

主要國家二氧化碳排放量的影響因素實證 分析

經濟研究處/國內經濟科

蔡釗旻

2025 年 5 月

摘 要

隨全球經濟復甦，能源需求不斷攀升，導致二氧化碳排放量（以下簡稱碳排）同步增加，對氣候及環境永續造成重大挑戰。各國為兼顧經濟成長與減碳目標，多致力於提升能源效率與推動能源結構轉型。

本文以 Kaya 恆等式為理論基礎，並搭配對數平均迪氏指數（logarithmic mean divisia index，以下簡稱 LMDI）方法，探討 1990~2022 年臺灣、日本、南韓、中國、美國及德國等 6 個主要國家碳排的潛在因素，並使用脫鉤指標來分析碳排總量變動率與經濟成長率間之狀態。主要的實證結果與建議分項說明如下：

壹、實證結果

- 一、能源效率效果對碳排總量變動率多為負向貢獻，顯示提高能源效率係減碳的主要力量。樣本國家普遍透過能源效率的改善，有效地降低能源消耗量（以下簡稱能耗）與碳排，係各國政府減碳措施的核心要素。
- 二、人均所得效果對碳排總量變動率大多呈正向貢獻，反映著經濟成長雖提高人均所得水準，惟亦帶動能源需求與加劇減碳壓力。
- 三、碳密集度效果對碳排總量變動率多為正向貢獻，主因發電結構多以燃煤發電為主；惟對美國與德國而言，近年來，因發電結構的明顯轉變，該正向貢獻已有縮減或轉呈負向貢獻。
- 四、能源結構效果對碳排總量變動率大多呈負向貢獻，顯示能源結構轉型有助於減碳，惟各國結果存在明顯差異，例如，於 1990 年以來，德國致力擴大再生能源，減碳效果顯著，惟近年能源結構效果對減碳的力度有所減弱，而高碳能源依賴度較高的國家

(如臺灣、南韓、中國)，以往能源結構效果雖對減碳的貢獻有限，惟近年的負向貢獻幅度逐漸顯現。

五、就脫鉤指標的結果而言，在樣本期間內，所有的樣本國家的碳排與經濟成長間多呈脫鉤狀態，主要受惠於能源效率的明顯改善，惟於部分時間點（如亞洲金融危機、全球金融危機等），脫鉤狀態可能暫時轉變。

貳、政策意涵

- 一、為能夠進一步改善能源效率，政府的能源政策需要發揮關鍵的作用，並加強各產業在能源使用與節能管理上的成效，並凝聚社會各界對於實現淨零排放目標的支持與共識。
- 二、宜加速推動能源轉型，逐步淘汰高碳能源。同時，應積極布局低碳能源（如天然氣）的供給來源，強化能源供給韌性。
- 三、面對瞬息萬變的國際經濟與金融情勢，宜強化具高度彈性與韌性的能源系統，並動態調整能源政策，確保經濟與環境永續雙軌並進。

關鍵詞：碳排、Kaya 恆等式、對數平均迪氏指數（LMDI）、脫鉤指標、碳密集度效果、能源效率效果、能源結構效果、人均所得效果、人口規模效果

JEL 分類代號：Q1、Q50、Q58

目 次

壹、前言.....	1
貳、文獻回顧.....	3
一、樣本國家未含臺灣的文獻.....	3
(一) 與 Kaya 恆等式或 LMDI 有關之文獻.....	3
(二) 與脫鉤指標有關之文獻.....	7
二、樣本國家包含臺灣的文獻.....	9
(一) 與 Kaya 恆等式或 LMDI 有關之文獻.....	9
(二) 與脫鉤指標有關之文獻.....	12
參、研究方法.....	14
一、Kaya 恆等式 (Kaya identity) 與對數平均迪氏指數 (logarithmic mean divisia index, LMDI)	14
二、脫鉤指標 (decoupling indicator)	17
肆、資料與敘述統計及實證結果	20
一、資料與敘述統計	20
(一) 臺灣.....	21
(二) 日本.....	22
(三) 南韓.....	22
(四) 中國.....	24
(五) 美國.....	24

(六) 德國.....	25
二、實證結果.....	26
(一) 臺灣.....	26
(二) 日本.....	31
(三) 南韓.....	36
(四) 中國.....	41
(五) 美國.....	46
(六) 德國.....	50
伍、結論與政策建議.....	55
一、結論.....	55
二、政策建議.....	56
附錄一、各國敘述統計表.....	62

圖目次

圖 1、全球碳排總量及其年增率走勢圖	2
圖 2、樣本國家來源別之碳排比重	23
圖 3、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（臺灣）	27
圖 4、發電結構的變動情況-臺灣	27
圖 5、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-臺灣	30
圖 6、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（日本）	32
圖 7、發電結構的變動情況-日本	32
圖 8、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-日本	35
圖 9、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（南韓）	37
圖 10、發電結構的變動情況-南韓	37
圖 11、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-南韓	40
圖 12、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（中國）	43
圖 13、發電結構的變動情況-中國	43
圖 14、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-中國	45
圖 15、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（美國）	47
圖 16、發電結構的變動情況-美國	47
圖 17、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-美國	49
圖 18、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（德國）	51
圖 19、發電結構的變動情況-德國	51
圖 20、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-德國	53

表 目 次

表 1、Tapio (2005)脫鉤指標之判斷標準	18
表 2、變數與資料來源	20
表 3、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-臺灣.30	
表 4、1995~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-日本.34	
表 5、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-南韓.40	
表 6、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-中國.45	
表 7、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-美國.49	
表 8、1992~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-德國.53	
附錄表 1、敘述統計-臺灣	62
附錄表 2、敘述統計-日本	62
附錄表 3、敘述統計-南韓	63
附錄表 4、敘述統計-中國	63
附錄表 5、敘述統計-美國	64
附錄表 6、敘述統計-德國	64

壹、前言

面對全球氣候變遷的挑戰，國際社會早在 1992 年便已簽屬《聯合國氣候變化綱要公約（The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）》，以期改善全球暖化的情況。然而，該公約並未針對個別國家規定具體需要承擔的義務，亦未規定實施機制，缺少法律約束力，因此，成效不彰。

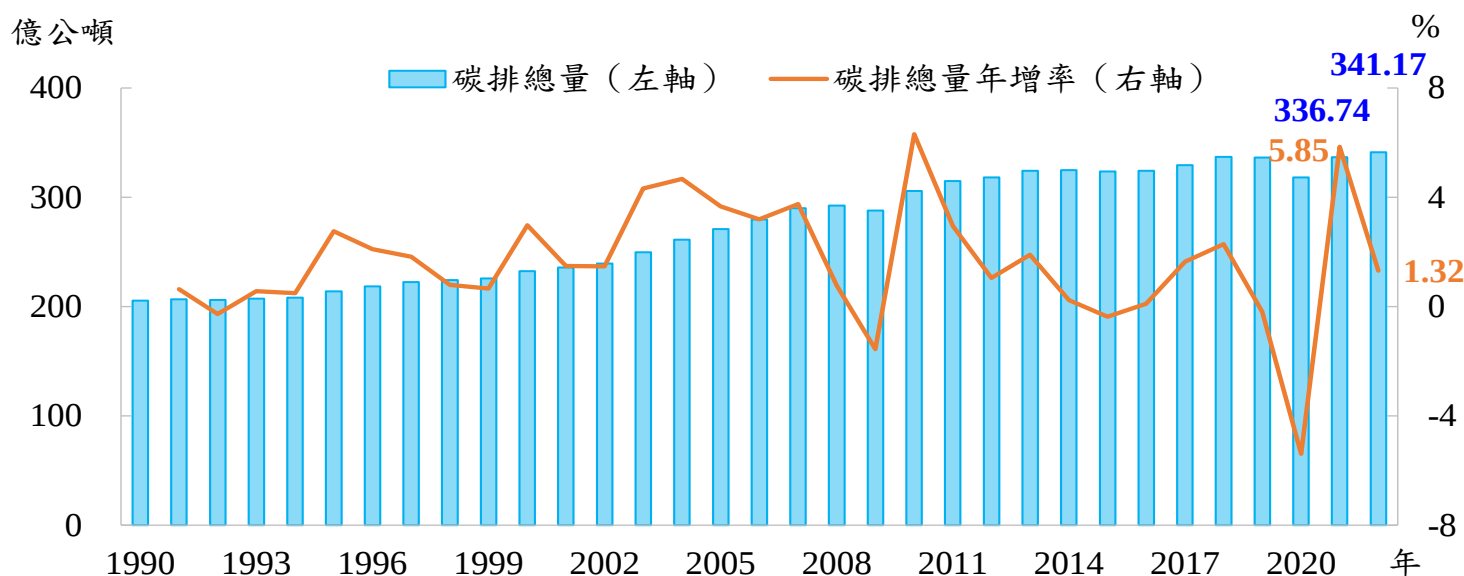
氣候變遷作為人類經濟活動的副產品，近年與氣候有關的災害事件變得頻繁，對世界各地帶來嚴重的災害，加以其具有不可逆性，各國均已意識到落實永續發展的必要性與迫切性；然而，UNEP (2022) 指出，¹ 雖各國採行多項措施來減少使用化石燃料，惟此一努力仍不足以將全球溫度上升幅度限制在 1.5°C 以內。

2022 年全球二氧化碳排放量（以下簡稱碳排）逾 341.17 億噸，創歷史新高，較 2021 年增加 4.43 億噸，惟年增率為 1.32%，低於 2021 年之 5.85%（2021 年碳排年增率明顯走高，主因 2020 年 COVID-19 疫情爆發，能源消耗量（以下簡稱能耗）與碳排大幅減少，致基期較低）。（見圖 1）

由於碳排仍持續增加，推升全球平均氣溫，加劇全球暖化的問題，導致近期極端的天氣型態頻繁發生，不僅影響自然生態與環境，亦衝擊全球經濟發展，由此可知，減少碳排仍為當前各國政府亟需努力的地方。再者，由於能源需求、經濟結構、人口密度等可能隨時間經過而轉變，以致碳排的變動情況亦有所改變，為制定有效的減碳政策，各國政府宜了解影響碳排的潛在因素及其動態情況，方能採行更有效的針對性措施。

¹ UNEP (2022), “Emissions Gap Report 2022: The Closing Window—Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies,” United Nations Environment Programme, Annual Report.

圖 1、全球碳排總量及其年增率走勢圖



註：最新資料僅至 2022 年。

資料來源：IEA。

另外，為評估各國在減碳措施的成效，多數文獻使用脫鉤指標（decoupling indicator）來評估此等減碳措施是否能取得經濟成長與環境間之平衡，並觀察脫鉤的動態情況，同時分析其背後的潛在因素，以利尋求更有效的政策與措施。

考慮到碳排受到多個因素（如能源結構、人口規模等）驅動，本文蒐集 1990~2022 年 6 個主要國家（臺灣、日本、南韓、中國、美國、德國）² 的碳排資料，以及採用 Kaya 恆等式（identity）作為分析碳排的基礎架構，並搭配對數平均迪氏指數（logarithmic mean divisia index，以下簡稱 LMDI）以 5 種效果（碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果、人均所得效果、人口規模效果）來探討各國的碳排情況。

此外，結合上述的 LMDI 結果並做跨國比較，再透過脫鉤指標的結果來觀察各國減碳措施的成效。借鏡各國的作法，有助於臺灣重新審視並進一步強化相關的減碳措施。

² 選取該 6 個國家係因我國能源署的能源知識庫大多探討此 6 個國家。

其餘章節內容：第貳章回顧相關文獻，第參章說明研究方法，第肆章為敘述統計與實證結果，最後則為結論與政策建議。

此外，本文的研究方法主要延續蔡釗旻（2025）（該文係分析主要國家能耗的影響因素），惟因能耗與碳排的定義不同，致 LMDI 方法分解後的潛在因素存在差異；另與蔡釗旻（2025）不同的是，本文的碳排分析著重於討論各國的發電結構，而在潛在效果上，則關注於碳密集度效果與能源結構效果（前者與能耗無關，而後者對能耗幾乎不具影響力）。

貳、文獻回顧

一、樣本國家未含臺灣的文獻

（一）與 Kaya 恆等式或 LMDI 有關之文獻

Henriques and Borowiecki (2017)以擴充的 Kaya 恆等式為基礎，並使用 LMDI 方法探討 1800 年以來，丹麥、法國、德國、義大利、荷蘭、葡萄牙、西班牙、瑞典、英國、美國、加拿大與日本碳排的驅動因素。結果發現，在人均所得較低下，自生質燃料（Biofuel）轉向化石燃料，致碳排增加；惟在人均所得較高下，因使用天然氣取代煤炭與石油係碳排減少的主因，該結果隱含著能源結構的轉變（即能源轉型）在改善碳排上的重要性。

自長期而言，技術進步改善能源效率，致碳排減少，過去幾十年來，技術變革與能源轉型已成為歐洲國家碳排減少的關鍵因素。事實上，在工業化初期，碳排會隨能源密集度上升（能源效率下降）而增加。英國與德國等早期屬於煤炭密集型國家亦有相同的情形，惟整體而言，能源密集度下降（即能源效率提升）有助於減少碳排。³

³ 能源密集度（energy intensity）：或稱能源強度，即單位 GDP 能耗，此為能源效率的指標，惟單位 GDP 能耗愈低（即能源密集度愈低），因每單位產出所消耗的能源愈少，意味著能源效率愈

Zhu and Du (2019)採用擴充的 Kaya 恆等式與 LMDI 方法分析 1990~2016 年澳洲、加拿大、中國、印度、俄羅斯、美國運輸部門碳排的潛在因素。結果顯示，在樣本期間，樣本國家的公路運輸業碳排持續上升，成長約 84.42%，其中，2016 年美國公路運輸業碳排約占樣本國家碳排總量的 54.24%，排名最高；其次為中國約 24.60%。

對所有的樣本國家而言，人均所得效果會增加公路運輸業的碳排，而碳排係數效果則較小。然而，運輸密集度效果與能源密集度效果在不同國家存在異質性，⁴ 二者對多數樣本國家公路運輸業的碳排存在抑制效果，惟對印度而言，運輸密集度上升會增加碳排。

對中國與俄羅斯而言，能源密集度效果上升會增加碳排。在人口規模效果方面，除俄羅斯外，其餘 5 國的人口規模效果均會增加碳排。因此，對樣本國家而言，仍宜致力推廣新能源汽車、加速淘汰老舊汽車、提高汽車排放標準等政策，降低公路運輸業的能源密集度，在發展經濟的同時，需要關注經濟成長對環境的影響。

Wang et al. (2020)以擴充的 Kaya 恆等式為基礎，並搭配 LMDI 方法分解 1997~2016 美國碳排總量與部門別碳排，並藉由情境分析來找尋 2020~2030 年可能的減碳路徑。結果指出，(1) 1997~2016 年美國碳排增加的主因係人均所得效果與人口規模效果，而技術面的效果（如能源效率、碳密集度效果（或稱碳排係數效果）⁵）則為關鍵的減碳驅動因素；(2) 結構效果（如產業結構、能源結構）雖有助於減少碳排，惟效果相對較小；(3) 情境分析的結果指出，在

高。

⁴ 運輸密集度：公路運輸週轉量占 GDP 的比重。能源密集度：公路運輸部門的能源消耗量占公路運輸週轉量的比率。所謂運輸週轉量係指，為運送旅客與貨物完成的運輸產品數量，其由旅客與貨物的運送量與運輸距離計算。

⁵ 碳密集度效果（carbon intensity effect）係指每消耗 1 單位燃料產生的二氧化碳排占能耗總量的比率，又稱為碳化指數（carbon index）、燃料係數效果（fuel coefficient effect）、碳排係數效果（the effect of carbon emissions coefficient of energy）。

中等與嚴格的情境下，能夠達成《聯合國氣候變遷綱要公約》公布的 2020 年目標。

2003 年英國公布能源白皮書，係全球第一個提出「低碳能源」與「低碳經濟」概念的國家，Wang and Song (2021)探討英國煤炭消耗量下降的潛在因素，藉由結合多區域投入產出分析與 LMDI 方法，自全球角度調查發現，在過去幾十年來，英國逐步淘汰煤炭，以致英國在生產面與消費面上的煤炭消耗量均下降，加以技術提升，致能源效率取得改善，碳排亦明顯減少。英國的經驗與作法可供目前朝能源轉型的國家參考。

Zhu (2023)採用 Kaya 恆等式與 LMDI 方法分析 2000~2015 年中國與 1971~1986 年日本碳排的潛在因素（碳密集度、能源效率、人均所得與人口規模）。對中國而言，於 2000~2015 年，人均所得效果係碳排增加的主因，顯示碳排會隨經濟成長而增加。

對中國與日本而言，碳密集度與能源效率在減少碳排上的效果最大。於 1971~1986 年，日本實施能源轉型，採用天然氣取代煤炭與石油，並已成為主要的發電來源，以致碳排明顯減少。對中國而言，雖風電、光電等快速發展，惟尚不足以取代傳統的化石燃料，能源轉型仍具有挑戰性。

Koilakou et al. (2023)以擴充的 Kaya 恆等式為基礎，同時採用 LMDI 方法來認定 2000~2017 年美國與德國之能耗與碳排的驅動因素。結果指出，兩國碳排減少的關鍵因素係能源效率的提升，且以工業部門最為明顯，其中，德國工業部門的能源密集度下降（即能源效率提升）約 34%，美國工業部門則下降約 12%。

特別的是，德國工業部門的比重增加，惟碳排明顯減少，主因能源結構效果（因能源轉型，碳排減少）抵銷人均所得效果（碳排

增加)，以致在經濟成長的情況下，單位 GDP 碳排仍下降。

再者，對美國與德國而言，運輸部門的減碳貢獻相當小，因此，必須針對該部門實施減碳措施，如使用更乾淨的能源（燃料轉換）、採用高效能的技術。另外，觀察人口規模效果發現，對美國而言，該效果相當明顯，惟對德國而言，則可忽略不計，主因德國的人口成長維持穩定，而美國人口成長則明顯增加。

Gołaś (2023)使用擴充的 Kaya 恆等式並搭配 LMDI 方法，以及脫鉤指標探討 2004~2020 年波蘭加入歐盟後碳排的情況。結果發現，樣本期間內，波蘭的能耗平均年增率為 0.8%，惟碳排的平均年增率為-0.7%，主因能源效率效果明顯減少碳排，雖碳密集度效果、能源結構效果均有助於減少碳排，惟其貢獻程度相對較小。

順帶一提，該文的脫鉤指標結果指出，在樣本期間，波蘭的碳排變動率與經濟成長率間大多呈現強脫鉤的狀態，此顯示該國政府在減碳措施的成效顯著，惟因脫鉤力度與碳排政策的效率均下降，主因能源結構的有利轉變與能源效率的改善速度均減緩。該結果意味著，若未能夠自根本上調整能源結構、未持續開發能源效率高的技術，則脫鉤狀態可能陷入停滯。

Magazzino et al. (2024)旨在分析 1990~2019 年經濟合作暨發展組織（Organization for Economic Cooperation and Development，以下簡稱 OECD）成員國碳排的影響因素。該文區分 6 個不同期間（1990~1994、1995~1999、2000~2004、2005~2009、2010~2014、2015~2019），再以擴充的 Kaya 恆等式為基礎，並搭配 LMDI 方法來觀察碳排情況。另採用脫鉤指標評估碳排與經濟成長間之脫鉤狀態。

結果發現，（1）於 1990~2004 年，人均所得效果與人口規模小果係碳排增加的主因；惟於 2005~2009 年，受能源效率效果的影響，

致碳排減少；(2) 於 1990~2004 年，多數樣本國家的碳排總量變動率與經濟成長率呈逆向脫鉤的狀態；嗣後，部分樣本國家轉呈強脫鉤狀態，而有部分樣本國家受到全球金融危機衝擊，致二者再度轉呈逆向脫鉤的狀態。

(二) 與脫鉤指標有關之文獻

脫鉤係指在各產業發展初期，碳排總量隨經濟成長而增加，惟當經濟與技術達到一定水準時，碳排總量反而呈現下降的趨勢，而經濟仍呈成長的情形。

Tapio (2005) 提出脫鉤的理論架構，定義脫鉤、掛鉤(coupling)、逆向脫鉤(negative decoupling)間之區別，並進一步細分為弱、強、擴張性(expansive)或衰退性(recessive)的脫鉤狀態(有關脫鉤狀態定義，見表 1)。⁶ 接著，分析 1970~2001 年歐盟 15 國的經濟成長與運輸部門的碳排間之脫鉤狀態，⁷ 結果指出，在客運方面，二者自逆向擴張性脫鉤轉變為擴張性掛鉤，在貨運方面，則自弱脫鉤轉變為逆向擴張性脫鉤。

Diakoulaki and Mandaraka (2007) 使用分解方法來探討 1990~2003 年 14 個歐盟國家工業部門碳排的變動情況，同時，評估在碳排總量變動率與工業部門產值成長率間之脫鉤狀態，並利用拉氏(Laspeyres)模型來認定潛在的驅動效果(如碳密集度、能源效率、能源結構、產業結構、經濟成長(GDP))來分析該狀態的潛在因素，以評估樣本國家在因應氣候變遷上的努力成果。

⁶ 在電子學中，將 coupling 翻譯成「耦合」，即結合的意思，為讓讀者容易理解，則翻譯成掛鉤。「強脫鉤」：能耗減少，惟經濟成長增加；「弱脫鉤」：能耗與經濟成長均增加，惟經濟成長增幅較大；「衰退性脫鉤」：能耗與經濟成長均減少，惟能耗減幅較大；「擴張性掛鉤」：能耗與經濟成長均增加，且增幅相近；「衰退性掛鉤」：能耗與經濟成長均減少，且減幅相近；「逆向強脫鉤」：能耗增加，惟經濟成長減少；「逆向弱脫鉤」：能耗與經濟成長均減少，惟經濟成長減幅較大；「逆向擴張性脫鉤」：能耗與經濟成長均增加，惟能耗增幅較大。

