

DryCore 模組化熱管理與氣候控制架構

v2.0 / 2026-07-29 / Neo.K（許釜崙） / 公開概念技術論文／可驗證架構提案

證據狀態：尚未完成整合原型與第三方實驗驗證；文中數值若未明確標示為文獻資料，均屬設計參數、測試條件或驗收門檻，而非既成成果

<https://thisoneisneok.com/html/papers/ccp-14.html>

SECTION

隔離式熱路徑、雙區污染控制、被動兩相循環與低品位廢熱利用

DryCore Modular Thermal and Environmental Control Architecture

Isolated Heat Paths, Dual-Zone Contamination Control, Passive Two-Phase Circulation, and Low-Grade Heat Utilization

作者：Neo.K（許釜崙）

機構：一言諾科技有限公司（EveMissLab），台灣

原始版本：2025 年 12 月

公開修訂版：v2.0，2026 年 7 月 29 日

文件性質：公開概念技術論文／可驗證架構提案

系列定位：立體運算與高功率運算模組的配套熱管理架構

證據狀態：尚未完成整合原型與第三方實驗驗證；文中數值若未明確標示為文獻資料，均屬設計參數、測試條件或驗收門檻，而非既成成果

論文授權：CC BY-SA 4.0；CAD、韌體、測試資料與其他工程資產應於實際釋出時另行指定授權

SECTION

修訂聲明

本文由《開源散熱系統 Series 7：DryCore 氣候控制架構》重構而來。原稿最重要的洞察，是把高功率運算設備視為一個需要主動管理熱、濕度、灰塵、噪音與維護風險的微型環境，而不是只在晶片上加裝一個更大的散熱器。此一系統觀具有保留價值。

然而，原稿同時把推演數據寫成「實測」、把單相虹吸誤解為可持續的無泵閉環、把高壓氣體導熱係數假設為與壓力線性成長、把負壓吸塵場宣稱為能在機殼周圍大範圍消除灰塵，並把低溫差熱電模組描述成足以讓整套散熱系統自給自足。v2.0 因此進行以下根本修正：

- 刪除所有未有原始量測紀錄支撐的實測結果，包括固定溫度、噪音、流量、發電量、六個月零故障與千瓦級負載驗證。
- 將 DryCore 從「液體永不進入機殼」的絕對宣稱，改為可設計的服務邊界：使用者可維護的接頭與循環液體留在電子艙外；穿越艙壁的熱傳輸元件可採密封熱管、均熱板、固態熱橋或經認證的冷板模組。
- 將 DustVoid 改為雙壓區污染控制：濾網側維持局部負壓，電子潔淨側維持微正壓，避免整個機殼負壓反而從縫隙吸入未過濾空氣。
- 將 GravityFlow 改為被動兩相熱虹吸：循環驅動來自蒸發段與冷凝段的密度差、壓差及重力回流，而非封閉單相水路中的靜態高度差。
- 將 ThermoHarvest 從「以 TEG 供應全部風扇」降為兩級廢熱利用：桌面級系統以感測器微能量採集為可選功能；機櫃或設施級系統優先回收溫水熱能。
- 移除 QAC 高壓氣體導熱主張。在一般連續介質區間，氣體導熱係數不會按壓力簡單線性增加；高壓氣體還引入壓力容器與安全成本。
- 將 HydroPeak 超頻壽命數字移出主論文。熱管理可以提供功率與溫度裕度，但不能單憑溫度推定固定壽命，也不能保證任意晶片達成特定頻率。
- 加入露點守護、材料相容性、壓力測試、漏液偵測、失效安全與標準化聲學量測。

因此，v2.0 不再是一組宣稱已完成的產品，而是一套可被分解、驗證、否認與逐級整合的熱管理研究計畫。

SECTION

摘要

高性能 CPU、GPU、AI 加速器、記憶體與電源模組的熱管理問題，不能只用單一「瓦數」衡量。晶片熱通量、熱源面積、封裝熱阻、冷卻介質溫度、污染累積、噪音、露點、材料相容性、液路可靠度與服務維護共同決定系統能否長時間維持性能。當運算模組走向高密度封裝、立體堆疊與模組化互連時，傳統「在熱源上堆更大的風冷器」將逐漸失去可擴展性，但液冷本身也引入接頭、腐蝕、過濾、壓力、冷凝與漏液風險。

本文提出 DryCore 模組化熱管理與氣候控制架構。其核心不是宣稱一種單一冷卻方式全面優於其他方式，而是把熱管理拆成四個可獨立驗證的支柱：第一，DryCore Thermal Spine 以隔離式熱路徑將高熱通量從電子艙導向外部可維護冷端；第二，DustVoid Dual-Zone 以髒側負壓、潔淨側微正壓及壓差監測控制顆粒污染；第三，GravityFlow Thermosyphon 以密封兩相熱虹吸提供無主循環泵的被動熱傳輸選項；第四，ThermoHarvest Interface 將廢熱利用分為微功率感測供能與設施級溫水回收，而不讓能量回收妨礙主要散熱路徑。

本文建立總熱阻、單相與兩相傳熱、濾網壓降、露點安全、熱電轉換上限與多目標控制模型；提出從加熱器試驗台、單模組原型、故障注入到整合設備艙的分階段驗證流程；並明確規定所有性能主張必須附帶環境條件、熱負載、量測位置、穩態判據、感測器不確定度與基線系統。DryCore 的可檢驗假說是：透過可服務的外部冷端、較清楚的熱與液體邊界、污染控制、被動優先熱傳輸與硬體級失效保護，可降低高功率設備的維護風險與性能衰減，並為立體運算架構提供比單一散熱器更可擴展的熱管理介面。

