

計畫編號：11015B0006

內政部建築研究所
創新循環綠建築環境科技計畫(三)
協同研究計畫
「住商部門溫室氣體減量策略成本效益之研究」
資料蒐集分析報告

研究主持人：王安強 副所長

協同主持人：黃國倉 教授

研究員：黃瑞隆 教授

研究助理：林國華、楊忻婕

研究期程：中華民國 110 年 3 月至 110 年 12 月

研究經費：新臺幣：85.8 萬元

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 110 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次		III
圖次		V
摘要		VII
第一章	緒論.....	1
第一節	研究緣起.....	1
第二節	研究內容.....	1
第二章	國內外文獻回顧與評析.....	3
第一節	各國住商部門之減碳措施文獻評析.....	4
第二節	國內有關住商部門溫室氣體排放預測之情況.....	18
第三章	研究方法.....	23
第一節	研究流程.....	23
3.1.1	空調能源推估用氣象資料.....	23
3.1.2	各項能源之溫室氣體排放係數.....	24
第二節	住宅部門溫室氣體推估理論.....	24
3.2.1	住宅空調耗能推估.....	26
3.2.2	住宅照明耗能推估.....	33
3.2.3	住宅家電耗能推估.....	35
3.2.4	住宅熱水耗能推估.....	38
3.2.5	住宅使用水量之推估.....	38
3.2.6	住宅烹飪耗能推估.....	39
3.2.7	住宅總耗能推估.....	39
第三節	商業建築溫室氣體推估理論.....	40
3.3.1	商業空調耗能之推估.....	40
3.3.2	商業建築照明耗能之推估.....	48
3.3.3	商業事務設備耗能之推估.....	50
3.3.4	商業它項設備與總耗能量之推估.....	51
3.3.5	商業耗水量之推估.....	52
3.3.6	商業瓦斯與汽柴油碳排量之推估.....	52
3.3.7	商業總耗能.....	52
第四節	住商部門建築溫室氣體排放量推估之校正.....	53
3.4.1	住宅溫室氣體排放推估模式之校正法.....	53
3.4.2	商業建築溫室氣體排放推估模式之校正法.....	54
3.4.3	商業部門非電力耗能項目之未來溫室氣體排放推估方法.....	57
第四章	住商部門溫室氣體排放量預測與滾動式修正	59

第一節 住宅溫室氣體排放量預測結果.....	59
第二節 商業溫室氣體排放量預測結果.....	65
第五章 我國住商部門減碳配額分析.....	67
第一節 我國住商部門減碳配額分析.....	67
第二節 住商部門電動車分析及策略彙整.....	70
第六章 住商部門可行之減碳策略及其效益分析	75
第一節 空調節能策略.....	75
第二節 照明節能策略.....	79
第三節 住宅電冰箱節能策略.....	83
6.3.1 住宅部門冰箱汰換節能效益推估法.....	84
6.3.2 商業部門冰箱汰換節能效益推估法.....	85
6.3.3 住商部門冰箱汰換節能效益評估.....	86
第四節 淨零能源建築路徑評估及短中長期策略.....	87
6.4.1 住商部門可行之減碳方案及策略彙整.....	89
6.4.2 達成淨零能源建築之短中長期策略初步建議.....	91
第七章 結論與建議.....	93
第一節 結論.....	93
第二節 建議.....	94
附錄一：期初審查意見回覆表.....	95
附錄二：期中審查意見回覆表.....	96
附錄三：期末審查意見回覆表.....	100
參考書目	103

表次

表 2-1 德國聯邦政府設定之能源消耗個階段目標（以 1990 年為比較基準）。..5	5
表 2-2 政府與 KfW 對新建建築之補助.....6	6
表 2-3 政府與 KfW 對既有建築之補助.....6	6
表 2-4 美國聯邦政府《未來十年聯邦可持續發展計畫》之目標以及具體措施。9	9
表 2-5 英國當前建築部門之減碳策略..... 11	11
表 2-6 第六期碳排平衡預算之高水平建築供暖政策.....12	12
表 2-7 香港建築對應氣候變遷的政策倡議.....15	15
表 2-9 七種能源服務需求的推估方式中採用的次級解釋變數.....20	20
表 2-8 住商部門能源服務需求定義與範疇.....21	21
表 3-1 各項能源之排放係數.....24	24
表 3-2 住宅建築外殼與室內發散熱參數設定.....27	27
表 3-3 各縣市人均居住面積.....28	28
表 3-4 我國未來 GDP 成長推估.....31	31
表 3-5 未來逐年年末人口數推估值（單位：千人）.....31	31
表 3-6 2036 至 2050 年之人均 GDP 線性中推估.....32	32
表 3-7 2036 至 2050 年中情境空調耗能密度推估.....33	33
表 3-8 各空間照明密度及時間.....34	34
表 3-9 住宅平面格局抽樣調查資料.....34	34
表 3-10 不同格局對應之廳室面積比例 $R_{Ai,j}$34	34
表 3-11 單台家電全年耗能（單位：kWh）.....35	35
表 3-12 戶均擁有家電台數.....35	35
表 3-13 未來戶數及低度用戶推估.....36	36
表 3-14 利用 2033 年人均居住面積推估之未來戶數.....37	37
表 3-15 各類熱水器耗能與普及率.....38	38
表 3-16 大台北地區家戶年食物處理能源消費概況（樣本數=661 戶）.....39	39
表 3-17 EnergyPlus 模擬案例數.....41	41
表 3-18 商業建築外殼參數設定.....42	42
表 3-19 商業建築室內發散熱設定.....44	44
表 3-20 商業大樓空調系統設定.....46	46
表 3-21 商業及住宅歷年核發建築物使用執照樓地板面積.....47	47
表 3-22 商業大樓電力流向.....51	51
表 3-23 商業大樓各項能源消費量及占比.....52	52
表 3-24 全國低度使用（用電）住宅統計表.....53	53
表 3-25 商業建築用電推估時採用之資料來源整理.....54	54

表 3-26 各商業建築類別之既有存量分析.....	55
表 3-27 屬服務業類別之各建築別逐年用電歷史與推估資料.....	56
表 3-28 經濟部能源局 2018 年公告之能源平衡表之部分節錄.....	58
表 3-29 其他各能源耗用別之消耗量推估模式.....	58
表 4-1 全國住宅瓦斯與自來水耗能量.....	61
表 5-1 歷年與未來逐年住商部門之預估總碳排放量一覽表.....	69
表 5-2 工研院 TIME 模型對未來純電動車之各階段推估.....	70
表 5-3 歷年與未來逐年住商部門電動汽車之預估總碳排放量一覽表.....	72
表 5-4 歷年與未來逐年住商部門之預估總碳排放量一覽表(加上電動車耗能).....	73
表 6-1 窗型冷氣機能源效率分級表.....	75
表 6-2 住宅冷氣機使用類型占比.....	77
表 6-3 在不同之汰換速度情境下所需之汰換成本及未來之節能率.....	77
表 6-4 照明節能汰換策略.....	80
表 6-5 照明節能汰換下未來逐年照明燈具數量之變化.....	80
表 6-6 106 年電冰箱新能源分級基準表.....	83
表 6-7 各類商業部門總用電占比與電冰箱電力流向.....	85
表 6-8 在不同之汰換速度情境下所需之汰換成本及未來之節能率.....	86
表 6-9 105 年至 109 年內政部推動策略及措施彙整表.....	90
表 6-10 建築淨零排放路徑初步之藍圖.....	92

圖次

圖 1-1 我國住宅與服務業部門電力與非電力溫室氣體排放比例	2
圖 2-1 德國能源證書分為九個等級	5
圖 2-2 美國住商部門總 CO ₂ 排放量來源比例(2016 年).....	8
圖 2-3 美國建築相關部門之年 CO ₂ 排放量預測(1990-2050).....	8
圖 2-4 美國各州商業建築能源規範採用版本分布圖	9
圖 2-5 英國建築部門溫室氣體排放量之細項	10
圖 2-6 英國建築部門歷年二氧化碳排放量統計	11
圖 2-7 EPC 評級範圍	12
圖 2-8 目前政策及未來脫碳情景下香港溫室氣體排放量目標	14
圖 2-9 當前政策及脫碳政策下香港的溫室氣體排放量預測	14
圖 2-10 2017 至 2050 年導致建築相關二氧化碳排放量下降變因	15
圖 2-11 2017 至 2050 年當前政策情景和脫碳情景下的建築類型和能耗因子	16
圖 2-12 劃分行業之用電量(左)與細分商業建築之用電內容(右).....	18
圖 2-13 工研院 TIMES 模型能源系統架構圖	20
圖 2-14 TIMES 模型電力系統架構	20
圖 2-15 TIMES 模型能源消費推估流程	21
圖 2-16 臺灣 TIMES 模型中住商部門能源推估模型流程示意圖	22
圖 3-1 全國住宅空調耗能推估模型	25
圖 3-2 全國住宅照明耗能推估模型	25
圖 3-3 住宅家電、熱水與烹飪耗能推估模型	26
圖 3-4 全國住宅部門二氧化碳排放計算與修正流程圖	26
圖 3-5 住宅平面配置圖	27
圖 3-6 人均居住面積與人均 GDP 之關係	30
圖 3-7 全球與國內人均居住面積之比較	30
圖 3-8 2021 至 2050 年人均 GDP 趨勢圖	32
圖 3-9 北中南冷房度時與鮮對應的空調 EUI 散佈圖	33
圖 3-10 2005 至 2020 年歷年總居住面積及全國戶數統計	37
圖 3-11 2020 至 2050 年未來戶數推估	37
圖 3-12 全國商業建築空調耗能推估模型	41
圖 3-13 建築長寬比隨機抽樣分佈示意圖	43
圖 3-14 玻璃 U 值隨機抽樣分佈示意圖	43
圖 3-15 商業大樓照明密度分布參考圖	44
圖 3-16 各設備之負荷率及運轉時程	45
圖 3-17 商業空調 EUI 分布示意圖	46
圖 3-18 全國商業建築照明與事務設備耗能推估模型	49
圖 3-19 商業照明 EUI 分布圖	49

圖 3-20 商業事務設備 EUI 分布圖	50
圖 3-21 各建築類別用電量占有住商部門用電量之比例(以 2018 年為例)	56
圖 4-1 人均 GDP 成長趨勢	59
圖 4-2 國家未來人口中推估	60
圖 4-3 各區住宅面積推估圖 (以人口中推估計算)	60
圖 4-4 全國未來戶數推估	60
圖 4-5 住宅各耗電項目耗電量未來推估	61
圖 4-6 全國住宅瓦斯與自來水耗能量與溫室氣體排放趨勢	61
圖 4-7 電力排碳係數成長趨勢	63
圖 4-8 全國住宅部門逐年溫室氣體排放量推估(未來以人口中推估且考量能源結構改變之情境).....	64
圖 4-9 住宅溫室氣體推估 (未來以人口中推估且考量能源結構不變之情境) ..	64
圖 4-10 住宅各耗能項目溫室氣體排放量占比 (以氣候中推估計算)	65
圖 4-11 逐年商業建築樓地板面積推估	66
圖 4-12 商業空調、照明、事務設備及其餘設備耗電量推估	66
圖 4-13 商業建築逐年溫室氣體排放量推估	66
圖 5-1 住商部門溫室氣體未來排放基線預測與核配減碳目標之比較(2021 更新)	68
圖 5-2 去年(109 年度)住商部門溫室氣體未來排放基線預估值	69
圖 5-3 總自用小客車之歷史與未來推估	71
圖 5-4 電動汽車之逐年占比推估	71
圖 5-5 電動汽車之逐年技術效能推估	71
圖 5-6 住商溫室氣體增加電動汽車未來排放基線預測與核配減碳目標之比較 ...	74
圖 6-1 北中南各分區不同房型之戶數存量趨勢分析(已扣除空屋)	76
圖 6-2 未來逐年預估之住宅冷氣數量趨勢	76
圖 6-3 未來逐年冷氣全負荷相當運轉時間之變化與節能率	77
圖 6-4 住宅冷氣效率提升四個等級在不同汰換率下空調總用電量變化之趨勢 ...	79
圖 6-5 改善策略導入下之住商照明節能量變化趨勢	81
圖 6-6 電冰箱之新舊基準對比	83
圖 6-7 2017 年住宅設備用電占比	84
圖 6-8 電冰箱效率提升四個等級下不同冷氣汰換率下空調總用電量變化之趨勢	86
圖 6-9 在未來發電結構不變情境下各措施之綜合減碳效益趨勢	88
圖 6-10 在未來發電結構改變情境下各措施之綜合減碳效益趨勢	88

摘要

關鍵詞：住商部門溫室氣體排放基線、近零耗能建築、減碳路徑

一、研究緣起

「溫室氣體減量及管理法」自 2015 年上路以來，明訂我國溫室氣體減量的目標為 2050 年碳排放減量至 2005 基準年的 50%，爰此我國依六大部門(能源部門、工業部門、運輸部門、農業部門、服務業部門與住宅部門)分別訂立其減碳目標，並於每五年滾動檢討之。由過去之研究發現全國住宅與服務業之溫室氣體排放量占全國總碳排放量約 11.0%與 10.7%。為達溫管法之目標，各部門暫依各自之全年溫室氣體排放比例分配減碳額度，其中內政部負責住宅部門與服務業部門內建築之溫室氣體減量部分。然而不同權責機關間存在主管之項目、可行之政策工具與減碳策略皆不同，各權責機關間進行減碳之難易程度因而各異。本計畫最終提出應用於住商部門具體可行之減碳策略，量化評估其未來合理之減碳潛力範圍，以供進行研商各部門間減碳分配額度之參考

二、研究方法及過程

本計畫係針對我國住商部門溫室氣體排放量推估模式進行比較分析，並基於未來氣象年，結合不確定性分析，進行未來住宅與商業部門能源消費分析及預測，建立溫室氣體排放基線，並分析相關減碳途徑，嘗試建立各式減碳策略之減碳效益，期作為政府作為提出住商部門減碳政策之參考及其減碳效益評估。在溫室氣體排放量推估之方法上，本研究採用由下而上之方法，依各建築類型中不同之能源耗用項目，逐項建立其逐年之耗能與碳排放量推估模型，透過與歷史耗能數據進行校正後，建立我國住商部門總體溫室氣體排放量推估與未來之預測模型。

本計畫分為以下四個部分：

1. 完成國內外住商部門減碳策略及減碳潛力之文獻蒐集。
2. 完成建築溫室氣體排放量及能源需求量之滾動推估。
3. 提出我國住商部門可行之減碳策略並量化其成本及減碳效益。
4. 完成我國淨零能源建築路徑評估報告。

三、重要發現

1. 依照重新建立之住商碳排基線模型與滾動更新新的各項統計資料後，發現 2020 年住商部門年總溫室氣體總量為 55,638 千公噸碳當量，相較於前一年度(2019 年)之 58,282 千公噸碳當量下降了 4.5%。因此往後各年之排碳推估 BAU 亦隨之調整，至 2025 年時預估住商部門之總溫室氣體排放量依發電結構不變與改變下，將分別降為 57,955 與 47,971 千公噸碳當量。

與現階段所訂的第二階段管制目標至 2025 年之分配排放額度分別仍有 14,241 與 4,257 千公噸碳當量之減碳缺口，尚須進一步分別再減碳 24.6% 與 8.9%。意即排除電力碳排放係數下降所導致之溫室氣體減少量外，額外住商部門本身需再減量 8.9%。

2. 本研究同時建立未來在電動車逐漸普及下，因充電樁位於建築內所增加之碳排放量預估模型。至 2050 年時因電動車充電所增加的碳排放量，在假設未來電力碳排放係數逐漸下降之前提下，為 29.9 MtCO₂e，相當於占當年度之住商總溫室氣體排放量的 0.81%。
3. 本研究提出之減碳策略在同時考量成本效益、推動之難易度(擴散率)、可行性，以建築照明燈具汰換、汰換效率差之冷氣、汰換老舊冰箱等做為優先推動之項目較建築外殼節能改善，更具減碳與成本效益。自 2022 年各項上述策略逐年依各自所設定之汰換率實施至 2050 年止，依序以(1)僅實施照明節能汰換、(2)實施照明節能汰換與冷氣汰換及(3)同時實施照明節能汰換、冷氣汰換與老舊冰箱汰換等三種情境下計算其至 2050 年之減碳幅度，在假設未來我國發電結構改變電力碳排放係數逐年下降下，與當年度之基線相較後分別可減碳 4.0%、10.1%與 12.2%；意即於 2050 年時全國住商排碳量將分別減為 44.735、41.887 與 40.915 百萬公噸CO₂e。

四、主要建議事項

根據本研究成果發現，提出下列建議：

建議一

本研究雖已基於減碳效益較為明顯之策略進行減碳潛力與成本之分析，這些策略以改善電器設備較具節能潛力。雖然建築外殼節能改善之節能效果有限，但就內政部之政策推行面而言，未來建築導入建築能效標示之制度可能是建築管理體制上較具有減碳潛力的作法。目前我國已初步完成建築能效標示之規範，並預計逐年擴大實施。因此，本研究建議除配合住商溫室氣體排放基線之滾動修正下，進一步評估導入建築能效標示制度之減碳效益，以作為政策推動方向之參考。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣建築中心

第一章 緒論

第一節 研究緣起

本計畫係針對我國住商部門溫室氣體排放量推估模式進行比較分析，並基於未來氣象年，結合不確定性分析，進行未來住宅與商業部門能源消費分析及預測，建立溫室氣體排放基線（Business As Usual, BAU），並分析相關減碳途徑，嘗試建立各式減碳策略之減碳效益，期作為政府作為提出住商部門減碳政策之參考及其減碳效益評估。

第二節 研究內容

「溫室氣體減量及管理法」自 2015 年上路以來，明訂我國溫室氣體減量的目標為 2050 年碳排放減量至 2005 基準年的 50%，爰此我國依六大部門(能源部門、工業部門、運輸部門、農業部門、服務業部門與住宅部門)分別訂立其減碳目標，並於每五年滾動檢討之。由過去之研究發現全國住宅與服務業之溫室氣體排放量占全國總碳排放量約 13.3%與 13.7%。為達溫管法之目標，各部門暫依各自之全年溫室氣體排放比例分配減碳額度，其中內政部負責住宅部門與服務業部門內建築之溫室氣體減量部分。然而不同權責機關間存在主管之項目、可行之政策工具與減碳策略皆不同，各權責機關間進行減碳之難易程度因而各異。

● 本計畫研究內容如下：

1. 持續滾動推估我國住商部門之溫室氣體排放總量及能源需求量。
2. 彙整國內外住商部門之減碳策略及推動之權責機關。
3. 進行我國住宅部門及服務業部門合理之減碳配額分析。
4. 考量減碳成本效益及減碳潛力，提出住商部門可行之減碳方案及策略，並進行衝擊影響評估。
5. 提出淨零能源建築路徑評估報告及短中長期策略。

「溫室氣體減量及管理法」(以下簡稱溫管法)自 2015 年上路以來，明訂我國溫室氣體減量的目標為 2050 年碳排放減量至 2005 基準年的 50%，爰此我國依六大部門(能源部門、工業部門、運輸部門、農業部門、服務業部門與住宅部門)分別訂立其減碳目標，並於每五年滾動檢討之。由過去之研究發現製造業占了將近一半之全國溫室氣體排放量，約 49%，而全國住宅與服務業之溫室氣體排放量占全國總碳排放量約 13.3%與 13.7%。為達溫管法之目標，各部門暫依各自之全年溫室氣體排放比例分配減碳額度，其中內政部負責住宅部門與服務業部門內建築之溫室氣體減量部分。然而不同權責機關間存在主管之項目、可行之政策工具與減碳策略皆不同，各權責機關間進行減碳之難易程度因而各異。本計畫，基於住宅與服務業部門建築本體之主管機關(內政部)，考量其可應用之政策工具與權責管理範疇，提出應用於住商部門具體可行之減碳策略，量化評估其未來合

理之減碳潛力範圍，以供進行研商各部門間減碳分配額度之參考。此外，住商部門二氧化碳排放來源主要為使用電力產生的CO₂排放，其排放量住、商分別為23.91百萬與23.69百萬公噸，占各自整體部門之比例為84.2%與87.6%，顯示節約用電為後續推動住商部門溫室氣體減量之首要工作。

我國之溫管法自2015年實施以來，前五年為第一個管制目標階段至2020年，今則進入下一個五年之第二期部門階段管制目標。依目前行政院環境保護署之規劃，2025年全國溫室氣體總淨排放量需降為2005年溫室氣體淨排放量再減少10%(相當於241.011 MtCO₂e)。以住商部門而言2025年推估之溫室氣體排放總量為48.857 MtCO₂e需再比基準年2005年之淨排放量降低27.9%，此目標比例訂立係依據預期我國之電力二氧化碳排放係數至2025年時，會再下降27.9%，然而卻未充分考量了住商部門未來之成長。依本團隊過去之研究，實際上相較於新草擬之第二期住商部門階段管制目標41.421 MtCO₂e，仍需再減量7.436 MtCO₂e。

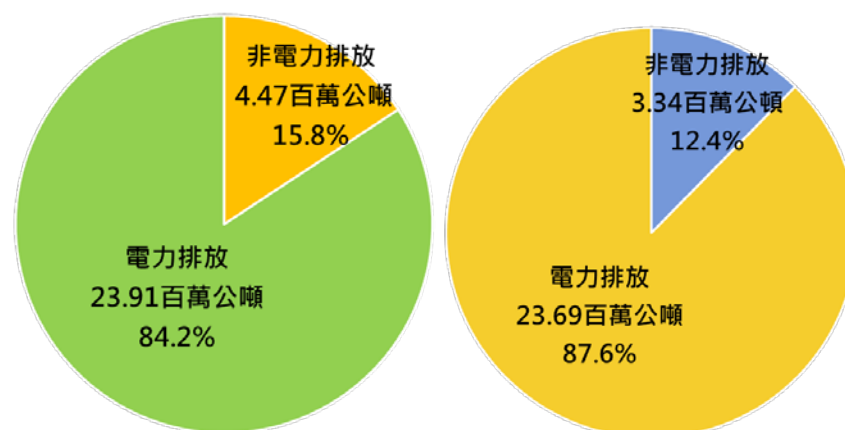


圖 1-1 我國住宅與服務業部門電力與非電力溫室氣體排放比例

(資料來源：(經濟部能源局 2019))

本計畫係針對我國住商部門溫室氣體排放量推估模式之檢討與持續滾動更新推估模式，同時考量未來氣候之變遷、住商未來之成長等因子，進行我國住宅與商業建築能源消耗與碳排放量之分析及預測，除了建立各建築類別之溫室氣體排放基線(BAU, Business As Usual)，並分析相關減碳情境下未來逐年至2035年之預期減碳效益。因此，本計畫之研究目的有以下四點：

1. 完成國內外住商部門減碳策略及減碳潛力之文獻蒐集。
2. 完成建築溫室氣體排放量及能源需求量之滾動推估。
3. 提出我國住商部門可行之減碳策略並量化其成本及減碳效益。
4. 完成我國淨零能源建築路徑評估報告。

第二章 國內外文獻回顧與評析

根據跨政府氣候變遷組織(IPCC)之相關研究，自從 1970 年以來，建築溫室氣體年排放量已成長超過兩倍，在 2010 年時達到 9.18 GtCO₂eq，占了 2010 年全球總溫室氣體排放量的 19% (International Energy Agency 2012, European Commission 2013)，其中 6.02Gt 大多來自建築用電所造成的間接排放(The IPCC Working Group III 2014)。在 2010 年，建築占了全球最終能源使用量的 32% (其中 24%是住宅部門，8%是商業部門) (International Energy Agency 2013)，為能源使用之最大宗，不管是住宅或商業部門，暖氣系統皆是耗能最多的，除此之外，照明耗能在商業部門次之，烹調及熱水耗能則在住宅部門較為顯著。不同於持續成長的溫室氣體排放量，世界各區的人均溫室氣體排放量在 1990-2010 年間並沒有太顯著的增加，這說明了能源使用效率的提高減緩了建築能源使用量成長的趨勢，在許多開發中國家尤其明顯，由於從生質能轉型到現代能源的過程可以大幅提高能源的使用效率。

然而 2021 年 IPCC 公布最新的第六次評估報告(AR6)中表示，隨著全球氣溫加劇提升，預計各地區會因氣候影響加劇。在所有排放情境中，除非未來十幾年內大幅減少二氧化碳及其他溫室氣體排放量，否則全球將在 21 世紀會超過 1.5 °C 和 2 °C。都市局部地區的溫度提升，加劇都市熱島影響程度，連同更頻繁的極端高溫區，將增加熱浪的嚴重程度。另外，沿海城市，會發生更頻繁的因海平面上升及暴潮所致的極端事件，使洪水的可能性大增。

國際能源署 (IEA) 與聯合國環境署 (UNEP) 在 2019 年發布了一份全球性的報告，內容談到在 2018 年建築與營造部門占了全球最終能源使用的 36% 以及全球二氧化碳排放量的 39%，而從 2017 年到 2018 年，全球的建築溫室氣體排放量增加了 2%，原因出自於樓地板面積以及人口的增加。主要的排放源來自電力的使用量增加，自從 2010 年以來電力的年使用量已成長超過 19%。2017-2018 年，暖氣的耗能下降了 2%，照明也下降了 1.4%，冷氣的耗能上升 2.7%，其餘服務如熱水、烹調、電器大致維持，自從 2010 年以來，冷氣已成長了 8%，成為建築中成長最快的能源使用量。

IEA 在 2021 年五月針對 2050 淨零路徑提出達標路徑與關鍵里程碑。整體轉型創造更多就業機會，對發展更高效能的電器、燃料電池運具，以及建築節能改造，可額外創造 1600 萬的就業機會。為了達到 2050 年淨零的目標，其電力來源 90%來自於再生能源，其中 70%是太陽能及風能，其裝置容量要提升四倍以上，而電動車銷售量則比現今提升 18 倍。除了改變發電結構以外，零碳建築 (Zero-carbon-ready building) 是計算建築碳排時，需涵蓋建築營運、搭建、和材料生產等各階段，因此建築須具備良好被動式設計、整合再生能源，以及使用低碳建材等要件。於 2030 年全球 20%既有建築需翻新，2050 年超過 85%的建築需遵守零碳建築能源法規。

以下回顧說明國際上有關各國住商部門減碳策略及減碳潛力之措施：

第一節 各國住商部門之減碳措施文獻評析

● 德國住商部門之溫室氣體減量措施

自 2020 年 11 月 1 日起，德國新建築能源法上路，以統整並取代先前的節能條例(EnEV)、節約能源法(EnEG)，以及可再生能源供熱法(EEWärmeG)三項建築節能法規。德國聯邦政府針對建築之節能與能源效率提升之具體政策作為主要可以分為兩部分：(1)針對新建建築之能源使用密度、建築外殼性能之規定；以及(2)針對既有建築物改造之低利貸款以及根據節能成效的補助。

德國最早在 1976 年時就實施「節約能源法」(陳麒任 2017)，並於隔年的 1977 年實施「建築節能法」，主要是因為建築部門的能源消耗占有能源消耗高達 40% 左右，也因此德國不斷地修訂新建建築物之耗能標準，從 1977 年之消耗標準 330 kWh/(m².a)，至 2009 年時已經將標準提高至 50 kWh/(m².a)，而未來的目標則是將新建建築之耗能標準控制在 25~30 kWh/(m².a)。

2013 年 7 月德國聯邦政府通過新修正的建築物節約能源法(EnEG)更新增了 2a 條以及 7b 條有關新建建築物零耗能建築以及能源績效證書與檢驗報告之規定。近零能耗建築物係指建築物擁有良好的能源使用效率，使其建築物之能源使用量維持在較低的水準，並且規定能源供給的來源應盡可能使用再生能源。在 2a 條有關新建零耗能建築物之規定中，明確規定所有新建之建築物必須在 2020 年 12 月 31 日時，履行近零耗能建築 (Niedrigstenergiegebäudestandard) 之義務，而對於政府機關之新建非住宅類之建築物，則提早至 2018 年 12 月 31 日開始實施，2021 年與歐盟同時實施所有新建建築皆須達成近零耗能建築的標準。然而目前歐盟尚未提供該項目全面性的定義，以致目前德國描述近零耗能建築是綜合高效能的建築，具體來說它是幾乎為零或非常低的能源需求的房屋，並可用鄰近的可再生能源來滿足能源需求。該項目由德國能源署(Deutsche Energie-Agentur, dena)監督，新建建築皆需滿足 2014 年版 EnEV 的節能法規。

2014 年 5 月 1 日德國聯邦政府修訂節能條例 (EnEV)，針對新建建築物的能源消耗採取更嚴格之標準，規定電力以及暖氣之能源消耗應降低 25%、建築外殼之隔熱性能應提高 20%，目標是希望能於 2020 年時降低德國能源消耗的五分之一，每一年度之目標可以參考表 2-1。另外一部有關德國節能之法規為《能源服務暨其他能源效率法》(Gesetz über und andere Energieeffizienzmaßnahmen, EDL-G)，為德國導入具有成本效益之能源服務，並由德國聯邦政府帶頭示範，目標在 2050 年實現近碳中和建築。另依據節能條例，建築物之能源證書由建築、土木、設備等專業共同認證與執行，而地方政府會將技師名單以及建築物之基本資料、能源需求、能源消耗量、改善建議及評估方法等內容公布於網路上，若既有建築中有 30 年以上之老鍋爐，隨著新法規的正式生效，必須強制更換，新核發之能源證書需載明能源效率等級(Deutsche Energie-Agentur) (如圖 2-1)，且必須清楚標示隔熱、空調使用、CO₂ 排放等能源消耗狀況，無論業者將建築物出租

或者出售，皆需要出示完整的建築能源證書，否則將被處以 15,000 歐元以下的罰鍰。透過建築物之能源資訊揭露的方式，可以使買方或者租賃方知道建築物的能源使用情形，若建築之能源表現較差，可能會影響到房價或者租金，透過這樣的方式，使市場機制促使建築物的所有權人改善建築物之能源表現。

表 2-1 德國聯邦政府設定之能源消耗個階段目標（以 1990 年為比較基準）。

項目	2011	2020	2030	2040	2050
減少溫室氣體排放	-27%	-40%	-55%	-70%	-80%
再生能源占能源總耗量	10%	18%	30%	45%	60%
再生能源占電力使用量	16%	35%	50%	65%	80%

資料來源：(Federal Ministry for Economic Affairs and Energy)

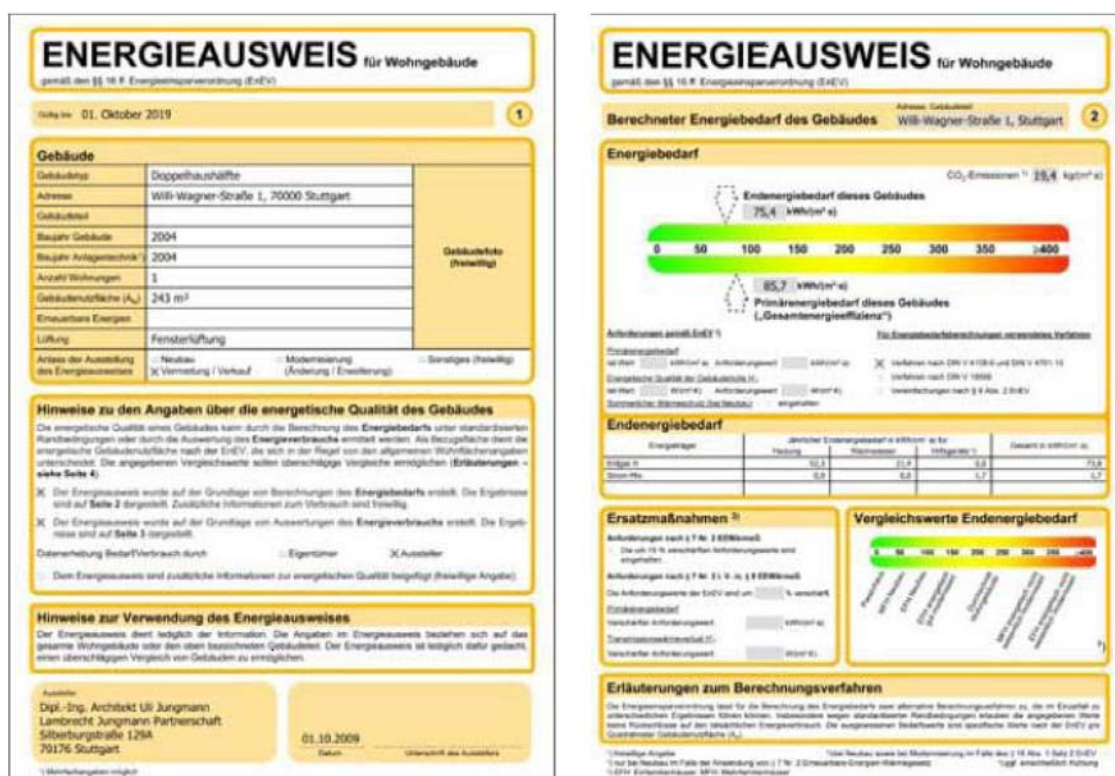


圖 2-1 德國能源證書分為九個等級

(資料來源：(Deutsche Energie-Agentur))

德國聯邦政府與德國復興信貸銀行（簡稱KfW）為節能建築提供相關借貸措施，關於新建建築之能耗改善。自 2021 年 7 月起民眾若是購買或建造新建建築者，可依造住房的能源等級獲得補助。利用基本能源需求(Q_p)與傳輸熱損失(H_T')制定貸款與政府補助額度，如表 2-2。目前法律規定新建建築之耗能是參考型建築 75%，以 KfW 效能房屋 55 為例，該建築須比 75% 基礎能源需求更下降至 55%，加上結構性隔熱性能提高 30%，才可取得 KfW 補助資金。而更高節能效率的建築如 KfW 效能房屋 40+，大多為擁有自發電與自用電設施。該房屋具有儲電專裝與熱回收功能的通風系統，以節省更多能源。同時，若建築擁有 55% 以上可再生能源的供熱系統，可另申請更高額的補助。詳細能源等級及補助額度

如表。另外，關於既有建築物的改善也是透過獎勵補助的方式，促進既有建築的翻新，使既有建築物亦可實現近零耗能之標準。目前的法規提供自用建築物所有權人為期 8 年、高達 300 萬歐元之額外補助，作為改善既有建築能源表現之誘因。KfW 提供「節能改善翻新計畫」，效能房屋分類從 40 至 100，其補貼相較新建建築更為豐厚，政府的貸款補貼甚至提升至 45%，若包含 55% 可再生能源的供暖系統，貸款額度不僅可增加 30,000 歐元甚至政府補貼可多得 5%，如表 2-3。對於特別建築另有其他節能規劃，以保護古蹟等重要文化建築遺產。

表 2-2 政府與 KfW 對新建建築之補助

效能等級	基礎能源需求(%)	建築結構熱損失 (%)	最高貸款額度(歐元)及政府補貼(%)
效能房屋 40+	40	55	貸款 € 150,000，補貼 25%
效能房屋 40	40	55	貸款 € 120,000，補貼 20%
效能房屋 40 (含再生能源類)	40	55	貸款 € 150,000，補貼 22.5%
效能房屋 55	55	70	貸款 € 120,000，補貼 15%
效能房屋 55+ (含再生能源類)	55	70	貸款 € 150,000，補貼 17.5%

(資料來源：(KfW 2021))

表 2-3 政府與 KfW 對既有建築之補助

效能等級	基礎能源需求(%)	建築結構熱損失 (%)	最高貸款額度(歐元)及政府補貼(%)
效能房屋 40	40	55	貸款 € 120,000，補貼 45%
效能房屋 55	55	70	貸款 € 120,000，補貼 40%
效能房屋 70	70	85	貸款 € 120,000，補貼 35%
效能房屋 80	80	100	貸款 € 120,000，補貼 30%
效能房屋 100	100	115	貸款 € 120,000，補貼 27.5%

(資料來源：(KfW 2021))

德國自 2020 年 11 月 1 日正式生效新建築能源法(GEG)，現階段已統整併取代先前的節能條例(EnEV)與節能法案(EnEG)，而可再生能源供熱法案(EeWärmeG)則會逐步併入該項政策。過去 EnEV 負責規定建築內部的加熱、冷卻、通風等耗能較大的設備。EnEG 是德國工商管理法的一部份，內容與 EnEV 相近。而 EeWärmeG 則是制定再生能源用於建築物的供熱與製冷的規範。聯邦政府之所以會將三項法律統整的最大原因是基於能源效率和建築物之間有極大的影響，因此利用 GEG 第 1 節規定該法律之目的是盡可能節約在建築中的使用能源，因此須加入再生能源為建築使用能源之一，以提供產生熱、冷與電力。然而政府為了不想 GEG 的新規使建築與公共建設增加不必要的花費，因此 EnEV 2014 版的能源規範與標準將繼續沿用，未來相關規範之更新則直接修改 GEG 即可。對於近零耗能建築的建築標準在 GEG 中有更明確的規範，對於歐盟的建築

規定做出反應，自 2021 年起所有新建建築必須是近零耗能建築，其標準是利用 EnEV 規範，因目前德國 EnEV 之規範是歐盟法律要求中最優秀的，未來對近零耗能建築會提供更明確的數值與解釋。最後 GEG 考慮建築之經濟效益，在第 9 節規定了 2023 年對將要建造的建築與既有建築的需求進行審查。若透過支出得方式產生更節省的效益，此要求對經濟而言是合理的因此。對於既有建築物、系統和設施，必須考慮預期使用壽命，以達最高效益。

● 美國住商部門之溫室氣體減量措施

美國針對住商部門有關之溫室氣體減量推動權責機關，主要為環保署(E.P.A.)與能源部(D.O.E)，其中美國環保署為聯邦的獨立機關而能源部則隸屬於行政院底下。其中環保署負責建築部門之溫室氣體排放量盤查與排碳路徑預測、減碳策略擬定等；而能源部則負責減碳技術之研發、住商節能法規制訂、零能耗建築與建築中的再生能源應用的推動等。而此兩大機關則共同制訂了 Energy Star 節能認證標章，以作為推動電器設備之節能標示，而其中所推動的 Energy Star Certified Homes 則為美國之建築能效標示制度。

美國的建築部門占了全國 40% 以上的能源消耗以及 76% 以上之電力消耗，同時也占了美國總溫室氣體排放量的 40%，若能透過能源科技的發展將有機會於 2030 年時降低建築部門之能源消費量(陳麒任 2017)。由圖 2-2 顯示不管是商業或住宅建築空調系統(包括冷房與暖房)的耗能量分別占了各自的 30% 與 38% 是最大宗；而照明與電器耗能則分別占了 32% 與 24%。然而自 2005 年美國的住商建築碳排放(如圖 2-3)達到最高峰以來，透過能源效率的提升至 2018 年時住宅與商業部門則分別減碳了 17.3% 與 11.4%(Leung 2018)。

美國眾議院於 2009 年 6 月 26 日通過《美國清潔能源與安全法規》(The American Clean Energy and Security Act, ACESA)，要求提高新建以及既有建築物之能源效率，包括頒布執行新建、家用電器以及工業之節能標準，例如：於第二篇能源效率的章節中，(1)規定新建的商用以及民用建築能效要提高 30%、(2)提供 1976 年以前建造之既有建築物的能效改造補貼並且(3)實施建築能效標示計畫。

在 2015 年 3 月 19 日，時任美國總統歐巴馬簽屬行政命令 EO 13693《未來十年聯邦可持續發展計畫》(Planning for Federal Sustainability in the Next Decade) (the White House)，訂定聯邦政府之清潔能源與減排目標，其中的目標包括：(1)未來十年聯邦政府溫室氣體排放量將比 2008 年減少 40%、(2)未來聯邦政府使用的電力必須有 30% 來自再生能源。關於此項法律訂立之目標以及具體措施如表 2-4 所示。

於同年的 4 月 30 日，時任美國總統歐巴馬簽屬通過另一份法案，名為《能源效率改善法案》(the Energy Efficiency Improvement Act of 2015)，主要分為三個部分：包含較佳建築 (Better Buildings)、可連網之熱水設備以及商業建築能源使用資訊。在較佳建築 (Title I) 的項目中，訂立了聯邦政府相關建築物之能

源效率，以及房客之星計畫（Tenant Star Program）。在訂立聯邦政府相關建築物之能源效率的項目中，規定主管機關（聯邦不動產服務部門）應於限期內訂定可鼓勵建築物所有人與租賃使用者共同投資提升用能與用水效率相關設備的商用建築租賃契約範。而房客之星計畫為目前建築節能措施計畫能源之星（Energy Star）計畫中之一部份，獎勵承租商用辦公大樓的用戶安裝節能燈具與系統，為美國政府第一個商業大樓內租用空間永續設計和運行的認可標章。在可連網之熱水設備（Title II）的項目中，於 2010 年之法案修正中規定電熱水器大於 55 加侖之能源因數值（energy factor）在 2015 年前須達到 1.98，約為現行效率之兩倍，只有熱泵熱水器可以達到這樣的標準。而在 2015 年修正過後，規定容量 75 加侖以上之可連網熱水器其能源因數值須達到 1.061 以上才可以販賣。

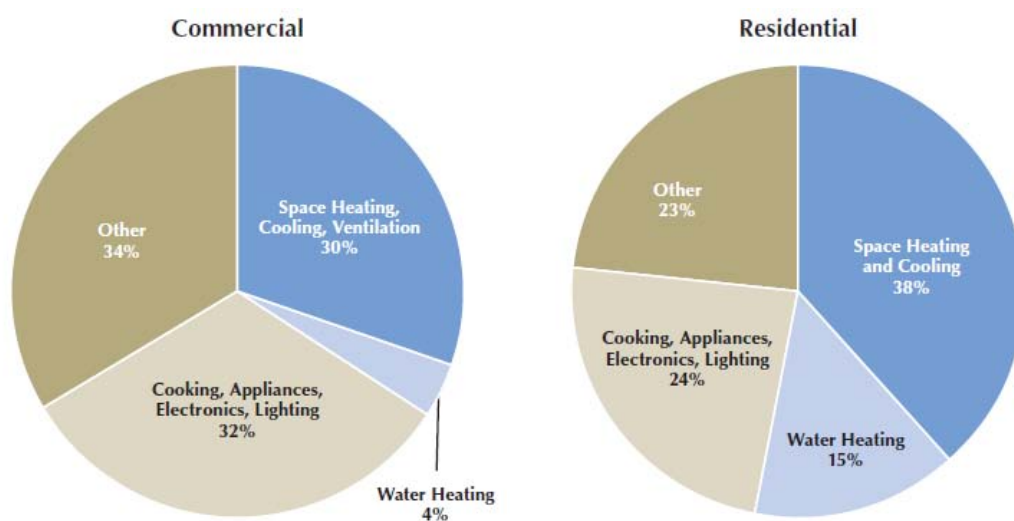


圖 2-2 美國住商部門總CO₂排放量來源比例(2016 年)

(資料來源：(U.S. Energy Information Administration 2018))

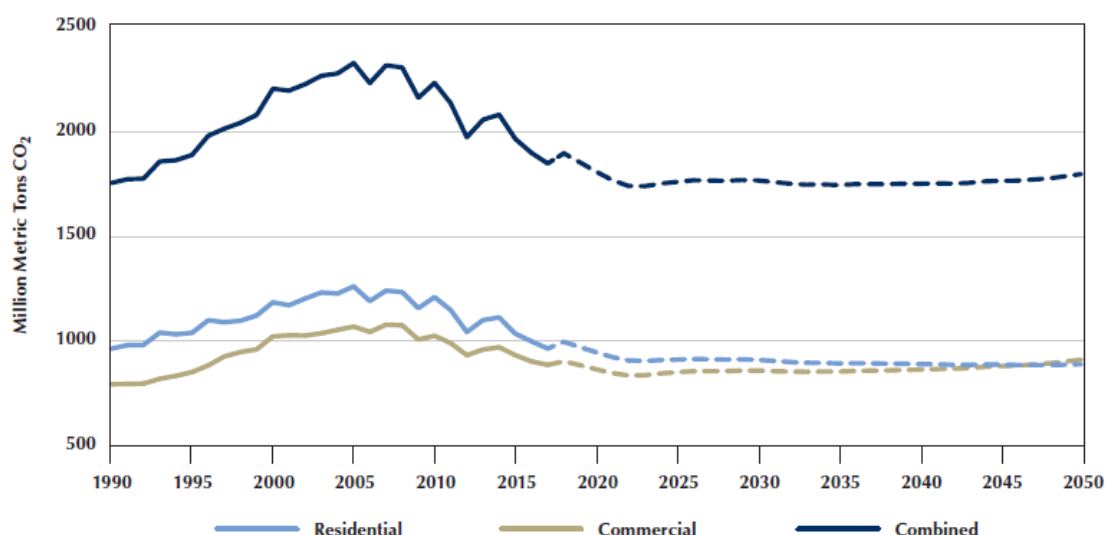


圖 2-3 美國建築相關部門之年 CO₂ 排放量預測(1990-2050)

(資料來源：(U.S. Energy Information Administration 2018))

表 2-4 美國聯邦政府《未來十年聯邦可持續發展計畫》之目標以及具體措施。

項次	項目	具體措施
1	推進並提高建築節能，效率和管理	2015年至2025年期間每年降低聯邦大樓2.5%的能源使用
2	確保在特定百分比，建築所消耗的電力和熱能來源來自可再生電能源和替代能源的最低限度	聯邦大樓2025年總能量消耗的25%需來自清潔能源
3	提高機構水資源利用效率和管理	至2025年聯邦大樓每年降低2%的用水強度
4	提高機構車隊和車輛的使用效率和管理，如果該機構有20輛以上汽車組成的車隊	2025年需減少聯邦車隊每英里溫室氣體排放量30%（以2014年為基準）

資料來源：(the White House)

另外一部與建築能源有關之法案為《美國建築能源規範》(Building energy code)，由美國能源局 (Department of Energy) 規定並且執行。目前現有之商業建築大多根據美國冷凍空調協會的 ASHRAE 90.1 標準或者根據國際能源法規委員會 (International Energy Conservation Code, IECC) 的標準建造。IECC 於 2015 提出 IECC 2015，對於建築之外殼、暖通空調、熱水器、照明以及對能源效率有更嚴格之規定，美國各州採用的標準不盡相同(Department of Energy 2015)，如圖 2-4 所示。以暖通空調之最低能效的規定為例，IECC 2015 商用建築針對空調部分之最低能效規定主要變更為 2016 年 1 月 1 日起，容量小於 65,000Btu/h 氣冷空調 SEER 值需由 13 提高至 14，介於 65,000Btu/h~135,000Btu/h 容量的空調 SEER 值需由 11 提高至 11.2。IECC 2015 另外規定之能源效率標準，必須選擇至少其中一項達到標準，包含：高效暖通空調、降低照明功率密度、增強照明控制、可再生能源、專用室外空氣系統、高效太陽能熱水器等。

