

能源密集產業電力效率提升與電力節約之反彈效果測定

塗千慧¹ 鄭睿合^{2*} 梁啟源³ 林杏秋⁴ 林華偉⁵

摘要

估計反彈效果以便正確顯現各項能源政策工具對能源效率影響程度至關重要。過往國內文獻大多論及電價調整對整體經濟或各產業之節電影響，並未探討電價變動後對於電力效率提升與電力節約之反彈效果，故本文運用我國1982-2017年六大能源密集產業之電力消費量與相關影響變數，採效率彈性估算法與隨機邊界分析法，研析我國能源密集產業電力效率提升與電力節約之反彈效果。研究結果顯示：(1)能源密集產業之工業生產指數提高將增加電力消費量，勞動投入增加亦對電力消費產生正向影響，而調漲電價則會抑低電力消費量。(2)我國能源密集產業於1982-2017年平均電力使用效率水準為0.81，顯示在產出、資本、勞動、中間投入、電價、產業結構成長率等因素不變下，臺灣能源密集產業電力使用效率仍有19%的改善空間。(3)短期電力效率反彈效果為2.44%，長期則為-3.56%，表示節電措施欲達到預期節能目標，須加大其力道。本文建議在未來國際能源價格循環波動下，政府宜堅守浮動電價調整機制，合理反映其內部及外部成本，引導產業提升電力使用效率，並為促進能源密集產業達到能源轉型目標，宜持續鼓勵業者採用高能源效率設備，以及透過能源節約輔導、規管或獎勵機制等，強化能源需求面管理措施，同時採教育和宣導方式增加人員之節能意識，以及導入能源管理師或節能服務團隊，強化能源管理事務，藉以減緩電力消費增量。

關鍵詞：能源效率，反彈效果，隨機邊界分析法，效率彈性估算法

1. 緒 論

在全球節能減碳趨勢下，國際間均致力於提高能源效率以達能源節約目標，且相關文獻(如WEC, 2010；Keay, 2011；Zhang and Lin, 2017；Lane and Mayer, 2018；DOE, 2019)均指出，改善能源效率為達到此目的之最具成本效益性方式。一般衡量能源效率時，普遍以能源密集度為代理變數(Adetutu *et al.*, 2016；Llorca

and Jamas, 2017；楊晴雯, 2012)，惟此項變數在運用和解釋能源效率變化時有較多爭議(Filippini and Hunt, 2011；柏雲昌等, 2010)，並非評估能源效率之最適方式，因此學界提出能源消費邊界函數，經由明確地控制收入和價格效果、國家特徵、氣候變化效果，或其他影響能源消費之外在共同因素等，以衡量出「潛在的能源效率」。其次，因採取節能措施後，能源用戶可能因為能源效率提升，導致其所面

¹中華經濟研究院第三研究所 高級專案管理師

²中華經濟研究院第三研究所 分析師

³中央大學管理 講座教授暨中華經濟研究院 諮詢委員

⁴工業技術研究院綠能與環境研究所 資深管理師

⁵工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

*通訊作者電話: 02-2735-6006#6232, E-mail: mike.jen@cier.edu.tw

收到日期: 2019年08月26日

修正日期: 2019年11月05日

接受日期: 2019年11月15日

對之單位能源使用成本降低，進而增加能源消費量(價格效果)，以及能源效率改善後，產生外溢效果帶動經濟成長，使得能源耗用量反而上揚(所得效果)，亦即推行能源效率措施後，因價格效果和所得效果影響而發生反彈效果(rebound effect)，可能產生實際節能量小於預期節能目標，將顯著影響政府施政成效，故有效衡量反彈效果是能源經濟學中一個重要的研究課題。

行政院於2017年4月修正核定「能源發展綱領」，據以推動我國能源轉型，其中，提升能源使用效率為邁向節能社會之重要措施，希冀透過各項計畫，帶動國內民生部門、服務業部門、工業部門、運輸部門、建築部門等之能源效率，逐步降低能源耗用、調整能源消費結構，且經濟部能源局長期以來亦投入資源於更換發光二極體(LED)照明燈具、補助購置或汰換動力與公用設備、節能家電、廢熱與廢冷回收技術等相關能源節約或提升能源效率之措施(經濟部，2019)，惟若政府所推動之節能政策存在反彈效果，即表示採行該項能源政策所產生之實際能源節約量低於預期能源節約量，將產生政府執行該政策時未能達成效果之疑慮，故應審慎規劃適宜目標，或考慮提高施政力度，以避免錯估能源效率提升或節能實績。

有鑑於我國工業部門之電力消費量占全國電力消費量比重甚高，透過政策工具促進工業部門能源效率，對整體能源效率變化將有顯著影響，特別是工業部門中之能源密集產業¹，若以能源消費量除以實質國內生產毛額之值(即一般定義之能源密集度)來觀察能源效率趨勢變化，其自2000年之32.39公升油當量/千元，提升為2017年之16.62公升油當量/千元，年均成長率為-3.85%，並且在能源轉型白皮書中進一步設定能源密集產業之能源密集度提升目標，以帶動整體能源節約成效(經濟部能源局，

2018)。惟影響能源密集度的因素眾多，以能源密集度來衡量效率時不易確知其背後改善成因，加上國內過往尚無文獻研析工業部門能源效率之反彈效果，不利於主管當局確切衡量工業部門能源效率變化，以及各項節能補助政策之力道及預期成效。

因此，本文聚焦於衡量國內六大能源密集產業之電力使用效率與電力節約之反彈效果及相關影響因素，以利未來政府在施行工業部門節能措施時之決策參考依據。此外，在資料來源及研究方法方面，係運用我國1982-2017年各能源密集產業之電力消費量與相關變數，並採效率彈性估算法與隨機邊界分析法(stochastic frontier approach, SFA)，研析我國各能源密集產業電力使用效率水準與電力節約行為之反彈效果，透過嚴謹理論方法和數據，估計完成我國能源密集產業之電力效率與反彈效果。

2. 文獻回顧

電力效率提升與電力節約之反彈效果概念最早來自Jevons (1865)，他認為能源效率提高常伴隨技術進步與經濟成長，進而可能增加能源消費量，此部分可稱為所得效果或成長效果；另一方面，能源效率提升使得能源使用成本降低，亦將刺激能源需求，此稱為價格效果，在兩者的共同作用下將導致能源消費增加，進而與原先設定的提高能源效率以達成能源節約的目標背道而馳，從而產生反彈效果，形成Jevons Paradox (Jevons悖論)，其後，則有Brookes (1978)、Khazzoom (1980；1987)和Saunders (1992)等將此一概念據以推展和應用(Zhang and Lin, 2017)。

分析反彈效果之方法主要可分為以投入產出模式和以計量模式為基礎(Jin and Kim, 2019a)²。前者包含運用可計算一般均衡模型

¹其中，本文分析之能源密集產業主要係參考經濟部能源局能源查核之六大重要產業，包括能源局定義的紡織成衣及服飾業、造紙紙製品及印刷出版業、化學及塑膠業、非金屬礦物製品製造業、基本金屬製造業以及能源耗用量大之電子及電力機械器材業，此六業別共占我國整體產業三分之二以上的電力使用量。

²依Jin and Kim (2019a)，分析反彈效果的代表性方法主要有一般均衡模型、時間序列和縱斷面分析、邊界分析、投

(computable general equilibrium model, CGE)，基於較為複雜和精細的假設(例如各要素間之代替彈性)，並考量產業間或國與國間之相互關聯，計算當能源效率提升後，可用較少的能源生產要素來提供產品或服務、減少對能源部門之需要，且生產成本降低有助於增進經濟成長，進而增加能源投入需要，據此計算潛在的反彈效果(Sorrell, 2007；Koesler *et al.*, 2016；Lu *et al.*, 2017)；後者則包括時間序列及縱斷面分析、邊界分析等，大多藉由建立計量模型，納入可能影響能源消費量和能源效率之變數(例如資本或勞動等生產要素，以及能源價格、實質國內生產毛額)，估計特定部門因能源效率提升後所可能之反彈效果，及影響反彈效果之因素與程度，其特點在於假設簡單(相較CGE模型)，且各項係數為內生估計而定，較屬於部分均衡概念(De Borger *et al.*, 2016；Gillingham *et al.*, 2016；Zhang and Lin, 2017)。由於本文主要研析近年我國能源密集產業之電力效率提升幅度和是否存在電力節約之反彈效果，並未進一步探討能源密集產業與其他部門間之關聯，係由個體層面直接估算反彈效果，因此在文獻回顧上，將彙整運用相關資料建立計量模型，據以衡量工業部門之能源效率與反彈效果。

此外，過往文獻中進行效率議題分析時之方法學，主要有資料包絡分析法(data envelopment analysis, DEA)及隨機邊界分析法(Jin and Kim, 2019b)。其中因資料包絡分析法屬無參數邊界法(nonparametric frontier)，係以線性規劃(mathematical programming)方式求算邊界，優點在於不須預先設定函數型式與估計參數，即可同時處理多產出與多投入的效率評估問題，但忽略資料會受隨機干擾項以及離群值(outlier)影響，且為一種相對性的評估模式，在個體資料蒐集上也有其一定限制。其

