



國立中央大學
National Central University



永續與綠能科技研究學院
S A G E - GRADUATE COLLEGE OF
SUSTAINABILITY AND GREEN ENERGY



國立中央大學通訊工程學系
National Central University Department of Communication Engineering

2026.5.28 綠色數位服務發展宣傳說明會

綠色軟體開發與國際市場新契機

胡誌麟 教授

國立中央大學。資訊電機學院。通訊工程學系
永續與綠能科技研究學院（合聘教授）

綠色軟體

軟體的定義

軟體是一系列依特定順序組織的電腦資料和指令，是電腦中無法觸摸、無形的非有形部分。軟體告訴硬體（電腦實體零件）該做什麼以及如何做，例如應用程式(APP)、作業系統等。它包括電腦程式、函式庫、腳本語言以及相關文件，主要分為系統軟體（如作業系統）和應用軟體（如文書處理軟體）。

綠色軟體

綠色軟體是由幾項基本元素，包括 碳效率（能源效率和硬體效率）和 碳意識，所構建，由碳排放、用電量和硬體綜合的SCI來評測

綠色軟體

綠色軟體並非指某個特定類型的應用程式，而是一種追求低能耗、高效能與環境友善的軟體狀態。

綠色軟體

綠色軟體是指在開發、部署與運行過程中，產生的溫室氣體排放量最少的軟體。

綠色程式碼

綠色程式碼（Green Code）就是省錢的程式碼，能耗的降低通常伴隨著雲端運算費用的減少。

綠色軟體工程 (八項原則)

綠色軟體基金會 (Green Software Foundation, GSF)

碳效益 (Carbon Efficiency)

核心：消耗最少的碳排放，做最多的事。

動作：優化演算法，減少不必要的運算循環，提高程式碼執行效率。

能源效益 (Energy Efficiency)

核心：軟體運行時，消耗最少的電能。

動作：精簡背景程序，在硬體閒置時進入低功耗模式（例如：行動裝置 App 減少背景重新整理）。

碳強度 (Carbon Intensity)

核心：消耗「乾淨（低碳）」的能源，而非「髒（高碳）」的能源。

動作：碳感知 (Carbon Awareness)。軟體可以偵測目前電網的碳強度（如風力、太陽能發電佔比高低），選擇在綠電充沛的時段執行高耗能任務（如大數據分析、AI 模型訓練）。

硬體效益 (Hardware Efficiency)

核心：延伸硬體的使用壽命，或提高硬體的利用率，以降低硬體製造與報廢過程中的「隱含碳 (Embodied Carbon)」。

動作：保持軟體對舊裝置的相容性，避免迫使用戶升級硬體；在雲端環境中提高伺服器利用率（如使用容器化技術）。

能源比例 (Energy Proportionality)

核心：硬體消耗的能源應與其工作負載成正比。通常伺服器在閒置時也會消耗極高的基礎電力。

動作：將工作負載集中到少數伺服器並讓其滿載，進而將其餘伺服器關機或休眠，而非讓大量伺服器都處於低利用率狀態。

需求塑形 (Demand Shaping)

核心：當綠電不足或資源緊張時，主動調整軟體行為，將資源需求「形塑」成符合當前供應的狀態。

動作：當電網碳强度高時，自動降低視訊串流解析度，或延遲非即時性的功能。

網路效益 (Networking Efficiency)

核心：減少透過網路傳輸的資料量與距離。資料在網路中傳遞（路由器、交換機）同樣需要消耗大量能源。

動作：優化資料壓縮、善用快取 (Caching) 機制、使用邊緣運算 (Edge Computing) 減少資料往返雲端的距離。

量化與量測 (Measurement)

核心：無法量測，就無法優化。

動作：引入 SCI (Software Carbon Intensity, 軟體碳強度) 指標，量化軟體系統的碳排放表現。

I. 硬體執行平台：高效能運算轉型

❖ 技術發展方向

- ▶ 異質計算架構：廣泛採用 TPU / NPU 等專用晶片，提升特定任務能效
- ▶ ARM 伺服器興起：AWS Graviton 3 較 x86 實例提升約 60% 的每瓦效能
- ▶ 先進冷卻技術：液冷與浸沒式冷卻系統可降低 30% 以上的 PUE 值

❖ 面臨挑戰

- ▶ 隱含碳 (Embodied Carbon) 佔伺服器生命週期排放的 20-50%。如何在追求新硬體能效的同時，平衡製造端的碳排放與電子廢棄物處理是一大難題



