

國際電力碳足跡係數研究及公用係數發展

摘要

近年來國際間溫室氣體管理的推動趨勢，已從組織盤查逐步擴展至供應鏈盤查，並帶動產業計算產品或服務之碳足跡。而產品碳足跡評估過程中對於供應鏈之基礎資料要求相當多，且並非所有資訊皆可由評估者自行取得，故目前國際上有部分國家已研究及發展各自在地之公用係數資料庫提供引用，係數類別涵蓋化學品、金屬、氣體、燃料及電力等，其中電力又為提供各行業從事產品生產之必要能資源，各國電網之電力碳足跡係數高低，將影響所在地之產品碳足跡，進而可能產生出口貿易之不利因素，故以下本研究將針對歐美及亞洲鄰近國家研究及公告之電力碳足跡係數進行分析，以作為我國未來發展規劃之參考應用。

關鍵字：生命週期、電力碳足跡、公用係數

一、國際電力碳足跡公用係數分析

本研究分析日本、韓國、泰國、澳洲及英國已由官方公告電力碳足跡係數之國家，如表 1 所示，其中以日本、澳洲、英國研究所涵蓋之生命週期邊界較為完整，本研究優先針對澳洲及英國進行介紹。

表 1、各國電力碳足跡公用係數評估準則比較

各國電力碳足跡公用係數	日本產品碳足跡 (CFP) 數據庫	韓國碳足跡公告之係數數據庫	泰國產品碳標籤資料庫	澳洲煤炭可持續發展合作研究中心	英國能源與氣候變遷部
使用目的	量化環境資訊披露	提高碳資訊披露	符合碳資訊披露，符合國際環保標準和法規	評鑑 7 大電網生命週期(碳足跡、空污、水等) 衝擊	提供政府及私人企業單位公開應用碳排放計算
邊界/範疇	含原料開採製造、燃料燃燒以及接收端	僅含燃料燃燒	原料開採製造、燃料燃燒	原料開採/加工、運輸、發電、輸電	生產、運輸、發電、廢棄、輸電
描述	2005~2009 調查結果	2010 年	2010	2004、2007、2010(三年一次)	1996~2010(每年)
計算方法	逐廠調查	全國統計資料	全國統計資料	逐廠調查	全國統計資料

公用係數 (kgCO ₂ e/ kWh)	0.479	0.495	0.561	1.011	0.504
---------------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

資料來源：<http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html>；

<http://www.edp.or.kr/lcidb/english/co2db/co2db01.asp>;

<http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/carbonfootprint/>

(一)澳洲煤炭可持續發展合作研究中心

澳洲煤炭可持續發展合作研究中心(Cooperative Research Centre For Coal in Sustainable Development,CCSD)為由澳洲政府建立及支持之合作研究組織，緣於澳洲電力結構高達 80%用電均源於自產的燃煤或棕煤(Brown coal)，澳洲政府為掌握以燃煤發電為主之結構下，對於經濟、社會、環境議題下之永續發展評估指標而建立之官方研究組織。

該組織在環境議題之相關研究中，已自 2004 年起每年 3 年針對澳洲 7 個電網分別進行生命週期評估，評估指標包含能源耗用、硫氧化物、氮氧化物、粒狀污染物、二氧化碳及固體廢棄物等，其中二氧化碳生命週期評估即本節所探討之電力碳足跡研究，評估之邊節範疇，詳如下圖 1 所示，包含燃料開採、煉製，運輸，電廠發電、廢棄物處理以及電網輸配階段，但不包含固定財(如開採設施、電廠設備等)評估，而數據資料來源係引用全國約 100 家電廠年度環境報告以及國家排放清冊，由表 2 所示以澳洲新南威爾士(New South Wale)輸配電網為例，區域內 8 家燃煤電廠、1 家天然氣電廠、1 家燃油電廠以及 1 家煤層甲烷氣(Coal seam methane,CSM)發電廠均各別計算電力碳足跡係數，顯示澳洲各電網電力碳足跡係數是以個別電廠由下至上計算求得的。

