

以KAYA恆等式分析我國2025年減碳目標之能源結構策略可行性

張志瑋¹ 葛復光² 柴蕙質^{3*} 吳雨寰⁴

摘要

根據「國家綠能低碳總行動方案」，我國節能目標為每年提高能源效率2%以上，使能源密集度於2025年相較2005年下降50%以上；減碳目標為全國CO₂排放量於2025年回到2000年排放量(208百萬公噸)。2015年1月召開之全國能源會議中，節能、減碳、各種能源結構方案亦為熱烈討論的議題，且眾說紛紜，但未見以通盤且簡明的方法，探討不同能源結構策略之可行性。Kaya恆等式為國際上常用探討二氧化碳排放來源之簡明方法，將二氧化碳排放來源拆解為能源使用、經濟產出及人口等因子，美國能源情報署(EIA)和國際能源總署(IEA)皆採用此方法分析二氧化碳排放的歷史資料或情境預測。本研究以指數分解方法分析我國碳排放因子增減之量化貢獻，並以Kaya恆等式分析在不同經濟成長假設與我國未來能源結構規劃下，能源缺口與低碳能源補足情形，以檢視不同能源結構策略之可行性。根據本研究分析結果，在高經濟成長的狀況下，減碳目標更為嚴峻，且使用單一低碳能源補足能源缺口，更是顯得極端且不易實現。在經濟成長與節能、減碳目標相衝突的情況下，須積極改善能源密集度，抑低能源需求，且多元發展低碳之替代能源，改變能源結構，才能在預期的經濟成長情況下，兼顧節能與減碳目標。

關鍵詞：kaya恆等式、節能目標、減碳目標、能源結構

1. 緒論

為因應氣候變遷日益嚴重的挑戰，全球暖化是目前國際間須共同面對並解決的問題。2009年底聯合國氣候變化綱要公約第15次締約國大會(COP15/CMP5)通過哥本哈根協議，各國自願性提出CO₂減量或減緩行動。我國為表達支持哥本哈根協議，向聯合國氣候變化綱要公約秘書處提出自願承諾，推動「我國溫

室氣體適當減緩行動」(Nationally Appropriate Mitigation Actions, NAMAs)，揭示於2020年達成溫室氣體排放總量比排放基線(Business as Usual, BAU)至少降低30%的目標(行政院環保署，2010)。另外行政院亦提出「國家綠能低碳總行動方案」訂立我國節能及減碳目標(行政院，2014)，其中節能目標為每年提高能源效率2%以上，使能源密集度於2025年相較2005年下降50%以上；減碳目標則為全國CO₂排放量於

¹ 行政院原子能委員會核能研究所 能經策略中心 前助理研發師

² 原能會核研所 能經策略中心 研究員兼副主任

³ 原能會核研所 能經策略中心 助理工程師

⁴ 原能會核研所 能經策略中心 助理研發師

*通訊作者, 電話: 03-4711400#2708, E-mail: HuiChih@iner.gov.tw

收到日期: 2016年03月18日

修正日期: 2016年05月12日

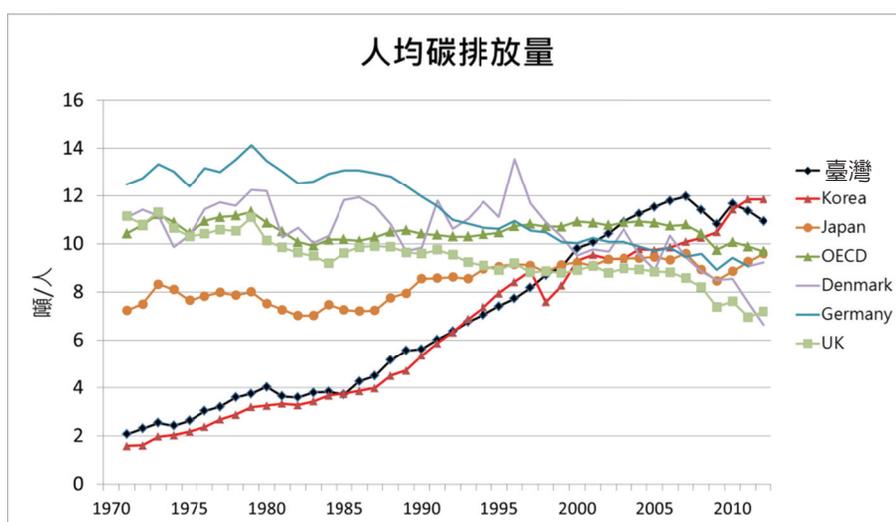
接受日期: 2016年06月29日

2025年回到2000年排放量(208百萬公噸)，本文將據此作為後續情境分析之政策目標假設¹。

回顧歷史統計數據(IEA, 2014a)，人均CO₂排放量方面，如圖1所示，我國與韓國CO₂排放逐年上升，且在2000年前成長趨勢相當一致，2000至2009年間韓國成長趨緩，略低於我國，另外我國於2000年時六輕廠開始商轉，也

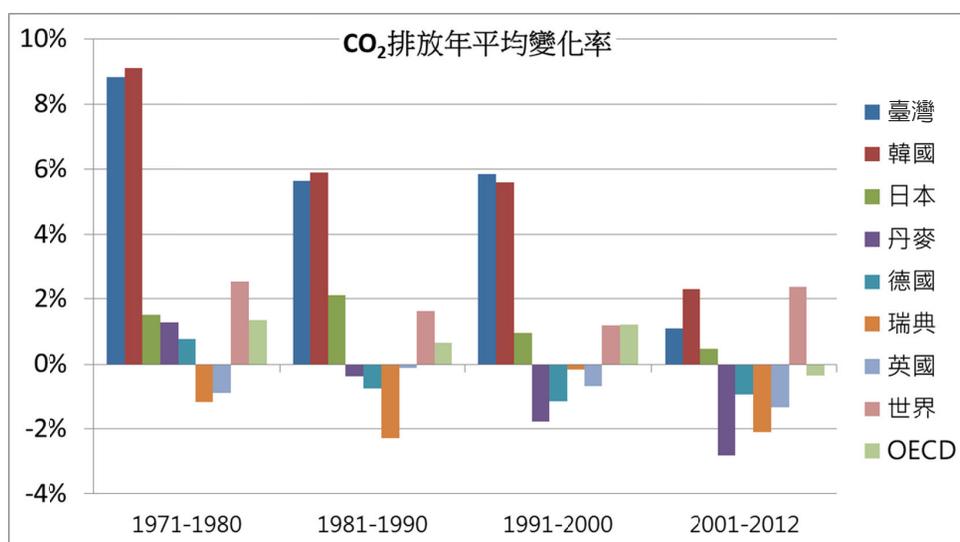
是成長趨勢居高不下的原因之一。反觀日、德、英等OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)先進國家，人均CO₂排放量均持平或逐年下降，於2007至2009年金融風暴影響期間，各國經濟不景氣，導致世界各國人均CO₂排放均呈現下降。

觀察各國的CO₂平均變化率，如圖2所示，



資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2015.10)

圖1 人均CO₂排放量歷史值



資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2015.10)

圖2 CO₂排放年均變化率

¹本文依據「國家綠能低碳總行動方案」之節能及減碳目標作為2025年情境模擬目標。2015年9月我國亦對外承諾INDC減量目標(2030年溫室氣體較BAU減量50%)，二者趨勢相近，INDC訂定之2030年目標或許可解讀為前述2025年目標與溫室氣體減量及管理法2050年目標間之階段性目標，但二者並無關連，未來政策若對2030年或2050年有較明確的規劃，亦可適用本研究簡明之方法分析。

在2000年以前韓國與我國都呈現正向，且改變量旗鼓相當，直到2001~2012年臺韓兩國均有明顯改善，且我國略低於韓國，但仍遠高於OECD國家許多。由以上歷史數據可知，如何有效減排，一直都是我國急須解決的問題，因此可透過Kaya指數分解了解我國排放之主要來源；然而在規劃能源政策之時，除訂定減量目標外，仍須考量能源安全及經濟層面，才能訂定國內外均能接受且確實可行之CO₂減量目標與能源政策，故本文亦透過Kaya恆等式分析我國減碳目標下各種能源結構策略之可行性，以作為能源政策規劃之用。

本文後續章節內容如下，第二節以Kaya恆等式所列之碳排放關鍵指標進行歷史數據回顧，藉由解讀歷史趨勢，觀察我國與國際間之歷史事件對個別指標的影響；第三節進行Kaya恆等式指數分解分析，利用指數分解方法探討我國與各國各項影響因子對碳排放的貢獻度；第四節利用Kaya恆等式進行能源結構與減碳目標之情境分析，採用簡明的控制方程式與國際通用、透明的參數，分析符合政策目標之情境下之能源缺口與低碳能源補足情形，並探討各方案之可行性。

