

水稻貨櫃化栽培可行嗎？封閉式控制環境下的光能需求、空間產能與電力成本下限之技術經濟評估

Can Rice Be Grown Economically in a Shipping Container? A Techno-Economic Assessment of Light Demand, Spatial Productivity, and the Electricity-Cost Floor in a Closed Controlled Environment

周秉漢 / CHOU, BING-HAN

ORCID : 0009-0000-7018-5096 | handson0102@hotmail.com

2026-07-15 | 公開工作論文；未經外部同儕審查

DOI : 10.5281/zenodo.21367053 | 授權：CC BY 4.0

研究結論摘要

技術上可栽培，不代表適合生產一般商品米。基準情境估算為 509.7 kWh/kg 稻穀；以每度電 5 元計，只含電力的成本下限約 2,549 元/kg。較合理用途為育種加速、種原與控制環境研究。

這是情境模型，不是實體貨櫃試驗，也不是投資或設備採購建議。

摘要

水稻能否在改裝貨櫃內完成生育，與此系統能否成為可負擔的商品米生產方式，是兩個不同問題。本文以四十呎高櫃的內部尺度為空間邊界，結合近期水稻植物工廠、垂直水耕、貨櫃農場能源與園藝照明文獻，建立可重現的技術經濟篩選模型。模型以兩層、總冠層面積四十平方公尺為共同假設，設定低負荷邊界、基準及高負荷邊界三種情境，估算光合作用光子通量密度（PPFD）、光週期、LED 光子效率、批次天數、設施附加負荷與稻穀產量共同決定的每批用電、年產量及每公斤電力成本下限。

結果顯示，在一組刻意偏向有利的低負荷邊界中，模型仍得到每公斤稻穀約 94.5 kWh 的設施用電；基準情境為 509.7 kWh/kg，高負荷邊界為 2,660.0 kWh/kg。以每度電新臺幣 3、5、7 元進行情境換算，基準情境的電力成本下限約為每公斤 1,529、2,549、3,568 元，且尚未納入貨櫃改裝、燈具、空調、除濕、營養液、人工、融資、碾米、包裝、耗損與物流。三種情境的理論年產量約為每櫃 188、93 與 50 公斤。數值不是實地試驗結果，而是用於判斷量級的工程篩選。

本文據此判斷：水稻貨櫃化栽培在生物學與工程上具有可行先例，但若目標是與露天稻作競爭一般商品米，人工光與環控所造成的能源成本極可能構成結構性障礙。較合理的近期用途是育種世代加速、種原保存、精準環境試驗、教育展示，以及極端環境或太空生命支持研究。正式投資前應先進行單層小面積試驗，實測冠層 PPFD 均勻度、空調與除濕負荷、完整成熟率、每平方公尺稻穀產量、耗水、營養鹽、病害與品質，再以量測值替換本文假設。

關鍵詞：水稻、貨櫃農場、植物工廠、垂直農業、水耕、控制環境農業、技術經濟分析、電力成本、育種加速

Abstract

Biological feasibility and commercial viability are distinct questions for containerized rice cultivation. This working paper combines a literature scoping review with a reproducible engineering scenario model. A 40-foot high-cube container, two cultivation layers, and 40 m² of total canopy are used as the common spatial boundary. Three deliberately broad scenarios vary PPFD, photoperiod, crop duration, LED photon efficacy, facility-load multiplier, and grain yield. The outputs are electricity per crop, theoretical annual grain output, electricity intensity per kilogram, and an electricity-only cost floor.

The low-load boundary produces 94.5 kWh per kilogram of paddy rice, while the baseline and high-load boundaries produce 509.7 and 2,660.0 kWh/kg. At assumed electricity prices of NTD 3, 5, and 7 per kWh, the baseline electricity-only floor is approximately NTD 1,529, 2,549, and 3,568 per kilogram. These figures exclude capital equipment, labor, finance, water treatment, nutrients, milling, packaging, losses, and distribution. The modeled annual outputs are approximately 188, 93, and 50 kg per container. These are scenario results, not observations from a physical container experiment.

The study concludes that rice cultivation in a closed plant factory is technically plausible but structurally disadvantaged for commodity grain because of artificial-light and climate-control demand. Near-term use cases with a better value-to-energy match include rapid generation advancement, germplasm work, controlled experiments, education, and extreme-environment research. A measured pilot is required before any commercial claim or investment decision.

