

110年度 內政部建築研究所 研究成果發表講習會

論文集

場次F3 智慧綠建築科技發展應用

- 建築物同層排水系統設計及技術應用之研究-廖婉茹
- 住商部門溫室氣體減量策略成本效益之研究-黃國倉
- AIoT 影像感測器在建築物安全應用與效益研究-余文德

主辦單位：內政部建築研究所
中華民國111年5月



建築物同層排水系統設計及技術應用之研究

主講人簡歷

姓 名：廖婉茹

服務單位：國立高雄科技大學營建工程系

職 稱：副教授

聯絡電話：07-6011000*32114

傳 真：07-6011017

電子信箱：liaowj@nkust.edu.tw

學 歷：國立臺灣科技大學建築博士

經 歷：臺灣建築學會建築性能評定中心委員

綠建築標章評定專業機構南區評定小組成員

主要著作：

1. Wan-Ju Liao, Cheng-Li Cheng ,Chao-Jung Lee,2021 Study on the Bathroom Space and the Application of Same-Floor Drainage in Congregate Housing, Journal of Water, Volume 13,Issue 20,2922.
2. Wan-Ju Liao , Chieh-Hsin Tang , 2021, Teaching Implementation of Practical Education and Innovative Construction Method, Journal of Sustainability, Volume 13, Issue 24, 13731.
3. 王榮進，鄭政利，廖婉茹，河村禎彥，呂文弘，徐虎嘯，陳麒任，2020，綠建築與近零能源制度之調合研究，臺灣建築學會「建築學報」第114期增刊（建築物理環境控制專刊），59~77頁，2020年12月
4. Wan-Ju Liao,Fu-Chou Cheng ,2019, Quality Assessment of Environmental Hygiene and Health of Indoor Bathroom Design, Journal of ARCHITECTURE,No.110,Special Issue on Innovation Low-carbon and Green Building.

中文摘要

羅時麒¹ 廖婉茹² 徐虎嘯³

關鍵字：同層排水、建築物生命週期、建築排水系統

於建築生命週期的規劃中，排水設備系統生命週期規劃往往遠比建築構造使用來得短，大約平均壽命約 15 年，需要經常更新及維護才能保持排水順暢。集合住宅建築排水系統設備管路的規劃設計，傳統施工方法基於經濟與方便之考量，多採取排水管路貫穿至下一樓層之作法。此貫穿樓版之排水設計工法，由於已經侵入他人住戶之專用區分所有權範圍，對於日後排水管路的生命週期維護修理，造成極大之困難與實務操作上之困擾，急須透過法令規範解決問題與導正合理之設計技術工法。

本研究透過實際案例調查，掌握建築同層排水實務作法。針對建築同層排水於生命週期之成本效益分析，以建築造價整體來看，導入同層排水工法大約增加 2% 內成本，其維修、施工時間皆具有最佳表現。另一方面，彙整同層排水工法施作方式、維護管理以及應用等，提供一完整明確的資料，作為設計及施工單位參考依據，或供業界或民眾參考使用，以提升建築環境品質，落實建築物全生命週期，永續營運與更新維護理念。

¹內政部建築研究所 組長

²國立高雄科技大學營建工程系 副教授

³內政部建築研究所 副研究員

ABSTRACT

Keywords : same floor drain; life cycle cost; building drainage system

Building drainage system is critical to home sanitation. It relies on the correct drainage pipeline configuration to fulfill the purpose of health and safety. In general, the life cycle of drainage system in congregate housing is much shorter than that of building structures, which has an average service life of about 15 years.

In Taiwan's traditional building drainage systems, the floor-penetrating method is often adopted since it is relatively simple and easy to implement. However, such method may lead to issues like water leakage, blockage and noise, with water leakage being the most serious problem¹¹. This type of piping method with drainage pipes penetrating through the floor and reaching the ceiling of the house downstairs causes not only inconvenience in maintenance, but also several housing disputes. Moreover, the application of such method to congregate housing also infringes the ownership of other households.

This study first understands the current practice of same-floor drainage for buildings in Taiwan. Furthermore, life cycle cost net present value analysis was adopted to investigate the cost and benefit between same-floor drainage system and the traditional piping system. In addition, actual building cases were introduced for discussion, serving as the reference for planning the design and cost of same-floor drainage system for buildings in the future.

壹、緒論

一、研究動機與目的

建築給排水設備系統的設置攸關建築居住環境的健康安全性能與居住舒適要求，隨著住宅居住品質提升與建築規劃設計及營造技術的進步，民眾對於相關設施的要求亦相對提高。然而建築排水通氣系統通常隱藏於設備管道空間，雖然與民眾日常生活關係密切，其重要性與相關生命週期為修管理課題發展，在規劃設計階段往往被輕忽。

台灣一直以來興建的住宅，皆使用穿板工法設計排水，因其工法工法施作較為簡單、方便，但隨著時間的考驗設備管線會產生鏽蝕、接合處腐蝕漏水等問題，影響至下層住戶。另一方面，由於臺灣目前對於配管系統實務上，國內建築設計法規對於給排水管路配置範圍與施工方式並無明確規定，建築使用專用區分所有權相關之公寓大廈管理辦法，對於區分所有權範圍排水管路配置之界定亦模糊不清，以致國內集合住宅大多採用此貫穿樓版至他戶區分所有權範圍之排水設計工法。此種工法對於公寓大廈排水管路的維護修理，造成極大之困擾，必須取得他人住戶之同意配合才能維修，也因而造成住戶間層出不窮的困擾與糾紛。根據文獻資料指出，內政部不動產資訊平台統計結果指出，104年第1季至第3季房地產消費糾紛有1,318件，消費糾紛前5名中房屋漏水問題(192件)居首位；房仲業及建商資訊平台所揭露之房屋糾紛事件，近十年來超過萬件的糾紛案例中，因排水管路漏水造成糾紛案例每年平均約235件，也是所有糾紛案件數之首，故國人在日常生活中排水管路漏水問題應該更多。

根據文獻資料指出，國外早已實施建築同層排水工法及配管原則多年，日本從1970年代起訂制法規定義，集合住宅排水配管設計必須配置樓版之上，配管不得進入他戶所有權範圍內，中國於2016年強制實施同層排水，住宅廚房和衛生間的排水橫支管應設置在當層，不得穿越

樓版進入他戶，以解決住戶間維修糾紛。故本研究透過建築案例調查，掌握其同層排水系統設計及施工技術，並擬定建築同層排水設計原則，未來提供作為設計及施工單位參考依據，或供業界或民眾參考使用，不僅可提升建築環境品質，同時落實建築物全生命週期，永續營運與更新維護理念。

貳、研究內容

一、文獻回顧分析法

首先蒐集國內外與研究相關之論文著作及技術研究報告，作為本研究之基礎資料，同時彙整國外有關於同層排水系統之實務技術規範，透過既有文獻彙整掌握台灣現有排水工法及現況問題，以作為後續研究基礎資料建立。

二、建築同層排水工法

透過國內建築案例現況調查，掌握其目前建築同層排水管路裝置之實況，並釐清新設備、新工法之發展及運用現況，並分析其工法、工期、維護方式、成本及應用，探討其在建築生命週期使用上之問題與影響以及未來發展趨勢，以作為歸納同層排水之可行技術與設計策略。

三、建築同層排水可行性技術與設計策略彙整

本研究將邀請國內相關領域之產官學專家學者，提出有關於建築同層排水系統之工法、工期、維護方式、成本及應用，作為歸納建築同層排水之可行技術與設計策略之參考建議。

參、研究發現

同層排水(SAME FLOOR DRAINING SYSTEM)是指將排水管配置於當樓層範圍內，器具的排水管設置不穿越樓板，根據不同的浴廁佈局，做合理的敷設管線坡道，達到有效的排污效果，並按設計標準做好防水層並經過防水測試，確定無漏水疑慮，採用輕質材料鋪設，並定期維修

及管理。如圖 1 所示。

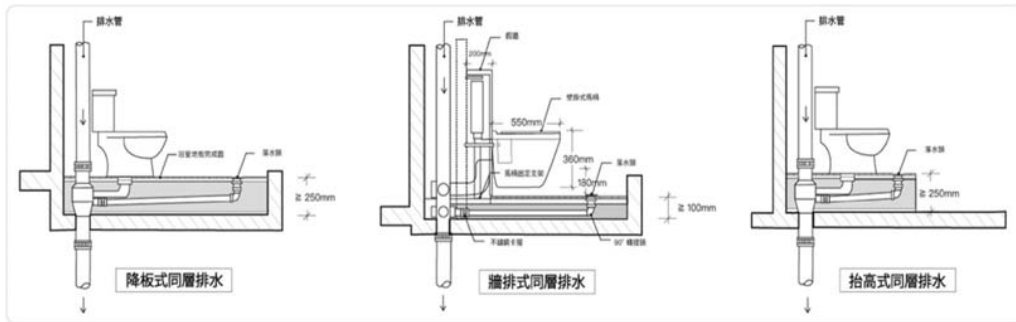


圖 1 建築同層排水工法示意圖

一、建築同層排水工法

(一) 降板式

目前最常見同層排水工法。用水區域採降板方式作為管道敷設空間，降板區域做好防水測試後，依洩水坡度進行配管施作作業，可搭配總存水彎，第二層樓板亦須作防水層再鋪設磁磚鋪面。施工方式有兩種形式有回填及無回填式。此工法優點為管道設備佈置在下降空間內，衛生器具佈置較靈活，便於施工和維修，缺點則為降板區域因案場現況不同，可能需做結構補強，增加成本費用，再者地面負荷增加和下降空間中積聚的水應事先排出。施工過程記錄如圖 2 至圖 6 所示。



樹脂砂漿
陰角補強

Prama(底劑)

Pu(一道)

Pu(2道+7厘
石)

試水

圖 2 降板區防水五步驟



圖 3 降板區防水壓層、洩水坡度、管線配置作業



圖 4 複層版 DECK 板鋪設



圖 5 複層版點焊鋼絲網及吊模施作



圖 6 複層版混凝土澆置

(二) 架高式

指於既有樓地板架高空間作為管道鋪設空間。此工法優點為靈活的構造和更少的空間限制，部分既有室內裝修因吊裝限制而採用此工法，缺點為設備分配應一起提高，並降低天花板高度，且室內地板高低差，影響實用性。施工過程記錄如圖 7 所示。



圖 7 無回填式架高配管施工過程記錄

(三)牆前式

指於牆前構造一個空間，利用輕型鋼、矽酸鈣板等材料將管線封閉於其中，在假牆內進行敷設、安裝管線，需選用壁掛式洗臉盆、馬桶。此工法優點為無須抬高或者降板而影響室內高度問題，適合小型浴室或是空間需大量化空間，以一體規格化工法設備設計配置，可以提升及呈現室內空間之衛生、美觀品質，缺點為維修管道空間必須擴增，影響到室內使用空間。施工過程記錄如圖 8 至圖 9 所示。



圖 8 當層配管現場施工照片



圖 9 當層配管-馬桶背牆水箱組件

二、建築同層排水工法成本分析

本研究成本取得來源主要透過實際案建築例調查，及設計、建造施工等相關單位專業人士訪談，取得構造體上成本推估依據。衛生系統建置基本上含衛生器具設備及構造體及管線兩大部分，但其衛生器具會因個人喜好選擇且產品價差較大，故本研究僅針對構造體及管線部分進行估算。衛浴空間尺寸設定為 150cm*270cm*340cm。

表 1 四種衛浴系統之構造初始成本

工程項目	傳統穿板構造配管	降板構造配管		架高構造配管		牆前構造配管
		回填	無回填	回填	無回填	
1.外牆結構體 (含鋼筋、模板、混凝土、防水、泥作打底、二丁掛)(L型)	45,825	45,825	45,825	45,825	45,825	45,825
2.濕式牆體輕隔間施作(含批土油漆)(L	26,418	26,418	26,418	26,418	26,418	26,418