次，隨機邊界分析法係利用計量經濟法，須事先預設生產(成本)函數形式³及函數誤差項分配等若干假設，並進行統計檢定，接著再估算效率值，且衡量的效率為絕對技術效率值，另因隨機邊界分析法最大特色在於其組合性誤差項(composite error term)，可處理外在環境中的不確定性因素，並將各決策單位無效率值區分為技術無效率和用以捕捉統計噪音(noise)的隨機誤差項兩種。前者由相對效率邊界的效率差異組成，後者則為無法衡量的誤差，例如氣候或天災因素、生產要素供給不確定性因素、廠房機械運作不可預期變動因素、政經情勢變動因素等對於產出的影響結果，藉由組合性誤差項的設計將無法衡量的誤差降至最低，以求取最接近現況之技術效率值。綜合前述，為衡量能源密集產業之絕對電力效率變化及影響因素，且以隨機邊界分析法衡量之反彈效果更接近原始反彈效果意涵(Jin and Kim, 2019a)，本文進一步彙整應用隨機邊界分析法估算能源效率或反彈效果之相關文獻，如表1所示並說明如後。

就分析範疇而言，依資料特性可估計國際間或單一國家中各區域之能源效率或反彈效果，應用性甚廣。如Filippini and Hunt (2011)估計1978-2006年間29個OECD (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)國家之能源效率變化；宋楓(2014)透過1995-2011年間中國大陸28個省、市以及自治區資料，求算其各項彈性和能源效率值；Adetutu *et al.* (2016)評估全球55個國家1980-2010年各國的能源效率水準、長短期能源效率彈性及能源節約行為的反彈效果；Llorca and Jamas (2017)探討1992-2012年間15個歐盟國家之道路貨物運輸能源效率和反彈效果；Zhang and Lin (2018)彙整中國大陸2003-2013年之30個省份、278個城市資料，估計交通運輸系統之燃料效率和反彈

入產出分析與總體經濟反彈效果分析法。其中，一般均衡模型亦以投入產出為基礎，而時間序列和縱斷面分析、邊界分析則可歸類為計量模式。

³根據對偶理論(duality theory)，生產函數與成本函數具有對偶關係，故可由各成本函數找出其生產結構特性。且因各廠商要素使用與生產技術時常被視為機密，使得建立生產函數之資料取得不易，因此利用產出數量與投入價格的關係建立成本函數，並應用對偶理論，亦可以隨機邊界分析法估算技術效率。

表 1 能源使用效率水準與能源節約行為之反彈效果國際文獻彙整(本研究整理)

作者	國家	年份	部門別	電力需求隨 機邊界函數 被解釋變數	電力需求函數解釋變數	無效率函數解釋變數	效率水準	反彈效果
Filippine and Hunt (2011)	OECD (29國)	1978-2006	整體產業	能源消費量 (成本函數)	國內生產毛額、實質能 源價格、人口數、低溫 虛擬變數、區域面積、 工業產出占比、服務業 產出占比、時間趨勢	分配假設：半常態分配	整體：0.781 瑞士：0.932 美國：0.633 英國：0.864 德國：0.905 日本：0.878 南韓：0.804	
宋楓(2014)	中國大 陸(28 省、市 及自治 區)	1995-2011	整體產業	能源消費量 (成本函數)	國內生產毛額、能源價 格指數、第二級產業或 第三級產業占國內生產 毛額比重、人口數、資 本占勞動比重、時間趨 勢	分配假設：截斷型常態分配 解釋變數：投資占資本比 重、城市人口占總人口比 重、外商直接投資、貿易占 國內生產毛額比重	整體：0.106-0.957 北京：0.957 黑龍江：0.955 天津：0.937 吉林：0.936 山西：0.926 山東：0.106	
Orea <i>et al.</i> (2015)	美國	1995-2011	住宅部門	能源消費量 (需求函數)	個人實質可支配所得、 實質能源價格、人口、 平均住宅面積、暖房度 日、冷房度日、獨立式 住宅占比和時間虛擬變 數	分配假設：半常態分配 解釋變數：房屋面積、人均 所得及所支付的能源價格	0.455-0.987	56-80%
Weyman- Jones <i>et al.</i> (2016)	葡萄牙	1970-2014	非住宅部門	電力消費量 (成本函數)	實質國內生產毛額、電 力相對燃料油、汽油以 及天然氣價格指數、農 業與工業或服務業產出 占比、淨資本價格	分配假設：半常態分配	0.95-1.00	
Amjadi <i>et al.</i> (2018)	瑞典	2000-2008	四大能源密 集產業(紙 漿與紙製品 製造業、鋼 鐵業、化學 業、採礦業)	燃料或電力 消費量 (生產函數)	實質產出、燃料相對電 力價格、資本額、員工 數、時間趨勢	分配假設：截斷型常態分配 解釋變數：實質產出、燃料 相對電力價格、碳排放密集 度、燃料或電力消費占比、 是否加入歐盟碳排放交易體 系之虛擬變數、時間趨勢、 時間趨勢平方項	燃料：0.81-0.98 電力：0.49-0.85	燃料：31-54% 電力：26-79%

表 1 能源使用效率水準與能源節約行為之反彈效果國際文獻彙整(本研究整理)(續)

作者	國家	年份	部門別	電力需求隨 機邊界函數 被解釋變數	電力需求函數解釋變數	無效率函數解釋變數	效率水準	反彈效果
Llorca and Jamas (2017)	歐洲15 個國家	1992-2012	道路貨物運 輸	燃料消費量 (需求函數)	實質國內生產毛額(經購 買力平減)、柴油價格及 汽油價格所組成之價格 指數與相對價格、貨車 與輕型車存量及物流績 效指數	分配假設：半常態分配 解釋變數：實質國內生產毛 額、柴油價格及汽油價格所 組成之價格指數、鐵路貨 運、貨車數量占比及物流績 效指數	0.89	3.8%
Zhang and Lin (2018)	中國大 陸	2003-2013	道路運輸系 統	燃料消費量 (需求函數)	燃料價格指數、車輛 數、實質國內生產毛 額、貨運量、載客量、 運輸距離長度、都市營 建土地面積、時間趨勢 變數、區域虛擬變數和 總人口	分配假設：截斷型常態分配 解釋變數：燃料價格指數、 人均實質國內生產毛額、運 輸距離長度、都市營建土地 面積、時間趨勢變數及區域 虛擬變數	0.698	27.1%
Adetutu <i>et</i> <i>al.</i> (2016)	55個國 家	1980-2010	整體產業	能源消費量 (生產函數)	實質國內生產毛額、實 質資本投入、員工數、 中間財、時間趨勢	分配假設：半常態分配 解釋變數：工業產出占比、 貿易開放程度、人口數、地 區面積、溫度、時間趨勢、 時間趨勢平方項	整體：0.317-0.965 瑞士：0.965 丹麥：0.962 以色列：0.957 希臘：0.956 中國大陸：0.317	短期：90% 長期：-36%
Jin and Kim (2019b)	21個新 興經濟 體	1995-2016	整體產業	產出水準及 碳排放量(生 產函數)	資本、勞動、能源消費 和經濟複雜度指數		平均能源效率： 0.712-0.762 碳排放無效率平均 值：0.709-0.918	

效果；Jin and Kim (2019b)參採摩根史坦利資本國際(Morgan Stanley Capital International, MSCI)所定義之21個新興經濟體，計算各新興國家之能源效率和碳排放效率。若以單一國家、部門別或能源類別為分析範疇，Orea *et al.* (2015)估計1995-2011年間，美國48個州之住宅部門能源效率和反彈效果變化；Weyman-Jones *et al.* (2016)採用隨機邊界分析法估計1970-2014年葡萄牙非住宅部門的電力需求邊界函數，並評估在這段期間葡萄牙產業部門是否存在電力節約行為之反彈效果；Amjadi *et al.* (2018)則估算2000-2008年瑞典四大能源密集產業(包括紙漿與紙製品製造業、鋼鐵業、化學業、採礦業)之燃料效率、電力效率和其反彈效果。

在分析應用面向與變數選取方面，可透過生產面(如Jin and Kim, 2019b)或需求面(如Filippini and Hunt, 2011；Llorca and Jamas, 2017；Zhang and Lin, 2018)進行衡量。於建構生產函數以計算效率值時，所納入之解釋變數主要為資本投入、勞動投入、能源消費量等生產要素，而建立能源或燃料需求函數時，主要考量所得、能源價格、面積、人口數或員工數，且視產業或部門別之不同，尚考慮氣候相關變數(如低溫虛擬變數、暖房度日、冷房度日等)、產業結構，以期在控制適宜變數下，估計能源或燃料效率。在求取反彈效果方面，因Filippini and Hunt (2011)之函數設定方式隱含反彈效果為0之假設，其後相關研究(如Orea *et al.* 2015；Llorca and Jamas, 2017；Zhang and Lin, 2018)進一步放寬此條件，同時在衡量反彈效果時於函數中放入相關變數，將產出水準、能源價格、都市面積、時間趨勢、貿易開放度、產業結構變化與虛擬變數等，作為影響反彈效果變動之解釋因子，且和需求函數所採用變數具高度一致(如Orea *et al.*, 2015；Amjadi *et al.*, 2018；Llorca and Jamas, 2017)。大抵而言，探討整體經濟或產業部門之能源效率水準與能源節約行為反彈效果議題時，所運用之解釋變數涵蓋產出水準(如國內生產毛額、人均所得)、

