數

$$EM_i = E_i(I-D)^{-1} \quad (8)$$

其中， E_i ：1×n 階之 i 能源直接係數向量，向量內各元素單位為 10⁷ 千卡/新台幣百萬元。 EM_i ：1×n 階之 i 能源乘數向量，向量內各元素單位為 10⁷ 千卡/新台幣百萬元。

$(I-D)^{-1}$ ：以國產品交易表為基礎所得之李昂提夫逆矩陣。上述 E_i 向量內各元素代表各產業之“能源直接係數”，是以各產業每年 i 能源最終消費量分別除以各產業當年國內生產總值而得，定義為某產業單位產出所需 i 能源最終消費量； EM_i 向量係以 E_i 乘上 $(I-D)^{-1}$ 所得，向量內之各元素代表各產業之“能源乘數”，定義為某產業產品最終需求變動一單位時，所導致 i 能源最終消費之總變動量，意即包括直接與間接的波及效果，與能源直接係數僅包含直接效果有所差異。

(2) 污染乘數

$$PM_j = P_j(I-D)^{-1} \quad (9)$$

本研究探討的污染物種包括 CO₂、SO₂、NO_x 及 TSP 等 4 種；其中， P_j 為 1×n 階之 j 污染物直接係數向量，向量內各元素單位為公噸/新台幣百萬元。 P_j 向量內各元素代表各產業之“污染直接係數”，是以各產業每年 j 污染物產生量分別除以各產業當年國內生產總值而得，定義為某產業單位產出的 j 污染物產

生量。 PM_j 為 $1 \times n$ 階之 j 污染物乘數向量，向量內各元素單位為公噸/新台幣百萬元。 PM_j 向量係以 P_j 乘上 $(I-D)^{-1}$ 所得，其內之各元素代表各產業 j 污染物之“污染乘數”，定義為某產業產品最終需求變動一單位時，所導致 j 污染物產生之總變動量，包括直接與間接的波及效果，與污染直接係數近包含直接效果有所差異。

3. 因素分解法

本研究採用因素分解法(Decomposition Method)中殘差項較小之迪氏指標法(Divisia Index)，探討影響鋼鐵業 CO_2 及 TSP、 SO_2 、 NO_x 排放量變動的主要關鍵因素。因素分解法的原理為數學恆等式，透過運算將欲探討的變數分解為數個相關因素的乘積。經因素分解計算後，各因素絕對值愈大則表示對探討變數影響愈大；若為正值，則為增量效應；若為負值，則為減量效應。因素分解法相關的研究包括，Lin and Chang^[10]利用迪氏指標法探討我國在 1980 至 1992 年間，主要部門的 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 排放變動特性，選取的因素有污染係數、燃料配比、能源密集度、經濟成長和產業結構；結果顯示經濟成長是影響排放量增加最主要的因素。Kim and Worrell^[8]利用物理指標因素分解法探討開發中國家(巴西、中國、印度)、新興工業國家(墨西哥、南韓)及已開發國家(美國)鋼鐵業之 CO_2 排放變動趨勢，結果顯示除了已開發國家之外，其他國家之鋼鐵業歷年 CO_2 排放量皆呈現上升趨勢，而大部分國家之鋼鐵業 CO_2 排放主要增量因素皆是由經濟成長帶動產量提升，主要減量因素則是能源密集度的改善。Choi and Ang^[3]分析韓國 1961 至 1997 年影響能源 CO_2 密集度變動之關鍵因素，採用迪氏指標法探討因素因包括能源密集度及排放係數。研究結果顯示，能源密集度對 CO_2 密集度的影響是大於排放係數。Bhattacharyya^[2]利用因素分解迪氏指標法，探討泰國 1981 至 2000 年間，影響工業能源消費的相關因素，選取的因素有能源密集度及結構配比。結果顯示，1981-1986 年間，能源密集度及結構配比兩因素皆為減量效應；1986-1996、1996-1998、1998-2000 年，能源密集度為減量因素，而結構配比則為增量因素，但整體累積變動為減量之結果。Wang 等^[19]探討中國在 1957 至 2000 年和能源相關之 CO_2 排放的變化，主要是利用迪氏指標法進行分析；其研究結果發現，造成中國 CO_2 排放減量，主要是歸因於能源密集度的改善，而燃料結構轉變和再生能

8 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

源的使用也會造成 CO₂ 排放的減量。Lin 等^[11]利用迪氏指標法，探討在台灣影響工業部門 CO₂ 排放變化關鍵因素，包括排放係數、能源密集度、產業結構和經濟成長四項。結果顯示，經濟成長和高的能源密集度是導致台灣工業部門 CO₂ 排放快速增加的主要原因。Ang and Liu^[1]應用因素分解法，探討影響美國製造業、貨運業、客運業能源消費關鍵因素，比較拉式指標法、費雪理想指標法、AMDI、LMDI I、LMDI II 5 種分析方法，結果指出拉式指標法相較於其他方法殘差值較大。林佑蓉、林素貞^[33]應用因素分解迪氏指標法，分析造成台灣、日本、韓國、英國、德國、荷蘭六國 CO₂ 排放變動之主要因素；研究結果指出，影響各國 CO₂ 增量的因素有人均 GDP 及人口數，在 CO₂ 排放係數上，我國與日本是呈現增量，其餘各國皆為減量因素，在能源密集度方面，除我國外，在其他 5 國為減量因素。林素貞、劉家豪等^[34]以因素分解法探討影響 IC 業 PFCs 及 CO₂ 排放之關鍵因素，結果顯示 IC 業所產生的 CO₂ 及 PFCs 排放量皆增加，主要增量因素為結構配比，而能源密集度為主要的減量因素，顯示該產業在技術改善及能源效益上有改善的效果。Chang 等^[4]使用投入產出因素分解法評估 1989-2004 年台灣地區的 CO₂ 排放變動趨勢。結果顯示 1999-2004 年因電力消費快速上升，導致 CO₂ 排放有顯著增量趨勢。主要增量因素是產品最終需求及出口量增加，而 CO₂ 排放增量多來自公路運輸業、鋼鐵業、石化業等能源密集度較高之產業，故調整燃料配比朝向低碳化，改善能源密集度是擬定 CO₂ 排放減量策略之重點。Timilsina and Shrestha^[18]研究數個亞洲國家在 1980-2005 年間各國運輸部門 CO₂ 排放的影響因素。研究顯示主要影響 CO₂ 排放的因素為：每人 GDP、人口成長及能源強度改變。Zha 等^[22]應用迪氏對數平均因素分解研究 1991 年至 2004 年間，影響中國城市農村住宅部門與 CO₂ 排放量相關的能源消耗變化的因素。結果顯示，顯著減量因子為能源密集度，而增量因素為收入的影響。Zhang 等^[23]應用因素分解辨別中國交通部門能源消耗的衝擊因素；結果顯示，交通活動的影響是最主要提高能源消耗的因素，而減量因素為能源密集度。

本研究所採用的迪氏指標法，以變動基期的方式計算，變動產生的交叉效果分配至各組成因素中，而迪氏指標法的殘差較其他指標法為小^[10]。探討鋼鐵業 CO₂ 排放量變動的關鍵因素影響能源消費 CO₂ 排放的關鍵因素，本研究所選取的

相關因素包括：鋼鐵業 CO₂ 排放係數、鋼鐵業能源密集度、產值配比及 GDP 等四項因素。各因素的定義如下：

- (1) 鋼鐵業 CO₂ 排放係數：每單位能源消費所造成之二氧化碳排放量，單位公噸/10⁷ 千卡，作為鋼鐵業 CO₂ 排放強度指標；
- (2) 鋼鐵業能源密集度：每單位鋼鐵業產值之能源消費量，單位 10⁷ 千卡/新台幣百萬元；
- (3) 產值配比：鋼鐵業產值佔當年國內生產毛額之配比，單位為新台幣百萬元/新台幣百萬元；
- (4) 國內生產毛額(GDP)：當年度國內生產毛額，單位為新台幣百萬元；

根據上述說明，鋼鐵業 CO₂ 排放總量可用下列公式表示：

$$Q_t = \frac{Q_t}{EC_t} \times \frac{EC_t}{G_t} \times \frac{G_t}{P_t} \times P_t \quad (10)$$

將(10)式簡化可得如下(11)式所示：

$$Q_t = U_t \times I_t \times S_t \times P_t \quad (11)$$

其中，式中各符號所代表之意義如下：

Q_t ：t 年全國鋼鐵業 CO₂ 排放量，單位公噸；

$U_t = \frac{Q_t}{EC_t}$ ：t 年鋼鐵業 CO₂ 排放係數，單位為公噸/10⁷ 千卡；

$I_t = \frac{EC_t}{G_t}$ ：t 年鋼鐵業能源密集度，單位 10⁷ 千卡/新台幣百萬元；

$S_t = \frac{G_t}{P_t}$ ：t 年鋼鐵業產值配比；

P_t ：t 年國內生產毛額(GDP)。

進一步將式(11)對時間微分後可得如下(12)式：

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{dU_t}{U_t} \times \frac{Q_t}{dt} + \frac{dI_t}{I_t} \times \frac{Q_t}{dt} + \frac{dS_t}{S_t} \times \frac{Q_t}{dt} + \frac{dP_t}{P_t} \times \frac{Q_t}{dt} \quad (12)$$

在將(12)式積分後可得鋼鐵業 CO₂ 排放變動量值，如(13)式所示：

10 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

$$\Delta Q_t = \int_0^t d \ln(U_t) \times Q_t + \int_0^t d \ln(I_t) \times Q_t + \int_0^t d \ln(S_t) \times Q_t + \int_0^t d \ln(P_t) \times Q_t \quad (13)$$

上述式(13)為連續性的函數，實際應用時採用間斷性的時間資料加以計算，其方程式如(14)式：

$$\Delta Q_t = \ln\left(\frac{U_t}{U_0}\right) \times \left(\frac{Q_t + Q_0}{2}\right) + \ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) \times \left(\frac{Q_t + Q_0}{2}\right) + \ln\left(\frac{S_t}{S_0}\right) \times \left(\frac{Q_t + Q_0}{2}\right) + \ln\left(\frac{P_t}{P_0}\right) \times \left(\frac{Q_t + Q_0}{2}\right) \\ + RD = DU + DI + DS + DP + DR \quad (14)$$

其中，上述(14) 式”0”代表基期年，為使殘差達最小，在本研究採用變動基期，以 1995 至 2010 年，各年為基期年。(14)式符號代表之意義如下：*DU* 為鋼鐵業 CO₂ 排放係數之迪氏指標；*DI* 為鋼鐵業能源密集度之迪氏指標；*DS* 為鋼鐵業產值配比之迪氏指標；*DG* 為國內生產毛額之迪氏指標；*RD* 為殘差項。

三、資料來源與處理

1.燃料資料

本研究的台灣鋼鐵業燃料耗用資料主要來自經濟部能源局所編印 1995-2010 年「台灣能源平衡表」中「熱值單位」的資料，將其整理合併並分為「煤及其產品」、「原油及其產品」、「天然氣」三類。

2.CO₂ 排放資料

本研究係依據能源平衡表(2012)，以 IPCC 法(2006)推估鋼鐵業 1995-2010 的 CO₂ 排放量，可以下式表示：

$$\text{CO}_2\text{排放量} = \sum \left\{ \left[\frac{(\text{能源使用量}_k \times \text{碳排放係數}_k) \times (1 - \text{碳固定量}_k)}{\times \text{碳氧化率}_k \times 44/12} \right] \right\}$$

其中，*k* 表示燃料種類，包括自產煤、進口燃料煤、燃料油、天然氣等燃料。

3.經濟資料

經濟方面的資料來源採用行政院主計處所公告之數據，由於主計處最新之 I-O 表，僅止於 2006 年(民國 95 年)，部份行業名稱與定義有所修訂，鋼鐵相關

產業在產業名稱與產值統計亦經過整理，經濟資料的變更追溯至 1995 年，選取 1995 至 2010 年的數據。由於本研究為探討歷年的變化，因此所蒐集之產值再根據主計處公佈之產業平減指數，以民國 95 年為固定基期進行平減，避免經濟波動造成研究上的誤差。

四、結果與討論

本年度的工作重點為利用投入產出方法探討鋼鐵業產業經濟與能源消費及污染物排放之相關性，包括產業關聯效果及能源消費對 CO₂ 排放之乘數效應；其次，應用因素分解法分析影響鋼鐵業 CO₂、TSP、SO_x、NO_x 等排放量變動的重要因素，結果分述如下。

1. 鋼鐵業產業關聯分析

本研究以感應度影響度及總關聯度，分析鋼鐵業的產業相關性。表 1 顯示，鋼鐵業在 2001、2004 與 2006 年之感應度分別為 1.92、2.72 和 1.81，排序以 2004 年最高，在 42 全體產業中排名第 4，顯示鋼鐵業對於支持下游產業發展的貢獻程度顯著。鋼鐵業的影響度分別為 1.34、1.40 和 1.19，排序以 2004 年最高。在 42 全體產業中排名第 3，這 3 年的影響度亦皆大於整體產業平均水準以上，顯示鋼鐵業對於帶動上游產業發展的貢獻程度顯著。另外，總產業關聯度為感應度與影響度之和，可表示一種產業在整體產業經濟中的地位，其值越高，則其在整體產業中之經濟關聯性越重要。如表 1 所示，鋼鐵業的總關聯度分別為 3.26、4.12 及 3.00，在這 3 年之排序皆位於全體產業前 4 名，顯示鋼鐵業實為國內主要的關鍵性產業，對於整體經濟發展與相關產業鏈之經濟有相當重要的影響。由向前關聯效果分析結果(表 2)，可看出鋼鐵業對於下游產業類別的影響，顯示所支持的重要產業包括：金屬製造業、機械製造、運輸工具製造業、營造業、水泥業、3C 產品製造業、橡膠製品及其他工業製品業等，多屬製造業範疇。在向後關聯分析結果(表 3)，顯示鋼鐵業所帶動之相關產業類別包括：批發零售業、其他服務業、金融保險業、煤製品業、電力、油氣煉製業、機械業、及非鐵金屬業等，多屬二

12 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

三級產業，帶動之相關產業分布廣泛。

表 1 鋼鐵業歷年之產業關聯效果

	2001 年	2004 年	2006 年
感應度	1.92	2.72	1.81
(排名)*	6	4	5
影響度	1.34	1.40	1.19
(排名)*	4	3	8
總關聯	3.26	4.12	3.00
(排名)*	3	2	4

*:排名係指鋼鐵業在本研究 42 個產業排序之相對位置

資料來源:2001、2004 與 2006 年國產品價格交易表(行政院主計處，2012)；本研究整理

表 2 鋼鐵業歷年向前關聯性較高之主要產業部門

排序	2001 年	2004 年	2006 年
1	金屬製品業	金屬製品業	金屬製品業
2	機械業	機械業	機械業
3	非鐵金屬業	非鐵金屬業	營造業
4	運輸工具製造業	營造業	非鐵金屬業
5	營造業	運輸工具製造業	運輸工具製造業
6	其他工業製品業	其他工業製品業	水泥業
7	水泥業	水泥業	其他工業製品業
8	3C 產品製造業	3C 產品製造業	橡膠製品
9	橡膠製品	橡膠製品	其它運輸
10	礦石業	礦石業	3C 產品製造業

資料： 行政院主計處(2001、2004、2010)；本研究整理。

表 3 鋼鐵業歷年向後關聯性較高之主要產業部門

排序	2001 年	2004 年	2006 年
1	其他服務業	其他服務業	批發及零售業
2	金融保險業	批發及零售業	其他服務業
3	批發及零售業	金融保險業	電力供應業
4	礦石業	煤油氣礦業	非鐵金屬業
5	煤油氣礦業	非鐵金屬業	煤製品業
6	電力供應業	礦石業	礦石業
7	油氣煉製業	電力供應業	油氣煉製業
8	非鐵金屬業	油氣煉製業	金融保險業
9	煤製品業	機械業	機械業
10	機械業	煤製品業	金屬製品業

資料：行政院主計處(2001、2004、2010)；本研究整理。

2. 鋼鐵業能源密集度變動趨勢及彈性係數

本研究顯示我國於 1995 至 2010 年間，鋼鐵業能源密集度最高者為 2001 年，其值為 4.64×10^7 Kcal/新臺幣百萬元，最低者則為 2009 年，為 3.23×10^7 Kcal/新臺幣百萬元。成長率在大部份年度為負值，僅於 1997、1998、2001 與 2006 年間為正值，其中又以 1997 的 19.96% 成長率最大，係因中鋼廠區擴建完工進行運轉，但是產值成長幅度不及能源消費，導致能源密集度表現較差；2001 年受到全球鋼鐵市場經濟不景氣，造成產值下滑與能源密集度上揚；而 2006 年全球鋼鐵市場受中國低價鋼材衝擊，我國鋼鐵業在產量成長、產值衰退的情況下亦導致能源密集度上升。分析結果亦顯示歷年表現最佳者為 2005 年，能源消費量與產值的成長率分別為 -6.12% 與 3.31%，彈性係數約 -1.85，即產值增加 1% 時，能源消費成長下降 1.85%；表現較差者為 2006 年，能源消費量與產值的成長率分別為 11.24% 與 -4.96%，彈性係數值約為 -2.27，即產值減少 1%，而能源消費量成長上升 2.27%。整體而言，於 1999 至 2004 年間的彈性係數值較為穩定，且皆小於 1；2007 至 2009 年間，鋼鐵業的能源消費成長率為負值，在產值成長率方面變動幅度縮小，顯示近年來鋼鐵業在節能方面有所改善。圖 1 為我國鋼鐵業歷年能源消費成長率與產值成長率之分布狀況。

14 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

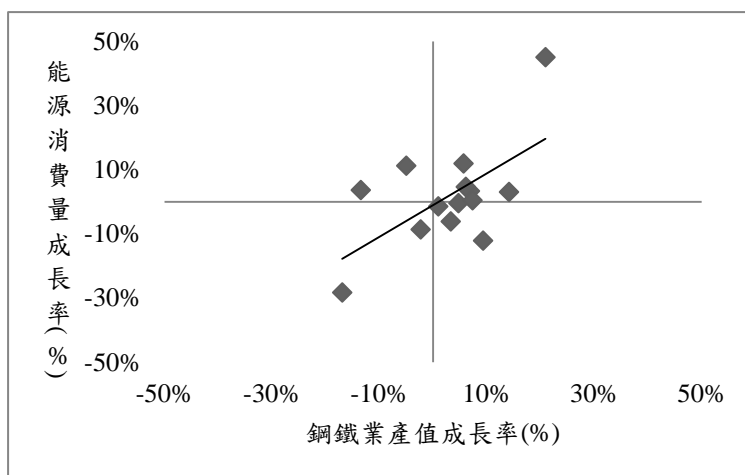


圖 1 鋼鐵業歷年能源消費量對產值之彈性係數分佈

3. 鋼鐵業 CO₂ 密集度變動趨勢及彈性係數

我國於 1995 至 2010 年間，鋼鐵業的 CO₂ 密集度分析結果顯示，在研究期間鋼鐵業能源消費之 CO₂ 密集度最高者為 2001 年，其值約為 25.92 ton/新臺幣百萬元，最低者為 1996 年的 18.79 ton/新臺幣百萬元。CO₂ 密集度的成長率在大部份年度為負值，於 1997、1998、2000、2001、2006 與 2007 年則為正值，其中以 1997 年的成長率最大(20.17%)，主要原因為中鋼擴建；而 2001 年的成長率居次(18.42%)，該年則是受到國際鋼鐵市場萎縮，產值下滑致使 CO₂ 密集度提高。圖 2 顯示，鋼鐵業歷年來的 CO₂ 排放成長率與產值成長率之間的彈性係數及其分佈情形。從分析結果發現，以 2005 年的表現最佳，CO₂ 排放減低 5.11%，產值上升 3.31%，彈性係數值約-1.54；換言之，產值增加 1%，CO₂ 排放量卻降低 1.54%。表現最差者在 2006 年，CO₂ 排放增長 10.25%，產值則衰落 4.96%，彈性係數值為-2.07，即產值減少 1%，而 CO₂ 排放量卻上升 2.07%。另外，2007 年 CO₂ 排放量對產值的彈性係數為正值，但是能源消費對產值之彈性係數則為負值；造成兩者不一致的原因是煤品、油品與天然氣消費量相對於 2006 年皆下降，但是電力消費量提高，造成能源消費量為負成長，而 CO₂ 排放量因電力 CO₂ 排放係數遠高於煤、油與天然氣，故 CO₂ 排放量對產值的彈性係數為正值的現象。整體而言，1999 至 2004 年間的彈性係數值相對穩定，大多為小於 1 的情況，除了 1999 和 2001 年係

數為負值，其餘年度的 CO₂ 排放成長率與產值成長率皆為正值，且產值成長率大多高於 CO₂ 排放成長率，故彈性係數相對較低。

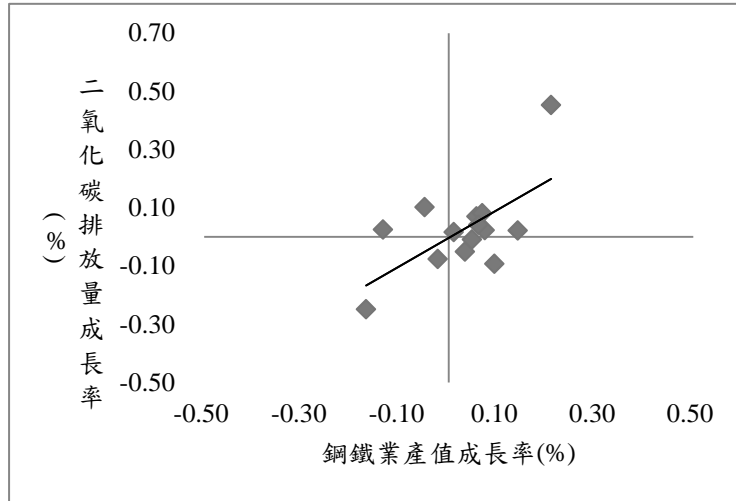


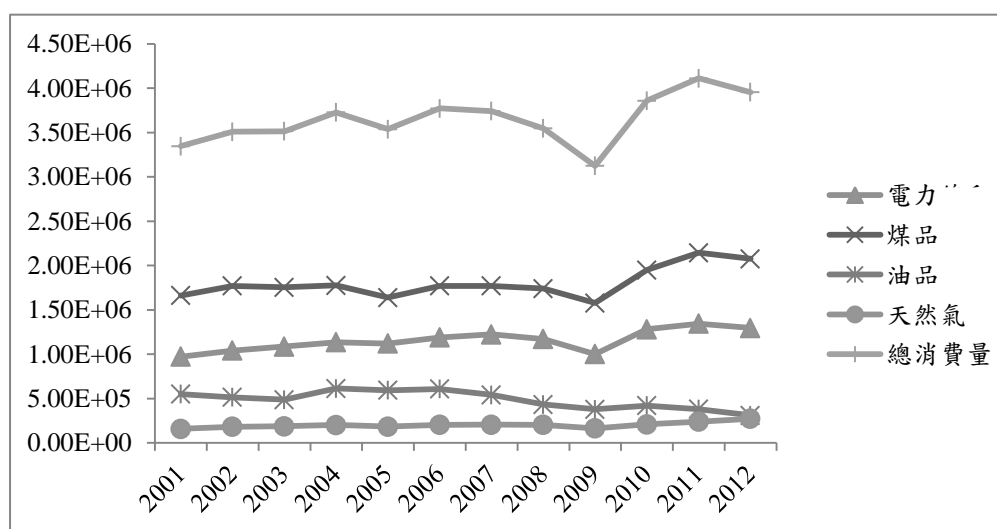
圖 2 鋼鐵業歷年 CO₂ 排放對產值之彈性係數分佈

4. 乘數分析探討鋼鐵業能源消費及 CO₂ 排放之直接與間接效應

鋼鐵業自 2001 至 2012 年間使用燃料之變動趨勢，如圖 3 所示，可看出總能源消費量主要受到煤及電力之牽動，三者變動趨勢雷同，在 2009 有顯著下降現象，主要是受到國際金融風暴之影響，隨後持續上升。另外，油品消費則是呈現下降趨勢，天然氣有緩慢成長之勢。以 2012 年為例，鋼鐵業的總能源消費量為 3.95×10^6 Kcal，其中煤品約占 52.5%，油品 7.9%，天然氣 6.9%，其消費量約佔全國當年總體能源消費量之 7.5%。表 4 為能源消費量、直接能源係數及總能源乘數分析之結果。能源乘數為產業最終需求增加一單位(以台幣 100 萬元計)，該產業直接及間接所需投入之能源(單位為 10^7 Kcal)。一般而言，此值可代表該產業的能源使用需求及效益，影響能源乘數的因子包括：(1)能源直接係數：指產業本身單位產值的能源需求量，(2)能源間接係數：指目標產業 j 由於向後關聯所誘發的相關產業發展所需的間接能源投入量。由表 4，可看出雖然能源消費量在 2001 至 2006 年呈現增加的現象，但直接能源消費係數在 2001 年至 2004 年則是從 3.93

16 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

$\times 10^7$ kcal/新台幣百萬元下降到 3.48×10^7 kcal/新台幣百萬元，而在 2006 年又增加至 4.11×10^7 kcal/新台幣百萬元；主因可能為鋼鐵業的產值在 2001 較 2004 年為低，故其能源直接係數在 2001 年較 2004 年為高，而在 2006 因受到中國鋼材低價傾銷，全球鋼鐵價格下跌影響，導致鋼鐵產值下降而能源係數上升之情況。由表 4 可知，鋼鐵業的能源消費量在此三年排名佔 42 個產業之前三名，顯示其為高耗能之產業。另外，直接能源乘數排名列在第 11 至 12 位，而總能源乘數位居第 13 至 16 位。



資料來源:2001 至 2012 年能源平衡表，行政院經濟部能源局

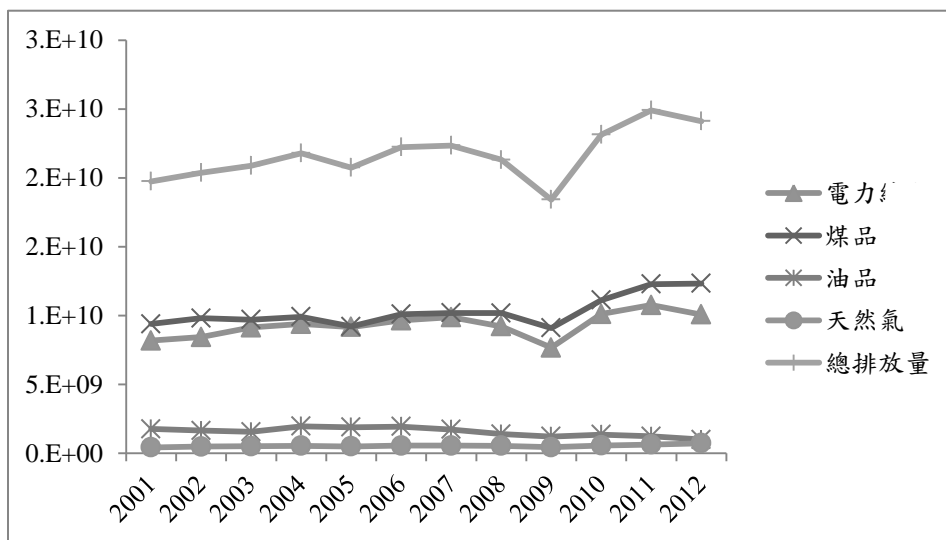
圖 3 鋼鐵業歷年燃料消費趨勢

表 4 鋼鐵業能源消費及能源乘數分析

年分	能源消費量 (10^7 kcal)	排名*	直接能源係數 (10^7 kcal/新台幣百萬元)	排名*	總能源乘數 (10^7 kcal/新台幣百萬元)	排名*
2001	4,287,271	3	3.93	12	6.99	16
2004	4,637,727	3	3.48	11	6.47	15
2006	4,842,860	3	4.11	11	7.75	13

*：排名係指鋼鐵業在全體 42 個產業之排序

鋼鐵業能源消費主要受煤及電力用量影響，研究結果顯示煤及電力分別占總能源消費的 52% 和 24%。能源乘數增加的趨勢顯示鋼鐵業不止是個能源密集度極高的產業，且為國內影響度非常重要之產業，故其帶動相關上游產業之增產所需投入的能源量頗大。因此，未來除了需要持續加強其能源效率及改善產品結構外，並需要一併提升鋼鐵業上游產業之節能措施與產業鏈結構，使其直接與間接之節能效益能夠大幅提升。在 CO₂ 乘數部分，鋼鐵業自 2001 至 2012 年間所造成 CO₂ 排放變動之趨勢如圖 4 所示，可看出 CO₂ 排放量亦受到煤及電力消費量之牽動，於 2009 有顯著下降現象，主因為受到全球金融風暴影響，故 CO₂ 排放趨勢與能源消費變動類似。



資料來源：2001 至 2012 年能源平衡表，行政院經濟部能源局；本研究整理

圖 4 鋼鐵業歷年 CO₂ 排放趨勢

表 5 顯示 CO₂ 乘數分析結果，其趨勢和能源消費乘數有類似的現象，在 2001 年至 2004 年呈現下降，而 2006 年又有增加之勢，理由與能源乘數分析結果類似。鋼鐵業的 CO₂ 排放量受到煤和電力消費量影響，故亦造成大量之 CO₂ 排放；其 CO₂ 排放量在 2001、2004 及 2006 年顯示排名高居第 3，是國內主要的 CO₂ 排放

18 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

源之一。數年來，在 CO₂ 直接排放係數與總 CO₂ 乘數之變化，與能源直接排放係數及能源乘數有類似之變化。

表 5 鋼鐵業 CO₂ 排放量及 CO₂ 乘數分析結果

年分	CO ₂ 排放量 (t CO ₂)	排名*	直接 CO ₂ 乘數 (t CO ₂ /新台幣百萬元)	排名*	總 CO ₂ 乘數 (t CO ₂ /新台幣百萬元)	排名*
2001	23,926,721	2	21.92	11	38.21	9
2004	26,063,133	3	19.57	12	35.33	11
2006	27,266,762	3	23.12	11	43.20	8

*：排名係指鋼鐵業在全體 42 個產業排序之相對位置

表 6 分析結果顯示，國內鋼鐵業的間接能源消費和 CO₂ 排放，約占乘數效應之 45% 左右，且可看出各年鋼鐵業每單位產值的間接能源消費量及 CO₂ 排放量比重亦有些許增加的趨勢。以 2006 年為例，鋼鐵業引發的間接能源需求與直接能源需求各占 47% 及 53%，顯示國內鋼鐵業的規模未來若持續擴充，亦將引發相關產業的能源需求與 CO₂ 排放量大幅增加的乘數效應，不容忽視。

表 6 鋼鐵業歷年之直接及間接能源與 CO₂ 乘數比例

	2001 年		2004 年		2006 年	
鋼鐵業	直接 效果	間接 效果	直接 效果	間接 效果	直接 效果	間接 效果
CO ₂ 乘數	57%	43%	55%	45%	54%	46%
能源乘數	56%	44%	54%	46%	53%	47%

5. 鋼鐵業 CO₂ 排放與其他污染物之因素分解

本研究係以應用迪氏指標法 (Divisia index) 分析 1996 年至 2010 年間我國基本鋼鐵工業之 CO₂、TSP、SO_x、NO_x 等污染物之變動因素，選取因素包括污染係數、能源密集度、產業結構配比及經濟成長等 4 項組成因素，藉以探討鋼鐵業在產業發展過程中影響其排放量變動之關鍵因素。

6.1 CO₂ 排放變動因素分析

我國歷年鋼鐵業 CO₂ 排放變動因素分析結果如圖 5 與表 7 所示，以 2009-2010 年變動量最大，增量達 5,629.28 千公噸，當年的產業結構配比因素為造成增量的主因；而減量則以 2008-2009 年的變動最多(3,423.07 千公噸)。就單一因子而言，排放係數在三個階段 1996-2000，2000-2005 及 2005-2010 年間皆呈現增量現象，總增量達 2,083.21 千公噸。能源密集度除了在 1996-1998 年間呈現少許增量外，其餘時段皆為減量，總減量達 10,276.75 千公噸。產業結構配比在三個時段平均皆有增量，總增量達 5,736.65 千公噸。經濟成長因子除了在 2000-2001 及 2008-2009 年間有少許減量外，其他時段皆為主要的增量因素，總增量達 13,812.13 千公噸。四項因子所構成的總變動量，於 1996-2010 年間為 11,404.15 千公噸；排放係數、產業結構配比及經濟成長為增量因素，其中經濟成長為最主要的增量因素，能源密集度為唯一的減量因素，顯示我國鋼鐵業在能源密集度上有所改善，而排放係數的增量效應亦有逐漸減小的趨勢，原因為能源消費結構的調整與燃煤品質的改善所致。

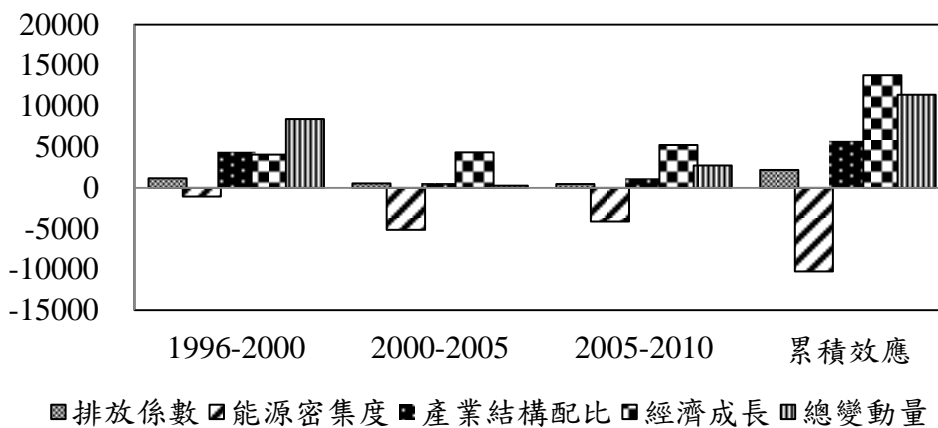


圖 5

我國鋼鐵業歷年 CO₂ 排放變動量因素分解

6.2 TSP 排放變動因素分析

我國歷年鋼鐵業 TSP 排放變動因素分析結果如圖 6 與表 7 所示，1996-1997 年的變動量最大，增量達 5.78 千公噸，而以 2000-2001 年減量最多(0.94 千公噸)。整

20 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

體而言，歷年鋼鐵業的 TSP 排放量共增加 7.40 千公噸，其中，影響 TSP 排放變動的最主要的增量因子為經濟成長，整體增量效應達 7.40 千公噸，其次為排放係數與產業結構配比，累積增量分別為 2.70 及 3.00 千公噸，而能源密集度則是導致 TSP 排放減量的因子，累積減量效應達 5.49 千公噸。就單一因子而言，排放係數在三個階段 1996-2005 年間皆呈現增量現象，2005-2010 年間則為減量現象，總增量達 2.70 千公噸。主要增量發生在 1996-1997 為 3.86 千公噸，主要減量則發生在 2009-2010 為 2.85 千公噸。能源密集度除了在 1996-1998 年間呈現少許增量外，其餘時段皆為減量，總減量達 5.49 千公噸。產業結構配比在三個時段平均皆有增量，總增量達 3.00 千公噸。經濟成長因子除了在 2000-2001 及 2008-2009 年間有少許減量外，其他時段皆為主要增量因素；整體而言，總增量為 7.40 千公噸。四項因子所構成的總變動量，於 1996-2010 年間為 7.40 千公噸。以 1996-2000 年間增量達 6.43 千公噸，以 1996-1997 為主要增量最多(5.78 千公噸)。排放係數、產業結構配比及經濟成長皆為增量因素，其中經濟成長為最主要的增量因素，其次為產業結構配比，再者為排放係數，而能源密集度為唯一的減量因素。能源密集度在三階段中各有 0.51、2.70 及 2.11 千公噸的減量效應，顯示 TSP 在污染排放控制與能源使用效率在研究期間上有所進步，然而在排放係數方面仍須有所改善。

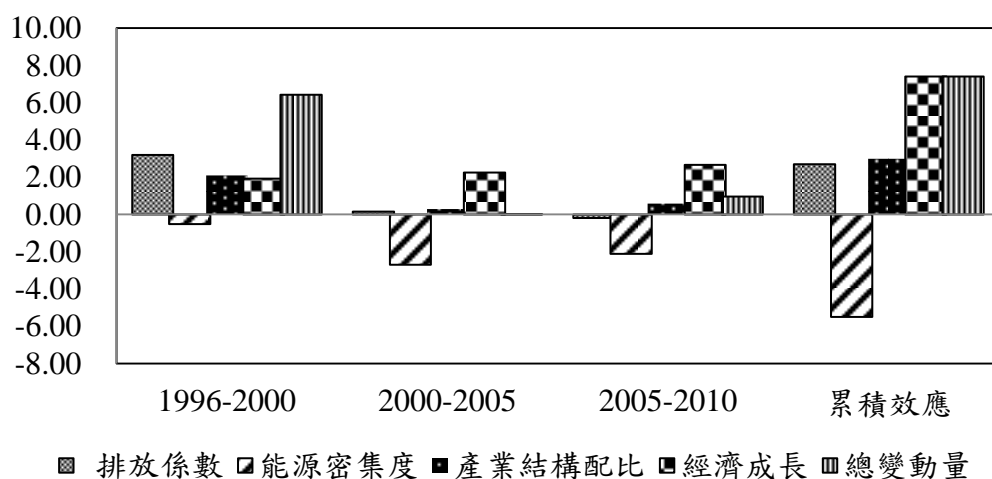


圖 6 我國鋼鐵業歷年 TSP 排放變動結果因素分解

表 7 歷年鋼鐵業 CO₂、TSP 排放變動結果因素分解

西元(年)	CO ₂					RD	TSP					
	排放係數	能源 密集度	產業結構 配比	經濟成長	總變動量		排放係數	能源 密集度	產業結構 配比	經濟成長	總變動量	RD
1996-1997	687.50	91.94	3167.42	981.56	4899.21	-0.60%	3.86	0.05	1.59	0.49	5.78	-3.48%
1997-1998	-14.80	609.96	250.41	737.08	1581.94	-0.04%	0.16	0.36	0.15	0.43	1.09	-0.06%
1998-1999	-506.63	-1567.12	370.32	1289.86	-413.56	0.00%	0.02	-0.93	0.22	0.77	0.08	0.00%
1999-2000	1008.65	-382.64	437.24	1306.73	2367.93	-0.09%	-1.28	-0.21	0.25	0.73	-0.52	-0.01%
2000-2001	564.25	-246.81	-959.58	-397.03	-1039.00	-0.02%	-0.12	-0.13	-0.49	-0.20	-0.94	-0.05%
2001-2002	-413.26	-3581.06	3491.62	1216.13	713.37	-0.01%	0.14	-1.84	1.79	0.62	0.72	-0.03%
2002-2003	542.19	-781.91	-64.50	877.05	572.81	0.00%	0.03	-0.40	-0.03	0.45	0.05	0.00%
2003-2004	-474.94	-282.04	250.68	1510.84	1004.41	-0.01%	0.02	-0.15	0.13	0.78	0.78	-0.03%
2004-2005	300.66	-165.54	-2300.46	1157.07	-1008.13	-0.01%	0.08	-0.09	-1.19	0.60	-0.60	-0.02%
2005-2006	-29.54	-737.48	1018.91	1345.85	1597.22	-0.03%	-0.05	-0.38	0.53	0.70	0.79	-0.03%
2006-2007	356.67	-972.16	-768.29	1527.50	143.73	0.00%	0.02	-0.50	-0.39	0.78	-0.09	0.00%
2007-2008	139.57	-505.53	-1055.61	189.36	-1231.98	-0.02%	0.87	-0.27	-0.55	0.10	0.15	0.00%
2008-2009	-449.41	-943.05	-1607.74	-428.98	-3423.07	-0.18%	1.80	-0.55	-0.94	-0.25	0.07	0.00%
2009-2010	472.28	-813.34	3506.24	2499.10	5639.28	-0.44%	-2.85	-0.45	1.96	1.40	0.05	0.00%
1996-2000	1156.79	-1085.54	4421.17	4069.28	8435.52	-1.50%	3.19	-0.51	2.09	1.92	6.43	-4.07%
2000-2005	528.00	-5179.41	560.95	4333.92	243.46	0.00%	0.15	-2.70	0.29	2.26	0.01	0.00%
2005-2010	464.91	-4132.73	1147.48	5248.02	2725.17	-0.09%	-0.19	-2.11	0.58	2.67	0.96	-0.04%
1996-2010	2183.21	-10276.75	5736.65	13812.13	11404.15	-1.46%	2.70	-5.49	3.00	7.40	7.40	-3.72%

22 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

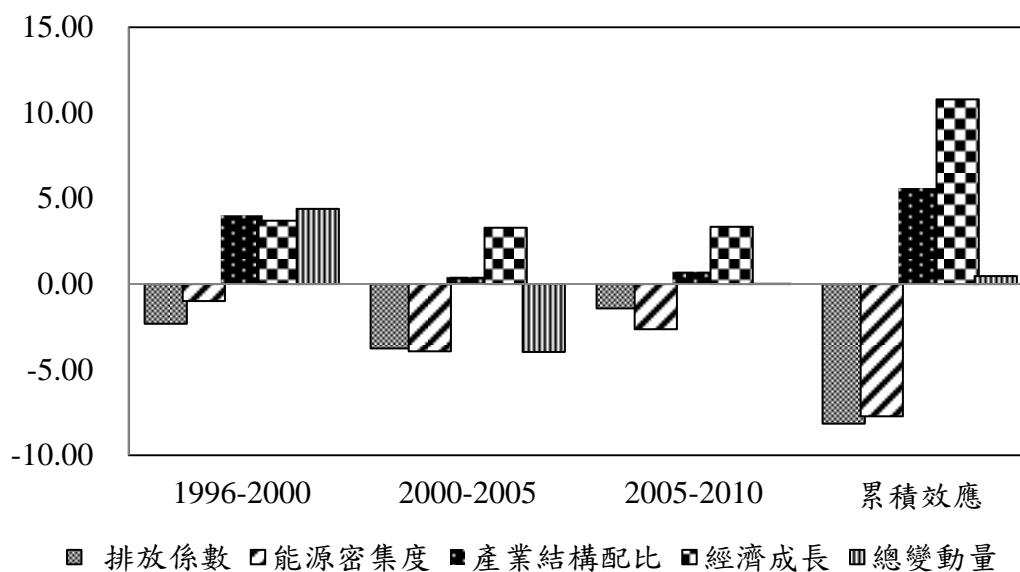


圖 7 鋼鐵業歷年 SO_x 排放變動結果因素分解

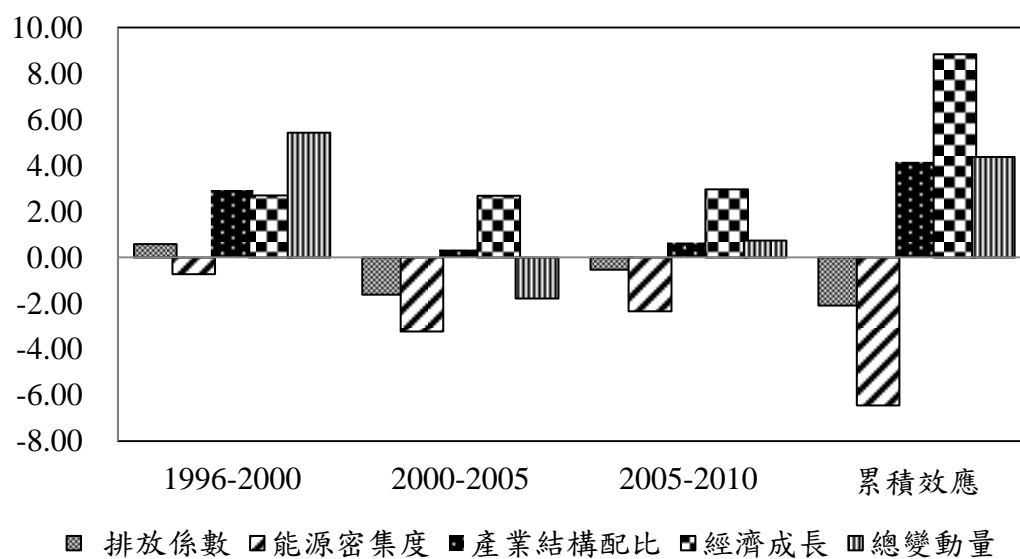


圖 8 鋼鐵業歷年 NO_x 排放變動結果因素分解

表 8 歷年鋼鐵業的 SO_x、NO_x 排放變動量因素分解

西元(年)	SO _x					NO _x						
	排放係數	能源密 集度	產業結構 配比	經濟成長	總變動量	RD	排放係數	能源 密 集度	產業結構 配 比	經濟成長	總變動量	RD
1996-1997	1.64	0.10	3.30	1.02	6.01	-0.83%	2.76	0.07	2.34	0.73	5.81	-1.56%
1997-1998	-1.16	0.63	0.26	0.76	0.49	0.00%	-0.44	0.48	0.20	0.58	0.81	-0.02%
1998-1999	-0.79	-1.57	0.37	1.29	-0.70	-0.01%	-0.35	-1.21	0.29	1.00	-0.28	0.00%
1999-2000	-2.65	-0.35	0.40	1.20	-1.40	-0.04%	-1.88	-0.27	0.31	0.93	-0.91	-0.03%
2000-2001	-0.58	-0.20	-0.79	-0.33	-1.90	-0.08%	-0.33	-0.16	-0.62	-0.26	-1.36	-0.06%
2001-2002	-0.84	-2.82	2.75	0.96	0.05	0.00%	-0.30	-2.26	2.20	0.77	0.41	-0.01%
2002-2003	-0.76	-0.59	-0.05	0.66	-0.74	-0.01%	-0.33	-0.48	-0.04	0.54	-0.31	0.00%
2003-2004	-0.94	-0.20	0.18	1.08	0.13	0.00%	-0.42	-0.17	0.15	0.91	0.47	-0.01%
2004-2005	-0.59	-0.11	-1.59	0.80	-1.50	-0.06%	-0.22	-0.10	-1.36	0.68	-1.00	-0.04%
2005-2006	-0.93	-0.48	0.67	0.88	0.13	0.00%	-0.45	-0.42	0.58	0.77	0.48	-0.01%
2006-2007	-0.76	-0.60	-0.48	0.95	-0.89	-0.03%	-0.33	-0.54	-0.43	0.85	-0.45	-0.01%
2007-2008	1.18	-0.31	-0.66	0.12	0.33	0.00%	1.07	-0.28	-0.59	0.11	0.30	0.00%
2008-2009	2.31	-0.66	-1.12	-0.30	0.24	0.00%	2.09	-0.59	-1.01	-0.27	0.21	0.00%
2009-2010	-3.28	-0.55	2.36	1.68	0.22	0.00%	-2.97	-0.50	2.14	1.53	0.20	0.00%
1996-2000	-2.32	-0.99	4.02	3.70	4.40	-0.48%	0.58	-0.72	2.94	2.70	5.43	-1.40%
2000-2005	-3.75	-3.93	0.43	3.29	-3.96	-0.38%	-1.61	-3.22	0.35	2.69	-1.79	-0.12%
2005-2010	-1.42	-2.64	0.73	3.36	0.03	0.00%	-0.54	-2.34	0.65	2.97	0.74	-0.02%
1996-2010	-8.15	-7.73	5.62	10.79	0.47	-1.07%	-2.10	-6.45	4.16	8.85	4.38	-1.75%

6.4 NO_x 排放變動因素分析

我國歷年鋼鐵業 NO_x 排放變動因素分析結果如圖 8 與表 8 所示，歷年殘差項介於 -1.56%~0%，顯示研究結果可信度高。NO_x 在 1996-1997 年變動量最大，增加 5.81 千公噸；而在 2000-2001 年減量達 1.36 千公噸。整體而言，歷年鋼鐵業的 NO_x 排放共增加 4.38 千公噸，其中，經濟成長是促使 NO_x 排放增加的關鍵因素，增量效應達 8.85 千公噸，其次為產業結構配比，增量為 4.16 千公噸；而能源密集度為導致 NO_x 排放減量的主要因子，減量達 6.45 千公噸。另外，排放係數的減量效應有 2.10 千公噸。就單一因子而言，排放係數在 2000-2010 年間呈現減量現象，1996-2000 年間則為少許增量現象。能源密集度在三個階段皆為減量現象，總減量為 6.45 千公噸。產業結構配比在三個時段皆為增量，總增量達 4.16 千公噸，其中 1996-1997 及 2009-2010 為增量較多的時段。經濟成長因子除了 2000-2001 及 2008-2009 間呈現少許減量，其餘各時段皆為增量，總增量為 8.85 千公噸。整體而言，由於經濟成長的增量效應被排放係數與能源密集度的減量所抵銷，故所造成的總增量僅有 4.38 千公噸。

五、結論與建議

本研究以投入產出分析鋼鐵業之產業關聯效果及探討對能源消費與 CO₂ 排放之乘數效應。其次，應用因素分解法分析影響鋼鐵業 CO₂ 排放及 TSP、SO_x 及 NO_x 排放量的重要因素。結果與建議摘要如下：

1. 鋼鐵業的總關聯度在 2001、2004 及 2006 之排序皆位於全體產業前 4 名，顯示鋼鐵業實為國內主要的關鍵性產業。向前關聯效果分析結果，可看出鋼鐵業對於下游產業的影響，包括金屬製造業、機械製造、運輸工具製造業、營造業、水泥業、3C 產品製造業、橡膠製品及其他工業製品業等，多屬製造業範疇。在向後關聯分析的結果，顯示鋼鐵業所帶動之相關產業包括批發零售業、其他服務業、金融保險業、煤製品業、電力、油氣煉製業、機械業及非鐵金屬業等，帶動之相關產業分布廣泛，顯示其影響力之重要。
2. 能源密集度分析顯示，鋼鐵業能源密集度以 1997 年成長率最大，係因中鋼廠區擴建完

工運轉，但產值成長幅度不及能源消費，導致能源密集度表現較差；能源密集度最高者發生在 2001 年，主因為當年全球鋼鐵市場經濟不景氣，造成產值下滑與能源密集度上揚；而 2006 年全球鋼鐵市場受到中國鋼材低價傾銷的衝擊，我國鋼鐵業產值亦受到影響，導致能源密集度再度上升。整體而言，於 1999 至 2004 年間的彈性係數值較為穩定，在 2007 至 2009 年間鋼鐵業的能源消費成長率為負值，顯示近年來鋼鐵業在節能方面有部分成效。

3. 鋼鐵業 CO₂ 密集度的分析結果顯示，以 1997 年的成長率最大，主要原因亦為中鋼擴建之故；2001 年則受到國際鋼鐵市場萎縮，產值下滑，致使 CO₂ 密集度升高；而 2006 年全球鋼鐵市場受到中國低價鋼材衝擊，我國鋼鐵業產值亦受到影響，故導致 CO₂ 密集度再度上升。另外，2007 年 CO₂ 排放量對產值的彈性係數為正值，但是能源消費對產值之彈性係數則為負值；造成兩者不一致的原因為雖然煤品、油品與天然氣消費量下降，但電力消費量增加，而電力 CO₂ 排放係數高於煤、油與天然氣故造成 2007 年 CO₂ 排放量對產值的彈性係數為正值的現象，值得注意。以上分析顯示，鋼鐵業需要調整燃料配比朝向低碳化，而持續改善能源密集度亦是 CO₂ 減量策略之重點。
4. 能源乘數為產業最終需求增加一單位，該產業直接及間接所需投入的能源，影響能源乘數的關鍵因素包括：(1) 能源直接係數：產業本身單位產值的能源使用量，(2) 乘數間接效果，為向後關聯誘發相關產業的間接能源投入量。鋼鐵業能源消費量在 2001 至 2006 年皆呈現增加的現象，但直接能源消費乘數在 2001 年至 2004 年下降，直到 2006 年呈現上升的情形，主因可能為鋼鐵業的產值在 2001 相對為低，故其能源直接係數遠較 2004 年為高，而在 2006 則是受到中國低價鋼材衝擊影響，導致產值下降能源係數上升之情況。此外，能源乘數增加的趨勢亦顯示鋼鐵業不止是能源密集度極高的產業，且為國內影響度相當重要之產業，故其帶動相關上游產業之增產所需投入的能源頗大。因此，未來除了需要持續加強其能源效率及產品結構外，需要一併改善鋼鐵業上游產業鏈之節能與燃料結構，使其直接與間接之節能效益能夠大幅提升。
5. CO₂ 乘數分析結果，顯示其變化趨勢和能源消費乘數有類似的現象，在 2001 年至 2004 年呈現下降，而 2006 年又有增加之勢，理由與能源乘數分析類似。由於鋼鐵業的 CO₂ 排放主要由煤和電力所影響，其 CO₂ 排放量在 2001、2004 及 2006 年顯示排名高居全國第三，顯示鋼鐵業為國內主要的 CO₂ 排放源之一。總 CO₂ 乘數之變化與其能源乘數變化

26 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

亦有類似趨勢，分析結果顯示，國內鋼鐵業的間接能源消費和 CO₂ 排放，約占乘數效應之 45% 左右，且可看出各年鋼鐵業每單位產值的間接能源消費及 CO₂ 排放比重皆有增加的趨勢。以 2006 年為例，鋼鐵業引發的間接能源需求與直接能源需求各占 47% 及 53%，顯示國內鋼鐵業的規模未來若持續擴充，亦將引發相關產業的能源需求與 CO₂ 排放量大幅增加的乘數效應，不容忽視。

6. 本研究以迪氏指標法分析 1996 年至 2010 年間我國基本鋼鐵工業之 CO₂、TSP、SO_x、NO_x 等污染物之變動因素，選取因素包括污染係數、能源密集度、產業結構配比及經濟成長等 4 項組成因素，藉以探討鋼鐵業在產業發展過程中影響其排放量變動之關鍵因素。鋼鐵業 CO₂ 排放總變動量，於 1996-2010 年間為 11,404.15 千公噸。其中排放係數、產業結構配比及經濟成長為增量因素，而經濟成長為最主要的增量因素；另外，能源密集度為唯一的減量因素，顯示我國鋼鐵業在能源密集度在那時段有所改善，而排放係數的增量效應亦有減小的趨勢。
7. 在 TSP 的排放量方面，影響 TSP 排放的最主要的增量因子為經濟成長，增量效應達 7.40 千公噸，其次為排放係數與產業結構配比，增量各為 2.70 及 3.00 千公噸，而能源密集度則是唯一的減量因素，減量效應達 5.49 千公噸；但歷年來鋼鐵業的 TSP 總排放量增加 7.40 千公噸，顯示 TSP 在污染控制仍然須要加強。
8. 在鋼鐵業 SO_x 排放變動因素分析結果顯示，1996-1997 年的變動量增量最大，達到 6.01 千公噸；而 2000-2001 年間為減量最多的時段，達 1.90 千公噸。4 項因子所構成的總變動量為 0.47 千公噸，除了 2000-2005 年間為減量現象外，於 1996-2000、2005-2010 年間呈現增量現象。由於經濟成長與產業結構的增量效果幾乎為排放係數與能源密集度的減量效應所抵銷，故總變動量僅為 0.47 千公噸。綜言之，排放係數及能源密集度為減量因素，顯示鋼鐵業在 SO_x 方面的污染控制已有所改善，而產業結構配比及經濟成長仍為增量因素，且以經濟成長為主要增量因素。
9. 在 NO_x 排放變動因素分析上，NO_x 排放共增加 4.38 千公噸，其中經濟成長為鋼鐵業 NO_x 排放增加的關鍵因素，增量效應達 8.85 千公噸，其次為產業結構配比，增量為 4.16 千公噸；而能源密集度則為 NO_x 排放減量的主因，減量達 6.45 千公噸；另外，排放係數的減量效應有 2.10 千公噸。整體而言，由於經濟成長的增量效應被排放係數與能源密集度的減量所抵銷，故所造成的總增量有 4.38 千公噸，顯示對 NO_x 減量控制仍有努力空

間。

- 10.由於鋼鐵業耗電量頗大，而我國發電結構以火力為主，電力的 CO₂ 排放係數高於煤、油與天然氣，此為造成鋼鐵業 CO₂ 排放量持續增加的主因之一，故需要改善鋼鐵業的燃料結構，增加低碳與再生能源比例，而鋼鐵業上下游產業鏈之燃料結構亦需進一步改善，如此可一併降低 CO₂ 排放量及引發之乘數效應。另外，由鋼鐵業的產業關聯顯示，鋼鐵對煤品的依賴度極高，因此國內鋼鐵業宜考量投資淨煤與碳捕捉及封存技術，以提升其能源效率與 CO₂ 減量之效。
- 11.由於鋼鐵業高耗能與高 CO₂ 排放之特性，相關單位宜加強能源技術輔導及 CO₂ 排放查核。目前國內雖已建立溫室氣體登錄平台，但仍屬自願性質，欠缺法令牽制之效，故相關單位應推動業者積極參與自願減量計畫，加予適當之誘因與機制，鼓勵業者引進低碳技術及再生能源應用，加速 CO₂ 減量。業者亦需積極投資能源改善及相關措施，包括設備汰舊換新、改善節能製程、加強回收多項廢熱源、汽電共生利用、加強能源需求管理及教育訓練等，以加速節能與 CO₂ 減量之效。

展望未來，世界鋼品的需求生態由於生活水準提升，教育及環保意識普及，鋼鐵市場將傾向於高附加價值、高品質、無公害、低污染、省能源的綠色產品，故加強國內鋼鐵產業之優質化，提昇產品品質、能源效率與環境親和力，是提升產業生存與競爭力之關鍵。另外，政府及業者皆需加強掌握國際資訊，建立區域性鋼鐵供需及相關產業鏈資訊網絡，及時因應國際市場之變動，以利增加我國鋼鐵業貿易空間及提昇國際競爭力。目前鋼鐵業 CO₂ 排放量約佔總排放量 10%，為國內重要的 CO₂ 排放源，有鑑於全球氣候變遷與相關議題持續受到國際關切，我方宜密切注意國際鋼鐵業在 CO₂ 減量與因應措施，積極引進相關的節能與製程技術，使我國鋼鐵業能兼顧產業經濟與能源效益，且具實力迎接國際環保趨勢之挑戰。

參考文獻

1. Ang, B.W. and Liu, N., (2007), "Energy decomposition analysis: IEA model versus other methods", *Energy Policy* 35 (3), 1426-1432.

