

# 應用台灣 TIMES 模型評估我國能源密集度下降可行性

郭瑾瑋<sup>1</sup>、周裕豐<sup>2</sup>、劉子衡<sup>3</sup>

## 摘要

能源是國家經濟發展的命脈，然而台灣地區能源蘊藏量相當有限，幾乎全需仰賴進口，2011 年進口能源依存度高達 99.2%。因此，如何透過各種政策手段來穩定能源供應及滿足經濟成長下的能源需求，並抑制二氧化碳排放量的驟增，為我國長期能源政策發展的重要目標。2008 年政府核定「永續能源政策綱領」，確定我國永續能源發展目標為提高能源效率、發展潔淨能源及確保能源供應穩定，並提出在未來 8 年每年提高能源效率 2% 以上，使能源密集度於 2015 年較 2005 年下降 20% 以上；並藉由技術突破及配套措施，2025 年下降 50% 以上。

能源密集度指標(油當量/元)代表國家或部門層級每單位 GDP 所需消耗之能源，常被用來比較各國或各部門的能源使用效率，甚至其節能成果。為瞭解國內能源密集度下降目標達成的可行性，本研究將應用台灣 TIMES 模型評估國內能源效率提昇措施的節能效果，以作為相關部會節能政策研擬的參考。由於計算能源密集度指標時必須利用 GDP 與最終能源消費量，本研究結合 TIMES 能源工程模型與 TaiSEND 總體經濟模型，透過 TaiSEND 模型評估我國至 2050 年的 GDP、產業結構變動及工業部門能源服務需求，並利用系統動態模型與時間序列方法估算我國住宅、服務業及運輸部門至 2050 年能源服務需求，爾後以 TIMES 模型評估技術面效率提昇對最終能源消費量及能源密集度下降的影響。

本研究情境設計參照國內外節能減碳策略，探討不同技術發展策略情境(技術凍結情境及技術發展情境)下，我國至 2050 年能源密集度下降趨勢。評估結果顯示，在技術凍結情境下，我國能源密集度至 2015 年與 2025 年將分別降為 7.7 公升油當量/千元與 6.47 公升油當量/千元，年平均下降為 1.89% 與 1.78%，與 2005 年能源密集度 9.6 公升油當量/千元相較，則分別下降 20% 與 33%，未能達成我國能源密集度下降目標。而在技術發展情境下，我國能源密集度至 2015 年與 2025 年將分別降為 7.23 公升油當量/千元與 5.50 公升油當量/千元，年平均下降為 3.10% 與 2.83%，與 2005 年能源密集度 9.6 公升油當量/千元相較，則分別下降 25% 與 43%，顯示技術效率發展情境下，可望達成我國能源密集度每年下降 2% 的目標，惟 2050 年若需較 2005 年下降 50%，則新技術市場滲透率與效率提昇需更進一步提昇。

**關鍵字：**能源密集度、能源工程模型、二氧化碳排放減量

---

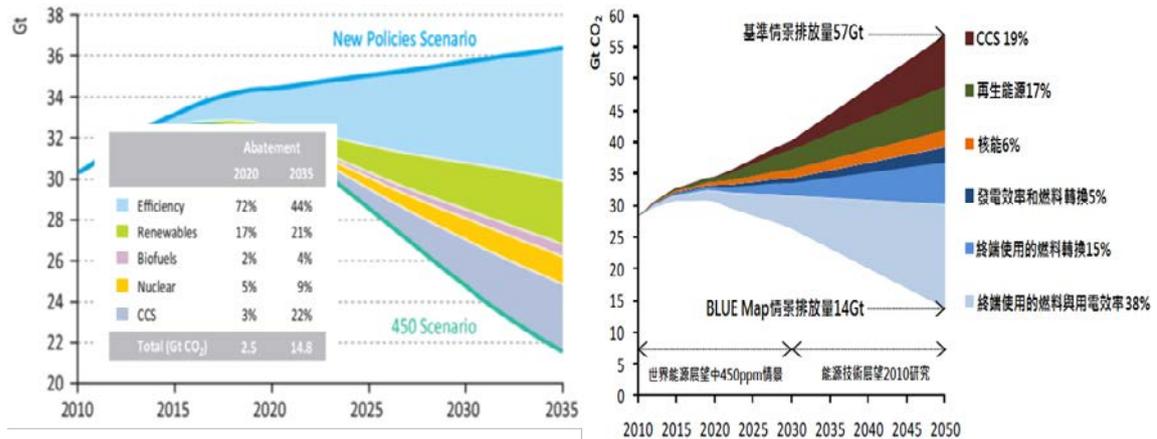
<sup>1</sup> 工研院綠能與環境研究所 管理師

<sup>2</sup> 工研院綠能與環境研究所 研究員

<sup>3</sup> 工研院綠能與環境研究所 正研究員

## 一、前言

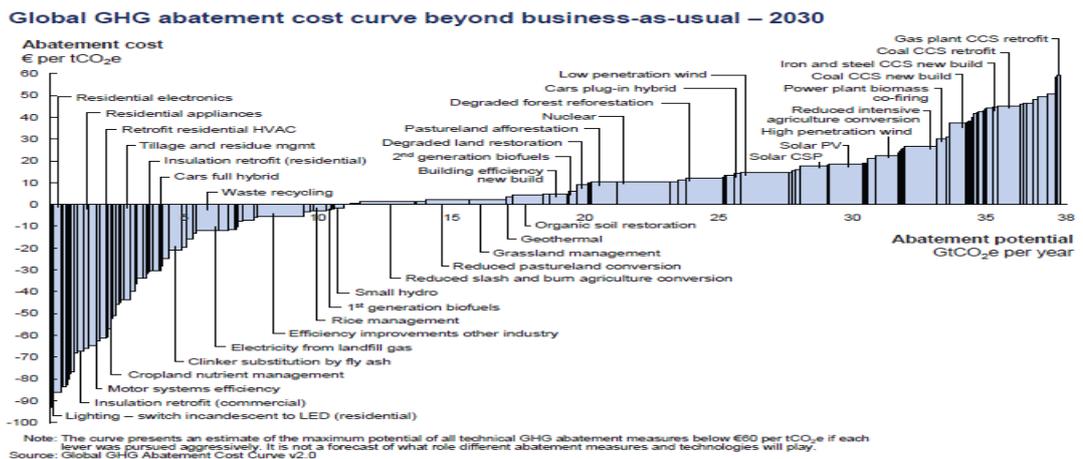
國際能源總署(IEA)2010年能源技術展望報告指出，若要達成全球2050年排放量回到2005年的50%水準(BLUE情境)，最主要的減量貢獻將源自於能源效率提昇，減量貢獻比達43%，而在2011年世界能源展望評估報告，全球大氣中溫室氣體濃度維持在450ppm情境下，提昇能源效率減量貢獻在2020年高達72%，顯示提升能源效率為短期內最有效的節能減碳措施。



資料來源：IEA, Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050, 2010; IEA, World Energy Outlook 2011.

圖 1 能源效率減量貢獻

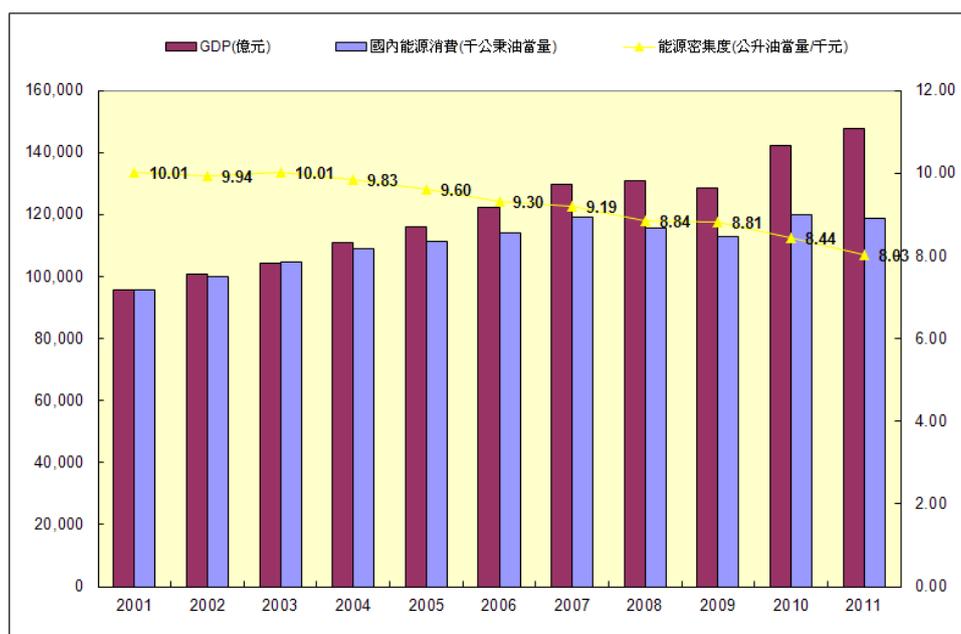
若比較各減量策略之減碳成本，依麥肯錫 2009 年全球減量成本曲線評估結果(圖 2)，各部門能源效率提昇措施多屬無悔策略(減碳成本為負)，顯見提昇能源效率不僅是最快捷有效的措施，亦是最具減碳效益的手段，對降低國家總節能減碳成本攸關最重大。



資料來源：Mckinsey, Pathways to a Low-Carbon Economy-Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2009.