⁷ 德國、英國、瑞典、法國、比利時、荷蘭、丹麥、義大利、奧地利、芬蘭、希臘、愛爾蘭、葡萄牙、西班牙。

結果發現，僅 6 個樣本國家（愛爾蘭、瑞典、法國、丹麥、德國、芬蘭）的工業產值成長率與碳排總量變動率間呈脫鉤狀態，顯示此等國家的能源成功轉型或能源效率明顯改善，抑或係減碳措施成效佳；然而，多數樣本國家雖實施相關減碳措施，惟在《京都議定書》之後的期間並未觀察到明顯的減碳速度，顯示減碳措施尚不足以使二者呈現脫鉤狀態。

Andreoni and Galmarini (2012)以分解分析的方法來評估 1998-2006 年義大利經濟成長率與碳排總量變動率間之脫鉤狀態。在考慮 4 個潛在因素（碳密集度、能源效率、能源結構與經濟成長（GDP）），並分解 5 個主要部門（農業、工業、能源生產、運輸、服務業），以確定影響碳排的主要因素。

歐盟與義大利均實施多項能源政策，如歐盟排放交易計畫、自願協議與立法措施等，希望能夠提高能源效率與減少碳排；惟研究發現，在樣本期間內，義大利碳排總量變動率與經濟成長率間不存在強脫鉤狀態，主因經濟穩定成長與能源效率不佳造成碳排增加，該結果似意味著義大利的能源政策效果不彰。

Wang et al. (2018)比較 2000~2014 年美國與中國的碳排情況，以及利用 Tapio 脫鉤指標來評估碳排總量變動率與經濟成長率間之脫鉤狀態，並以擴充的 Kaya 恆等式為基礎，搭配 LMDI 方法探討脫鉤狀態的潛在驅動因素。結果發現，在樣本期間內，對中國而言，二者多呈擴張性掛鉤、弱脫鉤的狀態；對美國而言，二者多為弱脫鉤、強脫鉤的狀態。整體而言，人均所得與人口規模均會造成二者呈掛鉤狀態，而脫鉤狀態主要係受到能源效率與能源結構的影響；惟在不同時間點下，碳密集度對脫鉤狀態的貢獻效果存在差異。

澳洲擁有豐富的不可再生資源與再生能源，卻為全球主要的溫

室氣體排放國之一，主因其過度依賴煤炭與天然氣。面對全球環境保護意識抬頭，澳洲開始重視環境問題以及永續發展的責任。Leal et al. (2019)採用擴充的 Kaya 恆等式與 LMDI 方法來分析 1990~2015 年澳洲各部門（農業、工業、建築業、運輸業、住宅部門、服務業）產值與溫室氣體排放量間之關係。

結果指出，僅農業部門與服務業部門的產值與溫室氣體排放量呈強脫鉤狀態，其餘產業則呈弱脫鉤狀態。整體而言，經濟成長與溫室氣體排放量間呈脫鉤狀態，主因澳洲經濟成長處於較高水準，以及農業部門因技術提升而明顯減少排放溫室氣體。雖然二者為脫鉤狀態，惟僅農業部門係減碳的主要貢獻者，由此可知，澳洲政府宜對不同產業制定更有效的減碳政策以及擴大投資高效率技術，藉以提高多數部門的能源效率，方有助於減少排放溫室氣體。

Parker (2024)擷取 1970~2018 年全球 59 個國家運輸部門的資料，並採用迴歸模型來估計 Tapio 脫鉤指標，藉以認定運輸部門產值與碳排間之脫鉤狀態。結果發現，僅 16 個樣本國家的運輸部門產值與碳排間呈弱脫鉤狀態，多數樣本國家亟需針對該部門採行更有效的綠色相關政策來實現減碳目標。

該文指出，由於目前的社會經濟力量，欲使運輸部門產值與碳排間之關係脫鉤的難度較大；惟參考弱脫鉤的樣本國家的作法，似宜設法改變民眾的運輸行為，如激勵民眾多使用大眾運輸交通工具、購買再生能源發電的電動車等，應有助於減少該部門的碳排。

二、樣本國家包含臺灣的文獻

（一）與 Kaya 恆等式或 LMDI 有關之文獻

李正豐與陳昭羽（2007）以 Kaya 恆等式為基礎，並搭配 LMDI

方法探討 1995~2005 年臺灣工業部門碳排的關鍵因素。實證結果指出，經濟成長（GDP）係碳排增加的主因，而能源效率不佳、電力的能源結構比重高、電力的碳密集度高均亦會增加碳排。由於工業部門的生產過程多使用化石燃料，致其對化石燃料的需求量與產業規模具高度正相關，因此，經濟成長會增加能耗，同時帶動碳排增加。有鑑於此，為維持經濟持續成長，若欲減少碳排，宜降低產業對化石燃料的依賴，並積極尋求再生能源或其它替代的乾淨能源。

再者，結果亦發現，電力的能源結構比重與電力的碳排密集度逐年走高，係工業部門碳排增加的主因。除工業用電量持續成長會增加碳排外，近年臺灣發電燃料結構因核能發電比重降低，燃煤發電比重提高，單位電力的碳排係數上升而導致碳排增加。

由此可知，若欲減少碳排，除實施用電管理、節約能源、裝設汽電共生設備等措施來減少外購電力之外，亦需要自發電端調整發電燃料結構，減少燃煤發電之比重，提高低碳能源（如天然氣）與再生能源的發電比重，以降低電力的碳排密集度，方能減少碳排。

Lu et al. (2007)採用 LMDI 方法分解 1990~2002 年臺灣高速公路車輛碳排總量的潛在因素（分解成公路運輸的碳密集度、車輛碳密集度、人均車輛持有數量、人口密集度（即單位 GDP 人口數）與經濟成長（GDP）），並參考其它國家（德國、日本、南韓）的公路運輸政策，以作為臺灣政府實施減碳政策之參考。

結果發現，臺灣經濟與車輛持有數量的快速成長為碳排增加的主因，而人口密集度增加則有助於減少碳排。為緩解經濟成長對環境造成的負面壓力，臺灣宜改善公路運輸系統的營運方式與能耗，實施具有需求管理的智慧交通系統（intelligent transportation system, ITS），並鼓勵民眾多使用綠色的交通方式。

李正豐與林勻淅(2008)採用 LMDI 方法來探討 1995~2005 年影響臺灣公路運輸部門溫室氣體排放之關鍵因素(公路運輸部門的碳密集度、公路運輸部門的能源結構、人均能耗、人口規模)。結果發現，人均能耗與人口規模係每年臺灣公路運輸部門溫室氣體排放量增加的主因，其中，以前者效果較明顯，且該效果有擴大的現象。

特別的是，人口成長雖會增加溫室氣體排放量，惟因近年臺灣人口出生率逐年降低，該效果有減緩的情形。總言之，減少公路運輸的人均能耗係減緩溫室氣體排放的重要方向，考量到大眾運輸系統的普遍與便利化會抑制自用小客車與機車的使用量成長，此舉似乎為可行措施。此外，為取代傳統的化石燃料源，積極發展新能源技術係未來公路運輸進一步減少排放溫室氣體的發展方向。

1996~2006 年臺灣碳排增加約 60%，其中，工業部門約占 50%，而鋼鐵業、石化業、電子業、紡織業、紙漿與造紙業、水泥業約占工業部門碳排總量的 3/4，由此可知，確定此等部門碳排的驅動因素對於制定有效的環境政策具高度價值。Huang and Wu (2013)採用投入產出的結構分解分析 (structural decomposition analysis, SDA) 來探討影響不同產業的碳排因素。實證結果指出，出口、國內最終需求均對碳排為正向貢獻，而材料消耗的技術改善會減少碳排；特別的是，發電組合對碳排的影響取決於發電所使用的能源而定，隱含著改變能源密集產業碳排的相關策略。

Huang et al. (2021)採用投入產出的結構分解分析來分析 2004~2014 年臺灣、日本、南韓碳排的驅動因素。結果指出，技術進步、要素替代係影響碳排的主要因素。技術進步可以提高樣本國家的能源效率與材料消耗效率。對臺灣而言，改善能源效率約減少 77% 的碳排，對南韓而言，則約減少 34%，此意味著技術進步與提高能源

效率宜作為首要政策。對日本而言，改善消耗材料的效率約減少 22% 的碳排，顯示改善工業流程亦有助於減少碳排。

能源要素替代的結果指出，日本與南韓則分別約增加 15%、4%，主因國內需求上升，增加天然氣、煤炭、石油的消耗；而臺灣碳排總量減少約 11%，主因增加使用天然氣，減少消耗煤炭與石油。該結果指出，碳排減少需要使用更乾淨的燃料與再生能源來取代傳統的化石燃料。

Chang and Huang (2023)擷取 1971~2012 年 18 個亞太經濟合作 (APEC) 成員國的資料，並以 Kaya 恆等式為基礎，搭配 LMDI 方法分解各國碳排，以探討潛在的影響因素。結果發現：(1) 人口規模與經濟成長會顯著地增加碳排；(2) 樣本國家的單位 GDP 能耗大抵下降，顯示樣本國家的能源效率改善；(3) 對香港、印尼與馬來西亞而言，雖能源效率效果有助於減少碳排，惟能源結構效果(該文稱為能源替代效果)與碳密集度效果均會增加碳排，致此等國家在樣本期間的碳排相對較高。

(4) 對秘魯、菲律賓、新加坡、泰國、越南而言，能源結構效果會增加碳排，而碳密集度效果會減少碳排；(5) 對澳洲、加拿大、智利、中國、日本、韓國、墨西哥、紐西蘭、臺灣、美國而言，能源結構效果會減少碳排，而碳密集度效果則會增加碳排。由此可知，不同國家因文化背景與政策等不同，致不同的因素對碳排的效果具異質性。

(二) 與脫鉤指標有關之文獻

Wang et al. (2016)採用脫鉤指標研究 2007~2013 年臺灣工業部門產值與碳排間之脫鉤狀態，並以 Kaya 恆等式為基礎，採用 LMDI 方法探討工業部門碳密集度變動的潛在因素，同時，分析工業部門

項下的子產業對潛在因素的貢獻。結果發現，(1)於 2007~2009 年，臺灣工業部門產值與碳排為逆向脫鉤的狀態，而於 2009~2013 年，二者則呈脫鉤狀態；(2)能源效率、能源結構、產業結構效果均會造成二者呈脫鉤狀態，且以能源效率的效果最大；(3)就產業別而言，化學材料業、電子機械業、基本金屬製造業係造成能源效率效果大的主因，亦即此等產業的能源效率較高。總言之，政府宜針對各產業實施減碳措施，並調整能源與產業結構。

Lee and Rosalez (2017)以內生成長模型配合脫鉤指標與 LMDI 方法來探討臺灣欲達成經濟成長率與碳排總量變動率間之脫鉤狀態，則能源生產、輸送與消費方式宜如何改變。結果發現，經濟成長與溫室氣體排放量均取決於能源生產力、能源支出比率、高能源價格等多項因素，提高能源價格有助於改變能源結構，減少經濟成長產生的碳排。

此外，該文認為每年能源密集度若能降低 2.4%，有助於臺灣在 2020 年達成脫鉤狀態，因此，建議臺灣宜朝改變能源結構、降低碳密集度的方向努力，並進一步提升整個經濟體系的能源效率。

Chou et al. (2019)以二次資料分析的縱向研究為基礎，⁸ 分析 1996~2006 年臺灣石化業及電子業的用電量、碳排、能耗情況。結果顯示，石化業與電子業係碳排與用電量增加的主要來源，二者碳排合計占碳排總量的比重約 27.1%，而用電量則約占 31.6%。

由於多數石化業與發電廠已使用最佳的可用控制技術 (best available control technology, BACT)，因此，能源效率的改善空間有限，而電子業因高用電量而碳排較多，因此，在當前電子業持續成

⁸ 二次資料分析係一種社會研究方法，其使用現有的統計資料（如人口普查）或大型學術資料庫的資料以從事實證分析。因該文需要觀察臺灣電力、能源與碳排的長期變動，因此，採用二次資料分析係合適的方法。

長下，臺灣需要能源轉型，增加再生能源發電係相當重要的計畫，以達成減碳目標，並努力實現永續發展。

李堅明等(2006)擷取 1990~2003 年的臺灣資料，並採用 OECD 脫鉤指標分析碳排總量變動率與經濟成長率間之脫鉤狀態。⁹ 結果指出，(1) 不同脫鉤指標的評估基礎不一致，造成估計結果存在差異，且意義不同，宜審慎解釋；(2) 利用 OECD 脫鉤因子（以上期為基期年）來衡量，結果發現，2000 年為分水嶺，於 2000 年以前，二者為相對脫鉤狀態，¹⁰ 惟於 2000 年以後，二者呈逆向脫鉤現象；(3) 額外採用 Tapio 脫鉤指標來評估脫鉤狀態，結果指出，在樣本期間內，二者大抵呈弱脫鉤狀態，工業部門先呈擴張性掛鉤後轉為脫鉤的狀態，而運輸部門則為弱脫鉤狀態，服務業部門則為擴張性掛鉤狀態。

參、研究方法

一、Kaya 恆等式 (Kaya identity) 與對數平均迪氏指數 (logarithmic mean divisia index, LMDI)

Kaya 恆等式於 1989 年由日本能源經濟學家賀屋洋一 (Yoichi Kaya) 首次在政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 上提出。

為分解碳排的潛在因素，並量化各因素的貢獻程度，Kaya 恆等式將碳排以線性的方式拆解成多個驅動因素，連結碳排、能源、經濟、人口等因素間的關係，以利後續分析，如等式 (A) 所示：

$$CO_2^t = \frac{CO_2^t}{E^t} \times \frac{E^t}{GDP^t} \times \frac{GDP^t}{P^t} \times P^t \dots \dots \dots (A)$$

⁹ OCED 脫鉤指標的估計結果對於選取的基期年具高度敏感性，不同基期年將呈現不同的脫鉤狀態，若欲進行跨國比較，基期年宜統一。

¹⁰ OECD (2002) 提出的「絕對脫鉤」係指，經濟持續成長，惟環境壓力下降；「相對脫鉤」係指，每單位產出對環境造成的壓力下降，即環境壓力的增加幅度小於經濟的成長幅度。

其中， CO_2^t 、 E^t 、 GDP^t 、 P^t 分別為 t 期下的碳排總量、能耗總量、國內生產毛額、人口數。由此可知，影響碳排的因素依序為碳密集度、能源密集度、人均 GDP、人口規模。

多數文獻（如 Wang et al., 2018；Wang et al., 2020；Koilkou et al., 2023；Gołaś, 2023；Magazzino et al., 2024）為關注不同化石燃料的碳排變動情況而使用擴充的 Kaya 恆等式，如等式（B）所示：¹¹

$$CO_2^t = \sum_m CO_{2,m}^t = \sum_m \frac{CO_{2,m}^t}{E_m^t} \times \frac{E_m^t}{E^t} \times \frac{E^t}{GDP^t} \times \frac{GDP^t}{P^t} \times P^t \dots (B)$$

其中，（1）碳密集度效果（ $CO_{2,m}^t/E_m^t$ ）：第 t 期各化石燃料（即煤炭、石油、天然氣，以下標 m 表示）的碳排（ $CO_{2,m}^t$ ）占其能耗（ E_m^t ）的比率，即碳密集度（每消耗 1 單位化石燃料產生的碳排）。倘若高碳排的化石燃料消耗的成長速度高於低碳排的化石燃料，則碳密集度效果會增加，隱含著對化石燃料的依賴程度；（2）能源結構效果（ E_m^t/E^t ）：第 t 期各化石燃料的能耗（fossil fuel energy consumption， E_m^t ）占能耗總量（ E^t ）的比重，能夠觀察能源轉型的效果。

（3）能源效率效果（ E^t/GDP^t ）：第 t 期單位 GDP 能耗，此即能源效率指標，能夠反映出整體的能源效率情況（單位 GDP 能耗愈低，即每單位 GDP 所需的能耗愈低，意味著能源效率愈好）；（4）人均所得效果（ GDP^t/P^t ）：第 t 期的人均 GDP；（5）人口規模效果（ P^t ）：第 t 期的總人口數。

考慮到資料取得便利性且為做跨國比較，本文依循文獻最常採用的 LMDI 方法，主因該法能將資料完全分解，沒有殘差。¹² 參考

¹¹ 亦可分解成 $\sum_m CO_{2,m}^t = \sum_m \frac{CO_{2,m}^t}{E_m^t} \times \frac{E_m^t}{GDP_m^t} \times \frac{GDP_m^t}{GDP^t} \times \frac{GDP^t}{P^t} \times P^t$ ，惟可能因資料侷限性（各燃料的產值資料難以取得），而將不同燃料的能源密集度與燃料產值結合，而改寫成 $\sum_m CO_{2,m}^t = \sum_m \frac{CO_{2,m}^t}{E_m^t} \times \frac{E_m^t}{GDP^t} \times \frac{GDP^t}{P^t} \times P^t$ 。

¹² 有關 LMDI 方法的說明可參考蔡釗旻（2025）。

Gołaś (2023)、Magazzino et al. (2024)，透過 LMDI 方法，可將特定時間內的碳排變動分解為 5 個潛在的驅動因素，如等式 (C) 所示：

$$\begin{aligned}\Delta CO_2^t &= \ln(CO_2^t) - \ln(CO_2^{t-1}) \\ &= \Delta CI^t + \Delta ES^t + \Delta EI^t + \Delta GP^t + \Delta P^t \dots \dots \dots (C)\end{aligned}$$

其中， ΔCO_2^t 為第 t-1 期至第 t 期的碳排總量變動率，其等於碳密集度效果 (ΔCI^t ，對應上述的 $CO_{2,m}^t/E_m^t$)、能源結構效果 (ΔES^t ，對應上述的 E_m^t/E^t)、能源效率效果 (ΔEI^t ，對應上述的 E^t/GDP^t)、人均所得效果 (ΔGDP^t ，對應上述的 GDP^t/P^t) 以及人口規模效果 (ΔP^t ，對應上述的 P^t) 的加總，計算如下：

$$\Delta CI^t = \sum_m \frac{L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1})}{L(CO_2^t, CO_2^{t-1})} \times \ln \left[\frac{\left(\frac{CO_{2,m}}{E_m}\right)^t}{\left(\frac{CO_{2,m}}{E_m}\right)^{t-1}} \right] \dots \dots \dots (D)$$

$$\Delta ES^t = \sum_m \frac{L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1})}{L(CO_2^t, CO_2^{t-1})} \times \ln \left[\frac{\left(\frac{E_m}{E}\right)^t}{\left(\frac{E_m}{E}\right)^{t-1}} \right] \dots \dots \dots (E)$$

$$\Delta EI^t = \sum_m \frac{L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1})}{L(CO_2^t, CO_2^{t-1})} \times \ln \left[\frac{\left(\frac{E}{GDP}\right)^t}{\left(\frac{E}{GDP}\right)^{t-1}} \right] \dots \dots \dots (F)$$

$$\Delta GP^t = \sum_m \frac{L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1})}{L(CO_2^t, CO_2^{t-1})} \times \ln \left[\frac{\left(\frac{GDP}{P}\right)^t}{\left(\frac{GDP}{P}\right)^{t-1}} \right] \dots \dots \dots (G)$$

$$\Delta P^t = \sum_m \frac{L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1})}{L(CO_2^t, CO_2^{t-1})} \times \ln \left(\frac{P^t}{P^{t-1}} \right) \dots \dots \dots (H)$$

其中， $L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1})/L(CO_2^t, CO_2^{t-1})$ 為對數平均權重，計算如下：

$$L(CO_2^t, CO_2^{t-1}) = \frac{CO_2^t - CO_2^{t-1}}{\ln(CO_2^t) - \ln(CO_2^{t-1})} \dots \dots \dots (I)$$

$$L(CO_{2,m}^t, CO_{2,m}^{t-1}) = \frac{CO_{2,m}^t - CO_{2,m}^{t-1}}{\ln(CO_{2,m}^t) - \ln(CO_{2,m}^{t-1})} \dots \dots \dots (J)$$

值得一提的是，該方法無法討論各部門（ i ）的碳排情況，主因能源部門均為各國主要碳排的貢獻者，惟該部門為能源生產者，與工業部門等屬於能源需求者（能源消耗者）不同。雖然在碳密集度（ $CO_{2,i}^t/E_i^t$ ）下，可用能源部門的能源生產量代替能源消耗量，惟在能耗比重（ E_i^t/E^t ）下，若將分母改成能耗總量加上能源生產量，恐有重複計算之虞，且該指標不符合能耗比重的定義；另外，若排除能源部門的碳排來計算剩餘部門的碳排比重，則對數平均權重數值恐失真，因其與真正的碳排比重（含能源部門碳排）意義完全不同。

另外，必須注意的是，Kaya 恆等式有其優點，惟其亦存在研究限制：（1）Kaya 恆等式為數學恆等式，並不代表變數間存在因果關係或遞延關係等，若欲分析變數間的因果關係，宜建立合適的計量模型，並進行檢定；（2）每個因素間為獨立，難以捕捉技術創新導致的連動效果；（3）無法涵蓋政策變數（如能源價格、碳排總量管制、碳交易等）、不確定性等。¹³

二、脫鉤指標（decoupling indicator）

OECD (2002)提出的脫鉤概念係指環境與經濟間不存在連結關係，並將之分為「絕對脫鉤」與「相對脫鉤」。「絕對脫鉤」係指，經濟持續成長，惟環境壓力下降；「相對脫鉤」係指，每單位產出對環境造成的壓力下降，即環境壓力的增加幅度小於經濟的成長幅度。

¹³ 黃宗煌，「能源消費與碳排放之因素拆解法：方法論與挑戰」，國家原子能科技研究院，資訊公開出版品，技術資訊及評析，第 56 卷，頁 1-12。該文未註明年份。
URL：https://www.nari.org.tw/files/202_85.html.

