

從 Kaya 恆等式分析我國各項能源指標對 CO₂ 排放的影響

陳治均、葛復光

核能研究所-能源經濟及策略研究中心

2013/06

前言

此簡析係根據先前研究³，進一步地更新研究參考數據而來，主要參考數據來源為 IEA 於 2012 年所公布之「CO₂ Emissions from Fuel Combustion - HIGHLIGHTS」，研究目的在於透過指數因素分解，了解各個關鍵的能源指標對於我國 CO₂ 排放的影響程度，同時也作跨國性之比較，包括產業結構與我國相似的韓國以及先進已開發國家的德國、丹麥、瑞典以及日本，並從指數分析中找出我國在減少 CO₂ 排放上，較為適合的思考方向。

一、我國與其他國 CO₂ 排放年平均變化率比較

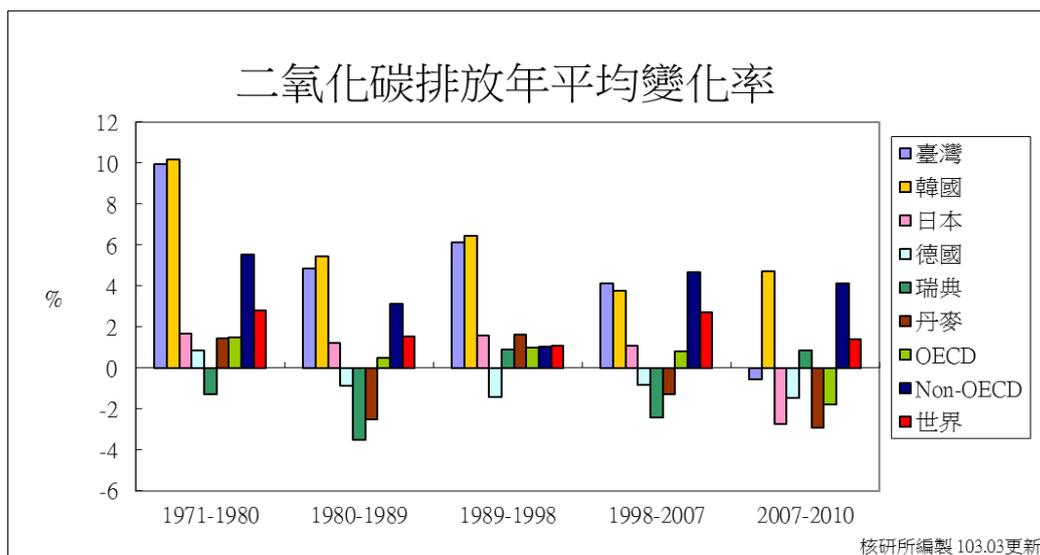


圖 3-1-1：我國與其他國家 CO₂ 排放年平均變化率比較

我國 2010 年人口佔全球人口總數的 0.34 %，但 CO₂ 的燃燒排放量卻佔了全球總排放量的 0.9 %，因此我國 CO₂ 減量責任應屬責無旁貸；圖 3-1-1 為我國及一些國家近 40 年之 CO₂ 排放年平均變化率比較，我國 1971 至 2010 期間 CO₂ 排放量年平均變化率約為 5.71 %，除韓國 6.3 % 略高於我國之外，我國近 40 年 CO₂ 排放之年平均變化率均遠高於世界平均以及 OECD 國家，而於 1998-2007 此 9 年間更只低於非 OECD 國家，2007-2010 年期間因受金融風暴之影響，我國 CO₂ 排放之年平均變化率開始呈現負值為 -0.58 %，其中於 2007-2008 年 CO₂ 排放變化率為 -4.39 %，2008-2009 年 CO₂ 排放變化率繼而下降為 -4.68 %，而於 2009-2010 年景氣開始復甦，因此 CO₂ 排放變化率回升至 7.85 %。