2. Bhattacharyya, S.C. and Ussanarassamee, A., (2005), "Changes in energy intensities of Thai industry between 1981 and 2000: a decomposition analysis" , *Energy Policy* 33 (8), 995-1002.
3. Choi, K.H. and Ang, B.W., (2002), "Measuring thermal efficiency improvement in power generation: the Divisia decomposition approach" , *Energy* 27 (5), 447-455.
4. Chang, Y.F., Lewis, C. and Lin, S.J., (2008), "Comprehensive evaluation of industrial CO₂ emission (1989-2004) in Taiwan by input-output structural decomposition" , *Energy Policy* 36 (7), 2471-2480.
5. Dhubbain, Á.N., Fléchar, M.C., Moloney, R. and O'Connor, D., (2009), "Assessing the value of forestry to the Irish economy-An input - output approach" , *Forest Policy and Economics* 11 (1), 50-55.
6. Easterling, D. R., (1999), "Development of Regional Climate Scenarios Using a Downscaling Approach" , *Climate Change* 29 (4), 665-692.
7. Hawdon, D. and Pearson, P., (1995), "Input-output simulations of energy, environment, economy interactions in the UK" , *Energy Economics* 17 (1), 73-86.
8. Kim, Y. and Worrell, E., (2002), "International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry" , *Energy Policy* 30 (10), 827-838.
9. Leontief, W. (1972), "Air pollution and the economic structure: empirical results of input-output economics" , in: *Input-Output Techniques*, Oxford University Press, Inc.
10. Lin, S.J. and Chang, T. C., (1996), "Decomposition of SO₂, NO_x and CO₂ Emissions from Energy Use of Major Economic Sectors in Taiwan" , *The Energy Journal* 17 (1), 1-17.
11. Lin, S.J., Lu, I.J. and Lewis, C., (2006), "Identifying key factors and strategies for reducing industrial CO₂ emissions from a non-Kyoto protocol member's (Taiwan) perspective" , *Energy Policy* 34 (13), 1499-1507.
12. Lin, Sue J. *, Liu, C.H. and Lewis Charles, (2012). CO₂ Emission Multiplier Effects of Taiwan' s Electricity Sector by Input-output Analysis. *Aerosol and Air Quality Research* 12, 181-190
13. Llop, M., (2007), "Economic structure and pollution intensity within the environmental input - output framework" , *Energy Policy* 35 (6), 3410-3417.

14. Miller, R. E. and Blair, P. D., (1985), "Input-Output Analysis Foundation and Extension", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, New Jersey.
15. Moffatt, I. and Hanley, N., (2001), "Modelling sustainable development : systems dynamic and input-output approaches", *Environmental Modeling & Software*, 545-557.
16. Madlener, R. and Koller, M., (2007), "Economic and CO₂ mitigation impacts of promoting biomass heating systems: An input – output study for Vorarlberg, Austria", *Energy Policy* 35 (12), 6021-6035.
17. Nishimura, K., Hondo, H. and Uchiyama, Y., (1997), "Estimating the embodied carbon emissions from the material content", *Energy Convers. Mgmt*, 38 (1), Suppl., S589-S594.
18. Timilsina, G. R. and Shrestha A., (2009), "Transport sector CO₂ emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options", *Energy Policy* 37 (11), 4523-4539.
19. Wang, C., Chen, J. and Zou, J., (2005), "Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957 – 2000", *Energy* 30 (1), 73-83.
20. Wiedmann, T., Scott, K., Lenzen, M., Feng, K. and Barrett, J., (2010), "Hybrid methods for incorporating changes in energy technologies in a input-output framework-the case of wind power in the UK", 18th international input-output conference, Sydney, Australia.
21. Wier, M., (1998), "Sources of changes in emissions from energy: A structural decomposition Analysis", *Economic Systems Research* 10 (2), 99-112.
22. Zha, D., Zhou, D., Zhou, P., (2010), "Driving forces of residential CO₂ emission in urban and rural China : An index decomposition analysis", *Energy Policy* 38 (7), 3377-3383.
23. Zhang, M., Li, H., Zhou, M. and Mu, H., (2011), "Decomposition analysis of energy Consumption in Chinese transportation sector", *Applied Energy* 88 (6), 2279-2285.
24. 胥愛琦、許志義, (1991), 「台灣能源密集度變動之因素分解」, 碩士論文, 國立政治大學經濟學系。
25. 行政院主計處, (2010), 2001、2004 與 2006 年產業關聯程度表, 行政院主計處。
26. 行政院主計處, (2012), 2001、2004 與 2006 年國產品價格交易表, 行政院主計處。
27. 行政院經濟部能源局, (2013), 2001 至 2012 年能源平衡表, 行政院經濟部能源局。
28. 台灣經濟研究院, (2012), 2000 至 2011 年鋼鐵業產業結構與產值分析, 台灣經濟研究

30 鋼鐵業能源消費與 CO₂ 排放及經濟之關聯效應分析

院產經資料庫。

- 29.林素貞、呂信賢，(1992)，「整合能源與環境政策之分析-以台灣地區石油消費結構對環境影響為例」，第五屆環境規劃與管理研討會論文集，pp. 195-214。
- 30.林素貞、張翊峰，(1995)，「以投入產出分析產業能源耗用與污染排放量之關連性-以 1991 年臺灣地區為例」，能源季刊，第 25 卷，第 4 期，pp. 52-74。
- 31.林素貞、張翊峰、李正豐、楊維修、胡秋蘭、江宜玲，(1997)，「溫室效應氣體之管制與評估-溫室氣體減量目標與管制措施對重要產業之衝擊評估(第二年)」
- 32.林素貞、李正豐，(1999)，「石化工業產業關聯對能源及二氧化碳之乘數效應」，能源季刊，第 29 卷，第 3 期，pp. 26-42。
- 33.林佑蓉、林素貞，(2007)，「台灣與數國之能源經濟及二氧化碳之關聯分析比較」，碩士論文，國立成功大學環境工程學系。
- 34.林素貞、劉家豪、陳俊凱、郭紋秀，(2008)，「台灣地區 IC 製造業溫室氣體排放變動因素分解」，第二十一屆環境規劃與管理研討會論文。

廢棄物及資源化

都市下水污泥轉換能源技術 之回顧與評析

江康鈺*、陳雅馨**、葛家賢***、呂承翰****

摘 要

國內不同產源事業所衍生之有機或無機污泥，受制於其來源種類及數量繁多，性質極為複雜，其後續之處理、處置或資源再利用技術規劃與應用途徑，將有所差異。為有效達成污泥類廢棄物之整合性處理或資源化技術規劃，近年來國際間大多朝向利用現行技術發展出最佳可行之應用技術、開發創新及新穎之處理或資源化技術，以及規劃低能源衝擊或發展自給自足能源系統之處理技術等方向著手進行，以期有效推廣永續利用技術及其應用實績。有鑑於此，本文蒐集國內外近 50 餘篇熱轉換能源技術之相關文獻，期藉由彙整相關技術原理、操作特性與應用實績等資訊，並利用強弱機危(strength, weaknesses, opportunities, and threats, SWOT)綜合評析，提出都市下水污泥能源轉換技術之關鍵問題及其可行之解決對策，以供國內未來都市下水污泥妥善處理、能源轉換及資源再利用技術發展推動之參考。

【關鍵字】下水污泥、熱裂解、氣化、碳化、能源轉換技術

*逢甲大學環境工程與科學系 教授

**逢甲大學環境工程與科學系 研究助理

***台灣潔淨能源科技股份有限公司 經理

****逢甲大學環境工程與科學系 博士班研究生

一、前言

近年來，污水下水道建設為都市發展的重要公共工程，下水道普及率不僅視為國家競爭力之重要指標，許多先進國家更列為維護生活環境品質之重要建設，目前台灣地區污水下水道建設正值起步階段，政府未來將投入大量經費加速推動污水下水道建設，根據內政部營建署污水下水道第四期建設計畫(98 至 103 年度)之計畫目標，103 年度之公共污水下水道用戶接管普及率，將由 97 年度之 19.27%增加至 35.77%，至於整體污水處理率，則由 97 年度之 42.97%提昇至 64.47%^[1]。另根據內政部營建署全國公共污水處理廠資料管理系統之營運資料顯示，101 年度下水污泥申報量約為 7.6 萬公噸^[2]，未來衍生之污泥產量，將隨著國內下水道建設之積極推動與發展，而明顯逐年增加。面對與日俱增的下水污泥產生量，如何找尋妥善之處理處置或減量與資源再利用技術與對策，將是現階段亟為重要之規劃與施政課題。

過去國際間對於下水污泥之處理處置或資源再利用之政策方向，大多從早期之掩埋處置，逐漸發展利用下水污泥中含有大量之揮發性固體物及營養鹽等成份，經適當之堆肥處理後，轉換為生機肥料或土壤改良劑，作為改良綠農地之肥沃度使用；然研究同時指出下水污泥易受到污水來源不同之影響，其內含之重金屬含量，經堆肥之生物轉化程序後，亦將濃縮累積於堆肥內，若長期施用於綠農地，亦可能造成土壤中重金屬長期之累積性，影響作物或植物之生長。此外，國外亦積極進行污泥減量/減容技術之開發與應用，尤其是針對地狹人稠之國家或地區，其中廣泛應用高溫焚化處理，以達到快速有效之減量/減容效果；應用好氧/厭氧消化或乾燥處理技術，亦是目前被廣泛使用之技術，藉由前述消化、乾燥或焚化處理後，雖可達到污泥減量及能源回收之目的，然其消化後污泥、乾燥後污泥或是焚化殘餘物等，均有待進一步妥善規劃其最終去處。近年來，替代能源之發展議題，逐漸受到世界各國重視，如何利用適當之能源轉換技術，將未來產量龐大之都市下水污泥等類之廢棄資材，轉化為可用之資/能源，將成為重要之環境課題。

本文之主要目的在於蒐集彙整近年來國內外相關下水污泥處理現況、組成及性質分析、能源轉換技術原理之介紹，以及技術應用實績之說明等，其中下水污泥轉換能源技術，主要包括碳化技術(Carbonization)、熱裂解技術(Pyrolysis)及氣化技術

(Gasification)等，期藉由技術資料之蒐集彙整與比較評估，期提供國內未來下水污泥能源轉換技術發展推動之參考。

二、都市下水污泥特性及其處理現況

根據「廢棄物清理法」(以下簡稱廢清法)第 2 條第 1 項針對廢棄物之定義，係依廢棄物之產源不同，將其區分為一般廢棄物及事業廢棄物，其中所謂之事業，另依據法令之規定定義之。過去有關下水污泥之產源事業，在廢清法中並未明列為事業，因此，下水污泥可視為一般廢棄物。然行政院環境保護署(以下簡稱環保署)於 103 年 1 月 29 日修正公布之「指定廢棄物清理法第二條第一項第二款之事業」，其中事業種類已增列「公共下水道污水處理廠」，並預計於民國 104 年 7 月 1 日起施行適用。換言之，未來公共下水道污水處理廠所產出之下水污泥，將視為一般事業廢棄物，並依相關法令予以管制。因此，未來有效瞭解與掌握都市下水污泥之組成與性質特性，將有助於後續相關處理處置或資源再利用技術之選擇與評估。以下本節內容除彙整蒐集主要國家之下水污泥處理現況外，並將針對國內外主要都市之下水污泥特性分析結果，彙整比較說明如後。

2.1 下水污泥基本特性

下水污泥為民生污水處理後之衍生物，係為有機污泥之主要來源之一，根據表 1 文獻資料顯示，下水污泥若未經任何處理，其含水率約為 98.0%左右，若經一般沉降、壓濾及離心等簡易脫水程序處理後，含水率可降低至 80%~90%間，然後續脫水污泥若需將其含水率降至 15%以下，則需以乾燥、曬乾、熱處理或與乾污泥摻混等方式處理。經前述乾燥或熱處理後之下水污泥，其熱值明顯增加，有助於後續應用於能源轉換技術之推動。

另根據表 1 彙整之國內相關文獻資料顯示，下水污泥之乾基灰分含量，介於 28%~48%之間，至於下水污泥之乾基固定碳含量則約在 10%以下。另根據文獻之下水污泥乾基元素組成分析結果顯示，碳、氫、氧及氮含量分別為 19.50%~45.72%、3.40%~6.84%、12.70%~55.87%及 3.10%~5.94%，至於硫及氯含量之變動差異較大，

34 都市下水污泥轉換能源技術之回顧與評析

平均含量皆低於 2% 以下。根據臺中市福田水資源中心下水污泥之熱值分析結果顯示，在高含水率(80%以上)之條件下，其低位發熱量約為 57kcal/kg~147kcal/kg，若未來可加強污泥脫水之效率，將可降低污泥之含水率及體積，減少運輸成本，並可進一步提升其後續應用於能源轉換之可行性^[3-8]。

表 1 國內下水污泥基本特性分析^[3-8]

文獻	周氏 (2004)	陳氏 (2007)	王氏 (2008)	程氏 (2012)	江氏 (2012)	江氏 (2013)	江氏 (2013)	程氏 (2012)	程氏 (2012)
污泥來源	內湖	內湖	迪化	福田	福田	福田	台中港	安平	六塊厝
近似分析(wt.%)									
水分	83.09	83.76	81.01	77.50	80.72	80.53	86.39	77.70	78.50
灰分*	28.86	47.35	40.49	N.A	37.03	47.01	42.24	N.A	N.A
揮發性有機碳*	N.A.	N.A.	N.A	N.A	54.70	45.80	52.09	N.A	N.A
固定碳*(wt.%)	N.A.	N.A.	N.A	N.A	8.30	7.19	5.67	N.A	N.A
元素分析*(wt.%)									
C	37.18	32.46	29.98	23.90	34.41	28.14	29.91	19.50	20.80
H	5.06	4.81	4.02	3.80	6.13	4.21	4.92	3.40	3.80
O	29.19	55.87	19.60	N.A.	16.39	15.51	16.98	N.A.	N.A.
N	5.94	5.65	4.95	3.10	4.36	3.59	3.67	3.30	4.00
S	1.11	1.21	0.95	1.50	1.59	1.49	2.13	2.00	1.80
Cl	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.09	0.05	0.15	N.A	N.A.
熱值(kcal/kg)									
HHV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	691	584	445	N.A	N.A
LHV	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	143	57	N.A	N.A	N.A

N.A：not available； *：dry basis

另一方面，下水污泥之重金屬含量變化，主要受到民眾生活習慣、污水處理廠之操作方式，或與都市污水下水道所接管區域之不同有關。根據國內文獻資料顯示，台灣不同區域之污水處理廠所衍生之下水污泥，其重金屬含量分析結果，以濕基(含水量 80% 計算基準)狀態下，下水污泥中鋅及銅含量較高，分別約為 245.84mg/kg~580.44mg/kg 及 43.07mg/kg ~101.44mg/kg，其次為鉻、鉛及鎳含量，

分別約為 20.69mg/kg~54.80mg/kg、11.18mg/kg~24.06mg/kg 及 10.43mg/kg~73.37mg/kg，至於鎘、砷及汞含量較低，僅分別介於 0.09mg/kg~2.58mg/kg、0.16mg/kg~2.63mg/kg 及 0.17mg/kg~1.00mg/kg^[7]。前述國內下水污泥中重金屬濃度差異原因，主要與污水處理廠是否收受來自工業或加工區之廢水有關^[7]。此外，Wong(1997)研究香港都市污水處理廠衍生污泥之特性分析資料顯示，香港地區由於都市污水與部份之工業區廢水，共同以下水道收集處理，因此，致使下水污泥中部份重金屬含量，較單純收集家庭污水之污泥為高，此與前述國內污泥特性分析結果相吻合^[9]。

2.2 下水污泥處理處置現況

依據日本國土交通省「土地、基礎設施和交通運輸部」之統計資料顯示，日本 1988 至 2010 年之下水污泥產出及回收再利用情形(詳如圖 1)，顯示日本下水污泥之產量隨著其污水下水道之普及率之提升而有顯著增加之趨勢，而其處理處置方式則由原掩埋方式轉變為以材料化、肥料化及燃料化等方式進行回收再利用。截至 2010 年日本下水污泥之總產量 226.8 萬公噸，其中約 22% 為掩埋處置，另約有 78% 為回收再利用，而其中回收再利用之選用技術，主要以材料化應用為主，約佔 60%，其次為綠農地應用約佔 15%，而燃料化之應用比例約佔 3%^[10]。

以下水道接管普及率較高之歐洲國家為例，依據英國環境、食品及農業部 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra) 之研究報告指出，因歐洲共同指導委員會於 1998 年，建議全面禁止污泥以海洋棄置方式處置，同時加上廢水處理程序及放流水標準加嚴，致使英國 2010 年下水污泥產量，由 1992 年之 997,673 公噸(乾基)增加至 1,412,836 公噸(乾基)。英國針對下水污泥之再利用及焚化處理之比例，則分別由 1992 年之 47.3% 及 9%，提昇至 80.8% 及 18.4%，另一方面，海洋棄置則由 27.7% 降至 0%。其中，英國下水污泥於 2010 年之再利用比例中，農業利用(肥料及土壤改良劑)約佔 79%^[11]。根據歐盟統計局(European Commission Eurostat)之下水污泥統計資料顯示，目前歐洲多數國家下水污泥多採用農業利用及堆肥方式，進行處理再利用。其中，西班牙及愛爾蘭約有三分之二以上之污泥量，以農業肥料之應用為主；愛沙尼亞及斯洛伐克則以堆肥化處理為主。此外，下水污

36 都市下水污泥轉換能源技術之回顧與評析

泥主要採焚化處理為主之國家，則包括荷蘭、斯洛維尼亞、比利時、德國、奧地利、瑞士等^[12-13]。圖 2 為歐洲主要國家之下水污泥處理及再利用情形之彙整。

澳洲 2010 年之下水污泥年產量約 30 萬公噸(以乾基為基準)，其中約有 2/3 之下水污泥以應用於肥料、土壤改良劑、客土等，其中農業利用約佔 55%，其次為堆肥處理約佔 10%^[14]。根據曾及潘等人(2007)研究報告指出，過去台灣對於下水污泥之處理處置方法，主要以掩埋處置為主，約佔總處理量之 54.4%，其次為焚化處理之 44.2%，堆肥及土地利用之處理方式約僅佔 1.1%，至於資源再利用技術之應用，仍有待進一步發展與推動^[15]。近年來，國際間對於下水污泥資源再利用及能源轉化或材料應用之研究，逐漸受到重視，不僅達到污泥減量及處理處置之目的，同時創造出下水污泥資源再利用及再生能源之商機。然而，為妥善利用下水污泥之廢棄資材，需兼顧致病菌及臭味之去除、有害物質之潛在危害，以及現階段國際間極為重視之節能減碳及綠色經濟等議題，未來台灣應積極針對下水污泥資源及能源再利用之技術開發，列為重要的研究與發展的課題。

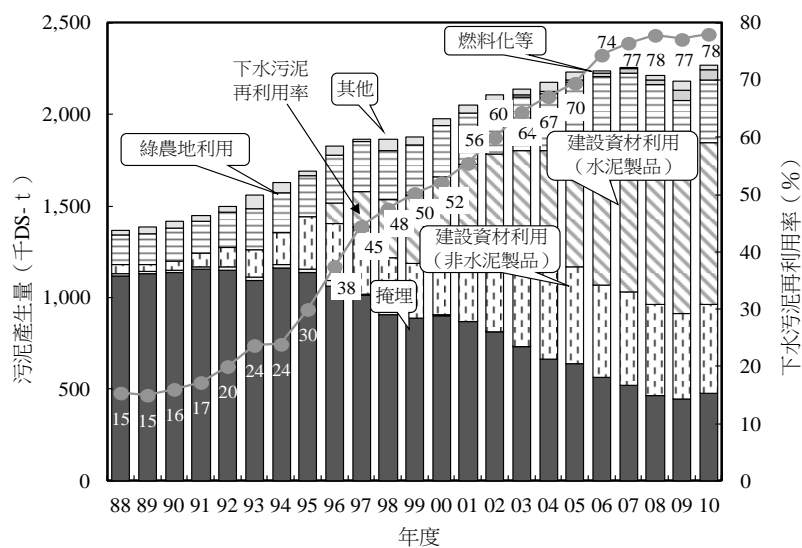


圖 1 日本下水污泥處理與再利用情形^[10]

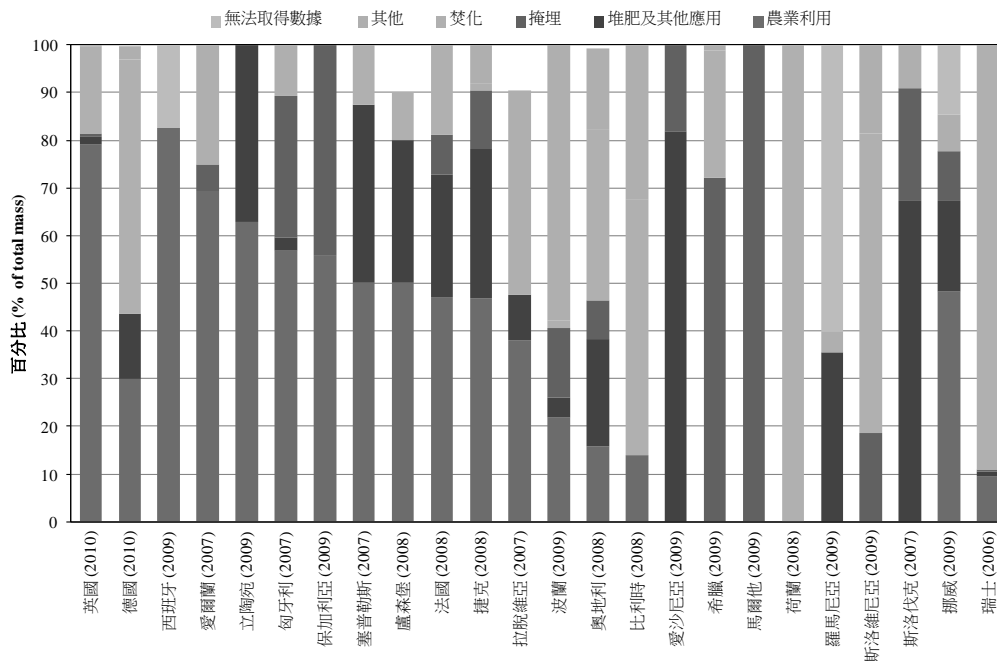
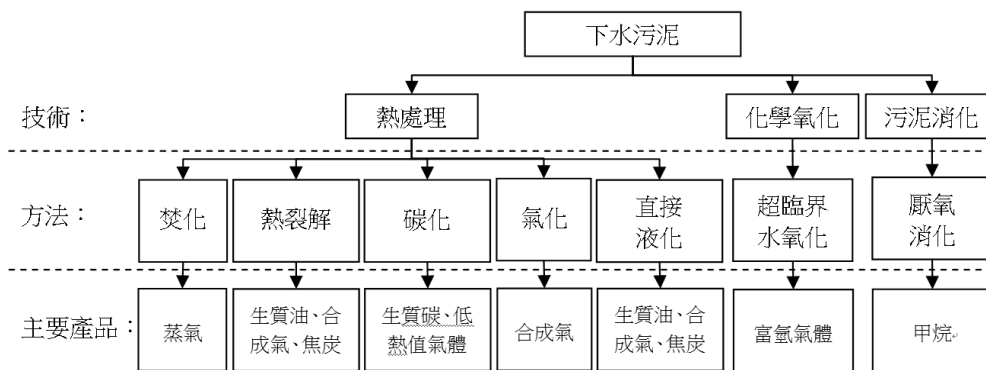


圖 2 歐洲主要國家下水污泥處理與再利用情形^[11-13]

三、下水污泥轉換能源技術之原理與應用實績

對於高含水率之污泥，現階段已有許多國家投入相關研究，主要為解決體積龐大及後續處理處置等應用問題。近年來，生質物轉換為生質能之技術與應用受到各國的重視與推廣，而下水污泥之能源轉換方式主要以熱處理、化學氧化及污泥消化等技術，分別將下水污泥轉換為固相之生質碳及焦炭、液相之生質油、氣相之甲烷、氫氣及合成氣等生質燃料(詳如圖 3)^[16]。然考量熱轉換能源之技術，須具有破壞有機化合物之能力、衍生廢氣排放量低、戴奧辛/呋喃生成潛勢低、合成氣體應用多元化、衍生之固體殘餘物性質穩定並可進行再利用等優點^[17]。本文主要針對下水污泥熱裂解(pyrolysis)、碳化(carbonation)及氣化技術(gasification)之原理、流程與應用實績等內容，彙整說明如下。

圖 3 生質物能源轉化技術^[16]

3.1 熱裂解技術 (Pyrolysis)

3.1.1 熱裂解技術原理及操作特性

熱裂解技術係一種於高溫惰性環境下，將有機物加熱產生熱化學變化，使其中所含有機物質分解成氣體包括一氧化碳、氫氣、甲烷、二氧化碳等、液體包括焦油(tar)、生質油(bio-oil)及固體殘餘物包括焦炭(Chars)、灰分等三相產物。早期研究中將熱裂解技術視為與碳化技術(Carbonization)相似，均以產生焦炭為其主要技術之產品。然而，近年來熱裂解技術之產品，則以生質油為其代表性產物。

Shao et al.(2008)依據反應溫度區間，將下水污泥之熱裂解程序劃分為 5 階段(詳如圖 4)：(1)污泥脫水($T < 200^{\circ}\text{C}$)，污泥中之自由水及輕質有機物質(如： CO_2 及 CH_4)釋出；(2)初級裂解($200^{\circ}\text{C} < T < 350^{\circ}\text{C}$)，乾燥污泥進行分解或去聚合反應，此階段將伴隨著碳及水分含量的降低，而 CO_2 及 CH_4 產出量增加；(3)二級裂解($350^{\circ}\text{C} < T < 550^{\circ}\text{C}$)，此階段可燃碳、水蒸氣以及 CH_4 含量持續降低，而 H_2 、 CO 以及 CO_2 產出量，則呈持續增加之趨勢；(4)完全裂解($550^{\circ}\text{C} < T < 900^{\circ}\text{C}$)，因非生物降解性物質之分解反應，抑或是 C 及 CH_4 發生還原反應，致使 H_2 及 CO 產量，隨著其他氣體產物之減少而增加；(5)焦炭產出($T > 900^{\circ}\text{C}$)，下水污泥之熱裂解反應完成， H_2 及 CO 產量趨於穩定，並產生焦炭^[18]。

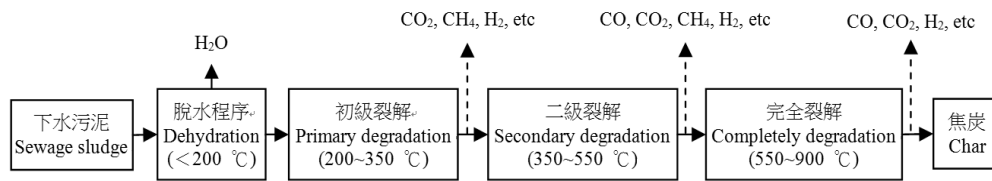


圖 4 下水污泥熱裂解處理程序示意圖^[18]

而依據生質物之反應特性，可將熱裂解技術大致區分為傳統慢速熱裂解 (conventional slow pyrolysis)、快速熱裂解 (fast pyrolysis) 及閃燃熱裂解 (flash pyrolysis) 等類型。本節主要探討熱裂解技術為升溫速率為 $1^{\circ}\text{C}/\text{sec} \sim 200^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 、熱裂解溫度 $600^{\circ}\text{C} \sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 、氣體停留時間小於 2 秒、氣體冷凝速率快，且生質油品質及產率高之快速熱裂解技術。根據文獻研究指出生質物快速熱裂解之重要反應參數，主要包括進料之乾燥度、粒徑大小、前處理、反應器的型式、熱源供給、熱傳、加熱速率、反應溫度、氣體停留時間、二次裂解反應、生質物種類、催化劑之添加、焦碳分離、飛灰分離以及生質油之收集等。常見生質油品質及產率之影響因素，包括熱裂解溫度、氣體停留時間及生質物特性等，以下彙整說明重要之比較內容。

1. 熱裂解溫度

一般而言，熱裂解溫度增加，可促進裂解反應釋放出更多的焦油氣體及合成氣，同時生質油在較高操作溫度下，會發生二次裂解反應並產生易揮發物質，致使合成氣之產氣量增加，導致生質油品產量減少。文獻亦指出在較高之熱裂解溫度，焦碳產量降低，此係焦碳受熱進行二次裂解反應，致使產氣量有上升之趨勢，同時有助於非冷凝性氣體產物之形成。Pedroza et al. (2014) 研究指出較高熱裂解溫度 (約 $500^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$)，可促進有機固相化合物 (油品、腐植酸、蛋白質) 及焦炭，進行液化及部分氣化反應。因此，下水污泥於熱裂解過程之氣相產物產量，將隨著裂解溫度之增加而增加，而固相及液相產物產量則隨之降低^[19]。

熱裂解溫度對於生質油中之化學物質變化，主要在於當溫度持續增加，生質物之組成主要進行脫氫及芳香化反應，隨著裂解溫度增加，芳香族化合物將分解為烷基團化合物。文獻研究亦指出生質油中之化學物質，可藉由熱裂解過程之加熱條件改變或利用催化劑進行改質，達到降低分子量及提高分餾程度之效果，期

達到更多生質油或更多氣體之產生。Park et al.(2008)以下水污泥熱裂解技術產製再生油品之研究，結果指出隨著熱裂解溫度之增加，導致易揮發性物質發生二次反應，促使再生油品產量降低，產氣量增加。此外，該研究亦指出高反應溫度下產出之再生油品黏滯度較低，主要原因為在高溫熱裂解環境下，將有助於蠟狀物質之降解，促使油品具有較佳之流動特性。在高溫環境下($T > 600^{\circ}\text{C}$)產出油品之主要物種為芳香族化合物，而低溫環境產出油品之物種則為烷烴類及烯烴類^[20]。

2. 氣體停留時間

一般而言，熱裂解過程之氣體停留時間低於 2 秒，將可避免焦碳與熱裂解蒸氣發生二級熱解反應，有助於提昇生質油產量。氣體停留時間主要受到氣體流率及進料率之影響，Park et al.(2010)研究利用熱裂解溫度 450°C ，及下水污泥粒徑為 0.7mm 之條件下，探討調整載氣流率及下水污泥進料速率，對生質油產量之影響，研究結果指出，當載氣流率由 5L/min 降至 3L/min ，生質油產率將由 42.6% 降至 38.1% ，氣體產率則由 17.2% 提昇至 24.6% ；而當下水污泥進料速率由 2.5g/min 增加至 5.0g/min ，生質油產率將提昇至 45.1% ，氣體產率則降至 14.4% ^[21]。

3. 生質物特性

生質物之粒徑及含水量等物化特性，亦是影響生質油產率及其油品品質之重要因素。其中生質物粒徑對生質油品之影響，Park et al.(2010)應用流體化床熱裂解系統，反應溫度為 450°C ，結果顯示，當下水污泥粒徑由 0.7mm 增加至 1.0mm ，其焦炭產率由 40.2% 增加為 44.9% ，再生油品產率由 42.6% 降至 34.5% ，氣體產率由 17.2% 增加為 20.6% ；而當下水污泥粒徑為 0.3mm ，其焦炭及生質油產率，則分別降至 37.3% 及 38.1% ，氣體產率則增加為 24.6% 。前述試驗結果係因大顆粒之污泥，其反應表面積較小，加熱速度較慢，沒有足夠熱源傳導至樣品內，致使顆粒之平均溫度較低，熱裂解反應不完全，焦炭產率增加。然而，若污泥之粒徑過小，亦可能導致因熱傳遞過快，而將蒸氣轉換為氣態產物^[21]。

Kim and Parker(2008)探討不同處理程序對下水污泥熱裂解產製生質油之技術及經濟性評估，研究指出熱裂解溫度及污泥之揮發性物質(VS)含量，為生質油及焦炭產率之主要影響因子，由於 VS 之熱分解溫度為 $200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 間，因此，VS 含量高之下水污泥，其生質油產率有顯著增加之趨勢。研究指出初沉污泥因

VS 含量為 84 wt.%(乾基)，其生質油產率可達 42%；而消化污泥因 VS 含量僅為 59 wt.%(乾基)，則其生質油產率降為 26%^[22]。Fonts et al.(2009)研究指出下水污泥之性質，為影響熱裂解生質油及氣態產物組成特性之重要反應參數，其中又以灰分含量之影響最為顯著，高灰分含量之下水污泥熱裂解，將有利於氣體產物之產出，同時亦達到可降低生質油黏滯度之需求^[23]。

3.1.2 熱裂解技術之應用實績

全球首座下水污泥熱裂解油品製造廠，於 2000 年 9 月至 2001 年 12 月在西澳的 Subiaco 污水處理廠正式營運，該廠採用 Environmental Solutions International (ESI)之 ENERSLUDGE™ 熱裂解系統(如圖 5)，該系統之建造費用為 2.3 百萬澳幣，每年的操作維護費用則超過 1.3 百萬澳幣^[24]。該廠每日污泥處理量約為 16~20 公噸之乾燥污泥，產出之下水污泥需先經脫水、乾燥、造粒等前處理程序，使其總固體含量達 95%後，方能進行後續之熱裂解反應。經乾燥後之污泥先以溫度 450℃(壓力為 2~5kPag)之 1 號爐進行熱裂解反應，生成之焦炭與氣體產物，進入相同溫度之 2 號爐進行催化反應，以純化生成碳氫化合物等可燃性氣體，純化後之氣體經過冷凝及分離系統後，即可產出非冷凝態氣體(NCG)及油品^[25]。然該廠未針對其成本效益進行詳細之評估，故於運轉 16 個月後即停止營運。

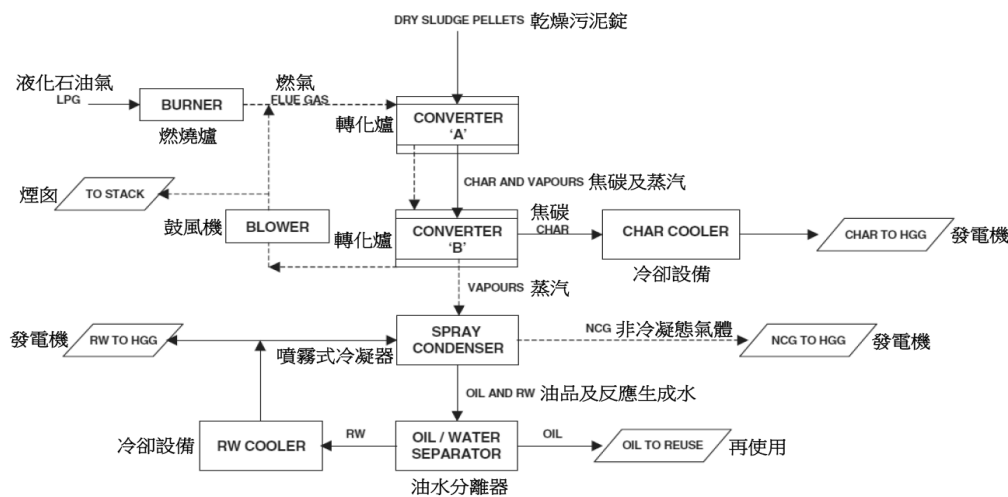


圖 5 澳洲 Subiaco 污水處理廠污泥熱裂解流程^[25]

3.2 碳化技術(Carbonation)

3.2.1 碳化技術原理及操作特性

碳化技術亦屬熱裂解反應技術之一，將有機碳氫化合物置於高溫惰性環境下（通常在 300℃~600℃），促使含碳有機物質發生化學分解反應。碳化反應過程，部分有機物質分子將進行重組，並形成新的有機物質，部分有機物質，經過一系列的物化學反應後，產生包括氣相之碳氫化合物及水蒸氣，以及固相之焦碳等碳化產物。其中，氣相之碳氫化合物若經過適當的冷凝程序，將轉變成油與水之相態存在^[26]。而有關碳化過程可依其溫度可分為三階段：

第一階段：25℃~200℃，此階段主要為水分的損失。

第二階段：200℃~500℃，此階段主要是揮發物與焦油開始釋出，由於重量損失以致於整體密度下降，此階段有機的碳氫化合物已形成基本的焦碳結構。

第三階段：500℃~900℃，由於焦碳的結構已鞏固，因此重量損失非常微量，而整體密度會些微的上升。

文獻研究指出下水污泥碳化產物之熱值，會隨著碳化溫度提昇而降低，當下水污泥之碳化溫度提昇至 500℃，生質碳之高位發熱量及可燃分含量皆有明顯之下降趨勢，然而在碳化溫度為 350℃時，因生質碳可燃分中的氧含量降低，進而提昇其碳含量，生成之生質碳熱值較高。表 2 為比較下水污泥碳化與燃燒技術之 N₂O 排放量，其中碳化技術之 N₂O 排放量確實遠低於一般焚化處理技術，且以低溫碳化技術之減碳成效最為顯著。綜合前述研究結果，顯示低溫碳化技術具有製備高熱值生質碳及低碳排放特性之發展優勢^[27-28]。

表 2 碳化能源轉化技術之 N₂O 排放情形^[27-28]

能源轉化技術	N ₂ O 排放量 (kg-N ₂ O/t-cake)	全球暖化潛勢值	換算為 CO ₂ 排放量 (kg-CO ₂ /t-cake)
低溫碳化 (250~350℃)	0.03	310	9.3
中溫碳化 (500℃)	0.13	310	40
高溫碳化 (600~800℃)	0.146	310	45
高溫燃燒	0.645	310	200
一般燃燒	1.51	310	468

3.2.2 碳化技術之應用實績

碳化技術係將下水污泥轉換成生質碳，本項技術具有污泥減容及減量、提高污泥熱值、抑制 N_2O 排放及容易貯存等優點。國外已有少數實廠案例，以下針對日本及美國之下水污泥碳化處理系統、流程、規模，以及碳化產物等說明如後。

1. 日本

根據文獻資料指出，日本利用碳化技術處理下水污泥之應用實績，主要包括低溫、中溫及高溫碳化技術，表 3 為日本採用碳化技術之相關資訊，其中包括碳化溫度、設備規模及其再利用產品產量、流向等^{[10][27]}。以下針對東京都之中溫碳化系統及廣島市之低溫碳化系統，分別針對其運作情形說明如後。

表 3 日本下水污泥碳化技術^{[10][27]}

碳化溫度 (°C)	地區	設備 規模 (ton/day)	再利用產品			備註
			產量 (ton/year)	用途	流向	
低溫碳化 250~350°C	廣島市	50×2	4,490	燃料	竹原火力發電廠	2012 年 4 月 營運
	熊本市	50	2,300	燃料	松浦發電廠	2013 年 3 月 完工
	大阪市	150	8,558	燃料	石炭火力發電廠	2014 年 4 月 完工
	橫濱市	150	—	燃料	—	2016 年 3 月 完工
中溫碳化 500~600°C	東京都	100×3	8,700	燃料	勿來發電廠	2007 年 11 月營運
	愛知縣	100	2,700	燃料	碧南火力發電廠	2012 年 4 月 營運
高溫碳化 800~900°C	胎內市	7.2	—	吸附劑、土壤改良劑	—	2008 年 4 月 營運

(1) 東京都東部污泥處理廠

東京都下水污泥之中溫碳化系統，主要包括乾燥機、碳化爐及燃燒爐等單元，透過燃燒爐提供之熱能進行污泥乾燥，可將原含水率為 76% 之污泥乾燥至

44 都市下水污泥轉換能源技術之回顧與評析

含水率為 20%。廠內 3 座碳化爐溫度為 500℃，最大操作碳化量為每日 100 公噸/座，碳化過程產生熱值為 2,000kcal/kg 的生質碳及合成氣，而合成氣將回收至燃燒爐，直接燃燒轉為熱能，作為乾燥污泥及碳化爐熱源之用^[29-30](如圖 6)。

(2) 廣島市西部水資源再生中心

廣島市西部水資源再生中心之下水污泥低溫碳化系統(如圖 7)，於 2012 年 3 月正式完工，該系統之碳化溫度 250℃~300℃，每日最多可處理廣島市水資源再生中心產出之 100 公噸下水污泥。該污泥碳化處理系統於規劃之初，估計每年可處理 27,886 公噸污泥，並產出 4,490 公噸、熱值為 15.8MJ/kg 之生質碳，目前廣島市水資源再生中心污泥經碳化技術產出之生質碳，亦已成為三原市竹原火力發電廠之煤替代燃料^[10]。

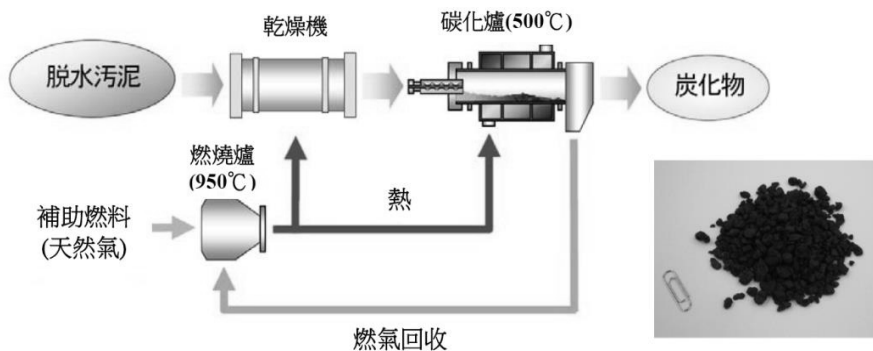


圖 6 日本東京都污泥處理廠下水污泥碳化流程^[30]

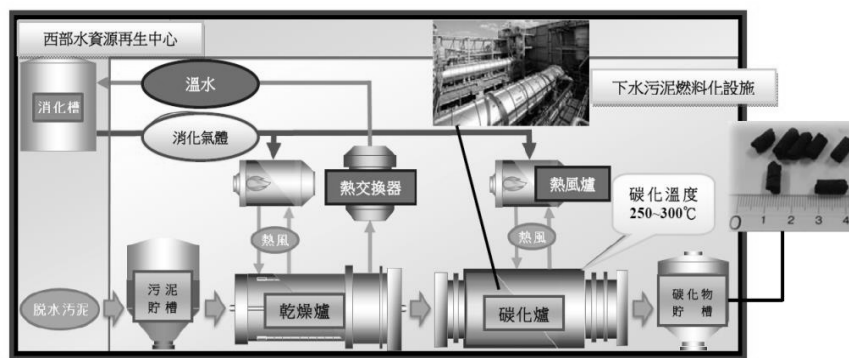


圖 7 日本廣島市水資中心下水污泥碳化流程^[10]

2. 美國

美國加州 Rialto 污泥碳化系統，採用 EnerTech Environmental 公司之 SlurryCarb™ 技術，該技術可依據其再利用用途之不同，產出固體含量為 50% 之 eGrow 或固體含量高於 95% 之 eFuel，且該系統於污泥資源化過程所產生之含 NH_3 廢水，透過廢水處理系統可有效回收營養鹽，並產出甲烷氣體。該處理廠之污泥固體含量為 15%~30%，經均質化前處理後，粒徑小於 0.5 英吋，再經高壓泵及熱交換器，將其加壓至飽和蒸汽壓及加溫至 230°C 後，進行碳化反應，碳化後的污泥，依據其再利用用途，進一步產出 eGrow 或 eFuel。現階段該污泥碳化廠主要生產 eFuel，且作為當地水泥窯之燃煤替代燃料^[31-32](如圖 8)。

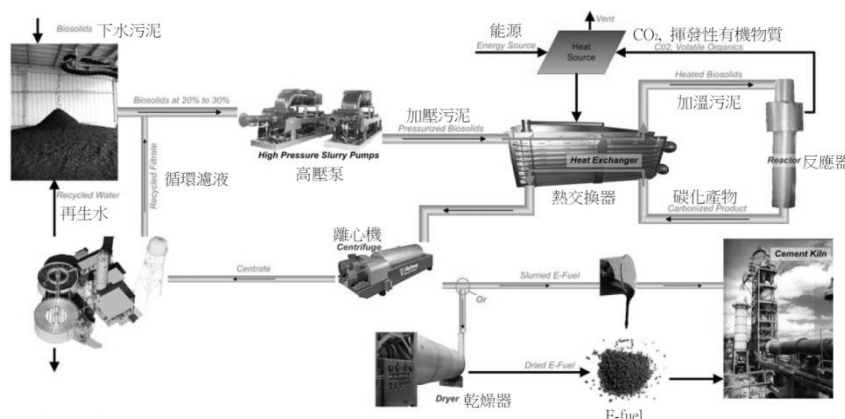


圖 8 美國加州 Rialto SlurryCarb™ 污泥碳化流程^[32]

3.3 氣化技術 (Gasification)

3.3.1 氣化技術原理及操作特性

所謂氣化技術即是利用高溫條件下，進行非催化性之部分氧化反應，將生質物中之含碳物質轉化為氣態及液態燃料，並作為能源供應使用。經氣化反應所產生之氣體種類包括一氧化碳、氫氣、甲烷、二氧化碳等，其中大多數可燃氣體可作為鍋

爐與發電機組之燃料使用；此外，氣化亦會產生焦油、焦炭、燃料油、灰份等副產物，亦可作為其他能源或材料使用。

而傳統氣化技術主要核心為氣化爐，氣化爐體依氣體與燃料接觸形式可分四大類，分別為：固定床氣化爐、移動床氣化爐、流體化床氣化爐與其他形式之氣化爐。其中較為常見之氣化系統為固定床及流體化床氣化爐兩種類型，其中固定床氣化爐亦可區分為向上流(up-draft)、向下流(down-draft)及橫流式(side-draft)固定床等三種，至於流體化床氣化爐則包括氣泡式(bubbling)、循環式(circulating)、雙床式(twin)及挾帶床(entrained flow bed)氣化爐等四種類型。而目前已商業化的氣化爐主要為：向上流(up-draft)固定床、向下流式(down-draft)固定床、流體化床(Fluidized bed)和挾帶床(entrained flow bed)^[33-34]。

文獻研究指出生質物氣化反應生成一氧化碳及氫氣等氣態燃料，氣化所進行之化學反應大致可包括如下反應。

部分氧化反應	$C + 1/2O_2 \leftrightarrow CO$	$dH = -268 \text{ MJ/kg mole}$
完全氧化反應	$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	$dH = -408 \text{ MJ/kg mole}$
水氣(Water gas)反應	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	$dH = +118 \text{ MJ/kg mole}$
水氣轉移(Water gas shift)反應	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$dH = -42 \text{ MJ/kg mole}$
甲烷生成反應	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + O$	$dH = -88 \text{ MJ/kg mole}$

上述反應受到溫度、壓力及反應物濃度之變化而進行，產出之氣體其組成將受到氣化爐爐型及生質物特性影響，而氣體品質則受到不同氣化媒介、操作方法及處理操作條件之影響。下列為常見之影響氣體組成及品質之因素：

1. 氣化溫度

根據研究文獻結果顯示，下水污泥進行氣化處理之典型反應溫度，分別控制於 800℃~1,400℃，在不同反應溫度條件下，其氣化產生之合成氣最高可達 90wt.%，至於焦炭及焦油產率，最高分別可達 30wt.% 及 5wt.%^[35]。Nipattummakul et al.(2010)於下水污泥蒸氣氣化之研究結果指出，當氣化反應溫度 700℃，合成氣產率為 0.66g_{gas}/g_{sample}、氫氣之莫耳濃度為 46.90%，而當溫度增加至 1,000℃，合成氣產率及氫氣莫耳濃度則分別增加至 1.14g_{gas}/g_{sample} 及 56.09%，說明隨著氣化

溫度之增加，合成氣及氫氣產率亦隨之增加^[36]。De Andrés et al.(2011)研究指出高反應溫度，對於下水污泥氣化產 H_2 具有正面效益。而隨著氣化溫度之提昇，將可促進下水污泥於氣化處理過程，發生熱裂解反應、部分氧化反應($2C+O_2 \rightarrow 2CO$)、Boudouard 反應($CO+CO_2 \rightarrow 2CO$)，以及 CO_2 轉化反應($CO_2+CH_4 \rightarrow 2CO+2H_2$)等，致使 CH_4 及 CO 之氣體組成比例增加^[37]。

2. 氣化媒介

目前氣化技術應用之媒介通常仍為空氣，亦有研究應用氧氣/蒸氣(oxygen/steam)、氫化(hydrogenation)及催化蒸氣氣化(catalytic steam gasification)以提昇氣化反應之效果。文獻指出不同之媒介物質產生之氣體熱值亦不同，一般而言，應用空氣或是空氣/蒸氣(air/steam)產生之氣體熱值較低($4MJ/Nm^3 \sim 6MJ/Nm^3$)、應用氧氣及蒸氣之熱值居中($13MJ/Nm^3 \sim 18MJ/Nm^3$)，至於應用氫氣及氫化反應產生之氣體熱值最高，約在 $40MJ/Nm^3$ 。前述不同熱值之氣體燃料應用用途極廣，低熱值氣體可直接使用於燃燒系統或作為引擎燃料，而中高熱值氣體則可作為後續轉化成甲烷或甲醇之原料^[38-40]。

3. 生質物特性

McKendry(2002)研究歸納指出生質物之進料特性將影響氣化爐之反應，其中生質物特性包括水分含量、灰分含量、揮發性物質含量及進料顆粒粒徑大小。研究發現生質物之水分含量高於 30%，將造成著火困難及降低產氣之熱值，此係在燃燒/氣化反應前水分揮發時吸收熱量所致，同時高水分含量之生質物，將使熱解區內碳氫化合物不完全斷鍵，致使降低氧化區之到達溫度。此外，增加水分及 CO 含量藉由水氣轉移反應(water gas shift reaction)產生氫氣，依序再增加氣體中氫氣含量，藉由氫化作用產生更多的甲烷^[41]。

在氣化反應過程，若氣化溫度高於灰分熔化溫度，將易使氣化爐產生結渣問題，一般而言，若生質物含有 5% 以上之灰分含量，同時灰分中含有高量之鹼金屬及其鹽類，則將使灰分熔點降低，氣化爐內結渣問題將會更為嚴重。原料物質的顆粒大小依據爐床尺寸而定，一般典型值為爐床直徑的 10%~20%，當燃料顆粒過大將可能形成架橋作用，而妨礙進料之向下移動，當燃料顆粒較小，則較傾向阻塞氣體流動，致使壓差較高及氣化爐之緊急停爐等操作問題^[41]。另 Xie et

48 都市下水污泥轉換能源技術之回顧與評析

al.(2010)研究指出，廢水處理過程之厭氧處理程序，可改善產出污泥於能源轉化過程之產氣品質，厭氧/缺氧/好氧(A_2O)程序產出之污泥，其揮發分含量較活性污泥程序高，灰分含量則較活性污泥程序低。因此， A_2O 污泥之氣化產氣中之 CO 、 CO_2 、 H_2 、 C_mH_n 濃度，以及燃氣熱值(LHV_{gas})均較活性污泥高^[42]。

3.3.2 氣化技術之應用實績

目前國內外均已大型實廠之下水污泥氣化實廠操作經驗，其中主要國家包括日本、美國、德國及台灣等，以下就下水污泥氣化實廠營運資料(如表 4)，包括規模、處理流程及減碳效益說明如後。

表 4 各國下水污泥氣化處理廠營運資料彙整

國別		日本 清瀨市 ^[43-45]	美國 Sanford ^[43]	德國 Balingen ^[46]	台灣 ^[6]
商轉日期		2010	2009	2006	2011
氣化爐型		循環式流體化床	向上流式	流體化床	氣泡式流體化床
設備規模		100 ton/day	80 ton/day	230 kg/hr	100 ton/day
產氣組成	H_2 (%)	7~10	—	13.1	2~4
	CO (%)	9~13	—	8.1	5~7
	CO_2 (%)	10~12	—	16.7	17~28
	CH_4 (%)	4~9	—	2.1	2~3
燃氣熱值(MJ/m^3)		5~7	—	3.2	5~8
發電量		150 kW/day	—	—	—