2. Kaya恆等式應用文獻及關鍵指標回顧

指數分解是了解指數背後趨動因子的常用方法，日本學者Yoichi Kaya將之應用於碳排放及能源使用之研究上(Kaya, 1990)，Kaya恆等式將CO₂排放的關鍵指標拆解為(1)式，即將CO₂排放歸因於：人口、人均GDP、能源密集度與碳排放係數。能源密集度通常與產業結構及節能有關，而碳排放係數則與能源供給結構有關。Zhang and Ang (2001)、Ang (2000)等人皆曾比較不同的分解應用及方法論，但學者們對最佳方法尚無定論，本文採用之方法及結果於第3節作更深入的說明。

$$CO_2 = POP \times \left(\frac{GDP}{POP} \right) \times \left(\frac{Energy}{GDP} \right) \times \left(\frac{CO_2}{Energy} \right) \quad (1)$$

CO₂ = CO₂排放量

POP = 人口數

GDP = 國民生產毛額

Energy = 國內能源消費量

Energy / GDP = 能源密集度，每單位GDP之能源消費量(此指標越低表示能源使用效率越好)

CO₂ / Energy = 能源碳排放係數，每單位能源消費之CO₂排放量(此指標越低，表示該國採用較為潔淨之能源)

國際間許多重要的能源研究單位皆應用此方法，如跨政府氣候變化委員會(IPCC)，即多次以此用來進行情境分析(Girod *et al.*, 2009)、美國能源情報署(EIA)和國際能源總署(IEA)均引用此方法探討全球各國能源相關之CO₂排放來源，進行國際比較，並作為政策情境評估之工具。亞洲方面，Steckel *et al.* (2011)以中國歷史碳排放統計及推估結果進行Kaya恆等式分解分析，認為中國在全球減量目標扮演不可或缺的角色，當面對愈嚴格的減量目標時，碳排放密集度則愈顯重要。Kawase *et al.* (2006)即應用延伸的 (extended) Kaya恆等式，將碳排放分解為CCS (Carbon Capture and Storage, CCS)、碳密集度、能源效率、能源密集度及經濟活動，以討論日本的未來情景發展。除了Kaya提出的因素之外，指數分解亦可更一般化的應用於特定議題之趨動因素探討，例如Ma and Stern (2008)以Divisia指數分析探討中國能源密集度變化趨勢，認為技術進步是中國能源密集度改善之主要因素，產業結構改變次之，燃料替換則貢獻有限。Lin *et al.* (2006)以Divisia指數鑑別影響臺灣工業部門CO₂排放變化之關鍵因子，包括碳排放係數、能源密集度、產業結構及經濟成長，並與美國、日本、德國、荷蘭及韓國比較以瞭解排放趨勢及減量策略。Lu *et al.* (2007)則用此方法來探討日本、韓國、臺灣及德國之高速公路汽車碳排放五力影響，該研究將碳

排放分解為碳排放係數、汽車燃料密集度、車輛持有率(vehicle ownership)、人口密度及經濟成長，並分析經濟成長、運輸能源需求及碳排放之脫鉤效應，以瞭解各國之燃料效能(fuel performance)及減碳策略。本文的主要特色，便是以簡單明瞭、國際認可的Kaya恆等式檢視國內之減碳、低碳電源規劃、能源密集度改善及經濟成長等目標是否一致或可行，此一簡易的檢視方法在國內外文獻均尚未看到。後續便先對Kaya恆等式中的各項因素，進行我國與國際之歷史資料比較與回顧。

2.1 人均國民生產毛額

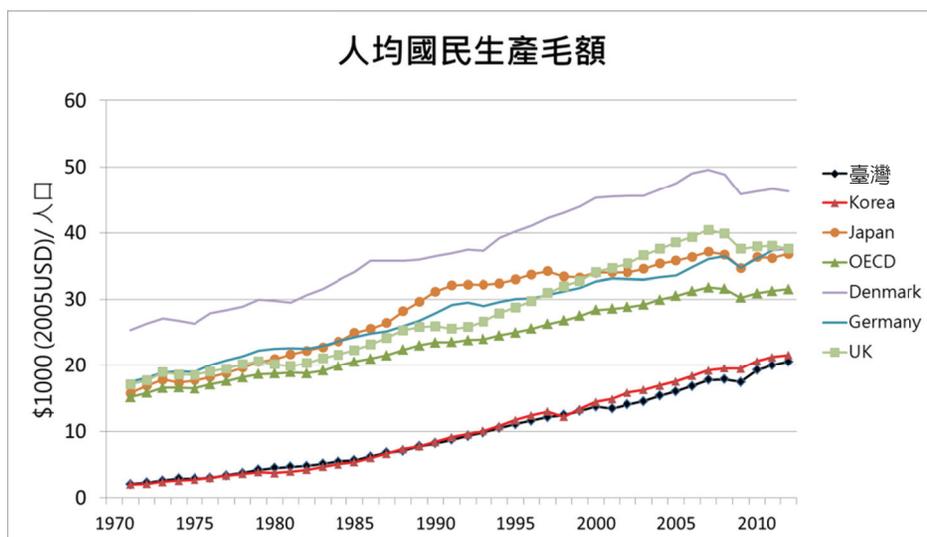
由各國人均國民生產毛額走勢圖(圖3)可得知，其他先進國家大幅高於我國與韓國。而各國於2009~2010年間均受到全球金融海嘯影響，人均GDP在該年均下跌。我國與韓國人均GDP之數值與成長率歷年來十分相近，但於1997年亞洲金融海嘯過後，韓國之人均GDP已超過我國。回顧我國近年來的人均GDP年平均成長率，近20年為4.02%，近10年為3.86%，近5年為2.94%，我國平均成長率逐年下降。

2.2 能源密集度

能源密集度改善係指創造每單位GDP所需之能源消費減少，故能源密集度越低越好。圖4為各國能源密集度的歷史值，在能源密集度方面，我國與韓國均曾先後惡化，但其他國家均逐年改善且優於臺韓兩國許多，2012年我國與韓國之能源密集度分別為OECD平均值的1.39倍與1.57倍。我國近5年來年均能源密集度改善率達到4.24%，近10年來則為每年2.98%，近20年為每年1.21%，可知近年來我國能源密集度改善率不錯。

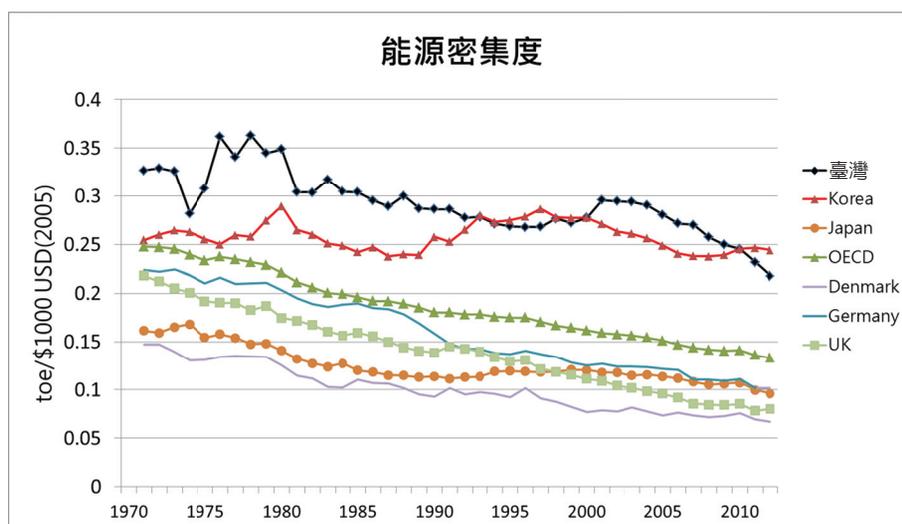
2.3 碳排放係數

圖5為各國的碳排放係數，我國碳排放係數於1980年代前後，因為核電廠陸續商轉而有效降低19%，且明顯低於OECD的平均值。其後因為不再新增核電機組及大幅擴大火力發電而逐年惡化，且高於大部分國家。韓國因近年大力發展核電，近年來碳排放係數已低於OECD平均值。另外我國於1985年左右，曾一度比丹麥低1/3，乃由於丹麥於1980-2000年間均以火力發電為主，火力發電佔該國發電量之80%以上，但近10年丹麥大力發展生質能源及風力，2013年風力已佔該國發電量之32%，再生能源總量佔47%(IEA, 2014b)，使丹麥碳排