圖 2 麥肯錫全球減量情境下之減量成本曲線

國際通用之能源效率指標可分為二大類:(1)總體能源及經濟指標—能源密集度(油當量/元)或能源生產力(元/油當量)，代表國家或部門層級-以每單位 GDP 所需消耗之能源表示；(2)個別效率指標—單位產品耗能值、熱力學效率值，代表部門別及產業別、製程及設備效率層級。其中，能源密集度指標常被用來比較各國的或各經濟部門的能源使用效率，甚至其節能的成果。圖 3 為我國 2001~2011 年經濟成長與最終能源消費成長趨勢，近十年能源消費年平均成長率為 2.17%，GDP 年平均成長率為 4.44%，能源密集度年平均下降 2.18%，顯示我國 GDP 與能源消費已逐漸脫鉤。



資料來源：能源統計月報(2012.05)，國民所得摘要(2012.05)，本研究整理。

圖 3 我國能源密集度下降趨勢

表 1 為我國 2006 年至 2011 年部門別能源密集度趨勢，2011 年全國能源密集度為 8.03(公升油當量/千元)，較前一年下降 4.8%。若以部門別進行比較，服務部門能源密集度 3.04(公升油當量/千元)為最佳，農林漁牧業能源密集度 5.27(公升油當量/千元)次之，工業能源密集度 13.92(公升油當量/千元)則最高。若與前一年相比較，我國整體能源密集度下降主要因為工業部門能源密集度下降 5.9%、服務業部門能源密集度下降 3.8%所致。僅管過去 5 年我國能源密集度年平均下降 2.9%，惟若與國際比較，依 2011 年 IEA/OECD 出版之能源統計指標，我國能源密集度為 178 公升油當量/千美元，雖較韓國(222 公升油當量/千美元)、美國(211 公升油當量/千美元)為佳，但相較日本(156 公升油當量/千美元)、新加坡(144 公升油當量/千美元)、英國(122 公升油當量/千美元)則仍有進步的空間。

鑑於能源效率為因應全球氣候變遷的關鍵策略，我國政府於 2008 年 6 月 5 日核定之「永續能源政策綱領」中，則明確指出我國永續能源發展目標，希望在未來 8 年每年提高能源效率 2% 以上，使能源密集度於 2015 年較 2005 年下降 20% 以上；並藉由技術突破及配套措施，2025 年下降 50% 以上。為協助國內相關部

會擬定具體節能減碳行動方案，並探討我國能源密集度下降可行性，本研究將應用台灣 TIMES 模型，評估技術效率提昇之效果及影響。

表 1 我國 2006-2011 年部門別能源密度變化

	95	96	97	98	99	100	99年成長率(%)	100年成長率(%)	95-100年平均成長率(%)
全國	9.30	9.19	8.85	8.81	8.44	8.03	-4.2%	-4.8%	-2.90%
全國(扣除進料)	8.17	7.85	7.51	7.37	7.01	6.89	-5%	-1.7%	-3.35%
農業部門	6.34	5.46	5.97	5.4	5.18	5.27	-4%	1.7%	-3.63%
工業部門	17.22	17.15	16.64	16.81	14.79	13.92	-12%	-5.9%	-4.17%
工業部門(扣除進料)	13.65	13.02	12.45	12.23	10.8	10.67	-12%	-1.2%	-4.81%
服務部門	3.62	3.4	3.27	3.23	3.16	3.04	-2%	-3.8%	-3.43%

註： 1. 能源密集度 = 能源消費量 / 實質 GDP。

2. 工業部門定義包含「能源統計月報」中工業部門+能源部門自用，目的為與主計處 GDP 行業分類做對應。

3. 服務部門定義包含運輸部門及服務業部門。

資料來源：能源消費量:能源統計月報，2012 年 1 月；主計處 2012 年 1 月。

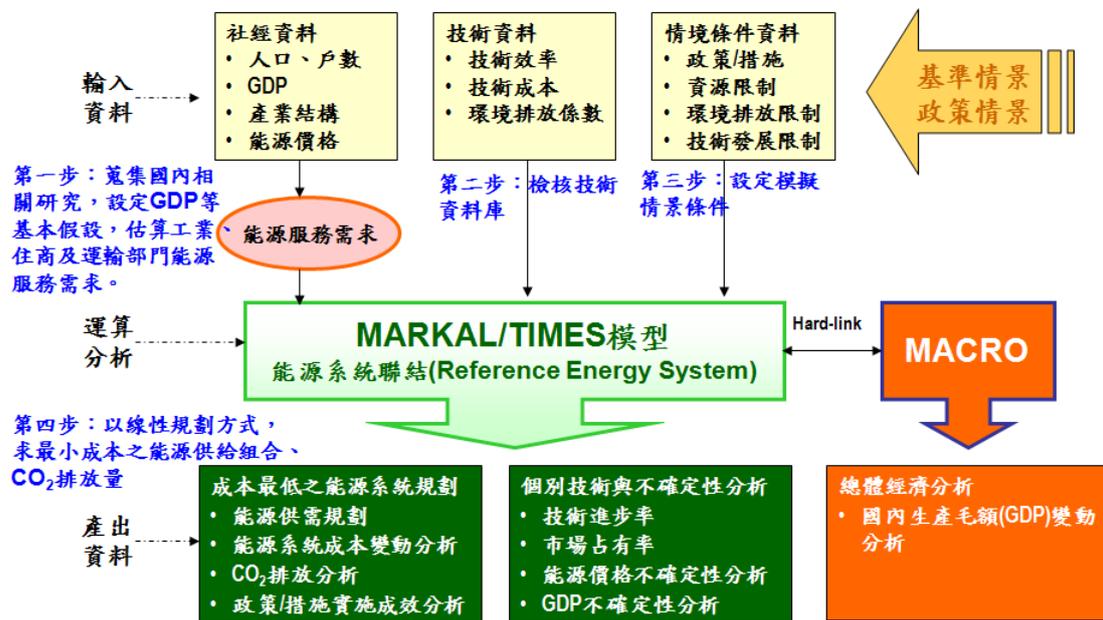
## 二、研究方法

為因應第一次能源危機，IEA 於 1976 年成立了多國共同合作的能源技術系統分析研究計劃(Energy Technology Systems Analysis Program, ETSAP)，此計劃主要目的在建立各會員國之能源系統分析能力，並成功開發 MARKAL 模型(MARKet Allocation)，初期 ETSAP 僅有 16 個 OECD 國家參加，但經過近三十年的發展，目前 MARKAL 模型已被 69 個國家、約 230 個機構廣泛使用。然隨著時間的演進，現實世界所需模擬的議題日趨複雜，MARKAL 模型既有功能尚有些考量不周全之處，因此 ESTAP 於 ANNEX VI(1996-1998)期間開始發展 TIMES 模型，於 ANNEX VII(1999-2001)期間完成此模型之驗證與應用。

TIMES 為 The Integrated MARKAL-EFOM System 的縮寫，表示其為 MARKAL 與 EFOM(Energy Flow Optimization Model)兩模型之結合，其中 EFOM 亦為能源工程模型，主要用於歐洲各國，其特點在於具彈性的投入與產出機制，因此 TIMES 模型比 MARKAL 模型在投入與產出關係之設定上更具彈性。本研究應用之 TIMES 模型，為工研院在能源局計畫支持下所引進發展之能源工程模型。工研院於 1993 年建立「台灣 MARKAL 能源工程模型」，1994 年開發完成「台灣 MARKAL-MACRO 能源經濟模型」，而為提昇分析能力，自 2007 年開始積極引進 TIMES 模型，並於 2010 年完成台灣 TIMES 模型本土化資料庫的建置。

