

電致變色貼膜節能與舒適效益研究

一、背景與目的

國內外目前相關之建築節能規範或標章皆已將 Low-e 窗、高性能單層/多層窗、惰性氣體填充窗等節能玻璃納管，隨著歐盟 SRI(Smart Readiness Index)及美國 GEB (Grid-interactive Efficient Buildings)概念之興起，開始訴求主動控制，以兼顧節能、人員舒適需求、電網彈性互動，其中電致變色玻璃產品被視為外殼智慧控制的重點項目。電致變色玻璃目前以室內隔間的使用較為常見，透過調光來控制房間隱私性。近年因應智慧節能控制概念，國際論文朝向探討電致變色玻璃產品應用於對外窗之控制策略及節能舒適效益。戚皓然等人透過模擬方式，依室外水平照度控制電致變色玻璃發現南向、東向和西向可分別減小總能耗 22.7%、24.9%和 28.7% [1]。Cannavale 等人透過模擬發現當室內工作面照度在 300~500 lux 時，節能與視覺舒適性較可取得平衡[2]。Ali Khatibi 等人透過混合控制演算法控制電致變色玻璃的色態，與沒有使用電致變色玻璃的建築相比節能率可提高至少 26.12%[3]。電致變色玻璃的技術相當成熟，但根據 Nundy 等人的研究表示動態型玻璃未有與建築整合之規範，導致推動上有些疑慮。此外，非技術人群對於電致變色玻璃對環境及節能減碳影響等相關資訊了解有限、成本高及既有建築附近無電源等都是降低選用電致變色玻璃的因素[4]。

電致變色玻璃產品在國際市場已相當成熟，但這類產品成本高，特別是既有建築窗戶汰換工程不易，在使用規模上比例仍偏低。因此，國內廠商開始著重於電致變色貼膜產品之開發與應用，以期降低成本及減少施工困難。電致變色材料主要技術分為懸浮粒子元件技術(suspended particle device, SPD)、高分子分散型液晶技術(polymer dispersed liquid crystal, PDLC)及電致變色技術(electro chromic, EC)。PDLC 是發展最早、最成熟之技術且成本最低，該材料通電時晶膜中的高分子液晶材料會進行有序排列，使光線可以輕易穿透成透明狀；反之，不通電時高分子液晶材料不能正常排列，使之成霧態狀，隱私性高。SPD 懸浮粒子被放置在兩塊玻璃或塑膠面板之間，斷電時粒子隨機排布，可吸收 99%以上的可見光，

呈深色態；當電流通過導電塗層與 SPD 懸浮粒子接觸時，它們排成一條直線並允許光線通過，呈透明態，但成本較高。EC 材料的變色是透過元件兩端電極外加電壓，透過氧化還原反應將其狀態從透明狀態改變為有色狀態，並在電源反轉時恢復到其原始狀態[5]。

因應申請綠建材之需求，目前廠商嘗試將電致變色貼膜(PDLC)與隔熱膜整合以用於外殼窗戶，但綠建材之性能量測是於標準實驗室內進行量測，與實際應用所面臨的環境變化及使用方式有一定差距。本計畫目標是於 SPINLab 進行實驗，量測電致變色貼膜的能耗及光、熱舒適性並提出建議。

二、實驗規劃

本研究 A 室為實驗組於 6mm+6mm 之膠合玻璃上加上電致變色貼膜進行量測，貼膜未通電時為霧態，通電後為透明態；B 室為對照組使用 6mm+6mm 之膠合玻璃。電致變色貼膜色態及現場光學性能如表 1。實驗時間為 2023 年 7 月至 2023 年 10 月，量測時間為上午 8 點至下午 18 點，開窗率 40%。空調使用日立變頻分離式冷氣乙台，冷氣能力 11kW，CSPF 為 5.9，設定溫度為 26°C。量測項目包含室內外溫濕度、玻璃室內側之單位面積熱通量、熱舒適度、桌面照度及眩光。量測儀器位置如圖 1 所示。電致變色貼膜情境有 3 種：1) 電致變色貼膜全時透明態；2) 電致變色貼膜全時霧態；3) 電致變色貼膜依室內側桌面照度自動控制色態，當照度低於 500lux 時變為透明態。

