

能源消費與碳排放之因素拆解法：方法論與挑戰

黃宗煌¹

一、前言

能源消費量與碳排放的增長，一直是許多研究所關注的議題，特別是將各變量按可能的驅動力而拆解成幾項可以線性加總的因素〔此即所謂的「因素拆解」(factor decomposition)〕，其中 Kaya Identity〔見式(1)²〕堪稱是最負盛名且廣被採用的拆解法。

$$CO_2 = \frac{CO_2}{N} \cdot \frac{N}{Y} \cdot \frac{Y}{P} \cdot P \quad (1)$$

其中 CO_2 、 N 、 Y 及 P 分別代表 CO_2 排放量、能源消費量、GDP 及人口數。

根據式(1)，吾人可將 CO_2 排放量拆解成 4 項組成因素的加總：能源的碳密集度 (A)、GDP 的能源密集度 (B)、人均 GDP (C)、及人口數 (D)；亦即：

$$CO_2 = A + B + C + D \quad (2)$$

此一拆解方法有許多優點：(1) 數學恆等式明確易懂；(2) 線性加總的各項組成因素也接地氣，容易理解，而且堪稱合理。(3) 各項因素可以完全解釋 CO_2 排放量變動，因此可望為決策者提供減碳策略。(4) 此一拆解方法普遍被國際組織採用，也常見於相關文獻，故拆解結果容易進行跨域的比較。(5) 根據 Kaya Identity 的拆解結果，可進一步進行主成分 (principal components) 的「群聚分析」(cluster analysis)。³

因此，Kaya Identity 的應用盛極一時，被廣泛用於能源需求、人均碳排放等許多變數的因素拆解，例如：我國的溫室氣體排放清冊、IPCC Special Report on Emissions Scenarios、Nationally Determined Contributions (NDCs)、美國能源情報署 (EIA) 和國際能源總署 (IEA)、以及用於拆解環境衝擊之驅動力的 IPAT Identity⁴等，皆採用此一方法；國內外的相關研究更是不勝枚舉 (吳榮華、黃玄洲 (2001)；周鳳瑛、李佳玲(2001)；吳銘峰(2003)；黃運貴、曹壽民 (2005)；吳榮華、陳彥尹、黃韻勳 (2005)；林素貞等人(2006)；林佑蓉(2007)；Liu (2007)；李正豐、林勻淅(2008)；陳治均，葛復光 (2013)；單佩玲 (2015)；張志瑋等人 (2016)；黃韻勳 (2018) 等)。

舉例而言，Alcántara, Duarte and Obis (2008)將人均 CO_2 排放量拆解如式(3)：

¹ 清華大學榮譽退休教授、天盛氣候能源股份有限公司及財團法人綠色生產力基金會顧問。

² Kaya Identity 由日本經濟學家 Yoichi Kaya (1989, 1997) 提出，用以拆解 CO_2 排放量的組成因素，並解釋各國碳排放的差異來源。

³ 見 Alcántara, Duarte and Obis (2008)。

⁴ IPAT Identity 也是一個方程式如下： $I = P \cdot A \cdot T$ ，其中 I 、 P 、 A 、 T 分別代表環境衝擊、人口數、影響因子 (affluence，如人均 GDP)、及技術。

Bruvoll and Medin (2003)將能源燃燒排放量 (P^{SM}) 拆解如式 (4)：

$$\frac{CO_2}{P} = \frac{CO_2}{N} \cdot \frac{N}{F} \cdot \frac{F}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \quad (3)$$

$$P^{SM} = \sum_s \sum_i \sum_w \frac{P_{wis}^{SM}}{N_{wis}} \cdot \frac{N_{wis}}{N_{is}} \cdot \frac{N_s}{GDP_s} \cdot \frac{GDP_s}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P \quad (4)$$

式 (3) 的特色在於反映能源轉換率 (N/F) 的影響；式 (4) 則考慮了能源的燃燒方法 (w)、能源種類 (i)、及產業部門 (s)，因此，可反映燃燒技術 (P_{wis}^{SM} / N_{wis})、能源結構 (N_{wis} / N_{is})、產業結構 (GDP_s / GDP) 等因素的影響。

Bruvoll and Medin (2003)應用式 (4) 拆解挪威多種空氣污染物及 CO_2 的組成因素，其結果如表 1 所示。

表 1. 挪威各污染物排放之組成因素的貢獻程度：1980 至 1996

組成因素	污染物類別									
	Pb	SO ₂	NOx	CO ₂	CO	PM	NM VOC	N ₂ O	CH ₄	NH ₃
人口	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
經濟規模	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
產業結構	-13	-9	2	8	-13	-14	3	-5	8	-6
能源密集度	-16	-13	-21	-22	-16	-15	-9	-1	-1	0
能源配比	-8	-29	-3	-17	-5	8	-1	1	0	0
燃燒方法	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0
其他技術：能源 ^(a)	-112	-31	-19	0	-42	-13	-16	3	0	4
其他技術：中間製程 ^(b)	-9	-52	-4	-2	-3	-3	69	-40	-37	-40
總變動	-99	-76	17	26	-20	24	105	18	29	17