型)						
3.泥作工程	4,576	4,576	4,576	4,576	4,576	4,576
4.防水工程	9,368	1,1596	1,1596	9,368	9,368	9,368
5.壁磚工程	24,562	24,562	24,562	24,562	24,562	24,562
6.地磚工程	7,175	7,175	7,175	7,175	7,175	7,175
7.天花板 PVC 工程	4,860	4,860	4,860	4,860	4,860	4,860
8.管路系統配管工程	11,500	14,950	14,950	11,500	11,500	12,075
9.總存水彎	-	6,000	6,000	-	-	-
10.降板(架高) 回填輕質混凝土、基座	-	6,885	-	5,145	-	-
11.墩座、鍍鋅鋼板(含防水)	-	-	14,745	-	-	-
12.勁扣鋼承板(含防水)	-	-	-	-	14,525	-
13.鍍鋅鋼架配管牆體	-	-	-	-	-	28,000
總計	134,283 (±0%)	152,847 (+13.8%)	160,707 (+19.7%)	139,429 (+3.8%)	148,809 (+10.8%)	162,859 (+21.3%)

(資料來源:本研究製作)

三、集合住宅實證成本分析探討

綜合上述基礎理論以及數據分析後，本研究以三個實際住宅案例了解其建築同層排水工法成本。

(一) 案例一：台北社會住宅案例

本案位於台北市，住宅基地面積為 2,606 平方公尺，建築主體主要區分為 A、B 兩棟，為高 11 層樓、地下 3 層 RC 造之住商大樓，2 層至 11 層平面為家居住宅及單身住宅，屋頂層為機房、水箱等機電空間及太陽能光電板。本研究將表 3-1 衛浴單元估算初始成本轉換為每坪單價後，套算入本案例估算其同層排水成本，套算 4 種構造佔總造價比例如表 2 所示。

表 2 套算 4 種構造佔總造價比例(資料來源:本研究製作)

項目	價錢	佔總造價	與傳統浴室比較
1.傳統穿板構造配管	27,839,159	7.5%	±0%
2.降板構造配管(回填)	31,687,793	8.5%	+1.0%
3.降板構造配管(無回填)	33,317,305	9.0%	+1.5%
4.架高構造配管(回填)	28,906,012	7.8%	+0.3%
5.架高構造配管(無回填)	30,850,646	8.3%	+0.8%
6.牆前構造配管	33,763,451	9.1%	+1.6%

(二) 案例二：中科院宿舍

本案例為某建設公司位於台中中科院宿舍案例，是地上 8 樓、地下 1 樓層高之 RC 構造建物，基地面積 13,960 m²，總樓地板面積 5,944.74m²，本案例規劃 134 戶，衛浴共計 134 間，其衛浴空間大小之寬度為 264cm~125cm，皆配置三件式衛浴設備，總工程造價約為 254,000,000 元。本工程案例操作，是於設計階段討論可進行之同層排水施工方法進行試算，其案例採用降板工法及整體衛浴降板同層排水工法，試算基準：分為土建及機電兩大部分，內含外牆工程、濕式輕隔間、降板區域以 Deck 版加上回填輕質混凝土施作，防水採複合式防水材施作、打底工程、地壁貼磚、油漆等，機電費用包含水電配管工程及衛浴設備等內含工資。另整體衛浴部分選擇沒有壁磚僅有地磚之單元，並搭配降板進行施作。本案例中部住宿空間案例傳統與同層排水工法試算之成本分析結果如表 3 所示。

表 3 中部住宿空間案例傳統與同層排水工法試算之成本分析

工法	隔層排水 (成本基準)	降板工法	整體衛浴 (降板)
單項工程成本差異 (%)	±0%	+ 7.11%	+ 24.28%
整體工程成本差異 (%)	±0%	+ 0.42%	+ 1.9%

(資料來源:本研究製作)

(二) 案例三：桃園集合住宅案例

本「印象天喬」案例為傑丞建築-永盛開發建設有限公司於桃園區建造，是地上 19 樓、地下 3 樓層高之 RC 構造建物，基地面積為 537.72 坪，本社區規劃 54 戶。本案例集合住宅同層排水工法成本分析如表 3-11 所示，經由結果顯示，本案例建築同層排水工法與傳統配管工法相比，僅針對建築同層排水結構體部分，於總營建工程成本增加 0.35%，若加上隱藏式側排水箱固定部分，總工程營建成本則提升至 0.66%。

表 4 印象天喬集合住宅案例同層排水工法之成本分析

項目	資源項目	施工費用	單坪成本	累計成本	成本百分比	備註
同層排水浴廁水泥砂漿墊層 H=12cm	地坪墊層工資	146,168	37	37	0.03%	傳統配管埋於 RC 版內
	地坪墊層水泥砂	168,432	43	80	0.07%	
牆排馬桶背層 (乾式面封 6mm 普納纖維板)	纖維板工資	90,000	23	103	0.09%	
	纖維板材料	169,200	43	145	0.13%	
墊層新增防水	防水公料	301,070	76	222	0.20%	傳統工法只做一層水
	抗裂纖維網	82,110	21	242	0.21%	
馬桶背牆石材蓋板	石材蓋板工資	53,628	14	256	0.23%	
	石材蓋板材料	164,372	42	298	0.26%	
總存位置預留 10"套管	套管間隙鋼筋補強	8,000	2	300	0.26%	傳統現場放樣開孔
	10" PVC 套管	6,000	2	301	0.27%	
預留馬桶旁三角 凡而水源	配管工資	360,000	90	391	0.34%	增加成本可估算為 393 元/坪
	三角凡而水及另件	6,000	2	393	0.35%	
隱藏式側排水箱 固定	固定水箱工資	184,000	46	439	0.39%	採牆排外露水箱馬桶可不計此成本
	TOTO 水箱費用	1,240,000	310	749	0.66%	

(資料來源:本研究製作)

因同層排水施工方法及材料選擇會直接影響其成本造價，經由本研究假定條件，以單一浴廁空間為單位，傳統衛浴於初期建置成本雖具有優勢，但於維修、施工時間、施工精準度表現較差，而降板構造配管、架高構造配管及牆前構造配管等同層排水工法雖然初期建置成本高於傳統工法 3.8% 至 21.3%，但其後續使用、維護管理、施工時間皆具較佳表現。經由三個實際集合住宅案例驗證，導入建築同層排水系統工法設計，與傳統穿板工法比，建置成本於總體工程造價增加 2.0% 以內。

四、建築同層排水系統設計

建築物採用同層排水系統，器具排水管和排水橫支管與衛生器具同層敷設，不穿越結構樓板外，建築同層排水工法配管之配管管徑、存水彎、清潔口及洩水坡度等設計及施工，以及設備單位數量等相關規定，應符合「建築物給水排水設備設計技術規範」相關章節條文規定。同層排水工程的敷設方式、結構形式、管道間位置和衛生器具配置等，應與

建築、結構和機電各有關專業協調後確定。

另一方面，因應台灣建築排水技術以及新工法新設備發展，從防疫建築角度談起，吸氣閥及正壓調節器有通氣管功能外，增加排水通氣管路，可有效減低排水系統內壓力變動情形，及避免存水彎水封產生破封問題，同時，國內近年來開發使用新型式集合式存水彎，提升給排水管線之整齊化及裝置上之系統化，並減少相關管材消耗及施工上之繁雜，同時部分解決在當層住戶排水系統清潔維護之課題。圖 10 至圖 13 為總存水彎設置方式示意圖，圖 14 為排水管路使用個別存水彎(圖左)與集合式總存水彎(圖右)之配置圖例，圖 15 建築同層排水配管 3D 模擬圖。

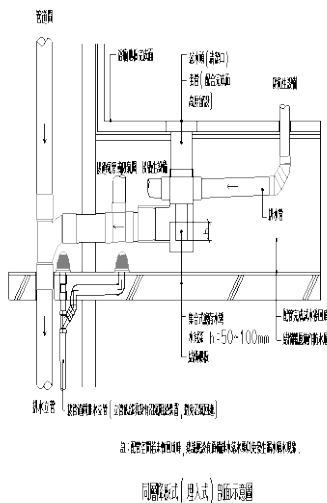


圖 10 同層降板式 (埋入式)

剖面示意圖

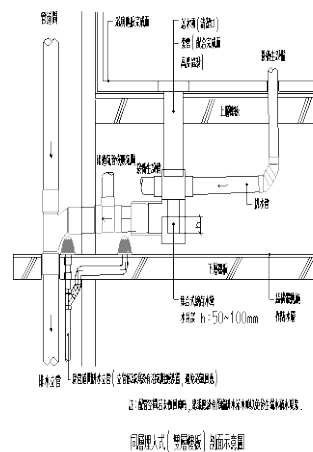
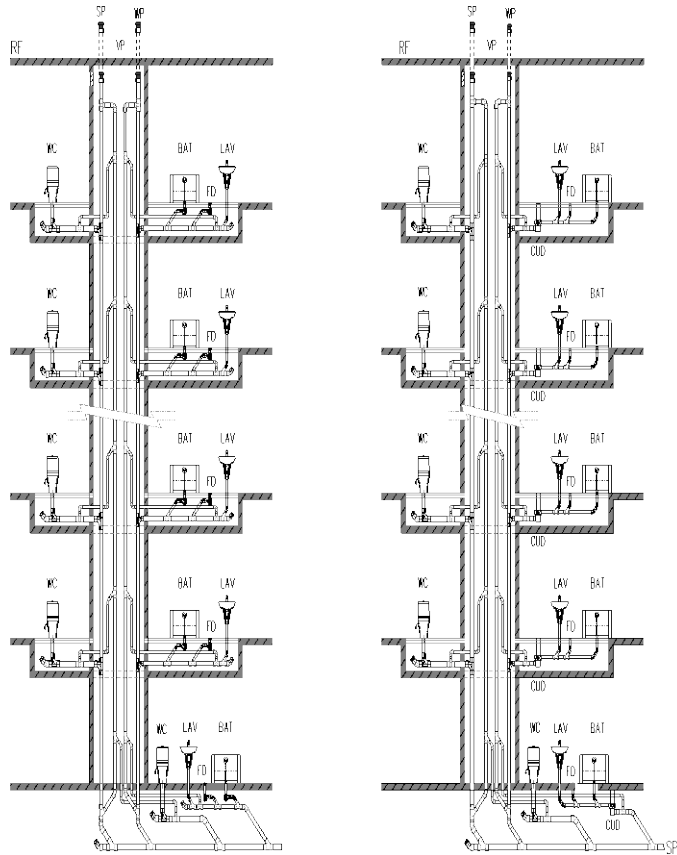


圖 11 同層降板式 (雙層樓板)

剖面示意圖



註

1. 當WP垂直管裝設存水彎時，若管本身已有存水彎(如浴盆盆)時，由水管直接連入水溝，若無存水彎造成排水不順現象無法維修時。
2. 立管、折曲管與排水衛生管之配置，應以建築師給排水水盤圖說技術規範圖則為準。

WP垂直管裝設個別存水彎

WP垂直管裝設集合式總存水彎

圖 14 排水管路使用個別存水彎(圖左)與集合式總存水彎(圖右)之配置圖例

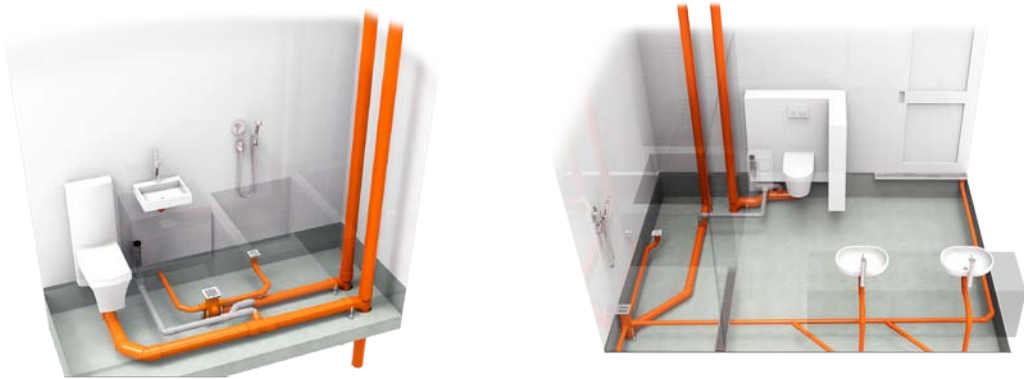


圖 15 建築同層排水配管 3D 模擬圖

肆、結 論

一棟建築物的排水系統設計合理性對於生命週期來說影響甚大，從建築物生命週期成本來看，倘若要針對建築延壽拉長營運管理期與降低日後維護修繕成本為目標，應於建築規劃前期導入正確排水工法，同時也能解決長期維修漏水時產生的所有權範圍不合理之處。