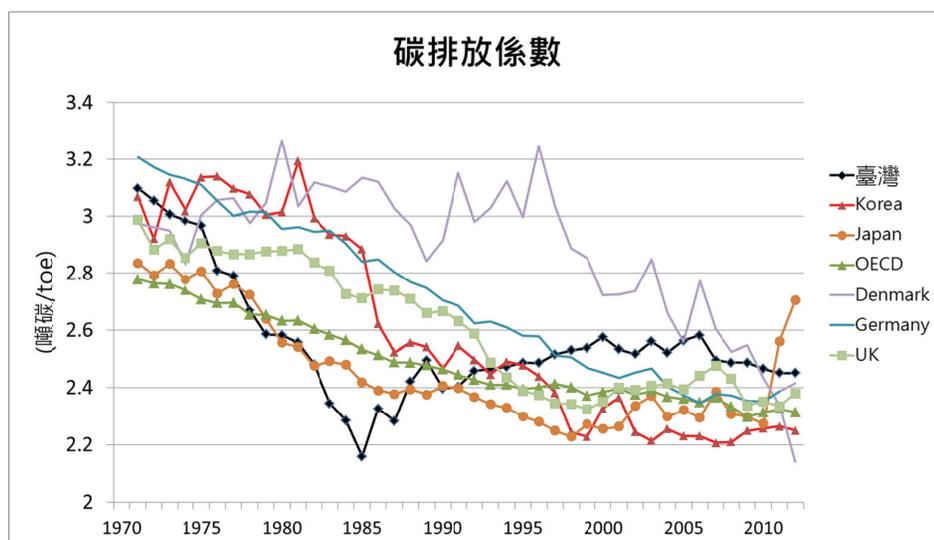
資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2015.10)

圖3 各國人均國民生產毛額



資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2015.10)

圖4 各國能源密集度歷史值



資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2015.10)

圖5 碳排放係數

放係數明顯改善，優於我國許多。日本碳排放係數於2011年福島核災後，以火力全面替代核能，使得日本碳排放係數快速惡化。

3. Kaya恆等式指數分解分析

指數分解法可以將指數的變化解成個別影響因子，並探討個別因子對指數變化的貢獻，此方法已長期應用於能源政策制定與分析(葛復光及邱戊吉，2011)。Ang (2000)指出理

想的分解法應具有四個性質：時間可逆(time-reversal)、循環性(Circular)、因素分解可逆(factor-reversal)和零質穩健(zero-value robust)。Ang (2000)亦比較不同的分解分析應用及方法論，將常用的分解方法分為兩大類：Laspeyers指數和Divisia指數。Laspeyers指數的概念是指變動其中一個因素，使其他因素不變，此時的變化量就是該因素的貢獻；Divisia指數則是將個別因素之變化率積分以得到歸因於該因素的變化量。另外依照變化量形式的不同，分解方

法又可以區分為加總法(additive approach)和乘積方法(multiplicative approach)兩類。

本研究採用Refined Laspeyers分解法(Ang, 2000)，Refined Laspeyers分解是Laspeyers分解法的改良，屬於加總分解法，可以確保分解的結果沒有殘差項，並理論推導與假設容易理解，同時滿足時間可逆、因素分解可逆、零值穩健三種特性。本研究將依照Kaya恆等式進行指數分解分析，探討人口、人均GDP、能源密集度及能源碳排放係數，四個指標對於CO₂排放的貢獻。

為方便後續公式推導將(1)式其簡化為

$$C = P \times (G/P) \times (E/G) \times (C/E) \quad (2)$$

其中C代表CO₂排放量，P代表總人口數，G為GDP，E為能源消費量，則G/P為人均GDP，E/G為能源密集度，而C/E則是能源碳排放係數。

令 $a = G/P$ ， $e = E/G$ ， $k = C/E$ ，C從時間0到時間t的變化量 ΔC 就可以表示成 $\Delta C = C_t - C_0 = (P_0 + \Delta P)(a_0 + \Delta a)(e_0 + \Delta e)(k_0 + \Delta k) - P_0 \times a_0 \times e_0 \times k_0$

將上式展開後可得

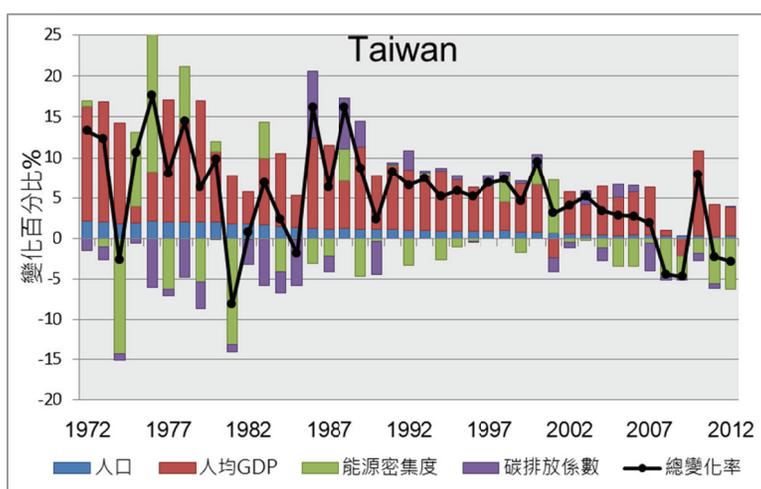
$$\begin{aligned} \Delta C = & \Delta P \cdot a_0 \cdot e_0 \cdot k_0 + P_0 \cdot \Delta a \cdot e_0 \cdot k_0 + a_0 \cdot P_0 \cdot \Delta e \cdot k_0 \\ & + a_0 \cdot P_0 \cdot e_0 \cdot \Delta k_0 + \dots + \Delta P \cdot a_0 \cdot \Delta e \cdot \Delta k + \\ & \Delta P \cdot \Delta a \cdot e_0 \cdot \Delta k + \dots + \Delta P \cdot \Delta a \cdot \Delta e \cdot k_0 + \Delta P \cdot \Delta a \cdot \Delta e \cdot \Delta k \end{aligned}$$

上式則將CO₂排放變化量分別歸因於四個因素，P、a、e、k，其總和等於總CO₂排放變化量。前四項都分別只有一個變動的因素(如 ΔP)，即可以明確地歸給相應的因素，第五項之後則代表各個因素的交互作用，假設在這些項中每個變動因素對CO₂排放的貢獻是相等的，(例如最後一項 $\Delta P \cdot \Delta a \cdot \Delta e \cdot \Delta k$ ，四個因素之交乘影響效果，其係數便為1/4)，於是便可以定義出各個因素變化對CO₂排放量的貢獻。將上式重新整理為 $\Delta C = P_c + a_c + e_c + k_c$ ，以碳排放係數k為例，其貢獻 k_c 為(3)式， P_c 、 a_c 、 e_c 則可依此類推

$$\begin{aligned} k_c = & P_0 \cdot a_0 \cdot e_0 \cdot \Delta k + 1/2 (\Delta P \cdot a_0 \cdot e_0 \cdot \Delta k + P_0 \cdot \Delta a \cdot e_0 \cdot \Delta k + P_0 \cdot a_0 \cdot \Delta e \cdot \Delta k) \\ & + 1/3 (\Delta P \cdot \Delta a \cdot e_0 \cdot \Delta k + P_0 \cdot \Delta a \cdot \Delta e \cdot \Delta k + \Delta P \cdot a_0 \cdot \Delta e \cdot \Delta k) + 1/4 (\Delta P \cdot \Delta a \cdot \Delta e \cdot \Delta k) \end{aligned} \quad (3)$$

3.1 Kaya指數分解分析結果

圖6為我國CO₂排放之指數分解分析，將CO₂排放貢獻因子依照Kaya恆等式分為人口、人均GDP、能源密集度、碳排放係數，將個別因子貢獻量加總便為CO₂排放年變化率，以2012年為例，CO₂排放變化率為-2.82%，人口、人均GDP、能源密集度、碳排放係數分別為0.88%、2.59%、-6.3%、0.01%。



資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2016.05)