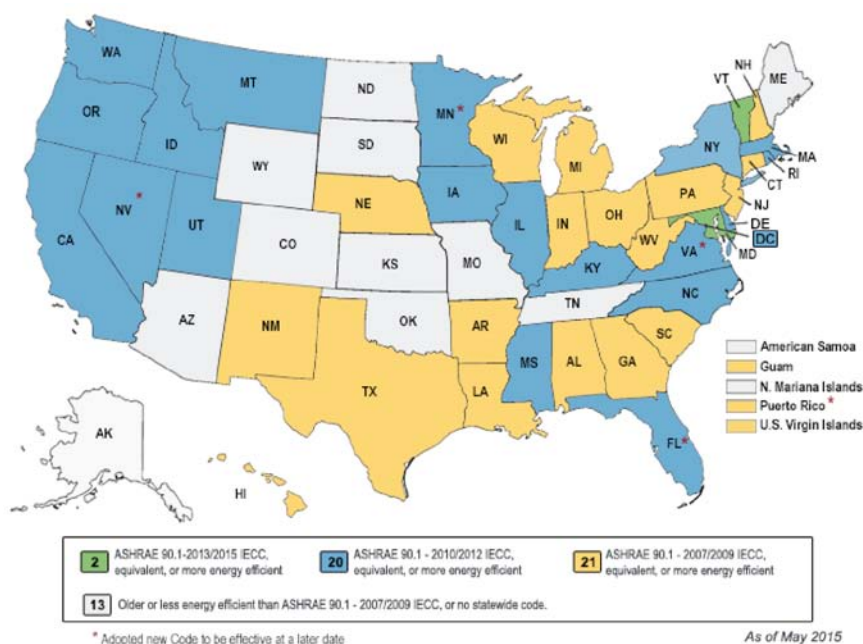


圖 2-4 美國各州商業建築能源規範採用版本分布圖

資料來源：(Department of Energy 2015)

● 英國住商部門之溫室氣體減量措施

英國政府針對住宅相關之溫室氣體減量權責機關，以 2008 年英國通過《氣候變遷法》(Climate Change Act, CCA)實現巴黎協定為基礎，著重在經濟成長的情況下仍持續漸少溫室氣體排放之辦法。以法條的方式規範溫室氣體之規劃。內容涵蓋減碳目標、每五年滾動式檢討碳預算、劃分各部門之權責以及明確提出減緩和調適之行動策略。此法案使氣候變遷在政治討論中更有向發展，主要是英國商業能源及工業策略部(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)與英國氣候變遷委員會(Climate Change Committee, CCC)兩大部門負責監督減碳進度與提供科學數據。

英國BEIS每年公布溫室氣體排放臨時報告(UK greenhouse gas emissions, provisional figures)提供該年或該季的各部門臨時估計值，以了解總體排放量之趨勢。2020 年住宅與公共部門以天然氣的供熱系統為主要能耗來源，電力消耗量則歸屬於能源供應部門。住宅與公共部門排碳量為 75.4 MtCO₂e，占 23.2%的總體溫室氣體排放量。相較 1990 年的二氧化碳排放量住宅與公共部門分別下降 13.5%與 42.2%。另外，商業部門排碳量 59.4 MtCO₂e，占 18.2%的總體溫室氣體排放量。相較 1990 年排碳量已大幅漸少 46.8%。以長年趨勢下降分析，自 2001 至 2009 年之下降原因可能是經濟因素，而 2020 年比 2019 年更減少 8.7%二氧化碳排放量的主要原因是COVID-19 導致的全國性封鎖，企業倒閉與交易量下降所驅使。

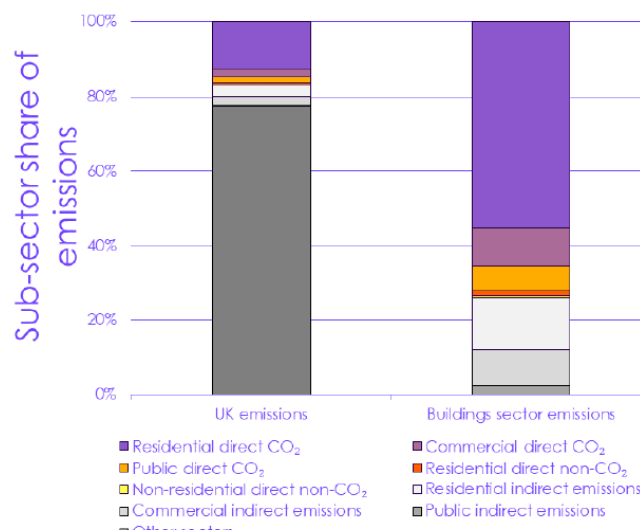


圖 2-5 英國建築部門溫室氣體排放量之細項

資料來源：(Committee 2020)

國會成立獨立第三方的氣候變遷委員會(CCC)以監督者身分追蹤與評估國家每年減碳進度，並向政府與國會提供符合更長期目標的建議。CCC在 2020 年提出的第六次建築碳排平衡預算(The Sixth Carbon Budget: Buildings)要求 2035 年溫室氣體排放量相較基準年(1990 年)減少 78%，而 2019 年已減少 63%開始進行第六期計畫，期望最晚在 2050 年可達成淨零，與巴黎協議一致。2019 年住商相關的建築部門直接性(Direct)溫室氣體排放量占總排放量 17% (87 MtCO₂)，以

供熱系統的化石燃料為主，分成住宅(77%)、商業(14%)以及公共(9%)，如圖 2-5。另外，建築部門室內用電量占總全國總用電量 58%，相當於 31MtCO₂e 的間接性(Indirect)排放量。建築物能效提升使 2015 年相較 1990 年的建築物化石燃料排放量下降了 19%，如圖 2-5 英國建築部門溫室氣體排放量之細項圖 2-6。因間接性用電需求逐年減少和綠色發電脫碳使得 2009 年起以平均每年 10% 的幅度下降。

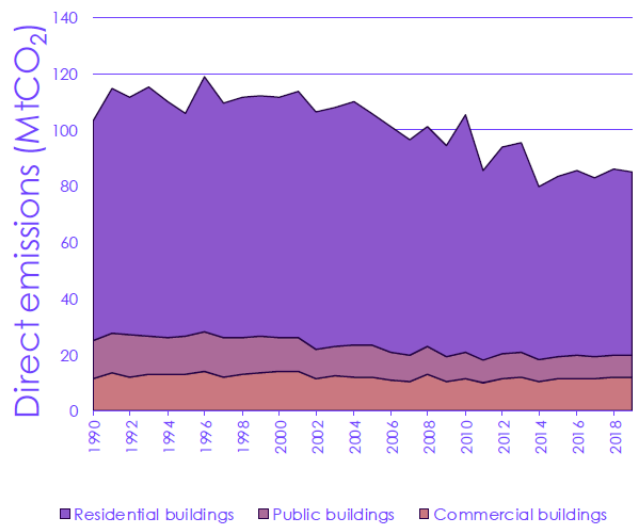


圖 2-6 英國建築部門歷年二氧化碳排放量統計

參考資料：(Committee 2020)

CCC 針對目前建築減碳政策分為 6 大項明確指出住宅、商業以及公共建築的差別，如表 2-5。英國建築在建造、出售或出租房屋時，需要能源績效證書 (Energy Performance Certificate, EPC)。這會顯示建築物的供熱系統和照明成本、其二氧化碳排放量以及可提高其能源效率的建議。EPC 按照從 A（效率最高）到 G（效率最低）的範圍對物業進行評級，有效期為自發布之日起後 10 年，如圖 2-7。由於英國有不同自治地區，如蘇格蘭政府在某些領域的標準比英國更為嚴謹或提早實行。例如，蘇格蘭要求自住房屋從 2024 年開始需符合 EPC C 並提供 15,000 英鎊的補助，意味著任何不及等級 C 的房屋必需升級才能出售，但不是所有地區(如威爾士與北愛爾蘭)皆有相同的補助。

表 2-5 英國當前建築部門之減碳策略

項目	內容
住家效率	2017 年政府提出淨能成長策略(Clean Growth Strategy)中提到 2030 年全國住宅的 EPC C。
租用商業和公共建築	當前法規要求英格蘭和威爾士的所有私人出租物業在 2023 年 4 月之前至少達到 EPC E。而非住宅私人出租建築應在 2030 年 4 月之前達到 EPC B 的提案，其中需建立在具有成本效益且滿足七年投資回本的情況。
新建建築	根據未來住宅的標準，新建築將不會建造使用化石燃料供熱系統。英國政府希望在 2025 年之前在英格蘭和威爾士引入這項措施，而蘇格蘭政府是從 2024 年開始實施。

商業建築效率	淨能成長策略針對企業與工業的能源效率設定在 2030 年相較 2017 年需提升 20%
公共建築	2032 年公共部門排放量相較 2017 年大幅減少 50% 為目標。
移除高碳化石燃料	在 2020 年開始逐漸停止安裝新式與淘汰舊有的煤炭或石油設備。占目前 11% 的宮熱與熱水設備。

(參考資料：(Committee 2020))

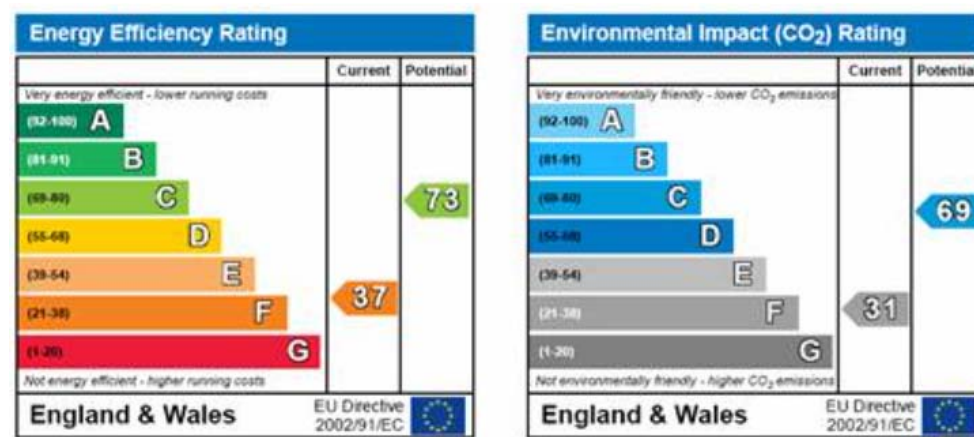


圖 2-7 EPC 評級範圍

資料來源：(energy 2021)

由於供熱系統為建築部門能耗最大宗，因此政府特別與產生建築能耗的相關企業協商出四項政策，以提高供暖設備的能效與建築管理，如表 2-6。

表 2-6 第六期碳排平衡預算之高水平建築供暖政策

項目	內容
目標明確 (A Clear Direction)	- 化石燃料淘汰標準需建立明確的 trajectory - 未來電氣化會取代天然氣電網。電氣化的靈活性使其作為區域解決方案之一。
使低碳經濟具有吸引力 (Making Low-carbon Financially Attractive)	- 在相對價格下提供更佳的電力靈活度，使其選擇使用電力而不是天然氣。 - 增加對低碳供暖的資助與大規模開放綠色金融
達成的可行性 (Enabling Measures)	- 利用真實數據歸納出良好建築應有的標準，如 EPC、PAS2035 住家改造計畫，以及綠建築護照 - 標準提高強制性與執行力 - 提供執行上的技能執導與完整的內容資訊。
延續下去 (Getting On With It)	- 針對新建與既有建築以及出租建築提早提出更強而有力的措施。 - 興建建築需屬於規劃項目或擁有綠建築護照為基準。 - 能源規劃需納入 RIIO 的投資循環。

(參考資料：CCC, 2020)

● 日本住商部門之溫室氣體減量措施

日本從設備供應端以及需求端積極推動設備節能措施，設備供應端以直接限制低效率設備作為手段，以最低能源效率標準（Minimum Energy Performance Standards, MEPS）限制廠商生產或進口達到標準之設備(陳麒任 2017)；而在需求端則積極提高用戶採用節能措施之意願，並搭配能源服務制度（Energy Service Companies, ESCO），透過設備的監控以及驗證機制確保用戶的節能效益。

日本政府針對設備自 1999 年起採用 Top Runner 的制度，目標是提升設備效率，促進住宅、商業與運輸部門的節能成效。Top Runner 管制的項目以高市場普及率的設備為主，規定管制設備在目標年限內需達到效率標準，而該效率標準以目前市場上同期產品效率最佳者為標竿，從初期 11 項管制項目，至今天已達 23 項，而日本政府亦於 2006 年時要求電視、微波爐、冰箱、販賣機、DVD 播放器、冷氣、電鍋、汽車等設備的效率水準提升 7%~34%。此一制度的實施大幅提升日本家用設備之效率，在相同使用時數之下所耗費的能源更少。

日本針對建築節能性能評估訂有《能源使用合理化》（The Law Concerning the Rational Use of Energy, 1998）的法律規範，採用 PAL（Perimeter Annual Load）與 CEC（Coefficient of Energy Consumption）性能指標法，前者用以評估建築外周區整年的熱負荷，後者則規範建築耗能設備之能源使用效率，將建築節能標準分為大樓以及住宅兩大類，並且提出建築隔熱材之性能係數標準與出版住宅節能設計施工指南。針對住宅類的建築，節能手段主要著重在外殼設計，而對大樓建築的節能標準管制較為嚴苛，包含：建築外殼熱損失、空調設備能源使用效率、非空調設備之機械通風能源使用效率、照明設備能源使用效率、熱水供應設備能源使用效率、升降機設備能源使用效率。而在 2008 年之後，日本修訂《能源使用合理化》的規章，加強規範效果，修正內容著重在大型建築物需主動向主管機關通報建築的節能措施與安全維護狀態，並且規定建築物的販售或者租賃業者須公開建築物的節能性能標示。若為建築物為獨棟住宅，且達到外牆、窗戶、設備以及熱水的性能，可標示「住宅符合業者判斷基準」。

● 香港住商部門之溫室氣體減量措施

由於中國是巴黎協定的其中一員，因此 2050 年邁向淨零排放為首要目的。但 Covid-19 的影響，原先預計 2020 年相較 2005 年為基準應減少 20% 的溫室氣體排放量可能延後兩年才能達成；而 2030 年藉由使用天然氣代替煤炭發電而漸少 26 至 36% 的溫室氣體排放量，如圖 2-8。人口與經濟增長是排放增加的主要原因，因此藉由電力脫碳、建築能效提升和交通運輸的改進是減少碳排的主要解決方法，期望在 2050 年使用低碳燃料發電完全取代燃煤發電和開發當地或購買再生能源，預計最大可漸少 27MtCO₂e 的排放量。另外建立建築節能措施可使建築能效在 2050 年減排 10.6MtCO₂e 的排放量，以及搭配改善交通方式可再減排 6.7MtCO₂e 的排放量。

目前香港設置兩種情境以預測未來溫室氣體排放量變化。當前減碳政策 (Current Policy Scenario) 是單純以來源進口電力與當地的天然氣為供電來源、提升建築效能，以及鼓勵電動汽車銷售與提高燃油效能。在這種情況下，香港的溫室氣體排放量預計將在 2035 年之前下降，這主要歸功於發電方式改變。然而至 2050 年二氧化碳當量排放量將僅下降至 2200 萬噸，因為建築行業能源需求的增加將抵消減少的碳排放量。若香港的策略改為脫碳情境 (Decarbonisation Scenario)，發電結構改變著重於購入進口電力與再生能源、建築能源效率提高 11~40%，以及強制交通工具類型可使 2050 年碳排放量有望減少到 3.9 MtCO₂e 相較 2005 年減少 90%，如圖 2-9。

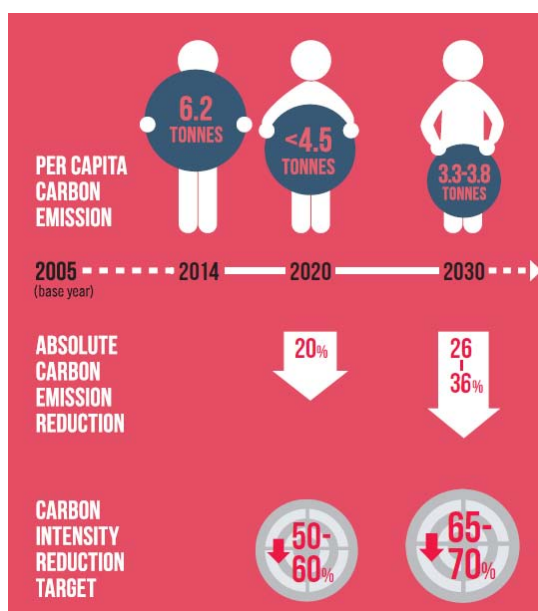


圖 2-8 目前政策及未來脫碳情景下香港溫室氣體排放量目標

參考資料：(Environment Bureau of Hong Kong 2017)

Figure 2-5 | Projected greenhouse gas emissions in Hong Kong under the Current Policy Scenario and the Decarbonisation Scenario, 2017-50

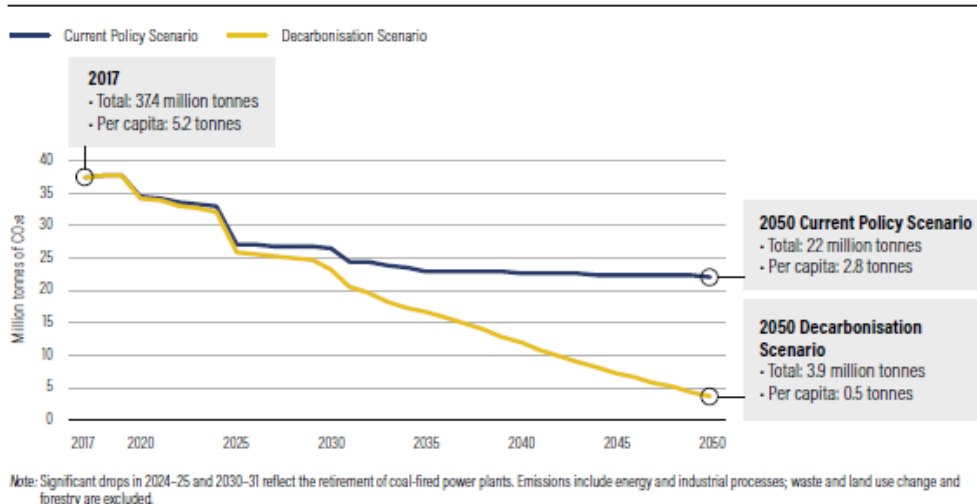


圖 2-9 當前政策及脫碳政策下香港的溫室氣體排放量預測

(參考資料：(Jiang, Iu et al. 2020))

由於香港的建築型態為密集的高層建築為主，因此住商建築用電量占香港總用電量 90% 以上，溫室氣體排放量為 60%，依照香港氣候變遷之建築目標如**錯誤！找不到參照來源。**所示，香港透過三項政策倡議，結合各部門檢視溫室氣體排碳量的進度。從預測模型顯示，建築物的二氧化碳排放量可以從 2017 年 27.1 MtCO₂e 大幅下降到 2050 年 2.3MtCO₂e。由圖 2-10 可知，改變能源來源，以電力替代燃氣將減少 23.1 MtCO₂e 的排放量，提升建築效能則可減少 10.6MtCO₂e 的排放量。在供電來源達到脫碳之前，中短期內減少建築能源消耗至關重要。

表 2-7 香港建築對應氣候變遷的政策倡議

項目	建築(Buildings)		
政策倡議	施政報告	2015~2025+香港住商環境儲能計畫	香港綠建築委員倡議
發佈時間	2003, 2009, 2015	2015	2014
目標	從 2003 年開始政府機關需每五年減少總用電量 5%	政府機關新建之建築 5,000m ² 含中央空調或大於 10,000m ² 者需取得黃金級以上 BEAM 標準。	2030 年之總體用電量基於 2005 年(基礎年)需減少 30%
預期發展	2003 至 2008 年需降低 7% 2009 至 2014 年需降低 9% 2015 至 2020 年尚未公布 (環保局,2017)	尚未發佈	2019 年增加 12% (政府統計處, 2020d)

參考來源：(Jiang, Iu et al. 2020)

Figure 5-2 | Factors contributing to the decline in building-related CO₂ emissions, 2017-50

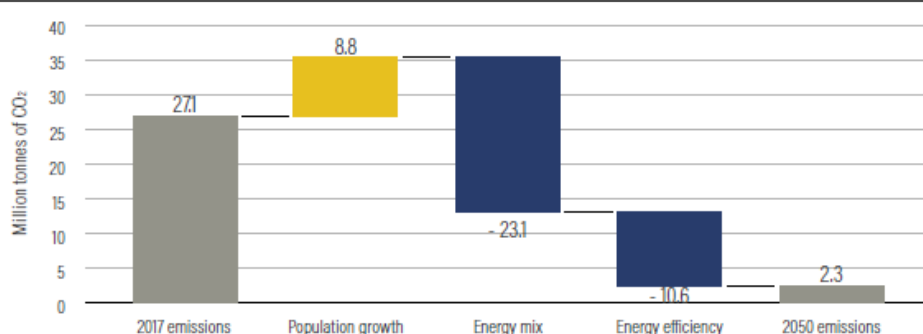


圖 2-10 2017 至 2050 年導致建築相關二氧化碳排放量下降變因

參考來源：(Jiang, Iu et al. 2020)

在 2017 年建築業部門能耗(Energy Use)為 179,350Tj，依當前政策情境下，2050 年能源總能耗量將增加至 21% (包含人均能源使用量增加 13%和人口增加產生額外 8%)。其中以商業建築占比最多，為 80%。若降情境改為脫碳情境，2050 年建築總能耗會相比 2017 年降低 20%左右，人均能源使用量下降 25%，而人口增長因此抵消。在建築能耗能下降的主因為空調冷卻系統下降 39%，如圖 2-11。

Figure 5-1 | Use of energy under the Current Policy Scenario and the Decarbonisation Scenario, by building type and component, 2017-50

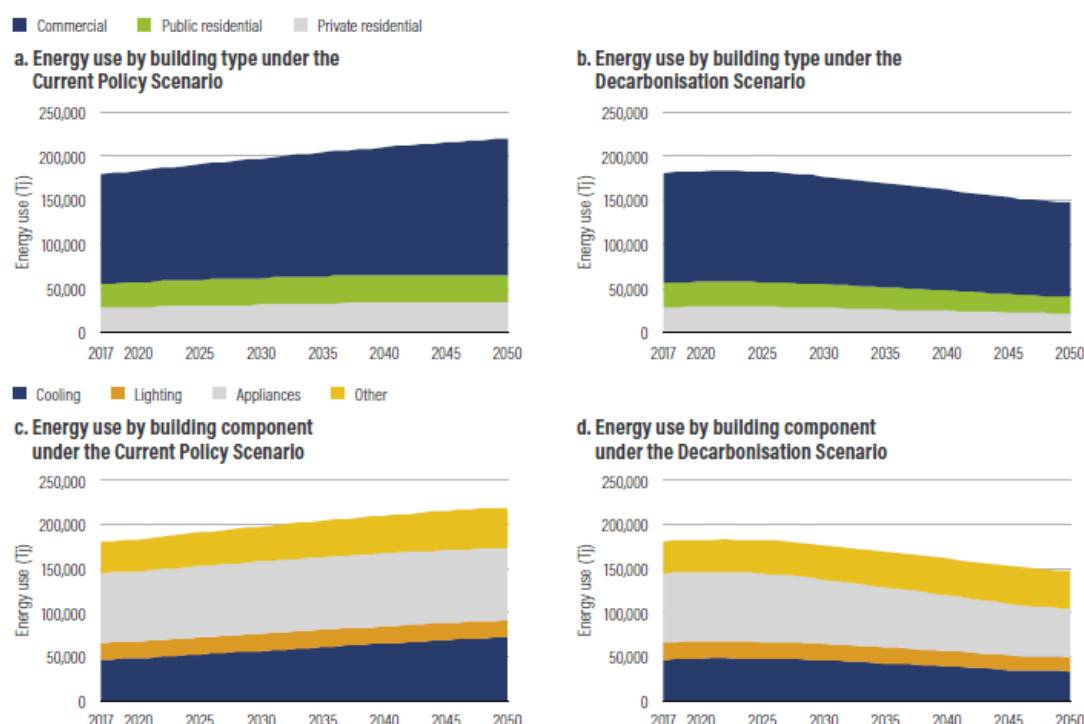


圖 2-11 2017 至 2050 年當前政策情景和脫碳情景下的建築類型和能耗因子

參考資料：(Jiang, Iu et al. 2020)

在電力尚未脫碳之前，政府針對建築部門的建築能效提出之四大策略如下：

1. 制定目標以持續追蹤相關機關的績效，並提高資料透明度。

香港政府於 2003 年公佈了第一個政府建築物的節能目標，並於 2019 年的施政報告中，制定綠色能源目標為 6%，以提高政府建設的能源效率。然而，香港並沒有針對整個建築行業或私人擁有的建築制定強制性節能目標。HKGBC 為所有建築物提出了一項名為 3030+ 的自願性減碳目標，其內容為至 2030 年之年耗電量需相較於 2005 年減少 30%。若以 2017 年的水準則至 2050 年建築能耗可以減少 20%。除了總體目標外，政府還納入其他既有的公共建築為節能對象，包括學校和醫院。鼓勵私有商業業主加入自願節能計劃以設定目標，如太古集團已設定了節能減碳目標。通過美國的 Better Buildings 等項目制定的能源績效目標可以鼓勵業主在 10 年內將其建築物的能源消耗降低 20%，但此自願性計劃並未在香港獲得顯著的成效。因此未來會建議逐步導入強制性的揭露年度節能績效報告，以改善資料公開性並提高透明度。

2. 逐步提高政策與節能法規之標準。

建築能源法規對能源消耗有重大的影響。香港的建築能源守則（Building Energy Code, BEC）每三年檢討一次、強制性的能源效益標示規範（Mandatory Energy Efficiency Labelling Scheme, MEELS）每五年檢討一次。商業建築或旅館的整體建築外殼熱性能指標(Overall Thermal Transfer Value, OTTV)和住宅外殼熱性能指標 (Residential Thermal Transfer Value, RTTV)等建築外殼節能指標，會

逐五年審視修訂一次，住宅建築和住宅娛樂設施將在 2020 年與 2030 年進行審查。依當前情境模擬，可預測 2050 年建築物的空調冷房效率可提高 40%，建築外殼能效提高 30%，照明系統能效提高 35%，電器能效提高 25%，其他設備能效提高 11%。而商業建築占香港建築用電量的 70%，因此提高其能源使用效率是相當重要地。通過對比相對於同類型建築物更實現卓越能源效率之辦公場域以提供獨立和專業認證，同時促進商業建築內租戶的能源效率。符合條件的建築將獲得能源績效證書和標章。

3. 增強能源稽查項目並修繕與維護設備效能

將原先每 10 年進行一次的商業建築能源審查要求改至每 5 年一次，更要求建築業主製作基於成本效益的能源效率審計建議。政府可以通過授權或目標設定逐步擴大建築類型的覆蓋範圍，包括公共建築、商業建築和能源系統，從而要求對低能源使用效率之建築進行更多節能改造。重新調整對既有設備能效之設定與調整，達到降低日常使用能耗與提高能源使用效率。此外持續地建築與設備維護可對節能產生更顯著的影響。採用節能設備和建築能源管理系統可大幅降低能源消耗。其中需考慮該建築物之使用壽命，以避免不必要的經濟負擔。

4. 改進需求管理和用戶行為

使用者的行為影響建築物的能源消耗及其碳足跡，如空調是建築物中最大的耗能來源。可要求商辦公司在夏季調整室內溫度保持在 24°C 至 26°C。行為改變需要藉由公共教育、能力培養、激勵措施、法規和文化影響。政府和工會需要教育和鼓勵更多的企業效仿。2015 年香港政府宣布將節能意識和節能文化作為其節能計劃的最高優先事項，推出了基準計劃以幫助住宅和非住宅用戶將他們的使用情況與同儕進行比較。並大規模推廣智慧電錶，促使香港轉型為智慧城市。最後透過設立「綠色建築基金」專案補助於能效改進之獎勵措施，並針對以商業建築為目標。目前已有超過 6,400 座建築物申請，估計可減少 126,000 噸二氧化碳排放量。

香港大多建築為既有建築其是室內的節能潛力仍有很大的空間。按香港行業劃分用電量可知目前商業建築消耗了 65% 的電力，其中包括政府和機構建築，如圖 2-12。政府發現既有的公共和商業建築群的用電量份額占香港總用電量約 20%，因此帶頭節能並致力發展綠色建築。目前政府大樓用電占政府用電約 54%。政府 2015 年制定公有建築物需要在 2020 年前達成總用電量減少 5% 的目標。並且從 2017 年開始提供經費給各部門實行節電改善工程或採購節能設備。此外，建築部門考慮將公立學校的節能潛力與實測數據監控系統結合，讓學生共同參與節能改善行動，以展示人們的行為對節能的影響。

最後著重於建築之內部設備能耗與民眾的使用習慣。首先減少空調能耗，在香港炎熱潮濕的氣候中空調耗電量約整體耗電量 30%。機電工程部門致力發展淡水冷卻塔(Fresh Water Cooling Towers, FWCT)與區域冷房系統(District Cooling Systems, DCS)。大多數既有的商業建築使用傳統氣冷式空調系統，應安裝水冷式空調系統更節能，預計能節省多達 20% 的電力。而區域冷房系統為中

央統一空調類型，相較傳統的氣冷式空調系統效率更高出 35%。先從新興都市開發區實施此區域冷房系統，為所有非住宅大樓提供更節能的空調服務。預計建成後每年可節約用電量 8500 萬千瓦 時。另外，建築內部的設備、電氣產品和系統與民眾使用習慣息息相關，推廣生活節能可對整體結果產生重大影響。最有效的監管手段之一是能源效率標籤計畫（Mandatory Energy Efficiency Labelling Scheme, MEELS），它主要提供電器的能源使用資訊，使民眾購買時能選擇更節能的產品，而政府負責繼續提高產品的能效標準並增加更多產品類別之能效標示。

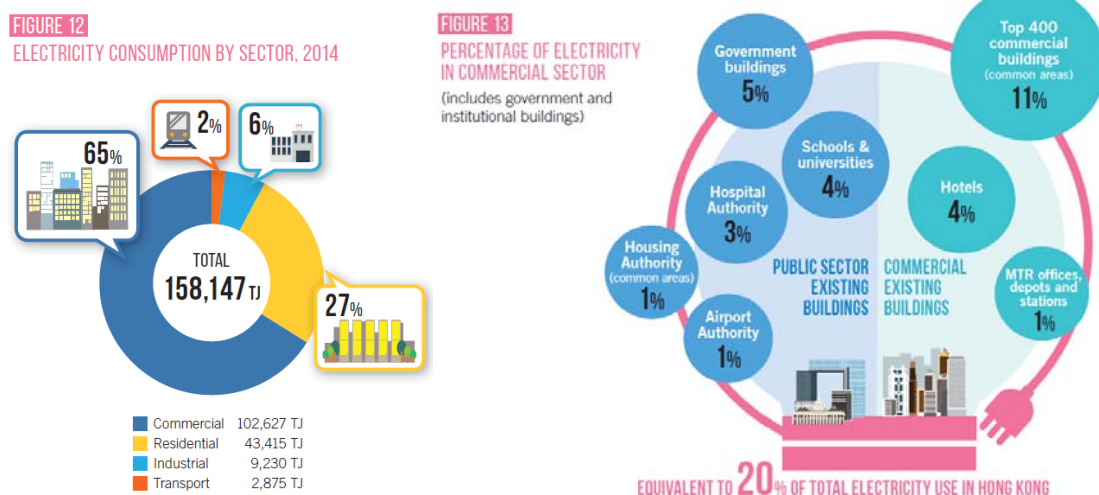


圖 2-12 劃分行業之用電量(左)與細分商業建築之用電內容(右)

(參考資料：(Environment Bureau of Hong Kong 2017))

第二節 國內有關住商部門溫室氣體排放預測之情況

為預測未來臺灣整體的能源供需情況，工研院綠能與環境研究所(郭瑾瑋, 周裕豐 et al. 2015)開發 TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) 模型，結合電力負載與供給面燃料別機組發電的季節性、每日及每小時間的特性，用以作為未來國家規劃發電結構以及政府政策擬定節能措施的依據。工研院採用的 TIMES 模型為以由下而上(Bottom-up)的能源推估方式，以能源技術為基礎，透過多項目之間彼此的投入產出關係，考量能源系統發展的可能與限制，在總能源系統成本最小化的目標下，滿足未來的能源服務需求 (Energy Service Demand, ESD)。圖 2-13 為工研院 TIMES 模型的能源供需架構圖，從最初的能源開採以及進口開始，經過煉油、發電等能源轉換程序，再經由電網的輸配送等程序給各部門的終端設備，以滿足最終的能源服務需求，每個過程背後皆有對應的資料庫以及模型支持。

圖 2-14 以輸入、輸出的方式呈現 TIMES 模型的電力系統架構。未來的電力供需可以藉由需求端外生的能源服務需求以及模型規劃的電力需求技術配比（如螢光等與省電燈泡）來計算所需的電力需求量，在供應端則以各燃料發電機

組特性以及資源供應限制等資料模擬滿足電力需求所需要的電源開發案、供電結構與供電量等。另外，除了能源的技術參數以外，模型中也包括經濟參數、環境參數等資料，用以計算整體能源系統所需的最小成本。TIMES 模型中的電力需求依照能源服務需求分為兩類，一類為需電量不因時段而有所差異，如冰箱等，另一類為因時段不同而有不同的占比的，如空調與照明等。

應用 TIMES 模型推估未來的電力負載主要可以分為下列步驟(郭瑾璋, 周裕豐 et al. 2015)：

1. 依據台灣未來的社經展望（人口、產業發展與經濟成長趨勢）等，利用計量模型與運輸規劃模型推估未來台灣各部門的能源服務需求。
2. 應用 TIMES 模型技術資料庫（包括製程、設備及運具的技術效率、可用率、成本等，及各能源服務需求的時段分類），並且搭配 GAMS 軟體求出滿足各部門需求的能源供給組合，以及未來台灣年平均電力消費量與時段別電力消費量基線。
3. TIMES 模型的技術資料庫中亦能模擬各部門的節能措施，藉此描述節能情境。
4. 可將能源服務需求轉為時段別電力消費負載量。

TIMES 能源工程模型中的部門主要可以分為三個：工業部門、住商部門以及運輸部門，如圖 2-15 所示，其中的住商部門的能源需求涵蓋包括烹調、熱水、空調、照明、冷凍、其他家電等能源服務需求項目，共計有 80 種技術項目，而在評估方面，則是採用 Eviews 軟體以指數迴歸方式進行評估，其中考量的變數包括人口成長率、人口結構、戶數、住宅樓地板面積、服務業 GDP、服務業主要場域的樓地板面積等，依照設備型態的不同而有不同的迴歸方程式。下面簡單呈現兩個 Eviews 在推估能源需求的過程中採用的迴歸方程式：

$$\text{服務業烹調需求} = -12.37 + 1.08 * \log(\text{住宿餐飲業 GDP})$$

$$\text{住宅烹調需求} = -37.71 + 2.39 * \log(\text{人口數})$$

TIMES 模型中的住商部門與本研究的關聯度較高，故在文獻回顧的部分特別將住商部門的模型拆解，以了解 TIMES 模型中是如何推估未來該部門的能源服務需求。TIMES 模型是透過 Bottom-up 的方式建構出住商部門的能源需求，以這些能源服務需求作為 TIMES 模型的外生變數，並且持續更新台灣最新的社經統計參數，以反映真實的能源耗用現況，如圖 2-16 所示，TIMES 模型中以社經因子（如：人口數、GDP、住宅戶數等）作為初級解釋變數，藉此影響次級解釋變數（如：住宅以及商業的樓地板面積），進而以迴歸分析的方式推估住商部門的能源需求。在終端能源使用的設備分類上，主要分為七類，下面以列表的方式呈現七種項目以及其分別的能源服務需求定義：

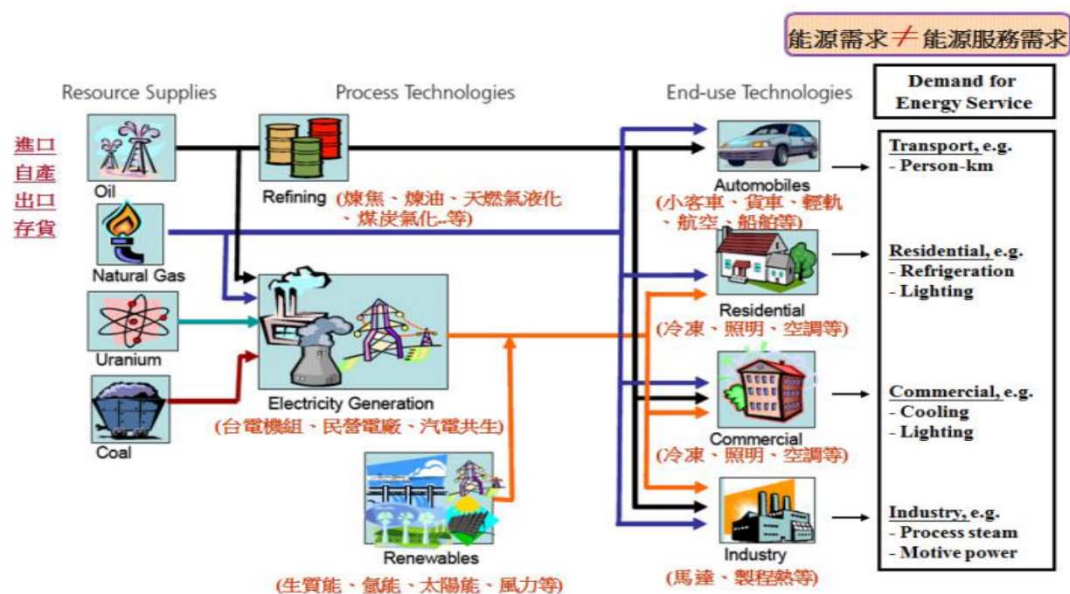


圖 2-13 工研院 TIMES 模型能源系統架構圖

(圖片來源：(郭瑾瑋, 周裕豐 et al. 2015))

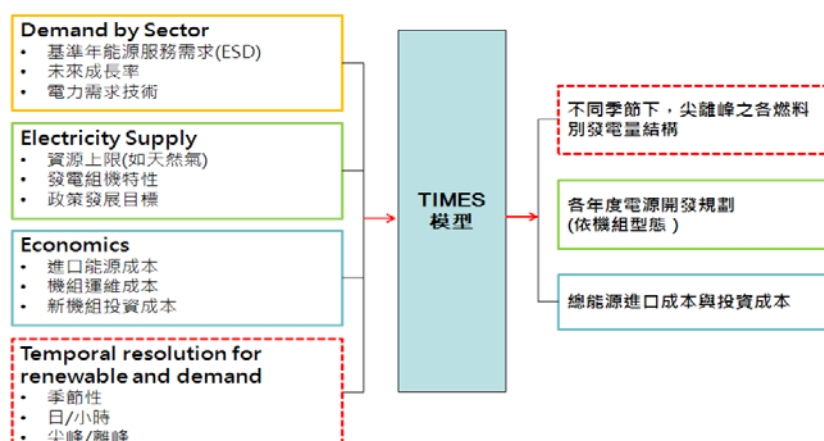


圖 2-14 TIMES 模型電力系統架構

(圖片來源：(郭瑾瑋, 周裕豐 et al. 2015))

在各個住商部門的能源服務需求中，分別有影響其需求的解釋變數，而有些解釋變數會受到社經影響，因此而有次級解釋變數以及初級解釋變數之別。表 2-8 以表格的方式呈現各個能源服務需求中對應到的次級解釋變數以及初級解釋變數的關係。

表 2-8 七種能源服務需求的推估方式中採用的次級解釋變數

項目	推估方式	次級解釋變數	初級解釋變數
1.空調	場域空調能源服務需求=場域樓板面積 x 冷房負荷 x 場域年使用時間 其中，冷房負荷採定值計算=450Kcal/h，場域年使用時間則根據場域使用目的以及季節因素等進行推算，樓地板面積為關鍵的影響因素	樓地板面積	1. 7~29歲人口數 2. 服務業 GDP 3. 人均所得 4. 戶數
2.照明	場域照明能源服務需求=樓板面積×照度需求×年使用時間	樓地板面積	1. 服務業 GDP 2. 就學人口數

	其中，照度需求參考國家標準（CNS12112），將照度需求界定於300~760 lx 之間，年使用時間則依照營業時間進行推算		3. 人均所得 4. 戶數
3.熱水	服務業熱水能源服務需求=f（大專院校住宿人數，老人安養機構住宿人數，醫療院所住院人次，觀光旅館住宿人次） 住宅熱水能源服務需求=f（我國人口中推計）	人次	1. 大專院校就學人口數 2. 65歲以上老年人口數 3. 服務業 GDP 4. 人均所得
4.烹調	服務業烹調能源服務需求=f（住宿餐飲業 GDP） 住宅烹調能源服務需求=f（人口數）	無	1. 服務業 GDP 2. 住宿餐飲業 GDP 3. 人口數
5.冰箱	冰箱冷藏需求=f（戶數） 以戶為推估基礎主要考量是一戶至少有一台電冰箱，只是這樣的方式較難預測因戶量不同造成的冰箱容量需求差異	無	戶數
6.其他用電器具	服務業其他插電設備能源需求=f（服務業 GDP） 住宅其他插電設備用電=f（戶數）	無	服務業 GDP 戶數
7.其他燃料設備	服務業其他燃料設備能源需求=f（服務業 GDP）	無	服務業 GDP

(資料來源：(郭瑾瑋, 溫珮伶 et al. 2017))

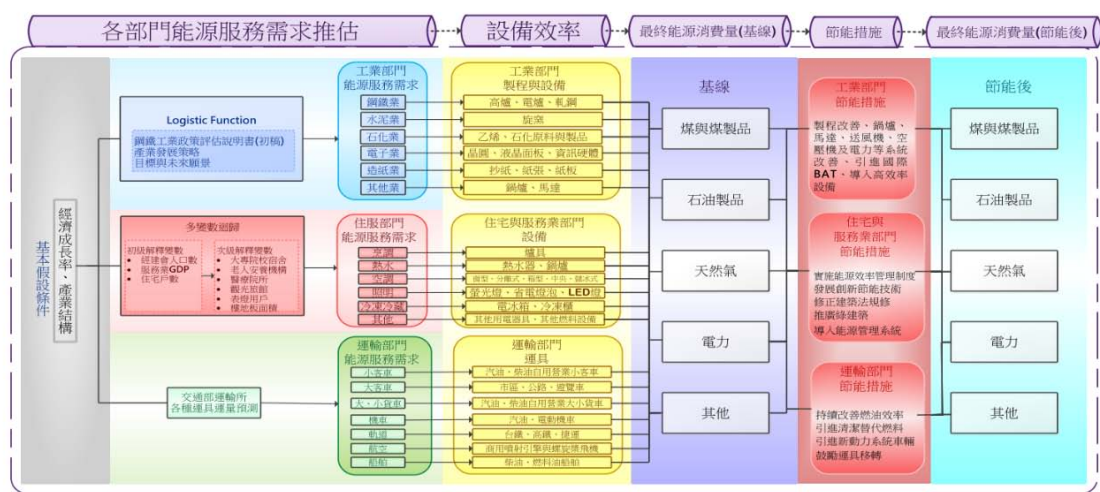


圖 2-15 TIMES 模型能源消費推估流程

(圖片來源：(郭瑾瑋, 周裕豐 et al. 2015))

表 2-9 住商部門能源服務需求定義與範疇

項目	能源服務需求定義	範疇
1. 空調	冷度需求 (kcal)	商業場所用之窗型、箱型、分離式冷氣機及中央空調 住宅用之窗型、箱型、分離式冷氣機及中央空調
2. 照明	照度需求	服務業場所用之照明 住宅場所用之照明
3. 熱水	熱水的熱能需求 (kcal)	服務業場所用之熱水 住宅場所用之熱水
4. 烹調	烹調用熱 (kcal)	服務業用之燃氣烹調需求 (天然氣及液化石油氣瓦斯爐) 住宅用之燃氣烹調需求 (天然氣及液化石油氣瓦斯爐)

5. 冰箱	冷藏需求 (公升)	住宅用冰箱
6. 其他用電器具	電力需求 (kWh)	影印機、傳真機、電腦等辦公設備電扶梯、升降梯等升降設備排風扇等通風設備
7. 其他燃料設備	能源需求 (kcal)	主要為住商部門中之公共行政業航空燃油及煤油需求

(資料來源：(郭瑾瑋, 溫珮伶 et al. 2017))

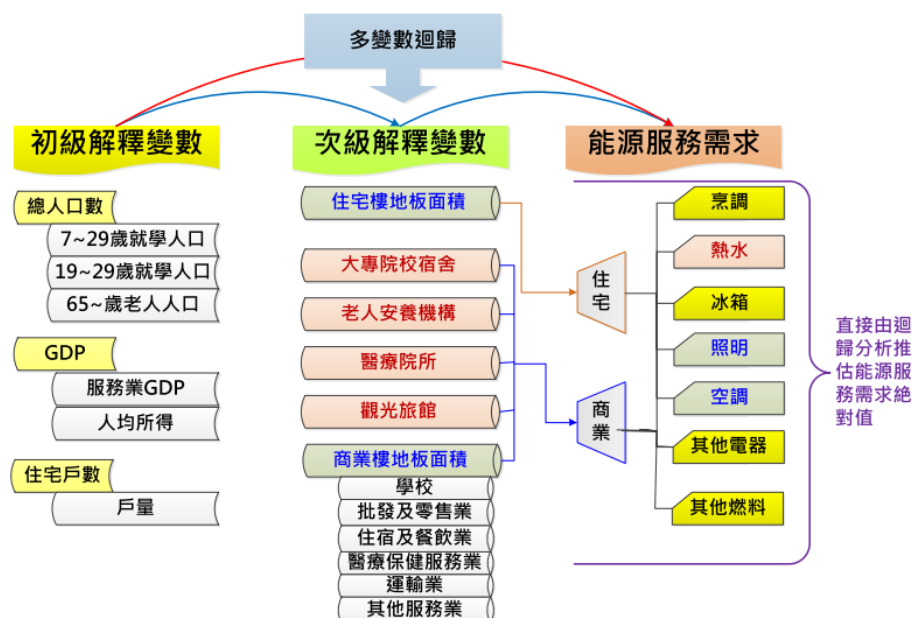


圖 2-16 臺灣 TIMES 模型中住商部門能源推估模型流程示意圖

(圖片來源：(郭瑾瑋, 溫珮伶 et al. 2017))