能源價格、產業結構、投入要素(如資本投入、員工人數、中間財貨等)、時間趨勢等，且影響能源需求量之因子亦可能為影響反彈效果之變數。

以實證估計結果言之，文獻均認為產出水準(如國內生產毛額、所得)和價格對能源消費量具備顯著影響。如Filippini and Hunt (2011)針對1978-2006年間29個OECD國家之研究結果顯示，能源所得彈性與能源價格需求彈性分別為0.9與-0.275，表示當一國所得水準愈高或能源價格愈低，能源需求量愈高；宋楓(2014)對中國大陸28省、市及自治區進行之實證分析，則顯示能源所得彈性與能源價格需求彈性分別為0.31和-0.53；Orea *et al.* (2015)、Weyman-Jones *et al.* (2016)、Llorca and Jamas (2017)、Zhang and Lin (2018)之研究，亦支持產出水準與能源需求量呈正相關、能源價格與能源需求量呈負相關之結論。另除了產出水準和價格外，其他可能影響能源消費量之因子尚包含氣溫相關變數、土地面積(如Filippini and Hunt, 2011；Orea *et al.*, 2015；Zhang and Lin, 2018)、資本及勞動投入(如Adetutu *et al.*, 2016；Jin and Kim, 2019b)、產業結構(如Filippini and Hunt, 2011；宋楓，2014)和時間趨勢(如宋楓，2014；Adetutu *et al.*, 2016；Amjadi *et al.*, 2018；Zhang and Lin, 2018)。

其他可能影響能源效率或反彈效果之因素，尚包含投資、所得、面積、技術發展、物流品質和能源價格等。例如宋楓(2014)評估中國大陸各區域後發現，投資占資本比重愈高，表示資本更新速度快，能源效率將愈高，其他城市化程度、經濟開放程度等對能源效率均具有顯著正向影響；Orea *et al.* (2015)之研究指出，美國48個州住宅部門之反彈效果受人均所得與房屋面積影響，且人均所得越高及房屋面積越大時，將降低反彈效果、產生節能之效；Weyman-Jones *et al.* (2016)分析1970-2014年間葡萄牙非住宅部門之電力效率趨勢發現，剛開始產業可能因技術創新、電力使用變得

更有效率，在生產過程或提供服務的單位成本降低下，從而拉高各產業的電力需求，導致電力節約行為之反彈效果，但電力效率隨時間經過將逐漸克服反彈效果問題；Llorca and Jamas (2017)對15個歐盟國家之實證結果顯示，反彈效果越高的國家通常有較高的燃料效率與較佳的物流品質；Zhang and Lin (2018)研究中國大陸道路運輸系統後提出結論，係燃料價格指數越高時將有助於減少反彈效果，而人均實質國內生產毛額及運輸距離長度增加時，則顯著提高反彈效果。

就能源效率和反彈效果估計結果而言，依不同分析構面和產業類別特性，文獻中之實證數據不盡相同，惟大體上均顯示所分析之對象仍有能源效率提升空間，以及確認反彈效果確實存在，值得政策當局關注。如Filippini and Hunt (2011)估計29個OECD國家平均整體的能源效率水準為0.781，其中，瑞士之能源效率水準最高(0.932)，美國、英國、德國、日本、南韓的能源效率水準則分別為0.633、0.864、0.905、0.878、0.804；Orea *et al.* (2015)估算美國住宅部門之反彈效果均值為56-80%；Adetutu *et al.* (2016)評估全球55個國家1980-2010年各國的能源效率水準、長短期能源效率彈性及能源節約行為反彈效果。研究結果顯示，OECD國家的能源效率水準普遍較非OECD國家高，顯示國際間存在技術落差；此外，短期與長期的能源效率反彈效果平均值分別為90%與-36%，表示短期下可能產生部分反彈現象，能源效率提升將抵銷部分的能源消費量，但長期下能源消費量降幅應會超過能源效率提升幅度，產生超節能現象；Llorca and Jamas (2017)指出15個歐盟國家於1992-2012年間之平均燃料效率及反彈效果分別為0.89和3.8%；Amjadi *et al.* (2018)估計2000-2008年瑞典四大能源密集產業之效率水準與反彈效果，其結果顯示，在燃料需求邊界函數中，燃料節約行為之反彈效果約為31-54%，在電力需求邊界函數方面，電力節約行為之反彈效果為26-79%；Zhang and Lin (2018)

研究中國大陸道路運輸系統之實證結果，全國平均燃料效率和反彈效果分別為0.698、27.1%；Jin and Kim (2019b)則發現，21個新興經濟體於1995-2016年之平均能源效率介於0.712(中國大陸、泰國)至0.762(巴西)間，碳排放無效率平均值為0.709(埃及)至0.918(土耳其)間。

綜觀過去相關文獻可知，產出與生產要素投入增加將提高能源消費量，而能源價格上漲則有助於抑低能源消費量與反彈效果，因此在政策意涵上，可考慮課徵碳稅使燃料價格上揚，應能發揮抑低反彈效果之效，以及在不同國家間所呈現出之能源效率和碳排放無效率具備差異性，故國際合作上需特別著重於先進能源和碳排放效率，國際組織也需要在各國間就經濟結構、能源組合、技術研究成果進行連結和分享。鑑於過往諸多研究顯示，能源節約行為普遍存在反彈效果，將抵消政府推行節能政策所產生之節能成效，若在制定能源政策時未考量此一現象，可能會高估能源效率改善的節能減碳成效。因國內尚未見運用隨機邊界分析法探討能源密集產業之能源效率變化及反彈效果議題，同時我國針對能源密集產業已於能源轉型白皮書明確制定提升能源效率規劃，衡量其能源效率及反彈效果程度具重要政策意涵，故本文參考文獻中曾引用之相關變數，同時依循資料特性及可取得性，研析我國六大能源密集產業之電力效率與反彈效果，瞭解我國能源密集產業之電力使用行為，進行電力效率成長估計與後續節電之反彈效果計算，以提供政府政策制訂時之決策依據。

3. 研究方法與資料分析

3.1 研究方法說明

本文主要研究目的在於運用隨機邊界分析法與效率彈性估算法，分別評估我國六大能源密集產業電力效率水準與電力節約之反彈效

果。

隨機邊界分析法與隨機邊界生產模型 (stochastic production frontier model) 最早係由 Aigner *et al.* (1977) 以及 Meeusen and den Broeck (1977) 提出，目的在於改良資料包絡分析法中，將任何無法控制的影響均視為無效率的問題。一般化之隨機邊界生產(成本)函數可以下式表示：

$$\ln(Y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \ln(X_{ji}) + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = v_i - su_i, s = \begin{cases} 1, & \text{生產函數} \\ -1, & \text{成本函數} \end{cases} \quad (2)$$

其中， i 由 1、2、3 至 n ， Y_i 表示第 i 個決策單位的實際產出水準， X_{ji} 表示第 i 個決策單位之第 j 個的投入要素， β_0 表示截距項， β_j 表示待估計之係數， ε_i 表示組合性誤差項，包含隨機誤差項(v_i)則和技術無效率誤差項(u_i)，且組合性誤差項的變異數(σ^2)即為隨機誤差項之變異數(σ_v^2)與技術無效率誤差項之變異數(σ_u^2)的加總，即 $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ ，而 $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ 則代表無效率因素在組合性誤差項中的重要程度。另依 Filippini and Hunt (2011) 及 Jondrow *et al.* (1982)，定義電力需求函數及電力效率(EF)如下：

$$\ln(E_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \ln(X_{ji}) + v_i + u_i \quad (3)$$

$$EF_i = \exp(-u_i) \quad (4)$$

其中， E_i 為電力需求量，而 $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \ln(X_{ji})$ 為最適電力需求邊界、 X_{ji} 意指各項控制變數以決定最適電力需求。 v_i 代表隨機誤差項，假設符合對稱性常態分配，即 $v_i \sim iid N(0, \sigma_v^2)$ ；而 u_i 則代表技術無效率誤差項，為非負隨機項且與 v_i 相互獨立。參考 Orea *et al.* (2015) 及 Zhang and Lin (2018)，式(3)表示能源效率值將位於(0, 1]間。當 $EF_i < 1$ 時存在能源無效率，而 $EF_i = 1$ 則代表能源使用效率已屬最適化。惟式(3)隱含無反彈效果，此即與「能源效率改善將可能產生反彈效果」之論點相違背，因此需修正此一條件。依

Saunders (2000) 之效率彈性估算法及定義之反彈效果(RE)如下：

$$RE = 1 + \varepsilon_{EF}^E \quad (5)$$

其中， ε_{EF}^E 為效率彈性，即電力效率(EF)變動一個百分點對電力需求量(E)變動之百分比，表示為：

$$\varepsilon_{EF}^E = \frac{d\ln(E)}{d\ln(EF)} \quad (6)$$

因此，反彈效果即在衡量電力效率改善對電力消費量影響的敏感程度。根據式(5)，電力節約之反彈效果估計結果可分為下列五種：

- (1) $RE > 1$ 或 $\varepsilon_{EF}^E > 0$ ：表示產生事與願違(backfire)現象，電力效率雖提升，但電力消費量卻不減反增，亦即實際節電量不僅未達預期，反而還更加耗電。
- (2) $RE = 1$ 或 $\varepsilon_{EF}^E = 0$ ：表示產生完全反彈(full rebound)現象，面對電力效率提升，但電力需求並未改變，即實際節電量亦未達預期，但也並未發生電耗增加的情況，故該電力效率提升政策可能對於電力節約行為並無太大用處。
- (3) $0 < RE < 1$ 或 $-1 < \varepsilon_{EF}^E < 0$ ：表示產生部分反彈(partial rebound)現象，電力效率提升，抵銷了一部分的電力消費量，即實際電力節約量低於預期，故表示該電力效率提升措施尚須審慎評估其成本效益性或政策有效性。
- (4) $RE = 0$ 或 $\varepsilon_{EF}^E = -1$ ：表示產生零反彈(zero rebound)現象，電力效率提升的幅度與電力需求量下降的幅度一致，故實際與預期的電力節約量相符。
- (5) $RE < 0$ 或 $\varepsilon_{EF}^E < -1$ ：表示產生超節電(super conservation)現象，電力消費量下降幅度超過電力效率提升幅度，亦即實際電力節約量超過預期。