本文不宣稱系統已支撐任何特定超頻、已達成零噪音、零灰塵、零故障或能源自給。其價值必須由熱阻、壓降、聲學、污染、可靠度、冷凝安全及全生命週期成本實驗共同判定。

關鍵詞：液冷、熱管理、熱虹吸、直接液冷、外部冷端、污染控制、露點守護、廢熱回收、熱電採集、模組化運算、失效安全

SECTION

1.1 從晶片結溫到最終熱排放

運算設備所消耗的電能，除少部分以訊號、機械運動或其他形式離開外，最終幾乎都會轉化為熱。系統必須建立一條連續熱路徑：

```
ext晶片介面
→
ext封裝與介面材料
→
ext熱擷取元件
→
ext熱傳輸元件
→
ext外部冷端
→
ext室內或設施環境.
```

若穩態熱流率為 $\dot{Q}$ ，可用總熱阻近似界面溫度：

$$T_{\square} = T_{\text{(sink)}} + \dot{Q} R_{\text{(th,total)}},$$

其中

$$R_{\text{(th,total)}} = R_{\text{(j-c)}} + R_{\text{(TIM)}} + R_{\text{(acq)}} + R_{\text{(trans)}} + R_{\text{(reject)}}.$$

各項分別代表晶片界面至封裝表面、熱介面材料、熱擷取、熱傳輸及最終排熱的熱阻。這一表示法揭示：即使外部冷水非常低溫，只要介面材料、冷板或熱橋存在高熱阻，晶片仍可能過熱；反之，單純增大冷排也無法修正封裝內部瓶頸。

SECTION

1.2 「高瓦數」不是完整規格

相同的 400W 熱負載，若分布於 400cm^2 與 4cm^2 ，其局部熱通量差異為兩個數量級：

$$q'' = (\dot{Q}) / (A).$$

因此，DryCore 的設計輸入至少必須包括：

- 總熱負載 $\dot{Q}$ ；
- 熱源面積與熱通量分布 $q''(x)$ ；
- 可容許界面溫度與封裝表面溫度；

- 冷卻介質入口溫度與流量；
- 環境乾球溫度、相對濕度與露點；
- 姿態、振動、海拔與服務條件；
- 噪音、成本、體積與維護限制。

沒有這些條件，單獨寫「可散熱 600W」並不具工程可比性。

SECTION

1.3 空冷與液冷不是道德二分

液體具有較高的體積熱容量，能在較小流道中搬運較多熱量，因此高熱密度設備正逐步採用直接液冷。

ASHRAE 對資料中心液冷的分析也指出，隨著處理器功率上升與所需熱阻下降，液冷的重要性持續增加；但液冷同時需要水質隔離、溫度控制、壓力管理、過濾、漏液偵測與設施協調。[1][2]

因此本文不採取「空冷必然落後、液冷必然先進」的敘事，而是按熱負載與風險選擇：

- 中低熱密度元件可繼續使用空冷；
- 高熱通量 CPU/GPU 可採直接冷板或兩相熱傳輸；
- 記憶體、VRM、SSD 與 I/O 仍可能需要受控風流或次級冷板；
- 外部熱排放可採風冷冷排、冷卻水、冷水機、乾式冷卻器或設施水系統。

DryCore 的目的，是定義這些層級如何接合，而不是強迫所有設備使用同一介質。

SECTION

1.4 本文不主張的事項

本文不主張：

- 一個外掛冷端必然比所有 AIO 或客製液冷溫度更低；
- 液體與電路只要物理隔離就能消除全部漏液風險；
- 負壓能在機殼周圍形成可量產的「吸塵氣場」；

- 單相封閉水路能單靠靜態高度差永久循環；
- 熱虹吸在任何方向、任何負載與任何填充率下都能正常啟動；
- 熱電模組可在一般桌面溫差下穩定供應所有風扇；
- 密閉機殼不需要把熱量排向外部環境；
- 較低溫度必然等於固定年限的壽命提升；
- 所有冷卻液、金屬、密封件與添加劑都能長期相容。

SECTION

2.1 四個可分離的工程支柱

DryCore v2.0 將原始四件套重構如下：

支柱 核心問題 v2.0 工程定義 主要驗證量

DryCore Thermal Spine 如何把高熱通量安全導出電子艙 密封熱擷取、艙壁熱橋、外部可服務冷端 總熱阻、熱擴散均勻度、接觸可靠度

DustVoid Dual-Zone 如何降低污染與維護衰減 髒側負壓、潔淨側微正壓、過濾與壓差監測 顆粒數、灰塵質量、濾網壓降、風量

GravityFlow Thermosyphon 如何降低主循環泵依賴 密封兩相蒸發—冷凝循環，必要時輔助啟動 啟動時間、熱阻、乾涸極限、姿態敏感度

ThermoHarvest Interface 廢熱如何被合理利用 微功率感測採集與溫水熱回收介面 淨電功率、附加熱阻、可用熱品位、經濟性

四支柱可以分開實作。任何一個模組未成熟，都不應阻止其他模組接受獨立驗證。

SECTION

2.2 六層熱管理堆疊

系統可分為六層：

- L0：晶片與封裝層——介面、IHS、裸晶、HBM、VRM 與局部熱點；

- L1：熱擷取層——冷板、均熱板、熱管蒸發器、導熱介面與機械夾持；
- L2：熱傳輸層——單相液路、兩相熱虹吸、熱管、固態熱橋或液冷歧管；
- L3：外部冷端層——冷排、風扇、乾式冷卻器、冷水機、CDU 或設施水；
- L4：環境控制層——潔淨氣流、濕度、露點、噪音與機殼內循環；
- L5：監測安全層——溫度、壓力、流量、液位、漏液、壓差、硬體互鎖與紀錄。