由於現今通行的制式建築配管空間與排水設備的條件，已難以滿足現代排水設計的要求，且浴廁空間中用水器具眾多，排水管穿越樓板設計將造成配管混亂與維修及清潔之困難，加上老舊建築漏水頻繁更新施工不易且有房屋產權及噪音問題。

近年來台灣積極發展建築新設備新工法技術發展，期許能夠逐年由建築同層系統排水取代傳統隔層排水，根據本研究實際案例調查與分析，以建築整體造價來看，雖導入同層排水工法大約增加 2% 以內成本，但其維修、施工時間皆有最佳表現。另一方面，透過實際建築案例調查，掌握建築同層排水設計系統及施工技術，並完成研提建築同層排水設計指引說明，包含配管原則、施工技術及後續維護管理，同時繪製建築同層排水工法圖說範例，有助於設計及施工單位應用於建築實務上的規劃

與設計，使國內建築物排水管路之維護更新與糾紛爭議等問題獲得改善。因此，若以物業管理角度來談，前期設計導入同層排水工法，不僅可延長建築壽命營運管理期與降低日後維護修繕成本，同時也決定了建築的安全性和舒適性。

伍、參考文獻

- (1) 廖婉茹，2011，中高層建築物排水系統非破壞性檢測方法及管內空氣壓力變動之研究，國立臺灣科技大學建築研究所博士論文
- (2) 劉新豐、陳宏熙/台灣給水排水研究學會，臺灣高級住宅大樓排水通氣系統之設計趨勢與設備運用，中國亞洲建築給水排水雜誌，第4期，2012，第34-44頁
- (3) 中華人民共和國建築同層排水工程技術規則手冊《建築同層排水工程技術規則》（中國2009）
- (4) 許玄明，2008，設備管線外置式開放住宅系統之研究，國立台灣科技大學建築研究所碩士論文
- (5) 杜功仁，2001，台灣集合住宅浴廁給排水配管方式之比較研究，亞洲地區建築給排水國際研討會論文集
- (6) 鄭政利，2020，集合住宅同層排水法制化與技術規範修訂之研究，內政部建築研究所研究報告
- (7) C.L. Cheng, C.J. Chen, W.J. Liao, Performance evaluation for same-floor drain technology in residential buildings, 43th International Symposium of CIB W064 on Water Supply and Drainage for Buildings, 2017
- (8) C.L. Cheng, C.J. Chen, W.J. Liao, Consideration of same-floor drain as life-cycle maintenance solution in residential buildings, 44th International Symposium of CIB W064 on Water Supply and Drainage for Buildings, 2018

- (9) Kung.Jen.Tu, Investigation and Analysis of Maintenance Performance of Residential Bathroom System, Architecture and Building Research Institute , MOI,2004,Taiwan
- (10) Fu.Huan.Chen, The survey on old housing deterioration and the application of open building technology, National Taiwan University of Science and Technology Department of Architecture, master's thesis, Unpublished, 2015,Taiwan

住商部門溫室氣體減量策略成本效益之研究

主講人簡歷

姓名：黃國倉

服務單位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系

職稱：教授

聯絡電話：02-33663477

電子信箱：huangkt@ntu.edu.tw

學歷：國立成功大學建築學博士

主要著作：

1. 2020 Huang*, K.-T. "Identifying a suitable hourly solar diffuse fraction model to generate the typical meteorological year for building energy simulation application." *Renewable Energy* 157: 1102-1115. (SCI)
2. 2020 Hwang, R.-L., W.-M. Shih and K.-T. Huang* "Performance-rating-based approach to formulate a new envelope index for commercial buildings in perspective of energy efficiency and thermal comfort." *Applied Energy* 264: 114725. (SCI)
3. 2019 Lin, F.-Y., K.-T. Huang, T.-P. Lin and R.-L. Hwang* "Generating hourly local weather data with high spatially resolution and the applications in bioclimatic performance." *Science of The Total Environment* 653: 1262-1271. (SCI)
4. 2018 Kuo-Tsang Huang*, Yang S-R, Matzarakis A, Lin T-P. Identifying outdoor thermal risk areas and evaluation of future thermal comfort concerning shading orientation in a traditional settlement. *Science of The Total Environment*. 626:567-80. (SCI)
5. 2018 Hwang R-L, Shih W-M, Lin T-P, Kuo-Tsang Huang*. Simplification and adjustment of the energy consumption indices of office building envelopes in response to climate change. *Applied Energy*. 230:460-70. (SCI)

6. 2017 Kuo-Tsang Huang* and Yi-Jhen Li, Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: a parametric analysis using orthogonal experiment. *Energy and Buildings*, 154:448-464. **(SCI)**
7. 2017 Ruey-Lung Hwang, Chuan-Yao Lin, Kuo-Tsang Huang*, Spatial and temporal analysis of urban heat island and global warming on residential thermal comfort and cooling energy in Taiwan. *Energy and Buildings*, 152:804-812. **(SCI)**
8. 2016 Kuo-Tsang Huang and Ruey-Lung Hwang*. Future Trends of Residential Building Cooling Energy and Passive Adaptation Measures to Counteract Climate Change: The Case of Taiwan, *Applied Energy*, 184:1230-1240. **(SCI)**
9. 2016 Kuo-Tsang Huang and Ruey-Lung Hwang*. Parametric study on energy and thermal performance of school buildings with natural ventilation, hybrid ventilation and air conditioning, *Indoor and Built Environment*, 25(7):1148-1162. **(SCI)**
10. 2015 Kuo-Tsang Huang, Tzu-Ping Lin*, and Hsiao-Chi Lien, Investigating Thermal Comfort and User Behaviors in Outdoor Spaces: A Seasonal and Spatial Perspective, *Advances in Meteorology*, 2015(11). **(SCI)**
11. 2015 Kuo-Tsang Huang, Wen-Pun Huang, Tzu-Ping Lin, and Ruey-Lung Hwang*. Implementation of Green Building Specification Credits for Better Thermal Conditions in Naturally Ventilated School Buildings. *Building and Environment* 86:141-150. **(SCI)**

中文摘要

黃國倉¹ 楊忻婕² 王安強³

關鍵字：住商部門溫室氣體排放基線、近零耗能建築、減碳路徑

我國之「溫室氣體減量及管理法」自 2015 年正式上路，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%，並每五年滾動檢討之，為了有效訂立住商部門之溫室氣體減量措施與碳排管理，則需仰賴精準之未來住商能源消費預測，以瞭解各項碳排之來源與組成，俾利進行減量措施之效益評估。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），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。

¹國立臺灣大學生物環境系統工程學系 教授

²國立臺灣大學生物環境系統工程學系 研究生

³內政部建築研究所 副所長

ABSTRACT

Keywords : Building GHG emission baseline, building energy consumption, carbon reduction pathways

The Greenhouse Gas Reduction and Management Act launched since 2015 targeted that the nationwide greenhouse gas (GHG) emission should be reduced to 50% to that of 2005. This target is scheduled to be revised every five years. To this end, a precise model that predicts the building sector's future energy consumption is crucial for analyzing the emission sources of GHG, and help formulate adequate GHG mitigation strategies. This research established the GHG emission prediction model of the nationwide building sector, and a BAU (Business As Usual) of the future building energy use was built as well. The potential pathways to mitigate the GHG emission of the building sector with their potential mitigation efficiencies were also proposed for references to formulate policies to cope with the changing climate.

壹、緒論

「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，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。

貳、研究內容

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。

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。

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。

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)。

由於中國是巴黎協定的其中一員，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%。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：(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。(2) 逐步提高政策與節能法規之標準。(3) 增強能源稽查項目並修繕與維護設備效能。(4) 改進需求管理和用戶行為。

在國內的研究方面，有以工研院綠能與環境研究所為首的研究團隊以 TIMES 模型作為主要的研究工具。由於影響電力負載的因素相當複雜，包括生活習性、用電行為、氣候變化等影響，且由於國家整體的能源政策導入再生能源，隨之而來的儲能技術的發展以及節能政策的推型等，電力供需規劃日漸複雜。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, 洪明龍, & 劉子銜, 2015)應用 TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) 模型，發揮 TIMES 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。

在國際上，電力負載以及電源開發的規劃之分析模式主要分為兩種方式，一種為「由上而下 (Top-down)」的方法，利用時間序列以及回歸分析的方式用以預測未來電力負載量，另外一種為「由下而上 (Bottom-up)」的方式，利用最終消費模式以及能源工程模型等工具，以具體的耗電設備為基礎單位，獲得更完整的用電資料，以預測未來的電力附載。而工研院採用的 TIMES 模型為 Bottom-up 的方式，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)。

本計畫採用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。

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。

參、研究發現

一、住宅溫室氣體排放預測結果

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，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。隨著未來人均 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，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 1 各區住宅面積推估圖（以人口中推估計算）所示。

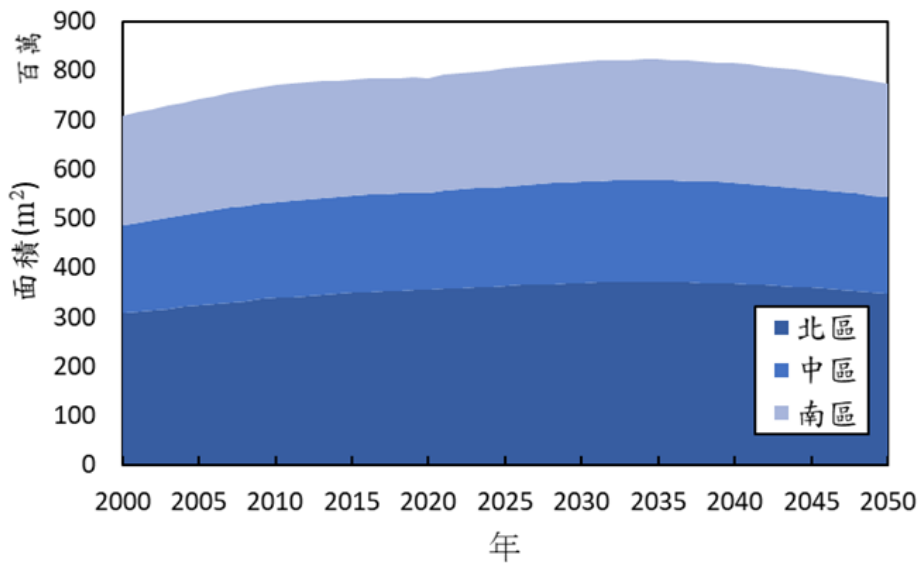


圖 1 各區住宅面積推估圖（以人口中推估計算）

（資料來源：本研究繪製）

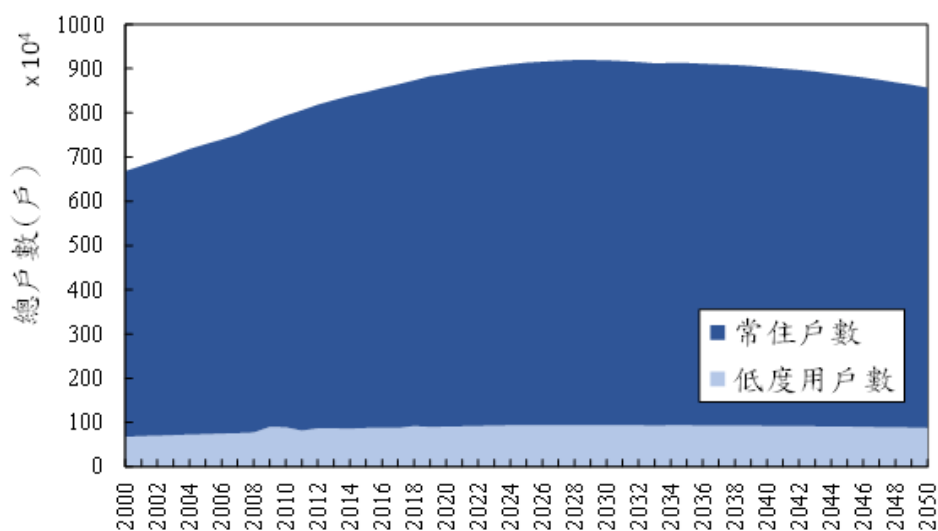


圖 2 全國未來戶數推估

(資料來源：本研究繪製)