配合前述效率定義，式(6)可改寫為

$$\varepsilon_{EF}^E = \frac{d\ln(E)}{d\ln(EF)} = \frac{d\ln(E)}{d\ln[\exp(-u)]} = -\frac{d\ln(E)}{d(u)} \quad (7)$$

由(7)式可知， $\frac{d\ln(E)}{d(u)}$ 即為式(3)中， $\ln(E)$

對 u 偏微分之估計係數。結合(5)式與(7)式得知 $\frac{dLn(E)}{d(u)} = -\varepsilon_{EF}^E = 1 - RE$ ，則式(3)可改寫為

$$Ln(E_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j Ln(X_{ji}) + v_i + (1 - RE)u_i \quad (8)$$

另一方面， u_i 可定義為下式，藉以分析影響無效率項之解釋因子：

$$u_i = \delta_0 + \sum_{j=1}^k \delta_j Z_{ji} + w_i \quad (9)$$

其中， Z_{ji} 代表影響各決策單位技術無效率的外生因素， δ_0 表示截距項， δ_j 表示待估計之係數， w_i 代表隨機誤差項。此外，隨機邊界分析法對於技術無效率誤差項分配的假設主要有三種(Greene, 1993)，分別為半常態(half-normal)分配、指數型(exponential)分配以及截斷型常態(truncated-normal)分配。其中，半常態分配為截斷型常態分配的特例，且截斷型常態分配係假設 u_i 小於某正數，而半常態分配允許極端值存在，兼且過去相關實證研究指出(Greene, 1990)，技術無效率項分配型態的假定對於效率估計結果差異不大，且Ritter and Simar (1997)建議應使用估計參數相對較少之半常態分配或指數型分配，於文獻中則大多假設為截斷型常態分配(如宋楓，2014；Amjadi *et al.*, 2018；Zhang and Lin, 2018)或半常態分配(如Filippini and Hunt (2011)；Adetutu *et al.*, 2016；Weyman-Jones *et al.*, 2016；Llorca and Jamas, 2017)，因此考量 u_i 特性未知與半常態分配允許存在極端值，故本文假設無效率項服從半常態分配，即 $u_i \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ 。

在估計方法上，隨機邊界模型與無效率項的參數可採最大概似估計法(maximum likelihood, ML)估計⁴，並將虛無假設定為 $H_0: \gamma = 0$ ，當檢定結果接受虛無假設時，代表 $\sigma_u^2 = 0$ ，亦即電力消費量變動與人為的技術無效率無關，純粹歸因於隨機因素，此時便可直接以普

通最小平方方法(ordinary least square, OLS)估計，但若檢定結果為拒絕虛無假設時，表示技術無效率對於衡量生產變動具重要性，必須以隨機邊界分析法估計。惟Coelli (1995)指出，此虛無假設因位於參數空間之邊界上，若以傳統概似比(likelihood ratio)檢定判斷將產生偏誤，須改以單邊概似比檢定，檢定統計量為 $LR = -2[Ln(\gamma = 0) - Ln(\gamma = \hat{\gamma})] \sim \chi^2$ ，服從自由度為1之混合式卡方分配(mixture of chi-square distribution)，其中， $Ln(\gamma = \hat{\gamma})$ 取自隨機邊界分析法，為在拒絕虛無假設下之對數概似比值，而 $Ln(\gamma = 0)$ 係利用普通最小平方方法，滿足在虛無假設下之對數概似比值。一般而言，單邊概似比檢定優於雙邊概似比、Wald (以最大概似估計法或校正後普通最小平方方法)或第三動差(third moment)檢定，但當 γ 數值愈高或樣本數愈大，前述五種檢定結果差異愈小。

由過去的實證研究中，例如Pitt and Lee (1981)或De Borger *et al.* (1996)等是以兩階段方式來衡量各決策單位的效率，即先估算出技術無效率，再以技術無效率為被解釋變數，其他會影響效率的因素，例如廠商規模、管理經驗等代表決策單位特質的因素為解釋變數，進行第二階段的迴歸分析，探討各決策單位技術效率差異的原因。然而，在兩階段的分析方法中存在一個問題，在第一階段估算技術無效率部分時，無效率項係假設為獨立且相同之分配，但在第二階段中，無效率項假設為決策單位特質因素的函數，即隱含除非決策單位特質因素的迴歸係數皆為零，否則無效率項應是不同的分配，從而估計參數將產生嚴重的偏誤(bias)。因此，許多學者例如Kumbhakar *et al.* (1991)、Reifschneider and Stevenson (1991)、Wang and Schmidt (2002)和Schmidt (2011)等，建議應以一階段模型，聯立估計隨機邊界生產

⁴Coelli (1995)採用蒙地卡羅模擬方法，比較以最大概似估計法與校正後普通最小平方方法估計半常態分配之隨機邊界生產函數的估計參數差異，研究結果指出，兩方法均存在估計偏誤，但當無效率因素在組合性誤差項中的重要程度(即 γ)愈靠近1時，以最大概似估計法估計之估計式偏誤較以校正後普通最小平方方法估計小，且在大樣本資料分析下，最大概似估計法亦優於校正後普通最小平方方法。

模型與無效率項的參數，而本文在進行後續實證估計時亦採一階段方式求解⁵。

3.2 研究模型建構

藉由相關文獻及方法學回顧，本文依國際常用於衡量影響產業電力消費的可能因素，同時以既有公開統計資料，採用產業結構與電力價格變化作為影響我國六大電力消費產業近年電力效率的解釋變數，以隨機邊界分析法進行電力使用效率水準實證分析，設定電力需求隨機邊界函數如下⁶：

$$\begin{aligned} \ln(E_{it}) = & \beta_0 + \beta_1 \ln(Y_{it}) + \beta_2 \ln(K_{it}) + \beta_3 \ln(L_{it}) + \\ & \beta_4 \ln(M_{it}) + \beta_5 \text{IND1}_i + \beta_6 \text{IND2}_i + \\ & \beta_7 \text{IND3}_i + \beta_8 \text{IND4}_i + \beta_9 \text{IND5}_i + \\ & \beta_{10} \ln(PE_t) + v_{it} - u_{it}, \\ & i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T \\ u_{it} = & \delta_0 + \delta_1 \ln(S_{it}) + \delta_2 T_t + w_{it}, \\ & i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (10)$$

其中， E_{it} 表示第 i 主要電力消費產業於第 t 期的電力消費量； Y_{it} 表示第 i 主要電力消費產業於第 t 期的工業生產指數； K_{it} 、 L_{it} 、 M_{it} 分別表示第 i 主要電力消費產業於第 t 期的資本投入數量指數、勞動投入數量指數以及中間投入數量指數； IND1_i 、 IND2_i 至 IND5_i 係代表各主要電力消費產業的虛擬變數，其中，若該樣本為紡織成衣及服飾業，則 $\text{IND1}_i = 1$ ，其餘產業虛擬變數為 0；若該樣本為造紙紙製品及印刷出版業，則 $\text{IND2}_i = 1$ ，其餘產業虛擬變數為 0；若該樣本為化學及塑膠業，則 $\text{IND3}_i = 1$ ，其餘產業虛擬變數為 0；若該樣本為非金屬礦物製品製造業，則 $\text{IND4}_i = 1$ ，其餘產業虛擬變數為 0；若該樣本為

基本金屬製造業，則 $\text{IND5}_i = 1$ ，其餘產業虛擬變數為 0；若該樣本為電子及電力機械器材業，則 IND1_i 、 IND2_i 、 \dots 、 $\text{IND5}_i = 0$ ； PE_t 表示第 t 期之平均實質電力價格； v_{it} 為隨機誤差項，假設符合對稱性常態分配，即 $v_{it} \sim iid N(0, \sigma_v^2)$ ； u_{it} 為非負的技術無效率誤差項，且在 u_{it} 特性未知的情况下，假設符合半常態分配，即 $u_{it} \sim iid N^+(0, \sigma_u^2)$ ，並與 v_{it} 相互獨立；此外， S_{it} 表示第 i 主要電力消費產業於第 t 期之名目國內生產毛額占全國比重； T_t 表示時間趨勢項； w_{it} 為隨機誤差項； β 與 δ 則表示待估計之係數。

另一方面，本文以最大概似估計法，並採一階段求解，同時估計電力需求函數和無效率函數，再將由隨機邊界分析法估計而得之潛在電力效率水準 ($EF_{it} = \exp(-u_{it})$) 納入電力需求函數中。當估計完成效率之後，進而參考 Adetutu *et al.* (2016) 估算長短期反彈效果之方式，將落後一期之電力消費量納入電力需求函數解釋變數，藉以求算我國六大電力消費產業電力節約行為之長短期反彈效果：

$$\begin{aligned} \ln(E_{it}) = & \theta_0 + \alpha \ln(E_{it-1}) + \theta_1 \ln(Y_{it}) + \theta_2 \ln(K_{it}) \\ & + \theta_3 \ln(L_{it}) + \theta_4 \ln(M_{it}) + \theta_5 \text{IND1}_i + \theta_6 \\ & \text{IND2}_i + \theta_7 \text{IND3}_i + \theta_8 \text{IND4}_i + \theta_9 \text{IND5}_i \\ & + \theta_{10} \ln(PE_t) + \theta_{11} \ln(EF_{it}) + w_{it} \end{aligned} \quad (11)$$