1.日本

日本東京下水道局於 2007 年美國國際水處理設備及技術展覽會(WEFTEC)發表，清瀨縣於 2005~2007 年間完成一座規模為每日 15 公噸之下水污泥氣化示範廠，並成功運轉 3,400 小時之試驗^[43-44]。清瀨污泥氣化示範廠之污泥氣化流程(如圖 9)，係藉由乾燥設備將污泥乾燥至含水率約為 20%後，以循環式流體化床氣化爐處理，氣化過程產生之氣體，經氣體改質爐與空氣進行氣體重組反應產出合成氣體。前述經淨化後產出之合成氣體，後續將透過鼓風機或內燃機轉化成動

能或電能。另該示範廠產出之固相焦炭及洗滌塔冷凝水，則是送至氣化爐中的燃燒室中予以處理，而燃燒室產出之廢氣，則是通過袋式集塵設備後，即排放至大氣中。根據東京下水道局之運轉試驗結果指出，相較於傳統污泥焚化系統(800℃)，清瀨污泥氣化示範廠每年約可降低 17,000 t-CO₂ 之排放。整體而言，下水污泥氣化技術不僅可抑制溫室氣體排放，同時產出可供能源利用之可燃性氣體^[54]。

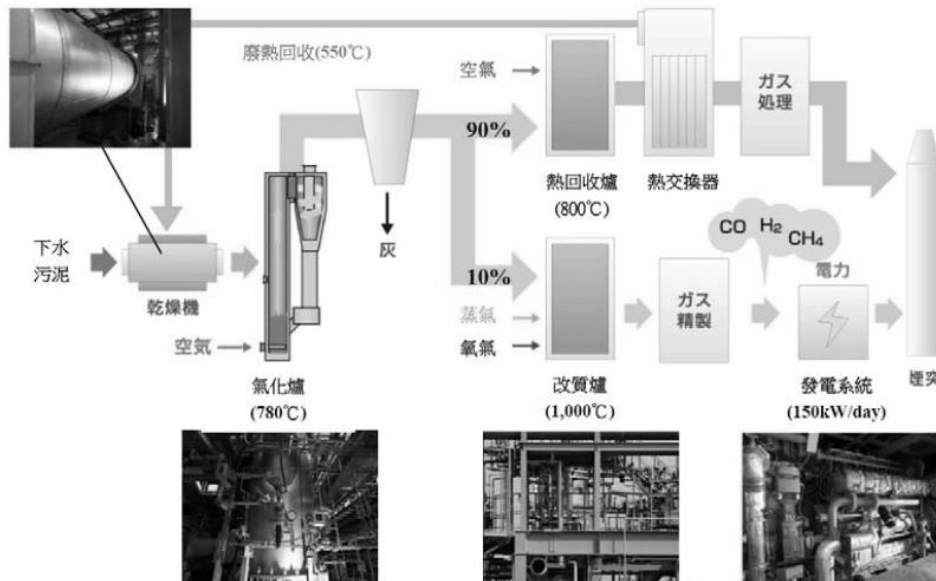


圖 9 日本清瀨縣下水污泥氣化流程^[47-49]

目前清瀨縣污泥氣化廠之處理規模已擴大至每日處理 100 公噸，並於 2010 年 7 月開始商轉。依據相關文獻資料指出，該廠分別於 2011 年及 2012 年期間，氣化爐之污泥處理量分別達該年度目標處理量之 80.6% 及 94.3%。另在系統操作維護部分，該廠於每年 6 月份將針對氣化爐爐體實施檢點或保養等作業，同時評估相關材料之更換維修頻率。而在系統操作條件設定部分，有鑑於污泥內含有低熔點金屬，於 850℃ 之氣化溫度操作條件，易產生熔融結焦現象，該廠將氣化操作溫度調降至 780℃，以抑制熔融物黏著床砂或灰分，及減少氣化爐內去流體化之現象發生^{[45] [47] [50]}。

2.美國

佛羅里達州 Sanford 之下水污泥氣化系統，係由 Maxwest 及 CHP 工程公司於 2009 年共同建造完成(如圖 10)。該廠興建之主要目的在於降低污泥處置費用，根據 Maxwest 公司之資料顯示，該氣化系統之設置(以 20 年營運期間計)，可替當地節省約 1 億 3 千萬美元之天然氣購買費用。該系統採用 Therna-Flite 公司之連續進料乾燥設備，以及向上流式固定床氣化爐，氣化反應後殘餘之灰分，將由氣化爐底部排出，產出之合成氣體則依序進到氧化爐及節熱器(Economizer)中進行燃燒及熱能回收。經節熱器之設計，係藉由熱媒轉換系統(thermal oil system)回收熱能，並透過熱媒泵浦(hot oil pump)將熱能供應至連續進料乾燥設備中。而產生之廢氣，則以袋式集塵設備及冷卻塔/洗滌塔處理後，再排放至大氣中^[43]。

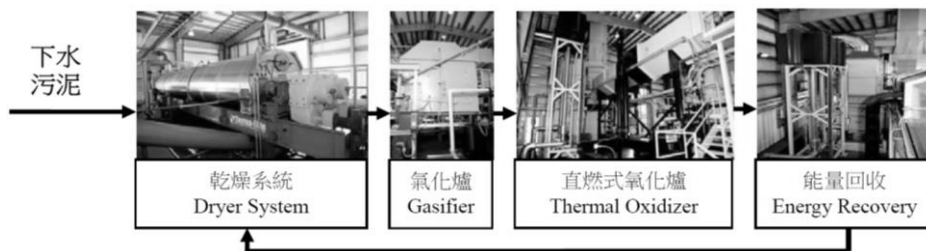


圖 10 美國 Sanford 下水污泥氣化處理流程^[51]

該氣化系統主要包括乾燥裝置、氣化爐及氧化爐等單元，相關設備所需之熱能，平時皆仰賴氣化過程產生之合成氣體。但當該系統重新啟動運轉時，則將透過外部燃料(天然氣)之供應，提供各單元設備啟動所需之能量來源，而一旦氣化爐爐體於運轉反應過程釋出能量及產出合成氣體後，氧化爐及節熱器即可有效回收利用反應過程產生之能源，以維持整體系統之運作。因此，若該氣化系統於正常運轉條件下，除部分系統仍須少量電力之供應外，幾乎可達到零熱能需求之狀態^[43]。

3.德國

德國 Balingen 污水廠為有效回收消化污泥之潛在能量，當地的廢水處理聯盟協議於污水廠內設置污泥氣化廠。而該示範廠於 2004 年由 Kopf 公司興建完成，

如圖 11 所示。該廠主要之設備單元包括太陽能乾燥裝置、流體化床氣化爐、氣動引擎單元及後燃燒室等，其中太陽能乾燥裝置為該廠最具特色之設備單元。該單元主要是仰賴太陽能將消化污泥之固體含量提昇至 70%~80%，惟該單元之操作時間或效率，較易受天候因素之影響，一般污泥之乾燥週期約為 2~8 週。至於氣化爐之操作溫度為 900℃，主要反應係透過通入預熱空氣之方式，將乾燥污泥轉化成固相之焦碳及氣相之可燃性氣體。氣化產出之合成氣體經回收、冷卻及乾燥後，隨即進入內燃機，並透過氣動引擎產生電力，產出之電力主要為供作污泥氣化及污水處理程序之用；而氣化程序所回收之熱能，則供污水廠之消化槽加熱之用。另該氣化系統，除於啟動之初，須以天然氣提供系統運轉所需之能源外，待氣化系統正常運作後，幾乎無外部燃料供應之需求^[43]。

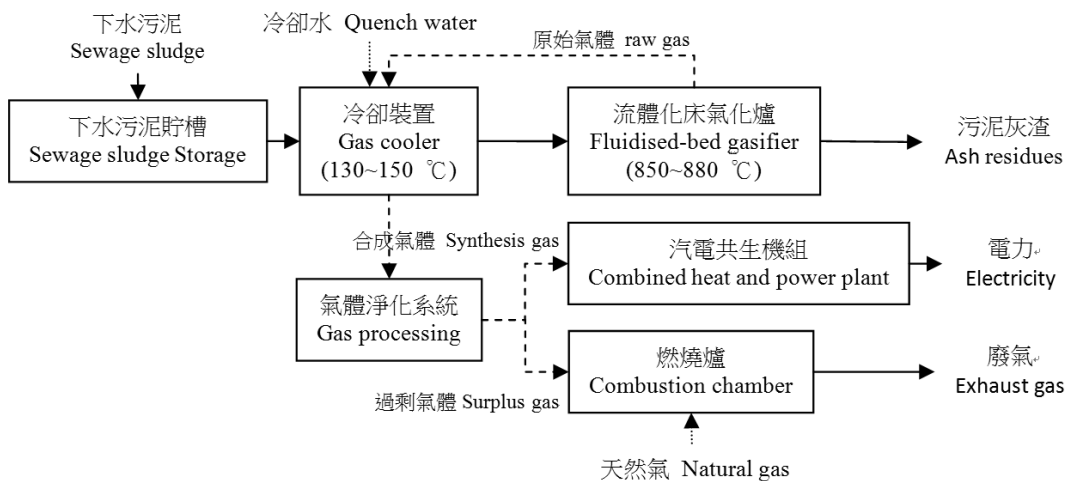


圖 11 德國 Balingen 下水污泥氣化處理流程^[46]

4.台灣

台灣過去對於污泥減量技術而言，大多以乾燥處理方式，將污泥之水份有效去除，並達到減量/減容之效果，然對於能源轉換技術之應用，則多數認為高含水率之污泥，並不利於能源轉換或應用。因此，應用氣化處理技術將下水污泥轉換為可利用能源，就現階段之台灣而言，實屬相當陌生且新穎之技術。然而隨著資源與能源永續利用之潮流趨勢變動下，下水污泥實應正視與找尋合適之能源轉換

技術，其中氣化處理技術即是一項已逐漸受到各界重視之發展技術。以台北市為例，目前除利用乾燥技術以有效達到污泥減量之效果外，台北市迪化污水處理廠亦已在其污泥資源再利用技術之選用評估，將氣化處理技術列為重要且值得開發之規劃技術之一^[52]，且目前應已獲行政院環保署再利用技術之審查核可。

台灣近幾年來已有部分學術或研究單位，開始著手進行氣化反應之相關研究，其中應用於氣化處理之生質物種類，舉凡煤炭、農業廢棄物及污泥等，均已具有相關之實驗室規模實績或應用。然就工程放大後之污泥氣化實廠實績，則首推利用漿紙污泥作為生質物，並將其氣化轉換為合成氣，該合成氣再以燃燒方式轉換熱能利用。該廠為一座利用流體化床進行氣化處理之系統，自 2011 年 8 月商轉迄今，氣化爐進料處理規模已於 2012 年 8 月，由原本的每日 50 公噸擴大為每日 100 公噸，進料熱值規模亦由 3MWth 提昇至 6MWth，現階段該氣化廠之蒸汽產生量約每小時 1 公噸。圖 12 為該氣化廠之處理流程，主要包括進料設備、流體化床氣化爐體、鍋爐、熱交換系統及空氣污染防治系統。基於該廠在處理漿紙污泥轉換為蒸氣能源之應用實績，江氏等人(2012)與該廠進行下水污泥氣化轉換能源之實廠可行性評估，其中污泥原料為臺中市福田水資源回收中心之污泥餅。根據實廠氣化處理 20 公噸之下水污泥試驗結果顯示， H_2 及 CO 組成比例分別約佔 2%~4% 及 5%~7%， CH_4 及其他碳氫化合物等可燃性氣體，則約佔 2%~3%。整體而言，下水污泥氣化後產生合成氣之熱值，約達到 $5MJ/Nm^3 \sim 8MJ/Nm^3$ ，該合成氣進入燃燒系統燃燒後產生熱量，經鍋爐及熱交換系統後，可提供下水污泥乾燥所須之熱量來源。整體而言，本處理系統僅於啟爐時，須要輔助燃料之供給外，後續乾燥所須之熱量來源，可利用其氣化產生之合成氣所提供，此技術不僅可節省污泥乾燥所須之熱量需求外，同時能源回收效益可達 50% 以上^[6]。

圖 13 為下水污泥氣化處理之反應示意圖，整體而言，氣化處理程序分別包括乾燥、裂解及氣化等程序，其中藉由乾燥程序，將高含水率之污泥，乾燥脫水至含水率符合氣化爐進料之要求，隨即將乾燥污泥加熱至 $400^\circ C$ ，並開始進行熱裂解反應。待氣化反應結束後($800^\circ C$)，下水污泥已完全轉換為焦炭、水蒸氣、焦油、可燃性氣體。其中下水污泥氣化程序產出之可燃性氣體，可透過燃燒爐及熱媒鍋爐，回收熱量，以供作污泥乾燥器所需之熱源。

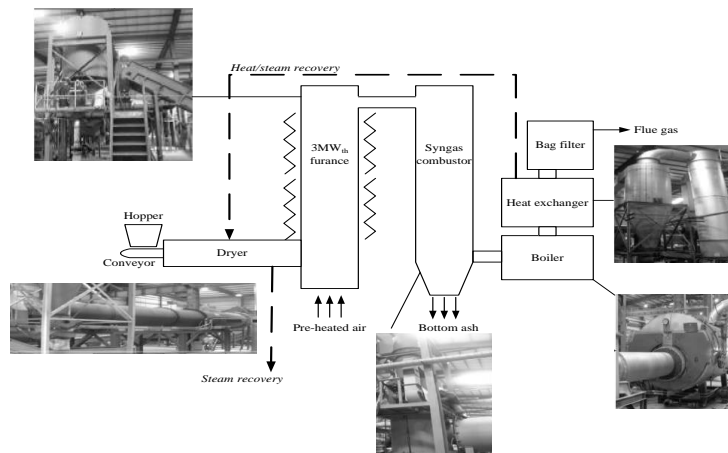


圖 12 台灣下水污泥氣化實廠設備流程圖^[6]

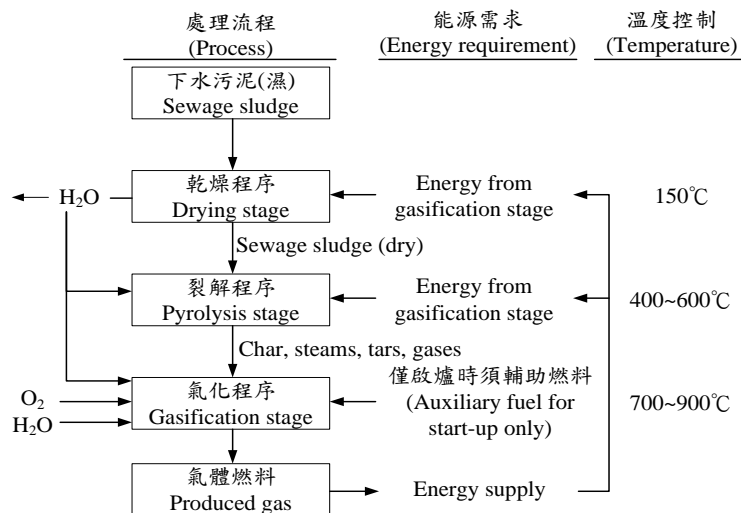


圖 13 下水污泥之氣化處理程序示意圖

3.4 下水污泥熱轉換能源技術之強弱機危(SWOT)分析

綜合前述相關文獻結果可知，現階段已有許多國家積極針對下水污泥之熱裂解、碳化及氣化技術進行研究，且部分國家已具有相關商業化應用實績。有鑑於國內目前對下水污泥轉換為能源之技術與應用發展，在欠缺前瞻性之思維與評估

考量下，大多持保守觀望之態度，較不利於後續推動相關能源轉換技術。考量下水污泥之能源轉換與利用技術推展之成功與否，與其技術可行性、經濟可行性、環境危害度、政策配合度及社會接受度等因素，均有極為密切之關係。本節嘗試利用強弱機危(SWOT)分析，分別針對國內現階段或未來可能之污泥處理處置方式，其中包括焚化、熱裂解、碳化及氣化等處理技術，根據前述之技術、經濟、環境、政策及社會等評估層面，進行綜合評估分析(如表 4 所示)。整體而言，相較於下水污泥焚化處理技術，熱裂解、碳化及氣化處理技術，其原料接受度、技術層次、產品特性及政策配合性等，實屬具有高度發展潛力之能源轉換技術。

表 4 下水污泥能源轉換技術之 SWOT 分析

處理技術	優勢(Strengths)	劣勢(Weaknesses)	機會(Opportunities)	威脅(Threats)
焚化	1.可併同國內之大型都市垃圾焚化廠處理。 2.具有回收熱能利用之價值。 3.可併同處理，來源廢棄物之接受度大。 4.衍生之灰渣併同垃圾焚化灰渣處理。	1.若新設處理設施之單位初設成本高。 2.既有都市垃圾焚化設施之配合意願不高。 3.新設污泥焚化廠之民眾抗爭及污染防治技術需求較高。 4.須妥善找尋殘餘物之最終去處。	1.在焚化處理設施之熱負荷規劃設計範圍下，可併同處理多種來源之廢棄物種類。 2.國內已有相關大型垃圾焚化廠之運轉經驗。	1.雖有熱能回收之效益，但易受其他能源技術之競爭。 2.原有焚化技術之刻板印象，影響民眾接受度。
熱裂解	1.國外已有相關應用實績。 2.兼具污泥處理及產生生質燃料之潛力。 3.具有高值化之產品應用價值與用途。 4.再生能源之重要發展技術。 5.可發展多元應用之再生產品。	1.國內雖已有輪胎裂解之實廠技術，然其商轉實績不佳。 2.國內再生能源技術之市場發展規模較小。 3.若新設處理設施之初設成本、操作維護成本等均較高。 4.技術層次與門檻較高。 5.需培養專業人員。 6.生質油品須進行改質/純化。	1.未來政府將持續推動再生能源之相關政策。 2.發展再生能源應用技術之潮流趨勢。 3.未來隨下水道普及後，所衍生之污泥產量大。	1.未來發展需與其他再生能源技術相互競爭。 2.對原有技術之可能衝擊與技術門檻較高。 3.原有技術之刻板印象，影響民眾接受度。 4.生質油品之再利用市場需求。

表 4 下水污泥能源轉換技術之 SWOT 分析(續)

處理技術	優勢(Strengths)	劣勢(Weaknesses)	機會(Opportunities)	威脅(Threats)
碳化	1.國外已有相關應用實績。 2.製備之碳化燃料，可作為取代燃煤之用途。 3.兼具再生能源之重要發展技術。 4.處理對象變化之操作彈性較大。 5.具有高值化之燃料應用價值與用途。	1.國內缺乏商轉實績。 2.碳化後產品需進一步拓展再利用市場。 3.國內再生資源市場小。 3.初設成本高。 4.需要專業人員之培養。	1.配合相關產業之替代能源規劃，可減少其化石燃料之需求。 2.配合政府推動之再生能源政策。 3.類似熱裂解技術，技術層次較低。 4.未來隨下水道普及後，所衍生之污泥產量大。	1.未來發展需與其他再生能源技術相互競爭。 2.對現有技術之衝擊與競合影響。 3.碳化後產品之再利用市場需求度。
氣化	1.國外已有應用實績。 2.再生能源之重要發展技術。 3.兼具污泥處理及產生生質燃料之潛力。 4.可併同處理，來源廢棄物之接受度大。 5.具有高值化之燃料應用價值與多元化用途。	1.國內商轉實績較少，目前僅有應用於漿紙污泥之氣化應用實績。 2.國內再生能源發展之門檻較高，不利於氣化技術應用發展。 3.初設及操作維護成本較高。 4.技術層次與門檻較高。 5.需要專業人員之培養。 6.氣態燃料不易運輸。	1.配合相關產業之替代能源規劃，可減少其化石燃料之需求。 2.配合政府推動之再生能源政策。 3.未來隨下水道普及後，所衍生之污泥產量大。 4.具有減緩溫室氣體排放，與改善氣候變遷之問題。 5.焚化廠屆齡除役後，可行替代技術之一。	1.未來發展需與其他再生能源技術相互競爭。 2.對現有技術之衝擊與競合影響。 3.新穎技術之應用，市場接受度有待突破。

四、都市下水污泥轉換能源技術應用之新思維

過去在講求污泥減量利用之角度而言，大多技術之選擇與評估，仍停留在應用污泥乾燥處理技術，期藉由污泥乾燥後，達到減量與資源或能源再利用之目的。然就現階段台灣下水污泥產量尚未急遽增加之際，為有效舒緩下水污泥無處可去之窘境，相關目的事業主管機關與環保主管機關，不妨共同思考藉由國內現有 24 座大型都市垃圾焚化廠之餘裕容量與操作經驗，將下水污泥併同都市垃圾焚化處理之可行性。就現階段下水污泥之妥善處理處置技術而言，併同焚化處理之技術規劃，不

僅考量兼顧協助妥善處理下水污泥與一般廢棄物外，同時在考量其設計熱值、處理容量及發電效益等因素後，不僅可減少下水污泥乾燥設備之設置投資成本，且達到資源/能源整合應用之雙重目的。

此外，根據國外文獻資料顯示，下水污泥進行能源轉換技術應用之新思維方向，大多朝向能源產生與併同處理之角度進行規劃。其中文獻研究指出，下水污泥中之水分含量，將有助於富氫之可燃性氣體產出，因此，將下水污泥利用適當之能源轉換技術，將可應用為全球熱化學產氫之重要原料來源。文獻指出濕污泥在高溫及高升溫速率之操作條件進行熱裂解反應，可促進揮發性物質進行蒸氣重組反應及焦炭進行部分氣化反應，故有利於富氫燃氣之生成^[35]。Xie et al. (2010)於下水污泥水分含量對其氣化特性影響之研究中指出，燃氣中之 CO_2 、 CH_4 、 H_2 濃度、燃氣熱值 (LHV_{gas})及水分產量，將隨著下水污泥水分含量之增加而增加，而 CO 及焦油產量則隨之降低。整體而言，該研究結果證實，下水污泥之水分含量，將有利於水氣反應 ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ ； $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$)、水氣轉移反應 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$)及烷化反應 ($2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$)之進行，對下水污泥之氣化反應過程，具有正面效益^[42]。另除控制下水污泥之水分含量外，透過添加合適之催化劑及控制操作參數等方式，亦可促進氣化過程蒸氣重組反應之進行，並提昇合成氣體之品質。

下水污泥併同其他類型廢棄物之處理規劃，亦是一項可行之處理對策，文獻指出下水污泥與生質物殘渣共同進行熱裂解或氣化處理，不僅可降低下水污泥之含水率，有效提昇下水污泥熱值，並可稀釋下水污泥中硫、氯及微量重金屬等物質含量。文獻利用農業廢棄物與下水污泥共同處理，因農業廢棄物具有低水分及低灰分含量之特性，因此，經適當摻混後，可透過熱處理技術將其轉換成高熱值之氣態或液態燃料^[35]。Folgueras et al. (2004)研究利用燃煤及下水污泥共同熱裂解，結果顯示下水污泥發生分解及液化反應之溫度較低，因此，熱裂解過程具有較佳之反應性^[53]。Pinto et al. (2007)研究指出燃煤氣化過程中添加下水污泥，將有助於能源轉化反應之進行，並提昇合成氣體之熱值^[54]。Zhang et al. (2009)於下水污泥與農業廢棄物共同熱裂解研究結果指出，添加稻稈可提供熱裂解過程中之揮發性物質含量，且下水污泥之重量損失速率，隨著稻稈的添加混合比例增加而增加^[55]。Pinto et al. (2008)於生質物-下水污泥共同氣化研究結果指出，添加生質物可提昇揮發性物質釋出速率，

並促進裂解及熱轉化反應，降低合成氣中碳氫化合物含量，因此，在下水污泥氣化過程添加生質物，對於合成氣之產製有正面效益。研究同時指出低含硫量生質物(稻稈)與下水污泥共同氣化過程，可降低氣體產物中 NH_3 、 H_2S 濃度^[56]。

為進一步瞭解下水污泥能源轉化技術，於下水污泥處理過程之能源需求情形，表 5 為針對氣化、碳化及焚化等技術進行外部能源需求之試算，結果顯示氣化處理程序所產出之可燃性氣體，經燃燒後產出之蒸氣，透過熱交換器，可回收再利用其熱量，作為下水污泥乾燥處理程序所需之熱量來源，因此，就氣化處理 1 噸之下水污泥而言，外部能源需求最低，僅需 127,490kcal。而下水污泥碳化及焚化技術，因處理系統需外部供給足夠之熱源，方能有效進行下水污泥之乾燥，若以下水污泥碳化為 30%或下水污泥乾燥至 25%後進入焚化爐為例，其外部供給之能源需求，分別為處理 1 噸下水污泥(80%含水量)需要供給 455,532kcal 及 467,654kcal。

表 5 下水污泥能源轉換技術之能源需求推估

處理技術		氣化	碳化	焚化
消化污泥	進料量 (kg)	1,000	1,000	1,000
	含水率 (%)	80	80	80
	熱值 (kcal/kg)	227	227	227
乾燥產物	質量 (kg)	286	286	267
	含水率 (%)	30	30	25
	熱值 (kcal/kg)	2,294	2,294	2,501
乾燥過程 ¹	水分蒸發量(kg)	714	714	733
	所需熱能(kcal)	455,532	455,532	467,654
製程過程 ²	回收熱能(kcal)	328,042	—	—
外部能源需求 ³ (kcal)		127,490	455,532	467,654

¹ 乾燥端熱量需求 (kcal)=水分蒸發量(kg)×{[(100-25)(°C)×1 (kcal/kg°C)]+539(kcal/kg)+[(150-100)(°C)×0.48 (kcal/kg°C)]}。

² 原物料氣化熱量回收 (kcal)=乾燥產物(kg)×乾燥產物熱值(kcal/3kg)×50%之能源轉換效率。

³ 外部能源需求 (kcal)=乾燥端熱量需求 (kcal)－製程熱量回收 (kcal)。

此外，為瞭解經厭氧消化處理前後之下水污泥，其氣化處理過程之能源需求情形，表 6 為針對消化及未消化污泥氣化所需能源之試算結果，推估結果顯示下水污

泥經厭氧消化處理後，下水污泥之熱值明顯降低，以致於污泥於氣化處理程序回收之熱量，不足以完全提供污泥乾燥(含水量 80%乾燥至 30%)過程所需之熱源，亦即仍需外部供給每噸下水污泥 127,490kcal 之熱量。至於下水污泥若未經厭氧消化處理，則其污泥中之有機碳尚未被分解，因此，熱值相對較消化後污泥為高。經推估結果顯示，若以未經消化之下水污泥進行氣化處理，其所產生之氣態燃料，經燃燒產熱後，其回收之熱量應可提供乾燥污泥使用，亦即就能量平衡之角度，當未經消化之下水污泥進行氣化處理，除在啟爐階段時，需外部供給熱量以供污泥乾燥使用外，後續相關乾燥所需熱源，應可自給自足。針對未來台灣併同下水污泥處理可行性之建議，本研究建議未來可考量利用都市垃圾中之廚餘進行併同處理，根據都市垃圾中廚餘之熱值分析結果，以臺中市下水污泥及廚餘相關物化特性及摻混比例進行能源需求推估，結果顯示在控制下水污泥與廚餘之摻混比例 1：1 條件下，不僅提高消化後下水污泥轉換能源之可行性，同時在污泥乾燥過程，亦不須額外添加輔助燃料，即可將污泥乾燥至含水率為 30%(如表 6 所示)。

表 6 不同污泥處理程序或併同廚餘處理對下水污泥氣化過程之能源需求推估

方案		消化污泥	未消化污泥	消化污泥 混合廚餘	未消化污泥 混合廚餘
原始進料	消化污泥(kg)	1,000	1,000	500	—
	未消化污泥(kg)	—	—	—	500
	廚餘(kg)	—	—	500	500
	含水率(%)	80	80	75	75
	熱值(kcal/kg)	227	484	532	660
乾燥產物	質量(kg)	286	286	357	357
	含水率(%)	30	30	30	30
	熱值(kcal/kg)	2,294	3,192	2,569	2,927
乾燥過程 ¹	水分蒸發量(kg)	714	714	643	643
	所需熱能(kcal)	455,532	455,532	410,234	410,234
氣化過程 ²	回收熱能(kcal)	328,042	456,456	458,567	522,470
外部能源需求 ³ (kcal)		127,490	-924	-48,333	-112,236

^{1,2,3} 計算基準與前表相同

五、結論與建議

- 1.現階段台灣下水污泥產量尚未急遽增加之際，為有效紓緩下水污泥無處可去之窘境，及考量現有大型都市垃圾焚化廠之餘裕容量與操作經驗，將下水污泥併同都市垃圾焚化處理，實不失為現階段解決下水污泥之重要方向，此不僅可減少下水污泥乾燥設備之設置投資成本，且可達到資源/能源整合應用之雙重目的。
- 2.未來對於都市下水污泥能源轉換技術之可行性與選擇評估，建議可參考先進國家對相關能源轉換技術選用與未來市場性之發展歷程，並逐步建置與發展本土化技術，以作為未來下水污泥能源轉換技術發展之參考。就台灣地狹人稠之環境特性，發展兼具處理處置廢棄物及產生綠色生質能源之重要發展技術，實有其必要性。
- 3.都市下水污泥之高含水率及低熱值之特性，對發展相關能源轉換技術，確有其亟待克服之能源需求問題。近年來國外相關先進技術，逐漸考量採用產生氣態燃料之氣化技術，作為其污泥乾燥所需熱量之來源，以減少外部供給燃料之所需。此技術發展之重要新思維，不僅逐漸受到相關國家之重視，同時亦已有相關實廠之應用與驗證實績。相信未來應用氣化轉換能源之技術，應會受到更多之關注與重視。
- 4.為解決都市下水污泥能源轉換過程之能源需求問題，與有機廢棄物併同處理之規劃，亦是現階段技術推動與政策擬定之重要考量因素。本文中已分別針對下水污泥是否經消化處理，以及是否併同都市垃圾中之廚餘處理，進行多種情境變化下之能源需求推估，初步結果得知，消化後污泥與廚餘共同氣化處理，其污泥乾燥之熱量來源，可由氣化產生之合成氣所提供，已不須外部之燃料供給。
- 5.都市下水污泥之能源轉換技術發展成功與否，除須考量技術之成熟度與政策之配合性外，未來能源應用市場接受度與廣泛性，亦將是一項重要的關鍵，因此，建議國內進行都市下水污泥能源轉換技術之可行性評估，應針對能源轉換後之產品應用用途及市場需求性，進行技術可行、經濟可行及環境可行性等整合評估，以期建立與發展本土化之能源轉換技術，供未來政府政策擬定與技術選擇之參考。

致 謝

本文承蒙行政院環境保護署及臺中市政府水利局提供經費補助及下水污泥樣品，進行有關下水污泥轉換合成氣技術之實廠驗證試驗，特此致謝。

參考文獻

- 1.內政部營建署，污水下水道第四期建設計畫(98 至 103 年度)核定本，2009。
- 2.內政部營建署全國公共污水處理廠資料管理系統，網頁資料，網址：
<http://sewagework.cpami.gov.tw/>，網頁截取日期：2013 年 12 月。
- 3.周明憲，都市下水污泥熱裂解行為之研究，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，桃園，2004。
- 4.陳逸凡，下水污泥堆肥施用過程有機物對重金屬與營養鹽移動性影響之研究，碩士論文，逢甲大學環境工程與科學學系，台中，2007。
- 5.王俊傑，KOH 活化法裂解都市下水污泥生成吸附劑之研究，國立中央大學環境工程研究所碩士論文，桃園，2008。
- 6.江康鈺，污泥類廢棄物轉換能源技術之實場應用可行性評估，行政院環境保護署環保創新科技研發計畫報告，EPA-101-U1U4-04-004，2012。
- 7.程淑芬，下水道污泥含磷調查及最佳磷回收量之研究，內政部營建署下水道工程處委託研究報告，2013。
- 8.江康鈺，臺中市下水污泥處理再利用先期規劃委託專業服務案期末修正稿，臺中市政府水利局委託研究報告，2014。
- 9.Wong, J.W.C., Fang, M., Li, G.X., and Wong, M.H., Feasibility of Using Coal Ash Residues as Co-Composting Materials for Sewage Sludge. *Environmental Technology*, 18, 563-568, 1997.
- 10.日本國土交通省，網頁資料，網址：<http://www.mlit.go.jp/>，網頁截取日期：2013 年 12 月。
- 11.Department for Environment, Food and Rural Affairs, Waste water treatment in the United

- Kingdom-2012, 2012.
12. European Commission Eurostat, Water statistics. [online] Available at: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>. Accessed March 2014.
13. Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety, Waste Management in Germany, 2013.
14. Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities, Biosolids Snapshot, 2011.
15. 曾迪華, 潘時正, 下水道污泥處理處置之現況與展望, 臺灣下水道工程實務研討會論文集, 2007。
16. Xu, C.C., Lancaster, J., 2012. Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery, Sustainable sanitation and water management, 187-212.
17. Pérez-Elvira, S.I., Nieto Diez, P., Fdz-Polanco, F., Sludge minimization technologies. Review in Environmental Science and Biotechnology, 5, 375-398, 2006.
18. Shao, J., Yan, R., Chen, H., Wang, B., Lee, D.H., Liang, D.T., Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Sewage Sludge by Thermogravimetry Fourier Transform Infrared Analysis. Energy & Fuels, 22, 38-45, 2008.
19. Pedroza, M.M., Sousa, J.F., Vieira, G.G.G., Bezerra, M.B.D., Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 105, 108-115, 2014.
20. Park, E.S., Kang, B.S., Kim, J.S., Recovery of Oils With High Caloric Value and Low Contaminant Content By Pyrolysis of Digested and Dried Sewage Sludge Containing Polymer Flocculants. Energy & Fuels, 22, 1335-1340, 2008.
21. Park, H.J., Heo, H.S., Park Y.K., Yim, J.H., Jeon, J.K., Park, J., Ryu, C., Kim, S.S., Clean bio-oil production from fast pyrolysis of sewage sludge: Effects of reaction conditions and metal oxide catalysts of reaction conditions and metal oxide catalysts. Bioresource Technology, 101, S83-S85, 2010.
22. Kim, Y., Parker, W., A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. Bioresource Technology, 99, 1409-1416, 2008.

62 都市下水污泥轉換能源技術之回顧與評析

- 23.Fonts, I., Azuara, M., Gea, G., Murillo, M.B., Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85, 184-191, 2009.
- 24.GVRD, Review of alternatives technologies for biosolids management. Report of the Greater Vancouver Regional District, Canada, 2005.
- 25.Bridle, T.R., Skrypski-Mantele, S., Experience and lessons learned from sewage sludge pyrolysis in Australia. *Water Science and Technology*, 49, 217-223, 2004.
- 26.金順志，廢棄物碳化資源回收處理技術，*工安環保報導*，第 21 期，pp.15-16，臺北，2004。
- 27.上田厚志，下水污泥の低温炭化燃料化システム，*日本エネルギー学会誌*，第 90 卷，第 3 期，pp. 206-211，2011.
- 28.椎屋光昭，石炭火力発電所におけるバイオマス資源活用取組み状況について，*社團法人日本下水道協會下水污泥資源利用協議會誌*，第 35 卷，第 130 期，pp.22-26，日本，2011。
- 29.財團法人下水道新技術推進機構，トピックス 下水污泥からバイオマス燃料→発電，*下水道機構情報*，第 1 卷，第 3 期，日本，2008。
- 30.日本東京下水道局，網頁資料，網址：<http://www.gesui.metro.tokyo.jp>，2013，網頁擷取日期：2013 年 07 月。
- 31.Kearney, R., Bolin, K., The New Slurrycarb™ Process, Under Construction in Rialto, CA, will Convert Biosolids to a Renewable Fuel. *Proceedings of the WEF Residuals and Biosolids Management Conference*, 9, 172-180, 2008.
- 32.Kearney, R., Patrick, G., Dooley, B., New Bioenergy Technology in Operation_The Rialto Slurrycarb™ Facility. *Proceedings of the WEF Residuals and Biosolids Management Conference*, 12, 1150-1161, 2010.
- 33.呂錫民，氣化技術，*科學發展月刊*，第 435 期，pp.62-66，台北，2009。
- 34.馬隆龍、吳創之、孫立，*生質物氣化技術及其應用*，化學工業出版社，北京，2003。
- 35.Manara, P., Zabaniotou, A., Towards sewage sludge based bio fuels via thermochemical conversion- A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 16, 2566-2582, 2012.
- 36.Nipattummakul, N., Ahmed, I.I., Kerdsuwan, S., Gupta, A.K., Hydrogen and syngas

- production from sewage sludge via steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 11738-11745, 2010.
- 37.De Andrés, J.M., Narros, A., Rodríguez, M.E., Air-steam gasification of sewage sludge in a bubbling bed reactor : Effect of alumina as a primary catalyst. *Fuel Processing Technology*, 92, 433-440, 2011.
- 38.Li, W., Li, W., Liu, H., Yu, Z., Influence of sewage sludge on the slurryability of coal-water slurry. *Fuel*, 88, 2241-2246, 2009.
- 39.Groß, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J., Kimmerle, K., Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification. *Waste Management*, 28, 1819-1826, 2008.
- 40.Nilsson, S., Gómez-Barea, A., Cano, D.F., Gasification reactivity of char from dried sewage sludge in a fluidized bed. *Fuel*, 82, 346-353, 2012.
- 41.McKendry, P., Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83, 55-63, 2002.
- 42.Xie, L., Li, T., Gao, J., Fei, X., Wu, X., Jiang, Y., Effect of moisture content in sewage sludge on air gasification. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 38, 615-620, 2010.
- 43.US EPA, Technology Assessment Report: Aqueous Sludge Gasification Technologies. United States Environmental Protection Agency, Greenhouse Gas Technology Center. EPA/600/R-12/540, 2012.
- 44.Takahashi, H., Study on Sewage Sludge Gasification. *Proceedings of the Water Environment Federation*. San Diego, California, 15-17, 2007.
- 45.石田貴，落修一，岩見博之，朽岡英司，清瀬水再生センターにおける汚泥ガス化炉施設の性能評価研究，2011 年度下水道新技術研究所年報，日本，2011。
- 46.Judex, J.W., Gaiffi, M., Burgbacher H.C., Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant. *Waste Management*, 32, 719-723, 2012.
- 47.青木知繪，清瀬水再生センター汚泥ガス化炉の技術評価について，社團法人日本下水道協會下水汚泥資源利用協議會誌，第 36 卷，第 137 期，pp.56-60，日本，2012。
48. Kawasaki, M., Sewage sludge gasification. *Highlighting Japan* 4 ,8 ,12-13, 2010.
- 49.日本新能源産業技術綜合開發機構，網頁資料，網址：<http://www.nedo.go.jp>，網頁截

取日期：2013 年 3 月。

- 50.中平雄二，下水污泥ガス化炉の導入について，社團法人日本下水道協會下水污泥資源利用協議會誌，第 35 卷，第 130 期，pp.59-63，日本，2011。
- 51.MaxWest Environmental Systems, Inc. [online] Available at: <http://maxwestenergy.com>. Accessed April 2013.
- 52.姚文城，污泥之減量技術與資源化以及有效利用，中國工程師學會會刊，第 86 卷，第 4 期，pp.82-89，台北，2013。
- 53.Folgueras, M.B., Diaz, M.R., Xiberta, J., Pyrolysis of blends of different types of sewage sludge with one bituminous coal. *Energy*, 30, 1079-1091, 2004.
- 54.Pinto, F., Lopes, H., Andre, R.N., Dias, M., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., Effect of experimental conditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasification. 1. Sewage sludge mixed with coal. *Energy Fuel*, 21, 2737-2745, 2007.
- 55.Pinto, F., Andre, R.N., Lopes, H., Dias, M., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., Effect of experimental conditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasification. 2. Sewage sludge mixed with biomass. *Energy Fuel*, 22, 2314-2325, 2008.
- 56.Pinto, F., Lopes, H., Andre, R.N., Dias, M., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., Effect of experimental conditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasification. 1. Sewage sludge mixed with coal. *Energy Fuel*, 21, 2737-2745, 2007.
- 57.Zhang, S., Yue, X., Yin, Z., Pan, T., Dong, M., Sun, T., Study of the co-pyrolysis behavior of sewage-sludge/rice-straw and the kinetics. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 661-666, 2009.
- 58.Pinto, F., Andre, R.N., Lopes, H., Dias, M., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., Effect of experimental conditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasification. 2. Sewage sludge mixed with biomass. *Energy Fuel*, 22, 2314-2325, 2008.

廢棄物及資源化

廢清洗液無害化處理技術

吳俊毅*、吳重霖**、段宇君***、陳智成****

摘 要

本技術針對教育機構事業廢棄物共同清除處理研究中心的廠內廢清洗液(包括進料端的物化處理系統、清洗反應桶槽、焚化處理系統中空氣污染防治單元產生的多股廢清洗液等)進行無害化處理。長期統計本廠廢清洗液月產生量約 10~20 噸，由於種類複雜(包含廠內多股清洗液，皆屬有機與無機混合之多種重金屬鹽類)，增加廠內後端廢水處理複雜度與操作負荷，針對有機與無機的廢清洗液，本技術結合 Fenton 斐頓氧化法(有機)與濕法冶金(無機，Ferrite 鐵氧磁體法或 Goethite 針鐵礦法)處理流程，加上國內對於廢清洗液處理，隨著廠內符合節能減碳目標、相關法規與降低處理成本之發展，技術整合角色亦逐漸加重，廢清洗液無害化已成為發展標的。藉由 Fenton 斐頓氧化與濕法冶金之整合技術處理廠內多股廢清洗液，降低廢水操作負荷與處理成本。廢清洗液處理除達成無害化目標，也需考量資源化產物去處與其他應用途徑，包括鐵氧磁體與針鐵礦化的再生產物(Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)。

【關鍵字】廢清洗液、斐頓氧化、濕法冶金

*遠東科技大學 機械工程系 環保材料中心 助理教授

**成功大學 環境資源研究管理中心 廠長

***成功大學 環境資源研究管理中心 副廠長

****遠東科技大學 機械工程系 環保材料中心 特聘教授

一、前言

環資中心資源回收廠為教育機構事業廢棄物共同清除處理研究中心(簡稱本廠)，經由物化、焚化及電漿熔融等 3 種處理系統的實廠整合運作，將所有廢棄物的毒性安定化，過程中產生多股廢清洗液待處理。廢清洗液包括進料端的物化處理系統、清洗反應桶槽、焚化處理系統中二次空污防制單元產生的多股廢清洗液(陰井)等。統計本廠月產生量約 10~20 公噸廢清洗液，種類複雜(包含多股清洗液，屬有機與無機混合之重金屬鹽類)，增加後端廢水處理複雜度與操作負荷，國內對於廢清洗液處理，隨著廠內符合節能減碳目標與相關法規、政策以及降低處理成本，廢清洗液無害化已成為首要目標。

目前急需處理的廢清洗液分為 2 類，包括清洗實驗室廢液空桶所產生的清洗液與洗滌焚化飛灰的清洗液，合計每月廠內約產生 12~16 噸的廢清洗液。

1. 針對廠內廢液空桶破碎前之清洗流程所產生的廢清洗液，統計每月近 4~6 噸產生量，暫存於儲存槽內。
2. 針對廠內焚化飛灰(Fly ash)，包括一次灰、二次灰、與袋式集塵器所產生的清洗廢液，統計每月約 8~10 噸產生量，暫存於陰井。

有鑑於廠內廢水處理複雜度與操作負荷，本技術對廢清洗液進行特性探討，藉由 Fenton 斐頓氧化與濕法冶金(鐵氧磁體法 Ferrite Process 或針鐵礦法 Goethite Process)技術，進行多股廢清洗液實驗，降低廢水操作負荷與處理成本。

二、文獻回顧

2.1 斐頓法(Fenton Process)處理難分解有機廢清洗液

Fenton 程序為高級氧化處理程序之一，原理以二價鐵鹽(Fe^{2+})與強氧化劑(雙氧水， H_2O_2)在酸性條件下，衍生具強氧化能力的氫氧自由基($\cdot\text{OH}$)，且 Fe^{2+} 被氧化成為 Fe^{3+} ，兩種鐵離子都具有混凝能力，在 Fenton 程序中兼具有催化 H_2O_2 氧化及混凝的雙重處理功能。直到 1975 年 Fenton 反應機制被 Walling 修飾得更加完備，反應式如(2-1)至(2-8)所示，其中反應式(2-5)與(2-7)為二價鐵與三價鐵的競爭反應，

促使氧化能力降低的關鍵反應式：



2.2 濕法冶金的鐵氧磁體法(Ferrite Process)處理含重金屬廢清洗液

鐵氧磁體廢水處理技術屬濕式冶金中的化學沈澱法，該技術處理對象包含鐵(Fe)、錳(Mn)、鎳(Ni)、鋅(Zn)、鉻(Cr)、砷(As)、鎘(Cd)等多元重金屬離子，亦廣泛應用於礦區排放水、實驗室廢水、金屬表面處理業產生的廢水(電鍍、不鏽鋼製程)等重金屬廢水處理，鐵氧磁體法可處理重金屬離子濃度高達 20,000mg/l，並將有害重金屬離子嵌入晶格結構中，使無害化、安定化並符合 TCLP 毒性溶出試驗標準。由內野等人提出鐵氧磁體反應之氧化還原電位(ORP)變化可由式(2-9)表示：

$$E = E^0 + (RT/F) \ln \left[\frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \right] + E(\text{DO}) \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

式中符號：

E^0 ：標準電位(volts)

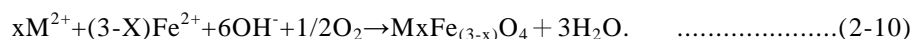
R：氣體常數(1.98 cal/K-mole)

T：絕對溫度(K)

F：法拉第常數(2,3061 cal/mole-volt)

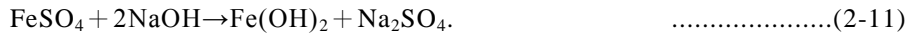
$E(\text{DO})$ ：溶氧電位(volts)

鐵氧磁體產物(magnetite product)可當顏料、塗料、磁性材料、空氣吸附材等資材化再利用，總反應式如(2-10)：

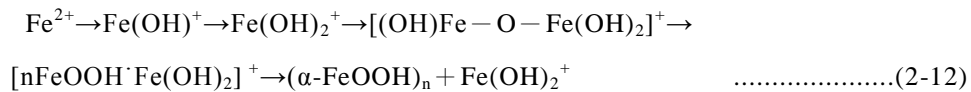


2.3 濕法冶金針鐵礦法(Goethite Process)處理含重金屬廢清洗液

由於針鐵礦(α -FeOOH)為針狀結晶，具比表面積大與陽離子交換能力高等優點，可作為良好的吸附材、針狀鐵粉及 δ -Fe₂O₃原料。針鐵礦化反應如(2-11)：



鐵系氫氧化物沈澱過程中在不同的鹼添加量、曝氣速率及溫度條件下，將產生不同反應過程，生成沉澱物隨著反應過程分別獲得 α -FeOOH、 γ -FeOOH、 δ -FeOOH、Fe₃O₄、 γ -Fe₂O₃ 及 α -Fe₂O₃ 等不同晶相氧化鐵產物。針鐵礦化反應形成過程，包括：中和、氧化、聚合、聚合鏈增長與形成後鏈中斷等，總反應式如(2-12)：



Hanada 和 Kuma 於 1976 年提出，在強鹼條件下氧化 FeCl₂ 可生成 α -FeOOH，於酸性下反應可製得 γ -FeOOH，中鹼性(8<pH<11)下主要產物為 Fe₃O₄。Frini 和 Maaoui 於 1997 年也指出 FeCl₂ 很難製成 α -FeOOH，多數製成棕色的 γ -FeOOH。在鹼性操作條件下製備針鐵礦需添加大量氫氧化鈉，且合成產物需大量水清洗使溶液 pH < 8.0 以除去鹽份；相對於在酸性條件下製備只需添加少量液鹼。

依照上述理論，Kiyama 等人對濕式氧化法製造各種鐵系結晶相生成條件做一系列之探討與研究，瞭解含 Fe 離子水溶液添加鹼液，在不同反應溫度所生成之沉澱物與生成條件之相關性，如所圖 1 示。由相圖中欲合成各種鐵系結晶相必須適當控制溫度及 R 值（2[OH⁻]/[SO₄²⁻]），在低溫時 R 值過高或過低時，易有 α -FeOOH 及 γ -FeOOH 之雜相共同形成，因此必須控制不同的 R 值與反應溫度，才能形成所需的晶相。

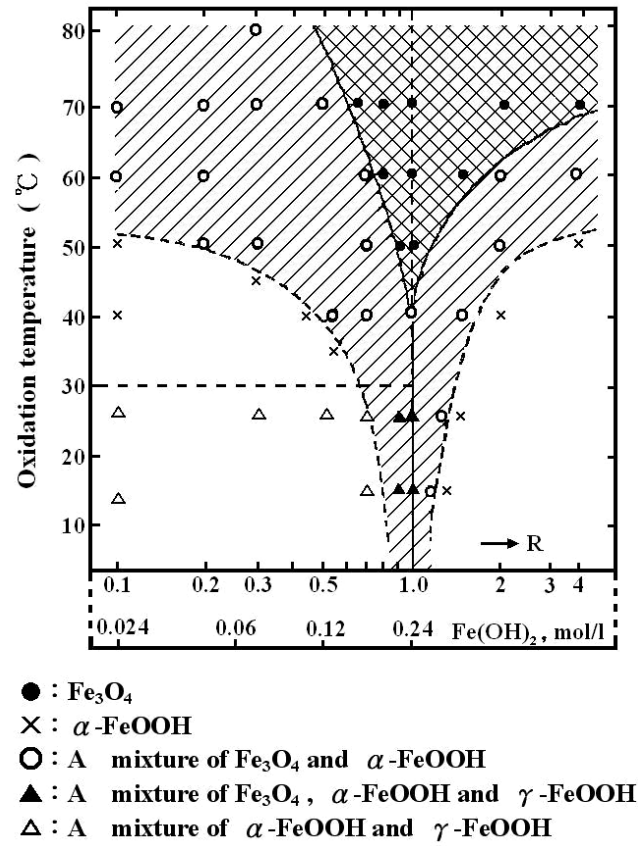


圖 1 形成鐵氧磁體之氧化條件

2.4 國內外文獻彙整

國內外文獻彙整 1

(No.)文獻	(1)Ambient-temperature synthesis of metal-bearing ferrite: how and why?	(2)Chromium removal from aqueous solution by the ferrite process
文獻出處	Journal of Alloys and Compounds 290(2000) pp.129-136	Journal of Hazardous Materials B109(2004) pp.71-77
作者/國家	Oscar Perales Perez et al. (Tohoku University, Japan)	Mehmet Erdem et al. (Turkey)
處理對象	Zn	Cr ³⁺
操作條件	r=Fe/Zn mole ratio=0~10 (FeSO ₄ •7H ₂ O) (ZnSO ₄ •7H ₂ O) Temp.=(Ambient) pH=11.0 (KOH) Constant flow-rate=/min Solution volume=500 ml	r=Fe/Cr ³⁺ weight ratio=10~16 (FeSO ₄ •7H ₂ O) (K ₂ Cr ₂ O ₇) Temp.= pH=9.0 (H ₂ SO ₄ & NaOH) air flow-rate=0~250 ml/min Agitation=300 rpm 1 Hr
分析儀器	XRD、Ms、EXAFS、FT-IR、HRTEM	AA、XRD、TCLP
重點/結論	1.r=2→Ms=2.1emu/g、 r=10→Ms=62.6emu/g 2.(Zn _x Fe _{1-x})O•Fe ₂ O ₃ 3.The EXAFS analyses→the configuration of the Zn and Fe atoms in the ambient-temp. ferrite is almost the same as in the ceramic Zn-ferrite produced at . Zn atoms were fully incorporated in the ferrite structure and occupied the tetrahedral-sites.	The major advantages of the process are: effective chromium removal small volumes of sludges separation ease due to magnetic property of sludges low dissolution levels of sludges formed
附註	1.Synthetic(simulated) wastewater 2.Monitor by ORP 3.XRD indicates that zinc sulfate (JCPDS 35-910) zinc oxide (JCPDS 36-1451)	Synthetic(simulated) wastewater TCLP test Cr ₂ FeO ₄

國內外文獻彙整 2

(No.)文獻	(3)Characterisation of solid residues obtained on removal of Cr from waste water	(4)Optimization of the operational variables of a medium-scale reactor for metal-containing wastewater purification by ferrite formation
文獻出處	Journal of Alloys and Compounds 335(2003) pp.203-209	Journal of Water Research Vol.(32) No.(10) (1998) pp.3055-3061
作者/國家	E. Barrado et al. (Spain, Mexico)	E. Barrado et al. (Spain)
處理對象	Cr^{3+}	15 metals
操作條件	$r=\text{Fe}/\text{Cr}^{3+}$ molar ratio=3~20 $(\text{FeSO}_4 \bullet 7\text{H}_2\text{O}) (\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \bullet 9\text{H}_2\text{O})$ pH=10.0 (H_2SO_4 & NaOH) Agitation=560 rpm 1 Hr	$r=\text{Fe}^{2+}/\text{Mt}$ molar ratio=15 $(\text{FeSO}_4 \bullet 7\text{H}_2\text{O}) (\text{ZnSO}_4 \bullet 7\text{H}_2\text{O})$ 2.Temp.=(Ambient) 3.pH=11.0 (KOH) 4.Constant flow-rate=/min 5.Reactor volume=5 L
分析儀器	AA(ICP)、XRD、XRF、FT-IR、DSC	ICP、XRD、EXAFS、FT-IR、HRTEM
重點/結論	$r=\text{Fe}/\text{Cr}^{3+}$ molar ratio>3 $\text{Cr}^{6+} \rightarrow$ to reduce Cr^{3+} acidified with & Fe^{2+} Cr removal efficiency > 99.9%	1.Air flow、stirrer rate、temp.and treatment time were chosen as the control factor. 2.In a wide range of applications of ferrite products, such as adsorbents for toxic gases(H_2S), pigments for anticorrosion paints, toner cartridges for printers, etc.
附註	Synthetic(simulated) wastewater $\text{Cr}_x\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_{2-x}^{3+}\text{O}_4$, $0.09 < x < 0.59$	1.References From 1977~1991 the optimal conditions:(1)pH=9~12 (2) $r=10\sim 20$ 3)temp.=60~80℃ 2. EDTA