● 內政部建築研究所內有關住商部門溫室氣體排放預測之研究情況

而建研所內有關住商部門溫室氣體排放預測等一系列之相關研究始於2017年。而於2020年本團隊協助內政部建築研究所的一份研究報告(羅時麒, 黃國倉 et al. 2020), 建立了住宅與商業辦公建築的溫室氣體排放預測模型, 該計畫中針對我國住商部門溫室氣體排放量推估模式進行比較分析, 並基於未來氣象資料, 結合不確定性分析, 進行未來住宅與商業部門能源消費分析及預測, 建立溫室氣體排放基線(Business As Usual, BAU), 同時初步分析了應用於住宅的減碳途徑。此外, 該研究發現, 雖隨著我國能源結構轉型, 電力之二氧化碳排放係數下降, 但由於隨未來我國經濟GDP成長以及建築樓地板面積增加之趨勢下, 住商之溫室氣體排放近期雖呈現下降之趨勢, 但自2026以後加上氣候變遷之影響逐漸明顯, 整體溫室氣體之排放量將呈微幅上升。因此提出在我國能源結構不改變以及朝綠色能源發展等二種情境下, 我國住商部門至2035年時溫室氣體排放趨勢之逐年變化, 同時完成我國住商部門第二階段溫室氣體排放管制目標之建議, 以2035年排放住商之總量為52.0百萬公噸碳當量, 相當於對比於2005年時再降低9.5%為目標。

第三章 研究方法

本計畫延續去(109 年)年之研究，採用同樣以由下而上之建築能源推估法，導入蒙地卡羅方法(Monte-Carlo Method)中之拉丁超立方抽樣 LHS (Latin Hypercube Sampling)方法，以綜合考量各種現存建築之建築外殼熱性能、建築使用密度、運轉時程、設備效率等之不確定因素，透過大量建立之樣本以推估我國總體建築之樣本分佈，進而推估其未來全年建築能源使用量。所建立之建築能耗資料庫其優勢在於提供未來政策導入各種節能減碳策略時，可以進一步評估各種可能之減碳潛力，以優化適合於台灣本土較佳之減碳路徑。

第一節 研究流程

本計畫區分為二階段，第一階段建立各類建築之溫室氣體排放量推估模式；第二階段擬定可行之減碳路徑評估其減碳潛力。在第一階段建立全國總體住商溫室氣體排放量預測方面，本研究採用蒙地卡羅方法配合各種影響建築耗能之因子，以建立足以代表全國建築樣本特性之資料庫，同時透過整合未來氣候資料與基於大量之建築耗能模擬下，建構全國建築耗能資料庫。此方法之優點在於方便未來第二階段擬定節能減碳政策或調適路徑時，得以量化分析各項減碳對策潛在的減碳潛力。

3.1.1 空調能源推估用氣象資料

空調耗能主要受到當地氣候條件影響，因此必須依地理氣候區分區討論，本研究將台灣分為北、中、南三區討論，並分別以台北、台中、高雄之氣象條件分別代表台灣北、中、南三大氣候區進行模擬。在已發生的歷史年份中，採用各區域實際之歷史氣象資料進行模擬，各區之歷史氣象資料取自中央氣象局之局屬一級測站，分別製作真實氣象年 AMY (Actual Meteorological Year)。這些歷年真實發生之氣象資料是為了作為本計畫所開發之建築能源推估模型與真實之建築能源耗用統計值比對驗證用途，藉以修正能源預測模型，以更精確預測未來之建築能耗已換算未來的碳排放量。

此外，為了推估在未來氣候變遷影響下空調耗能量之變化，需要以未來氣候作為建築耗能之模擬。首先需製作台北、台中與高雄之未來氣候資料。國際上有關未來氣候之推估，常依聯合國氣候變遷委員會(IPCC)所公告之各國大氣環流模式 GCM (General Circulation Model)為依據，依當地氣候進行空間與時間之降尺度後以產製的逐時之未來氣象年做模擬。此部分，本計畫採用團隊過去所曾建立未來氣候之逐時氣象資料(Huang and Hwang 2016)，此資料是依 CanESM 大氣環流模式透過型態轉換法(Morphing method)配合台灣當地之平均氣象年(TMY3)(何明錦 and 黃國倉 2013)降尺度而得台北、台中及高雄自 2000 至 2100 年間各年逐時之氣候變化資料，在未來氣候變遷的情境選擇上，由於 RCP4.5 與 RCP6.0

兩種情境的相似性高，因此本研究選定 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三種氣候變遷情境分別作為低、中、高三種情境。此外，為確保未來氣候資料之可靠度。

3.1.2 各項能源之溫室氣體排放係數

由於建築內使用之能源種類除電力外，尚有烹飪與熱水供應使用之瓦斯、天然氣以及自來水用水等不同之能源使用型態。本研究參考經濟部能源局、行政院環保署以及自來水公司等之公告資料，以各種能源之溫室氣體排放係數(如下表 3-1)，藉以將各種能源使用型態統一換算為二氧化碳排放當量表示。此類排放係數之公告數值，如為逐年公告者，則依實際值計算總體排探量。

表 3-1 各項能源之排放係數

年	電力排 碳係數 (β_1)	液化石油氣排放 係數 ($\text{kgCO}_2\text{e/度}$) (β_2)	天然氣排放 係數 ($\text{kgCO}_2\text{e/度}$) (β_3)	自來水排放係數 ($\text{kgCO}_2\text{e/度}$) (β_4)	
				臺北自來 水事業處	台灣自來水股 份有限公司
2005	0.555	1.7529 (行政院環境保 護署 2019)	1.8790 (行政院環境 保護署 2019)	0.0633	--
2006	0.562				--
2007	0.558				--
2008	0.555				--
2009	0.543				0.167
2010	0.534				0.169
2011	0.534				0.167
2012	0.529				0.164
2013	0.519				0.156
2014	0.518				0.155
2015	0.525				0.154
2016	0.530				0.152
2017	0.554				0.162
2018	0.533				0.160
2019	0.509				0.150

(資料來源：(經濟部能源局 2019)、(行政院環境保護署 2019)、(臺北自來水事業處)、(台灣自來水全球資訊網))

第二節 住宅部門溫室氣體推估理論

住宅能源需求項目可區分為空調、照明、家電、熱水、烹飪等五大類別，而能源使用型態以電力與瓦斯二者為主要。在未來溫室氣體排放量推估上，在無進一步節能措施介入下之未來耗能情況稱為耗能基線(Business as usual, BAU)，此一耗能基線受到人口變化、經濟情況、氣候變遷等而逐年而異，因此住商溫室氣體排放之推估首要需先推估在未來社會經濟條件以及氣候變遷影響下，耗能基線之變化趨勢，以作為任何溫室氣體減量措施或政策之不可控因素，其次再評估在推行不同節能策略與調適路徑下其可能之溫室氣體減碳效益。整個住宅部門溫

室氣體排放基線(BAU)之推估流程如圖 3-3 至圖 3-4 所示。其中，全國戶數、氣候、台灣各地區之戶均人口數、人均 GDP 以及外來逐年之溫室氣體排放係數等會隨時間而變化，應此有必要以逐年滾動檢討之方式進行推估，以逐年修正之方式更能接近於真實之情況。以下各節分述住宅各耗能項目之耗能 BAU 推估模式。

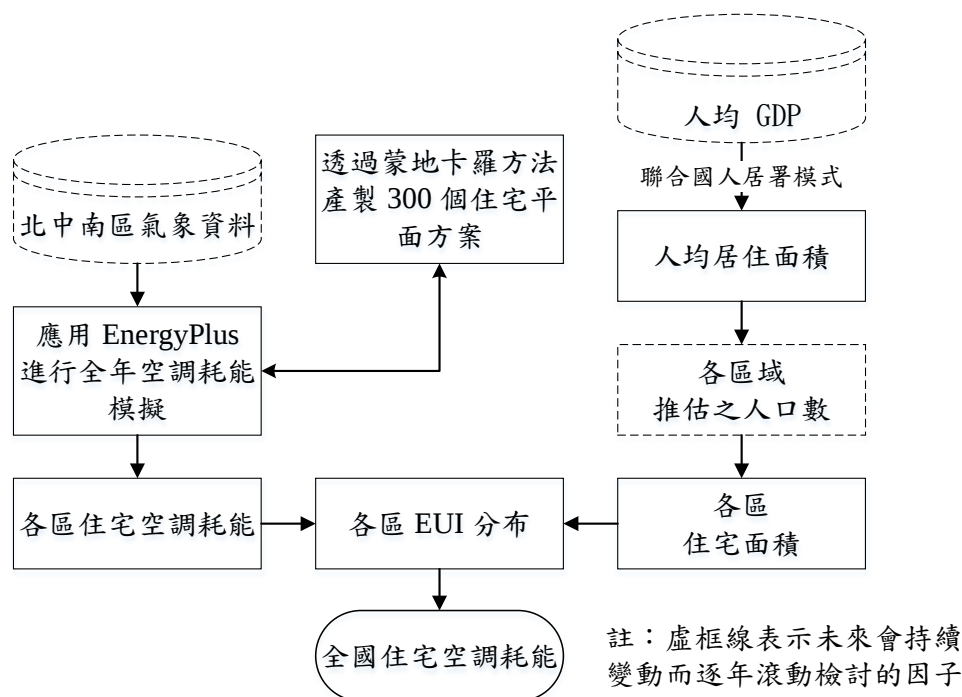


圖 3-1 全國住宅空調耗能推估模型

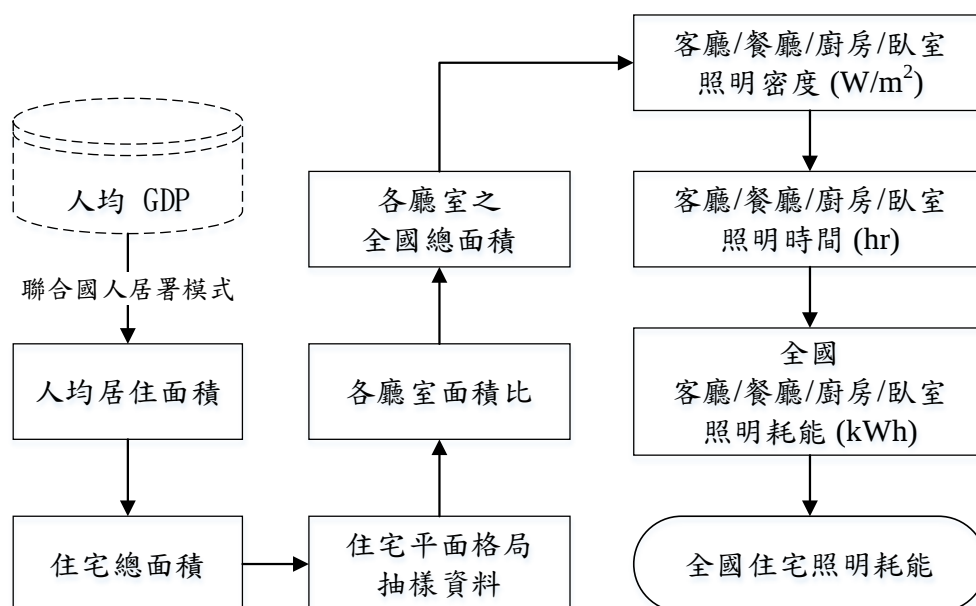
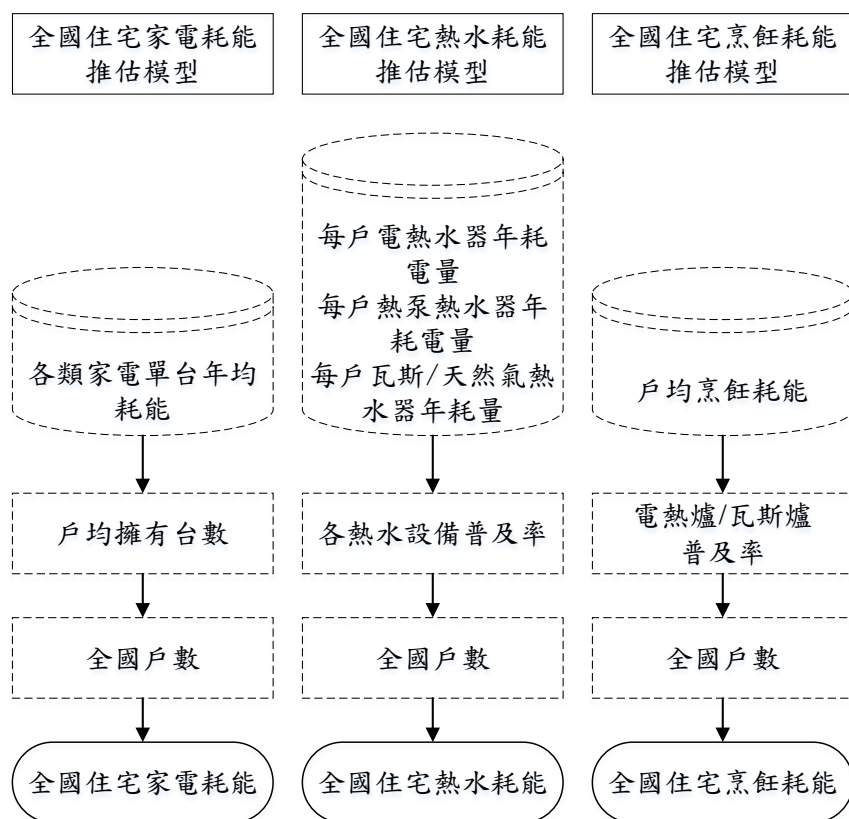
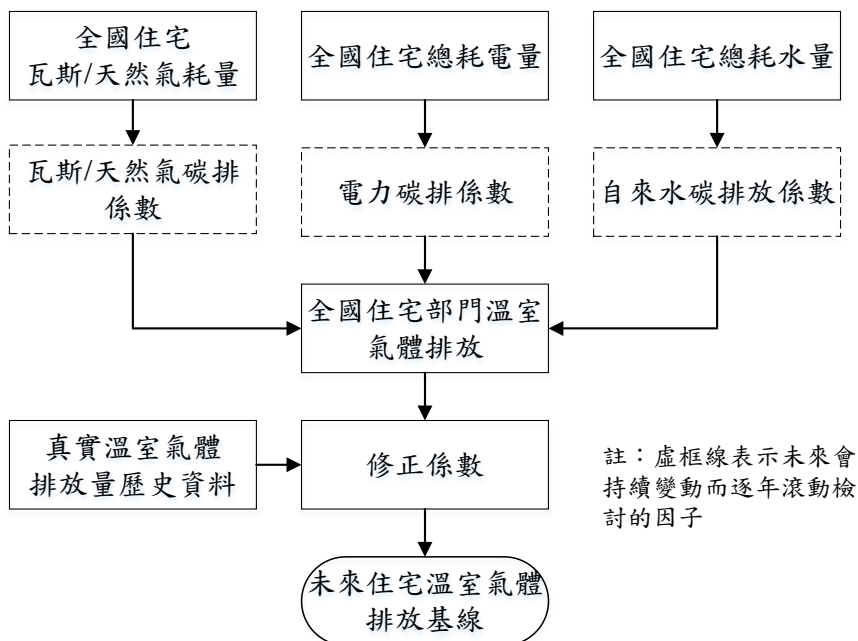


圖 3-2 全國住宅照明耗能推估模型



註：虛框線表示未來會持續變動而逐年滾動檢討的因子

圖 3-3 住宅家電、熱水與烹飪耗能推估模型



註：虛框線表示未來會持續變動而逐年滾動檢討的因子

圖 3-4 全國住宅部門二氧化碳排放計算與修正流程圖

● 住宅耗能基線之推估

3.2.1 住宅空調耗能推估

影響住宅空調耗能的因素複雜，包含建築外殼、氣候、空調系統、室內發散熱等等，由於住宅建築在類型上與熱學性質上的多樣性，使得模擬過程存在著高度的不確定性，因此本研究參考所內過去之研究(羅時麒，黃瑞隆 et al. 2017)，透過全域的模擬方法-蒙地卡羅法中之拉丁超立方取樣法，設計 300 個住宅案例進行市場上可能之案例分布模擬。蒙地卡羅法為一種隨機分布的模擬方法，透過大量的案例來掌握實際的情況，而各個參數之範圍則參考過去的經驗及文獻設定。其步驟如下：

(一) 住宅建築外殼與室內發散熱參數設定

由於空調受到氣候、建築外殼及設備影響，為了涵蓋國內大部分的住宅建築性質，空調耗能採用較保守的蒙地卡羅法設計 300 個案例，並以國內常見的住宅平面圖作為基準，如圖 3-5，其中 L 代表客餐廳等公共空間，B 代表臥室，相關參數設定如表 3-2 所示：

表 3-2 住宅建築外殼與室內發散熱參數設定

變因	最小值	最大值	備註
每戶樓地板面積分配	92.56		m ²
窗牆比 (WWR)	0.1	0.6	-
玻璃熱傳透率 (U 值)	1.5	6.0	W/m ² -K
玻璃日射透過率 (SHGC)	0.20	0.85	-
外遮陽深度比	0	2.0	格子遮陽
外牆熱傳透率 (U 值)	0.5	3.5	W/m ² -K
建築方位	八方位等機率模擬		
每戶人員數	4		人
客餐廳燈光密度	12.0		W/m ²
客餐廳設備密度	10.8		W/m ²
臥室燈光密度	9.6		W/m ²
臥室設備密度	4.8		W/m ²

(資料來源：(羅時麒，黃瑞隆 et al. 2017))

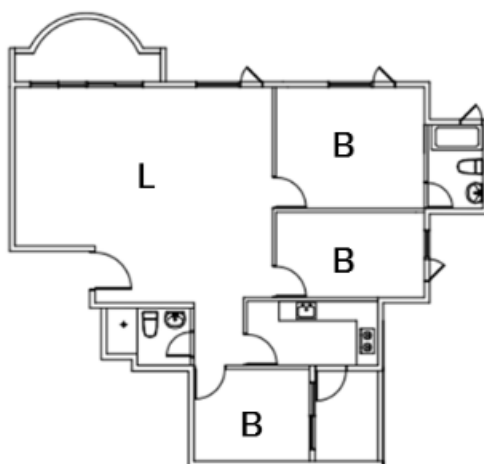


圖 3-5 住宅平面配置圖

(資料來源：(羅時麒, 黃瑞隆 et al. 2017))

(三) 空調運轉模式

台灣住宅多以小型分離式冷氣為主，運轉模式為當室內過熱時才啟動空調運轉，否則平時多以自然通風為主，是否開啟空調視室內有無過熱而定，為了判斷住宅空調的啟閉時間，本研究採用ASHRAE Standard 55所提出的熱適應舒適模型作為評斷標準，當室內操作溫度超過該模型 80% 的熱舒適上限時則開啟空調，該模型的最佳室內操作溫度(T_{oc})為外氣均溫(T_{om})的函數，如式 3-1 所示，而 80%的舒適範圍上界為 $T_{oc}+3.5^{\circ}\text{C}$ 。

$$T_{oc} = 0.31 \times T_{om} + 17.8 \quad \text{式 3-1}$$

(四) 住宅空調耗能計算

住宅空調耗能採用EnergyPlus模擬，將 300 個住宅案例與北、中、南三區之氣象條件輸入至EnergyPlus後將會計算出每個住宅案例在不同的氣象條件下全年的空調耗能，將全年的空調耗能除以空調面積即求得空調的能源使用密度(Energy Use Intensity, EUI)，繪製 300 個案例的EUI分布，作為該氣候條件下之住宅空調EUI表現，再將此分布乘上住宅面積即可求得住宅空調耗能，計算公式如下

$$E_{\text{res,HVAC,yr}} = \sum_{\text{region}} (EUI_{\text{res,region,HVAC,yr}} \times A_{\text{res,region,yr}}) \quad \text{式 3-2}$$

$$E_{\text{res,HVAC,yr}} = \sum_{\text{region}} (EUI_{\text{res,region,HVAC,yr}} \times A_{\text{res,region,yr}}) \quad \text{式 3-2}$$

其中， $E_{\text{res,HVAC}}$ 代表住宅空調耗能， $EUI_{\text{res,HVAC}}$ 代表住宅空調EUI（由分布中取值）， A_{res} 代表住宅面積，下標res代表住宅部門，下標region代表北、中、南三種不同之區域，下標yr代表某一年份。

(五) 住宅樓地板面積變遷之推估法

住宅樓地板面積可由民國 89、99 年普查得知全國各縣市的人均居住面積，如表 3-3，再根據各縣市歷年人口估算該縣市的住宅面積，各縣市歷年人口資料取自內政部戶政司的人口統計資料庫(內政部戶政司全球資訊網)。

由於人均居住面積為每十年調查一次，因此在未調查的年份之間，採用線性內插的方式將每一年各縣市的人均居住面積計算出來，而民國 99 年之後的年份由於尚未取得民國 109 年的資料，因此取民國 99 年的調查結果作為每年的人均居住面積值，各縣市住宅面積計算公式如各區域住宅面積 $_{yr}$ (分北、中、南區， m^2)=各區域人均居住面積 $_{yr}(\text{m}^2/\text{人}) \times$ 各區域人口 $P_{\text{zone, yr}}$ (人) 式 3-3。

$$\text{各區域住宅面積}_{yr}(\text{分北、中、南區, m}^2) = \text{各區域人均居住面積}_{yr}(\text{m}^2/\text{人}) \times \text{各區域人口 } P_{\text{zone, yr}}(\text{人}) \quad \text{式 3-3}$$

表 3-3 各縣市人均居住面積

單位： $\text{m}^2/\text{人}$

氣候分區	縣市	民國 79 年	民國 89 年	民國 99 年
北區	臺北市	24.8	26.1	27.9
	新北市	22.7	26.8	27.1

	基隆市	20.1	27.9	30.0
	新竹市	26.0	37.6	35.2
	桃園市	26.2	36.1	35.3
	新竹縣	26.8	35.3	37.2
	宜蘭縣	23.8	35.2	38.6
	苗栗縣	26.1	37.4	39.1
	金門縣	29.0	44.7	36.8
	連江縣	19.6	28.6	32.9
中區	臺中市	25.9	34.9	35.7
	彰化縣	22.0	32.1	33.5
	南投縣	25.2	34.9	37.0
	雲林縣	22.0	28.3	35.5
	花蓮縣	23.7	32.1	36.7
南區	高雄市	24.3	32.2	34.5
	臺南市	24.1	36.4	37.1
	嘉義市	22.6	31.1	35.3
	嘉義縣	21.5	28.8	34.4
	屏東縣	23.6	32.7	36.6
	澎湖縣	21.4	36.6	35.9
	臺東縣	21.6	34.5	35.8
全國平均		24.1	31.7	33.2

(資料來源：(行政院主計總處 2010))

住宅面積影響空調耗能，因此在推估未來空調耗能時也須考慮住宅面積的變化，由於無法精確掌握未來全國住宅樓地板面積之變化，因此在未來住宅面積推估上擬採用聯合國人居署全球城市指標數據庫和歐洲統計局城市審計歐洲統計數據庫所統計的模式推估住宅面積成長率，此模式描述了全球人均居住面積與人均GDP之間的關係，如圖 3-6。式 3-4 為人均GDP與人均居住面積的關係式，可由表 3-4 中的未來人均GDP 代入 式 3-4 得到未來的人均居住面積，搭配表 3-5 進一步推求未來逐年的住宅面積及成長率(ζ)，再利用成長率與各區域住宅面積 yr (分北、中、南區， m^2)= $\text{各區域人均居住面積}yr(m^2/\text{人}) \times \text{各區域人口 } P_{\text{zone}, yr}(\text{人})$ 式 3-3 求得的住宅面積推估未來全國各縣市的住宅面積 FA 。

$$y_{yr} = 6.33 \ln(x_{yr}) - 28.95 \quad \text{式 3-4}$$

$$\text{未來各區域住宅面積}(FA_{yr, zone}) = FA_{yr-1, zone} \times \zeta_{yr, zone} \quad \text{式 3-5}$$

$$\zeta_{yr, zone} = (y_{yr} \times P_{yr, zone} / y_{yr-1} \times P_{yr-1, zone}) \quad \text{式 3-6}$$

其中 y 代表人均居住面積； x 代表人均 GDP (參考表 3-4 中華民國統計資訊網中我國未來 GDP 成長推估)； yr 為未來某一年份； ζ 代表住宅樓地板面積之成長率。

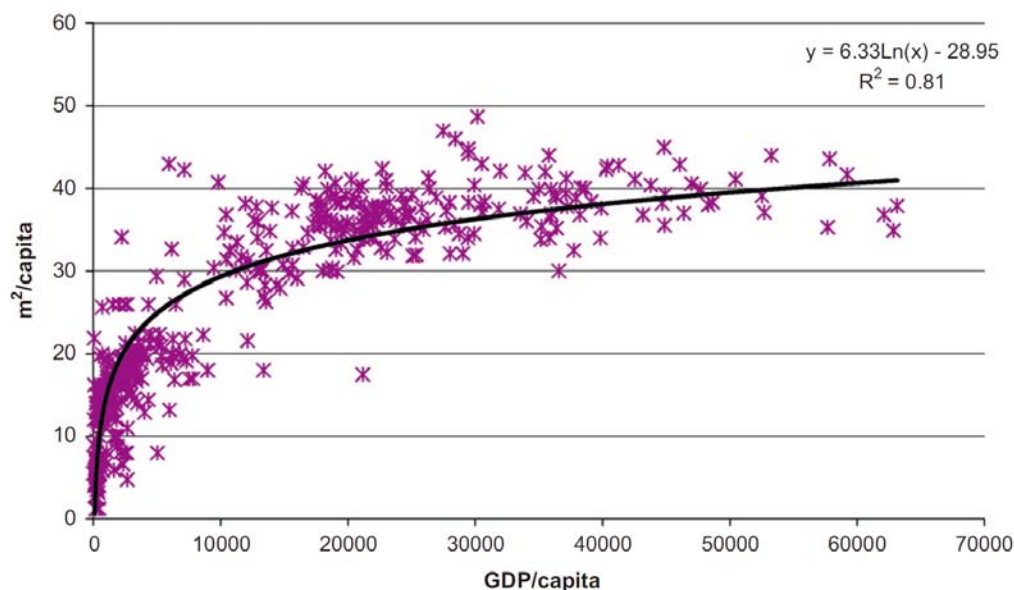


圖 3-6 人均居住面積與人均 GDP 之關係

(資料來源：(Isaac and Van Vuuren 2009))

而在使用聯合國人居署的模式之前，為了確保世界的趨勢與國內的趨勢相近，因次將民國 79 年、89 年與 99 年的全國人均居住面積(行政院主計總處 2010)和人均 GDP (中華民國統計資訊網) 的真實資料與聯合國人居署的模式做比較，比較結果顯示，除了民國 79 年的人均居住面積低於全球趨勢外，民國 89 年與 99 年的人均居住面積皆與世界趨勢相近，如圖 3-7，而由於本研究的推估起始點為民國 89 年 (西元 2000 年)，因此民國 79 年的資料將會被捨棄，並採用符合國內近況的聯合國人居署模式推估未來每一年的住宅面積及成長率。

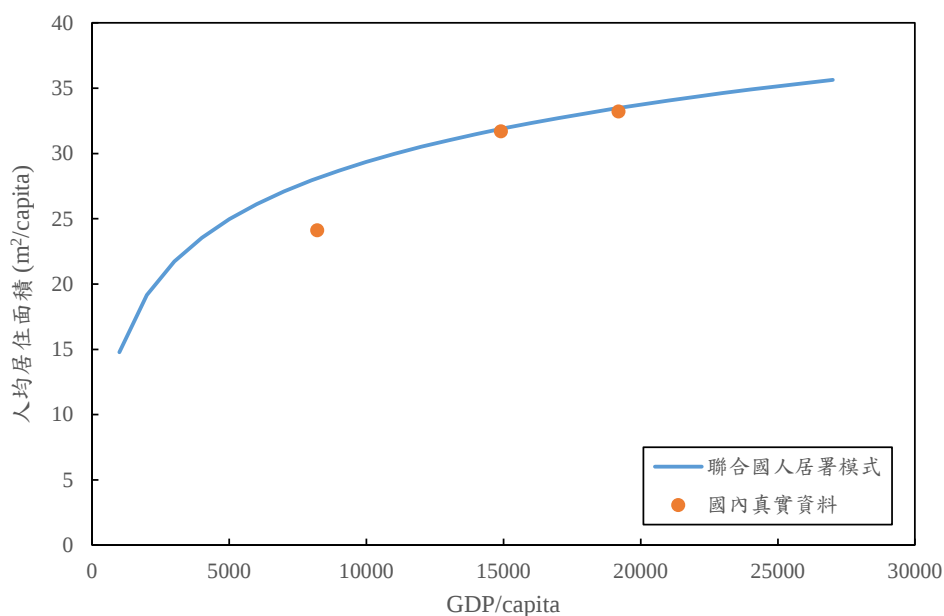


圖 3-7 全球與國內人均居住面積之比較

(資料來源：(中華民國統計資訊網，Isaac and Van Vuuren 2009，行政院主計總處 2010))

表 3-4 我國未來 GDP 成長推估

年	(1) GDP 成長率 (%)	(2) GDP (百萬美元) (2) _{yr} =(2) _{yr-1} ×[1+(1)]	(3)人均GDP (美元/人)* (3)=(2)/總人口
2021	2.50	641573	27169
2022	2.60	658254	27876
2023	2.60	675369	28606
2024	2.70	693604	29391
2025	2.70	712331	30203
2026	2.60	730852	31013
2027	2.50	749123	31821
2028	2.50	767851	32659
2029	2.50	787047	33531
2030	2.50	806723	34437
2031	2.40	826085	35348
2032	2.40	845911	36294
2033	2.30	865367	37246
2034	2.30	885270	38237
2035	2.30	905631	39275

*人均GDP以未來人口中推估計算

(資料來源：(中華民國統計資訊網，陳政弘 2018))

表 3-5 未來逐年年末人口數推估值 (單位：千人)

年	高推估	中推估	低推估
2020	23,620	23,610	23,599
2021	23,638	23,614	23,594
2022	23,660	23,614	23,580
2023	23,680	23,609	23,559
2024	23,695	23,599	23,530
2025	23,706	23,585	23,493
2026	23,713	23,566	23,449
2027	23,715	23,542	23,398
2028	23,711	23,511	23,338
2029	23,700	23,472	23,270
2030	23,682	23,426	23,193
2031	23,656	23,370	23,107
2032	23,621	23,307	23,012
2033	23,577	23,234	22,907
2034	23,525	23,152	22,793
2035	23,463	23,059	22,669

(資料來源：(國家發展委員會 2018))

由於國家發展委員會之未來人均 GDP 只有推估至 2035 年，因此更長遠的中推估之未來人均 GDP 利用線性的方式推估至 2050 年，如圖 3-8。

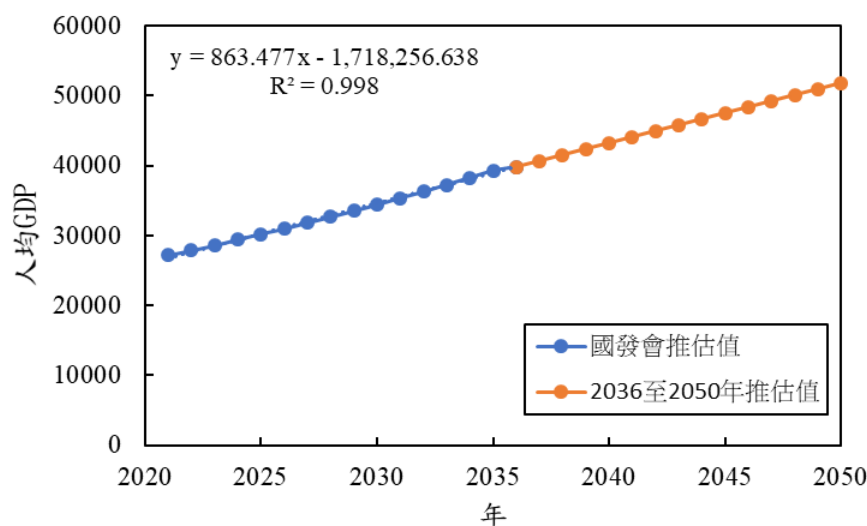


圖 3-8 2021 至 2050 年人均 GDP 趨勢圖

(資料來源：本研究整理，(國家發展委員會 2018))

表 3-6 2036 至 2050 年之人均 GDP 線性中推估

年	人均 GDP (美元)	年	人均 GDP (美元)	年	人均 GDP(美元)
2036	39,790	2041	44,106	2046	48,422
2037	40,653	2042	44,969	2047	49,286
2038	41,516	2043	45,833	2048	50,149
2039	42,380	2044	46,696	2049	51,012
2040	43,243	2045	47,559	2050	51,875

(資料來源：本研究整理)

(六) 2036 至 2050 年住宅空調耗能之推估法

由於模擬僅討論至 2035 年，因此更長遠情境需用其他方式推估。本研究使用北、中、南的總冷房度時(CDH)於 23° C 以下時間與該年氣候變遷之中情境(RCP4.5)的空調耗能密度取散佈圖並找出趨勢線，如下圖 3-9。

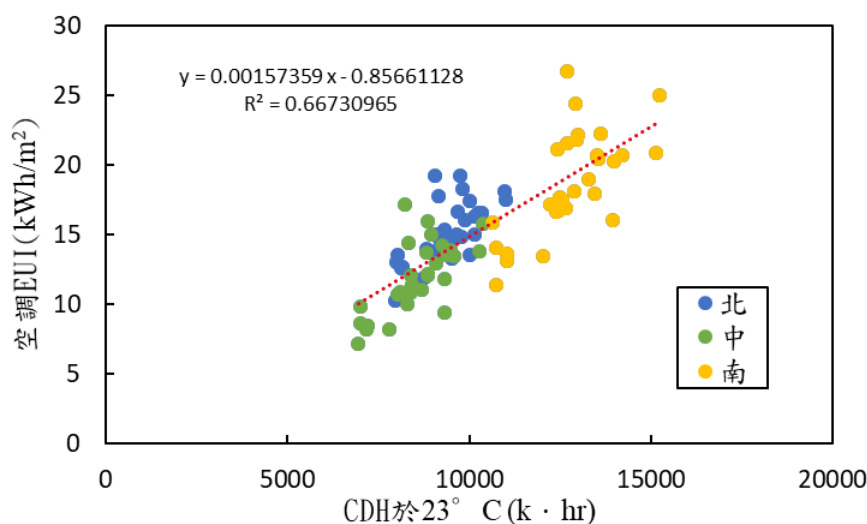


圖 3-9 北中南冷房度時與鮮對應的空調 EUI 散佈圖

(資料來源：本研究整理)

利用該線性趨勢線與未來 2036 至 2050 年已知的各區總冷房度時 23°C 以下時間推估出未來各地區之空調耗能密度，如表 3-7。

表 3-7 2036 至 2050 年中情境空調耗能密度推估

年	北部(kWh/m ²)	中部(kWh/m ²)	南部(kWh/m ²)
2036	16.04	14.85	21.43
2037	15.94	14.66	21.30
2038	17.90	17.06	24.66
2039	17.22	16.57	24.88
2040	15.87	14.78	22.20
2041	16.79	16.02	23.89
2042	16.57	15.54	23.66
2043	15.35	14.02	21.45
2044	16.50	15.46	23.50
2045	15.88	14.84	22.45
2046	15.44	14.40	22.00
2047	15.89	14.72	22.46
2048	16.88	15.63	22.80
2049	16.10	15.15	23.28
2050	15.92	14.98	22.86

(資料來源：本研究整理)

3.2.2 住宅照明耗能推估

一般照明耗能受到氣候的影響較小。因此僅須考慮住宅中各個空間所需的照明密度、空間面積以及全年的使用時數，即可計算出全年照明耗能，照明耗能計算公式如下 式 3-7。

$$E_{\text{res,light}} = \sum_i (A_{\text{res},i} \times I_{\text{res,light},i} \times t_{\text{res,light},i} \times 365) \quad \text{式 3-7}$$

其中， i 下標代表住宅中不同廳室空間， A 為面積， $I_{\text{res,light}}$ 為住宅照明密度， $t_{\text{res,light}}$ 為每日照明時間，各空間之照明密度及時間設定如下表 3-8。

表 3-8 各空間照明密度及時間

空間	住宅照明密度 $I_{\text{res,light},i}$ (W/m^2)	平均每日照明使用時間 $t_{\text{res,light},i}$ (hr)
客廳	11.30	6.0
餐廳	7.50	2.5
廚房	7.50	2.5
臥室	8.36	4.0
衛浴	7.97	1.5
陽台	5.93	0.5

資料來源：(郭柏巖 2005)

各廳室面積 $A_{\text{res},i}$ 則由全國住宅總面積乘上各廳室空間之比例，各空間之面積比例則參考內政部營建署於民國 95 年所做的調查研究報告，報告中統計了不同平面配置的住宅數量，如表 3-9，本研究參考市面常見的住宅平面圖平均計算各廳室之面積比，如表 3-10，利用 式 3-8 即可概略求得各廳室之全國總面積。

$$A_{\text{res},i} = A_{\text{res}} \times \sum_j (R_{A_j} \times R_{A_{i,j}}) \quad \text{式 3-8}$$

其中， A 代表面積，下標 i 代表不同廳室，下標 j 代表不同的格局， R_{A_j} 為格局 j 之比例， $R_{A_{i,j}}$ 代表在格局 j 之下廳室 i 之面積比例

表 3-9 住宅平面格局抽樣調查資料

平面格局	宅數 (戶)	比例 R_{A_j}
兩房以下	1,203,262	19%
三房	2,860,518	45%
四房以上	2,315,056	36%

(資料來源：(內政部營建署 2006))

表 3-10 不同格局對應之廳室面積比例 $R_{A_{i,j}}$

廳室\格局	兩房以下	三房	四房以上
客廳	17%	26%	27%
餐廳	16%	12%	11%
廚房	10%	8%	9%
臥室	36%	35%	38%
衛浴	7%	9%	7%
陽台	14%	10%	8%

(資料來源：本研究整理)

在未來照明基線耗能(BAU_{lighting})之推估上，假設未來國民生活水準大致變動不大之前提下，全年照明使用時間應大致不變。而未來人口消長導致的住宅樓地板面積之增加或減少是影響照明耗能之因子之一。其變動的因子為未來之樓地板面積成長率，其推估則依照上一節的方式，參考主計總處之人均居住面積、人均GDP、國發會之人口推估及聯合國人居署之研究計算。

3.2.3 住宅家電耗能推估

為了避免重複計算，此節的家電項目須扣除冷氣、照明設備、熱水器等項目，並以「戶」為單位推估，由於每戶住宅所擁有的電器種類及台數不盡相同，因此需考慮「家電戶均台數」的問題，家電戶均台數定義為「每戶平均所擁有的各種電器設備數量」。住宅家電耗能計算公式如下式 3-9：

$$\text{過去家電耗能 } E_{\text{res,app,yr}} = \sum_k (\text{家電}_k \text{ 全年耗能} \times \text{戶均擁有家電}_k \text{ 台數} \times \text{戶數}_{\text{yr}}) \quad \text{式 3-9}$$

其中， $E_{\text{res,app}}$ 為住宅家電耗能，下標 k 代表不同種類の家電設備；各種家電年均耗能則參考下表 3-11，戶均擁有台數參考下表 3-12。

表 3-11 單台家電全年耗能（單位：kWh）

家電設備	2014 單台年耗量	2015 單台年耗量	2016 單台年耗量
電扇	78	75	73
電視	281	326	303
電腦	65	62	63
洗衣機	41	41	43
除濕機	50	74	86
電冰箱	403	401	396

（資料來源：(林素琴 and 林志勳 2017)）

表 3-12 戶均擁有家電台數

家電設備種類	(1) 每百戶擁有台數 (台)	(2) 戶均擁有台數 (2)=(1)/100
電扇	353.4	3.53
電視	183.1	1.83
電腦	77.8	0.78
洗衣機	107.2	1.07
除濕機	46.6	0.47
電冰箱	129.7	1.30
洗/烘碗機	54.7	0.55

（資料來源：(梁世武 2019)）

未來隨著人口增加、戶數成長，購買之家電亦會日益增加，且隨著人均GDP的上升，國民購買之家電數量也會跟著成長，將導致家電設備之耗能隨之上升。在未來住宅家電設備基線耗能(BAU_{equip})之推估上，假定未來家電設備之能源效率技術維持 2018 年的水準之一般情境下，未來家用電器耗能每年以 1.6 %之速率成長(梁世武 2019)，計算未來某一年份之家電設備耗能量如下式 3-10：

$$E_{\text{res,app,yr}} = \sum_k (\text{家電}_k \text{ 年均耗能} \times \text{戶均擁有家電}_k \text{ 的台數}) \times \text{戶數}_{\text{yr}} \times (1.016)^{\text{yr}-2018} \quad \text{式 3-10}$$

其中 yr 代表未來某一年， $\text{yr} \geq 2018$ ，而戶數 yr 之推估則如下說明。

住宅用戶之未來戶數推估步驟參考台電調查報告(梁世武 2019)之方法，推估 2019-2033 年住宅用戶戶數，迴歸式如下 式 3-11：

$$H_{\text{yr}} = 0.3135 p_{\text{yr}} + 1.9827 H_{\text{yr}-1} - 0.9859 H_{\text{yr}-2} + \varepsilon_{\text{yr}} \quad \text{式 3-11}$$

其中， H_{yr} ：第 yr 年之戶數推估值； $H_{\text{yr}-1}$ ：前一期戶數； $H_{\text{yr}-2}$ ：前兩期戶數； p_{yr} ：當期總人口數； ε_{yr} ：殘差項。

表 3-13 未來戶數及低度用戶推估

年	戶數	低度用戶比例(%)	調整後戶數
2020	8,884,632	10.3	7,973,282
2021	8,949,077	10.2	8,031,876
2022	9,006,408	10.2	8,085,147
2023	9,056,424	10.2	8,129,885
2024	9,098,835	10.3	8,165,942
2025	9,133,763	10.2	8,198,114
2026	9,161,104	10.2	8,222,906
2027	9,180,686	10.2	8,240,629
2028	9,192,002	10.2	8,250,593
2029	9,194,776	10.2	8,252,882
2030	9,188,963	10.2	8,247,832
2031	9,174,475	10.2	8,234,862
2032	9,151,316	10.2	8,214,066
2033	9,119,513	10.2	8,185,480

*原文獻僅推估到 2033 年

(資料來源：(梁世武 2019))

由於戶數原文獻僅推估到 2033 年，因此本研究嘗試兩種方法，其一利用 2033 年人均居住面積直接推估至 2050 年各年戶數與；其二，單純利用非線性方式處理 2034 至 2050 年之戶數資料發現，此方法會在 2035 年後會大幅下降，依照未來人口會逐漸漸少，但家庭組成型式應為小家庭為主，因此 2050 年相較 2020 之戶數不應大幅下降 17%。本研究利用各年總居住面積以及戶均居住面積推估戶數，但 2005 至 2020 年之戶數與總居住面積之成長率皆有浮動，如，因此最終先暫用 2033 年戶均居住面積推估後 17 年之戶數，計算公式如式 3-12 與式 3-13。此方法推估 2050 年之戶數相較 2020 年下降 3.5%，如下圖 3-11。

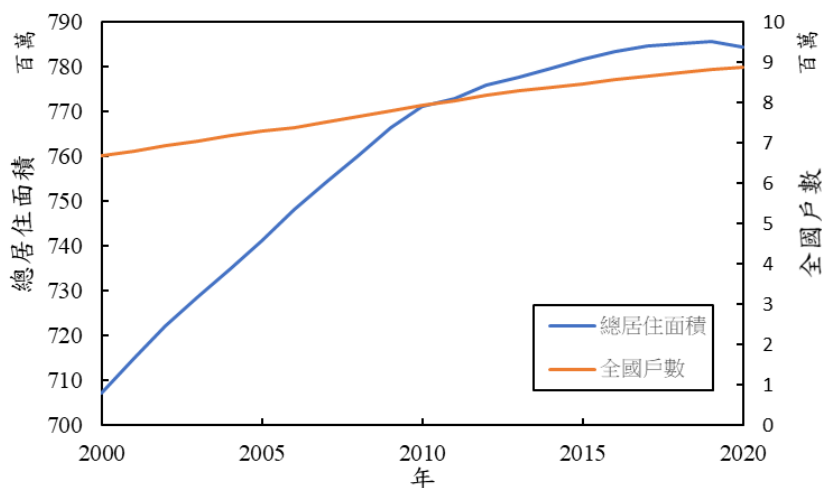


圖 3-10 2005 至 2020 年歷年總居住面積及全國戶數統計

資料統計：(內政部戶政司全球資訊網 2021)、(內政部戶政司 2021)

$$\text{人均居住面積}_{\text{yr}} = A_{\text{res, yr}} / p_{\text{yr}} \quad \text{式 3-12}$$

$$H_{\text{yr}} = \text{戶均居住面積}_{2033} \times A_{\text{res, yr}} \quad \text{式 3-13}$$

其中， p_{yr} ：當期總人口數； H_{yr} ：第 yr 年之戶數推估值； $A_{\text{res, yr}}$ ：第 yr 年之總居住面積；戶均居住面積₂₀₃₃：2033年戶均居住面積，為 $89.95\text{m}^2/\text{人}$ 。

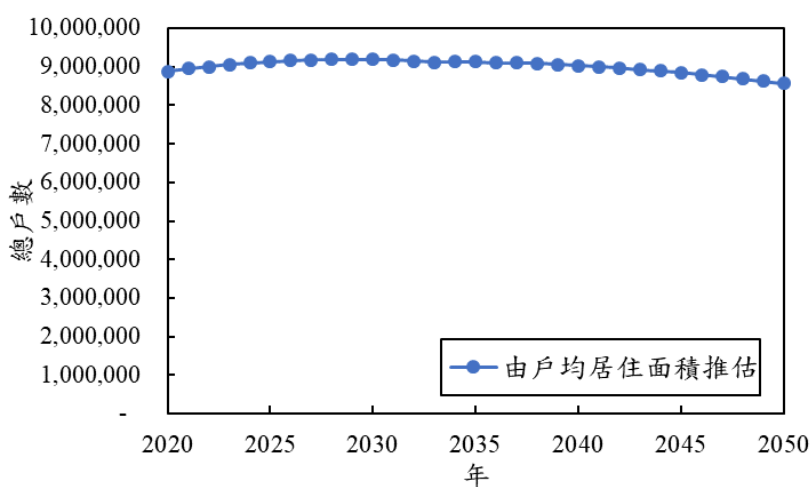


圖 3-11 2020 至 2050 年未來戶數推估

(參考資料：本研究整理)

表 3-14 利用 2033 年戶均居住面積推估之未來戶數

年	總居住面積 (m^2)	戶數 (戶)	低度用戶比例 (%)	調整後戶數 (戶)
2034	820,982,113	9,127,444	10.2	8,196,445
2035	821,345,128	9,131,480		8,200,069
2036	819,487,078	9,110,823		8,181,519
2037	818,397,583	9,098,710		8,170,642
2038	816,895,214	9,082,007		8,155,643