此分層避免把「冷板很強」誤當成整機已被解決。若 L3 無法排熱、L4 發生結露或 L5 感測失效，L1 的高性能沒有意義。

SECTION

2.3 三種產品邊界

DryCore 可形成三種不同實作，而不是一個固定機殼：

2.3.1 桌面工作站型

- 高熱源使用密封熱管或冷板；
- 外部冷排或小型冷卻模組可在斷電後快速維護；
- 機殼內保留低速潔淨氣流，服務記憶體、VRM 與儲存裝置；
- 以露點保護與漏液感測為最低安全條件。

2.3.2 模組化運算節點型

- 多個運算模組共用外部冷卻匯流排；
- 每個模組有可隔離閥、流量與溫度遙測；
- 冷卻分配單元負責水質、壓力、熱交換與備援；
- 熱支柱與資料／電源接口共同成為模組規格。

2.3.3 機櫃／設施型

- 直接液冷捕捉主要熱量；
- 溫水回水可供設施端回收；
- 空氣只處理未被液路捕捉的殘餘熱；
- 必須符合設施水質、壓力、排水、維護與建築管理系統要求。

SECTION

3.1 核心定義

DryCore Thermal Spine 不再宣稱「所有液體都不在機殼內」，而是區分兩種邊界：

- 使用者可維護液體邊界：快拆接頭、軟管、儲液槽、泵、冷排與冷水機留在電子艙外；
- 密封熱傳輸邊界：艙內可存在工廠密封的熱管、均熱板、焊接冷板或其他無日常接頭的元件。

其目標是降低在主機板上方拆裝液管與接頭的需求，而不是宣稱密封元件永不失效。

SECTION

3.2 四段熱路徑

建議結構為：

ext晶片

→

ext熱擷取頭

→

ext艙壁熱脊

→

ext外部 ColdDock

→

ext最終熱排放.

3.2.1 熱擷取頭

可採：

- 單相微流道冷板；
- 均熱板或蒸氣室；
- 兩相蒸發器；
- 高導熱金屬底板配合可控夾持力。

選型必須依熱通量、壓降、材料相容性與可製造性，而非只追求最細微流道。微流道縮小通常能提高換熱面積，但也會提高壓降、堵塞敏感度與製造成本。ASHRAE 的水冷伺服器指南亦指出，冷板鰭片間距、壓降、熱阻與過濾能力之間存在直接權衡。[2]

3.2.2 艙壁熱脊

艙壁熱脊可採：

- 扁平熱管；
- 毛細芯均熱板；
- 銅／石墨複合熱橋；
- 工廠焊接的液體通道；
- 兩相熱虹吸蒸發器與蒸氣管。

此段的關鍵是穿越機殼邊界時仍維持低熱阻、可固定、可承受振動，並避免讓服務接頭直接位於電子元件上方。

3.2.3 外部 ColdDock

ColdDock 是外部熱交換與維護模組。可包含：

- 風冷冷排；
- 液對液熱交換器；

- 乾式冷卻器；
- 冷水機；
- CDU；
- 溫水回收接口。

v2.0 不預設 ColdDock 可帶載熱插拔。除非快拆接頭、旁路、壓力隔離、滴液控制與韌體流程已通過驗證，預設服務程序應是：降載、停止運算、隔離液路、確認壓力、拆卸與重新檢漏。

3.2.4 最終熱排放

冷卻系統不會消滅熱，只會移動熱。若 ColdDock 位於同一室內，則計算設備與冷卻設備消耗的功率最終仍進入房間：

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{(room)}} \\ \approx \\ P_{\text{(IT)}} \\ + P_{\text{(cooling)}} \\ - P_{\text{(exported)}}. \end{aligned}$$

因此，小型冷水機雖可降低晶片溫度，卻可能增加室內總熱量。若目標是降低房間熱負擔，必須把冷凝端、設施水或回收熱真正導向室外或其他使用端。

SECTION

3.3 單相液路的基本設計

單相液路的熱量搬運可寫為：

$$\begin{aligned} \dot{Q} \\ = \\ \dot{m} c_p \\ (T_{\text{(out)}} - T_{\text{(in)}}). \end{aligned}$$

若以水為近似， $c_p \approx 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。例如搬運 500W，並允許水溫上升 5K，理論所需質量流率約為：

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \\ (500)/(4180 \times 5) \\ &\approx 0.0239 \text{ kg/s}, \end{aligned}$$

約等於 1.43L/min。這只是能量平衡下限；實際流量還須滿足冷板熱阻、流量分配、局部沸騰、材料限制與控制裕度。

泵浦功率可近似為：

$$\begin{aligned} P_{\text{(pump)}} &= \\ (\Delta p \dot{V})/(\eta_{\text{(pump)}}). \end{aligned}$$