三、熱舒適及眩光評估指標

本次實驗皆為全空調無自然通風之情境，故熱舒適評估採用 PMV(Predicted Mean Vote)/PPD(Predicted Percentage Dissatisfied)靜態模型。熱舒適自 -3(冷)到 +3(熱)共分成 7 個不同冷熱感，其中 $-0.5 < PMV < +0.5$ 為舒適區，代表僅 10% 的人會感到不滿意。

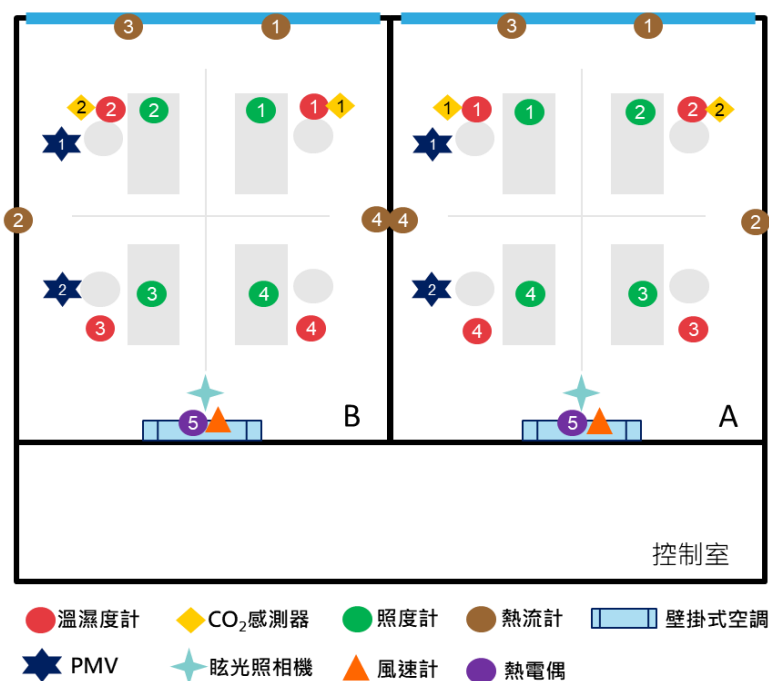
眩光指數的方法是採用由 Wienold 和 Christoffersen [6]開發的基於影像的日光眩光指標(Daylight Glare Probability, DGP)，這是用於評估日光空間中受一個

或多個眩光干擾源影響的百分比。一般 DGP 值小於 0.35，代表無眩光問題。

表 1、電致變色貼膜色態及現場光學性能

透明態	霧態
	
可見光穿透率：56% 紅外光阻隔率：99% 紫外光阻隔率：100% 遮蔽係數 SC：0.54	可見光穿透率：11% 紅外光阻隔率：99% 紫外光阻隔率：100% 遮蔽係數 SC：0.54

資料來源：本計畫彙整



資料來源：本計畫繪製

圖 1、SPINLab 量測儀器位置圖

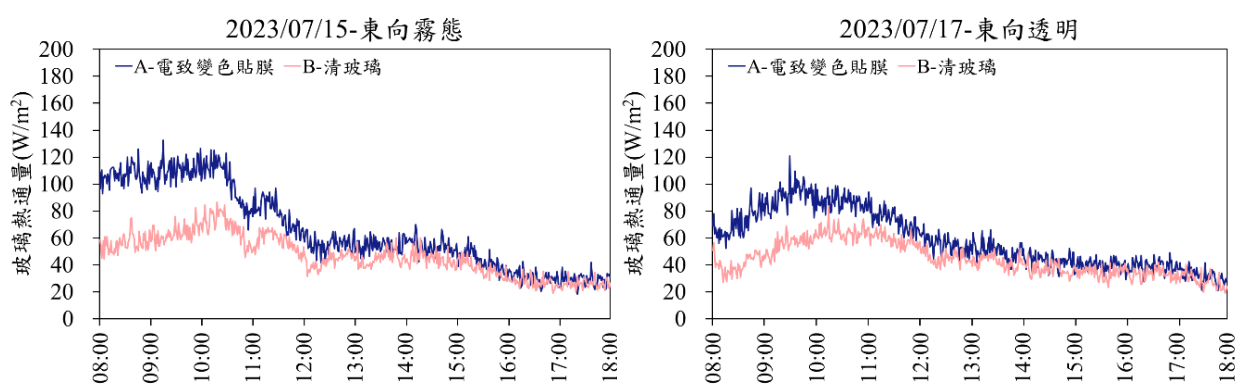
四、實驗結果

電致變色貼膜全時採霧態/透明態在各方位的用電效益結果如表 2。從表中可知，電致變色貼膜在霧態時的節電效益較透明態高，以西向節電效益最高，可達 10.1%；東向次之，可節 8.1%空調耗電；南向節電效益稍低，約 4.4%；北向則無節電效益。透明態下，電致變色貼膜對於空調節電仍有約 2.7~5.0%之節電效益，但是電致變色貼膜透明態下全日(共 10 小時)耗電 0.5kWh，其使用的電量會弭平空調節電量，導致在透明態下整體耗電量高於一般玻璃使用。