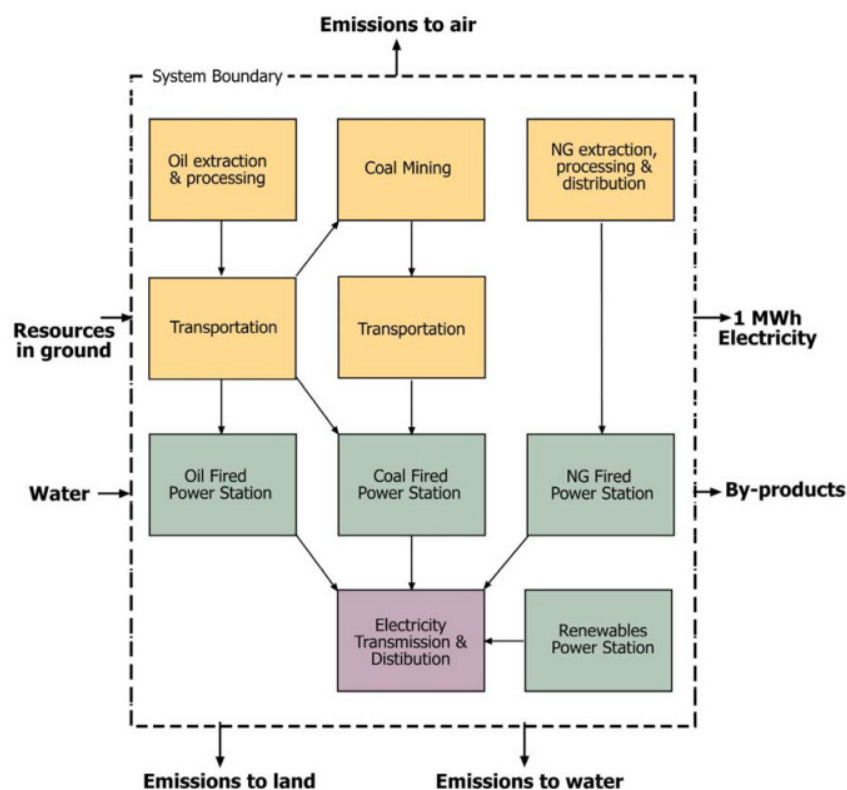


圖 1、澳洲 CCSD 生命週期評估之邊界範疇設定

資料來源：CCSD

表 2、新南威爾士電網內各電廠生命週期評估結果

Station	Efficiency (%)	CO ₂ (kg/MWh)	NO _x (kg/MWh)	SO _x (kg/MWh)	PM ₁₀ (kg/MWh)	Fresh water (m ³ /MWh)
Appin/Tower	32.1 ^a	569 ^b	2.73	0.003	<0.1	Not reported
Bayswater	35.6	879	2.3	5.44	0.02	2.29
Eraring	36.4	870	2.27	3.24	0.07	0.1 ^g
Hunter Valley	28.0	940	17.1	Not reported	Not reported	0
Liddell	32.7	949	2.21	4.96	0.07	3.05
Mt Piper	37.2	843	2.9	4.29	0.02	1.55
Munmorah	32.0	984	2.21	2.92	0.09	0.3 ^g
Smithfield	42.4	431	0.21	<0.1	0.014	Not reported
Redbank	32.0	978	0.56	2.04	0.12	2.08
Vales Point B	35.6	896	2.40	3.3	0.23	0.13
Wallerawang	33.2	893	2.02	4.2	0.17	1.81

a) Estimate

b) Actual emissions from generation – overall this facility results in negative net emissions due to the avoidance of fugitive CH₄. This net saving is shown in its LCA results.