1. 研究問題與貢獻

本研究回答四個問題：第一，現有正式研究是否支持水稻在封閉式水耕與人工光環境中完成生育？第二，四十呎貨櫃可配置多少有效水稻冠層面積，垂直層數受到哪些限制？第三，在不同光強、批次週期、設備效率與產量下，每公斤稻穀需要多少電力？第四，如果一般商品米不是合理的近期市場，貨櫃化系統還有哪些較符合其優勢的用途？

本文的主要貢獻不是宣稱找到「最佳配方」，而是建立一個透明的量級篩選器。所有核心假設均列於 assumptions.csv，公式由 analyze.py 執行，輸出 scenario-results.csv、JSON、圖表與敏感度表。讀者可以用實測值替換假設，重算結果。

2. 文獻與技術背景

2.1 水稻在植物工廠中的生物學可行性

近期比較研究將三個水稻品種同步置於田間與植物工廠，植物工廠使用雙層水耕架，種植密度約 26 穴/m²。平均生育期由田間 138 天縮短為 95 天，植物工廠促進早期分蘖、根系及營養生長，但稔實率、千粒重與最終稻穀產量沒有同步顯著增加[1]。這說明環控可以改變生育節奏，卻不能直接把旺盛的營養生長等同於更高的可收穫穀粒。

另一項植物工廠快速育種研究使用雙層水耕、350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 的光子通量、動態光週期、循環 Hoagland 營養液、日夜溫約 28/21°C 與相對濕度 65% 左右；秈稻最快可在 63 天形成可供世代推進的種子，理論上可達每年五至六代[2]。然而「快速取得下一代種子」的目標與「讓完整成熟商品稻穀達到最大重量及品質」不同，63 天不能直接當成一般商品米的成熟週期。

受控環境的早期研究亦顯示，光質與光週期會影響水稻形態、氮利用、結實與收穫指數[3,10]。因此貨櫃系統不能只以「燈有多亮」設計；抽穗誘導、灌漿期光合來源、溫差、CO₂、根域溶氧與品種光週期反應都可能成為限制。

2.2 為何貨櫃比一般植物工廠更受限制

貨櫃具有模組化、可搬運、遮光與容易建立生物安全邊界等優點，但內部狹長，表面積相對體積大，燈具的電能最後多轉成熱，水稻蒸散又帶來潛熱與除濕需求。貨櫃農場研究通常聚焦葉菜；2025 年一項整合生長模型與 EnergyPlus 的研究，在萵苣貨櫃農場得到 24.6–27.7 kWh/kg 的基準特定能耗，並指出燈具效率是模型準確度的主要因素之一[5]。該數值不能移植為水稻結果，因為水稻生育期更長、植株更高、光需求與可食部分比例不同；它只證明貨櫃農場必須同時建模照明與熱濕負荷。

美國能源部的園藝照明報告以 $\mu\text{mol}/\text{J}$ 定義光合作用光子效率，列出的 2019 年最佳等級 LED 約為 3.2 $\mu\text{mol}/\text{J}$ ，並提醒產品效率依光譜、驅動電流與熱管理而變[7]。本文因此把 3.2 設為基準，以 3.5 與 2.5 作為敏感度邊界，而不把廠商標稱值視為實際冠層效率。