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圖 3。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%。

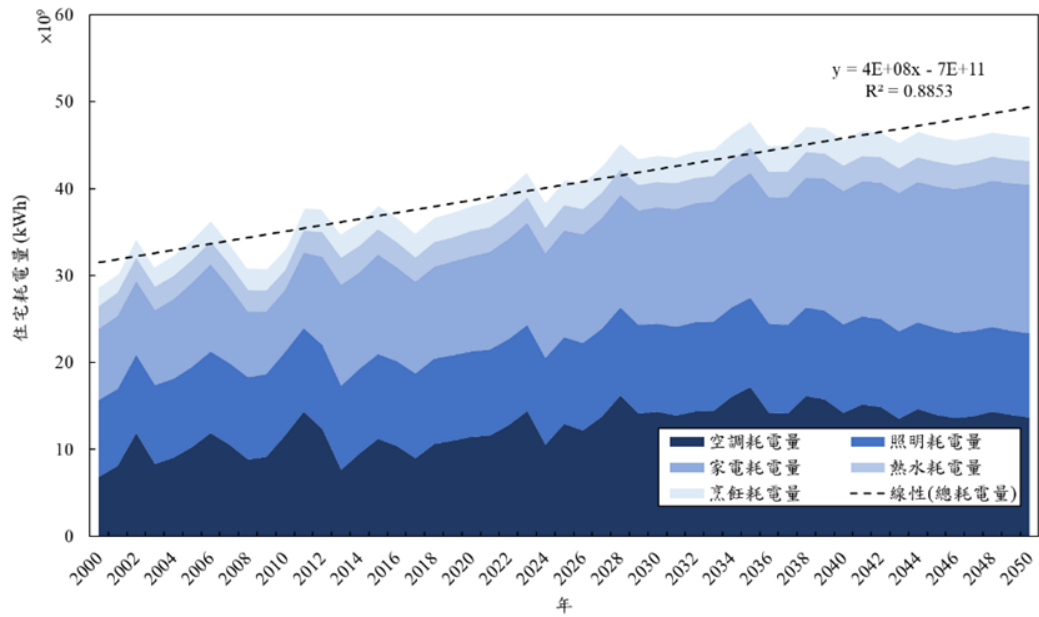


圖 3 住宅各耗電項目耗電量未來推估

(資料來源：本研究繪製)

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，須考慮電力碳排係數，此係數參考經濟部能源局的公告，而最新的資料顯示民國 108 年度的電力碳排係數為 0.509 kgCO₂e/度[1]，此後推估由於發電結構之改變預測之電力碳排係數將逐年降低，則參考自能源局之估計值。

今以能源局所預測在臺灣未來發電結構改變後之電力碳排係數，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 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 2019 年所公告之電力碳排係數為 0.509 (kgCO₂e/度)計算時，其結果圖 5，未來住宅部門之溫室氣體排放則呈現增加之趨勢。

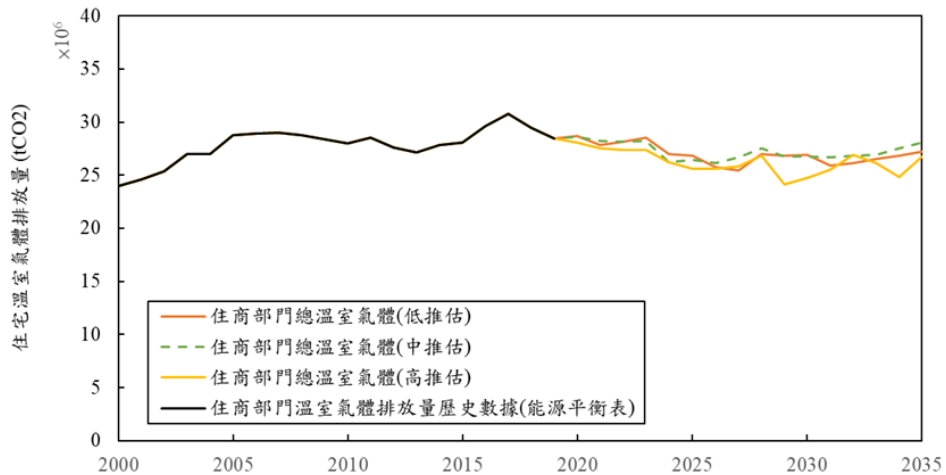


圖 4 住宅溫室氣體推估

(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)

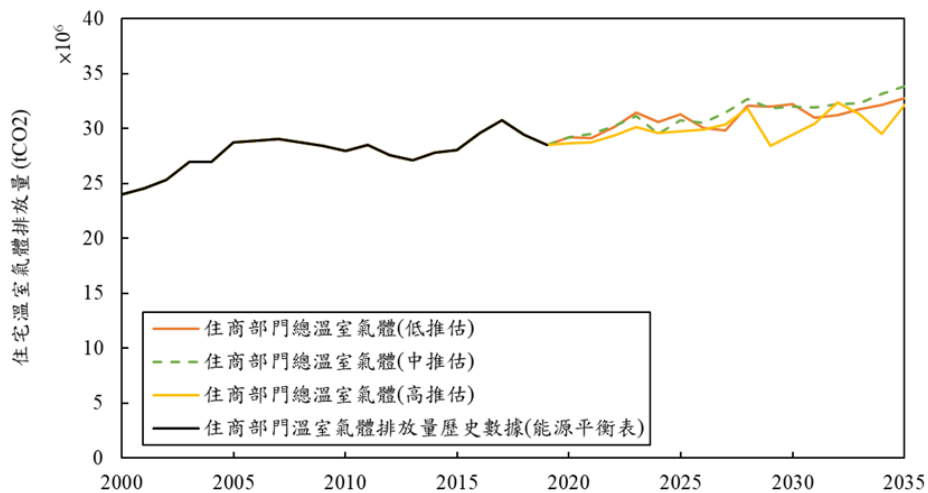


圖 5 住宅溫室氣體推估

(資料來源：本研究整理)

二、商辦溫室氣體排放量預測結果

藉由研究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。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 6。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。

自 2000 年至 2035 年商業建築之總耗電量增加了 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，由於未來商辦面積漸少，2000 年至 2050 年，商業大樓之總耗電量增加了 14.68%，其中空調設備增加了 1.7%，照明設備增加了 15.95%，事務設備 15.95%，其餘設備則增加了 31.09%。

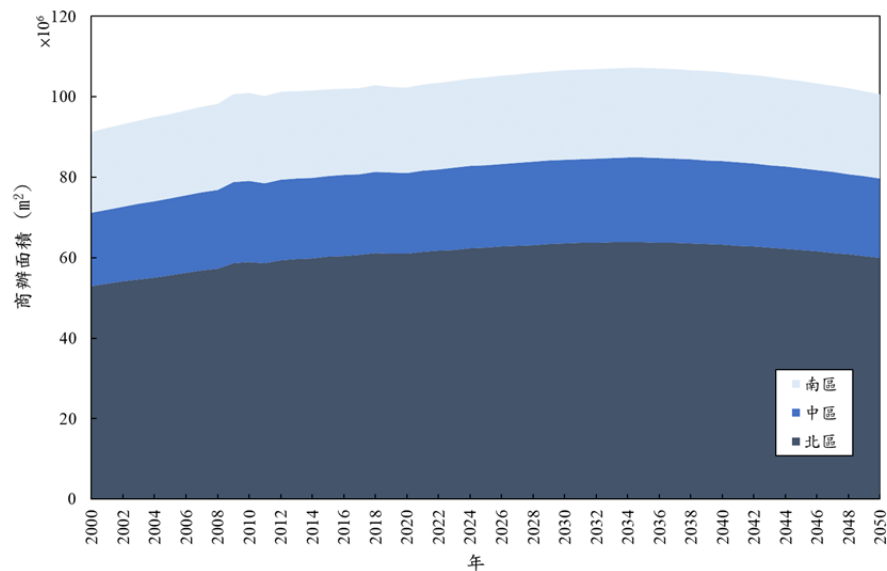


圖 6 逐年商辦建築樓地板面積推估

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。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碳排係數下降之情況，則整體商業建築逐年之溫室氣體排放量則如圖 7 中上方曲線所示，未來逐年呈現緩步上升。

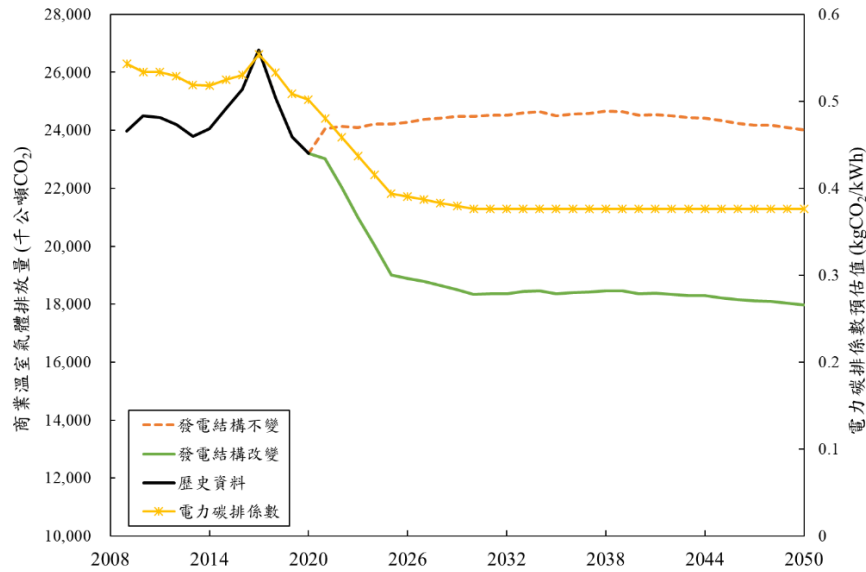


圖 7 商辦建築逐年溫室氣體排放量推估

(資料來源：本研究整理)

三、我國溫室氣體第二期階段管制目標住商部門核配分析

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。

¹ 比例之計算係各依於 2025 年當年度之溫室氣體基線換算。

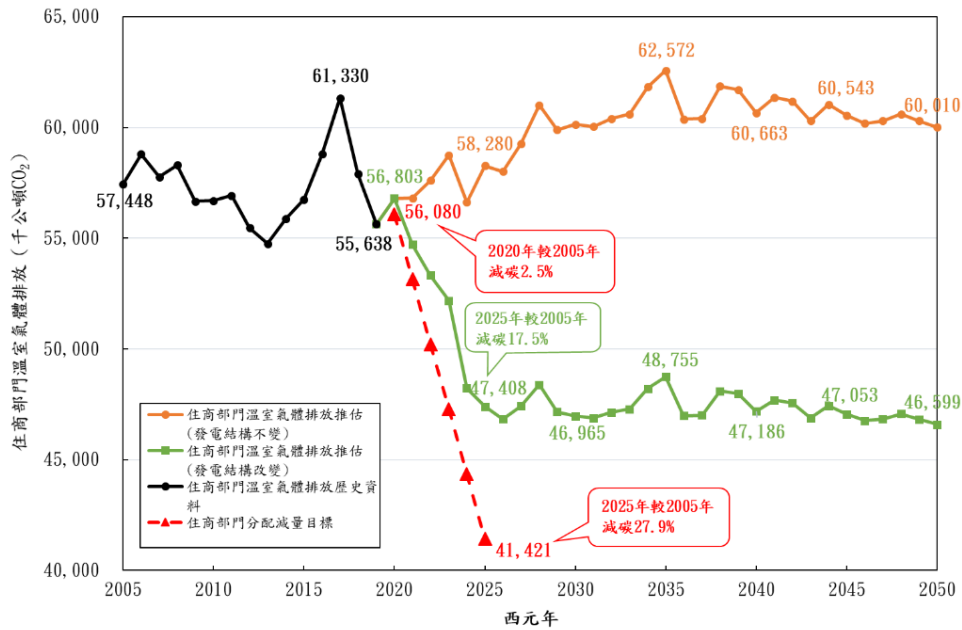


圖 8 住商部門溫室氣體未來排放基線預測與核配減碳目標之比較
(資料來源：本研究整理)

