

課程名稱：專題研究（校訂必修）

研究主題：基於社會外部成本最小化之智慧電網綠能即時模擬調度系統

指導教師：謝孟翔 老師

學生：陳可祐

組員：翁昱傑、許祐恩

1、 主題說明：

當每一度電都貼上隱形的「環境標價」時，我們的能源決策會發生什麼改變？本專題源於長達一整年的「專題研究」課程，我們「智慧電網綠能即時調度系統」三位組員（陳可祐、翁昱傑、許祐恩）觀察到台灣在半導體算力擴張下，「供電穩定」與「環境永續」正面臨極度緊繃。台積電（TSMC）為首的產業鏈使數據中心、算力機櫃用電需求以前所未有的速度衝擊台灣電網穩定性；而台灣發電結構仍高度依賴燃煤（2024 年佔比約 39.3%），其 PM2.5 排放量佔電力部門總空氣污染高達 95%，每年造成超過 6,000 人死亡（IARC 已將 PM2.5 列為第一類致癌物）。然而，傳統電網調度幾乎只考慮「供需平衡」，卻幾乎未將「環境代價」系統性地納入即時決策邏輯。

我們決定打破傳統只追求供需平衡的框架，引入歐盟 NEEDS 計畫與 ExterneE 計畫認可的「衝擊路徑法（Impact Pathway Approach, IPA）」，其核心步驟包含排放盤查、大氣擴散模擬、劑量反應函數衝擊評估、及最終的貨幣化轉換，將台電火力機組排放的 PM2.5、SOx、NOx 量化為具體的「社會外部健康損害成本」。

我們以 Node-RED 為決策大腦及運行平台，結合 MQTT 物聯網協定、Mosquitto 訊息代理伺服器、AMB82-mini（瑞昱 RTL8735B）IoT 開發板與 Arduino Uno R4 WiFi 微控制器，建構出具備 9 種壓力測試情境、五階段備轉燈號（綠→黃→橘→紅→黑）、三類分級限電保護（工業 A → 商業 C → 民生 B，民生永遠最後限電）且能將「減碳效益貨幣化」並優先執行低碳調度的智慧電網模擬系統。

在長達三百多個日子的研究淬鍊中，我們歷經了無數次的試錯與碰壁。從最初面對生澀文獻的茫然、對物聯網通訊的一竅不通，到後來在系統延遲與物理限制中掙扎，我們逐步學會如何在理想與現實進行「取捨」。我們自創「80/20 Vibe Coding」的 AI 協作法則，以 80% 的心力傾注於系統架構、調度邏輯設計、功能取捨判斷與使用者體驗設計，僅以 20% 處理工具學習、硬體整合與偵錯。我們的核心信念是：程式碼的生成可交由 AI 協助，但「系統應如何架構」「調度邏輯是否符合電網的物理現實」等判斷，屬於研究生一句電網知識判斷。這一年我學會將能源工程、IoT 與軟體架構整合

2、 目錄：

1、 學習心得與反思	P.2~4
2、 小組工作分配表	P.5~6
3、 專題成果報告	P.7~10
4、 課程筆記選錄	P.11
5、 相關照片選錄	P.12~13
6、 專題研究進度規畫表	P.14~17

經過這一次的課程，我發現表達能力大幅提升，實作面則有勇敢及創新思維，也會試著用適當的工具從抽象概念轉換為實體成果。

（修課結束後的自我覺察）

3、 學習心得與反思

【學術嚴謹】從「盲目引用」到「數據重構」：學會留意學術倫理

在高中階段，學校課程並未系統教我們如何進行嚴謹的學術引用，這使得我們在專題開發初期，僅憑對文獻字面數據的理解便直接引入公式。直到後期進行代碼校驗時，我才驚覺我們犯了「口徑」混用錯誤。