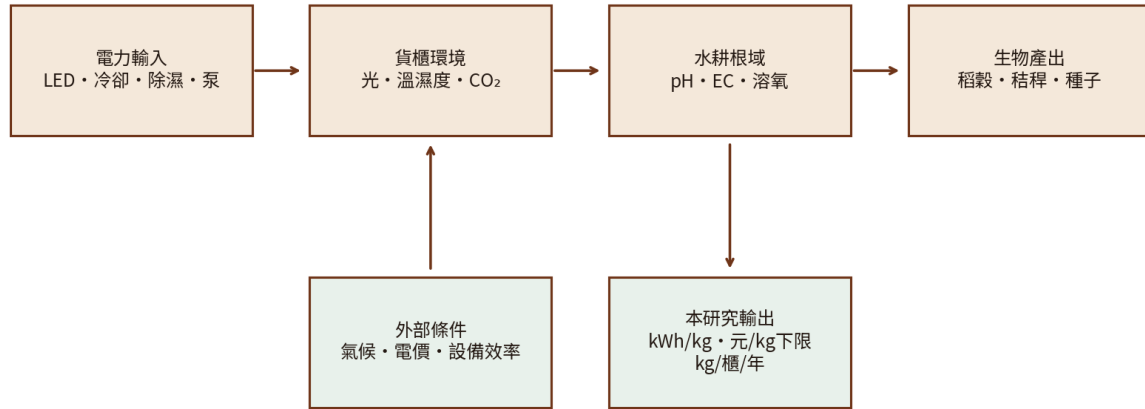
3. 方法

3.1 研究設計

研究採三段式設計：（1）範疇式文獻整理，辨識植物工廠水稻的生育週期、栽培層數、光環境與根域管理先例；（2）工程情境模型，將貨櫃幾何、冠層面積、PPFD、光週期、LED 效率與設施負荷轉換為每批電力；（3）技術經濟篩選，以不同電價計算「只含電力」的每公斤成本下限，並評估用途適配度。

本研究沒有訪談設備商、沒有取得工程報價，也沒有建造或操作貨櫃。因此不計算淨現值、內部報酬率或回收年限。沒有實測資料時硬算投資報酬，會讓精確的小數掩蓋不確定性。

圖1 水稻貨櫃化栽培之系統邊界



不包含：設備資本支出、土地、人工、融資、碾米、包裝與配送；因此成本為電力成本下限。

圖1 水稻貨櫃化栽培之系統邊界

3.2 空間邊界

本文採 CMA CGM 公開的 40 呎 High Cube PalletWide 規格作為幾何參考：內長 12.095 m、內寬 2.444 m、內高 2.692 m[8]。規格會因箱型與實際箱號而異，工程前必須量測實體貨櫃。參考規格的地板面積約 29.6 m²；扣除走道、水槽、泵、空調、除濕、配電、清洗與維修空間後，每層只配置 20 m² 有效冠層。雙層合計 40 m²。

近期植物工廠研究的成熟株高約 90.6–107.9 cm[1]。兩層配置還必須容納栽培槽深、燈具厚度、燈與冠層距離、回風通道與結構梁，因此屬緊密配置。三層成熟水稻未納入基準；除非使用矮化品種並完成抽穗空間、光均勻與維修驗證，否則不應把三層視為可直接實現的產能。

3.3 核心公式

冠層照明功率：

$$P_{\text{light}} (\text{kW}) = \text{PPFD} \times A \div \text{PPE} \div 1000$$

其中 PPFD 單位為 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，A 為總冠層面積 m²，PPE 為燈具光子效率 $\mu\text{mol}/\text{J}$ 。

每批照明用電：

$E_{light} = P_{light} \times \text{每日光照小時} \times \text{批次天數}$

每批設施用電：

$E_{facility} = E_{light} \times \text{設施倍率}$

設施倍率用於包含冷卻、除濕、水泵、送風、感測與控制，但不是經實測分項負荷。每公斤用電與電力成本下限分別為：

$SEC = E_{facility} \div (\text{冠層面積} \times \text{每平方米每批稻穀產量})$

$\text{Electricity floor} = SEC \times \text{假設電價}$

每日光積分以 $DLI = PPFD \times \text{光照小時} \times 0.0036$ 換算。模型不把 DLI 相同視為生物效果必然相同，因為水稻仍會回應瞬時光強、光譜與光週期。

3.4 情境設定

參數	低負荷邊界	基準	高負荷邊界
總冠層面積	40 m ²	40 m ²	40 m ²
PPFD	350	600	900 μmol/m ² /s
光週期	10	12	14 h/day
DLI	12.6	25.9	45.4 mol/m ² /day
批次天數	63	95	125 day
LED PPE	3.5	3.2	2.5 μmol/J
設施倍率	1.35	1.55	1.90
稻穀產量	0.90	0.65	0.45 kg/m ² /cycle

低負荷邊界刻意把有利條件組合在一起，用於估計「很難再低很多」的成本下界；它不是任何單一研究已共同觀察到的組合。63 天來自育種加速研究，而 0.90 kg/m² 是高產敏感度假設，兩者同時成立尚無證據。基準產量 0.65 kg/m² 接近臺灣 2024 年平均稻穀單位產量 6,421 kg/ha，即 0.642 kg/m²[9]；這只是量級錨點，不表示貨櫃必能達到田間平均。完整假設、狀態與理由見 assumptions.csv。

3.5 水資源的處理方式

循環水耕可回收未被植株利用的水與養分，卻不能消除蒸散。溫室水耕水稻研究在前 60 天營養生長期觀察到每栽培穴約 11.31–14.37 L 的水需求[4]。若機械式套用到 26 穴/m²、40 m²，前 60 天約為 11.8–14.9 m³；但品種、氣候、穴內株數與系統不同，因此本文不把這個換算列為貨櫃實測耗水，也不外推完整生育期。正式試驗應分開記錄補水量、排放量、清洗用水、逆滲透濃水與產品含水量。