因此，流道設計不能只追求更高換熱係數，還必須避免讓壓降與泵浦功耗失控。

SECTION

3.4 機械與材料邊界

DryCore 不預先指定唯一材料配方。設計者必須建立濕潤材料清單並評估：

- 銅、鋁、鎳、不鏽鋼與焊料的電化學相容性；
- O-ring、軟管、黏著劑與冷卻液的化學相容性；
- 腐蝕、結垢、生物污染與顆粒脫落；
- 熱循環造成的膨脹差異；
- 壓力脈動、振動與運輸衝擊；
- 製造殘留物與清洗程序。

ASHRAE 指南將設施水與技術冷卻系統水區分處理，正是因為冷板與細流道對水質、腐蝕與顆粒更敏感。[2] 因此，不應在公開概念稿中直接指定單一防腐劑比例，並假設它對所有材料都安全。

SECTION

4.1 為何整機負壓通常不是答案

若機殼內壓力低於環境，空氣會從所有縫隙進入。只有設計過的進氣口有濾網時，未密封縫隙便可能吸入未過濾灰塵。因此，DustVoid v2.0 採用雙區架構：

- 髒側區域：位於濾網與集塵盒之前，由風機形成局部負壓；
- 潔淨側區域：位於濾網之後與電子艙內，維持相對環境的微正壓。

氣流方向為：

```
ext環境空氣
→
ext預分離／粗濾
→
ext主濾網
→
ext潔淨正壓艙
→
ext受控排氣口.
```

如此保留原始「把污染物集中在可維護區域」的想法，但不再宣稱在機殼外形成半徑數十公分的無塵場。

SECTION

4.2 壓差、風量與濾網負荷

風機工作點由系統阻抗曲線與風機曲線交會決定。濾網壓降增加時，實際風量通常下降；若只提高轉速，噪音與功耗會增加。

潔淨側控制量可寫為：

```
 $\Delta p_{\text{(clean)}}$ 
 $= p_{\text{(inside)}} - p_{\text{(ambient)}}.$ 
```

設計目標不是追求巨大壓差，而是維持足以讓縫隙主要向外漏氣的微正壓，同時避免機殼面板受力與風噪。
實際目標值必須由機殼洩漏面積、濾網與風扇測試決定。

濾網壽命可由壓差變化與顆粒負荷共同判定：

$$\Delta p_{\text{(filter)}}(t) \\ = p_{\text{(dirty)}}(t) - p_{\text{(clean)}}(t).$$

當壓差超過設備驗證門檻時，系統應降載、提高風量或提示更換，而不是用固定月份推定所有環境的濾網壽命。

SECTION

4.3 顆粒控制的正確驗證

「看起來沒有灰」不是充分量測。建議採用：

- 進氣與潔淨側光學粒子計數；
- 標準試驗粉塵或可追蹤粒子；
- 散熱器、風扇與 PCB 前後質量差；
- 影像分析沉積覆蓋率；
- 相同風量下的熱阻變化；
- 濾網壓降與風機功耗變化。

顆粒穿透率可表示為：

$$P_d(d_p) \\ = \\ (C_{\text{(clean)}}(d_p)) / (C_{\text{(dirty)}}(d_p)),$$

其中 d_p 為粒徑， C 為粒子濃度。過濾效率為：

$$\eta_f(d_p) = 1 - P_d(d_p).$$

任何「減少 95% 灰塵」的主張，都必須說明粒徑、流量、濾材狀態、洩漏率與量測不確定度。

SECTION

4.4 噪音量測

風扇數量、轉速、葉片通過頻率、機構共振、流道轉折與濾網阻力都會影響聲音。多項降噪措施的分貝值不能直接線性相加。v2.0 建議依 ECMA-74 或相容程序測量資訊設備聲功率與發射聲壓，並記錄：

- 麥克風位置與距離；
- 背景噪音；
- 設備工作狀態；
- A 加權與頻譜；
- 量測空間與不確定度。[8]

「20dB 深夜靜音」若沒有上述條件，不應作為公開性能資料。

SECTION

5.1 為何單相虹吸不能構成永久閉環

原稿以

$$\Delta p = \rho g \Delta h$$

計算儲液槽與冷排高度差，再推論封閉水路可永久產生約 10L/min 流量。這忽略了閉合回路中上升柱與下降柱的靜水壓大致互相抵消。若流體密度相同、沒有泵、沒有熱引起的浮力差或相變，靜態高度差不會提供持續淨驅動功。

可持續自然循環需要回路不同區段存在密度差。對單相自然循環，可概念化為：

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{(drive)}} &= \\ g \int_H &(\rho_{\text{(cold)}} - \\ \rho_{\text{(hot)}}) dz. \end{aligned}$$

但水在一般電子冷卻溫差下的密度差有限，且流道阻力可能壓過驅動壓差。兩相熱虹吸則利用蒸發形成低密度蒸氣／兩相混合物，通常能提供較明顯的自然循環驅動。

SECTION

5.2 兩相熱虹吸循環

GravityFlow v2.0 的基本元件為：

- 蒸發器；
- 蒸氣上升管；
- 位於蒸發器上方的冷凝器；
- 液體下降管；
- 儲液與充填控制；
- 壓力、溫度與安全保護。

熱源使工作流體蒸發，蒸氣上升至冷凝器釋熱，液體再由重力回流。其熱搬運可近似包含顯熱與潛熱：

$$\dot{Q} \approx \dot{m} (\Delta h_{\text{sens}} + x h_{\text{fg}}),$$

其中 h_{fg} 為汽化潛熱， x 為有效蒸發品質。這不代表所有輸入熱都理想轉化為汽化；實際性能受沸騰、流型、壓降、充填率、非凝結氣體、乾涸、冷凝與姿態影響。

近年的兩相熱虹吸研究顯示，此類系統可用於電子冷卻與伺服器，但其啟動、填充率、冷凝條件與流動狀態具有明顯設計敏感性，不能只靠一條靜水壓公式推定性能。[4][5][6]