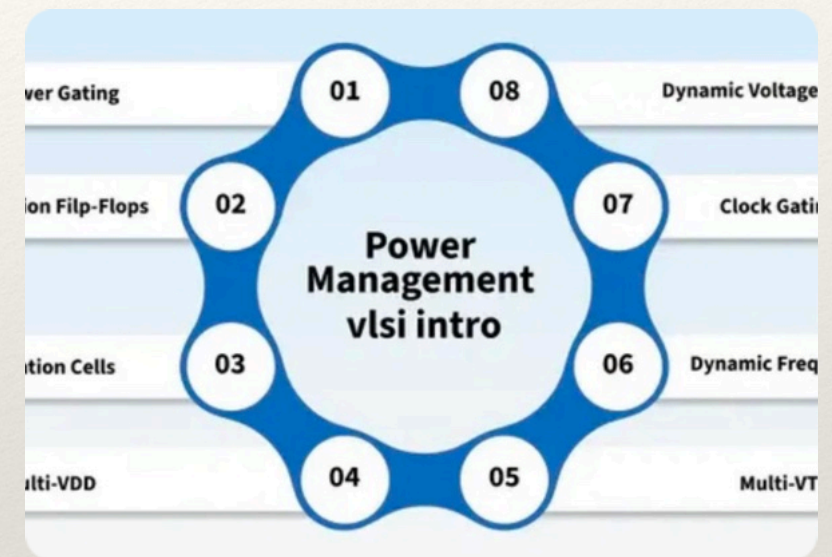
2. 軟體與作業平台：能源調度核心

❖ 關鍵技術進展

- ▶ 精細化功率控制：利用 Intel RAPL 指標實施 ms 等級的能耗監控
- ▶ eBPF 遙測：無須修改程式碼即可監控系統調用層級的精準功耗
- ▶ 綠色調度器：根據電網碳強度動態調整工作負載 (Carbon-Aware Scheduling)

❖ 面臨挑戰

- ▶ 典型伺服器閒置功耗佔峰值30-50%。
遺留系統 (Legacy Systems) 的程式碼膨脹
與頻繁的情境切換 (Context Switching)
造成大量隱形能耗支出

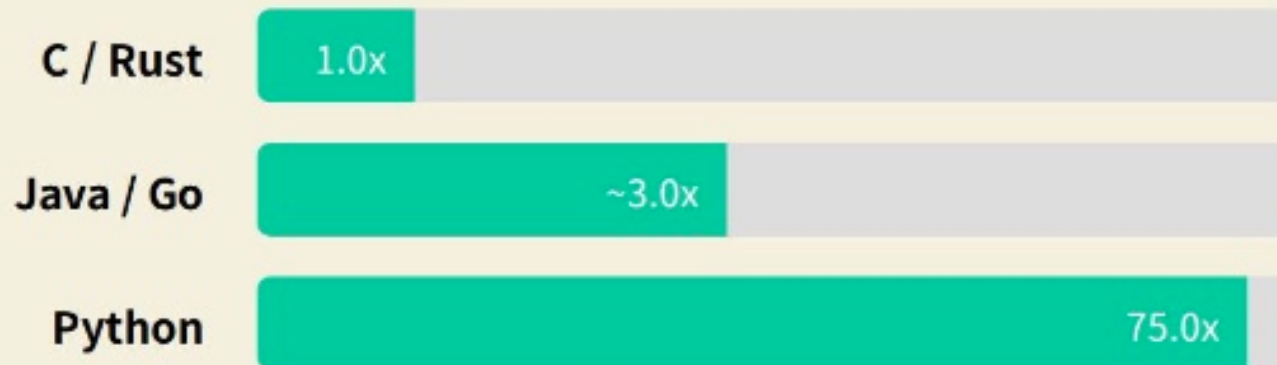


3. 應用程式開發：綠色程式碼實作

❖ 開發挑戰

- ▶ 硬體進步減輕了開發者優化程式碼的壓力，導致程式碼效率大幅下滑
- ▶ FinOps 脫節：開發者往往缺乏即時能耗數據之回饋，難以及在開發階段做出綠色決策

語言能效排名（能耗比）



數據來源：Energy Efficiency across Programming Languages 研究

4. AI 與 機器學習：模型效率之爭

❖ 賦能技術路徑

- ▶ 模型壓縮：修剪 (Pruning) 、量化 (Quantization) 與知識蒸餾 (Distillation)
- ▶ Pareto 優化：在精準度與能耗間尋找最佳平衡點，可減少約 30% 能耗，但僅損耗 < 1% 精準度
- ▶ TinyML：將運算移轉至邊緣設備，減少 90% 以上的雲端往返能耗