2039	815,016,137	9,061,116		8,136,883
2040	812,688,356	9,035,237		8,113,643
2041	809,984,096	9,005,172		8,086,644
2042	806,940,039	8,971,329		8,056,253
2043	803,520,187	8,933,308		8,022,110
2044	799,797,967	8,891,925		7,984,949
2045	795,774,117	8,847,189		7,944,776
2046	791,412,446	8,798,697		7,901,230
2047	786,787,175	8,747,275		7,855,053
2048	781,825,029	8,692,107		7,805,512
2049	776,637,707	8,634,436		7,753,724
2050	771,188,984	8,573,859		7,699,325

(參考資料：本研究整理)

3.2.4 住宅熱水耗能推估

住宅熱水耗能主要來自沐浴熱水之耗能，其計算假定每人每次沐浴使用水量訂為 40 L，水溫設定為 39°C，熱水出水溫度為 55°C (李孟杰 2006)，而不同的熱水器，耗能也不相同，因此本研究參考「建築產業碳足跡」一書中之計算標準，將不同種類的熱水器耗能(林憲德 2018)與其住宅用戶之普及率(梁世武 2019)整理成下表 3-15。因此，住宅之全國年熱水耗能量($E_{res,DHW}$)之計算，依使用能源區分為用電與瓦斯熱水，分由下式 3-12 與式 3-13 計算而得。

表 3-15 各類熱水器耗能與普及率

熱水器種類	每戶耗能量	碳排係數	住宅用戶普及率
電熱水器	1378.6 kWh/yr	依能源局最新公告	24.3 %
熱泵熱水器	459.5 kWh/yr	依能源局最新公告	4.3 %
瓦斯熱水器	149.9 m ³ /yr	2.09 kgCO ₂ e/m ³	53.3 %

(資料來源：(林憲德 2018)、(梁世武 2019))

$$E_{res,DHW,elec,yr} = \sum_w (\text{熱水器}_w \text{戶均熱水年耗能} \times \text{戶數}_{yr} \times \text{熱水器}_w \text{普及率}) \quad \text{式 3-14}$$

$$E_{res,DHW,gas,yr} = \text{戶均熱水年耗瓦斯量} \times \text{戶數}_{yr} \times \text{瓦斯熱水器普及率} \quad \text{式 3-15}$$

其中，下標 w 為熱水器種類，未來的戶數估計，與上一步驟 H_{yr} 推估模型相同。

而針對熱水耗能之未來耗能基線(BAU_{DHW})推估方面，根據過去之研究，其採取實際案例監控的方式，針對各住戶的用熱水量、耗電量、進水量、用熱水溫以及室外溫度進行分析，結果發現每日用熱水行為與氣候的相關性不大(鄭凱文 2004)，且使用熱水行為並不會影響耗電量，因此本研究在住宅熱水耗能的部分在不考慮氣候變遷之影響與假設各式熱水器的普及率不變下，未來的熱水耗能僅與全國戶數變化有關。至於全國戶數之推估則參考表 3-13。

3.2.5 住宅使用水量之推估

住宅耗水推估參考建築產業碳足跡(林憲德 2018)，將每人年用水量定為 98.6 m³/人，藉此推得全國住宅之用水量如下式 3-16。而全國住宅用水之溫室氣

體排放量，則再乘上依自來水公司每年公告之處理自來水之溫室氣體排放係數而得。

$$\text{住宅部門用水量 } E_{\text{res,water,yr}} (\text{m}^3/\text{年}) = 98.6 (\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{年}) \times \text{人口數 (人)} \quad \text{式 3-16}$$

3.2.6 住宅烹飪耗能推估

全年戶均烹飪耗能部分則引用蘇育弘之碩士論文，其研究調查大台北地區家戶內有關處理食物之能源消耗，以台北市及新北市的高中生為調查對象，透過問卷紀錄家中食物相關設備之情形以及每日的使用狀況，其調查結果顯示，在食物處理（烹飪）上，每戶家庭每年約消耗 6674.57 MJ (蘇育弘 2018)，因此本研究將引用此結果作為每戶每年住宅烹飪的耗能。

由於在計算溫室氣體排放量時，皆從耗電量或瓦斯耗量推算，因此在推估住宅烹調溫室氣體排放量時必須先將MJ的單位換算成電的單位 (kWh) 與瓦斯的單位 (m^3)，假設電力與瓦斯在烹飪時無能量損失，電力的熱值以 860 千卡/度計算，瓦斯的熱值以 8900 千卡/度計算，換算結果如下表 3-16 所示。

表 3-16 大台北地區家戶年食物處理能源消費概況 (樣本數=661 戶)

年能源消費量項目	每戶每年能源消費量 (MJ/戶)	單位換算結果	
		每戶年耗電量 (kWh/戶)	每戶年耗瓦斯量 ($\text{m}^3/\text{戶}$)
食物處理 (烹飪)	6674.57	1854 kWh	179.2 m^3

(資料來源：(蘇育弘 2018))

住宅烹飪耗能即可以下二式推估：

$$E_{\text{res,cook,elec,yr}} = \text{食物處理耗電量} \times \text{電熱爐普及率} \times \text{戶數}_{\text{yr}} \quad \text{式 3-17}$$

$$E_{\text{res,cook,gas,yr}} = \text{食物處理耗瓦斯量} \times (1 - \text{電熱爐普及率}) \times \text{戶數}_{\text{yr}} \quad \text{式 3-18}$$

其中，各項耗能參考表 3-16，電熱爐普及率參考台電 106 年之調查報告(梁世武 2019)，調查結果顯示電熱爐普及率為 20.5%，且假設其餘用戶皆使用瓦斯爐；未來的戶數估計與上一步驟 H_{yr} 推估模型相同。

3.2.7 住宅總耗能推估

將以上各節之住宅各分項年耗能量推估依能源種類加總，即可分別得到住宅年耗電量、住宅年耗瓦斯量及住宅年耗水量，如式 3-17、式 3-18、式 3-20 與式 3-21，將耗電量、瓦斯耗量及耗水量分別乘上碳排係數即可得知住宅部門之年溫室氣體排放量(GHG_{res})，以每年之二氧化碳排放當量表示其單位為 $\text{kgCO}_2\text{e/yr}$ 。

住宅部門第 yr 年之耗電量＝

$$E_{\text{res,elec,yr}} (\text{kW/yr}) = E_{\text{res,HVAC,yr}} + E_{\text{res,light,yr}} + E_{\text{res,app,yr}} + E_{\text{res,DHW,e,yr}} + E_{\text{res,cook,e,yr}} \quad \text{式 3-19}$$

$$\text{住宅部門耗瓦斯量 } E_{\text{res,gas,yr}} (\text{m}^3/\text{年}) = E_{\text{res,DHW,gas,yr}} + E_{\text{res,cook,gas,yr}} \quad \text{式 3-20}$$

在住宅耗水方面，由於台北市以及新北市部分行政區是由臺北自來水事業處（以下簡稱北水處）供給水源，其餘縣市皆為台灣自來水股份有限公司（以下簡稱台水公司）提供，根據最新資料，北水處的排放係數為 0.0633 kgCO₂e /度(臺北自來水事業處)，台水公司的自來水排放係數為 0.150 kgCO₂e /度(台灣自來水全球資訊網)，因此在計算溫室氣體排放時需分開代入計算。由於北水處在新北市提供約 38 % 的人口用水，因此本研究將全臺北市及新北市人口的 38 % 計入北水處用水，其餘縣市人口用水則計入台水公司用水，如式 3-21、式 3-22。

北水處耗水量(m³/年)=98.6(m³/人.年)×(台北市人口數+新北市 38%人口)式 3-21

台水公司耗水量(m³/年)=98.6(m³/人.年)×(新北市 62%人口+其餘縣市人口)式 3-22

住宅部門第yr年總溫室氣體排放量推估值GHG'_{res,total,yr} (kgCO₂e/yr)=

住宅部門耗電量E_{res,elec,yr}×電力排碳係數(β_{1,yr})+住宅部門瓦斯耗量E_{res,gas,yr}×桶裝瓦斯占比×桶裝瓦斯碳排係數(β_{2,yr})+住宅部門瓦斯耗量E_{res,gas,yr}×天然氣占比×天然氣碳排係數(β_{3,yr})+住宅部門用水量E_{res,water,yr}×自來水碳排放係數(β_{4,yr})

式 3-23

其中GHG代表溫室氣體，β₁為電力排碳係數，引自經濟部能源局(經濟部能源局 2019)，桶裝瓦斯占比取 0.56，天然氣占比取 0.44，桶裝瓦斯碳排係數β₂，此處以 1.7529 (kgCO₂/m³) 代入，天然氣碳排係數β₃以 1.8790 (kgCO₂/m³) 代入(行政院環境保護署 2019)，自來水排放係數(β₄)則引自自來水公司網站，區分北水與台水分別有各自之碳排係數(台灣自來水全球資訊網，臺北自來水事業處)，再依此節之計算方法區分為北水處與台水公司之碳排係數計算；下標yr為未來某一年份，「GHG'」表示只經由本研究的模式推估，尚未考量修正係數的結果。

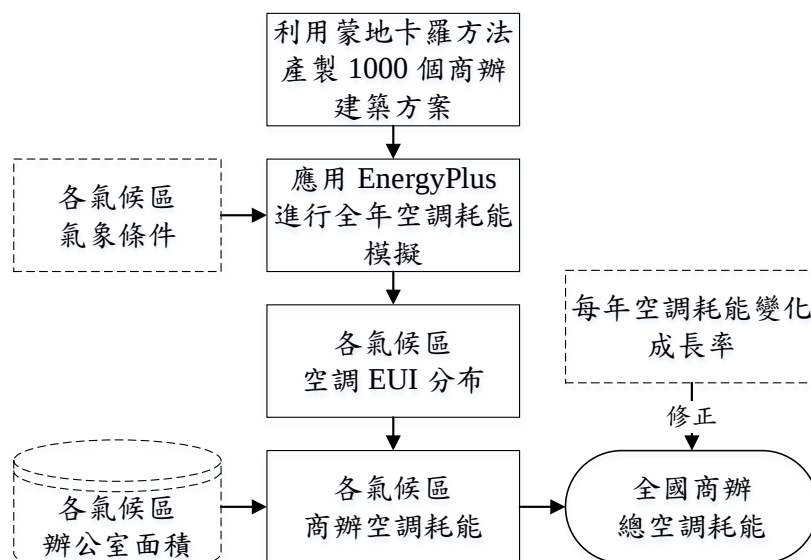
第三節 商業建築溫室氣體推估理論

本節探討商業大樓之耗能推估方法，以商業大樓作為建築耗能模擬的代表建築，期透過能源模型的建立預估未來商業大樓溫室氣體之排放量。商業大樓之溫室氣體推估擬先由商業大樓之各項耗能設備推估起，區分為空調、照明與事務設備，再根據經濟部能源局公布的逐年電力排碳係數以及行政院環保署與自來水公司所公布的排放係數計算溫室氣體排放量。而電梯、給水汙水設備、送排風等它項設備耗能，則根據各年之大用電戶之能源查核年報資料(經濟部能源局 2018)納入計算，以推估總耗能量。以下將分項介紹各耗能的推估方法。

3.3.1 商業空調耗能之推估

本研究藉由 EnergyPlus 以全年動態模擬搭配各年之逐時氣象年來推估商業大樓之空調耗能量。而在模擬之假設上，需先決定建築物的外殼構造、熱學性質、室內發散熱、空調系統及效能。空調耗能之來源，包括室內發散熱(室內人員、

照明、事務機器設備所產生之熱負荷)、建築外殼構造之熱學性能、室內外氣換氣之需求以及空調系統效能等因素之影響,因此,為了涵蓋我國各種可能之建築型態組合,採用與住宅溫室氣體推估同樣之方法,應用蒙地卡羅方法以推估整體我國商業建築之各種樣態。其流程如圖 3-12。



註：虛框線表示未來會持續變動而逐年滾動檢討的因子

圖 3-12 全國商業建築空調耗能推估模型

(資料來源：本研究繪製)

本研究將建築外殼熱性能分解成以下影響因子：窗牆比(WWR)、玻璃熱傳透率(U 值)、玻璃日射透過率(Solar heat gain coefficient, SHGC)、外遮陽深度比、外牆熱傳透率 (U 值)、屋頂熱傳透率 (U 值)、建築方位。將上述因子以蒙地卡羅法搭配拉丁超立方抽樣(LHS)生成 1000 個建築案例,以求涵蓋國內大部分可能之商業大樓建築樣態。同時在空調方面,以 CAV+VWV 與 VRF 兩種空調系統做為模擬基準,模擬的氣象條件則採用台北、台中、高雄之真實氣象資料與新產製之未來氣象資料以分別代表台灣北、中、南三個相異之氣候區,來求得未來之空調耗能量變化。由於空調耗能主要受到當地氣候影響,且各年的氣候狀況也不盡相同,因此必須根據不同年份與地區分批模擬,耗能模擬之數量估計如下表 3-17 所示。此外,為考量未來氣候變化之不確定性,將同時考量氣候變遷推估上三種不同的變化情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5),以分別代表未來人類發展將趨向為溫室氣體低排放、中排放與高排放下之情境,但本研究針對 2036 至 2050 年年之模型只考慮 RCP4.5 中排放情境。因此,在商業建築之耗能模擬上,將進行 294,000 次之模擬數量,以同時考量多樣的建築外殼、使用強度與空調系統效率組合與未來氣候變化上之不確定性,另外針對更長遠之未來則暫時考慮中排放即可。

表 3-17 EnergyPlus 模擬案例數

項目	數量	備註
----	----	----

地區		3	台北、台中、高雄
未來情境		3	RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5
GCM 模式	歷史年分 (2005 年至 2019 年)	15	以 RCP4.5 模擬
	未來年分 (2020 年至 2050 年)	63	區分為以 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 三種情境模擬；2036 至 2050 年只使用 RCP4.5 情境模擬
真實氣候年分 (2000 年至 2019 年)		20	採台北、台中、高雄三城市之歷史氣 象資料
建築案例(個)		1,000	以蒙地卡羅法之 LHS 生成
總模擬次數(個)		294,000	=[(15*3*1)+(16*3*3)+20*3*1+(15*3*1)]*1000

(資料來源：本研究整理)

(一) 建築模型外殼熱性能之模擬設定

本節所模擬之商業大樓單層樓高為 3.5m，外牆及屋頂之 RC 樓版厚度為 15cm，同時藉由調整 PS 隔熱板的厚度以決定外牆及屋頂的構造熱傳透率(U 值)。此外，建築面向方位、建築平面之長寬比皆會影響室內熱負荷取得之多寡進而影響空調耗能，因此將建築物可能的四個坐向也考慮到模型之中。建築物的長寬比主要影響著外周區之面積大小，若外周區面積愈大，則空調耗能表現愈易受到外界氣象影響，台灣目前建築長寬比大多為 1.4 左右，因此該隨機分佈使用 Gamma 分佈型態，並在使其高峰值落於 1.4 至 1.5 之間，示意圖可見下圖 3-13。地面層上樓層數則以常見的 6 樓至 20 樓為模擬基準。一般而言，非辦公區域的空調密度、照明密度、事務設備密度皆比辦公區域的密度還低，因此需分開討論，本研究以「空調空間面積比」與「空間有效面積比」來分別代表建築內有空調之空間面積比例以及有效樓地板面積占整棟大樓樓地板面積的比值。

與窗戶開口部有關之外殼熱性能，如窗牆比(WWR)、窗玻璃 U 值及窗玻璃日射透過率(SHGC)，皆依台灣常見之水準設定。尤其 U 值的分布型態在正常情況並非是均佈的，故本研究以 Gampertz 分布型態定義玻璃 U 值之分佈，真實情形玻璃之隔熱性能大多分佈於 4.5 至 6.0 為準，如下圖 3-14。外遮陽以水平遮陽之方式透過描述遮陽板深度與窗高之比值之「深度比(x/y)」定義建築開口部之外遮陽性能，相關參數之設定範圍參見下表 3-18。

表 3-18 商業建築外殼參數設定

變因	最小值	最大值	分佈型態
長邊面向方位	N-S, W-E, NE-SW, SE-NW		四方位均佈
建築平面長寬比	1.1	3.5	Gamma 分佈
單層樓地板面積(m ²)	800	3000	均佈
地面上總樓層數	6	20	均佈
空調空間面積比($\delta_{A/C}$)	0.8	0.95	均布
空間有效面積比(δ)	0.6	0.85	均布

窗牆比(WWR)	0.35	0.85	均布
玻璃熱傳透率(U 值)	2.5	6.2	Gompertz
玻璃日射透過率(SHGC)	0.25	0.85	均布
外遮陽深度比(x/y)	0.0	0.5	均布(但當 WWR>0.5 時，x 須小於 0.2)
外牆隔熱材 PS 版厚度 (cm)	0.0	1.25	均布
屋頂隔熱材 PS 版厚度 (cm)	1	5.0	均布

(資料來源：本研究整理)

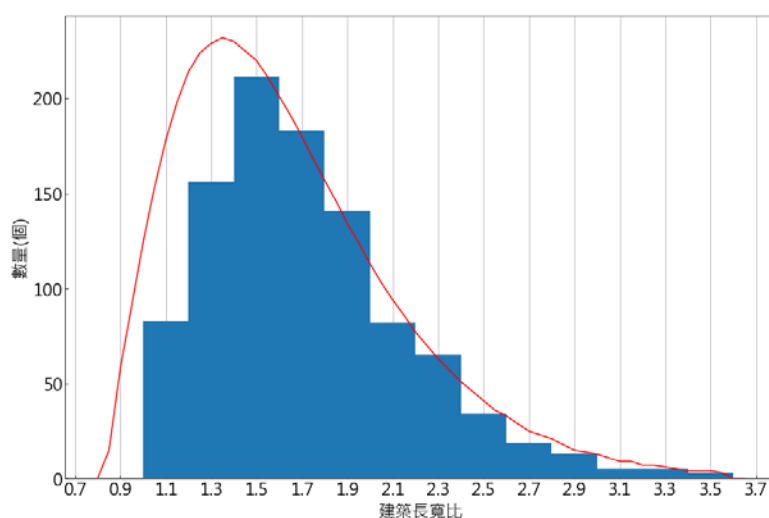


圖 3-13 建築長寬比隨機抽樣分佈示意圖

(資料來源：本研究整理)

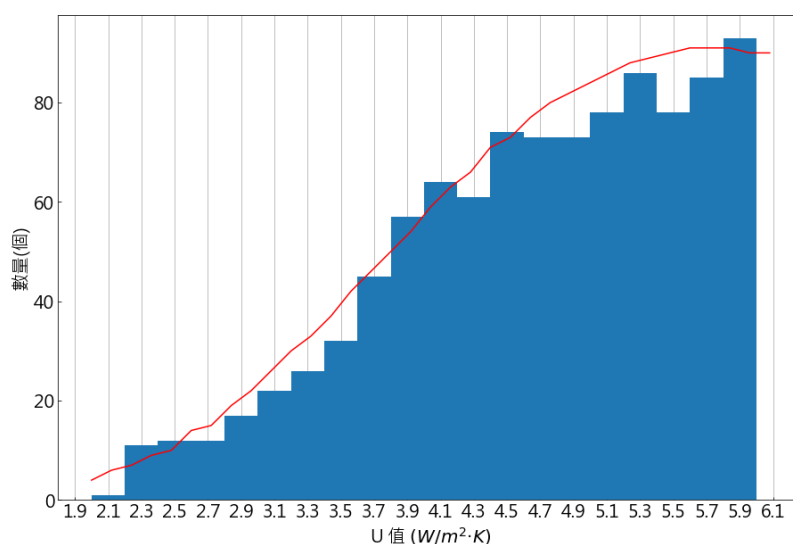


圖 3-14 玻璃 U 值隨機抽樣分佈示意圖

(資料來源：本研究整理)

(二) 室內發散熱之模擬設定

商業大樓室內發散熱之假定則參考自「綠建築解說與評估手冊」(內政部建築研究所 2014)以及符合市面上之經驗，分別設定人員密度、照明密度以及事務設備密度。考量國內已有部分商業大樓採用 LED 燈具，其照明密度較低的緣故，

因此本研究假定照明密度之分佈為常態分布，如圖 3-15，之情況下進行 LHS 抽樣。而人員密度及事務設備密度則皆採隨機均勻分布。各因子之上下界設定與假定之分佈如下表 3-19 所示。此外，在時程方面同樣參考「綠建築解說與評估手冊」及修正部分數值而得，其中空調、照明、人員分佈與事務設備之運轉時程如下圖 3-16。

表 3-19 商業建築室內發散熱設定

變因	最小值	最大值	分佈型態
人員密度 (人/m ²)	0.05	0.15	均布
照明密度 (W/m ²)	3	13	以平均數為 8，標準差為 2.3 之常態分佈(圖 3-15)
事務設備密度 (W/m ²)	5	10	均布

(資料來源：本研究整理)

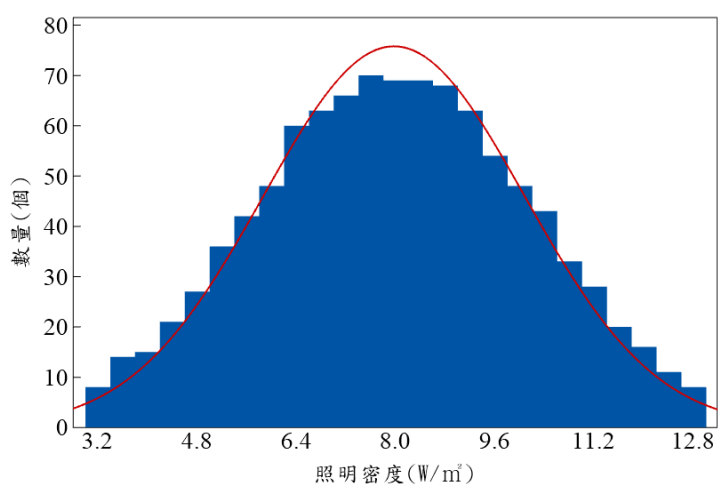
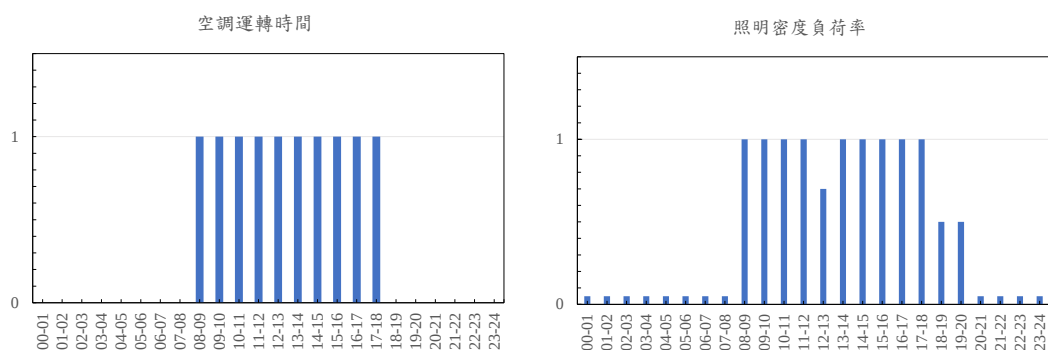


圖 3-15 商業大樓照明密度分布參考圖

(參考資料：本研究繪製)



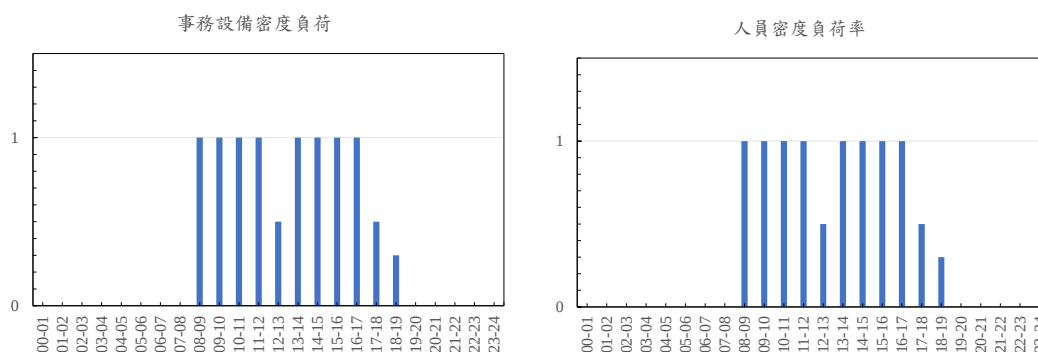


圖 3-16 各設備之負荷率及運轉時程

(參考資料：本研究繪製)

(三) 空調系統之模擬設定

空調系統的設定分為二次側定風量(CAV)搭配水側變流量(VWV)系統與氣冷式 VRF 系統，根據一篇建築學報之研究(林憲德 and 賴柏亨 2010)，既有商業建築約有 86.8 % 為 CAV+VWV 系統，13.2% 為氣冷式 VRF 系統，因此本研究將 1000 個案例依照此比例分配為 CAV+VWV 系統與氣冷式 VRF 系統。

在 CAV+VWV 空調主機效能(coefficient of performance, COP)的設定上，由於不同噸數大小的主機其合理的 COP 區間範圍亦不同，但礙於模擬上的限制，無法直接指定空調主機的噸數，因此需事先建立空調主機噸數(USRT)與總樓地板面積(Total Floor Area, TFA)的關係，以便未來直接利用生成案例之樓地板面積概估空調主機總容量，並分別訂定不同的 COP 變化範圍，將更能趨近真實之情況。本研究沿用去年之計畫成果(羅時麒，黃國倉 et al. 2020)，依式 3-22 來預估每個模擬案例可能的空調主機容量，藉以套用合理之 COP 範圍回模擬案例中，已進行全年空調耗能之計算。

$$\text{空調總噸數} = 0.0209 \times \text{TFA} + 46.031$$

式 3-24

根據式 3-22，當空調總噸數<150 USRT 時，總樓地板面積 $\text{TFA} < 4975$ ；而當空調總噸數>300 時，總樓地板面積 $\text{TFA} > 12152$ ，藉由兩者之間的關係，即可將此蒙地卡羅方法所生成之 1000 個案例做適當的 COP 分派，詳細之 COP 上下界如下表 3-20 所示。

此外，本研究為考量各建築使用時室內空調設定溫度之差異所致之空調耗能變化，因此將空調設定溫度納為變數之一。此外，一個空間中有多少體積之氣體被外氣置換亦影響空調負荷量之多寡，此於進出空間時開關門及門窗的間隙因素都是影響此參數的變因，此參數的大小端看空間的規劃及使用習慣，因此外氣換氣量與空調 Sizing factor 同樣採蒙地卡羅隨機模擬的方式處理，以描述不同建築間相異的外氣換氣量，詳細之範圍如表 3-20。

表 3-20 商業大樓空調系統設定

空調系統		COP 最小值	COP 最大值	備註
CAV + VWV	USRT < 150	4.00	5.50	市占約 86.8%
	150 < USRT < 300	4.55	6.05	
	USRT > 300	5.10	6.60	
氣冷式 VRF		2.95	3.85	市占約 13.2 %
空調溫度設定		常態分佈(平均值=25°C，標準差=1.0°C)		
外氣換氣量(ACH)		最小值：0.1	最大值：0.5	均勻分布
Sizing Factor		常態分佈(平均值=1.5，標準差=0.3；最小值=1.0)		

(資料來源：本研究整理)

待所有參數設定完畢及透過 EnergyPlus 配合各年之氣象資料模擬完成後，即可得到在不同地區氣候條件下，此 1000 個案例所呈現的當年 EUI 分布情形，如圖 3-17 所示是以 2019 年為例所呈現這 1000 個樣本之全年空調耗能量分佈，在有效面積內將每一塊樓地板面積依照此分布賦予其一 EUI 值，最後再將所有的 EUI 耗能總加即可推得商業大樓空調耗能，如下式 3-25：

$$E_{\text{com,HVAC,yr}} = \sum_{\text{region}} (EUI_{\text{com,region,HVAC,yr}} \times A_{\text{com,region,yr}} \times \delta) \quad \text{式 3-25}$$

其中，下標u為每單位樓地板面積，region為北、中、南三個區域，com為商業部門， δ 為空間有效面積比，本參數為變動值係透過蒙地卡羅方法LHS取值（取值範圍參見研究報告之表 3-15）；而 $EUI_{\text{com,region,HVAC,yr}}$ 為透過EnergyPlus搭配未來逐年氣候(依RCP4.5 情境)分台灣北、中、南三氣候區模擬而得。

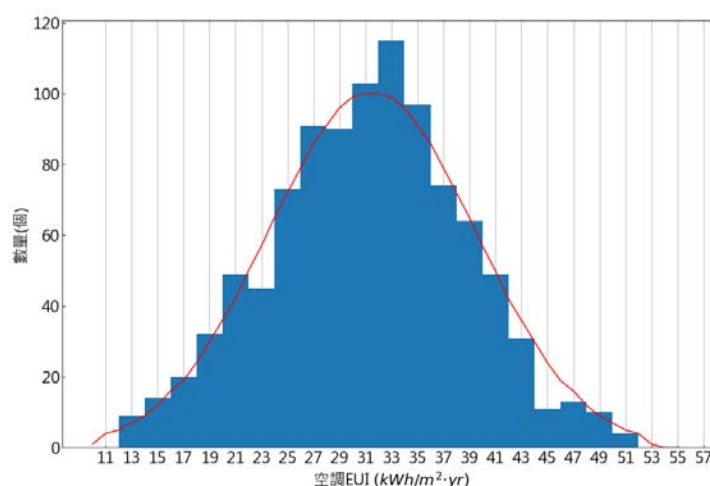


圖 3-17 商業空調 EUI 分布示意圖

(資料來源：本研究繪製)

為確保一致性，商業建築空調的歷史與未來耗能推估模擬皆採用 GCM 模型所產製的未來氣象年模擬，但由於 GCM 產製的氣象年未必與國內真實氣象吻合，因此需同時以真實氣象年模擬這 1000 個案例，之後再將兩者所模擬的結果比較修正，本研究以 2000 年至 2019 年台北、台中及高雄三地的真實氣象資料產製真實氣象年，與 GCM 模型之中推估(RCP4.5)所產製的氣象年相互比較其

2000-2019 年間之變化量。發現台北、台中、高雄的 GCM 模擬結果比真實年各低了 3.6%、2.7%與 2.5%，因此需再將以 GCM 產製之未來氣象資料的模擬結果乘上各自的校正倍數(1.036、1.027 與 1.025)才能更近似於真實的模擬結果，以排除 GCM 推估與真實發生年份間之預測偏差之現象。

● 商業建築空調系統耗能基線之推估法

在耗能基線之推估上，假設未來之建築外殼熱性能、室內發散熱、空調系統等均維持現狀不變，改變的僅有外界氣候條件及未來樓地板面積之增減。本研究未來氣候以 CanESM2 之 GCM 模式所產生的未來逐時氣象年進行模擬，未來氣象分為高、中、低推估，分別代表三種不同情境的未來氣候，區分為台北、台中、高雄三地區進行模擬。

經過文獻蒐集分析後，並無全國商業建築樓地板面積既存量之統計資料，僅有每年核發之建照資料，由於無法完全精確掌握國內商業樓地板之總面積，因此本研究利用住宅與商業大樓之面積比值推求全國既存商業大樓可能的樓地板面積。根據營建署的統計，歷年核發的住宅與商業新建樓地板面積如下表 3-21。其資料最早僅可溯源至民國 71 年，且民國 94 年以前之面積資料並無各縣市之統計值，因此本研究取民國 95 年後之累積樓地板面積資料進行商業與住宅樓地板面積之比例計算，並將各縣市核發之建築樓地板面積分別依北、中、南三區加總，以反應台灣各區域商業建築數量不一之情況。經比較兩者間的比例關係，可發現長期以來北部、中部與南部商業建築樓地板面積平均約是各區住宅面積的 15.8%、9.9%與 8.2%，本研究乃援用此比例進以推求全國三個氣候區的商業總樓地板面積。

表 3-21 商業及住宅歷年核發建築物使用執照樓地板面積

民國	當年商業建築 新建面積(m ²)	累積商業建築 面積(m ²)	當年住宅新建 面積(m ²)	累積住宅面積 (m ²)	商業建築面積占 住宅面積之比例
71	1,652,519	1,652,519	13,435,474	13,435,474	12.3%
72	1,669,206	3,321,725	13,354,217	26,789,691	12.4%
73	2,086,211	5,407,936	14,118,905	40,908,596	13.2%
74	2,068,138	7,476,074	13,994,242	54,902,838	13.6%
75	2,144,045	9,620,119	13,290,689	68,193,527	14.1%
76	1,679,917	11,300,036	12,361,737	80,555,264	14.0%
77	1,611,075	12,911,111	14,465,778	95,021,042	13.6%
78	2,235,944	15,147,055	14,527,690	109,548,732	13.8%
79	1,867,864	17,014,919	12,059,109	121,607,841	14.0%
80	2,500,075	19,514,994	13,112,880	134,720,721	14.5%
81	2,508,465	22,023,459	16,721,810	151,442,531	14.5%
82	2,376,622	24,400,081	23,035,824	174,478,355	14.0%
83	2,163,748	26,563,829	29,990,737	204,469,092	13.0%
84	2,290,260	28,854,089	27,791,923	232,261,015	12.4%
85	2,486,399	31,340,488	21,779,131	254,040,146	12.3%
86	2,902,472	34,242,960	15,634,945	269,675,091	12.7%
87	2,467,355	36,710,315	14,821,070	284,496,161	12.9%
88	4,088,783	40,799,098	14,564,635	299,060,796	13.6%
89	3,042,080	43,841,178	11,292,174	310,352,970	14.1%
90	2,425,365	46,266,543	9,127,718	319,480,688	14.5%
91	1,769,308	48,035,851	8,532,831	328,013,519	14.6%

92	2,656,023	50,691,874	10,659,082	338,672,601	15.0%
93	1,437,657	52,129,531	12,330,189	351,002,790	14.9%
94	1,324,176	53,453,707	13,972,174	364,974,964	14.6%
95	2,008,339	55,462,046	17,419,853	382,394,817	14.5%
96	2,619,557	58,081,603	18,853,621	401,248,438	14.5%
97	3,361,455	61,443,058	16,079,464	417,327,902	14.7%
98	2,553,207	63,996,265	13,493,453	430,821,355	14.9%
99	2,044,040	66,040,305	13,307,584	444,128,939	14.9%
100	1,297,075	67,337,380	12,692,807	456,821,746	14.7%
101	1,788,175	69,125,555	15,032,533	471,854,279	14.6%
102	1,841,437	70,966,992	16,056,000	487,910,279	14.5%
103	1,748,281	72,715,273	17,286,741	505,197,020	14.4%
104	2,460,170	75,175,443	18,200,576	523,397,596	14.4%
105	1,443,926	76,619,369	16,977,443	540,375,039	14.2%
106	2,059,318	78,678,687	14,947,226	555,322,265	14.2%
107	1,757,769	80,436,456	16,040,790	571,363,055	14.1%
108	1,507,860	81,944,316	14,558,549	585,921,604	14.0%
109	1,972,413	83,916,729	22,984,676	608,906,280	13.8%

註：民國 95 年後始有各縣市樓地板面積之統計值

(資料來源：(內政部營建署 2006, 內政部營建署 2006 至 2020))

3.3.2 商業建築照明耗能之推估

建築照明之全年耗能量推估流程如圖 3-18 所示，其耗能由照明EUI與樓地板面積決定，而全年照明EUI則再由照明密度與照明使用時間求得。單位面積照明密度則由表 3-19 經蒙地卡羅方法取樣後而得，其取樣後產生 1000 個商業大樓模型中的照明密度值($I_{com,light}$)之分布如圖 3-15 所示。由於不同商業大樓的照明使用時間不同，因此照明使用時間同樣以隨機以每日使用 7 至 10 小時間以均佈取值進行計算。如假設全年上班日數為 254 日，因此全年之建築照明運轉時間約介於 1778 小時至 2540 小時之間，照明全年耗能量之計算如下式 3-25 所示，區分為居室($EUI_{com,light}$)與非居室($EUI'_{com,light}$)之照明用電量密度計算，最後再依各氣候區之商業建築樓地板面積比例累計台灣各氣候區之全年總照明用電量。而全國之全年照明EUI的分布如下圖 3-19：

$$EUI_{com,light} = \sum_d (I_{com,light,d} \times t_{com,light} / 1000) \quad \text{式 3-26}$$

$$EUI'_{com,light} = 5.5 \times t_{com,light} / 1000 \quad \text{式 3-27}$$

其中，下標light代表照明設備系統， $EUI_{com,light}$ 為全年商業有效面積內之照明能源使用密度($kWh/m^2 \cdot yr$)， I 為有效面積內單位面積照明密度(W/m^2)，而非有效面積內之照明密度本研究取 5.5 (W/m^2)，下標d為如下圖之分布之每一取樣點； t 為全年運轉時數，為變動值(本研究取值自 1778 小時至 3048 小時之間)， $EUI'_{com,light}$ 為非有效面積之年照明EUI(本研究取 5.5 $W/m^2 \cdot yr$)。

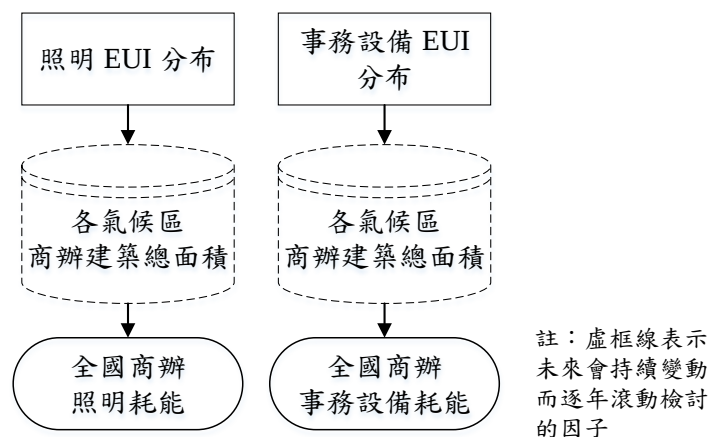


圖 3-18 全國商業建築照明與事務設備耗能推估模型

(資料來源：本研究繪製)

參考圖 3-19 作為照明EUI的機率分布，將全國商業大樓之有效樓地板面積依照此EUI的機率分布賦予每單位面積一個照明EUI值，由於並非所有辦公空間內之照明設備皆同時開啟，因此屬於有效樓地板面積內之居室空間另需考慮同步開燈率(本研究取 0.8)。非有效樓地板面積之區域則賦予其一最低照明密度，本研究設定為梯間 5.5 W/m^2 (California Energy Commission 2019)，最後將所有的EUI值相加即為該年度的商業大樓照明耗能，計算如式 3-27：

$$E_{\text{com,light,yr}} = A_{\text{com,yr}} \times \delta \times \rho_{\text{light}} \times \text{EUI}_{\text{com,light}} + A_{\text{com,yr}} \times (1-\delta) \times \text{EUI}'_{\text{com,light}} \quad \text{式 3-28}$$

其中， A_{com} 為全國商業大樓樓地板面積(m^2)； $\text{EUI}'_{\text{com,light}}$ 為非有效面積之年照明EUI(本研究取 $5.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{yr}$)； δ 為有效面積比(為變動值)； ρ_{light} 為同步開燈率，本研究取 0.8。。

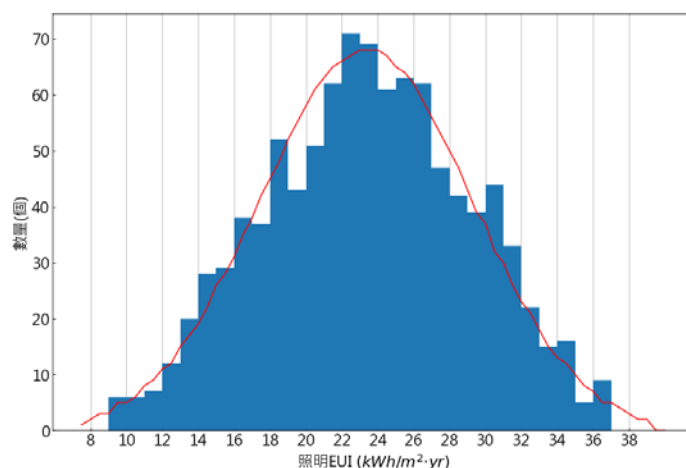


圖 3-19 商業照明 EUI 分布圖

(資料來源：本研究繪製)

● 商業建築照明系統耗能基線之推估法

在照明耗能基線的假設上，商業大樓照明密度不變與現況具相同之分佈，未來之商業大樓照明耗能則僅隨樓地板面積增加而增加，因此只需推估未來的商

業大樓面積即可推得照明耗能。未來商業面積可透過前一節的方法透過住宅面積的比例推估。

3.3.3 商業事務設備耗能之推估

由於事務設備耗能亦不受地區氣候影響，同樣不分地理區域討論，全年商業之事務設備耗能由全年事務設備EUI與樓地板面積決定，而全年事務設備EUI由事務設備密度($I_{com,eqp}$)與事務設備運轉時間($t_{com,eqp}$)所決定。事務設備密度($I_{com,eqp}$)參考表 3-19，上下界設定參考過去經驗及國內現況，採用隨機均勻分布設定，事務設備運轉時間($t_{com,eqp}$)則同樣參考照明使用時間之分佈同步變動，然而所有室內之設備亦非全時同步運作，需再考慮事務設備同步使用率(本研究取 0.7)，才更符合真實之情況。以全年上班天數 254 日為計算基準，每日運轉 7 至 10 小時，相當於全年運轉 1778 小時至 2540 小時之間，由此可得事務設備EUI之計算式如下式 3-28：

$$EUI_{com,eqp} = I_{com,eqp} \times t_{com,eqp} \times \rho_{eqp} / 1000 \quad \text{式 3-29}$$

其中， $EUI_{com,eqp}$ 為事務設備之單位面積用電量($kWh/m^2 \cdot yr$)； $I_{com,eqp}$ 參考下表事務設備密度一欄內之範圍取值， $t_{com,eqp}$ 則與照明時間範圍相同(取值自 1778 小時至 2540 小時之間)； ρ_{eqp} 為事務設備同時負荷率，本研究取 0.7。

由式 3-28，可得到事務設備之EUI分布圖，如下圖 3-20，依照此EUI的分布賦予每單位商業大樓有效樓地板面積一事務設備EUI值，非有效樓地板面積之區域如梯廳、走道等區域則無事務設備以 $0 W/m^2$ 計。計算式如下 式 3-30：

$$E_{com,eqp,yr} = A_{com,yr} \times \delta \times EUI_{com,eqp} \quad \text{式 3-30}$$

$E_{com,eqp,yr}$ 為第yr年全國商業事務設備之用電量 (kWh/yr)；下標eqp代表事務設備。

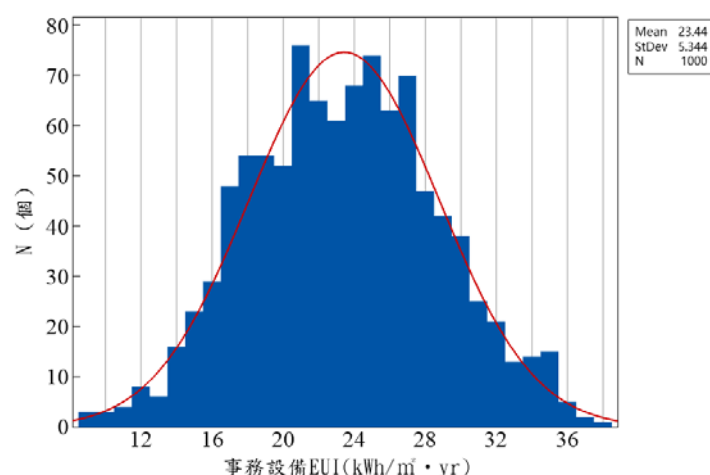


圖 3-20 商業事務設備 EUI 分布圖

(資料來源：本研究繪製)

● 商業建築事務設備耗能基線之推估法

由於目前文獻上未有針對商業建築事務設備密度變化趨勢之報告，故本研究暫先假設其事務設備密度未來大致不變，未來之商業事務設備耗能僅因為樓地板面積增加而增加，因此僅需推估未來的商業大樓面積即可推得事務設備耗能。而其樓地板面積則可透過前一節的方法依與住宅面積的比例推估。

3.3.4 商業它項設備與總耗能量之推估

由前面的推估步驟可求得空調、照明及事務設備的耗能，由表 3-22 可知，在 2018 年時，此三項耗能平均已占商業大樓總耗能之 78.48 %，其餘剩下約二成之耗能，則分由電梯耗能($E_{com,elev,yr}$)、給水汙水設備耗能($E_{com,pump,yr}$)、送排風耗能($E_{com,vent,yr}$)、冷凍冷藏設備耗能($E_{com,refri,yr}$)及其他非歸則於上述分類之設備耗能($E_{com,other,yr}$)等組成。有鑑於此部分比例占比較小，這些耗能採以比例推估。因此，商業之電力總耗能基線計算如下式 3-30 所示。

$$E_{com,total,yr} = E_{com,HVAC,yr} + E_{com,light,yr} + E_{com,eqp,yr} + E_{com,elev,yr} + E_{com,pump,yr} + E_{com,vent,yr} + E_{com,refri,yr} + E_{com,other,yr}$$

式 3-31

其中，

$$E_{com,elev,yr} = r_{elev,yr} \times (E_{com,HVAC,yr} + E_{com,light,yr} + E_{com,eqp,yr})/0.78$$

$$E_{com,pump,yr} = r_{pump,yr} \times (E_{com,HVAC,yr} + E_{com,light,yr} + E_{com,eqp,yr})/0.78$$

$$E_{com,vent,yr} = r_{vent,yr} \times (E_{com,HVAC,yr} + E_{com,light,yr} + E_{com,eqp,yr})/0.78$$

$$E_{com,refri,yr} = r_{refri,yr} \times (E_{com,HVAC,yr} + E_{com,light,yr} + E_{com,eqp,yr})/0.78$$

$$E_{com,other,yr} = r_{other,yr} \times (E_{com,HVAC,yr} + E_{com,light,yr} + E_{com,eqp,yr})/0.78$$

$E_{com,elev,yr}$ 為電梯耗能； $E_{com,pump,yr}$ 為給水汙水設備耗能； $E_{com,vent,yr}$ 為送排風設備耗能； $E_{com,refri,yr}$ 為冷凍冷藏設備耗能；以及 $E_{com,other,yr}$ 為其他非歸則於上述分類之設備耗能。 r 為根據下表 3-22 所決定該項目之耗電量占總耗電量之百分比。