表 2、電致變色貼膜霧態/透明態各方位用電效益結果

日期	座向	色態	空調耗電(kWh)		空調節電量(kWh)	空調節電比	計入貼膜通電後之節電量(kWh)	
			A-貼膜	B-清玻				
7/15	東	霧態	7.88	8.57	0.69	8.1%		
7/17	東	透明	7.49	7.71	0.22	2.9%	-0.28	-3.6%
7/22	南	霧態	6.59	6.89	0.30	4.4%		
7/25	南	透明	7.20	7.40	0.20	2.7%	-0.30	-4.1%
8/22	西	霧態	7.83	8.71	0.88	10.1%		
8/23	西	透明	8.00	8.42	0.42	5.0%	-0.08	-1.0%
8/26	北	霧態	6.26	6.16	-0.10	-1.6%		
8/28	北	透明	6.81	6.66	-0.15	-2.3%	-0.65	-9.8%

資料來源：本計畫整理



資料來源：本計畫繪製

圖 2、清玻璃及電致變色貼膜霧態/透明態玻璃熱通量(以東向為例)

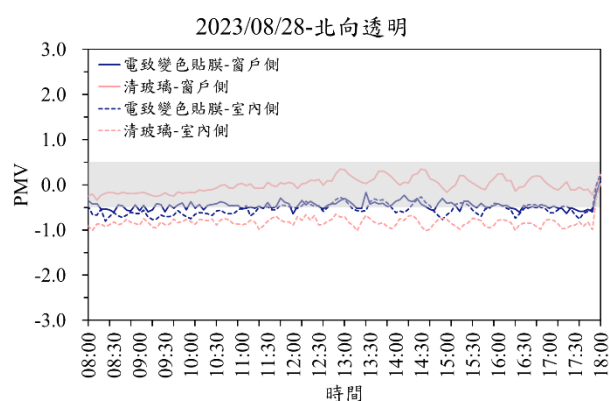