註：此處的貢獻程度係以 1996 年之排放量相對於 1980 年之排放量所增加的百分比計之。

(a)能源的碳密集度。

(b)中間製程的其他物質排放密集度。

資料來源：Bruvoll and Medin (2003)。

Li and Ou (2013) 也應用 Kaya Identity 而將 GDP 的碳密集度設定如式 (5)：

$$I = \frac{CO_2}{GDP} = \sum_i \sum_j (R_{ij} \cdot e_{ij} \cdot Q_i \cdot S_i) \quad (5)$$

其中 R_{ij} 代表第 i 部門所使用之第 j 種燃料的碳排係數； e_{ij} 代表第 i 部門所使用之第 j 種燃料的占比 (反映能源結構)； Q_i 代表第 i 部門之 GDP 的能源密集度； S_i 代表第 i 部門之 GDP 的占比 (反映產業結構)。⁵

二、Kaya 拆解法的挑戰

⁵ 其實 Li and Ou (2013) 的拆解只能算是 Bruvoll and Medin (2003) 簡化後的特例之一。

應用 Kaya Identity 拆解法的相關文獻雖然極為豐富，但也引起許多質疑和批評；例如在「On The Kaya Identity」這個網頁上，就出現了許許多多五花八門的評論；有趣的是，Kaya 是位工程學者，而留言批評者，也大多是工程學界的專家。

整體而言，我認為 Kaya Identity 在方法上無可挑剔，畢竟任何批評都無法否認恆等式是成立的，但數學上的本質卻與實務經驗不盡相容，其政策意涵更是非我所願，因此，有人認為 Kaya Identity 是“USELESS”，故以之作為研擬節能減碳策略時，恐須倍加審慎。

本節論述 Kaya 拆解法的一些問題如下：

(一) 因素的選擇及涵蓋的面向流於主觀認知

一如式 (1)、式 (3) 和式 (4) 所示，各等式所涵蓋的因素可因研究目的和研究者主觀認知而增減；換言之，建立恆等式時雖有所本（例如能源轉換率、能源的燃燒技術、能源結構、產業結構、人均 GDP、人口數等因素皆是關鍵性的驅動力），但絕非必然如此，況且因素之間重複交錯，相互不獨立，因素的選擇及涵蓋的面向（因素個數）也受制於研究者的主觀認定。

(二) 數學恆等式難獲實證分析的支持

雖然 Kaya Identity 並不是一條迴歸式，但式 (1) 隱含：

$$\ln CO_2 = \ln \frac{CO_2}{N} + \ln \frac{N}{Y} + \ln \frac{Y}{P} + \ln P \quad (6)$$

換言之，CO₂ 排放量的各因素彈性（ $= \partial \ln CO_2 / \partial \ln X_i$ ）均等於 1；這樣的隱性假設顯然很難與實證模型的推估結果相容。

(三) 各組成因素與應變數的因果關係不明，也不具有預測功能

雖然 Kaya Identity 是恆等式，但無法據以說明各因素與應變數之間的因果關係 (causality)。因此，Briggs (2014) 認為，如欲刻劃彼此間的因果關係，還是有必要建立適當的經濟計量模型，並進行因果關係的檢定，以確保模型的可接受性。