資料來源：CCSD

綜合澳洲電網碳足跡評估成果，如下圖 2~3 所示，各電網均以利用澳洲充沛煤炭資源原因，因此普遍電力排放係數均大於 1,000kgCO₂e/MWh，其中維多利亞州(Victoria)更因所有火力電廠均燃燒棕煤，因此係數超過 1,400kgCO₂e/Mwh。另外塔斯馬尼亞州(Tasmania)因為澳洲離島，多以再生能源風力供應島上用電，因此係數不到 100kgCO₂e/MWh，合計澳洲公開目前全國平均係數為 1,011kgCO₂e/MWh，其中 96.2%來自於電廠營運(含輔助原料之使用)，2.2%來自於煤礦開採，1.6%來自於運輸、廢棄等其他階段。

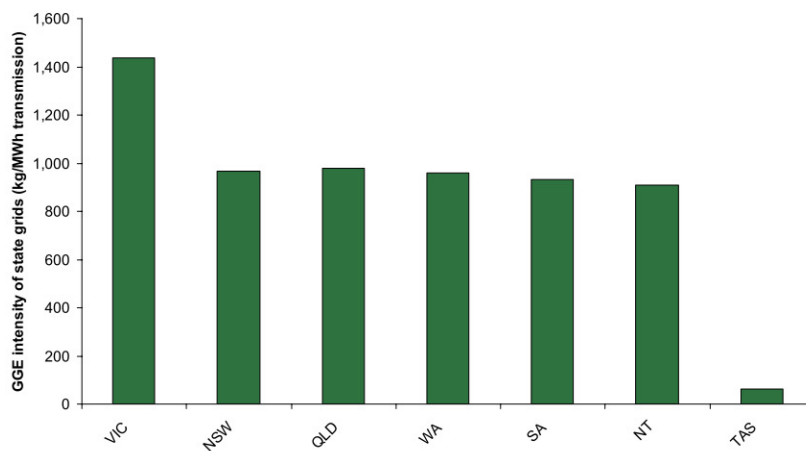


圖 2、澳洲 7 大電網電力碳足跡係數評估比較圖

資料來源：CCSD

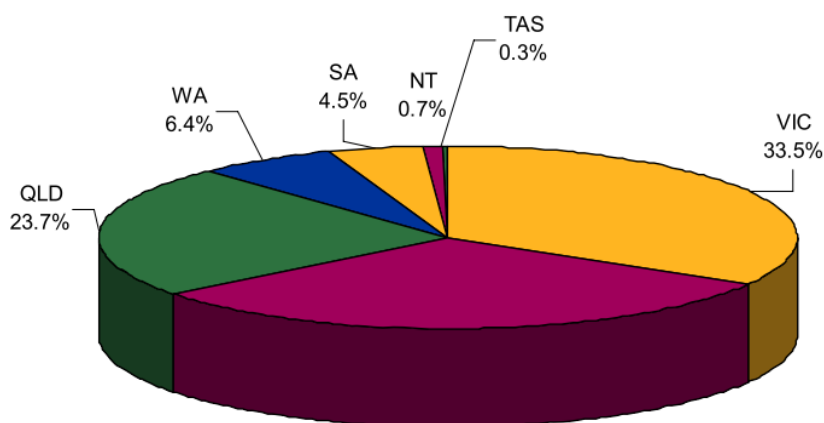


圖 3、澳洲 7 大電網電力碳足跡排放占比圖

資料來源：CCSD

(二)英國能源與氣候變遷部

英國政府整合環境實務、農村事務等部門於 2008 年 10 月成立英國能源及氣候變遷部(Department of Energy and Climate Change, DECC)，建立一貫性之能源與氣候變遷策略，以面對全球劇烈變化之氣候及為國土供應安全無慮且自給自足之能源等目的，DECC 每年度均會公開年度各項排放因子計算方法論報告(conversion factor for company reporting: methodology paper for emission factors)，內容詳述國家層級各種公用排放係數(包含 CO₂、SO_x、NO_x 等)，亦對應電力供應、燃料、運運、航空、貨運等活動，官方公用係數的目的為提供組織或私人機構自行從事各種碳足跡計算之用途，每一年度均會進行更新。