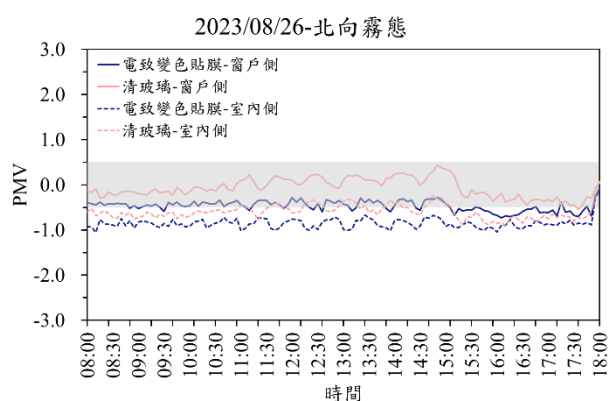
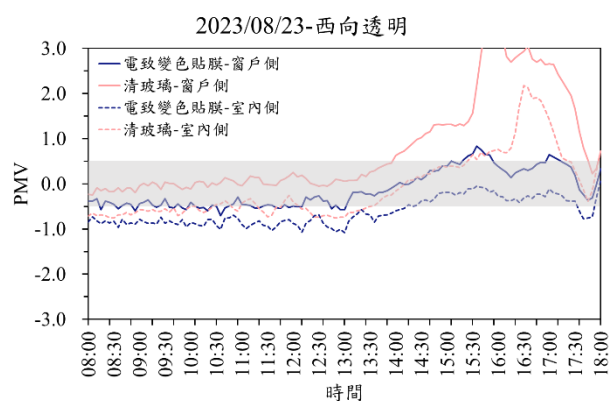
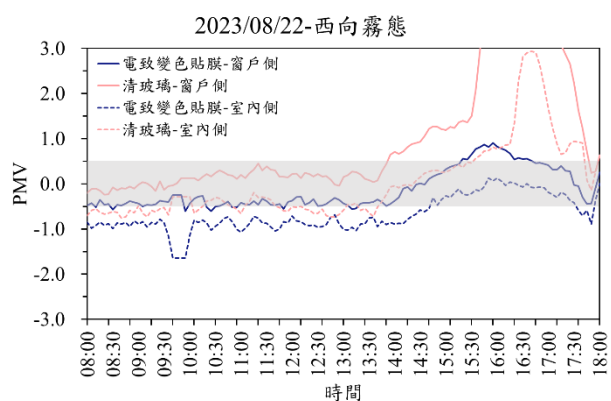
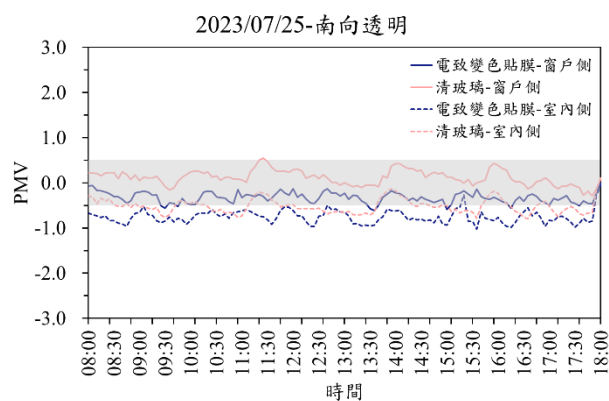
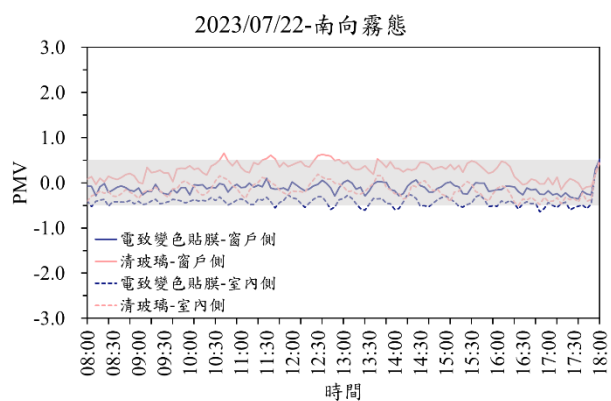
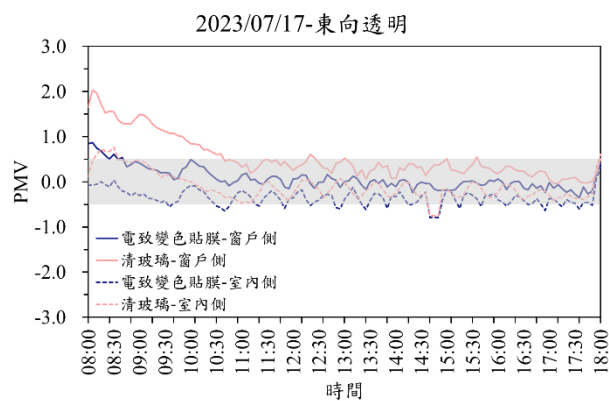
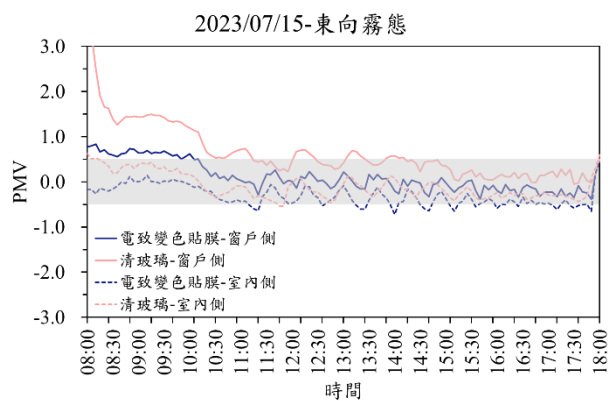
圖 2 以東向為例說明與吸熱型隔熱貼膜整合後之電致變色貼膜對玻璃熱通量的影響。從圖中可知玻璃熱通量變化不受電致變色貼膜色態影響，主要是受吸熱型隔熱貼膜吸附熱之能力影響，A 室因吸熱太陽光之熱量於玻璃及膜上，其熱通量明顯高於 B 室清玻璃。在有直射日光時段(東向上午) 貼膜一室的熱通量可達 100W/m^2 以上，無直射日光時段(東向下)則熱通量小於 100W/m^2 。B 室因採用清玻璃，室外熱大多會直接穿透進入室內，故玻璃熱通量通常小於 100W/m^2 。