❖ 關鍵挑戰

- ▶ 反彈效應 (Jevons Paradox)：運算效率越高，反而促使人類開發更巨大的模型，導致總能耗不減反增

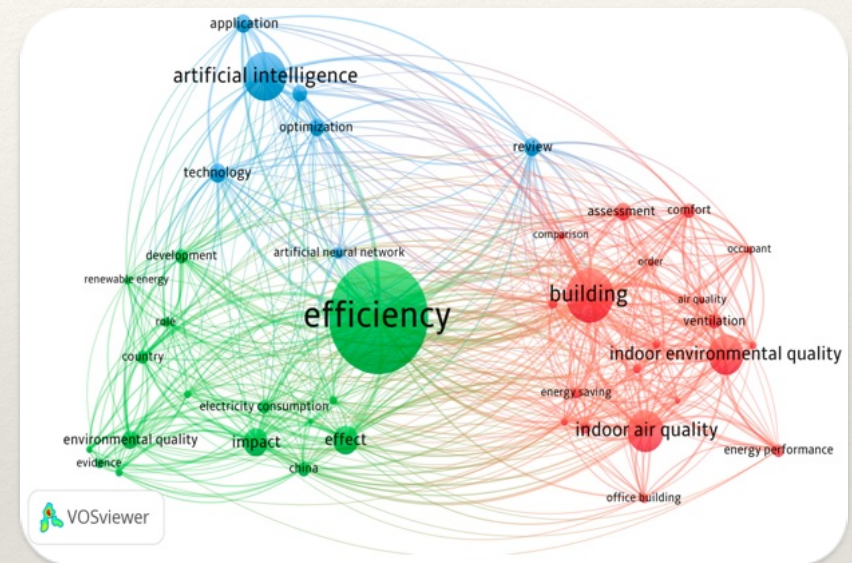


Image source: https://www.mdpi.com/sustainability/sustainability-16-03627/article_deploy/html/images/sustainability-16-03627-g004.png

綠色軟體工程的總結

維度	核心技術發展	關鍵數據	主要挑戰
硬體平台	專用加速器(NPU) / 浸沒冷卻	ARM提升60%能效比	硬體隱含碳(Embodied C)
OS系統	eBPF遙測 / 碳感知調度	閒置功耗佔30-50%	遺留程式碼能耗黑洞
軟體開發	Rust / C++ 高能效語言轉型	Python能耗為C的75倍	開發速度與能效的權衡
AI / ML	模型剪枝 / 邊緣運算 (TinyML)	優化後能耗減少30.6%	巨大參數量的需求增長

國際市場：全球合規與 ESG 剛性需求

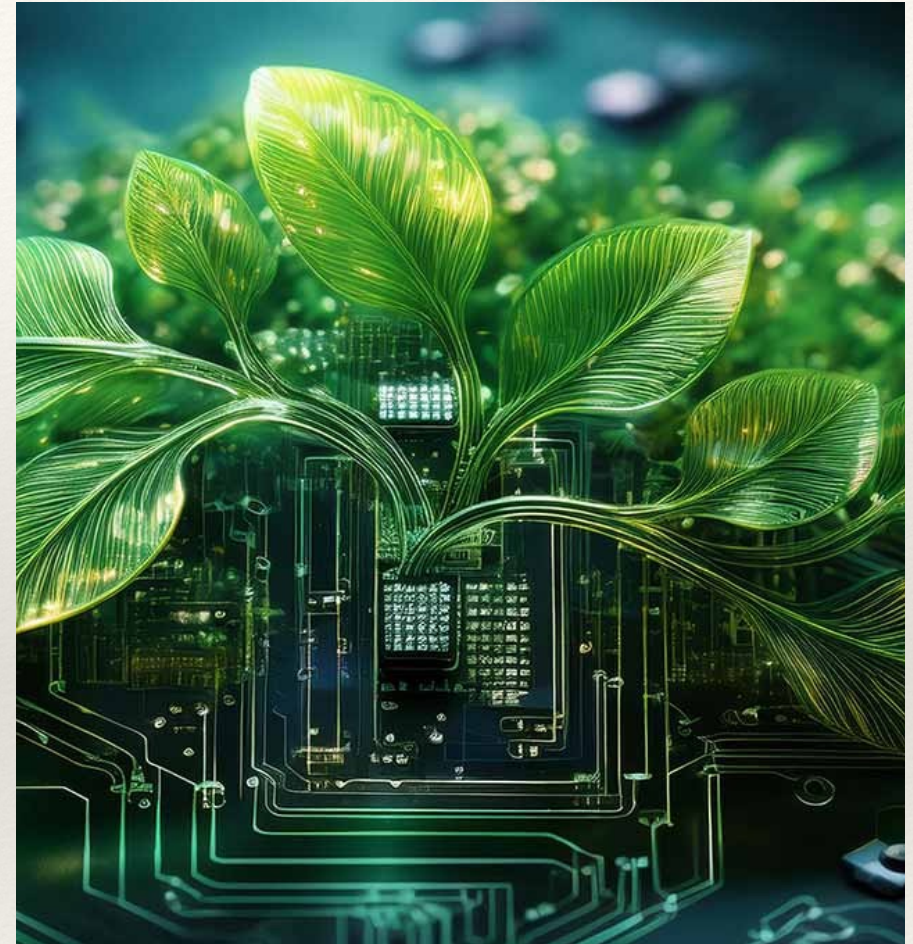
- ❖ **範疇三 (Scope 3) 碳披露**：歐盟 CSRD、美國 SEC 氣候新規及台灣金管會規章，強制要求企業盤查供應鏈與數位資產的隱形碳排放，讓「軟體碳盤查」軟體成為剛需。
- ❖ **數位產品護照 (Digital Product Passport, DPP) 的興起**：軟體供應鏈的每一層（包含相依套件與雲端託管）都需要像物理硬體一樣進行碳強度標記與審計，驅動綠色軟體檢驗市場。
- ❖ **綠色採購標準**：國際大型企業（如 Microsoft、Google）已將「供應商軟體能效」列入招標門檻，未實行綠色軟體工程的科技業者將面臨被國際鏈除名的風險。