SECTION

5.3 被動優先，而非被動教條

GravityFlow 的系統模式可分為：

- P0 純被動模式：適用固定直立姿態與穩定負載；
- P1 被動＋啟動輔助：冷啟動或低負載時由微型泵、加熱器或閥門短暫協助；
- P2 混合備援模式：正常由熱虹吸傳熱，異常時啟動輔助泵並限制功率；
- P3 主動回退模式：若姿態、流量或溫度超出安全範圍，切換到傳統液冷或關機。

移除主循環泵可以降低一個機械故障源，但不等於零故障。仍須考慮：

- 非凝結氣體累積；
- 密封洩漏；
- 冷凝器風扇故障；
- 蒸發器乾涸；
- 工作流體劣化；
- 姿態改變；
- 凍結與過壓；
- 啟動遲滯與脈動流。

SECTION

5.4 工作流體與壓力安全

工作流體不能僅按導熱係數選擇。還須考慮：

- 飽和壓力與設計溫度；
- 潛熱、黏度、表面張力與潤濕性；
- 可燃性、毒性、環境影響；
- 金屬與密封材料相容性；

- 充填、回收、運輸與法規；
- 失效時對電子設備與人員的風險。

壓力邊界必須按最大可能溫度與工作流體飽和壓力設計，並以合格元件、壓力釋放與測試程序驗證。DIY 原型不應用壓縮氣體進行高能量「爆破式」檢漏；在條件允許時，應採低危害的液壓／水壓測試、分段升壓、遠端隔離與防護屏障，且試驗壓力不得脫離元件額定值與適用規範。

SECTION

6.1 廢熱的能量與可用功不同

一個 500W 處理器會產生約 500W 熱流，但這不代表可以再發出接近 500W 電力。熱能轉化為功受到溫度品位限制。理想可用功上限可由熱源溫度 T_h 與環境溫度 T_c 的火用近似：

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\text{(max)}} \\ = \\ \dot{Q} \\ (1 - (T_c / T_h)). \end{aligned}$$

當熱源只比環境高數十 Kelvin 時，可用功比例本來就低，實際裝置還有材料、接觸與電力電子損失。

SECTION

6.2 熱電模組的正確定位

熱電發電器的理想化效率可寫為：

$$\begin{aligned} \eta_{\text{(TEG)}} \\ = \\ \frac{(T_h - T_c)}{(T_h)} \\ \frac{\sqrt{1 + \overline{ZT}} - 1}{\sqrt{1 + \overline{ZT}} + T_c / T_h}, \end{aligned}$$

其中 $\overline{ZT}$ 為平均無因次熱電優值。低溫差首先受到 Carnot 因子限制；同時 TEG 置入主熱路徑會增加熱阻，可能抬高晶片溫度。

因此桌面級 ThermoHarvest 的合理用途是：

- 為無線溫度／流量感測器提供微功率；
- 維持關機後短時間紀錄或警示；
- 驗證材料與介面的研究平台；
- 在不增加主熱阻時回收旁路熱流。

它不應預設能供應全部風扇、泵浦或冷水機。低溫廢熱發電至今仍是材料、成本、界面與系統整合上的挑戰。[7]

SECTION

6.3 機櫃與設施級熱回收

在較大尺度下，直接使用熱通常比先轉電更合理。若回水溫度足夠，可考慮：

- 生活熱水預熱；
- 建築供暖回路；
- 除濕再生；
- 吸收式或熱驅動系統；
- 鄰近製程的低溫預熱；
- 季節性熱儲存。

ASHRAE 對液冷資料中心的討論也強調，液冷的效率優勢需要與較高溫的熱排放設備與熱利用系統整合，不能只看晶片端溫度。[1]

因此，ThermoHarvest 的優先順序為：

ext避免不必要功耗

>

ext提高熱排放效率

>

ext直接利用溫水

>

SECTION

6.4 淨收益判據

若加入能量回收模組，必須計算淨收益：

$$\begin{aligned} P_{\text{(net)}} &= \\ &P_{\text{(harvest)}} \\ &- \\ &\Delta P_{\text{(fan)}} \\ &- \\ &\Delta P_{\text{(pump)}} \\ &- \\ &\Delta P_{\text{(control)}} \\ &- \\ &P_{\text{(performance loss)}}. \end{aligned}$$

最後一項表示回收模組增加熱阻後造成的降頻或額外冷卻代價。若 $P_{\text{(net)}} \leq 0$ ，即使 TEG 端測到電壓，系統仍不應宣稱節能。

SECTION

7.1 半密閉設備艙

原稿的 SilentBox HydroZero 宣稱完全密閉、零外部排風與自給自足。v2.0 將其改為半密閉、受控換氣或全熱耦合設備艙。

若所有主要熱源都能直接耦合至液路，電子艙可減少外界空氣交換。但仍需處理：

- VRM、記憶體、SSD、網路晶片與電源轉換器的殘餘熱；
- 內部空氣均溫；
- 材料釋氣與濕氣；
- 壓力平衡；

- 維護開艙後的污染；
- 感測器與控制器自身熱量。

可採內部空氣—液體熱交換器，使艙內空氣封閉循環，熱量仍由液路排出。這不是「不排熱」，而是把對外空氣交換改為固體／液體熱交換。

SECTION

7.2 露點守護

若冷板、管路或熱橋表面低於空氣露點，可能產生凝結水。可用 Magnus 近似估算露點：

$$\begin{aligned} \gamma(T, RH) &= \\ &\ln((RH)/(100)) \\ &+ \\ &(aT)/(b+T), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{(dp)} &= \\ &(b\gamma)/(a-\gamma), \end{aligned}$$