我們引用的核心文獻—廖孟儀等人（2016）發表於《臺灣能源期刊》的論文中，每噸 88,212 元的社會成本參數其實是對應 PM10；但我們在 Node-RED 決策大腦的計算鏈中，卻直接將其混用在危害性更高、粒徑不同的 PM2.5 上。此外，我還發現作品說明書存在「虛假精確」的漏洞：文獻中的排放係數僅以「~」標記、有效位數僅 2 位，我們的情境運算卻保留到小數點後第二位，嚴重違反了「約值乘精確值＝約值」的有效數字原則。

我們深刻體會，學術引用不只是「把數據填進公式」，必須釐清數據背後的定義與限制。

【工程取捨】時間壓縮與物理現實限制的拉扯

在專題設計上，我們發覺「物理現實」的重要性。真實發電機組的升載速率是極為緩慢，水力 33MW/min（最快）、燃氣 15MW/min、燃油 10MW/min、燃煤 5.5MW/min。若完全還原物理時間，評審根本無法在現場看到電網從跳機到補位回穩的動態過程。為了讓大腦的調度動作流暢呈現，我們做出了成熟的工程折衷：在 Node-RED 中設定 `compression=60`（將時間壓縮 60 倍）。但我們深知這犧牲了真實熱機過程等物理約束，因此在報告的研究限制中誠實揭露此點。

【最大突破】上台談吐和發表能力—現今不可或缺的能力

這次專題除了讓探究問題與運用 AI 實作的能力變強之外，也意外訓練了完整的表達能力。老師規定每兩週上台報告一次，用意是讓我們從別組發表的破綻中檢視自己是否有同樣的問題，同時藉由高一以來持續向外講解所學的訓練，逐漸練出台風，並

把討論內容內化成自己真正理解的東西。因為經常要面對科展、校內成果展等發表場合,我學到如何清楚鋪陳故事線與架構,讓聽者能掌握重點;也學會「拆解問題」,先判斷對方問的是未來發展、實作本體還是底層邏輯,再用對應的思考模式精準回答,這種進退應對的能力,讓我能把內化很久的東西侃侃而談,就像在旺宏半導體公司裡聽到的一樣:唯有先內化過,才有辦法把東西講出來。整理下來,這次專題讓我學到上台不再緊張、能自信地表達自己內化過的成果,以及深刻體會到表達能力如何幫助自己與他人建立連結。

【團隊合作的重要性】從「單兵」到「合作」:學會信任

專題初期,我很習慣把每個環節都攬在自己身上覆核一遍,畢竟「決策大腦」邏輯正不正確,直接決定整個系統的生死。但我很快發現,一人根本無法同時兼顧 Node-RED 運算邏輯、MQTT 通訊協定,又要處理 6 組麵包板電路與數十個外部 API。翁昱傑在硬體上展現出令我望塵莫及的耐心與手感,面對 AMB82-mini 複雜的 GPIO 接線與反覆燒毀的 LED,他總能靠著逐一排查線路,最終讓「大腦→MQTT→AMB82-mini→LED」的訊號鏈完整跑通;許祐恩則在資料的細膩度上補足了我最大的弱點,他將中外文獻整理得井井有條。我從他們身上學到:真正的系統整合,不是一個人把所有事情做對,而是學會把最關鍵的判斷放手交給值得信任的隊友。

我們也並非總是意見一致。在 20260209 那場長達一小時的會議中,針對「研究方向及內容等問題吵得轟轟烈烈,加上課業壓力」,一度僵持不下。我們回到最基本核心「這個專題到底想證明什麼?」。

【勇於改變研究方向並聚焦】從「配電算電價」到「著重發電端」

在專題初期,我們將目光放在用戶端的「配電雙向溝通及用電分配(電價亦為智慧電網範疇)」,但在多次討論並被老師質疑「再生能源隨時在波動,你根本無法控制發電端,雙向溝通是死路(不好呈現)」後,我提議大膽推翻以前的做法,將專題聚焦於發電端的「即時調度」。這個關鍵轉折點發生在我們主動召開的 20260209 討論會上,我們做出了三個最重要的決策:

- (1) 確立「決策大腦」為核心定位
- (2) 將台電「以火力為基礎、再生為輔」的傳統邏輯翻轉
- (3) 確立「決策透明化」為最大差異化亮點。

正如老師在那場討論中的提點:「你們做的不是一般的模擬,你們是在設計未來能源的作業系統。」在老師 PR1 發表筆記中,老師給了我們的評語是「表達能力很好、想法很有前瞻性」,同時也提醒我們「觀念很大,要拆解!」這句話成為我們後續將宏大的電網概念拆解為六種機組、三類用戶、9 種情境、五階段燈號的具體

實作依據。

當我們最終在第六屆專題成果展上按下「算力機櫃啟動」按鈕，看著代表電廠的實體 LED 燈號在 1 秒內切換為升載閃爍、實體風扇隨風力發電啟動而轉動，且 Node-RED 儀表板上同步顯示出社會外部成本暴增的即時數據時，那種跨學科整合的成就感無與倫比。這次研究讓我深信，科技必須為社會永續服務，而這份使命感奠定了我未來想深入大學【**電機工程／資訊工程／能源工程**】學系的志願。我期許自己未來能成為一名智慧電網的架構師，推動「電網」的民主化，為台灣的能源轉型設計出更安全、更環保的決策大腦。

4、 小組工作分配表

	姓名	分 工
組 員 一	陳可祐	決策大腦邏輯開發：設計 Node-RED 決策核心與 1 秒（Tick）計算鏈，每次 Tick 完成 10 項子計算（供需偵測→升降載分配→汙染計算→社會成本換算→備轉燈號判定→限電決策→用戶狀態更新→硬體指令發送→調度日誌寫入→Google Sheets 記錄）並驗證邏輯正確性 物聯網通訊架構：以 MQTT 協定與 Mosquitto 伺服器搭建電廠與大腦的雙向通訊鏈，解決 HTTP 易遺失封包的問題，路徑：「大腦→MQTT→AMB82-mini→LED」 - Email 即時預警模組開發（保留未採用）：串接免費 SMTP 服務，設計「決策透明化」預警郵件，備轉容量跌破橘燈/紅燈時自動發送含缺口規模與補位策略的通知信 設計歷史數據庫建置：Google Sheets 雲端 API 串接與數據記錄模組開發（每秒自動記錄 40+ 個數據點的完整系統快照） 設計外部數據面板串接：中央氣象署即時氣象/地震預警 API、颱風路徑預測 API、水利署 15 座水庫水情 API 解析 - 設計 Arduino Uno R4 WiFi 用戶端實體電路接線與微控制程式並與 A I 協作撰寫（三塊 Arduino 分別為工業/商業/民生三類用戶） 設計 AMB82-mini 控制板 GPIO 驅動與實體 LED 狀態燈電路搭建（6 組麵包板代表 6 間電廠，紅/綠 LED 指示升降載） - 構想實體按鈕（微動開關，模擬「算力機櫃啟動」用電大增事件） - 實體電路圖（Tinkercad）佈線邏輯規劃與硬體聯網除錯 - 調度邏輯規劃與 9 種極端情境設計
組 員 二	翁昱傑	- 協助程式碼偵錯 - 環境成本量化實作：將衝擊路徑法（IPA）公式與 PM2.5 社會成本係數（120,000 元/噸）實作於大腦邏輯中，即時計算六類機組的 PM2.5、PM10、NO_x、SO_x 與 CO₂，並換算為社會外部成本。 - 校外參賽說明文書修訂

組 員 三	許祐恩	1. 國內外參考文獻搜集整理與格式校對，以及專題英文摘要翻譯撰寫 2. 電路圖繪製 3. 校外參賽說明文書修訂
-------------	-----	---