表 3、清玻璃及電致變色貼膜霧態/透明態各方位溫度及輻射溫度

日期	座向	色態	空氣溫度(°C)			臨窗側輻射溫度(°C)	
			室外	A 室	B 室	A 室	B 室
7/15	東	霧態	31.5~37.7	23.3~28.2	23.3~29.6	26.0~32.0	26.7~43.2
7/17	東	透明	31.3~37.9	23.3~27.2	23.2~28.8	26.0~31.4	26.6~36.3
7/22	南	霧態	27.7~37.2	23.3~25.8	23.4~26.9	26.0~27.7	26.1~29.6
7/25	南	透明	26.1~35.8	21.5~25.4	21.6~25.9	25.1~27.3	25.6~28.6
8/22	西	霧態	31.3~35.8	21.2~28.3	21.7~32.6	25.0~32.2	25.8~44.0
8/23	西	透明	30.9~37.0	21.3~27.7	21.6~31.5	25.1~32.1	26.1~42.4
8/26	北	霧態	26.5~36.9	21.4~24.6	21.6~25.6	24.4~26.2	24.8~28.5
8/28	北	透明	29.6~36.9	21.3~24.6	21.8~25.4	24.7~26.2	25.5~27.6

資料來源：本計畫整理

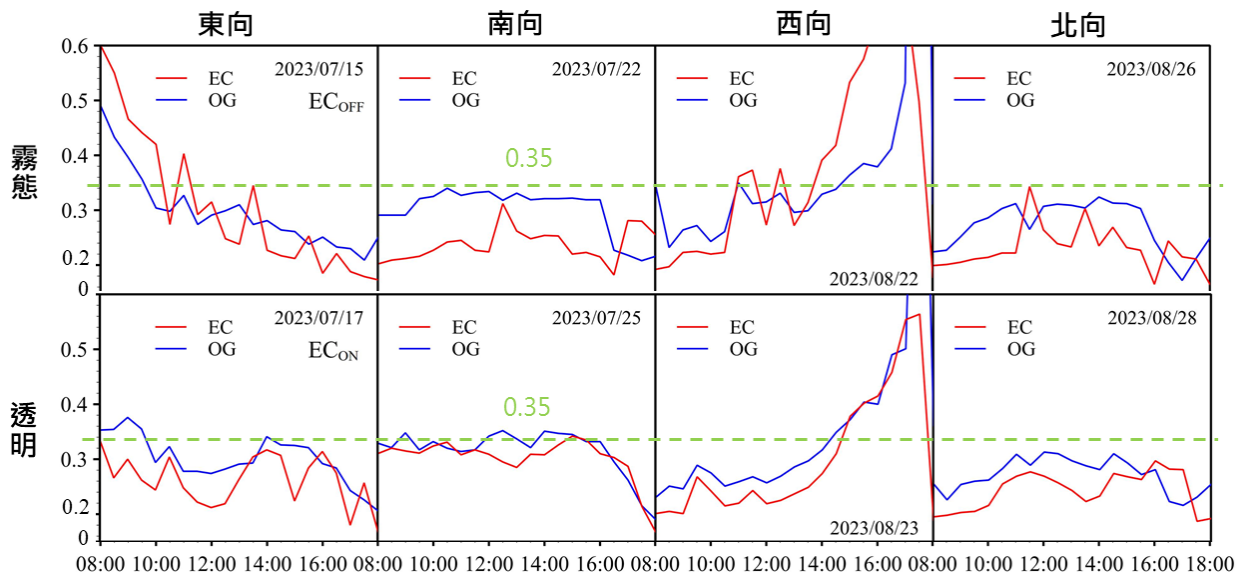
表 3 顯示 A、B 室之室內空氣溫度及臨窗側輻射溫度分佈範圍。電致變色貼膜一室的溫度分佈大多在 $21.2\sim 28.3^{\circ}\text{C}$ 之間，清玻璃一室則在 $21.6\sim 32.6^{\circ}\text{C}$ 之間。以西向下 A 室最多可降低 4.3°C ，東向上午可降約 1.6°C ，其它非日光直射時段二室室內溫差大多 $<1^{\circ}\text{C}$ 。使用清玻璃的 B 室窗戶側的輻射溫度在東向上午及西向下有直射日光時段可達 40°C 以上，其它無直射日光之時段與方向則輻射溫度大約落在 30°C 以下。A 室使用電致變色貼膜後可降低輻射溫度，以東向上午及西向下較為明顯，其中霧態時最多可降低約 12.2°C ，透明態時可減少約 10.3°C 的輻射溫度；南向窗戶側大約降 $0.1\sim 1.9^{\circ}\text{C}$ ；北向窗戶側約降 $0.4\sim 2.3^{\circ}\text{C}$ 。因此，在東向上午及西向下有直射日光時段，使用電致變色貼膜後可令 PMV 自 2 以上降至 1 以下甚至 ± 0.5 以內；其它不受直射日光影響之時段與方位，則不論是否有貼膜，PMV 都控制在 ± 0.5 之舒適範圍內，如圖 3。