在一般室溫範圍可取 $a \approx 17.62$ 、 $b \approx 243.12^\circ \text{C}$ 作估算。控制條件為：

$$\begin{aligned} T_{(surface, min)} &\geq \\ &T_{(dp)} + \Delta T_{(guard)}. \end{aligned}$$

ASHRAE 的水冷伺服器指南建議供水溫度至少保持在室內露點以上約 2°C ，以提供感測誤差裕度。[2] 實際產品可依感測器精度、局部濕度與表面溫差採用更大安全裕度。

露點保護不應只依相對濕度判斷。控制器至少需要：

- 入口空氣溫度與濕度；
- 冷卻液供回水溫；

- 最冷表面溫度；
- 感測器交叉檢查；
- 低溫旁路或混水閥；
- 異常時升高供水溫度、降低負載或停止冷卻。

SECTION

7.3 壓力平衡與防塵

完全剛性密閉艙在溫度與海拔變化下會產生壓差。可採：

- 疏水透氣膜；
- 膨脹囊；
- 受控微量換氣；
- 壓力感測與機械安全閥。

任何 IP 等級都必須由具體完成品依適用測試認證，不能因使用 O-ring 或透氣膜便自行宣稱 IP65／IP67。

SECTION

8.1 控制目標

DryCore 控制器不是單純追求最低溫度，而是解多目標問題：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}} & \mathbf{J}(\mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{J} &= \\ & \mathbf{w}_T \mathbf{J}_T \\ & + \mathbf{w}_E \mathbf{J}_E \\ & + \mathbf{w}_N \mathbf{J}_N \\ & + \mathbf{w}_R \mathbf{J}_R \\ & + \mathbf{w}_C \mathbf{J}_C, \end{aligned}$$

其中：

- J_T：溫度與熱點代價；
- J_E：風扇、泵浦與冷水機能耗；
- J_N：聲學代價；
- J_R：可靠度與冷凝風險；
- J_C：元件循環、維護與成本代價。

控制輸入可包括：

- 風扇轉速；
- 主動液路流量；
- 三通／旁路閥；
- 冷水機設定點；
- 輔助泵啟停；
- 設備功率上限；
- 濾網維護提示；
- 熱回收路徑選擇。

SECTION

8.2 AI 的合法角色

AI 或預測模型可以：

- 預測工作負載造成的熱慣性；
- 提前調整風扇或冷卻設定；
- 辨識濾網堵塞、流量衰退與感測器漂移；

-
- 建立不同環境與姿態下的性能模型；
 - 協助找出能耗、噪音與溫度的 Pareto 前緣。

但安全功能不得只依賴 AI。下列保護應具備獨立硬體或確定性邏輯：

- 過溫關機；
- 過壓釋放；
- 漏液互鎖；
- 流量／冷凝異常降載；
- 感測器斷線偵測；
- 看門狗與失效預設狀態。

SECTION

8.3 最低感測集合

建議最小感測集合為：

- 晶片或封裝溫度；
- 熱擷取元件入口／出口溫度；
- 外部冷端入口／出口溫度；
- 液路壓力與流量；
- 電子艙溫度、相對濕度與露點；
- 最冷表面溫度；
- 濾網前後壓差；
- 漏液繩或漏液墊；
- 風扇／泵轉速回饋；

- 系統功率。

所有感測器應記錄校準、量程、精度、更新率與失效行為。

SECTION

8.4 失效模式與反應

失效模式 可觀測訊號 第一反應 第二反應

冷端風扇失效 轉速為零、回水升溫 啟動備援風扇／降載 安全關機

主動泵失效 流量下降、壓差異常 切換備援或被動模式 降載／關機

熱虹吸未啟動 蒸發器升溫、冷凝器無溫差 啟動輔助模式 限制功率

蒸發器乾涸 熱阻急升、局部溫度突升 立即降載 關機檢查

液體洩漏 漏液感測、壓力／液位下降 關閉閥、斷開相關電源 排液與維護

濾網堵塞 壓差上升、風量下降 提高風量或降載 更換濾網

結露風險 表面溫度接近露點 提高供液溫度 降載／停止冷卻

感測器漂移 多感測器不一致 使用保守估計 維護／更換

控制器失效 看門狗、通訊中斷 切換硬體安全曲線 關機

ASHRAE 液冷資料也建議在關鍵設備下方使用集液盤、漏液偵測與排水，並協調液路、電力與網路配置。[1]

SECTION

9.1 證據分級

DryCore 後續文件應使用以下標記：

等級 意義

E0 概念或物理推論

E1 解析計算、CFD／FEA／系統模擬

E2 單模組加熱器試驗台

E3 整合原型與故障注入

E4 真實運算設備長時間測試

E5 第三方重現、認證或量產資料

本文本身主要位於 E0–E1，不得把計算推演寫成 E3–E5。

SECTION

9.2 共通量測規則

每個測試至少報告：

- 熱源類型、面積、位置與校準功率；
- 環境溫度、濕度、氣壓與露點；
- 冷卻液、入口溫度、流量與壓力；
- 溫度量測點與感測器不確定度；
- 穩態判據；
- 基線系統；
- 噪音量測方法；
- 控制器設定；
- 原始時間序列與異常事件；
- 是否含冷水機、泵浦與風扇能耗。