3.6 可重現性與驗證

analyze.py 直接讀取 assumptions.csv，輸出三種情境、敏感度矩陣及五張圖。驗證包括：所有數值必須為正；電價增加時每公斤電力成本必須單調增加；三個情境的單位用電按設定由低至高排列。程式不含隨機抽樣，因此同一輸入應得到相同結果。

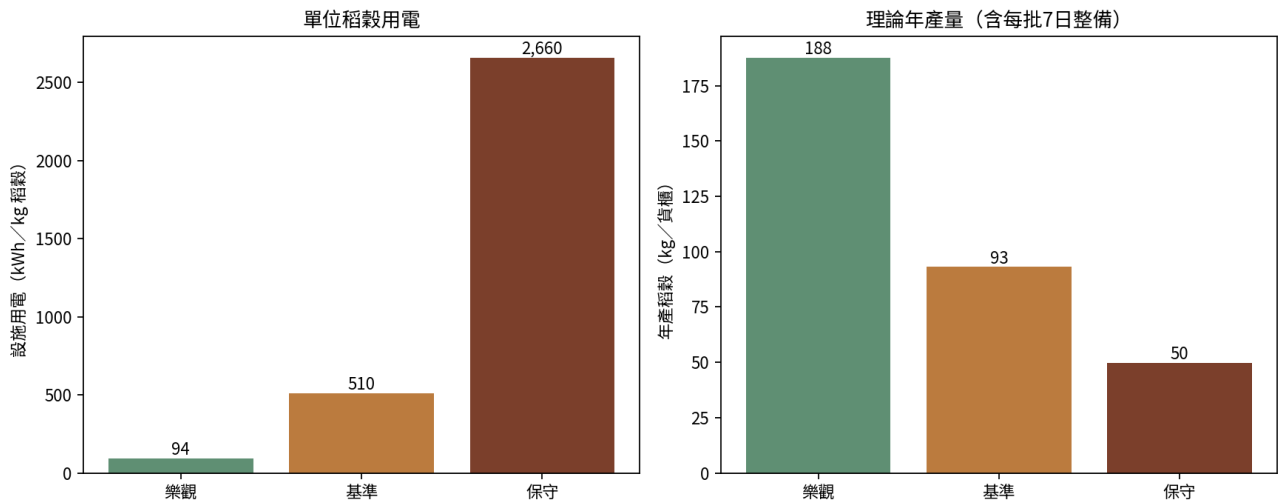
4. 結果

4.1 三種情境的用電與產能

結果	低負荷邊界	基準	高負荷邊界
照明功率	4.0 kW	7.5 kW	14.4 kW
每批照明用電	2,520 kWh	8,550 kWh	25,200 kWh
每批設施用電	3,402 kWh	13,252.5 kWh	47,880 kWh
每批稻穀	36 kg	26 kg	18 kg
單位用電	94.5 kWh/kg	509.7 kWh/kg	2,660.0 kWh/kg
每年批次（含7日整備）	5.21	3.58	2.77
理論年產量	187.7 kg	93.0 kg	49.8 kg

即使在低負荷邊界，四十平方公尺冠層每批僅假設產出 36 kg 稻穀，照明加設施附加負荷為 3,402 kWh。基準情境每批 26 kg、年產約 93 kg；長週期、高光、低設備效率與較低產量同時出現時，單位用電急遽上升。

圖2 三種工程情境的能源與產能結果



情境值並非實地貨櫃試驗結果；用途是呈現參數組合下的量級。

圖2 三種工程情境的能源與產能結果

4.2 光強與產量敏感度

固定光週期 12 小時、週期 95 天、PPE 3.2 $\mu\text{mol/J}$ 與設施倍率 1.55 時，PPFD 由 350 升至 900、產量由 1.20 降至 0.45 kg/m²，單位用電範圍約 161–1,104 kWh/kg。由公式可知，若固定負荷可忽略，增加層數與冠層面積會等比例增加光照用電與產量，不能自動降低每公斤照明能耗。多層化真正可能改善的是貨櫃外殼、控制器或部分泵送等固定成本的分攤；但它同時加劇風道、除濕、遮蔭與維修問題。