表 3-22 商業大樓電力流向

單位：%

年	空調 r_{HVAC}	照明 r_{light}	冷凍冷藏 r_{refri}	事務 設備 r_{equip}	送排 風 r_{vent}	給水 汙水 r_{pump}	電梯 r_{elev}	其他 r_{other}
2004	42	28	30					
2005	44.6	27.2	0.5	9.6	3.3	3.5	7.1	4.2
2006	42.5	26.2	0.4	11.1	4.2	3.6	8.2	3.7
2007	44.5	24.6	0.2	10.9	4.2	3.6	7.4	4.5
2008	45.5	24.0	0.2	12.5	3.6	3.3	6.6	4.3
2009	42.7	24.6	0.3	13.6	3.6	3.2	6.3	5.7
2010	43.7	24.8	0.3	13.3	3.6	3.1	6.2	5.0
2011	46.1	23.3	0.3	12.1	3.5	3.2	6.4	5.1
2012	46.05	22.98	0.34	12.09	3.41	3.22	6.39	5.51
2013	45.17	23.01	0.31	12.71	3.51	3.23	6.43	5.63
2014	48.30	20.51	1.13	9.46	4.39	3.22	6.76	6.23
2015	47.90	19.55	0.76	9.93	4.27	3.38	6.85	7.35
2016	50.48	17.49	0.77	10.55	4.28	3.79	6.53	6.11

2017	51.39	16.10	0.75	10.63	4.62	3.38	6.75	6.38
2018	50.73	16.66	0.94	11.09	4.23	3.41	7.14	5.80
2019	52.80	14.78	0.90	10.37	4.56	3.56	7.44	5.59

(資料來源：(經濟部能源局 2020))

3.3.5 商業耗水量之推估

商業大樓之耗水量採用人均年用水量推估，本研究參考「建築產業碳足跡」一書中的設定，取 10 小時行政辦公類空間每人年用水量訂為 25.4 m³/人(林憲德 2018)，而商業大樓的使用人數將從表 3-19 之平均值 0.1 人/m²，從商業大樓的有效面積中，推得使用人數，計算式如下式 3-31，再由使用人數推得商業大樓年用水量，如式 3-33。

$$p_{com, yr} = A_{com, yr} \times \delta \times 0.1 \quad \text{式 3-32}$$

$$E_{com, water, yr} = 25.4 \times p_{com, yr} \times p_{ri, com} \quad \text{式 3-33}$$

其中， $E_{com, water, yr}$ 為全國總用水量(m³)， p_{com} 為商業大樓使用人數(人)； $p_{ri, com}$ 為人員使用率(取 0.7)； $A_{com, yr}$ 為第 yr 年商業大樓總面積(查營建署逐年樓地板面積統計資料)； δ 為有效面積比(取值自蒙地卡羅樣本生成時有效面積比之平均數)；25.4 (m³/人.年)為辦公空間每人每年單位用水量，參考自(林憲德，2018)。0.1 為辦公類建築人員密度之平均值，單位為(人/m²)。

3.3.6 商業瓦斯與汽柴油碳排量之推估

由 2020 年非生產性質行業能源查核年報(經濟部能源局 2019)之辦公大樓內取得。商業大樓主要的溫室氣體排放源為電力，其二氧化碳排放量占了所有能源項目的 99.52%，如表 3-23，因此除了電力以外的能源將使用相對於使用電力之碳排百分比比例進行推估，如 式 3-33：

$$GHG_{com, other, yr} = (GHG_{com, elec, yr} / d_e) \times (d_{NG} + d_{gas} + d_{diesel}) \quad \text{式 3-34}$$

其中， $GHG_{com, gas, yr}$ 為某年 yr 商業大樓使用天然氣及汽柴油所排放之溫室氣體總量， $GHG_{com, elec, yr}$ 為某年 yr 商業大樓使用電力所排放之溫室氣體； d_e 為商業大樓電力使用排放溫室氣體占商業大樓總溫室氣體排放量之比例； d_{NG} 、 d_{gas} 與 d_{diesel} 分別為商業大樓天然氣、汽油與柴油占商業大樓總溫室氣體排放量之比例。

表 3-23 商業大樓各項能源消費量及占比

能源項目	消費量	排放係數	CO ₂ 排放量	比例(d)
電力	1,322,630(kWh)	0.492 kgCO ₂ e/kWh	650,733,960	99.51%
天然氣 NG	1,466,000 (m ³)	1.879 kgCO ₂ /m ³	2,754,614	0.42%
汽油 gas	72(公秉)	2.263 kgCO ₂ /L	162,936	0.02%
柴油 diesel	114 (公秉)	2.606 kgCO ₂ /L	297,084	0.05%

(資料來源：(經濟部能源局 2020))

3.3.7 商業總耗能

綜合前幾節之推估，商業大樓之總溫室氣體排放量計算式如下。

$$GHG_{com,elec,yr} = E_{com,total,yr} \times \beta_{1,yr} \quad \text{式 3-35}$$

$$GHG_{com,water,yr} = E_{com,water,yr} \times \beta_{4,yr} \quad \text{式 3-36}$$

$$GHG_{com,total,yr} = GHG_{com,elec,yr} + GHG_{com,water,yr} + GHG_{com,other,yr} \quad \text{式 3-37}$$

其中， $GHG_{com,elec}$ 為商業大樓電力使用所排放的溫室氣體量； $GHG_{com,total,yr}$ 為第 yr 年商業大樓總溫室氣體排放量， β_1 為電力排放係數， β_4 為自來水排放係數，依台北自來水公司與台灣自來水公司所公告之碳排係數分區計算， $GHG_{com,other,yr}$ 為其他能源別A.至I.項各項之推估總和，如下 0 所示。

第四節 住商部門建築溫室氣體排放量推估之校正

3.4.1 住宅溫室氣體排放推估模式之校正法

住宅部門溫室氣體排放量之推估值係依由下而上將每一耗能設備分項計算而得，亟需仰賴統計資料之完整性與正確性，本研究盡量蒐集目前可獲得之本土統計數據進行推算各分項之耗能量。然而仍有許多非可控因子影響真正之耗能情形，與真實之耗能情況尚有許多無法掌握之變數，需進一步與真實耗能數據進行修正，以提升模型之準確度及可信度。我國每年針對住宅部門溫室氣體的排放皆有詳細之統計資料，因此直接得以作為與模擬推估值進行模型的校正。本研究擬透過與真實耗能資料，透過導入修正係數之概念，考慮社會經濟情況，包含人均GDP、空屋率等因子計算修正率(γ_{res})。人均GDP參考表 3-4，歷史空屋率參考內政部不動產資訊平台之低度使用（用電）住宅統計，如下表 3-24，未來空屋率則參考表 3-13。

表 3-24 全國低度使用（用電）住宅統計表

年份	全國低用電戶數量(戶)	占全國總戶數比例
2009	900,431	11.49%
2010	884,978	11.17%
2011	813,925	10.15%
2012	863,083	10.63%
2013	856,924	10.50%
2014	849,869	10.30%
2015	862,682	10.35%
2016	862,965	10.22%
2017	864,835	10.12%
2018	916,383	10.56%
2019	891,880	10.17%

（資料來源：（內政部不動產資訊平台））

為了將模擬推估的結果與真實的情況進行校準，分別計算 2000 年至 2018 年低推估、中推估及高推估溫室氣體排放量的年平均變化率，與真實溫室氣體排放量的年變化率進行比較，自 2001 至 2018 年共 18 年期間模擬推估之平均年變化率為 1.56%，而真實的平均年變化率為 1.20%，平均差了 1.30 倍，因此，欲將模擬的成長率應用到真實情況時需再除以 1.30 以減小誤差。

由於推估出來的溫室氣體排放量在歷史的部分仍與真實統計資料有所出入，為了與能源局統計之溫室氣體排放量接軌，在歷史資料的部分直接引用經濟部能源局「我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析」之統計值，而在未來的推估上則參考本研究之推估結果，並以每年與前一年的變化率推估未來的排放量。

推估值之修正計算方式：

$$\gamma_{res} = \frac{\sum_{yr=2008}^{2018} \frac{E_{res,actual,yr} - E_{res,actual,yr-1}}{E_{res,est,yr} - E_{res,est,yr-1}}}{2018 - 2008} \quad \text{式 3-38}$$

下標 est 為模型推估值；下標 actual 為實際值

經修正的住宅部門第yr年之總溫室氣體排放量($GHG_{res,total,yr}$)則可由推估的住宅溫室氣體排放量($GHG'_{res,total,yr}$)乘上修正係數 γ_{res} 後而得：

$$GHG_{res,total,yr} (kgCO_2e/yr) = GHG'_{res,total,yr} \times (1 + \gamma_{res}) \quad \text{式 3-39}$$

3.4.2 商業建築溫室氣體排放推估模式之校正法

我國之耗能統計資料是依台電行業別之分類而製作，但以建築管理之立場是以建築類別為依歸。本研究業已建立商業類建築與住宅建築之溫室氣體排放之基線預測模型，其他商業建築(服務業)部分尚包括如旅館、百貨商場、學校、醫院以及其他非能以特定建築類別歸納之行業別。如第 3.4.1 節所述有關我國商業服務部門之能源統計係依行業別進行彙整。依經濟部能源局對商業部門之定義即為服務業，其中除了商業大樓以外，尚有學校、醫院、旅館、百貨公司等建築類型混雜其中，關於這四類的建築溫室氣體推估方式則以(台灣電力公司 2018)之歷年行業別用電統計資料，依上述四大類建築物以下表 3-25 之分類依據分別統計其歷年用電量，以作為校正之依據。

表 3-25 商業建築用電推估時採用之資料來源整理

建築種類	對應產業別	對應台電歷年行業別 (98-107) 用電資料之代號	附註
旅館類	旅館住宿業	88.旅館業	資料來源：台電 歷年行業別 (98-107) 用電 量
百貨商場類	零售業	53.54.55.零售業合計	
學校類	教育業	821.教育訓練服務業	
醫院類	醫療保健業	823.醫療保健服務業	
商業類	服務業	56.國際貿易 H.金融、保險及不動產業 I.工商服務業 911.公務機關 92.國際機構及外國駐在機構	

	94.其他不能歸類之行業
其他類	商業用電資料扣除上述建築產業別與本研究所推估之商業建築用電後而得

(資料來源：本研究整理與(台灣電力公司 2018))

表 3-26 各商業建築類別之既有存量分析

主類別	用戶分類-次類別	數量	占比	平均 EUI (kWh/m2)	比例加權後的 EUI (kWh/m2)	台電 2019 年真實總耗電量 (kWh)	總樓地板面積 (m2)
百貨商場類	百貨(百貨公司)	47	25%	313.9	319.4	4,946,606,196	15,488,325
	百貨(購物中心)	29	15%	295.2			
	量販(量販店(無冷凍冷藏))	3	2%	280			
	量販(量販店)	82	43%	346.4			
	複合式商場	30	16%	281.4			
旅館類	旅館(一般旅館)	15	17%	219.5	226.3	2,078,878,480	9,186,855
	旅館(一般觀光旅館)	17	20%	224.3			
	旅館(國際觀光旅館)	54	63%	228.8			
學校類	學校(一般大學(專))	67	39%	78.8	68.0	3,282,370,250	48,272,613
	學校(工商職業學校)	14	8%	52			
	學校(科技大學(專))	55	32%	65.7			
	學校(高級中學)	37	21%	57.9			
辦公大樓類	辦公大樓	107	100%	152.6	152.6	7,720,720,154	50,594,496
醫院類	醫院(地區醫院)	30	25%	173.5	224.3	2,914,290,691	12,994,884
	醫院(區域醫院)	66	55%	231			
	醫院(醫學中心)	25	21%	267.4			
住宅*							783,315,159

*住宅部分為本研究統計 (資料來源：經濟部能源局)

以 2018 年為例，不同建築類別之用電比例如下圖 3-21 所示，住宅、商業、旅館、百貨商場、學校、醫院與其他類建築之用電量各占整個住商部門全年用電量的 49.25%、9.37%、2.03%、4.37%、3.19%、3.25%與 28.55%。

由第三節所建立之蒙地卡羅推估商業建築之理論耗能模式，需再與實際發生之歷年用電資料校正，始可讓預測模式更為準確。在模擬推估與真實溫室氣體排放量盤查資料之校準上，由於基於由下而上發展之推估模型中，暫先忽略了社會經濟的發展對建築耗能之影響，這些社會經濟或其他非建築變因等因素往往是造成與真實耗能情況誤差之來源，因此必須將模式模擬得的耗能量與現實狀況進行比對修正以考量社經因子變動之影響，才能使推估模式更貼近於反應真實耗能

之變化。其校正方式採用 2009 年至 2018 年由台電公司依行業別所統計得之商業建築歷年實際用電資料(台灣電力公司 2018)作為基礎，依各年份中實際值與推估值之比例差異建立逐年修正係數 δ 之預測模型。

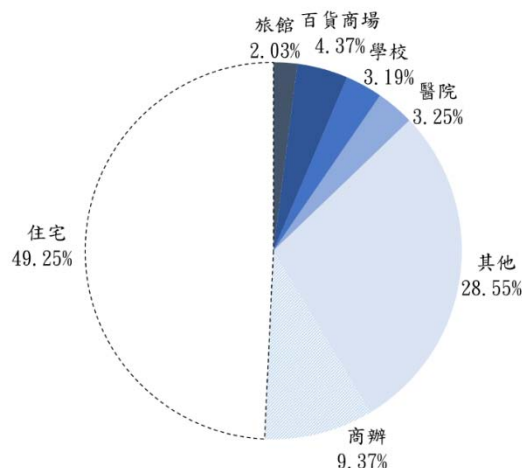


圖 3-21 各建築類別用電量占所有住商部門用電量之比例(以 2018 年為例)

(資料來源：本研究繪製)

$$\delta_{yr} = \frac{E_{actual,com,yr}}{E_{estimate,com,yr}} \quad \text{式 3-40}$$

其中，下標 yr 為預估之年份(西元年)； δ 修正係數，E 為全年用電量(kWh)；下標 actual 為實際用電量；下標 com 代表商業建築；下標 estimate 為本研究預估模型產出之預估用電量。

而所建立之修正係數預估模型為：

$$\delta_{yr} = 0.006557 \cdot yr - 12.336619 \quad (R^2 = 0.386) \quad \text{式 3-41}$$

其他商業部門內之各類建築類別則以歷史資料逐年假設與商業建築之年變化率相同之幅度成長推估其用電量，如下：

$$E_{estimate,i類建築,yr} = E_{estimate,i類,yr-1} \times \frac{E_{estimate,com,yr}}{E_{estimate,com,yr-1}} \quad \text{式 3-42}$$

$$GHG_{商業部門,elec,yr} = \sum E_{estimate,i類建築,yr} \times \beta_{1,yr} \quad \text{式 3-43}$$

$GHG_{商業部門,elec,yr}$ 表示第 yr 年商業部門用電部分之溫室氣體排放量； β_1 為逐年之用電碳排係數

不同建築類別逐年推估之結果以及歷史真實用電統計如下表 3-27。

表 3-27 屬服務業類別之各建築別逐年用電歷史與推估資料

年份	旅館類	百貨商場 (零售業)	學校教育 類	醫院類	商辦類	其他
單位	GWh	GWh	GWh	GWh	GWh	GWh

2009	1,391.2	4,690.7	3,242.5	2,779.0	5,927.0	26,121.5
2010	1,494.6	4,629.6	3,220.7	2,884.0	6,412.0	27,256.0
2011	1,534.2	4,485.8	3,176.2	2,830.0	6,207.1	27,537.4
2012	1,552.2	4,424.2	3,113.0	2,848.0	6,307.0	27,486.7
2013	1,608.6	4,366.0	3,115.1	2,899.3	6,522.8	27,341.5
2014	1,678.5	4,300.4	3,084.8	2,915.4	6,756.9	27,719.2
2015	1,765.9	4,308.1	3,083.5	2,976.9	7,006.2	27,996.8
2016	1,861.3	4,350.7	3,105.2	3,062.4	7,132.7	28,445.6
2017	1,899.5	4,264.1	3,049.3	3,077.9	7,439.4	28,587.3
2018	1,933.6	4,162.0	3,033.7	3,096.2	7,705.3	27,185.0
2019	2,078.9	4,946.6	3,282.4	2,914.3	7,720.7	25,777.7
2020	2,028.6	4,815.1	3,190.4	2,977.6	7,697.8	25,506.5
2021(f)	2,047.8	4,860.7	3,220.7	3,005.8	7,826.9	26,942.1
2022(f)	2,063.0	4,896.7	3,244.5	3,028.1	7,941.4	26,895.2
2023(f)	2,055.4	4,878.7	3,232.6	3,016.9	7,968.5	26,848.3
2024(f)	2,078.4	4,933.5	3,268.9	3,050.8	8,114.8	26,801.4
2025(f)	2,078.7	4,934.0	3,269.2	3,051.1	8,172.6	26,754.5
2026(f)	2,087.5	4,955.0	3,283.1	3,064.1	8,264.5	26,707.5
2027(f)	2,106.9	5,001.0	3,313.6	3,092.5	8,399.0	26,660.6
2028(f)	2,111.1	5,011.0	3,320.2	3,098.7	8,473.6	26,613.7
2029(f)	2,122.0	5,036.9	3,337.4	3,114.7	8,575.5	26,566.8
2030(f)	2,122.6	5,038.3	3,338.3	3,115.6	8,636.1	26,519.9
2031(f)	2,129.7	5,055.1	3,349.4	3,125.9	8,723.0	26,473.0
2032(f)	2,127.0	5,048.9	3,345.3	3,122.1	8,770.6	26,426.1
2033(f)	2,143.3	5,087.4	3,370.9	3,145.9	8,896.2	26,379.2
2034(f)	2,149.4	5,102.0	3,380.5	3,155.0	8,980.7	26,332.3
2035(f)	2,122.0	5,036.8	3,337.3	3,114.7	8,924.0	26,285.4
2036(f)	2,132.9	5,062.7	3,354.5	3,130.7	9,028.3	26,238.5
2037(f)	2,133.7	5,064.6	3,355.8	3,131.9	9,090.2	26,191.6
2038(f)	2,147.4	5,097.1	3,377.3	3,152.0	9,207.3	26,144.6
2039(f)	2,143.2	5,087.3	3,370.8	3,145.9	9,248.2	26,097.7
2040(f)	2,118.4	5,028.4	3,331.8	3,109.5	9,199.3	26,050.8
2041(f)	2,122.4	5,037.9	3,338.0	3,115.3	9,274.6	26,003.9
2042(f)	2,113.0	5,015.6	3,323.3	3,101.6	9,291.6	25,957.0
2043(f)	2,101.2	4,987.6	3,304.7	3,084.2	9,297.1	25,910.1
2044(f)	2,096.5	4,976.4	3,297.3	3,077.3	9,333.8	25,863.2
2045(f)	2,079.9	4,937.1	3,271.2	3,053.0	9,316.9	25,816.3
2046(f)	2,060.1	4,890.0	3,240.0	3,023.9	9,284.5	25,769.4
2047(f)	2,049.9	4,865.8	3,224.0	3,008.9	9,294.7	25,722.5
2048(f)	2,047.0	4,858.9	3,219.5	3,004.7	9,337.7	25,675.6
2049(f)	2,032.7	4,824.9	3,196.9	2,983.6	9,328.0	25,628.6
2050(f)	2,016.2	4,785.7	3,171.0	2,959.4	9,307.4	25,581.7

註：(f)代表預測年份

3.4.3 商業部門非電力耗能項目之未來溫室氣體排放推估方法

為了與國家溫室氣體排放量接軌，本研究參考經濟部能源局所公告之能源平衡表（節錄如下表表 3-28），分別以迴歸分析的方式推估商業部門各項能源之消耗，其中，電力的部分採用本研究推估之結果之年變化率，由於本研究推估之

結果並不完全等於全國服務業部門的溫室氣體排放量，因此僅採用研究成果每一年與其前一年的年變化率，來推估整體商業部門未來的溫室氣體排放量；而其餘非電力消費的排放，參考《能源平衡表》中的資料，以多項式回歸分析的方法以及具有時間序列特性 ARIMA 模型（Auto regressive Integrated Moving Average model），又稱差分整合移動平均自迴歸模型。ARIMA 模型的精神在於利用時間序列以及使用自身的歷史數據以推估未來自身情況藉以預測未來的趨勢，在只有過去歷史數據的單變數的情形下，使用 ARIMA 模型需使用三種參數，可以表示為 ARIMA (p, d, q)，其中 AR 表示「自回歸」(Auto regressive)，p 為自回歸項數；MA 為「移動平均」(Moving Average Model)，q 為移動平均項數，d 為使之成為平穩序列所做的差分次數（階數）。其中不同能源類別會依據能源消費的統計特性採取不同的預估方式，如液化石油氣採用 ARIMA 模型進行預估，而煤油則採用二次多項式迴歸分析，以求可以符合真實的現況。此部分非電力耗能項目之推估模型由於今年變動不若電力來得大，本計畫直接採用過去所建立之模式（羅時麒，黃國倉 et al. 2020），其推估模型整理如下表 3-29 所示。

表 3-28 經濟部能源局 2018 年公告之能源平衡表之部分節錄

項目		13 原油及石油產品合計	18 液化石油氣	22 車用汽油
83	服務業部門	832,535	109,889	33,501
84	批發及零售業	178,737	1,407	-
85	住宿及餐飲業	109,025	104,011	112
86	運輸服務業	26,643	995	660
87	倉儲業	152	-	-
88	通信業	7887	-	6,205
89	金融保險與不動產業	619	-	579
90	工商服務業	7312	425	5,804
91	社會服務及個人服務業	9415	232	699
92	公共行政業	396,777	3	19,371
93	其他	95,967	2,816	71

表 3-29 其他各能源耗用別之消耗量推估模式

能源耗用類別	消耗量推估模式
液化石油氣	$X_y = 1.600 \times X_{y-1} - 0.601 \times X_{y-2} + \varepsilon_y$
車用無鉛汽油	$X_y = 1.826 \times X_{y-1} - 0.831 \times X_{y-2} + \varepsilon_y$
航空燃油煤油型	$X_y = 1.033 \times X_{y-1} + 0.414 \times X_{y-2} - 0.446 \times X_{y-3} + \varepsilon_y$
煤油	$X_y = 0.770 \times X_{y-1} + 0.962 \times X_{y-2} - 0.778 \times X_{y-3} + \varepsilon_y$
柴油	$X_y = 1.313 \times X_{y-1} + 0.310 \times X_{y-2} - 0.624 \times X_{y-3} + \varepsilon_y$
燃料油	$X_y = 1.561 \times X_{y-1} - 1.001 \times X_{y-2} + 1.194 \times X_{y-3} - 0.797 \times X_{y-4} + \varepsilon_y$ 當 $y > 2021$ 時 $X_y = 0$
自產天然氣	$X_y = 1.82627 \times X_{y-1} - 0.82884 \times X_{y-2}$
進口液化天然氣	$X_y = 1.92 \times X_{y-1} - 0.494 \times X_{y-2} + \varepsilon_y$
其中：X 表為各能源耗用別之消耗量，單位為公升，下標 y-1 表示前一期，下標 y-2 表示前兩期，末項 ε 表示殘差值，下標 y 為當年度。	

(資料來源：(羅時麒, 黃國倉 et al. 2020))

第四章 住商部門溫室氣體排放量預測與滾動式修正

本章藉由第三章所建立之推估法，分別推估與探討住宅與商業部門之溫室氣體排放量。由於空調系統之耗能受外界氣候之影響，由去年之研究成果得知在氣候變遷下，不論北、中、南氣候區，隨著氣候變遷的影響下逐年的全年冷房度時(CDH₂₃)平均將以全台每年約 117.31 (°C·hr)微幅增加，或平均而言 2035 年之 CDH₂₃會較 2000 年時多約 17.3%，意味著未來空調耗能量亦將隨之成長。以下分別說明住宅與商業建築溫室氣體排放量基線之推估結果與變化趨勢。

第一節 住宅溫室氣體排放量預測結果

由於在進行住宅部門的溫室氣體的推估之前必須先將住宅的面積估算出來，由 3.2.1 節的推估方法，本研究透過未來人均 GDP 及聯合國人居署全所統計的模式推得人均居住面積，再配合國發會的人口推估即可得之未來住宅面積的成長趨勢，由圖 4-1 可知未來人均 GDP 不斷上升，導致未來人均居住面積增加，本研究在未來人口的推估上採用國發會的中推估，中推估情境之全國人口於 2021 年至 2022 年達到高峰（圖 4-2），即便人口數在 2022 年之後開始下降，由於人均 GDP 的上升導致住宅面積推估仍呈增加之趨勢，如圖 4-3 所示。

由以上的住宅面積以及過去和未來的氣象資料，利用EnergyPlus電腦動態模擬計算出之各區域逐年空調耗能量，再利用第三章第二節提到的各項耗能項目的計算公式，可得到各耗能項目的耗電分布如下圖 4-5。基本上全國之住宅總體耗能量是向上增長的，平均每年以 4.7×10^8 (kWh/yr) 或相當於每年以 1.0% 之幅度增加。圖中住宅中各耗能項目的耗電量占比（不含瓦斯、天然氣），顯示住宅部門中最耗電的項目為空調及照明，由於每年的氣候條件不盡相同，因此空調也會隨著氣候條件起伏，因此有時照明耗電會略高於空調耗電，而隨著住宅面積增加，整體住宅的耗電量為逐年上升，從 2000 年至 2035 年的成長趨勢為約 56.5%，其中，空調耗電量成長了 82.1%，照明耗電成長了 15.7%，家電耗電成長了 77.4%，熱水耗電成長了 14.8%，烹飪耗電成長了 36.3%。從 2000 年至 2050 年的成長趨勢為約 56.5%，其中，空調耗電量成長了 82.1%，照明耗電成長了 15.7%，家電耗電成長了 77.4%，熱水耗電成長了 14.8%，烹飪耗電成長了 36.3%。

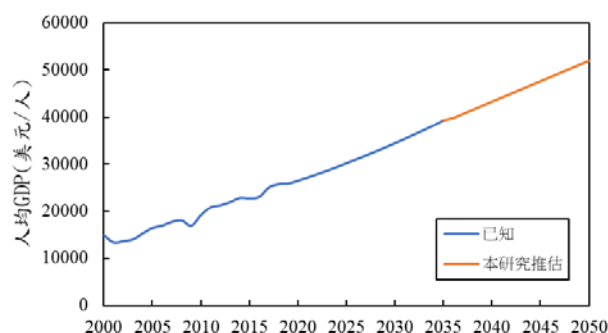


圖 4-1 人均 GDP 成長趨勢

（資料來源：(中華民國統計資訊網，陳政弘 2018)，本研究繪製）

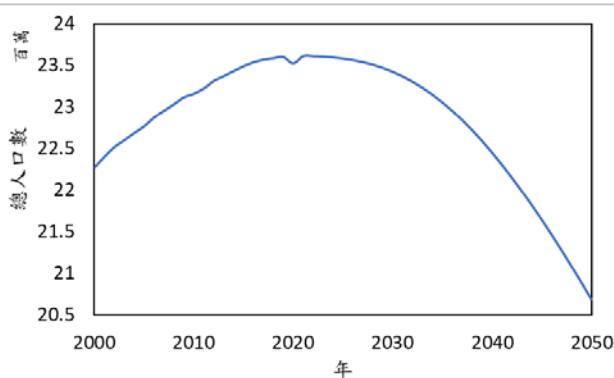


圖 4-2 國家未來人口中推估

（資料來源：（內政部戶政司全球資訊網，國家發展委員會 2018））

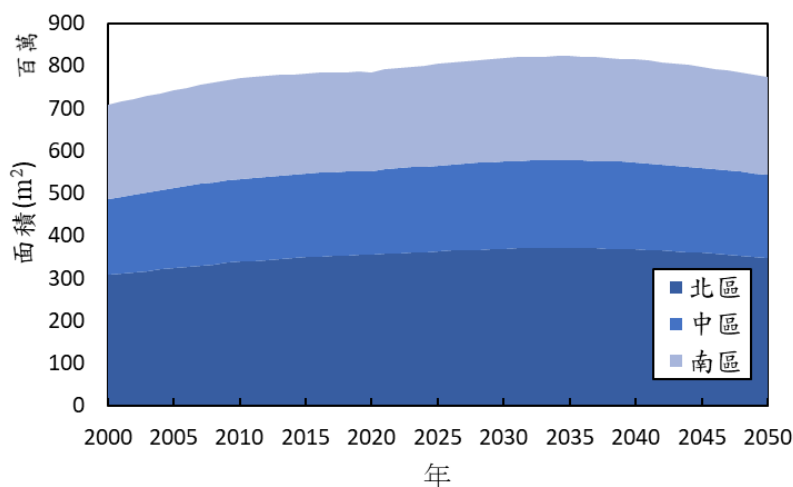


圖 4-3 各區住宅面積推估圖（以人口中推估計算）

（資料來源：本研究繪製）

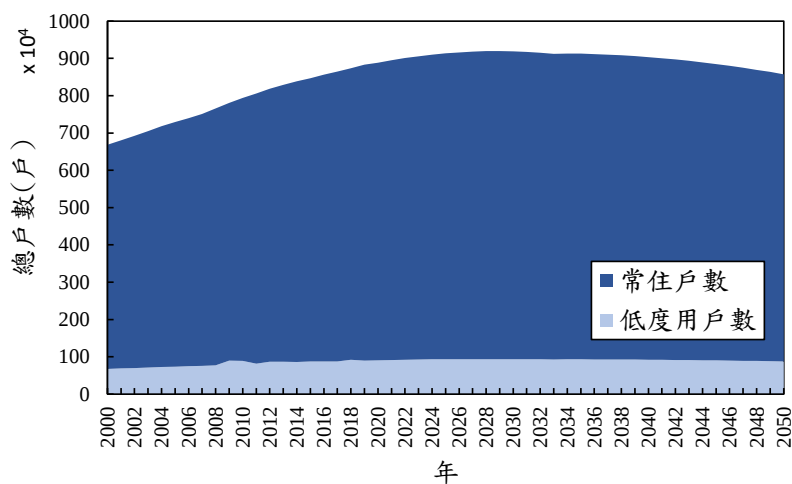


圖 4-4 全國未來戶數推估

（資料來源：本研究繪製）

而全國的瓦斯及自來水的成長趨勢如圖 4-6 所示，由於未來人口數在 2020 年至 2027 年達到最高峰，也就是說在 2028 年以後國家人口逐漸減少，造成瓦斯

與自來水的使用人數逐漸減少，直接影響住宅部門在瓦斯與自來水的消耗量，由圖中可知，來自自來水之碳排放在 2022 年達到使用高峰，而使用瓦斯之碳排放則在 2029 年才達到使用高峰。

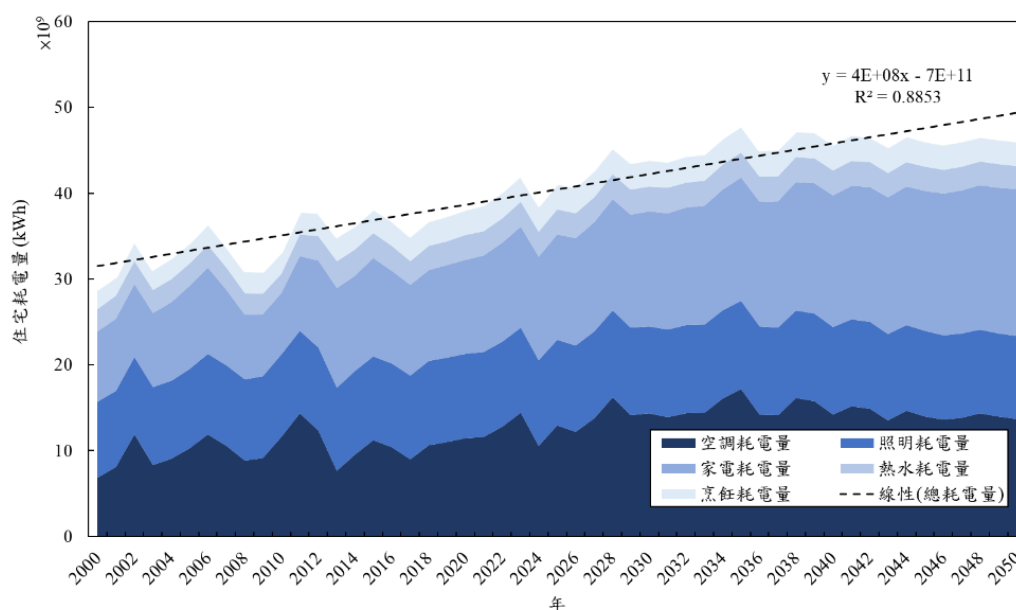


圖 4-5 住宅各耗電項目耗電量未來推估

(資料來源：本研究繪製)

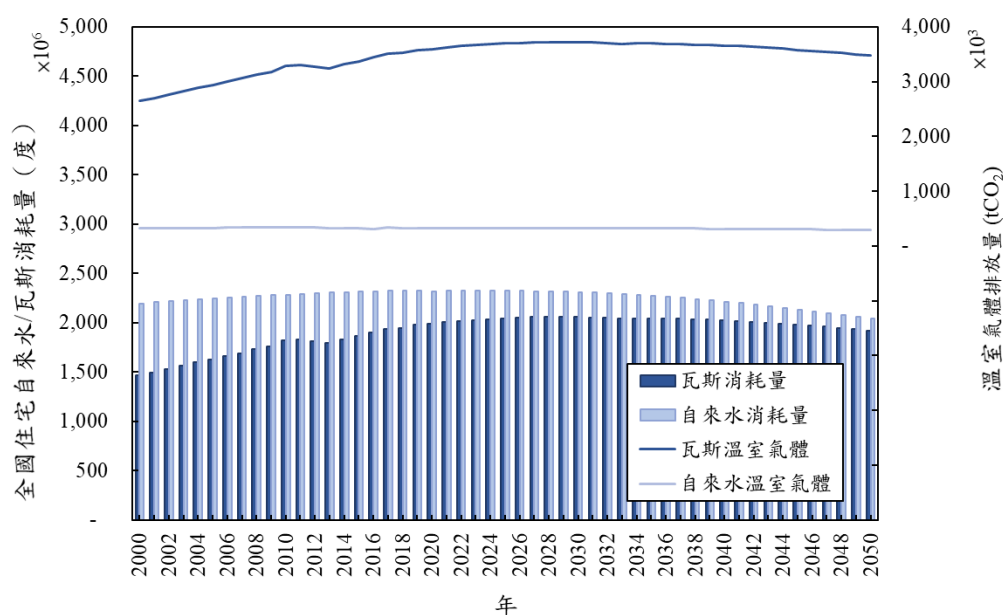


圖 4-6 全國住宅瓦斯與自來水耗能量與溫室氣體排放趨勢

(資料來源：本研究繪製)

表 4-1 全國住宅瓦斯與自來水耗能量

全國住宅瓦斯與自來水消耗量與溫室氣體排放量推估				
年份	瓦斯消耗量	瓦斯溫室氣體	自來水消耗量	自來水溫室氣體
單位	度	tCO ₂ e	度	tCO ₂ e

2000	1,470,038,268	2,658,394	2,196,479,859	325,890
2001	1,496,570,607	2,706,374	2,209,189,005	327,977
2002	1,529,173,506	2,765,333	2,220,548,514	329,671
2003	1,561,844,349	2,824,414	2,228,808,630	331,064
2004	1,598,043,893	2,889,877	2,237,147,429	332,382
2005	1,630,059,645	2,947,774	2,245,159,764	333,671
2006	1,659,806,644	3,001,568	2,255,625,562	335,138
2007	1,692,803,695	3,061,239	2,263,694,296	336,396
2008	1,731,805,118	3,131,769	2,271,451,257	337,618
2009	1,761,751,274	3,185,923	2,279,609,519	338,983
2010	1,821,616,366	3,294,182	2,283,785,328	343,232
2011	1,831,130,513	3,311,387	2,289,976,323	340,103
2012	1,810,585,738	3,274,234	2,298,940,049	335,621
2013	1,794,939,090	3,245,939	2,304,628,776	321,230
2014	1,833,976,322	3,316,533	2,310,568,046	320,075
2015	1,866,046,066	3,374,528	2,316,318,496	319,030
2016	1,903,544,348	3,442,339	2,321,025,858	315,995
2017	1,939,733,118	3,507,782	2,324,122,982	335,652
2018	1,949,313,615	3,525,108	2,325,868,695	332,218
2019	1,979,840,082	3,580,311	2,327,267,731	332,583
2020	1,990,805,357	3,600,141	2,319,626,428	331,491
2021	2,005,245,736	3,626,254	2,328,340,400	332,736
2022	2,018,092,060	3,649,485	2,328,340,400	332,736
2023	2,029,299,291	3,669,752	2,327,847,400	332,666
2024	2,036,532,066	3,682,832	2,326,861,400	332,525
2025	2,046,628,866	3,701,091	2,325,481,000	332,328
2026	2,052,755,243	3,712,170	2,323,607,600	332,060
2027	2,057,143,039	3,720,105	2,321,241,200	331,722
2028	2,059,678,648	3,724,690	2,318,184,600	331,285
2029	2,060,300,226	3,725,814	2,314,339,200	330,735
2030	2,058,997,690	3,723,458	2,309,803,600	330,087
2031	2,055,751,322	3,717,588	2,304,282,000	329,298
2032	2,050,562,017	3,708,204	2,298,070,200	328,410
2033	2,043,435,827	3,695,317	2,290,872,400	327,382
2034	2,045,213,049	3,698,531	2,282,787,200	326,226
2035	2,046,117,384	3,700,166	2,273,617,400	324,916
2036	2,041,488,648	3,691,795	2,263,560,200	323,479
2037	2,038,774,522	3,686,887	2,252,517,000	321,901
2038	2,035,031,853	3,680,119	2,240,586,400	320,196
2039	2,030,350,735	3,671,654	2,227,867,000	318,378
2040	2,024,551,818	3,661,167	2,214,161,600	316,419
2041	2,017,815,023	3,648,984	2,199,667,400	314,348
2042	2,010,231,734	3,635,271	2,184,483,000	312,178
2043	2,001,712,271	3,619,864	2,168,509,800	309,895
2044	1,992,439,556	3,603,096	2,151,945,000	307,528
2045	1,982,415,428	3,584,968	2,134,788,600	305,076
2046	1,971,549,726	3,565,319	2,116,942,000	302,526
2047	1,960,027,352	3,544,482	2,098,602,400	299,905

2048	1,947,665,759	3,522,128	2,079,572,600	297,186
2049	1,934,743,213	3,498,759	2,060,148,400	294,410
2050	1,921,169,471	3,474,212	2,040,231,200	291,563

(資料來源：本研究整理)

由於住宅部門主要使用的能源為電力，因此在評估住宅部門溫室氣體排放時，須考慮電力排碳係數，此係數參考經濟部能源局的公告，而最新的資料顯示民國 107 年度的電力排碳係數為 0.533 kgCO₂e/度(經濟部能源局 2019)，此後推估由於發電結構之改變預測之電力排碳係數將逐年降低，參考能源部門溫室氣體排放管制行動方案(第一期階段)核定本(經濟部 2018)的資料，如下圖 4-7。

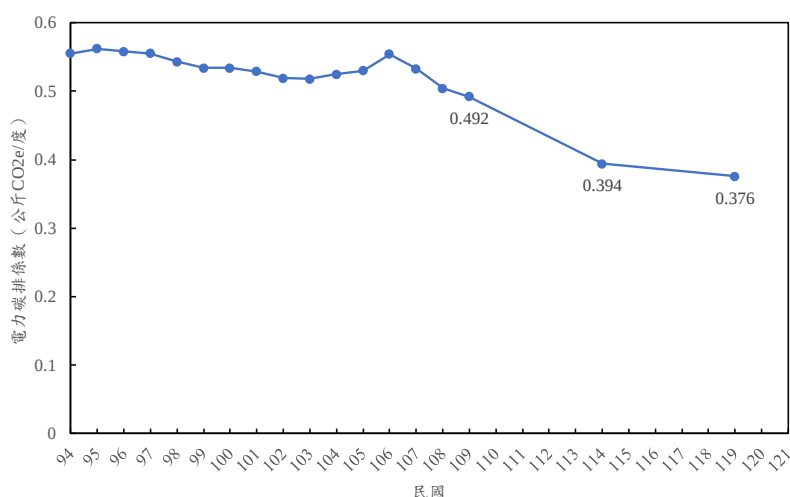


圖 4-7 電力排碳係數成長趨勢

(參考資料：(經濟部 2018, 經濟部能源局 2019))

今以能源局所預測在台灣未來發電結構改變後之電力排碳係數，以及人口數變化依國發會之中推估計算未來住宅部門之逐年溫室氣體排放量，其結果如圖 4-8 所示。圖中在未來氣候之部分，分別以氣候變遷情境RCP2.6、RCP4.5與RCP8.5分別代表未來氣候之低、中、高推估來表示。發現無論是哪一未來氣候情境下，雖總耗能增加，但電力發電結構改變下，總體溫室氣體排放量呈微幅下降之趨勢。如果，在不考慮未來發電結構改變對未來電力碳排放係數之影響，以現今最新 2018 年所公告之電力排碳係數為 0.533 (kgCO₂e/度)計算時，其結果如圖 4-9，未來住宅部門之溫室氣體排放則呈現增加之趨勢。

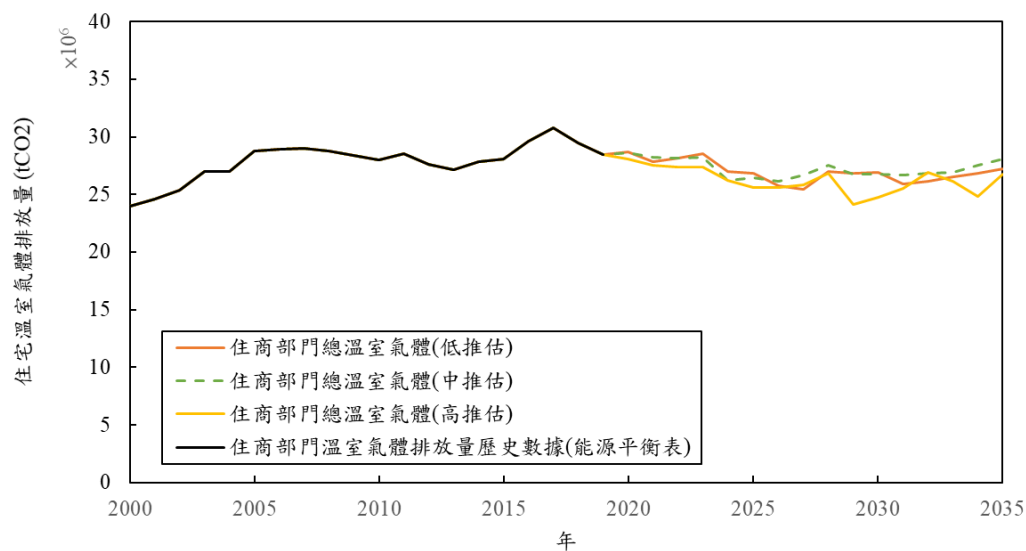


圖 4-8 全國住宅部門逐年溫室氣體排放量推估(未來以人口中推估且考量能源結構改變之情境)

(資料來源：本研究繪製)

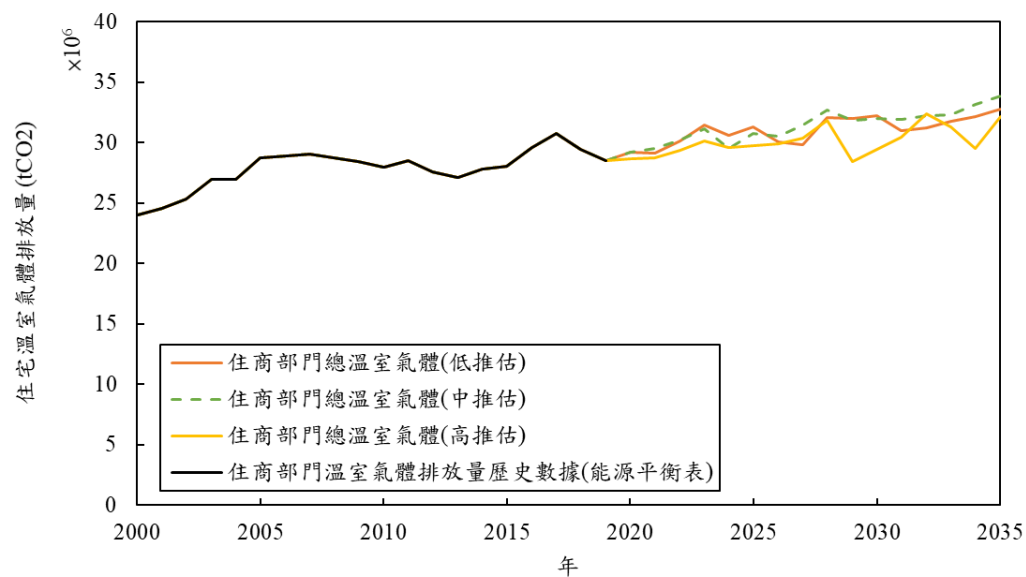


圖 4-9 住宅溫室氣體推估 (未來以人口中推估且考量能源結構不變之情境)

(資料來源：本研究整理)

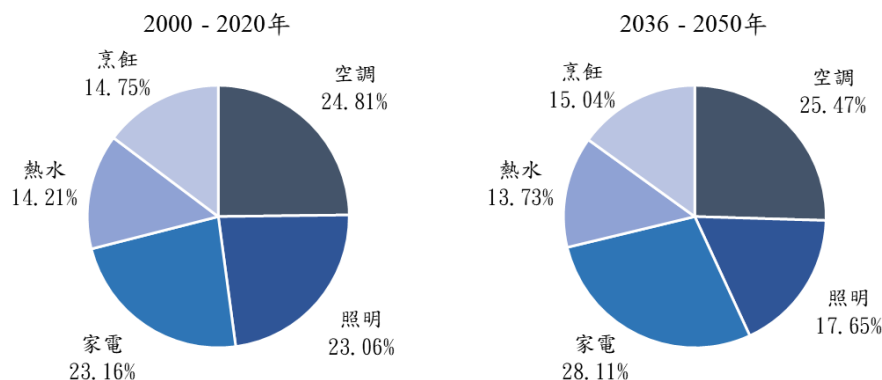


圖 4-10 住宅各耗能項目溫室氣體排放量占比（以氣候中推估計算）

（資料來源：本研究繪製）

第二節 商業溫室氣體排放量預測結果

藉由第三章的方法，可以得到商業建築空調、照明與事務設備系統三項之主要逐年耗能量，再利用商業大樓各耗能項目的比例，推得其餘耗電項目的耗電量。最後再將各能源分別乘上溫室氣體排放係數即可得到商業大樓的溫室氣體排放量，電力排碳係數參考表 3-1 和圖 4-7，自來水用水之溫室氣體排放係數則參考台灣自來水公司公告之排放係數計算。未來商業面積若已 2020 年之商業樓地板面積成長則依與住宅全國面積一定之比例推估其樓地板面積增加率，如圖 4-11。目前可取得歷年辦公面積只能追溯到 2006 年，因此 2000 年至 2005 年之商業樓地板面積使用 2006 年之比例。圖 4-12 為氣候變遷中推估下的商業未來耗電量推估堆疊圖，由圖可得自從 2000 年至 2035 年，商業大樓之總耗電量增加了 15.68%，其中空調設備增加了 5.24%，照明設備增加了 17.49%，事務設備 17.49%，其餘設備則增加了 32.83%。另外，由於未來商業部門樓地板面積漸少，2000 年至 2050 年，商業部門之總耗電量增加了 14.68%。