此外，Briggs (2014) 也指出，Kaya 的拆解方式不具有預測能力，因此，應用此一拆解方法的結果來預測應變數的未來趨勢，是無法接受的。

(四) 拆解結果與政策意涵的問題

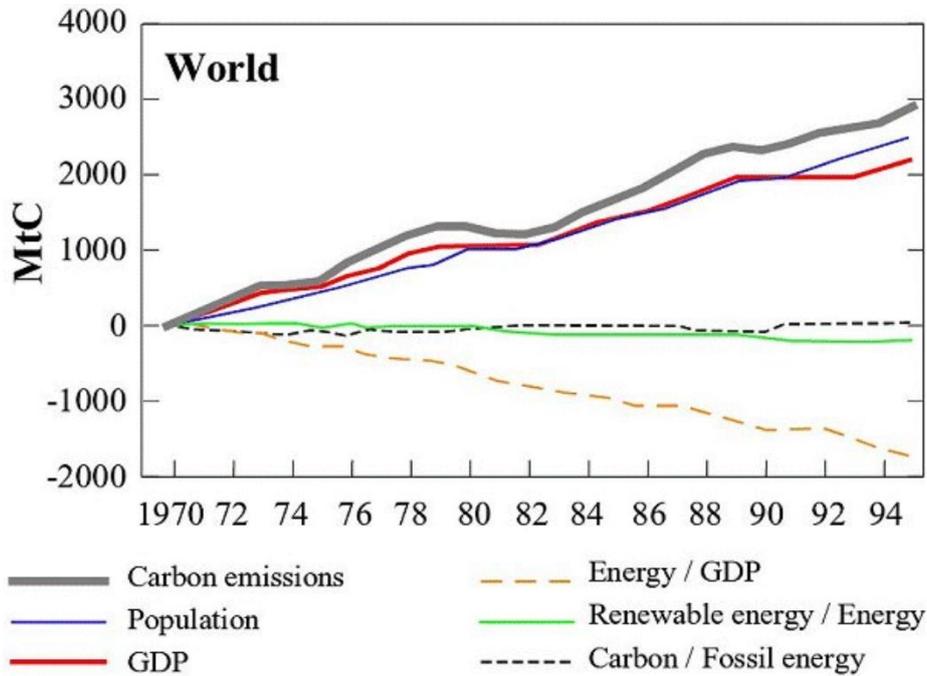
由表 1 可以看出，人口或經濟規模（即人均 GDP）對於各種污染物的貢獻度完全相同，其於不同部門之間也完全相同。這正是 Kaya Identity 下的必然結果，但這樣的結果委實難以接受。⁶

⁶ 即因此故，Shang and Huang (2011) 將 CO₂ 排放量拆解如下：

此外，Kaya 的拆解模式雖然甚為廣用，惟文獻上所有的分析結果，幾乎一致顯示人均 GDP 係構成各部門排放增量的最主要因素(見圖 1 和圖 2)，因此隱含減碳的最有效策略首重於降低人均 GDP。這樣的政策意涵顯然極不實際，對於減量政策的制定毫無助益。因此，有必要根據拆解結果，建立其與各項政策工具之間的關聯，始能掌握政策制訂的有效方向。

(五) Kaya 拆解法忽略了許多影響應變數的自變數

在 Kaya Identity 的設定下，無論是能源消費量、碳排放量、還是人均碳排放量，往往無法容納若干極為重要又具影響力的因素，例如政策變數（能源價格、總量管制、碳權交易等）、時間、技術進步、不確定性 (uncertainty) 等。因此，此一拆解方法既無法傳遞有用的政策意涵，也無法解釋重要政策變數的影響，更有學者指出：“if the time-dependencies were inadvertently left out, then Kaya is most certainly not an identity.”

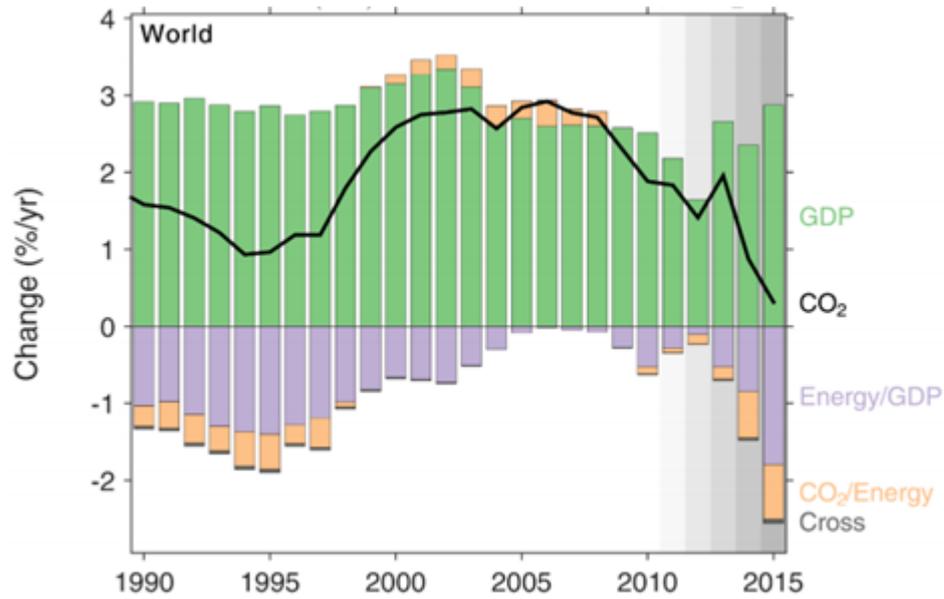


Source: Gürer and Ban (1997).

圖 1. 全球碳排放量的驅動力及其貢獻度：1970-1995

$$CO2_{st} = \frac{CO2_{st}}{N_{st}} \cdot \frac{N_{st}}{GDP_{st}} \cdot \frac{GDP_{st}}{GDP_t} \cdot \frac{GDP_t}{B_{st}} \cdot \frac{GDP_t}{(GDP_{st}/B_{st})}$$

上式同時反映了能源之碳密集度 ($CO2_{st}/N_{st}$)、GDP 的能源密集度 (N_{st}/GDP_{st})、產業結構 (GDP_{st}/GDP_t)、勞動平均生產力 (GDP_t/B_{st})、及各部門的勞動力 ($GDP_t/(GDP_{st}/B_{st})$) 等因素的影響。



Source: Peters et al. (2017).