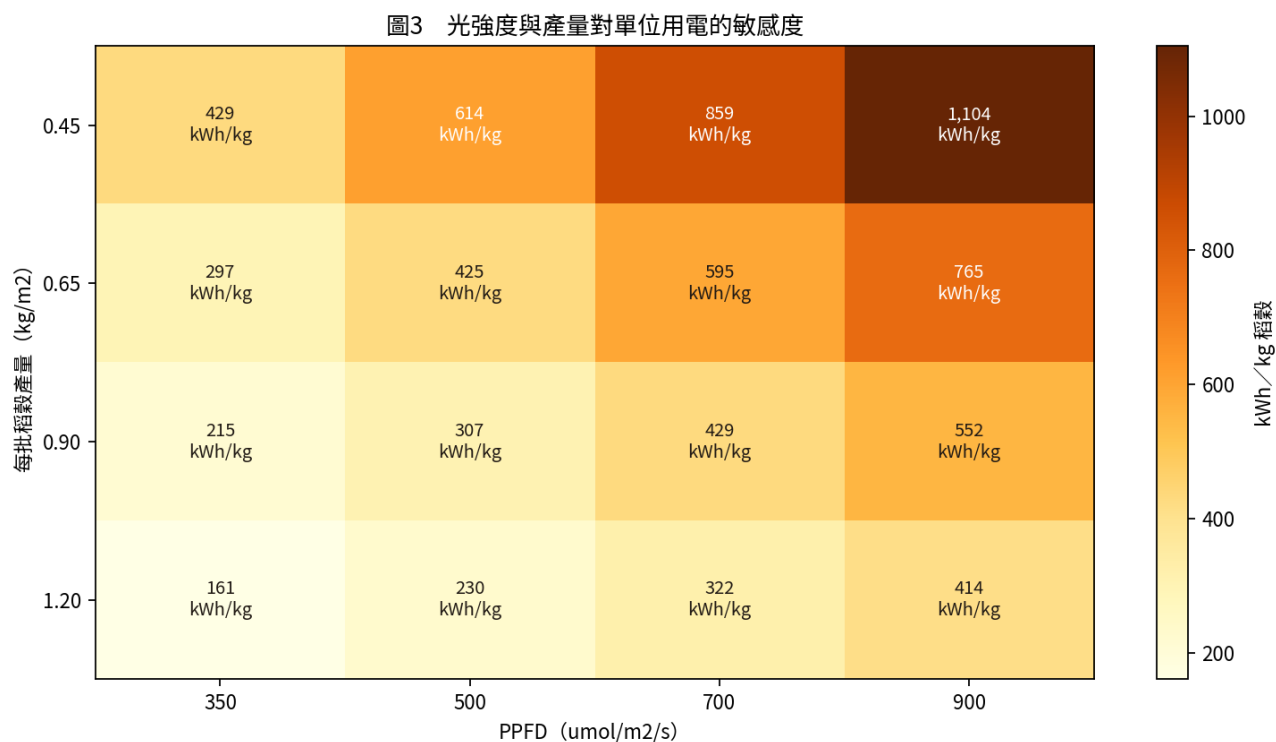


圖3 光強度與產量對單位用電的敏感度

4.3 電力成本下限

假設電價	低負荷邊界	基準	高負荷邊界
3 元/kWh	284 元/kg	1,529 元/kg	7,980 元/kg
5 元/kWh	473 元/kg	2,549 元/kg	13,300 元/kg
7 元/kWh	662 元/kg	3,568 元/kg	18,620 元/kg

這些金額不是台電正式適用電價，也不是本站報價；3、5、7 元只是敏感度刻度。實際電費還涉及契約容量、基本電費、時間電價、功率因數與季節。更重要的是，表中完全未含資本與非電力營運成本，所以只能稱為成本下限。即使採最有利組合，電力一項已顯示一般商品米市場很難吸收其成本。