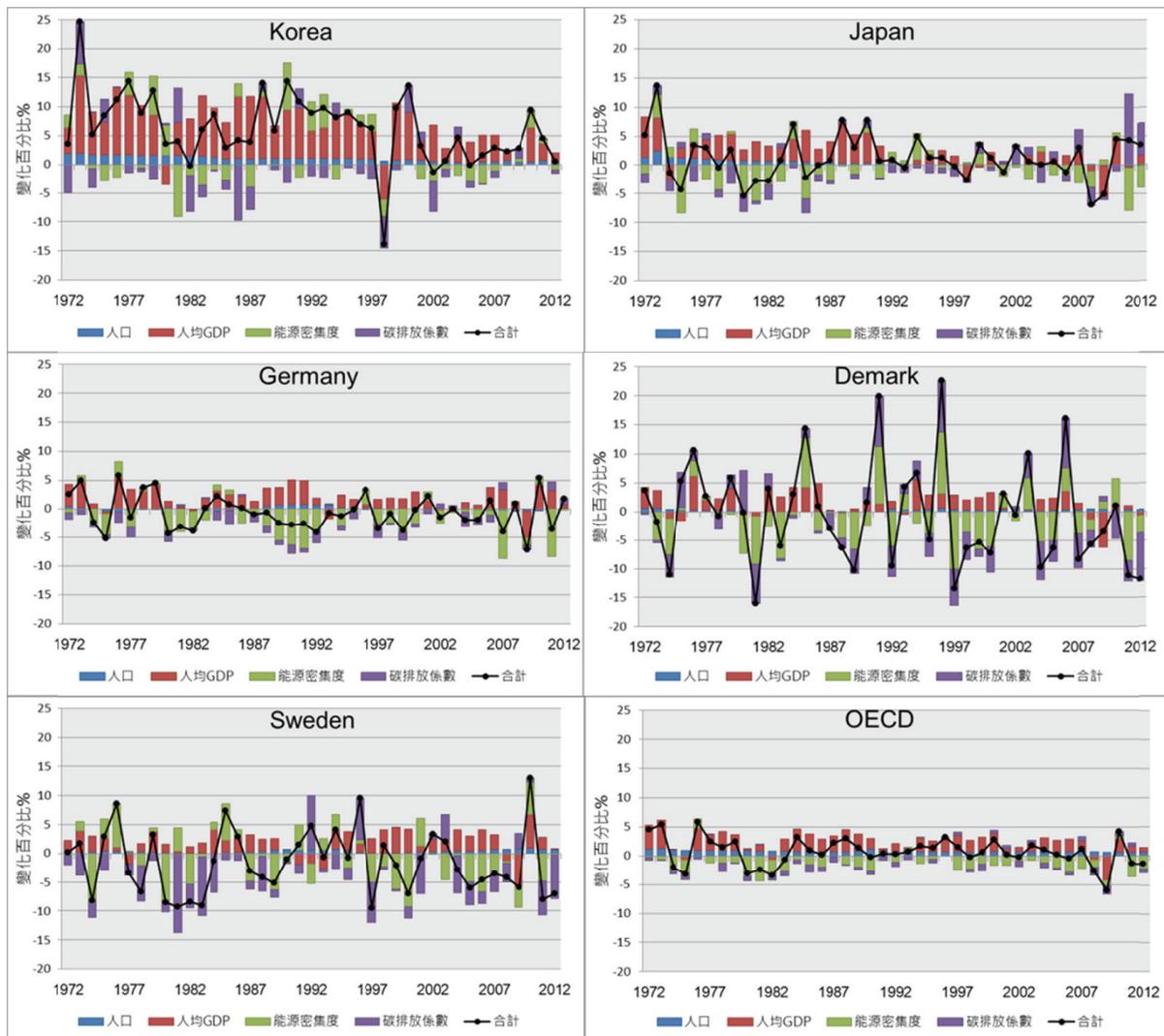
圖6 我國CO₂排放之指數分解分析

觀察圖6，我國CO₂排放負成長時通常與經濟表現不佳有關，80年代前期因核電廠陸續商轉，碳排放係數成為抑低碳排放之重要因子；1985-1989年間，核電廠前後發生故障，且用電需求上升，故以火力發電補足其缺口，燃煤發電量佔總發電量由25%上升至28%，燃油則由9%上升至25.7%，使得該期間碳排放係數惡化；2000年以後則因持續擴大天然氣使用，碳排放係數再度成為抑低CO₂排放之重要原因；2007-2009年碳排放係數改變原因為大潭燃氣複循環機組陸續商轉，另外2008-2009因金融海嘯造成能源需求下降，由於液化天然氣受制於不拿亦付款契約(take or pay)，使燃氣發電降幅

有限，進而使得高碳排放之燃煤與燃油發電減少；另外2008年油價狂飆亦使運輸之CO₂排放量減少。

2008-2009年間我國碳排放係數呈現負成長，一般認為是節能的成果，但由指數分解分析圖6中可知，2008年減碳來自於能源密集度下降，2009年則為經濟負成長及能源密集度下降。整體而言，我國人均GDP與CO₂排放之相關度極高，但能源密集度及碳排放係數的改善貢獻則相當有限，雖於2004-2012年間能源密集度均有改善，但人均GDP的增減仍主導CO₂排放量。

由圖7可發現，韓國基本上與我國經濟情



資料來源：IEA, 2014a。核能研究所繪製(2015.10)

圖7 其他OECD國家CO₂排放之指數分解分析

況較為接近，均為經濟快速成長的國家，人均GDP的貢獻度亦很明顯，其長年平均能源密集度改善不及我國，但近年因發展核電，加上能源密集度改善顯著，進而有效抑低碳排放成長。日本能源密集度長期均為抑低因子，2011年福島核災後，可看到日本碳排放係數明顯造成CO₂排放量增加。德國在過去40年能源密集度年平均改善率為1.93%，雖然碳排放係數改善相對有限，但因經濟成長穩定，故能源密集度改善可有效抑低碳CO₂排放量。瑞典與丹麥在近年來大量採用再生能源，使得碳排放係數及能源密集度改善均高於人均GDP之貢獻，因此CO₂排放呈現負成長，丹麥於2011-2012年間再生能源發電占比分別為58%、49%，碳排放係數及能源密集度明顯改善，CO₂排放顯著下降。綜觀圖7其他OECD國家之指數分解分析結果，人均GDP雖為CO₂排放成長的重要影響因子，但因能源密集度的改善貢獻更大，而使得整體CO₂減少。

3.2 人均CO₂排放量與碳排放係數探討

由前一節的分析可知，除GDP外，碳排放係數的改變是主導我國的人均CO₂排放的另一個主要原因，以下將以部門別分析及比較各國的人均CO₂排放量，並且檢視我國的狀況。圖8為2012年各國人均CO₂排放量(含電及熱)²，我國與韓國仍為人均CO₂較高的國家，各國的運輸部門人均排放量均相當，主要與其他OECD國家的差距來自於工業部門的CO₂排放量，臺韓兩國工業部門均占大部分的比重，我國工業部門CO₂排放接近50%。

如前所述，影響我國碳排放係數的重點事件大多為發電結構的改善，探討CO₂與發電結構的狀態可由發電排放係數觀察(圖9)。我國發電排放係數在各國比較時始終高於其他國家，相較丹麥及瑞典等以再生能源發電為主的國家，電力排放係數較低，且逐年改善，另外，日本於福島核災後，火力發電代替原本的核能發電，因此發電排放係數明顯上升。

為探討發電排放係數的影響，本研究將圖8的人均CO₂排放量，分解成僅有電熱的部分如圖10，其中運輸部門大多採燃料直接燃燒，用電量較少故運輸部門貢獻極少。圖11則假設各

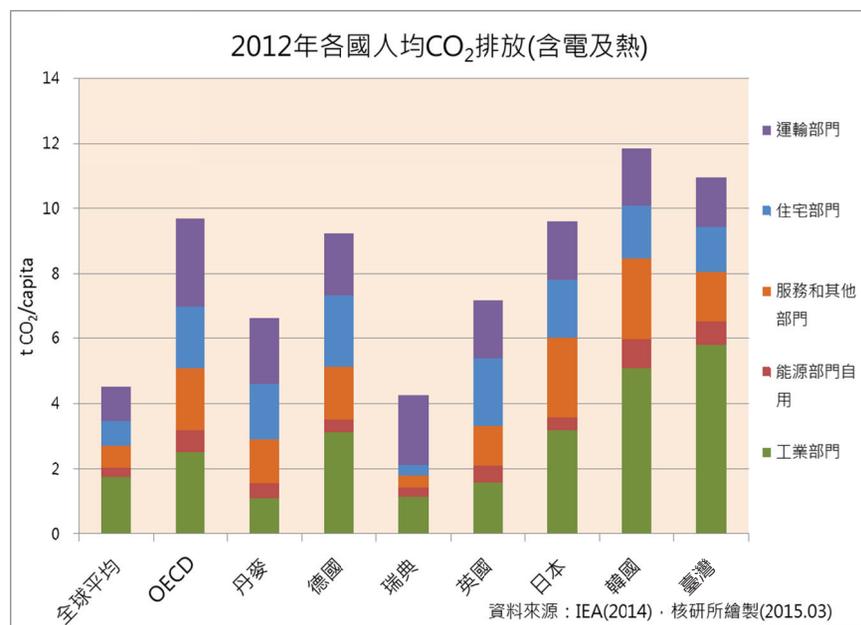


圖8 2012年各國人均CO₂排放(含電及熱)

² CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2012, IEA報告中，部門別的分析分為整體的CO₂排放量(含電及熱)，另一則為不含電及熱，用以區分電力使用外的燃料燃燒CO₂排放狀況。

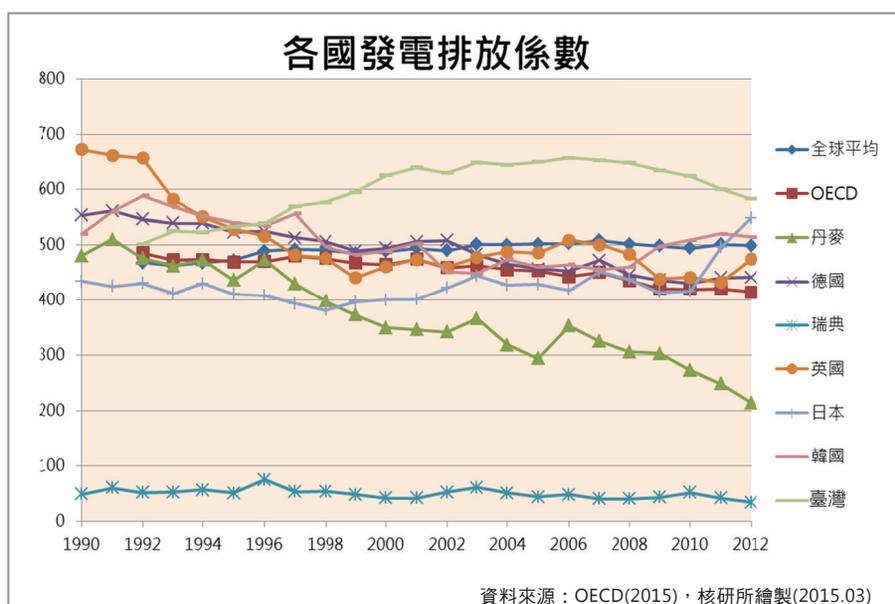


圖9 各國發電排放係數

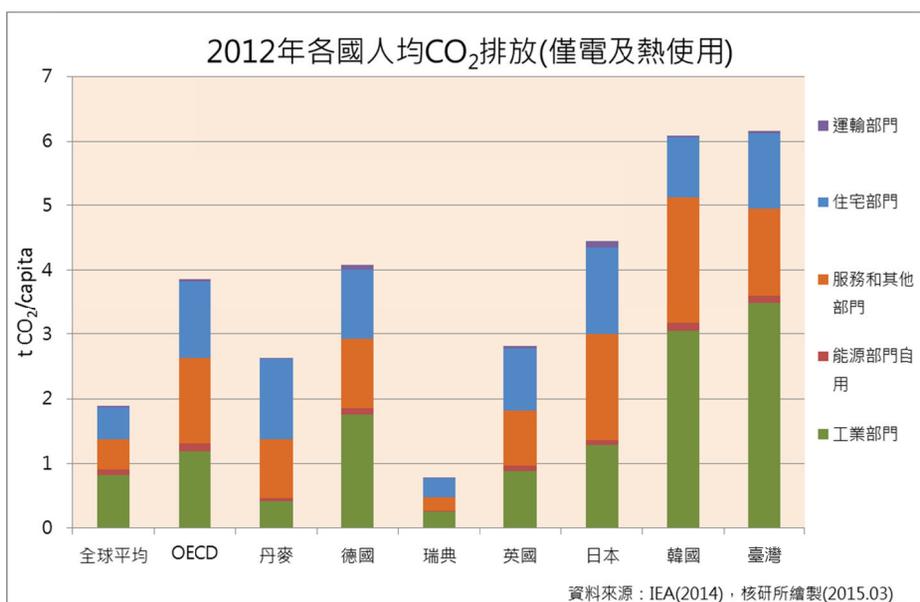


圖10 2012年各國人均CO₂排放(僅電及熱使用)

國的發電排放係數均與我國相同，凸顯出我國發電結構的問題。

4. 能源結構與減碳目標

本節以Kaya恆等式針對我國的減碳目標與能源結構進行分析，概算我國2025年減碳目標是否可行，由於本章分析跟人口因素無關，故將Kaya恆等式簡化為(4)式：

$$C = G \times (E/G) \times (C/E) \quad (4)$$

在我國節能減碳政策目標且GDP成長率已知的假設下，能源密集度已知、總排碳量已知，便只剩下能源供給結構與碳排放量之結構為未知，配合透明、國際通用的研究參數進行能源結構情境分析，提供簡明的分析結果，以作為能源政策之可行性評估使用。

4.1 分析假設與相關參數設定

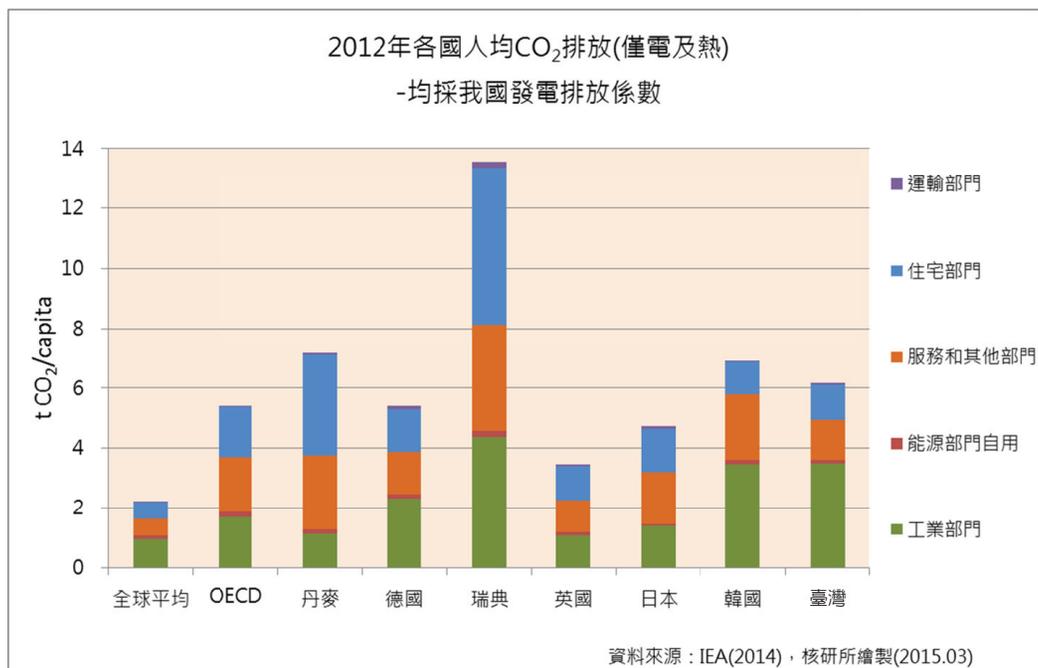


圖11 2012年各國人均CO₂排放 (僅電及熱使用，並均採用我國發電排放係數)

- (1) 節能目標：每年提高能源效率2%以上，使能源密集度於2025年相較2005年下降50%以上(行政院，2014)。
- (2) 減碳目標：全國CO₂排放減量，於2025年回到2000年排放量(208百萬公噸)(行政院，2014)。
- (3) 能源密集度：我國常用之能源密集度定義：為國內能源消費/GDP，但因應國際重要報告以便進行國際比較，本研究參考IEA之World Energy Outlook之能源密集度定義，採國際通用方式計算能源密集度：初級能源總供給(TPES)/GDP。
- (4) 煤碳排放係數為3.96 t-CO₂/toe；液化天然氣碳排放係數為2.35 t-CO₂/toe (能源局，2014)。
- (5) GDP成長率預測：本研究將GDP成長率分為高低案進行分析，高案為台電2015年之負載預測假設，低案則為NEP-II計畫之低案設定(葛復光等人，2015)，較Global Insight 2015年底發布之近10年預測平均成長率2.6%更為保守(如表1與圖12)。
- (6) 2013年原油及石油產品佔國內初級能源總供

表1 GDP成長率預測

	高案(台電10405甲案)	低案(NEP-II)
104年	3.78%	1.83%
105年	3.70%	1.83%
106年	3.81%	1.83%
107年	3.70%	1.83%
108年	3.63%	1.83%
109-113年	3.14%	1.83%
114年	2.79%	1.83%
平均GDP成長率	3.35%	1.83%
預測2025年GDP (100年實質新臺幣兆元)	22.26	18.92