二、我國與其他國家 CO₂ 排放關鍵指標比較

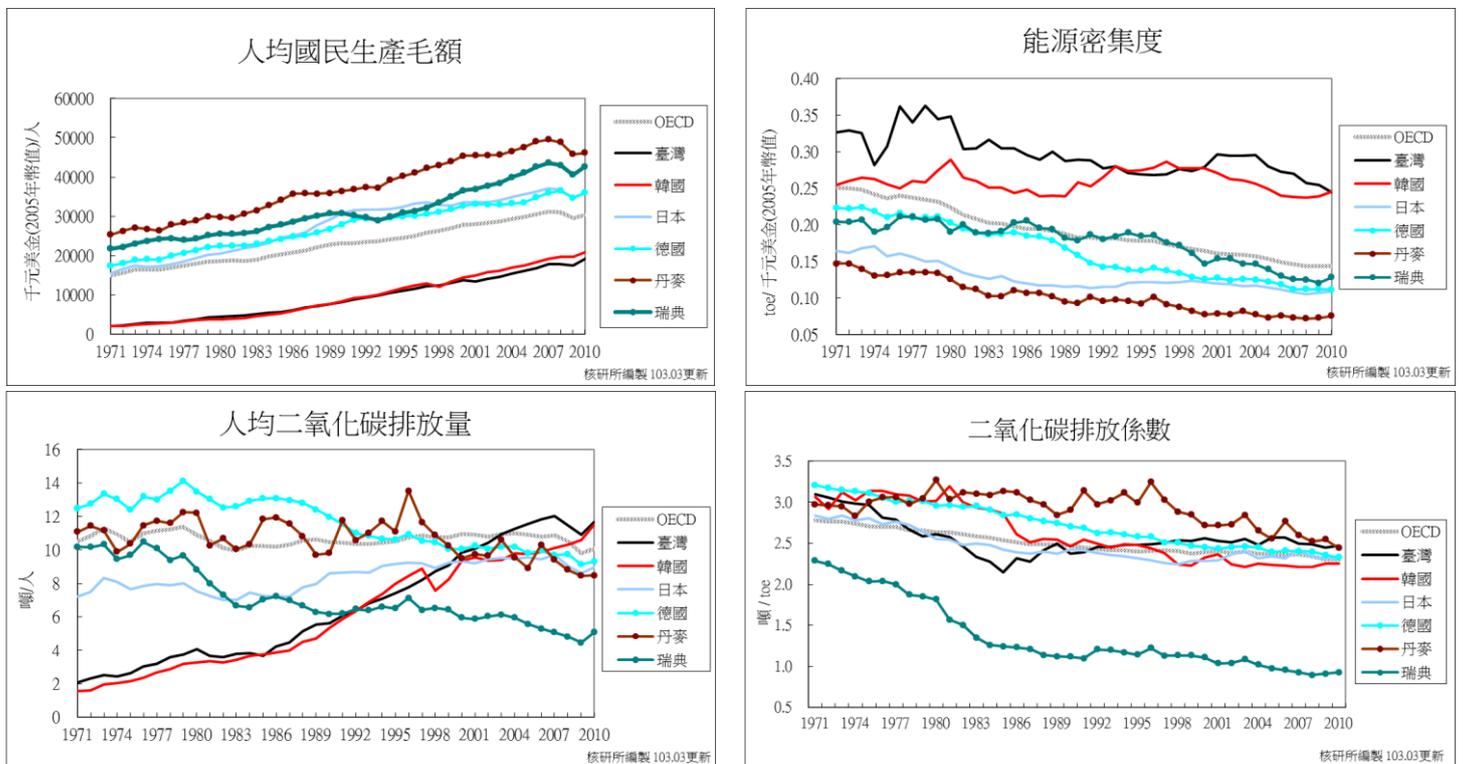


圖 3-1-2：我國與其他國家 CO₂ 排放關鍵指標比較

根據我國歷史統計數據，可以將其整理成 CO₂ 關鍵指標，以此作系統性的觀察(圖 3-1-2)。Kaya 恆等式簡單扼要地將 CO₂ 排放歸因於：人口、人均 GDP、能源密集度與碳排放係數，而藉著圖 3-1-2，可以觀察上述 CO₂ 排放關鍵指標於我國近 40 年發展下的變動趨勢。

(一) 人均國內生產毛額

從圖 3-1-2 顯示各國的人均 GDP 發展呈現逐年上升的趨勢，而我國從 1971 年之 2,051 千美元成長至 2010 年 19,254 千美元，成長幅度約 9.3 倍，只在 2008 與 2009 受到金融風暴的影響才略有下滑的趨勢，而其他國家的人均 GDP 發展盡皆有此現象，只是下滑幅度略有差異。