共同完成：

- 智慧電網「綠能最大化」調度邏輯規劃與 9 種極端情境定義
- 實體電路圖（Tinkercad）佈線邏輯規劃與硬體聯網除錯
- 專題成果說明書撰寫與複賽展示海報設計、答辯簡報準備
- 真實事故（大潭 2017、興達 2022、大潭 2024）數據等比例縮放模擬與對照實驗設計說明：全組共有 3 個組員：陳可祐、翁昱傑、許祐恩。

藍色框線內（分工欄）是我在本次長達一年的專題中，我聚焦系統開發範疇，主張創意思維及解決問題的能力，站在 AI 的肩膀上看得更高更遠。技術層面佔大多數（與 AI 協作），AI 扮演轉概念為實體的角色。

五、成果報告：

（一）設計：

電力不足時，大腦依據「低污染優先」的調度序位，優先調度水力（40%，零排放）、燃氣（35%，PM2.5 僅為燃煤的 3.75%），僅將 25% 分配給高碳排放機組（燃煤 15% + 燃油 10%）。實驗初始狀態（每次測試前按下「系統重置」按鈕）：燃煤 2,300MW、燃氣 3,200MW、燃油 0MW、太陽能 1,200MW、風力 800MW、水力 1,000MW，總負載 8,500MW。初始 PM2.5 = 193.60 kg/h，社會外部成本 = 169,762 NTD/h。

表 1：三大情境系統反應與汙染值數據（升載完成後穩態值）

情境	電網衝擊	PM2.5 (kg/h)	CO ₂ (ton/h)	社會成本 (NTD/h)	成本變化
初始（基準）	無	193.60	3,625.0	169,762	—
烏雲遮蔽	太陽能 1,200→約 25 MW（隨機 0~49MW，10 秒後恢復）	220.71	4,077.4	198,503	+16.9%
燃煤跳機	燃煤 -550 MW（瞬間跳脫）	162.32	3,314.9	150,427	-11.4%
算力用電大增	用戶 C 負載 +2,000 MW（模擬算力機櫃啟動）	239.70	4,395.0	218,612	+28.8%

表 2：燃煤跳機瞬間（T+0）與補位完成（穩態）的數據對比

項目	跳機前（初始）	跳機瞬間 (T+0)	變化 (%)	補位完成（穩態）
燃煤出力 (MW)	2,300	1,750	-23.9%	1,833
PM2.5 (kg/h)	193.60	149.60	-22.7%	162.32（比初始低 16.2%）
社會成本 (NTD/h)	169,762	136,958	-19.3%	150,427

實驗發現與科學論證：

- 低碳調度效益：以 1,000MW 缺口為例，大腦優先調度水力與燃氣，使社會外部成本降至傳統全燃煤方案的 41%，每小時節省 35,219 元的健康損害；以本系統規模推估，

低碳調度年可避免社會損害**超過 1.37 億元**。

2. **反直覺發現**：燃煤跳機瞬間，PM2.5 立即下降 22.7%，系統中 **95% 的 PM2.5 來自燃煤**。補位完成後雖回升至 162.32 kg/h，但仍比初始值**低 16.2%**，因為補位主力為水力與燃氣。證明：在高燃煤依賴的電網中，減少燃煤不僅不會造成空污惡化，反而是**最直接的改善手段**。

3. **SO_x 是調度短板**：PM2.5 可減至 28.8%，但 SO_x 僅減至 59.8%，因為燃油的 SO_x 排放係數是燃煤的 **4.4 倍**。這指明了未來優化方向應嚴格限制燃油調度比例。

4. **社會外部成本的啟示**：「算力機櫃啟動」情境中，社會成本每小時增加 48,849 元，意味著每當有高耗能設備接入 +2,000MW 負載，社會每日需額外承擔約 **117 萬元**的隱性健康損害。