圖 2. 全球碳排量的驅動力及其貢獻度：1990-2015

三、改善作法

(一) 建立並推估政策變數與各因素之貢獻量的關聯模式

因素拆解的終極目的，既是為了掌握應變數變動的驅動力及其貢獻度之外，更重要的是，為了釐清政策變數對應變數的影響程度，以作為研擬因應策略參考。因此，即便吾人可以根據不同的思維而根據 **Kaya Identity** 拆解出多項因素，應該更進一步建立各因素之貢獻量與政策變數之間的關聯。

為此，Shan and Huang (2011) 首先考慮各部門之勞動力及其生產力的差異，應用 **Kaya Identity** 估算各因素對部門 CO_2 的貢獻量（見表 2），然後建立各因素貢獻量與相關政策變數的 *seemingly unrelated regression model* 如式 (7) 所示：

$$\begin{bmatrix} CI_{jt} \\ EI_{jt} \\ SE_{jt} \\ LP_{jt} \\ WE_{jt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & EV_{jt} & TAR_{jt} & TOT_{jt} & T_{jt} \\ 1 & EV_{jt} & TAR_{jt} & TOT_{jt} & T_{jt} \\ 1 & EV_{jt} & TAR_{jt} & TOT_{jt} & T_{jt} \\ 1 & EV_{jt} & TAR_{jt} & TOT_{jt} & T_{jt} \\ 1 & EV_{jt} & TAR_{jt} & TOT_{jt} & T_{jt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_{j0}^i \\ \beta_{j1}^i \\ \beta_{j2}^i \\ \beta_{j3}^i \\ \beta_{j4}^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{jt}^i \\ \varepsilon_{jt}^i \\ \varepsilon_{jt}^i \\ \varepsilon_{jt}^i \\ \varepsilon_{jt}^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中政策變數包括：能源相關之環境稅收入 (EV)、各部門在第 t 期的關稅收入 (TAR)、及各部門在第 t 期的貿易條件 (TOT)。推定結果如表 3 所示。⁷ 由此可以看出政策變數對各項因素之貢獻量的影響，這對政策工具

⁷ 各因素的貢獻量係以拉氏指數法估算之，並以 1992 年為基期年。

的擬定提供更有意義的參考。

表 2. 各部門 CO₂ 排放變動量之各組成因素平均貢獻值：1992-2008

Components	Agriculture	Industry	Service	Transport
碳密集度效果 (CI)	-0.39	-13.27	-1.97	-1.62
能源密集度效果 (EI)	0.17	6.00	-0.07	2.18
產業結構效果 (SE)	-1.42	-3.57	0.90	-4.77
勞動生產力效果 (LP)	1.82	11.23	0.37	7.76
勞動人口效果 (WE)	-0.75	0.95	0.83	-0.25
變動總量	-0.57	1.34	0.06	3.3

資料來源：Shan and Huang (2011)。

表 3. 政策變數對各因素之部門 CO₂ 排放之貢獻量的影響

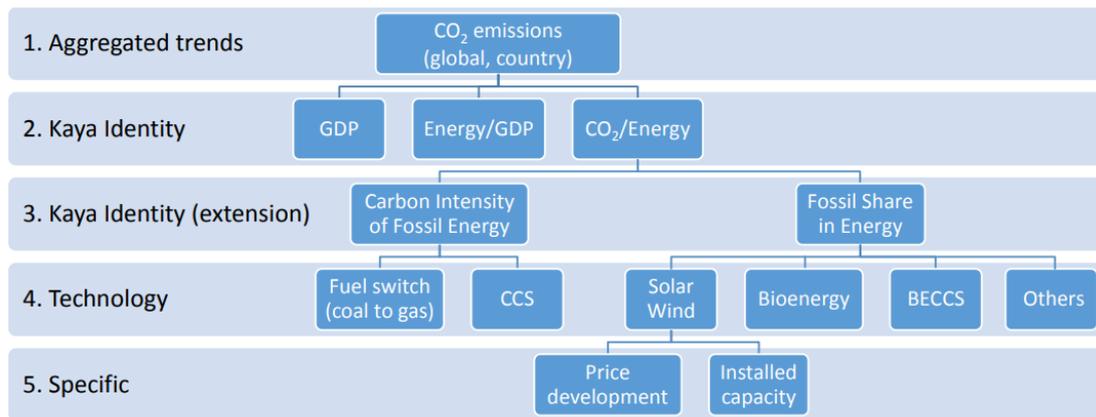
Components Variables	CI	SE	EI	WE	LP
Constant	-20.95* (0.09)	2.23 (0.47)	-7.55 (0.65)	12.08*** (0.000)	-30.50*** (0.000)
EV	8.23*** (0.0005)	-1.03 (0.32)	-4.26 (0.24)	-0.69 (0.35)	1.54 (0.21)
TAR	-3.12*** (0.019)	0.36*** (0.000)	0.90 (0.58)	0.35 (0.14)	1.11*** (0.001)
TOT	11.32 (0.18)	-1.34*** (0.000)	12.54 (0.24)	-10.13*** (0.000)	19.31*** (0.000)
T	-2.54*** (0.000)	-0.27*** (0.0006)	0.99*** (0.0009)	0.20*** (0.005)	1.77*** (0.000)
Adjusted. R ²	0.96	0.46	0.62	0.62	0.96
AIC	1.59	0.29	2.60	-0.50	0.56