(二) 碳排放係數

我國在 1971-1990 年間核能電廠陸續開始商轉，因此能有效降低碳排放係數，且於 1980 年後期明顯低於 OECD 平均值，其後為了因應電力需求成長，但因未有新增核電機組，所以必須大幅擴大燃煤發電，進而導致了碳排放係數逐年升高，至 1998 年已經高於大部分 OECD 國家，而韓國由於持續且大量發展核能發電，以致於 1995 年時開始低於我國，於 1997 年時碳排放係數已低於 OECD 平均值；我國碳排放係數於 1980-1996 期間與丹麥仍有明顯差距，丹麥約高於我國 30%，但從 1996 年因丹麥大力發展再生能源，使得碳排放係數在爾後幾年快速下降，而我國則始終維持緩慢上升的趨勢，因此，於 2010 年時丹麥與我國差距已相當有限。

(三) 能源密集度

近 40 年裡我國以及韓國皆屬於開發中國家，國內產業結構與性質也相似，大都以高耗能的產業為國家發展主軸，因此相較於 OECD 國家均逐年改善的情況，我國與韓國始終維持於高段，而且都先後惡化過，於 2010 年時我國與韓國之能源密集度都約為 OECD 平均值之 1.7 倍，我國雖然近 6 年似有明顯改善，但若將觀察尺度延伸至 1971 年，過去 40 年我國能源密集度的年平均變化率為-0.74 % 而 OECD 國家為-1.41 %，其實改善幅度相較於 OECD 國家則相當有限；若觀察 1980-2010 年，則我國過去 30 年之年平均變化率為-0.9 %；而 1990-2010 之年平均變化率為-0.4 %。