資料來源：葛復光等人，2015

給之比例為39.31%，其平均碳排放係數為1.63 t-CO₂/toe，假設未來油類初級能源供給占比不變(即2025年佔比與2013年相同)。

(7) 再生能源發展預測

再生能源發展預測參照能源局之再生能源推廣目標之裝置容量與發電量，並應用此資料進行單位裝置容量之能源供給推估，如表2，2025年總裝置容量為12.51 GW。

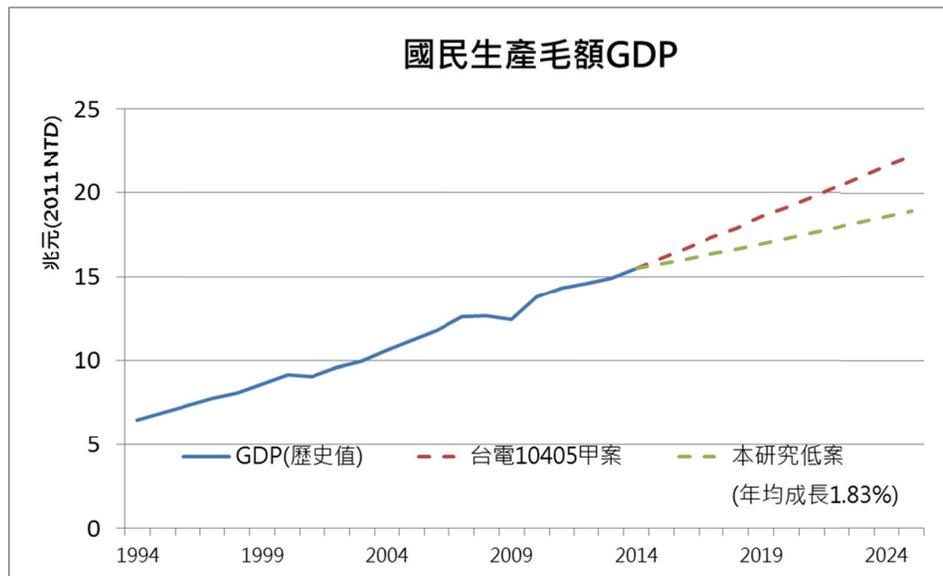


圖12 國民生產毛額趨勢(本研究繪製)

表2 再生能源推廣目標2025年裝置容量與發電量

	裝置容量 (MW)	發電量 (億度)
太陽光電	6,200	78
陸域風力	1,200	29
離岸風力	2,000	68
生質能&廢棄物	813	59
川流式水力	2,150	48
地熱	150	10
總和	12,513	292

資料來源：吳玉珍(2015)，核能研究所計算整理

(8) 天然氣能源供給量推估

單位天然氣對能源供給之推估，採用歷史值進行估算，2013年天然氣進口量為1,291.4萬噸(能源局，2015a)，天然氣之初級能源供給量為14.59 Mtoe (能源局，2015b)，推估天然氣之初級能源供給為112.97toe/萬噸。我國2025年天然氣進口量推估為1,700萬噸(林全能，2015)。

(9) 核能

單位裝置容量核能之能源供給推估，採用歷史值計算，2013年核能裝置容量為5.14

GW，初級能源供給量為10.85 Mtoe，核能之初級能源供給為2.11 Mtoe/GW。根據台電10405甲案-無核四電源開發方案，核一、二、三如期除役³，核四不商轉，本研究採用零核情境作為2025年之基本情境分析。

(10) 碳捕捉及封存(CCS)

假設碳捕捉率為85%，意即CCS電廠之碳排放係數僅為燃煤的15%，並假設CCS電廠的淨效率等同於核能電廠，進行估算。

4.2 控制方程式

利用Kaya恆等式，並在節能(能源密集度)與減碳目標與GDP已知的假設下，可將控制方程式寫為(5)式：

$$\begin{cases} CI = R_{oil} \times CI_{oil} + R_{LNG} \times CI_{LNG} + R_{coal} \times CI_{coal} \\ \quad + R_{ccs} \times CI_{ccs} \\ E_{total} = E_{oil} + E_{LNG} + E_{coal} + E_{Nuclear} + E_{Re} + E_{CCS} \end{cases} \quad (5)$$

其中CI表示碳排放係數，R表示單一能源佔總能源供給之佔比例，E為能源供給，下標則為能源別。

³最後一部核能機組，核三2號機於2025年5月除役。

4.3 Kaya能源結構分析結果

4.3.1 非核政策之能源缺口

依照我國節能目標，能源密集度2025年降至2005年之50%，若參考台電10405甲案之經濟成長狀況，可推算出初級能源總供給為99.53 Mtoe (下降8.43%)⁴。另外，依照我國減碳目標，CO₂排放量等同於2000年之CO₂排放量，則2025年之能源碳排放係數為2.14 t-CO₂/toe。因總能源碳排放係數為各型式能源之碳排放係數之加權平均，依照前述(6)~(9)之能源供給假設，石油佔初級能源供給之39.31%，天然氣佔19.3% (使用量擴大至1,700萬噸)，另再生能源(政策目標12.51 GW)與核能均可視為無碳能源。在滿足減碳目標下，可求得燃煤佔初級能源供給為26.55%，且尚有8.31 Mtoe之零碳能源缺口(約佔初級能源供給之8.35%)。

4.3.2 低碳能源補足能源缺口

為了達成減碳目標的前提下，能源缺口補足方案僅可採用低碳或零碳能源，才不會造成額外的CO₂排放量，使得節能及減碳目標可同時達成。本研究採用的低碳能源補足方案包含(1) 使用核能 (2) 擴大再生能源使用 (3) 增加天然氣使用量 (4) 碳捕捉及封存(CCS)等4種，圖13為在能源密集度年均改善率為3.4%時(2005-2025年間總改善率為50%)，使用不同補足方案的能源配比：

(1) 使用核能

在此情境下能源缺口約等於3.4 GW的核電，僅須延役部分核能機組，不須啟用核四，則可達成節能及減碳目標，但以核能補足又與非核的政策相衝突，是否使用核電或以其他低碳能源替代仍須思考。

(2) 擴大再生能源使用

若須完全以再生能源補足缺口，則2025年再生能源總裝置容量須達28.59 GW，為我國目前各項再生能源發展目標的2.29倍。若假設未來用電零成長，再生能源發電佔比將達到

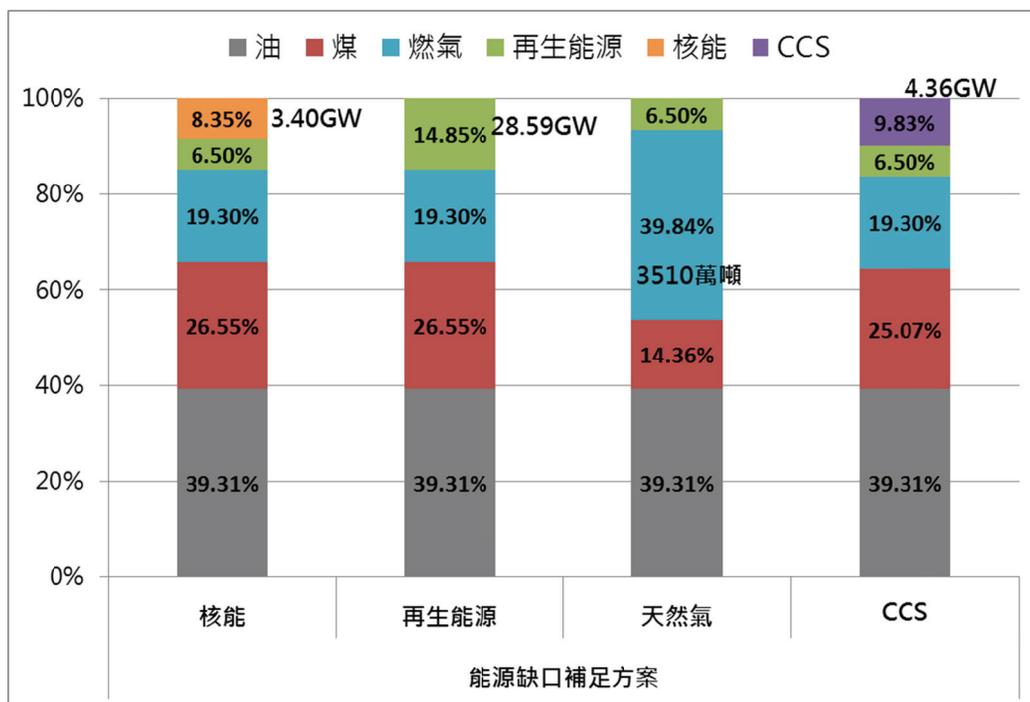


圖13 各低碳能源補足方案下之能源配比(本研究繪製)