Tapio (2005)以彈性的概念重新定義脫鉤指標與 3 種脫鉤狀態（即脫鉤、掛鉤、逆向脫鉤）。為合理區分脫鉤狀態，該文將 3 種脫鉤狀態分為 8 種邏輯可能性，以探討經濟成長與環境（如碳排）間之關係，進而被用來觀察各國在經濟與碳排上的實際努力。

然而，Tapio (2005)的脫鉤指標僅能描述目標變數與經濟成長間之脫鉤狀態，無法分析造成該狀態的潛在因素，有鑑於此，Diakoulaki and Mandaraka (2007)在分解模型的基礎上，重新定義脫鉤模型，藉以探究其潛在因素。

參考 Tapio (2005)，並依循李堅明等（2006）、Koilkou et al. (2023)、Gołaś (2023)，將 t 期脫鉤指標（ $\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t$ ）定義為碳排總量變動率與經濟成長率之比率，表示如下：¹⁴

$$\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t = \frac{\frac{CO_2^t - CO_2^{t-1}}{CO_2^{t-1}}}{\frac{GDP^t - GDP^{t-1}}{GDP^{t-1}}} = \frac{\Delta CO_2^t}{\Delta GDP^t} \dots \dots \dots (K)$$

其中，上標 t 為時間（年）， CO_2^t 係 t 期的碳排總量，而 GDP^t 為 t 期的國內生產毛額， ΔCO_2^t 代表碳排總量變動率（年增率），而 ΔGDP^t 代表國內生產毛額變動率（年增率）。脫鉤指標的判斷標準詳見表 1。

考慮到 Tapio (2005)僅定義脫鉤狀態，無法探討影響碳排與經濟成長間之狀態改變的潛在因素，因此，參考 Diakoulaki and Mandaraka (2007)、Gołaś (2023)，在 LMDI 的基礎下，將脫鉤指標（ $\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t$ ）分解成 5 種效果（將等式（C）代入等式（K）），改寫如下：

¹⁴ Tapio (2005)脫鉤指標的定義係基準年（base year）與目標年（t）能耗變動率與經濟成長率變動率之比率，表示為 $(GDP^0 \times \Delta E^t) / (E^0 \times \Delta GDP^t)$ 。

表 1、Tapio (2005)脫鉤指標之判斷標準

ΔE	ΔGDP	ε	脫鉤狀態與意義
脫鉤			
<0	>0	$\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t < 0$	強脫鉤 (strong decoupling) : 「碳排減少，惟經濟成長增加」
>0	>0	$0 < \varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t \leq 0.8$	弱脫鉤 (weak decoupling) : 「碳排與經濟成長均增加，惟經濟成長增幅較大」
<0	<0	$\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t > 1.2$	衰退性脫鉤 (recessive decoupling) : 「碳排與經濟成長均減少，惟碳排減幅較大」
掛鉤			
>0	>0	$0.8 < \varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t \leq 1.2$	擴張性掛鉤 (expansive coupling) : 「碳排與經濟成長均增加，且增幅相近」
<0	<0	$0.8 < \varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t \leq 1.2$	衰退性掛鉤 (recessive coupling) : 「碳排與經濟成長均減少，且減幅相近」
逆向脫鉤			
>0	<0	$\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t < 0$	逆向強脫鉤 (strong negative decoupling) : 「碳排增加，惟經濟成長減少」
<0	<0	$0 < \varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t \leq 0.8$	逆向弱脫鉤 (weak negative decoupling) : 「碳排與經濟成長均減少，惟經濟成長減幅較大」
>0	>0	$\varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t > 1.2$	逆向擴張性脫鉤 (expansive negative decoupling) : 「碳排與經濟成長均增加，惟碳排增幅較大」

註：Tapio (2005)的脫鉤指標反映著相對變動的彈性概念，惟其並未以 0、1 作為臨界值，反而使用一個範圍。該文主張，為了避免過度放大解讀細微的變動，因此，將 1.0 左右（20%的變動）的彈性值仍視為掛鉤，因此，掛鉤的彈性值定義為 0.8~1.2。

資料來源：Tapio (2005)。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{(CO_2, GDP)}^t &= \frac{1}{\Delta GDP^t} \times (\Delta CI^t + \Delta ES^t + \Delta EI^t + \Delta GP^t + \Delta P^t) \\
 &= \frac{\Delta CI^t}{\Delta GDP^t} + \frac{\Delta ES^t}{\Delta GDP^t} + \frac{\Delta EI^t}{\Delta GDP^t} + \frac{\Delta GP^t}{\Delta GDP^t} + \frac{\Delta P^t}{\Delta GDP^t} \\
 &= \varepsilon_{CI}^t + \varepsilon_{ES}^t + \varepsilon_{EI}^t + D_{GP}^t + D_P^t \dots \dots \dots (L)
 \end{aligned}$$

由等式 (L) 可知，碳排與經濟成長間之脫鉤狀態可以用碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果、人均所得效果、人口規模效果來解釋。

然而，必須注意的是，Tapio (2005)提出的脫鉤指標雖能夠反映出經濟成長與環境間之關係，惟亦存在不足之處，因該脫鉤指標定義的長期關係尚未完善，且對短期的政策具高度的敏感。事實上，脫

鈎指標強調著脫鈎狀態的趨勢或持續性。換言之，脫鈎狀態著重於環境與經濟成長在某一期間內呈現穩定且持續的分離，並非短期的轉變，由此可知，脫鈎指標並非一個短期的過程，而是在一定時間內，經濟成本的調整過程。(Dong et al., 2019)

肆、資料與敘述統計及實證結果

一、資料與敘述統計

樣本期間為 1990~2022 年，頻率為年。資料包含碳排總量、各化石燃料（煤炭、石油、天然氣）的碳排、各化石燃料的使用量、能耗總量、名目國內生產毛額、總人口數。

各國的碳排資料（含燃料別）均來自國際能源署（International Energy Agency, IEA），而臺灣、日本的名目國內生產毛額則分別擷取自主計總處、日本內閣府（Cabinet Office），其餘國家（南韓、中國、美國、德國）則均擷取自彭博社（Bloomberg）。臺灣的總人口數擷取自內政部，其餘國家的總人口數則均擷取自美國能源資訊管理局（Energy Information Administration, EIA）。（見表 2）¹⁵

觀察附錄表 1~附錄表 6 發現，在碳排總量方面，在樣本期間內，平均而言，樣本國家以中國約 59 億 9,770 萬公噸、美國約 51 億 3,246 萬公噸、日本約 11 億 480 萬公噸最大。

在不同的化石燃料方面，平均而言，除美國與日本使用較多石油，致碳排較多之外，其餘樣本國家多使用煤炭，致碳排較高，尤其是中國，其煤炭的碳排高達 49 億 4,723 萬公噸，約占其碳排總量的 82.49%，該結果顯示不同燃料的比重在一定程度上取決於特定國家的能源生產。例如，美國在石油與天然氣上有相當大的貢獻，而中國在煤炭上占主導地位。

¹⁵ 各國 GDP 均為名目且未經季節調整的資料，雖然貨幣單位不同，惟經 LMDI 拆解後，各效果會轉化成比率型式，因此，仍能做跨國比較。

表 2、變數與資料來源

定義		資料來源
碳排總量		IEA
碳排（燃料別）	煤炭	
	石油	
	天然氣	
能耗總量		
能耗（燃料別）	煤炭	
	石油	
	天然氣	
國內生產毛額（名目）		Bloomberg、主計總處、日本內閣府
人口數		EIA、內政部

事實上，以往歐美國家在全球的煤炭供給上相當重要，惟近幾十年來，歐美國家進行能源轉型而大幅減少使用煤炭；嗣後，煤炭的碳排則轉移至其它國家，如中國、印度、南非等。

在能耗總量方面，仍以美國約 6.31 千萬兆焦耳、中國約 5.38 千萬兆焦耳、日本約 1.29 千萬兆焦耳最大，此可能與總人口數有關，中國約 13.11 億人、美國約 2.97 億人、日本約 1.26 億人最多。

有鑑於各國的碳排情形亦取決於其經濟結構與能源系統，以下就圖 2 的結果分項說明各樣本國家的碳排情況：

（一）臺灣

2022 年臺灣碳排總量約 2 億 6,660 萬噸，其中，煤炭的碳排約 1 億 4,158 萬噸，占 53.10%，主因臺灣的發電方式以燃氣與燃煤為主，¹⁶ 惟相較於 2013 年之 58.80% 的高點，近年來，煤炭的碳排已有下降。

樣本期間內，石油的碳排比重大抵逐年下降，至 2022 年約 23.17%，此可能與 1979 年第二次石油危機有關，因石油容易受到

¹⁶ 2022 年臺灣發電結構：煤炭占 42.00%、天然氣占 38.87%、石油占 1.54%、核能占 8.24%、其它（含水力、太陽能光電與熱能、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物）占 9.34%。（見圖 4）

國際重大事件影響，而逐漸減少使用燃油發電；惟因石化等與石油高度相關的產業仍以石油為主要原料，因此，石油的碳排比重仍高。

再者，為降低碳排，減少使用煤炭與石油而推動燃氣發電，改採用低碳的天然氣，天然氣的碳排比重逐年上升，至 2022 年約 23.72%，仍遠低於煤炭的碳排比重。

（二）日本

2022 年日本碳排總量約 9 億 3,825 萬噸，其中，煤炭的碳排約 3 億 8,722 萬噸，占 41.27%，主因發電方式以傳統的化石燃料為主。¹⁷事實上，日本經濟發展對石油依賴性高，加以化工業蓬勃發展，致其為全球主要的石油進口國。1990 年石油的碳排比重為 61.05%，高於煤炭的 28.30%。

然而，因 1973 年、1979 年、1990 年爆發石油危機，對資源匱乏的日本而言，煤炭在供給穩定性、經濟效率、地緣政治風險上均優於石油，加以日本擁有高效率的燃煤發電技術，採用「超臨界壓發電」與「煤氣化複合發電」等技術，有助於減少碳排，致其逐漸轉向燃煤發電，於 2015 年煤炭的碳排比重首次高於石油的碳排比重。此外，2011 年發生福島核災後，日本政府與民眾對核電充滿不信任感，反而加重對化石燃料的依賴。

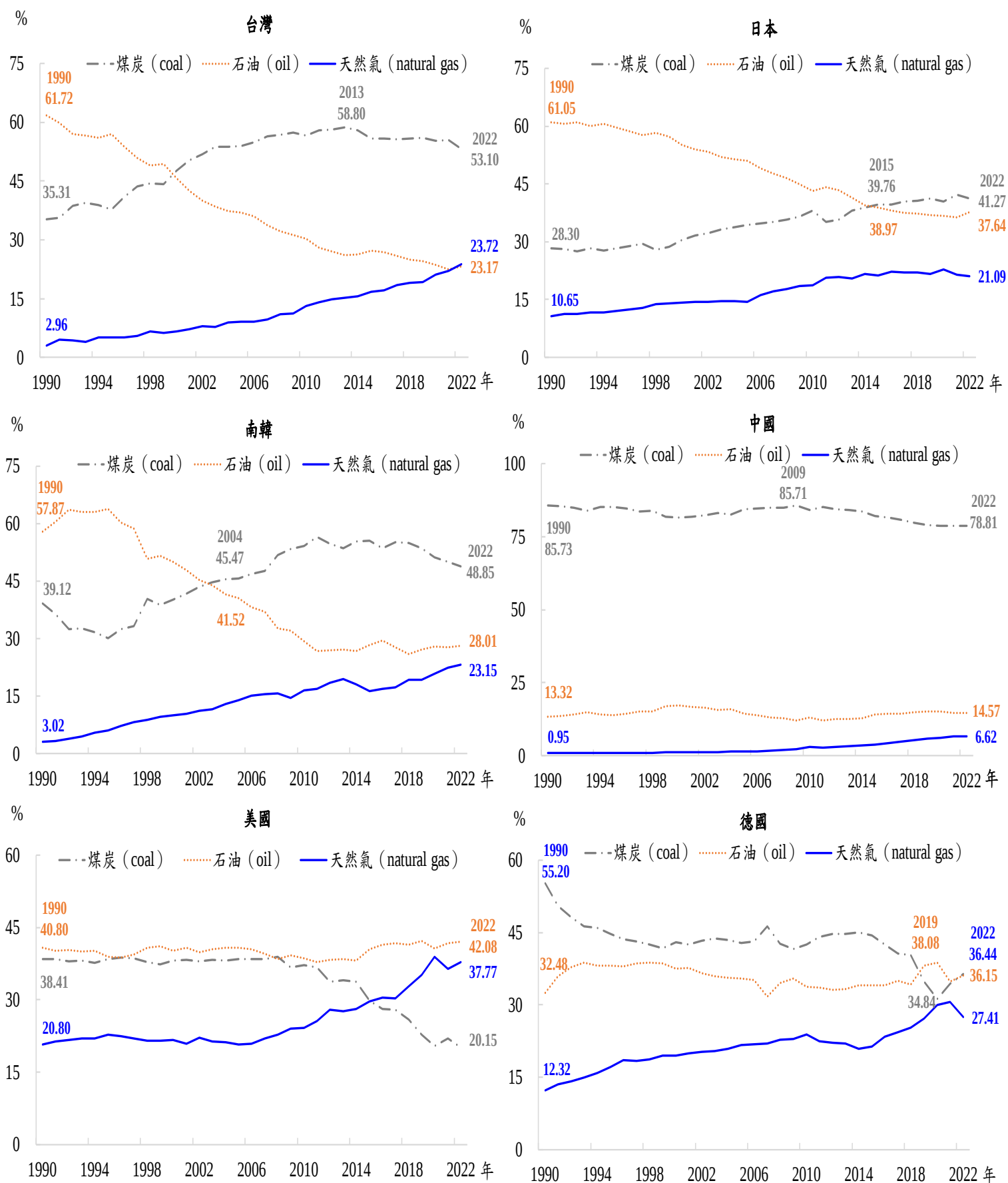
（三）南韓

2022 年南韓碳排總量約 5 億 3,175 萬噸，其中，煤炭的碳排約 2 億 5,974 萬噸，占 48.85%，主因發電方式以燃煤發電為主。¹⁸南韓亦為全球主要的石油進口國，因其煉油產能在全世界成品油市場具有關鍵地位，經濟發展對石油依賴程度大。

¹⁷ 2022 年日本發電結構：煤炭占 30.66%、天然氣占 33.71%、石油占 4.03%、核能占 5.50%、其它（含水力、太陽能光電與熱能、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物）占 26.10%。（見圖 7）

¹⁸ 2022 年南韓發電結構：煤炭占 33.74%、天然氣占 27.69%、石油占 1.10%、核能占 28.68%、其它（含水力、太陽能光電與熱能、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物）占 8.79%。（見圖 10）

圖 2、樣本國家來源別之碳排比重



資料來源：IEA、作者整理。

1990 年南韓的石油碳排比重為 57.87%，高於煤炭的 39.12%。惟於 2004 年石油的碳排比重首度低於煤炭的碳排比重，可能與南韓為降低對石油的依賴程度，進行能源結構調整有關。再者，天然氣的碳排比重自 1990 之 3.02% 持續上升至 2022 年之 23.15%，主因電力需求與經濟成長的帶動，加以近年節能減碳意識受到關注所致。惟於 2014~2015 年間，該比重下降，主因 2014 年全球煤炭價格暴跌，部分製造業與發電廠選擇使用便宜的煤炭取代天然氣。

（四）中國

2022 年中國碳排總量約 105 億 9,197 萬噸，係全球碳排最多的國家，其中，煤炭的碳排約 83 億 4,750 萬噸，占 78.81%，主因為促進經濟發展，中國的電力與熱能主要以燃煤發電為主，¹⁹ 致燃煤電廠裝置容量大幅提升。

然而，相較於 2009 年之 85.71% 的高點，近年來，煤炭的碳排比重已有下降，可能係因於 2017 年，中國政府啟動檢查計畫，違反汙染規定的發電廠遭到勒令停工或停產，並限制 30 個城市的煤炭使用量，致家計部門改採用天然氣，因此，天然氣的碳排比重自 1990 年之 0.95% 上升至 2022 年之 6.62%。

（五）美國

2022 年美國碳排總量約 45 億 9,002 萬噸，其中，石油的碳排約 19 億 3,138 萬噸，占 42.08%，主因運輸部門以石油為主要燃料；天然氣與煤炭的碳排分別約 17 億 3,356 萬噸、9 億 2,508 萬噸，分別占 37.77%、20.15%，主因美國的發電方式以燃氣與燃煤為主。²⁰

¹⁹ 2022 年中國大陸發電結構：煤炭占 61.72%、天然氣占 2.98%、石油占 0.10%、核能占 4.67%、其它（含水力、太陽能光電與熱能、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物）占 20.54%。（見圖 13）

²⁰ 2022 年美國發電結構：煤炭占 20.32%、天然氣占 38.72%、石油占 0.95%、核能占 17.88%、其它（含水力、太陽能光電與熱能、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物）占 22.14%。（見圖 16）

1990 年煤炭、石油、天然氣之碳排比重分別為 38.41%、40.80%、20.80%，由此可知，煤炭的碳排比重已有下降，轉而以天然氣取代，致天然氣的碳排比重上升，除與能源轉型有關之外，亦可能與前述提及之「燃料比重在一定程度上取決於美國的能源生產」有關。

（六）德國

2022 年德國碳排總量約 5 億 9,415 萬噸，其中，煤炭、石油、天然氣的碳排分別約 2 億 1,652 萬噸、2 億 1,480 萬噸、1 億 6,283 萬噸，碳排比重分別為 36.44%、36.15%、27.41%。²¹

相較於 1990 年，煤炭、石油、天然氣的碳排比重分別為 55.20%、32.48%、12.32%，由此可知，早期德國的經濟活動較依賴煤炭，主因德國係全球最大的褐煤生產國，褐煤的開採成本較低，且在德國發電站附近開採，以致生產成本便宜。

嗣因德國進行能源轉型，朝減煤減核的方向邁進，未來規劃將燃煤發電逐步歸零，致煤炭的碳排比重明顯下降，於 2019 年煤炭的碳排比重 34.84%，低於石油的碳排比重 38.08%。

值得一提的是，於 2022 年，煤炭的碳排比重（36.44%）再度高於石油的碳排比重（36.15%），主因該年 6 月，由於俄羅斯進一步削減對歐洲的天然氣供給，²² 加以天然氣價格持續攀升，加深德國等歐洲國家的通膨壓力，為此德國重新啟用多座閒置的燃煤發電廠，並向企業提供獎勵，限制使用天然氣，以因應歐洲與俄羅斯間之能源戰。

²¹ 2022 年德國發電結構：煤炭占 32.65%、天然氣占 14.85%、石油占 0.90%、核能占 5.98%、其它（含水力、太陽能光電與熱能、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物）占 45.62%。（見圖 19）

²² 俄羅斯天然氣公司（Gazprom）以機組維修為由，宣布減少天然氣管線北溪 1 號（Nord Stream 1）的輸送量；惟歐盟官員認為俄羅斯此舉欲懲罰烏克蘭的盟國（該年 2 月俄烏戰爭爆發）。

二、實證結果

部分實證結果存在相似之處，惟考慮到樣本國家的背景差異，為了解各國碳排的變動情況，以下依國家分項說明 LMDI 分解結果與脫鉤指標結果。

（一）臺灣

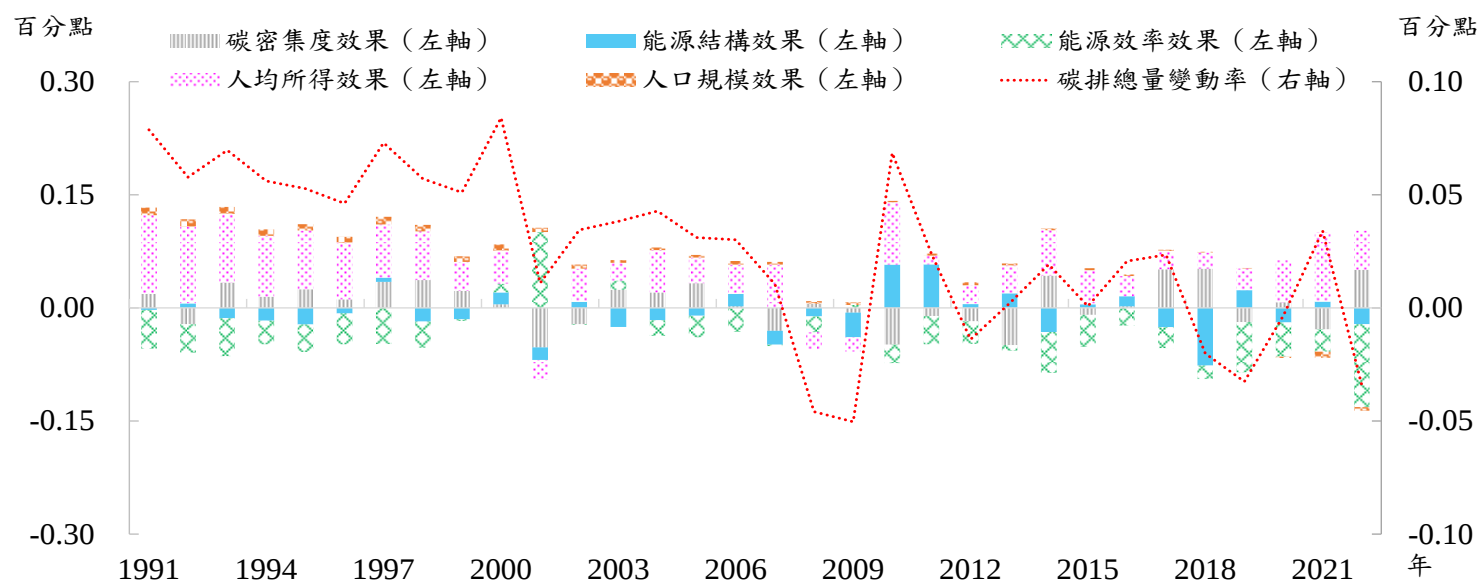
1. 潛在效果對碳排總量變動率的貢獻情況

就圖 3 而言，影響臺灣碳排總量變動率的主要因素係碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果與人均所得效果。