其中， E_{it-1} 表示第 i 主要電力消費產業於第 $t-1$ 期的電力消費量、 θ 表示待估計之係數。由上式即可計算短期與長期的效率彈性與電力節約行為之反彈效果：

$$\begin{cases} \text{短期 } \varepsilon_{EF}^E = \frac{d\ln(E)}{d\ln(EF)} = \theta_{11} \\ \text{短期 } RE = 1 + \text{短期 } \varepsilon_{EF}^E = 1 + \theta_{11} \end{cases} \quad (12)$$

⁵ 文獻中進行反彈效果估計時，主要包含透過建立反彈效果函數方式(如 Orea *et al.*, 2015；Amjadi *et al.*, 2018；Zhang and Lin, 2018)據以估計，亦或先建立效率函數後，再計算反彈效果(如 Adetutu *et al.*, 2016)，惟效率彈性源自於估計出效率值，本質上衡量效率或建立反彈效果函數進行估算，實為一體兩面。

⁶ 對比文獻中之方法學，Orea *et al.* (2015) 使用的是 input requirement function (IRF)，主要是固定投入和產出水準下，估算出短期效率結果；Adetutu *et al.* (2016) 使用的 input distance function (IDF)，則是固定產出、投入是變動的，要素和能源間可互相替代互補，因此為長期效果。然而，若分析對象為國家整體時，一國之內可以藉由調整國內要素間的配置和變化(尚含部門間要素流動)，影響效率變動；若為單一部門時，則因生產活動之故，使得要素之間的替代程度甚低。以工業部門為例，能源或電力間幾無替代可能，例如當設備沒有電力作為驅動時，應無以人力替代電力推動機器運轉的可能性，即使要素間的相對價格改變，在工業部門的實務上，也不易有要素替代能源運作之空間，故採 IRF 模式相對合宜。

$$\begin{cases} \text{長期} \varepsilon_{EF}^E = \frac{\theta_{11}}{1-\alpha} \\ \text{長期} RE = 1 + \text{長期} \varepsilon_{EF}^E = 1 + \frac{\theta_{11}}{1-\alpha} \end{cases} \quad (13)$$

3.3 資料蒐集與變數定義

本文蒐集1982-2017年我國六大能源密集產業影響電力消費量與效率變數的年資料，並據以估計電力節約行為之反彈效果。其中，六大能源密集產業包括經濟部能源局定義之紡織成衣及服飾業、造紙紙製品及印刷出版業、化學及塑膠業、非金屬礦物製品製造業、基本金屬製造業等五大能源密集產業、以及能源耗用量大之電子及電力機械器材業，共占我國整體產業三分之二以上的電力使用量，且為我國政府能效提升計畫的重點推動產業，亦為經濟部能源局能源查核主要產業，實具評估電力使用效率與反彈效果之重要性。以下詳細說明能源密集產業電力需求隨機邊界函數中各解釋變數的計算方式與資料來源。

(1) 電力消費量：

我國六大能源密集產業(紡織成衣及服飾業、造紙紙製品及印刷出版業、化學及塑膠業、非金屬礦物製品製造業、基本金屬製造業、電子及電力機械器材業)之1982-2017年電力消費量年資料，數據取自經濟部能源局《能源統計年報》。

(2) 工業生產指數：

我國六大能源密集產業工業生產指數資料取自經濟部統計處工業生產統計資料庫。

(3) 資本投入數量指數：

我國六大能源密集產業資本投入數量指數資料取自行政院主計總處國民所得及經濟成長統計資料庫、工商普查資料、國富調查及產業關聯表，並參考梁啟源(2009a, 2009b)、梁啟源等(2019)之資本投入數量指數，將資本投入分為建物、其他建物、運輸設備、機械設備、存貨、土地、無形資產七大類。其中，資本存量資料係根據永續存量(perpetual inventory)法來推估；各產業資本形成毛額的資料取自行政院主

計總處歷年工商普查資料及國富調查以內插外補的方式取得；除土地外，各類資本之存量係將各年的資本形成毛額扣掉折舊後予以加總，而折舊則另採定率折舊法加以計算，折舊年限取自1988年的國富調查；各產業的存貨統計資料則取自主計總處之資本形成毛額中存貨增加數值。

計算資本投入數量指數所用的資本勞務價格係根據Jorgenson and Gollop (1980)的方法編製，充分考慮平均資本報酬率、折舊率、資本利得(capital gain)、所得稅以及財產稅等因素，資本勞務價格為各類資本價格的Divisia指數，本文即依此指數進行估算。各類資本勞務價格(P_{ki})係根據下式計算：

$$\begin{aligned} P_{ki} &= \frac{1-\mu(T) \cdot Z_i(T)}{1-\mu(T)} \left[\frac{P_{hi}(T-1) \cdot (1-\mu(T)) \cdot R_i(T)}{+\delta_i \cdot P_{hi}(T)} \right] + P_{hi}(T) \cdot \tau_i(T) \\ R_i(T) &= \frac{PC - \sum_{i=1}^6 \left[\frac{1-\mu(T) \cdot Z_i(T)}{1-\mu(T)} \cdot (\delta_i P_{hi}(T) - P_{hi}(T)) \right] \cdot K_i}{\sum_{i=1}^6 (1-\mu(T) \cdot Z_i(T)) \cdot P_{hi}(T-1) \cdot K_i(T)} \\ PC &= \sum_{i=1}^6 P_{ki} \cdot K_i(T-1) \\ i &= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \end{aligned} \quad (14)$$

其中， $\mu(T)$ 為有效營業事業所得稅稅率； $Z_i(T)$ 為折舊現值； P_{hi} 為*i*資本財價格； $R_i(T)$ 為內部報酬率； PC 為資本報酬； δ_i 為*i*資本財折舊率； τ_i 為*i*資本財之財產稅率。

由於國民所得帳的資本報酬包括利息、地租及利潤，惟產業中小企業甚多，自雇及無酬家屬工作者，因勞動報酬不會反映在盈餘中，需要調整。然而，因產業關聯表已設算自雇及無酬家屬工作者的報酬改列為勞動報酬，故本文改以歷年產業關聯表的資本報酬及勞動報酬占產值比率來替代國民所得帳的資本及勞動份額。

(4) 勞動投入數量指數：

我國六大能源密集產業勞動投入數量指數資料取自中研院調研中心歷年人力運用調查資料，並參考梁啟源(2009a, 2009b)、梁啟源等(2019)之勞動投入數量指數，按性別(男、女)、就業別(受雇、自雇及無酬)、年齡別(15-24歲、

25-34歲、35-44歲、45-54歲、55-64歲、超過65歲)、教育別(國中、高中及高職、大學及大學以上)細分為72類，各類別勞動人數與薪資之乘積即為各類別之勞動報酬，並計算72個類別的勞動報酬份額，進而計算為Divisia 指數，本文即依此指數進行估算。

(5) 中間投入數量指數：

我國六大能源密集產業中間投入數量指數資料取自中華民國物價統計月報、進出口統計月報、國民所得資料、工業生產統計及交通統計年報等，並參考梁啟源(2009a, 2009b)、梁啟源等(2019)之中間投入數量指數，將中間投入分為農產品、工業產品、運輸服務、服務產品以及進口品五大類，各類中間投入份額的資料再根據歷年產業關聯表，茲以內插法及外插法求得並予以調整，進而計算成Divisia指數，本文即依此指數進行估算。

(6) 平均實質電力價格：

我國六大能源密集產業平均實質電力價格資料取自經濟部能源局《能源統計年報》與行政院主計總處物價指數資料庫。本文係以年平均名目電力價格除以各年度消費者物價指數

(consumer price index, CPI)後再乘以100，即可得工業年平均實質電力價格。

由1982-2017年我國實質工業電價變化趨勢可知(參考圖1)，過去因國際燃料價格大幅上漲，政府於2006年至2013年間曾數次調高電價，透過價格機制降低臺灣整體電力消費量，其後於2015年訂定新版浮動電價調整機制，使電價能合理反映燃料成本變化，惟2014年後因美國頁岩油氣大量生產、全球景氣趨緩影響原物料需求，帶動國際能源價格下跌，因此2014-2017年間依據電價計價公式反映燃料成本變動，故我國2017年電價相較2014年為低，惟2017年我國工業電價相較2005年仍成長19.62%。

(7) 產業結構：

我國六大能源密集產業國內生產毛額資料取自行政院主計總處國民所得及經濟成長統計資料庫。本文係以各能源密集產業國內生產毛額占全國比重作為衡量能源密集產業之產業結構變化的代理變數(proxy variable)。