四、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。

(1) 空調節能策略

我國之無風管冷氣機之能源效率分級基準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。

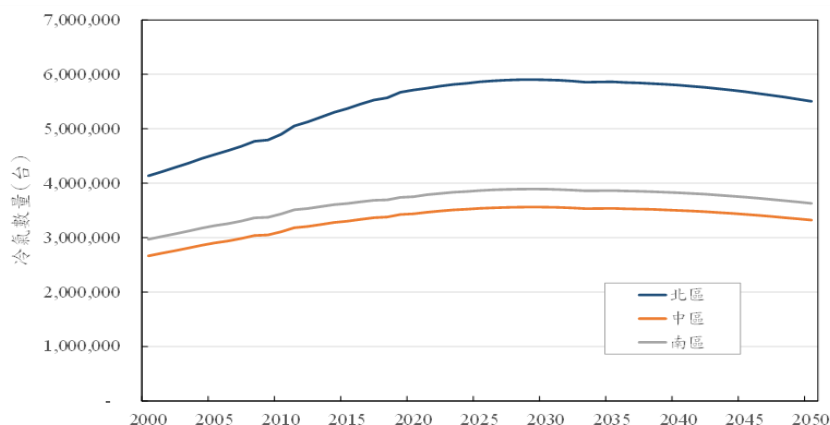


圖 9 未來逐年預估之住宅冷氣數量趨勢

(資料來源：本研究整理)

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 (Adaptive thermal comfort model) 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 10 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。

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 8% 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 11 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 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。

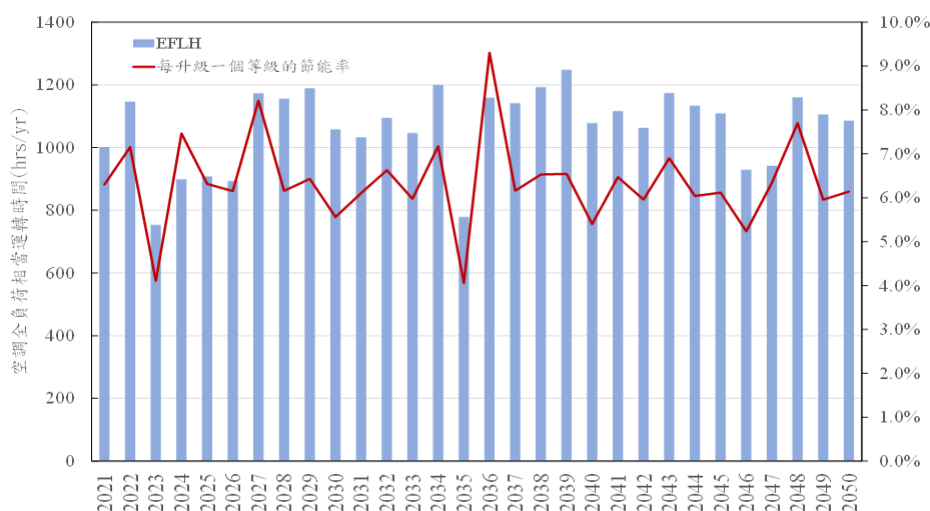


圖 10 未來逐年冷氣全負荷相當運轉時間之變化與節能率

(資料來源：本研究整理)

表 1 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

(資料來源：本研究整理)

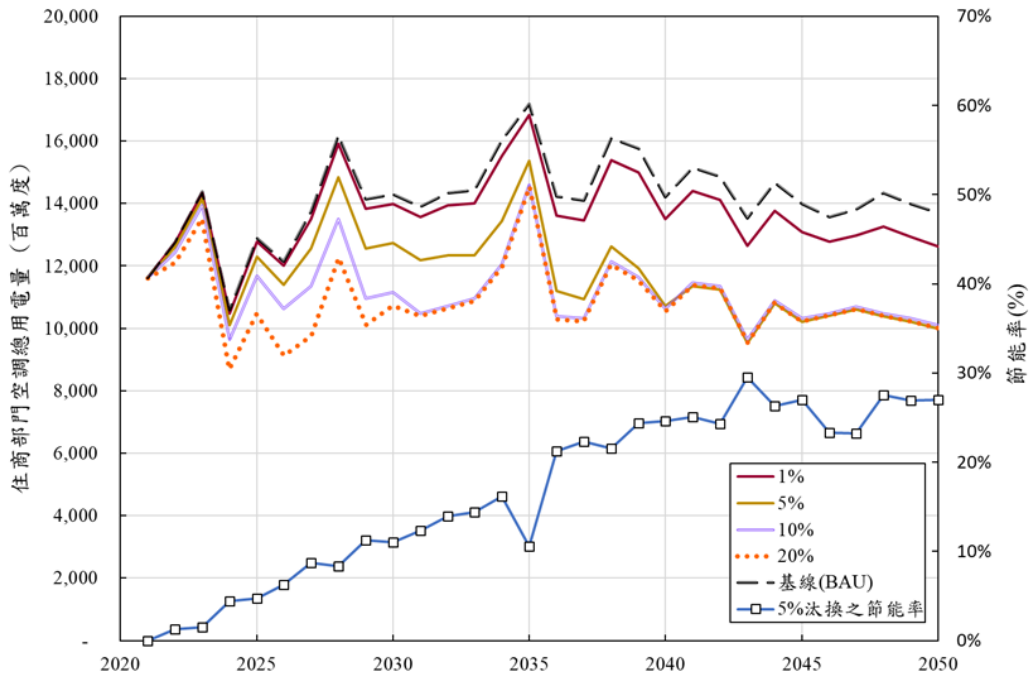


圖 11 住宅冷氣效率提升四個等級在不同汰換率下
空調總用電量變化之趨勢

(資料來源：本研究繪製)

(2) 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，以逐年之汰換率進行推算。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 崁燈；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。

在此逐年汰換率下未來逐年至 2050 年時，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。各年之節能率與照明用電趨勢如圖 12 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[2]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。

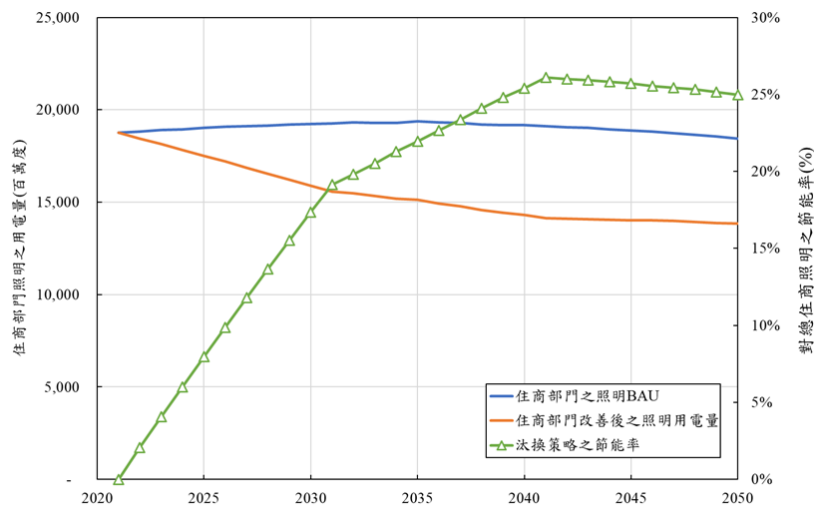


圖 12 改善策略導入下之住商照明節能量變化趨勢

(資料來源：本研究整理)

(3) 住宅電冰箱節能策略

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，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。

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 13 呈現三種不同年汰換率之水準下，逐年住商部門商辦電冰箱用電量之變化推故。在 1%汰換情境下直至 2050 年仍有 27%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 11 年，於 2039 年汰換完畢。在各電冰箱汰換情境下最終總成本如表 2 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 69.3 億元與 70.1 億元，其成本計算方法如前節冷氣之評估相同。

表 2 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%
	每年所需汰換之電冰箱數量(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)

(4) 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 14 與圖 15 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 15)，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 CO₂ 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 40,915 千公噸 CO₂ 勉強達到 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 CO₂) 皆仍有一段差距。

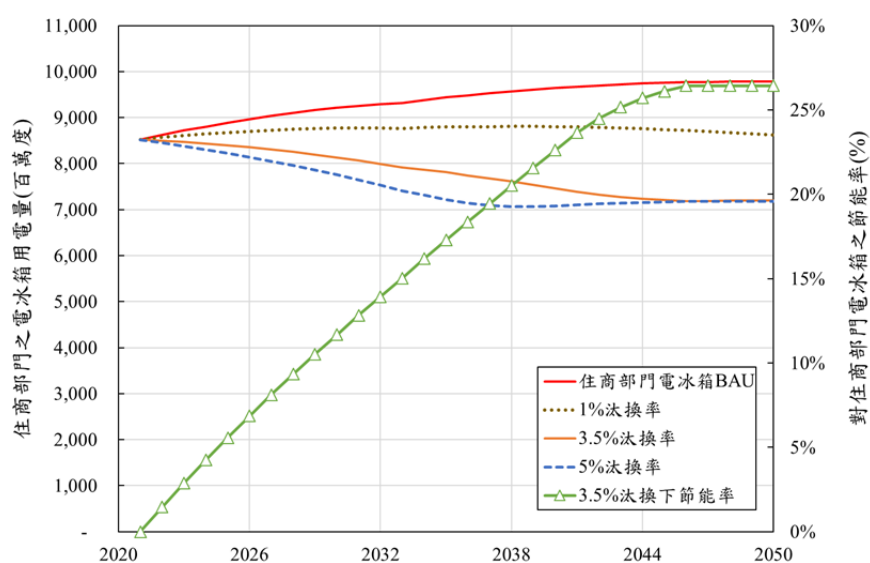


圖 13 電冰箱效率提升四個等級下不同冷氣汰換率下

空調總用電量變化之趨勢

(參考資料：本研究繪製)

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，由於需另外需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[3]，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。

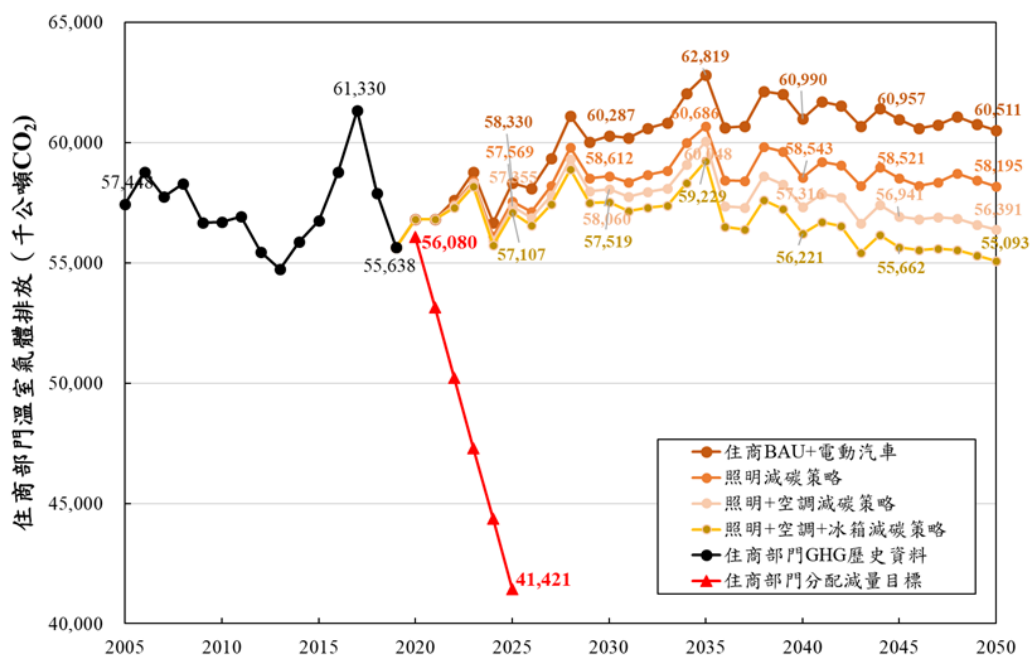


圖 14 在未來發電結構不變情境下各措施之綜合減碳效益趨勢

(資料來源：本研究整理)