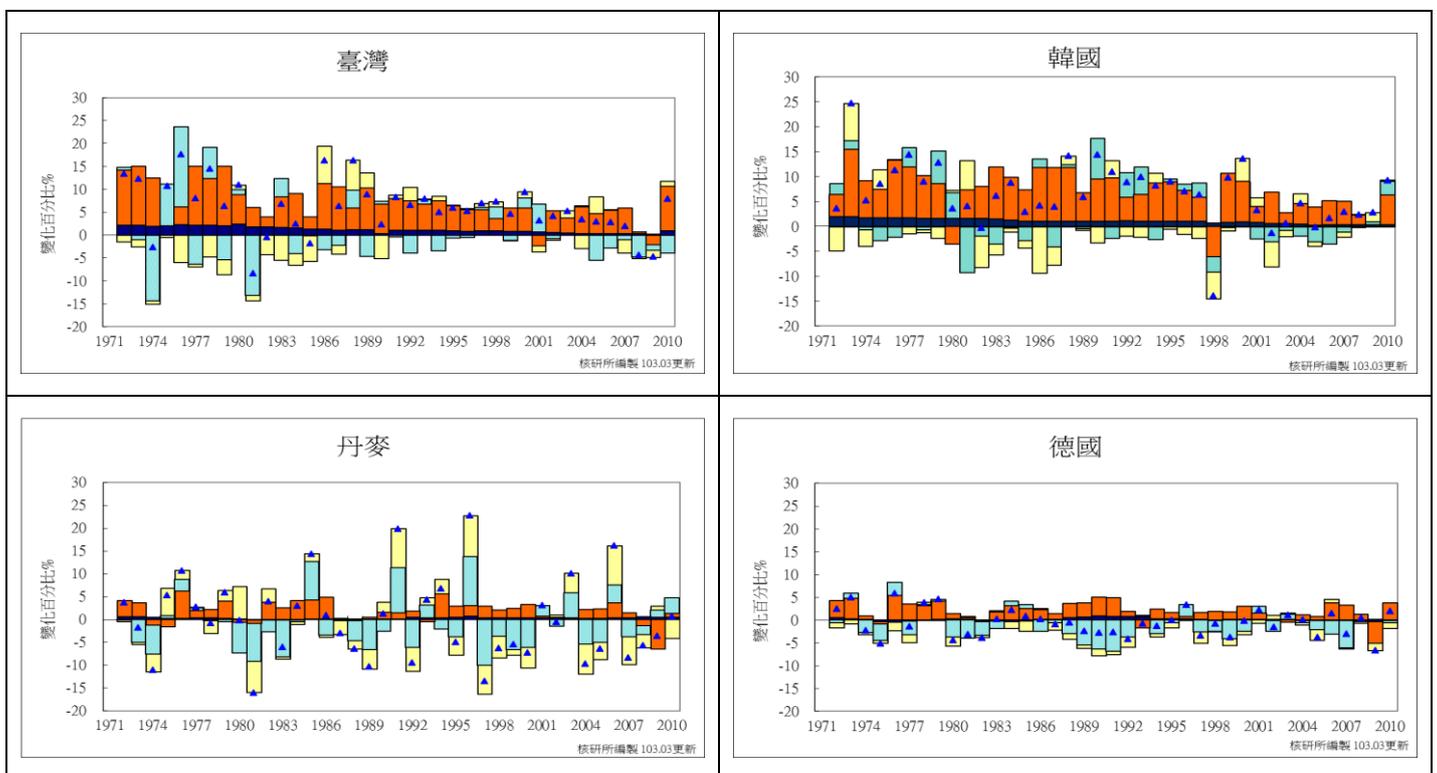
(四) 人均燃料燃燒二氧化碳排放量

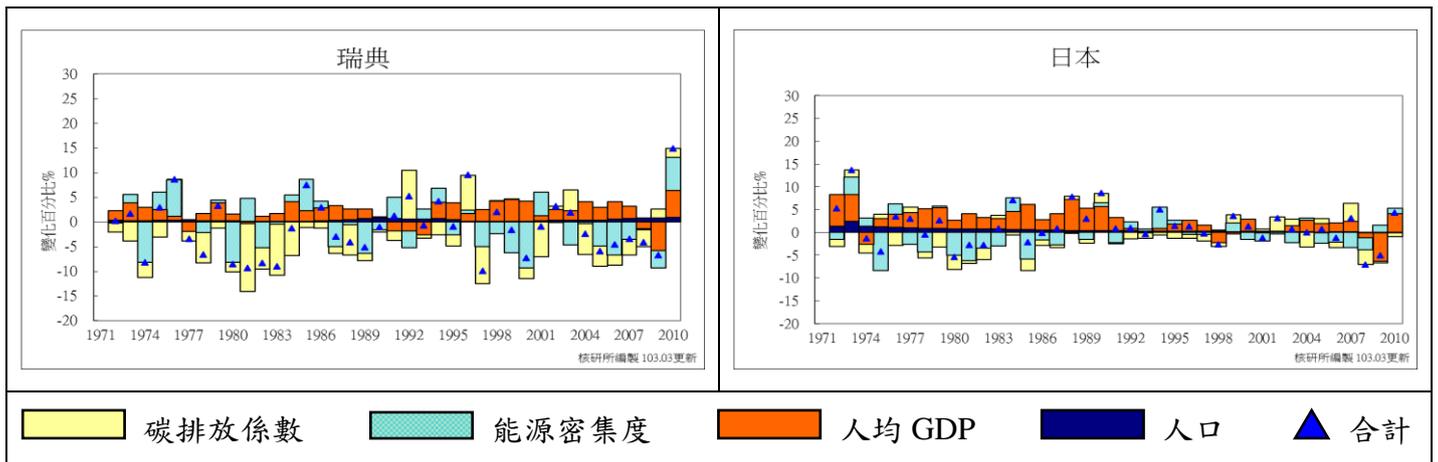
從圖 3-1-2 顯示我國與韓國在 1998 年前成長趨勢相當一致，但其後韓國明顯趨緩，我國卻仍維持持續上升的趨勢，至 2004 年時我國人均二氧化碳排放量到達 11.28 公噸 CO₂/人超越了 OECD 國家的 10.99 公噸 CO₂/人，爾後幾年依舊維持上升，直至 2007 年上升到 12.03 公噸 CO₂/人，而於 2008 發生金融風暴，降為 11.47 公噸 CO₂/人，而 2009 持續下降為 10.91 公噸 CO₂/人，隨後 2010 年因景氣復甦，人均二氧化碳排放量也隨之回升到 11.66 公噸 CO₂/人，我國與韓國在近 40 年裡，都係處在開發中國家邁向已開發國家的階段，於此過程中，對於能源需求逐年地急遽增加，我國近 40 年能源需求的年平均變化率為 6.32 % 而韓國為 7.14 %，且大量消耗的能源概都以化石燃料為主，因此也導致人均二氧化碳排放量快速的逐