括弧內數值為 p-value。

資料來源：Shan and Huang (2011)。

(二) 建置完整的巢式結構 (nested structure) 改善拆解的方式

為改善 Kaya Identity 拆解的限制和問題，Peters *et al.* (2017) 提出一個拆解的巢式結構如圖 3 所示，其中第 3 層為 Kaya Identity 的擴充（此即 Li and Ou (2013) 的作法），第 4 層反映技術（包括燃料轉換、CCS、發電技術等），第 5 層反映其他的特定因素（例如裝置容量、價格因素等）。



Source: Peters *et al.* (2017).

圖 3. Kaya Identity 的巢式結構

Peters *et al.* (2017)的巢式結構雖然可以讓拆解的結果更為精準和細緻，但並無法解決上一節所提出的許多問題。因此，如要讓拆解的結果更具政策意涵，應該建立在個體基礎（microfoundation）上，然後根據理論模型推定相關的函數，並據以估算各政策變數對應變數的潛在貢獻。

（三）因循適當的拆解原則

1. 確立拆解的目的；例如：只為估算各因素的貢獻度，抑或對環境的衝擊、抑或根據估算結果進行群聚分析（cluster analysis），以針對不同國家或地區、或產業部門進行群組歸類。
2. 各拆解的因素需與應變數（如 CO₂）有關，而且是通過檢定的主成分（principal component），故須藉由因素分析找出主成分，以減少拆解的面向。
3. 各因素須相互獨立，不能有高度的相關性（故須進行獨立性檢定）。
4. 各因素需有確實可靠的資料與之對應。
5. 估算各因素的貢獻度時，宜選用適當的推估方法（如迴歸分析法、拉氏拆解法、迪氏拆解法等）。
6. 貢獻度的估算結果（特別是在不同時點的變動狀況）可以合理解釋，尤其是與政策工具（或管制策略）之間的關聯性。