樣本期間內，碳密集度效果對碳排總量變動率多呈正向貢獻，惟平均而言，正向貢獻幅度約 0.25 個百分點略低於負向貢獻幅度約 0.26 個百分點。特別的是，於 1990~2006 年（16 筆樣本），平均貢獻為正值（1.15 個百分點），而於 2007~2022 年（16 筆樣本），平均貢獻為負值（-0.06 個百分點），顯示臺灣已逐漸減少使用部分高碳排的化石燃料。

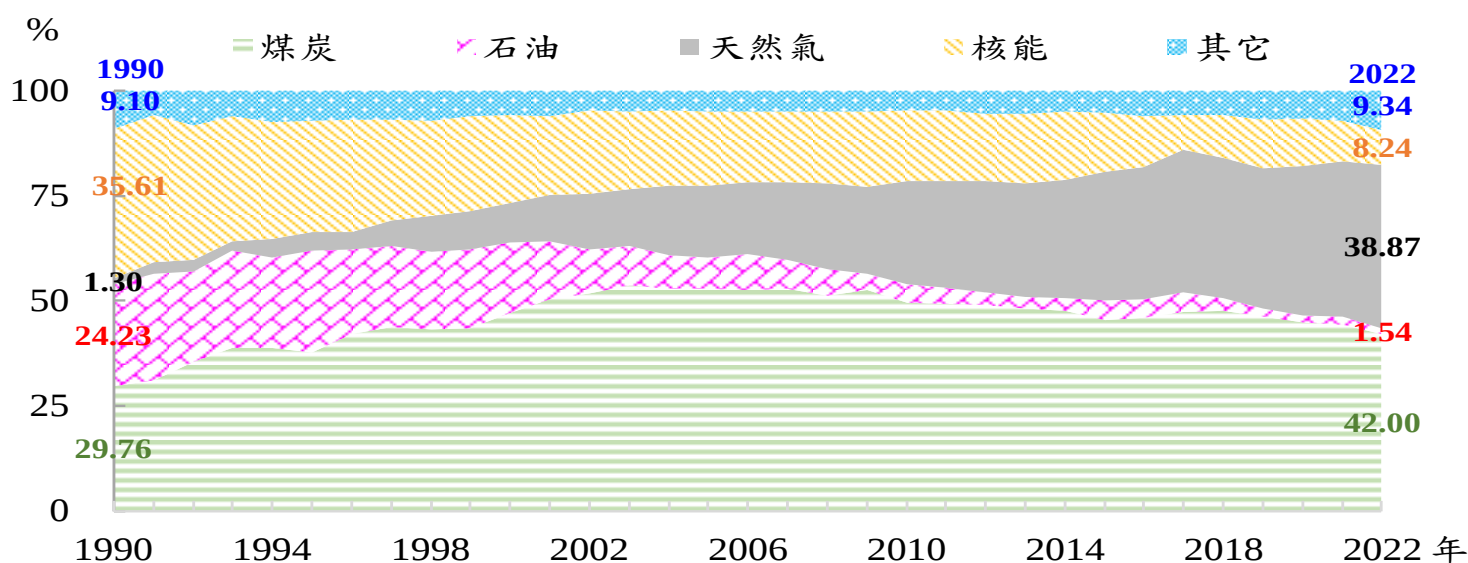
考量到碳密集度與發電結構有關，觀察 1990~2022 年臺灣發電結構（圖 4）發現，核能與石油的比重明顯下降，分別自 1990 年之 35.61%、24.23% 降至 2022 年之 8.24%、1.54%；惟為滿足用電需求，改由煤炭與天然氣取代，二者比重明顯上升，分別自 1990 年之 29.76%、1.30% 升至 2022 年之 42.00%、38.87%。由此可知，碳密集度對碳排的平均貢獻轉呈負值，主因減少使用燃油發電與增加燃氣發電。

圖 3、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（臺灣）



資料來源：IEA、作者計算。

圖 4、發電結構的變動情況-臺灣



註：其它包含水力、太陽能光電、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物、太陽能熱能。

資料來源：IEA、作者計算。

不同的是，能源結構效果對碳排總量變動率多呈負向貢獻，且近年的負向貢獻較明顯，可能與臺灣於2016年宣布能源轉型，陸續修正相關法規；於2017年通過《電業法》修正法案，確立綠能先行的原則；於2019年修訂《再生能源發展條例》，優化綠電發展環境；於2020年核定「能源轉型白皮書」等有關。

此一結果與 Chang and Huang (2023)一致；惟貢獻幅度較小，顯示臺灣在能源轉型上仍有相當大的進步空間。值得一提的是，於 2010~2011 年，能源結構效果具有明顯的正向貢獻，主因全球金融危機後，經濟復甦，各產業消耗較多的煤炭與天然氣。

在能源效率效果方面，其對碳排總量變動率多為負向貢獻，顯示提高能源效率有助於減少碳排，該結果與多數文獻一致（李正豐與陳昭羽, 2007；Huang et al., 2021；Chang and Huang, 2023）。

特別的是，2001 年能源效率效果呈明顯的正向貢獻，主因該年全球景氣下滑，臺灣對外貿易衰退，致 GDP 呈負成長，單位 GDP 能耗上升，反映能源效率下降，此與柏雲昌(2013)指出 2001 年工業部門的能源效率下降一致。²³ 另外，該結果亦可能與 2001 年起，臺灣的煤炭全部從國外進口，煤炭消耗量持續成長有關。人口規模效果與人均所得效果對碳排總量變動率大多為正向貢獻，惟前者的正向貢獻相當微弱，且自 2020 年起轉呈負向貢獻，主因總人口數轉呈負成長。

對後者而言，除 2001 年因經濟成長衰退，致人均所得效果對碳排總量變動率呈負向貢獻之外，其餘時間點均為明顯的正向貢獻，該結果與多數文獻一致（李正豐與林勻淅, 2008；Chang and Huang, 2023）。

上述結果反映著經濟成長雖然帶動所得成長，卻亦造成較多的碳排，如何在追求經濟成長的同時，減少碳排，取得與環境間之平衡，以達永續發展的目標，係政府宜持續努力的方向。

2. 脫鉤指標的結果

脫鉤指標適用於觀察碳排與經濟成長間之長期趨勢與結構

²³ 柏雲昌(2013),「我國總體與部門能源效率政策目標檢覈系統建置」,行政院經濟建設委員會,委託研究計畫,頁 1-147。

性變化，惟脫鉤指標對短期政策與景氣波動具高度敏感性，且其本質上強調二者關係的趨勢或持續性，而非短期轉變。

觀察表 3 與圖 5 的結果發現，樣本期間內，臺灣碳排總量變動率與經濟成長率間大多呈脫鉤狀態，主因能源效率效果的負向貢獻較大，顯示臺灣政府在減碳與經濟成長間取得成效。

惟仍有部分時間點出現不同的情況（如 1997 年、1999 年、2005 年、2010 年、2017 年，二者狀態均呈擴張性掛鉤），因此，本文嘗試分析呈現擴張性掛鉤背後可能的偶發因素，目的在於補足長期趨勢外的轉折點意涵，而非將其過度推論為結構性逆轉，實為輔助脫鉤趨勢的詮釋與驗證。茲說明如下：

（1）1990~2000 年間，臺灣並未新增核電機組，惟為因應電力需求增加而擴大燃煤發電，致碳密集度逐年走高（如圖 5 所示，碳密集度效果大抵逐年增加），加以經濟穩定成長，碳密集度效果與人均所得效果造成二者的狀態自弱脫鉤轉呈擴張性掛鉤，甚至於 2000 年轉呈逆向擴張性脫鉤（碳排增幅高於經濟成長的增幅）。

（2）2005 年石油碳密集度上升，此可能與該年兩岸首次實施直航包機，提高航空煤油的使用比例有關，致碳密集度效果的正向貢獻較大而呈擴張性掛鉤。²⁴

（3）2010 年經濟逐步復甦，各產業使用較多煤炭作為能源來源，能源結構效果存在明顯的正向貢獻，致二者呈擴張性掛鉤；

（4）2017 年天然氣與煤炭的碳排明顯增加，致碳密集度效果的正向貢獻擴大，細究其潛在原因發現，該年的核能發電比重創

²⁴ 2005 年航空煤油（Jet kerosene）的能耗年增率自 2004 年的 6.82% 上升至 18.54%，此可能與該年農曆春節期間，臺灣與中國首次實施兩岸直航包機，共安排 48 個航班，運送超過 10,000 名旅客。此等航班的開通不僅增加航班數量，亦提高航空煤油的需求有關。

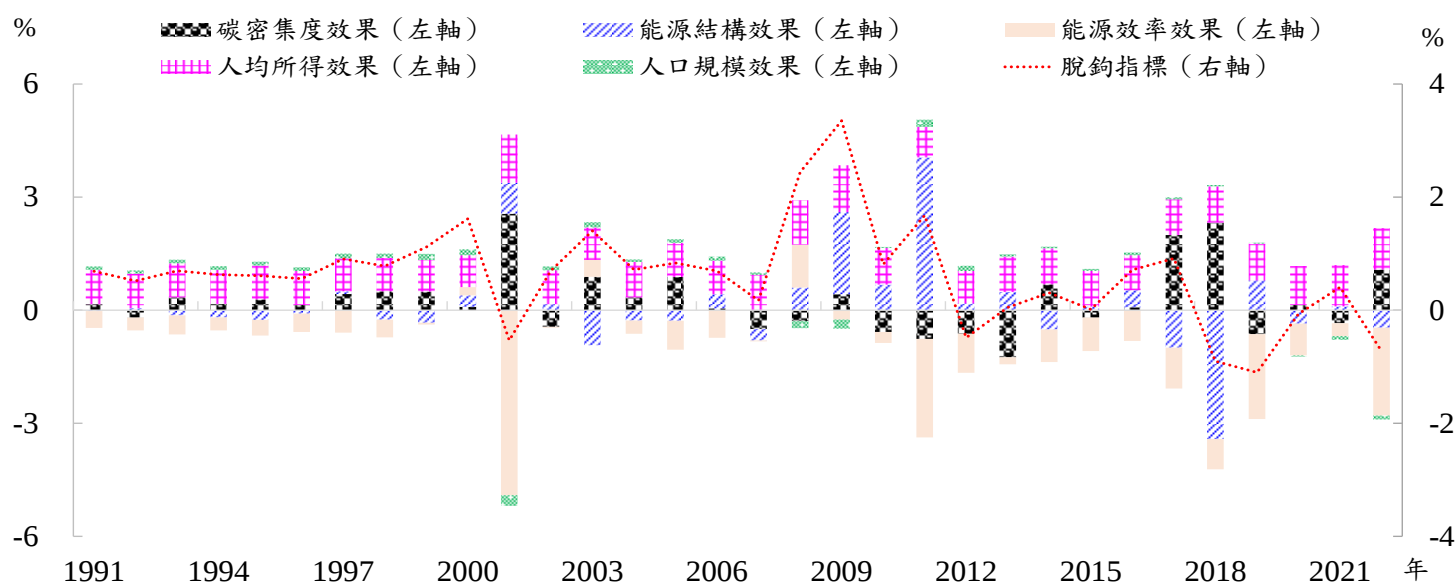
1979 年以來新低，取而代之的是，燃氣與燃煤發電。²⁵

表 3、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-臺灣

年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態
1991	0.69	弱脫鉤	2002	0.70	弱脫鉤	2013	0.05	弱脫鉤
1992	0.52	弱脫鉤	2003	1.40	逆向擴張性脫鉤	2014	0.31	弱脫鉤
1993	0.70	弱脫鉤	2004	0.72	弱脫鉤	2015	0.01	弱脫鉤
1994	0.63	弱脫鉤	2005	0.83	擴張性掛鉤	2016	0.71	弱脫鉤
1995	0.61	弱脫鉤	2006	0.69	弱脫鉤	2017	0.91	擴張性掛鉤
1996	0.55	弱脫鉤	2007	0.17	弱脫鉤	2018	-0.90	強脫鉤
1997	0.91	擴張性掛鉤	2008	2.44	衰退性脫鉤	2019	-1.10	強脫鉤
1998	0.78	弱脫鉤	2009	3.35	衰退性脫鉤	2020	-0.06	強脫鉤
1999	1.11	擴張性掛鉤	2010	0.81	擴張性掛鉤	2021	0.41	弱脫鉤
2000	1.61	逆向擴張性脫鉤	2011	1.67	逆向擴張性脫鉤	2022	-0.72	強脫鉤
2001	-0.53	逆向強脫鉤	2012	-0.49	強脫鉤			

資料來源：作者計算。

圖 5、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-臺灣



註：2017~2018 年碳密集度存在明顯的正向貢獻可能與 2016 年蔡英文總統推動非核家園有關。於 2018 年，第一核電廠 1 號機除役。於 2025 年 5 月第三核電廠 2 號機除役。

資料來源：作者計算。

²⁵ 2017 年 6 月因豪雨沖塌核一廠的輸電鐵塔，迫使核一廠 2 號機停機（後因燃料池滿而再度停機）；核二廠 1 號機則因裝載池改裝；核三廠 2 號機歲修延宕等原因，均導致 2017 年核能發電量大幅下降。

在部分時間點下，人均所得效果與碳密集度效果，係造成碳排總量變動率與經濟成長率呈掛鉤狀態的主因，前者顯示經濟景氣繁榮會增加碳排，造成碳排與經濟成長同步擴張，呼應前述 LMDI 的分解結果；而後者則在一定程度上取決於發電結構的情況，即燃料來源屬於高碳或低碳。

惟整體而言，二者大抵為脫鉤狀態，顯示臺灣政府持續努力取得經濟與碳排間之平衡，惟為維持脫鉤狀態，發電結構宜減少使用高碳排的煤炭或加速提高再生能源發電的比重，使碳密集度效果達到穩定的負向貢獻，此為臺灣政府可以努力的方向。

（二）日本

1. 潛在效果對碳排總量變動率的貢獻情況

就圖 6 而言，日本碳排總量變動率的主要影響因素係碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果與人均所得效果。

樣本期間內，碳密集度效果對碳排總量變動率的貢獻方向並不穩定，主因其發電結構變動較大，尤其在福島核災發生後。再者，該效果對碳排總量變動率的平均正向貢獻值約 1.64 個百分點，高於平均負向貢獻值約 1.58 個百分點，主因其發電結構逐漸傾向燃氣與燃煤發電取代核能發電。

自圖 7 可知，以往核能為日本主要的發電方式之一（1990~2010 年（福島核災發生前）核能發電比重平均為 27.03%），於 1999 年 9 月 30 日，因核燃料整備工廠違反燃料加工的作業程序，2 名工作人員死亡，該年核能發電比重明顯下滑，改由燃煤與燃氣發電取代，致 1999 年碳密集度效果的正向貢獻明顯增加。

圖 6、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（日本）

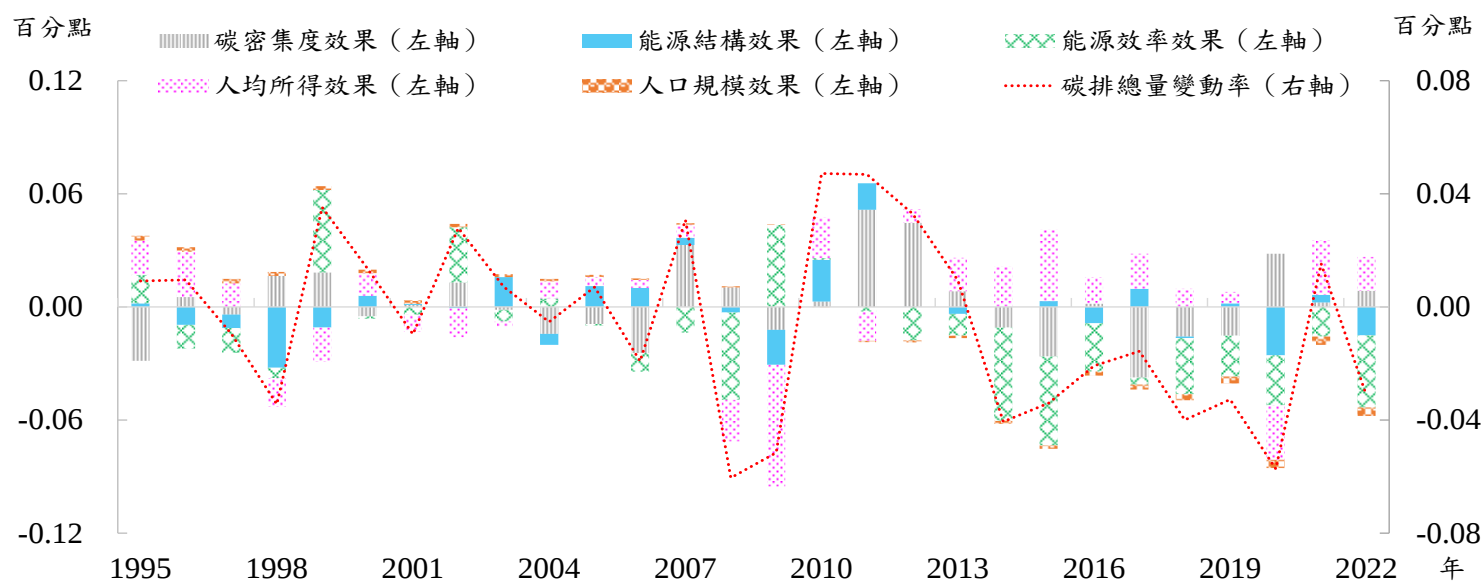
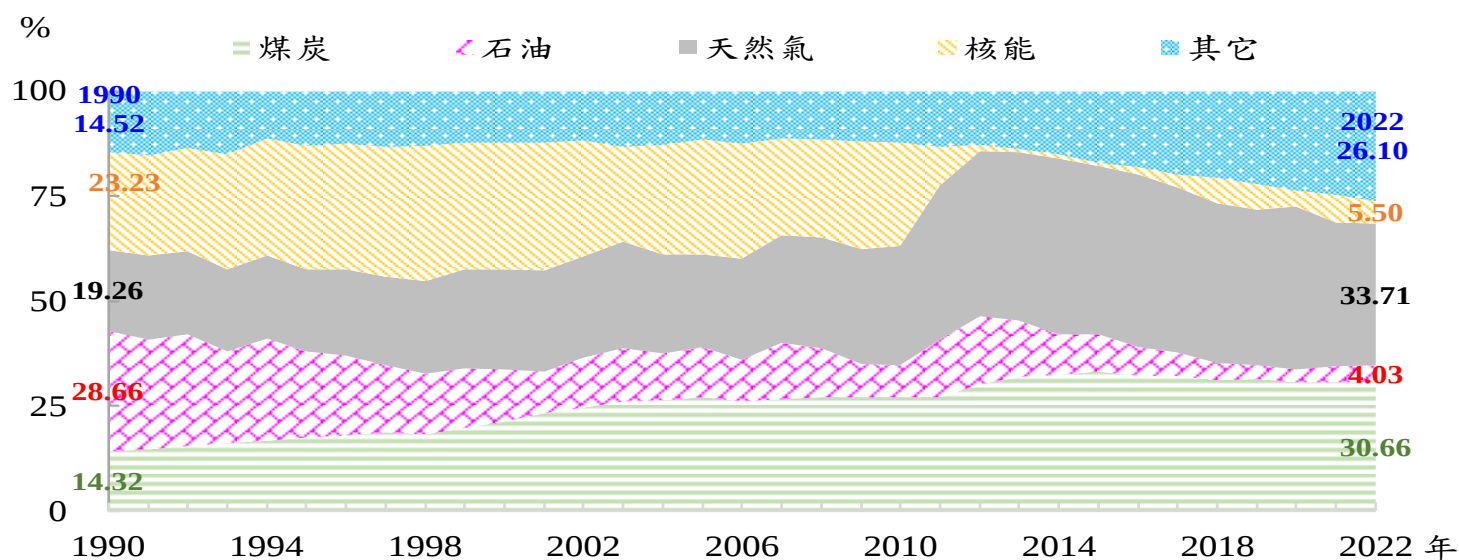


圖 7、發電結構的變動情況-日本



註：其它包含水力、太陽能光電、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物、太陽能熱能。
資料來源：IEA、作者計算。

再者，2007 年能源部門碳排放大幅增加，主因部分核能發電廠停止運轉，亦由燃煤、燃油與燃氣取代，電力的碳排係數惡化，導致碳密集度效果的正向貢獻擴增。2011 年福島核災爆發，核能發電比重驟降，改以燃氣發電為主，以致 2011~2012 年碳密集度

效果的正向貢獻增加。

在能源結構效果方面，該效果與核能發電比重具有一定程度的關係，²⁶ 主因核能有助於減少對化石燃料的依賴程度，當核能發電比重愈高，對化石燃料的依賴程度愈低，有助於能源結構效果的負向貢獻發酵。於福島核災發生前（1995~2010 年），該效果的平均貢獻約-0.26 個百分點。

特別的是，於福島核災發生後（2011~2022 年），核能發電比重驟降，惟該效果仍為負向貢獻，平均約-0.18 個百分點，此可能與其它（含再生能源）發電比重逐步上升有關。²⁷

然而，整個樣本期間內，正向與負向貢獻次數各占 1/2（各 14 次），顯示能源結構效果的貢獻方向並不穩定，此可能與發電結構頻繁變動、能源政策反覆有關。（見圖 6）

在能源效率效果方面，該效果對碳排總量變動率多為負向貢獻，惟於 1999 年、2009 年該效果轉呈正向貢獻，主因分別受亞洲金融危機、全球金融危機影響，致煤炭、石油與天然氣的能耗均明顯增加（能源效率不佳），帶動碳排增加。²⁸

2011 年福島核災發生後，日本政府傾向不再使用核能發電，致能源供給不足，為解決此一問題而修訂相關法案，同時制定能源計畫，並推動多項節能減碳措施，使 2011 年後能源效率效果對碳排總量變動率均呈負向貢獻，同時帶動碳排總量變動率下降，甚至轉為負成長。

²⁶ 1995~2010 年能源結構效果與核能發電比重間之相關係數為-0.51。

²⁷ 2011~2022 年能源結構效果與其它發電比重間之相關係數為-0.48。

²⁸ Liu et al. (2011)發現在景氣蕭條時，能源效率效果會增加能耗。

Liu, H. Q., X. Yan, H. Y. Duan and X. E. Wang (2011), "Analysis of Energy Consumption Influence Factors in Japan Based on LMDI Model," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 71-78, pp. 2416-2419.