其中有關電力供應之描述為該報告之第三章，生產電力之 CO₂ 排放分別計算直接排放(indirect emission)及間接排放(indirect emission)，其總合即為電力碳足跡係數，其中直接排放包含電廠營運、發電等由廠內直接產生的溫室氣體，而間接排放則為廠外燃料生產、運輸及廢棄物等供應鏈產生排放，亦包含電網輸配之損失，從下表 3 及表 4 可看出，英國於近 15 年內電力結構主力由使用燃煤發電轉換為以天然氣發電為重心，天然氣使用比例已由 1996 年之 23.5% 提升為 2010 年之 43.4%，而電力碳足跡係數亦由 0.57kgCO₂e/kWh 降至 0.50kgCO₂e/kWh，而歷年各發電類別相較於直接排放均為其 13~14%。

該份報告僅呈現最終全國電網之電力碳足跡係數成果，未提及細部計算方法，但由表 4 可發現燃煤、燃油及其他發電類型各年度占總排放之比例均為定值之現象，如燃煤均為 16.5%，燃料油均為 18.9%，顯示 DECC 於間接排放項目可能未以電廠為單位進行深入盤查，而是參採其他研究文獻並以全國發電燃料燃燒排放量之比例進行計算，也就是採以由上至下(Top-down)方式進行。

表 3、英國歷年電力結構分析

	Fuel Consumed in Electricity Generation, % Total					
	Coal	Fuel Oil	Natural Gas	Other thermal (excl. renewables)	Other generation	Total
1990	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1991	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1992	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1993	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1994	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1995	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1996	45.5%	5.3%	23.5%	1.9%	23.8%	100.0%
1997	39.9%	3.0%	29.8%	1.9%	25.4%	100.0%
1998	39.9%	2.0%	30.7%	1.8%	25.6%	100.0%
1999	34.6%	2.1%	36.8%	1.9%	24.6%	100.0%
2000	38.4%	2.1%	37.4%	1.8%	20.4%	100.0%
2001	40.4%	1.8%	34.3%	1.3%	22.2%	100.0%
2002	38.5%	1.7%	36.8%	1.4%	21.7%	100.0%
2003	40.9%	1.5%	35.0%	1.9%	20.7%	100.0%
2004	39.8%	1.4%	37.2%	1.8%	19.8%	100.0%
2005	40.5%	1.6%	35.5%	2.3%	20.0%	100.0%
2006	44.2%	1.8%	33.0%	1.9%	19.1%	100.0%
2007	42.1%	1.5%	39.1%	1.6%	15.8%	100.0%
2008	39.6%	2.1%	42.8%	1.5%	14.1%	100.0%
2009	33.8%	2.1%	42.4%	1.4%	20.4%	100.0%
2010	34.7%	1.6%	43.4%	1.1%	19.3%	100.0%