⁴2013年之能源碳排放係數為2.36 t-CO₂/toe，初級能源總供給為108.7 Mtoe。

33%，因再生能源發電狀態不穩定，發電成本也較高，必然對我國的電力供給系統造成相當影響，因此不可能單以再生能源補足能源缺口。

(3) 增加天然氣使用量

天然氣雖為低碳能源，但其仍會排碳，在減碳目標固定的情況下，提高天然氣的使用，同時須減少煤的使用，才能符合減碳目標。由於我國天然氣均為進口，且天然氣成本高，若增加天然氣使用量，將增加能源成本，且限於進口合約及天然氣接收站的卸收能力，增加新的卸收站又須付出額外的建廠成本。從KAYA恆等式的推估結果得知，2025年需使用3510萬噸天然氣才能補足能源缺口，已是原先目標1,700萬噸的2.06倍。因此單以天然氣補足缺口，可行性並不高。

(4) 碳捕捉及封存CCS

假設碳捕捉技術可使排碳量減為原本燃煤的15%，但仍會排碳，亦需同時減少燃煤的比例。若CCS電廠的淨效率等同於核能發電廠，

則需4.36 GW的CCS，由於2025年達到如此高的CCS，難度極高，因此短期內勢必還是得靠其他成熟技術(如：再生能源及核電)才是可行的減碳手段。

4.3.3 能源密集度改善率及經濟成長敏感度分析

根據WEO2014 (IEA, 2014c)之450 ppm情境預測，全球2012-2030年能源密集度年均改善率為2.23%，美國為2.66%、歐盟2.23%、日本1.39%，反觀我國之政策目標能源密集度年均改善率達3.34%，實屬一嚴峻的目標。本研究以能源密集度年均改善率2%、3%進行敏感度分析，並針對GDP低成長的方案(年均成長率1.83%)，探討不同能源密集度改善率及經濟成長率下之我國能源缺口及其補足方案，敏感度分析結果列示於圖14及表3。

從Kaya恆等式分析結果可知，在GDP高案下，能源密集度改善率分別為3.4%、3%、2%時，所需之初級能源供給分別為99.5 Mtoe、

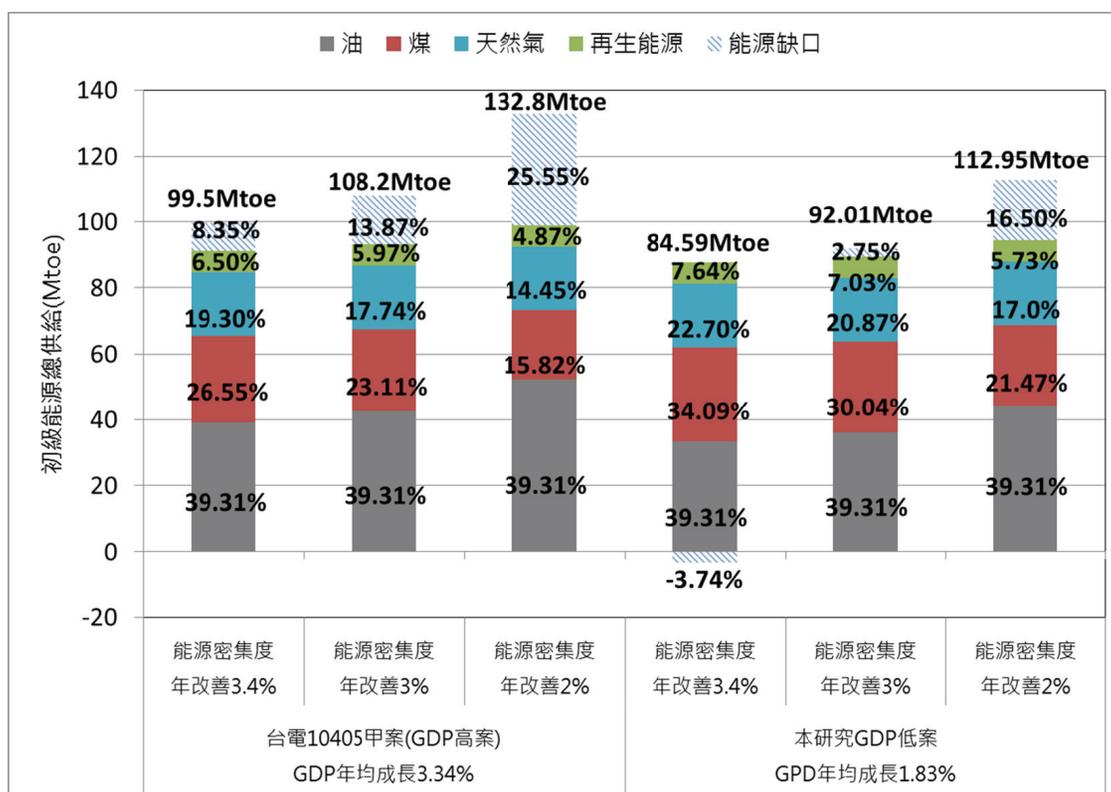


圖14 能源密集度及經濟成長敏感度分析(本研究繪製)

表3 能源密集度改善與其他減量方案搭配(本研究整理)

	GDP高案(台電10405甲案)			GDP低案(NEP-II)			我國目前之政策規劃
	3.4	3	2	3.4	3	2	
能源密集度年均改善率(%)	3.4	3	2	3.4	3	2	3.4
核能(GW)	3.4	7.12	16.1	-	1.2	8.83	0
天然氣(萬噸)	3,509	4,968	無解	1,011	2,251	無解	1,700
再生能源(GW)	28.59	41.53	78.18	6.38	17.41	48.57	12.51
CCS(GW)	4.6	8.37	18.9	-	1.41	10.4	0

註："- "表示不需核能及CCS。

108.2 Mtoe、132.8 Mtoe，改善率越差，初級能源供給越高，使得能源缺口更大。

在能源補足方案中，以GDP高案來看，能源密集度改善率為3%時，核能則須達到7.12 GW，大略等於核一、二、三延役並且核四商轉才可能達到此目標，天然氣甚至需要達到原先規劃的2.9倍，再生能源為3.3倍，可見能源密集度改善較差的狀況下，我國需要的低碳能源的量便多了許多。另在能源密集度改善率為2%之天然氣補足方案，因需要使用大量的天然氣，已使得CO₂排放量超過減碳目標，故不能完全依賴天然氣作為補足方案。

在GDP的敏感度分析中，GDP成長率越低，初級能源總供給也越低，甚至能源密集度改善率為3.4%的狀況下，本研究GDP低案之初級能源總供給由高案之99.5 Mtoe下降至低案84.59 Mtoe，並且無須再配合其它低碳方案，即可達到目標。但是犧牲經濟成長，降低初級能源供給，達成政策目標，是大家所不樂見的。

5. 能源政策探討

由Kaya恆等式，我們可知減碳、節能、經濟具密不可分的相互關係，因此能源政策規劃不應只考慮減碳目標，同時須要兼顧經濟發展與能源供給結構，才可能落實。由指數分解分析結果可知，人均GDP一直是左右我國CO₂排

放成長的最主要因子，即便2004至2008年間因產業結構調整，使能源密集度有明顯改善，但仍不足以抵銷人均GDP的排碳貢獻(葛復光及邱戊吉，2011)。反之碳排放係數是我國CO₂排放減量的重要因素，因此必須在能源結構改變上有積極的作為。

故本文以碳排放係數改善作為切入點進行探討，探討改善能源結構，提高低碳能源占比，本文分析之低碳能源方案則包含被各界寄予厚望的再生能源、核電、CCS、天然氣等。由歷史資料可知，核電的商轉有效改善我國的CO₂排放量，且在KAYA能源結構分析中，以核電作為補足方案時(能源密集度改善3.4%情境)，僅需延役部分現有核能機組，即可達成政策目標，但我國核能的去留一直具有極大爭議，在福島核災後更是傾向非核，在現今的環境下，核能反而是低碳能源中面臨較大阻礙的項目。

若改以天然氣補足能源缺口，以日本為例，在福島核災後，日本關閉所有核電廠，使用天然氣作為替代能源，2010至2012年間，日本的碳排放係數增加20%，另外因為進口大量的天然氣造成日本的財政負擔，由出超轉為入超(蔡翼澤，2014)。反觀我國，天然氣大多為進口(進口液化天然氣佔天然氣供給98%)，若大量增加燃氣佔比，除了造成我國經濟的負擔，也須同時即早建立天然氣儲存槽，擴大卸收能力，但此舉也會造成我國能源自主與能源安全惡化。