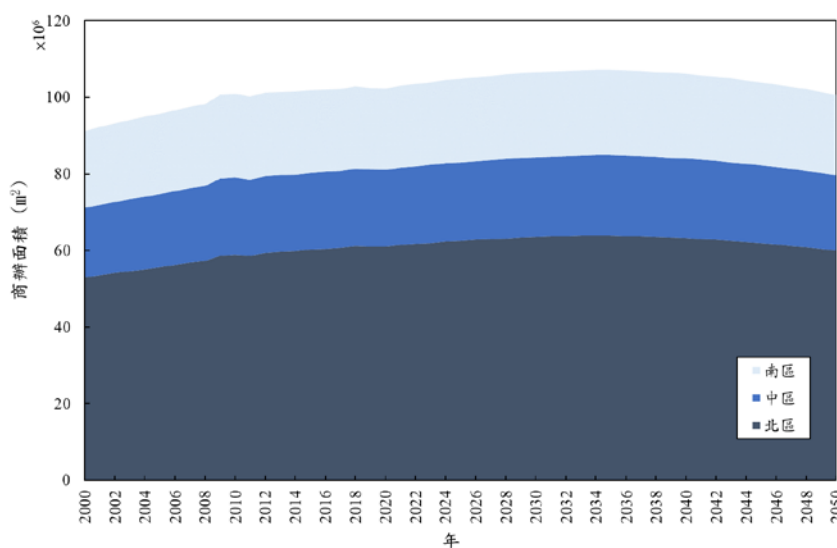


圖 4-11 逐年商業建築樓地板面積推估

(資料來源：本研究繪製)

而逐年溫室氣體排放量推估方面，如未來人口之成長以中推估估計，且同時考量國家發電結構改變之情境下，未來逐年之電力碳排放係數逐年降低。全國商業之逐年溫室氣體排放趨勢如圖 4-13 中下方曲線所示，呈現下降之趨勢。值得注意的是，去年(2020 年)住商部門用電大幅下降之緣故。倘不考慮未來我國之發電結構改變導致電力排碳係數下降之情況，則整體商業建築逐年之溫室氣體排放量則如圖 4-13 中上方曲線所示，未來逐年呈現緩步上升。

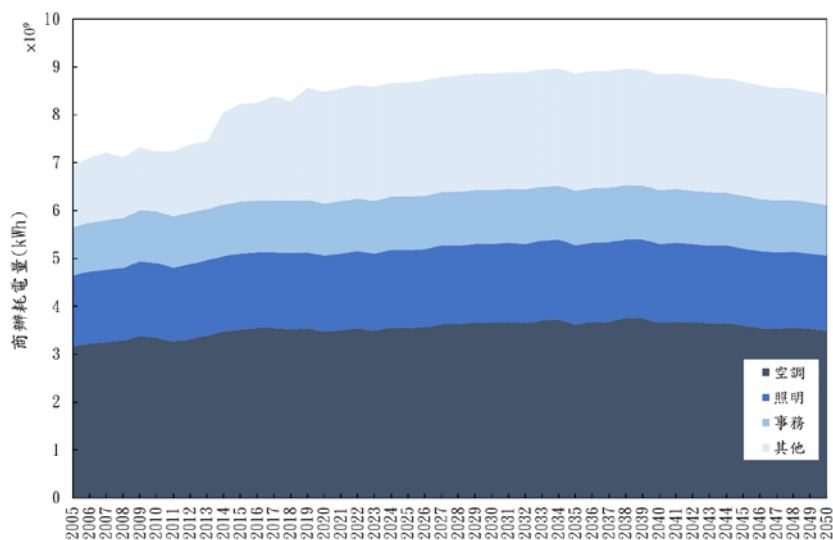


圖 4-12 商業空調、照明、事務設備及其餘設備耗電量推估

(資料來源：本研究整理)

(資料來源：本研究整理)

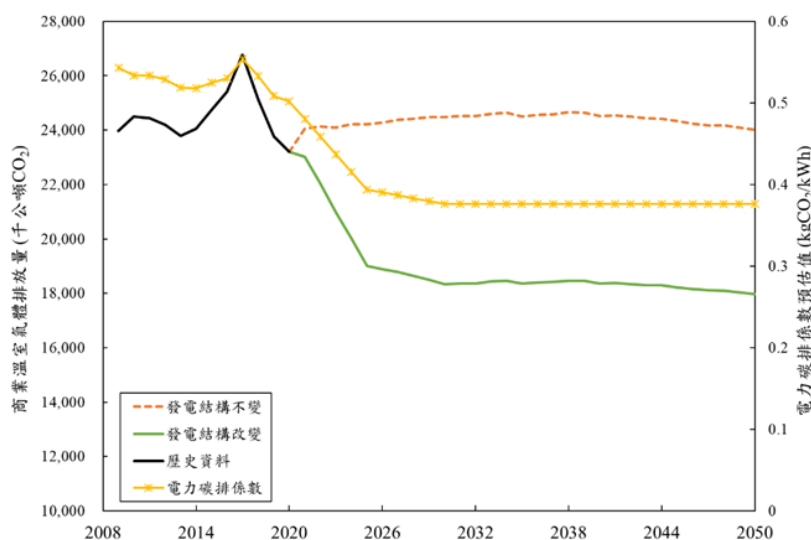


圖 4-13 商業建築逐年溫室氣體排放量推估

(資料來源：本研究整理)

第五章 我國住商部門減碳配額分析

第一節 我國住商部門減碳配額分析

我國「溫室氣體減量及管理法」的減量目標中定立長期目標為 2050 年碳排放減量至 2005 基準年的 50%，政府部門亦應開始檢討過去的減碳目標成效以及訂立下一期的溫室氣體減量目標以及減碳額度的核配。政府部門間的核配額度訂立應以具有科學根據的溫室氣體排放量預估作為基礎，本研究的研究目的之一即為利用國際能源總署提出的「由下而上」的推估方式進行住商部門未來幾年之內溫室氣體排放量的預測，以作為未來減碳額度在各個政府部門之間協調的基礎。

在此之下，本研究分別針對住宅部門以及商業部門進行推估，以下簡述推估方式以理解本研究的研究方法以及科學根據。

步驟一：統計歷史能源消耗量。

參考 2005-2020 服務業部門與住宅部門之能源平衡表，其中能源消耗項目包含液化石油氣、車用汽油、航空燃油、煤油、柴油、燃料油、天然氣、液化天然氣、電力。

步驟二：推估未來能源消耗量。

除電力外，均參考步驟一之歷史資料以時間序列迴歸分析，未來電力消耗量之推估則參考服務業與住宅部門年耗電量變化率之趨勢修正後推得。由於透過「能源平衡表」以逐項能源消耗量合計得之溫室氣體排放數據與由能源局公告之「我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析」統計資料比對後，發現略有微小差異，因此本研究依下點所述之方式進行修正，以推估未來之溫室氣體排放量，更符合真實排放之情況。

步驟三：計算未來溫室氣體排放變化率。

將以上之各項能源依照其各自之排放係數換算溫室氣體排放量。其中，電力排放係數方面區分為二種情境來推估：其一為假設發電結構於未來改變下（改變之數值採用能源局所公告之預估數據），導致電力排放係數逐年下降之情境；其二為發電結構維持現況下，電力排放係數以 2020 年之值據以推估至未來。依上述二情境，分別計算未來溫室氣體之年變化率，以推估未來之溫室氣體排放量。

步驟四：推估未來溫室氣體排放量。

以經濟部能源局「我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析」之歷史統計資料為基礎，參考步驟三之未來溫室氣體年變化率，推算出未來服務業與住宅部門之溫室氣體排放量。

本研究針對住商部門的溫室氣體排放量經去年(109 年)所公告之溫室氣體排放實際值修正後的碳排基線推估結果如圖 5-1 所示，其中縱軸表示二氧化碳排放當量，以千公噸碳當量為單位。2020 年以前之排放量數據參考「我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析」之統計數據，而未來之溫室氣體排放量預估分為兩

種情境，如步驟三所述，較高的預估歷線為發電結構不變的情形下之溫室氣體排放量，而較低的預估歷線則為電力排放係數依照能源局之規畫預測下的情境。而虛線則表示依照既有住商部門的減碳目標，依照該核配之減碳額度，至 2025 年時需減碳至 41,421 千公噸碳當量，相當於需較 2005 年減碳 27.9%。

今年度則滾動更新了基線之預測量，如圖 5-1。由於 2020 年依公告所統計得之住商部門年總溫室氣體總量為 55,638 千公噸碳當量，相較於前一年度(2019 年)之 58,282 千公噸碳當量(如圖 5-2)則下降了 4.5%，因此往後各年之排碳推估 BAU 亦隨之調整，至 2025 年時，依電力碳排放係數在維持不變以 0.509 kgCO₂e/kWh(108 年度最新公告值)推算以及隨我國發電結構逐漸轉型分別推算下，預估住商部門之總溫室氣體排放量將分別降為 58,985 與 47,408 千公噸碳當量。與現階段所訂的第二階段管制目標至 2025 年之分配排放額度分別仍有 17,564 與 5,987 千公噸碳當量之減碳缺口，尚須進一步分別再減碳 30.6%與 10.4%¹。意即排除電力碳排放係數下降所導致之溫室氣體減少量外，額外住商部門本身需再減量 10.4%，有待住商部門之主管機關在未來提出更具積極性的減碳策略。

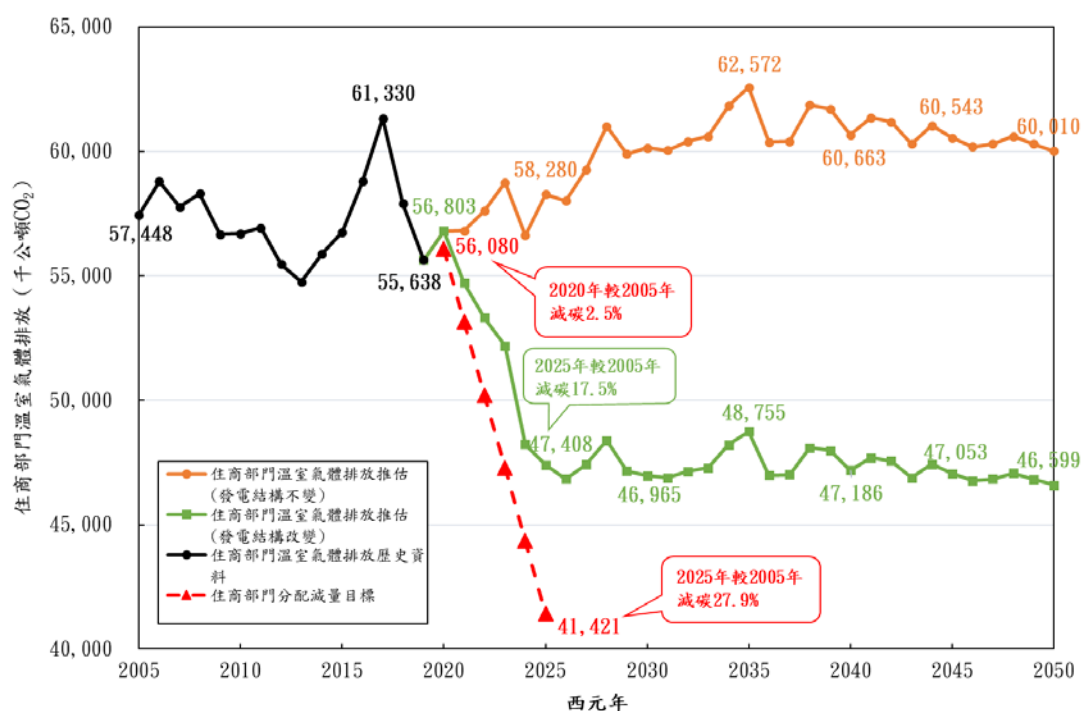


圖 5-1 住商部門溫室氣體未來排放基線預測與核配減碳目標之比較(2021 更新)

(資料來源：本研究整理)

¹ 比例之計算係各依於 2025 年當年度之溫室氣體基線換算。

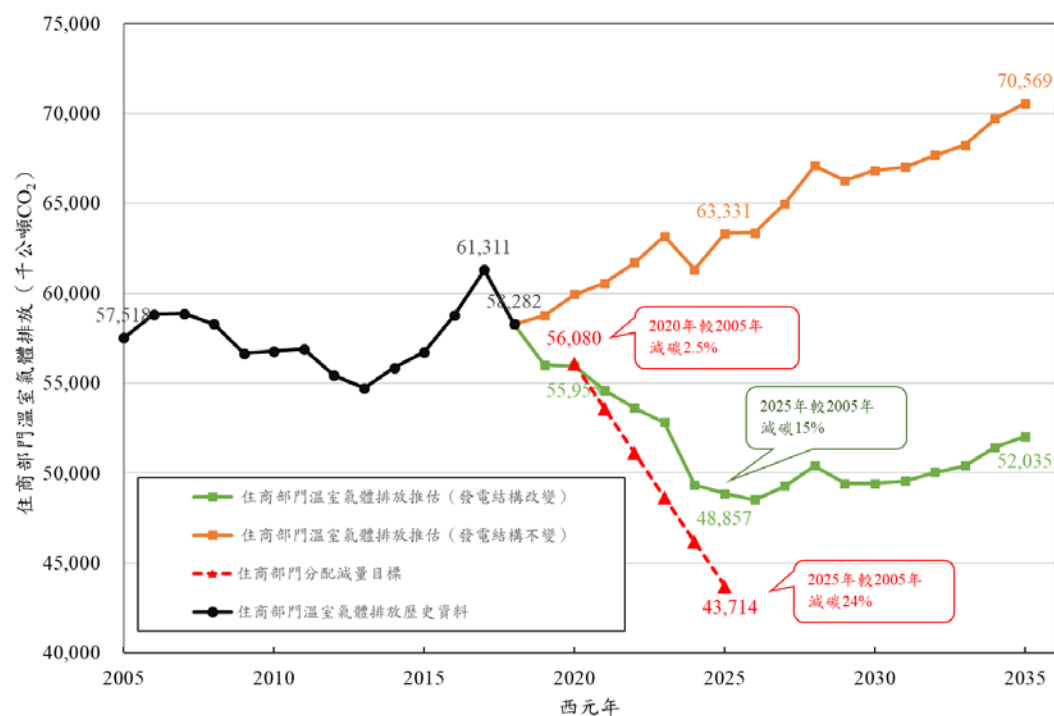


圖 5-2 去年(109 年度)住商部門溫室氣體未來排放基線預估

(資料來源：(羅時麒, 黃國倉 et al. 2020))

表 5-1 歷年與未來逐年住商部門之預估總碳排放量一覽表

年份	住宅部門 (發電結構改變)	住宅部門 (發電結構不變)	商業部門 (發電結構改變)	商業部門 (發電結構不變)	住商部門 (發電結構改變)	住商部門 (發電結構不變)
單位	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e
2005	28.739		28.710		57.448	
2006	28.904		29.888		58.792	
2007	29.029		28.739		57.769	
2008	28.741		29.566		58.307	
2009	28.415		28.247		56.662	
2010	27.968		28.730		56.698	
2011	28.544		28.377		56.921	
2012	27.582		27.880		55.462	
2013	27.115		27.638		54.753	
2014	27.845		28.036		55.880	
2015	28.046		28.710		56.756	
2016	29.635		29.156		58.791	
2017	30.778		30.552		61.330	
2018	29.463		28.437		57.900	
2019	28.495		27.143		55.638	
2020(f)	30.128	30.128	26.676	26.676	56.803	56.803
2021(f)	28.800	29.861	25.916	26.950	54.716	56.812
2022(f)	28.642	30.847	24.686	26.763	53.328	57.610
2023(f)	28.647	32.114	23.530	26.641	52.177	58.755
2024(f)	25.649	29.885	22.574	26.743	48.223	56.628
2025(f)	25.947	31.607	21.461	26.673	47.408	58.280
2026(f)	25.550	31.334	21.287	26.684	46.837	58.018

2027(f)	26.296	32.541	21.128	26.723	47.423	59.264
2028(f)	27.421	34.268	20.965	26.741	48.385	61.010
2029(f)	26.344	33.118	20.815	26.782	47.159	59.901
2030(f)	26.327	33.363	20.638	26.783	46.965	60.146
2031(f)	26.226	33.231	20.650	26.806	46.876	60.037
2032(f)	26.510	33.615	20.635	26.789	47.145	60.404
2033(f)	26.604	33.746	20.686	26.862	47.290	60.609
2034(f)	27.503	34.945	20.705	26.892	48.208	61.836
2035(f)	28.172	35.838	20.583	26.734	48.755	62.572
2036(f)	26.814	34.028	20.176	26.343	46.989	60.371
2037(f)	26.839	34.063	20.169	26.339	47.008	60.402
2038(f)	27.872	35.447	20.221	26.410	48.093	61.857
2039(f)	27.782	35.330	20.194	26.379	47.976	61.709
2040(f)	27.096	34.420	20.090	26.243	47.186	60.663
2041(f)	27.600	35.097	20.095	26.255	47.695	61.353
2042(f)	27.505	34.978	20.053	26.201	47.558	61.179
2043(f)	26.896	34.172	19.993	26.127	46.889	60.299
2044(f)	27.463	34.937	19.969	26.098	47.432	61.035
2045(f)	27.163	34.545	19.890	25.997	47.053	60.543
2046(f)	26.970	34.297	19.803	25.885	46.773	60.182
2047(f)	27.096	34.475	19.750	25.818	46.846	60.293
2048(f)	27.342	34.814	19.732	25.797	47.073	60.611
2049(f)	27.165	34.589	19.661	25.708	46.826	60.297
2050(f)	27.013	34.398	19.586	25.611	46.599	60.010

註：(f)代表預測的年份

(資料來源：歷史資料來源為能源局、未來推估資料為本研究推估)

第二節 住商部門電動車分析及策略彙整

為了減少碳排放與污染的問題，全面禁止燃油車是各國永續發展的目標之一。本節將探討電動車對住商部門之耗能推估，以自用小客車之插電式電動汽車為推估的主要對象，涵蓋項目為安裝在住宅或商辦停車場內的充電樁，因此使用族群設定為自用小客車，此模型將排除建置露天停車場之公用充電樁。本研究利用工研院預設純電動車占比與自用小客車總量求得逐年電動汽車之台數，但尚無資料預測未來自用小客車之總存量，因此本研究利用 2005 至 2021 年歷史自用小客車總量(交通部 2021)線性推估未來自用小客車台數，如圖 5-3。

由於工研院 TIME 模型對未來電動汽車各項推估如表 5-2 所示，是以五年設定一目標，但本研究為了推估逐年電動汽車對住商部門之影響，因此利用內插法以滿足推估需求，其結果如圖 5-4 與圖 5-5 所示。

表 5-2 工研院 TIME 模型對未來純電動車之各階段推估

年	存量占比 (%)	技術效率 (km/kWh)
2017	0.01	4.87
2025 (積極)	1.70	-
2030 (積極)	4.89	-
2035 (積極)	8.64	6.40

參考資料：(李孟穎；工業技術研究院 2018)

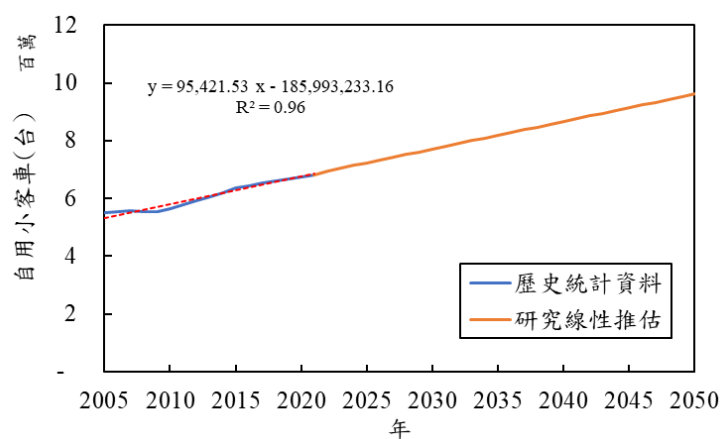


圖 5-3 總自用小客車之歷史與未來推估

(資料來源：(交通部 2021), 本研究推估)

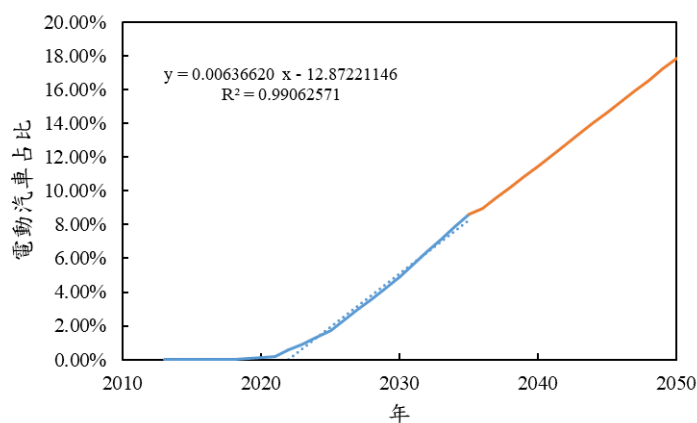


圖 5-4 電動汽車之逐年占比推估

(資料來源：(李孟穎；工業技術研究院 2018), 本研究推估)

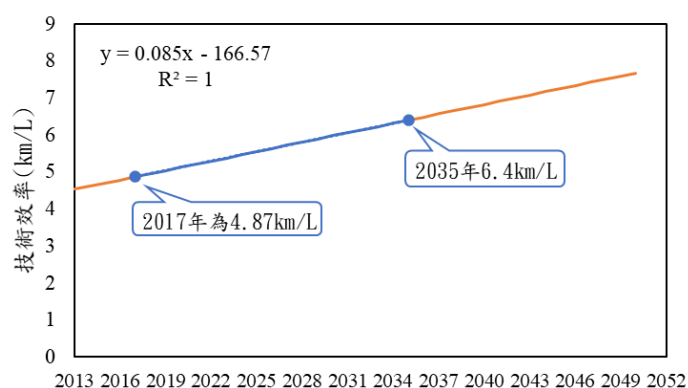


圖 5-5 電動汽車之逐年技術效能推估

(資料來源：(李孟穎；工業技術研究院 2018), 本研究推估)

以下為本研究推估逐年電動汽車之溫室氣體排放量推估所使用的公式，首先計算出逐年自用小客車之電動汽車數量，如式 5-3：

$$\text{台數}_{EV, yr} = \text{自用小客車總量}_{yr} \times \text{電動汽車占比}_{yr} \quad \text{式 5-1}$$

其中，台數 $_{EV, yr}$ 為第 yr 年自用小客車類之電動汽車總台數代入(交通部 2021)；自用小客車總量 $_{yr}$ 是由歷史與推估值取得代入(交通部 2021)，如圖 5-3；電動車占比 $_{yr}$ 為第 yr 年純電動汽車於總自用小客車之占比代入(李孟穎；工業技術研究院 2018)。

再者，影響住商部門的電動汽車只包含設置於商業大樓以及社區停車場等私用充電樁，然而經濟部截至 2021 年三月統計公共充電樁為 2944 個(經濟部 2021)。另外，社區充電樁目前尚無詳細計算充電樁數，但根據樂居房價網之統計已裝置充電裝的社區數量估計下，暫定平均一個社區皆有一支充電樁，總數為 1703 個。由此可計算出 2021 年住商部門之充電樁占總充電樁之比例，如式 5-2：

$$\sigma_{yr} = \text{充電樁}_{\text{住商}} / \text{充電樁}_{\text{Total}} \quad \text{式 5-2}$$

其中， σ 為 2021 年社區與商業建築內部建置充電樁之占總充電樁之比例以 0.3665 代入，因該年總充電樁為 4647 個，其中住商充電樁為 1703 個。

最後住商部門之電動汽車總溫室氣體由式 5-4 求得：

$$\text{GHG}_{\text{住商部門}, EV, yr} = \text{台數}_{EV, yr} \times \text{年行駛距離} \times \text{技術效率} \times \beta_{1, yr} \times \sigma_{2021} \quad \text{式 5-3}$$

其中， $\text{GHG}_{\text{住商部門}, EV, yr}$ 為第 yr 年住商部門電動汽車之總溫室氣體排放量， $\beta_{1, yr}$ 為第 yr 年電力排放係數(kgCO₂e/kWh)，年行駛距離此處以 12,176 (km) 代入(李孟穎；工業技術研究院 2018)，技術效率為第 yr 年電動汽車技術效率(km/kWh)代入(Energy 2017)。

表 5-3 歷年與未來逐年住商部門電動汽車之預估總碳排放量一覽表

年	自用小客車	純電動汽車	溫室氣體排放之發電結構	
			改變	不變
單位	台	台	tCO ₂ e	tCO ₂ e
2013	6,046,599	115	59	
2014	6,205,246	153	77	
2015	6,365,190	240	120	
2016	6,453,083	286	141	
2017	6,542,685	779	395	
2018	6,617,429	1,152	553	
2019	6,685,641	3,597	1,621	
2020	6,749,381	8,487	3,636	3,710
2021(f)	6,822,566	11,999	4,855	5,159
2022(f)	6,949,101	38,700	14,768	16,373
2023(f)	7,044,522	66,073	23,742	27,512
2024(f)	7,139,944	94,174	31,805	38,603
2025(f)	7,235,365	123,001	38,966	49,648
2026(f)	7,330,787	171,394	52,989	68,137
2027(f)	7,426,208	221,004	66,691	86,554
2028(f)	7,521,630	271,832	80,076	104,901
2029(f)	7,617,051	323,877	93,147	123,182
2030(f)	7,712,473	377,140	105,909	141,399
2031(f)	7,807,894	440,365	121,929	162,788
2032(f)	7,903,316	505,022	137,897	184,107
2033(f)	7,998,737	571,110	153,815	205,359
2034(f)	8,094,159	638,629	169,684	226,547
2035(f)	8,189,580	707,580	185,508	247,672
2036(f)	8,285,002	740,445	191,580	255,779

2037(f)	8,380,423	802,324	204,904	273,569
2038(f)	8,475,845	865,419	218,195	291,314
2039(f)	8,571,267	929,728	231,453	309,014
2040(f)	8,666,688	995,252	244,679	326,673
2041(f)	8,762,110	1,061,992	257,875	344,291
2042(f)	8,857,531	1,129,946	271,042	361,870
2043(f)	8,952,953	1,199,115	284,180	379,411
2044(f)	9,048,374	1,269,499	297,292	396,916
2045(f)	9,143,796	1,341,098	310,377	414,386
2046(f)	9,239,217	1,413,912	323,436	431,822
2047(f)	9,334,639	1,487,941	336,471	449,225
2048(f)	9,430,060	1,563,185	349,483	466,597
2049(f)	9,525,482	1,639,643	362,472	483,938
2050(f)	9,620,903	1,717,317	375,438	501,250

(資料來源：(李孟穎；工業技術研究院 2018，經濟部能源局 2019，交通部 2021),本研究推估)

將逐年電動汽車之溫室氣體排放增加至住商部門溫室氣體排放基線之預測量，如圖 5-6。由於過去電動汽車尚未納入住商部門之溫室氣體排放量內計算，因此本研究暫定 2021 年為增加起始年使往後各年之排碳推估 BAU 亦隨之調整。預估 2025 年住商部門之總溫室氣體排放量分別降為 58,330 與 47,447 千公噸碳當量。與現階段所訂的第二階段管制目標至 2025 年之分配排放額度分別仍有 16,909 與 6,026 千公噸碳當量之減碳缺口，尚須進一步分別再減碳 29.4%與 10.5%，此時電動汽車占總自用小客車總量為 1.7%。另外，有鑑於未來電動汽車的數量大幅提升，導致住商部門溫室氣體排放量增加之問題，自 2035 年後即使發電結構改變仍無法抑制溫室氣體增加，更超越 2020 年溫室氣體管制目標為 56,354 千公噸碳當量。而 2050 年住商部門之總溫室氣體排放量分別為 60,511 與 46,975 千公噸碳當量，與現階段所訂的第二階段管制目標至 2025 年之分配排放額度之缺口分別需再減碳 61.1%與 37.6%，此時(2050 年)電動汽車占自用小客車總量將增至 17.85%。

下圖 5-6 為未來逐年因計入電動車之充電而導致住商部門耗電總量增加之情形，圖中同時顯示了未來各年隨著電動車愈趨普及下，其耗能佔住商總耗能之比例預估。現今之電動車之比例還甚低僅約 0.17%，而至 2050 年時電動車逐漸增加下，其充電樁之耗能將在住商用電中約占 0.94%。

表 5-4 歷年與未來逐年住商部門之預估總碳排放量一覽表(加上電動車耗能)

住商部門溫室氣體排放推估				
年	發電結構改變		發電結構不變	
	原始 GHG	GHG 加電動汽車	原始 GHG	GHG 加電動汽車
單位	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e
2020	56.803	55.843	56.803	56.807
2021(f)	54.716	53.944	56.812	56.817
2022(f)	53.328	52.749	57.610	57.626
2023(f)	52.177	51.795	58.755	58.782
2024(f)	48.223	48.061	56.628	56.666
2025(f)	47.408	47.447	58.280	58.330
2026(f)	46.837	46.890	58.018	58.086
2027(f)	47.423	47.490	59.264	59.350
2028(f)	48.385	48.465	61.010	61.115

2029(f)	47.159	47.252	59.901	60.024
2030(f)	46.965	47.071	60.146	60.287
2031(f)	46.876	46.998	60.037	60.200
2032(f)	47.145	47.283	60.404	60.588
2033(f)	47.290	47.444	60.609	60.814
2034(f)	48.208	48.378	61.836	62.063
2035(f)	48.755	48.941	62.572	62.819
2036(f)	46.989	47.181	60.371	60.626
2037(f)	47.008	47.213	60.402	60.676
2038(f)	48.093	48.311	61.857	62.148
2039(f)	47.976	48.207	61.709	62.018
2040(f)	47.186	47.431	60.663	60.990
2041(f)	47.695	47.952	61.353	61.697
2042(f)	47.558	47.829	61.179	61.541
2043(f)	46.889	47.173	60.299	60.678
2044(f)	47.432	47.729	61.035	61.432
2045(f)	47.053	47.363	60.543	60.957
2046(f)	46.773	47.097	60.182	60.614
2047(f)	46.846	47.182	60.293	60.743
2048(f)	47.073	47.423	60.611	61.078
2049(f)	46.826	47.188	60.297	60.781
2050(f)	46.599	46.975	60.010	60.511

註：(f)代表預測的年份

(資料來源：歷史資料來源為能源局、未來推估資料為本研究推估)

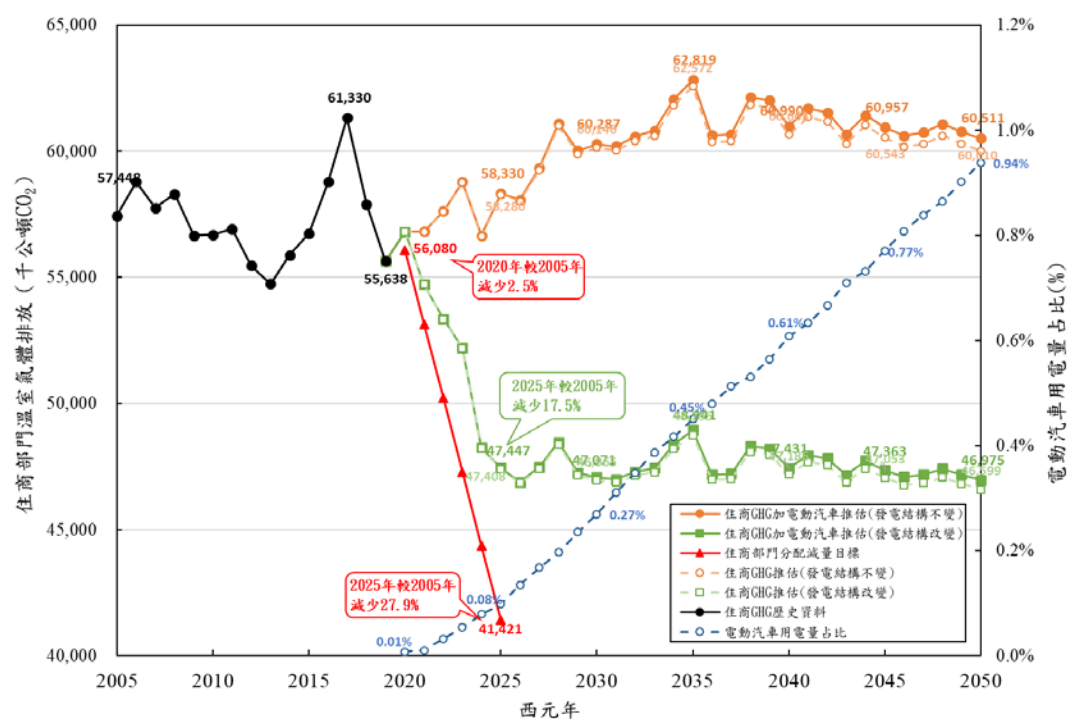


圖 5-6 住商溫室氣體增加電動汽車未來排放基線預測與核配減碳目標之比較

(資料來源：本研究整理)

第六章 住商部門可行之減碳策略及其效益分析

由過去之研究顯示針對既有建築進行建築外殼節能改善之節能效益有限，但所需之經費龐大，在今日溫室氣體減碳量相較於不論是 2050 年達零碳排或降為 2005 年的 50% 目標皆仍有大量減碳之缺口，既有建築本體的節能改善策略恐緩不濟急。另一方面，針對未來的新建築，則可進一步強化建築節能法規或擴大需檢討之建築範圍以為因應。有鑑於既有建築數量占比大，針對既有建築實施減碳策略將是更為有效率的作法。本研究基於節能效果佳、汰換成本低以及政策擴散率高等三個政策推動因素，針對既有建築提出以(1)空調設備效率提升、(2)照明燈具節能汰換與(3)冷凍設備與冰箱能效升級等三個影響整體住商部門用電較大的項目，進行政策擴散率之推演計算其預期之節能減碳成效與估計其成本。

第一節 空調節能策略

我國之無風管冷氣機之能源效率分級基準如表 6-1 所示，一共區分為五個能效等級。倘將原五級能效之冷氣設備汰換為一級能效時，冷氣之能源效率比以單體式窗型冷氣為例其效率將由 2.95 提升至 3.40 以上，相當於冷氣之效率將增加 20%-28%。但由於冷氣並非全年皆以滿載狀態運轉，因此其效率之提升並不代表即有相當增加的節能量，此乃因冷氣之運轉大部分時間是處於部分負載狀態之故，且同時考慮未來各年氣候之變化導致冷氣之負載狀態亦不同，本研究以冷氣之全負荷相當運轉時間(Equivalent Full Load Hours,EFLH)藉以換算可能之節電量。

表 6-1 窗型冷氣機能源效率分級表

無風管空氣調節機能源效率分級基準表							
機種		額定冷氣能力分類 (kW)	各等級基準(kWh/kWh)				
			5 級	4 級	3 級	2 級	1 級
氣冷式	單體式	2.2 以下	3.40 以上， 低於 3.64	3.64 以上， 低於 3.88	3.88 以上， 低於 4.11	4.11 以上， 低於 4.35	4.35 以上
		高於 2.2，4.0 以下	3.45 以上， 低於 3.69	3.69 以上， 低於 3.93	3.93 以上， 低於 4.17	4.17 以上， 低於 4.42	4.42 以上
		高於 4.0，7.1 以下	3.25 以上， 低於 3.48	3.48 以上， 低於 3.71	3.71 以上， 低於 3.93	3.93 以上， 低於 4.16	4.16 以上
		高於 7.1，71.0 以下	3.15 以上， 低於 3.37	3.37 以上， 低於 3.59	3.59 以上， 低於 3.81	3.81 以上， 低於 4.03	4.03 以上
	分離式	4.0 以下	3.90 以上， 低於 4.41	4.41 以上， 低於 4.91	4.91 以上， 低於 5.42	5.42 以上， 低於 5.93	5.93 以上
		高於 4.0，7.1 以下	3.60 以上， 低於 4.03	4.03 以上， 低於 4.46	4.46 以上， 低於 4.90	4.90 以上， 低於 5.33	5.33 以上
		高於 7.1，10.0 以下	3.45 以上， 低於 3.86	3.86 以上， 低於 4.28	4.28 以上， 低於 4.69	4.69 以上， 低於 5.11	5.11 以上
		高於 10.0，71.0 以下	3.40 以上， 低於 3.81	3.81 以上， 低於 4.22	4.22 以上， 低於 4.62	4.62 以上， 低於 5.03	5.03 以上
水冷式		全機種	4.50 以上， 低於 4.77	4.77 以上， 低於 5.04	5.04 以上， 低於 5.31	5.31 以上， 低於 5.58	5.58 以上

(資料來源：經濟部能源局)

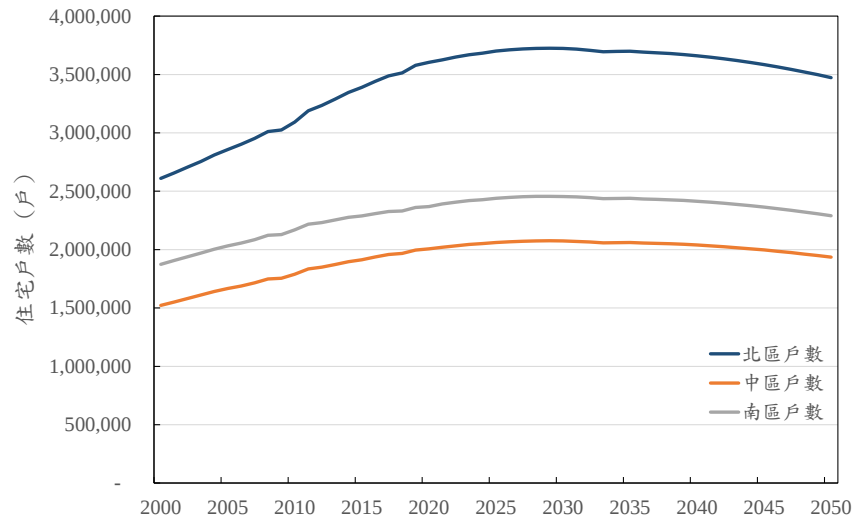


圖 6-1 北中南各分區不同房型之戶數存量趨勢分析(已扣除空屋)

在估計全國住宅冷氣於未來各年之既存數量時，以全國各區住宅戶數以及各房型之比例推估依下式 6-1 推估其存量。

$$N_{ac,yr} = \sum_{loc} \cdot \sum_{layout} (N_{res,loc,layout,yr} \times \delta_{loc} \times \gamma_{layout} \times \rho_{layout}) \quad \text{式 6-1}$$

其中： N_{ac} 為住宅冷氣機數量預估值(台)； N_{res} 為住宅戶數(戶)； δ 為台灣北中南三區之戶數比例； γ 為各房型住宅之比例取自表 3-9，區分為二房、三房與四房以上之格局； ρ 為各房型下冷氣之擁有數量；下標 loc 為地理分區；下標 $layout$ 代表不同的房型格局

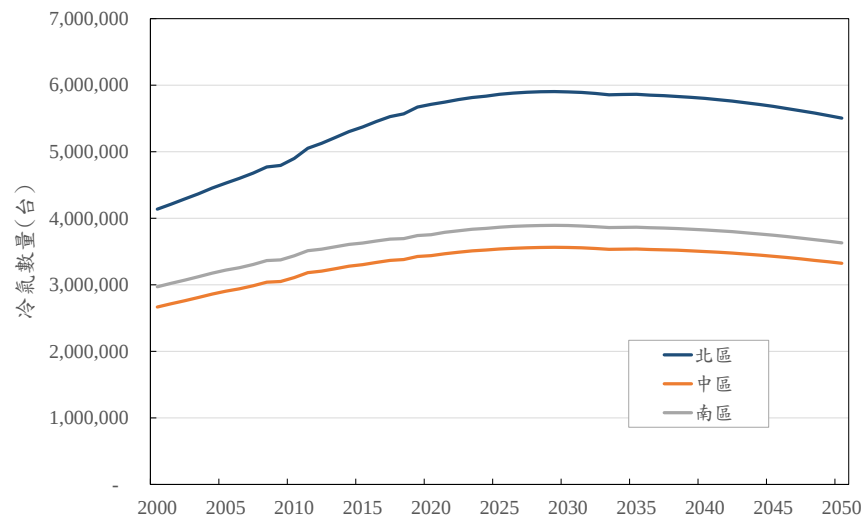


圖 6-2 未來逐年預估之住宅冷氣數量趨勢

為計算冷氣之 EFLH 以考量未來逐年氣候影響下之冷氣運轉時數變化與在能源效率提升下之潛在的節能量。本研究以電腦動態負荷模擬之方式(本研究採用 EnergyPlus 進行模擬)，同時搭配未來各年之未來逐時氣象年，以住宅之標準平面進行推算可能之 EFLH。此外，由於住宅冷氣之使用行為有別於中央空調型建築，在決定冷氣在全年中之運轉時間時，本研究應用 ASHRAE Standard 55 之

室內人體熱適應模型(Adaptivethermalcomfortmodel)作為判斷各時刻住宅之空調起停狀態，將更貼近與預測未來各年之冷氣運轉使用情況。圖 6-3 呈現了在未來氣候影響下，理論上 EFLH 之變化趨勢，以及在每一冷氣提升一個能效等級時，可能帶來的節能率。

表 6-2 住宅冷氣機使用類型占比

項目別	樣本數	百分比
窗型	1202	36.8%
分離式	2005	61.4%
中央空調式	45	1.4%
箱型	11	0.3%
移動式冷氣	3	0.1%

(資料來源：(梁世武 2019))

$$\Delta E_{ac, yr} = E_{ac, yr} \times N_{ac, yr} \times (EFLH_{yr} / EFLH_{yr-1}) \times \tau \times \psi_{yr}$$

式 6-2

$$\tau = (CSPF_{\text{分離式後一等級}} / CSPF_{\text{分離式前一等級}}) \times \sigma_{\text{分離式}} + (CSPF_{\text{窗型後一等級}} / CSPF_{\text{窗型前一等級}}) \times \sigma_{\text{窗型}}$$

式 6-3

其中： ΔE_{ac} 為空調節能量(kWh)； E_{ac} 為冷氣平均年耗電量(kWh/yr)；EFLH 為冷氣之全年全負荷運轉時間(hrs/yr)； τ 為每一冷氣能效分級之間的節能率(窗型機為 5%、分離式冷氣為 7%，節能率參考自能源局，經市占率加權後為 6.3%)； ψ 為每年進行冷氣能效汰換之比率； σ 為市占率；下標 yr 代表未來的某一年份。

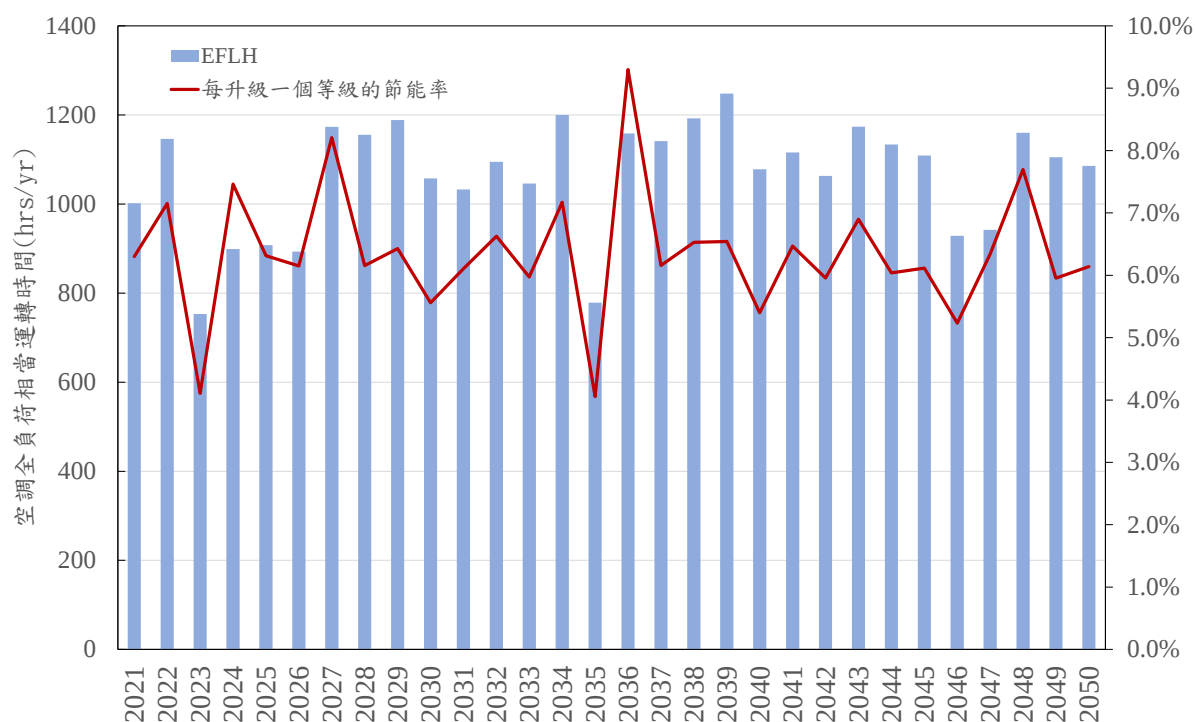


圖 6-3 未來逐年冷氣全負荷相當運轉時間之變化與節能率

(資料來源：本研究整理)

表 6-3 在不同之汰換速度情境下所需之汰換成本及未來之節能率

冷氣汰換策略	改善方案(每年汰換率)	1%	3.5%	5%	10%	15%
	每年所需汰換之冷氣數量(千台)	124	434	621	1,241	1,862
	各年所需成本(百萬元/年)	3,376	11,817	16,881	33,763	50,644
能效提升四等級	至 2025 年節能率	0.9%	3.3%	4.7%	9.4%	14.1%
	至 2030 年節能率	2.2%	7.7%	11.0%	22.0%	22.6%
	至 2035 年節能率	2.1%	7.4%	10.5%	15.0%	13.8%
	至 2050 年節能率	7.8%	26.3%	27.0%	26.3%	24.2%
能效提升三等級	至 2025 年節能率	0.7%	2.5%	3.5%	7.1%	10.6%
	至 2030 年節能率	1.6%	5.8%	8.2%	16.5%	16.9%
	至 2035 年節能率	1.6%	5.5%	7.9%	11.3%	10.4%
	至 2050 年節能率	5.8%	19.7%	20.2%	19.7%	18.1%
至 2050(30 年後)外部報酬(單位：十億元)		25.4 ^{*1}	85.1	80.7	73.7	63.8