TIMES 模型和 MARKAL 模型的基本架構相似(bottom-up model)，均具備豐富能源技術資料，將複雜的能源系統(全國、地區或部門)以線性規劃模式展現。模型為部分均衡的能源最佳化模型、可考量多區域及外在環境與資源限制。模型的核心是以能源服務需求(外生變數)為驅動力，以線性規劃方法考慮能源系統發

展可能的情境與限制，在能源系統成本最小化目標下，規劃符合未來能源服務需求下之能源供需情形與能源系統技術組合，模型操作流程如圖 4 所示。



資料來源：工研院綠能所

圖 4 台灣 MARKAL/TIMES 模型操作流程

台灣TIMES模型較MARKAL模型新增之功能為(1)可變時間期程(Time Periods)長度，MARKAL模型受限於只能設定固定的Time Periods長度，故台灣MARKAL模型是以5年為一期，但TIMES允許使用者自行定義長度，在規劃初期，欲模擬短期的因應策略，可以設定以每1年為1期，而規劃期間之中長期，則可以設定較長的時間長度(如5年為一期)，目前台灣TIMES模型技術資料庫2005年至2030年設為1年1期，2035年至2050年則設為5年1期；(2)時間劃分(Timeslice)更細緻，MARKAL模型只有電力與低溫熱能設定Timeslice level，但在TIMES模型中所有的能源商品及製程都可以設定Timeslice level。此外，MARKAL Timeslice數量限制為電力6個，熱3個，但TIMES對時間的劃分更細緻，可分四季、並新增週末與一般日的劃分機制，每日分割上更可細分至每小時。目前台灣TIMES模型共設定為12個Timeslice level；(3)可考量技術之Vintage機制，MARKAL模型技術參數與該技術所使用的年限為相互獨立，TIMES模型則新增vintage機制；(4)TIMES模型中投入與產出之比例設定更具有彈性，並簡化許多設定步驟，可精確表示各種不同類型的製程及燃料間的轉換；(5)TIMES模型新增區域指標、可區隔資料年與分析年、考量設置的建造時期與除役時期及其成本，且對投資成本有更精確考量、允許汰舊換新、區分技術服務年限與經濟年限、增加污染物排放的相關資料等。目前台灣TIMES模型資料庫共分三大類技術：轉換技術(63項)、處理技術(75項)及需求技術(256項)，該三大類技術同時又涵蓋工程、經濟及環境等三種技術參數(≥36,000個)，技術分類如表2所示。

表 2 台灣 TIMES 模型技術分類

分類	技術內容(2011)
轉換技術	燃煤汽力機、燃氣汽力機、燃油汽力機、複循環機組、核能、水力發電、鋼鐵業汽電共生等，合計63個技術項目。
處理技術	煉焦、煉油、脫硫、去氮、煤炭氣化、天然氣液化、生質能氣化、空氣污染防治技術等，合計75個技術項目。
工業部門需求技術	涵蓋鋼鐵業、水泥業、造紙業、石化業、紡織業、電子業等六大產業，及鍋爐、製程熱、動力等三大共通性需求，合計17個能源服務需求項目，相對應之技術項目共計103個技術項目。
住商部門需求技術	涵蓋烹調、住商熱水、住商空調、住商照明、冰箱、住商其他用電與其他燃料等11項能源服務分類，而相對應之需求技術選項合計88項。
運輸部門需求技術	涵蓋機車、小客車、大小貨車、大客車、軌道運輸、船舶、航空等能源服務需求項目，合計12個能源服務需求項目，相對應之需求技術項目合計65個。

資料來源：台灣 TIMES 模型

### 三、假設條件與情境設計

在進行能源密集度下降可行性評估分析前，依能源工程模型的操作程序(如圖 4)，首先必須完成情境之假設條件設定，包括：實質經濟成長率預測、人口數及戶數成長預測、產業結構演變趨勢、電力需求預測及國際能源價格。而這些假設條件的設定，均來自於各專業研究機構或學術單位運用不同的專業預測模型、產業發展趨勢及判斷等所估算而來，以下茲詳述假設條件與情境設計：

#### (一) 假設條件

##### 1. 實質經濟成長預測

實績值係依據主計處公布之國民所得資料(2006 年幣值)，2010 年至 2050 年的國內生產毛額係依據清大 TaiSEND 模型<sup>4</sup>所推估的經濟成長率，2011 至 2015 年年平均成長率為 4.69%、2016 至 2020 年年平均成長率為 3.97%、2021 至 2025 年年平均成長率為 3.51%、2026 年至 2030 年年平均成長率為 3.11%、2031 年至 2035 年年平均成長率為 2.75%、2036 年至 2040 年年平均成長率為 2.60%、2041 年至 2045 年年平均成長率為 2.45%、2046 年至 2050 年年平均成長率為 2.37%。

<sup>4</sup>清大永續發展研究室 TaiSEND 模型估算，2010 年 11 月。

年別	GDP 成長率
2011-2015	4.69%
2016-2020	3.97%
2021-2025	3.51%
2026-2030	3.11%
2031-2035	2.75%
2036-2040	2.60%
2041-2045	2.45%
2046-2050	2.37%

資料來源：清華大學黃宗煌教授 TaiSEND 模型，2010。

## 2. 人口數及戶數成長預測

人口數實績值係依據主計處「臺灣地區經社觀察表」，戶數實績值則依據主計處統計資料。而未來人口數預測值係依據經建會公佈之「2010 年至 2060 年臺灣人口推計-中推計」，未來戶數成長率則參考清大永續發展研究室利用 State Space 模型之推估值，在考量人口成長率逐年降低下，戶數年平均成長率亦逐年降低。2011 年~2025 年人口平均年成長率為 0.07%，戶數平均年成長率為 1.41%。

	人口成長率	戶數成長率
2011-2015	0.15%	1.63%
2016-2020	0.06%	1.41%
2021-2025	-0.02%	1.23%
2026-2030	-0.12%	0.41%
2031-2035	-0.27%	0.41%
2036-2040	-0.45%	0.41%
2041-2045	-0.64%	0.41%
2046-2050	-0.84%	0.41%

資料來源：

1. 經濟建設委員會，2010 年至 2060 年臺灣人口推計-中推計，2010 年。
2. 戶數成長率引用清大永續發展研究室 State Space 模型估計值，2009 年。

## 3. 產業結構演變趨勢

產業結構主要係依據 TaiSEND 模型「內生求解」的各行業附加價值為衡量標準。台灣近幾年來產業結構發展趨勢，農業部門的比重不斷降低，至 2010 年其生產毛額占實質 GDP 的比重為 1.32%，依據 TaiSEND 模型之推估結果，農業部門至 2050 年生產毛額占實質 GDP 的比重持續下降，僅 0.77%；工業部門 2010 年生產毛額占實質 GDP 的比重為 34.78%，至 2050 年其生產毛額占實質 GDP 的比重降至 22.63%；至於服務業的比重則不斷攀升，2010 年其生產毛額占實質 GDP 的比重為 63.92%，預測至 2050 年其生產毛額占實質 GDP 的比重將上升至 76.6%，顯示我國產業結構的發展最終仍舊以服務業為主力。

年	農業	工業	服務業
2015	1.37%	29.91%	68.72%
2020	1.28%	30.01%	68.71%
2025	1.21%	29.22%	69.57%
2030	1.09%	27.64%	71.27%
2035	1.00%	26.00%	73.00%
2040	0.90%	24.31%	74.79%
2045	0.84%	23.66%	75.50%
2050	0.77%	22.63%	76.60%

資料來源：清華大學黃宗煌教授 TaiSEND 模型，2010。

#### 4. 能源價格預測

我國能源超過 99% 仰賴進口，因此國內能源價格受國際能源價格影響很大。未來能源價格為模型重要參數，係依據目前國內進口能源價格與美國能源部對於未來各項進口能源價格預測資料，並考量能源進口來源特性，估計各項能源價格。其中原油、燃料煤與原料煤等能源價格預測值是以國內海關進口價格與美國能源部(AEO2011)能源價格迴歸估計而得。天然氣預測價格則是以國內原油進口價格與液化天然氣價格迴歸估計而得。

	原油	燃料煤	原料煤	液化天然氣
	(NT\$2009/桶)	(NT\$2009/公噸)	(NT\$2009/公噸)	(NT\$2009/M <sup>3</sup> )
2015	2,538	3,007	6,400	12.5
2020	2,884	3,067	6,476	13.8
2025	3,139	3,113	6,603	16.4
2030	3,285	3,116	6,705	17.8
2035	3,323	3,199	6,983	23.2
2040	3,573	3,162	7,059	30.8
2045	3,841	3,127	7,135	39.9
2050	4,130	3,091	7,213	53.3
2055	4,419	3,055	7,291	66.7