建議穩態判據可定義為：在至少 30min 視窗內，關鍵溫度斜率絕對值低於預先設定門檻，且能量平衡誤差在允許範圍內。具體門檻須按試驗精度指定。

SECTION

9.3 V0：基準熱路徑台

目的：建立可重現基線。

- 使用電阻加熱器或可校準加熱塊，不先使用昂貴 CPU／GPU；
- 測試 50、100、200、300、500W 等多個負載點；
- 比較傳統冷板、DryCore 熱脊與外部 ColdDock；
- 輸出總熱阻：

$$R_{(th)} = (T_{(heater)} - T_{(sink)}) / (\dot{Q}).$$

驗收重點不是達到某固定溫度，而是辨識各段熱阻、重複性與失效模式。

SECTION

9.4 V1：DryCore 單模組

測試項目：

- 接觸壓力與熱阻；
- 艙壁熱脊均溫性；
- 外部冷端更換後的重複性；
- 熱循環與機械循環；
- 震動、運輸與接頭維護；
- 壓力保持與漏液偵測；
- 冷端失效時的熱暫態。

SECTION

9.5 V2：DustVoid 污染試驗

建立對照艙與實驗艙：

- 相同風量或相同噪音基線；
- 受控試驗粉塵；
- 粒子計數器量測濾前／濾後濃度；
- 濾網壓降與風機功耗；
- 散熱器沉積質量與熱阻變化；
- 模擬縫隙洩漏與門板開啟。

不得只用「肉眼無塵」作為結論。

SECTION

9.6 V3：GravityFlow 熱虹吸試驗

掃描參數：

- 充填率；
- 蒸發器與冷凝器高差；
- 管徑與長度；
- 工作流體；
- 冷凝器入口溫度；
- 熱負載與熱通量；
- 姿態偏角；
- 啟動與停止循環。

輸出：

- 啟動時間；

- 穩態熱阻；
- 溫度脈動；
- 壓力脈動；
- 最大穩定熱負載；
- 乾涸與回流限制；
- 失效後安全反應。

SECTION

9.7 V4：ThermoHarvest 淨收益試驗

對 TEG 或其他採集裝置，必須同時測量：

- 開路電壓、最大功率點與轉換器效率；
- 加入裝置前後的熱阻；
- 為維持相同晶片溫度增加的風扇／泵功率；
- 長時間熱循環衰減；
- 每瓦成本。

只有在 $P_{\text{(net)}} > 0$ 且不降低設備可靠度時，才能稱為有效回收。

對溫水回收，則測量：

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{(recovered)}} \\ = \\ \dot{m} c_p \\ (T_{\text{(return)}} - T_{\text{(supply)}}), \end{aligned}$$

並記錄實際有多少熱被下游使用，而不是只計算理論回水熱量。

SECTION

9.8 V5：整合原型

首個整合原型建議限制在 250–500W 可控熱源，而不是直接宣稱千瓦級運算節點。測試包括：

- 72h 穩態負載；
- 循環負載與快速功率變化；
- 高溫高濕露點情境；
- 冷端風扇、泵浦、感測器與濾網故障注入；
- 開關機與冷啟動；
- 外部冷端拆裝後重複測試；
- 聲學測試；
- 至少數百次熱循環後的密封與性能檢查。

通過後才進入真實 CPU／GPU 測試。

SECTION

10.1 第一階段：低風險模組

優先實作 DustVoid 雙區氣流試驗艙與感測系統，因其不必接觸昂貴電子設備，且可快速驗證：

- 微正壓是否減少縫隙進塵；
- 濾網壓差如何影響風量與噪音；
- 顆粒感測是否足以預測維護時間。

SECTION

10.2 第二階段：DryCore 熱脊

使用加熱器與商用冷板／熱管建立：

- 熱擷取頭；
- 穿艙壁熱脊；
- 外部冷排；
- 溫度、流量與漏液紀錄。

此階段不追求新奇材料，先證明模組邊界與服務流程。

SECTION

10.3 第三階段：GravityFlow

在獨立防護試驗台驗證兩相熱虹吸。第一版不與真實電腦整合，先完成：

- 工作流體與壓力邊界審查；
- 啟動、姿態與填充率地圖；
- 冷凝器風扇失效測試；
- 輔助啟動與安全回退。

SECTION

10.4 第四階段：ThermoHarvest

先以旁路熱源驗證微能量採集，避免增加主熱路徑熱阻。設施級熱回收則應與暖通、熱交換與實際熱需求共同設計，不能只在桌面原型上推演。

SECTION

10.5 第五階段：統一控制器

當各模組已有可用資料後，再建立控制器：

- 確定性安全層；

- 規則式基線控制；
- 模型預測控制；
- 最後才加入機器學習預測。

順序不能顛倒。沒有安全基線與故障資料，AI 不應成為唯一控制核心。

SECTION

11.1 QAC 高壓氣體導熱

原稿使用：

$$k_{\text{(gas)}} = k_{\text{ref}}(P)/(P_{\text{ref}}),$$

並推論 10atm 空氣的導熱係數約為常壓十倍。此模型不適用於一般連續介質氣體。常見氣體在非稀薄、非極端狀態下的導熱係數主要由分子性質與溫度決定，並不隨壓力簡單線性增加。提高壓力可改變密度與自然／強制對流行為，但也需要壓力容器、密封、檢驗與安全管理。