資料來源：本計畫繪製

圖 3、清玻璃及電致變色貼膜霧態/透明態各方位 PMV 分佈

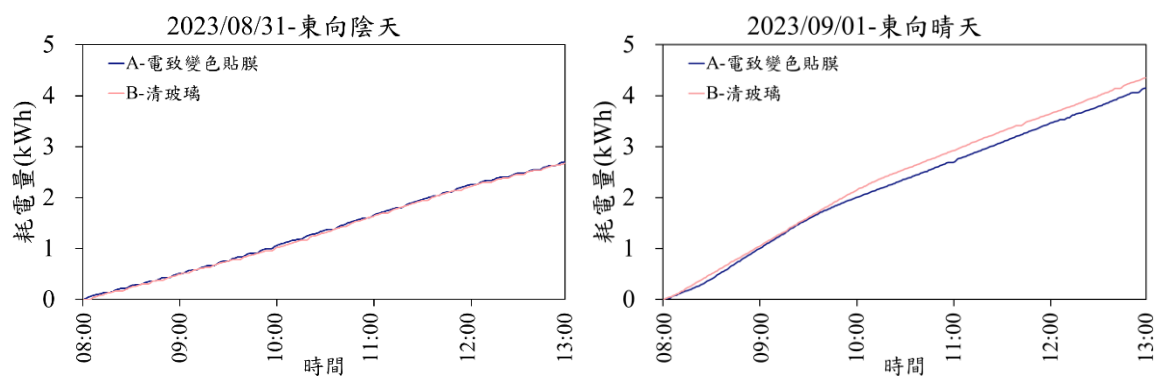
眩光環境評估結果如圖 4。電致變色貼膜(EC)透明態與清玻璃(OG)的 DGP 表現差異不大，但面臨東向和西向直射日光時仍有可能產生眩光(DGP>0.35 以上)。電致變色貼膜在霧態無直射光下，一般無眩光問題(DGP<0.35)，且 DGP 略低於清玻璃。但電致變色貼膜霧態液晶遇東向及西向直射日光時會使窗戶變亮，較清玻璃更易產生刺眼眩光，DGP 易達 0.45 以上，反而造成視覺不舒適的問題。