比較1982-2017年我國六大能源密集產業國內生產毛額占全國比重(參考圖2)，其中以電子

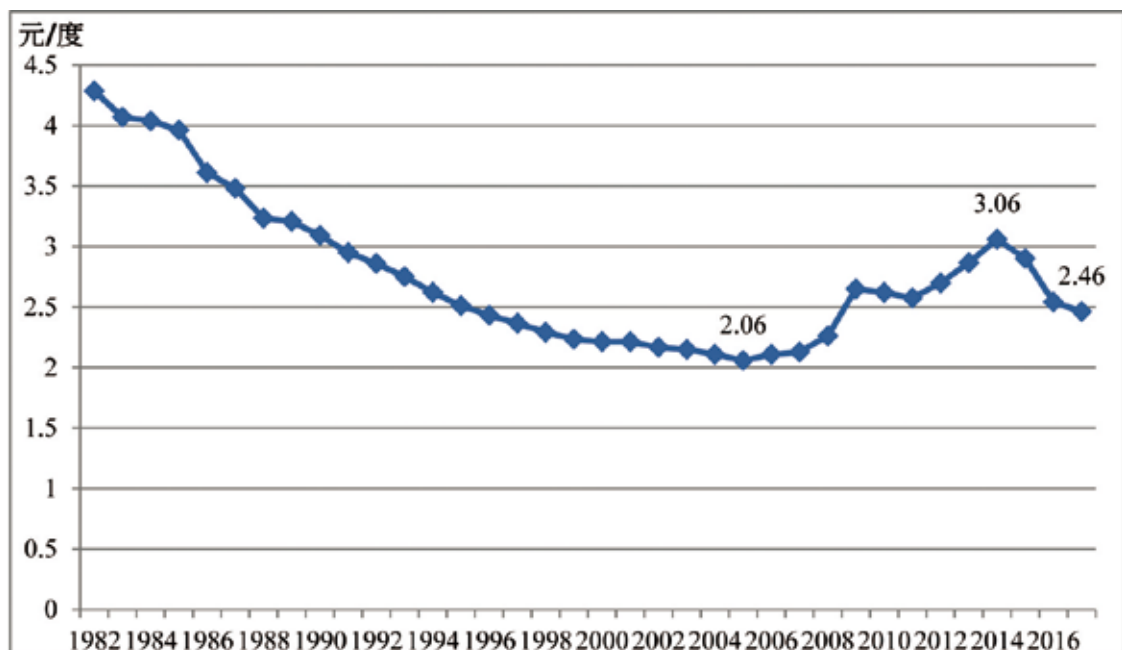


圖1 1982-2017年我國實質工業電價

資料來源：經濟部能源局，2019；行政院主計總處，2019a(本研究整理)。

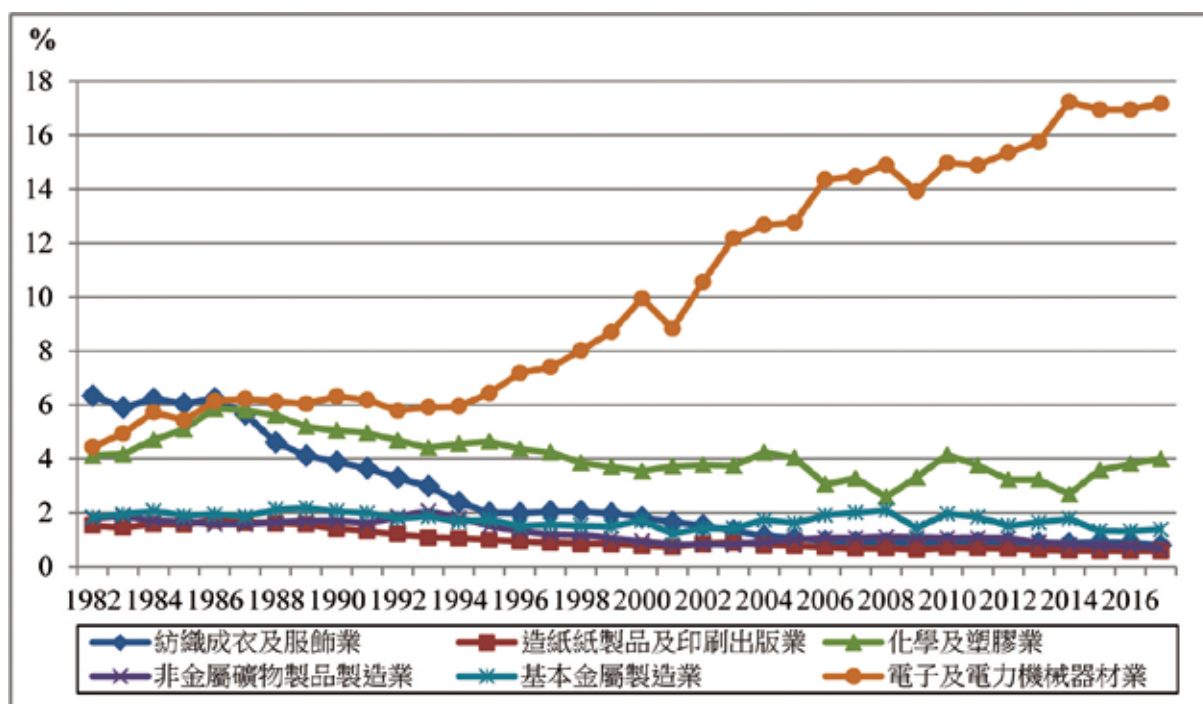


圖2 1982-2017年我國六大能源密集產業國內生產毛額占全國比重

資料來源：行政院主計總處，2019b(本研究整理)。

及電力機械器材業占比最大，且近年來比重明顯增加，成長速度最快，其餘業別占比則呈逐年遞減現象。

茲彙整我國六大能源密集產業電力需求隨機邊界函數各解釋變數敘述統計資料如表2所

估計結果顯示(參考表3)，工業生產指數、

4. 實證結果

表2 1982-2017年我國六大能源密集產業電力需求隨機邊界函數各解釋變數敘述統計(本研究整理)

解釋變數	單位	平均數	標準差	最小值	最大值	個數	資料來源
電力消費量	十億度	10.87	10.70	1.10	49.02	216	經濟部能源局，2019
工業生產指數	指數	113.35	128.67	13.62	768.09	216	經濟部統計處，2019
資本投入數量指數	指數	127,313	226,485	343.42	1,279,812	216	梁啟源(2009a, 2009b)與梁啟源等(2019)
勞動投入數量指數	指數	200.71	123.46	53.16	597.82	216	梁啟源(2009a, 2009b)與梁啟源等(2019)
中間投入數量指數	指數	80.48	5.87	60.66	92.78	216	梁啟源(2009a, 2009b)與梁啟源等(2019)
平均實質電力價格	元/度	2.77	0.61	2.06	4.29	216	經濟部能源局，2019 與行政院主計總處，2019a
產業結構(各能源密集產業國內生產毛額占全國比重)	%	3.47	3.75	0.59	17.24	216	行政院主計總處，2019b

表3 能源密集產業電力需求隨機邊界函數估計結果：隨機邊界分析法(本研究估算)

解釋變數	係數(t統計)
電力需求函數(被解釋變數：電力消費量)	
Ln (工業生產指數)	0.5898*** (13.80)
Ln (資本投入數量指數)	-0.0005 (-0.06)
Ln (勞動投入數量指數)	0.1739*** (5.05)
Ln (中間投入數量指數)	0.3837 (1.14)
紡織成衣及服飾業	-1.9277*** (-17.53)
造紙紙製品及印刷出版業	-2.4067*** (-33.63)
化學及塑膠業	-0.2023*** (-2.66)
非金屬礦物製品製造業	-2.2059*** (-26.38)
基本金屬製造業	-1.0915*** (-14.53)
Ln (平均實質電力價格)	-0.1694** (-2.36)
常數	-1.4035 (-0.91)
無效率項函數(被解釋變數：無效率性)	
Ln (產出占國內生產毛額比重)	3.1826*** (6.64)
時間趨勢	-0.2789*** (-7.68)
常數	-2.7253*** (-3.93)
最大概似估計($H_0: \gamma=0$)	
P-value	0.0000***

說明：***、**、*分別表示在1%、5%、10%的顯著水準下，拒絕虛無假設。

勞動投入對能源密集產業電力消費量具高度顯著影響。其中，產出增加會提高電力消費量，且平均工業生產指數每提高1%將增加0.59%的電力消費量；而勞動投入提升將帶動能源密集產業電力使用量，表示對能源密集產業而言，增聘較多人力會導致電力消費量上揚，因此若在產業持續成長進而增雇人力之際，宜透過教育和宣導增加人員之節能意識，並且同時導入能源管理師或節能服務團隊，強化能源管理事務；另本研究以電子及電力機械器材業為參考

組，在1982-2017年期間，平均而言，紡織成衣及服飾業、造紙紙製品及印刷出版業、化學及塑膠業、非金屬礦物製品製造業、基本金屬製造業均較電子及電力機械器材業電力消費量低，其中又以造紙紙製品及印刷出版業的電力消費量最小，表示宜對我國電子及電力機械器材業提供適宜之能源節約輔導、規管或獎勵機制，以誘使用戶投入資源於節能工作，藉以減少和各業別間之電力消費量差距。其次，在5%的顯著水準下，電力價格調漲將有助於降低電

力消費量，且電價每上漲1%，電力需求量將減少0.17%（電力需求價格彈性為-0.17），故電價上漲將增進產業節能誘因，促使電力使用效率改善，尤其是對於電力使用量龐大的能源密集產業而言，電價提高將大幅提高產業的營運支出，從而誘發能源密集產業從事節能行為，使電力消費量下降。

再者，就影響無效率項的係數估計結果可發現，產業結構變數對無效率項的影響為正，亦即能源密集產業之產業結構變化會導致無效率性提高，表示近年來隨著能源密集產業占我國整體經濟比重越高與結構變化，並無助於能源密集產業的電力使用效率，故宜針對能源密集產業中成長快速之電子及電力機械器材業，診斷其主要用電流向和耗能項目，提供輔導、規管及獎勵措施，協助其提升能源效率；另一方面，時間趨勢的係數估計結果為顯著負向，表示近幾年在技術持續提升下，能源密集產業的電力使用效率仍呈改善趨勢。