（二）以真實電網事故驗證調度邏輯

為進一步檢驗調度策略在真實情境下是否合理，我們選取近年三起重大台灣電網事故（**大潭電廠 2017 年 8 月 15 日事件、興達電廠 2022 年 3 月 3 日事件、大潭 8 號機 2024 年跳脫事件**），按比例縮放至本系統的 8,500MW 規模進行映射模擬。以大潭 2017 為例：真實事件中 6 部燃氣機組瞬間喪失約 4,200MW（佔全台負載 12%），導致 668 萬戶停電、歷時 8 小時才完全恢復。映射至本系統（燃氣 -1,020MW），大腦在 T+1 即啟動升載分配，穩態 PM2.5 僅增加 10.6%，若備轉足夠則無需限電。我們在報告中誠實標註：用於檢驗本系統在相似供電缺口下的反應，**不等於真實預測**，因為系統未納入輸電網拓撲、區域分裂、儲能等真實物理限制。

（三）誠實面對科學局限：系統之 9 大研究限制

本研究秉持嚴謹的科學誠信，不誇大系統的能力。我們列了 **9 項研究限制**，揭露本系統的邊界條件。展現科學研究中勇於**誠實面對自己做不到的事**。

表 3：本研究之 9 大研究限制與影響

編號	限制項目	具體說明	對研究結論的影響
1	排放係數固定	程式內建排放係數為固定值，未隨機組老化、負載率或季節變動	結論為「數量級正確」之模擬推估，非精確預測；未來需進行敏感度分析
2	非 AI 預測模型	本系統為 If-Else 規則引擎，不具備機器學習或負載預測能力	系統為「反應式」調度，無法像真實電網提前暖機應對「鴨子曲線」等可預測情境
3	硬體為縮尺模型	以 LED 代表發電機組、Arduino 代表負載端，非真實電力設備；無 AC 功率潮流、頻率或電壓模型	驗證的是「調度決策邏輯」而非「電力物理品質」；定位為能源調度策略模擬器
4	未量測端到端延遲	未在程式內建延遲量測功能，僅以肉眼觀察判斷為毫秒級	無法提供 MQTT 從大腦到 LED 實際亮起的精確延遲量化數據
5	時間壓縮簡化現實	設定 compression=60 使升載速率加速 60 倍	簡化了真實發電機的熱機過程與最低技術出力約束；明確定位為 Proof of Concept

6	水庫調度未自動回饋	水情規則引擎僅產出文字建議，未自動調整水力 target	水力機組升載上限不受水庫蓄水量自動限制
7	橋燈限電為全量	橋燈限電對工業用戶 A 執行完整斷電，「減供 5%」為描述性文字而非精確比例	未來版本需實作按比例減載的精細控制
8	未納入輸電網拓撲	假設所有機組直連負載，無輸電瓶頸或線路阻抗	興達 2022 事件中「南部系統分裂」的物理情境無法模擬
9	未模擬儲能系統	系統中無電池儲能（BESS）或抽蓄水力設備	無法模擬台電以儲能應對「鴨子曲線」的調度策略；未來將整合 BESS