圖4 電價敏感度：尚未計入設備、人工、耗材與碾米

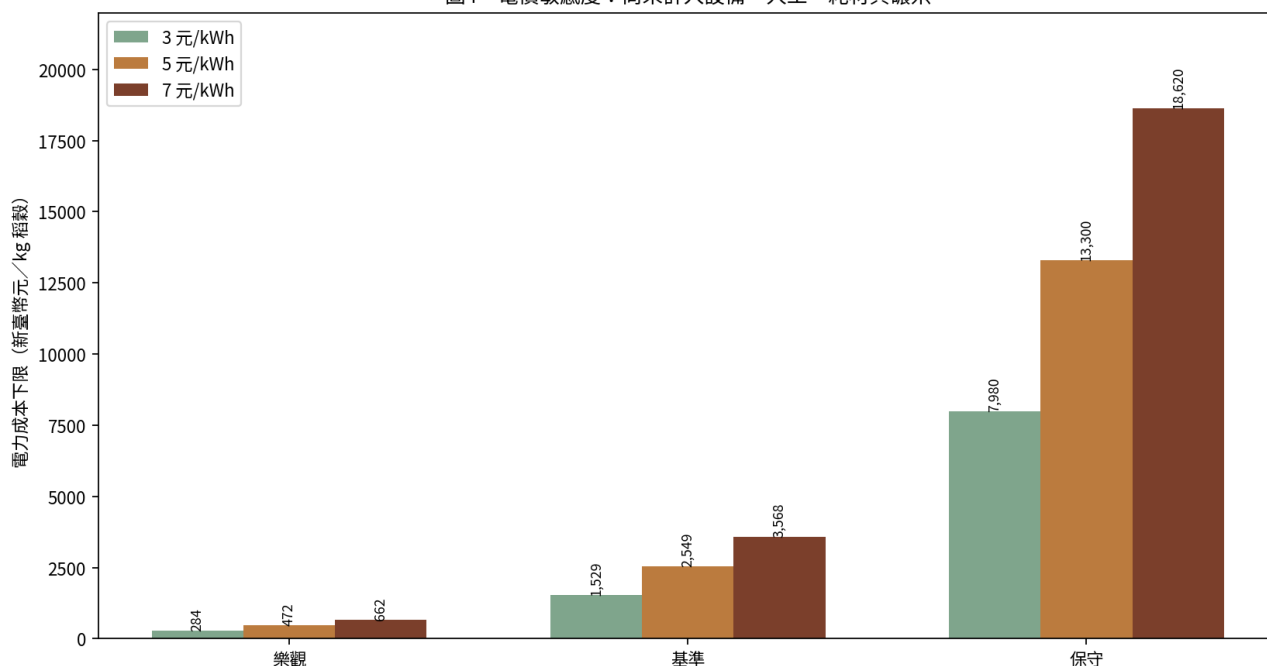


圖4 電價敏感度與每公斤電力成本下限

5. 討論

5.1 技術可行，但商品米商業模式不匹配

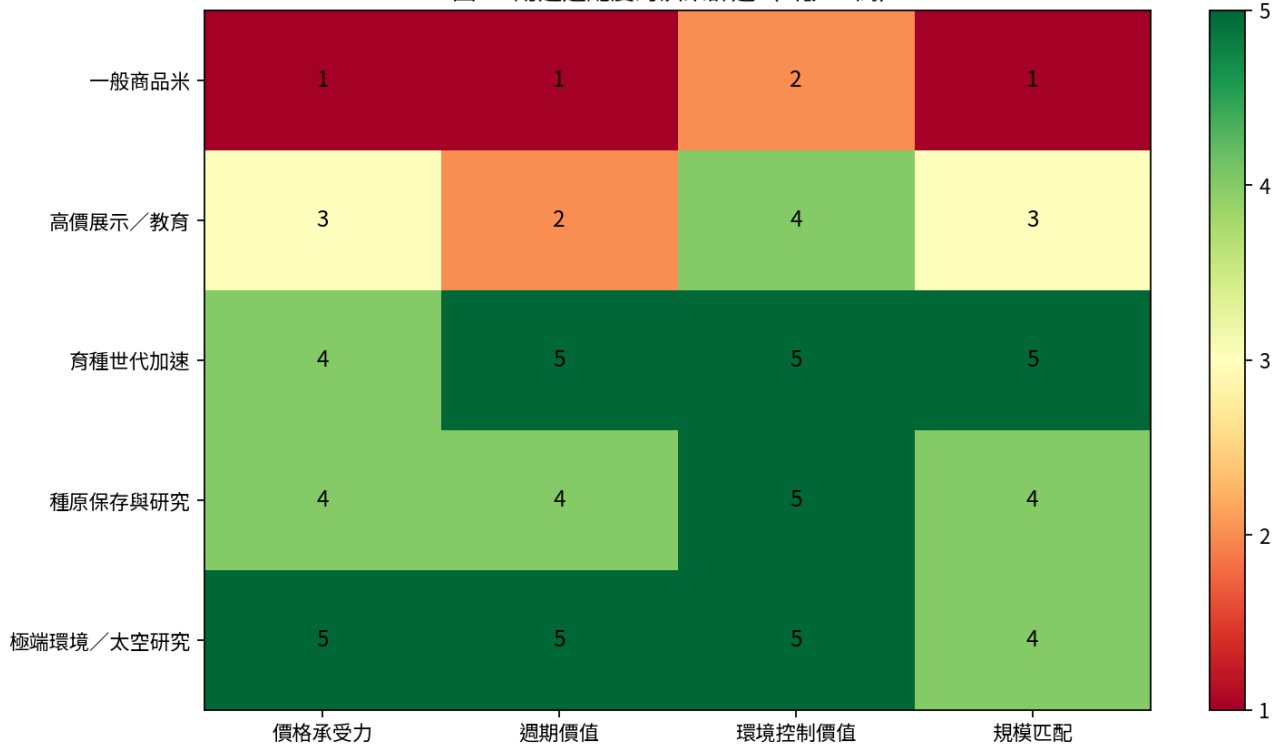
現有研究足以回答「水稻能不能在人工光水耕環境生長與結穗」：可以。但貨櫃的價值在於環境完全可控、全年可重複、隔離性高與可放置於特殊地點；一般稻田的價值則在於免費太陽光、大面積、成熟農機與既有加工物流。用高價設備與電力去複製土地密集、低單價的穀物生產，基本經濟結構不利。