此外， $\gamma (= \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2))$ 表示無效率項之變異數相較於隨機誤差項變異數之貢獻程度，或表示無效率項對電力消費影響的重要程度，其數值將介於0與1之間，若 $\gamma = 0$ 即代表無效率項無關緊要，此時採隨機邊界分析法的估計結果將等於普通最小平方法的估計結果；若 $\gamma = 1$ 則代表所有電力消費估計誤差均來自電力使用的無效率性。根據本文最大概似估計法檢定估計結果為顯著拒絕虛無假設($H_0: \gamma = 0$)，且 $\gamma = 0.9838^7$ ，表示產業結構變化與時間趨勢之無效率項對於衡量電力需求影響因素具重要性，應以隨機邊界分析法估計。

就效率水準而言，我國能源密集產業於1982-2017年平均潛在電力效率水準為0.81，顯示能源密集產業電力使用仍有19%的改善空間。另一方面，電力效率提升將影響我國能源密集產業的電力消費量下降，且由短期電力效率彈性估計結果，從而計算我國能源密集產

業短期電力消費反彈效果為2.44%，其值大於零，顯示短期而言實施相關電力效率提升政策雖可降低我國能源密集產業電力消費量，但實際電力節約量低於預期，產生部分反彈現象，故若欲在短期內達到預期節能目標，政府應加大節能措施力道。除此之外，我國能源密集產業長期電力效率反彈效果為-3.56%，其值小於零，表示長期下電力消費量下降幅度超過電力效率預期提升幅度，亦即有超額節電現象，故若實施相關節電政策以提升電力使用效率，對我國能源密集產業而言可能會產生額外的節電效果。其原因可能為任何的能源政策對節電影響有累積效果，且產業結構變化亦需要時間，另外，因我國《能源管理法》訂有相對應罰則，在能源密集產業用戶為避免受到懲罰下，會有意願在政府節能政策下進一步從事電力節約行為，因而產生高於預期下之節電量(參考表4)。

比較我國實證分析與國際文獻研析結果，產出水準對能源消費量具正向顯著影響，而價格對能源消費量呈反向關係，和過往相關研究結論具一致性，代表未來產業持續擴張之際，預期電力消費量仍將提升，惟善用價格機制作為政策工具，則可有效抑低電力消費量上揚，例如透過課徵碳稅或能源稅，讓能源價格反映實際使用成本、增進產業節能誘因。而在短期與長期之效率彈性方面，本文研究結論與Adetutu *et al.* (2016)相同。Adetutu *et al.* (2016)估計全球55個國家在1980-2010年整體平均短期能源效率反彈效果為90%，長期則為-36%，即短期下可能產生節能行為部分反彈現象，但長期而言能源消費降幅應會超過能源效率升幅，存在超額節電現象，因此，雖在短期內所達成之節能量可能未達原先預期，但隨時間經過，能源用戶將克服反彈效果問題，達到節能政策目標。

⁷根據Coelli (1995)，當 γ 愈靠近1時，以最大概似估計法估計之估計式偏誤較以校正後普通最小平方法估計小，且以概似比檢定、Wald檢定或第三動差檢定結果差異不大。

表4 能源密集產業電力消費短期與長期反彈效果估計結果：效率彈性估算法(本研究估算)

解釋變數	係數(t統計)
電力需求函數(被解釋變數：電力消費量)	
$Ln(\text{電力消費量}_t)$	0.0579*** (3.44)
$Ln(\text{工業生產指數})$	0.5684*** (30.91)
$Ln(\text{資本投入數量指數})$	0.0001 (0.02)
$Ln(\text{勞動投入數量指數})$	0.1537*** (7.11)
$Ln(\text{中間投入數量指數})$	0.4745** (2.56)
紡織成衣及服飾業	-1.8944*** (-26.92)
造紙紙製品及印刷出版業	-2.3187*** (-40.92)
化學及塑膠業	-0.2329*** (-6.60)
非金屬礦物製品製造業	-2.1388*** (-36.89)
基本金屬製造業	-1.0725*** (-28.41)
$Ln(\text{平均實質電力價格})$	-0.1539*** (-4.24)
$Ln(\text{電力效率})$	-0.9756*** (-40.46)
常數	-1.7760** (-2.12)
樣本數	215
Adj R-squared	0.9936
F統計量	2,759.33
效率彈性	反彈效果
短期	-0.9756 0.0244
長期	-1.0356 -0.0356

說明：***、**、*分別表示在1%、5%、10%的顯著水準下，拒絕虛無假設。

生產指數平均將增加0.59%的電力消費量，電價每上漲1%，電力需求量將減少0.17%，而勞動投入增加將提高能源密集產業的電力使用。

其次，我國能源密集產業於1982-2017年之平均潛在電力效率水準為0.81，顯示能源密集產業電力使用效率仍有19%改善空間，且整體平均短期電力效率反彈效果為2.44%，長期則為-3.56%，此研究結果與Adetutu *et al.* (2016)一致，即短期而言實施相關節電政策以促進電力效率提升雖可降低電力消費量，但電力效率提升將抵銷部分的電力消費量，導致實際電力節約量低於預期，產生部分反彈現象，惟長期下節電量將超過預期，使電力消費降低幅度高於電力效率提升幅度。因此，透過產業結構變化或節能政策工具，若欲在短期內達到預期節能目標，須加大其力道，長期而言，整體能源密集產業應能克服反彈效果問題，甚至達到超額節電的政策效果。

考量我國正持續推動能源轉型，且能源密集產業為國內主要耗能產業，預期未來工業生產仍將增加與廠商擴廠投資下，將導致電力需求提高，故本文建議能源價格宜合理反映其內部及外部成本，引導各產業有效使用能源。其次，除落實合理的能源價格政策外，政府宜促進低耗能產業發展，鼓勵業者採用高能源效率設備，並持續提高設備能源效率標準，特別是電子及電力機械器材業為能源密集產業中成長最為快速的業別，可藉由能源節約輔導、規管或獎勵機制等，強化其能源需求面管理措施，以及在產業持續成長進而增雇人力之際，宜透過教育和宣導增加人員之節能意識，並且同時導入能源管理師或節能服務團隊，強化能源管理事務。

5. 結論與建議

依本文建置我國能源密集產業電力需求隨機邊界函數之實證分析顯示，每提高1%的工業

誌謝

本文承蒙經濟部能源局、財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所支持，僅誌謝忱。

參考文獻

- 行政院主計總處，2019a。「物價指數資料庫」，<https://www.dgbas.gov.tw/lp.asp?ctNo=3091&CtUnit=333&BaseDSD=7> (資料擷取日期2019年8月)。
- 行政院主計總處，2019b。「國民所得及經濟成長統計資料庫」，<https://www.dgbas.gov.tw/ct.asp?xItem=33338&ctNode=3099&mp=1> (資料擷取日期2019年8月)。
- 宋楓，2014。「中國區域能源效率差異及影響因素分析」，《中國人民大學國家發展與戰略研究院—能源與資源戰略系列報告》，總第24期。
- 柏雲昌，李翊綸與陳玟綺，2010。「我國終端面能源效率之追蹤分析」，《中華民國能源經濟學會九十九年年會暨學術研討會論文集》，臺北：中華民國能源經濟學會。
- 梁啟源，2009a。「Industrial Structure Changes and Measurement of Total Factor Productivity Growth: The Krugman-Kim-Lau-Young Hypothesis Revisited」，《經濟論文》，37(3)，305-338。
- 梁啟源，2009b。「能源稅對臺灣能源需求及經濟之影響」，《臺灣經濟預測與政策》，40(1)，45-78。
- 梁啟源，鄭睿合與塗千慧等，2019。「工業尖離峰用電影響因子分析(期中報告)」，財團法人工業技術研究院委託研究計畫。
- 楊晴雯，2012。「能源效率之衡量及其與環境政策工具的關聯」，《經濟研究》，臺北大學經濟學系，48(2)，287-317。
- 經濟部，2019。節約能源法規及行政規則，參考網址：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/Law/LawsList.aspx?kind=7&menu_id=3303 (資料擷取日期2019年8月)。
- 經濟部能源局，2018。《能源轉型白皮書 - 2018.03初稿》，臺北：經濟部，https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=14974 (資料擷取日期2019年8月)。
- 經濟部能源局，2019。《能源統計年報資料庫》，https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/SubMenu.aspx?menu_id=6977 (資料擷取日期2019年8月)。
- 經濟部統計處，2019。「工業生產統計資料庫」，<https://dmz26.moea.gov.tw/GMWeb/investigate/InvestigateDB.aspx> (資料擷取日期2019年8月)。
- Adetutu, Morakinyo O., Anthony J. Glass and Thomas G. Weyman-Jones, 2016. "Economy-wide Estimates of Rebound Effects: Evidence from Panel Data," *The Energy Journal*, 37(3), 251-269.
- Aigner, Dennis J., C. A. Knox Lovell and Peter Schmidt, 1977. "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models," *Journal of Economics*, 6(1), 21-37.
- Amjadi, Golnaz, Tommy Lundgren and Lars Persson, 2018. "The Rebound Effect in Swedish Heavy Industry," *Energy Economics*, 71, 140-148.
- Brookes, Leonard G., 1978. "More on the Output Elasticity of Energy Consumption," *The Journal of Industrial Economics*, 21(1), 83-92.
- Coelli, Tim J., 1995. "Estimators and Hypothesis Tests for a Stochastic Frontier Function: A Monte Carlo Analysis," *Journal of Productivity Analysis*, 6(3), 247-268.
- De Borger, Bruno, Inge Mayeres, Stef Proost and Sandra Wouters, 1996. "Optimal Pricing of Urban Passenger Transport: A Simulation Exercise for Belgium," *Journal of Transport Economics and Policy*, 30(1), 31-54.
- De Borger, Bruno, Ismir Mulalic and Jan Rouwendal, 2016. "Measuring the Rebound