七、專題進度規畫表

週 次	預定進度	完成情形與說明
第 4 週	選定專題研究題目及文本材料，進行大綱規畫	【準時完成】確立「智慧電網」為題。老師在 PR1 發表筆記中評語：「表達能力很好、想法很有前瞻性」，同時提醒「觀念很大，要拆解！」我們據此決定翻轉台電「火力為主、綠能為輔」的傳統邏輯，將「再生能源最大化」與「環境外部成本貨幣化」作為研究核心主軸。
第 5 週	完成【壹、前言】(研究動機、研究目的)	【超前完成】大量做功課吸收新知識，使用 Google NotebookLM 整理文獻，成功從廖孟儀等（2016）研究中提取空氣污染物之單位社會成本。
第 6 週	進行【貳、文獻探討】+【參、研究方法】 (研究方法、研究流程、研究結構)	【超前完成】研讀陳筆與王麗文（2018）中研院報告，掌握 CO ₂ 排放公式 $E = \sum (F_i \times H_i \times C_i)$ 與各燃料單位熱值，整理出完整排放係數表（燃煤、燃氣、燃油）。
第 7 週	第一次期中考	【如期應試】期中考週，利用零碎時間統整文獻筆記。
第 8 週	分組上台發表(2)	【準時完成】召開關鍵的 20260209 討論會議，做出研究方向的「大膽推翻」，從「配電雙向溝通」轉向「發電端即時調度」，決定採用 Node-RED、MQTT 協定與 Mosquitto 伺服器建置大腦。
第 9 週	完成【貳、文獻探討】+【參、研究方法】	【準時完成】完成儀表板初步環境建置與連線壓力測試。同時解決三個技術瓶頸：(1) ADMQ 因空間與 Linux 門檻過高而放棄；(2) LINE Notify 與 Telegram Bot 預警方案失敗，改用 SMTP Email；(3) 確立「階段化開發」策略。
第 10 週	【肆、研究分析與結果】	【準時完成】迎來一年中最艱難的技術陣痛期，主導與 AI 的交叉除錯，採用「計劃審核機制」，將程式碼同時交給 Claude 3.5 Sonnet、Gemini 1.5 Pro 等模型交叉偵錯，逐條人工審查確保執行方向正確。
第 11 週	【肆、研究分析與結果】+【陸、參考文獻】	【準時完成】排解 MQTT 通訊延遲與邏輯死結，並發現 PM10 與 PM2.5 的口徑混亂（致命問題），緊急修正並重構 Node-RED 大腦公式。

第 12 週	進行【肆、研究分析與結果】+【陸、參考文獻】	【準時完成】引入 PM2.5 專屬社會成本係數 120,000 元/噸，成功讓數位大腦與硬體肢體完美同步運作。
第 13 週	【伍、研究結論與建議】	【準時完成】設計對照實驗，比較「有大腦」與「無大腦」的環境成本差：低碳調度使社會成本降至全燃煤方案的 41%，每小時節省 35,219 元；並完成三起真實電網事故的比例縮放映射模擬。
第 14 週	第二次期中考	【如期應試】期中考週，同步以「模擬科展嚴格評審」的角度自我審查研究限制。
第 15 週	上台發表(3)	【準時完成】以最高科學標準誠實撰寫 9 項研究限制，主動承認系統的所有邊界條件（如非 AI 預測模型、未納入輸電網拓撲、時間壓縮 60 倍等）。
第 16 週	上台發表(4)	【準時完成】於發表中分享歷屆專題海報觀摩心得，同步微調本組海報架構與答辯重點。
第 17 週	開始製作 海報初啼 【研究計畫】+【專題海報】	【準時完成】進行上學期小收尾，開始製作海報初啼，將系統願景擴展至「電力調度中心情境意識輔助工具」等應用場域。
第 18 週	進行海報初啼【研究計畫】+【海報製作】	【準時完成】於第六屆專題成果展現場動態演示：觀眾按下「燃煤跳機」按鈕，實體 LED 瞬間切換限電燈號，「決策透明化」成為本組最具特色的亮點。
第 19 週	上台發表(5)+【課程學習成果】撰寫	【準時完成】將「金字塔式工具分層策略」與「發現 SO _x 是調度短板」等體悟寫入定稿報告書，更正所有 AI 工具版本標示，統一 PM10/PM2.5 口徑。
第 20 週	製作【課程學習成果】	【準時完成】沉澱一整年的衝擊與成長，將原本冰冷的程式碼，推廣成一個帶有社會溫度與工程哲思的調度系統