近期比較研究也提醒，縮短週期與增加分蘗並不保證稻穀增產[1]。如果商品化提案只展示綠色植株或快速抽穗，卻沒有完整成熟稻穀重量、稔實率、千粒重、白米率與品質，便不足以證明商品米產能。

5.2 最值得發展的是「時間價值」而非「公斤價值」

貨櫃環控較適合每一批次具有高資訊價值或高時間價值的工作。育種世代加速的產出不是幾公斤米，而是提早數月取得下一代、在一年內多完成數個世代[2]。種原保存、逆境處理、營養液試驗、病原隔離、表型量測與教育展示，也能為每一平方公尺創造高於一般食用稻穀的價值。NASA 等機構關注受控環境作物，是因為封閉生命支持、食物、氧氣、CO₂ 循環與遠離地球的供應限制[11]，不能直接當成地面商品農業的成本證明。

圖5 用途適配度的決策篩選（1低、5高）



此矩陣是依本研究成本與技術條件形成的規範性判斷，不是問卷或市場實測結果。

圖5 用途適配度的決策篩選

5.3 建議的試驗路徑

第一階段不應直接改裝整櫃，而應用 2-4 m² 單層試驗架完成一個完整成熟週期。至少每 15 分鐘記錄燈具實際功率、冷氣、除濕、泵、風機與控制器的分項電表；以冠層網格測 PPF_D 均勻度；每日記錄補水、排水、pH、EC、溶氧、溫濕度與 CO₂；收穫時測稻穀乾重、含水率、稈實率、千粒重與白米率。

第二階段才比較單層與雙層，並以同一品種、相同種植密度及相同 DLI 進行重複試驗。若雙層造成下層濕度、病害或灌漿差異，不能只用總產量掩蓋層間不均。第三階段再把量測負荷帶入貨櫃熱濕模型，選擇空調與除濕設備並估算資本支出。只有完整成熟且具重複批次資料後，才適合談商品化。

5.4 可否搭配太陽能

太陽能可以改變電力來源與部分邊際成本，不能消除光子需求。貨櫃頂部面積有限，且發電具有日夜與季節變動；若仍要求穩定人工光與除濕，通常需要電網、儲能或更大的外部光電面積。把再生能源稱為「免費電」會忽略模組、逆變器、儲能、土地、衰退與資金成本。後續研究可把逐時發電與負荷疊合，但本稿不做未經場址驗證的零電費假設。

6. 研究限制

第一，本文沒有實體貨櫃、栽培或分項電表資料。第二，三種情境是工程邊界，不是統計信賴區間；參數間可能存在生物交互作用，不能認為各參數可獨立任意組合。第三，設施倍率是簡化假設，沒有依臺灣不同地點的逐時氣象、貨櫃隔熱、氣密、作物蒸散與設備性能曲線計算。第四，產量以稻穀重量表示，尚未扣除乾燥、去殼、碾米與篩選損失。第五，未評估蛋白質、直鏈澱粉、食味、重金屬、病原或農藥，因此不能推論食品安全或品質優劣。