資料來源：DECC

表 4、英國歷年電力直接/間接排放分析

	Indirect Emissions as % Direct CO ₂ Emissions, by fuel						Av. Electricity EF CO ₂ e/kWh		
	Coal	Fuel Oil	Natural Gas	Other thermal (excl. renewables)	Other generation	Weighted Average	Direct CO ₂	Calc Indirect CO ₂ e	5-yr Rolling Av.
1990	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.70393	0.10334	0.10334
1991	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.67804	0.09954	0.10144
1992	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.64035	0.09400	0.09896
1993	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.57379	0.08423	0.09528
1994	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.55081	0.08086	0.09239
1995	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.52410	0.07694	0.08711
1996	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.7%	14.7%	0.50106	0.07355	0.08192
1997	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.0%	14.0%	0.46436	0.06520	0.07616
1998	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.9%	13.9%	0.47177	0.06575	0.07246
1999	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.5%	13.5%	0.44127	0.05944	0.06818
2000	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.6%	13.6%	0.46686	0.06345	0.06548
2001	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.8%	13.8%	0.48416	0.06672	0.06411
2002	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.6%	13.6%	0.47163	0.06413	0.06390
2003	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.7%	13.7%	0.49269	0.06769	0.06429
2004	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.6%	13.6%	0.48777	0.06636	0.06567
2005	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.7%	13.7%	0.48016	0.06582	0.06615
2006	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	14.0%	14.0%	0.50760	0.07084	0.06697
2007	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.6%	13.6%	0.49994	0.06808	0.06776
2008	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.4%	13.4%	0.48657	0.06536	0.06729
2009	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.2%	13.2%	0.44718	0.05915	0.06585
2010	16.5%	18.9%	10.4%	12.5%	13.2%	13.2%	0.45453	0.05998	0.06468

資料來源：DECC

三、國內外電力碳足跡研究分析

(一)歐洲市長公約

歐洲市長公約(Covenant of Mayors)為歐盟執行機構「歐洲委員會」規劃之策略機構，由歐洲超過 350 個城市的市長一組成聯盟，期望地方自行擬定政策，至 2020 年時，讓歐洲城市碳排放量至少降低兩成，而不只是由高層訂定新規範，交由基層規劃及實施，歐洲市長公約亦有針對歐洲各國進行電力碳足跡之相關研究，詳如下表 5 所示，歐盟平均電力碳足跡係數為 0.578tCO₂e/MWh。

表 5、歐洲市長公約分析歐盟各國電力碳足跡結果

Country	Standard emission factor (t CO ₂ /MWh _e)	LCA emission factor (t CO ₂ -eq/MWh _e)
Austria	0.209	0.310
Belgium	0.285	0.402
Germany	0.624	0.706
Denmark	0.461	0.760
Spain	0.440	0.639
Finland	0.216	0.418
France	0.056	0.146
United Kingdom	0.543	0.658
Greece	1.149	1.167
Ireland	0.732	0.870
Italy	0.483	0.708
Netherlands	0.435	0.716
Portugal	0.369	0.750
Sweden	0.023	0.079
Bulgaria	0.819	0.906
Cyprus	0.874	1.019
Czech Republic	0.950	0.802
Estonia	0.908	1.593
Hungary	0.566	0.678
Lithuania	0.153	0.174
Latvia	0.109	0.563
Poland	1.191	1.185
Romania	0.701	1.084
Slovenia	0.557	0.602
Slovakia	0.252	0.353
EU-27	0.460	0.578

資料來源：Covenant of Mayors

(二)日本財團法人產業環境管理協會

日本財團法人產業環境管理協會(The Japan Environmental Management Association for Industry,JEMAI)為日本透過污染防治技術的開發、評估、公害管理人的認證、與國外污染防治技術的交流，輔導產業解決環境污染的問題之非營利組織，自 2008 年起受日本經產省委託建置日本碳足跡資料庫，包含資訊蒐集、計算及資料庫建置，自目前為止，已建置國內製造數據達 1,000 項以上，並廣蒐國際相關排放係數，顯見日本政府對於產品碳足跡各項制度之重視。

目前日本蒐集國際電力碳足跡係數包含越南、新加坡、南韓、美國等 10 個國家，計算方式為蒐集透過該國公開進口燃料及分配電力部門資訊，並依電力結構進行分配計算，本研究並以 IEA 公布 2009 年各國各類發電型態結構對應，如圖 4，並依各國電力碳足跡係數及發電結構，分為 >0.9 、 $0.6\sim 0.9$ 以及 $<0.6\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ 之區間比較說明：