*1 逐年汰換率為 1%時，至 2050 年無法汰換完畢，節能量無法達標。數值不具參考意義。

*2 購置費用假設窗型冷氣平均為 2 萬元，分離式冷氣平均為 3 萬元計算。

住宅空調之改善情境假設為逐年汰換能效五級或能效更差之既有老舊冷氣機，並以汰換後冷氣能效提升四個等級，且自 2022 年開始以每年 5%汰換率施行至 2035 年或以每年 3.5%之汰換率施行至 2050 年時，可望將全國之冷氣提升至一級能效之水準。而在此期間計算上假定未來每年因增加之住宅戶數所新增加之冷氣機皆為一級能效之機種。

在此汰換情境下最終至 2050 年，在考量人口之消長導致空調設備增加下，空調耗電量可降回至 2005 年的全國空調耗能水準。圖 6-4 呈現了在四種不同年汰換率(1%、5%、10%、20%)之水準下，以冷氣效率提升四個等級為改善情境未來逐年之全國住宅空調用電量之變化推估。在各冷氣汰換率情境下各年所需之總成本如表 2-1 所示。由於當汰換率為 1%時至 2050 年仍未能完全將市場上既有之空調汰換完畢因此不予考慮。今若以 3.5%之汰換速率並自 2022 年始開始汰換能效五級以後之效率較差之冷氣機，各年所需之總成本為 12.47 億元/年。

本研究於評估方案投入之成本效益時以工程經濟分析中之「外部投資報酬」進行考量。所謂「外部投資報酬」，定義為使投資方案的期末值(此處為 2050 年)等於此投資資金於期末到期前各年之再投資所產生之累積報酬。以本研究為例，意即為當某一改善方案擁有最大之外部投資報酬時，即可相對地視為在經濟上較佳之方案。假設政策上以補助民眾 20%之購置經費藉以鼓勵汰換老舊冷氣之假設前提，同時考量工程經濟概念概念下，參考行政院主計處近十年來之統計，假設未來各年之物價上漲率為 0.89%而銀行利率為 0.81%，據以計算其外部報酬率時則以 3.5%汰換情境下有最大之外部報酬率約 898 億元，意即權衡節能量於

2050 年達標與成本經濟上建議應以每年汰換 3.5% 之速度(相當於每年汰換約 131 千台)以將既有冷氣提升四級能效之方式，進行冷氣之汰舊換新。

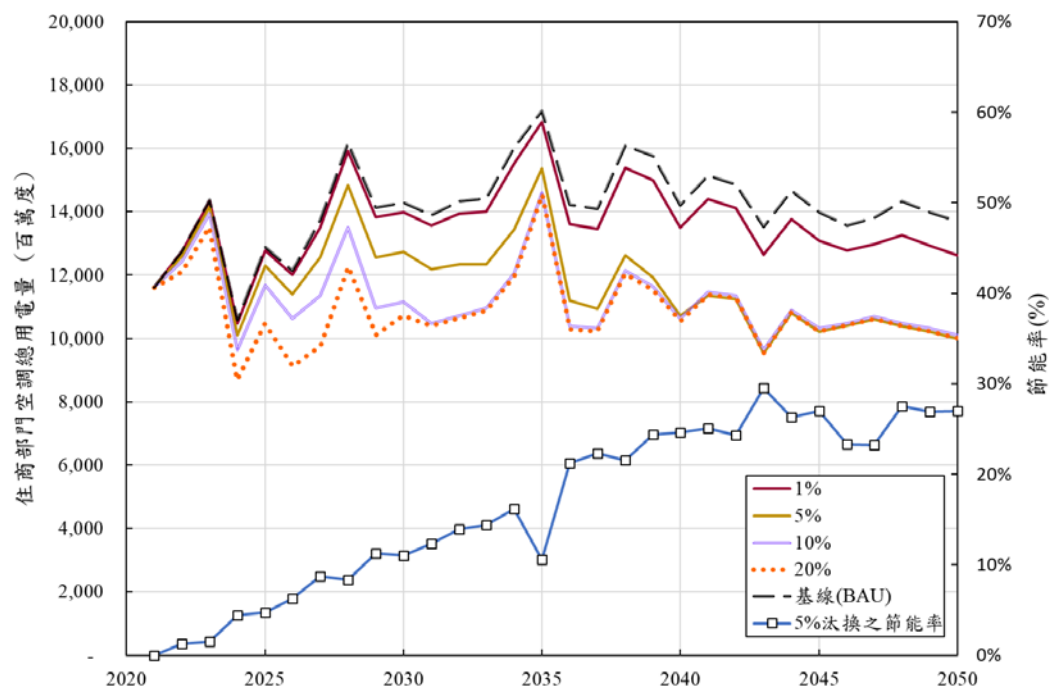


圖 6-4 住宅冷氣效率提升四個等級在不同汰換率下空調總用電量變化之趨勢

(資料來源：本研究整理)

第二節 照明節能策略

照明耗能占整體住宅與商業建築用電平均約 15% 至 20%，是商業建築中占比次多的耗能來源，也是住宅第三大耗能僅次於空調與家電。既有建築之照明改善成本較為低廉且汰換上亦較建築外殼節能改善容易。在照明節能效益之計算上與功率呈線性關係較易估計，不若空調系統有部分負載之問題。只要掌握全國既有燈具之數量種類，即可試算其效益。燈具既存數量參考(林唐裕 2014)之統計如表 6-4 中之每百戶既存數量概估值推估，而於未來之各種燈具數量變化則依式 6-4 與式 6-5，以逐年之汰換率進行推算。而照明耗能與其溫室氣體排放量則由式 6-6 與式 6-7 計算。

$$N_{yr,i} = N_{yr-1,i} \times (1 + \zeta_{yr,i}) + N_{yr,LED} \quad \text{式 6-4}$$

$$N_{yr,LED} = \Delta N_{H,yr} \times \lambda_i / 100 \quad \text{式 6-5}$$

$$E_{light,yr} = (\sum N_{yr,i} \times W_i) \times 3285 \times \alpha / 1000 \quad \text{式 6-6}$$

$$GHG_{light,yr} = E_{light,yr} \times \beta_{1,yr} \quad \text{式 6-7}$$

$$C_{light,y} = \{ \sum C_i \times [N_{y-1,i} \times \zeta_{y,i}] \} \times (1 + \phi)^{y-1} \quad \text{式 6-8}$$

N 為燈具數量(盞)； $\zeta_{y,i}$ 為第 y 年第 i 種燈源之替換比率(負值代表逐年減少)； $\Delta N_{H,y}$ 為第 y 年增加之戶數(戶)； λ 為每百戶平均燈具數量(盞/戶)，參考自(林唐裕 2014)； W_i 為第 i 種燈源之平均耗電功率(W)； $E_{light,y}$ 為未來第 y 年時之全國住宅總照明耗電量(kWh/yr)；3285 為住宅類照明全年平均使用小時數(hr)，參考自(林憲德 2018)； α 為與真實耗能之修正係數； C 為每年替換燈具所需之成本(元)； ϕ 為利率與物價上漲率。下標 i 代表不同種類的燈具。

住宅汰換燈具之策略為將既有之白熾燈泡與省電燈泡逐步汰換為 LED 燈泡；鹵素燈泡汰換為 LED 燈泡；而原 T8 燈管則替換為 LED 燈管；而 T5 燈管則以使用壽命將近時再予以逐步替換為 LED 燈管。且強制於未來每年所增加的戶數皆採用 LED 燈具為前提，進行照明耗能與節能效益之模擬計算。

在所需照明汰換成本之計算上，LED 燈泡與 LED 燈管之平均價格分別以 110(元/個)與 260(元/支)計算，同時假設政策上以所需汰換成本之二成作為補助，以誘導民眾自主汰換。補助之範圍為白熾燈泡、鹵素燈泡與傳統省電燈泡汰換為 LED 燈泡；而 T8 燈管汰換為 LED 燈管之方式進行。在此政策補助之誘因下，假設各照明種類之逐年汰換率可達如下表 6-4 所示。

表 6-4 照明節能汰換策略

燈源種類	白熾燈泡	鹵素燈	省電燈泡	T5 螢光燈	T8 螢光燈
現今既存數量概估值* (個/支)/百戶)	62.2	46.4	672.1	275.1	374
逐年汰換率	10%	10%	5%	1%	10%
完成全部汰換之年數	10 年	10 年	20 年	-	10 年
汰換為燈具之種類	LED 燈泡	LED 燈泡	LED 燈泡	LED 燈管	LED 燈管

*資料來源：(林唐裕, 黃宗煌 et al. 2014, 梁世武 2019)

而在此逐年汰換率下未來逐年至 2050 年時照明燈具數量之變化趨勢如下表 6-5 所示。未來白熾燈、鹵素燈與 T8 傳統螢光燈將於 2031 年達成完全汰換完畢；而省電燈泡則於 2041 年完成全面汰換成 LED 燈具。在此前提下，各年之節能率與照明用電趨勢如圖 6-5 所示，至 2030 年時照明節能率達 33%；至 2050 年時節能率將可達 48%。

在成本效益方面，以 LED 燈泡平均市場價格 110 元以及 LED 燈管價格 260 元(郭瑾瑋, 溫珮伶 et al. 2021)進行所需成本估計，同時在假設策略上政府同時補助其成本之二成情境下，並且考量物價上漲率與銀行利率為 1.7%/年，據以計算外部報酬率下，所需之成本則將近為 46.76 億元。

表 6-5 照明節能汰換下未來逐年照明燈具數量之變化

年	白熾燈泡 (百萬個)	鹵素燈 (百萬個)	省電燈泡 (百萬個)	T5 螢光燈 (百萬支)	T8 螢光燈 (百萬支)	LED 燈泡 (百萬個)	LED 燈管 (百萬支)	平板燈 (百萬個)	總計 (百萬)
2018	4.9	3.6	52.5	21.5	29.2	36.1	9.0	3.5	160.2
2019	4.9	3.7	53.3	21.8	29.7	36.6	9.1	3.5	162.7
2020	5.0	3.7	53.6	21.9	29.8	36.8	9.2	3.5	163.6
2021	5.0	3.7	54.0	22.1	30.1	37.1	9.2	3.6	164.8
2022	4.5	3.4	51.3	21.9	27.1	41.3	12.9	3.6	165.9
2023	4.0	3.0	48.6	21.7	24.0	45.4	16.4	3.6	166.8
2024	3.5	2.6	45.9	21.4	21.0	49.4	19.9	3.6	167.4
2025	3.0	2.2	43.2	21.2	18.0	53.4	23.4	3.6	168.2
2026	2.5	1.9	40.5	21.0	15.0	57.3	26.8	3.6	168.7

2027	2.0	1.5	37.8	20.8	12.0	61.1	30.2	3.6	169.1
2028	1.5	1.1	35.1	20.6	9.0	64.8	33.5	3.6	169.3
2029	1.0	0.7	32.4	20.3	6.0	68.4	36.7	3.6	169.3
2030	0.5	0.4	29.7	20.1	3.0	72.0	40.0	3.6	169.3
2031	0.0	0.0	27.0	19.9	0.0	75.5	43.2	3.6	169.2
2032	0.0	0.0	24.3	19.7	0.0	78.1	43.4	3.6	169.1
2033	0.0	0.0	21.6	19.5	0.0	80.7	43.6	3.6	168.9
2034	0.0	0.0	18.9	19.2	0.0	83.4	43.8	3.6	169.1
2035	0.0	0.0	16.2	19.0	0.0	86.2	44.1	3.6	169.1
2036	0.0	0.0	13.5	18.8	0.0	88.8	44.3	3.6	169.0
2037	0.0	0.0	10.8	18.6	0.0	91.5	44.5	3.6	168.9
2038	0.0	0.0	8.1	18.3	0.0	94.1	44.7	3.6	168.8
2039	0.0	0.0	5.4	18.1	0.0	96.7	44.9	3.6	168.7
2040	0.0	0.0	2.7	17.9	0.0	99.3	45.1	3.6	168.6
2041	0.0	0.0	0.0	17.7	0.0	101.9	45.3	3.6	168.4
2042	0.0	0.0	0.0	17.5	0.0	101.7	45.5	3.6	168.2
2043	0.0	0.0	0.0	17.2	0.0	101.6	45.7	3.5	168.0
2044	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	101.4	45.8	3.5	167.8
2045	0.0	0.0	0.0	16.8	0.0	101.2	46.0	3.5	167.5
2046	0.0	0.0	0.0	16.6	0.0	101.0	46.2	3.5	167.3
2047	0.0	0.0	0.0	16.4	0.0	100.8	46.3	3.5	167.0
2048	0.0	0.0	0.0	16.1	0.0	100.6	46.5	3.5	166.7
2049	0.0	0.0	0.0	15.9	0.0	100.3	46.7	3.4	166.4
2050	0.0	0.0	0.0	15.7	0.0	100.1	46.8	3.4	166.0

(資料來源：本研究整理)

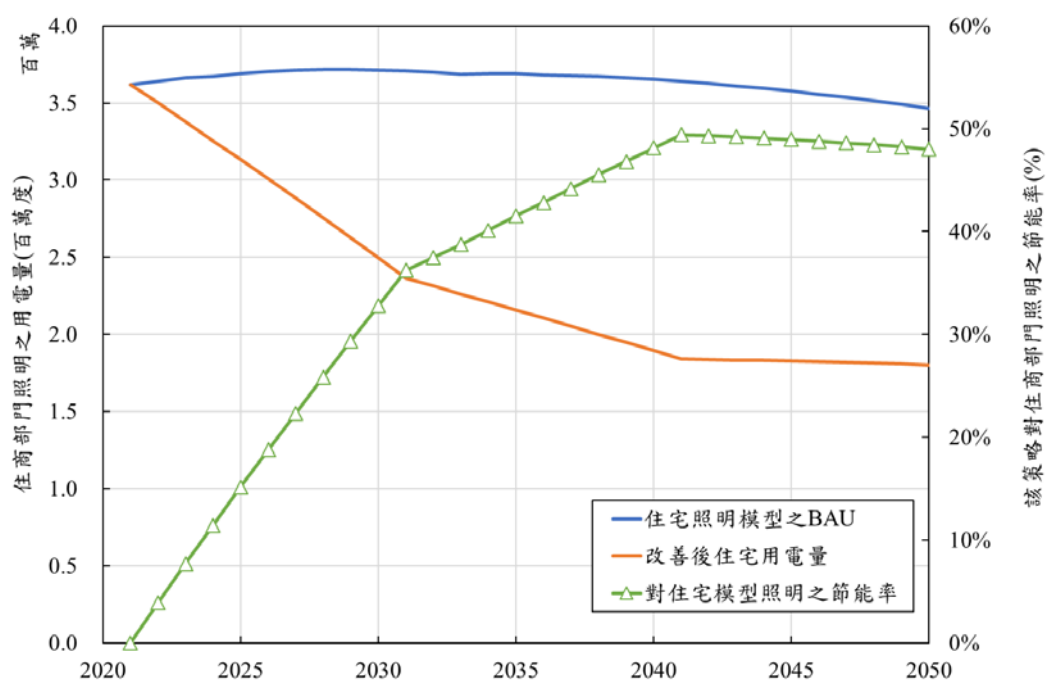


圖 6-5 改善策略導入下之汰換照明對住宅照明模擬節能變化趨勢

(資料來源：本研究整理)

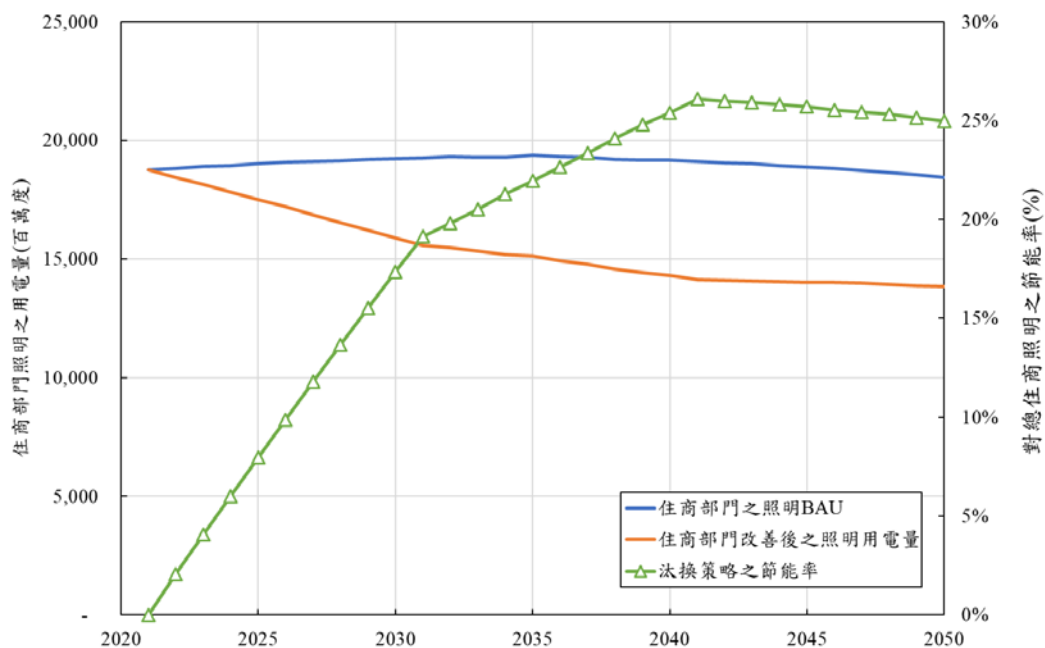


圖 6-6 改善策略導入下之汰換照明對住商部門照明之節能變化趨勢

(資料來源：本研究整理)

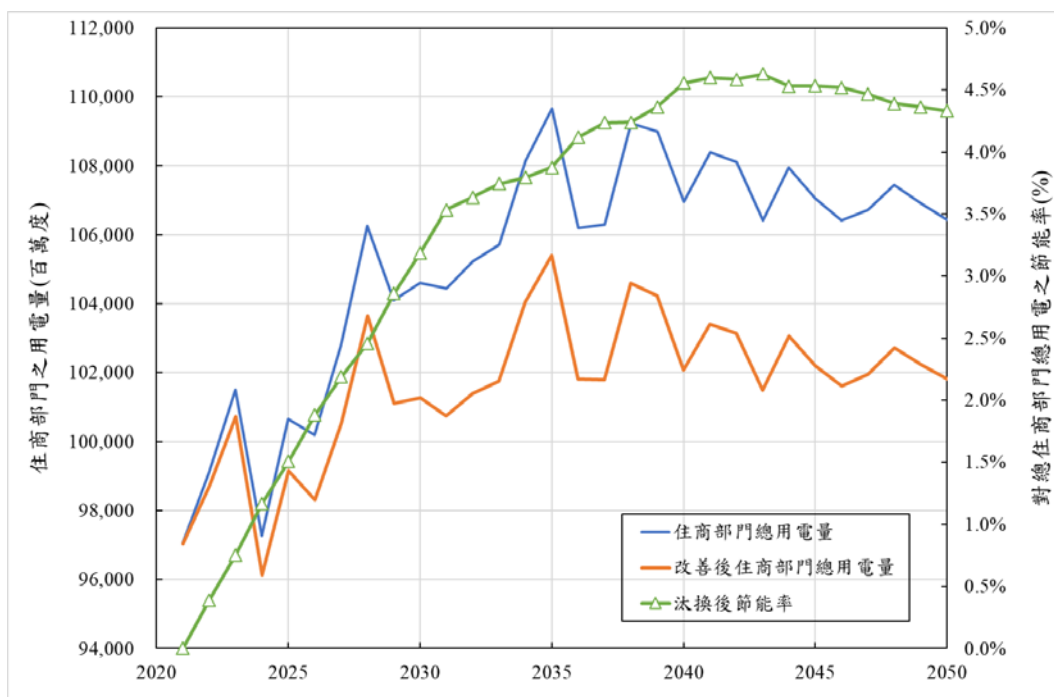


圖 6-7 改善策略導入下之汰換照明對住商部門總用電之節能變化趨勢\

(資料來源：本研究整理)

第三節 住宅電冰箱節能策略

雖然電熱水器改瓦斯熱水器亦有減碳效果，但考量其全年使用時間不若冷凍冷藏設備(冰箱)來得多，再加上汰換為瓦斯熱水需有天然氣管線配合之因素，本研究暫先以冰箱汰換為高能效機種為策略進行節能預估。我國電冰箱之能效分級區分為五等級，其中包含 400 公升以上下的風扇式、400 公升以上下直立式，以及冷藏式冰箱。2016 年 5 月新基準上路，相較過去 99 年舊基準的 1 級能效變成新制的 4 級能效，如圖 6-8，對於節能標準大幅提升。由於電冰箱大多全年運轉，因此其耗電量可觀。電冰箱的容許耗用能源效率基準(E.F.)是以其容量公升為計算基礎，如表 6-6，因此預估住宅與商業之電冰箱用電量將以容量公升數推算。本研究假設冰箱之節能改善情境為逐年汰換低能效之既有老舊冰箱，並從最耗能之能效逐步汰換至最高等級。自 2022 年開始每年以汰換率相當於既有總量的 1%、3%以及 5%三種情境去探討汰換為高效率機種後之效益，其中在需汰換的冰箱數量上，假設有 95%汰換為一級能效以及 5%汰換為二級能效的冰箱機種，並期望至 2050 年將全國電冰箱提升至一級能效之水平，在此同時每年因全國戶數增加而新增的電冰箱皆假定為購買一級能效之機種進行未來逐年全國冰箱總量與耗能量之估算。

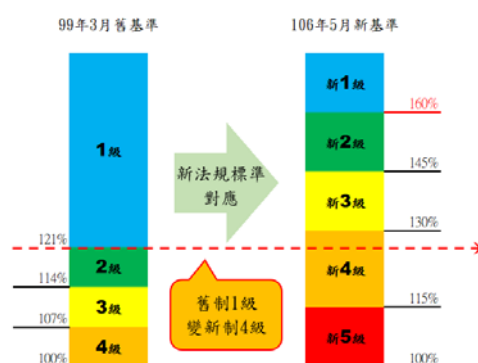


圖 6-8 電冰箱之新舊基準對比

表 6-6 106 年電冰箱新能效分級基準表

型 式	容許耗用能源基準 (公升 / 千瓦小時 / 月)	5 級	4 級	3 級	2 級	1 級
等效內容積低於 400 公升 風扇式冷凍冷藏電冰箱	$E.F. = V / (0.037V + 24.3)$	容許耗用能源基準以上，低於容許耗用能源基準之 115%	容許耗用能源基準之 115% 以上，低於容許耗用能源基準之 130%	容許耗用能源基準之 130% 以上，低於容許耗用能源基準之 145%	容許耗用能源基準之 145% 以上，低於容許耗用能源基準之 160%	容許耗用能源基準之 160% 以上
等效內容積 400 公升以上 風扇式冷凍冷藏電冰箱	$E.F. = V / (0.031V + 21.0)$					
等效內容積低於 400 公升 直冷式冷凍冷藏電冰箱	$E.F. = V / (0.033V + 19.7)$					
等效內容積 400 公升以上 直冷式冷凍冷藏電冰箱	$E.F. = V / (0.029V + 17.0)$					
冷藏式電冰箱	$E.F. = V / (0.033V + 15.8)$	容許耗用能源基準以上，低於容許耗用能源基準之 118%	容許耗用能源基準之 118% 以上，低於容許耗用能源基準之 136%	容許耗用能源基準之 136% 以上，低於容許耗用能源基準之 154%	容許耗用能源基準之 154% 以上，低於容許耗用能源基準之 172%	容許耗用能源基準之 172% 以上

(參考資料：經濟部能源局)

*V (公升) = VR + K × VF; VR: 冷藏室有效內容積 (公升); VF: 冷凍室有效內容積 (公升); K 值: 冷凍室等效內容積換算係數, 二星級為 1.56; 超二星級者為 1.67; 三星級及四星級為 1.78。

6.3.1 住宅部門冰箱汰換節能效益推估法

利用 2017 年台電統計住宅用戶電冰箱擁有量複合年成長率為 0.68%，與本研究整理之戶數計算住宅逐年電冰箱之用電量。假設從五級節能效率之電冰箱開始汰換，再加設每年新增戶數皆購買第一級能效之電冰箱。由於電冰箱占住宅總耗電量為 15%，如圖，除以 2015 年之各級能效電冰箱之占比，第 1、2 級能效 24%、第 3、4 級能效 13% 與第 5 級能效 63%，取得 2021 之電冰箱各級數量與各級能效節能比例之乘積可得每台基準電冰箱之用電密度，如式 6-9：

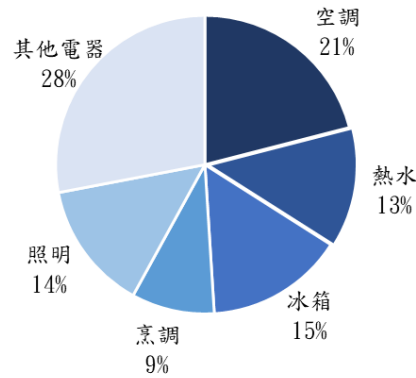


圖 6-9 2017 年住宅設備用電占比

參考資料：(工研院綠能所 2016)

$$\sigma_{res, yr} = \sigma_{res, yr-1} \times (1 + 0.68\%) \quad \text{式 6-9}$$

$$N_{ref, Total, res, yr} = \text{戶數}_{yr} \times \sigma_{res, yr}$$

$$\xi_{ref, res, BAU} = (E_{Total, res, 2021} \times 15\%) / (\sum(\alpha_{res, x, 2015} \times \theta_x) \times N_{ref, Total, res, yr}) \quad \text{式 6-10}$$

$N_{ref, Total, res, yr}$ ：第 yr 年住宅電冰箱總台數(台)； $\sigma_{res, yr}$ ：第 yr 年每百戶電冰箱擁有台數(台/百戶)(梁世武 2019)，每年以 0.68% 成長； $\xi_{ref, res, BAU}$ ：住宅每台基準電冰箱之用電密度(kWh/台 基準電冰箱)； $E_{res, elec, 2021}$ ：為 2021 年住宅總用電量(kWh)，設改善情境之基準年； $\alpha_{res, x, 2015}$ ：2015 年住宅的 x 級能效之占比(%) (郭瑾璋, 溫珮伶 et al. 2017)； θ_x ：x 級能效之用電率(%)。

取得每台住宅電冰箱之基準用電密度，並加入兩項設計條件，每年優先汰換低能效之電冰箱，並假設汰換後其中有 95% 購買 1 級能效之冰箱與 5% 汰換成 2 級能效。若二級以下之既有冰箱數皆已汰換完畢，則全數汰換成一級節能電冰箱；另外，每年因增加戶數而新購電冰箱一律假設為購買 1 級能效電冰箱。每年因導入改善策略後的節電量計算如式 6-11 至式 6-13 所示。

$$E_{ref, res, BAU, yr} = \sum(\alpha_{res, x} \times \theta_x) \times N_{ref, Total, res, yr} \times \xi_{ref, res, BAU} \quad \text{式 6-11}$$

$$E_{ref, res, save, yr} = \sum(N_{ref, yr, x} \times \theta_x) \times \xi_{ref, res, BAU} \quad \text{式 6-12}$$

$$\Delta E_{ref, yr} = E_{ref, res, BAU, yr} - E_{ref, res, save, yr} \quad \text{式 6-13}$$

$E_{ref,res,BAU,yr}$ ：第yr年住宅電冰箱基準用電量(kWh)； $E_{ref,res,改善,yr}$ ：第yr年改善策略導入後之住宅電冰箱用電量(kWh)； $\Delta E_{ref,yr}$ ：第yr年改善策略導入後之年節電量(kWh)； $E_{ref,yr}$ ：第yr年住宅部門總耗電量(kWh)； $N_{ref,yr,x}$ ：第yr年之x級節能效率電冰箱台數(台)； θ_x ：x級能效之用電率(%)； $\xi_{ref,res,BAU}$ ：每台基準電冰箱之用電密度(kWh/台 基準電冰箱)； $N_{ref,Total,res,yr}$ ：第yr年住宅總電冰箱台數(台)

6.3.2 商業部門冰箱汰換節能效益推估法

商業部門因無營業用戶之戶數資料，因此商業電冰箱總台數需要利用住宅部門逐年之電冰箱增加率求得。首先利用 2020 年經統計之各類商業建築電冰箱電力流向之占比以及各類商業建築用電量占比，如表 6-7，取得商業部門電冰箱占比，如式 6-14：

表 6-7 各類商業部門總用電占比與電冰箱電力流向

各商業建築	電力流向 (電冰箱占比)	各類建築耗 能占比
學校	3.48%	6.90%
辦公大樓	0.90%	16.66%
醫院	3.65%	6.44%
量販/百貨	11.62%	10.42%
旅館	6.62%	4.39%
其他	0.50%	55.19%

參考資料：(經濟部能源局 2020)

$$\Gamma_{ref,2020} = \varepsilon_{1,i,2020} \times \varepsilon_{2,i,2020} \quad \text{式 6-14}$$

$\Gamma_{ref,2020}$ ：2020 年電冰箱占總商業用電量占比，得 2.4%； $\varepsilon_{ref,i,2020}$ ：2020 年各i類商業建築電冰箱之電力流向(%)； $\varepsilon_{用電量,i,2020}$ ：2020 年各i類商業建築用電量占總商業部門用電量(kWh)。

計算 2021 年商業部門電冰箱總台數使用已知的 2020 年電力流向所計算之電冰箱占總商業部門用電占比如下式：

$$N_{ref,Total,商業,2021} = \Gamma_{ref,2020} \times E_{Total,商業,2021} \times N_{ref,Total,res,2021} / (E_{Total,res,2021} \times 15\%) \quad \text{式 6-15}$$

$N_{ref,Total,商業,2021}$ ：2021 年商業便冰箱總台數(台)； $\Gamma_{ref,2020}$ ：電冰箱占總商業用電量占比，為 2.4%，； $E_{Total,商業,2021}$ ：2021 年商業部門總用電量(kWh)； $N_{ref,Total,res,2021}$ ：2021 年住宅部門總電冰箱台數(台)； $E_{Total,res,2021}$ ：2021 年住宅部門總用電量(kWh)，其中電冰箱占比 15%。

由於目前沒有商業部門電冰箱台數逐年成長率，首先計算商業電冰箱為住宅電冰箱之比例，再利用住宅逐年電冰箱之增長率計算商業部門電冰箱總台數：

$$\gamma_{ref} = (E_{Total,商業,2020} \times \Gamma_{ref,2020}) / (E_{Total,res,2020} \times 15\%) \quad \text{式 6-16}$$

$$N_{ref,Total,商業,yr} = N_{ref,Total,商業,yr-1} \times (1 + \varphi_{yr} \times \gamma_{ref}) \quad \text{式 6-17}$$

γ_{ref} ：2020 年商業部門電冰箱為住宅部門電冰箱之比例(%)； $N_{ref,Total,商業,yr}$ ：第yr年商業便冰箱總台數(台)，yr > 2021； φ_{yr} ：住宅逐年電冰箱之增長率(%)。

最後比照住宅部門相同汰換及因戶數增加之改善策略，最終可得逐年商業部門電冰箱之節電量，如下式 6-18 至 6-20 之計算：

$$E_{ref,商業,BAU,yr} = \sum(\alpha_{商業,x} \times \theta_x) \times N_{ref,Total,商業,yr} \times \xi_{ref,商業,BAU} \quad \text{式 6-18}$$

$$E_{ref,商業,改善,yr} = \sum(N_{ref,yr,x} \times \theta_x) \times \xi_{ref,商業,BAU} \quad \text{式 6-19}$$

$$\Delta E_{ref,yr} = E_{ref,商業,BAU,yr} - E_{ref,商業,改善,yr} \quad \text{式 6-20}$$

$E_{\text{ref,商業,BAU,yr}}$ ：第yr年商業電冰箱基準用電量(kWh)； $E_{\text{ref,商業,改善,yr}}$ ：第yr年改善策略導入後之商業電冰箱用電量(kWh)； $\Delta E_{\text{ref,yr}}$ ：第yr年改善策略導入後之年節電量(kWh)； $N_{\text{ref,yr,x}}$ ：第yr年之x級節能效率電冰箱台數(台)； θ_x ：x級能效之用電率； $\xi_{\text{ref,商業,BAU}}$ ：每台基準電冰箱之用電密度(kWh/m²·台基準電冰箱)； $N_{\text{ref,Total,商業,yr}}$ ：第yr年商業總電冰箱台數(台)

6.3.3 住商部門冰箱汰換節能效益評估

住商部門電冰箱之改善策略是從最耗能之能效等級逐年汰換，並期望電冰箱最終可全面提升至一級能效，且假設自 2022 年開始以 1%、3.5%以及 5%汰換率實施至 2050 年。在此期間所有因戶數增加而新增的電冰箱皆假定為購買一級能效之機種。圖 6-10 呈現三種不同年汰換率之水準下，逐年汰換電冰箱策略對總住商部門用電量之影響，而圖 6-11 則是呈現汰換電冰箱策略對住商部門電冰箱用電量之影響。在 1%汰換情境下直至 2050 年仍有 44%之第 5 級能效之機種尚未汰換完成，但第 1、2 級能效機種已占總存量為 56%，因此 2050 年對電冰箱之能耗仍可有 11.9%節能率。另外，3.5%汰換情境可於 2046 年住商部門之電冰箱皆汰換至一級能效，而 5%汰換情境則提早 8 年，於 2042 年汰換完畢。在各電冰箱汰換情境下最終總成本如表 6-8 所示。若自 2022 年開始逐步汰換效率較差之電冰箱，在 3.5%與 5%汰換情境下，至 2050 年所需之總成本為億元與 53.8 億元，其成本計算方法如前節冷氣之評估相同。

表 6-8 在不同之汰換速度情境下所需之汰換成本及未來之節能率

電冰箱汰換策略	改善方案(每年汰換率)	1.0%	3.5%	5.0%
	每年所需汰換之冰箱數量(千台)	110	384	549
	各年所需成本(百萬元/年)	2,547	8,915	12,736
95%提升為四級能效、5%提升為三級能效	至 2025 年節能率	2.4%	5.6%	7.5%
	至 2030 年節能率	4.8%	11.7%	15.8%
	至 2035 年節能率	6.8%	17.3%	23.6%
	至 2050 年節能率	11.9%	26.4%	26.6%
至 2050(30 年後)外部報酬(單位：十億元)		19.3	55.8	53.8

(參考資料：本研究整理)

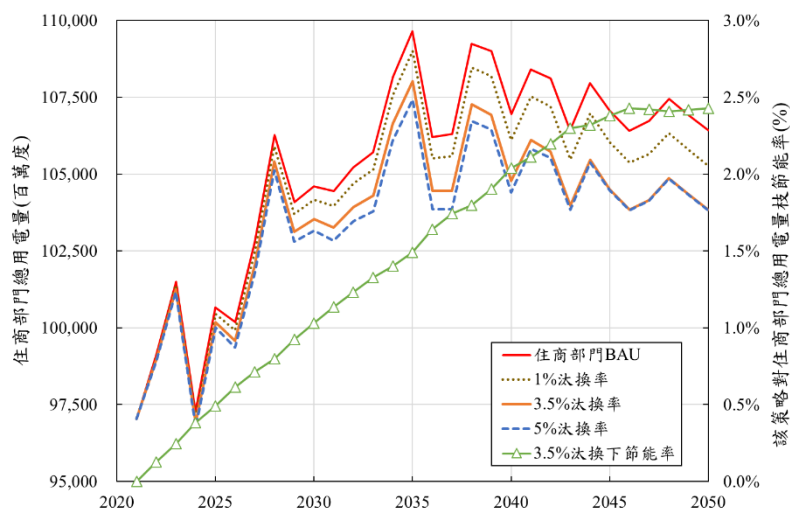


圖 6-10 電冰箱效率提升四個等級下不同電冰箱汰換率下住商部門總用電量變化之趨勢

(參考資料：本研究繪製)

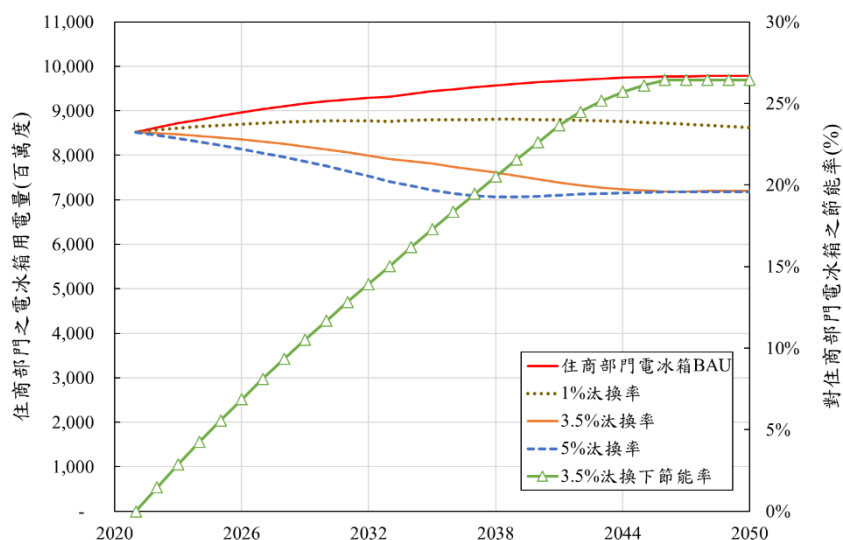


圖 6-11 電冰箱效率提升四個等級下不同電冰箱冷氣汰換率下住商部門電冰箱用電量之影響

(參考資料：本研究繪製)

第四節 淨零能源建築路徑評估及短中長期策略

綜合上述各節之節能措施逐步導入下，預估未來住商部門溫室氣體排放量之變化趨勢依未來的發電結構不變(電力碳排放係數以 2020 年計算)與改變(電力碳排放係數依能源局預估之變化計算)下，其結果分別如圖 6-12 與圖 6-13 所示。以假設未來我國發電結構逐漸朝向低碳排，即電力排放係數逐年下降之情境下(如圖 6-13)，如僅執行照明節能改善措施至 2050 年末時住商之溫室氣體排放量將從原本基線預估的 46,975 千公噸CO₂e降至 45,241 公噸，減碳幅度為當年度基線之 4.0%；如再增加空調之減碳策略，其至 2050 年之減碳幅度為為當年度基線

之 10.1%；而再加上冰箱汰換效率提升之減碳措施，則其減碳幅度為當年度基線之 12.4%，住商部門總碳排達 42,917 千公噸CO₂e 仍無法達到 2025 年溫管法所定的第二階段管制目標，但與 2050 年之淨零碳排目標或相較於 2005 年 50%排碳目標(28,724 千公噸CO₂e)皆仍有一段差距。

然而，此處之推估係假設未來之家電能效與今日相當，而尚未考量未來科技技術逐漸進步下設備之能效同時也會提升之情形下所做之保守估計，研判實際之減碳量應較圖中所估者為多。未來電器節能技術之進步，非本計畫之研究範疇，此乃本研究之限制。

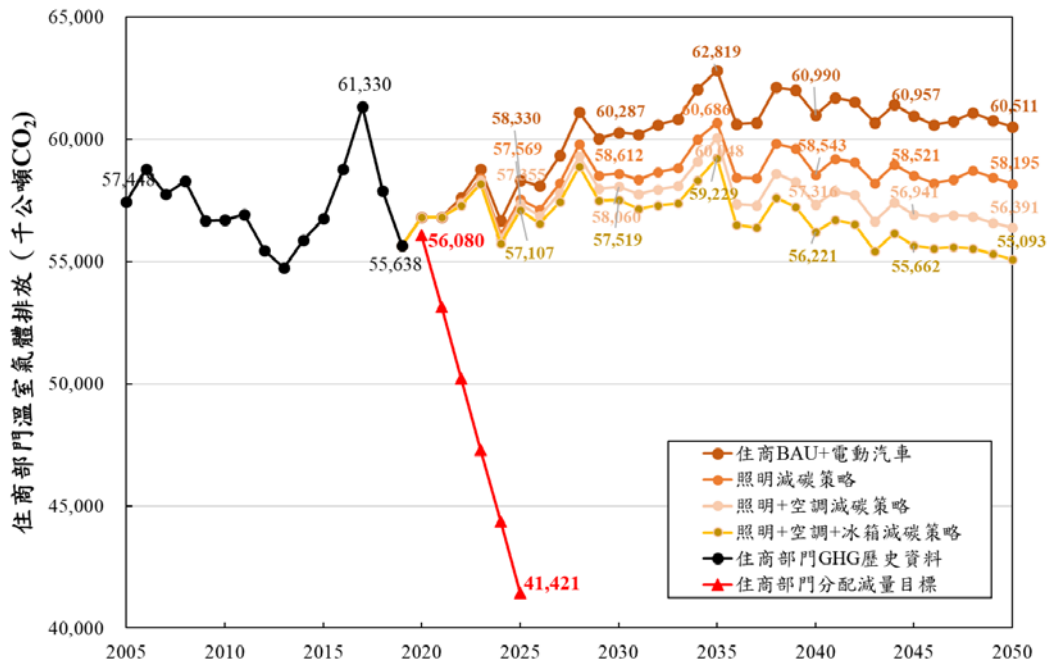


圖 6-12 在未來發電結構不變情境下各措施之綜合減碳效益趨勢

(資料來源：本研究整理)

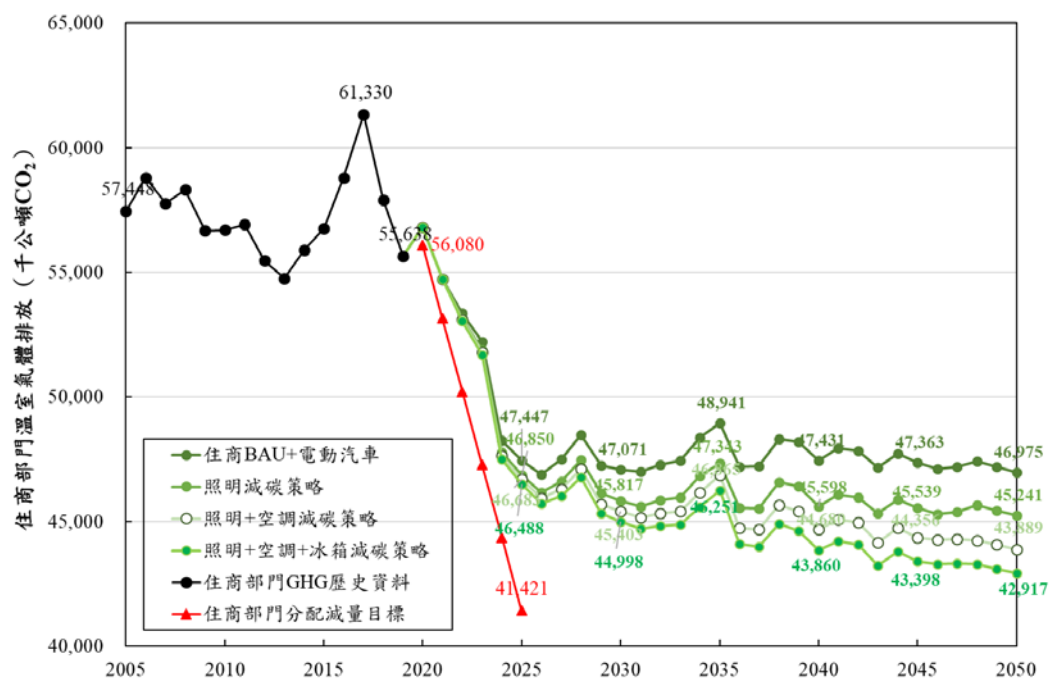


圖 6-13 在未來發電結構改變情境下各措施之綜合減碳效益趨勢

(資料來源：本研究整理)

此外，在建築外殼之節能改善方面。針對既有建築的外殼進行節能改善其成本較高，且針對外牆隔熱性能提升在實務上，由於需另外考量施工鷹架與人力之成本較不易推動，在政策推動擴散效果上恐不彰，僅能透過都市更新、危老重建、老屋外殼改善(老屋拉皮)等作法同時一併提升建築外牆的隔熱性能，此策略在節能改善推動之過程緩慢且成本效益不佳。僅屋頂隔熱在施工上比外牆隔熱施工容易，倘政策上針對屋齡老舊屋頂有漏水疑慮之案例，在進行屋頂防水改善時一併施作屋頂的隔熱性能，再予以補助隔熱之部分，應是較具實務之作法。而針對建築開口窗玻璃之節能改善上，既有老舊建築之窗玻璃不若新建築擁有較佳之日射遮蔽性能，老舊建築之玻璃窗多為單層清玻璃，其日射取得係數(SHGC)往往大於0.8 節能效果差，窗玻璃之直接替換涉及窗框重新施作等因素，施工複雜實務上也不太實際。而於窗玻璃室內側直接貼附隔熱膜之作法看似為較可行之作法。然而，過去曾有研究以玻璃貼隔熱膜之方式進行空調節能效益與成本之估算(陳瑞鈴 and 黃國倉 2017)，由於採用較具節能效果之隔熱膜其成本亦較高昂，發現其回收年限將高達 29-69 年不等，似也不盡是符合成本效益之作法。

縱使屋頂層之隔熱提升，以全國住商溫室氣體排放總量來看，由於隔熱提升所帶來的空調節能受惠者僅為位於頂樓的住戶，效益恐不大。過去研究顯示(羅時麒, 黃國倉 et al. 2020)，以整個商業建築而言，如將既有建築之外牆構造U值大於 2.75 ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)、開口率大於 40%且窗玻璃之SHGC大於 0.6 之案例於 10 年內全面進行節能改善，將這些建築的外殼優化至外牆的 $U=2.75$ ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) 以及外窗玻璃的SHGC達 0.6 之節能水準，透過模擬其節能效益也僅有整個住商部門溫室氣體排放的 2.62%減碳效益；另一較貼近現實可行之方案若以全國四成之商

業建築進行建築外殼節能改善，其帶來的減碳效益更只比同年基線BAU情況下減碳 1.4%，成效不大但成本高。

上述這些以仰賴建築外殼熱性能之節能改善作法，對於實際住商最終用電(或排碳量)的影響在於降低建築空調設備系統的耗能，然而其影響是間接的且與空調設備運轉使用的時間多寡有關，對於全年空調運轉的建築物其節能效果才會彰顯；但對於為數眾多的住宅建築，由於住宅多屬間歇型空調運轉的建築型態，且住宅內並非每個室內空間皆同時運轉，全年空調使用時數不若中央空調型的商業建築來得大。因此，直接針對耗電來源設備進行能源使用效率之提升，是更為直接且有效的作法。而建築外殼熱性能之提升，則應以強化既有之建築節能法規規範，同時針對未來的新建建築強制導入建築能效標示，並以朝近零能耗建築之目標邁進。