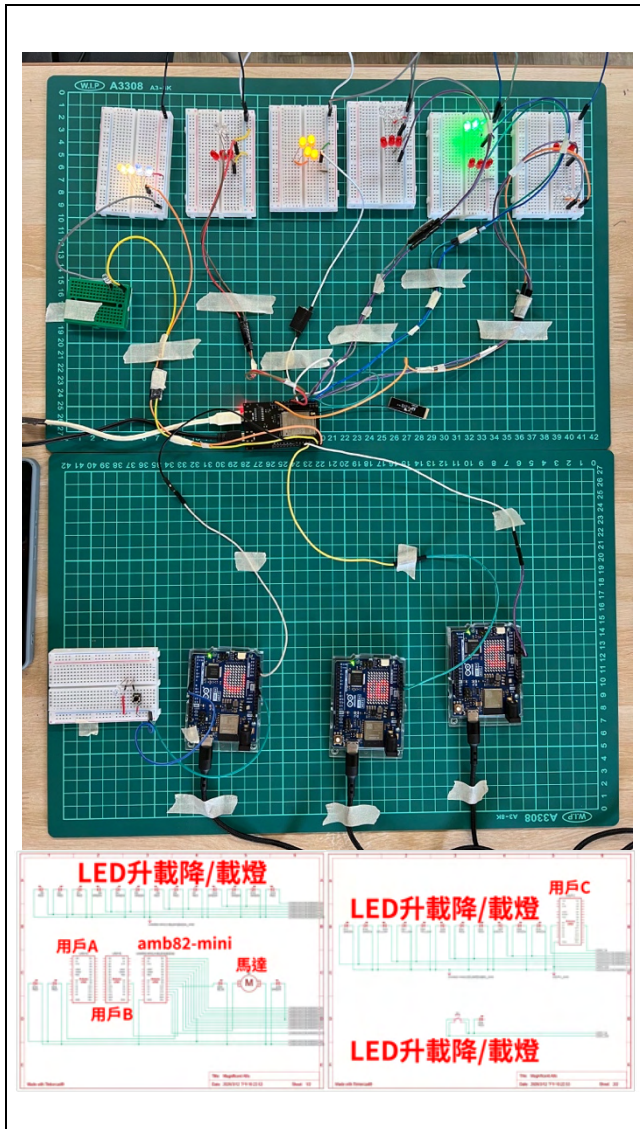
相關數位成果連結

🎬 關鍵模擬系統操作示範影片：

<https://drive.google.com/file/d/1CMefuA7PXm9qz1ZS8aIdnvfFR4dTX0SS/view?usp=sharing>



六、相關照片選錄



▲照片一說明：實體聯網電路全貌。以 6 個麵包板作為不同電廠，紅/綠 LED 代表升載 / 降載，黃燈代表正常運作。中央的 AMB82-mini 為實體決策中心，透過 MQTT 與筆電上的 Node-RED 大腦雙向通訊；3 塊 Arduino 分別模擬工業 A / 民生 B / 商業 C 用戶，其中用戶 C 設有實體按鈕可觸發「算力機櫃啟動」。