國內外文獻彙整 3

(No.)文獻	(5)Ambient-temperature precipitation of Zn ions from aqueous solutions as ferrite-type compounds	(6)Fundamental Study of an Ambient Temperature Ferrite Process in the Treatment of Acid Mine Drainage
文獻出處	Hydrometallurgy 63(2002) pp.235-248	ES&T 30(1996) pp.2604-2608
作者/國家	Oscar Perales Perez et al. (Tohoku University, Japan)	Weixing Wang et al. (Canada)
處理對象	Zn	Ca^{2+} 、 Zn^{2+}
操作條件	1. $r=\text{Fe}/\text{Zn}$ mole ratio=2~10 ($\text{FeSO}_4 \bullet 7\text{H}_2\text{O}$)($\text{Fe}=658.7\text{mg/L}$) ($\text{ZnSO}_4 \bullet 7\text{H}_2\text{O}$) 2.Temp.=25°C (Ambient) pH=11.0 (KOH& H_2SO_4 Constant flow-rate=0.1 L/min Agitation=500 rpm	$r=\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=1.75$ gave the highest metal recovery as ferrites and the greatest saturation magnetization, lowest leachability and coarsest particle size. ($\text{FeSO}_4 \bullet 7\text{H}_2\text{O}$) simulated AMD Temp.=ambient temp. 3.pH=9~11(5N or 1N NaOH)
分析儀器	ICP-AES、XRD、SEM、EPMA	AA、XRD、Ms、Laser-particle sizer
重點/結論	$R_s=S/(\text{Fe}/\text{Zn})$ decreased with increasing $\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$, $0 < x < 1$ Increasing the Fe/Zn mole ratio enhanced the stability of the corresponding ferrite. The formation of the ferrite at low temp. permitted the removal of Zn ions to sufficiently low conc.	radius: $\text{Zn}^{2+}=0.82\text{\AA}$ $\text{Fe}^{2+}=0.83\text{\AA}$ $\text{Ca}^{2+}=1.14\text{\AA}$ AMD using AT.FP. is effective, with Fe:5880→0.2 ppm, Zn :2760→25 ppb, Al:704→0.9 ppm.
附註	Synthetic(simulated) wastewater Monitor by ORP	Synthetic(simulated) wastewater Ms decreased with increasing Ca^{2+} from 0ppm→78emu/g, 100ppm→50emu/g, 400ppm→30emu/g

國內外文獻彙整 4

文獻出處	(7)國內-1(1993 年) 蔡敏行教授、 黃志良 成大資源所	(8)國內-2(2003~2007 年) 成大資 源所
1.藥劑(等級)	Copperas(EP 級) NaOH(EP 級)	Copperas(EP、工業級) 45%工業用液鹼
2.濃度比例	Copperas=0.1~0.5M	Copperas=0.1~0.5M 45%工業用液鹼
3.R 值/體積比	8~20	12~20
4.操作溫度℃	40±2	40±2
5.攪拌速度(rpm)	100~180	240
6.曝氣量(LPM)	4(D.O.) 4(N ₂)	4(D.O.)
7.反應體積(L)	1(2)	1(2)
8.反應時間(hr)	3~4	2~4
9.pH 或 ORP(mv)	-800 ~ -200	-950 ~ -150
10.水洗/ 過濾方式	調整 pH 至中性	反覆加水稀釋攪拌調整 pH \approx 8，再 過濾調整
11.軸長比/ 其他	11(R \uparrow ，軸長比 \uparrow)	<50℃烘乾、研磨與分析

三、研究方法

探討環資中心廢清洗液之最佳前處理程序，並以此為基礎，提供未來放大處理量之模廠模組設計建議，研究架構流程如圖 2 所示，研究方法如下：

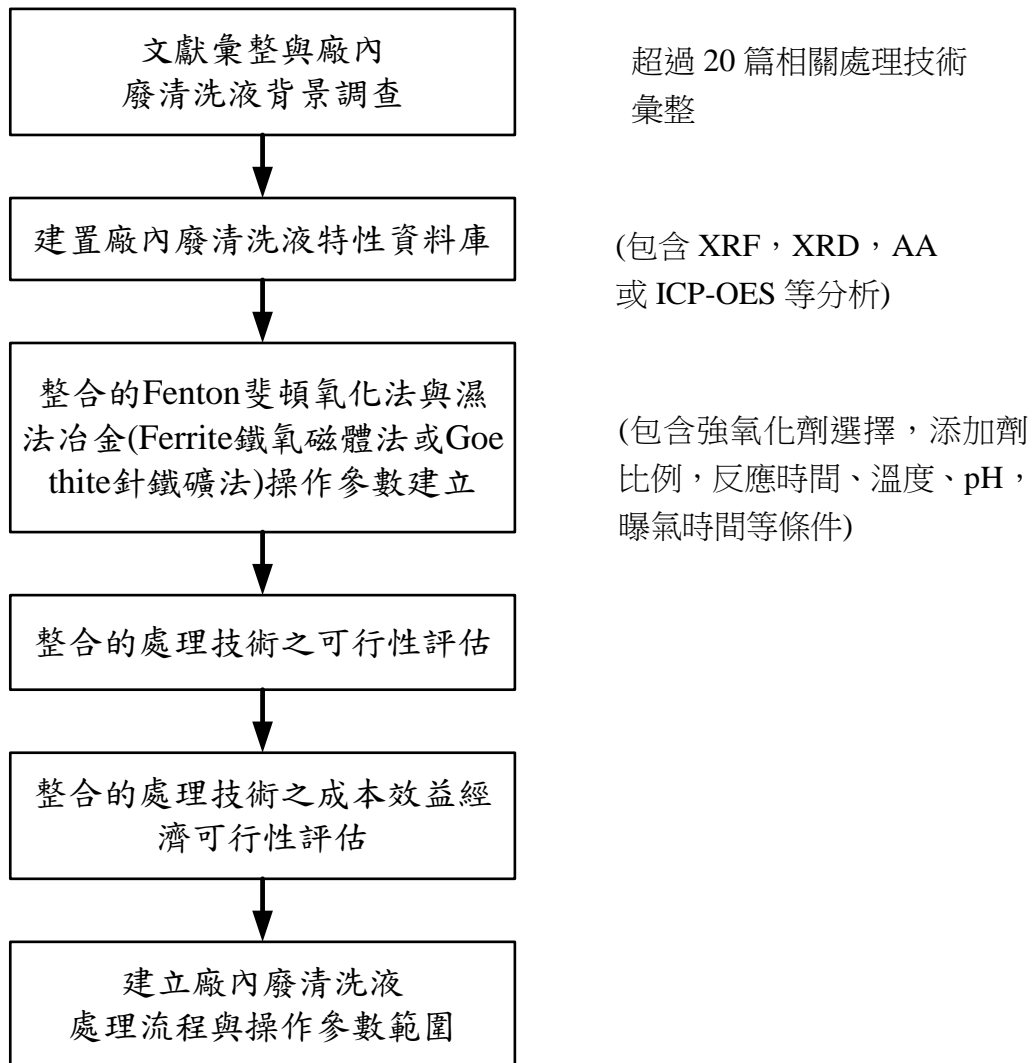


圖 2 研究架構流程圖

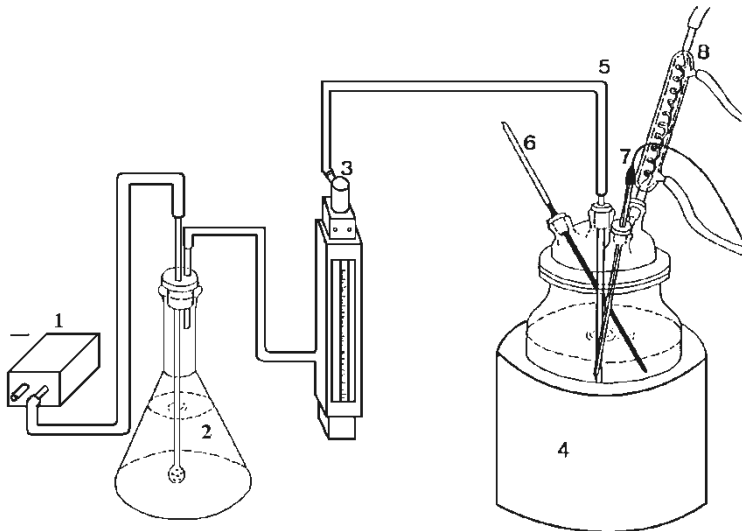
3.1 廢液處理技術彙整及廢清洗液背景調查與成分分析

本技術針對廢清洗液進行定性、全量與無害化產物分析等：

- 1.廢清洗液定性分析(XRF，X-ray 螢光分析儀)。
- 2.廢清洗液全量分析(AA 原子吸收光譜儀或 ICP-OES 感應耦合電漿原子發射光譜儀)。
- 3.無害化處理後產物分析(SEM 電子顯微鏡或 XRD 晶相結構分析)。

3.2 實驗室設備

裝置設備圖如圖 3 所示，包括 2 公升容量之五口燒瓶反應器、空氣壓縮機、空氣流量計、電熱式加熱器(含溫度計與加熱包)以及 pH 與 ORP(氧化還原電位)電極。



- | | | | |
|---------|---------|----------------|-------|
| 1.空氣壓縮機 | 2.空氣洗滌瓶 | 3.空氣流量計 | 4.加熱包 |
| 5.通氣管 | 6.溫控器 | 7. pH 與 ORP 電極 | 8.冷凝管 |

圖 3 實驗室設備圖

3.3 處理技術(整合 Fenton 斐頓氧化法與濕法冶金)操作參數建立

實驗 Fenton 斐頓氧化法與濕法冶金法之整合無害化處理操作參數，包括：

1. 添加藥劑的濃度或添加比例(R 值為二價鐵鹽與重金屬離子濃度之比值)。
2. 各階段之反應酸鹼值 pH。
3. 整體操作時的反應時間與反應溫度。
4. 曝氣量等條件。

四、結果與討論

4.1 廢清洗液之採集及水質分析

本實驗進行 5 次廢清洗液採集樣品及定性半定量分析，如表 1 所示。本廠破碎桶槽廢清洗液含氯量高，焚化飛灰廢清洗液除氯離子外，亦有鐵、鈣、矽等元素。初步檢測發現 2 處廢清洗液幾次採樣結果成分穩定，水質分析項目包括 pH、氧化還原電位(ORP)、電導度(EC)、化學需氧量(COD)、總有機碳(LOC)之廢清洗液分析結果如表 2 所示。由表 2 可知，廢清洗液水樣 pH 值均為鹼性，ORP 皆為負值，電導度值、總有機碳與化學需氧量值很高，由此可知水樣中有機物與無機鹽類含量很高，須經適當無害化處理。針對 3 月 29 日採樣分析數據 LOC 與 COD 值與其他採樣結果不同之處，已進一步確認，為測試過程稀釋倍率錯誤導致檢測數值誤差過大所致。由表 3 可知，廢清洗液中鐵離子含量較其他離子高，運用濕式冶金法(鐵氧磁鐵法、針鐵礦法)皆需要鐵離子存在，故在進行此實驗時能將水樣中的鐵離子濃度降低並一併去除其他重金屬離子濃度，同時亦降低含鐵藥劑使用。由於測試結果發現廢水含高濃度之有機物與重金屬，故將採用 COD 對處理前後液體中有機污染物進行分析，結果如表 4 所示。

表 1 廢清洗液定性半定量分析

取樣日期	取樣點	主要成分			
		氯	鈣	鐵	矽
1 月 22 日	陰井	60,400	>6,329	>13,630	N.D.
	廢清洗液	30,380	N.D.	N.D.	N.D.
3 月 19 日	陰井	61,000	N.D.	N.D.	N.D.
3 月 29 日	陰井	23,220	>16,730	>15,310	>6,000
4 月 30 日	陰井	7,061	N.D.	>8,961	N.D.
5 月 28 日	陰井	16,870	N.D.	N.D.	N.D.
	廢清洗液	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
8 月 08 日	陰井	7,496	N.D.	N.D.	N.D.

*ND：Not detected

單位：mg/l

表 2 廢清洗液之水質分析結果彙整表

取樣日期	取樣點	pH	ORP(mv)	EC(S/cm)	TOC(mg/L)	COD(mg/L)
1 月 22 日	陰井	8.8	-144.3	94.1	4,390	8,900
	廢清洗液	11.05	183.9	145	540	7,300
3 月 19 日	陰井	13.88	-84.3	127.4	1,140	7,600
3 月 29 日	陰井	13.45	-120	103.8	4,320	7,300
4 月 30 日	陰井	13.35	-124.7	26.6	707	900
5 月 28 日	陰井	14.08	-100.9	30.6	— *	5,300
	廢清洗液	10.92	169.8	135	— *	470
8 月 8 日	陰井	13	-44.8	45.6	— *	2,060
8 月 14 日	廢清洗液	7.37	174	139.8	— *	200

*：分析儀器故障

表 3 廢清洗液之金屬離子濃度 ICP-OES 檢測結果

元素 取樣	取樣點	鈣	鎘	鉻	銅	鐵	錳	鎳	鉛	矽	鋅
1 月 22 日	陰井	377	2.18	377	21.7	2,220	36.0	215	30.4	7.13	112
	廢清洗液	15.7	N.D.	N.D.	0.424	0.096	0.058	0.485	0.020	3.68	0.062
3 月 19 日	陰井	35.8	0.390	188	12.1	774	14.8	97.8	5.19	29.1	33.8
3 月 29 日	陰井	297	0.119	52.2	3.39	661	21.3	51.7	1.57	22.8	19.6
4 月 30 日	陰井	42.7	1.22	77.0	7.00	915	20.1	103	18.0	22.0	24.4
5 月 28 日	陰井	7.77	0.100	5.73	0.935	35.2	0.956	5.47	0.936	7.96	3.21
	廢清洗液	34.4	0.016	N.D.	0.087	0.307	0.110	0.123	N.D.	10.7	0.067
8 月 08 日	陰井	12.3	N.D.	16.2	2.12	72	3.25	24.1	0.43	12.6	1.02
8 月 14 日	廢清洗液	12.2	N.D.	N.D.	0.030	0.012	0.073	0.232	0.064	4.8	0.048

單位：mg/L

表 4 試驗後 COD 的去除率

	原 COD (mg/L)		處理後 COD (mg/L)		COD 去除率 (%)	
	陰井	廢清洗液	陰井	廢清洗液	陰井	廢清洗液
FFP	2,060	200	124	20	94%	90%
GFP	2,060	200	89	32	96%	84%

*FFP：斐頓氧化法+鐵氧磁體法

GFP：斐頓氧化法+針鐵礦化法

4.2 整合之處理技術操作參數建立與結果

將破碎桶槽廢清洗液(通稱廢清洗液)與焚化飛灰廢清洗液(統稱陰井)之水樣分別進行 Fenton 斐頓氧化法與濕法冶金(鐵氧磁體法與針鐵礦化法),藉以去除二股廢清洗液中的有機物與重金屬無機物,使處理後產物(固體與過濾液)符合環保法規標準。無害化處理技術實驗結果較佳,操作條件彙整如表 5 所示。

表 5 較佳操作參數彙整表

實驗方法	參數設定
Fenton 斐頓氧化法 (去除有機物)	攪拌速率 200~400rpm、添加雙氧水 2~3%、添加硫酸亞鐵(二價鐵鹽, R 值>2)、pH<4(酸性條件)、反應溫度常溫、pH<4(酸性條件範圍內)、反應時間約 20 分鐘~ 60 分鐘。
鐵氧磁體法 (去除無機物)	接續 Fenton 斐頓氧化法 攪拌速率 200~400rpm、補充硫酸亞鐵(二價鐵鹽,R 值>4)、氫氧化鈉(45%NaOH,液鹼)調整 pH>10.5(鹼性條件)、曝氣量控制 4~6L/min、反應溫度 60~70℃、反應時間約 20 分鐘~ 120 分鐘(以 ORP 監測作為判斷製備鐵氧磁體反應終止指標,當 ORP 呈穩定狀態時,表示反應終了),形成尖晶石結構之四氧化三鐵黑色產物(Fe_3O_4)。
針鐵礦化法 (去除無機物)	接續 Fenton 斐頓氧化法 攪拌速率 300~500rpm、曝氣量 4~6L/min、補充硫酸亞鐵(二價鐵鹽)、調整 pH>12(高鹼條件)、反應溫度常溫、反應時間約 20 分鐘~ 220 分鐘(以 ORP 監測作為判斷製備針鐵礦反應終止指標,當 ORP 呈穩定狀態時,表示反應終了),直到反應完成形成黃色針鐵礦產物($\alpha\text{-FeOOH}$)。由於針鐵礦化完成後,需進行結晶相轉變,將 $\alpha\text{-FeOOH}$ 或是 $\beta\text{-FeOOH}$ 再生中間產物,再經由鍛燒後可得到褐紅色之氧化鐵(Fe_2O_3),以 400℃焙燒溫度 3 小時。

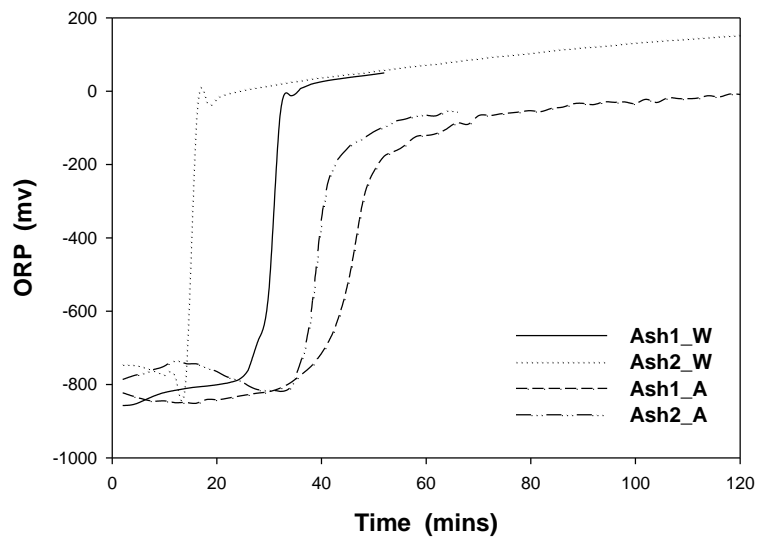


圖 4 鐵氧磁體法反應過程中之 ORP 變化

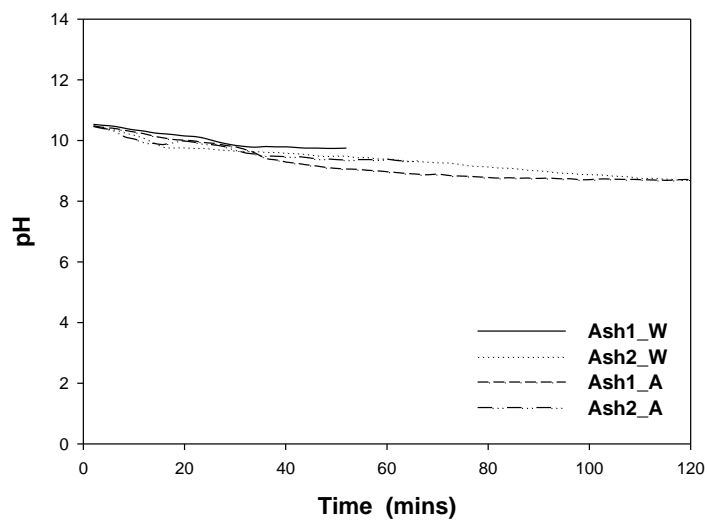


圖 5 鐵氧磁體法反應過程中之 pH 變化

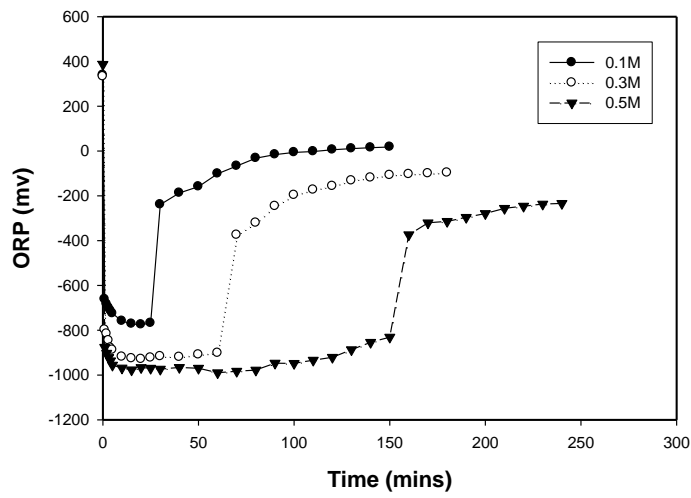


圖 6 針鐵礦法反應過程中之 ORP 變化

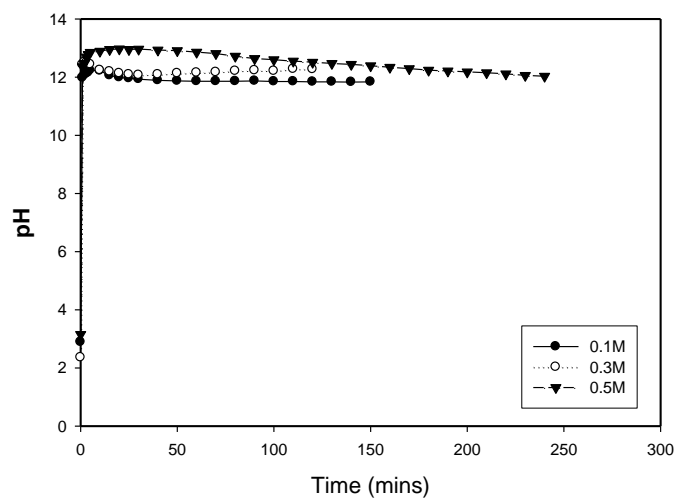


圖 7 針鐵礦法反應過程中之 pH 變化

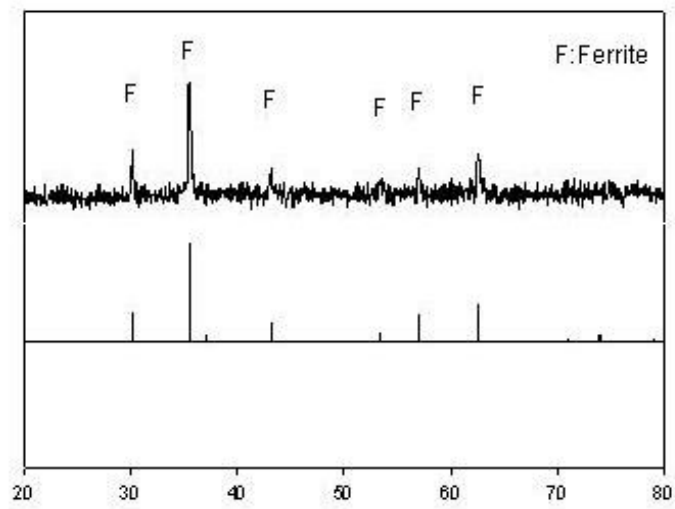


圖 8 鐵氧磁體再生產物之 XRD 晶相圖

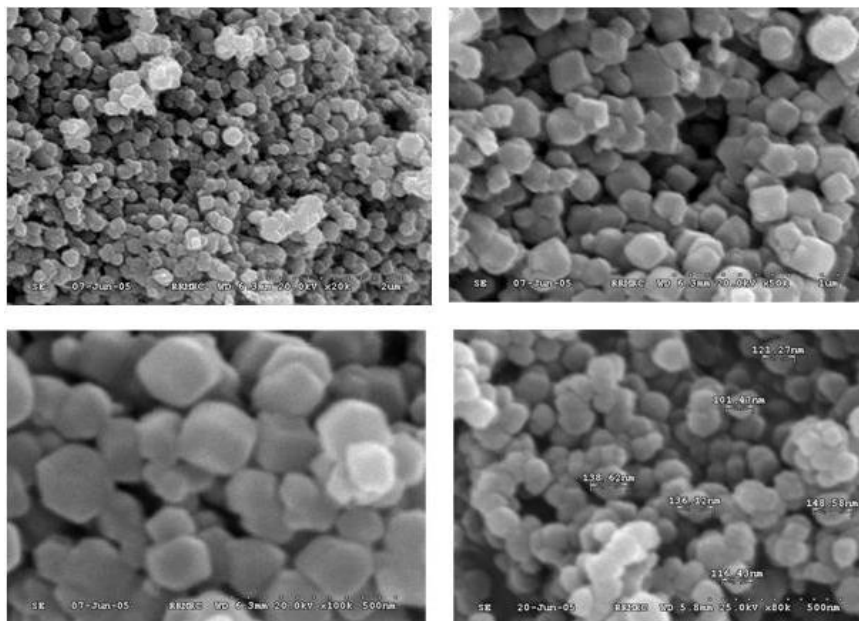


圖 9 鐵氧磁體再生產物之 SEM 顯微照片

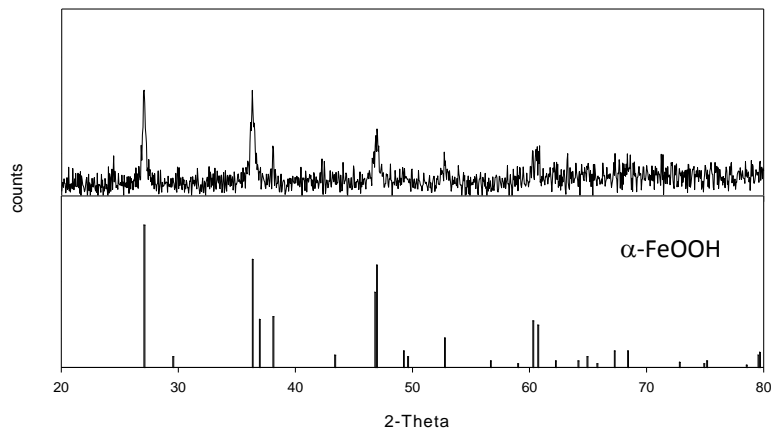


圖 10 針鐵礦再生產物之 XRD 晶相圖

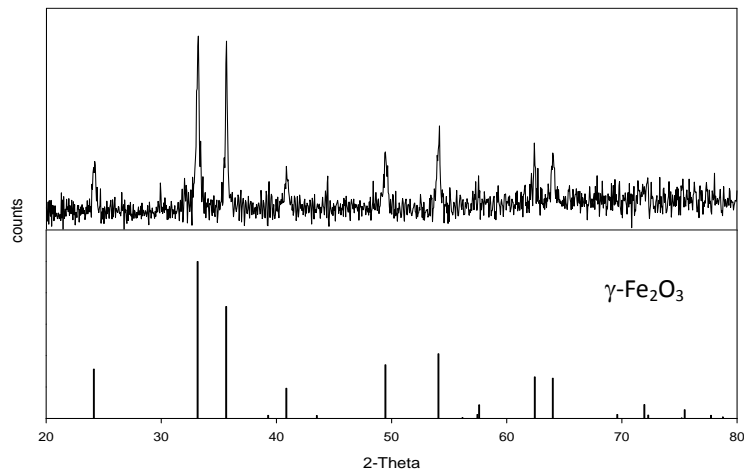


圖 11 針鐵礦再生產物經相轉變氧化鐵(γ -Fe₂O₃)之 XRD 晶相圖

五、整合之技術與成本效益經濟可行性評估

5.1 整合技術可行性評估

5.1.1 斐頓(Fenton)處理技術

斐頓處理技術處理對象多以難分解性有機物，如酚、氯酚、氯苯、硝基酚、硝

84 廢清洗液無害化處理技術

基苯及界面活性劑等，處理濃度可高達 175,000mg/l，雖然斐頓廢水處理技術對於染整廢水脫色處理效果不錯，可減低 UV/H₂O₂ 處理時有機物對 UV 光的吸收效應，但仍有條件限制，如鐵離子觸媒不足導致反應時間增長、鐵離子觸媒經化學混凝引起污泥等缺失，包括：

- 1.斐頓處理技術需在酸性條件下(pH=2~5)進行，針對廢清洗液，須調整至 pH<4 酸性條件下進行。
- 2.斐頓反應使用鐵離子藉由化學混凝處理去除，產生大量污泥。
- 3.廢水如含有重金屬離子，產生污泥在酸性條件下有重金屬溶出之虞。

5.1.2 濕法冶金的鐵氧磁體法

鐵氧磁體廢水處理技術針對重金屬廢水的處理亦為業界普遍運用，但該處理技術亦需要添加足量二價鐵及三價鐵離子等反應技術形成鐵氧磁體，並將有和重金屬離子嵌入晶格中，使重金屬離子無溶出污染之虞；藉由加入適量二價鐵鹽，經氧化後形成安定性高鐵氧磁體產物，且能通過毒性溶出試驗(TCLP)，由於具磁性，可作為磁性材料；但在廢水中所含低濃度的有機物卻會影響回收的鐵氧磁體產品磁性，因而大幅降低利用性。有鑑於過去採用單一斐頓廢水處理或鐵氧磁體廢水處理技術，導致無法一次處理有機物及金屬離子缺點及產生污泥及色度等問題，故藉由整合技術減少污泥產生量，並藉由系統整合適用於大部分工業廢水處理，彙整如表 6 所示。

表 6 整合技術之優缺點彙整表

整合技術	優 點	缺 點
斐頓(Fenton)處理技術	處理對象多以難分解性有機物(如酚、氯酚、氯苯、硝基酚、硝基苯及界面活性劑等)，處理濃度可高達 175,000 mg/l。	1.需在酸性條件下(pH=2~5)進行，若含重金屬離子，產生污泥在酸性條件下又有重金屬溶出之虞。 2.反應會產生大量污泥。
鐵氧磁體法(Ferrite Process)	針對多元金屬離子的廢水或污泥，處理之重金屬離子濃度高達 20,000 mg/l。可作為顏料、塗料與吸附材等應用。	廢水中所含低濃度的有機物會影響鐵氧磁體(Ferrite)再生產品磁性，大幅減低原料可利用性。

表 6 整合技術之優缺點彙整表(續)

整合技術	優 點	缺 點
針鐵礦法 (Goethite Process)	針對多元金屬離子的廢水、廢酸處理。 依據再生產物需求調整其酸性或鹼性的操作條件。	反應時間長，需大量水洗調整溶液 pH 值。
整合斐頓及鐵氧磁體廢水處理技術	整合斐頓及鐵氧磁體廢水處理技術減少處理單元及污泥產生量且可同時處理廢水中有機物，適用於大部分工業廢水之處理。	進行斐頓處理後廢清洗液成酸性，但濕法冶金技術須於鹼性條件下進行實驗，故需進行大幅度的 pH 值調整。

5.1.3 濕法冶金的針鐵礦法

實驗獲得的鐵氧磁體粉末或是氧化鐵粉末，再生產品資源化應用途徑經調查與相關資料彙整，產品進口平均價值以空氣吸附劑價格最高，顏(塗)料次之，若作為商業氧化鐵用途之價格相對為最低。但由於空氣吸附劑所需技術門檻更高，需經由混拌造粒、改質、披覆與純化等製程，因此目前評估經處理後的再生產品以商用氧化鐵與作為顏(塗)料最具市場應用可行性，彙整如表 7 所示。

表 7 再生產物之應用途徑與原物料進出口單價

應用途徑	氧化鐵	顏(塗)料	釉料	磁材	空氣吸收劑
進口價值	25~50	180~260	18~28	30~60	800~1,000
出口價值	16~38	80~100	20~45	20~82	—

資料來源：財政部關務署－歷年統計資料庫進出口彙整平均數據 (單位:\$NT 元/kg)

5.2 成本效益經濟可行性評估

資源廠內設置廢清洗液實廠經濟可行性評估，彙整如表 8 所示。

1. 預估資源廠每年產生的廢清洗液約 90 噸/年。

2. 設備及場地投資費用：

若依據目前每月費清洗液產生量 7.5 噸/月，預估資源化硬體設備投資約 60 萬新台幣，考量雙週批次處理，包括 5 噸暫存槽、4 噸具攪拌與加熱反應桶槽、5

86 廢清洗液無害化處理技術

噸清洗槽、板框壓濾機、管線(件)、空壓機、閥。攤提每月維修費用(2%)=1.2 萬元，換算每年 14.4 萬元。

3.設備操作及維護費用：估計每年攤提操作及維護成本約 44.48 萬元(14.4 萬元+22.8 萬元+0.24 萬元+7.04 萬元)

表 8 預估實廠化操作費用彙整表

工業用藥劑名稱	每年用量 (噸/年)	單價 (元/噸)	每年支出 (萬元/年)
硫酸亞鐵	6	18,000	10.8
30%雙氧水	4	20,000	8
45%液鹼	5	8,000	4
小計金額			22.8

註：回收鹼液可用於廢水處理系統，減少液鹼添加量。

- 1.水費：用於鐵氧磁體或針鐵礦的再生產物批次清洗水，預估約 20 噸/月，換算 240 噸/年，平均 10 元/度(噸)，每年為 24 萬元。
- 2.電費：用於反應槽加熱、攪拌、管路輸送與鼓風機曝氣、後段乾燥等，預估工業用電 220 伏特，200 安培，批次處理 1 次/雙週，20 雙週/年(以工作日為計算基礎，扣除歲修)，20 小時/次(預估每次的處理時程)，平均\$4 元/度(KW-Hr)，每年為.04 萬元。

六、結論與建議

6.1 結論

- 1.本實驗以 pH 和 ORP 作為監測參數與反應完成之判斷依據，當 pH 與 ORP 呈穩定狀態時，尤其以 ORP 變化作為各階段反應依據，包括 Fenton 處理法、鐵氧磁體或針鐵礦各階段之反應終了與再生產物形成。
- 2.若考量將來實廠運作，斐頓(Fenton)處理技術較佳操作條件包括攪拌速率 200~400rpm、利用加藥機添加工業用雙氧水(2~3%)、利用加藥機添加硫酸亞鐵藥劑(二價鐵鹽，R 值 >2)、pH< 4(酸性範圍內)、維持常溫(室溫)。待 Fenton 斐頓氧化法，進行鐵氧磁體法實驗，攪拌速率 200~400rpm、持續補充硫酸亞鐵(二價鐵鹽，R 值>4)、氫氧化鈉(液鹼)調整 pH>10.5(至曝氣前須維持在高鹼環境下)、曝氣量 4~6L/min-L、反應溫度 60~70℃，

反應時間則視 ORP 變化決定，形成尖晶石結構之四氧化三鐵黑色產物。另一選擇，待 Fenton 斐頓氧化法處理後，進行針鐵礦法實驗，實驗條件為攪拌速率 300~500rpm、反應溫度為維持常溫、曝氣量控制 4~6L/min-L、反應時間同樣需視 ORP 變化決定，且比鐵氧磁體反應時間長，直到實驗反應完成形成黃色針鐵礦產物。

3.由實驗室結果得知，當 R 值增加時，皆使得反應完成時間增長。

4.預估若興建實廠處理廠內廢清洗液，每年攤提操作成本約 45 萬元。

6.2 建議

1.根據文獻與實驗結果，最佳操作條件並符合經濟考量，包括鐵藥劑添加量與重金屬濃度 R 值、液鹼添加量、曝氣量改成強氧化劑(如：臭氧，但需考量成本)等，朝向縮短反應時間與降低處理成本，更符合本廠需求。

2.考量強氧化劑、藥劑與鐵氧磁體法的操作溫度(電費)為最大經濟成本考量，建議尋求其他較便宜的藥劑取代與考量利用廠內的餘熱來處理實施。

3.廢清洗液處理成果已達到無害化目標，但需考量資源化產物的去處與其他應用途徑，如顏料、塗料、經由造粒後製成有害空氣(SO_x、H₂S、NO_x 等)吸收劑等應用，包括鐵氧磁體與針鐵礦化的再生產物(Fe₃O₄、α-FeOOH、γ-Fe₂O₃)。

誌 謝

感謝教育部 102 年度「專案研究計畫」與經濟部技術處學界科專三年計畫(103-EC-17-A-10-S1-187)之經費補助，使得本計畫順利完成。

參考文獻

- 1.Tao Zhou et al, "Synergistic catalytic degradation of antibiotic sulfamethazine in a heterogeneous sonophotolytic goethite/oxalate Fenton-like system", Applied Catalysis B: Environmental 136- 137, pp. 294- 301, 2013.

- 2.Teng-Chien Chen, Yu-Jen Shih, Chun-Chi Chang, Yao-Hui Huang, "Novel 2.adsorbent of removal phosphate from TFT LCD wastewater" , Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 44, pp.61-66, 2013
- 3.M. C. PEREIRA, L. C. A. OLIVEIRA AND E. MURAD, "Iron oxide catalysts: Fenton and Fentonlike reactions-a review" , Clay Minerals, 47, pp. 285-302, 2012.
- 4.R. Molina, Y. Segura, F. Martinez, J.A. Melero, "Immobilization of active and stable goethite coated-films by a dip-coating process and its application for photo-Fenton systems" , Chemical Engineering Journal 203, pp. 212-222,2012.
- 5.Hui Zhang, Xiaogang Wu, Xianwang Li, " Oxidation and coagulation removal of COD from landfill leachate by Fered - Fenton process" , Chemical Engineering Journal 210, pp.188-194, 2012.
- 6.Erik Casbeer, Virender K. Sharma, Xiang-Zhong Li, " Synthesis and photocatalytic activity of ferrites under visible light: A review" , Separation and Purification Technology 87, pp.1-14, 2012.
- 7.Yao-Jen Tu, Chien-Kuei Chang, Chen-Feng You, Shan-Li Wang, "Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process" , Journal of Hazardous Materials 209- 210, pp.379- 384, 2012.
- 8.Zuo Ming and Wang Xiaojun, "Treating Wastewater Containing Nickel, Chromium, Zinc and Copper by Ferrite Process" , *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2011 - Proceedings*, pp. 3744-3747, 2011.
- 9.Ronald R. Navarro, Hiroyasu Ichikawa, Kenji Tatsumi, "Ferrite formation from photo-Fenton treated wastewater" , Chemosphere 80, pp.404-409, 2010.
- 10.Yao-Jen Tu, Chien-Kuei Chang, Chen-Feng You, Jie-Chung Lou, " Recycling of Cu powder from industrial sludge by combined acid leaching,chemical exchange and ferrite process" , Journal of Hazardous Materials 181, pp.981-985, 2010.
- 11.Iara R. Guimaraes et al," Synthesis and thermal treatment of cu-doped goethite: Oxidation of quinoline through heterogeneous fenton process" , Applied Catalysis B: Environmental 91,

- pp. 581-586, 2009.
- 12.Jie-Chung Lou, Yu-Jen Huang, Jia-Yun Han, " Treatment of printed circuit board industrial wastewater by Ferrite process combined with Fenton method" , Journal of Hazardous Materials 170, pp.620-626, 2009.
 - 13.Jie-Chung Lou and Yu-Jen Huang, " Assessing the performance of wastewater treatment with the combination of Fenton and ferrite process" , Environ Monit Assess 151:pp.251-258, 2009.
 - 14.Ting Ke Tseng, Han Ching Chang, Hsin Chu, Hung Ta Chen, " Hydrogen sulfide removal from coal gas by the metal-ferrite sorbents made from the heavy metal wastewater sludge" , Journal of Hazardous Materials 160, pp.482-488, 2008.
 - 15.M. Tamimi, S. Qourzal, N. Barka, A. Assabbane, Y. Ait-Ichou, " Methomyl degradation in aqueous solutions by Fenton' s reagent and the photo-Fenton system" , Separation and Purification Technology 61, pp.103-108, 2008.
 - 16.Dan Chen, Yi-Zhong Yu, Hua-Jun Zhu, Zhong-Zhe Liu, Yun-Feng Xu, Qiang Liu, Guang-Ren Qian, "Ferrite process of electroplating sludge and enrichment of copper by hydrothermal reaction" , Separation and Purification Technology 62, pp.297-303, 2008.
 - 17.Jun-Yi Wu, T. C. Hsiao, W.S. Chen, S.H. Hu, M.S. Tsai, "Process for Treating High Copper Containing Wastewater by Producing Magnetic Material" , Proceedings of the 9th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, p.150-154, Sendai, 2007.
 - 18.黃志良, "製備針鐵礦粒徑之影響因素研究", 碩士論文, 國立成功大學資源工程學系, 台南市(1993)。
 - 19.陳宏達等 7 位, " 有機物與重金屬廢水整合性處理方法", 國內發明專利, 593164。
 - 20.陳宏達等 5 位, " 鐵系污泥整合性濕式冶金回收及處理方法", 國內發明專利, I32279 4。

廢棄物及資源化

還原碴做為水泥生料燒製 環保水泥之研究

林凱隆*、羅康維**

摘 要

本研究首先調查還原碴及泥渣廢棄物產量與來源及其物化特性，再進行環保水泥特性評估，盼望能建立泥渣及還原碴之化學組成條件及作為水泥之替代生料，冀望能在處理廢棄物處置問題的同時，亦能開發出新的環保水泥材料，達到廢棄物減量及資源化再利用的目標。本研究係將還原碴及泥渣廢棄物等根據水泥配料之石灰飽和度、水硬係數、矽氧係數和鋁鐵係數等為邊界條件，利用電腦程式配料系統以燒結溫度為 1,400℃、持溫 2 小時的條件下燒製 4 組環保水泥熟料。實驗結果顯示，環保水泥熟料與波特蘭水泥成份相當，其單礦物組成皆含有 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 等晶相物種。抗壓強度試驗結果顯示，EcoA 漿體不論何種養護齡期下，其抗壓強度與 OPC 相當；且 EcoB 水泥漿體於養護齡期為 1 及 3 天時，其抗壓強度分別為 13.6 及 21.5 MPa，符合 CNS61 中輸氣第 IIIA 型水泥漿體之抗壓強度規範。MIP 分析結果顯示，隨著養護齡期之增加，總孔與毛孔體積有逐漸趨於緻密化。綜合上述結果顯示：含 1% 還原碴及泥渣廢棄物所燒製之全資源化環保水泥符合 CNS61 輸氣第 IIIA 型水泥規範值，具有做為緊急修補工程材料之潛力。

【關鍵字】還原碴、廢棄污泥、環保水泥、熟料

*國立宜蘭大學環境工程系 教授

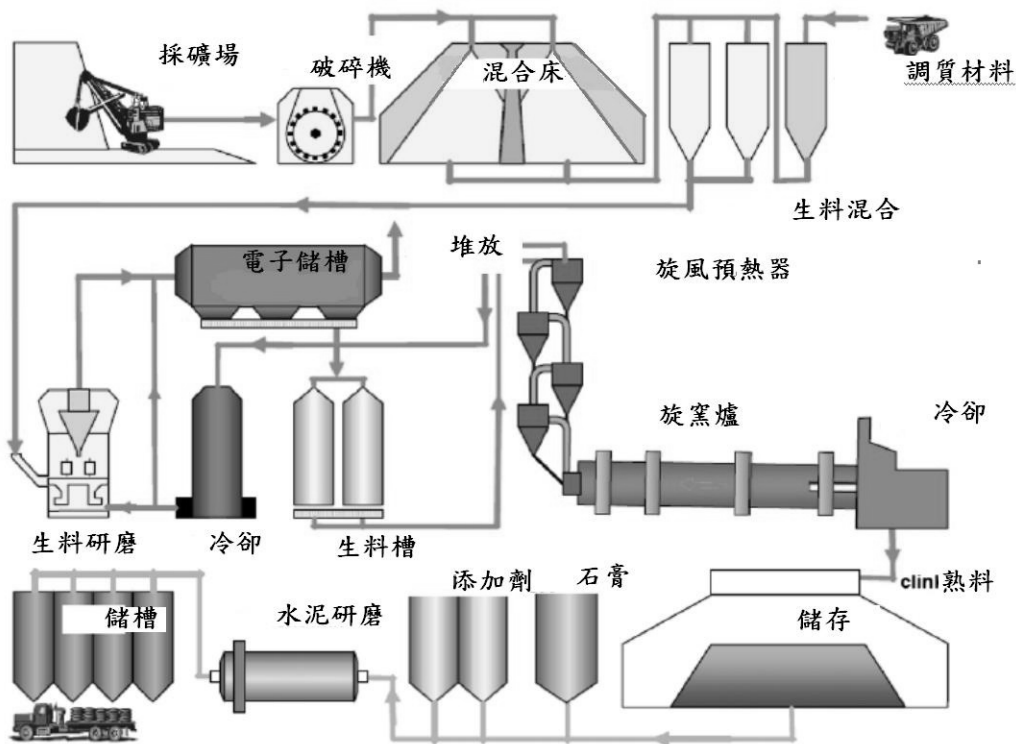
**國立宜蘭大學環境工程系 碩士

一、前言

還原渣為製鋼過程中所產生之副產物，將電弧爐作為熔煉設備，熔煉後之鋼液倒入盛鋼桶再用其他電極棒進行精煉工作，此程序易控制添加物的加入，以達到鋼液之品質控制，並以氬氣進行攪煉，達到調均鋼液及提高鋼液溫度，以利後續軋鋼處理，而此精煉爐所產生之爐渣即為還原渣^[1]。

近年來，隨著全球經濟成長快速，工程建設蓬勃發展，以至於水泥產量逐年增加。根據全球水泥報告統計指出，2012 年全球水泥產量為 37.36 億公噸，較 2011 年 35.85 億公噸成長 4.21%，其中約有 58%集中於亞洲地區^[2]。由於地球環境正面臨前所未有的挑戰，迫切需要轉向成為資源效率、低碳及封閉循環經濟^[3]。如何將現有資源製造成與水泥相同的材料，並有效降低製造水泥所需的原物料，以減緩天然資源的消耗，為水泥工業現階段主要需克服的問題之一。因此，近 30 年逐漸出現“綠色”水泥的研發^[3]。

傳統上，環保水泥 (Eco-cement)一詞乃是日本秩父小野田株式會社與株式會社荏原製作所於 90 年代中期共同研發，並由太平洋水泥株式會社於 2001 年正式將之商業化營運^[4-5]。環保水泥係採用廢棄物為主要原料並添加石灰石等天然礦物以調整其成分，故其化學及礦物特性與一般水泥有所差異，但生產流程與一般水泥工廠相似，圖 1 為環保水泥之生產流程。由於廢棄污泥及電弧爐煉鋼爐還原渣(石)其化學組成主要為大自然中常見元素矽、鈣、鋁及鐵之氧化物，與水泥原料相似，應可取代水泥製程中所使用之原料，成為資源化可行的方向。



資料來源：Lamas et al., 2013

圖 1 環保水泥生產流程

二、還原渣之來源特性與產量

電弧爐煉鋼業係以廢鋼為原料，經通以電流方式，藉石墨電極與廢鋼鐵原料間產生電弧，以高溫放熱方式熔煉廢鋼而生產鋼胚。電弧爐煉鋼均為批式作業，通常每一批次時間約 1-3 小時。冶煉過程可依其化學反應分成 3 個階段，分別為熔解期、氧化期及還原期。廢鋼原料經電弧熔解後形成液態鋼水，雜質則氧化成氣態或固態氧化物，此時通入高壓氧氣，以加速氧化作用，稱為氧化期，等造渣完成後將浮渣倒除，此時再加入大量的石灰石及碳粉等副原料，主要功能係與氧化物反應，促使鋼液內不要殘留過多氧氣，稱為還原期，此期之還原渣顆粒較氧化渣小，主要是還原期的鋼液僅含微量且微小雜質，故造渣之外觀呈細粉狀^[1]，其製程如圖 2 所示。

94 還原渣做為水泥生料燒製環保水泥之研究

表 1 為各種還原渣之主要化學組成。

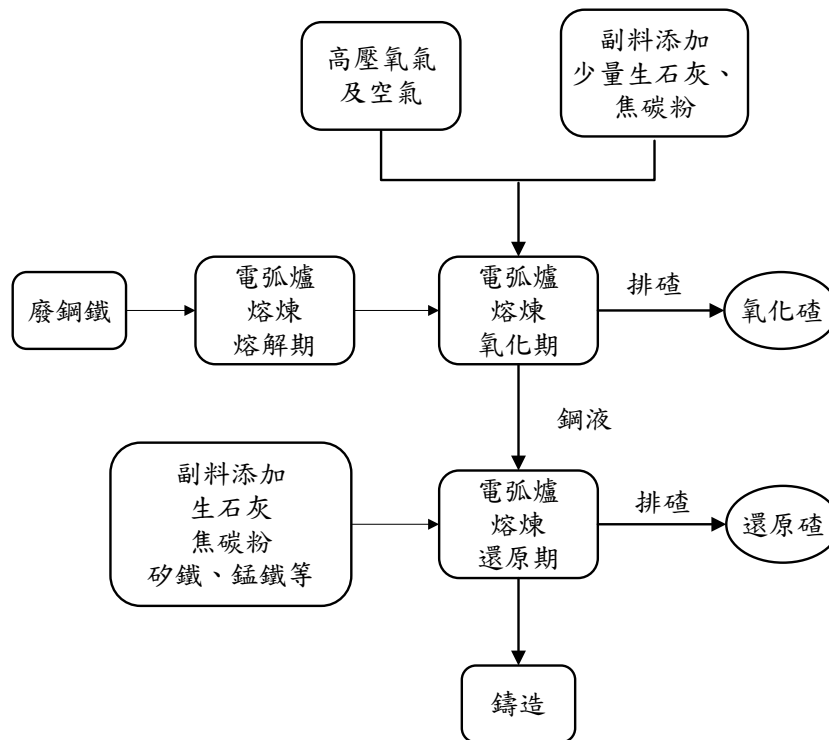


圖 2 電弧爐煉鋼爐還原渣製造流程圖^[6]

表 1 還原渣之主要化學組成^[6]

	GH1	GY	TR	WZ	YL	SS	CS	MS
CaO (%)	35.28	50.30	54.93	52.21	53.79	53.68	46.45	50.65
SiO ₂ (%)	34.80	27.51	30.54	16.53	32.01	31.31	26.52	29.78
Al ₂ O ₃ (%)	5.75	7.95	3.55	4.53	3.71	3.76	5.95	4.46
Fe ₂ O ₃ (%)	6.73	2.35	0.26	2.41	0.18	0.39	3.78	2.76
MgO (%)	14.27	8.61	8.79	22.09	8.40	8.88	14.27	10.02
K ₂ O (%)	0.29	-	-	0.07	-	-	0.11	-
Na ₂ O (%)	0.52	-	-	0.14	-	-	0.26	-
SO ₃ (%)	0.37	1.15	-	0.01	-	-	0.65	0.20

根據資料顯示，全球鋼碴產量約有 50 Mt/y 且歐洲的產量即占 12 Mt/y，約有 65% 應用於主要建設，其餘則用於貯存或其他用途^[7]。依環保署廢棄物管制中心網路申報資料顯示，國內煉鋼廠於 100 年 7 月至 9 月合計產出約 38.4 萬公噸之爐碴，其中以碳鋼製程之廠家為最多，約 28.3 萬公噸。而廠內貯存量則超過 23.7 萬噸，其中碳鋼製程約 58.49%。國內目前以某鋼鐵業之貯存及產出量最多，分別約 6.6 萬噸及 5.9 萬噸^[1]。根據環保署統計之資料指出，2012 年事業廢棄物申報量總計 10,144,861 公噸。其中電弧爐煉鋼爐碴(石)佔 238,987 公噸，約佔總量之 2.36%^[8]。但因粉粒狀還原碴經日曝曬及雨水的淋洗，使得成分中的氧化鎂與水反應形成氫氧化鎂導致膨脹現象；此外，有鑒於「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」，已針對爐碴貯存加嚴規定「還原碴(石)不得採用露天貯存方式」^[9]，因此須以回收再利用方式來取代傳統的處理方式，避免造成環境之負荷。

三、還原碴之處置與再利用方式

目前經濟部工業局公告爐碴之再利用用途，主要以工程填地材料、道路工程級配料、混凝土骨材替代物及燒結熔劑等用途為主。各再利用方式分述如下：

1. 工程填地材料再利用

工程填地材料再利用主要是利用電弧爐煉鋼碴(石)使用於工程填地材料，而工程填地材料之物質反應因使用情形而有所不同。一般而言，路基材料應用於交通之填地材料時，經常以加州載重比試驗(CBR 試驗)作為研究工程填地材料是否符合路面支撐力之依據。使用電弧爐煉鋼爐碴(石)於路基回填料，能增強剪力強度及減低壓縮性。若與使用天然細砂所建造之堤防相較，更具不透水性。其使用流程如圖 3 所示。

96 還原渣做為水泥生料燒製環保水泥之研究

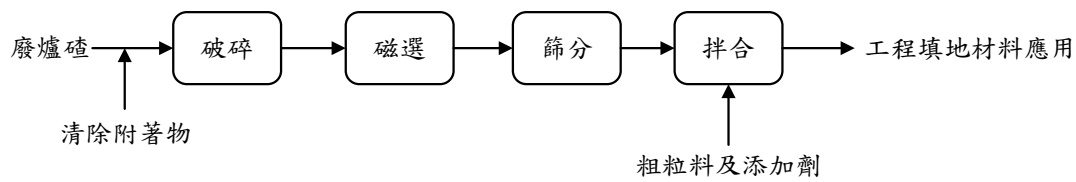


圖 3 還原渣於路基回填料之使用流程^[8]

2. 道路工程級配料

由於煉鋼爐渣較天然骨材具有比重大、且質硬、耐磨耗性優異特性，故可廣泛應用於磨耗較激烈的公路上，目前日本將爐渣做為道路鋪設用路基材料，用量約為全部爐渣之 30%-40%，其可與回收金屬工作一併進行，在回收金屬後之爐渣必需送至一個場地中進行養生，係因煉鋼過程中在熔煉時所添加生石灰的部份未溶解而原狀殘留在爐渣中，由於這些游離石灰(free CaO)和水反應後會使爐渣膨脹崩壞，須經由養生處理以避免因爐渣膨脹率過大或不穩定而造成道路膨脹龜裂。一般而言，氧化渣膨脹率為 1.5%，還原渣膨脹率為 10%-20%，故還原渣需加蒸氣養生方能再利用。日本大同特殊鋼(株)知多工廠盛鋼桶精煉爐(Ladle Furnace)產生之爐渣採用如圖 4 之處理程序，將所產生之還原渣用蒸氣養生約 10 天，而氧化渣則仍需養生 3-6 個月。

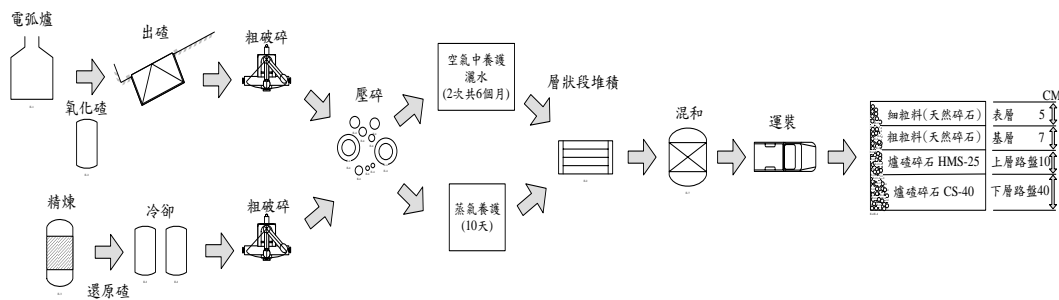


圖 4 日本電弧爐爐渣再利用為路基材料處理流程^[8]