1. $>0.9\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$

以中國大陸、印尼、印度等開發中國家為主為主，主要以燃煤/燃油發電等電力碳足跡係數相對較高之發電型態，大約占整體電力結構之 60%以上，且核能發電比例極低。

2. $0.6\sim 0.9\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$

該區皆之發電結構可區分為 2 類，其中美國、韓國雖有高比例燃煤發電(超過 40%)，但亦有約 20%以上之核能發電；另泰國、新加坡、馬來西亞則是以天然氣發電為主(超過 60%)。

3. $<0.6\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$

電力碳足跡係數落於此區間國家為日本及越南，主因為使用相對較少燃煤發電，取而代之以核能、水力發電為主，其中越南雖無核能發電，但充分使用該國水利資源，其水力已達整體發電量之 30%以上。

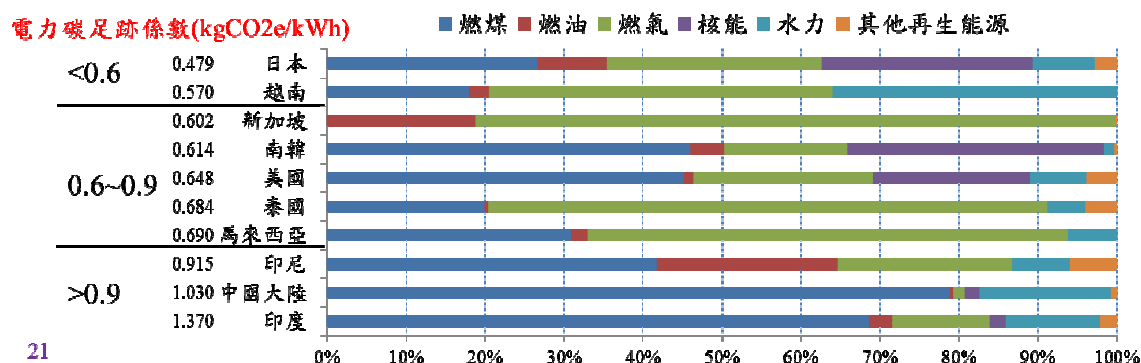


圖 4、JEMAI 分析各國電力碳足跡及電力結構分析

資料來源：JEMAI,IEA

資料整理：本研究彙整

(三)工業技術研究院

工業技術研究院(以下簡稱工研院)於受行政院環保署委託 102 年度產品碳足跡揭露服務專案工作計畫，以由上至下(Top-down)方式評估我國整體電網之電力碳足跡係數，採以工研院自行研發之生命週期評估軟體 DoItPro，並參考國際能源總署(International Energy Agency,IEA)各國電力部門燃料使用資訊，評估各法國、德國、義大利、加拿大等國之電力碳足跡係數，如下圖 5 所示。