與多數文獻的結果類似，人均所得效果大多為碳排總量變動率的正向貢獻，顯示經濟成長會增加碳排。特別的是，雖人口規模效果對碳排總量變動率為正向貢獻，惟該貢獻隨時間經過而持續減少，甚至自 2010 年轉變成負向貢獻且隨時間經過而持續增加，此一結果係因自 2009 年起，日本的人口數便開始下降且逐年減少，致人口規模效果轉變成負向貢獻且持續擴大。

2. 脫鉤指標的結果

觀察表 4 與圖 8 的結果發現，在樣本期間內，日本碳排總量變動率與經濟成長率間大多呈脫鉤狀態，主因能源效率效果與碳密集度的負向貢獻較大。

惟受亞洲金融危機衝擊後，經濟逐漸復甦，2000 年碳排總量變動率與經濟成長率間呈擴張性掛鉤；2005 年日本經濟續呈正成長，惟因天然氣價格飆漲，而增加燃煤發電，致二者呈擴張性掛鉤；2009 年受全球金融危機影響，致二者呈衰退性掛鉤。

整體而言，二者呈掛鉤狀態主要係受到人均所得效果與能源結構效果的正向貢獻，惟相較於能源結構效果，人均所得效果的正向貢獻幅度較大。另外，於 2012 年（含）以前，二者的狀態變動較為頻繁，且多為衰退性脫鉤、逆向強脫鉤、逆向擴張性脫鉤，此可能與日本經濟失落 10 年的現象有關，因 2012 年以前，日本的經濟低迷，致碳排與經濟成長多為負成長。

於 2013 年（含）以後，因能源效率效果對碳排的負向貢獻較大，致二者均為脫鉤狀態，此可能與日本政府的節能減碳措施效果逐步發酵有關，如 2012 年的「能源環境創新戰略」、2015 年的「2030 年長期能源供需展望」等。綜上所述，日本政府宜持續改善能源效率或節約能源，以達經濟與碳排間之平衡。

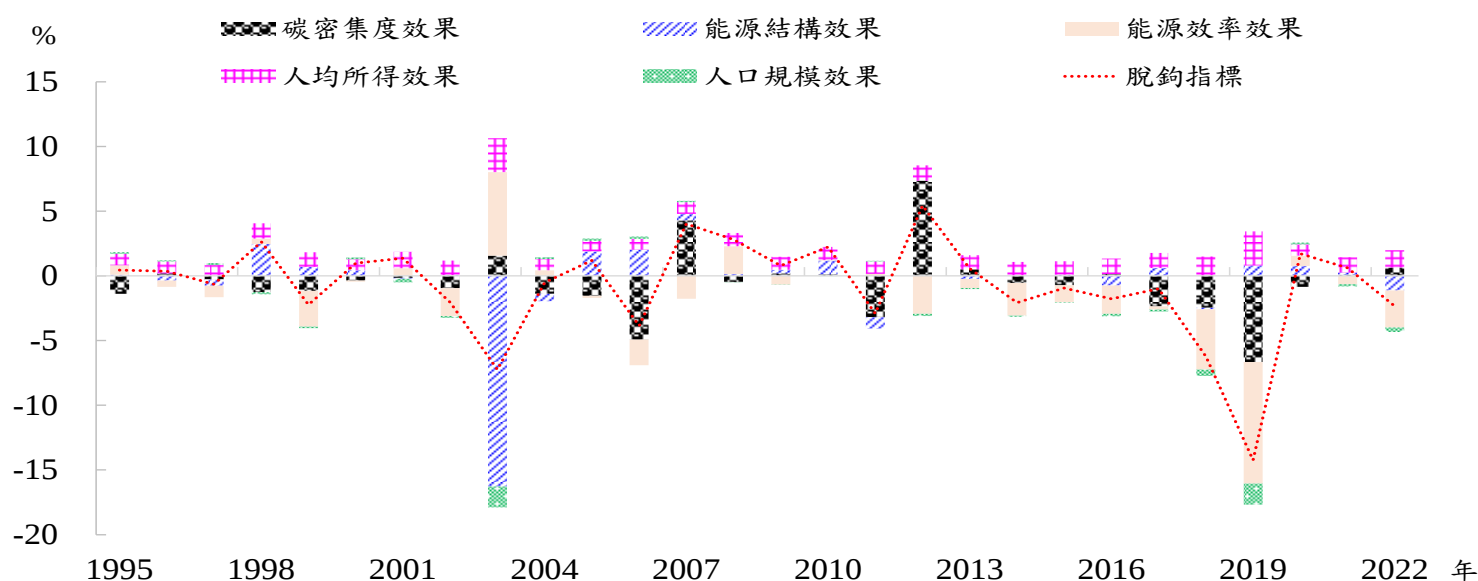
表 4、1995~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-日本

年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態
1995	0.44	弱脫鉤	2004	-0.52	強脫鉤	2013	0.58	弱脫鉤
1996	0.36	弱脫鉤	2005	1.20	擴張性掛鉤	2014	-2.06	強脫鉤
1997	-0.65	強脫鉤	2006	-3.86	強脫鉤	2016	-0.93	強脫鉤
1998	2.64	衰退性脫鉤	2007	4.02	逆向擴張性脫鉤	2017	-1.78	強脫鉤
1999	-2.22	逆向強脫鉤	2008	2.81	衰退性脫鉤	2018	-0.99	強脫鉤
2000	0.98	擴張性掛鉤	2009	0.80	衰退性掛鉤	2019	-6.23	強脫鉤
2001	1.37	衰退性脫鉤	2010	2.23	逆向擴張性脫鉤	2020	-14.24	強脫鉤
2002	-2.05	逆向強脫鉤	2011	-2.91	逆向強脫鉤	2021	1.72	衰退性脫鉤
2003	-7.25	逆向強脫鉤	2012	5.44	逆向擴張性脫鉤	2022	0.62	弱脫鉤

註：國內生產毛額資料最早僅能追溯至 1994 年。

資料來源：作者計算。

圖 8、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-日本



註 1：國內生產毛額資料最早僅能追溯至 1994 年。

2：2003 年能源結構效果對脫鉤狀態的貢獻相當大之可能原因：IEA (2003)指出，核能安全疑慮攀升與國際油價走高，迫使日本發電結構回到穩定且可大量儲存的煤炭，主因多座核能機組因安全紀錄造假事件而停機，致燃煤發電急遽增加，加以 2003 年上半年伊拉克戰爭爆發，國際原油價格上漲，均造成煤炭使用量明顯增加。該年核能發電比重自 2002 年之 27.63%驟降至 22.67%；燃煤發電則自 24.54%升至 26.26%。

資料來源：作者計算、IEA (2003), “Energy Policies of IEA Countries: Japan 2003 Review,” IEA reports, pp. 1–167.。

(三) 南韓

1. 潛在效果對碳排總量變動率的貢獻情況

就圖 9 而言，影響南韓碳排總量變動率的主要因素係碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果、人均所得效果。

首先，就碳密集度效果而言，樣本期間內，其對碳排總量變動率多為正向貢獻（平均約 3.08 個百分點，高於平均負向貢獻約 2.33 個百分點），主因南韓的燃煤發電比重與燃氣發電比重分別自 1990 年之 19.59%、8.87% 上升至 2022 年之 33.74%、27.69%，加以核能發電比重自 1990 年之 48.44% 下降至 2022 年之 28.68%。（見圖 9）

南韓逾 60% 的電力來自燃煤與核能，於 2017 年政府為回應民眾對空氣汙染與核能安全的擔憂，未來將對煤炭與核能課徵環境稅，並擴大採用再生能源。目標於 2030 年，燃煤發電比重能夠下降至 21.8%，而核能發電比重下降至 21.6%。燃氣發電比重能夠提升至 27%。（文在寅政府：脫核去煤）

然而，2022 年新政府上任，能源政策大幅調整（尹錫悅政府：增核、減煤、展綠），於 2023 年 1 月 11 日通過第 10 次長期電力供需基本計畫，南韓的發電結構將以核電、燃氣與再生能源為主，並減少使用煤炭。

就人均所得效果而言，除 1998 年受亞洲金融危機的影響，因經濟衰退而呈負向貢獻之外，其餘時間點的人均所得效果對碳排總量變動率均為正向貢獻，顯示南韓政府亟需取得經濟與碳排間的平衡。特別的是，隨時間經過，人均所得效果的正向貢獻大抵呈下降趨勢，主因 GDP 成長率隨時間而下降（1990~2002 年多為

雙位數，2003~2022 年均為個位數）。²⁹

圖 9、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（南韓）

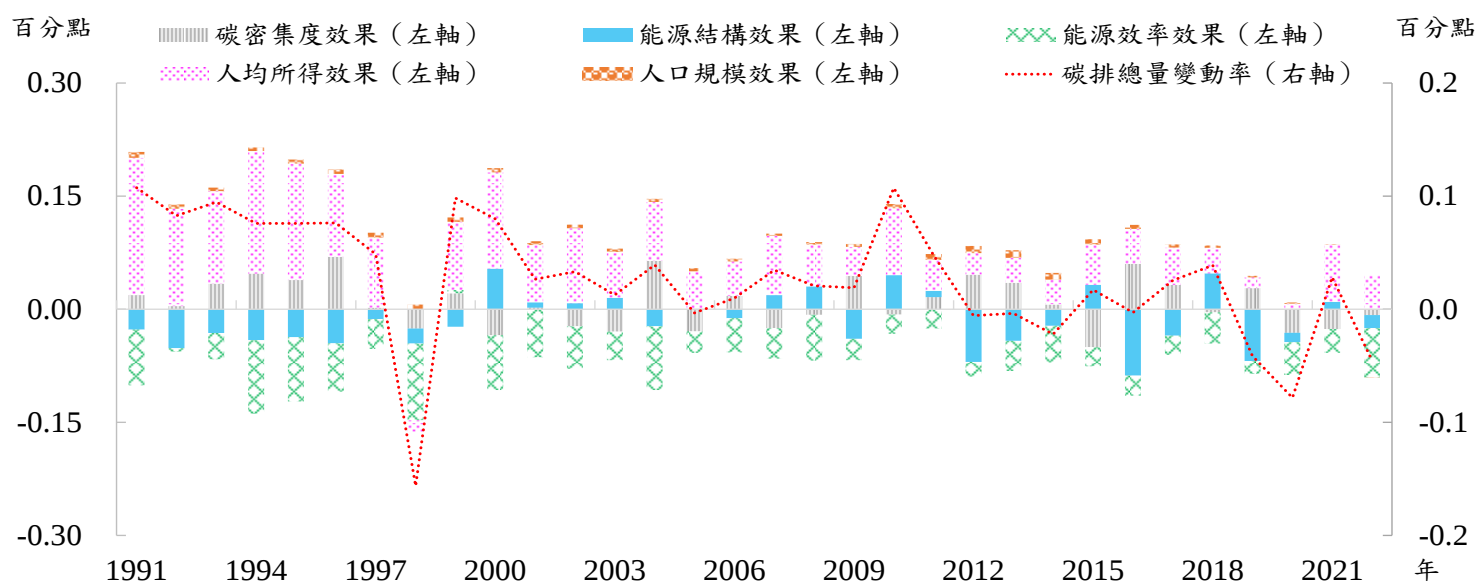
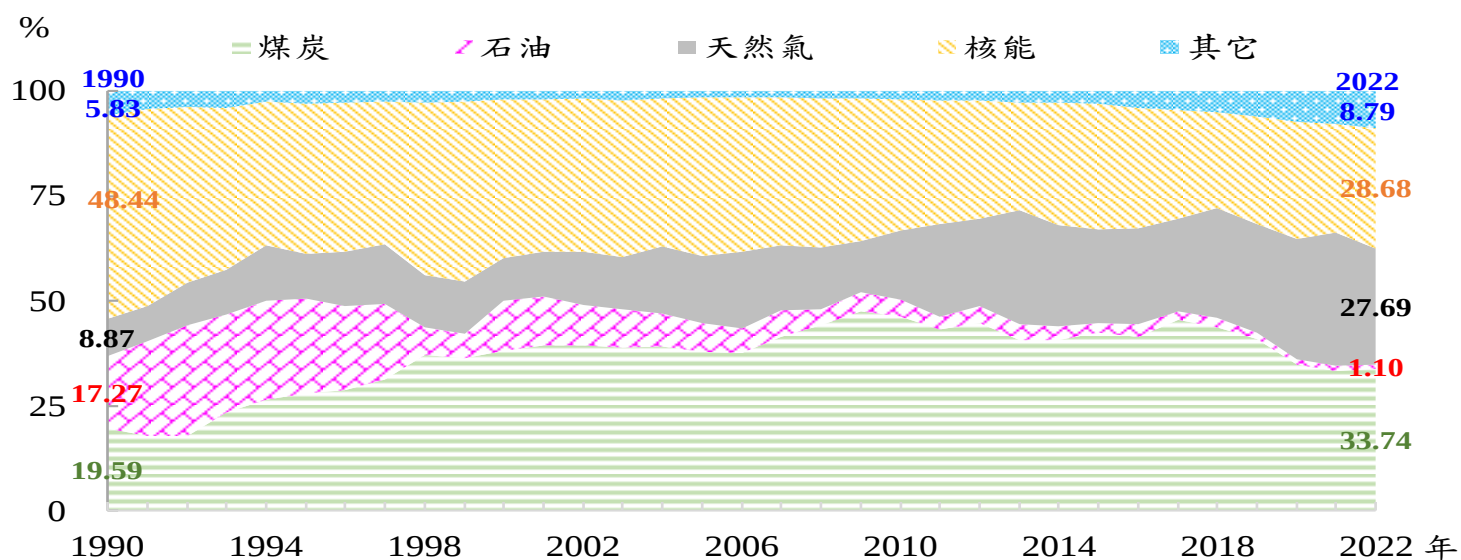


圖 10、發電結構的變動情況-南韓



註：其它包含水力、太陽能光電、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物、太陽能熱能。

資料來源：IEA、作者計算。

²⁹ 南韓於 1962~1996 年共實施 7 次 5 年經濟發展計畫，促使經濟蓬勃發展，GDP 大幅成長；其中，第 6 次（1987~1991）計畫主要扶植科技相關產業、改善生產力；第 7 次（1992~1996）計畫因南韓國內市場飽和，廉價勞動力不再具有優勢轉而發展高科技。產業，嗣後經濟成長趨於穩定。

接著，在能源效率效果方面，於 1999 年，其對碳排總量變動率為正向貢獻，主因 1998 年南韓經濟因亞洲金融危機遭受巨大損失，為刺激經濟，能耗增加，加以經濟成長動能疲弱，單位 GDP 能耗明顯上升（即能源效率不佳），以致碳排擴增。

其餘時間點的能源效率效果均為負向貢獻，該結果與多數國家一致，顯示對南韓而言，受惠於能源效率改善的成效，碳排隨能耗下降而減少，由此可知，能源效率的重要性。

另外，在能源結構效果方面，樣本期間內，其對碳排總量變動率大多為負向貢獻，顯示南韓的能源結構偏向減碳，主因明顯減少使用石油，改以天然氣取代。

細究部分時間點（2000 年、2010 年、2015 年、2018 年）該效果存在明顯的正向貢獻之潛在原因：（1）2000 年國際煤炭價格處於低水準，且遠低於天然氣與石油的價格，致成本導向的發電廠偏好使用煤炭，顯示價格低廉的煤炭雖具成本競爭力，惟卻惡化能源結構效果。再者，雖核能係南韓發電的主要來源，惟 2000 年正逢部分老舊機組檢修以及新機組投產延後，為因應電力缺口，南韓使用燃煤發電來填補。（1999~2000 年的發電結構：燃煤發電自 36.50%擴增至 38.15%；核能發電則自 42.73%明顯降至 37.69%）

（2）全球金融危機後，2010 年經濟逐漸復甦，帶動能源需求增加，為滿足各產業的能源需求，使用較多的化石燃料所致。

（3）因 2014 年國際煤價大幅下跌，2015 年煤價仍處於低水準，促使發電廠與部分產業增加使用煤炭（2014~2015 年的發電結構：燃煤發電自 40.82%擴增至 42.47%；燃氣發電自 24.16%降至 22.39%），以降低成本。另外，Paik (2018)提及，在 2015~2016 年

間，南韓對天然氣的支持力度不如預期，導致短期上仍以煤炭作為穩定的能源來源，以彌補核能發電減少的缺口。³⁰

(4) 2018 年文在寅政府實施「脫核去煤政策」，停止興建新的核能電廠，該年核能發電比重自 2017 年之 26.03% 降至 22.65%，雖燃煤發電比重亦自 2017 年之 45.46% 降至 43.86%，惟其它部門（尤其係工業部門）並未減少使用煤炭，主因煤炭價格續處較低水準，致煤炭的能耗明顯增加。

整體而言，南韓的碳排情況主要受其發電結構、煤炭價格、能源政策的效果等影響，雖政府致力減少使用煤炭，惟其仍處於較高水準，加以近期因俄烏戰爭，天然氣價格上漲，致工業部門轉而使用煤炭，致能源結構改善進展趨緩，反而加劇減碳壓力。

2. 脫鉤指標的結果

表 5 的結果指出，對南韓而言，除了 1999 年、2010~2011 年、2018 年呈擴張性掛鉤之外，其餘時間點的碳排總量年增率與經濟成長率間均為脫鉤狀態。

探究二者呈擴張性掛鉤的可能原因：(1) 1998 年南韓經濟深受亞洲金融危機的衝擊而轉呈負成長，惟碳排的減幅更大，且能源效率不彰，造成碳排與經濟成長均為負成長，致二者呈衰退性脫鉤；嗣後，為刺激經濟復甦，政府擴大基礎建設，以及工業部門（如鋼鐵、石化等碳密集度較高的產業）加大生產，增加使用化石燃料，推升碳排，致二者呈擴張性掛鉤。

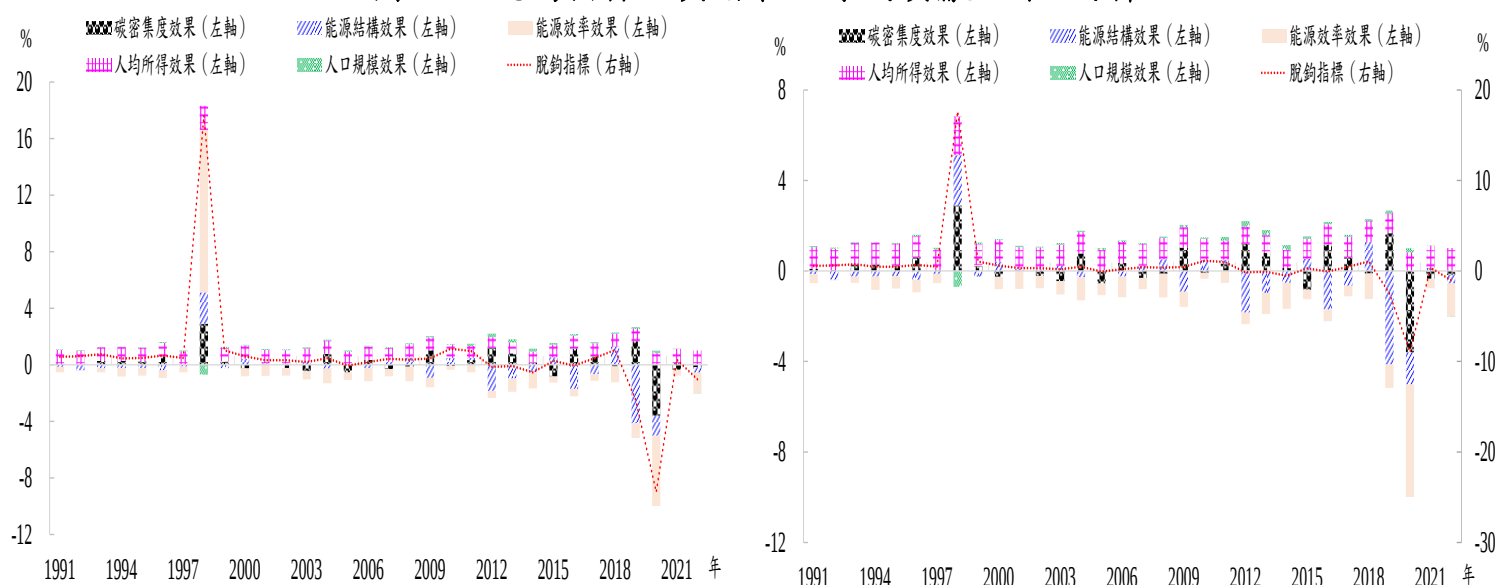
³⁰ Paik, K. W. (2018), "South Korea's Energy Policy Change and the Implications for its LNG Imports," The Oxford Institute for Energy Studies, ISBN 978-1-78467-113-6, pp. 1-28.