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[4]，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 (W/m²)、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 (W/m²) 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。

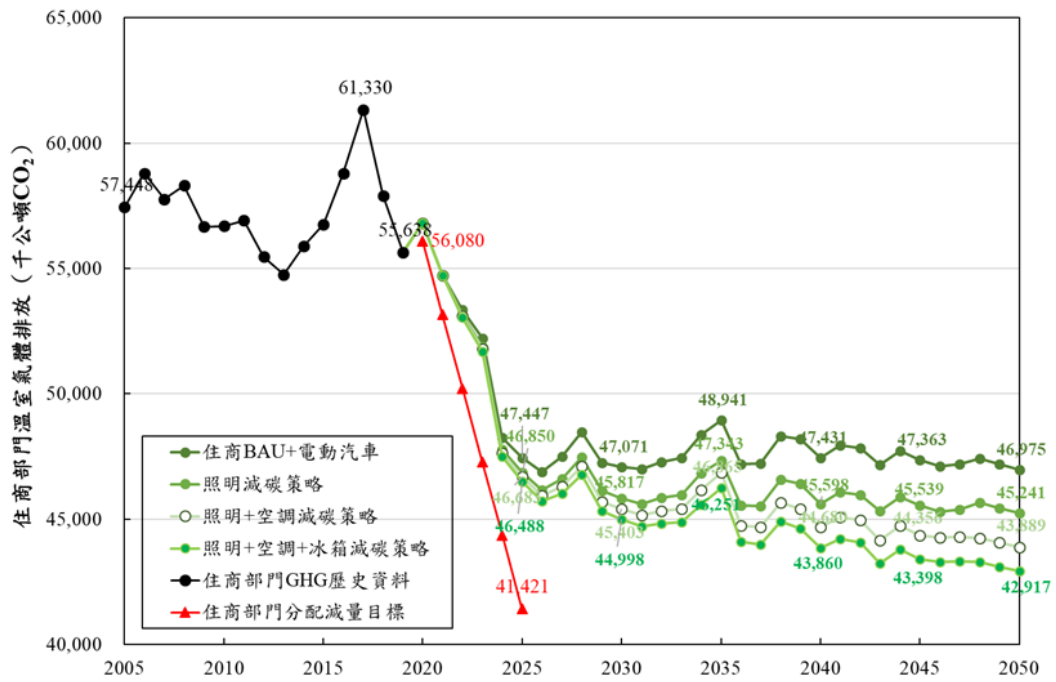


圖 15 在未來發電結構改變情境下各措施之綜合減碳效益趨勢

(資料來源：本研究整理)

肆、結論

本研究獲致以下結論：

- 一、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%。
- 二、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。

伍、參考文獻

- (1)經濟部能源局, 107 年度電力碳排係數. 2019.
- (2)郭瑾瑋, et al., 臺灣能源工程模型：住服部門. 2021, 工研院綠能與環境研究所.
- (3)陳瑞鈴 and 黃國倉, 既有建築外殼開口部應用玻璃隔熱膜節能改善對策. 2017, 內政部建築研究所: 台北.
- (4)羅時麒, 黃國倉, and 黃瑞隆, 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, 2020.

AIoT 影像感測器在建築物安全應用與效益研究

主講人簡歷

姓 名：余文德

服務單位：朝陽科技大學營建工程系

職 稱：特聘教授

聯絡電話：04-23323000-4850

傳 真：04-237423255

電子信箱：wemderyu@cyut.edu.tw

學 歷：美國普渡大學營建管理博士

經 歷：朝陽科技大學助理副校長兼國際長、中華大學營建管理系教授

主要著作：

1. Chang, H. K., Yu, W. D.* & Cheng, T. M., “A Quantity-Based Method to Predict More Accurate Project Completion Time.” KSCE J Civ Eng 24, 2861–2875 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1924-y>
2. Yu, W. D, Chang, H. K.*, Hsu, Y. Y., Cheng. S. T., and Wang, K.W. “Pre-Tendering Decision Model for Contractor Selection of Public Procurement Projects.” ASCE, J. Constr. Eng. Manage., 2020, 146(11): 04020126.
3. Yu, W. D., Chang, H. K.*, and Lai, C. H., “A knowledge management-based engineering design system for highway design projects.” International Journal of Applied Science and Engineering. 18(2): 13 pp., 2021. doi: 10.6703/IJASE.202106.18(2).005
4. Chang, H.K., Yu, W.D.*, Cheng, S.T., and Cheng T.M. “The Use of a Multiple Risk Level Model to Tackle the Duration of Risk for Construction Activity.” KSCE, Journal of Civil Engineering, 23(6): 2397-2408. DOI: 10.1007/s12205-019-1757-8.

中文摘要

王榮進¹ 余文德² 廖琬洲³ 張憲寬⁴ 林子怡⁵

關鍵字：人工智慧物聯網、智慧建築、智慧安全監測、效益分析。

本研究探討如何應用 AIoT 影像感測器(AIoT-IS)提升智慧建築之效能，及其在未來智慧生活空間之應用潛力。本文透過次級資料分析、專家訪談與效益分析模型設計，共歸納 AIoT-IS 於建築生命週期四個階段 18 種可能應用情境類型；並提出「建築智慧科技應用成本效益分析模式(CAMITA)」以做為 AIoT-IS 之應用效益分析方法。經兩個模擬案例效益評估試算發現：在「建築施工中工地安全監控案例中，淨現值指標(NPVI)為 20.21%，而益本比(BCR)則為 5.10；另外，在「建築使用營運階段之智慧社區安全管理」案例中，其 NPVI 為 12.63%，而 BCR 則為 2.10；可見 AIoT-IS 在建築物安全應用確實具有明顯效益。另外，透過專家訪談亦發現，AIoT-IS 之應用也存在著潛在之社會風險；不同利害關係人對於 AIoT-IS 於建築物安全應用之期待效益、成本接受度、未來發展潛力，以及社會風險之感受度亦皆有不同。本文最後針對建築安全之利害關係人對於 AIoT-IS 於建築物安全應用之相關議題，歸納出具體建議，以供建築工程不同參與單位之參考。

¹ 內政部建築研究所 所長

² 朝陽科技大學營建工程系 特聘教授

³ 朝陽科技大學資訊工程系 教授

⁴ 朝陽科技大學營建工程系 兼任助理教授

⁵ 朝陽科技大學資訊工程系 博士後研究員

ABSTRACT

Keywords : AIoT, Smart Building, Intelligent Safety Monitoring, Benefit Evaluation.

This study aims to investigate the potential scenarios and the associated benefits of AIoT-IS applications. Through literature review, expert interview, and benefit analysis model, this study summarizes 18 AIoT-IS application scenarios categorized into four different phases of building lifecycle and a "Cost/benefit Analysis Model for Intelligent building Technology Adoption, CAMITA)" is proposed for benefit evaluation of AIoT-IS for building safety monitoring. According to the results of two simulated case studies, AIoT-IS achieves significant benefits, with Net Present Value Index (NPVI) of 20.21% and Benefit/Cost Ratio (BCR) of 5.10 in "Case (I)—AIoT image sensing for construction site safety monitoring", and with NPVI of 12.63% and BCR of 2.10 in "Case (II)—AIoT images sensing adoption in the security control of smart community." The interviews with the domain experts also point out that there exist potential threats and risks while adopting AIoT image sensing in building safety monitoring. Different interviewees (stakeholders of buildings) have different perspectives on the benefits and risks of such an innovative technology from the angles of their priority issues, expected benefits, application limitations and implementation obstacles. Finally, specific suggestions are summarized for stakeholders of buildings regarding the safety monitoring the application of AIoT-IS to provide references for different interested parties of building projects.

壹、前言

因應人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 深度學習技術 (Deep Learning, DL) 在電腦視覺、影像辨識上具有高度商業應用可行性，其技術核心之深度學習運算平台，也從雲端或伺服器平台延伸到物聯網 (Internet of Things, IoT) 感測器上，成為人工智慧物聯網 (Artificial Intelligence of Things, AIoT) 感測器，現階段科技發展已可透過 AIoT 感測器端的邊緣運算來提供即時的影像辨識結果。

本研究旨在分析 AIoT 影像感測器 (AIoT-IS) 導入建築安全應用之可能情境，並探討如何應用 AIoT-IS 技術提升智慧建築之效益，以了解 AIoT 技術在未來智慧生活空間之應用潛力，以及它可能帶來的正面與負面影響。透過學術研究方法之探討，提出建築物各利害關係人在面對與採用本先進技術時，應該具備之了解與思維，以善用本先進科技對於建築智慧化之優點，而降低其負面衝擊。

為達前述研究目的，本研究首先透過文獻與技術現況回顧，調查國內外應用 AIoT-IS 技術於建築安全應用之案例、效益分析及其他安全隱私課題等相關資料，作為後續分析之基礎；其次，依據文獻回顧成果，提出 AIoT-IS 於建築安全之應用情境，包含人臉、車牌、寵物等影像辨識服務導入流程、因應隱私權保護課題之注意事項，以及評估 AIoT-IS 技術對提升之建築物營運效率之效益。最後，透過案例訪談及案例模擬試算方式，比較 AIoT-IS 應用方案相對於傳統非 AIoT-IS 方案在建築物安全應用之量化及質化效益差異。具體研究目標有三，包括：

- (1) 完成國內外應用人工智慧物聯網 (AIoT) 影像感測器於建築安全應用之案例及效益分析等相關文獻資料之蒐集與調查，其預期成果在蒐

集國內外 AIoT 影像感器於建築安全之應用案例與相關效益分析方法等資料。

- (2) 完成並提出 AIoT-IS 於建築安全之應用情境及效益分析，其預期成果在提出 AIoT 影像感器於建築安全之可能應用情境，並完成模擬案例與相關應用情境之研擬。
- (3) 完成 AIoT-IS 在建築物安全應用效益之案例模擬試算，其預期成果在完成模擬案例之質性效益及潛在風險評估與量化效益模擬之試算。

貳、文獻回顧

一、AIoT 技術發展現況

- (一) IoT 與 AIoT 技術發展之演進—物聯網 (IoT) 基本的概念是可以將各式各樣的「事物 (Things)」，透過獨特的方法來與其他「事物」互動與協作以達成共同的目標 [1]。各 IoT 元件之間可以透過無線通訊網路來互相溝通、傳遞資料、做出簡單的決策，例如 RFID 標籤、氣體感測器、煙霧感測器、溫度感測器等。
- (二) AIoT-IS 之機器學習技術與框架—透過機器學習演算法產出可用的模型後，IoT 應用系統只需執行預先訓練好的模型，便可執行具人工智慧的決策。坊間常見的 AIoT-IS 之機器學習技術與框架包括：You Only Look Once (Yolo) [2]、DeepLab [3]及 TensorFlow [4]等。
- (三) 國內外 AIoT-IS 發展現況—近年來已經有許多硬體廠商相繼推出效能高、體積小、耗電量低的 AIoT 邊緣運算裝置，例如 NVIDIA Jetson 模組系列 [5]、人工智慧的深度學習視覺攝影機 [6] (Cognex, 2021)及 NEON AI 智慧相機 [7]等。

二、國外 AIoT 影像感測技術之應用案例

- (一) 即時人流推估與異常行為偵測之應用－包括利用 Convolutional Neural Network (CNN) 來估算人群的數量與密度[8] 及基於 Recurrent Neural Network (RNN) 與 Sparse Long Short-term Memory (SLST) 的 AnomalyNet 異常行為分析網路 [9]。
- (二) 居家照護與健康管理之應用－包括基於 IoT 與 CNN 的智能嬰兒照護系統[10]；藉由 TP-LSTM (Temporal-pyramid Long Short-term Memory) 來預測事故發生的可能性並提出預警之系統[11]；藉由人工智慧的方式監控與辨識是否為優良的睡姿[12]及以提取嬰兒的骨架資訊來預測或偵測危險狀態[13]。
- (三) 智慧停車場之應用－例如基於視覺輔助智能車輛存在傳感器的物聯網智能停車系統[14]。