年增長，我國近 40 年人均二氧化碳排放的年平均變化率為 4.52 % 而韓國為 5.22 %，相較於 OECD 國家，其對能源需求已趨於穩定狀態，OECD 國家近 40 年能源需求的年平均變化率約 1.21 %，而人均二氧化碳排放的年平均變化率為 -0.094 %。

三、指數因素分解比較與分析

圖 3-1-3 為我國與韓國、日本、德國、丹麥及瑞典 CO₂ 排放之指數分解分析，將 CO₂ 排放年變化率分解為碳排放係數、能源密集度、人均 GDP 及人口之貢獻，如我國 2010 年 CO₂ 排放年變化率為 7.85 %，其中碳排放係數、能源密集度、人均 GDP 及人口之貢獻分別為 1.1 %、-3.93 %、9.74 % 及 0.94 %；綜觀而言，人口因子的影響為最小。

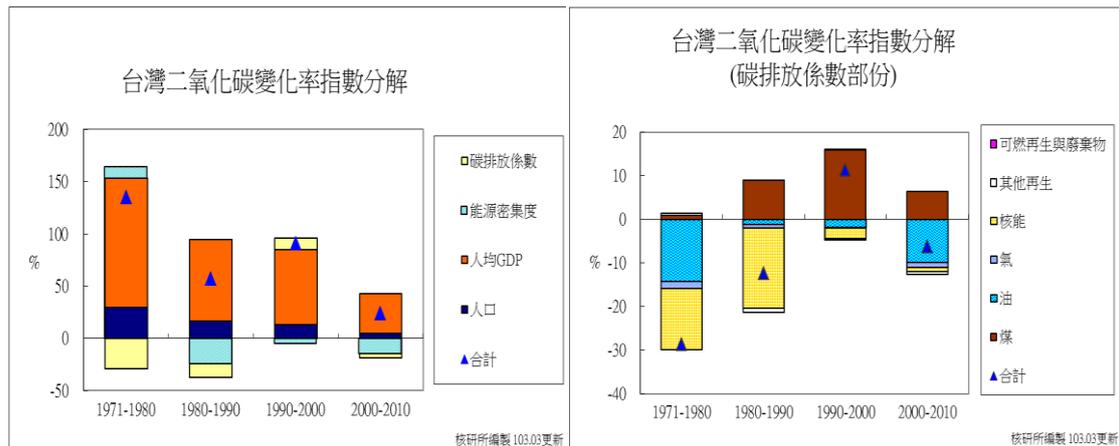


圖 3-1-3：不同國家之 CO₂ 排放指數分解

從圖 3-1-3 可進一步探討近 40 年的指數分解分析的結構，而我國與韓國係有其相似之處，具呈現了由於經濟快速成長，使得人均 GDP 逐年都處於正成長，因此，就我國與韓國而言，近 40 年來經濟成長為影響 CO₂ 排放大幅度增加的最主要因素；我國於 1980 年代前期因核能電廠陸續商轉，使得碳排放係數成為抑制 CO₂ 排放最重要因子；2000 年以後則因持續擴大天然氣使用，碳排放係數再成為抑制 CO₂ 排放重要因子之一。2007-2009 年碳排放係數改善是因大潭燃氣複循環機組陸續商轉，且 2008-2009 年因金融風暴導致了用電需求減少，使得具有高 CO₂ 排放之燃煤及燃油發電機組減少之故；除了 2008-2009 年因金融風暴導致 CO₂ 排放負成長外，我國近 10 年 CO₂ 排放概都處於正成長狀態，隨後 2010 年因景氣復甦，經濟情況改善，CO₂ 排放又大幅成長。整體而言，我國人均 GDP 對於 CO₂ 排放變化的影響最大，年平均變化率為 5.91%，但反觀能源密集度與碳排放係數的改善幅度卻相當有限，年平均變化率分別為 -0.74% 與 -0.57%，相較之下，可以得知我國 CO₂ 排放成長應仍持續增加；由圖 3-1-3 可知，我國近 5 年經

濟成長仍較 OECD 國家快，即便 2005-2010 年能源密集度有較明顯改善，其年平均變化率為-3.15%，但顯然不足以抵消年平均變化率為 3.82% 的人均 GDP 成長，所以於此 5 年間 CO₂ 排放成長仍舊緩慢增加。