說明：各能源價格預測值是以國內海關進口價格與美國能源部(AEO2011)能源價格及 OECD 國家能源平均進口價格迴歸估計而得。

相關迴歸式如下所示：

我國原油進口價格 =  $0.97778 \times \text{AEO 原油價格}$   $R^2=0.9932$

我國煤進口價格 =  $-30.3345 + 3.844206 \times \text{AEO 煤價格} + 0.296183 \times \text{OECD 國家平均煤進口價格}$   
 $R^2=0.9863$

我國天然氣進口價格 =  $(0.542442) \times \text{AEO 天然氣價格}$   $R^2=0.9632$

#### (二) 能源服務需求推估

台灣 TIMES 模型係在滿足能源服務需求量下，以最小成本進行能源供需系統規劃。因此，能源服務需求為整個 TIMES 模型重要的外生參數，亦為模型規劃未來長期能源發展之驅動力。在進行長期能源發展的情景規劃前，首要步驟便是進行能源服務需求的推估。

能源服務需求的定義係指對能源服務之需求，亦即為能源所能提供之服務。在 TIMES 模型中，將能源服務需求區分為三大部門：工業部門、住宅與服務業部門及運輸部門(如表 3)。各部門所需的能源服務需求來自於煤炭、石油、天然氣、水力、核能及再生能源等各種初級能源，經過不同的處理及轉換技術，以提供各部門內各分項行業或設備類別所需要的能源類別。以照明設備為例，消費者所需的為照度需求，並非實際的電力，所以照度需求為照明的能源服務需求，爾後再以 TIMES 模型提供的各項照明設備技術，去推估滿足未來照度需求下，所需要的電力需求，再藉由 TIMES 模型的轉換技術規劃出滿足照明需電量下的電力供應量與發電技術組合。由於能源系統龐大而複雜，所需的能源種類相當多，以能源服務需求取代能源需求量之優點在於可保持能源系統的彈性，讓各種能源技術間產生相互替代關係。

**表 3 TIMES 模型能源服務需求分類**

部門分類	能源服務需求分類
工業部門	鋼鐵業(含鋼胚與軋鋼)、水泥業、造紙業(含紙張與紙板)、石化業(含石化中間原料、塑橡膠原料、石化原料、化學製品、塑膠製品、紡織)、電子業(含半導體、液晶面板)、其他行業(含鍋爐、製程熱、動力)及非能源使用
住宅與服務業部門	烹調、住宅熱水、商用熱水、住宅空調、商用空調、住宅照明、商用照明、冰箱、其他家電、服務業電器、服務業其他能源需求
運輸部門	機車、小客車、大客車、小貨車、大貨車、航空、鐵路、客運船舶、貨運船舶、高鐵、捷運

資料來源：台灣 TIMES 模型。

因能源服務需求為整個 TIMES 模型重要的外生參數，亦為模型規劃未來長期能源發展之驅動力，以下茲分別說明工業部門、住宅與服務業部門及運輸部門之能源服務需求推估方式：

### (1) 工業部門能源服務需求

- 鋼鐵業與石化業依政策環評所估算之產出成長率，作為該行業之能源服務需求成長率。
- 水泥業、造紙業、電子業等其他行業則委由 TaiSEND 團隊採用時間序列模型推估未來能源服務需求(產量)成長率。
- 鍋爐、製程熱：以 GDP 與產業結構計算非資訊工業 GDP 成長率，作為鍋爐、製程熱之能源服務需求成長率。
- 動力：以台電公司(2010)所估算之工業電力用電成長率，作為動力之能

源服務需求成長率。

- 非能源使用：依據 GDP 成長率與產業結構計算工業 GDP 成長率，以此作為非能源使用之能源服務需求成長率。

## (2) 住宅與服務業部門能源服務需求

本研究運用系統動態模型以推估住宅與服務業部門能源服務需求(系統動態學為一種預測與規劃的模型工具)，在進行住宅與服務業部門能源服務需求規劃預測時，主要影響變數包括：經濟成長率、服務業用電、服務業 GDP、人口數、戶數、樓地板面積、旅館住宿人數、醫院住院人數及大專就學人數等。各項住宅與服務業部門能源服務需求推估方式如下：

- 烹調及熱水：主要影響變數為人口數及 GDP 成長率，因此在人口數成長率逐年降低影響下，烹調能源服務需求年平均成長率亦逐年降低。
- 住宅空調：住宅空調能源服務需求主要由戶數成長驅動冷氣機數量之增加，在戶數的成長率逐漸降低情況下，住宅空調能源服務需求成長率亦逐年降低。
- 商業空調：商業空調能源服務需求主要影響變數為人均 GDP 及服務業 GDP 占比，故其能源服務需求成長率與 GDP 及服務業結構占比變化趨勢相近。
- 住宅照明：住宅照明能源服務需求因人口數影響住宅存量成長率，故整體住宅照明需求成長率逐年下降。
- 商業照明：商業照明需求主要影響變數為人均 GDP 及服務業 GDP。
- 冰箱：以冷凍冷藏等效內容積需求成長率作為能源服務需求未來成長率，根據研究顯示冰箱的等效內容積成長率基本上由人口成長率主導，故其能源服務需求成長率與人口成長率變化趨勢相近。

## (3) 運輸部門能源服務需求

運輸部門能源服務需求分為城際運輸及都會運輸，其中城際運輸需求推估方法是以交通部運輸研究所「永續發展之城際運輸系統需求模式研究」推估的 2016 年、2026 年、2036 年城際客運需求和貨物運輸需求為基礎，再以 TaiSEND 模型推估之 GDP 及人口數進行調整，而都會運輸需求則利用時間序列方法進行能源服務需求預測。

## (三) 情境設計

檢視各國為了達成減量目標採行之能源密集度措施主要朝三個主軸：第一個

為技術減量，主要著重在各種排放部門之節約能源、提升能源效率等；其次為經濟手段，如執行經濟誘因措施或實施租稅制度(如能源稅、碳稅)；最後為改變社會體制，如改變生活型態、消費行為及產業結構等。由於 TIMES 模型為能源工程模型，不易評估經濟手段對能源需求之影響分析，且不易模擬行為面(需求面)的策略，因此本研究評估僅著重於技術面之能源效率提昇措施的影響效果。

在進行能源密集度下降可行性分析時，由於 TIMES 模型中 GDP 為外生變數，故產業結構調整或產業高值化等效果，已反應至 GDP 與產業結構等外生變數所推估之能源服務需求中，故模型情境設計是以技術凍結情境，先將 GDP 對能源密集度下降的影響效果分離出，再估算我國技術面能源效率提昇致使能源密集度下降的影響效果，表 4 為我國能源密集度下降可行性分析情境內容，各部門情境設計則參考國內外能源效率提昇措施，相關細節整理於表 5 至表 7。

表 4 我國能源密集度下降可行性評估之情境設計

部門別	技術凍結情境	技術發展情境
工業部門	技術維持在 2010 年水準	<ul style="list-style-type: none"> <li>單位產品耗能提昇：參考能源查核資單位產品耗能指標值及國際 BPT(Best Performance Technology)。</li> <li>改善製程、導入高效率技術。</li> </ul>
住宅與服務業部門	技術維持在 2010 年水準	<ul style="list-style-type: none"> <li>提昇能源效率基準：參考國內能源效率基準規劃。</li> <li>導入高效率化設備：參考工研院綠能所 2011 年技術專家建立之 MACC(Marginal Abatement Cost Curve)資料庫<sup>5</sup>。</li> </ul>
運輸部門	技術維持在 2010 年水準	<ul style="list-style-type: none"> <li>提昇新車效率標準：參考國際燃油效率現行標準。</li> <li>推動替代燃料車：參考國內智慧型車輛推動規劃。</li> <li>推廣大眾運輸工具。</li> </ul>

各部門技術面能源效率提昇措施情境設計，主要係參考國際各部門能源效率提昇措施及我國能源效率提昇政策，將各部門技術面之能源效率提昇措施整理如下：

#### (1) 工業

工業部門主要減量措施為採行最佳可行技術(BAT)或最佳操作技術(BPT)、推廣能源效率增加計畫(鼓勵設備汰舊換新)、單位產品耗能標準等。本研究各行業

<sup>5</sup> ITRI MACC 係由工研院“綠能所、機械所及材化所”近百位各技術領域專家，依長期執行國內先進節能技術開發計畫之經驗，並搭配本院能源查核團隊、節能推廣團隊等與廠商實際訪查經驗所建置之我國減量成本曲線。