表 5、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-南韓

年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態
1991	0.57	弱脫鉤	2002	0.32	弱脫鉤	2013	-0.09	強脫鉤
1992	0.61	弱脫鉤	2003	0.19	弱脫鉤	2014	-0.53	強脫鉤
1993	0.74	弱脫鉤	2004	0.47	弱脫鉤	2015	0.28	弱脫鉤
1994	0.45	弱脫鉤	2005	-0.06	強脫鉤	2016	-0.06	強脫鉤
1995	0.48	弱脫鉤	2006	0.20	弱脫鉤	2017	0.47	弱脫鉤
1996	0.66	弱脫鉤	2007	0.42	弱脫鉤	2018	1.05	擴張性掛鉤
1997	0.49	弱脫鉤	2008	0.35	弱脫鉤	2019	-2.50	強脫鉤
1998	17.62	衰退性脫鉤	2009	0.45	弱脫鉤	2020	-8.99	強脫鉤
1999	1.02	擴張性掛鉤	2010	1.14	擴張性掛鉤	2021	0.37	弱脫鉤
2000	0.60	弱脫鉤	2011	0.97	擴張性掛鉤	2022	-1.02	強脫鉤
2001	0.33	弱脫鉤	2012	-0.15	強脫鉤			

資料來源：作者計算。

圖 11、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-南韓



註：由於 1998 年的能源效率效果遠大於其它效果，故為利觀察其它潛在效果的貢獻情況，右圖刪除 1998 年的能源效率效果。
資料來源：作者計算。

(2) 與 1998 年的情況類似，因 2008 年全球金融危機後，2010~2011 年為經濟復甦期間，南韓對中國出口強勁反彈，推升工業部門（如鋼鐵、石化等碳密集度較高的產業）的生產活動與

能源需求，消耗較多的化石燃料，碳排增加，能源結構效果轉呈正向貢獻，致二者為擴張性掛鉤。(見圖 11)

(3) 如前所述，2018 年處於「脫核去煤」能源政策的初始階段，惟因煤炭價格低，工業部門持續使用煤炭作為能源來源，主因南韓仍倚賴傳統的高爐 (blase furnace) 煉鋼技術 (需要大量冶金煤 (met coal) 作為還原劑)，致能源結構效果轉呈正向貢獻。(見圖 11)

南韓 1999 年實施《電力產業結構調整基本方案》；2012 年《溫室氣體排放許可證交易法》生效，建立 KETS (Korea ETS) 碳交易體系，透過碳訂價與碳交易制度，內部化企業碳排成本，促進企業的節能減碳投資；2014 年頒布《再生能源特別措施法》修正案，以提升再生能源比重，減少碳排等，以致在樣本期間內，二者多呈脫鉤狀態，顯示南韓政府的減排措施成效佳。

(四) 中國

1. 潛在效果對碳排總量變動率的貢獻情況

就圖 12 而言，在樣本期間內，能源效率效果對碳排總量變動率均為負向貢獻，顯示中國的能源效率持續改善，惟因經濟快速成長，致人均所得效果對碳排總量變動率均為正向貢獻。

順帶一提的是，除 2022 年人口規模效果對碳排總量變動率為負向貢獻之外，其餘時間點則均呈正向貢獻，顯示宜提倡民眾節約能源，有助於減少碳排；然而，該正向貢獻隨時間經過而大抵下降，主因在樣本期間，中國人口成長趨緩。

在碳密集度效果方面，其對碳排總量變動率多呈正向貢獻，主因中國作為全球煤炭的主要生產國，其發電結構以燃煤發電為

主，2022 年仍占 61.72%。(見圖 13)

在 2000~2011 年間，中國經濟快速成長，且多數工業的製造過程（如煉鋼、水泥、化工等）需要大量的化石燃料，雖於 2005 年通過《可再生能源法》與「十一五規劃」，強調低碳經濟的重要性，惟以煤炭為主的能源系統仍未根本性轉變，可能係因能源轉型在某種程度上受到資源結構的制約，多數部門仍傾向使用煤炭，致煤炭對碳排總量變動率仍具明顯的正向貢獻。

值得一提的是，於 2004~2005 年，碳密集度效果轉呈明顯的負向貢獻，此可能與 2004 年 8 月公布的《清潔生產審核暫行辦法》，加以部分城市（如上海）推動以氣代煤有關。此一結果與 Zhu (2023)一致。³¹

在能源結構效果方面，其對碳排總量變動率多呈負向貢獻，且近年的負向貢獻幅度較為明顯，可能與 2007 年《可再生能源中長期發展規劃》；2016 年「十三五能源規劃」；2021 年「雙碳目標」（2030 碳達峰、2060 碳中和）；2022 年《十四五現代能源發展規劃》等政策有關，導致煤炭的能耗占能耗總量自 1990 年之高點 48.45%降至 2022 年之 25.12%。

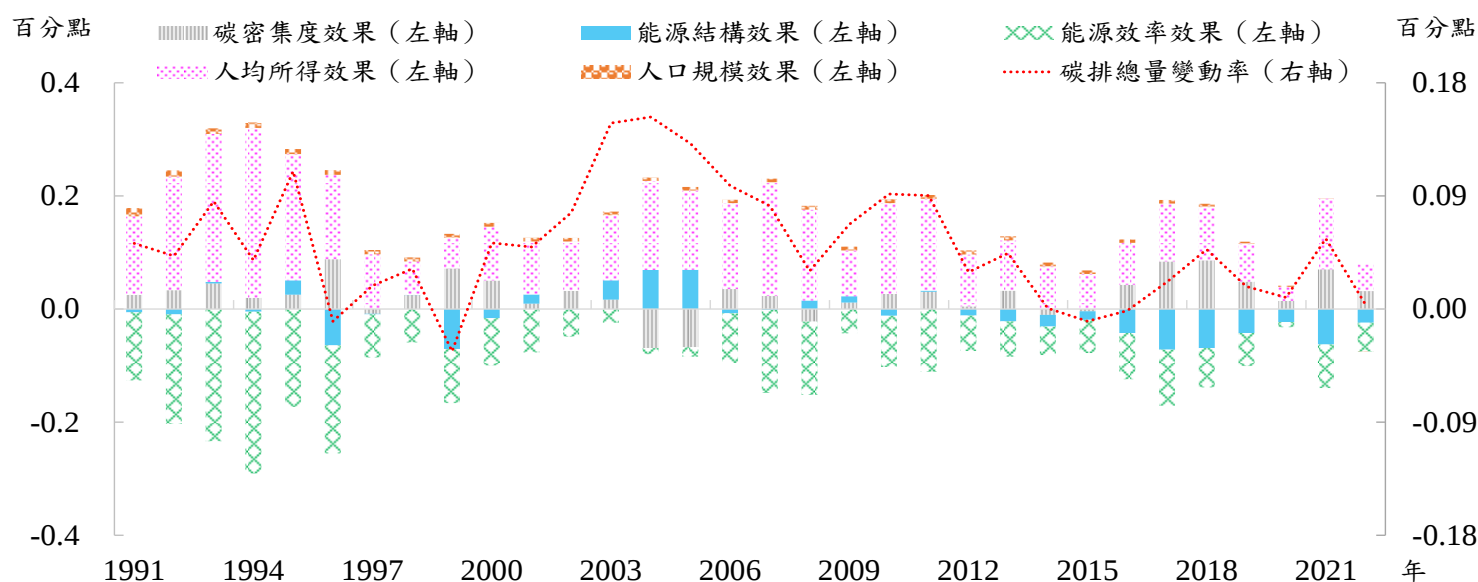
如同 Zhu (2023)指出，中國的能源結構效果對減碳存在效益，尤其在政策支持下表現出穩定的負向貢獻；Wang et al. (2018)指出，中國的能源轉型尚處於早期階段，惟近年擴展再生能源與天然氣的成效已略有顯現。

整體而言，中國的能源系統仍相當依賴煤炭，加以相關能源法規與制度發展進程較遲緩，致能源政策效果發酵時間較晚。雖近年來，發展碳捕捉（CCUS）或高效率的燃煤技術，致煤炭能耗

³¹ 該辦法旨在規範清潔生產審核程序，推動企業實施清潔生產，降低能耗與碳排。

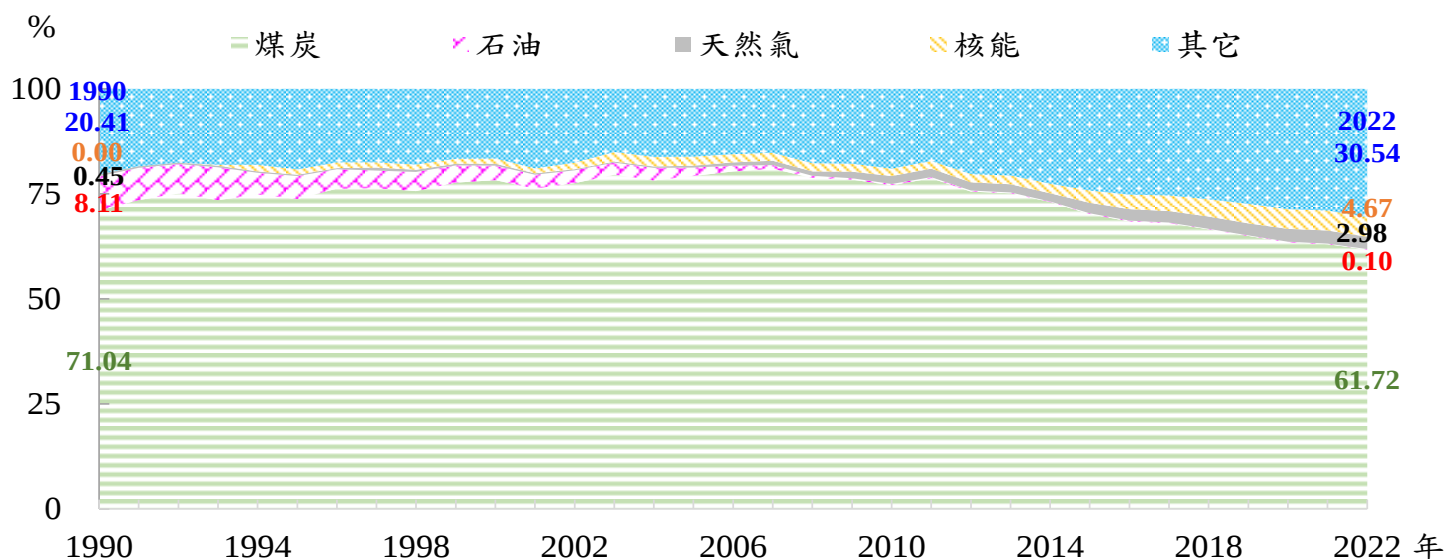
占能耗總量的比重已明顯下降；惟中國作為全球碳排的第一大國，似宜加大控管化石燃料的使用與加速推動能源轉型的時程，以達成其能源政策的目標。

圖 12、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（中國）



資料來源：IEA、作者計算。

圖 13、發電結構的變動情況-中國



註：其它包含水力、太陽能光電、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物、太陽能熱能。

資料來源：IEA、作者計算。

2. 脫鉤指標的結果

表 6 的結果指出，於 2002 年、2004~2005 年，碳排總量變動率與經濟成長率均呈擴張性掛鉤，係因人均所得效果與能源結構效果的正向貢獻所致。（見圖 14）

於 2002 年，中國加入世界貿易組織（World Trade Organization, WTO），因大量外資流入，製造業快速發展，帶動經濟成長，並逐步成為全球鋼鐵、水泥、鋁等最大製造國家。嗣後，經濟成長對化石燃料的依賴性相當高，且未採用高效的能源技術與落實能源結構轉型，致碳排急遽攀升，因此，二者呈擴張性掛鉤。該結果與 Wang et al. (2018)一致。³²

然而，在其它時間點下，二者均為脫鉤狀態，此可能係因中國致力於發展經濟與產業發展，樣本期間內的經濟成長率多為雙位數成長，而在碳排方面，中國的多項政策與規劃（如 2005 年的「十一五規劃」、2006 年的「節能減碳綜合性工作方案」、2016 年的「能源發展十三五計畫」、2022 年的「十四五現代能源發展規劃」等）著重於減碳與改善能耗，以致碳排總量變動率（年增率）除 2003~2005 年呈雙位數成長之外，其餘均為個位數成長，導致二者呈現脫鉤狀態。

觀察圖 14 的結果發現，人均所得效果係造成二者呈掛鉤狀態的主因，而能源效率效果則為脫鉤狀態的主要因素；此外，近年來，能源結構效果的負向貢獻增加，如前所述，此係因發電結構的轉變，即擴展再生能源與天然氣的成效；惟碳密集度效果的正向貢獻仍增加，顯示中國各部門對煤炭的高度依賴。綜上所述，此等結果意味著，若欲維持二者間之脫鉤狀態，改善能源效率與

³² 2003 年碳排總量變動率與經濟成長率呈逆向擴張性脫鉤，顯示該年碳排持續增加，其年增率超過經濟成長率，主因中國經濟快速成長，帶動碳排擴增。

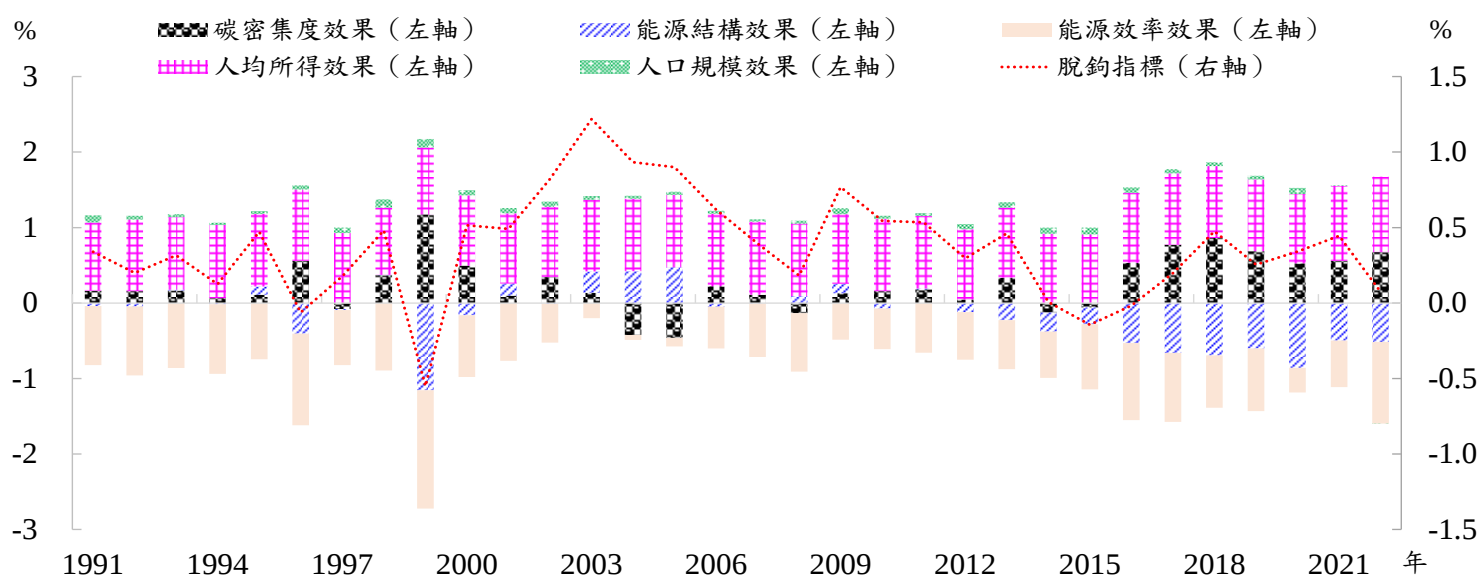
各部門減少使用化石燃料或能源轉型，係減少碳排的關鍵角色。

表 6、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態-中國

年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態
1991	0.34	弱脫鉤	2002	0.82	擴張性掛鉤	2013	0.46	弱脫鉤
1992	0.20	弱脫鉤	2003	1.22	逆向擴張性脫鉤	2014	0.01	弱脫鉤
1993	0.32	弱脫鉤	2004	0.93	擴張性掛鉤	2015	-0.14	強脫鉤
1994	0.12	弱脫鉤	2005	0.90	擴張性掛鉤	2016	-0.02	強脫鉤
1995	0.47	弱脫鉤	2006	0.62	弱脫鉤	2017	0.20	弱脫鉤
1996	-0.06	強脫鉤	2007	0.39	弱脫鉤	2018	0.48	弱脫鉤
1997	0.18	弱脫鉤	2008	0.18	弱脫鉤	2019	0.25	弱脫鉤
1998	0.48	弱脫鉤	2009	0.77	弱脫鉤	2020	0.34	弱脫鉤
1999	-0.55	強脫鉤	2010	0.55	弱脫鉤	2021	0.44	弱脫鉤
2000	0.52	弱脫鉤	2011	0.53	弱脫鉤	2022	0.07	弱脫鉤
2001	0.49	弱脫鉤	2012	0.30	弱脫鉤			

資料來源：作者計算。

圖 14、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果-中國



資料來源：作者計算。

(五) 美國

1. 潛在效果對碳排總量變動率的貢獻情況

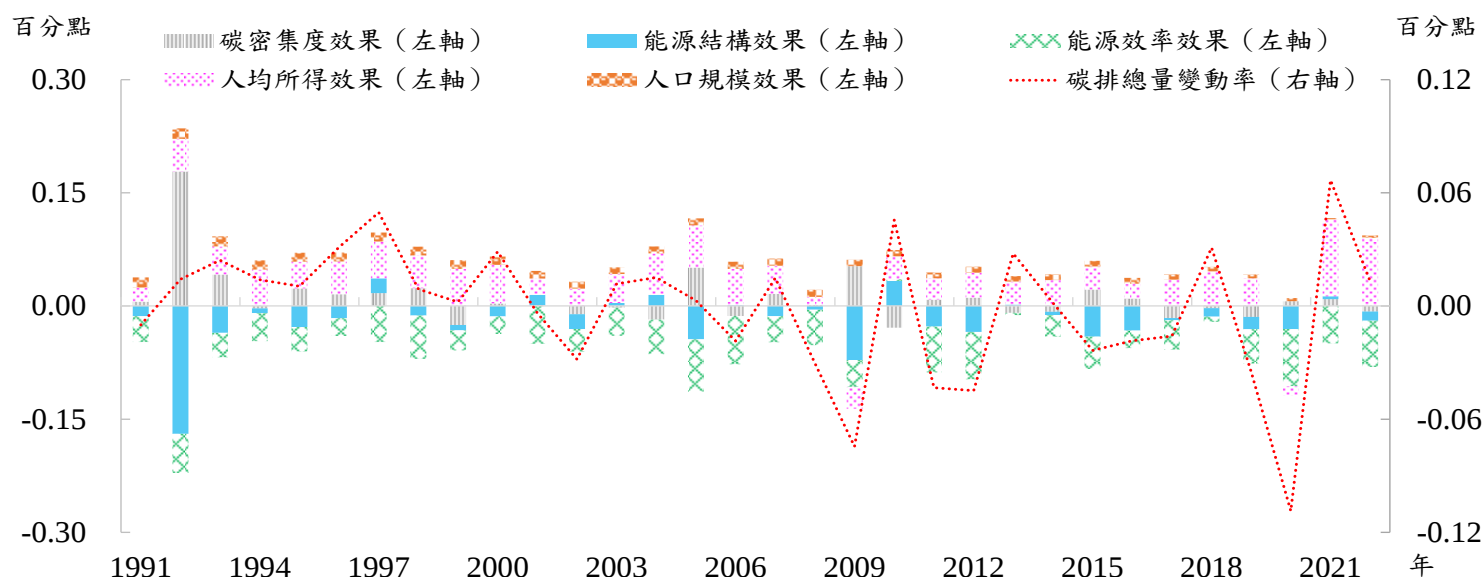
就圖 15 而言，影響美國碳排總量變動率的主要因素為碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果、人均所得效果，該結果與 Wang et al. (2020)一致。

大致而言，1990~2007 年碳排總量多為正成長，主因經濟穩定成長，加以運輸部門對石油的依賴程度高；2008~2009 年受全球金融危機影響，碳排驟減而轉呈負成長；2010~2020 年碳排總量多為負成長，惟於 2021 年疫後經濟復甦，致碳排增加，年增率係樣本期間內最高。

就碳密集度效果而言，在樣本期間內，其對碳排總量變動率多呈正向貢獻，主因以往美國各部門消耗較多的化石燃料，加以發電的燃料多以煤炭為主（1990 年燃煤發電比重為 52.81%）；然而，近年碳密集度效果的正向貢獻已明顯減少，主因當前發電結構明顯轉變，2022 年燃煤發電比重降至 20.32%，燃氣發電比重升至 38.72%，其它發電的比重升至 22.14%。（見圖 16）