6.4.1 住商部門可行之減碳方案及策略彙整

探尋過去內政部針對住商部門溫室氣體減量策略所研提之策略內容羅列整理如下表 6-9 所示，其內容包括五大推動方案：(1)提升建築能源效率、(2)強化建築節能法規、(3)既有建築獎勵措施、(4)推動既有建築效能分級管理與(5)推動新舊建築減量措施等項目(行政院環境保護署 2018)。其中雖羅列了相對應的預期效益與所需成本，然而過去由於缺少可靠之建築溫室氣體排放基線之模型，因此這些預期效益可能存在不少的誤差。

而在最新政府所提的建築淨零排放路徑初步之推動時程藍圖，如表 6-10 所示，區分為新建建築之推動策略與針對既有建築節能改善的推動策略。在對新建建築的策略方法上，為了因應未來氣候溫暖化導致之耗能增加，除了應持續強化建築技術規則內之建築外殼節約能源設計標準與綠建築標章內之日常節能評估外，建議可研議除公有建築外，民間的新建建築達一定規模以上時也應逐漸強制取得一定等級的綠建築標章，尤其是針對綠建築標章中直接影響未來建築之能耗的日常節能指標，更需規定必須取得該指標一定之分級得分，則較有減碳之效果。此外，有鑑於我國已完成建築能效標示之評估規範，其中能效標示為 1+ 等級者即定義為近零能源建築。依表 6-10 所規劃之時程預計 2024 年始新建建築達 5000 萬造價者強制開始納入標示，而至 2030 年始新建建築需達能效 1 級；至 2040 年達近零能源建築(能效 1+ 等級)，其餘建築節能手段無法達成碳中和之部分再輔以再生能源之創能補足，最終並於 2050 年達淨零耗能建築。

但有鑑於規模較小的建築物更有機會達成淨零排放，建築規模大的建築物其基礎耗能本身就高，不易達成真正的淨零能耗。因此，考量小規模建築取得高等級之建築能效標示較易，在未來建築能效標示制度之設計上，應有別於現行綠建築之作法，建議優先以小規模建築為對象提早納入建築能效標示，並以取得 1+ 等級之近零能耗水準為目標，再加上小規模建築之數量占比可觀產生之全國總節能效益也較大，更能達到整體建築部門之減碳效果。

表 6-9 105 年至 109 年內政部推動策略及措施彙整表

推動方案	策略	主(協)管	政策&方案	預期效益	成本
------	----	-------	-------	------	----

		機關			(萬元)
提升建築能源效率	推廣綠建築	內政部建研所	(住宅)取得候選綠建築證書及綠建築標章相關措施	每年新增約 190 件候選綠建築證書及綠建築標章。預計累計減碳量約為 6.99 萬公噸CO ₂ e。	1,150
		內政部建研所	(商業)取得候選綠建築證書及綠建築標章相關措施	每年新增約 310 件候選綠建築證書及綠建築標章。預計累計減碳量約為 36.51 萬公噸CO ₂ e。	
強化建築節能法規	新建建築能效提升	內政部營建署	(住宅)強化新建建築物節約能源相關法規	累計約為 29.5 萬公噸CO ₂ e。	500
		內政部營建署	(商業)強化新建建築物節約能源相關法規	累計約為 20.5 萬公噸CO ₂ e。	
		內政部營建署	落實新建建築物節約能源設計管制	補助地方政府辦理綠建築審核抽查及法規宣導工作，每年約執行 4 千餘件建築執照綠建築抽查及 30 場次綠建築宣導活動。	10,000
既有建築獎勵措施	既有建築減量管理	內政部營建署	都市更新整建維護補助	既有建築與新建築採用綠建材、綠色能源或綠建築工法進行整建維護工程	1,000
推動既有建築效能分級管理	規劃建築物外殼耗能資訊透明機制	內政部營建署	規劃建築物外殼耗能資訊透明機制	研議可行之建築物外殼耗能資訊揭露方式，建立建築外殼耗能分級制度。	94
		內政部營建署	規劃建築外殼耗能分級制度，登錄於建築執照	新建建築執照登載外殼耗能分級資訊。	-
		內政部營建署	規劃建築外殼耗能分級制度，結合房屋買賣定型化契約	房屋買賣定型化契約登載外殼耗能分級資訊。	-
推動新舊建築減量措施	特定對象輔導措施	內政部營建署	辦理住宅節能診斷與輔導	每年輔導 10 個以上住宅社區進行節能診斷並提供改善建議。	300

註：最右成本一欄為過去在行政院環保署所核定之預估值(行政院環境保護署 2018)

6.4.2 達成淨零能源建築之短中長期策略初步建議

綜合上述各節之分析，以下提出基於內政部或經濟部之權責為達成 2050 年我國淨零能源建築之目標，區分為不同時程可能之作法供參：

1. 短期策略(2021 年-2030 年)

● 新建建築部分：(內政部)

- (1) 逐步強化「建築技術規則」內建築外殼節約能源設計標準
- (2) 研議「建築技術規則」內增修建築設備效率規範
- (3) 逐步強化綠建築標章內日常節能指標之基準與合格門檻
- (4) 研議民間私有建築達一定規模需取得綠建築標章
- (5) 公有新建築導入「建築能效標示」
- (6) 民間新建築輔導鼓勵進行「建築能效標示」

- (7) 研議「建築能效標示」導入房屋不動產交易市場之機制
- 既有建築部分：(經濟部)
 - (1) 推動電器設備(冷氣、冷凍冷藏設備、電熱水器等)之節能汰換獎勵
 - (2) 公私有建築推動照明燈具節能汰換提高效率
 - (3) 既有建築能源診斷與改善(ESCO)
- 2. 中期策略(2031 年-2040 年)
 - 新建建築部分：(內政部)
 - (1) 公有建築強制取得建築能效第 1 等級水準
 - (2) 一定規模以上之私有建築取得建築能效第 2 等級水準
 - 既有建築部分：(經濟部)
 - (1) 推動電器設備(單體式冷氣、冷凍冷藏設備、電熱水器等)之節能汰換獎勵
 - (2) 公私有建築推動照明燈具節能汰換提高效率
 - (1) 擴大既有建築能源診斷與改善(ESCO)
- 3. 長期策略(2041 年-2050 年)
 - (1) 公有建築強制取得建築能效第 1+等級之近零能耗建築水準
 - (2) 私有建築強制取得建築能效第 1 等級水準

表 6-10 建築淨零排放路徑初步之藍圖

具體措施/規劃路徑										
110	111	112	113	114	119	124	129	134		
2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040	2045		
強化綠建築標準減碳評估			推動共有智慧綠建築實施方針，持續提升綠建築普及率							
			地方政府自治條例、環評與都審等納入綠建築設計							
研訂建築能效評估系統，定義近零碳建築	講習培訓試辦	造價5000萬以上者納入標示 以建築容積獎勵鼓勵都市更新及危老重建案取得綠建築、智慧建築標準	目標2030年達建築能效第1級		30%公有新建建築物達建築能效第1+級(近零碳建築)					
			提升基準值至10%							
落實中央空調系統(EAC指標)節能設計										
落實法治化										
30%民間新建建築物達建築能效第1級										
100%民間「建築(以再										
主動節能績效保證專案示範推廣補助										
研訂建築物實施建築能效評估及改善	研訂建築物實施建築能效評估及改善		1. 分年分階段公有建築能效評估 2. 列管未達建築能效等級之公有建築物 3. 要求各機關逐年編列預算辦理改善				40%公有既有建築物達建築能效第1級			
	20%公有既有建築物達建築能效第1級		建築(以再							
鼓勵都市更新整建維護補助案以綠建材、綠色能源或綠色工法進行										
鼓勵企業建築取得綠建築標準，納入企業責任(CSR)報告					持續推動納入企業社會責任(CSR)報告					
評估修繕貸款融資利息補貼之可行性										
鼓勵地方政府提供相關稅賦減免					逐年實施既有民間建築物節能改善提供相關稅賦減免					
主動節能績效保證專案示範推廣補助										
政府機關及學校用電效率管理計畫					政府機關及學校用電效率提升					

(資料來源：內政部建築研究所, 2021)

第七章 結論與建議

第一節 結論

本計畫完成之工作項目與獲致之結論如下：

4. 彙整國內外住商部門之減碳策略及推動之權責機關與文獻蒐集。
5. 蒐集我國經濟部能源局、環保署、台電等有關去年或前年之各項能源統計資料。此外，由於最新有關台電行業別用電統計年報其行業類別分組略有調整(85~107年版與108~109年版之分類細項不同)，本計畫重新統計彙整新的行業類別分項據以統計住商部門之年用電量。
6. 以能源局最新公告更新電力碳排放係數為 $0.492\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ (2020年)以及台灣自來水公司之每度自來水的碳排係數 $0.150\text{kgCO}_2\text{e/噸}$ (2019年)，更新未來住商碳排基線之計算基礎。
7. 透過內政部不動產資訊平台，以最新2019年之統計資料更新全國低用電戶數量為891,880戶，約占全國總戶數之10.17%，較前一年(2018年)下降了0.39%。進行未來住宅部分之碳排基線更新預估值。
8. 以最新內政部營建署之統計資料，更新109年核發住宅與商業之建築使用執照樓地板面積，作為推算未來住商部門建築之成長趨勢。更新住商部門之溫室氣體排放量基線預測從原本2035年延伸至2050年，同時減碳策略之效益亦同步推估至2050年。
9. 依照能源局最新統計之商業大樓電力流向比例資料，更新2019年始以及未來至2050年之各項建築耗能組成比例，作為推估商業建築各耗能來源之推算基礎。
10. 有鑑於去年所發展以蒙地卡羅方法作為推估未來建築耗能之模型，重新更新定義變數之範圍與增加模擬之變數，並結合未來氣候重新大量更新模擬以建立新的排碳基線預測模式，擴大模型之使用彈性，以進一步作為計畫下半年度以該模型作為評估各項住商溫室氣體減碳策略之成效。
11. 更新氣候資料，進行既有碳排預測模式之更新與滾動檢討。
12. 依照重新建立之住商碳排基線模型與滾動更新新的各項統計資料後，發現2020年住商部門年總溫室氣體總量為55,638千公噸碳當量，相較於前一年度(2019年)之58,282千公噸碳當量下降了4.5%。因此往後各年之排碳推估BAU亦隨之調整，至2025年時預估住商部門之總溫室氣體排放量依發電結構不變與改變下，將分別降為58,280與47,408千公噸碳當量。與現階段所訂的第二階段管制目標至2025年之分配排放額度分別仍有16,859與5,987千公噸碳當量之減碳缺口，尚須進一步分別再減碳26.9%與10.4%。意即排除電力碳排放係數下降所導致之溫室氣體減少量外，額外住商部門本身需再減量10.4%。

13. 本研究同時建立未來在電動車逐漸普及下，因充電樁位於建築內所增加之碳排放量預估模型。至 2050 年時因電動車充電所增加的碳排放量，在假設未來電力碳排放係數逐漸下降之前提下，為 29.9 MtCO₂，相當於占當年度之住商總溫室氣體排放量的 0.81%。
14. 本研究提出之減碳策略在同時考量成本效益、推動之難易度(擴散率)、可行性，以建築照明燈具汰換、汰換效率差之冷氣、汰換老舊冰箱等做為優先推動之項目較建築外殼節能改善，更具減碳與成本效益。自 2022 年各項上述策略逐年依各自所設定之汰換率實施至 2050 年止，依序以(1)僅實施照明節能汰換、(2)實施照明節能汰換與冷氣汰換及(3)同時實施照明節能汰換、冷氣汰換與老舊冰箱汰換等三種情境下計算其至 2050 年之減碳幅度，在假設未來我國發電結構改變電力碳排放係數逐年下降下，與當年度之基線相較後分別可減碳 4%、10.1%與 12.4%；意即於 2050 年時全國住商排碳量將分別減為 45,241、43,889 與 42,917 千公噸 CO₂e。

第二節 建議

建議一

評估我國導入建築能效標示制度之減碳效益：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣建築中心

本研究雖已基於減碳效益較為明顯之策略進行減碳潛力與成本之分析，這些策略以改善電器設備較具節能潛力。雖然建築外殼節能改善之節能效果有限，但就內政部之政策推行面而言，未來建築導入建築能效標示之制度可能是建築管理體制上較具有減碳潛力的作法。目前我國已初步完成建築能效標示之規範，並預計逐年擴大實施。因此，本研究建議除配合住商溫室氣體排放基線之滾動修正下，進一步評估導入建築能效標示制度之減碳潛力，以作為政策推動方向之參考。

附錄一：期初審查意見回覆表

項次	委員意見	回應
1.	計劃書 P22 中有關 (2) 空調節能改善效益推估中有關各項節能技術的採用率 (γ)，未來在模型推估時如何設定？	有關空調節能改善效益推估中各項節能技術的採用率，擬將依循現行綠建築評估內之空調節能評估法進行。
2.	在減碳策略之成本效益分析中，擬參考當地營建物價。近年國內因前瞻建設及台積電擴廠等原因，缺工及物價上揚此為短期之特殊現象（或許也可能成為常態？），研究中如何考量？	有關碳排預測不確定因素，包括疫情、缺工物價上揚等，目前僅能先以公告之營建物價推估，而疫情對住商碳排影響之層面複雜，再加上各行業之衝擊影響不一，未來可能僅能依歷史能耗數據進行碳排模式之修正。
3.	計劃預期目標中「完成我國淨零能源建築路徑評估報告」(Netenergy)將與創能有關，計劃中將如何考量？	淨零能源建築與創能部分，涉及我國之發電來源結構之轉型，非本計畫探討之議題。
4.	國內外相關研究的資料收集能否納入熱帶亞熱帶國家？	本研究未來將補充有關適合應用於熱帶或亞熱帶之相關文獻回顧內容。
5.	COVID-19 對能源模型溫室氣體排放的影響是否可納入？	鑑於目前能源統計僅至 2019 年，本年度碳排基線預估之修正尚不會受到疫情之影響。
6.	本案會進行建築外殼空調照明改善效益推估，而這些改善措施的逐年推廣情況如何預估？	有關各減碳策略之改善效益預估，本計畫擬透過評估各改善措施之政策擴散率來預估。
7.	氣候環境是否有亞熱帶氣候的案例，較接近台灣可以參考的策略及方式	本研究未來將補充有關適合應用於台灣氣候之相關文獻回顧內容與針對我國氣候特徵提出建築物節能減碳策略。
8.	P.22-23 的各項節能效益推估是否有權重或重要性，以提供推動策略時之參考	感謝委員建議。事實上，本研究節能效益之推估係以區分建築類別所建立以逐一解析各類之節能效益，各節能效益之相互權重已考量在模型中。
9.	P.18 運用 EnergyPlus 模擬之案例數為 LHS 生成，是否有實際案例驗證及納入推估	本計畫係利用 LHS 以推估全國之住商碳排放量，恐不適合以實際案例驗證，唯為確保所提出模式之預估精確度，將依過去之住商歷史能耗數據進行模式之修正。
10.	我國地處環亞熱帶氣候區，寒帶與溫帶氣候區之住商部門溫室氣體減量策略有所差異，請問是否針對我國氣候特徵提出建築物節能減碳策略？	本研究所提出之住商部門減碳策略將考量我國亞熱帶或熱帶氣候區之特徵，提出適合之建築物節能減碳策略。
11.	未來的減量目標相當高，住商部門面臨的挑戰很大，請問是否提出可能的減碳措施，以達到減碳目標。	本計畫將透過所建立之各類建築碳排基線，分析可能之減碳潛力，藉以提出可能的減碳措施，以臻我國減碳目標。
12.	有關外殼保溫隔熱的手法在寒帶及溫帶國家較有效益（暖房節約效益），在亞熱帶的國家效益有限（冷房節約效益），請問是否具體說明兩者差異？	本研究擬加以說明溫帶與亞熱帶國家建築節能技術之差異，藉以提出適用於台灣氣候區之減碳措施。

附錄二：期中審查意見回覆表

項次	委員意見	回應
1.	Page25 頁，表 3-2，每戶樓地板面積分配取 92.56m ² ，採用此數據的依據理由為何？另外燈光設備有無分負荷率(schedule)？	此為典型住宅平面之平均值，而照明負荷有考慮負荷率。
2.	Page39 頁，圖 3-13，商業大樓有負荷率，但此負荷率是只有一種還是配合第 49 頁，表 3-22，建築種類不同而有所不同？各類別的樓地板面積比例可區分嗎？	負荷率在不同建築類型上係採用不同的使用時程。各類別樓地板面積則根據建照之統計依比例推估不同類型建物之耗能。
3.	Page49 頁，表 3-22，所謂商業建築就是服務業所包含的種類嗎？有辦公大樓內有許多實驗室、生技檢驗室是列入服務業還是全部劃入工業部門，此部分如何分類是否有明確規定？	實驗室、生技檢驗室等空間通常屬於工業區內之廠辦，在能源統計上為工業用電，非屬住商部門之範疇。
4.	Page40 頁，公式 3-22，空調噸數與樓地板面積關係，當 1000m ² 時要 11.2m ² /RT？4975m ² 要 33.17m ² /RT，12152m ² 要 40.5m ² /RT，請問此空調總噸數是何意義？主機噸數？最高運轉噸位？年平均運轉噸位？不同面積m ² /RT差異太大不太合理？	此公式並非作為推估空調噸數使用，其目的在於進行建築耗能動態模擬時事先預判主機之效率取值範圍。以避免大容量主機卻搭配到 COP 很差之不合理情況。
5.	表 3-17，氣冷式 VRF，COP 最小值 2.95 最大值 3.85，可能太保守，估計應該要更好。(如果最小到最大 COP 值質的運轉負荷量不同時的 COP)，另外市占的 13.2%也太保守，此現有綠建築評估有 22%只有越來越多的趨勢。	建構基線模型之意義在於須能反應既有建築上之現況，而非反應現今最前沿之技術，此前提下才不會與既有之排碳情況差之千里。同理，市占率取自既有文獻之調查數據，亦是相同之考量。
6.	德國住商部門的溫室氣體減量措施，提及該國建築物節約能源法新增新建建築物零耗能建築規定，建請補充其定量的規定及演變的過程。另報告書提及“近碳中和建築”，亦建請補充。	感謝委員意見，擬將補充之。
7.	報告書提及能源推估法，國內工研院已開發 TIMES 模型，而本研究擇採用蒙地卡羅方法，其原因為何？建請補充說明。	TIMES 模型採用社會經濟因子為變數，不易評估建築節能策略之效益。本研究應用蒙地卡羅方法能夠涵蓋市面上各種不同的建築組合，採用之變因為建築變數具可操作性，同時可作為評估各種建築減碳對策之效益。
8.	住商部門未來預測結果，整體住商電力總耗能均呈耗能增加，但在電力發電結構改變下整體溫室氣體排放量則呈下降趨勢，爰建議： (1) 以經濟部預測的 2025 年電力排放係數，推估未來溫室氣體排放量，並檢討本部目前彙整各部會所提政策的減碳績效及兩者間的缺口，以利規劃未來減量路徑。	感謝委員意見，本研究將透過文獻查找有關我國電動車耗能與成長之趨勢，盡量嘗試推估。

	(2) 另請考量未來增加電動車對住商部門的充電耗能需求。	
9.	內政部雖主責住商部門的減碳成效，但住商部門並彙整經濟部能源局的績效，至於服務業部門則由經濟部負責並彙整包含交通部、教育部…等各部會工作，是相關政策工具及減碳策略，宜考量納入各部會政策，以發揮減碳成效。	感謝委員建議。本研究擬納入考量在設備層面上之減碳策略與評估其效益。
10.	另報告書部分疑義，請參考： (1) Ps.美國能源部「隸屬於行政院底下」請再確認。 (2) 現行溫室氣體減量目標要求住商部門2025年需較2005年減少27.9%，建請調整。	感謝委員提醒，本研究將據以修正。
11.	我國推動溫室氣體減量政策已有多年，請檢討各項策略之成效，目前看來，如果每度電之碳排放量降低的幅度如預期，則似乎只要用電量不增加就可以達到減碳之目標，所以建議住商部門之減碳建議以節用多少電量為目標較能確實顯現其效益。	事實上，目前僅在2020年之碳排有達到溫管法第一階段之排碳目標。而於未來，縱使加上電力排碳係數的減少，在住商部門樓地板面積成長下，預計如無任何減碳策略介入下仍不足以達成2025年之階段性目標。
12.	德國推動節能之作法有些值得參考，如在2009年訂定每平方公尺年用度量為50度，而未來的目標則是期望降到25-30度，個人認為這是一個較確實具體的做法或可作為國內推動之參考。	感謝委員意見。
13.	本研究國外相關文獻蒐集相當完整，惟部分策略有其地域特殊性，國內未必適用，建議應清楚說明避免造成誤解。例如表2-1說明德國推動再生能源之階段目標，惟宜說明德國因為有歐洲電網系統，尤其是法國為核電大國，所以當再生能源不足時可以立即供電，這些有利因素在台灣是不存在的；另第4頁有關德國對於既有建築進行節能改善部分語意不清建議宜作更清楚之說明。	感謝委員意見，遵照辦理。
14.	在文獻回顧英國在節能策略部分，因應地球氣候之轉變，已經逐漸從過去以暖氣為主逐漸需考慮夏天氣溫升高之冷房需求，所以強調改造住宅之通風與遮陽(p.10)，對應綠建築有關住宅部分建議同樣應加強通風與遮陽，尤其現在很多住宅都配合綠建築將窗戶之窗台做到1.2公尺，不只通風效果不佳以國內部分住宅坪數小，視覺效果與使用性能都受到影響。	感謝委員意見。住宅通風與遮陽之規定屬於綠建築規範之範疇，以誘導設計。非本計畫之研究範圍。
15.	本研究致力於推估模式之修正，讓推估模式可更趨近於實際值，成果確實值得肯定。惟本研究之重點為減量策略成本效益之研究，本階段均未提出相關資料，另表5-2中所提過去之減	減量策略成本效益部分將於期末成果中呈現。而，「推動建築外殼耗能資訊」部分，由於成效恐不佳，本研究將不予考量為減碳策略。

	量策略，其中「推動建築外殼耗能資訊」，由於外殼耗影響建築能耗有限，是否延續推動建議再酌。	
16.	住宅部門耗能項目熱水，溫室氣體排放占比，約達 13%~14%，且該項目亦為 TIMES 模型所列住商部門能源服務需求及基線推估項目之一，具重要性。參酌美國能源效率改善策略，在熱水部分，系採管制電熱水器使用及販賣時之能源效率辦理。建議參照考量列入住商部門減碳路徑之一。	感謝委員建議，設備能源效率基準之訂定權責非為內政部，本研究將考量本土應用之可行性再行評估是否決定參採此策略。
17.	住商部門人員服務需求範疇（表 2-4）冰箱乙項只列住商用，而未將服務業使用之冰箱列入，是否漏列？由於服務業包含旅館、學校、醫院、宿舍…等，其使用的冰箱若未納入能源消費推估，將影響推估結果之產出。請明察補正。	感謝委員意見，冰箱之耗能係被計入在家電設備中。
18.	住商部門最耗電的項目，根據圖 4-10 所示，應屬家電占比最高。惟第 54 頁，根據圖 4-5 敘及住宅部門最耗電項目為空調及照明，是否誤值？由於圖 4-5 尺度（十億度）較大，各項顏色相近，判讀不易。併請修正。	感謝委員提醒，擬重新檢視後予以更正。
19.	有關住商部門溫室氣體減量策略之一，推動既有建築效能分級管理，規則外殼耗能資訊透明機制部分，由於外殼節能法規，實際僅有 10% 之建築能效規範效力，而空調、照明、電器、管運，使用行為及環境等級等相關因子，實質上對能效影響更大。故近來建築研究所陸續研發建立之建築能效標示制度。將各項因子納入評估，可提高建築能效規範能力至 90%~100%，是更周延精確的管制工具。建議修訂幾項策略，由社會住宅率先進行建築能效認證。	感謝委員建議，「建築外殼資訊透明」對節能之幫助不大，擬予以排除於減碳策略之外。
20.	本案主題為政府對住商部門溫室氣體減量策略之成本效益分析，而第五章第二節所蒐集之 105-109 成本，僅列出各項內政部推動策略所編預算，是否足以反應該等政策所投入成本？	該表所呈現者僅為過去政府部門之概估值，非政策所投入之成本。
21.	住商部門在用電量分析模型中，是否需將考量夜間照明、景觀照明等用電納入評估。	這類用電的占總體耗能之比例甚小，目前歸納在其他項內考量。
22.	報告中使用占與佔不一，建議統一。 p.5 第二段第三行末，圖 2-2 之連結有誤，煩請更正。p.65 頁之表 5-2 與其後文字應加空格，否則易造成誤解。	感謝委員提醒，業已修正。
23.	報告中指出引用最新電力排碳係數為 109 年之 0.492 公斤/度，名稱請修正為電力排碳係數，另能源局尚未公告 109 年之電力排碳係數。	感謝委員提醒，擬修正為 108 年公告之電力排碳係數，以 0.509 公斤/度計算。

24.	由於能源耗用為住商部門主要之溫室氣體排放來源，且近年來住商部門用電需求增加，若評估減碳成效，建議不宜將電力排碳係數之下降成效計算在內，而改以實質之節電成效計算，有助於國家整體減量之規劃。	研究中所呈現者為建築碳排之基線情況，尚未將節電成效計入。但由於本研究為了以溫室氣體排放量呈現未來排碳趨勢與計算減碳效益，因此必須考量電力排碳係數，唯為了考量未來排碳係數變化趨勢之不確定性，因此乃將以未來電力排碳係數不變與能源局預計之改變量分別呈現。
25.	報告呈現之減碳策略多為技術面措施，建議可增加行政管控(如禁止耗能產品銷售)及經濟誘因(如能源價格)之措施。	謝謝委員建議，此類措施與內政部之建築管理較無關連，可能超出本研究之範圍。
26.	請補充說明住宅建模 300 戶、辦公建模 1,000 戶數量依據？	數量之決定此乃綜合考量不同建築類型間與熱負荷差異相關之變數多寡及其各變數之設計多樣性而決定之。
27.	P.30 住宅照明密度係引用較早期文獻，建議宜考量下修(因 LED 普及)，至少與綠建築手冊數據接近。	由於所建立的是「碳排基線」，意即必須考量大量既有建築之目前之照明水準；而綠建築之規範係針對新建築之規範，新建築之占比相對於既有存量而言比例是較少的。
28.	商業建築推估目前所見以辦公建築為代表，能推估其他類型建築嗎？	本研究以蒙地卡羅方法建構建築碳排基線必須仰賴大量之電腦模擬工作，礙於研究工作量之負荷，其他類型建築之碳排基線推估目前暫以所占之能耗比例推估。
29.	P.39 引用 2010 文獻表示國內現況以 CAV+VWV 系統為大宗，然目前綠建築評估已經把 VAV 視為一般技術(不採用則扣分)，理當此技術已有一定滲透率，建議有對應調整	本研究第一部份所建立的是建築碳排「基線」必須反應既有建築之現況，而非最先進最新穎的技術。而，節能技術之考量則將反應於節能減碳之策略上。
30.	P.61 圖 4-14 及簡報 34 頁，碳排放變化跟人口氣候情境似無關，建議補充原因。	商業建築成長變化之趨勢，不若住宅對人口變化敏感。而氣候之因素影響商業建築之空調耗能，對整個耗體之占比約為三成之譜，且未來氣候本研究係仰賴全球大氣環流模式(GCM)之推估，一般 GCM 在全球氣候變遷之變化可能要在 2050 年以後，不同的氣候變遷情境下其氣候才會有顯著之差異，這可能必須再拉長時間觀察。
31.	地球暖化情況日趨嚴重，建築物節能減碳極具重要性。這個研究案，以建築師執業立場而言，給予肯定。	感謝委員肯定。
32.	以目前之「舊建築物」而言，冷氣使用量只有持續上升情形。故，除了新建物的設計在「綠建築標章」研究外，建議在較小規模建築物及舊建築物上，也能加以考量研究。	感謝委員意見，本研究係為建立模式以推估我國既有建築之碳排，委員之建議恐非本研究之議題，建議作為未來相關之研究。

附錄三：期末審查意見回覆表

項次	委員意見	回應
1.	商業建築溫室氣體推估理論之空調系統模擬設定表 3-20 內容，有幾點請在報告內註明： (1) 該設定是針對 2000 年系統?2005 年系統?2019 年?2030 年?空調系統? (2) 市占 86.8% CAV+VWV 系統，應詳細說明市什麼樣系統，VRF 13.2%?該資料為 2010 年的報告，所以模擬設定應是 2019 年?與市場的案例差異太大! (3) 外氣是採用 ACH: 0.1~0.5 是否指新鮮空氣外氣量?如果是則與實際狀況差距太大。 (4) COP 最小值最大值是指全系統之值? (5) 2021~2030 年之後則此模擬設定會如何做，與 EAC 有關嗎?	由於溫管法所定義之基準年為 2005 年，因此本研究之情境假設皆基於在 2005 年左右之使用情境。市佔率之資料是參考自 2010 之既有文獻，唯目前無更新的統計資料，因此佔以既有文獻為參考值，待未來有新的統計數據，再予以更新。而 COP 為冷凍主機之效率非全系統效率。此外，本研究採用電腦動態模擬之方式與氣候精算空調耗能量，非採用 EAC 推估。
2.	文獻資料蒐集完整並做詳細分析推估溫室氣體排放模式與省電策略影響等值得肯定。	感謝委員肯定。
3.	本研究題目為溫室氣體薦量策略成本效益，但是結論中似乎只提汰換燈具、空調設備及冰箱百分比對溫室氣體薦量之影響，但未提出更換之成本(應考慮購置之費用、使用年限等)。	本研究係以外部報酬率之工程經濟方法同時考量未來逐年不同汰換率下推算潛在之成本。
4.	登記汰換中提到汰換鹵素燈，惟鹵素燈目前似乎已不常見，納入汰換對策假設是否妥適請再酌。	報告中之數據皆引用自既有之文獻統計，本研究僅能就既有之文獻統計數據進行參數之假設。
5.	Covid-19 疫情之後，部分商業(網購)辦公(居家辦公)形式可能會影響後續之生活方式，再推估時是否需納入考慮。	由於目前無相關因為疫情導致使用行為變化之報告文獻，佔無法考量 COVID-19 的影響。
6.	根據報告書 P.7 美國住商部門之溫室氣體健量措施內得知美國的建築部門占了全美 40% 以上的能源消耗以及 76% 以上之電力消費，同時占全美總溫室氣體排放量大於 40%，可見本國溫室氣體排放量應大於 40%，因此新建築透過推廣使用再生綠建材在降低溫室氣體排放量是最實際最有效益。	謝謝指教，事實上建材之隱藏碳排，以辦公建築為例約僅佔二成。因此以減碳策略而言，應著眼於建築使用階段之能源減量，效果將會較佳。
7.	建議建構全國建築耗能資料庫，提供建築業界參考選用，達到減碳效益。	謝謝委員肯定。
8.	P.27 表 3-2，每戶人員數 4 人，是否要下修表內的客餐臥等空間之照明密度與 P.34 表 3-8 又有不同，有無統一需要?	照明用電量與空調耗能之推估意義不盡然相同，本研究在空調耗能推估上因採用 ASHRAE 之標準時程，因此配合其密度值。當然如將二者統一或調整室內人數等亦無不可，只是對空調耗能的影響很小，不至於影響整體建築群溫室氣體排放量之推估。

9.	P.32 冷房度時設在 23C，可否改變調整，調高調低那個會對減碳有利?	冷房度時非空調設定溫度，其意義在於呈現未來氣候對空調可能之耗能變化。CDH 以 23 度起算是基於與目前 ENVLOAD 一致。
10.	2050 年人均樓地板面積 P.37 推估 89.95m ² /人，而 P.29 民國 99 年僅 33.2m ² /人(全國平均)，是否相差過大? 未來台灣的人口是負成長 P.36 表 3-13 的低度用戶都保持 10% 嗎?	感謝委員提醒，文中單位誤繕 89.95 應為每戶平均面積。而低度用戶係採用目前台電的推估值。未來低度用戶變化不見得單純與人口有關，家庭結構，戶均人口之改變亦是變因之一，影響因子可能很多元，非本研究探討之議題，目前僅就現有資料進行推估。未來有新數據再以滾動修正的方式處理。
11.	P.39 住宅用水是 98.6m ³ /人年換算後相當 270L/人·日與現行自來水用量計算 225L(台北市)或 250L(台南市)都還高。P.52 商業部門用水量 25.4m ³ /人年換算後 90L/人·日(105 一年上班 280 日·升)是否過大?	單位用水量是參考自既有文獻，如有更新的統計數據，未來再予以代入修正。
12.	P.90 策略建議短期新建(2)建築技術規則從未有訂定設備效率規範之先例，設備效率應歸經濟部工業部門制定，倒是可以研訂系統效率，如中央空調系統效率。中期策略中新建(1)公有建築強制取得 1 及效能，可能還是要區分用途與面積大小為主。	感謝委員建議，將補充修正於報告中。
13.	P.71 小客車推估 圖 5-3 在未來人口減少、戶數持平下，小客車仍持續成長? 圖 5-4 電動車占比在 2030 年後不生產燃油車的情況下，後段的占比似乎不應是線性，而是拋物線。圖 5-5 技術效率單位 km/L，代表什麼意義?	電動車的推估目前既有文獻僅推估到 2035 年，且呈現線性發展，因此至於對遠未來至 2050 年之趨勢本研究在無相關資料佐證下暫先以同樣之線性趨勢進行推估。此外，技術效率單位應為 km/kWh。
14.	建築能效標示若要導入不動產交易市場，可能要重新修訂 EEWB-BERSe，因為不動產交易市場是以戶為單位，非以整棟建築物為單位。而且 R-BERS 也沒有既有建築物版本，應有一些困難。	感謝委員建議。本研究也因此是提出需「研議」導入不動產市場接軌之機制，其中也可能包括評估法的修正。然而，本項策略建議之提出另有委員建議取消，因此已刪除。
15.	本案針對住商建築耗能占比較高項目，設定不同情境，詳實推估演算期可達成之節能率，所需之汰換成本及不同結合態樣彌補減碳缺口之能力，獲得更有效可行減碳策略，是未來修訂溫減推動策略之重要參據。	感謝委員肯定。
16.	冷氣、照明與冰箱效率提升後用電變化趨勢圖(圖 6-4、圖 6-5、圖 6-8)誤繕，請訂正。	感謝委員提醒，已更新文字內容。
17.	有關短期策略研設「建築能效標示」導入房屋交易市場機制乙項，牽涉廣泛，執行難度高，建議取消	遵照辦理。
18.	成果結論(11)三種不同情境至 2050 年之減碳幅度，各數值請再複檢確認。	遵照辦理。

19.	感謝研究團隊於報告書第 2 章彙整許多國外住商部門的減碳策略，建議將各國法規、政策等措施整理成表格呈現，並註明權責單位，以便了解各國推動架構。	謝謝建議，各國之減碳策略不盡然相同，在無同一框架架構下不容易以表格處理，以段落論述會較清楚。至權責單位部分，資料來源內因未載明因此也無法得知。請諒察。
20.	報告書第 90 頁短期策略建議「研議建築技術規則內增修建築設備效率規範」部分，建築技術規則可在條文明定依其他設備主管機關之法令規定辦理，而非於技術規則就各項設備另定一套效率規範，建議文字再做調整	遵照辦理。
21.	報告書部分文字及用詞似有誤植或待釐清處列舉如下，請研究團隊參考 (1) 結論 P.93 第 9 點內容數值(需再減 8.9%)與 P.68 內容數值(需再減 10.4%)不同，請釐清 (2) P.4 近碳中和建築用詞請釐清 (3) P.17 區域冷房系統(District Cooling Systems)是否為中央空調系統？建議補充說明 (4) P.8 第 6 行是否應為表 2-4？ (5) P.18 第 7 行能效誤植為能校 (6) P.20 第 3 行是否為表 2-9？ (7) P.89 建議將文末"建築部門"改為"住商部門"	感謝提醒，誤植內容皆以訂正更新。用詞部分也已依委員意見修正。
22.	商業部門家用型電冰箱占少數，預期是商用的冷凍冷藏設備居多。目前因未有相關統計資料故參採家用冷箱之數值，未來商用凍冷藏設備之能效分級標準公告後，建議修正商業部門在冷凍冷藏設備之節能效益推估。	感謝委員建議。未來如有相關數值將進行滾動修正。
23.	表 6-10 建築淨零排放路徑初步之藍圖於 8 月有調整一版，建議更新。	謝謝委員建議，擬向所內索取最新資料再予以更新。
24.	P.88 U 值單位有誤。另，對於建築外殼改善事宜，固然成本效益不佳，惟目前推估，住商部門不盡然能達 2025 減碳目標，甚至 2050 淨零排放仍為遙遙長路，未來電力(費)情境亦可能改變而造成推動效益變化，故建議仍要納入評估考量，當然實際執行面上推動順位可能不見的是最優先要處理的項目。	感謝委員建議。建築外殼改善之效益過去已有過評估報告，可參考去年(109年)建研所之報告。
25.	2005 年是一個基準年，請於文內適當位置說明 2005 年時台灣地區之溫室氣體總量，及住商部門之溫室氣體量為若干。	遵照辦理。
26.	文內提及全國住宅與服務業之溫室氣體排放量占全國總碳排放量 11.0%與 10.7%。上述百分比與經濟部能源局的統計數據 13.3%、13.7% 2005 年不符，建請釐清。	此數據來源是參考自 2019 年環保署之統計。

參考書目

1. California Energy Commission (2019). California Titled 24 Alternative Calculation Method Manual.
2. Committee, C. C. (2020). The Sixth Carbon Budget summary - Buildings.
3. Department of Energy (2015). "American State Building Codes." <https://www.buildingsguide.com/blog/resources-building-codes-state/>(Accessed Date: 2021.02.15).
4. Deutsche Energie-Agentur "zukunft haus." <https://www.zukunft-haus.info/start/>(Accessed date: 2021.02.15).
5. energy, E. (2021). "EPC rating bands." <https://www.edfenergy.com/energy-efficiency/how-improve-your-epc-rating>.
6. Energy, U. D. O. (2017). "Electricity Costs for Charging." https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_charging_home.html(2021.09.27).
7. Environment Bureau of Hong Kong (2017). Hong Kong's Climate Action Plan 2030+, Environment Bureau, Hong Kong.
8. European Commission, J. R. C. J., PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, (2013). "Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), Release Version 4.2 FT2010." <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>.
9. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy "Energiewende." <https://www.bmwi.de/Navigation/DE/Home/home.html>(Accessed date: 2021.02.15).
10. Huang, K.-T. and R.-L. Hwang (2016). "Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan." *Applied Energy* 184: 1230-1240.
11. International Energy Agency (2012). "CO2 Emissions from Fuel Combustion. Beyond 2020 Online Database." Available at: <http://data.iea.org>.
12. International Energy Agency (2013). "IEA Online Data Services." <http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp>.
13. Isaac, M. and D. P. Van Vuuren (2009). "Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change." *Energy policy* 37(2): 507-521.
14. Jiang, X., L. Iu, J. R. Gibson, L. Chan, W. K. Fong and R. Henning (2020). Towards a Better hong Kong - PATHWAYS TO NET ZERO CARBON EMISSIONS BY 2050, World Resources Institute.
15. KfW (2021). "The efficiency house levels for a new building." <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-Effizienzhaus/>.
16. Leung, J. (2018). DECARBONIZING U.S. BUILDINGS. *Climate Innovation 2050*. ARLINGTON, VA, USA, Center for Climate and Energy Solutions.
17. The IPCC Working Group III (2014). "Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*.
18. the White House "Executive Order -- Planning for Federal Sustainability in the Next Decade." <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/03/19/executive-order-planning-federal-sustainability-next-decade>(Accessed date:

- 2021.02.15).
19. U.S. Energy Information Administration (2018). Annual Energy Outlook 2018. Washington, DC, USA, U.S. Department of Energy.
 20. U.S. Energy Information Administration (2018). Monthly Energy Review February 2018. Washington, DC, USA, U.S. Department of Energy.
 21. 工研院綠能所 (2016). "臺灣 TIMES 模型住宅與服務業部門技術資料庫維護更新."
 22. 工業技術研究院 (2016). "電冰箱「容許耗用能源基準與能源效率分級標示事項、方法及檢查方式」修訂草案廠商座談會."
 23. 中華民國統計資訊網. "國民所得及經濟成長統計資料庫." (Accessed date:6/21, 2020), from <http://statdb.dgbas.gov.tw/pxweb/Dialog/NI.asp?mp=4>.
 24. 內政部不動產資訊平台. "低度及待售住宅." (Accessed date: 6/11, 2020) from <https://pip.moi.gov.tw/V3/E/SCRE0104.aspx>.
 25. 內政部戶政司 (2021). "縣市戶口數按戶別." <https://www.ris.gov.tw/app/portal/346>.
 26. 內政部戶政司全球資訊網. "人口統計資料庫." (Accessed date:6/18, 2020) from <https://www.ris.gov.tw/app/portal/674>.
 27. 內政部戶政司全球資訊網 (2021). "人口統計資料庫." <https://www.ris.gov.tw/app/portal/674>.
 28. 內政部建築研究所 (2014). 綠建築評估手冊-基本型.
 29. 內政部營建署 (2006). 臺閩地區住宅狀況調查.
 30. 內政部營建署 (2006 至 2020). 2006-2020 縣市建造核發及使用執照概況.
 31. 台灣自來水全球資訊網. "每度用水排放二氧化碳(CO₂)約當量." (Accessed date: 6/18, 2020), from <https://www.water.gov.tw/ch/Subject/Detail/2269?nodeId=813>.
 32. 台灣電力公司 (2018). "電力行業別用電(98~107 年資料)."
 33. 交通部 (2021). "機動車登記數." <https://stat.motc.gov.tw/mocdb/stmain.jsp?sys=100&funid=b3301>(Accessed date:2021.10.01).
 34. 交通部 (2021). "機動車輛登記數按縣市別及使用燃料分." <https://stat.motc.gov.tw/mocdb/stmain.jsp?sys=220&ym=10109&ymt=11008&kind=21&type=9&funid=b330104&cycle=41&outmode=0&compmode=0&outkind=1&fld11=1&cod13=1&rdm=imbmimlx>(Accessed date: 2021.09.27).
 35. 行政院主計總處 (2010). 人口及住宅普查.
 36. 行政院環境保護署 (2018). 住商部門溫室氣體排放管制行動方案(第一期階段)核定本. 台北, 行政院環境保護署.
 37. 行政院環境保護署 (2019). 溫室氣體排放係數管理表.
 38. 何明錦 and 黃國倉 (2013). "臺灣建築能源模擬解析用逐時標準氣象資料 TMY3 之建置與研究." 內政部建築研究所協同研究報告.
 39. 李孟杰 (2006). "住宅生活熱水使用耗能評估與節能方法之研究." 國立臺灣科技大學博士論文.
 40. 李孟穎; 工業技術研究院 (2018). "TIMES 能源工程模型運輸部門."
 41. 林唐裕, 黃宗煌 and 陳玟如 (2014). 因應不確定性因素情境下電力負載預測之研究, 財團法人台灣綜合研究院
 42. 林素琴 and 林志勳 (2017). "我國住宅部門電力使用." 臺灣能源期刊 第四

- 卷第三期: pp.285-302.
44. 林憲德 (2018). "建築產業碳足跡."
 45. 林憲德 and 賴柏亨 (2010). "辦公大樓空調形式與耗能特性之研究." 建築學報(74): 27-44.
 46. 國家發展委員會 (2018). 中華民國人口推估 (2018 至 2065 年) .
 47. 梁世武 (2019). "106 年家用電器普及狀況調查." 台灣電力股份有限公司綜合研究所委託研究.
 48. 郭柏巖 (2005). "住宅耗電實測解析與評估系統之研究." 國立成功大學建築研究所博士論文.
 49. 郭瑾瑋, 周裕豐, 洪明龍 and 劉子銜 (2015). "應用臺灣TIMES模型進行我國長期電力供需規劃." 臺灣能源期刊 第 2 卷第 4 期.
 50. 郭瑾瑋, 溫珮伶, 徐昕煒, 周裕豐 and 李孟穎 (2021). 臺灣能源工程模型：住服部門, 工研院綠能與環境研究所.
 51. 郭瑾瑋, 溫珮伶, 徐昕煒, 周裕豐 and 李孟穎 (2017). "臺灣能源工程模型：住服部門." 工研院綠能與環境研究所.
 52. 陳政弘 (2018). "溫室氣體階段管制目標中長期社經參數推估." 國家發展委員會.
 53. 陳瑞鈴 and 黃國倉 (2017). 既有建築外殼開口部應用玻璃隔熱膜節能改善對策. 台北, 內政部建築研究所.
 54. 陳麒任 (2017). "推動既有建築節能改善策略與效益之研究." 內政部建築研究所自行研究報告.
 55. 經濟部 (2018). "能源部門溫室氣體排放管制行動方案(第一期階段)核定本."
 56. 經濟部 (2021). "電動汽車充電基礎設施推動初步規劃草案." 4.
 57. 經濟部能源局 (2018). "2018 非生產性質行業能源查核年報."
 58. 經濟部能源局 (2019). 107 年度電力排碳係數.
 59. 經濟部能源局 (2019). 2019 非生產性質行業能源查核年報.
 60. 經濟部能源局 (2019). "我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析."
 61. 經濟部能源局 (2020). "109 年(2020)能源平衡表之原單位."
 62. 經濟部能源局 (2020). "2020 年非生產性值行業能源查核年報."
 63. 臺北自來水事業處. "每度水排放二氧化碳約當量及計算公式." (Accessed date:6/18, 2020) , from https://www.water.gov.taipei/News_Content.aspx?n=30E4EDA27F6D9953&sms=87415A8B9CE81B16&s=A82FC62D5CECBA69.
 64. 鄭凱文 (2004). 家用太陽能熱水器輔助電熱器耗能因子分析. 碩士, 國立成功大學.
 65. 羅時麒, 黃國倉 and 黃瑞隆 (2020). "建築溫室氣體排放預測及減量措施之分析." 內政部建築研究所協同研究期末報告.
 66. 羅時麒, 黃國倉, 黃瑞隆, 簡裕恒, 龔宇彥 and 黃彥碩 (2020). 建築溫室氣體排放預測及減量措施之分析. 台北, 內政部建築研究所.
 67. 羅時麒, 黃瑞隆 and 黃國倉 (2017). "基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略." 內政部建築研究所協同研究期末報告.
 68. 蘇育弘 (2018). "大台北地區家戶食物能源消費之探討." 臺灣師範大學地理學系學位論文: 1-91.