技術發展情境主要係參考我國工業部門能源查核計畫過去單位產品耗能下降趨勢、大用戶年平均節能率及國際技術發展趨勢。TIMES 模型工業部門分類為鋼鐵業、軋鋼業、水泥業、半導體業、石化原料業-乙稀、其他化工製品業、造紙業、紡織業，及馬達、鍋爐、製程熱等共用設備，各行業/設備情境設計如表 5 所示。

表 5 工業部門技術發展情境

TIMES 模型 工業部門分類	技術發展情境
鋼鐵業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 國內鋼鐵業透過製程設備更換、設備能源效率提昇，初期依能源查核過去鋼鐵業單位產品耗能下降趨勢，即電弧爐煉鋼單位產品耗能年下降 1.36%，高爐年下降 0.3%；廠商分期達成能源查核單位產品耗能指標值，至後期單耗則提高至與全球 BPT 相符</li> </ul>
軋鋼業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 依能源查核大用戶申報統計，設軋鋼業未來節能率同過去九年基本金屬工業節能率，平均年節能 0.48%；此外廠商分期達成能源查核單位產品耗能指標值</li> </ul>
水泥業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水泥業既有廠依能源查核過去卜特蘭水泥單位產品耗能下降趨勢，單位產品耗能年下降 0.84%，而新設廠則符合能源查核單位產品耗能指標值，至後期單耗則提高至與全球 BPT 相符</li> <li>● 提高水淬爐石替代熟料的比例，至 2030 年較目前增加 20%</li> </ul>
半導體業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 依能源查核大用戶申報調查資料顯示，電機電子業過去九年平均年節能率為 2.04%；且電子半導體業平均 4 年一次新製程產生，單位產品耗能降低約 20%</li> </ul>
石化基本工業- 乙稀製程	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 依能源查核大用戶申報調查資料顯示，化工業過去九年平均年節能率為 1.09%；此外，2013 年後三輕更新完成，單位產品耗能由 8,850 Mcal/ton 降為 5,500 Mcal/ton</li> </ul>
紡織業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 依能源查核大用戶申報調查資料顯示，紡織業過去九年平均年節能率為 0.9%</li> </ul>
造紙業	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 依能源查核調查資料顯示，2005~2009 年紙張及紙板單位產品耗能年平均分別下降 0.73%與 1.19%；2020 年後引進國際先進技術，效率較台灣目前高約 13.6%~50%</li> </ul>
馬達	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 參考經濟部能源局 2008 年「高效率馬達推廣策略座談會」訂定之目標，導入高效率馬達，未來新設馬達全數採用高效率馬達，而既有設備則至 2025 年全面替換為高效率馬達</li> </ul>

鍋爐	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 導入高效率鍋爐(燃煤及燃氣鍋爐效率為 93%，燃油鍋爐效率為 90%)，未來新技術滲透率參考工研院 MACC 曲線，2011 年開始逐年滲透，至 2025 年全數鍋爐替換為高效率鍋爐</li> </ul>
其他	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 依能源查核大用戶申報調查資料顯示，整體製造業過去九年平均年節能率為 1.33%</li> </ul>

## (2) 住宅與服務業

住宅與服務部門主要減量措施為提昇能源效率基準、導入高效率化設備及建築外殼改善。TIMES 模型住宅與服務業部門分類為熱水、照明、空調、電冰箱、烹調及其他用電器具與燃料設備，各設備技術發展情境主要係實施 MEPS 與導入變頻機及高效率設備，各設備情境設計如表 6 所示。

表 6 住宅與服務業部門技術發展情境

TIMES 模型 住宅與服務業分類	技術發展情境
熱水	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 住宅熱水：依據燃氣熱水器節能標章，現行節能標章效率值為 82.5%，新修訂案為 83%，未來可能提高至 85%。假定新技術以每年 10% 的市場滲透率，10 年後完全取代既有技術</li> <li>● 商用熱水：商用熱水器效率提昇由目前 80%，提昇至 82%，熱泵熱水器市占率是由 2011 年的 5% 至 2030 年提昇至 25%，2050 年提昇至 50%</li> </ul>
照明	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 實施 MEPS，依螢光燈節能標章能源效率基準，搭配傳統式安定器效率提昇為 85 lm/W，搭配電子式安定器效率提昇為 88.5 lm/W；省電燈泡 2010 年依照現行法規安定器內藏式螢光燈泡能源效率基準(98 年 8 月公告)</li> <li>● 導入 T5 螢光燈及 LED 燈，LED 燈技術效率 2015-2020 年則依 IEA(2006)技術效率趨勢</li> <li>● 假定各項新技術以每年 10% 的市場滲透率取代既有技術，10 年後完全取代既有技術，且 T5 螢光燈及 LED 燈至 2030 年市占率分別達 6 成及 2 成以上</li> </ul>
空調	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 實施 MEPS，窗型及分離式冷氣機依 2011 年及 2016 年依照現行法規無風管冷氣機能源效率基準(於民國 100 年及 105 年實施)，之後逐期提高能效基準，但因技術理論限制，COP 最高達 3.85；箱型冷氣高效率值則以能源效率分級標示制度代表</li> <li>● 導入變頻空調，變頻機依空調機季節性能源效率為基礎，以現行 COP 管制值乘 1.35 估算；中央空調則導入</li> </ul>

	高效率水冷變頻螺旋式及離心式冰水機，IPLV 達 7.0 ● 以上各項新技術以每年 10%的市場滲透率取代既有技術，10 年後完全取代既有技術
電冰箱	● 市場導入新技術，其效率依經濟部能源局公告電冰箱能源因數值標準 (MEPS) 與 節能標章- 實施日期 2011.01.01，新技術以每年 10%的市場滲透率取代既有技術，10 年後完全取代既有技術
烹調	● 市場導入新技術，其效率依經濟部能源局公告燃氣台爐節能標章- 實施日期 2011.09.26，新技術以每年 10%的市場滲透率取代既有技術，10 年後完全取代既有技術
其他用電器具	● 住商部門其他用電器具及其他燃料設備，假定技術效率每年自發性提昇 0.4%/年

### (3) 運輸

運輸部門主要減量措施為提高車輛能源效率、增加低碳燃料使用占比及鼓勵使用大眾運輸，而降低車輛運輸耗能短期解決方案則以提昇車輛能源使用效率為優先(具成本有效性)。TIMES 模型運輸部門分類為小客車、小貨車、大貨車、大客車、機車、軌道運輸、航空及船舶，各運具技術發展情境主要係依據全國能源會議「提升汽、機車新車耗能標準，至 2015 年提高 15%~30%」之結論，並參考國際車輛能效標準及國際運輸技術發展趨勢，各運具情境設計如表 7 所示。

表 7 運輸部門技術發展情境

TIMES 模型 運輸部門分類	技術發展情境
小客車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 為落實 2009 年全國能源會議「提升汽、機車新車耗能標準，至 2015 年提高 15%~30%」之結論，2009 年修訂之「車輛容許耗用能源標準」，小客車油耗標準已提昇 10%，假設 2015 年小客車能效標準將較 2008 年前提昇 40%，且未來新技術將以每年 10%的市場滲透率取代既有技術</li> <li>● 為推廣生質柴油，2011 年起實施 B2 政策，2016 年起提昇為 B5</li> <li>● xEV 車亦逐年進入市場，至 2030 年市占率達五成</li> </ul>
小貨車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 2009 年修訂之「車輛容許耗用能源標準」，小貨車油耗標準已提昇 10%，假設 2015 年小貨車能效標準將較 2008 年前提昇 40%，且未來新技術將以每年 10%的市場滲透率取代既有技術；</li> <li>● 為推廣生質柴油，2011 年起實施 B2 政策，2016 年起提</li> </ul>