（四）立基於完善的個體基礎，並採用適當的推定方法

圖 4 是一個可行的個體基礎的巢式結構（nested structure），建立在一個國家的投入、產出與最終消費的物質流基礎上。茲說明如下：

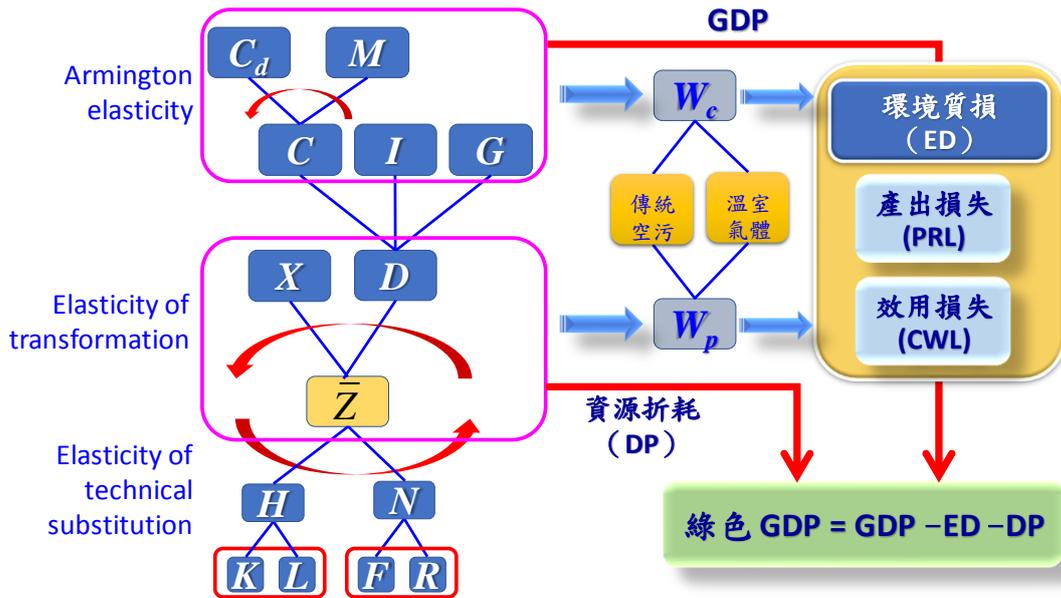


圖 4. 個體基礎的模型架構：投入、產出、消費與排污之物質流的巢式結構

1. 原始要素配置與生產轉換

投入面的生產要素歸納為能源 (N) 與非能源 (H) 兩類複合投入，前者包括化石能源 (F) 與再生能源 (R)，後者包括勞動 (L)、資本 (K) 等原始投入。⁸ 複合投入可用於生產出口導向與內銷導向的兩類產品，分別以 D 與 X 表示之。假設社會所擁有之原始投入的總量固定，惟其配置均具柏拉圖效率 (Pareto efficiency)，則 D 與 X 可以一生產轉換函數 (production transformation function, PTF) 刻劃之。因此，產出轉換曲線 (product transformation curve, PTC) 向外移動的驅動力包括：原始投入的擴增 (如人口增長、人力資本累積、化石能源進口、再生能源發展等)、要素組合的結構變動 (如因人工智慧、大數據、互聯網的發展而提高資本密集度，或因節能減排而促成產業轉型)、或技術進步等。

2. GDP

國內總產出 ($D + X$) 即為國內生產毛額 (gross domestic product, GDP)，亦即：

$$Z \equiv GDP = X + D \quad (8)$$

國內的總消費來自內銷的國產品 (D) 和進口品 (M)，而最終消費可分為私人消費 (C)、民間投資 (I)、政府支出 (G) 等 3 項，因此：

$$C + I + G = D + M \quad (9)$$

⁸ 原始投入的分類可以更為詳盡，尤其是在可計算一般均衡 (computable general equilibrium, CGE) 模型的架構下，惟本文的重點不在於此，故簡化示意之。

根據式 (8) 和式 (9) 可知，傳統上所界定的 GDP 如式 (10) 所示：

$$GDP = C + I + G + X - M \quad (10)$$

3. 環境污染物的類別與排放量

環境污染物可區分為地方污染物 (local pollutants)、跨境污染物 (transboundary pollutants)、及全球污染物 (global pollutants)⁹，均可來自生產面和最終消費面，故地方污染物的總排污量 (W_l) 與全球污染物的總排污量 (W_g) 分別如式 (11) 和式 (12) 所示：

$$W_l = W_{lp} + W_{lc} \quad (11)$$

$$W_g = W_{gp} + W_{gc} \quad (12)$$

其中：

$$W_{lp} = e_{lp}(\tau_l, \bar{e}_l, G_g, G_l) \cdot (C_d + I + G + X) \quad \forall i = l, g \quad (13)$$

$$W_{lc} = e_{lc}(\tau_l, \bar{e}_l, G_g, G_l) \cdot (C_d + I + G) + e_{im}M \quad \forall i = l, g \quad (14)$$

式 (13) 表明：(1) 生產面排放之傳統污染物總排污量 (W_{lp}) 和溫室氣體總排放量 (W_{gp}) 均與 GDP 呈正相關，其排污係數 (e_{lp} ，代表國內產出的污染密集度) 受各該污染物之環境政策工具¹⁰ 和政府的環保支出 (G_l) 和節能減碳支出 (G_g) 等因素的影響。¹¹ 值須一提的是，環保支出 (G_l) 和節能減碳支出 (G_g) 之所以同時影響排放係數，係為反映溫室氣體減量和傳統污染物減量具有相輔相成的功效；換言之，在節能減碳的同時，也有助於傳統空氣污染物的減量，反之亦然。¹²

由式 (14) 可知，消費面之傳統污染物的總排污量 (W_{lc}) 和溫室氣體總排放量 (W_{gc}) 則與國內總消費呈正相關，而消費國產品之排污係數 (e_{lc}) 與消費進口品之排放係數 (e_{im}) 未必相等，且 $0 < e_{im} < e_{lc} \quad \forall i = l, g$ ，藉以反映

⁹ 雖然這三種污染物又有流量 (flow pollutants) 與存量 (stock pollutants) 之別，但本模型係屬靜態，故不考慮污染物累積的存量效果。此外，為簡化分析，此處也僅考慮地方污染物與全球污染物兩種，前者以傳統污染物為代表 (如 NOx, SOx, BOD, COD 等)，後者以溫室氣體為代表 (如 CO₂)。

¹⁰ 地方性污染物之環境政策工具如排污費率 τ_l 和排放標準 \bar{e}_l ，全球性污染物之環境政策工具如碳稅 (τ_g)、效能標準 (\bar{e}_g)。