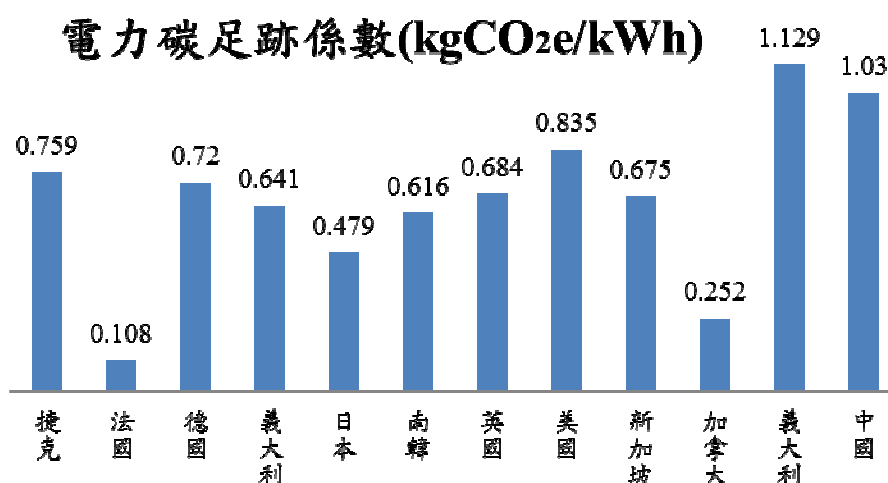


圖 5、我國工研院分析各國電力碳足跡比較圖

資料來源：工業技術研究院

(四)綜合分析

綜合前述所列之各國研究分析，據以排序各國電力碳足跡係數排名，如下表 6 所示，共計歐盟、美國、加拿大與亞洲鄰近國家 45 國中，最低為瑞典、法國及立陶宛約為 0.1(kgCO₂e/kWh)，最高則為波蘭、印度及愛沙尼亞(1.2~1.6kgCO₂e/kWh)。

影響各國電力碳足跡之因子，可藉由電力排放結構分析，如前三名是以水力、核能發電為主，而最後三名則均是以燃煤發電為主，因火力、核能、再生能源發電型態之碳排放係數彼此存有相當明顯差異，如火力燃煤達核能及再生能源數 10 倍之多，因此電力結構應才是國家電力碳足跡公用係數高低之最主要關鍵。

表 6、各國電力碳足跡係數彙整比較表

排名	國家	電力碳足跡係數 (kgCO ₂ e/ kWh)	研究來源	排名	國家	電力碳足跡係數 (kgCO ₂ e/ kWh)	研究來源
1	瑞典	0.079	歐洲市長公約研究	23	英國	0.684	我國工研院研究
2	法國	0.146	歐洲市長公約研究	24	馬來西亞	0.69	JEMAI
3	立陶宛	0.174	歐洲市長公約研究	25	德國	0.706	歐洲市長公約研究
4	加拿大	0.252	我國工研院研究	26	意大利	0.708	歐洲市長公約研究
5	奧地利	0.31	歐洲市長公約研究	27	荷蘭	0.716	歐洲市長公約研究
6	斯洛伐克	0.353	歐洲市長公約研究	28	德國	0.72	我國工研院研究
7	比利時	0.402	歐洲市長公約研究	29	葡萄牙	0.75	歐洲市長公約研究
8	芬蘭	0.418	歐洲市長公約研究	30	捷克	0.759	我國工研院研究
9	日本	0.479	JEMAI	31	丹麥	0.76	歐洲市長公約研究
10	拉脫維亞	0.563	歐洲市長公約研究	32	捷克語	0.802	歐洲市長公約研究
11	越南	0.57	JEMAI	33	美國	0.835	我國工研院研究
12	歐盟 27 國	0.578	歐洲市長公約研究	34	愛爾蘭	0.87	歐洲市長公約研究

排名	國家	電力碳足跡係數 (kgCO ₂ e/ kWh)	研究來源	排名	國家	電力碳足跡係數 (kgCO ₂ e/ kWh)	研究來源
13	斯洛文尼亞	0.602	歐洲市長公約研究	35	保加利亞	0.906	歐洲市長公約研究
14	新加坡	0.602	JEMAI	36	印尼	0.915	JEMAI
15	南韓	0.614	JEMAI	37	塞浦路斯	1.019	歐洲市長公約研究
16	南韓	0.616	我國工研院研究	38	中國大陸	1.03	JEMAI
17	西班牙	0.639	歐洲市長公約研究	39	羅馬尼亞	1.084	歐洲市長公約研究
18	美國	0.648	JEMAI	40	義大利	1.129	我國工研院研究
19	英國	0.658	歐洲市長公約研究	41	希臘	1.167	歐洲市長公約研究
20	新加坡	0.675	我國工研院研究	42	波蘭	1.185	歐洲市長公約研究
21	匈牙利	0.678	歐洲市長公約研究	43	印度	1.37	JEMAI
22	泰國	0.684	JEMAI	44	愛沙尼亞	1.593	歐洲市長公約研究

資料來源：Covenant of Mayors, JEMAI, 工業技術研究院

資料整理：本研究彙整