	<p>昇為 B5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● HEV 車及 BEV 車亦逐年進入市場，至 2030 年市占率達五成。</li> </ul>
大貨車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 因國內目前尚未針對重型車輛訂定車輛能效標準，故參考能源局能技組「國家節能減碳總行動方案」100 年度工作計畫提報資料，短期節能 10% 為目標，假設 2011 年起大貨車能效標準將較目前平均效率提昇 10%，新技術以每年 10% 的市場滲透率取代既有技術</li> <li>● 推廣生質柴油，2011 年起實施 B2 政策，2016 年起提昇為 B5</li> </ul>
大客車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 假設 2011 年起大客車能效標準將較目前平均效率提昇 10%，新技術以每年 10% 的市場滲透率取代既有技術；</li> <li>● 推廣生質柴油，2011 年起實施 B2 政策，2016 年起提昇為 B5</li> </ul>
機車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 為落實 2009 年全國能源會議「提升汽、機車新車耗能標準，至 2015 年提高 15%~30%」之結論，2009 年修訂之「車輛容許耗用能源標準」，機車油耗標準已提昇 5%，假設 2016 年機車能效標準將較 2008 年前提昇 30%</li> <li>● 推廣電動機車，至 2012 年達工業局目標 16 萬台</li> </ul>
軌道運輸	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 至 2050 年小客車運量有 10% 移轉至大眾運輸工具 (與日本低碳社會目標同)，其中以台鐵及高鐵替代客車-長程運輸需求；以捷運-替代短程運輸需求</li> </ul>
航空	<ul style="list-style-type: none"> <li>● IPCC 預估解除飛行管制的限制，獲得 6~12% 的燃油節省量，而增加運載率、降低飛機重量與飛行阻力、使用最佳飛行速率、減少使用飛機輔助動力系統與滑行時間等措施，可降低 2~6% 燃油用量。因此，假設航空器具未來設備效率可提昇 10%，每年逐步滲透，至 2030 年新技術市場滲透率達 20%</li> </ul>
船舶	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 船舶若採用小型蒸汽動力循環作為柴油機廢熱回收系統，約可節省 10% 總能源消費量。此外，在船艙加裝翼板、改良漁船線型減低船舶阻力以及運用奈米塗料，可減少船舶阻力 13%，也可減少興波阻力 3.3%。依本計畫 98 年召開之運輸座談會資料，未來般船效率可提高 10%，新技術市場滲透率至 2030 年為 20%</li> </ul>

表 8 為綜合前述工業部門、住宅與服務業部門及運輸部門技術發展情境主要行業及設備之重要參數設定。

表 8 技術發展情境主要行業及設備之重要參數設定

別 部門	行業/設備	比較基準	新技術	新技術進入市場時程	新技術年滲透率假設
工業部門	鋼鐵業	2010 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=101.36</li> <li>• 效率=111.39</li> <li>• 效率=116.76</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2011</li> <li>• 2015</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 10\%</math></li> </ul>
	半導體業	2010 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=102.04</li> <li>• 效率=120</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2015</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 未設定</li> </ul>
	石化基本工業-乙稀製程	2010 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=101.09</li> <li>• 效率=111.76</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2013</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 未設定</li> </ul>
	造紙業	2010 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=101.19</li> <li>• 效率=113.6</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2020</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 未設定</li> </ul>
住宅與服務業部門	熱水	2010 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=103.1</li> <li>• 效率=111.3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2020</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 未設定</li> </ul>
	照明	2010 年效率=100	FL <ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=111.6</li> <li>• 效率=127.2(T5)</li> </ul> LED <ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=139.8</li> <li>• 效率=146.9</li> </ul>	FL <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2011</li> </ul> LED <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2015</li> <li>• 2020</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 節能標章產品<math>\geq 10\%</math></li> <li>• LED 燈至 2030 年市占率達 2 成以上</li> </ul>
	空調	2010 年效率=100	小型空調 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=116.2(COP)</li> <li>• 效率=129.6(COP)</li> <li>• 效率=149.0(SEER)</li> </ul> 中央空調 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=123.8</li> <li>• 效率=133.3</li> </ul>	小型空調 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011 (COP)</li> <li>• 2016 (COP)</li> <li>• 2016 (SEER)</li> </ul> 中央空調 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2020</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 10\%</math></li> </ul>
運輸部門	小客車	2008 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=110</li> <li>• 效率=140</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2015</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 10\%</math></li> </ul>
	小貨車	2008 年效率=100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率=110</li> <li>• 效率=140</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2011</li> <li>• 2015</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq 10\%</math></li> </ul>

## 四、台灣能源密集度下降可行性評估結果

### (一) 初級能源供應量變化

2010 年我國能源供給量為 145,561 千公秉油當量，其中石油比重達 49%，其次煤炭占 32.09%、天然氣(含液化天然氣)為 10.16%、核能發電 8.28%，慣常水力發電占比亦下降至 0.28%，新能源之能源供給量占比僅 0.07%。依據我國再生能源與天然氣發展目標，在技術凍結情境中，2030 年我國初級能源供給規劃至 2030 年成長為 203.75 百萬公秉油當量，在技術發展情境中，2030 年級能源供給成長為 178.23 百萬公秉油當量，相較技術凍結情境減少 12.5%，其中又以煤炭為主要減少能源類別，占總減量的 75%。

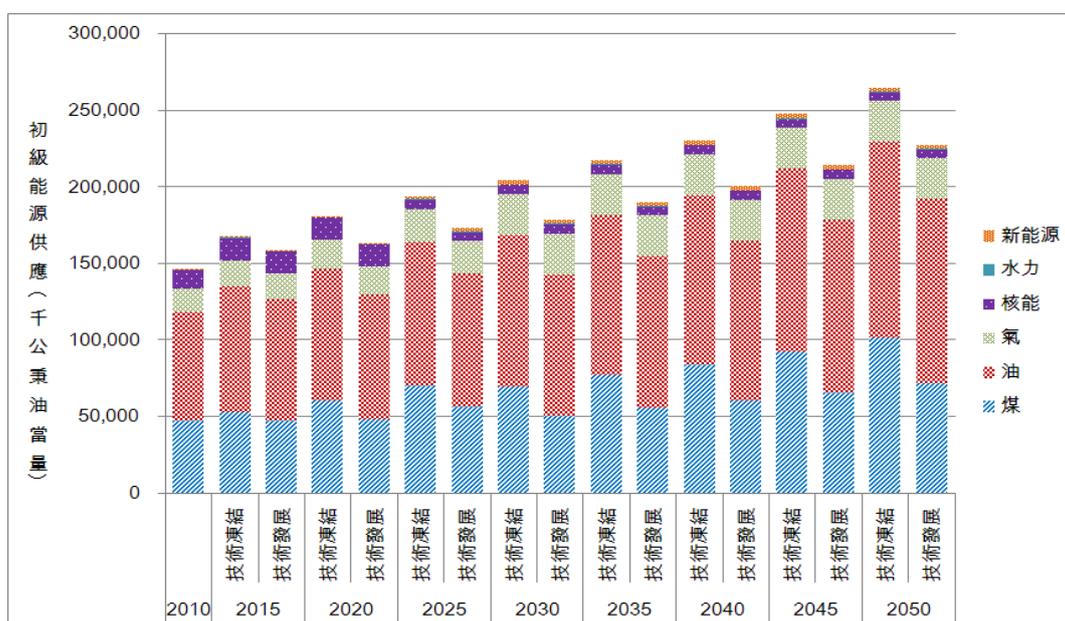


圖 5 我國初級能源供應變化

### (二) 最終能源消費量變化

2010 年我國最終能源消費量為 111,926 千公秉油當量，其中電力占 48.01%、石油產品占 41.45%、煤及煤製品占 8.02%、天然氣(含液化天然氣)占 2.11%、太陽熱能占 0.41%。在配合我國未來經濟的穩定發展，在技術凍結情境下，未來最終能源需求呈逐漸成長趨勢，至 2020 年為 144.6 百萬公秉油當量，2025 年為 158.1 百萬公秉油當量，2030 年為 172.8 百萬公秉油當量，2010 年至 2030 年年平均成長率為 2.2%。在技術發展情境下，未來最終能源需求至 2020 年為 126.4 百萬公秉油當量，2025 年為 134.5 百萬公秉油當量，2030 年為 142.6 百萬公秉油當量，2010 年至 2030 年年平均成長率為 1.2%。

技術發展情境相較技術凍結情境 2030 年最終能源消費量減少 17.5%，其中又以電力為主要減少能源類別，占總減量的 60%，其次為石油產品占 35%、煤炭占 4.1%、天然氣占 1.8%。