2026 三星 Solve for Tomorrow

複賽入圍證明

智慧電網

「智慧電網 - 綠能即時調度系統」

參賽組員	
高雄市立三民高級中學	翁昱傑
高雄市立三民高級中學	許祐恩
高雄市立三民高級中學	陳可祐
指導老師	
高雄市立三民高級中學	謝孟翔

台灣三星電子股份有限公司 總經理 *梁澤原*

SAMSUNG

中華民國 115 年 7 月 10 日

SolveforTomorrow Samsung ... 6月2日週二 下午12:31 ☆ ☺ ↶ ⋮

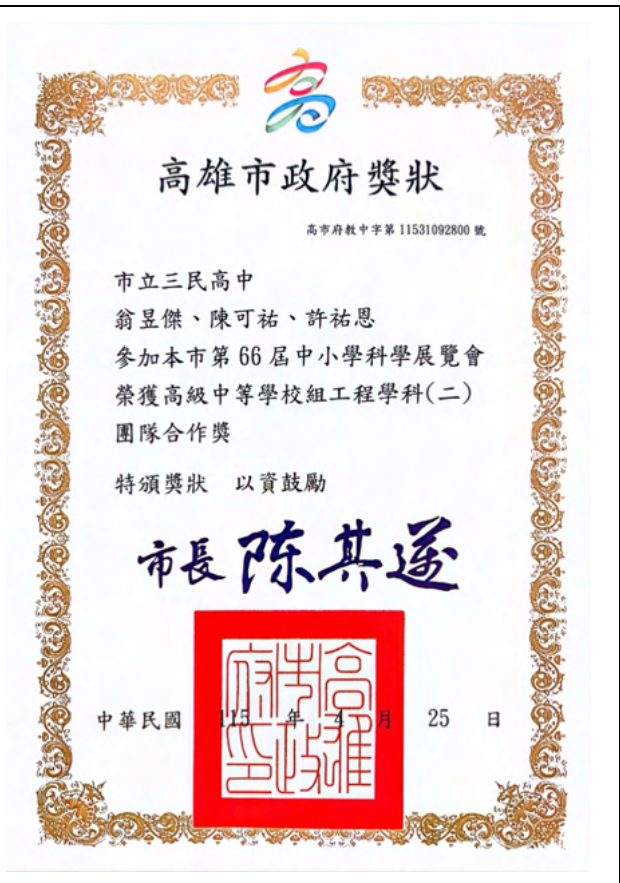
寄給 收件副本：我 ▾

致 親愛的參賽團隊：

恭喜貴團隊於眾多徵件中脫穎而出，挺進三星第七屆Solve for Tomorrow「新思維，心技術，永續星未來」創意提案競賽複賽🏆。為鼓勵學員自主學習，提升競賽所需的相關知識能力，進入複賽階段的隊伍將可獲得主辦單位精心規劃的教育資源：設計思考工作坊及業師輔導課程。台灣三星電子鼓勵您充分運用課程資源，全力衝刺下一個競賽階段！🔥

▲

照片二（上）：入圍三星創意提案競賽通知信
 照片二（下）：參加三星舉辦設計思考工作坊
 藉由參加此設計思考工作坊，讓我們了解我們的利害關係人是誰我們要用什麼方式來？發現問題解決問題用不同的思考層次不同的思考理論。



▲此為高雄市政府於 115 年 4 月 25 日頒發之官方獎狀。本團隊代表市立三民高中，以系統開發專題參與「高雄市第 66 屆中小學科學展覽會」，並於競爭激烈的高級中等學校組工程學科（二）中榮獲「團隊合作獎」。



即時狀態總覽	顯示當前系統的整體電力供需平衡狀態，用以評估電網健康度與備轉容量。
發電與負載比較圖	以折線圖與堆疊面積圖即時對比系統總負載與發電量，視覺化供需是否平衡，以及各能源出力的結構變化。
情境模擬 (互動區)	核心互動控制區。允許手動觸發突發事件，測試電網在極端衝擊下的彈性與自動調度能力。

名稱	核心功能說明	對應圖片
進階參數設定	開放後台核心參數控管，可自定義電網運作機制、用戶端負載結構及供電極限。	
調度決策歷程	系統運作日誌 (Log)，紀錄自動調度機制在面對負載變動或跳機事件時的應變決策軌跡。	

水利署水情分析

透過外部 API 串接真實水利署數據，產生智慧調度摘要與水情風險評估，作為水力發電潛能的決策依據。



污染排放與環境衝擊

全面監控火力發電所帶來的空氣污染與碳排強度，即時反應當前發電結構的環境外部成本。



實驗記錄自動連動

提供實驗歷程的自動化存檔機制。可將系統遭遇突發事件（如跳機）時的秒級數據變動，打入雲端資料庫。