- Effect with Micro Data: A First Difference Approach,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 1-17.
- DOE, 2019. Energy Efficiency, Science & Innovation, U. S. Department of Energy on the World Wide Web: <https://www.energy.gov/science-innovation/energy-efficiency>.
- Filippini, Massimo and Lester C. Hunt, 2011. “Energy Demand and Energy Efficiency in the OECD Countries: a Stochastic Demand Frontier Approach,” *Energy Journal*, 32(2), 59-80.
- Gillingham, Kenneth, David Rapson and Gernot Wagner, 2016. “The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy,” *Association of Environmental and Resource Economists*, 10(1), 68-88.
- Greene, William H., 1990. “A Gamma-Distributed Stochastic Frontier Model,” *Journal of Econometrics*, 46(1/2), 141-164.
- Greene, William H., 1993. “The Econometric Approach to Efficiency Analysis,” in H.O. Fried, C.A.K. Lovell, and S.S. Schmidt (ed.), *The Measurement of Production Efficiency Techniques and Applications*, New York: Oxford University Press.
- Jevons, William Stanley, 1865. *The Coal Question*, London: Macmillan and Co.
- Jin, Taeyoung and Jinsoo Kim, 2019a, “A Comparative Study of Energy and Carbon Efficiency for Emerging Countries Using Panel Stochastic Frontier Analysis,” *Scientific reports*, 9(1), 6647.
- Jin, Taeyoung and Jinsoo Kim, 2019b. “A New Approach for Assessing the Macroeconomic Growth Energy Rebound Effect,” *Applied Energy*, 239(C), 192-200.
- Jondrow, James, C.A. Knox Lovell, Ivan S. Materov and Peter Schmidt, 1982. “On the Estimation of Technical Efficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model,” *Journal of Econometrics*, 19(2-3), 233-238.
- Jorgenson, Dale W. and Frank M. Gollop, 1980. “U.S. Productivity Growth by Industry, 1947-73,” in J. W. Kendrick and B. N. Vaccara, (ed.), *New Developments in Productivity Measurement and Analysis*, Chicago: University of Chicago Press.
- Keay, Malcolm, 2011. “Energy Efficiency - Should We Take It Seriously?” *Oxford Institute for Energy Studies*.
- Khazzoom, J. Daniel, 1980. “Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances,” *The Energy Journal*, 1(4), 21-40.
- Khazzoom, J. Daniel, 1987. “Energy Saving Resulting From The Adoption of More Efficient Appliances,” *The Energy Journal*, 8(4), 85-89.
- Koesler, Simon, Kim Swales and Karen Turner, 2016. “International Spillover and Rebound Effects from Increased Energy Efficiency in Germany,” *Energy Economics*, 54, 444-452.
- Kumbhakar, Subal C., Soumendra Ghosh and J. Thomas McGuckin, 1991, “A Generalized Production Frontier Approach for Estimating Determinants of Inefficiency in us Dairy Farms,” *Journal of Business and Economic Statistics*, 9(3), 279-286.
- Lane, Kevin and Armin Mayer, 2018. “Commentary: Efficiency Should Always Be the First Answer,” retrieved November 20, 2018 from IEA Newsroom on the World Wide Web: <https://www.iea.org/newsroom/news/2018/november/efficiency-should-always-be-the-first-answer-.html>.
- Llorca, Manuel and Tooraj Jamas, 2017. “Energy

- Efficiency and Rebound Effect in European Road Freight Transport,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101(C), 98-110.
- Lu, Ying-Ying, Yu Liu and Mei-Fang Zhou, 2017. “Rebound Effect of Improved Energy Efficiency for Different Energy Types: A General Equilibrium Analysis for China,” *Energy Economics*, 62, 248-256.
- Meeusen, Wim and Julien van Den Broeck, 1977. “Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Function with Composed Error,” *International Economic Review*, 18(2), 435-444.
- Orea, Luis, Manuel Llorca and Massimo Filippini, 2015. “A New Approach to Measuring the Rebound Effect Associated to Energy Efficiency Improvements: An Application to the US Residential Energy Demand,” *Energy Economics*, 49, 599-609.
- Pitt, Mark M. and Lung-Fei Lee, 1981. “The Measurement and Sources of Technical Inefficiency in the Indonesian Weaving Industry,” *Journal of Development Economics*, 9(1), 43-64.
- Reifschneider, David and Rodney Stevenson, 1991. “Systematic Departures from the Frontier: A Framework for the Analysis of Firm Inefficiency,” *International Economic Review*, 32(3), 715-723.
- Ritter, Christian and Léopold Simar, 1997. “Pitfalls of Normal-Gamma Stochastic Frontier Models,” *Journal of Productivity Analysis*, 8(2), 167-182.
- Saunders, Harry D., 1992. “The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth,” *Energy Journal*, 13(4), 131-148.
- Saunders, Harry D., 2000. “A View from the Macro Side: Rebound, Backfire, and Khazzoom-Brookes,” *Energy Policy*, 28(6-7), 439-449.
- Schmidt, Peter, 2011. “One-Step and Two-Step Estimation in SFA Models,” *Journal of Productivity Analysis*, 36(2), 201-203.
- Sorrell, Steven, 2007. “The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency,” *UK Energy Research Centre Report*.
- Wang, Hung-Jen and Peter Schmidt, 2002. “One-Step and Two-Step Estimation of the Effects of Exogenous Variables on Technical Efficiency Levels,” *Journal of Productivity Analysis*, 18(2), 129-144.
- WEC, 2010. “Energy Efficiency: A Recipe for Success - Executive Summary,” *World Energy Council*.
- Weyman-Jones, Thomas, Júlia Mendonça Boucinha, Catarina Feteira, Inácio and Pedro Miguel Martins, 2016. “Measuring Non-residential Electric Energy Efficiency in the Portuguese Economy,” *Energy Procedia*, 106, 2-13.
- Zhang, Jiangshan and Lawell Lin, 2017. “The Macroeconomic Rebound Effect in China,” *Energy Economics*, 67(C), 202-212.
- Zhang, Shanshan and Boqiang Lin, 2018. “Investigating the Rebound Effect in Road Transport System: Empirical Evidence from China,” *Energy Policy*, 112, 129-140.

Measurement of the Electricity Efficiency Improvement and Electricity Saving's Rebound Effect on Energy-Intensive Industries

Chian-Huei Tu¹ Ruei-He Jheng^{2*} Chi-Yuan Liang³
Hsin-Chiu Lin⁴ Hua-Wei Lin⁵

ABSTRACT

Most literatures had dealt with the impact of electricity price change on energy consumption, neglecting the rebound effect. However, it is important to consider the rebound effect for estimating the impact of various energy policy instruments on energy efficiency change correctly. This paper uses electricity consumption and related variables of the Taiwan's top six energy-intensive industries during 1982-2017. We employ the efficiency elasticity method and stochastic frontier approach to analyze electricity efficiency level and its rebound effect in Taiwan's energy-intensive industry. The main findings are: (1) If the industrial production index of the energy-intensive industry rises, electricity consumption would increase. Labor input has positive effect on electricity consumption. Additionally, Electricity price has negative effect on electricity consumption growth. (2) The average annual electricity efficiency is estimated as 0.81 during 1982-2017 in Taiwan's energy-intensive industry, implying that there is still 19% potential for electricity efficiency improvement if the output, capital, labor, intermediate, electricity price and industry structure are given. (3) The rebound effect is 2.44% in the short run and -3.56% in the long run. In other words, policy tools need extra efforts for achieving an energy saving target in the short run. In the long run, energy-intensive industry can overcome the rebound effect and even achieve a higher electricity saving target. As international energy prices fluctuate in the future, it is suggested that the government should stick to the floating electricity price adjustment mechanism to reflect its internal and external costs, guiding the industry to use electricity more efficiently. Additionally, to promote energy-intensive industries to achieve energy transformation goals, it is suggested that the government should continue to encourage operators to adopt high-energy efficiency equipment, and strengthen energy demand management measures through energy conservation counseling, regulations or incentive mechanisms, etc. Simultaneously, we should strengthen the awareness of energy conservation for employees and join energy managers or energy service teams to strengthen energy management affairs, so as to lower the electricity consumption.

Keywords: Energy Efficiency, Rebound Effect, Stochastic Frontier Approach, Efficiency Elasticity Method.

¹ Assistant Research Fellow, Chung-Hua Institution for Economic Research.

² Analyst, CIER.

³ Chair Professor of Management, National Central University & Consultant, CIER.

⁴ Senior Administrator, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.

⁵ Associate Researcher, GEL, ITRI.

* Corresponding Author, Phone: +886-2735-6006# 6232, E-mail: mike.jen@cier.edu.tw

Received Date: August 26, 2019

Revised Date: November 5, 2019

Accepted Date: November 15, 2019