3. 混凝土骨材替代物

主要係利用電弧爐煉鋼爐渣(石)與其他摻配料一起拌合製成混凝土及相關建材，其相關流程如圖 5 所示。Pellegrino 等人利用電弧爐煉鋼爐渣(石)作為混凝土材料，結果顯示添加爐渣有助於提升混凝土之耐久性^[10]。電弧爐煉鋼爐渣又細分為氧化渣和還原渣。在日本之電弧爐煉鋼工業中，由精煉(LF)程序所產生之爐渣(亦即還原渣)，每年約有 140 萬噸。其主要處理應用方式有兩種，其一約有 40% 之還原渣是以蒸氣養生之方式，來加速其安定化或穩定化，此穩定化之還原渣可以被利用來作為路基材料；其二約 60% 之還原渣是與氧化渣相混合作為臨時便道用之路基材料。目前在日本對於路基材料之需求已漸漸減少，因而興起多方面之研究，包括作為混凝土骨材及製成環保水泥等，例如將還原渣添加石膏研磨製成水泥，再與電弧爐氣冷氧化渣(當粗骨材)及電弧爐水淬氧化渣(當細骨材)混煉後，製成 U 型溝、平板、敷石、涵管、岸壁、水泥磚、景觀材、消波塊及人工魚礁等水泥建材製成品。

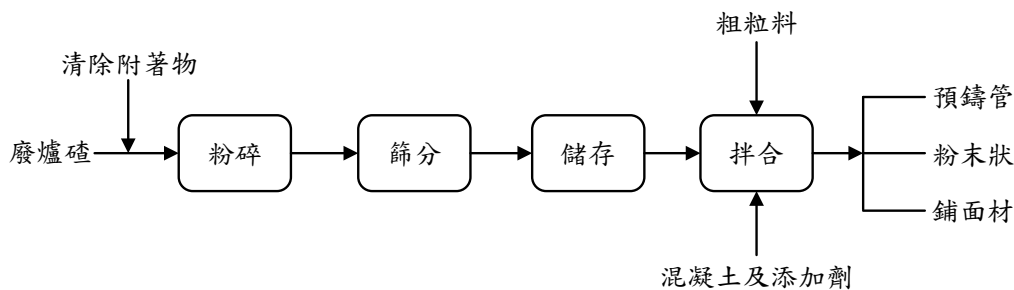


圖 5 還原渣使用作為混凝土製品流程^[8]

4. 燒結熔劑

燒結礦的生產，需添加石灰作熔劑。通常電弧爐還原渣都含有 45-55% 的 CaO，故 1 公噸的爐渣相當於 700-750 公斤的石灰石。若把爐渣加工到小於 10 mm 的爐渣粉，便可代替部份石灰石直接作燒結配料用。添加量視精礦純度及含磷量確定，一般純度較高，含磷量低的精礦，則可添加 4-8% 之爐渣。爐渣作為燒結熔劑時，

不僅可回收再利用爐渣中的鈣、鎂、錳及鐵等有價元素，並可提高燒結機械之利用係數和燒結礦的質量，降低燃料消耗，其相關流程如圖 6 所示。

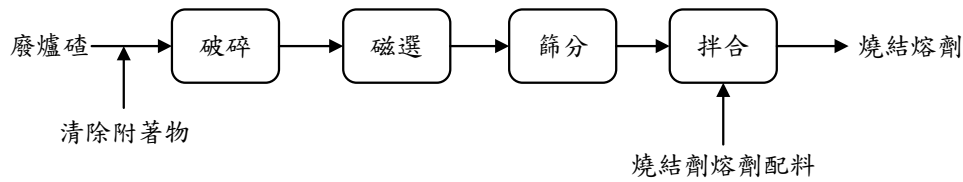


圖 6 還原渣使用作為燒結熔劑流程^[8]

5. 卜作嵐材料

還原渣的化學成分分析顯示，其主要是以氧化鈣(CaO)、氧化矽(SiO₂)及少量的氧化鋁(Al₂O₃)所組成，且粒徑小、比表面積高具有做為卜作嵐材料的潛力。由於還原渣中的氧化鈣能有助於鹼活化，因此適合做為卜作嵐材料。近年來已有許多學者研究還原渣做為卜作嵐材料的可行性，Jin 等人利用電弧爐爐渣做為卜作嵐材料，其結果顯示水泥漿體受到爐渣鹼活化的影響，進而改善其漿體的抗壓強度及收縮性^[11]。Sheen 等人利用還原渣取代部分水泥原料，其結果顯示還原渣卜作嵐活性指數良好能改善其漿體之凝結時間，並減少水泥用量達到資源化再利用之目標^[12]。Muhmood 等人則以 15%之電弧爐煉鋼爐渣取代部分水泥，發現並不會降低其抗壓強度^[13]。

目前國內外還原渣之資源化再利用技術如表 2 所示。從表中可得知，目前還原渣主要再利用方式係以資源化再利用為營建材料為主。因還原渣成分含有高含量之氧化鎂，在以往的掩埋處置方式中，會導致氧化鎂與水反應形成氫氧化鎂造成膨脹現象。因此，本研究目的主要探討還原渣與泥渣廢棄物資源化再利用以全取代原料來作為水泥等營建材料，藉以評估開發新型環保水泥之潛力。

表 2 還原碴再利用資源化技術^[3, 6, 12-17]

作者	再利用方式	研究成果
林庭亦 (2003)	電弧爐還原碴再生應用於高性能混凝土性質之研究	利用還原碴取代部分水泥所拌製之高性能混凝土其 28 天抗壓強度符合設計強度要求，且能有助於提升其耐久性。
江奇成 (2005)	電弧爐煉鋼還原碴作為混凝土之再生材	以還原碴取代部分水泥作為混凝土膠結料，其結果顯示可提升流動性，且抗壓強度在齡期為 2 年後略優於混凝土。
Huang et al. (2010)	以煉鋼爐碴作為水泥材料	以 10% 爐碴作為部分水泥材料，其 28 天抗壓強度超過 40 MPa，並且在水泥中扮演鹼活化劑的角色。
Li et al. (2011)	利用電弧爐煉鋼爐碴與氣轉爐渣混合作為取代水泥之資材	以電弧爐煉鋼爐碴與氣轉爐渣以適當比例混合進行改質，其結果顯示改質後能有助於增加 C_3S 含量，並可提升其水化活性。
Iacobescu et al. (2013)	以煅燒電弧爐煉鋼爐渣取代部分水泥熟料	透過煅燒電弧爐煉鋼爐渣取代部分水泥熟料，其結果顯示隨著取代量增加漿體凝結時間逐漸增加，而使用爐碴能有效降低其 CO_2 排放量。
Jin et al. (2014)	利用電弧爐爐碴作為卜作嵐材料	利用電弧爐爐碴做為卜作嵐材料，其結果顯示水泥漿體受到爐碴鹼活化的影響，進而改善其漿體的抗壓強度及收縮性。
Sheen et al. (2013)	利用還原碴取代部分水泥原料	還原碴之卜作嵐活性指數良好，能改善其漿體之凝結時間，並減少水泥用量達到資源化再利用之目標。
Muhmood et al. (2009)	以電弧爐煉鋼爐渣取代部分水泥	以 15% 之電弧爐煉鋼爐渣取代部分水泥，不會降低其抗壓強度。

四、實驗材料與方法

本研究首先調查還原碴及泥渣廢棄物產量與來源及其物化特性，再進行環保水泥特性評估，盼望能建立還原碴及泥渣廢棄物之化學組成條件及作為水泥之替代生料，冀望能在處理廢棄物處置問題的同時，亦能開發出新的環保水泥材料，達到廢棄物減量及資源化再利用的目標。

4.1 實驗材料

1. 還原碴：廢鋼鐵原料經高溫熔煉成液態鋼液，由於鋼液中含氧量過高，需加以還原，再

100 還原碴做為水泥生料燒製環保水泥之研究

加入大量石灰石、碳粉等副原料，此過程中所產生之廢棄物即為還原碴。外觀為灰色粉末狀。

- 2.石灰石污泥：採自東部某石化廠，為生產石灰過程中，經水洗石灰石原石後之沉澱物。烘乾研磨後，外觀以淡白色粉末為主。
- 3.石材污泥：採自東部某石材加工業者之花崗石污泥，為石材製品製造在石材切割、研磨等製程中產生之污泥。脫水烘乾研磨後，外觀為米色粉末狀，屬硬脆性能之無機質粉體。
- 4.煤灰礦泥拌合料：煤灰礦泥拌合料為中鋼煉鋼後所產生之副產品送至中聯資源公司所加工之產品。煤灰及礦泥經適當之配比拌合加工處理後，即為煤灰礦泥拌合料。脫水烘乾研磨後，外觀為深褐色粉末狀。
- 5.天然二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）：石膏一般在水泥中約佔 3-5 %。
- 6.水泥：本研究以台灣水泥公司所生產的品牌卜特蘭第 I 型水泥作為空白對照組之用。

4.2 實驗方法

本研究中利用表 4 之水泥配料係數規值之石灰飽和度 (L.S.F.)、水硬係數 (H.M.)、矽氧係數(S.M.)及鋁鐵係數(I.M.)等水泥係數為邊界條件，利用還原碴、石灰石污泥、石材污泥及煤灰礦泥拌合料，以電腦程式計算混合配置不同類型之環保水泥生料。接著將混合均勻的替代生料進行壓錠，並置入高溫爐中升溫至 1,400℃ 並持溫 2 小時以燒製環保水泥熟料。燒製後之環保水泥熟料混合適量之石膏即為本研究所用之環保水泥。

試體之製作以水灰比為 0.4，依規範 ASTM C305 灌製 1 立方英吋之環保水泥漿體，隔日拆模後浸泡飽和石灰水置入恆溫恆溼機，達到預定之養護齡期後取出並依照 ASTM C109 規範進行抗壓試驗，試體抗壓破壞後將浸泡於甲醇中，使甲醇取代試體內之水分而終止其水化，試體經 105℃ 烘乾 24 小時後，進行 MIP 分析水泥漿體微結構之變化。

表 3 環保水泥熟料之配比

樣品	EcoA 熟料	EcoB 熟料	EcoC 熟料	EcoD 熟料
生料化學組成 (Wt. %)				
石灰石污泥	78.00	77.00	75.50	71.00
石材污泥	19.51	19.51	19.51	19.51
煤灰礦泥拌合料	2.49	2.49	2.49	2.49
還原值	0.00	1.00	2.50	7.00
石灰飽和度	0.86	0.85	0.82	0.76
水硬係數	2.00	1.97	1.93	1.78
矽氧係數	2.80	2.80	2.97	2.87
鋁鐵係數	1.66	1.68	1.87	1.66

表 4 配料所用之水泥係數及其規範值

水泥係數	定義	規範值
石灰飽和度	$\text{CaO}/(\text{SiO}_2+1.18\text{Al}_2\text{O}_3+0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$	0.8-0.95
水硬係數	$\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	1.7-2.3
矽氧係數	$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	1.9-3.2
鋁鐵係數	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.5-2.5

五、結果與討論

5.1 基本材料特性

表 5 為生料材料之化學組成，還原值成份主要為 CaO ，為 54.78%， SiO_2 次之為 17.66%，具有取代水泥原料中石灰石礦物的潛力。石灰石污泥組成以 CaO 成份為主，佔 65.90%，具有取代石灰石原料之潛力。石材污泥主要以 SiO_2 為 58.30%，具有用來取代矽質原料之潛力。煤灰礦泥拌合料主要以 Fe_2O_3 為 46.00%， Al_2O_3 次之為 13.00%，具有用來取代鐵砂之潛力。

表 6 為水泥生料重金屬總量和 TCLP 結果。從表中發現，還原值之重金屬以 Zn 最高，其濃度為 261.90 mg/kg，其次 Cu 含量為 40.48 mg/kg；石灰石污泥中含量最

102 還原碴做為水泥生料燒製環保水泥之研究

高之重金屬為 Zn，其濃度為 167.86 mg/kg；石材污泥中 Zn 的含量最高，其濃度值為 142.90 mg/kg，其次為 Cu 為 92.80 mg/kg；煤灰礦泥拌合料中 Zn 的含量高達 4,280.90 mg/kg，且 Pb 含量亦高達 519.10 mg/kg。經由毒性特性溶出試驗結果顯示，廢棄物之溶出皆符合法規標準，顯示本研究所使用之廢棄物符合一般事業廢棄物要求，具資源化再利用潛力。

表 5 生料材料之化學組成

樣品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
還原碴	18.70	4.23	0.66	58.90	4.34	1.70	—	0.88
石灰石污泥	1.84	0.53	0.82	65.90	1.25	0.05	—	0.08
石材污泥	58.30	14.80	3.21	2.95	0.77	0.12	2.86	4.18
煤灰礦泥拌合料	9.97	13.00	46.00	6.34	2.59	0.83	—	0.68

單位：%

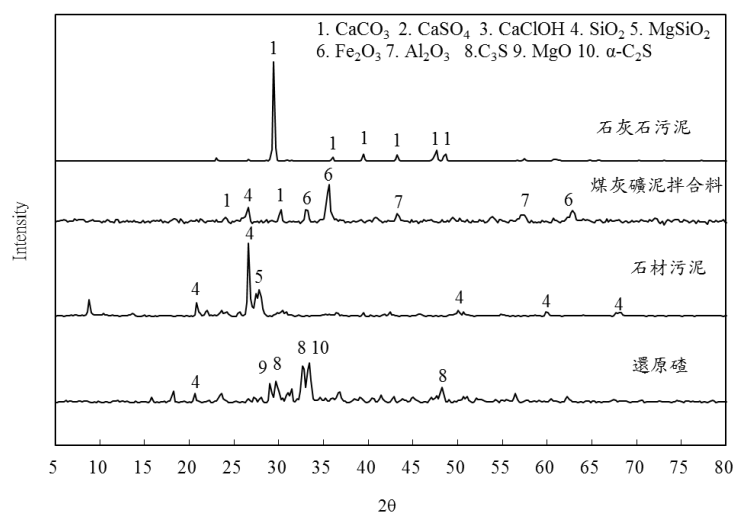


圖 7 生料之 XRD 圖譜

表 6 水泥生料重金屬總量與毒性溶出特性試驗結果

樣品	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Ni
Total Metal (mg/kg)						
還原值	28.57	35.71	40.48	261.90	N.D.	N.D.
石灰石污泥	10.71	N.D.	23.81	167.86	N.D.	N.D.
石材污泥	20.40	28.60	92.80	142.90	9.50	9.50
煤灰礦泥拌合料	519.10	142.90	135.70	4,280.90	7.14	204.80
TCLP (mg/L)						
還原值	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
石灰石污泥	N.D.	N.D.	0.04	0.54	N.D.	N.D.
石材污泥	N.D.	N.D.	1.0	1.6	N.D.	N.D.
煤灰礦泥拌合料	1.8	N.D.	1.5	6.1	N.D.	N.D.
規範值	5.00	5.00	15.00	—	1.00	—

5.2 環保水泥熟料基本特性

表 7 為水泥規範品管化學成分。由表 7 得知，其 C_3S 單礦物含量，隨著還原值之增加有減少的趨勢。而 C_3S 水化作用為主要提供早期強度的來源^[18]，可能導致其強度發展減緩之現象；且 $\alpha-C_2S$ 在水化作用中無法提供強度來源，因此可能造成漿體強度發展有不良影響。

圖 8 為環保水泥熟料之 XRD 圖譜。由圖 8 發現，OPC 熟料在繞射角為 29.85° 、 32.12° 、 34.48° 、 57.15° 和 62.61° 時有 C_3S 晶相出現；至於 $\beta-C_2S$ 晶相物種之繞射峰則出現在繞射角為 32.21° 、 41.2° 和 52.23° 之位置；而繞射角為 33.27° 係 C_3A 晶相；繞射角為 10.78° 與 46.83° 出現之晶相為 C_4AF 。EcoA 及 EcoB 熟料之晶相與 OPC 相似，皆有 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 和 C_4AF 產生；添加較多還原值之 EcoC 及 EcoD 熟料可觀察到其 C_3S 峰值下降，並逐漸轉為 $\beta-C_2S$ 及 $\alpha-C_2S$ 。

表 7 水泥規範品管化學成分

樣品	EcoA 熟料	EcoB 熟料	EcoC 熟料	EcoD 熟料	OPC
化學成分					
CaO (%)	66.20	65.96	65.07	64.63	64.51
SiO ₂ (%)	23.38	23.43	23.68	23.73	22.27
Al ₂ O ₃ (%)	5.07	5.20	5.55	6.13	4.97
Fe ₂ O ₃ (%)	3.18	3.02	3.10	3.14	3.10
MgO (%)	2.17	2.39	2.60	3.29	2.47
單礦物成分					
C ₃ S (%)	53.2	51.2	43.2	32.7	54.8
β-C ₂ S (%)	25.9	27.6	33.6	40.2	22.5
α-C ₂ S (%)	1.0	1.0	1.7	3.1	—
C ₃ A (%)	8.1	8.7	9.5	10.9	7.9
C ₄ AF (%)	9.7	9.2	9.4	9.6	9.4

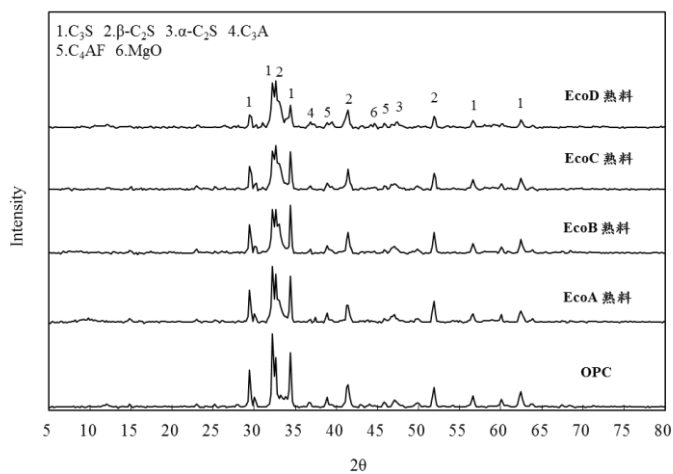


圖 8 環保水泥熟料之 XRD 圖譜

表 8 環保水泥熟料之重金屬總量與 TCLP 分析結果

樣品	Pb	Cr	Cu	Zn	Cd	Ni
Total Metal (mg/kg)						
OPC	114.00	61.00	289.15	619.56	N.D.	33.17
EcoA 熟料	N.D.	N.D.	50.00	450.00	N.D.	N.D.
EcoB 熟料	N.D.	N.D.	50.00	535.71	N.D.	N.D.
EcoC 熟料	N.D.	14.29	64.29	342.86	N.D.	14.29
EcoD 熟料	N.D.	85.71	57.14	421.43	N.D.	57.14
TCLP (mg/L)						
OPC	0.06	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
EcoA 熟料	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.
EcoB 熟料	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	N.D.	N.D.
EcoC 熟料	N.D.	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.
EcoD 熟料	N.D.	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	N.D.
規範值	5.00	5.00	15.00	—	1.00	—

表 8 為環保水泥熟料之重金屬總量與 TCLP 分析結果。從表中得知，環保水泥熟料中的 Zn 含量極高，最高濃度為 619.56 mg/kg，其次為 Cu 含量約為 289.15 mg/kg。係由於還原礫中含有較高含量之 Zn 及 Cu，因此可觀察到隨著還原礫含量增加，其 Zn 及 Cu 含量也隨之增加，但經由毒性特性溶出試驗結果顯示，環保水泥熟料之溶出皆符合法規標準，故對環境安全無危害之疑慮。

5.3 環保水泥漿體之物理性質

表 9 為環保水泥之物理性質彙整表。由表 9 可得知，EcoB 水泥漿體於養護早期(1 至 3 天)時其抗壓強度發展迅速，係因添加還原礫之水泥漿體其凝結時間有減少的現象，是由於熟料中含有含有較多之 C_3A 單礦物，而水泥中的 C_3A 有助於提升水泥早期的水化速率^[18]。而添加較高之還原礫致使熟料中的 MgO 含量較 EcoA 為高。而水泥中 MgO 含量會造成其水化速率加速的現象而使得凝結時間有提早的趨勢^[19]。

此外，EcoC 漿體及 EcoD 漿體可以觀察其抗壓強度相較於 EcoB 漿體較低，因還原礫添加量增加時會使得熟料成分中 C_3S 單礦物含量減少而 β - C_2S 以及 α - C_2S 含

量增加，而 α -C₂S 單礦物水化過程中則無法提供強度，故導致其抗壓強度有下降的趨勢。根據 CNS 61 規範中對於 IIIA 型水泥之養護齡期為 1、3 天時之抗壓強度其物理要求，分別為 10 及 19 MPa 以上。本研究之 EcoB 環保水泥於養護齡期為 1 及 3 天時其抗壓強度分別為 13.6 及 21.5 kg/cm²，均符合規範要求。因此，EcoB 環保水泥具有做為緊急修補工程材料之潛力。

表 9 環保水泥之物理性質彙整表

樣品	OPC 漿體	EcoA 漿體	EcoB 漿體	EcoC 漿體	EcoD 漿體	規範值
抗壓強度 (MPa)						
1 day	11.5	6.8	13.6	8.9	6.3	> 10
3 days	16.2	9.8	21.5	12.6	10.8	> 19
7 days	51.2	47.6	29.0	21.5	16.0	> 19
28 days	59.1	56.3	42.4	31.5	26.3	> 28
60 days	68.9	64.7	44.5	34.2	27.2	—
凝結時間(分鐘)						
初凝時間	231.3	159.6	58.3	70.7	108	> 45
終凝時間	315	285	165	180	210	< 375

5.4 各型別環保水泥漿體之 MIP 分析

水泥漿體因水化作用而產生水化產物，水化產物會隨著齡期的增加而逐漸成長；而隨著水化產物的成長，水泥中之水化空間逐漸被填充；當水化終止時，即成為所謂的孔隙。而壓汞式試驗 (MIP) 是一種已被廣泛用來測試水泥漿體孔隙分佈的技術^[20]。根據 Young 等人指出，水泥之孔隙可分為孔徑大於 0.01 μ m 之毛孔 (Capillary Pores) 和孔徑小於 0.01 μ m 之膠孔 (Gel Pores)^[21]。毛孔大部分由水份所佔之空間，主要受到水灰比之影響；而膠孔又稱膠體孔隙，主要係指漿體內部之結合水所佔之空間。

圖 9 為 OPC 漿體於不同齡期之孔隙大小分佈。由 MIP 結果顯示，純水泥漿體隨著養護齡期之增加，總孔與毛孔體積有逐漸減少之現象。係因隨著養護齡期的增

加，漿體之水化產物逐漸生成並充填毛孔，使得總孔與毛孔之體積減少，顯示因水化產物的填充，漿體趨於緻密化。

圖 10 為環保水泥漿體之孔隙大小分佈。由圖中可以發現，EcoA 及 EcoB 漿體其總孔與毛孔體積與純水泥漿體相當，係因 EcoA 漿體其單礦物組成與純水泥漿體相似，故 EcoA 漿體其總孔與毛孔體積結果相似於純水泥漿體。含有還原值之 EcoC 及 EcoD 漿體的孔隙分布在水化早期，較 OPC 漿體之孔隙為大。此現象之原因係為添加還原值之水泥漿體含有較高的 MgO，根據 Xiaocun 等人研究指出水泥中 MgO 有助於提升其水化速率，並且造成凝結時間有提早之趨勢^[19]，因此使得水泥漿體其工作性下降且造成在拌製過程的困難性，導致水泥漿體成形的過程中有許多孔隙，此結果與抗壓強度發展相符。

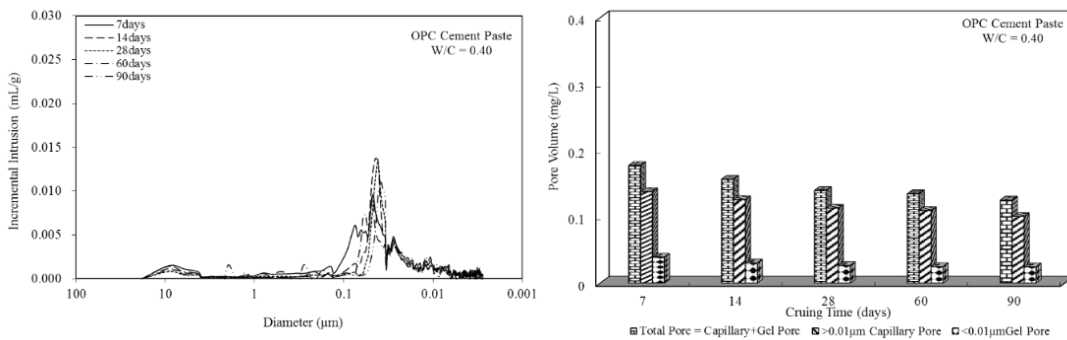


圖 9 OPC 漿體於不同齡期之孔隙分佈情形(W/C = 0.40)

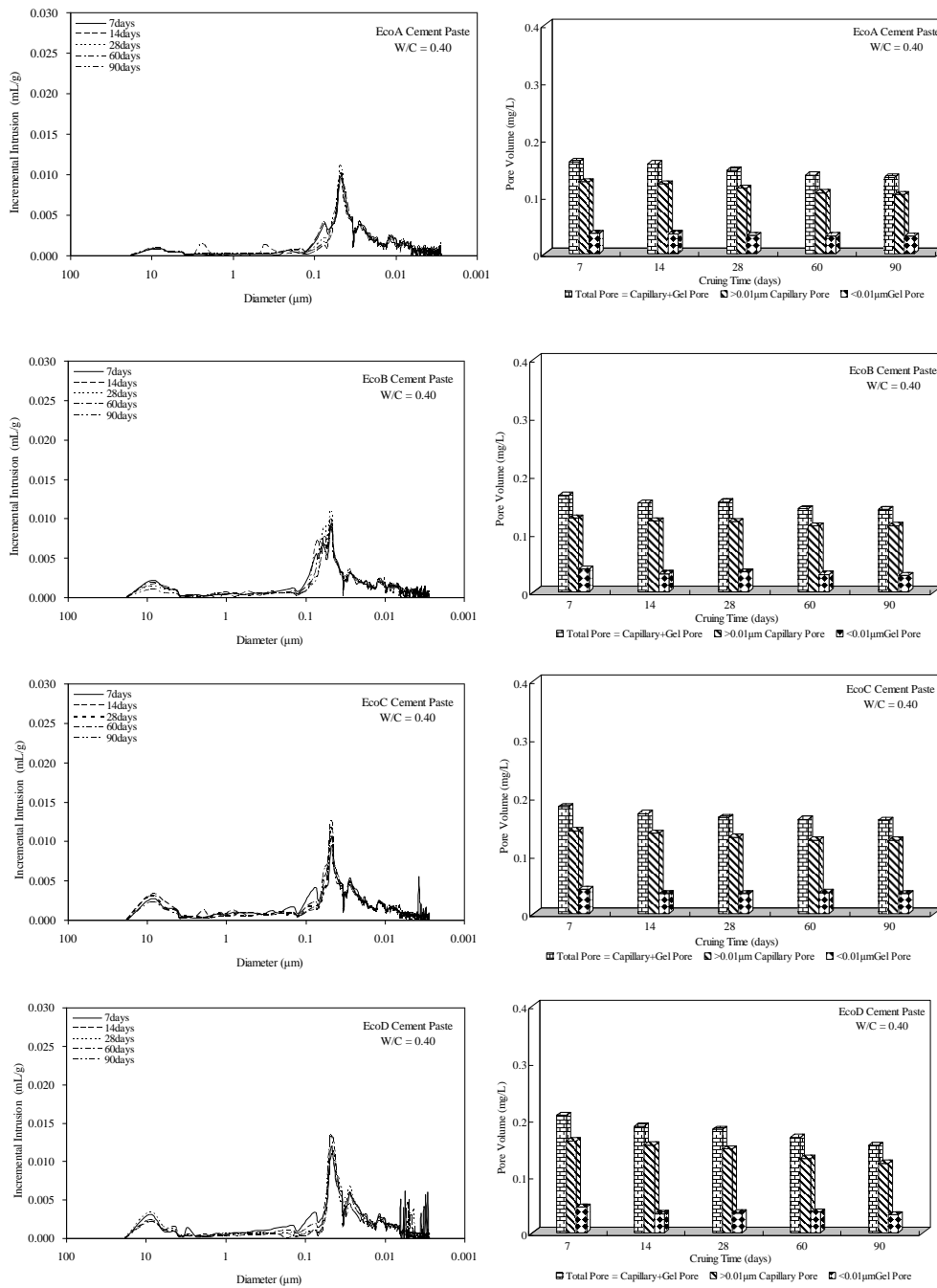


圖 10 環保水泥漿體於不同齡期之孔隙大小分佈(W/C = 0.40)

六、結 論

本研究首先調查還原渣及泥渣廢棄物產量與來源及其物化特性，再進行環保水泥特性評估，盼望能建立還原渣及泥渣廢棄物之化學組成條件及作為水泥之替代生料，冀望能在處理廢棄物處置問題的同時，亦能開發出新的環保水泥材料，達到廢棄物減量及資源化再利用的目標。結論如下：

1. 還原渣之成份主要為 CaO ，具有取代水泥原料中石灰石礦物的潛力；石灰石污泥之化學成分主要以 CaO 居多，能取代水泥生料中之石灰石；石材污泥主要以 SiO_2 為 58.30%，具有用來取代矽質原料之潛力；煤灰礦泥拌合料中 Fe_2O_3 占 45% 以上，可做為水泥生料中鐵質原料之來源。
2. 燒製環保水泥之最佳條件為燒結 $1,400^\circ\text{C}$ 時持溫兩小時，其環保水泥漿體之游離石灰皆小於 1%。
3. 研究中所燒製各組環保水泥熟料與波特蘭水泥成份相同，其單礦物組成皆含有 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 等晶相物種。
4. EcoB 水泥漿體於養護齡期為 1 及 3 天時，其抗壓強度分別為 13.6 及 21.5 MPa 符合 CNS 61 輸氣第 IIIA 型水泥之規範。
5. MIP 結果顯示還原渣添加量增加時會使得熟料成分中 C_3S 單礦物含量減少而 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 以及 $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ 含量增加，導致其總孔體積較大之現象，此結果與抗壓強度發展相符。
6. 本研究結果顯示，77% 石灰石污泥、19.51% 石材污泥、2.49% 煤灰礦泥拌合料及 1% 還原渣，經燒結溫度為 $1,400^\circ\text{C}$ ，持溫 2 小時後所燒製之全資源化環保水泥符合 CNS 61 輸氣第 IIIA 型水泥規範值，具有做為緊急修補工程材料之潛力。

參考文獻

1. 余騰耀、林平全、施延熙、黃兆龍、蔡敏行，「電弧爐煉鋼還原渣資源化應用技術手冊」，中技社綠色技術發展中心，台中，(2000)。
2. International Cement Review, <http://www.cemnet.com/>, Global Cement Report 12, 2013
3. Iacobescu R.I, Pontikes Y, Koumpouri D, Angelopoulos G.N. Synthesis, characterization and

110 還原渣做為水泥生料燒製環保水泥之研究

- properties of calcium ferroaluminate belite cements produced with electric arc furnace steel slag as raw material. *Cement & Concrete Composites* 2013; 44: 1-8.
- 4.Torii K, Tomotake H, Osafo AK, Echigo T. Compatibility between ecocement produced from incinerator ash and reactive aggregates in ASR expansion of mortars. *Cem Concr Res* 2003; 33: 571-577.
- 5.Ampadu KO, Kazuyuki T. Characterization of ecocement pastes and mortars produced from incinerated ashes. *Cem Concr Res* 2001; 31: 431-436.
- 6.林廷亦，電弧爐還原渣再生應用於高性能混凝土性質之研究，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(2003)。
- 7.Li J, Yu Q, Wei J, Zhang T. Structural characteristics and hydration kinetics of modified steel slag. *Cement and Concrete Research* 2011; 41: 324-329 .
- 8.Environmental Protection Administration Executive Yuan, R.O.C (Taiwan). The national industrial waste declaring amount reported by EPA in 2012, Taipei:<http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gweb.cgi/ccd=KtFBm7/search?q=aue=%22Jiun-Wei%20Chang%22.&searchmode=basic> 2012.
- 9.Ministry of Economic Affairs, R.O.C. (Taiwan). Reuse of industrial waste types and managemen Ministry of Economic Affairs; 2011.
- 10.Pellegrino C, Gaddo V. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites* 2009; 31: 663-671.
- 11.Jin F, Gu K, Al-Tabbaa A. Strength and drying shrinkage of reactive MgO modified alkali-activated slag paste. *Construction and Building Materials* 2014; 51: 395-404.
- 12.Sheen YN, Wang HY, Sun TH. A study of engineering properties of cement mortar with stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials. *Construction and Building Materials* 2013; 40: 239-245.
- 13.Muhmood L, Vitta S, Venkateswaran D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cem Concr Res* 2009; 39: 102-109.
- 14.江奇成，電弧爐煉鋼還原渣與鑄件廢料摻用混凝土再生材之模式研究，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，(2005)。

- 15.Huang Y, Lin Z. Investigation on phosphogypsum – steel slag – granulated blast-furnace slag – limestone cement. *Construction and Building Materials* 2010; 24: 1296-1301.
- 16.Li J, Yu Q, Wei J, Zhang T. Structural characteristics and hydration kinetics of modified steel slag. *Cement and Concrete Research* 2011; 41: 324-329 .
- 17.Lin Y, Zhou S, Li F, Lin Y. Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement. *J Hazard Mater* 2012; 213-214: 457-465.
- 18.Xiaocun L, Yanjun L. Effect of MgO on the composition and properties of alite-sulphoaluminate cement. *Cement and Concrete Research* 2005; 35: 1685-1687.
- 19.Hakan NA, Osman NO, Mehmet AT. Effects of water – cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste. *Construction and Building Materials* 2008; 23: 1196-1200.
- 20.Mindess S, Young JF. *Concrete*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey; 1998.
- 21.Wang Q, Yan P. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. *Construction and Building Materials* 2010; 24: 1134-1140.
- 22.Kourounis S, Tsivilis S, Tsakiridis PE, Papadimitriou GD, Tsibouki Z. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cement and Concrete Research* 2007; 37: 815-822.
- 23.林凱隆、羅康維、謝政平，太陽能板廢玻璃之卜作嵐材料特性研究，2012 資源與環境學術研討會暨光電產業廢棄物資源化技術成果發表會，(2012)。

本期專題：節能技術與能源管理系統

專題編輯委員

李育明

學歷

美國約翰霍浦金斯大學環境工程暨環境系統
分析博士

經歷

國立中興大學資源管理研究所約聘副研究員
國立中興大學資源管理研究所副教授
國立臺北大學資源管理研究所副教授
國立臺北大學資源管理研究所兼任所長
國立臺北大學自然資源與環境管理研究所教授

現任

國立臺北大學自然資源與環境管理研究所教授

林志森

學歷

國立臺北大學自然資源與環境管理研究所碩士

經歷

經濟部工業局永續發展組(第七組)組長
經濟部 工業減廢聯合輔導小組執行秘書
環保署 中華民國環境工程學會理事長
財團法人中技社常務董事暨執行長

現任

財團法人台灣綠色生產力基金會董事長

專題介紹

我國自產能源有限，主要仰賴國外進口，在能源價格上易受到國際情勢變化之影響，能源的穩定供給為國家經濟發展之重要因素。而我國工業生產為最主要能源消費部門，如何降低工業部門能源消費並落實節能減碳，已成為現階段重要的工作。

本期專題為「節能技術與能源管理系統」，邀請多位專家論述能源管理、能源查核機制、以及節能技術配套調和，內涵包括工業局潘建成技正介紹政府推動能源管理系統輔導狀況與發展；TAF 葉薇芬經理就 ISO 50001 系列標準最新制定狀況，以及 EnMS 認證多邊承認協議之發展提供專文介紹；綠基會林冠嘉資深協理介紹 ISO 50001 之最佳化能源管理資訊化系統，林文祥資深協理就發展節能技術與能源管理系統調和之配套，並進而提升能源查核制度之成效進行說明；和泰興業張育誠副總經理針對隔熱塗料於建築節能應用提供案例分析；冠呈能源環控王獻堂總經理分享其業界多年經驗，提供翻轉屋頂之屋頂綠化創新工法。

本期專題透過邀請專家學者撰寫相關專文，藉以拋磚引玉，提供國內能源管理與節能技術之參考。專題作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

政府推動能源管理系統輔導介紹

潘建成*、簡津浩**、林冠嘉***

摘 要

面臨低碳時代的衝擊，降低能源成本與管理溫室氣體排放已成為當前企業追求永續發展之必要策略。國際標準化組織(ISO)順應此趨勢，已制訂一套具系統化管理模式的能源管理標準 ISO 50001，提供一套全面性的能源管制系統，國際間諸多企業已藉由 ISO 50001 能源管理系統的實施獲得利益及節省能源成本。因此，各部門亟需儘早推動能源用戶建置能源管理制度，強化能源查核管理，提升能源使用效率、持續改善能源績效及降低能源成本。

本文介紹政府機關結合民間顧問與節能技術單位能量，輔導建置 ISO 50001 能源管理系統，並通過國際驗證之做法與初步成果。期透過能源用戶內部管理系統之建置，協助獲得節能之直接效益並建立持續改善之機制與動力，達到落實節能減碳之永續目標。

【關鍵字】能源管理系統、節能技術服務、管理顧問

*經濟部工業局 技正

**經濟部能源局 科員

***財團法人台灣綠色生產力基金會 資深協理

一、前 言

企業面臨低碳時代所帶來的衝擊，如何降低能源使用成本與管理溫室氣體排放，已成為企業追求永續發展之必要策略。國際標準化組織(ISO)順應此項趨勢，開始推廣一套具系統化管理模式的能源管理標準－ISO 50001 國際標準，協助企業經由導入能源管理系統改善能源管理績效、提升能源使用效率及減低能源消費成本。

ISO 50001 能源管理系統可促使企業高階主管透過宣示能源政策之方式，展現重視能源管理工作之具體承諾，並制訂降低能源使用的管理目標，提出具體的能源管理行動計畫。由於，ISO 50001 能源管理系統適用於任何類型與規模的組織，並具有提升能源效率與減低能源成本之改善效益，許多先進國家均開始將 ISO 50001 能源管理系統納入推動國家節能管理政策的一環，並鼓勵企業自願性地推動節能改善工作。

依據 99 年「國家節能減碳總計畫」十大標竿方案(四)「營造低碳產業結構」對推動產業節能減碳部分，以推動產業自願減量、節能減碳服務團技術服務為執行重點；另配合「永續能源政策綱領」施政目標，以「能源效率與能源技術」為主軸，積極推動各部門節能減碳工作，訂定二氧化碳減量目標，期望集結跨部會的力量，規劃及推動產業、運輸、住宅及生活等層面的具體行動，引導全民邁向低碳經濟與社會之長期願景，達成節能減碳之永續目標。

有鑑於此，能源局特提供經費，並邀請工業局一同強化製造業和服務業部門落實節能減碳之永續目標，規劃「服務業能源管理系統示範推廣輔導計畫」和「製造業能源管理系統示範應用與輔導推廣計畫」，引用 ISO 50001 國際標準輔導我國各行業能源大用戶及企業集團建置和加速推廣能源管理系統，期盼我國工業與服務業部門透過能源管理系統提供的系統化、標準化及資訊化的概念，落實節能績效持續改善。

二、能源管理系統輔導服務推動概念

ISO 50001 國際標準代表著能源管理的最佳實務，是以現有的全球標準和行動計畫為基礎而建立的，這項標準具體說明了對能源管理系統的各项要求，讓組織能發展並實行政策、找出重大的能源消耗領域，並制訂降低能源使用的目標。而節能技術則是協助企業發掘內部重大能源使用項目與確認符合能源管理法規。透過節能診斷輔導團隊來執行能源流向分析與節能空間診斷，以辨識組織營運過程產生的重大能源管理議題，並輔導業者設定能源管理目標、標的及行動計畫。

是以，為提供服務業與製造業能源用戶架構完整且可持續發展之能源管理，能源局與工業局整合了能源管理系統建置和專業節能技術診斷兩大項目的輔導服務。在符合 ISO 50001 國際標準的管理系統建置過程中，節能技術診斷提供了下列四項貢獻以強化能源用戶內部之能源管理系統，如圖 1 所示，讓能源管理系統較環境管理系統、品質管理系統具備管理上更實質之目標達成價值。

1.訂定可達成並能掌握之目標

應用節能績效量測與驗證方法，協助業者建立能源基線資料，以擬訂組織適當的能源績效管理指標，作為後續監測與管理能源績效的依據。另檢視組織實施能源管理系統的需求，協助業者擬訂符合組織營運型態的能源政策，並設定適當的能源管理目標、標的及行動方案，以落實推動能源管理系統。

2.研擬實質可行之改善項目

執行能源流向分析與節能空間診斷，以辨識組織營運過程產生的重大能源管理議題，並輔導業者設定能源管理目標、標的及行動計畫，且符合企業需求與特性。

3.建構完善之操作維護標準作業流程

透過專業節能診斷找出節能改善空間，針對特定作業擬訂管制程序，編訂符合現場需求的作業管制文件，以控制能源管理系統運作績效。此外，需依據作業準則操作及維護設施、過程、系統及設備，並對為組織工作或代表組織工作的人員溝通作業管制要求。

4.提供正確的監測與量測方法

專業之節能診斷技術可協助企業針對此重大設備制訂相關監測與量測方法，且實施之監督與量測結果應加以記錄與保存，以有效管理組織之重大能源使用設備。

節能技術診斷服務將針對耗能設備與監控系統進行檢查，確保提高能源使用效率，並透過現場能源檢測作業，檢核特定耗能設備或監控系統之能源使用紀錄，以找出現場節約能源的地方，提供能源管理行動計畫之建議。透過專業儀器進行現場量測，依實際量測結果研擬改善建議，以設定能源管理績效指標。

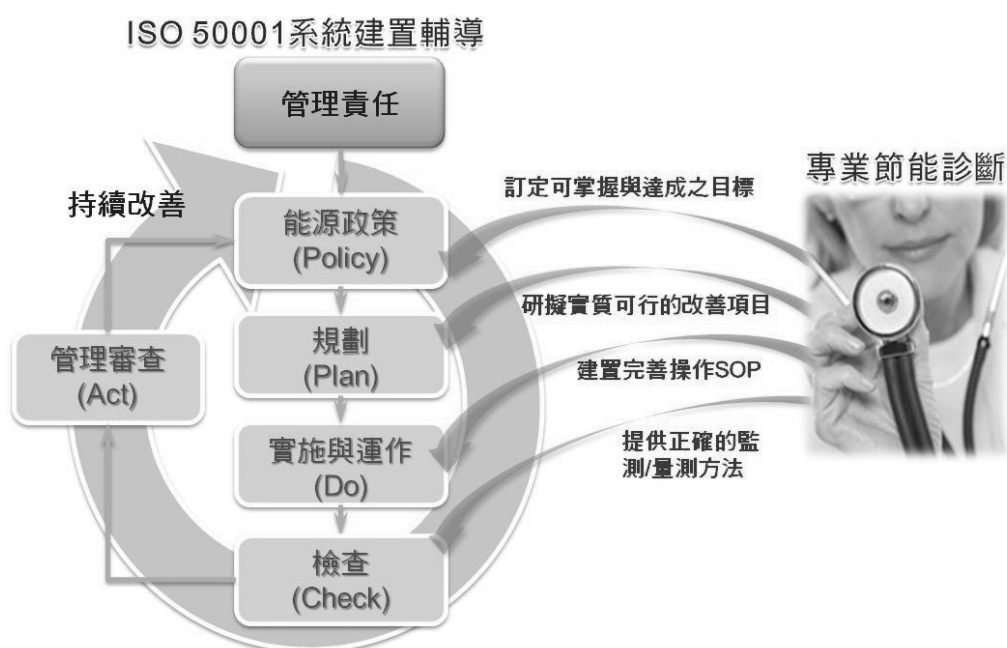


圖 1 能源管理系統輔導服務推動概念圖

三、輔導服務團隊之能量整合與輔導模式

結合國內管理顧問業之嚴謹系統建置和能源技術服務業(ESCOs)之專業節能技術診斷，提供完整性之能源管理輔導服務(如圖 2)，是帶給能源用戶長期投入節能

之最佳動力。以下說明國內管理顧問業和能源技術服務業之能量與配合本推動工作之輔導做法。



圖 2 能源管理系統輔導團隊整合圖

1.管理顧問業能源管理系統輔導

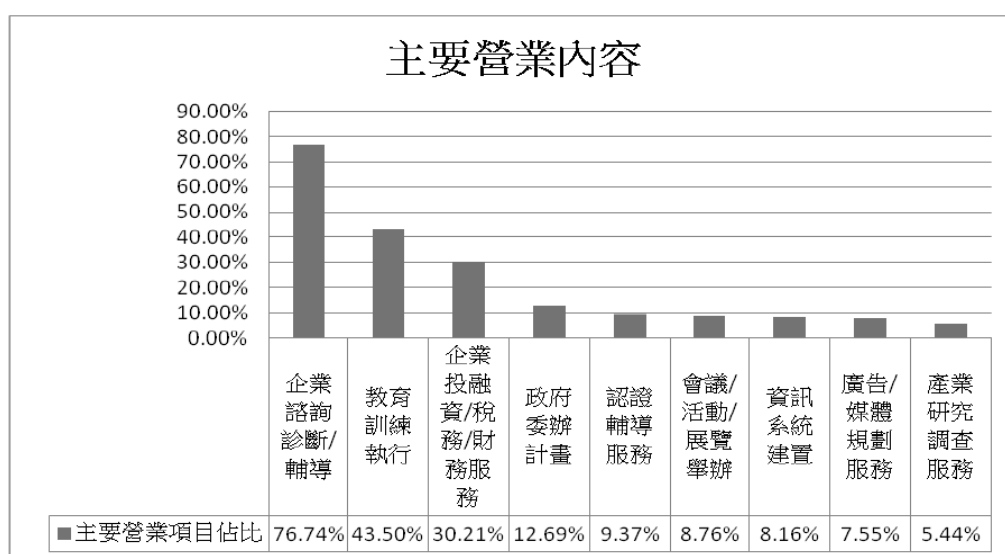
(1)管理顧問業定義

根據行政院主計處「中華民國行業標準分類」(第八次修訂, 2006 年 5 月), 將管理顧問業列於 M 類專業、科學及技術服務業中, 其定義指「凡從事提供企業或其他組織有關管理問題諮詢及輔導之行業均屬之, 如財務決策、行銷策略、人力資源規劃及生產管理等顧問。提供公共關係服務亦歸入本類。」主要經濟活動包括: 人事管理顧問服務、公共關係服務、生產管理顧問服務、行銷管理顧問服務、財務管理顧問服務、組織管理顧問服務及銷售管理顧問服務。

(2)我國管理顧問業發展

120 政府推動能源管理系統輔導介紹

依據經濟部中小企業處 100 年度管理顧問服務科技發展計畫之管理顧問產業供需調查與研究報告，我國專門為管理顧問之公司家數共 1,706 家，推測管理顧問業者整體管理顧問業總體年產值為 273.21 億元。進一步分析管理顧問業營收結構，如圖 3.1.2-1，整體而言以「企業諮詢診斷/輔導」為最，占 76.74%；其次為「教育訓練」占 43.50%；再者為「企業投融資/稅務/財務服務」占 30.21%。



資料來源：管理顧問產業供需調查與研究報告，中小企業處

圖 3 管理顧問業營收來源分布(N=1,127)

(3)管理顧問業技術服務能量登錄制度介紹

工業局為推動知識服務業發展，扶持國內技術服務機構(含營利機構、非營利機構及學校)，建構公平競爭環境，鼓勵技術服務機構申請技術服務能量之登錄，進而能成為工業局功能性專案輔導計畫之技術服務單位，並藉由工業局專案計畫資源，協助產業進行研發創新、提升效能、升級轉型等產業知識化工作。工業局技術服務能量登錄類別、服務項目及分項包括：

- ✧ AU 類：自動化服務機構
- ✧ IT 類：資訊服務機構
- ✧ IP 類：智慧財產技術服務機構
- ✧ DE 類：設計服務機構
- ✧ MA 類：管理顧問服務機構
- ✧ RD 類：研究發展服務機構
- ✧ IN 類：檢驗及認證服務機構
- ✧ SD 類：永續發展服務機構

其中可提供能源管理系統之輔導服務需求者為 SD 類永續發展服務機構中(表 1)，登錄於「SD1 環保服務」之「SD108 能源管理系統建制及持續改善服務」，而申請此 SD1 環保服務項目之服務機構服務能量登錄審查標準需符合資格如表 2 所示。

表 1 工業局技術服務能量登錄 SD1 環保服務類別表

項目	審核標準
SD1 環保服務	SD101 環境管理系統建制及持續改善服務 SD102 溫室氣體盤查、確證、查證與減量服務 SD103 國際環保指令推廣服務 SD104 企業社會責任推廣服務 SD105 節能技術推廣服務 SD106 環境技術服務(含污染防治、廢棄物資源化、水資源利用等) SD107 產品環境資訊揭露服務 SD108 能源管理系統建制及持續改善服務 SD109 其他環保服務

資料來源：產業永續發展整合資訊網 <http://proj.ftis.org.tw/isdn/Technology>

表 2 工業局技術服務能量登錄 SD1 環保服務項目審查標準

項目	審查標準
人力素質	<p>一、人力：至少 5 位專任人員</p> <p>二、學經歷：</p> <p>1.教育程度具下列條件之一：</p> <p>碩士學位以上且至少具備 2 年環保相關工作經驗。</p> <p>大學學位且至少具備 3 年環保相關工作經驗。</p> <p>專科學位且至少具備 4 年環保相關工作經驗。</p> <p>其他學位且至少具備 6 年環保相關工作經驗。</p> <p>2.其中至少 3 位專任人員有以下資格之一：</p> <p>具申請登錄項目 2 年以上相關工作經驗。</p> <p>曾接受工業局認可之申請登錄項目相關訓練課程並領有結業證明者，或受過其他 35 小時以上之申請登錄項目相關訓練並領有訓練結業證書者。</p> <p>曾取得工業局之申請登錄項目輔導人員登錄證書，或取得申請登錄項目國際認可之相關主任稽核/查證員合格證書。</p> <p>具有環工技師資格，惟節能技術推廣服務亦可由電機技師、冷凍空調技師、冷凍空調裝修甲級技術士替代。</p>
實績	列舉最近二年內完成之實績資料，足以證明本機構具有申請登錄項目之相關經驗及能力。
財務狀況	財務健全、淨值不為負值。

資料來源：產業永續發展整合資訊網 <http://proj.ftis.org.tw/isdn/Technology>

(4)能源管理系統輔導做法

能源管理系統旨在協助組織建立能源基線及能源績效指標，並透過高層宣示及系統 P-D-C-A 循環機制持續改善，達成系統化能源管理之目標，透過此一能源管理系統之運作，達到改善能源使用效率。採用國際 ISO 組織公告之 ISO 50001 能源管理系統標準規範，管理系統輔導工作流程如圖 4 所示。



圖 4 能源管理系統輔導工作流程圖

a. 先期成立推行組織

本階段工作由輔導人員與企業承辦人員溝通並確認輔導範疇，如：輔導地點、輔導項目、計畫時程、預期目標及聯絡窗口，說明能源管理系統觀念與內部權責分工建議。最後協助成立適當的推行委員會，並透過啟始會議展現高階主管推動能源管理系統的決心。

b. 執行能源規劃

本階段工作由輔導人員與承辦人員溝通，並確認能源管理組織架構及現場作業流程，主要重點為發掘內部重大能源使用及確認符合能源管理法規狀態，並透過辦理教育訓練方式，讓企業內各單位人員參與鑑別內部重大能源使用，並據以作為後續改善規劃的基礎。

當企業建立能源管理團隊後，輔導人員將協助企業著手進行能源使用調查和發掘內部重大能源使用項目。

進而，輔導人員協助企業對耗能設備與監控系統進行檢查，以確保提高能源使用效率，並透過現場能源檢測作業，檢核特定耗能設備或監控系統之能源使用紀錄，

以找出現場節約能源的地方，並提供能源管理行動計畫之建議。透過專業儀器進行現場量測，可以研擬出符合組織需求與特性提供適當的改善建議，以達到實質節能之目的。

輔導人員對企業提供的基本用電資料進行分析，以了解其能源使用狀況，藉由電費單、電力單線圖、能源平衡圖、公用設備能源耗用狀況及組織節能需求等資訊，找出較完整的節能空間診斷，再依現場設備的稼動率、耗能量及安全性之考量，透過儀器量測分析，發掘出節能潛力空間。

c. 推行能源管理計畫

本階段工作基於企業實施能源審查結果，輔導人員應用國際能源效率評估組織 (Efficiency Valuation Organization, EVO) 提供的節能績效量測與驗證的方法，協助企業建立能源基線資料，並據以擬訂能源管理績效指標，以作為後續監測與管理能源績效的依據。

輔導人員與承辦人員依重大能源使用評估結果，討論後續改善方案與作業管制之需求。企業依實施能源管理系統的需求，擬訂符合組織營運型態的能源政策。經鑑別的重大能源使用，透過小組討論與腦力激盪方式找出可改善空間及能源診斷提出的節能方案，並著手規劃適當的能源管理目標、標的及行動計畫。為有效控制能源管理成效，開始討論文件化的作業管制架構，並編訂符合現場需求的作業管制文件。

d. 建立能源管理制度和實施管理制度

本階段工作由輔導人員與承辦人員依據 ISO 50001 標準建立符合能源管理需求的標準化文件管制系統，包括：建立能源管理手冊，制定能源管理系統程序文件(含作業指導書、操作規範、檢驗標準及紀錄表單)。此外追蹤執行管理系統之落實情形，可避免因系統運作出現偏差而導致預設目標無法達成的情形。

依企業辨識重大能源管理議題之結果，輔導人員協助討論後續行動計畫與作業管制之需求，再經小組討論與腦力激盪方式找出節能改善空間。為控制能源管理系統運作績效，在輔導人員協助下，企業應針對特定作業擬訂管制程序，編訂符合現場需求的作業管制文件。另外，本工作項協助受輔導業者建立能源設計與採購的管

理程序，並由輔導人員輔導企業在規劃新設施或採購新設備的時候，可以考慮節能績效的需求。

e. 實施監督與量測

本階段工作由輔導人員協助企業以節能技術服務之基礎，將能源管理績效指標所需之監測項目和影響變因項目一一建立監督量測制度和方式，使得能源管理績效指標得以長期監督計算，並與能源基線對應比較，呈現落實節能改善方案後之節能效益，促使邁向企業設訂之能源管理政策和目標。

f. 系統內部稽核、教育訓練及管理審查

本階段工作將透過實施教育訓練過程，協助人員熟悉內部稽核的執行方式，並藉由改善稽核缺失的過程，修改文件管制內容與加強相關能源管制措施。當所有稽核缺失獲得改善後，召開能源管理審查會議，邀請高階主管主持會議，擬訂後續改善行動。

在教育訓練方面，依建置能源管理系統需求、達成節能改善行動以及推廣能源管理教育之目的，對每個輔導服務單位可考慮規劃提供能源管理趨勢、能源管理系統建置要項及節約能源技術等類型之能源管理種子人員訓練課程。

在內部稽核方面，ISO 50001 國際標準要求組織應於預定規劃期間內實施稽核，以確保能源管理系統能符合組織對能源管理系統規劃的安排、組織建立的能源目標及標的，確保能源管理系統有效實施、維持及持續改善。