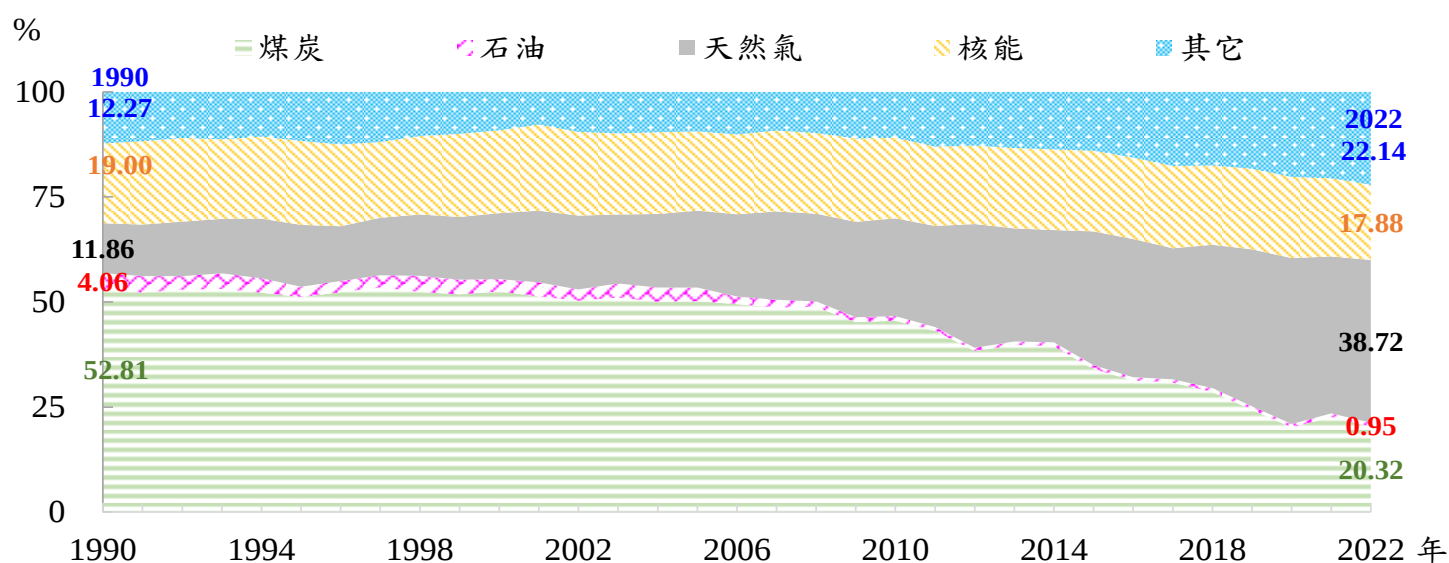
1991~2006 年（共 16 筆樣本）的碳密集度的正向貢獻平均約 1.80 個百分點，惟 2007~2022 年（共 16 筆樣本）平均則約 0.32 個百分點，顯示美國在推動乾淨能源上的努力已有成效，如 2009 年的《美國 2009 潔淨能源與安全法案（The American Clean Energy and Security Act of 2009）》、2015 年的「乾淨電力計畫（Clean Power Plan）」、2022 年的《清潔競爭法案（Clean Competition Act）》等。

圖 15、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（美國）



資料來源：IEA、作者計算。

圖 16、發電結構的變動情況-美國



註：其它包含水力、太陽能光電、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物、太陽能熱能。

資料來源：IEA、作者計算。

就能源效率效果而言，對美國而言，在樣本期間內，除 2010 年處於經濟復甦期間，能源效率效果對碳排總量變動率呈正向貢獻之外，其餘時間點均為負向貢獻，顯示提高能源效率能夠減少能耗，進而減少碳排。

然而，在樣本期間內，除 2009 年全球金融危機期間與 2020

年 COVID-19 疫情期間，經濟受到嚴重的衝擊，致人均所得效果為負向貢獻之外，其餘時間點的人均所得效果均為正向貢獻，顯示激勵民眾節能減碳的自主行為，進而取得經濟與碳排間之平衡為美國政府可以努力的地方。

接著，在能源結構效果方面，其對碳排總量變動率多呈負向貢獻，主因自 1990 年以來，美國持續進行能源轉型，逐漸降低對煤炭等高碳能源的依賴。自頁岩氣革命（tight oil revolution）以來（2000 年中期起），美國成為全球天然氣與石油的主要生產國之一，天然氣供給充足且價格低廉，促使能源部門由燃煤發電轉變成燃氣發電，因此，能源結構效果在樣本期間內大多呈負向貢獻。（見圖 16）

順帶一提，在人口規模效果方面，均為碳排總量變動率的正向貢獻，惟幅度相當小，且隨時間經過，該效果大抵持續減少。在樣本期間內，雖美國人口數持續增加，惟其年增率持續下滑，致該正向貢獻隨時間經過而減少。

2. 脫鉤指標的結果

表 7 的結果指出，樣本期間內，能耗與經濟成長間多為脫鉤狀態，主因能源效率效果具明顯的負向貢獻，抵銷人均所得效果的正向貢獻，該結果與 Wang et al. (2020)一致，且此似乎反映出美國投入節能技術與實施能效標準的成果，使單位 GDP 能耗逐年下降（能源效率提升），帶動碳排減少。

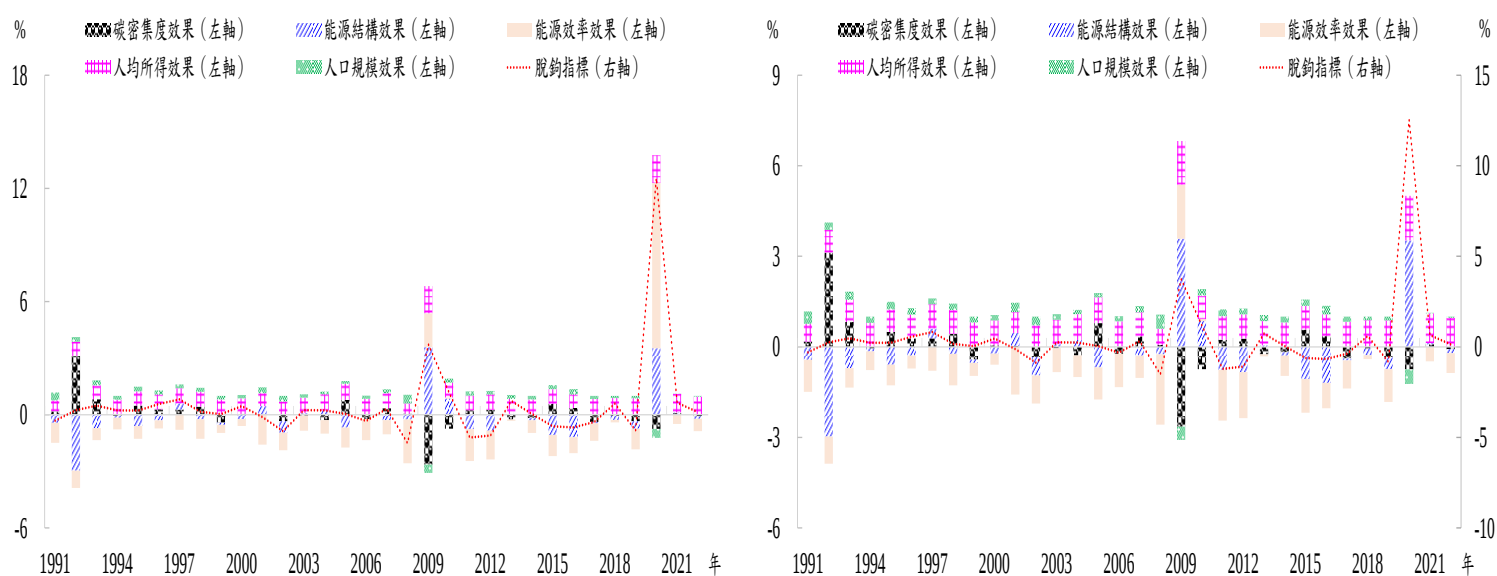
惟於 1997 年、2010 年，二者為擴張性掛鉤，分別係因（1）1997 年美國經濟活絡，GDP 約 6.25%，經濟成長動能強勁帶動運輸與能源需求增加，惟當時發電仍以燃煤為主（比重約 53.44%），加以經濟繁榮促使運輸部門消耗較多石油，致碳排增加。

表 7、1991~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態—美國

年	ϵ	脫鉤狀態	年	ϵ	脫鉤狀態	年	ϵ	脫鉤狀態
1991	-0.31	強脫鉤	2002	-0.88	強脫鉤	2013	0.74	弱脫鉤
1992	0.25	弱脫鉤	2003	0.25	弱脫鉤	2014	0.04	弱脫鉤
1993	0.48	弱脫鉤	2004	0.23	弱脫鉤	2015	-0.61	強脫鉤
1994	0.23	弱脫鉤	2005	0.04	弱脫鉤	2016	-0.67	強脫鉤
1995	0.22	弱脫鉤	2006	-0.32	強脫鉤	2017	-0.38	強脫鉤
1996	0.57	弱脫鉤	2007	0.32	弱脫鉤	2018	0.60	弱脫鉤
1997	0.82	擴張性掛鉤	2008	-1.51	強脫鉤	2019	-0.83	強脫鉤
1998	0.16	弱脫鉤	2009	3.74	衰退性脫鉤	2020	12.54	衰退性脫鉤
1999	0.04	弱脫鉤	2010	1.18	擴張性掛鉤	2021	0.65	弱脫鉤
2000	0.46	弱脫鉤	2011	-1.21	強脫鉤	2022	0.14	弱脫鉤
2001	-0.12	強脫鉤	2012	-1.09	強脫鉤			

資料來源：作者計算。

圖 17、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果—美國



註：由於 2020 年能源效率效果遠大於其它效果，故為利觀察其它潛在效果的貢獻情況，右圖刪除 2020 年的能源效率效果。
資料來源：作者計算。

(2) 全球金融危機後，2010 年經濟逐漸復甦，能源需求增加，導致消耗較多的化石料燃料。Koilkou et al. (2023)指出，2010 年碳排因經濟復甦與消耗較多高碳能源而增加；Magazzino et al. (2024)亦提及，經濟復甦初期常見碳排同步升溫現象。

相反地，2009 年與 2020 年分別受全球金融危機與 COVID-19 疫情危機的影響，致能源效率效果與能源結構效果轉呈正向貢獻，進而造成碳排總量與經濟成長同步衰退，呈衰退性脫鉤。

圖 17 的結果指出，美國能源效率的改善與能源結構的轉變係碳排減少的主因，可能係因技術進步以及發電結構轉變帶來的助益。總言之，在政策制定、科技進展的前提下，有助於實現「高成長、低碳排」的永續目標。

（六）德國

1. 潛在效果對碳排總量變動率的貢獻情況

就圖 18 而言，對德國而言，碳排總量變動率的主要影響因素係碳密集度效果、能源結構效果、能源效率效果與人均所得效果。

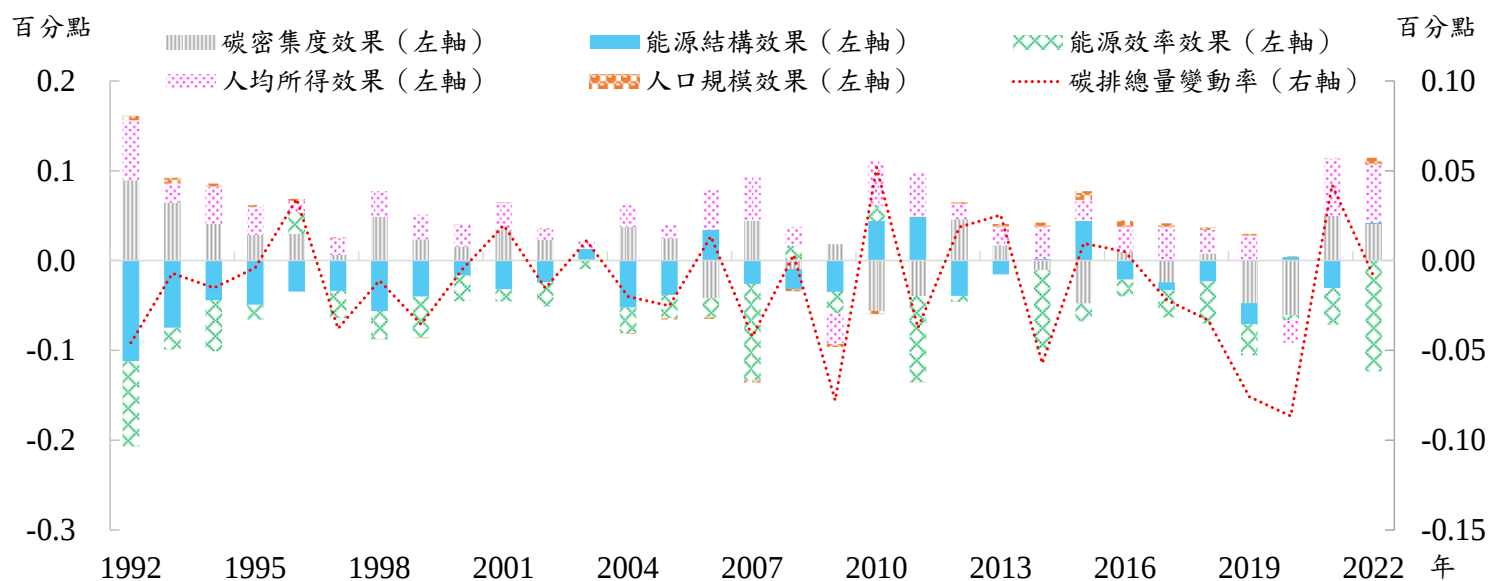
歐洲國家致力於能源轉型，近年來，各產業已大幅減少使用煤炭；此外，觀察圖 19 的發電結構亦發現，燃煤發電比重自 1990 年之 58.48% 降至 2022 年之 32.65%，其它發電比重（含再生能源）則自 1990 年之 4.55% 大幅攀升至 2022 年之 45.62%，主因德國推行「減煤減核」的能源政策，積極減少使用高碳排的燃煤發電，並推動再生能源發展與碳捕捉技術，致近年碳密集度效果多對碳排總量變動率呈負向貢獻，³³ 此與 Koilakou et al. (2023) 一致。

比較特別的是，雖在樣本期間內，能源結構效果對碳排總量變動率多呈負向貢獻，惟該負向貢獻的幅度有減少的情況，似乎隱含著近年能源結構效果的減碳力道有所減弱，可能係因邊際效果降低所致。德國於 1990 年初期便開始著手能源轉型，大幅減少使用燃煤發電、推動再生能源，早期成效顯著，碳排明顯減少，

³³ 碳密集度效果：1992~2006 年（共 15 筆樣本）平均貢獻約 2.85 個百分點下降至 2007~2022 年（共 16 筆樣本）平均貢獻約 -0.40 個百分點。

惟隨再生能源比重逐漸增加，後期新增的轉型空間相對變小。³⁴

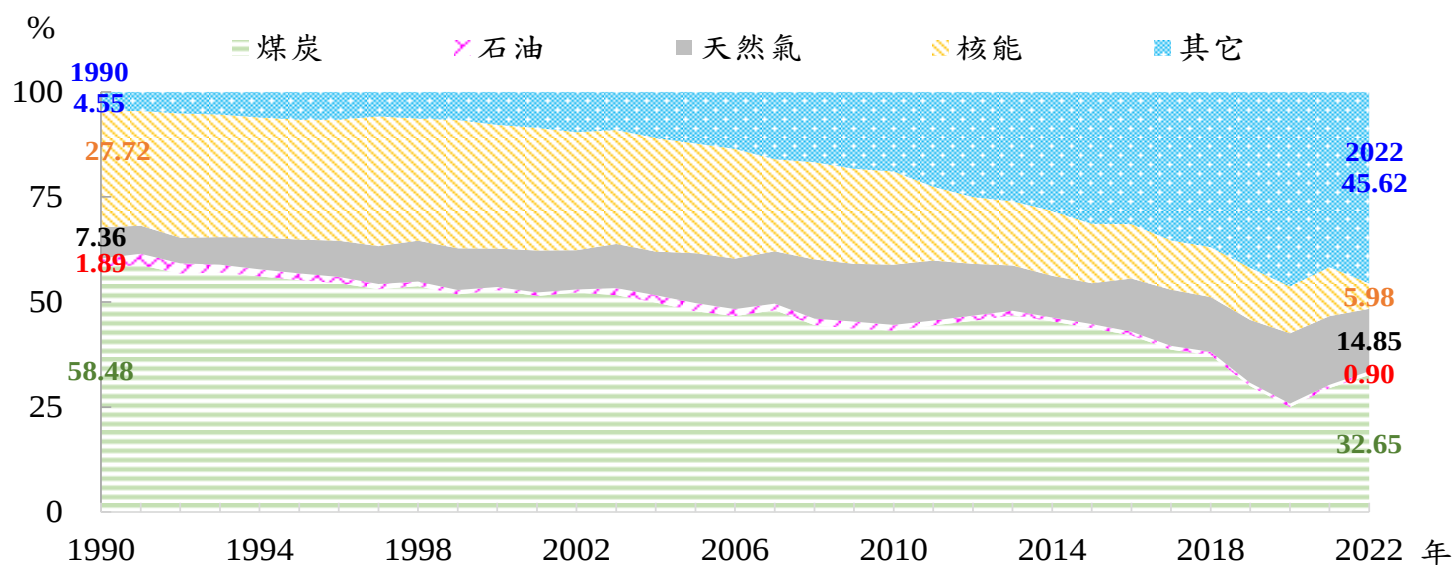
圖 18、碳排總量變動率分解結果-潛在效果的貢獻情況（德國）



註：國內生產毛額（含部門別）資料最早僅能追溯至 1991 年。

資料來源：IEA、作者計算。

圖 19、發電結構的變動情況-德國



註：其它包含水力、太陽能光電、風力、地熱、潮汐、生質燃料、廢棄物、太陽能熱能。

資料來源：IEA、作者計算。

³⁴ 能源結構效果：1992~2006 年（共 15 筆樣本）平均貢獻約-3.76 個百分點下降至 2007~2022 年（共 16 筆樣本）平均貢獻約-0.63 個百分點。

雖德國再生能源發電比重提高，惟並不代表 LMDI 的能源結構效果一定會存在明顯的負向貢獻，因發電結構的轉變主要反映在碳密集度效果，惟在 LMDI 的能源結構效果中，當化石燃料能耗占能耗總量的比例變動趨於穩定，或再生能源的成長未能進一步大幅排擠煤炭與天然氣時，則能源結構效果可能會趨緩。

在能源效率效果方面，與多數樣本國家相同，其對碳排總量變動率多為負向貢獻，可能與工業部門導入高效能製程、自動化與節能設備（如熱能回收、節能馬達等），以及德國政府推動節能法規，促使企業與家計部門減少能源浪費有關。

經濟成長往往伴隨能源需求上升，在樣本期間內，人均所得效果對碳排總量變動率多呈正向貢獻，意味著德國在經濟發展過程中會增加減碳壓力，惟上述的能源效率效果與能源結構效果的負向貢獻能夠抵銷此一正向貢獻，因此，整體而言，德國能夠維持碳排總量變動率下降的趨勢。Koilkou et al. (2023)指出，德國在所得成長的同時，仍可減少碳排，顯示能源政策的成效佳。

整體而言，德國碳排總量變動率下降的主要驅動力為能源效率提升與能源結構轉型。雖人均所得增加對減碳形成壓力，惟其在減排與能源效率上的顯著進步，使其能夠抵銷此一正向貢獻。

2. 脫鉤指標的結果

由表 8 與圖 20 的結果發現，碳排總量變動率與經濟成長率間大抵為脫鉤狀態，主因能源效率效果與能源結構效果的負向貢獻促使二者的變動幅度不同，該結果可能與德國的能源轉型政策逐步淘汰核能與化石燃料，轉向再生能源，並推動多項能源效率提升計畫，如 2002 年的《能源節約法案（Energy Conservation Act）》、2005 年的《能源效率法案（Energy Performance Act）》等；同時，亦制定多項氣候行動計畫，如《氣候行動計畫 2020（Climate Action Programme 2020）》等，明確設定減碳目標與具體措施有關。

特別的是，於 2010 年、2012~2013 年，碳排總量變動率與經濟成長率均為擴張性掛鉤。2010 年全球金融危機過後，經濟處於復甦期間，為刺激景氣，各部門消耗較多能源，進而增加碳排，

