

白皮書：多效蒸發 (MEE) 與薄膜蒸發器 (降膜 / 升膜) 技術應用與工程實務

作者：

迦拓科技有限公司 <https://ecodewater.com>

Email: ecodewater@gmail.com

TEL: 07-2231539

日期：2025 年 11 月 29 日

目錄

1. 執行摘要
2. 緒論
3. 多效蒸發基礎理論
4. 降膜 / 升膜蒸發器詳細比較
5. 系統架構與熱整合 (MVR / TVR / 真空)
6. 產業應用案例
7. 設計與選型流程 (工程檢核表)
8. 範例計算 (含步驟)
9. 維護 / CIP / 結垢管理
10. 經濟效益與投資回收 (範例)
11. 環境 / 法規 / 安全考量
12. 結論與建議
13. 參考文獻
14. 附錄：檢核表、P&ID 範例、儀表表

1. 執行摘要

多效蒸發 (Multi-Effect Evaporation, MEE) 結合薄膜蒸發器 (主要為降膜與升膜) 能在多種產業實現高效率、低熱應力的濃縮或溶劑回收。對食品、製藥與生技等對品質敏感的行業，降膜蒸發器因為短停留時間與高傳熱效率往往為

首選；對於稀溶液或低黏度工況，升膜具有結構簡單、成本較低的優勢。導入時，必須同時評估物料特性、產能、蒸汽來源與經濟性 (CAPEX/OPEX)。

2. 緒論

說明工業濃縮需求因能源成本上升與環保法規趨嚴而成為企業優先改善項目。白皮書目的在於提供從選型、設計、到運轉與維護的一貫技術參考，協助工程師與採購做出合理判斷。

3. 多效蒸發基礎理論

- **蒸發基本量測**：蒸發量 m_{evap} (kg/h) 與蒸汽需求、潛熱 λ (kJ/kg) 直接關聯。
- **蒸汽經濟性 (Steam Economy)**：理論上： $\text{steam_economy} \approx \text{number_of_effects}$ 。實務上需考慮熱損失與熱阻，故實際經濟值低於理想值。
- **能量平衡**： $Q = m_{\text{evap}} \times \lambda$ 。若採用 MVR，則要替換為電功率估算 (壓縮機輸入功率、效率)。

4. 降膜 / 升膜蒸發器詳細比較

表格化比較 (摘要)：

- **降膜 (Falling Film)**
 - 優點：短停留時間、低熱應力、傳熱效率高、適合熱敏感物料。
 - 缺點：需良好分液器、對分液不均敏感、對高黏度可能需輔助設計。
- **升膜 (Rising Film)**
 - 優點：自然循環、結構相對簡單、成本較低 (小規模)。
 - 缺點：對高固含物 / 高黏度不友善、需要較大 ΔT 才能產生蒸汽 lift。

- **混合設計**：升膜做預濃縮 → 降膜做最終濃縮的組合，常見於需要節省投資但又要提高最終品質的流程。

5. 系統架構與熱整合 (MVR / TVR / 真空)

- **MVR (機械蒸汽再壓縮)**：使用電力驅動壓縮機把低壓蒸汽壓縮後做加熱源，能顯著降低蒸汽需求但增加電力消耗。適用電價低且連續運轉之廠。
- **TVR (熱汽回收)**：使用熱動力回收系統，較 MVR 投資低但效率也較低。
- **真空操作**：降低操作溫度，用於熱敏感物料保持品質。

6. 產業應用案例

(逐項詳述食品 / 乳製品 / 果汁 / 化工 / 製藥 / 廢水 等應用，含常見入口濃度、目標濃度與常用效數建議。)

7. 設計與選型流程 (工程檢核表)

- STEP1：物料實驗 (實驗室或 pilot plant) → 蒸發行為觀察 (結晶、起泡、分層)。
- STEP2：確定產能 (kg/h 或 t/d)。
- STEP3：選擇型式 (降膜/升膜/混合) 與效數。
- STEP4：熱整合規劃 (MVR/TVR/真空/多效)。
- STEP5：材質與表面處理、CIP 設計。
- STEP6：安全與法規評估 (VOCs、廢水排放)。

(附可下載的檢核 Excel 範本供工程使用 — 若需要，我可幫你產出。)

8. 範例計算 (含步驟) — 詳細步驟 (必須精確計算請參考工程手冊)

範例 A (濃縮與蒸汽需求)

- 條件：Feed = 10,000 kg/day · 初始濃度 5% (w/w) · 目標 35% (w/w)。
- 計算步驟 (逐位數)：
 1. 原料固形物量 = $10,000 \times 0.05 = 500.00$ kg 。
 2. 目標總質量 = $500.00 \div 0.35 = 1,428.571428571... \text{ kg}$ 。
 3. 去除水量 = $10,000 - 1,428.571428571... = 8,571.428571429 \text{ kg} \approx 8,571.43 \text{ kg/day}$ 。
- 熱量估算 (以水汽化潛熱 $\lambda = 2,257 \text{ kJ/kg}$)：
 - $Q = 8,571.428571429 \times 2,257 \approx 19,346,285 \text{ kJ/day}$ 。
- 蒸汽消耗估算：
 - 單效 (理論) $\approx 8,571.43 \text{ kg steam/day}$ 。
 - 3-效 (理論) $\approx 8,571.43 \div 3 = 2,857.14 \text{ kg steam/day}$ (不含損失)。
 - 實務上請加上效率因子 (例如 1.1 ~ 1.4) 來估算實際蒸汽消耗，具體依系統設計不同而不同。

提示：工程報價需提供更精細的熱力計算 (傳熱面積 $U \times A$ 、 ΔT 、冷凝器負荷、循環泵功率、壓縮機功率、冷凝水處理需求等)。

9. 維護 / CIP / 結垢管理

- 設計可接 CIP 的排放與回流閥路，CIP 參數 (溶液濃度、溫度、循環時間、頻率)。
- 建議使用砂濾與預處理以降低原料中懸浮固體對傳熱面的影響。
- 定期檢測傳熱效率下降 (U 值下降) 以判定清洗頻率。

10. 經濟效益與投資回收 (範例)

- 列舉 CAPEX (設備、安裝、管線、土建) 與 OPEX (蒸汽/電力/藥劑/維修)。
 - 以範例 A 計算 (以不同 steam price / electric price 做敏感度分析)，估算投資回收期 (Payback)。
-

11. 環境 / 法規 / 安全考量

- 若處理含 VOCs 或有害化學溶劑，需加裝冷凝回收與廢氣處理單元。
 - 蒸汽冷凝水若含污染物，需納入廢水處理流程或回收再利用計畫。
 - 設備屬高溫高壓 / 真空系統，需依國家壓力容器法規與電氣安全檢驗。
-

12. 結論與建議

- 依物料屬性優先決定「降膜 vs 升膜」；系統整合 (MVR/TVR) 視成本與運轉時間而定。
 - 進行 pilot 測試並量測 fouling / scaling、傳熱係數與產能是必要步驟。
 - 建議在初期規劃階段同時進行 CAPEX/OPEX 與環境合規評估。
-

13. 參考文獻

(建議列出供應商技術白皮書、工程手冊、期刊文章與國際標準。)

14. 附錄：檢核表 (摘要)

包含：物料表、P&ID 必備儀表、溫度點、壓力點、CIP 流程、預估傳熱面積初算表格、機械設計檢核。