內部稽核計畫之安排，應將組織營運過程與活動區域之狀態與重要性納入考量，並追蹤先前稽核的結果是否已獲得改善。

在管理審查方面，為確保能源管理系統持續有效地實施，ISO 50001 標準要求組織管理階層應依其規劃期間，審查能源管理系統運作。

g. 外部驗證

本階段工作由輔導人員協助實施驗證前準備，配合第三者驗證工作之實施，協助企業負責人員向國際驗證單位提出驗證申請。

2. 能源技術服務業節能服務

(1) 能源技術服務業定義

我國能源技術服務產業(ESCOs)範疇，依經濟部商業司定義為「從事新淨潔能源(包含太陽能、生質與廢棄功能、地熱、海洋能、風力、水力)、節約能源、提升能源使用效率或抑制移轉尖峰用電負載之設備、系統及工程之規劃、可行性研究、設計、安裝、施工、維護、檢測、代操作、相關軟硬體構建及其相關技術服務之行業。」，行業代碼為 IG03010。

(2)我國能源技術服務業發展

我國自 87 年參考國外經驗引介 ESCOs 能源技術服務產業於國內，而為加速落實推動 ESCOs 產業發展，於 94 年發起成立台灣能源技術服務產業發展協會，提供能源技術服務業者正確與專業的知識，建構業者與業者、業者與客戶的溝通平台等，以協助能源用戶提升節能技術，迄今已累計有 80 多家團體會員與 150 多位個人會員。

95 年 3 月時能源局成立專責的「能源技術服務產業推動辦公室」，加強 ESCOs 環境建置與產業推動及輔導。97 年 8 月成立中華民國能源技術服務商業同業公會，作為能源技術服務業者與政府之溝通平台，共同突破推動節約能源工作之障礙，並秉持朝向全方位服務之精神，現階段 ESCOs 廠商之組成，已成功結合設備供應商、工程施工、工程規劃整合、金融機構與專案管理機構等類型廠商提供 ESCOs 服務，會員廠商約 200 家，企業結構以中小企業為主。而廠商之技術領域更橫跨冷凍空調工程、節能工程、監控系統、燃燒及電能管理等各節能技術領域。另截至 101 年 12 月 19 日止，經經濟部商業司統計公司行號營業項目有登記為能源技術服務業之廠商共計 7,390 家。

目前我國 ESCOs 產業結構細分為設備供應商、工程施工、工程規劃整合與專案管理機構及金融機構/設備租賃等 5 大類。其中工程施工、工程規劃整合與專案管理等三類主要由傳統之工程公司或工程顧問公司轉型而成。而設備供應商(含技術合作與代理)，又細分為空調系統、環境控制、電力系統、鍋爐與燃燒系統、照明系統、水處理系統、空壓系統以及太陽能系統等。

登記營業項目為能源技術服務業且資本額前 500 大之廠商中計有 201 家廠商實際執行業務項目符合 ESCOs 範疇，其中有 35 家除提供設備供應外，亦兼

具工程施工服務。分析以設備供應廠商 52%(105 家)的占比最高，工程施工 38%(92 家)次之，而同時具備設備供應及工程施工之廠商占比 17%(35 家)，其餘工程規劃整合、專案管理機構及金融機構/設備租賃，各分別僅占 < 1%，如圖 5。

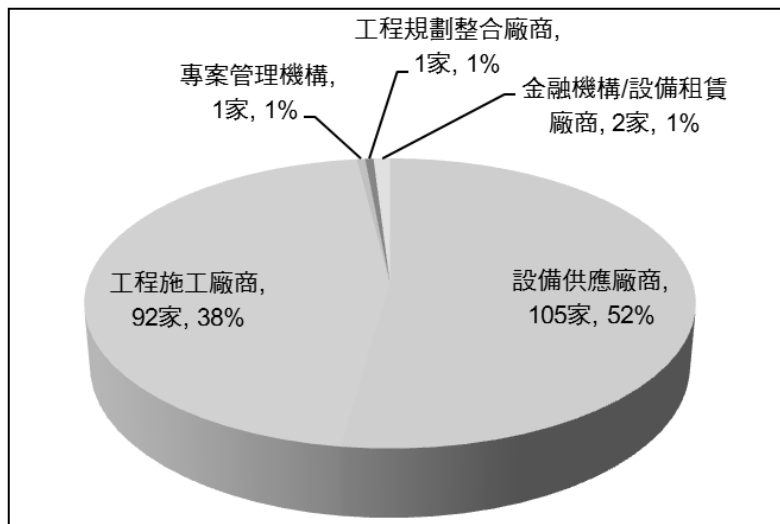


圖 5 資本額前 500 大能源技術服務業實際執行 ESCOs 業務廠商(201 家)類別占比

(3)能源技術服務業服務能量登錄制度介紹

能源局為推動能源技術服務業發展，鼓勵能源技術服務業申請服務能量之登錄，希望藉由網路資訊交流平台與 ESCOs 廠商資料庫的建置，提供能源用戶查詢能源技術服務業者執行業務之相關資訊，以促進節能改善專案媒合機會。以下為主要登錄要求項目。

a.登錄對象資格

申請能源技術服務業資訊平台登錄之廠商，需符合以下二點資格：

- ◎國內依法登記成立之獨資、合夥事業或公司；
- ◎從事能源技術服務工作，營業項目登記有 IG03010 之公司。

b.登錄技術領域

登錄廠商依專業技術領域選擇所提供服務範圍，選擇項目須提出相對應之營業項目登記證明，所選擇之項目須具備一項實績，以佐證該系統技術之服務經驗，技術領域項目如下：

- | | | |
|-------|---------|---------|
| ◎空調系統 | ◎電能管理系統 | ◎熱泵系統 |
| ◎照明系統 | ◎熱能燃燒系統 | ◎監控系統 |
| ◎空壓系統 | ◎冷凍冷藏 | ◎再生能源系統 |
| ◎其他項目 | | |

c.登錄節能服務業務範圍

登錄廠商依執行過之業務模式登錄業務範圍，所登錄之項目須具備一項實績，以佐證該業務模式之服務經驗，業務範圍項目如下：

- | | | |
|---------|-------|---------------|
| ◎安裝施工 | ◎工程規劃 | ◎操作運轉維護 |
| ◎效率檢測 | ◎技術顧問 | ◎節能方案評估(系統整合) |
| ◎節能績效驗證 | ◎其他項 | |

(4)節能技術服務做法

由國內 ESCOs 能源技術服務業提供輔導服務，ESCOs 業者依現場需求提供節能減碳技術服務，並對能源設備效率進行檢測(如：電力、空調、鍋爐、轉動機械及照明系統等)，協助業者發掘潛在節能改善空間，研提適當的節能改善措施，使其能源設備與系統之效率達到最佳化，以落實節能改善行動，節能技術服務流程如圖 6 所示。

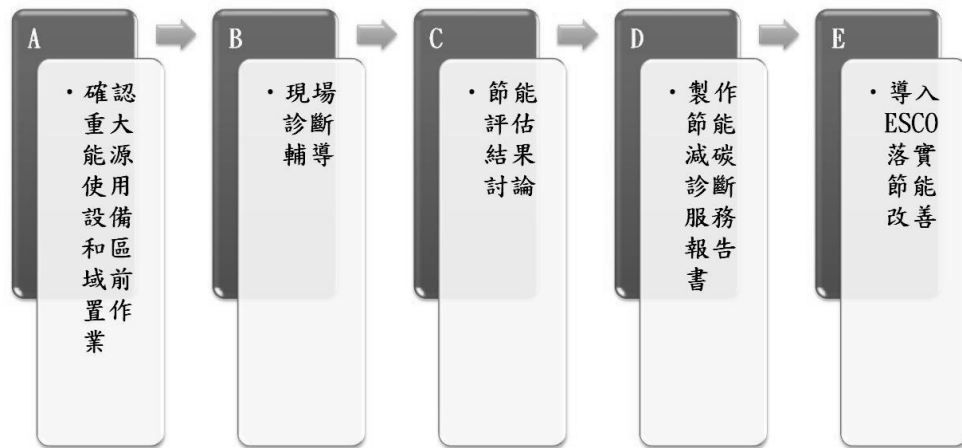


圖 6 節能技術服務流程圖

a. 確認重大能源使用設備和區域前置作業

首先收集企業基本資料，包括前一年度企業能源查核申報表、最近 1 年電費通知單、能源使用量、製程生產流程圖、能源平衡圖、公用及製程設備能源耗用狀況，以及節能問題與需求等資訊。使輔導團隊能瞭解該企業的能源使用特性，以初步評估能耗情形及可能對應之改善對策。若廠商以往曾進行節能改善(3 年內)或溫室氣體盤查，將請企業提供以往執行節能改善措施、改善成效、或溫室氣體盤查表單，以詳細瞭解受輔導業者其能源使用改善情形及溫室氣體排放特性，供輔導時，能快速有效研判分析，提出具體有效改善建議方案。

此外，於現場服務前，將針對企業特性、能源使用情形及企業內主要耗能機器及設備，備妥相關診斷輔導工具、表單、技術資料及相關檢測儀器，以利輔導工作進行。相關儀器建議包含：電力測試、流量測試、分析設備、資料收集以及溫度溼度測試等，以符合公用系統(電力、照明、空調、空壓及蒸汽鍋爐)及製程等不同設備之各項常態測試功能，提供全區專業診斷服務所需，以發掘企業的節能改善空間。

b. 現場診斷輔導

實施現場診斷輔導，相關作業流程包括：

130 政府推動能源管理系統輔導介紹

- ✧ 技術服務內容說明；
- ✧ 資料審閱，確認企業基本能耗資料之正確性；
- ✧ 廠區現勘，確認主要耗能設備位置及其週邊環境；
- ✧ 設備現勘，確認製程與公用設備之操作程序與運轉紀錄；
- ✧ 儀器量測，依據現場作業需求，使用檢測儀器針對耗能設備進行各項常態測試功能，以發掘企業的節能改善空間。

c. 節能評估結果討論及製作節能減碳診斷服務報告書

現場診斷輔導結束後，和現場人員討論提出適當的節能措施管制策略，作為後續推動節能改善之依據。依據各項輔導紀錄及調查表單，將相關紀錄表單納入輔導資料庫統一管理，並依企業設備能耗及溫室氣體排放情況及兼顧企業生產需求及經濟效益、減量潛力評估之原則，提出符合廠商需求之改善方案和節能措施管制策略，納入 ISO 50001 管理系統中落實之。

改善方案報告書內容包含企業基本資料、能源耗用/溫室氣體排放現狀說明、能耗檢測及問題分析結果、改善建議事項、初步節能減碳潛力/投資與回收效益評估，讓受輔導業者可依財務狀況評估投資改善之期程。同時，依各受輔導業者現場診斷之結果，提出適當節能措施管制策略，配合改善方案之執行，以有效落實節能減碳工作之推動。

d. 導入 ESCOs 落實節能改善

為促使輔導企業積極落實節能改善提案，本工作將透過 ESCOs 公司節能技術診斷服務後，進一步由 ESCOs 公司協助企業進行節能實質改善工程。ESCOs 公司可提供綜合性工程技術服務，對能源用戶保證節能效益之承諾，並採用適當的量測與驗證程序計算節能效益，再從節省之能源費用來回收節能技術服務與設備等費用支出，也可以在兩造協商合意下，由能源用戶編列部分預算支付專案費用，以縮短回收年限，如圖 7 所示。引進 ESCOs 公司參與企業節能績效改善工作，能降低企業投入節能實質改善工程的風險，並提升企業改善之意願。



資料來源：經濟部能源局「節能績效保證專案示範推廣補助要點宣導手冊」

圖 7 ESCOs 節能改善效益圖

四、能源管理系統輔導初步成果

1. 能源管理系統輔導

能源局自 100 年起，同為 ISO 國際標準組織公布 ISO 50001 標準的年份，立即啟動我國服務業部門的能源管理系統輔導工作，100 年和 101 年在「住商部門及公部門能源查核管理與節能技術服務計畫」中，進行輔導元智大學和長庚醫院嘉義分院等 10 家能源用戶示範性建置 ISO 50001 能源管理系統，而 102 年起推動「服務業能源管理系統示範推廣輔導計畫」，全面輔導台北大眾捷運公司和台

132 政府推動能源管理系統輔導介紹

灣大哥大等 20 家服務業建置能源管理系統，迄今共完成輔導 30 家服務業能源用戶。

在能源局經費支持下，工業局自 102 年起推動「製造業能源管理系統示範應用與輔導推廣計畫」，輔導正隆公司竹北廠等 34 家工廠和李長榮化工高雄廠等 6 個中衛體系建置能源管理系統。在政府的協助之下，服務業和製造業建置能源管理系統名單和行業別如表 3 和表 4 所示。

表 3 歷年服務業能源管理系統輔導名單

	行業別	廠商名稱		行業別	廠商名稱
能源大用戶	醫療保健服務業	台中榮民總醫院	企業集團用戶	銀行業	玉山銀行
		恩主公醫院			國泰世華銀行
		台北市立萬芳醫院			第一銀行
		光田醫院		證券業	玉山證券
		台安醫院		保險業	國泰人壽
		長庚醫院嘉義分院			新光人壽
		彰化基督教醫院		電信業	台灣大哥大
	教育服務業	中央大學		運輸服務業	台北大眾捷運
		弘光科技大學			中華航空
		聖約翰科技大學		保全業	中興保全
		中興大學			新光保全
		元智大學		零售業	大潤發
	旅館業	美麗信酒店			
		長榮桂冠酒店			
	零售業	特力屋			
	電信業	遠傳電信			
	銀行業	中國信託			

表 4 歷年製造業能源管理系統輔導名單

行業別	廠商名稱
化學材料製造業	中美和石油化學公司台中廠
	南寶樹脂化學工廠公司寶立廠
	聯成化學科技公司林園廠
	台橡公司高雄廠
	長春石油化學公司苗栗廠
	歐萊德國際公司
電子零組件製造業	凌巨科技公司八德廠
	欣興電子公司蘆竹二廠
	默克光電科技公司
	矽品精密工業公司大豐廠
	健鼎科技公司
	台灣通用器材公司
紙漿、紙及紙製品製造業	中華紙漿公司-花蓮廠
	正隆公司大園廠
	正隆公司竹北廠
	正隆公司后里廠
	台灣史谷脫紙業公司大園廠
	榮成紙業公司
金屬製品製造業	三星科技公司
	伯鑫工具公司
	榮剛材料科技公司
紡織業	遠東新世紀公司湖口紡織廠
	衛普實業公司
	台南紡織公司太子廠
塑膠製品製造業	四維精密材料公司桃園廠
	四維創新材料公司新竹工廠
其他運輸工具及其零件製造業	漢翔航空工業公司台中一廠區
非金屬礦物製造業	和成欣業公司
汽車及其零件製造業	璨揚企業公司
家具製造業	震旦行公司家具廠

表 4 歷年製造業能源管理系統輔導名單(續)

行業別	廠商名稱
基本金屬製造業	盛餘公司
電腦、電子產品及光學製品製造業	寶麗明公司
橡膠製品製造業	國聯矽業化學公司
藥品及醫用化學製品製造業	杏輝藥品工業公司
電子零組件製造業	明基材料公司桃園廠
	綠能科技公司
化學製品製造業	李長榮化工公司高雄廠
	紘洋化學公司
電腦、電子產品及光學製品製造業	英業達公司桃園廠
電力設備製造業	華城電機公司中壢廠

在服務業方面，已輔導 10 類行業之服務業(醫院、學校、旅館、量販業、電信業、銀行業、運輸業、保險業、證券業及保全業等)能源大用戶及企業集團；而製造業方面，已輔導 16 類行業之製造業工廠(化學材料、電子零組件、造紙、金屬製品、紡織、塑膠製品、非金屬礦物、家具、基本金屬、電子產品、橡膠製品、藥品、化學製品、電力設備、汽車及其零件、運輸工具及其零件)。

上述共 70 家廠商和企業用戶在完整的輔導服務下，全數通過 ISO 50001 國際驗證。為宣傳推廣能源管理系統之示範輔導效果，分享能源用戶建置能源管理系統之推動經驗，邀請更多企業廠商共同參與推動能源管理系統，以落實能源績效持續改善之永續目標，能源局邀請工業局於 102 年 12 月 19 日假台灣金融研訓院菁業堂舉辦「ISO 50001 能源管理系統示範輔導成果發表會」。活動會場外也安排國內 ESCOs 產業公(協)會與能源技術業者介紹新的節能技術和設備，宣傳節能技術服務新知，與現場業者進行技術交流。



圖 8 102 年 ISO 50001 能源管理系統示範輔導成果發表會

2.促進節能效益

在輔導過程中，專業管理顧問師和節能技術師合作，依現場實施節能技術診斷結果，依營運需求、財務考量、業務條件、改善技術可行性及利害相關者觀點，協助受輔導之能源用戶逐項檢討各項節能提案之可行性，並與各能源用戶能源管理推行團隊成員共同討論目標、標的及行動計畫。

透過能源管理系統的建置，70 家服務業和製造業廠商皆提出多項節能的改善行動計畫，並積極落實改善工程，故在管理系統要求下，呈現出廠商踴躍投資改善之良好成果。

表 5 統計 100-102 年服務業各受輔導能源用戶內部提出之能源管理改善行動計畫之節能成果，共約節省用電 3,120 萬度/年、節省用油 757 公秉/年、節省能源成本 1 億 1,400 萬元/年，3 年內也促進了 ESCOs 產值約 3 億 4,350 萬元。

而製造業 102 年 34 家示範標竿廠商和 6 個中衛體系示範實施改善行動計畫，獲致節電量約 1,900 萬度/年和節約燃料油量約 7,400 kLOE/年，節約能源成本約 1 億 3,200 萬元/年，促進投資 ESCOs 產值約 3 億 1,200 萬元。

在標準要求下，能源用戶自願投資高達數億元以上進行節能改善工程，多數改善可於 3 年內回收投資金額，顯見 ISO 50001 能源管理系統對能源用戶節能工作具有強大的引導性。

表 5 歷年能源管理系統輔導節能改善行動計畫效益表

	年份	節電量 (萬度/年)	節油量 (kLOE/年)	節省能源成本 (萬元/年)	促進 ESCOs 投資 (萬元)
服務業	100	435.60	376.16	1,879	5,650
	101	795.98	345.25	2,880	8,700
	102	1,886.5	36	6,642	20,000
製造業	102	24,007	12,858	28,177	35,200

將 100-102 年受輔導服務業能源用戶的改善行動計畫依節能類別統計，發現多數進行「照明」改善為主，高達 49 項(47.6%)。究因為能源用戶最容易進行且經費較低之節能改善；其次實行之改善行動計畫項目為空調系統 30 件。

將 102 年受輔導製造業廠商的改善行動計畫依節能類別統計，發現工廠多數以進行「製程」改善為主，高達 51 項(45.5%)。究因為廠商對於製程之瞭解程度結合外來之節能技術服務業(ESCOs)，確實協助廠商進行根本之製程節能工作，這也是輔導計畫引進 ESCOs 業者提供服務，從與廠商不同角度和經驗，和廠商一同挖掘具節能潛力項目之緣由。故，輔導計畫可獲得良好之量化和質化效益；其次實行之改善行動計畫項目為照明系統(18)項和空調系統(17 件)。

將服務業和製造業受輔導之能源用戶所投資改善項目合計，則以照明改善 67 件最多，其次為製造業之製程改善 51 件，再其次為空調改善 47 件。

表 6 能源管理系統之改善行動計畫節能類別統計表

	空調	照明	鍋爐	製程	空壓	馬達	電力系統	蒸汽系統	其他
服務業	30	49	3	-	-	-	-	-	21
製造業	17	18	6	51	11	3	2	1	5
總計	47	67	9	51	11	3	2	1	26

政府部門推動能源用戶建置能源管理系統雖然正值執行初期，但深入企業文化的能源管理制度已儼然成為推動企業內部持續性改善能源使用之動力。企業透過與國際接軌的能源管理制度，持續改善能源績效，提升自我之競爭力將

有助於企業發展，同時政府機關也獲得降低全國總能源消費量的亮眼成果，以及邁向節能減碳總目標的一大步。

五、結論

政府部門推動能源用戶建置能源管理系統雖然正值執行初期，但深入企業文化的能源管理制度已儼然成為推動企業內部持續性改善能源使用之動力。企業透過與國際接軌的能源管理制度，持續改善能源績效，提升自我之競爭力將有助於企業發展，同時政府機關也獲得降低全國總能源消費量的亮眼成果，以及邁向節能減碳總目標的一大步。

參考資料

- 1.經濟部能源局，服務業能源管理系統示範推廣輔導計畫期末報告，102 年 12 月。
- 2.經濟部工業局，製造業能源管理系統示範應用與輔導推廣計畫期末報告，102 年 12 月。

ISO 50001 系列標準最新制定狀況及 EnMS 認證多邊承認協議之發展

葉薇芬*

摘 要

ISO 組織於 2011 年 6 月 15 日正式公布 ISO 50001 能源管理系統(Energy Management Systems-Requirements with guidance for use, EnMS)標準，本份標準可提供組織建立所需的系統與過程以改善能源績效，包括能源效率、能源使用及能源消耗，它適用於所有型式、規模(大小)之組織。隨著本標準之公布，有關與本標準相關之稽核、認證，以及能源績效之相關議題，益形顯得重要。因此，ISO TC 242 技術委員會接著草擬此系列標準，增訂規範要求或提供指引以協助組織及認證機構做為建立或實施之遵循或參考。此系列標準除 ISO 50001 外，包括 ISO 50002、ISO 50003、ISO 50004、ISO 50006 及 ISO 50015，大部分標準仍為草案階段，預計於 2014 或 2015 年陸續公布，本文將簡要介紹此系列標準制定現況及草案內容重點，藉以瞭解其發展方向。

至於 EnMS 能源管理系統之多邊承認協議(Multilateral Agreement, MLA)之發展，APEC 於 2014 提供補助專案，希望促進亞太地區經濟體之認證機構，儘速推動此領域之 MLA，本文亦簡要說明目前之認證發展現況。

【關鍵字】能源管理系統、能源基線、能源績效指標、量測及驗證、多邊承認協議

*財團法人全國認證基金會 經理

一、前言

ISO 50001 能源管理系列相關標準之發展，主要目的是提供組織實施、維持及改善能源管理系統及提升能源績效，以減少溫室氣體排放與其他有關的環境衝擊。此系列標準除 ISO 50001 外，另包括 ISO 50002、ISO 50003、ISO 50004、ISO 50006 及 ISO 50015，其中 ISO 50001 為組織實施能源管理系統須遵循之標準及驗證機構執行驗證依循之標準，當一個組織要著手建立 ISO 50001 能源管理系統時，ISO 50004 則可提供一個以 ISO 50001 條文為架構之指引，除了對 ISO 50001 各條文深入解釋外，並佐以參考之實務範例，此外，於實施 ISO 50001 能源管理系統之過程，組織可尋求內部或外部資源，依據 ISO 50002 之要求執行能源稽核以鑑別能源改善的機會，在實務之執行上，ISO 50006 提供如何鑑別能源績效指標(EnPI)及能源基線(EnB)，並參考 ISO 50015 之要求，執行量測及驗證(M & V)以確認能源績效之改善。因此，ISO 50001 能源管理系列之各標準實為息息相關，並互為應用，以達能源績效改善之目標。

國內廠商及驗證機構於 2011 年即開始建置能源管理系統及提供驗證服務。財團法人全國認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation, TAF)亦因應國內之驗證需求，及國際認證趨勢之發展，於 2012 年 1 月 1 日開放受理 EnMS 能源管理系統認證服務。隨著國際間節能減碳及溫室氣體議題受到全球之關注，推動能源管理系統及國際多邊承認協議之腳步，亦加速推進及發展。

二、ISO 50001 系列標準最新制定狀況

ISO 50001 能源管理系列相關標準之最新制定狀況，可參考表 1，本文另將簡要介紹 ISO 50002、ISO 50003、ISO 50004、ISO 50006 及 ISO 50015 等標準草案之重要內容及方向。有關各標準之使用及相互關係，可參考圖 1。

表 1 ISO 50001 能源管理系列相關標準之最新制定狀況

標準名稱	版本	制定目的
ISO 50001 Energy management systems – Requirements with guidance for use 能源管理系統 – 使用指引之要求事項	IS (2011/6/15)	提供組織實施、維持及改善能源管理系統及提升能源績效，以減少溫室氣體排放與其他有關的環境衝擊
ISO 50002 Energy management systems – Requirements with guidance for use 能源管理系統 – 附使用指引之要求事項	IS (發布程序中)	執行能源稽核以鑑別能源績效改善之機會
ISO 50003 Energy management systems – Requirements for bodies providing audit and certification of energy management systems 能源管理系統 – 機構提供能源管理系統稽核及驗證之要求	DIS	提供對能源管理系統(EnMS)之額外特定技術要求，以確保稽核及驗證之有效性
ISO 50004 Energy management systems – Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system 能源管理系統 – 能源管理系統之實施、維持及改善之指引	DIS	提供組織實施以 ISO 50001 為基礎之能源管理系統(EnMS)，以及如何採取系統化方法達成能源管理及能源績效之持續改善之指引
ISO 50006 Energy management systems – Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) – General principles and guidance 能源管理系統 – 使用能源基線及能源績效指標量測能源績效之一般原則及指引	DIS	提供組織如何鑑別相關能源績效之資訊，以及建立、使用及維持 EnPIs、EnBs
ISO 50015 Measurement and verification of organizational energy performance – General principles and guidance 組織能源績效之量測及驗證之一般原則及指引	DIS	建立共通之原則及指引以量測及驗證(M&V)組織能源績效

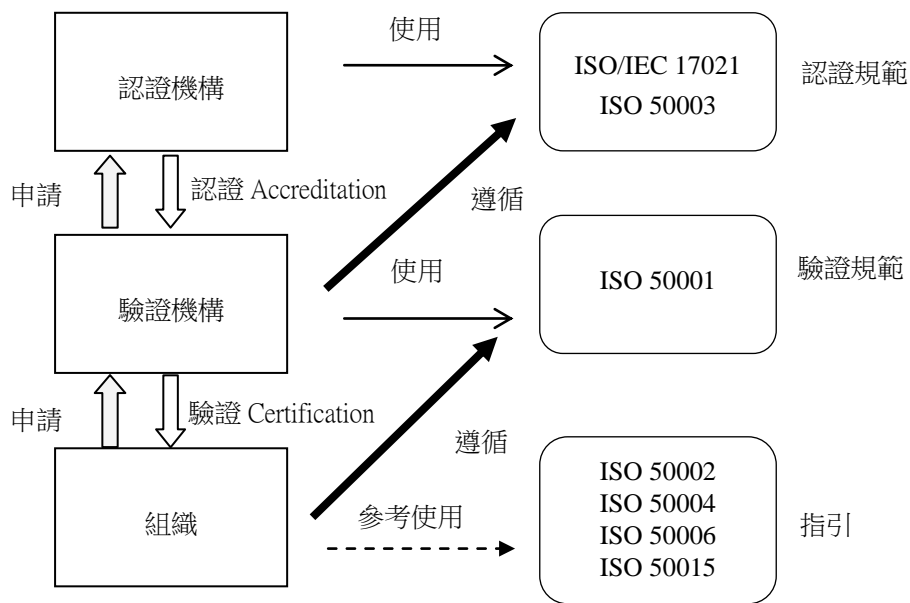


圖 1 ISO 50001 能源管理系列相關標準之使用及關係

1.ISO 50002 Energy Audits – Requirements with guidance for use (能源稽核－附使用指引之要求事項)

ISO 50002 標準是參照 EN 16247-3 為基礎訂定，主要目的是執行能源稽核以鑑別能源績效改善之機會。ISO 官網公告之標準制定階段為 IS 標準，惟尚未完成發布程序(截至 103 年 5 月 31 日止)。Energy Audits (能源稽核) 的觀念，於 ISO 50001:2011 之附錄 A4.3 節能源審查之章節中首先被提出，說明其與能源審查之關係” 能源稽核或評鑑包含組織、過程或兩者之能源績效的詳細審查。其通常是以實際能源績效之適當的量測與觀察為基礎”，也明述執行能源稽核之目的“能源稽核被規劃與執行做為改善能源績效機會之鑑別與排序的一部分”，另外本標準也很明確揭示它並未涵蓋 ISO 50003 有關能源管理系統稽核之範圍。本標準中「能源稽核」定義為：系統性地分析被稽核標的之能源使用、消耗，以鑑別，量化及報告能源績效改善之機會。能源稽核之執行者，不限於內部或外部資源。

本標準內容共 5 個章節及 1 個附錄，主要包括範圍、名詞定義、參考規範、能源稽核原則、能源稽核之執行，附錄則介紹如何使用本標準。第 4 章之能源稽

核原則包括對能源稽核員之原則要求及執行能源稽核之原則要求二大部份。第 5 章為能源稽核之主軸，以能源稽核流程之 9 個步驟(如圖 2)說明如何執行能源稽核。

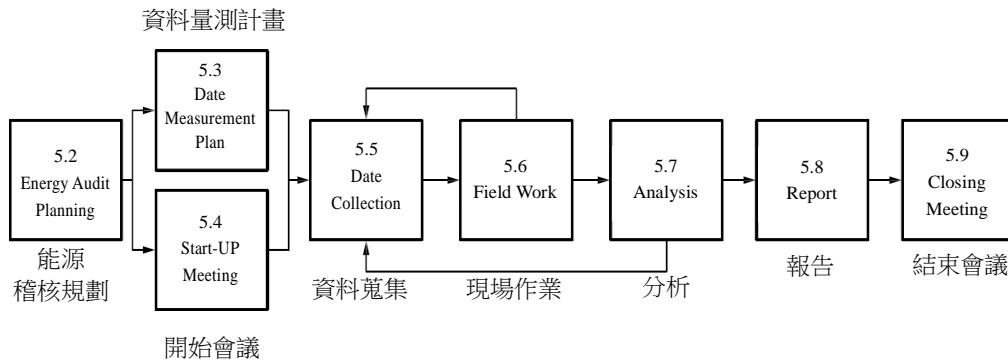


圖 2 能源稽核過程之流程圖

能源稽核之過程中，於本標準中特別被強調的是能源稽核員要能鑑別能源績效改善的機會，並能進一步分析及提出報告。另外，能源稽核亦可視組織規模、能源使用、能源消耗、資料蒐集之方式、製程特性..等不同考量因素，而區分為 3 等級之能源稽核(分別為 Level 1, Level 2, Level3)，各有不同程度要求之規範(參照本標準附錄 A)。ISO 50001 標準所規範之能源管理系統並未要求必須執行能源稽核，但卻可做為能源審查重要的參考輸入資料。

2.ISO/DIS 50003 Energy management systems – Requirements for bodies providing audit and certification of energy management systems(能源管理系統 – 機構提供能源管理系統稽核及驗證之要求)

ISO 50003 標準係規範機構提供能源管理系統稽核及驗證之要求，本標準目前仍在 DIS 階段，未來將與 ISO/IEC 17021 合併使用，做為驗證機構執行能源管理系統驗證應遵循之要求。

本標準共有 6 個章節及 4 個附錄，主要包含範圍、名詞定義、參考規範、能源管理系統之稽核特性、稽核流程之要求及能力要求；4 個附錄，有 2 個為參考性質，2 個為規範性質，其中最重要的是附錄 B 有關稽核人天決定之要求，以及

附錄 C 有關多場區取樣原則。本標準強調除 ISO/IEC 17021 條文皆適用外，例如第 6 章及第 9 章都分別另外訂定適用於 EnMS 稽核過程之特定要求，以及稽核人員基本能力及特定技術能力之要求。

驗證機構執行管理系統驗證稽核，目前須遵循 ISO/IEC 17021 要求，至於稽核人天數的規定，國際認證論壇(International Accreditation Forum, IAF)訂定 IAF MD5 強制文件(Mandatory Document)規範有關 QMS 品質管理系統及 EMS 環境管理系統稽核人天之要求。然而本標準附錄 B 針對 EnMS 稽核人天，另訂定較複雜的計算方式，依照能源管理系統的特性，須考量三個不同因素，包括能源年使用量、使用能源數目，以及重大能源使用之數目，且此三個因素各有不同權重加以計算複雜度，依複雜度程度之高、中、低與有效員工數之矩陣表，訂出初次驗證之最低人天要求。此計算過程可以下述三個表依序決定(表 2 決定稽核人天數之能源複雜度範圍、表 3 EnMS 複雜度程度、表 4 初次驗證最低稽核人天數)。

表 2 決定稽核人天數之能源複雜度範圍

Considerations Weight (考量因素)	(multiplier) 權重	Range 範圍	Complexity factor 複雜度因子
Annual energy consumption 年度能源使用量(使用 單位 TJ)	40 %	Less than or equal to 139 TJ 小於或等於 139 TJ	1.0
		279 TJ to 140 TJ	1.2
		13,999 TJ to 280 TJ	1.4
		Greater than or equal to 14,000TJ 大於或等於 14,000 TJ	1.6
Number of energy sources 使用能源數目	25 %	1 to 2 energy sources 使用 1 至 2 種能源	1.0
		3 energy sources 使用 3 種能源	1.2
		Greater than or equal to 4 energy sources 使用 4 種或 4 種以上能源	1.4

表 2 決定稽核人天數之能源複雜度範圍(續)

Considerations Weight (考量因素)	(multiplier) 權重	Range 範圍	Complexity factor 複雜度因子
Number of significant energy uses (SEUs) 重大能源使用數目	35 %	Less than or equal to 5 SEUs 重大能源使用小於或等於 5 種	1.0
		6 to 10 SEUs 重大能源使用為 6~10 種	1.2
		11 to 14 SEUs 重大能源使用為 11~14 種	1.3

表 3 EnMS 複雜度程度

Complexity value 複雜度計算值	Level of the EnMS Complexity 複雜度程度
Greater than 1.35	High 高
1.1 to 1.35	Medium 中
Less than 1.1	Low 低

表 4 初次驗證最低稽核人天數

Number of effective personnel 有效員工數	Complexity 複雜度		
	Low 低	Medium 中	High 高
1-15	3	5	6
16-25	4	6	7.5
26-65	5.5	7	8.5
66-85	6.5	8	9.5
86-175	7	9	10
176-275	7.5	9.5	10.5
276-425	8.5	11	12.5
>425	若有效員工數大於 425，驗證機構可依此表之原則計算人天數		

有關附錄 C 多場區取樣原則，與 IAF MD5 之取樣原則大致相同，惟本標準另訂定有關中央辦公室之最低稽核人天要求。

3.ISO/DIS 50004 Energy management systems -- Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system 能源管理系統 - 能源管理系統之實施、維持及改善之指引

本標準提供組織實施以 ISO 50001 為基礎之能源管理系統(EnMS)，如何採取系統化之方法達成能源管理及能源績效持續改善之指引。本標準適用於不同實施程度之能源管理系統，包括對能源管理系統或標準鮮少經驗者、已實施能源效率專案但缺少能源管理系統經驗者、已建置能源管理系統但並非建置 ISO 50001 系統者，以及已建置 ISO 50001，但尋求持續改善。

本標準屬於指引性質，撰寫的架構係與 ISO 50001 條文一致，逐條進一步解釋條文之意義。另於章節中以實務範例做為舉例，更清楚詮釋標準之要求。本份標準對於初步開始建置 ISO 50001 之組織，於標準的解讀及實務的應用，有很大的助益，尤其 6 個參考性附錄 A~F，包含實施能源管理系統之查檢表、能源政策之範例、能源審查之範例、行動計畫之範例、量測計畫之範例，以及能源管理系統中重要名詞及項目之相互關係等，極具參考價值。

4.ISO/DIS 50006 Energy management systems -- Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) -- General principles and guidance 能源管理系統 - 使用能源基線及能源績效指標量測能源績效之一般原則及指引

本標準提供組織於量測能源績效及其變動時，如何建立、使用及維持能源績效指標(EnPI)及能源基線(EnBs)，以符合 ISO 50001 標準之要求。由於 EnPI 及 EnBs 為 ISO 50001 中能源績效量測及能源績效管理相關之兩個主要相關項目，故本標準內容主要以這 2 個項目為主軸，提供量測能源績效、如何鑑別能源績效指標、如何建立能源基線及蒐集資料等指引。

本標準就能源績效指標(EnPI)及能源基線(EnBs)探討如何量化能源績效之變更、如何從能源審查取得有效之能源績效資訊，決定能源基線之期間、資料蒐集之頻率等，例如必須首先界定 EnPI 之邊界(boundary)，可以從物理性(physical)、系統相關(system-related)或組織層級(organizational)來界定其設定之邊界，此外

EnPI 可以不同形式表示，例如可量測之能源使用、統計模型、每單位之能源使用等，至於訂定基線之資料蒐集期間，一般以一年為基礎做為統計，或少於一年，或大於一年，視能源使用之穩定度及過去能源使用之紀錄決定。本標準之附錄 A~附錄 E，列出許多實務之參考範例，包括附錄 A 透過能源審查鑑別出 EnPIs、EnBs 之資訊、附錄 B 生產過程中之 EnPI boundary、附錄 C EnPIs 及 EnBs 更進一步指引、附錄 D 使用相關變數以訂定能源基線，以及附錄 E 監督及報告能源績效。

5.ISO/DIS 50015 Measurement and verification of organizational energy performance-General principles and guidance 組織能源績效之量測及驗證之一般原則及指引

本標準之目的係建立共通之原則及指引以量測及驗證(Measurement and verification, M&V)組織能源績效。本標準適用於各種規模之組織及使用任何方法之量測及驗證，其所述之原則及指引並非 ISO 50001 之要求，但有些已實施 ISO 50001 EnMS 能源管理系統之組織，將適用此原則。

本標準之內容主要包括 M&V 原則、M&V 計畫、執行 M&V 計畫、不確定性，以及 M&V 之文件化，另外亦包括 3 個參考性附錄，附錄 A：M&V 流程概要、附錄 B：不確性範例，以及附錄 C：資料量測之品質。

本標準揭示之 M&V 原則，包括：

- 適當之準確度及不確定性管理
- 過程之透明度及再現性
- 良好之數據管理
- 有能力執行 M&V 活動
- 公正性
- 保密性
- 適當之方法學

M&V 過程之基本 5 個步驟，如圖 3：

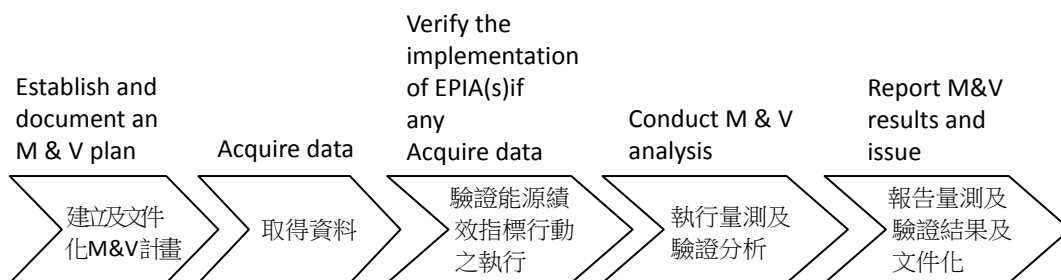


圖 3 量測及驗證過程之基本步驟

此外，此標準中也強調 M&V 其不確定性之來源及範例(參考附錄 B)，例如：

- M&V 方法
- 所選擇方法之計算
- M&V 邊界之選擇
- 邊界內 SEUs 之選擇及使用
- 排除之能源
- 資料蒐集之頻率
- 資料之區間
- 量測方法之使用
- 能源使用模型診斷及偏差
- 樣本大小及是否具代表性
- 量測設備之不確定性
- 未包含於量測結果之可能重要影響

三、EnMS 認證多邊承認協議之發展

由於 ISO 50001 能源管理系統於 2011 年 6 月 15 日才公布，有關其認證及驗證之發展，亦屬相對較晚起步之管理系統領域。因此，EnMS 認證多邊承認協議，也於 2012 年才開始於太平洋認證合作組織(Pacific Accreditation Cooperation, PAC)

開始發展。

PAC 於發展新領域之多邊承認協議(Multilateral Agreement, MLA)，近 2 年循 APEC(Asia-Pacific Economic Cooperation)補助專案之模式，以 APEC 貿易暨投資自由化及便捷化(TILF, Trade and Investment Liberalization and Facilitation)委員會基金之贊助，成功開展促成了食品安全管理系統(Food Safety Management System, FSMS)及溫室氣體確證與查證(Greenhouse Gas, GHG)MLA 之推行，並陸續於 2012 年及 2013 年完成該二項領域之同行評估，預計 2013 年 6 月 PAC 大會將簽署首批之多邊承認協議。同樣地，2013 年由日本經濟產業省(Ministry of Economy, Trade and Industry)向 APEC 提出 EnMS MLA 專案，以協助亞太地區經濟體發展 EnMS 之多邊承認協議，截至 2013 年資料，亞太地區已推動或正發展 EnMS 認證之認證機構，如圖 4：

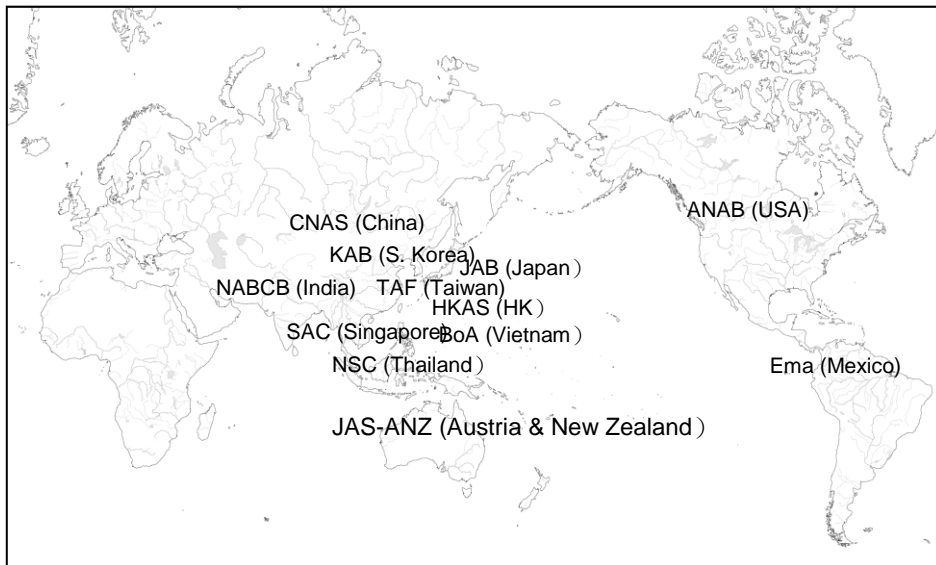


圖 4 亞太地區推動 EnMS 認證情形

2014 年間 APEC EnMS 專案，將包含 4 個訓練課程，其中有 EnMS 內部稽核員訓練、EnMS 驗證機構稽核員訓練、EnMS 認證機構評審員訓練，以及 EnMS 同行評估員訓練，分別由泰國 NSC、中國大陸 CNAS、印尼 KAN，以及越南 BoA 等認

證機構辦理。預期此一專案，將延續 FSMS 及 GHG 領域之成功模式，加速推展 EnMS 能源管理系統 MLA 之進行，也期望藉由國際間建立能源管理系統多邊承認協議之機制，促進達到此領域「一張證書，全球通行」之目標。

四、結 語

ISO 50001 能源管理系列相關標準是一套完整且系統性之標準，組織依此系列標準確實建立、實施及維持其能源管理系統，以達到改善能源績效之目標。此系列標準除原已公告之 ISO 50001 外，ISO 50002 目前已在標準發布程序之最後階段，其他標準亦將陸續進入 FDIS 最終草案版，預計 2015 年可正式發布。

此系列標準界定之要求(Requirements)及指引(Guidance)，無論是做為認證標準遵循或當做參考之指引，於組織能源管理系統之發展及維持，具有重大價值，且進而擴及與國際接軌之多邊承認協議機制，亦為全球採認共通一致性標準之發展趨勢。

參考資料

- 1.ISO 50001:2011, Energy management systems — Requirements with guidance for use。
- 2.ISO/DIS 50002, Energy audits。
- 3.ISO/DIS 50003, Conformity assessment — Requirements for bodies providing certification audits of energy management systems audits and audit competency
- 4.ISO/DIS 50004, Energy management systems — Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system。
- 5.ISO/DIS 50006, Energy management systems -- Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) -- General principles and guidance。
- 6.ISO/DIS 50015, Measurement and verification of organizational energy performance -

General principles and guidance °

7. 經濟部能源局網站 http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/home/Home.aspx?Menu_id=798
8. 經濟部能源局能源資訊網 <http://emis.erl.itri.org.tw/>
9. ISO 網站, <http://www.iso.org/iso/home.html>

ISO 50001 之最佳化能源管理資訊化系統 介紹

林冠嘉*、吳哲仁**、彭郁潔***、曹永誠****

摘 要

國際 ISO 組織於 2011 年 6 月 15 日正式公布 ISO 50001 能源管理系統(Energy management systems, EnMS)標準，此標準在使組織於改善能源績效時，所需的系統與過程之建立有所依據，其中包括能源效率、能源使用及能源消耗，它適用於所有型式、規模(大小)之組織，並強調 PDCA 持續改善。目前政府機關針對各行業提供輔導資源，協助國內企業正積極建置此管理系統。然而，企業建置與運作過程皆投入大量人力，本文介紹在滿足國際標準要求下，如何透過資訊化系統輔助能源管理系統的建置與運作，為企業持續投入節約能源和提高能源效率工作，提供有效且穩定之工具。

【關鍵字】能源管理系統、能源基線、能源績效指標

*財團法人台灣綠色生產力基金會 資深協理

**新鼎系統股份有限公司 產品經理

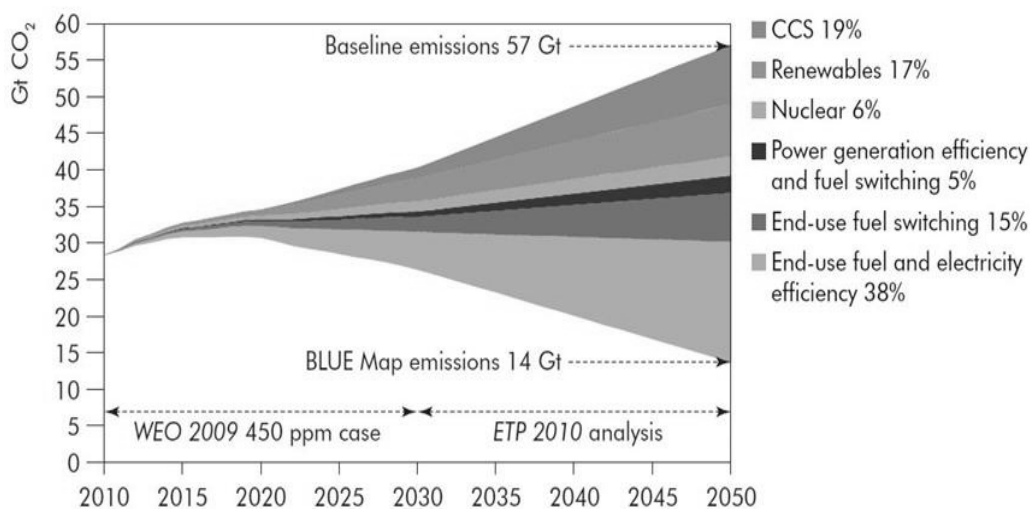
***新鼎系統股份有限公司 企劃專員

****新鼎系統股份有限公司 處長

一、前言

牽動全球命運的聯合國氣候變化綱要締約國大會暨京都議定書第 5 次締約國會議(COP15/CMP5)，最終通過「哥本哈根協定(Copenhagen Accord)」，該協議明定各國必須努力將全球的升溫控制在攝氏 2 度以內。呼應全球減碳願景，台灣在「永續能源政策綱領」中，亦提出全國二氧化碳排放減量的期程，短期目標希望在 2016 年到 2020 年間回到 2008 年排放量，至於中程目標則是 2025 年回到 2000 年排放水準，長期希望 2050 年排碳量回歸到 2000 年的 50%。

全球暖化及氣候變遷之永續發展為近年來所討論的重要議題，國內外企業也意識到使用高能源效率設備及能源管理之重要性。依國際能源總署(IEA)2010 年能源科技展望報告指出，要維持大氣中穩定的溫室氣體濃度，且符合京都議訂書在 2050 年的減量標準，在各種可能的技術中，立即可行且減量成本最小的技術是使用端的能源效率提升。



資料來源：IEA, Energy Technology Perspective, 2010

圖 1 國際節能技術展望

依照能源局統計資料，近 11 年(1991-2011)來，電力是最主要的能源需求占比，2011 年能源消耗以電力比例最高，佔 49.79%，其次為石油佔 38.22%(換算為油當量)；煤及煤產品約佔 8.37%；天然氣約佔 3.06%；生質能源及廢棄物約佔 0.17%；太陽熱能約佔 0.1%。而 2012 年為聯合國的「國際永續能源年」(International Year of Sustainable Energy)提到，聯合國期待全球於 2030 年達到三項目標：(1)全球均可享有現代能源服務；(2)倍增能源效率提升目標；及(3)倍增再生能源發展目標等。由此可知，掌握能源消費與供給狀態，將是提升能源效率與發展再生能源的基礎。

能源管理相對顯得越來越重要，為了因應國際的節能需求與政府要求的節能目標，許多企業主或是工廠常無法瞭解哪些單位用了多少電？重要耗能設備有那些及合理與否？因此，ISO 組織於 2011 年 6 月 15 日正式公布 ISO 50001 能源管理系統(Energy management systems -- Requirements with guidance for use, EnMS)標準，此標準在使組織於改善能源績效時，所需的系統與過程之建立有所依據，其中包括能源效率、能源使用及能源消耗，它適用於所有型式、規模(大小)之組織，並強調 PDCA 持續改善。目前國內能源用戶已具有實施能源查核之經驗且已建置 ISO 9001 或 ISO 14001 之企業，若使二者有效整合，將有助於能源管理系統之建置，透過管理系統達到降低能源成本，將與減緩全球氣候暖化共創雙贏。

二、運用資訊平台落實 ISO 50001

ISO 50001 要求能源績效必須做到經常性監測(monitors)與量測(measures)，而被選定的能源績效指標必須能記錄保存並進行經常性的審查。此外，能源基線的正确性也要經常性的檢討，當生產狀況有大幅改變或能源基線發生偏離時都需要立即修正。

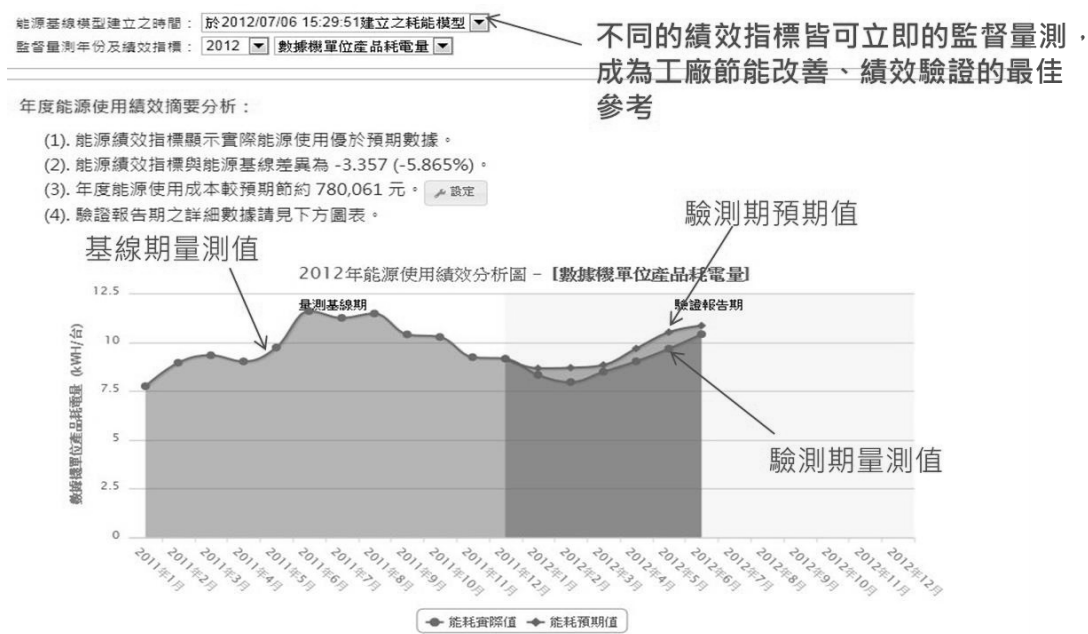
1.即時能源績效報導

現行能源績效監測工作的複雜度較高且需耗費較多人力，導致許多單位在資料收集的作為，僅採用 1 個月一筆資料、甚至 2 個月一筆資料的資料收集方

式，使得績效指標只能用於展現每月的平均值，此法由於取樣時間太長，造成基線模型已發生偏離並無法及時發現，對於每日機台操作都不同的工廠根本無法提供操作參考，甚至等到 12 個月之後再重新檢視能源基線是否需要調整，為時已晚。

2.即時驗證能源調整結果

若有一個完整的資訊系統，連結現場資料收集，就可使能源績效即時讓各部門瞭解其能耗狀況；而績效監測及警報的自動化連動，可即時提醒組織的能源管理代表，執行矯正措施。此外，資訊系統可隨時修正或重新擬定能源基線，並可隨時驗證結果，使資料間隔的時間縮短為 1 天，甚至每個小時每分，大幅增加數據統計與分析正確性及參考價值。



資料來源：新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 2 能源基線與績效驗證圖

三、ISO 50001 資訊化架構設計

資訊系統因應 ISO 50001 導入及維護過程中，技術面上最複雜的能源績效指標(Energy Performance Indicators, EnPIs)及能源基線(Energy Baseline)能以系統演算的方式快速解決，並將 EnMS 的導入區分為「能源管理層」能源績效管理及分析為主及「能源技術層」現場耗能設備的運作與能源使用量的監控。

1.EIM Layer：能源資訊管理層

EIM Layer(Energy Information Management Layer)是整合所有能源使用資訊的平台，也是導入 ISO 50001 能源管理系統的核心所在。而 Mr. Enregy 50001 則是透過智慧型能源管理平台(SEM)來達成。

2.EDP Layer：能源資料處理層

EDP Layer(Energy Data Processing Layer)是將監控系統提供的資料經過前處理，演算為可以被計算能源績效的影響變因，供 EIM Layer 的能源績效指標以及能源基線模型所使用，可以自動化的方式達到 ISO 50001 對持續監控耗能參數的要求。而 Mr. Enregy 50001 則是透過智慧型能源資料前處理裝置(SED)來達成。

3.SCADA Layer：能源使用設備監控系統層

SCADA Layer(Supervisory Control And Data Acquisition Layer)是現場能源使用設備的監控系統。這些監控系統往往由 Power SCADA、DCS、FMCS、MES...來組成，透過一個橋接器(bridge)提供與 SED 銜接的介面，即可將監控系統所取得的能源使用資料傳遞至 EDP Layer。

4.Site Layer：能源使用現場層

Site Layer 是在現場端的能源使用設備及量測能源使用量的感測器，這些設備或感測器往往提供 DO/AO、UART(如 RS-485)或 Ethernet 為資料傳輸媒介，提供給 SCADA Layer 做設備能源使用監控。