因此，二者為擴張性掛鉤。

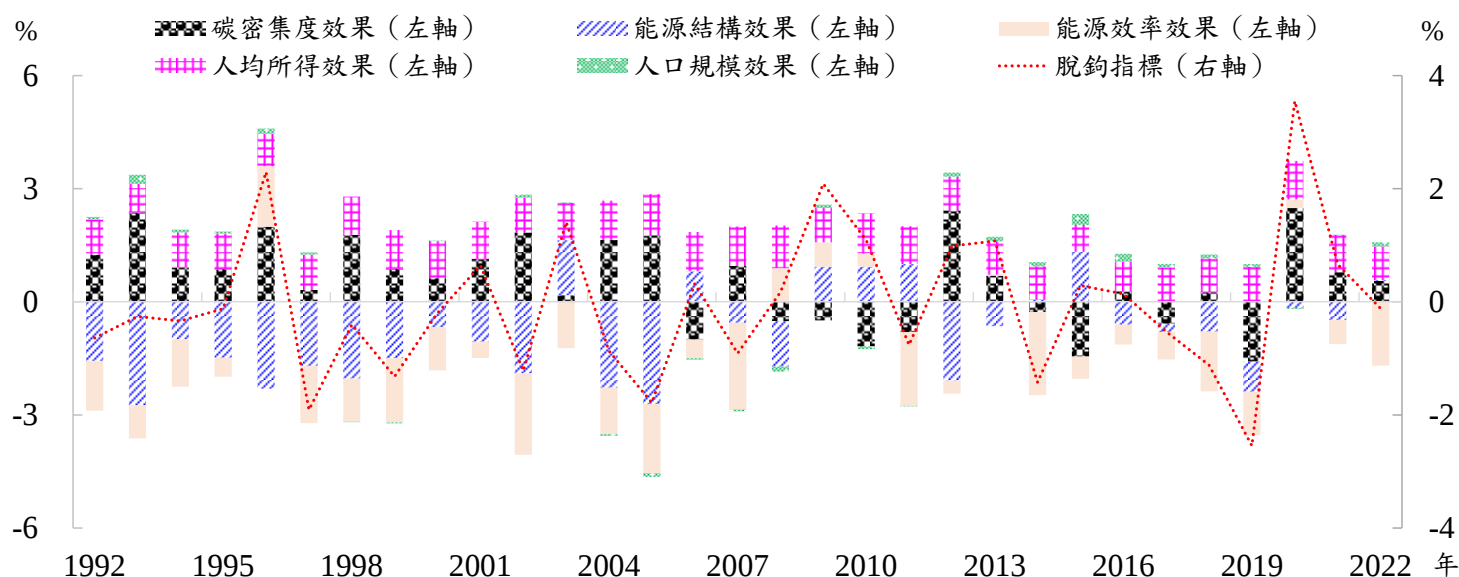
表 8、1992~2022 年碳排總量變動率與經濟成長率之脫鉤狀態—德國

年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態	年	ε	脫鉤狀態
1992	-0.64	強脫鉤	2003	1.41	逆向擴張性脫鉤	2014	-1.42	強脫鉤
1993	-0.26	強脫鉤	2004	-0.87	強脫鉤	2015	0.29	弱脫鉤
1994	-0.34	強脫鉤	2005	-1.78	強脫鉤	2016	0.14	弱脫鉤
1995	-0.12	強脫鉤	2006	0.32	弱脫鉤	2017	-0.53	強脫鉤
1996	2.29	逆向擴張性脫鉤	2007	-0.91	強脫鉤	2018	-1.12	強脫鉤
1997	-1.91	強脫鉤	2008	0.17	弱脫鉤	2019	-2.54	強脫鉤
1998	-0.40	強脫鉤	2009	2.08	衰退性脫鉤	2020	3.55	衰退性脫鉤
1999	-1.32	強脫鉤	2010	1.09	擴張性掛鉤	2021	0.66	弱脫鉤
2000	-0.20	強脫鉤	2011	-0.76	強脫鉤	2022	-0.12	強脫鉤
2001	0.64	弱脫鉤	2012	0.99	擴張性掛鉤			
2002	-1.22	強脫鉤	2013	1.07	擴張性掛鉤			

註：國內生產毛額（含部門別）資料最早僅能追溯至 1991 年。

資料來源：作者計算。

圖 20、脫鉤指標及其潛在因素的貢獻效果—德國



註：國內生產毛額（含部門別）資料最早僅能追溯至 1991 年。

資料來源：作者計算。

2012~2013 年歐債危機過後，德國經濟快速回溫，而因 2011 年日本福島核災發生後，德國政府決定提前關閉核能發電廠，

2012~2013 年核能發電比重明顯下滑（2011~2013 年比重分別為 17.61%、15.83%、15.23%），轉由燃煤發電取代（2011~2013 年比重分別為 44.43%、45.54%、46.82%），加劇碳排，致二者呈擴張性掛鉤。

雖 2012 與 2013 年因廢核政策，導致燃煤發電上升，出現短暫的擴張性掛鉤，惟整體而言，在再生能源擴增與能源密集度降低下，能源結構效果與能源效果持續發酵，形成碳排與經濟成長間穩定的脫鉤關係。面對未來氣候風險的挑戰，持續推動結構性調整與完善能源制度，係德國確保低碳成長的關鍵方法。

彙整所有樣本國家的實證結果，茲說明如下：

- （1）碳密集度效果：對碳排總量變動率多為正向貢獻，惟對美國與德國而言，近年來，因發電結構的明顯轉變，該正向貢獻已有縮減或轉呈負向貢獻。
- （2）能源效率效果：對碳排總量變動率幾乎呈負向貢獻，顯示提高能源效率能夠減少能耗，進而有助於減少碳排。
- （3）能源結構效果：對碳排總量變動率多為負向貢獻，惟各樣本國家的結果存在相當大的異質性，可能係因各國能源政策與能源轉型的速度不同。
- （4）人均所得效果：對碳排總量變動率多為正向貢獻，顯示能源需求因經濟成長而上升，進而導致碳排增加。
- （5）人口規模效果：對碳排總量變動率多為正向貢獻，惟幅度相當小且正向貢獻隨時間經過而減少，主因多數樣本國家的人口成長率均低且隨時間經過而下降。此外，近年來，部分樣本國家（如臺灣、日本、南韓、中國）的人口為負成長，致

該效果轉呈負向貢獻。

- (6) 就脫鉤指標的結果而言，對所有的樣本國家而言，在樣本期間內，碳排總量變動率與經濟成長率間大多呈脫鉤狀態，顯示各國政府的減碳措施成果。

伍、結論與政策建議

一、結論

(一) 各國碳排的主要影響因素係人均所得效果與能源效率效果

碳排的變動情況受到多種因素的影響，本文以 Kaya 恆等式為基礎，並搭配 LMDI 方法分解來認定。結果發現，人均所得效果對碳排總量變動率的正向貢獻最明顯，顯示經濟成長雖推升所得，卻伴隨碳排增加。相對地，能源效率效果則多為負向貢獻，係減碳的重要驅動力，此反映著在追求經濟成長的同時，仍需高度關注碳排管理與能源效率改善的重要性。

(二) 各國碳排的變動情況具異質性，可能係因發電結構、能源政策的影響

因文化背景與發電結構不同，致各國執政者採行的能源政策及其推動力度存在差異，以致碳排的變動情形存在異質性。例如，發電結構中的再生能源比重較高之國家（如德國），其能源結構效果對碳排具有明顯的負向貢獻，惟近年該效果對減碳的力度有所減弱；反之，對依賴高碳能源的國家（如臺灣、南韓、中國）而言，以往能源結構效果雖對減碳的貢獻有限，惟近年的負向貢獻幅度漸趨明顯。

（三）樣本期間內，各樣本國家的碳排與經濟成長多為脫鉤狀態

就脫鉤指標的結果而言，各樣本國家的碳排總量變動率與經濟成長率間多呈脫鉤狀態，顯示能源效率效果已抵銷人均所得效果帶來的減碳壓力。雖部分時間點（如亞洲金融危機、全球金融危機）的脫鉤狀態曾有短暫的轉變，惟整體趨勢仍指向碳排與經濟成長間的脫鉤關係，反映著政府政策與技術進步（能源效率提升）的正面效果。

二、政策建議

（一）持續提升能源效率，以鞏固脫鉤成效

提升能源效率為減少碳排與能耗的核心關鍵，各國政府宜持續推動節能技術創新與應用，加強各產業的用能與節能管理。同時，深化民眾節能減碳意識，進而強化整體社會對淨零排放的支持。

（二）積極推進能源結構轉型，降低高碳能源的依賴度

發電結構對碳排具有長期深遠影響，各國宜加快能源轉型，逐步減少使用高碳能源，擴大再生能源。同時，建立多管道的低碳能源（如天然氣）來源，提高能源供給的穩定，以因應國際情勢與氣候變遷帶來的衝擊。

對臺灣而言，2025 年 5 月核三廠 2 號機除役，正式進入非核家園，非核政策對碳排壓力不容忽視，發電來源可能將更倚賴天然氣、煤炭等燃料，核能退場後的能源組合調整與碳排動態，將取決於天然氣與再生能源能否即時補足能源缺口，仍宜持續關注。

（三）因應國際變局，動態調整能源與減碳政策

考量到全球能源市場持續受到地緣政治與供應鏈問題（如俄烏戰爭、³⁵ 國際貿易摩擦）等影響，各國政府宜建立具有彈性的能源管理系統，適時檢視與調整減碳策略，確保碳排與經濟成長持續脫鉤，進而實現永續發展。

³⁵ 俄烏戰爭爆發後，歐洲國家為了因應俄羅斯切斷天然氣供給，轉而使用煤炭來發電，例如，德國原本計畫在 2030 年前逐步淘汰燃煤發電，惟為因應俄烏戰爭造成的能源危機，延遲關閉部分燃煤發電廠。

參考文獻

- 李正豐與林勻浙 (2008), 「我國公路運輸溫室氣體排放變動因素分解分析」, 《運輸計畫季刊》, 第 37 卷第 4 期, 頁 360–380。
- 李正豐與陳昭羽 (2007), 「1995~2005 年臺灣工業部門 CO₂ 排放變動因素分解分析」, 《工業污染防治》, 第 104 期, 頁 29–46。
- 李堅明、黃宗煌、孫一菱、莊敏芳 (2006), 「臺灣二氧化碳排放脫鉤指標之建立與評估」, 《臺灣經濟論衡》, 第 4 卷第 3 期, 頁 1–24。
- 蔡釗旻 (2025), 「主要國家『能源消耗量』的影響因素 – 對數平均迪氏指數 (LMDI) 與脫鉤指標之應用」, 中央銀行經濟研究處, 內部研究報告。
- Andreoni, V. and S. Galmarini (2012), “Decoupling Economic Growth from Carbon Dioxide Emissions: A Decomposition Analysis of Italian Energy Consumption,” *Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 682–691.
- Chang, Y.-F. and B. Huang (2023), “Factors Leading to Increased Carbon Dioxide Emissions of the APEC Countries: the LMDI Decomposition Analysis,” *The Singapore Economic Review*, Vol. 68, No. 6, pp. 2195–2214.
- Chou, K.-T., D. Walther and H.-M. Liou (2019), “The Conundrums of Sustainability: Carbon Emissions and Electricity Consumption in the Electronics and Petrochemical Industries in Taiwan,” *Sustainability*, Vol. 11, No. 20, pp. 5664–5686.
- Diakoulaki, D. and M. Mandaraka (2017), “Decomposition Analysis for Assessing the Progress in Decoupling Industrial Growth from CO₂ Emissions in the EU Manufacturing Sector,” *Energy Economics*,

Vol. 29, No. 4, pp. 636–664.

Dong, F., J. Li, Y. Wang, X. Zhang, S. Zhang and S. Zhang (2019), “Drivers of the Decoupling Indicator between the Economic Growth and Energy–Related CO₂ in China: a Revisit from the Perspectives of Decomposition and Spatiotemporal Heterogeneity,” *Science of The Total Environment*, Vol. 685, pp. 631–658.

Gołaś, Z. (2023), “Decoupling Analysis of Energy–Related Carbon Dioxide Emissions from Economic Growth in Poland,” *Energies*, Vol. 16, No. 9, pp. 1–27.

Henriques, S. T. and K. J. Borowiecki (2017), “The Drivers of Long–Run CO₂ Emissions in Europe, North America and Japan since 1800,” *Energy Policy*, Vol. 101, pp. 537–549.

Huang, Y.–H and J.–H Wu (2013), “Analyzing the Driving Forces behind CO₂ Emissions and Reduction Strategies for Energy–Intensive Sectors in Taiwan, 1996–2006,” *Energy*, Vol. 57, pp. 402–411.

Huang, Y.–H., J.–H. Wu and H.–S. Huang (2021), “Analyzing the Driving Forces behind CO₂ Emissions in Energy–Resource–Poor and Fossil–Fuel–Centered Economies: Case Studies from Taiwan, Japan, and South Korea,” *Energies*, Vol. 14, No. 17, pp. 1–14.

Koilakou, E., E. Hatzigeorgiou and K. Bithas (2023), “Carbon and Energy Intensity of the USA and Germany. A LMDI Decomposition Approach and Decoupling Analysis,” *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, pp. 12412–12427.

Leal, P. A., A. C. Marques and J. A. Fuinhas (2019), “Decoupling

Economic Growth from GHG Emissions: Decomposition Analysis by Sectoral Factors for Australia,” *Economic Analysis and Policy*, Vol. 62, pp. 12–26.

Lee, C.–M. and E. R. Rosalez (2017), “Economic Growth, Carbon Abatement Technology and Decoupling Strategy–The Case of Taiwan” *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 17, pp. 1649–1657.

Lu, I. J., S. J. Lin and C. Lewis (2007), “Decomposition and Decoupling Effects of Carbon Dioxide Emission from Highway Transportation in Taiwan, Germany, Japan and South Korea,” *Energy Policy*, Vol. 35, pp. 3226–3235.

Magazzino, C., P. Pakrooh and M. Z. Abedin (2024), “A Decomposition and Decoupling Analysis for Carbon Dioxide Emissions: Evidence from OECD Countries,” *Environment, Development and Sustainability*, Vol 26, pp. 28539–28566.

OECD (2002), “Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth,” Sustainable Development, SG/SD (2002)1/Final, Organisation for Economic Co-operation and Development, pp. 1–108.

Parker, S. (2024), “Assessing Progress in Decoupling Transport CO₂ Emissions from GDP Growth since 1970,” *Empirical Economics*, Vol.66, pp. 27–51.

Tapio, P. (2005), “Towards a Theory of Decoupling: Degrees of Decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland between 1970 and 2001,” *Transport Policy*, Vol. 12, No. 2, pp. 137–

- Wang, Q. and X. Song (2021), “How UK Farewell to Coal–Insight from Multi–Regional Input–Output and Logarithmic Mean Divisia Index Analysis,” *Energy*, Vol. 229, No. 120655.
- Wang, Q., Y. Hang, P. Zhou and Y. Wang (2016), “Decoupling and Attribution Analysis of Industrial Carbon Emissions in Taiwan,” *Energy*, Vol. 113, pp. 728–738.
- Wang, Q., M. Zhao, R. Li and M. Su (2018), “Decomposition and Decoupling Analysis of Carbon Emissions from Economic Growth: A Comparative Study of China and the United States,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 197, pp. 178–184.
- Wang, Z., J. Qingzhe, D. Kangyin, S. M. Muhammad and D. Xiucheng (2020), “Decomposition of the US CO₂ Emissions and Its Mitigation Potential: An Aggregate and Sectoral Analysis,” *Energy Policy*, Vol. 147, No. 111925.
- Zhu, C. Z. and W. B. Du (2019), “A Research on Driving Factors of Carbon Emissions of Road Transportation Industry in Six Asia–Pacific Countries Based on the LMDI Decomposition Method,” *Energies*, Vol. 12, No. 21, pp. 1–19.
- Zhu, Z. (2023), “Analysis of Carbon Emission Factors in China and Japan Based on LMDI,” International Conference on Energy Materials and Environment Engineering (ICEMEE), E3S Web of Conferences, Vol. 406, No. 03003, pp. 1–4.

附錄一、各國敘述統計表

附錄表 1、敘述統計-臺灣

定義		平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
碳排總量（百萬公噸）		228.89	51.28	117.95	282.04	33
碳排 （百萬公噸）	煤炭	119.48	39.92	41.65	156.99	
	石油	81.42	11.92	61.79	100.87	
	天然氣	27.98	18.33	3.50	63.24	
能耗總量（兆焦耳）		2,548,634.94	590,275.12	1,344,115.00	3,195,292.00	
能耗 （兆焦耳）	煤炭	232,633.70	43,503.37	145,477.00	305,240.00	
	石油	1,516,747.09	307,102.41	876,593.00	1,842,697.00	
	天然氣	119,109.67	55,052.13	46,126.00	245,434.00	
國內生產毛額（新臺幣百萬元）		12,671,208.45	4,906,689.20	4,474,288.00	22,820,430.00	
人口數（千人）		22,557.42	978.81	20,401.31	23,603.12	

註：國內生產毛額為未季調、名目的資料，見註解 15。

資料來源：IEA、主計總處、內政部。

附錄表 2、敘述統計-日本

定義		平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
碳排總量（百萬公噸）		1,104.80	68.32	938.25	1,213.46	33
碳排 （百萬公噸）	煤炭	378.58	52.44	294.98	461.68	
	石油	540.94	107.83	349.50	674.60	
	天然氣	185.27	44.06	111.56	251.64	
能耗總量（兆焦耳）		12,922,751.88	936,275.25	10,915,890.00	14,206,458.00	
能耗 （兆焦耳）	煤炭	931,885.73	91,143.42	746,385.00	1,133,725.00	
	石油	7,287,397.82	1,012,092.83	5,346,279.00	8,542,468.00	
	天然氣	1,133,019.61	251,567.38	633,169.00	1,440,831.00	
國內生產毛額（10 億日圓）		530,519.01	18,023.57	494,938.40	560,506.00	29
人口數（千人）		126,483.09	1,373.36	123,672.00	128,091.00	33

註：國內生產毛額（含部門別）為未季調、名目的資料，見註解 15。資料最早僅能追溯至 1994 年。

資料來源：IEA、日本內閣府、EIA。

附錄表 3、敘述統計-南韓

定義		平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
碳排總量 (百萬公噸)		461.81	108.82	229.76	609.94	33
碳排 (百萬公噸)	煤炭	218.68	84.77	89.88	334.55	
	石油	176.46	25.78	132.95	236.00	
	天然氣	66.68	38.27	6.93	124.33	
能耗總量 (兆焦耳)		5,819,366.00	1,405,252.79	2,736,598.00	7,594,021.00	
能耗 (兆焦耳)	煤炭	411,107.64	72,270.11	259,330.00	556,572.00	
	石油	3,388,649.33	505,663.58	1,827,973.00	4,082,240.00	
	天然氣	667,884.64	345,273.24	41,795.00	1,069,104.00	
國內生產毛額 (10 億韓元)		1,132,575.67	648,437.03	200,556.30	2,323,781.50	
人口數 (千人)		48,263.76	2,491.66	44,166.00	51,881.00	

註：國內生產毛額 (含部門別) 為未季調、名目的資料，見註解 15。
資料來源：IEA、Bloomberg、EIA。

附錄表 4、敘述統計-中國

定義		平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
碳排總量 (百萬公噸)		5,997.70	3,051.50	2,088.85	10,591.97	33
碳排 (百萬公噸)	煤炭	4,947.23	2,445.19	1,790.81	8,347.50	
	石油	847.82	420.77	278.23	1,553.80	
	天然氣	202.66	218.36	19.81	701.35	
能耗總量 (兆焦耳)		53,770,367.94	22,254,463.86	26,908,206.00	87,846,679.00	
能耗 (兆焦耳)	煤炭	21,011,934.97	7,607,090.89	11,491,304.00	32,372,309.00	
	石油	12,997,541.94	7,264,562.71	3,431,395.00	25,824,953.00	
	天然氣	3,045,101.79	3,148,934.05	393,204.00	10,429,941.00	
國內生產毛額 (人民幣 10 億元)		61,695.96	33,158.09	16,184.02	120,472.40	
人口數 (千人)		1,311,051.39	83,562.91	1,153,704.00	1,425,893.00	

註：國內生產毛額 (含部門別) 為未季調、名目的資料，見註解 15。
資料來源：IEA、Bloomberg、EIA。

附錄表 5、敘述統計—美國

定義		平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
碳排總量（百萬公噸）		5,132.46	399.01	4,238.26	5,689.47	33
碳排 （百萬公噸）	煤炭	1,783.56	401.31	866.17	2,179.15	
	石油	2,057.76	159.56	1,724.20	2,316.64	
	天然氣	1,291.14	197.09	994.85	1,733.56	
能耗總量（兆焦耳）		63,116,821.12	3,667,177.03	55,351,808.00	67,667,235.00	
能耗 （兆焦耳）	煤炭	1,167,727.33	415,554.54	540,494.00	2,329,408.00	
	石油	31,443,646.73	2,061,431.78	27,963,134.00	35,288,888.00	
	天然氣	15,502,170.27	1,110,012.49	13,822,355.00	17,935,607.00	
國內生產毛額（10 億美元）		13731.11	5,497.71	5,963.14	26,006.89	
人口數（千人）		296,512.97	26,032.92	249,517.00	333,096.00	

註：國內生產毛額（含部門別）為未季調、名目的資料，見註解 15。
資料來源：IEA、Bloomberg、EIA。

附錄表 6、敘述統計—德國

定義		平均數	標準差	最小值	最大值	樣本數
碳排總量（百萬公噸）		767.16	91.33	574.62	935.12	33
碳排 （百萬公噸）	煤炭	333.51	68.44	179.59	516.18	
	石油	275.61	40.15	209.18	335.88	
	天然氣	158.05	16.37	115.23	183.80	
能耗總量（兆焦耳）		9,419,032.03	357,497.17	8,601,307.00	10,015,841.00	
能耗 （兆焦耳）	煤炭	432,214.42	291,789.32	234,776.00	1,643,184.00	
	石油	4,330,382.91	240,848.36	110,992.00	742,861.00	
	天然氣	2,451,813.55	222,520.63	1,817,221.00	2,792,775.00	
國內生產毛額（10 億美元）		2,560.27	636.36	1,591.61	3,953.85	32
人口數（千人）		81,429.82	1,023.75	79,433.03	83,870.00	33

註：國內生產毛額（含部門別）為未季調、名目的資料，見註解 15。資料最早僅能追溯至 1991 年。
資料來源：IEA、Bloomberg、EIA。