三、AIoT 技術於建築安全之應用案例

- (一) 建築施工中人員安全監控－例如以人工智慧視覺辨識技術為基礎，發展之營建工地施工人員定位與安全裝備辨識系統[15]；以語意分割深度學習技術為基礎之人工智慧電腦視覺辨識方法，開發之建築工地電梯直井安全監控輔助系統[16]等。
- (二) 建築施工中結構安全監測－例如基於人工智慧物聯網 (AIoT) 的隧道施工即時監控系統[17]。
- (三) 完工後建築物安全監測－例如應用於廚房的智能火警系統[18]；監控結構安全的智能攝影系統[19]等。
- (四) 建築使用營運階段社區安全管理－前述社區異常行為偵測、居家照護與健康管理、智慧停車場應用、預防火災之智能火警系統、

建築物結構偏移偵測及預防水災之社區排水系統水位監測等，皆可應用於建築使用營運階段社區安全管理。

四、智慧建築效益評估研究回顧

國內外之智慧建築效益評估，其重要研究包括：

- (一) 內政部建築研究所之智慧建築成本效益評估方法 (Intelligent Build Benefit Evaluation Method, IBEM) [20]，探討其應用於智慧建築成本效益分析之可行性。
- (二) 溫琇玲、游璧菁[21]及張效通等[22]則提出以經濟決策分析為基礎之辦公類「智慧建築效益量化評估」模式。
- (三) Wisdom et al. [23] 提出包含外部系統、組織、創新方案及個人等四個層級的創新技術採用預測理論框架，用以分析醫療健康領域創新技術之接受度。
- (四) Wilson et al. [24] 針對英國居民進行問卷調查發現，智慧建築科技帶來的主要效益在於能源管理，而其最大風險為喪失個人在家之隱私、獨立與自主權。其調查指出，「管理能源 (managing energy use)」及「節約能源 (save energy)」是影響居民選擇或預期智慧建築科技達成的主要目的。
- (五) Arfi et al. [25] 提出科技接受與採用理論框架，來分析醫療產業採用與接受 IoT 技術之重要驅動因子；並指出績效期望、付出期望、社交影響、便利條件和感知風險等，為四個使用者採用行為決策最重要之影響因子。
- (六) Yang et al. [26]以「混合作業基礎成本分析」方法，結合「決策實驗室分析法 (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory,

DEMATEL)」與「網路層級分析法(Analytic Network Process, ANP)」進行「物聯網智慧建築管理系統最佳化組合」之研究。

(七) Gao et al. [27]針對四種中國空氣汙染管制政策方案進行成本效益分析 (Cost Benefit analysis, CBA) 比較。

參、AIoT 影像感測器在建築安全應用情境歸納

本研究歸納 AIoT-IS 在建築安全應用之情境共 18 項。依建築物生命週期不同階段 (施工中、完工後及營運中) 說明如下：

- 一、建築施工中之工地安全監控—黃德琪與闕妙如[28] 認為 AIoT-IS 具有定位技術結合移動軌跡演算與預測、影像辨識、環境感測、異常預測等功能，可提供建築施工階段施工人員之安全監測、施工機具操作安全監控以及危害環境之偵測與預警等功能。後經專家訪談建議，擬定其應用情境共六項，包括：高處施工之建築開口或結構物邊緣之人員墜落風險監控、個人防護設備之辨識、施工人員不安全行為辨識、移動式起重機操作時周圍碰撞風險之警示與監控、工地出入口人、車門禁管制以及工區環境安全監控。
- 二、建築施工中之結構安全監測—建築施工過程因為建築物強度尚未完全發展，且因施工過程之需要會有土方開挖、臨時支撐等需求，而產生結構體破壞、崩塌等安全性之問題。基於 AIoT-IS 具有光學測量之功能，只要能克服精度問題，即可應用於傳統施工過程之安全監測。經由文獻回顧發現，其可能之應用情境共三項，包括：地下開挖之安全支撐監控、鄰房下陷或傾斜之監測及地下管線(隧道)等開挖之結構變形監控。
- 三、完工後之建築物安全監測—建築完工之後，可能會因為地震、火災、風災、水災等各類外力影響，導致結構體強度、耐久性等問題。

除了可以針對火災、地震等災害進行建築物安全監測外；若能結合光學測量、非破壞檢測等探測技術，則可應用於完工後之建築物安全監控情境。經由文獻回顧發現，其可能之應用情境共三項，包括：結構損壞檢測、外牆損壞檢測及設施耐久性檢測。

- 四、營運階段社區安全管理—建築完工使用與營運階段，時間上一般佔建築物生命週期 95% 以上，因此其安全監控應用情境較多；經由文獻回顧以及專家訪談後之建議，其可能之應用情境共六項，包括：智慧建築內之居家照護與健康管理、建築物出入口之人員門禁管制、建築物車道出入口之車牌辨識、公共空間異常行為之安全偵測、失智老人、寵物等之協尋及建築物火災、洪水等之偵測與警示。

肆、AIoT 影像感測器在建築安全應用效益之分析模式之建構與發展

本研究提出 AIoT-IS 於建築安全應用效益之分析模式稱為「建築智慧科技應用成本效益分析模式 (Cost/benefit Analysis Model for Intelligent building Technology Adoption, CAMITA)」。CAMITA 方法結合先前學者所提出之質化效益分析與經濟決策分析模型，針對 AIoT 影像感測器在建築物安全應用之成本效益進行評估。CAMITA 成本效益分析架構共分成四個層級，包含五個階段，如圖 1 所示，說明如下：

- 一、目標層級 (Objective)—在分析建築智慧科技應用(本研究將聚焦於 AIoT 技術應用於建築安全)之效益。
- 二、構面層級 (Category)—包括：(1)效率提升之效益 (Benefit, B)；(2)技術發展潛力之機會 (Opportunity, O)；(3)設備建置與維護之成本 (Cost, C)；以及(4)對於社會及個人可能帶來之風險 (Risk, R) 等四大構面 (BOCR)，以分析建築智慧科技應用之各面向成本與效益。

- 三、項目層級 (Item)—從 BOCR 四大構面向下定義各評估面向所應包含之評估項目，包含：(A) 效率提升效益 (B)—包含 1.1 安全、1.2 健康、1.3 節能、1.4 管理等項目之效益 (溫琇玲、游璧菁，2019；張效通等人，2020)；(B) 技術發展潛力 (O)—包括 2.1 實用性、2.2 可靠度、2.3 接受度、2.4 競爭力等項目之潛力；(C) 建置營運成本 (C)—包括 3.1 新建、3.2 更新、3.3 營運、3.4 維護等項目之成本；(D) 社會隱性風險 (R)—包括 4.1 隱私、4.2 資安等項目之風險。
- 四、準則層級 (Criterion)—由各評估項目之內涵，透過文獻回顧、專家訪談、問卷調查等歸納出評定該項目之評分準則，以決定各項目之 BOCR 量化數值。此一層級之評估方法，將依據不同應用技術之不同應用情境進行調整，以符合個案之條件。
- 五、評分 (Score)—依據第四層級之評分準則，針對不同應用技術之不同應用情境，進行個案之評分。其中，效率提升效益 (B)、技術發展潛力 (O)及建置營運成本 (C)等三面向之評分，主要是依據不同應用技術之不同應用情境所需建置之設備與相關技術進行評估；而社會隱性風險 (R) 之評分，則需透過個案利害關係人之訪談或問卷調查意見回饋進行評估。

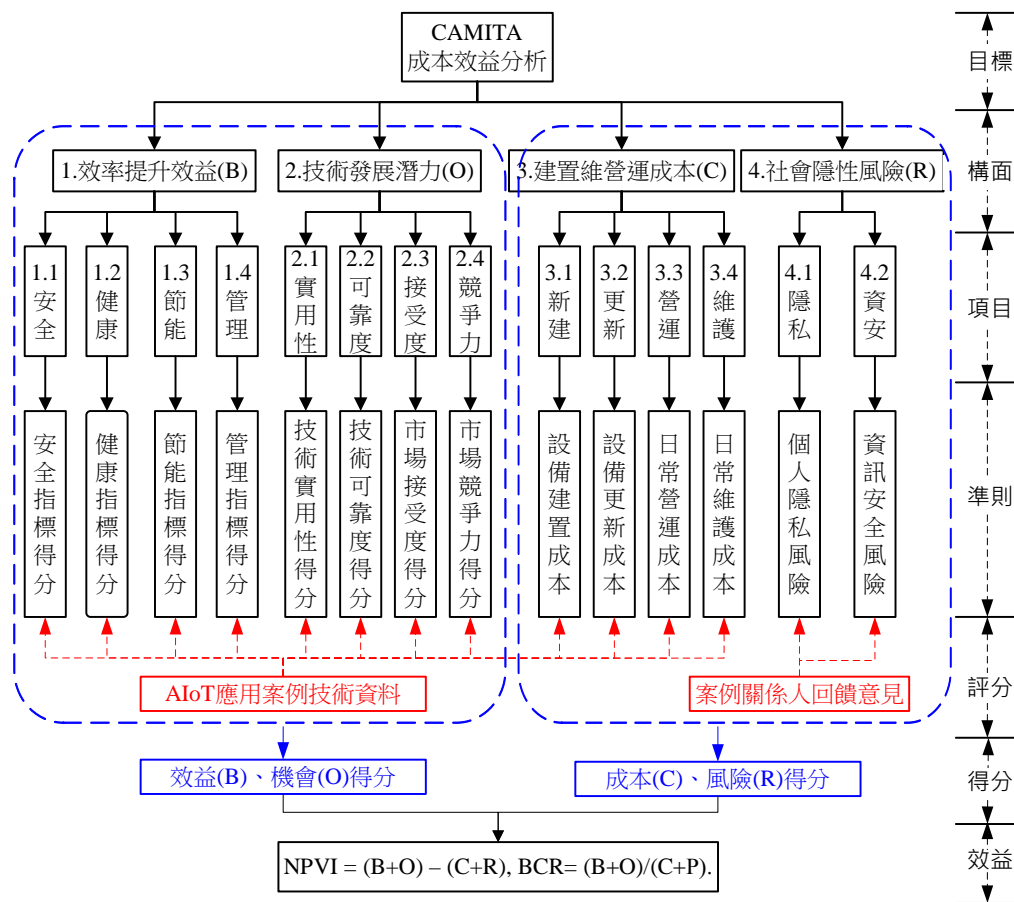


圖 1 CAMITA 成本效益分析模式

為確保 CAMITA 評估模式之有效性，首先必須確認圖 1 中各分析項目與評估準則間之相互影響性。CAMITA 採用「決策實驗室法」結合網路層級分析法進行分析，主要步驟說明如下：

(一) 依據問題複雜度，或個案之特性，先以「決策實驗室分析法

DEMATEL) 」方法分解 BOCR 四大項之細項分類，並評估各構面、項目及準則之相互影響力，以決定最終納入 CAMITA 成本效益分析之詳細架構。

(二) 依據 DEMATEL 之評估結果以及所得到之 CAMITA 評估架構，以兩兩比較法 (pairwise comparison) 進行項目重要性相對權重分析；若不同構面、項目之子項間具有獨立性，則採用「層級架構分

析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)」進行各項目間之相對權重分析；否則，則採用「網路層級分析法Analytic Network Process, ANP)」進行各項目間之相對權重分析。

- (三) 依據 AIoT-IS 應用案例之個案資料，以量化或質性（次量化）方法，評估「效益提升(B)」、「發展潛力(O)」、「應用成本(C)」及「隱私與資安風險(R)」等構面下各項目之準則數據與得分，此處之評分方式可參考知識加值方法[29]，比較導入創新技術前後之價值或成本差異。
- (四) 依據各項目權重，加總計算效益與機會（潛力）得分 (B + O)，以及成本與風險項減分 (C + R)；為了輔助使用者進行評估，本研究除提出標準評估尺規 (Evaluation scale) 作為不同對照方案之相對效益評估參考之外，也提出檢核表 (Checklist) 簡易評估方法，供決策者參考應用。
- (五) 帶入經濟決策分析指標計算，因為 CAMITA 之成本效益為方案相對價值（技術加值）比較，故其淨現值指標為方案相對之價值（技術加值），而非絕對之貨幣價值。因此，本研究仿照經濟決策分析之淨現值(Net present value, NPV) 定義一個新決策指標：淨現值指標 (NPV Index) = (B + O) - (C + R)；另外，定義益本比為 BCR = (B + O) / (C + R)，並完成案例之成本效益指標數值分析。