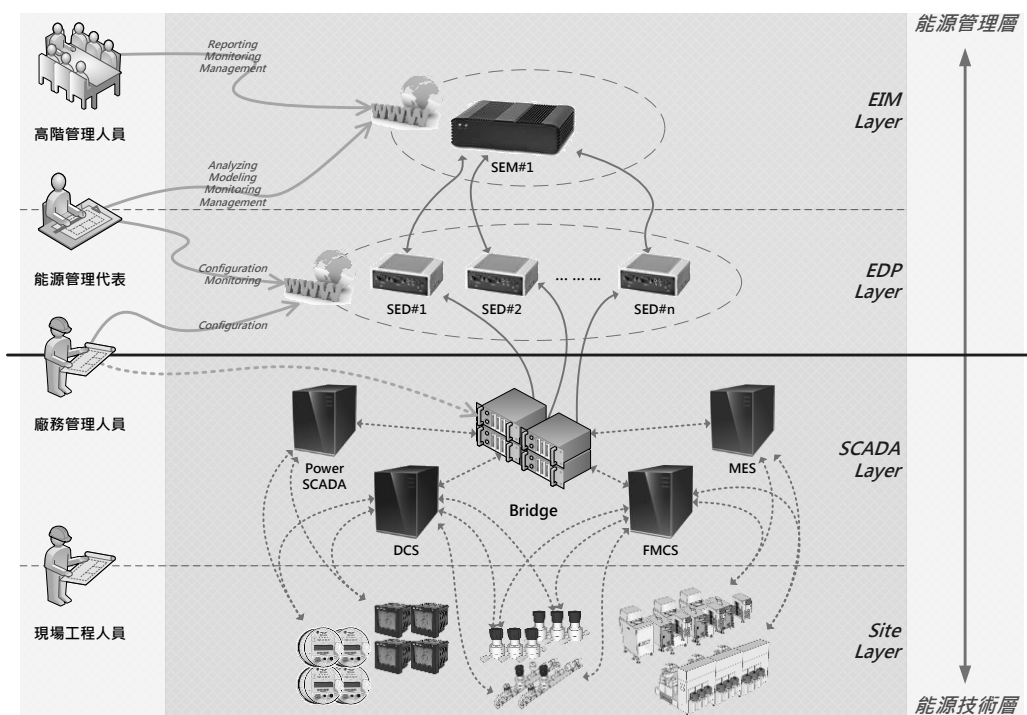


圖 3 ISO 50001 能源管理資訊系統-分層架構圖

能源管理透過前端裝置收集的即時能源資訊，協助企業進行能源審查，分析與鑑別企業的重大能源消耗，進而建立能源基線，持續監督能源績效指標，並管制能源管理紀錄，協助企業進行能源管理與節能減碳工作。

四、ISO 50001 資訊系統目標

為了符合 ISO 50001 標準化的能源管理軟體規劃循 Plan-Do-Check-Act (PDCA)，ISO 50001 能源管理資訊系統應將能源管理區分為各項模組並交互搭配來達成，其架構圖及重點技術說明如下：

1. 滿足 ISO 50001 系統要求

ISO 50001 規範應對組織改善能源績效的活動進行規畫及引導，其中包含能源審查、能源基線、能源績效指標以及目標、標的與行動計畫，以上準則是 ISO

50001 與其他國際標準如 ISO 14000 及 ISO 9001 較為獨特之處，對於能源管理的循環來說是最為重要的一環，因此須納入相關方法學及國際節能量測量和驗證規程(International Performance Measurement and Verification Protocol, IPMVP)於能源績效的驗證。

2.協助企業落實能源績效監控

ISO 50001 規範組織應確保其運作之關鍵特性，確定在計畫的時間內監督、量測與分析其能源績效，此為能源管理循環中的監督階段(Check)；而能源績效無法單純透過量測設備直接取得，對於不同的能源績效指標必須透過特定的方法學、演算法或數學模型運算後得知，也由於這些能源使用的績效評估並不是單純量測可得，一個能提供相關能源績效指標運算及分析的平台就特別重要；此外，能源績效指標的訂定也是建立未來能源基線必備的基礎。

企業要落實能源績效管理，必需有一套完善的資訊軟體工具，能夠運用最少的人力，進行耗能資料的分析，找出最有效的管理方法。

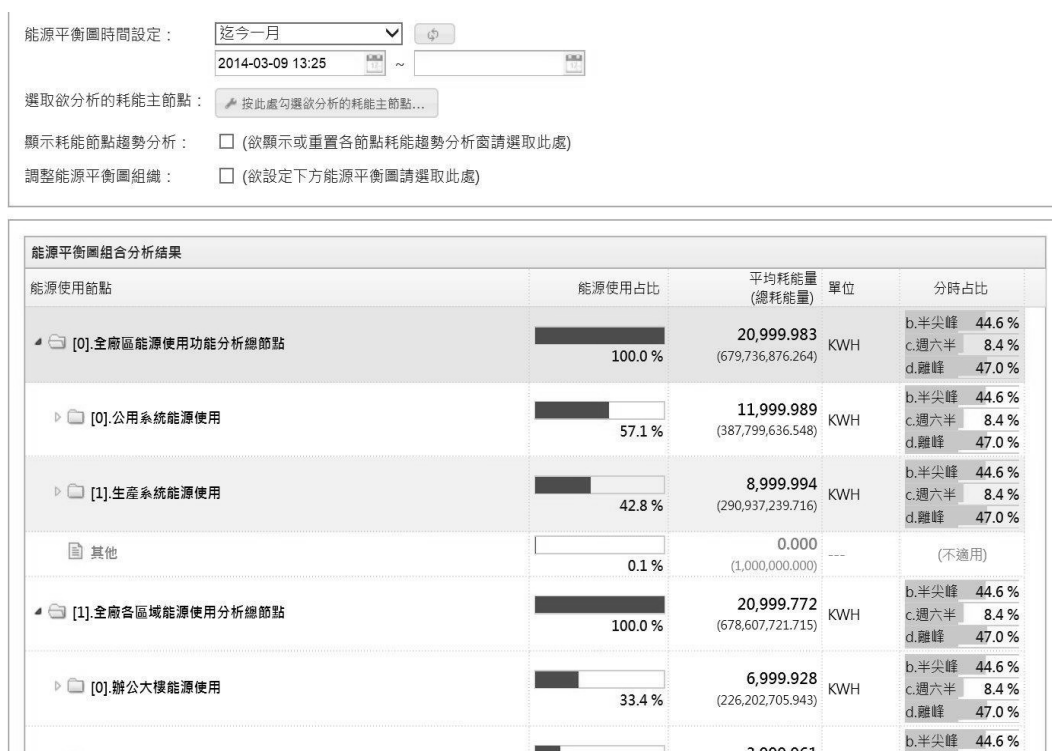
五、ISO 50001 資訊系統主要功能說明

為使 ISO 50001 標準化的能源管理軟體能達成能源審查一系列作業活動，其進階作業功能擴充說明如下：

1.能源審查作業：新增能源使用分配狀態配比統計功能

國際 ISO 50001 標準 4.4.3 提到：「組織應依據能源使用分析，鑑別重大能源使用及消耗的區域」；為了使能源管理組織能進一步鑑別與分析出能源使用設備所在區域的耗能占比，ISO 50001 資訊系統應提供針對能源使用設備鑑別表新增以設備所在區域進行耗能比例分析的占比圖功能。

160 ISO 50001 之最佳化能源管理資訊化系統介紹



資料來源：新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 4 ISO 50001 能源管理資訊系統-區域別耗能比例分析圖

如同能源使用分配狀態配比統計功能對應 ISO-50001 標準 4.4.3，能源平衡圖則是被廣泛使用於分析組織邊界內各種系統能源使用分配狀態的工具。除了 ISO 50001 導入初期可透過此功能讓組織進行離線設定與分析外，在組織導入完善的能源管理及監控系統後，能源平衡圖組合分析功能將進化為全自動化的即時耗能配比分分析工具，除了可以從各種角度的能源使用分析組合方式，並允許使用者任意組合與設定連結耗能變因以取得即時的能源使用量，隨時呈現全組織的最即時的能源平衡圖，加上預先定義的時間區間設定，讓能源管理委員會例行性檢討能源使用狀態時更加便利與快速。

ISO 50001 要求企業要進行重大能源鑑別，以做為節能監控及改善方案之標的，因此重大能源鑑別方法需要考慮：

- ✧ 定義評估因子及其權重。
- ✧ 訂定量化評估公式。
- ✧ 重大能源評估方法。
- ✧ 設定優先性等級。
- ✧ 設備類別套用評估方法。

評估方法清單				
<input type="checkbox"/>	評估方法名稱	目前套用的設備類別	建立副本	編輯
<input checked="" type="checkbox"/>	燈具評估方法	照明設備		
<input checked="" type="checkbox"/>	轉動設備方法	給水污水設備		
<input type="checkbox"/>	空調設備評估方法	空調設備		

評估因子	評估因子名稱	評估因子權重說明	權重分級
A	耗能量	第1級：100kW以上 第2級：50kW~100kW 第3級：10kW~50kW 第4級：10kW以下	第1級：>= 10分 第2級：>= 4分 第3級：>= 2分 第4級：>= 1分
B	使用時數	第1級：每年1000小時以上 第2級：每年300~1000小時以上 第3級：每年300小時以下	第1級：>= 10分 第2級：>= 6分 第3級：>= 2分
C	老舊度	第1級：20年以上 第2級：10年~20年 第3級：10年以下	第1級：>= 10分 第2級：>= 6分 第3級：>= 2分
D	改善空間	第1級：不需增購設備 第2級：需要增購設備 第3級：短時間 無改善空間	第1級：>= 10分 第2級：>= 5分 第3級：>= 3分

評估公式
$4 \times A + 3 \times B + C + D$

優先性
A級：>= 60分、B級：>= 40分、C級：>= 0分、D級：>= 0分

Page 1 of 1 Displaying 1 to 3 of 3 items

資料來源：新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 5 ISO 50001 能源管理資訊系統-重大能源鑑別圖

2. 能源績效指標管理作業

ISO 50001 標準條文 4.4.5 提及，規範組織應鑑別可適當監督與量測能源績效的能源績效指標，且訂定與更新能源績效指標的方法應被紀錄與定期審查，而標準 4.4.4 規範應由於先期能源審查階段所使用的資訊建立能源基線，並考量適合組織能源使用與消耗的數據期間。因此，能源使用績效管理的技術面困難處是 ISO 50001 能源管理資訊系統最關注的問題與待解決的事項。

162 ISO 50001 之最佳化能源管理資訊化系統介紹

ISO 50001 能源管理資訊系統受到國內晶圓廠及化工大廠的重視與採納，原因在於 ISO 50001 能源管理系統技術層面的問題被完善的解決，由於要驗證能源績效必須取得相當數量的耗能資料與基線模型的建立，大量的耗能與變因資料與不斷修正的能源基線版本管理就成為一件複雜且困難度高的工作，而透過 ISO 50001 能源管理資訊系統能將這些令能源管理代表頭痛的能源績效指標(Energy Performance Indicator, EnPI)、能源基線與能源績效，用導引的方式，帶著能源管理代表一步一步將 EnPI 及能源基線模型建立起來，並於報告期進行能源績效驗證，大幅降低能源績效管理的複雜度。

建模要參考的影響變因：☐全部選取 ☐全部取消

☐BU=產線A總消耗熱值(kcal)

☒BV=產線A總產量(MT)

☒BW=產線A停車時數(HR)

☒BX=產線A產品切換頻率(次)

☒BY=產線A開車時數(HR)

☐BZ=相對濕度(%)

☒CA=平均溫度(度)

☐調整後R平方 >= 0.75

☐對應P值 <= 0.05

☐變異係數 <= 0.05

☐觀察值個數 百分比(%) >= 80

計算合適的基線模型：

符合設定值的基線模型如下表：(已選取的能源基線模型在第1頁)

模式	類型	調整後R平方	對應P值	變異係數	觀察值個數	參考的影響變因	影響變因P值	基線模型	適用
RA	非線性	0.92651	0	0.06321	12	BW = 產線A停車時數(HR) BW^2=產線A停車時數(HR)^2	BW =0.3267 BW^2=0.0508	-14481.17766628*BW +202.439063730874*BW^2 +1055289.38175251	<input checked="" type="button" value="套用"/>
RA	線性	0.89659	0	0.07499	12	BW=產線A停車時數(HR)	BW=0	16797.3620732655*BW -91298.5195943067	<input checked="" type="button" value="套用"/>
RA	線性	0.89509	0.00002	0.07553	12	BW=產線A停車時數(HR) BX =產線A產品切換頻率(次)	BW=0.00001 BX =0.37857	17732.5118868993*BW +4326.55322764844*BX -310952.999906059	<input checked="" type="button" value="已套用！"/>
RA	線性	0.89137	0.00002	0.07686	12	BW=產線A停車時數(HR) CA =平均溫度(度)	BW=0.00001 CA =0.48928	16847.7728617611*BW +6171.51054025385*CA -249405.282714888	<input checked="" type="button" value="套用"/>
RA	線性	0.88916	0.00002	0.07764	12	BV =產線A總產量(MT) BW=產線A停車時數(HR)	BV =0.57991 BW=0.02989	1306.06890844928*BV +21474.7422140797*BW -812906.572556807	<input checked="" type="button" value="套用"/>
RA	線性	0.88863	0.0004	0.07782	12	BV =產線A總產量(MT) BW=產線A停車時數(HR) BY =產線A開車時數(HR) CA =平均溫度(度)	BV =0.22925 BW=0.09551 BY =0.2821 CA =0.2336	8800.73045432376*BV +17760.29147161*BW -3816.15888688644*BY +13880.4827662641*CA -570138.702100554	<input checked="" type="button" value="套用"/>

資料來源：新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 6 ISO 50001 能源管理資訊系統-能源基線評估建立圖



資料來源: 新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 7 ISO 50001 能源管理資訊系統-能源績效分析圖

3.能源績效監測

ISO 50001 標準 4.4.4 及 4.4.5 提到組織應依據能源基線進行量測能源績效的變化，定期審查能源績效指標，並與能源基線相比較。一般的能源績效監測，只能以最新建立的能源基線進行績效分析，而運用資訊系統，可以將能源績效監測作業進展到可切換至歷次發佈的能源基線模型，以新年度的資料對歷史能源基線模型做能源績效驗證，觀察歷次發佈的基線所造成的能源績效變化，以作為下一年度基線模型調整的參考。

4.整合能源查核網路申報系統

ISO 50001 標準 4.4.3 規定的能源審查工作，規範組織應鑑別影響其重大能源使用與消耗之設備。而經濟部能源局提供能源使用大戶透過網路的方式，每年進行能源查核的資料輸入，分為「生產性質行業(<http://emis.erl.itri.org.tw/erl/>)」及「非生產性質行業(<http://egov.tgpf.org.tw/>)」的能源查核網路申報系統，由於能源使用大戶的能源使用設備在此處皆會進行調查與輸入，因此為了減省能源管理代表在鑑別能源使用設備的時間，避免重複輸入設備資料，將以該系統匯出的 Excel 格式，作為匯入 Mr. Energy 50001 能源使用設備鑑別的參考格式，或透過少許修改的方式就可以將已申報至能源查核系統大量的設備資料上傳至 ISO 50001 能源管理資訊系統的設備鑑別資料庫，以加快完成鑑別能源使用設備的工作。

5.能源使用分時段分析功能

分時能源使用(Time Of Use, TOU)分析乃針對我國電力公司在計算電價的費率採用時間電價的方式，依據不同時段的電價費率來限制尖峰時段的能源使用量。分析並了解組織在不同時段間的能源使用，以往分時能源使用的分析多用在電能管理的領域，運用在控制電力的使用量，進行峰谷填平的調配，以降低超約罰款的發生。而在 ISO 50001 能源管理資訊系統的運用上則有更多的彈性，且可分析電能以外的能源使用，並進行分時能源使用的比較。

ISO 50001 能源管理資訊系統亦可設計提供進一步對每一個變因，進行分析，計算負載因數(平均值與最大值的比較)、加上能源成本佔比等分析功能，同時亦可針對任何一個變因進行趨勢圖分析。



資料來源：新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 8 ISO 50001 能源管理資訊系統-分時能源分析圖

六、ISO 50001 能源管理資訊系統應用實例

新鼎系統股份有限公司依據 ISO 50001 標準概念和建置運作經驗，開發設計 Mr. Energy 50001 的能源管理資訊化系統，以平台的方式運作，而產品包裝為一精巧的小機器，即所謂嵌入式主機(Embedded system)，除能將繁雜的安裝及導入工作簡約話，也能夠確保不會發生資安問題。目前已有台積電公司與李長榮化工公司等大廠使用，應用領域橫跨電子、石化與傳統產業。

1. 台灣積體電路製造股份有限公司

台積電晶圓十五廠除了確實達成 ISO 50001 的節能目標外，更首度與業界合作，成功導入 Mr. Energy 50001 能源管理資訊系統，連結現場資料收集，使能源

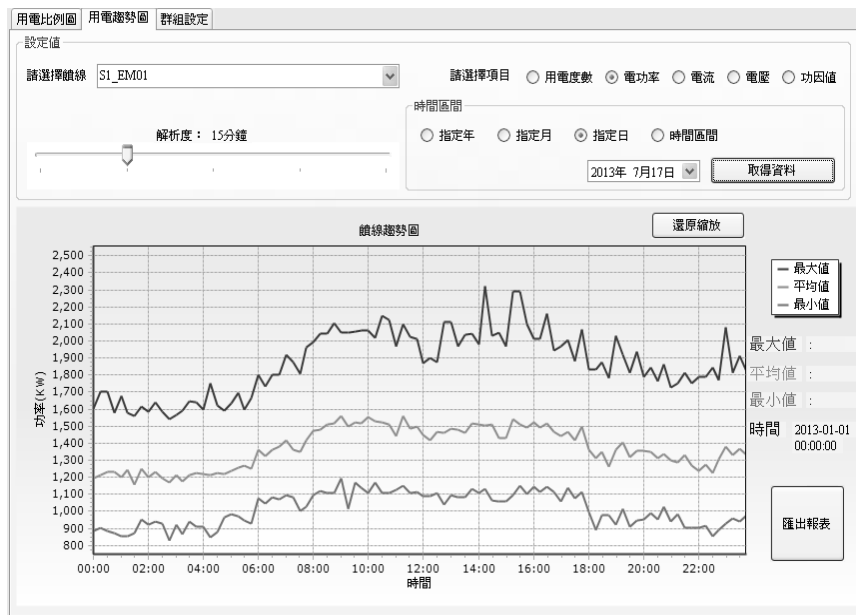
績效透明化，並將能源管理納入警報系統，達到即時警示的作用。透過資訊系統即時修正或重新擬定能源基線，且能隨時驗證結果，大幅增加統計分析的正確性及參考價值。(經濟日報 2014/2/20)

2.李長榮化學工業股份有限公司

新鼎系統能源管理團隊為李長榮規劃一整套能源管理系統，於能源管理建置的過程中將「電力監控系統」、以及「Mr. Energy 50001 能源管理系統」規劃在能源管理計劃中，主要在於「電力監控系統」負責將電力資料完整而穩定的蒐集，並提供機電人員電力監視所用，同時將資料透過 Mr. Energy 50001 所設計的各种演算轉化，結合生產狀態的各項資料，建立績效指標(EnPI)與能源基線(Baseline)，以能源管理平台為主要呈現。整體專案同時內含以下功能，協助業主依循 ISO50001 要求，有效且正確完成能源管理作業。

(1)建置目標

- ✧透過電力監控系統可即時監控各監控點的各項電力資訊。
- ✧將電力監控系統與能源管理系統整合。
- ✧符合且延伸 ISO 50001 國際標準的精神，建立起一套以績效指標為評估能源使用效率的能源管理系統。
- ✧績效指標為管理評比標的：以各單位產品耗能量為績效指標，可建立全廠、各生產線、各公用系統等多項績效指標。
- ✧建立能源基線：建立各項績效指標之基線。
- ✧監督量測：即時量測並與基線比較。



資料來源：新鼎系統股份有限公司Mr. Energy 50001頁面

圖 9 電力監控系趨勢圖

(2)執行項目

- ✧ 依 ISO 50001 國際標準，輔導單位實施能源審查、設定能源管理目標、研提能源管理改善方案、建立管制作業程序文件，以及協助廠商實施管理審查、能源管理內部稽核等完整性 ISO 50001 能源管理作業。
- ✧ 依 ISO 50001 國際標準，規劃並提供廠商種子人員能源管理及節能技術諮詢及交流。
- ✧ 依 ISO 50001 國際標準，協助受輔導廠商向通過全國認證基金會 (TAF) 認證之公正驗證機構提出驗正申請。
- ✧ 協助受輔導廠商通過能源管理系統驗證。
- ✧ 研提節約能源及提高能源使用效率之改善建議與執行措施。
- ✧ 協助將改善建議措施納入能源管理系統之改善方案中，做為工廠持續改善之參考。

八、結 語

因應全球能源管理發展趨勢，ISO 50001 能源管理資訊系統旨在透過系統化的方法、自動化的方式，並依據 ISO 50001 之標準，針對執行能源管理系統最為複雜的技術面問題，在「能源審查作業」、「能源基線及績效指標管理」，以及「能源績效監測」等幾項在執行 ISO 50001 上較為技術性且須持續監督的重要工作，將複雜而重複性的能源使用績效管理簡單化，降低企業在實施能源管理系統的人力與成本，除了將管理能源績效指標及基線建立的過程系統化，讓組織的能源管理代表不用熟悉複雜的統計分析模型建立的方法，就能輕鬆建立能源基線模型，再透過自動化的方式，在專屬的嵌入式系統平台即時對能源使用績效進行運算及分析，隨時為組織能源使用績效進行監督任務與能源模型之監測及評估，藉由妥善管理能源，達到節能減碳的共同目標。

參考資料

1. (2010) Energy management systems, requirements with guidance for use. ISO/DIS 50001
2. Chia-Hung, L., Ying-Wen B., & Ming-Bo L. (2007). Remote-Controllable Power Outlet System for Home Power Management. IEEE, 53(4), 1634-1641.
3. Christensen, C.M. (1997). The Innovator' s Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail. Boston: Harvard Business School Press.
4. Darby, S. (2006). The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption. UK: Environmental Change Institute, University of Oxford.
5. Ambrosio, E.M. (1995). Technological Management and Transfer of Technology. International Journal of Technology Management, 10(7), 665-675.
6. ISO 50001 主導稽核員訓練課程重點講義,SGS

發展節能技術與能源管理系統 以提升能源查核制度之成效

林文祥*、王仁忠**

摘 要

台灣能源資源貧乏，97.8%能源仰賴進口，故節約能源政策一直為政府施政主軸之一，目前已納管 4,659 家能源大用戶(耗能占全國 41%) 依能源管理法必須建立能源查核制度，包括：設置能源查核專責組織、分析能源流向、檢查能源設備效率、分析能源耗用、訂定節能目標及執行節能改善計畫等事項，並透過臨場查核輔導機制，督促並協助能源大用戶落實能源查核制度。

對政府而言，透過能源查核制度可掌握全國能源使用及供需平衡狀況，規劃適合之能源政策，有效利用能源，創造國家總體利益；對業者而言，可及時發現能源使用問題、提升能源使用效率及節省能源費用，並藉由輔導措施協助業者落實節約能源改善。

國內能源查核制度之基礎在於節約能源技術之推廣與節能專業人才之建立，藉由檢測儀器、資料記錄等診斷分析手法，可以達成查核內容之有效性及管理制度上軌道，節能技術之發展歷久彌新，早期從協助國內各行業能源用戶、集團式企業、中小企業乃至於集合式住宅等，由注重平日的維護保養措施著手，進而引導用戶運用高效率設備及系統(設備)操作最佳化，是推動全面性節能不可或缺的一環。尤其，受到全球暖化影響，企業必須更審慎地面對低碳經濟時代來臨，積極提高能源使用效率及降低能源使用成本，成為企業追求永續發展重要課題。

170 發展節能技術與能源管理系統以提升能源查核制度之成效

目前國際標準化組織為協助企業強化能源管理，發布 ISO 50001 能源管理系統國際標準，適用於各類型不同規模的企業，透過 PDCA 管理循環模式，達到強化自發性能源管理機制及持續提升能源效率等多重效益。另外，企業導入能源管理系統後，可以達到提升能源管理組織層級、能源管理人才專業化、提高守規性表現以及落實自我監督管理機制等優點。

【關鍵字】能源查核制度、ISO 50001 能源管理系統、PDCA 管理循環模式

*財團法人台灣綠色生產力基金會專五部 資深協理

**財團法人台灣綠色生產力基金會專五部 副理

一、前言

全球氣候變遷現象日益明顯，IPCC 於 2013 年 9 月提出第五次評估報告中，指出氣候變遷已造成全球總降水量增加，強降水的強度和頻率逐漸上升，且趨向兩極化，即雨季越濕、乾季越乾(其變化隨著地區改變有所不同)，氣候的不確定性更為強化。眾所皆知，18 世紀工業革命後，化石能源的大量開發使用，造成大氣二氧化碳濃度急遽攀升，2013 年 5 月 28 日夏威夷大氣監測站測得 CO₂ 濃度已突破 400 ppm，人類要盡力減緩氣候變遷的努力將越來越嚴峻。

我國為新興工業化國家，能源使用量逐年遞增，自 1992 年至 2012 年之能源使用平均成長 3.52%，依據 IEA 能源統計我國 2011 年人均能源消費約 4.64 噸油當量/人(toe/capita)，為全球人均量的 2.47 倍。政府於 2012 年宣達能源問題攸關國家安全、民生需求、經濟發展、環境保護與永續社會，能源及氣候變遷溫室氣體減量之議題，已由政策層次提升至戰略層次，必須確保國家能源供應的穩定及維護社會與經濟體系的永續發展。

為協助節約能源政策目標之達成，本會由早年推動產業節能技術發展、技術輔導、落實節能改善及節能管理開始，逐步配合政府建置能源查核制度，輔導企業導入能源管理系統，期待藉由制度面、技術面及管理面逐步建構社會各階層節能減碳的持續性動能。

1.制度面

依據「能源管理法」及其施行細則，要求能源使用量達到一定標準之能源用戶，遵行能源查核制度，訂定節能目標及計畫，並透過臨場查核輔導，促使能源用戶落實能源管理。

2.技術面

發展可行節約能源技術作為制度面規範、管理面診斷之基礎，透過設備檢測提供各類用戶〔包含能源用戶(用電高壓 800kW 以上)、中型用戶(500kW 以上)、集團企業(中小型用戶)及集合式住宅等〕節能技術輔導，以提升能源效率，協助用戶落實節能措施、統計分析建築物用電參考指標，提供企業主管作為自主節能管理參考標準。

3.管理面

輔導用戶導入國際能源管理系統(ISO 50001)，協助內部訂定行動方案，持續改善落實節能目標。

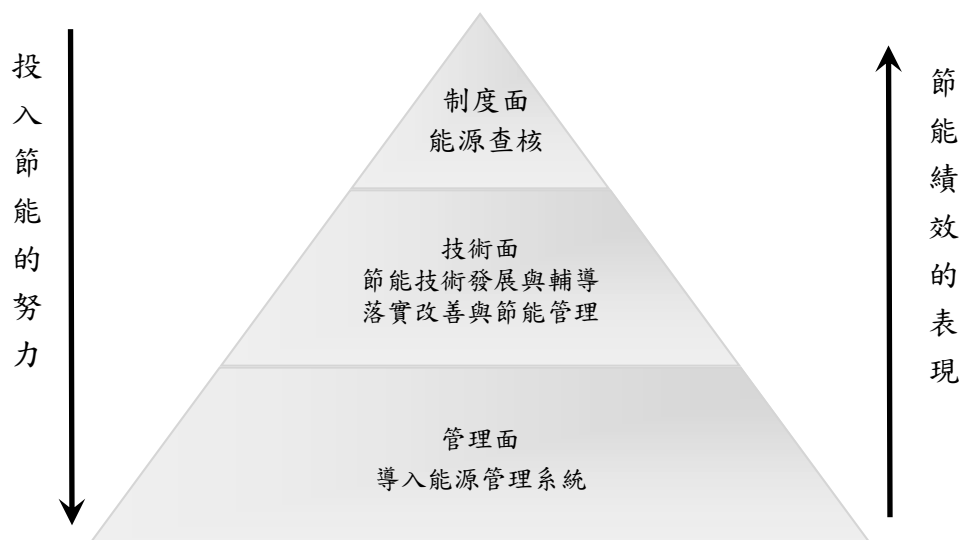


圖 1 推動節約能源目標層次架構圖

本文將說明本會目前推動節能技術應用、執行能源查核制度、輔導能源管理系統等全方位節約能源之情形。

二、全方位節約能源服務

本會 20 餘年來為輔導能源用戶節約能源、增加企業利基兼顧環保，培訓出許多富有能源專業經驗之工程人才，俱備各類量測能源效率儀器，針對電力用量、溫度、壓力、風量等，進行專業檢測，提供能源用戶執行能源效率、能源流向、操作模式分析等功能。同時運用目標管理循環(PDCA)機制，建立設備效率檢測、系統節能診斷及製程最適化策略(P)，執行最佳化節能改善計畫及節能績效保證工程(D)，

達到落實節能效益驗證(C)，建構即時動態管理及培育節約能源專業能力(A)之服務模式，提供全方位持續有效之節約能源解決方案。

1.診斷評估

- (1)設備效率檢測：提供用戶電力、空調、鍋爐、空壓機、水泵及其他耗能設備進行各項重要參數量測，並分析各單元設備使用效率，據以提出設備操作、控制調整、或汰換等整合性改善建議。
- (2)系統節能診斷：同步針對系統中各項單元設備進行量測，依用戶操作條件，提出最佳化調整及操作模式建議，提升整體系統運轉能源使用效率。
- (3)製程最適化節能策略：監測製程設備運轉數據，運用質能平衡計算能源進出情況，研析製程合理運轉條件(溫度、壓力、產能)，探討製程節能最適化操作模式。

2.落實改善工程

- (1)規劃最佳化節能改善計畫：協助用戶建立能源基準線，並分析各提案經濟效益、回收年限等，以最具效益之方式，提供用戶全方位節能解決方案規劃。
- (2)節能績效保證工程：提供專案節能效益保證，以節省之能源費用攤提改善經費，包含專案評估規劃、設計施工、後續維運、節能績效驗證等一條龍之商業模式。

3.量測驗證技術

- (1)建立量測驗證方法學：引用國際能效評估組織(EVO)之量測驗證協定(IPMVP)，因應能源技術服務業者需求，打造各項節能技術量測驗證方法。
- (2)驗證節能績效：依國際量測驗證協定之準則，發展能源技術服務產業及用戶確認專案節能績效，建立客觀、公正之第三方單位驗證報告。

4.即時動態管理

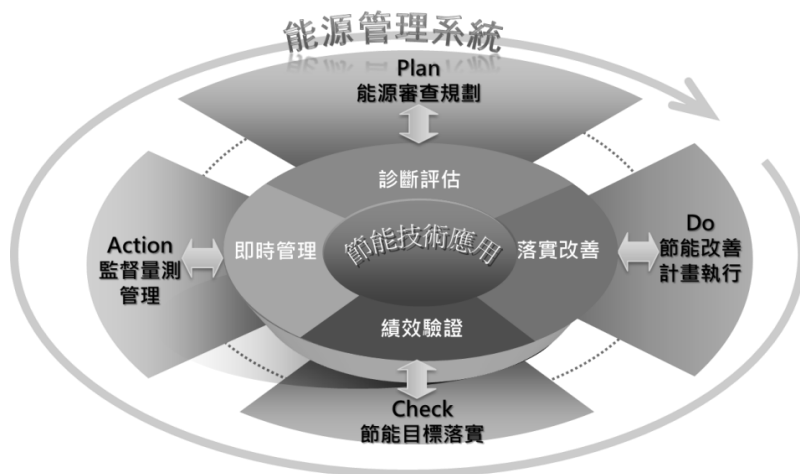
- (1)最適化能源管理系統建置：依能源用戶用電特性及重要耗能設備使用情形，分析影響系統運轉效率因子，運用能源資訊技術(EICT)，減少不必要之監控參數，協助用戶建立可視化動態能源資訊系統。
- (2)最佳化操作管理制度建立：運用巨量歷史資料，分析設備運轉情況及效率，協助能源用戶導出即時能效管理模式，並進行最佳化設備/系統調整，提高能源使用與生產效率。

174 發展節能技術與能源管理系統以提升能源查核制度之成效

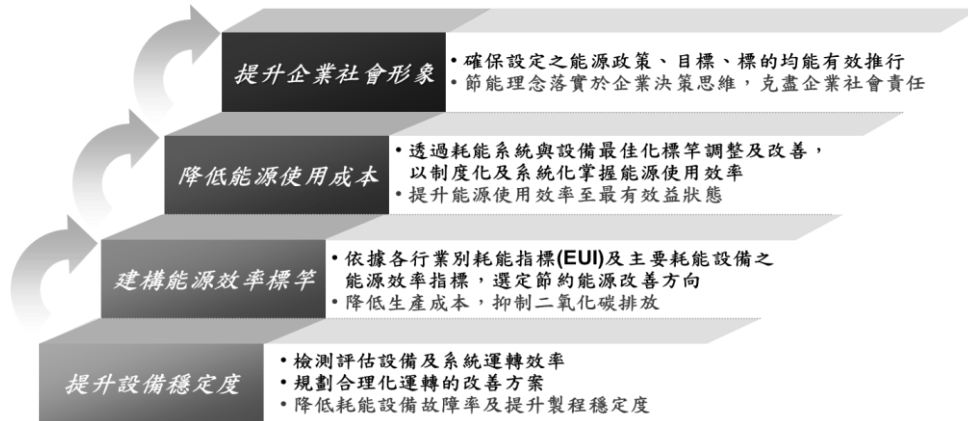
- (3)培育節約能源專業能力：掌握國內外最新節能趨勢、技術及手法，加速各產業專業節約能源人力養成，提升用戶節能改善執行能量，同時與國外專業顧問公司合作開辦前瞻性節能專業訓練。

5.能源管理系統服務

- (1)能源審查規劃(Plan)：掌握企業能源使用歷史資料和趨勢，評估重要影響能源使用的設備單元或區域，發掘較大節能潛力項目，以及提供改善之優先排序建議。
- (2)節能改善計畫執行(Do)：規劃企業節能改善實施內容，包括改善計畫執行內容、節能效益分析、投資經濟回收年限等，使企業正確選擇優先落實節能改善方案。
- (3)節能目標落實(Check)：依據企業營運狀況和節能潛力，訂定企業可落實和具挑戰性之節能目標與標的，以降低能源成本，減少 CO₂ 排放，並達到企業永續發展目標。
- (4)監督量測管理(Action)：建立企業能源使用效率之監督量測作業模式，提供具適切可信度和可靠度的監督量測方法和儀器設備，使企業持續提升節能改善績效。



6.全方位節能效益



三、能源查核制度推動現況與限制

1.法令依據

我國能源查核制度之實施係依據能源管理法第 9 條、11 條及 12 條之規定及能源用戶達應辦理能源管理法規定事項之使用數量基準，要求列管能源用戶應依法申報其能源使用種類、數量及效率、訂定年度節能目標及計畫、追蹤前一年度執行成效及設置能源管理人員等。

表 1 能源查核制度相關規定表

能源用戶	能源使用數量基準	應行辦理事項
煤炭	年使用量 > 6,000 公噸	1. 每年十二月底前，將次年能源查核制度，節約能源目標及執行計畫，報請中央主管機關核備。 2. 設置能源管理人員。 3. 每年一月底前彙集前一年使用能源資料，向中央主管機關申報。 4. 新設或擴建應先經中央主管機關核准。
燃料油	年使用量 > 6,000 公秉	
天然氣	年使用量 > 1,000 萬 m ³	
電能	用電契約容量 > 800Kw	

2.實施成效

能源大用戶透過能源查核制度於 101 年整體執行節能成效達 54 萬公秉油當量、節能率 1.22%，透過臨場查核輔導機制，於 102 年臨場查核 330 家大用戶節能計畫實施情形，落實比率達 87%。另外，能源局亦提供節能診斷服務及協助建立未來節能計畫及目標，發掘節能潛力達 13.1 萬公秉油當量，已實質督促落實能源查核制度與節能計畫之實施。

3.施行限制

現行能源查核制度在施行上仍有不足之處，例如，推動對象侷限於列管能源大用戶、設備繁複僅能重視查核結果難以了解過程、查核人力無法對同一用戶持續進行查核，申報資料為歷史資訊無法即時分析發現問題、節能成效未經第三者查驗證等，皆為我國推動能源查核制度之限制條件。

四、導入能源管理系統之作法

為強化國內能源查核制度之推行成效，經濟部能源局主導引進 ISO 50001 能源管理系統國際標準，逐步輔導國內能源大用戶、企業集團用戶及中衛體系建置能源管理系統，建立我國各行業別能源管理系統示範標竿案例，達到補強現行能源查核制度不足及協助企業強化與落實自主性能源管理之目的。

經濟部能源局與工業局共同推動能源用戶落實自主性能源管理工作，於 100 年至 102 年期間輔導 11 類服務業及 16 類製造業建置能源管理系統示範輔導標竿，累計已有 48 家能源大用戶、16 家企業集團用戶及 6 家中衛體系通過 ISO 50001 能源管理系統國際驗證，並協助業者發掘節能潛力達 2.7 萬公秉油當量，節能成效顯著。

經濟部能源局與工業局除了輔導各行業別能源大用戶建置能源管理系統示範標竿外，同時也採取「母雞帶小雞」的推廣模式，輔導企業集團用戶及中衛體系導入能源管理系統，以加速能源管理系統之擴散與推廣，促成能源用

戶持續改善能源績效及創造節能技術服務業市場商機。目前主要朝向能力建構、

示範輔導及宣傳推廣等 3 個主要構面推動，略以說明如下：

1.能力建構

辦理人才培訓課程，協助企業培養能源管理人員具備運作能源管理系統之管理能力、輔導能源管理系統驗證人員建立節能績效計算之技術能力以及強化企業中高階主管對於能源管理系統認知。另建置能源管理系統技術工具，提供能源審查、能源基線及能源績效指標分析之所需，以促使企業健全能源管理制度。

2.示範輔導

輔導能源大用戶、企業集團用戶及中衛體系依 ISO 50001 國際標準建置能源管理系統，取得第三者國際驗證，另將實地節能檢測輔導成果落實於各項能源管理行動計畫，導入節能技術服務業(Energy Service Company, ESCO)協助落實節能改善。

3.宣傳推廣

依行業別編製能源管理系統建置指引，提供企業運作能源管理系統所需的程序文件與紀錄表單；舉辦能源管理系統示範輔導成果發表會，宣傳企業建置能源管理系統之推動成果；結合產業公(協)會組織辦理能源管理系統訓練課程，橫向擴散能源管理系統之推廣效果。另外透過能源管理系統示範輔導績效平台，期追蹤企業建置能源管理系統持續改善能源績效之成果及遭遇問題，並提供政策回饋建議。

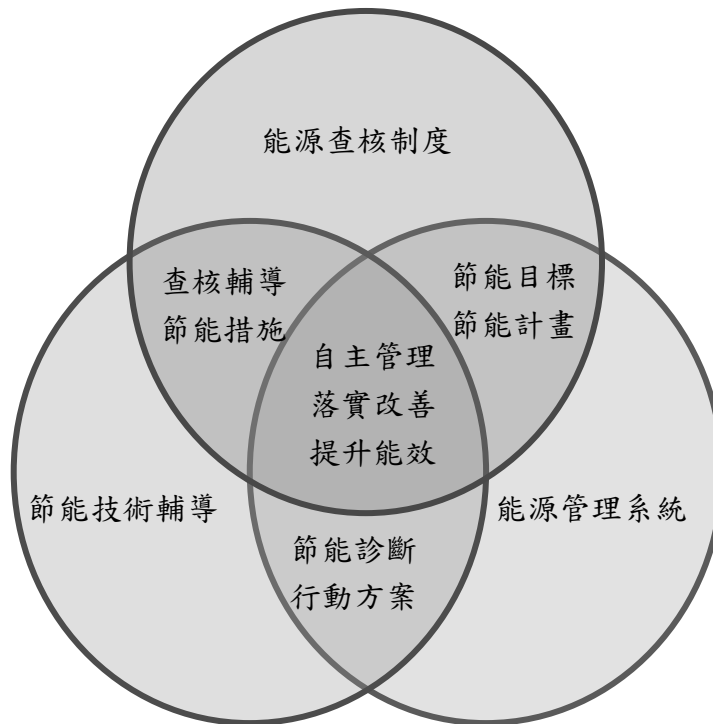
此外，經濟部中小企業處與加工出口區管理處也已陸續推動所轄事業建置能源管理系統，國內電子業、傳產及電信業等企業也已主動導入實施，顯示政府推動產業落實節能改善及溫室氣體減量工作上，已有效帶動民間企業自發性建置及深化能源管理工作，亦有具體之實質貢獻。

五、能源查核制度與 ISO 50001 能源管理系統 調和作法

國內能源查核制度的架構已具有能源管理系統基本雛型，但是，與 ISO 50001 能源管理系統要求的實施內容仍然有所差異，未來兩者可以適當地予以調合，以發

178 發展節能技術與能源管理系統以提升能源查核制度之成效

揮最大的綜效。而作為查核制度與管理系統基礎之節能技術，除可提供現場查核輔導、管理系統之節能診斷外，技術發展之本身即從協助各類型用戶注重平日的維護保養措施著手，使用儀器、資料庫記錄等診斷分析手法，使系統設備之運轉管理最佳化，可有效深入各階層甚至家庭與個人，引導運用高效率設備及節能手法，是推動全面性節能不可或缺的一環。



純就管理制度而言，目前政府積極宣傳與推廣的 ISO 50001 能源管理系統，可與現行能源查核制度產生互補作用，例如：

- 1.現行能源查核制度已經要求列管能源大用戶設置能源管理組織，並設立能源管理專責人員。但是，ISO 50001 能源管理系統會進一步要求最高管理階層應主動參與能源管理事務，並授權能源管理代表執行能源管理事務，有助於全方位推動節能改善行動。
- 2.現行能源查核制度已經要求企業針對各種能源流向進行分析，並透過能源效率診斷建立各項能源績效指標。但是，ISO 50001 能源管理系統進一步要求企業應更深入運用節能

技術、儀器及監控軟體等，定期監測、量測及分析各項能源績效指標變動趨勢，即時掌握節能改善的機會，更能落實能源績效持續改善之目標。

- 3.現行能源查核制度已經要求企業訂定能源管理行動計畫，並設定節能改善目標。但是 ISO 50001 能源管理系統進一步要求企業使用符合節能需求的設計，並優先採購能源效率高的節能設備，有助於落實能源績效提升之具體效益。

表 2 我國能源查核制度與 ISO 50001 能源管理系統之調和建議

類別	調和建議
組織管理	<p>1.能源查核組織之管理層級偏重於工務部門，對各成員權責分工內容較不明確，建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，要求明確指派能源管理代表，整合各部門代表組成能源管理組織，並對各成員所扮演的角色與權責，也要訂出明確的規範。</p> <p>2.能源查核制度未規範企業展現推動能源管理事務的策略方向，建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，可要求企業最高管理階層發布能源政策，揭露企業推動節能改善的指導方針。</p> <p>3.能源查核制度未規範企業最高管理階層須參與能源管理事務，建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，可要求企業最高管理階層定期審查能源管理系統的運作成果，並持續改善能源績效。</p>
能源規劃	<p>1.能源查核制度已調查能源設備數量及能源流向，建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，要求企業再針對重大能源使用設備逐項檢討如何落實節能改善行動。</p> <p>2.能源查核制度已設定能源績效指標以追蹤能源績效變化情形，建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，要求企業應定期監測、量測及分析各項能源績效指標之變動趨勢。</p> <p>3.能源查核制度並未突顯遵守法規之重要性，建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，要求企業應主動檢討各項與組織營運活動相關的能源管理法規之守規狀態。</p>

表 2 我國能源查核制度與 ISO 50001 能源管理系統之調和建議(續)

類別	調和建議
節能目標與改善行動	<p>1.能源查核制度雖要求企業訂定節能目標，但是因缺乏系統化的推動模式，容易流於形式。建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，鼓勵企業呼應本身能源政策方針提出節能目標與推動能源管理行動計畫，並列為經營管理策略重要核心項目。</p> <p>2.能源查核制度雖要求企業推動節能改善方案，但是因缺乏驗證能源績效的方法，不易落實節能改善成果。建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，鼓勵企業針對能源管理行動計畫提出驗證能源績效改善的方法與量化改善成果。</p>
能源管理運作	<p>1.能源查核制度未要求企業持續對能源設備操作人員與能源管理相關人員進行訓練，不易強化相關人員的職能。建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，鼓勵企業操作與管理能源之相關人員均須接受適當的訓練。</p> <p>2.能源查核制度未要求對主要耗能設備或製程建立標準操作程序，不易確認設備符合最佳化運轉條件。建議參考 ISO 50001 能源管理系統作法，鼓勵企業針對重大耗能設備及其最適操作條件訂定明確的操作規範。</p> <p>3.能源查核制度未要求採購節能設備或使用符合節能之設計、技術。建議參考 ISO50001 能源管理系統作法，鼓勵企業應採購符合節能要求的設備、技術。</p>
監測、量測及分析機制	<p>1.能源查核制度未特別要求企業定期監測、量測及分析能源使用設備的運轉效率。建議可參考 ISO 50001 能源管理系統作法，鼓勵企業針對重大能源使用設備建立即時監測、量測及分析的機制。</p> <p>2.能源查核制度未要求企業定期檢討能源管理制度運作的成效。建議可參考 ISO50001 能源管理系統作法，鼓勵企業定期實施內部稽核、守規性評估及管理階層審查會議，並列管各項能源管理運作紀錄。</p>

六、結論與建議

孔孟有言：「工欲善其事必先利其器」、「徒善不足以為政，徒法不能以自行」，對於企業而言，無論是能源查核制度或 ISO 50001 能源管理系統，如果不能具體且長期的落實執行節能措施，再好的管理制度也無法發揮其效用。其次，最高管理階層實踐節約能源措施的決心，也是企業能源管理工作是否可以產生績效的關鍵。如果無法確實執行節能改善行動，再完整的能源分析也不能促成能源績效提升，有效的節能改善行動則必須培養專業節能技術能力作為基礎。而能源管理系統不僅重視企業自發性遵守法律規範的承諾，也注重企業應優先選用高效率的節能設計與採購低耗能的節能設備，這與現有能源查核制度及節能技術輔導有異曲同工之妙。

本會經由歷年對工商業之節能技術輔導，已具備節能專業領域人力與核心技術能力，建立各種耗能設備（如冰水主機、泵浦等）效率檢測標準程序文件。近年來，透過各行業節能技術輔導所累積的實務經驗，再建立各項重大能源使用設備之操作維護程序及研發能效診斷評估軟體（如 Mr. Energy 50001 等）工具，能簡捷迅速地為企業進行節能診斷把脈，並藉以持續累積建構國內推廣能源管理系統輔導所需的能量，展現技術、制度及管理三者整合之績效。為有效推廣節能技術輔導之深度與廣度，擴大推動國內企業導入 ISO 50001 能源管理系統，強化與落實能源查核制度，確實達成整體節能目標，建議未來可採行之具體作為如下：

1.法規制度整合

綜觀國際間推廣 ISO 50001 國際標準之發展趨勢，企業未來須逐漸加強能源管理制度之健全發展。若能透過能源管理法規之調整與修訂，促成我國能源查核制度與 ISO 50001 能源管理系統之相互調和，不僅有助於協助能源查核制度與國際接軌，更可促使企業透過能源管理系統的有效運作，強化能效提升之綜效。

2.節能專業人才及能源管理人才培育

從能源管理議題多元化發展的結果，已顯示能源管理工作需要整合各種跨領域的專門技術。未來應仿效先進國家依技術別，培育各類專業人才及國內能源管理人員，並優先推動能源管理專業證照制度，再透過培訓、回訓及考試制度，協助企業提升節能技術及能源管理之專業能力。

182 發展節能技術與能源管理系統以提升能源查核制度之成效

3.能管系統工具軟體研發與推廣應用

因能源管理系統涉及跨部門整合，也要處理繁雜的能源數據，假若能透過能管系統工具軟體(如 Mr. Energy)之綜整能力，能使企業用戶於導入能管系統時，更具時效性與便利性。另外，可應用能源資訊技術(EICT) 建置雲端監控管理系統，即時掌握用戶端之設備耗能資訊，透過線上診斷分析及管理，即時對能源用戶提出最佳化運轉建議，達到合理化使用能源之目的。

4.健全能源管理系統認證/驗證機制

持續推動我國與國際認證合作組織之交流活動，加速促成與國際接軌之能源管理系統認證/ 驗證制度，強化能源管理系統驗證人員建立節能技術專業能力，提升第三者驗證品質。

5.持續追蹤能源管理系統相關國際標準之發展動態

國際標準組織對能源稽核、能源管理系統驗證機構管理、能源基線與能源績效指標量測及能源績效量測與驗證等項目正在研擬國際標準，我國應即時掌握標準制訂動態，持續蒐集國外能源管理系統最新應用資訊，待相關國際標準正式公告後，快速導入國內實施與應用，以利於國內能源管理系統之實施方法能與國際制度無縫接軌。

6.檢討擴大能源查核管理對象

從企業自發性建立能源管理系統之運作經驗，當能源查核制度與能源管理系統整合後，若擴大現行能源查核制度之適用對象，將可促成更多企業應用能源查核制度健全內部能源管理機制，進一步提升能源使用效率及持續改善能源績效。

7.發展節能技術、健全節能法令規範

提供獎勵誘因鼓勵研發發新且高效率能源技術(設備)，發展綠色能源產業及營造節能市場規模。另外，藉由完整的節能技術產業作後盾，逐步健全節能法令，透過規範約束更多能源用戶提升能源效率，促進全民節能減碳。

參考文獻

- 1.經濟部能源局，「台灣能源統計手冊」，2012 年。
- 2.財團法人台灣綠色生產力基金會，「綠基會通訊」36 期，2014 年。
- 3.International Energy Agency, 「Key World Energy Statistics」，2013 年。
- 4.財團法人台灣綠色生產力基金會，「2013 非製造業能源查核年報」，2013 年。

隔熱塗料於建築節能應用之案例分析

張裕成*、張靜怡**

摘 要

建築節能是符合都市永續發展與提升居住生活環境品質的最佳途徑，從內政部建築研究所公布的最新綠建築評估系統的 9 大指標，「生態、節能、減廢、健康」的綠建築用語中，可發現節能將是台灣推動綠建築的一項重要課題，其中之「日常節能指標」，是以最大耗電部分的空調與照明用電的節能設計為重點，並將節能評估重點設定在建築外殼節能設計、空調效率設計及照明效率設計等 3 大方向。

有鑑於此，在建築外殼節能設計中，窗戶、屋頂與外牆的隔熱性能在整個建築空調用電上扮演著重要的角色，故導入高性能窗戶、屋頂及外牆隔熱材料，來提高太陽熱能的反射，降低太陽熱能傳導至建築物內，可以有效的減少建築空調用電與減少二氧化碳的消耗。

本文中說明「Zeffle 隔熱塗膜」應用於建築節能的特性與應用，塗有隔熱塗料的建築屋頂或外牆，可以反射太陽光中 50% 以上的紫外光及 80% 以上的紅外光，可以有效的隔絕熱源抑制室內溫度上升，控制室內環境溫度，減少空調的使用率，達到節能減碳的目的。

【關鍵字】綠建築、建築外殼節能、太陽輻射熱能、隔熱塗料

*和泰興業股份有限公司技服總處 副總

**和泰興業股份有限公司技服總處 專員

一、前言

有感地球的環境危機，1980 年世界自然保護組織(IUCN)首次提出「永續發展(Sustainable Development)」的口號，呼籲全球重視地球環保危機。1992 年 6 月於巴西里約召開的「地球高峰會議」，史無前例地聚集 170 個國家政府代表及 118 位的國家元首，共同商討挽救地球環境危機的對策，會中簽署了氣候變化公約、生物多樣性公約，同時發表了森林原則、里約宣言、二十一世紀議程等重要宣示，一直到 1998 年的「京都環境會議」，更正式制定了各先進國家二氧化碳排放減量的目標，在此顯示了地球環保問題已成為超國境、超政體的國際要務^[1]。

然而建築是高污染、高耗能的產業，其一磚、一瓦、一鋼筋、一玻璃都是環境破壞之源，有如許多建築業常使用的天然石材，造成山林破壞、土石流失，其中建材的製造，在生產過程耗用大量的煤與電能，並排放大量二氧化碳，往往對環境造成嚴重的傷害與污染。1996 年 6 月在伊斯坦堡召開的「居所會議(Habitat II Agenda)」，其會議宗旨為謀求最低環境負荷的開發使用方式，達成永續發展的人類居所，並與自然和諧共處，且針對當今的都市危機研商對策。我國也在同年 7 月的「APEC 永續發展會議」中，承諾推動「居所會議」的決議目標，並在行政院成立「永續發展委員會」，誓言善盡國際環保職責，同年行政院經建會也成立了「國家永續發展論壇」，以研擬「跨世紀國家建設計畫」，此計畫下設有 8 個工作小組，在其中的「城鄉永續發展」小組，特別將「綠色建築」列為執行重點^[1]。

我國內政部建研所在 1999 年公佈「台灣綠建築標章 EEWB 評估系統」實施以來，已經變成國家級之綠建築認證規範，建立具亞熱帶氣候特色之台灣綠建築評估系統(EEWB)，為全世界第 4 個綠建築評估系統。EEWB 是以生態、節能、減廢及健康為主軸，其中包括生物多樣性、綠化量、基地保水、日常節能、二氧化碳減量、廢棄物減量、室內環境、水資源、污水垃圾改善等 9 大評估指標，在綠建築「日常節能指標」中，是以最大耗電部分的空調與照明用電的節能設計為重點，並將節能評估重點設定在建築外殼節能設計、空調效率設計及照明效率設計等 3 大方向^[2-3]。

林憲德^[4]指出，都市建築物較鄉村地區密集，太陽輻射進入都市之中，容易被建築體所吸收，又因為建築物高聳與吸熱面積大，使日射量進入都市內，經建築物

之多重反射後，被吸收的比率增加，造成都市環境儲熱上升，加速都市暖化的現象，導致大量使用空調設備來調節室內溫度，增加建築總能量消耗。近年來，世界各國對於都市熱島效應的研究，已逐漸由以往都市是熱島基礎理論的探討發展至解決方案的實務層面，在經歷環保團體與學界的努力與推動，目前可行的技術主要有冷鋪面(Cool Pavement)、冷屋頂(Cool Roof)以及植栽(Shade tree planting)等技術，其中冷屋頂與植栽已整合在各國推行的綠建築方案中，對降低建築物之能源費用有直接的效益，較具經濟性而倍受重視^[5-7]。2006 年 Synnefa^[8]提出反射塗料對降低建築和城市環境表面溫度有相對影響性，由數據結果得知，在使用反射塗料可以有效的降低建築圍護結構和城市環境表面溫度，而有助於熱島效應的緩解及減少建築空調負荷的用電量。2007 年 Synnefa^[9]探討冷屋頂塗料在不同氣候條件下，對住宅的冷熱負荷和室內熱舒適的影響進行評估，數據結果顯示，增加屋頂的太陽能反射率 18-93%，在有空調的建築物中，可減少 11-27%的空調負荷，因此冷屋頂塗料的應用是有效的，其具有低成本及易使用等特性，有助於提高建築空調節能和建築物的熱舒適性。