在再生能源的發展上，雖然德國、丹麥等OECD先進國家，再生能源蓬勃發展，有效改善碳排放係數，但歐盟國家再生能源發展優勢在於各國間有跨國電網，電力可以做為商品進出口，調配上更為彈性。反觀我國為島嶼型國家，無跨國電網支援，且地狹人稠，再生能源發展受限，並且再生能源發電成本較高，若完全以再生能源替代，用電成本會大幅上升，對我國產業必然造成衝擊。因此再生能源發展規劃，不僅須針對供給面，需求端的產業節能輔導等配套措施，亦須並行且循序漸進。

CCS的技術發展近年來受到碳價低迷與美國頁岩氣開採的影響，造成CCS發展受阻，並且CCS目前都仍於試驗階段(張志璋與張耀仁，2015)，我國CCS於短期內仍無法實質貢獻。各項低碳能源均有其發展的困難，僅使用單一技術進行能源缺口補足，將需要極高成本，因此不輕言放棄各項低碳能源，使其達到最大效益，仍是我國未來能源政策的重要議題。

制定能源政策時應全面的整合目標及實施策略，目標與策略須務實規劃，考量我國的資源條件及相關風險。我國2014年進口能源佔總能源供給為97.75%(能源局，2015a)，在考量我國能源安全情況下，確保能源多樣性與自主性，並且須建立長期的期程規劃，才有足夠的時間進行前置規劃、部屬、推動及政策宣導等。

6. 結論與建議

本研究以Kaya指數分解分析剖析我國目前能源政策、不同能源結構情境下減碳目標的可行性。Kaya恆等式能源結構分析，應用簡單且透明的參數及計算公式進行運算，探討我國節能減碳目標下，各種能源結構之減量方案是否可行，並針對不同經濟成長率及不同能源密集度改善率進行敏感度分析。研究結果顯示不論是核能、再生能源、天然氣、或CCS，我國未來若依賴單一方式來調整能源結構，皆面臨可

行性上之困難。在能源密集度敏感性分析中，能源密集度改善狀況越好，能源缺口越小；以低碳能源補足能源缺口時，若以單一能源進行補足，需要極大的低碳能源，如GDP高案下達到政策目標，須約3.4 GW核能，或是28.59 GW再生能源，在假設用電零成長的情況下，已佔總發電量之33%，因此多元發展低碳能源才是可能的解決方案。本文以未來各明確政策規劃進行情境設定，推估各情境下之碳排放量，採用之統計資料為年資料，其中能源密集度改善率已涵蓋產業結構之轉變，而需量反應或移轉尖離峰用電等短期之能源使用移轉則不在本文討論之範圍內。

滿足嚴峻的CO₂減量目標，仍須以確保國家能源安全與經濟發展為前提，進行能源政策規劃，此時多元發展低碳能源勢在必行。建議以務實且透明的方式規劃能源政策，積極改善能源密集度、規劃再生能源發展、擴大天然氣使用與CCS發展，核能的去留也是可以再考量的選項。唯有循序漸進且透明的能源政策規劃，才能提高能源政策的接受與執行度，並得以落實我國節能、減碳目標。

參考文獻

- 行政院，2014。國家綠能低碳總行動方案103年度工作計畫(核定本)。
- 行政院環境保護署，2010。我國溫室氣體適當減緩行動(NAMAs)成果展現暨後續規劃重點，行政院節能減碳推動會99年度第4次委員會議，99年7月
- 吳玉珍，2015。電力事業經營現況之挑戰與展望。中華民國104年7月。
- 林全能，2015。國際能源發展趨勢下，我國能源政策之調適與經濟發展，2015年石油市場之變革與展望研討會，臺北。
- 能源局，2014。我國燃料燃燒二氧化碳排放統計。中華民國103年7月。
- 能源局，2015a。能源統計手冊2014。中華民國

- 104年5月。
能源局，2015b。能源平衡表。
- 張志瑋、張耀仁，2015。頁岩氣革命對CCS發展之影響－FutureGen Dead! CCS何去何從，核研所。
- 葛復光、邱戊吉，2011。從Kaya恆等式反思我國能源政策規劃，中華民國能源經濟學會 CAEE99年度論文，臺北。
- 葛復光、劉家豪、鄧馨瀚、韓佳佑、蔡翼澤、陳中舜、柴蕙質、袁正達、孫廷瑞、卓金和、黃宗煌、蘇漢邦、楊晴雯、林芝瑋、陳文棠、陳建助，2015。我國能源配比初步評估，核研所研究報告。
- 蔡翼澤，2014。日本近期核能策略的轉變與啟示，核能研究所。
- Ang, B.W., 2000. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy* 25, pp.1149-1176.
- Girod, B., Wieka, A., Mieg, H., Hulme, M., 2009. The evolution of the IPCC's emissions scenarios, *Environmental Science & Policy* 12, pp.103-118.
- International Energy Agency (IEA), 2014a. CO₂ Emissions From Fuel Combustion Highlights 2014. OECD/IEA, Paris, France.
- International Energy Agency (IEA), 2014b. Electricity Information 2014. OECD/IEA, Paris, France.
- International Energy Agency (IEA), 2014c. World Energy Outlook. OECD/IEA, Paris, France.
- Kawasea, R., Matsuokaa, Y., Fujino, J., 2006. Decomposition analysis of CO₂ emission in long-term climate stabilization scenarios. *Energy Policy* 34, pp.2113-2122.
- Kaya, Y., 1990. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios. Paper Presented to the IPCC Energy and Industry subgroup, Responses Strategies working group, Paris.
- Lin, S. J., Lu, I. J., 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, pp.1499-1507.
- Lu, I.J., Lin, S. J., Lewis, C., 2007. Decomposition and decoupling effects of carbon dioxide emission from highway transportation in Taiwan, Germany, Japan and South Korea. *Energy Policy* 35, pp.3226-3235.
- Ma, C., Stern, D. I., 2008. China's changing energy intensity trend: A decomposition analysis. *Energy Economics* 30, pp.1037-1053.
- Steckel, J., Jakob, M., Marschinski, R., Luderer, G., 2011. From carbonization to decarbonization?-Past trends and future scenarios for China's CO₂ emissions. *Energy Policy*, 39, pp.3443-3455.
- Zhang, F. Q., Ang, B. W., 2001. Methodological issues in cross-country/region decomposition of energy and environmental indicators. *Energy Economics* 23, pp.179-190.

Future Energy Structure in Taiwan and the 2025 CO₂ Emissions Target- Scenario Analysis Based on Kaya Identity

Chih-Wei Chang¹ Fu-Kuang Ko² Hui-Chih Chai^{3*} Yu-Huan Wu⁴

ABSTRACT

According to Master Action Plan of Energy Conservation and Carbon Reduction, energy saving target shows that improving energy efficiency by 2% annually, and energy intensity in 2025 would reduce to less than 50% of 2005 levels. Taiwan aims to develop clean energy to reduce nationwide CO₂ emission to 2000 levels by 2025. During 2015 Energy Conference, many topics were discussed, such as energy saving, carbon reduction, new energy technologies, various energy structure, but lacking of comprehensive feasibility analysis. Many international studies used Kaya identity to recognize the relationship between socioeconomic, energy efficiency and CO₂ emission. This study applied Kaya index decomposition to analyze the contribution of carbon emission. Base on different economic growth and energy structure, this study proposed a simple and transparent methodology to investigate Taiwan's current policy targets of energy saving and carbon reduction. Then, we discussed the alternative low-carbon energy in different scenarios for filling the energy gap. The results show that the gap cannot be made up with single low-carbon energy in the case of high economic growth. Namely, Taiwan's carbon reduction target is really difficult to reach. To balance the conflict of economic growth, energy-saving and carbon reduction, this study suggested that Taiwan government should improve energy intensity, reduce energy demand and develop various low-carbon energies.

Keywords: Kaya identity, Carbon reduction target, Energy saving target, Energy structure

¹ Former Assistant Research & Development Engineer, Center of Energy Economics and Strategy Research, Institute of Nuclear Energy Research Atomic Energy Council, Executive Yuan.

² Deputy director, Center of Energy Economics and Strategy Research, INER.

³ Associate Engineer, Center of Energy Economics and Strategy Research, INER.

⁴ Assistant Research & Development Engineer, Center of Energy Economics and Strategy Research, INER.

*Corresponding Author, Phone: +886 3 4711400#.2708, E-mail: HuiChih@iner.gov.tw

Received Date: March 18, 2016

Revised Date: May 12, 2016

Accepted Date: June 29, 2016