¹¹ 此處所謂「環保支出」係指用於防制傳統空氣污染物 (地方性污染物) 的支出，而「節能減碳支出」係指用於防制溫室氣體 (全球性性污染物) 的支出。

¹² 此一互動關聯是文獻上經常忽視的一環，因此對於政策工具的制訂恐有誤導之虞。

國產品和進口品之污染密集度未必相同。¹³

4. 環境污染的產量損失和消費者福利損失

傳統污染物與溫室氣體的排放所造成的損害成本（**damage cost**），在性質上有很大差別，特別是對個別國家而言。傳統污染物屬於地方性污染物，與地方環境品質（ $Q = Q(W_{lp}, W_{lc})$ ）息息相關；過量的排放一方面造成生產者的產量損失（**PDL**）（如式（15）所示），另一方面也造成消費者的福利損失（**CWL**）（如式（16）所示）。

$$PDL = -\frac{\partial \pi}{\partial Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial W_{lp}} dW_{lp} + \frac{\partial Q}{\partial W_{lc}} dW_{lc} \right) > 0 \quad (15)$$

其中 $\partial PDL / \partial Q < 0$ ， $\partial^2 PDL / \partial Q^2 > 0$ ； $\partial Q / \partial W_{lj} < 0$ ， $\partial^2 Q / \partial W_{lj}^2 < 0 \quad \forall j = p, c$ ； $\partial^2 Q / \partial W_{lp} \partial W_{lc} = 0$ 。¹⁴

$$CWL = -\frac{\partial u / \partial Q}{\lambda} \left(\frac{\partial Q}{\partial W_{lp}} dW_{lp} + \frac{\partial Q}{\partial W_{lc}} dW_{lc} \right) > 0 \quad (16)$$

其中 $\partial u / \partial Q > 0$ ， $\partial^2 u / \partial Q^2 < 0$ ，用以反映環境品質變動對消費者效用的影響， $(\partial u / \partial Q) / \lambda$ 則代表其貨幣價值（ λ 代表所得的邊際效用）。

國內溫室氣體排放量對全球溫升的貢獻微乎其微（見圖 5）¹⁵，卻可能引起國際社會的關注，從而影響國家聲譽，¹⁶ 也可能受到相關產業（如鋼鐵、半導體等產業）之國際組織的規範而影響產品的出口；不過，這些損害成本在現段尚難逐項掌握，有效可靠的推估數據至為罕見。故可以政府的節能減碳支出（ G_g ）經由產業關聯所創造的**社會淨效益**（**net social benefit, NSB**）¹⁷ 來衡量（見式（17））：

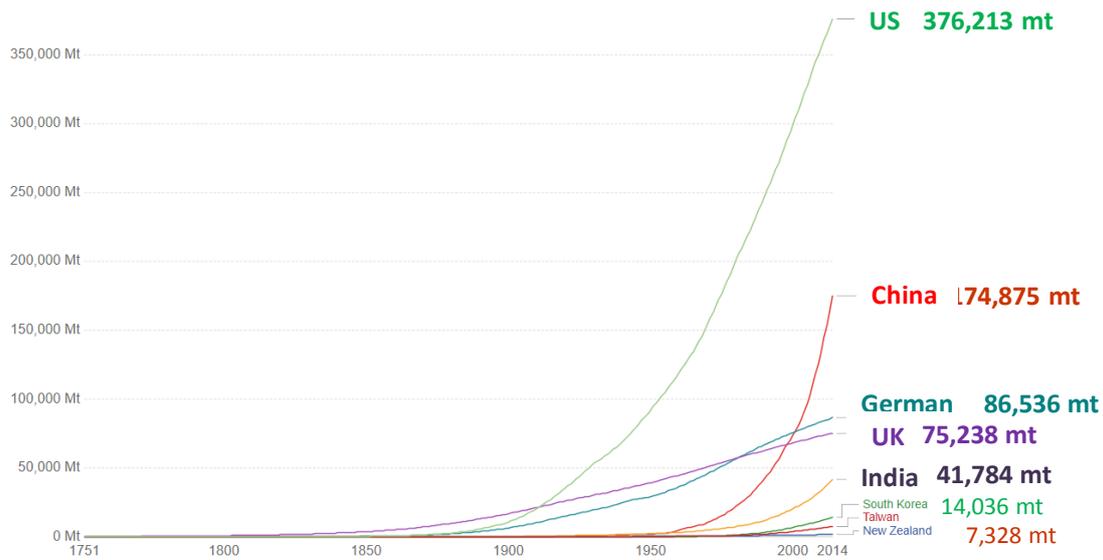
¹³ e_1 與 e_2 的差別設定，一則為反映國產品與進口品之排放密集度的差異，二則反映進口品的排放密集度不全然受控於國內的環境政策。

¹⁴ 此處假設生產與最終消費的排污量相互獨立，對環境品質的影響可完全分隔（**completely separable**）；但在實務上，二者可能相互影響。例如，生產面若能加強產品的綠色設計，最終消費面的排污量（或廢棄物）可望減少；反之，最終消費若能落實綠色消費，也可望誘導綠色生產，從而減少生產面的排污量。