資料來源：本計畫繪製

圖 4、清玻璃及電致變色貼膜霧態/透明態眩光評估

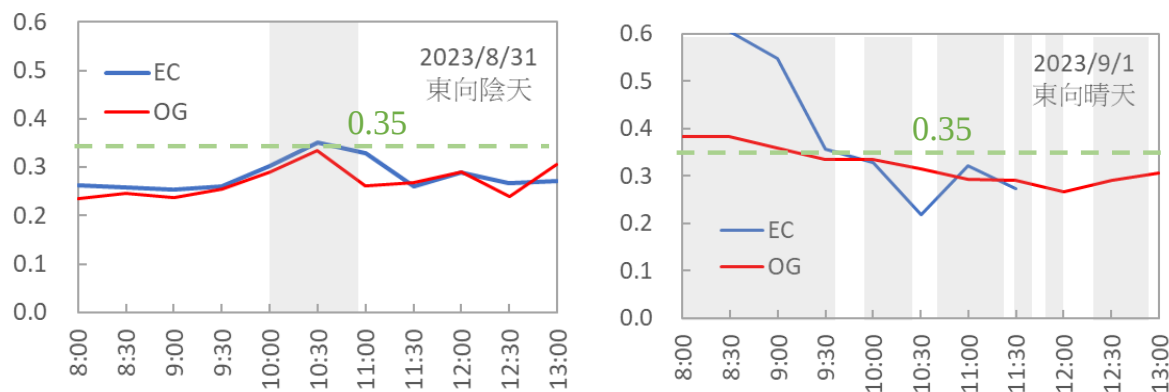
綜合前述實驗結果進一步針對東向上午有直射日光時段進行量測，分別比較自動控制模式下在晴天與陰天的效益。從圖 5 可知在陰天情況下，由於室內側桌面照度易低於 500Lux，使得電致變色貼膜需頻繁或長時維持在透明態，變色貼膜消耗之電量約 0.019kWh，加上陰天室外溫度與空調設定溫度相近，無明顯空調節電，造成陰天使用電致變色貼膜反而更為耗電。晴天時，室內側桌面照度大多高於 500lux，故多維持在不耗電之霧態狀況下，變色貼膜之耗電僅 0.006kWh，故整體節電量可達 4.4%。



資料來源：本計畫繪製

圖 5、電致變色貼膜自動控制下陰天與晴天節電效益比較

眩光環境評估結果如圖 6。在陰天情況下，由於室內側桌面照度易低於 500Lux，使得電致變色貼膜頻繁或長時維持在透明態，觀察電致變色貼膜(EC)霧態或透明態與清玻璃(OG)的 DGP 表現差異都不大，一般無眩光問題($DGP < 0.35$)，且 DGP 略低於清玻璃。晴天時電致變色貼膜多維持在霧態狀況下，早上直射日光使電致變色貼膜(EC)與清玻璃(OG)仍可能產生眩光($DGP > 0.35$ 以上)，但電致變色貼膜霧態液晶遇東向直射日光時會使窗戶變更亮，DGP 易達 0.45 以上，較清玻璃更易產生刺眼眩光，同樣有造成視覺不舒適的問題。



資料來源：本計畫繪製

圖 6、電致變色貼膜自動控制下陰天與晴天眩光評估(灰色表電致變色貼膜在霧態，白色表在透明態)

五、 小結

1. 電致變色貼膜在全日霧態(不通電)情況下，除北向無空調節電效益外，其它向可節電 4~10%；全日透明態(通電)情況下則無節電效益；採自動控制模式時，在晴天有直射日光情況下可節電 4.4%。
2. 電致變色貼膜可降低 PMV，臨窗側 PMV 可控制在 ± 0.5 ，室內側 PMV 可控制在-0.5~-1。
3. 電致變色貼膜在東、西向有直射日光時段若為霧態狀況下，易有眩光問題，DGP 通常 >0.35 。
4. 由於本次實驗使用之電致變色貼膜是與吸熱型隔熱貼膜整合之產品，預期節電及降低 PMV 之效益是來自隔熱貼膜之作用，民眾若選擇使用於對外窗之電致變色貼膜產品，建議留意產品是否具隔熱膜或取得綠建材中節能建材之標章以確保節能之效益。
5. 值得注意的是電致變色貼膜在東、西向有直射日光時段且為霧態狀況下有相當高之節電效益，但同時會產生嚴重的眩光問題，主要是霧態顏色偏白色會加強亮度導致，預期改用深色系有機會降低眩光影響。相關成果將提供廠商做為未來產品開發改良參考之用。

參考文獻

1. 戚皓然、孫育英、王偉、徐文靜& 薛鵬。電致變色玻璃窗的夏季調控方法優化研究，建築科學，Vol.35，No.4，2019
2. Cannavale, A.; Ayr, U.; Martellotta, F. Innovative electrochromic devices: Energy savings and visual comfort effects. Energy Procedia 2018, 148, 900–907.
3. Khatibi, A., Jahangir, M. H., & Astaraei, F. R. Energy and comfort evaluation of a novel hybrid control algorithm for smart electrochromic windows: A simulation study. Solar Energy, 2022, 241, 671-685.
4. Nundy, S., Mesloub, A., Alsolami, B. M., & Ghosh, A. Electrically actuated visible and near-infrared regulating switchable smart window for energy positive building: A review. Journal of Cleaner Production, 2021, Vol.301, 126854.
5. 黃文昌，電致變色。科學發展，549 期，2018

6. Wienold, J., & Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and buildings*, 38(7), 743-757.