因此 QAC 從產品路線中移除。若未來研究高壓氦氣、超臨界流體或特定氣隙熱傳，應另立專門論文與壓力安全框架。

SECTION

11.2 HydroPeak 與壽命預測

熱管理可降低溫度、減少熱降頻並改變電遷移與材料老化速率，但處理器壽命還受電壓、電流密度、製程差異、時序裕度、熱循環與封裝應力影響。不能把「42^{\circ}\text{C}」直接換算成「壽命只損失 8%」。

HydroPeak 因此改列為跨層性能控制的後續子題，只允許使用：

- 原廠允許的遙測與功率控制；
- 實際穩定性測試；
- 不超出元件額定範圍的設定；
- 明確的風險與保固邊界。

本文不提供固定超頻頻率或壽命承諾。

SECTION

11.3 「零」字眼的限制

下列用語在未完成長期統計與第三方驗證前不得使用：

- 零漏液；
- 零故障；
- 零維護；
- 零噪音；
- 零灰塵；
- 零外部功耗；
- 永久壽命；
- 絕對安全。

可替代為：降低風險、移除特定故障源、被動優先、可維護、低噪音目標、污染受控、具備備援。

SECTION

11.4 開源邊界

CC BY-SA 4.0 主要處理本文文字與圖表的著作權分享，不自動等同於完整硬體專利授權、產品安全認證或工程擔保。若未來釋出 CAD、韌體、BOM、測試資料或正式專利不主張承諾，應分別附上：

- 可識別的版本與內容指紋；
- 明確授權文本；
- 專利範圍與例外；
- 安全警告與責任邊界；

- 可重現測試資料。

「概念公開」與「完成可安全複製的開源硬體」是不同成熟度。

DryCore v2.0 保留了原始版本最有價值的系統直覺：高功率運算設備不應只被視為一顆需要降溫的晶片，而應被視為一個具有熱流、液流、氣流、污染、濕度、噪音與維護邊界的微型環境。

但真正可工程化的「溫度主權」不是讓系統無視物理限制，也不是用革命性語言代替量測，而是讓每一條能量路徑、每一個服務接頭、每一個壓差、每一個露點裕度與每一種故障反應都可被觀察、計算與驗證。

本文提出四個可獨立發展的支柱：

- DryCore Thermal Spine：將高熱通量導向外部可維護冷端，降低液路服務與電子艙直接交錯；
- DustVoid Dual-Zone：以髒側負壓與潔淨側微正壓控制污染，而非建立不可驗證的吸塵氣場；
- GravityFlow Thermosyphon：以真正的兩相自然循環取代錯誤的單相虹吸推論；
- ThermoHarvest Interface：以淨收益與熱品位判斷廢熱利用，而非預設桌面 TEG 能使散熱自給自足。

DryCore 的下一個合理成果，不是再次預測某顆處理器能在何種頻率下維持多少度，而是建立一個 250–500W 的可校準加熱器原型，公開原始量測、熱阻分解、故障注入、露點控制與長期循環資料。只有完成這一步，DryCore 才會從概念產品真正進入工程產品。

[1] ASHRAE, Emergence and Expansion of Liquid Cooling in Mainstream Data Centers, 2021.

[2] ASHRAE TC 9.9, Water-Cooled Servers: Common Designs, Components, and Processes, ASHRAE White Paper.

[3] Open Compute Project, Open Edge Servers Meet Liquid Cooling: A Feasibility Study, 2024.

[4] J. Caner et al., “Simulation of a Two-Phase Loop Thermosyphon Using a New Flow Model,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024.

[5] “An Experimental Evaluation of the Performance of a Remote 2U Loop Thermosyphon,” Applied Thermal Engineering, 2024, Article 123243.

[6] “An Experimental Study on a Novel Two-Phase Loop Thermosyphon Applicable for Cooling in 2U Servers,” Applied Thermal Engineering, 2025.

[7] Tellurium-Free Thermoelectric Materials and Devices for Low-Temperature Energy Harvesting, Nature Reviews Materials, 2026.

[8] Ecma International, ECMA-74: Measurement of Airborne Noise Emitted by Information Technology and Telecommunications Equipment, current edition.

[9] ISO, ISO 3744:2025 — Acoustics: Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure.

每項性能聲明應附：

```
claim_id: DC-0001
module: DryCore | DustVoid | GravityFlow | ThermoHarvest
claim: "待驗證的明確敘述"
evidence_level: E0 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5
baseline: "對照系統與設定"
heat_load_W: null
heat_source_area_mm2: null
ambient_temperature_C: null
relative_humidity_percent: null
dew_point_C: null
coolant_supply_C: null
flow_rate_L_min: null
measurement_method: ""
uncertainty: ""
raw_data_path: ""
limitations: ""
status: proposed | simulated | measured | reproduced | rejected
```

當原型完成時，建議一次發布：

- 原理圖與系統邊界圖；
- BOM 與濕潤材料清單；
- CAD／製造圖；
- 感測器與校準紀錄；
- 原始時間序列；
- 熱負載校準方法；
- 壓力與漏液測試紀錄；
- 露點與冷凝測試；
- 聲學量測配置；

-
- 故障注入紀錄；
 - 失敗版本與修改歷史；
 - 授權與內容指紋。