本文將在以下內容介紹「Zeffle 隔熱塗膜」，是採用四氟化型氟素塗料，氟素樹脂具有較佳的耐候性，可改善白色塗料常因氧化作用使塗膜提早劣化的問題，四氟化型氟素塗料可直接在常溫下施工，可直接現場塗裝，具有抗紫外線、不易髒污、抗腐蝕能力強、可常保美麗外觀及隔熱效果可持續 15~20 年的耐久性。

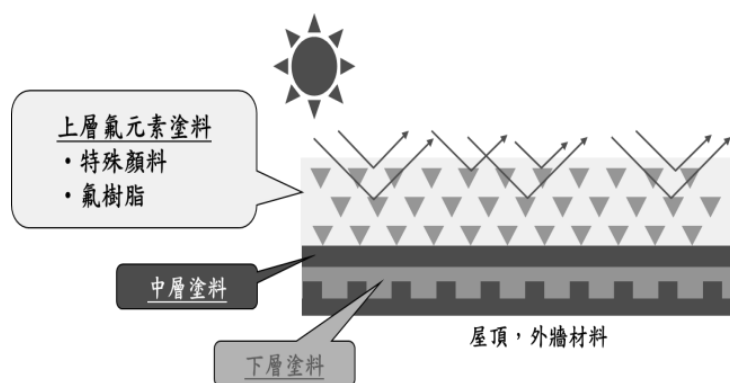
二、Zeffle 隔熱塗膜特性

2.1 隔熱原理

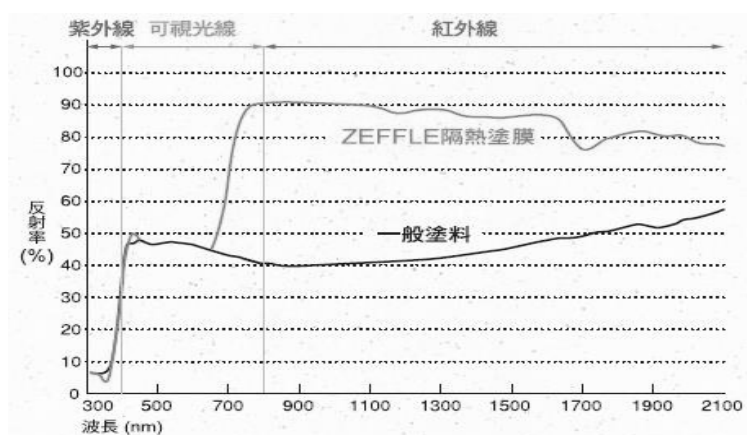
「Zeffle 隔熱塗膜」屬 3 層構造，分別為上層氟元素塗層、中塗層及下塗層，如圖 1(a)所示，其中上層氟元素塗層成分，含有特殊顏料及氟樹脂，使具有高紅外線反射率，能有效反射太陽熱能，避免熱源侵入，可避免室溫上升，由圖 1(b)所示在日照反射率量測中，實驗數據顯示 Zeffle 隔熱塗膜對紅外線的反射率皆在 80%以上，其紅外線反射率的表現，較市場上其他相似產品效果更為顯著。

188 隔熱塗料於建築節能應用之案例分析

圖 2 為隔熱效果示範說明，圖中實驗量測地點為日本公司的劍道場，其測量氣候條件環境溫度為 37°C ，天候特徵為晴朗，量測時間於下午 2 點測量，劍道場建材是由 0.75mm 鋼板與 5mm 斷熱材所組成，由實驗數據結果得知，塗上「Zeffle 隔熱塗膜」的建物，相較於傳統塗料，所測得屋頂表面溫度下降約 15°C ，屋頂內面溫度下降約 10°C ，而室內溫度下降約 7°C ，其隔熱效果卓越。



(a) 隔熱塗膜結構示意圖



(b) 日照反射率量測

圖 1 Zeffle 隔熱塗膜結構與反射率

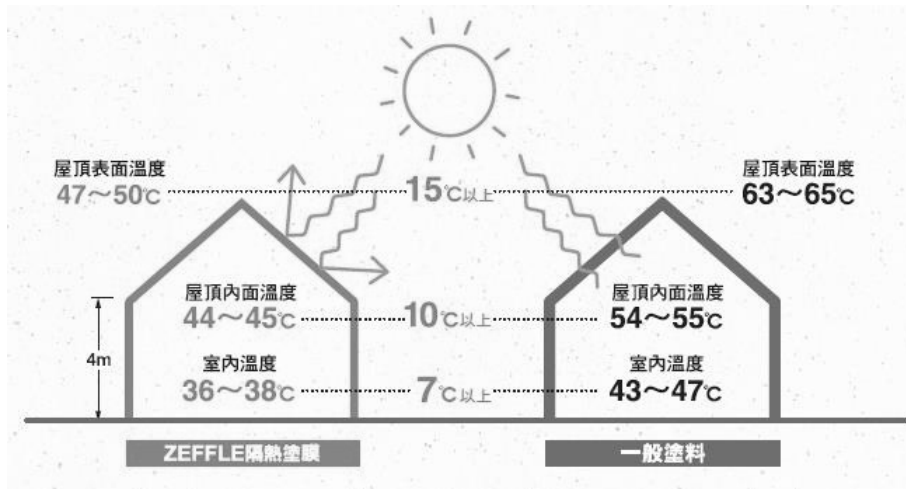


圖 2 隔熱效果示範說明

2.2 耐久性與抗髒污特性

「Zeffle 隔熱塗膜」其主要成分為四氟化型氟素樹脂與特殊材料所組成，氟元素其分子間結合的能量很高，因此具有超耐久性，氟元素結構有較低的表面張力，又因塗膜表面具有親水化特性，可降低塗膜表面的污染性，故 Zeffle 隔熱塗膜具有優異的耐久性、防髒污等特性，即使風吹雨打，塗膜也不會剝落，能長年保持美好的外觀。圖 3 為 SUV 耐久性測試，此實驗是以強烈紫外線照射待測物，隨強烈紫外線曝曬的時間增加，將使待測物表面產生剝離或劣化的現象，經強烈紫外線照射 500 小時，相當於正常使用 10 年的時間，因此在本次 SUV 耐久性測試實驗中，塗料選擇包含了壓克力烤漆塗料、壓克力聚氨酯塗料、壓克力矽膠塗料、其他氟素塗料及 Zeffle 隔熱塗膜，由圖 3 實驗數據中得知，Zeffle 隔熱塗膜在 SUV 耐久性測試 2,000 小時之後，其物件光澤度仍維持高達 90% 以上。

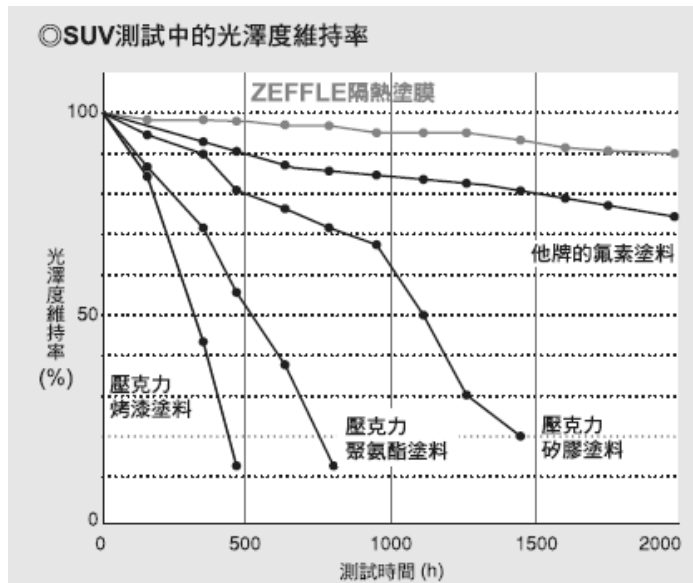


圖 3 SUV 耐久性測試

2.3 穩定度與抗腐蝕特性

「Zeffle 隔熱塗膜」其主要成分為四氟化型氟素塗料樹脂，對於紫外線或雨水的化學穩定度很高，不易產生使基材劣化的分解物，具有極佳抗腐蝕的特性。圖 4 中的測試試片是在不鏽鋼金屬板上，分別塗上一層 Zeffle 隔熱塗膜用樹脂與其他氟素塗料用樹脂來進行比較，並在沖繩宮古島曝曬四年，此地區年平均氣溫為 23.3℃，最低氣溫為 18℃，屬於溫暖潮濕的氣候型態，年降雨量和氣溫與熱帶雨林氣候極為相似，因此由圖 4 兩張照片中，可明顯看出受高溫潮濕氣候影響的試片，在塗有 Zeffle 隔熱塗膜用樹脂的外觀無任何變化，但是塗有其他氟素塗料用樹脂的外觀有明顯的金屬銹蝕現象，並有塗膜剝落的狀態，其試片隔熱與反射率的功能皆因此而喪失。

圖 5 為維護費估算示意圖，「Zeffle 隔熱塗膜」其材料特性具有極佳隔熱性、耐久性、抗髒污、穩定性及抗腐蝕等特性，其使用期限可持續 20 年之久，相較於其他一般塗料平均使用 8 年為期限，選用 Zeffle 隔熱塗膜在成本上可節省許多。由

圖 5 可得知，假設建築物使用時間為 50 年，建築物外牆面積為 $5,000\text{m}^2$ ，若選用一般塗料平均使用 8 年為期限，一旦期限過後需重新塗裝，因此 50 年後需反覆塗裝約 7 次，將消耗 46 噸塗裝材料；若選用 Zeffle 隔熱塗膜平均使用 20 年為期限，一旦期限過後需重新塗裝，因此 50 年後需反覆塗裝約 3 次，將消耗 19 噸材料，由此可知，Zeffle 隔熱塗料無需再短期內再次塗裝而消耗資源，與其他樹脂塗料相比，對環境更加有益。

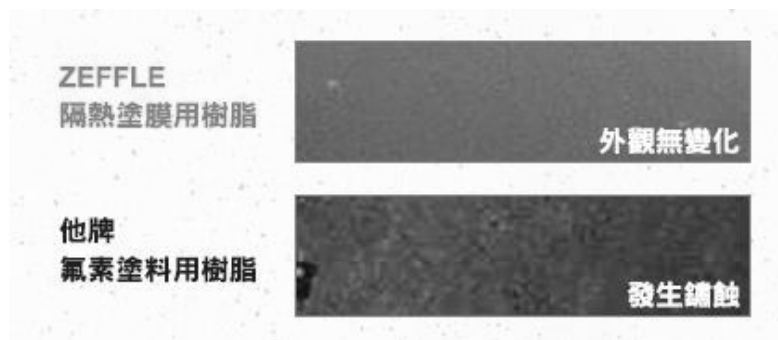


圖 4 沖繩宮古島試片照片

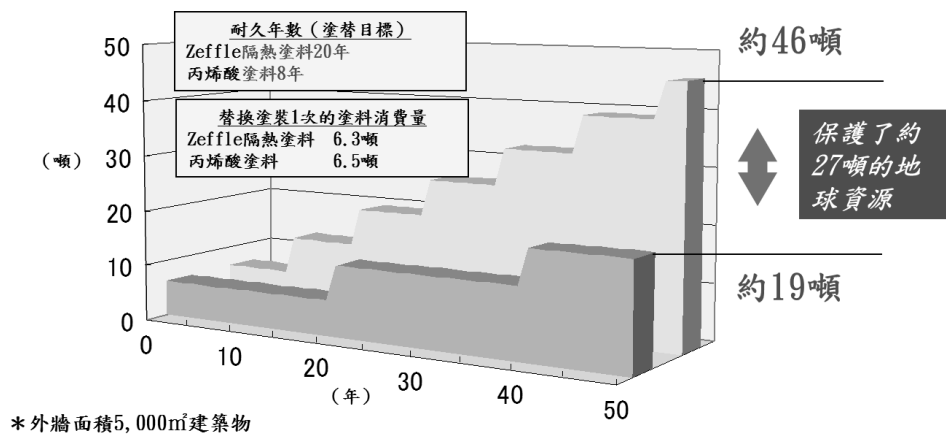


圖 5 維護費估算示意圖

三、案例應用及分析

3.1 建築案例 1 說明

本案例為日本大阪造紙廠如圖 6 所示，該公司所生產項目有紙類製造與紙管容器，需解決室內溫度上升而導致產品品質下降的問題，當中希望選用低成本與省管理的辦法，來防止屋頂的熱量侵入，該公司過去是採用灑水的機制，故此次以環境作為考量，希望達到節水節電的需求。本案使用 Zeffle 隔熱塗膜作為解決的方針，透過隔熱技術與變頻空調的雙重效果下，使屋頂的表面溫度下降了 15.4°C ，室內溫度保持在紙張保存的最佳溫度 25°C ，減少了過去灑水管理的水費，減輕了空調負荷，大幅降低二氧化碳的消耗量。屋頂的表面溫度量測數據如圖 7 所示。



圖 6 日本大阪造紙廠

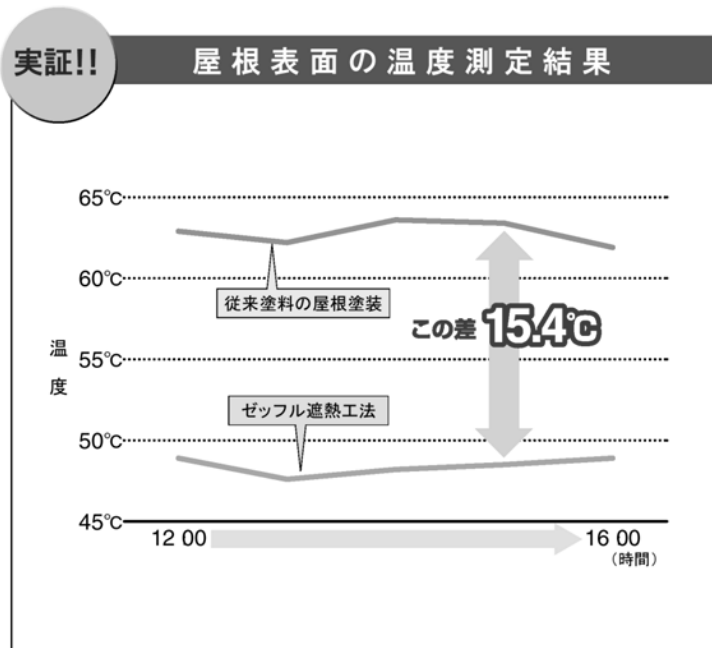


圖 7 屋頂的表面溫度量測數據

3.2 石化案例 2 說明

圖 8 為石化工業儲槽設備案例，石化工業中儲槽的溫度太高，將導致儲槽的內壓上升，使儲槽 VOC 揮發性有機物質排放，也將使液體在高溫下大量揮發，為避免儲槽設備的溫度升溫太高，故選用 Zeffle 隔熱塗膜作為解決方針。透過 Zeffle 隔熱塗膜絕佳的隔熱技術，可以降低儲槽的溫度，避免夏天因高溫，導致儲槽中內壓上升，使液體在高溫下大量的揮發，可以有效抑制儲槽設備內液體耗損。由圖 9 所示使用 Zeffle 隔熱塗裝相較於一般塗裝，經由紅外線熱顯像儀拍攝，儲槽設備上方表面溫度下降 6°C，有效的降低儲槽設備溫度。



圖 8 石化工業儲槽設備

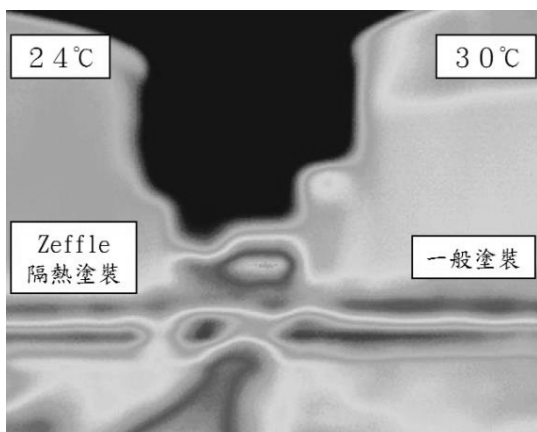


圖 9 紅外線熱顯像儀拍攝儲槽設備

四、結 論

「Zeffle 隔熱塗膜」具有先端的氟化學技術，研發出同時具有隔熱、耐候性、耐久性，以及親水性能的多功能隔熱塗料，為舒適的生活環境以及節能環保提供最佳的解決方案。

1.隔熱：不耗能的降低盛夏時的室內溫度，在營造更舒適的居住及工作環境的同時，

節省電費支出且對於節能環保盡一份心力。

2.耐久：壽命長達 15~20 年，可減少塗料的開銷及反覆施工的困擾。

3.耐候：耐鹽蝕、酸蝕，適合台灣的環境使用。

4.自潔：塗膜具有親水性能，雨水沖刷即可洗淨表面，使塗膜表面常保如新。

參考文獻

- 1.江宜樺，亞熱帶的綠建築挑戰，內政部出版，2008。
- 2.林憲德，我愛綠建築:建康又環保的生活空間新主張，新自然主義出版社，2004.11。
- 3.林憲德、莊惠雯、張從怡、陳建男，綠建築評估手冊-基本型，內政部建築研究所出版，2012.04。
- 4.林憲德，現代人類的居住環境，胡氏出版社，1994。
- 5.U.S. Environmental Protection, Agency Cambridge Systematics, Cool pavement Report, EPA Cool Pavements Study-Task 5, Heat Island Reduction Initiative, 2005.
- 6.Rosenfeld, A.H., Akbari, H., Brets, S., Fishman, B.L., Kurn, D., Sailor, D., and H. Taha, "Mitigation of Urban Heat Islands: Materials," Utility Programs, updates, Energy and Buildings, Vol.22, pp.255-265, 1995.
- 7.Rosenfeld, A.H., Romm, J. J., Akbari, H., and M. Pomerantz, "Cool Communities: Strategies for Heat Island Mitigation and Smog Reducion," Energy and Buildings, Vol.28, pp.51-62, 1998.
- 8.Synnefa, A., Santamouris, M., Livada, I., "A Study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment," Solar Energy, Vol.80, Issue 8, pp.968-981, 2006.
- 9.Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H., "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions," Energy and Buildings, Vol.39, pp. 1167 – 1174, 2007.

翻轉屋頂之屋頂綠化創新工法

王獻堂*、黃世銘**

摘 要

藉由綠建築元素構面(永續基地、水資源、能源與大氣、材料與資源、室內環境品質與創新設計)的整合式設計，實踐本期推出的屋頂綠化創新工法，期望國內綠化速度迎頭趕上先進國家。也藉由整合式設計概念，實踐節能減碳、降低都市熱島、雨水回收讓水資源有效利用、結合屋頂光電板設計達到零碳農業生產；好看、好玩還可實踐糧食生產與食品安全把關，也藉由提供一個綠色場域，讓社區人與人更有互動、尋回台灣人熱情與和善的本質。

【關鍵字】翻轉屋頂,LEED,熱島效應,綠屋頂,能源模擬,屋頂農場,節能減碳

*冠呈能源環控有限公司 總經理

**冠呈能源環控有限公司 顧問

一、緒 論

筆者與夥伴們係國內以綠建築與節能減碳為職志的顧問團隊，依據 103 年 5 月 USGBC 統計除美國外，台灣在 150 個全球 LEED 認證國家中，認證面積創造出台灣排名全球第五，僅次於加拿大、中國大陸、印度與南韓之佳績。

全世界國家中以德國和日本在屋頂綠化上有最多的實績和經驗，其中德國屋頂綠化總面積為 12,953 萬 m^2 ，並以每年 1,300 萬 m^2 的速度成長中^[1]，期望在既有團隊合作下，推動創新綠屋頂工法來翻轉目前綠屋頂的施作概念，藉由軟、硬體整合來加速擴散迎頭趕上先進國家的綠化速度，接軌國際綠建築 LEED 綠屋頂推動計畫。

創新屋頂綠化工法並提昇綠屋頂產業競爭力。具體作法是將原先應用於農業的水耕技術，優化載具的創新工法應用於綠屋頂設計。讓屋頂不再只是曬棉被的閒置空間，而是兼具生產的糧食基地、教育推廣的魚菜共生實驗基地、綠建築雨水回收的應用基地、都市排水滯洪的基地、消防給水的預備基地、零碳農魚業的實踐基地、落實綠屋頂與節能減碳的政策推廣基地、更是人與人之間培養共同種植樂趣的綠色療癒基地。

本文除了硬體工法創新外，亦期望結合政府降低熱島政令，讓一棟建築的綠化影響到一個社區，讓社區藉由綠化彼此分享交流，讓這個交流影響城市，讓城市轉型為生態城市與自然和平相處，讓城市微環境進入良性循環。

二、綠屋頂之實質效益

2.1 LEED 降低都市熱島效應建議之技術與策略

1.50%以上的屋頂面積為綠地。

2.混合裝設高反射率(SRI)屋頂表面材料與屋頂綠地，並符合 $(SRI \text{ 屋頂面積}/0.75) + (\text{屋頂綠地面積}/0.5) \geq \text{總屋頂面積}$ 。

熱島現象、或稱熱島效應，是一個自 1960 年代開始，在世界各地大城市所發現的一個地區性氣候現象。具體來說，無論從早上到日落以後，城市部份的氣溫都

比周邊地區異常的高，並容易產生霧氣。這個現象的發現，是由於人造衛星的出現，使人類得以利用人造衛星從高空以紅外線拍攝地球。這種拍攝的最初目的，是作氣象測量用途，用以分析雨雲的構成。可是，後來人類從紅外線的影像發現了照片中的城市地區的溫度有著很明顯的差異，看起來城市部份就好像在周邊地區的一個浮島。

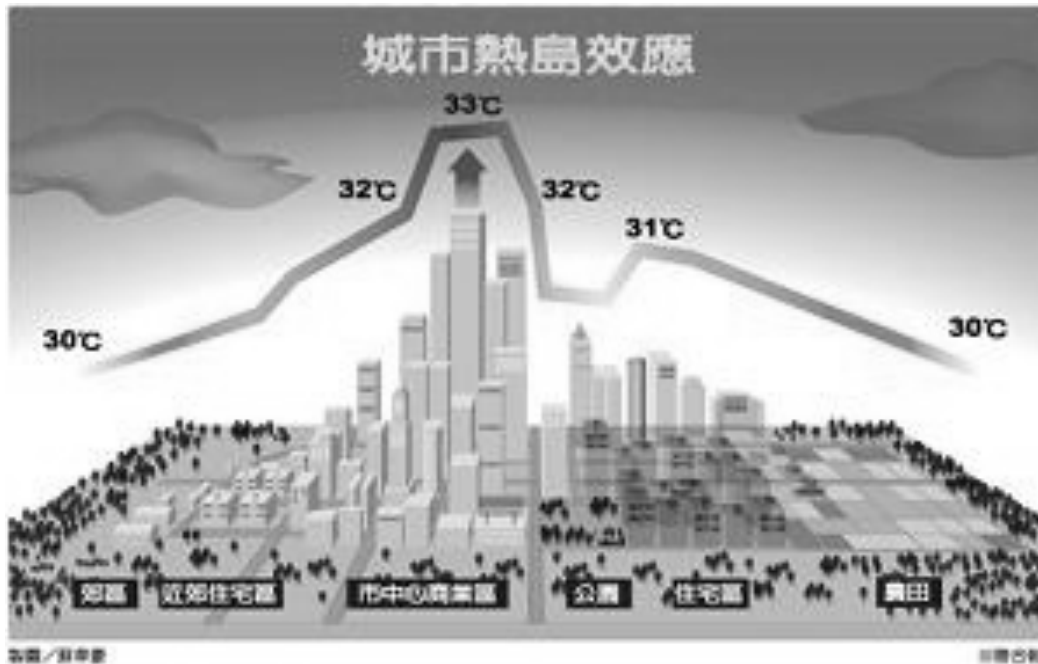


圖 1 城市熱島效應示意圖^[2]

2.1.1 都市熱島之定義

由於都市中大量的人工發熱、建築物、道路的高蓄熱體、綠地稀少等因素，造成都市的高溫化。因此，溫暖化的都市在周遭低溫郊區的背景襯托下，有如一座發熱般的島嶼，這種現象在氣象學上稱之為「都市熱島(urban heat island)」^[3]。台北市與新北市 2011 年開始，建案只要超過 5 千平方公尺，申請建造執照規定要在屋頂「設置綠能設施或設備」，其中包含了屋頂綠化及太陽光電屋頂設置。都是為減緩「熱島效應」，提升都市綠化率，使都市環境更永續的政策規定。

200 翻轉屋頂之屋頂綠化創新工法

都市化發展，人口大量往都市集中，都市熱島效應越演越烈。報告顯示熱帶雨林一半的降雨是來自上午現地水氣蒸散，上升至高空遇冷產生凝結而下的午後陣雨，因此綠屋頂推動將有利於：

- 1.提高都市綠覆率，紓緩都市熱島效應。
- 2.配合雨水管理：建立溫室屋頂收集雨水，提供增加水氣蒸散，減緩都市水患的頻率與程度。
- 3.建置屋頂陽光生活溫室，發展生態科技農業立體空間生產。
- 4.調節都市水氣，改變巨型都市微氣候。形成夏季午後陣雨的自然調節微氣候型態。
- 5.綠屋頂的植栽可以改善微氣候：樹木花草葉面的遮陰和蒸散作用能降低氣溫、調節濕度、吸收太陽輻射，並在降溫增濕效果上相當明顯。
- 6.由於綠色屋頂對陽光的反射率比深色水泥屋頂面大，減少屋頂吸收輻射熱，且綠色屋頂面因植物的蒸散和潮濕下墊面的蒸發作用使綠化屋頂從空中獲得的熱量少，而散熱效果大，因而可大大減緩都市的熱島效應。

2.2 綠屋頂對室內空氣品質之效益

2.2.1 空氣污染的影響

都市中的空氣含有大量的污染物質，如硫氧化合物、氮氧化合物、一氧化碳、二氧化碳、粉塵等都會直接影響都市氣候。另一方面，粉塵類的污染物再都市上空形成一層塵罩，覆蓋著都市區域(詳圖 3)。這種塵罩不但會阻擋太陽輻射，形成所謂的陽傘效果，也使塵罩下的大氣不易對流，大氣輻射冷卻卻無法發生效用，積聚的熱量和污染物不易擴散，只有在強風下才會流動。因此，都市中的大氣總是讓人感覺灰濛濛的，多雲和多霧的日數都比郊區多。同時，空氣污染的硫氧化物也是都市酸雨增加的元兇

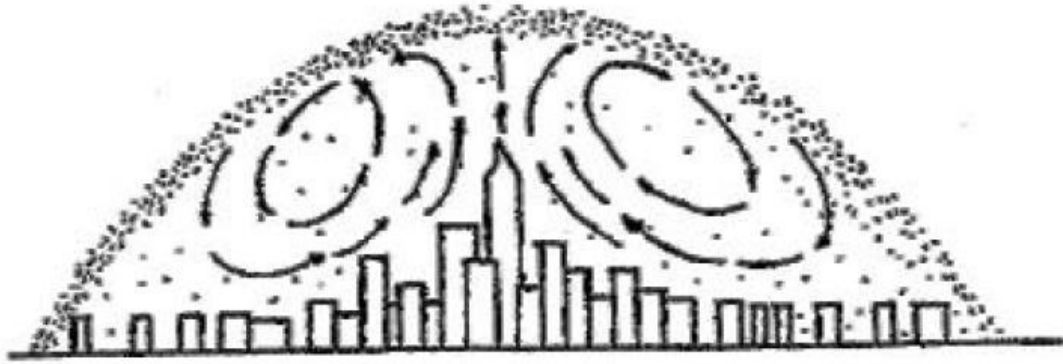


圖 3 都市上空塵罩的效應^[3]

都市屋頂是空氣最好的地方，綠屋頂更是提升空氣品質的重要手段，因為

- 1.植物光合作用可以淨化空氣
- 2.提供解決都市空氣嚴重霾害污染的方法
- 3.都市冠層陽光生活圈不僅可種植作物生產糧食，更可淨化空氣降低霾害。
- 4.建立屋頂玻璃生態科技農業生產生活空間，創造都市最清新空氣的生態圈，將形同擴大都市之肺。
- 5.綠屋頂的綠化植物通過吸收和截留空氣中的污染物(如 CO_2 、 NO_2 、 SO_2 、 O_3 和塵埃、重金屬等)，可以淨化空氣、提高空氣品質、改善環境。
- 6.屋頂綠化對大氣中灰塵的降低有兩條途徑：(1)降低風速：種植植物可增加屋頂的粗糙程度，提高風的摩擦阻力使風速減小。隨著風速的降低，空氣中攜帶的灰塵也隨之下降。(2)吸附作用：綠色植物葉片表面生長的蠟質或絨毛有皺褶且能分泌黏液，能夠阻擋、過濾和吸附各種塵埃。綠化樹種中以葉面粗糙、具茸毛、葉片硬挺、具黏性物質、葉形小而多變者具較高的單位葉面積滯塵量，但關鍵在於植栽的葉面面積的總和，形成複層植栽，則可獲得較佳的效果。

2.3 綠屋頂對節能效益能源模擬實證

2.3.1 eQUEST 動態耗能模擬程式介紹

eQUEST 動態耗能模擬程式是由美國 Lawrence Berkeley National Laboratory，

Consultants Computation Bureau, Hirsch & Associates, Los Alamos National Laboratory, Argonne National Laboratory and University of Paris. 等單位所共同研發之建築耗能計算程式，主架構及核心計算程式係以 DOE-2 為基礎，其為國際上最具權威且受到眾多知名研究機構、政府、學校等單位所採用之動態建築能源模擬程式。此程式之計算架構為：1.可讀取具彈性格式的輸入資料，並且將其轉譯成電腦可辨識之格式同時計算牆壁內瞬時之反應係數(response factors)、建築空間之熱反應加權係數(weighting factors)之處理器；2.可計算外在氣候、人員、照明、設備、通風、牆壁熱傳、屋頂、窗戶與遮陽等之逐時空調顯熱與潛熱負荷；3.可藉由控制策略、運轉時間以及溫度控管等條件，評估空氣側設備如空調箱、送/排風機與水側設備，如冰水機、水泵、冷卻水塔等之性能是否符合需求及最低建築耗能；4.可針對各種建築外殼、照明或空調系統等規劃進行最佳經濟效益之分析。

2.3.2 模擬參數

1.外觀

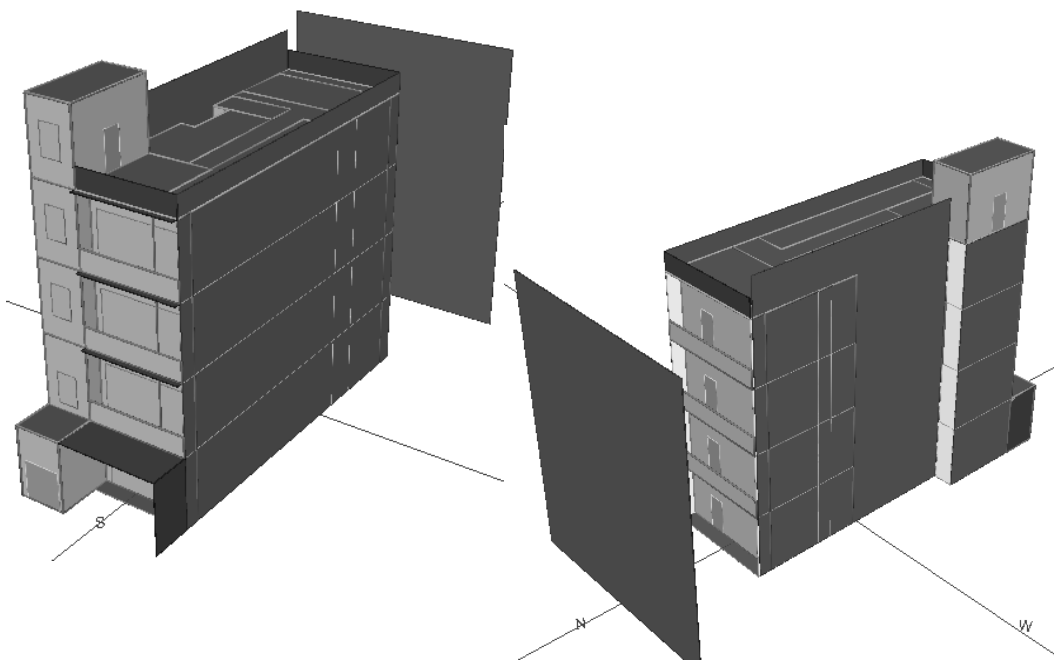


圖 4 以大安區一號屋頂農場為例模擬圖

2.屋頂材質

A.一般屋頂

構造	厚度 d (m)	熱傳透率
		W/m ² -K
外氣膜	-	1.01
防水層	0.004	
泡沫混凝土	0.1	
青油毛氈	0.01	
水泥砂漿	0.02	
鋼筋混凝土	0.15	
水泥砂漿	0.015	
內氣膜	-	

B.薄層綠屋頂

構造	厚度 d (m)	熱傳透率
		W/m ² -K
外氣膜	-	0.82
塑化木	0.03	
輕質混凝土	0.05	
防水層	0.004	
泡沫混凝土	0.1	
青油毛氈	0.01	
水泥砂漿	0.02	
鋼筋混凝土	0.15	
水泥砂漿	0.015	
內氣膜	-	

C.水層綠屋頂

構造	厚度 d (m)	熱傳透率
		W/m ² -K
外氣膜	-	0.60
水層	0.2	
塑膠層	0.06	
防水層	0.004	
泡沫混凝土	0.1	
青油毛氈	0.01	
水泥砂漿	0.02	
鋼筋混凝土	0.15	
水泥砂漿	0.015	
內氣膜	-	

204 翻轉屋頂之屋頂綠化創新工法

3.模擬方案說明

方案名稱	屋頂特性	樓層數	綠屋頂覆蓋率
CASE05_00	一般屋頂	4	0%
CASE05_01	薄層綠屋頂	4	100%
CASE05_02	水層屋頂	4	100%

2.3.3 模擬結果

(1) 屋頂之空調負載量分析

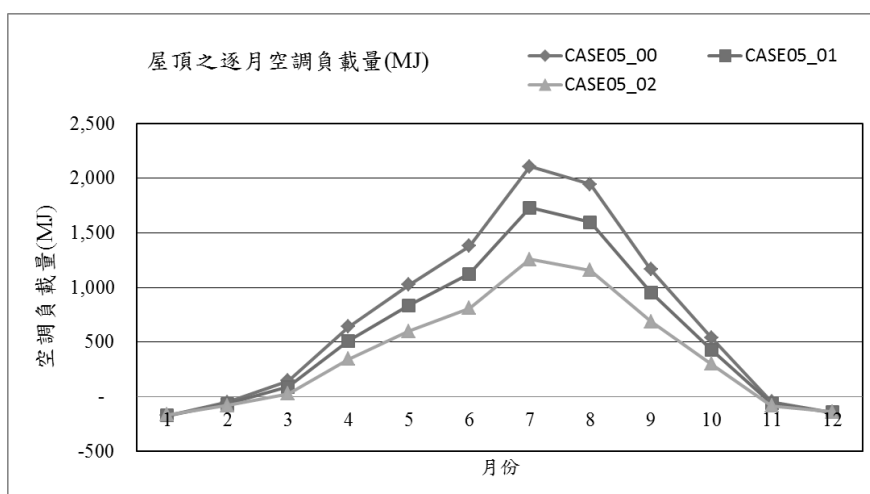


圖 5 屋頂之逐月空調負載量

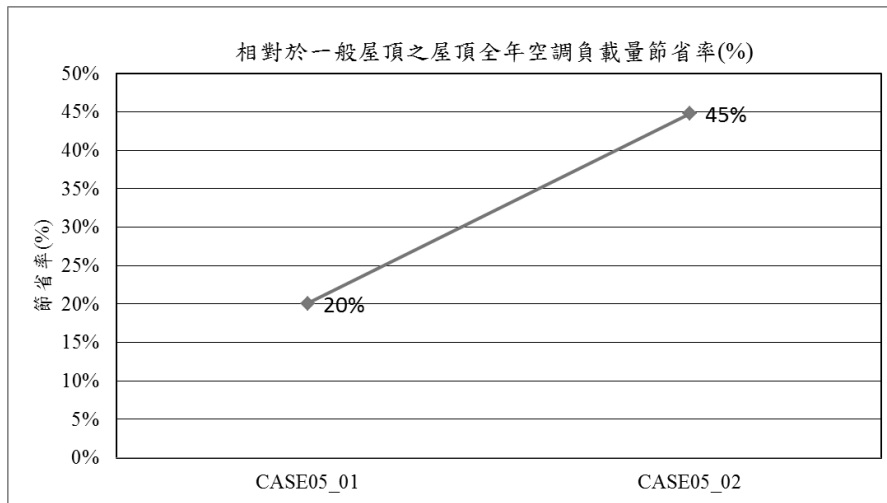


圖 6 屋頂全年空調負載量節省率(%)

(2) 模擬結果說明

由模擬結果得知，當採用薄層綠屋頂與水層綠屋頂之熱傳透率($\text{W/m}^2\text{-K}$)分別為 0.82 與 0.60；相對於一般屋頂時，薄層綠屋頂之全年空調負載量節省率約為 20%，而水層綠屋頂約為 45%。

三、綠屋頂面臨問題

傳統土層綠屋頂施作常有因忽略品質而失敗的例子，而創新工法提供了解決方案。

3.1 屋頂載重結構安全問題

一般屋頂的靜載重大多在 200-300 公斤左右，花土(包括陽明山土)的比重大概是 1.5 左右，只要覆土 15 公分就超載了，而植物要在這樣薄層的泥土中生長，環境是嚴苛的，尤其遇到炎熱的夏季植物就死傷一片導致失敗。

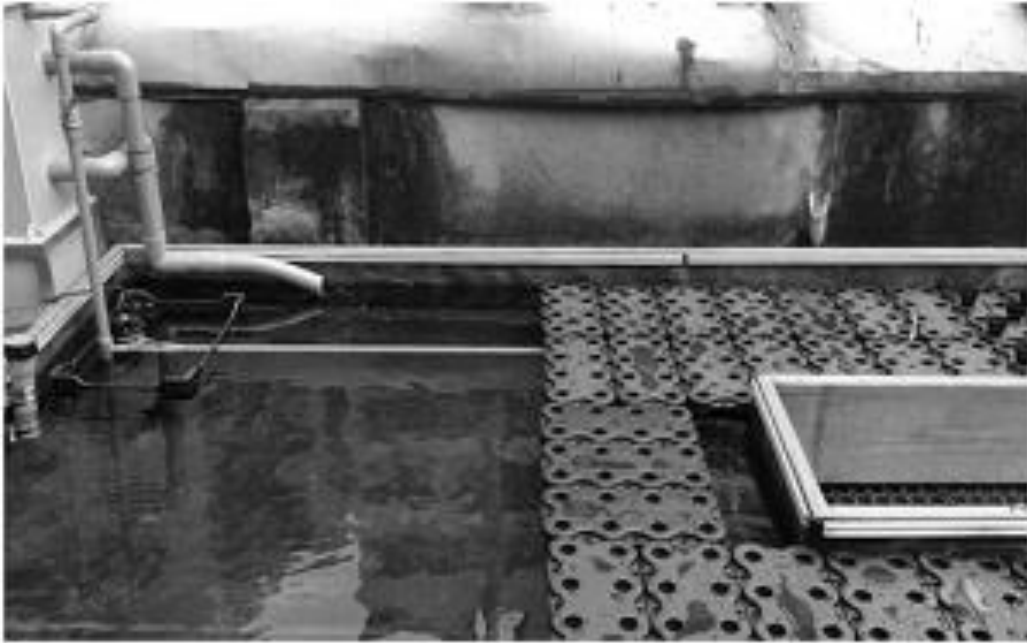


3.1.1 創新工法

水的比重為 1，在 15 公分深的水池中就可種到香蕉這樣的大植物，還可以養魚，植物要喝多少水它自己會決定，沒有澆水的困擾。

3.2 泥土流失造成排水管阻塞

為因應屋頂載重安全問題，現行都以輕質介質作為種植土壤，若逢大雨天，介質顆粒過小的容易流失，介質太輕的都會漂走，有可能塞住排水孔，而介質大量流失會需要補土。



3.2.1 創新工法

水池的設置完全與建築結構體分離，無妨礙原本的逕流，以水耕種植杯種植，亦無介質流失的疑慮。反而因設置水池的面積，還可把部分雨水保留下來使用，對雨水回收及滯洪都有極大貢獻。

3.3 阻根防水層的考驗

台灣地震頻繁，建築物易產生裂隙，植物的根系容易從裂隙伸入，進而造成頂樓住戶天花板滲水，造成整體綠屋頂的失敗。



3.3.1 創新工法

屋頂生態水池的設置在地震時，可以發揮有如阻尼般的效能，減少震幅保護房子。而水池所覆蓋的屋頂樓板，因為多了一層保護層，夏天降溫而冬天保溫，如此縮小溫差可以延長防水層的使用壽命。植物的根系長在水池中，不但沒有破壞結構的困擾，還可欣賞到平日土耕所看不到的根系美景。

3.4 土質劣化

綠屋頂的淺層土壤若無適當維管，土質劣化的速度很快，在劣化的土地上很難種植，但想換土則又是另一項辛苦的工作。這個常使無充足維管預算的綠屋頂失敗。



3.4.1 創新工法(浮田=福田)

使用專利浮田板創造一福田，將植物定植在種植杯中，所需的介質只有一點點，而且可以混合採收後的殘根落葉重覆循環利用，非常經濟。福田另一項優於土田的地方是，福田沒有劣化的危機，也沒有連作的障礙，使得產量得以提升。

3.5 綠屋頂創新工法的其它優點：(以大安區一號屋頂農場為例)

- 1.工法施作簡易。
- 2.可結合農業與園藝，種菜種花兩相宜。
- 3.植物與魚共生於一系統內，具觀賞及生態價值。
- 4.植物無澆水、施肥、除草的需求。
- 5.雨後乾淨而清新，無土壤泥濘之擔憂。
- 6.不需有種植經驗也能上手的懶人系統。
- 7.透視圖如圖 7 所示。

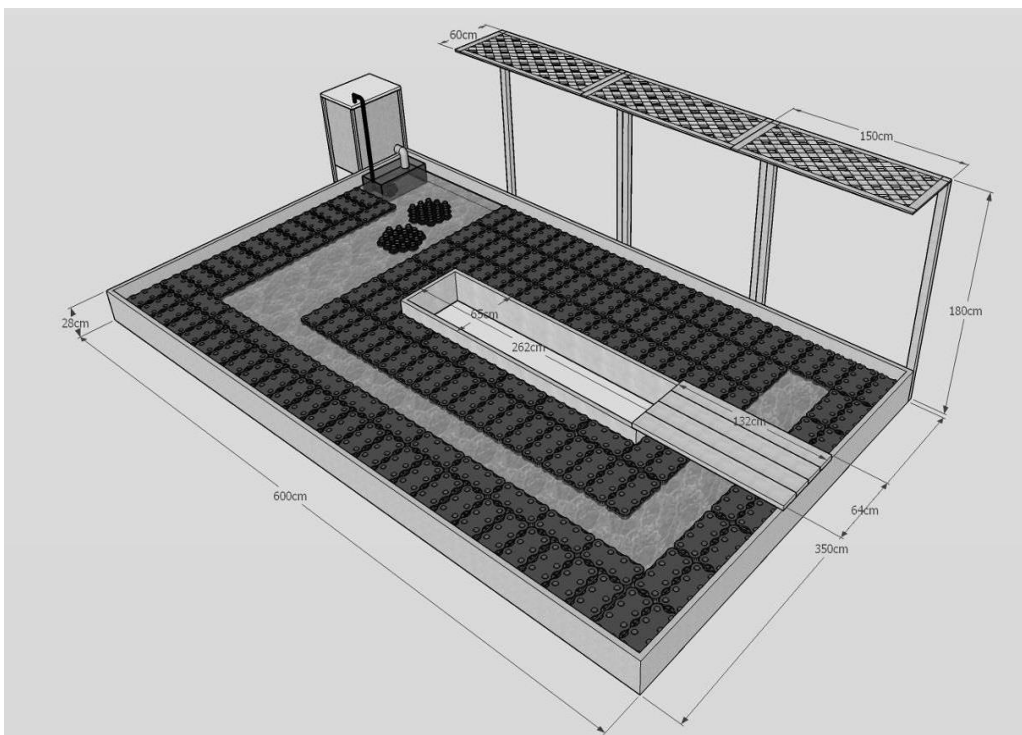


圖 7 大安區一號屋頂農場設計透視圖

8.平面配置圖如圖所示(以大安區一號屋頂農場為例)

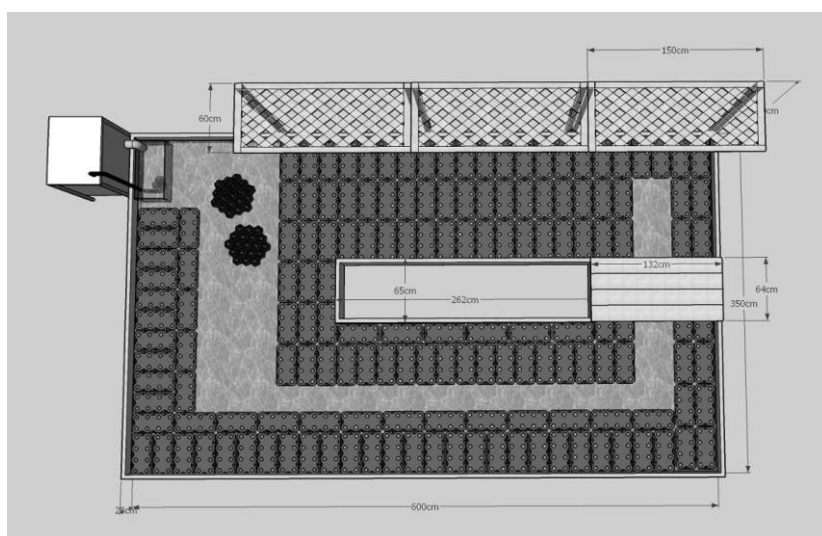


圖 8 大安區一號屋頂農場平面配置圖

三、創新工法施作說明(以大安區一號屋頂農場為例)

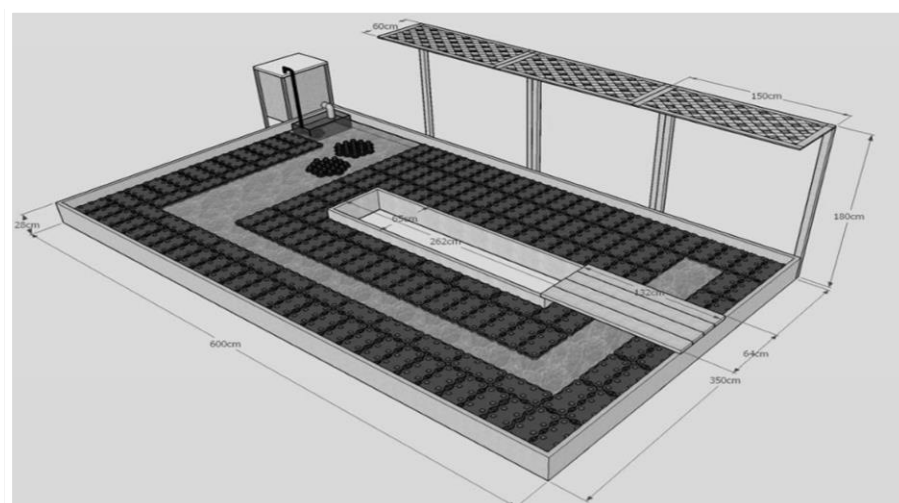


圖 9 施作系統規劃

212 翻轉屋頂之屋頂綠化創新工法



1.備料/清潔



2.排水板鋪設



3.邊框組合



4.完成邊框



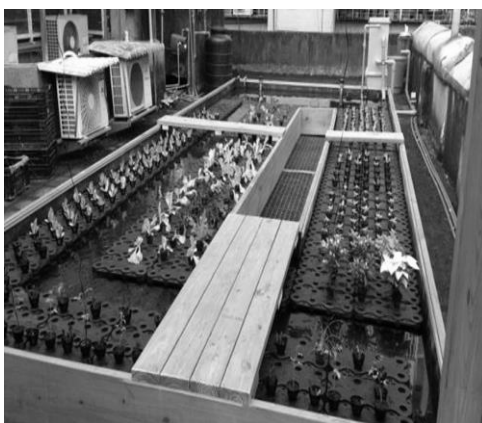
5.HDPE 防水布鋪設



6.架設假田



7.系統安裝



8.種植



9.一個月後成果

四、屋頂農場之成果分享



1.肥而結實的草莓，有機天然、無農藥，
冬季易栽培作物之一



2.大頭菜也是屋頂農場成員之一



3.作物成長至採收，輕鬆又簡單，讓你吃
得安心又便利



4.多餘的老葉由兔子吸收，排出的糞便直
送堆肥區，製造高營養堆肥



5.魚幫菜，菜幫魚，魚菜共生系統兼具景觀價值



6.香草園區，只要有風、有擾動，空氣中便滿是香氣撲鼻



7.兼具食用而美麗的花菜魚園子，總是能吸引欣賞他的人前來駐留



8.食用蔬菜也可以造就美麗的景觀，建置一座可以吃的風景

五、結 論

在綠屋頂這件事來說，設置綠屋頂的好處很多，且絕對是件對的事，但是選用什麼方法來設置，就有很大的成果差異，同樣是做對的事，但是方法至關重要。

其實在都市我們已經失去了真正的土地，所以我們就設置綠屋頂一定要先認清這個事實，不能認清這個事實而一昧強求是不智的，所以跳脫泥土的思維框架，才能有創新的好方法。

所有的設施在完成後能否永續經營才是成敗的關鍵。高養護管理費用的系統，如果又沒有糧食產出，常是會讓使用者最後選擇放棄的主因，所以糧食產出在綠屋頂建置上就有非凡的意義。一個好的綠屋頂，不應僅是能種種草皮和一些耐乾旱植物的地方，應該要提升為糧食的生產基地，是可以種花種菜養魚和休閒的，它可以

降低城市對農村的依賴，免除食安的威脅，減少食材的運送所需消耗的能源，真正達到人與生態的平衡，系統就可以永續運作了。

參考文獻

- 1.<http://www.treegarden.com.tw/greenroof.html>
- 2.http://mag.udn.com/mag/edu/storypage.jsp?f_ART_ID=405516
- 3.林憲德，現代人類的居住環境，1994。

「工業污染防治」刊物 撰稿說明

■依據行政院公共工程委員會(90)工程企字第 90004111 號公告「技師執業執照換發辦法」第 5 條第 1 項第 4 款所訂「國內外專業期刊」一覽表，已將工業污染防治季刊登錄為專業期刊之一，環工技師投稿本刊物將取得高達 60 分積分，歡迎大家踴躍投稿。

■徵稿說明

- 1.凡有針對產業環境管理之研究或實務經驗、個案介紹、技術新知等撰述稿均極歡迎。
- 2.稿件請勿一稿兩投，每篇請勿超過兩萬字(含圖表)，請附中文摘要(300 字以內)，並附關鍵字。一經採用酌酬稿費，其版權即歸本刊所有。來稿限未在其他刊物發表過之文稿。
- 3.來稿請附真實姓名、服務單位、地址及電話，以利聯絡並對讀者負責。(文稿電子檔請逕寄至工業污染防治季刊編輯組)
- 4.本刊對來稿有刪改權，不採用恕不退稿，如需退稿或不願意被刪改，請在來稿中註明。
- 5.來稿請寄「工業污染防治」季刊編輯組信箱：xing@ftis.org.tw，並請將「**著作權讓渡同意書**」一併回傳。
- 6.通訊地址：台北市大安區四維路 198 巷 39 弄 14 號 1 樓，財團法人台灣產業服務基金會，凡需詢問本刊相關事宜，請電(02)2325-5223 轉 403「工業污染防治」季刊編輯組。

■編寫說明

- 1.章節編寫系統請如右例：一、

1.1
1.1.1
1.
(1)

- 2.圖表序號請按照文中順序，圖表需清晰，說明文字請採用中文，編號如表 1，表 2，圖 1，圖 2 等。
- 3.翻譯名詞採用易通易懂者，首次出現請附原文，如沉澱(sedimentation)
- 4.原文名詞為首字一般不必大寫，如活性污泥法(activated sludge process)
- 5.一般通用之縮寫文字不必加點，如 BOD、SS 等(不必寫成 S.S)
- 6.採用公制單位，如 mg/L、m/d、kg/m³、d、m、min、°C 等。
- 7.文句中之數字採用阿拉伯數字，如八十八年請寫成 88 年，可量化數字每超過三位數請以逗點區隔，如 1,250。
- 8.文句簡明，用字通俗即可，請儘可能避免如“的”、“之”混用情形。
- 9.請用直式 A4 大小由左至右書寫電子檔，圖片請掃描入電子檔。

■參考文獻

※文中引用文獻，請註明參考資料出處，並加註編號，例如：.....依據資料顯示^[1]，造成污泥膨化之原因生物，大致上有 *Sphaerotilus natans*, *Bacillus*, *Thiothrix*, *Escherichia*, *Beggiatoa*, *Geotrichum candidum*, 絲狀增殖酵母及其他絲狀微生物，..... 活性污泥膨化之原因大致上有：菌種變異、有機負荷及食微比不當、營養劑不足、負荷突變及曝氣流型不良等因素^[2].....。

參考文獻

- 1.陳國城，廢水生物處理學，國立編譯館主編，茂昌圖書有限公司印行，p.52~55，1991。
- 2.張訓中，活性污泥鬆化現象及其控制，工業污染防治，第 13 期，p.169~176，1985。

※參考資料之書寫順序如下：

期 刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月或年。
書 籍：作者，篇名，出處，頁數，年月或年。
研 討 會：篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。
機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，頁數，年月或年。

著作權讓渡同意書

作 者：_____

題 目：_____

作者通訊處：_____

一、保證本篇文章除本次投稿於工業污染防治期刊外，相同內容未投國內外其他有版權之期刊；如 有上述情形願抽回本文。

二、同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，讓渡給經濟部工業局，財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部工業局計畫，有重新製作並將本篇文章置於該會所屬網站及刊物等刊載供外界查詢之權利，但須註明本文章作者。作者保留引用文章在自己的著作的權力。如爾後有版權、著作權等之法律紛爭，文責由作者自負。

此 致

財團法人台灣產業服務基金會

作者：_____簽章

年 月 日