而德國過去 40 年能源密集度年平均變化率為-1.78%，雖然碳排放係數改善有限，但因經濟成長相對緩慢，人均 GDP 年平均變化率為 1.8%，故能源密集度改善可有效抑制 CO₂ 排放成長。韓國基本上與我國均屬經濟成長快速發展之國家，其人均 GDP、能源密集度以及碳排放係數的年平均變化率，分別為 6.15%、-0.09% 以及-0.79%，由上述可見，韓國在能源密集度的改善不及我國，但近年因大量發展核能發電，進而能有效抑制 CO₂ 排放成長，且韓國從 1998 年起人均 CO₂ 排放已開始低於我國。日本的能源密集度始終維持在全球排序的前段，因此能源密集度再進一步改善的空間有限，所以很難再藉著能源密集度的改善來抑制 CO₂ 排放成長，而碳排放係數亦改善不足，故 CO₂ 仍持續成長。瑞典及丹麥在 1990 年代後期起，碳排放係數及能源密集度改善對於抑制 CO₂ 排放成長的貢獻均大於人均 GDP，因此 CO₂ 排放均於此時期大都呈現負成長。



4(a)

4(b)

圖 3-1-4：台灣 CO₂ 排放變化的指數分解

圖 3-1-4 與圖 3-1-3 類似，但觀察時間尺度自 1971 至 2010 分作 4 個區段，用以觀察此四個時間區段內之 CO₂ 排放變化率，從圖 3-1-4(a)可以看出人均 GDP 在過去 40 年一直是我國 CO₂ 排放成長率之最主要因子，而能源密集度以及排碳係數之減碳貢獻，相較之下就顯得並不顯著，此現象在 1990 年之後更是明顯。圖 3-1-4(b)為圖 3-1-4(a)中碳排放係數貢獻進一步分解為不同能源對碳排放成長率之貢獻，可以看出核電是 1971-2000 年之最主要減碳能源；油的碳排放係數對碳排放成長率貢獻為負值的原因係由於石油腦(輕油)，其主要用途為石化工業的進料，並非直接當燃料燃燒使用，因此石油腦不計算 CO₂ 排放，我國在 1971-1980 年間，以石油腦為進料的仁武大社以及林園石化工業中心相繼成立，所以導致油的碳排放係數變化率為明顯的負值，相同情形也可從 2000-2010 年間，台塑六輕計畫(一~四期)相繼完工觀察到；燃煤則一直是最主要之排碳能源，特別在 1990-2000 年間，因不再興建核能電廠而大量興建燃煤電廠，此現象更是明顯。

然而近年來政府大力推廣的天然氣與再生能源對碳排放量改善的貢獻均不顯著，最大的原因還是天然氣與再生能源佔能源供給比例較低。雖然天然氣的碳排放係數約只有煤的 60%，畢竟還是不如核能或再生能源等無碳排放的能源，因此其減碳貢獻並不明顯。

四、 結論

從指數因素分解的分析中不難看出，我國人均 GDP(經濟因素)對 CO₂ 排放影響甚鉅，佔了變化率絕大部分的比重，在追求經濟發展的前提之下，又要同時兼顧減量排放，對我國現今的政經情勢與產業結構似乎已很難達成，因此我國在碳排放係數以及能源密集度的改善上就必須更為著力，而要改善碳排放係數，整個發電的結構勢必要做調整，包括核能、再生能源以及 CCS 等減碳技術應都視為可行的方案，從上述分析已然看出核能發電對我國的減碳貢獻不容忽視，但我國現今的能源規劃係朝向減少核能而增加天然氣發電，就碳排放的角度而言，天然氣發電畢竟還是不如核能發電的無碳排放，此外天然氣還牽涉到整體國家能源安全與國內儲存、輸送設施的限制條件，有鑑於此，實有必要審慎地考量我國未來能源規劃的走向，而國際能源署 (IEA) 或 IPCC 均強調多元務實減碳，而非奢望只靠一種方法就解決問題，因此這些國際組織都提倡多元化的減碳方式，而只有多元化的能源組合才能真正有助於我國邁入低碳經濟社會。

致謝

感謝邱戊吉先生以及劉家豪博士協助審閱本文。

參考文獻

1. International Energy Agency (2012), CO₂ emissions from fuel combustion – highlights.
2. Kaya, (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 (mimeo).
3. Kawasea, R., Matsuokaa, Y., Fujino, J. (2006), Decomposition analysis of CO₂ emission in long-term climate stabilization scenarios. Energy Policy, 34, 2113-2122.