伍、建築安全之模擬應用案例

一、工地安全監控之應用

本應用案例以位於台中市西屯區某公共工程做為模擬案例之假想工地，本工地基地面積約 2.6 公頃，總樓地板面積為 58,016 m²。由於工區廣闊，若僅採用傳統人工巡查方式進行工地安全管制，不但耗費人力且容易產生安全死角，故該工程採用 AIoT-IS 技術於工地安全管制。

選用之 AIoT-IS 技術包括：(1) 工地大門出入口之人員與車輛管制。(2) 個人防護設備 (Personal Protection Equipment, PPE) 自動辨識。(3) 建築施工面高處作業之邊緣與結構體內部開口之墜落風險自動監控。(4) 移動式起重機吊裝作業區人員與物品管制。

依據案例特性，建立 CAMITA 分析架構，共包含 4 個構面、9 個項目及 14 項評分準則之評分架構。本案例訪談及問卷共分為三個階段：第一階段的 DEMATEL 共訪談七位專家；第二階段的 ANP 除訪談第一階段七位專家外，並擴大邀請五位專家，共十二位專家；第三階段之評分問卷調查，除第二階段之專家外，另邀請參與第二次專家座談會之業主代表填寫，實際回收問卷共十份，相關領域包括學術界、設計監造、施工及業主。分析過程及結果說明如下：

- (一) 第一階段—依據 7 位專家的 DEMATEL 分析結果，4 大構面中「技術發展潛力 (O)」、「效益提升效率(B)」及「營運建置成本 (C)」之主動影響性較高，「社會隱性風險 (R)」之被動影響性較高。經靈敏度分析後，由專家座談會決議採用 20% 為閾值，作為影響性矩陣建立依據。
- (二) 第二階段—依據 12 位專家的 ANP 統計分析結果，權重最高的項目為「效率提升效益」中的「1.1 安全指標」佔 16.88%；第二及第三為「.

建置營運成本」中的「3.1 新建成本」佔 14.94%及 3.2「營運成本」佔 13.03%。準則部分則有 4 項大 10%，包括：A1. 人員安全改善效益佔 12.19%；F. 技術可靠度潛力 11.62%；E. 技術實用性潛力 10.80% 及 N. 資訊安全風險 10.15%。

(三) 第三階段一效益評分則以兩個方案 (AIoT vs. CCTV) 進行比較，共回收十份有效問卷，經統計分析後，「方案一：AIoT-IS 自動識別方案」的 NPVI 與 BCR 分別為 20.21%與 5.10，「方案二：傳統CCTV 方案+人工監看方案」的 NPVI 與 BCR 分別為 10.34%與 4.43。不論由淨現值指標(NPVI)或成本效益指標(BCR)之分析結果，皆為「方案一 (AIoT) 優於「方案二 (CCTV)」，顯示在建築施工中「工地不安全情境監控」應用情境下，若以 AIoT 影像識別技術於工地不安全情境監控，取代傳統 CCTV+人工職安巡檢，屬於可行之創新技術方案，故值得營造業者採用。

二、社區安全管理之應用

本模擬案例以大台中地區某一約 70 戶之集合住宅大樓社區為模擬之案例。依據該社區之特性選用相關技術作為效益分析之標的。

選用之 AIoT-IS 技術包括：(1) 人員入口安全管制。(2) 車輛入口安全管制。(3) 異常行為偵測。(4) 建築水、火災、結構偏移偵測。(5) 老人嬰兒居家照護。

依據案例特性，建立 CAMITA 分析模式，共包含 4 大構面、11 個項目、25 個評分準則之評分架構。本案例訪談及問卷亦分為三個階段：第一階段的 DEMATEL 共訪談六位專家；第二階段的 ANP 除訪談第一階段七位專家外，並擴大邀請五位專家，共十二位專家；第三階段共邀請六位專家參與評估，相關領域包括智慧建築設計專家、AIoT 設備與

技術專家、系統保全專家、資訊安全專家、社區住戶委員、業主代表等相關領域的專家。分析過程及結果說明如下：

- (一) 第一階段—從 6 位專家的 DEMATEL 分析結果發現，在 4 大構面中，「技術發展潛力(O)」和「效益提升效率(B)」的主動影響性最高，而「社會隱性風險(R)」和「營運建置成本(C)」的被動影響性最高。可見未來 AIoT-IS 之發展重點，在於技術之穩定性與可靠度等，以及其對於安全監控之精確性與管理效率之提升；在技術可靠與效率提升的前提下，成本與風險課題相對都可以逐步獲得解決。由 DEMATEL 細部分析中發現在社區安全管理應用情境中，「節能指標」應被忽略不考慮。
- (二) 第二階段—透過共 12 位專家填寫 ANP 問卷中進行統計分析，權重最高的項目為「效率提升效益」中的「安全指標」，第二是「技術發展潛力」中的「可靠度指標」，第三則是「社會隱性風險」中的「資訊安全風險」。
- (三) 第三階段—效益評分亦以兩個方案 (AIoT vs. CCTV) 進行比較，共回收六份有效問卷，結果發現「方案一：AIoT-IS 自動識別方案」之 NPVI 與 BCR 分別為 12.63% 與 2.10；而「方案二：CCTV+DVR/IVS 方案」的 NPVI 與 BCR 分別為 1.04% 與 1.09。若將方案一與方案二相比較，在 AIoT 取代 CCTV+DVR/IVS 時，其 NPVI 與 BCR 分別也有 11.59% 與 1.01。因此，在專家們的綜合評估下， $NPVI > 0$ 並且 $BCR > 1.0$ ，無論單獨考量「方案一 (AIoT)」或以「方案一 (AIoT)」取代「方案二 (CCTV+DVR/IVS)」，在社區安全管理應用上，都具有明顯的成本效益。

伍、結 論

經由研究團隊對現有文獻進行回顧、建立 CAMITA 模式及對兩個模擬案例詳盡分析，得到結論有四：

- 一、目前 AIoT-IS 於建築安全已漸臻成熟，具有產業化以及商業化之應用價值與發展潛力，未來可搭配相關規範於建築施工與營運階段來導入 AIoT-IS 技術，加速 AIoT-IS 的應用效益。
- 二、國內外有關 AIoT-IS 於建築安全之應用範圍廣泛—分析國內外 AIoT-IS 於建築安全之應用案例文獻發現，其應用範圍相當廣泛；除包含智慧建築標章第 5 項「安全防災」之防火、防水、防盜、監視、門禁、停車管理、有害氣體防制及緊急求救等外，亦與第 7 項「健康舒適」之健康管理相關。
- 三、國際有關智慧建築科技效益分析主要在於成本效益分析—傳統經濟決策分析法(EDAM)之成本效益分析 (CBA) 方法，仍為國際學術界對於智慧型新興科技效益評估之主流。本研究提出一「建築智慧科技應用成本效益分析模式 (CAMITA)」，則為各項與 AIoT 應用相關之有形與無形之成本與效益量化並轉換成為貨幣單位困難之解決方案。
- 四、依據兩個模擬案例經由實際專家訪談與問卷調查結果，AIoT 影像感測創新技術，無論是建築施工中安全監測，或是建築物使用階段之社區安全管理均較現有傳統方式為優，值得持續推廣與應用。

本研究雖已完成國內外相關文獻及案例回顧，同時建立完成 CAMITA 模式，並對模擬案例完成評估，然仍有幾項後續研究建議，包括：

- (一) 建議將本研究歸納之 18 項 AIoT-IS 於建築安全之應用情境作為業主或工程與設計單位未來於建築設計與施工時納入參量應用。
- (二) 經專家座談與焦點團體訪談之專家與利害關係人意見發現，AIoT-IS 之高解析度與高辨識能力，會引發侵犯個人隱私之疑慮。因此，建議後續應研擬相關配套措施，例如建立符合國際標準之規範。
- (三) 建議可將應用 AIoT-IS 於社會住宅之社區安全管理作為後續政策擬定參考。以降低社會住宅之規模朝向小型化 (戶數在 35~80 間)發展後，大幅減低住戶保全管理費用之負擔之功能。

陸、參考文獻

1. TensorFlow (2021), "TensorFlow", Website: <https://www.tensorflow.org/>, accessed 2021/03.
2. Nvidia (2021) "Embedded Systems Developer Kits & Modules from NVIDIA Jetson," NVIDIA Jetson, Website: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/>, accessed 2021/03.
3. Cognex (2021) “IN-SIGHT D900 視覺系統”，Website: <https://www.cognex.com/zh-tw/products/deep-learning/in-sight-d900>，查詢日期: 2021/6。
4. 凌華科技 (2021)，「工業機器人危害預防解決方案 | AI 智慧相機應用案例」，Website: https://www.adlinktech.com/tw/AI_Vision_Case_Smart_Camera_Robot_Hazard_Prevention/，查詢日期: 2021/6。
5. Huang, Q. and Hao, K. (2020) "The Development of Artificial Intelligence (AI) Algorithms to Avoid Potential Baby Sleep Hazards in Smart Buildings," in Construction Research Congress 2020, pp.

278-287.

6. McCay, K. D., Ho, E. S. L., Shum, H. P. H., Fehringer, G., Marcroft, C., and Embleton, N. D. (2020) "Abnormal Infant Movements Classification With Deep Learning on Pose-Based Features," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 51582-51592.
7. Luque Sánchez, Hupont, F., I., Tabik, S., and Herrera, F., "Revisiting crowd behaviour analysis through deep learning: Taxonomy, anomaly detection, crowd emotions, datasets, opportunities and prospects," *Information Fusion*, vol. 64, pp. 318-335, 2020/12/01/ 2020.
8. 余文德、廖琬洲、蕭文達、張憲寬、吳定餘、林楨中 (2020)，「混合式機器學習方法於施工人員個人安全裝備即時辨識之應」，*技術學刊*，第三十五卷，第四期，第 115 至 165 頁。
9. 廖琬洲、余文德、蕭文達、張憲寬、蔡智弓、林楨中(2021)，「運用深度學習技術之影像語意分割於施工中電梯直井墜落風險監控的應用」，*技術學刊*，第三十六卷，第一期，第 1 至 12 頁。
10. Zhang, P., Chen, R.P., Dai, T., Wang, Z.T., and Wu, K. (2021) "An AIoT-based system for real-time monitoring of tunnel construction." *Automation in Construction*, Volume 109, 103766.
11. Ma, Y., Feng, X., Jiao, J., Peng, Z.H., Qian, S., Xue, H., and Li. H. (2020) "Smart Fire Alarm System with Person Detection and Thermal Camera," Cham, 2020: Springer International Publishing, in *Computational Science – ICCS 2020*, pp. 353-366.
12. Hsu, T.-Y. and Kuo, X.-J., "A Stand-Alone Smart Camera System for Online Post-Earthquake Building Safety Assessment," *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3374, 2020.
13. 張效通、溫琇玲、游璧菁 (2020)，「辦公類智慧建築效益量化評估

- 合理性研究」，內政部建築研究所委託研究報告，內政部建築研究所。
14. Arfi, W.B., Nasr, I.B., Khvatova, T., Zaied, Y.B. (2021)“Understanding acceptance of eHealthcare by IoT natives and IoT immigrants: An integrated model of UTAUT, perceived risk, and financial cost,” *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 163, 120437.
 15. Yang, C.H., Lee, K.C., Li, S.E. (2020) “A mixed activity-based costing and resource constraint optimal decision model for IoT-oriented intelligent building management system portfolios.” *Sustainable Cities and Society*, Volume 60, 102142.
 16. 黃德琪、闕妙如，「職安衛 AIoT 技術運用實務」，*工業安全衛生月刊*，第 378 期，第 10 至 32 頁，2020。