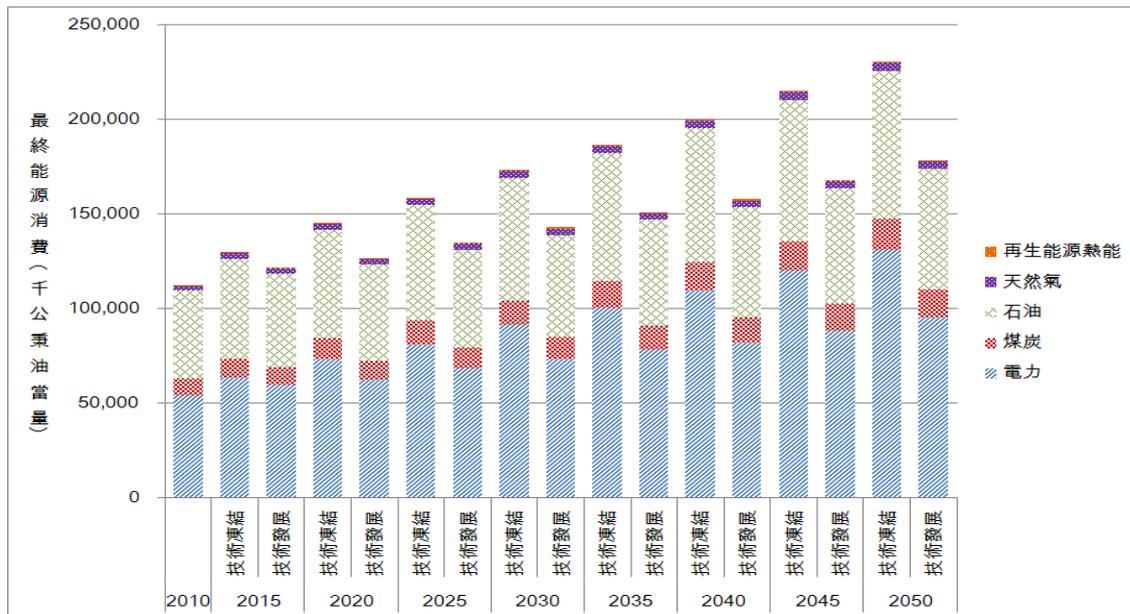


圖 6 我國最終能源消費變化

### (三) 部門別能源消費量變化

比較各部門技術凍結情境與技術發展情境之最終能源消費量變化，各部門節能潛力以工業部門、住宅與服務業部門最為顯著，2030 年分別占節能量的 39.8%、39.3%，而運輸部門節能占比約為 20.9%。

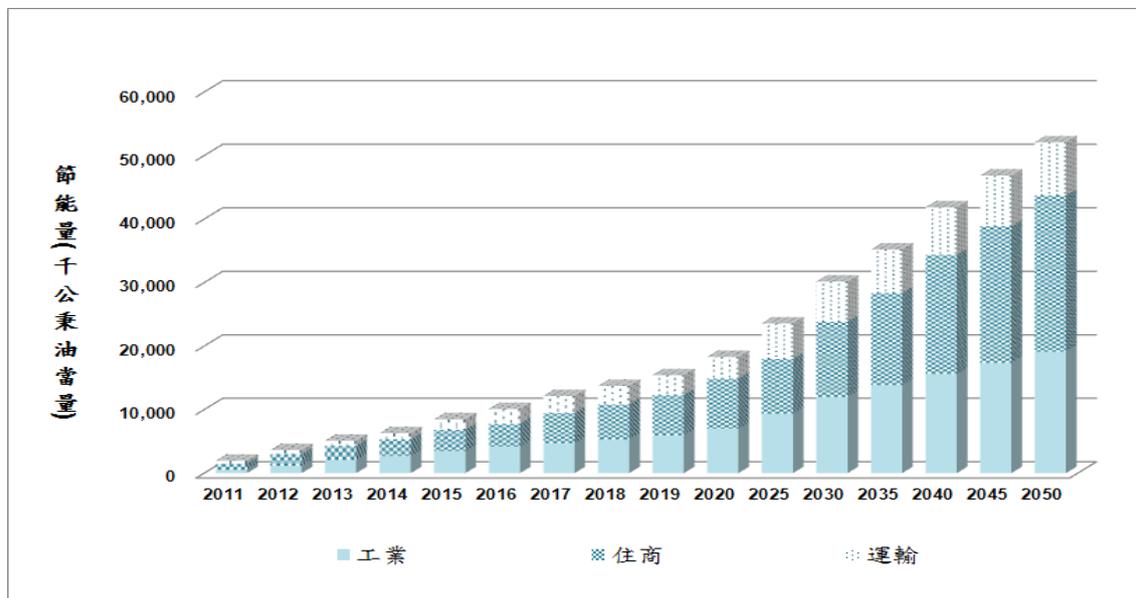


圖 7 我國部門別最終能源消費變化

工業部門節能措施為導入高效率設備與製程改善，預計至 2030 年節能量達 12,000 千公秉油當量。初期以石化原料業節能最為顯著，其因 2013 年三輕更新完成，節能貢獻比達 40%，其次為其他化工製品製造業，節能貢獻比約 20%。後期因半導體業 4 年新一代製程技術產生，節能潛力最為顯著。

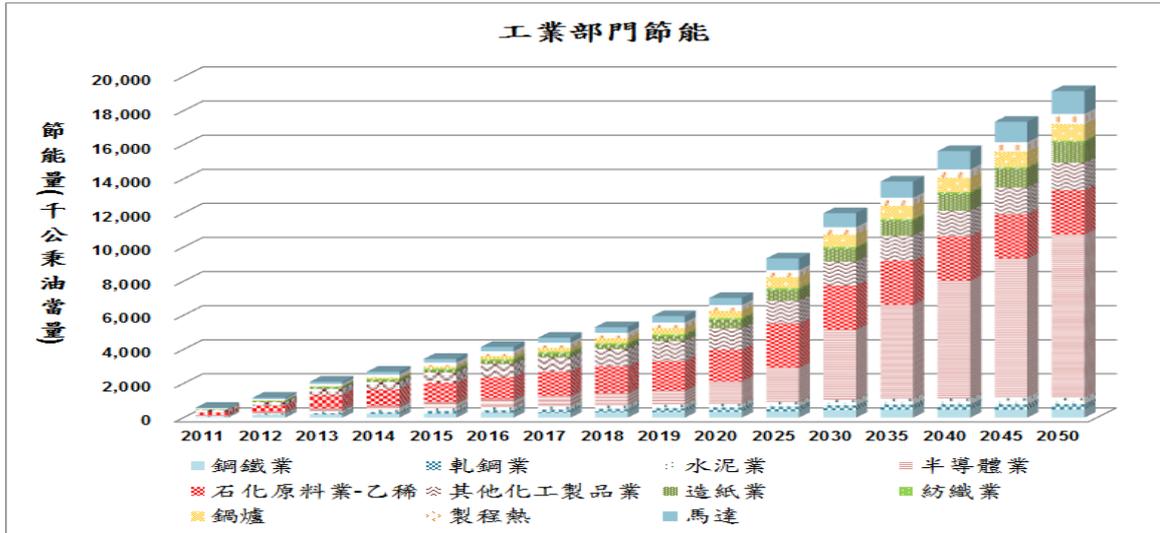


圖 8 工業部門最終能源消費結構變化

住宅與服務業部門節能措施為導入 MEPS 與高效率設備，由於 2020 及 2030 年因多數既有設備已全數汰換為高效率設備，故至 2030 年節能量明顯增加達 11,840 千公秉油當量，其中空調設備因變頻技術效率相較既有定頻效率提昇幅度大，且空調占整體住宅與服務業耗能最大，故節能占比亦是最為顯著，節能貢獻超過 60%，其次為照明，節能貢獻比約為 23%。

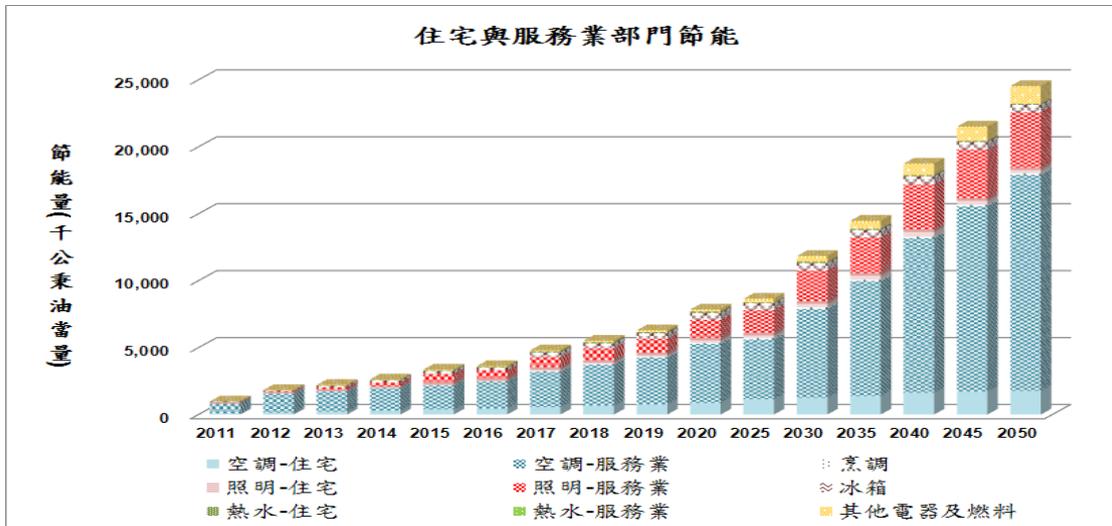


圖 9 住宅與服務業部門最終能源消費結構變化

運輸部門 2015 年及 2025 年因小客車、小貨車及機車車輛能效大幅提昇，且新技術完全取代既有技術，故節能量明顯增加，預計至 2030 年節能量達 6,309.7 千公秉油當量。各運具設備中，初期以小客車及機車節能占比最為顯著，主要因為車輛容許耗能基準提昇，且 2012 年達成工業局電動機車推動目標，而至 2030 年則以小客車及小貨車節能占比較高，節能貢獻比分別達 49% 與 25%。此外，因推廣大眾運輸工具，鐵路及捷運之能源耗用量不降反增。