綠色 AI 與演算法優化

❖ 大模型時代的「綠色演算法」溢價

- ▶ 隨著 LLM 推理與訓練成本佔企業 IT 預算比重暴增（AI 運算電力年增 25%），高效能 AI 演算法已從環保議題轉變為極具商業價值的硬技術市場
- ▶ 模型量化、結構剪枝與 TinyML 邊緣推理技術的軟體服務商，能協助企業在不犧牲模型精準度的前提下，直接削減 30% 至 70% 的雲端 AI 算力支出

❖ 綠色 AI 優化（Green AI Tuning）將成為極具爆發力的 B2B 科技市場

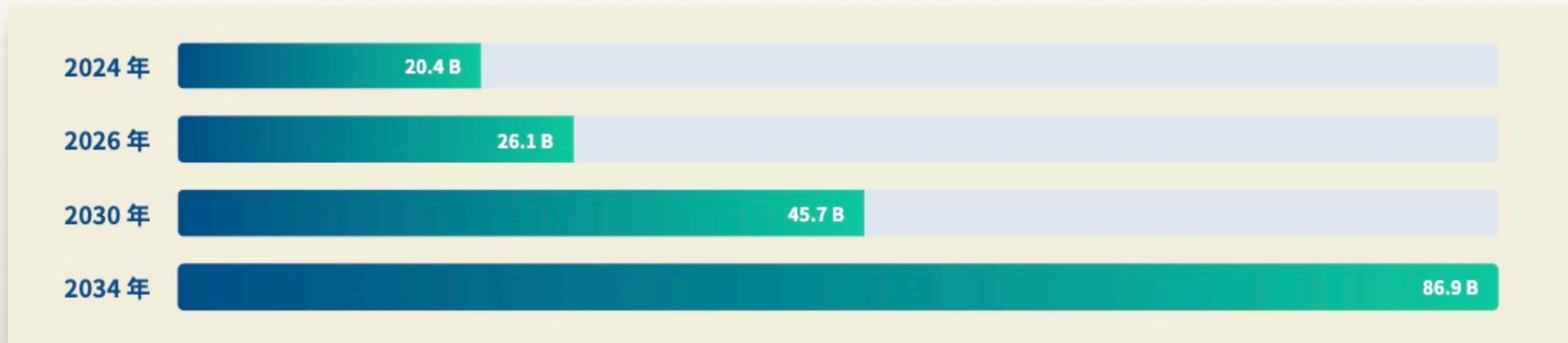


雲端架構：GreenOps 與雲端優化市場

❖ GreenOps 與 FinOps 合流

- ▶ **碳排與帳單雙重優化**：企業在將 IT 基礎架構遷移至雲端後，面臨巨額的帳單與碳足跡壓力。GreenOps 技術能在「降本」與「減碳」間找到完美平衡。
- ▶ **動態碳調度軟體市場**：能感測各國電網即時碳強度，並自動將無時效性任務（如批次處理、數據備份）空間轉移或時間轉移至綠電充沛區域的智慧中介軟體需求激增。
- ▶ **eBPF 實時能耗監控**：精準到「Pod / Container / Function」層級的能耗度量與歸因軟體，是未來企業進行微服務優化的基礎工具基礎設施。

市場規模：全球綠色 IT 服務趨勢預測



市場量化洞察

全球綠色 IT 與軟體服務市場規模預計到 2034 年將爆發式增長至 869.1 億美元，複合年增長率 (CAGR) 高達 16.23%。其中「綠色軟體及優化平台」預計將主導該市場，佔據整體技術產值份額的 63% 以上。

亞太地區更因其強大的半導體、資通訊軟硬體整合基礎，成為增長速度最快的核心戰略樞紐。

Q & A

謝謝您的聆聽