¹⁵ 由圖 4 可知，我國 CO_2 年排放量與澳大利亞相當，約各佔全球年度排放量的 1%，但比起其他排放大國，歷史累積排放量則微乎其微，從減排的責任分擔及成本效益的角度來說，目前國內自訂的短、中、長期減碳目標是否是社會最適（**socially optimal**），實有檢討空間。

¹⁶ 環保團體「德國看守協會」（**Germanwatch**）每年公布全球氣候變遷績效指標排名，其於聯合國氣候變化綱要公約第 24 次締約方會議（**COP24**）發布 2019 年氣候變遷績效指標排名，結果顯示：台灣 2018 年之評比分數僅獲 28.8 分，不如去年 29.43 分，在 56 國和歐盟間的排名，也從 54 名退居 56 名，被列為「非常糟糕」等級，只贏南韓、伊朗、美國及沙烏地阿拉伯。

¹⁷ **NSB** 係以政府節能減排支出（ G_g ）增加所衍生之就產量效果、所得效果及就業效果的總和，換言之， $dNEB = (\partial f(\cdot) / \partial G_g - 1) dG_g$ 。



Source: Global Carbon Project; Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC)
<https://ourworldindata.org>.

圖 5. 各國 CO₂ 累積排放量：1751-2014

$$NSB_g = f(G_g) + P_g W_g - G_g \quad (17)$$

其中 $f(\cdot)$ 代表國內從事溫室氣體減排的效益，扣除政府推動節能減排的支出 (G_g) 後，即為節能減排的淨效益。如果 $NSB_g > 0$ ，表示國內溫室氣體排放對國內造成經濟損失，反之則不然。

四、結論與建議

Kaya Identity 雖然是國際上極為普遍的一種因素拆解方式，但卻存在著許多問題和限制。本文說明了其中多項問題，並就可行的改善方法，提出四點建議，其中個體基礎的模型建構雖然較為複雜，卻是最為周延合理的方式。退而求其次的方式，則可根據本文所提出的拆解原則及 Peters *et al.* (2017) 的巢式結構進行拆解，如此至少可使拆解結果更為精準和細緻。

參考文獻

黃韻勳 (2018)，「我國住宅部門電力消費趨勢及其驅動力」。綠能發展與社經互動學術研討會，核能研究所主辦，2018.11.23，台北。

Alcántara, Vicent, Rosa Duarte, and Teresa Obis (2008). "Regional decomposition of CO₂ emissions in the world: a cluster analysis." REVISTA SOCIEDAD Y ECONOMIA – CIDSE, Universidad Del Valle.

- Borghesi, Simone and Alessandro Vercelli (2010). “Greenhouse gas emissions and the energy system: decomposition analysis and the environmental Kuznets curve.” *MPRA Paper No. 27438*.
- Christoph Rothe (2012). “Decomposing the Composition Effect.” *IZA Discussion Paper No. 6397*.
- Dalia Štreimikienė and Tomas Baležentis (2016). “Kaya identity for analysis of the main drivers of GHG emissions and feasibility to implement EU “20–20–20” targets in the Baltic States.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews 58*: 1108-1113.
- Gürer, N., and J. Ban, (1997). “Factors affecting energy-related CO₂ emissions: past levels and present trends.” *OPEC Review*, 21(4): 309-350.
- Hong, Cheng-Yih, Chung-Huang Huang, and Jian-Fa Li (2017). “Investment, Energy Consumption and CO₂ Emissions: An Analysis on the Strategy of Industry Development.” *International Journal of Energy Economics and Policy 7*(4): 138-143.
- Hong, Cheng-Yih, Chung-Huang Huang, and Jian-Fa Li. (2017). “Factor Decomposition of Responsiveness of the Domestic Price to Crude Oil Price.” *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(6): 136-140.
- Kaya, Yoichi (1990). “Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios.” In *Proceedings of the IPCC Energy and Industry Subgroup*, Response Strategies Working Group, Paris, France.
- Kaya, Yoichi and Yokoburi, Keiichi (1997). *Environment, energy, and economy: strategies for sustainability*. Tokyo: United Nations Univ. Press.
- Li, Wei and Qing-Xiang Ou (2013). “Decomposition of China’s Carbon Emissions Intensity from 1995 to 2010: An Extended Kaya Identity.” *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2013, Article ID 973074.
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Fuss, S., Jackson, R.B., Korsbakken, J.I., Le Quéré, C., Nakicenovic, N. (2017). “Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement.” *Nature Climate Change 7*, 118-122.
- Shan, Pei-Ling and Chung-Huang Huang (2011). “Decomposition of Sectoral CO₂ Emission and Its Linkage to Policy Instruments.” Selected paper presented at the 4th IC-EpsMsO Conference, July 6-9, Athens, Greece.
- Waggoner, P. E. and J. H. Ausubel (2002). “A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity.” *PNAS 99*(12):7860-7865.