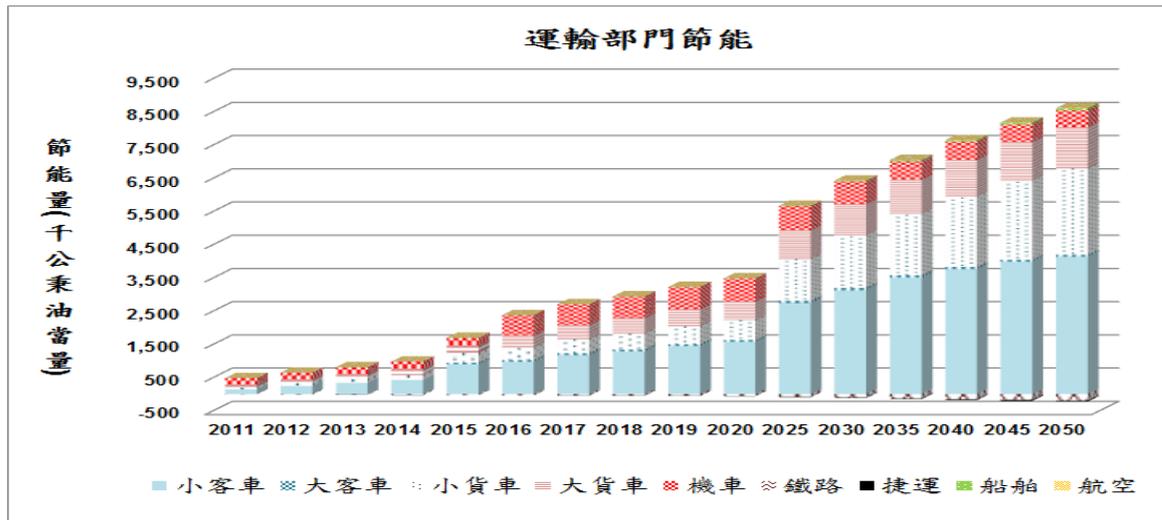


圖 10 運輸部門最終能源消費結構變化

(四) 能源密集度下降趨勢

技術凍結情境下，因 GDP、產業結構及人口等外生變數影響下，能源密集度至 2015 年與 2025 年分別降為 7.7 公升油當量/千元與 6.47 公升油當量/千元，年平均下降為 1.89%與 1.78%，與 2005 年能源密集度相較，分別下降 20%及 33%，未能達成我國節能目標。而在技術發展情境下，由於逐年導入高效率技術，能源密集度至 2015 年與 2025 年將分別降為 7.23 公升油當量/千元與 5.50 公升油當量/千元，年平均下降為 3.10%與 2.83%，與 2005 年能源密集度相較，分別下降 25%及 43%。顯示技術效率發展情境下，可望達成我國能源密集度每年下降 2%的目標，惟 2050 年若需較 2005 年下降 50%，則新技術市場滲透率與效率提昇需更進一步提昇。

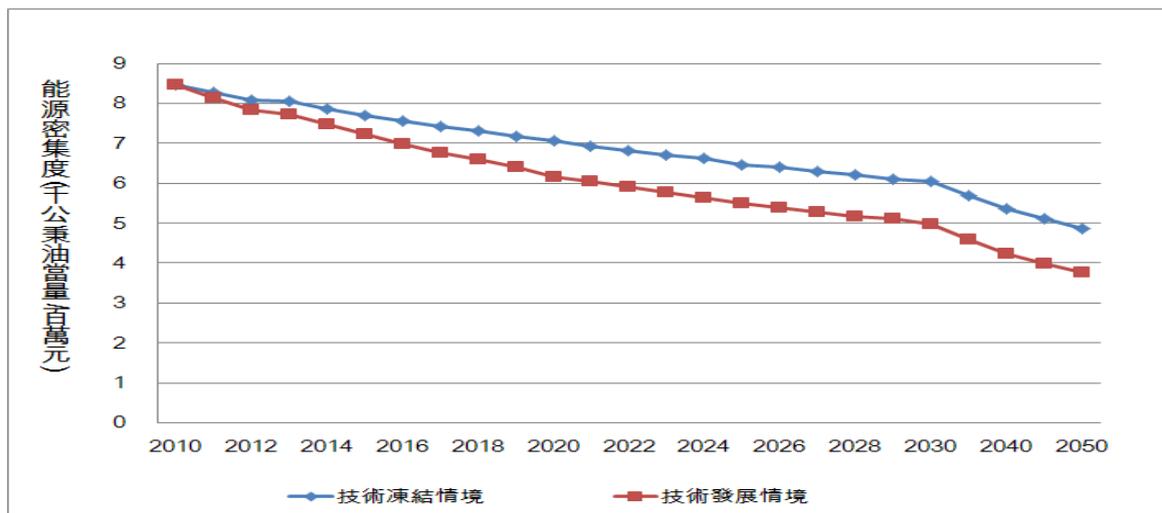


圖 11 我國能源密集度下降趨勢

## 五、結論與建議

為評估我國能源密集度下降可行性，本研究蒐集國內外能源效率提昇策略，並運用台灣 TIMES 模型分別以技術凍結與技術發展情境，評估我國能源密集度下降的幅度。結果顯示，在技術發展情境下，我國能源密集度至 2015 年與 2025 年年平均下降為 3.10%與 2.83%，與 2005 年能源密集度 9.60 公升油當量/千元相較，則分別下降 25%及 43%，顯示可望達成我國能源密集度每年下降 2%的目標，惟 2050 年若需較 2005 年下降 50%，則新技術市場滲透率與效率提昇需更進一步提昇。此外，由於在技術發展情境下，高效率技術的引進主要是透過成本設定及市場滲透率的假設，因研究時間限制，本次研究針對滲透率的設定採較主觀的設定方式，為利於政策後續實際落實推動，未來 TIMES 模型將參考國際滲透率推估模式，針對重要設備進行滲透率評估，並召集相關專家進行討論，以提高評估結果之合理性。

## 參考文獻

1. IEA, Energy Technology Perspective 2010.
2. IEA, Key World Energy Statistics, 2011.
3. IEA, World Energy Outlook 2011.
4. Mckinsey, Pathways to a Low-Carbon Economy-Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2009.
5. 工研院，工研院減量成本曲線資料庫，2011 年。
6. 台電公司，台電統計年報，2009 年。
7. 行政院，永續能源政策綱領，2008 年。
8. 行政院主計處，國民所得統計摘要，2012.05。
9. 行政院經濟建設委員會，2010 年至 2060 年臺灣人口推計，2010 年。
10. 行政院經濟建設委員會，國家節能減碳總計畫，2010 年。
11. 行政院經濟建設委員會，溫室氣體減量政策對產業發展之影響及因應對策，2006 年。
12. 行政院經濟建設委員會，溫室氣體減量政策對運輸及住商部門之影響及因應對策，2007 年。
13. 經濟部，我國整體能源效率提升策略面向與加強作法，2010 年。
14. 經濟部能源局，98 年全國能源會議全體大會大會結論，2009 年 4 月。
15. 經濟部能源局，工業部門能源查核管理與節能技術服務計畫執行報告，2010 年。
16. 經濟部能源局，能源統計月報，2012.05。
17. 經濟部能源局，對能源密集產業低碳化之能源效率管理及輔導策略作法，2010 年。
18. 環保署，我國低碳路徑發展藍圖規劃專案工作計畫執行報告，2010 年。