第六，水需求證據只涵蓋另一個溫室水耕試驗的營養生長期，不能當成本系統的完整耗水。第七，未計入貨櫃取得與改裝、消防、結構、防鏽、電氣、冷媒、備援、感測校正、清洗、廢液與法規成本。第八，本文沒有市場調查，不能推論消費者願意為「貨櫃米」支付溢價。第九，引用的歷史可行性文章 S12 僅作背景，因出版品質不確定，未用於數值校準。

7. 結論

水稻貨櫃化栽培不是不存在，而是用途選擇決定成敗。文獻支持水稻在雙層水耕植物工廠中完成生育，並可透過環境控制加速世代；但現有實驗也顯示，較快與較旺盛的營養生長未必轉成更高稻穀產量。本文的可重現模型顯示，即使採刻意有利的低負荷邊界，人工光與環控的每公斤電力需求仍高；在基準條件下，只計電力的成本下限已遠高於一般商品米可合理承擔的量級。

因此，若目標是大量供應日常食用米，本研究不支持在沒有實測證據下直接投資整櫃量產。若目標改為育種加速、種原、精準試驗、教育或極端環境研究，貨櫃的可控性、隔離性與模組化才可能創造足以抵銷能源成本的價值。下一個可檢驗里程碑不是募資或宣傳，而是完成至少一個全成熟週期的分項量測，並把真實數據代回公開模型。

研究揭露、AI 使用與作者責任

本文未接受貨櫃農場設備商、燈具商、電力業者或稻米競爭者委託。作者目前未建造或營運水稻貨櫃農場。本文不構成設備採購、投資、農藝、食品安全、法律或交易建議，也不證明作者所經營商品或服務具有特定成效。

生成式 AI (OpenAI Codex) 協助文獻線索整理、工程公式實作、情境計算、圖表與語言起草；AI 不列為作者。周秉漢負責研究問題、來源核對、假設選擇、分析解讀、公開決策與後續更正。CRedit: 概念化、方法設計、軟體、驗證、寫作—原稿、寫作—審閱與編輯：周秉漢。

本版本以 Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) 公開發布。CC BY 4.0 僅適用於作者有權授權的原創分析、研究程式、文字編排與原創圖表；第三方名稱、商標、資料、文章、規格與其他內容仍依原權利人或來源條款使用，不因收錄於本研究而改以 CC BY 4.0 授權。DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21367053>。更正聯絡: handson0102@hotmail.com。

參考文獻

1. Yang Y, Yang J, Lu J, et al. (2026). Machine-learning-assisted comparative analysis of rice growth and yield formation in field and plant factory systems. *Frontiers in Plant Science*, 17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1875450>
2. Liu Y, Li Z-G, Cheng H, et al. (2025). Plant Factory Speed Breeding Significantly Shortens Rice Generation Time and Enhances Metabolic Diversity. *Engineering*, 50, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.09.019>
3. Yano S, Fujiwara K. (2006). Growth of rice plants under red light with or without supplemental blue light. *Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00063.x>
4. Moningka CNG, Ludong DPM, Rumambi DP. (2020). Kajian irigasi mikro pada sistem hidroponik padi (*Oryza sativa* L.) varietas Serayu dalam rumah tanaman. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 11(1). <https://doi.org/10.35791/jteta.11.1.2020.29981>
5. Zhou N, Liu D. (2025). Energy efficiency modelling and optimization for container farms in various production environments. *Energy Conversion and Management*, 346, 120471. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120471>
6. Sparks RE. (2016). Mapping and analyzing energy use and efficiency in a modified hydroponic shipping container. Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI10182217/>

7. U.S. Department of Energy. (2020). Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in Horticultural Applications. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/ssl-agriculture-jun2020.pdf>
8. CMA CGM. (2017). Containers brochure: High Cube PalletWide technical data. https://www.cma-cgm.com/static/Communication/Attachments/CMACGM_Containers_Brochure_201706.pdf
9. 農業部。 (2025) 。《113年農業統計年報：稻米》。 https://agrstat.moa.gov.tw/moasdweb/book/Book_File.ashx?chapter_id=1427_10_2
10. Volk GM, Mitchell CA. (1995). Photoperiod Shift Effects on Yield Characteristics of Rice. Crop Science, 35(6). <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500060019x>
11. NASA. Growing Plants in Space and controlled-environment crop research. <https://www.nasa.gov/exploration-research-and-technology/growing-plants-in-space/>