

機殼散熱評估

150 × 100 × 50 mm 機殼，內含 60 × 60 × 25 mm 鋁散熱片與一顆 15 W 晶片。
比較四種進出風口與散熱片配置，以空氣與鋁的耦合熱傳（CHT）計算晶片溫度與風扇負載。

風扇 2 L/s（約 4.2 CFM） 進風 25 °C 發熱 15 W 求解器 OpenFOAM v2312

建模 FreeCAD 1.0 + CfdOF

結論

建議採用 A + 導風罩：晶片 50.3 °C，比原始前進後出設計低 14 °C，熱阻 1.69 °C/W。

- 原始 A 設計有一半以上的風從鰭片上方繞過。導風罩把整股風擠進鰭片之間，通道風速由約 1 m/s 升到約 2.2 m/s。
- 代價是系統壓降由 0.77 Pa 升到 3.0 Pa，40 mm 風扇的最大靜壓一般在 20–40 Pa，負載仍很輕。
- 側進頂出（B）最差，晶片 83.4 °C：側風撞上第一片鰭片後往上翻，內側通道幾乎沒有風。把鰭片轉 90° 對準進風方向後降到 63.1 °C，與 A 相當。

四種配置比較

配置	晶片溫度	熱阻 R_{th}	散熱片最高	出風溫度	系
A + 導風罩 前進後出，漏斗 + 頂蓋 + 側擋牆	 50.3 °C	1.69 °C/W	51.1 °C	31.3 °C	3.0
B + 鰭片轉 90° 側進頂出，鰭片 對準進風	 63.1 °C	2.54 °C/W	63.9 °C	31.5 °C	1.4
A 前進後出 原始設計	 64.1 °C	2.61 °C/W	64.9 °C	31.3 °C	0.7
B 側進頂出 原始設計	 83.4 °C	3.89 °C/W	84.1 °C	31.3 °C	1.5

長條刻度 0–87.6 °C。熱阻 $R_{th} = (\text{晶片溫度} - \text{進風溫度}) / 15 \text{ W}$ 。能量守恆以出風溫
升 $\times$ 風量 $\times \rho c_p$ 回推，與設定的 15 W 相差 $\leq 3\%$ 。

散熱方案比較：CHT（空氣 + 鋁散熱片耦合熱傳），風扇 2 L/s

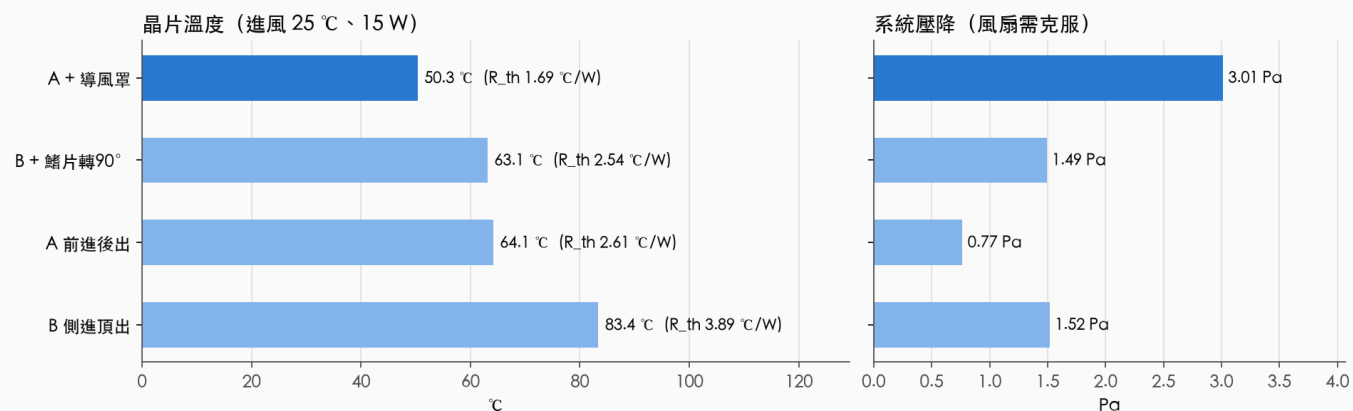


圖 1 晶片溫度與系統壓降。兩項分開作圖，不共用座標軸。

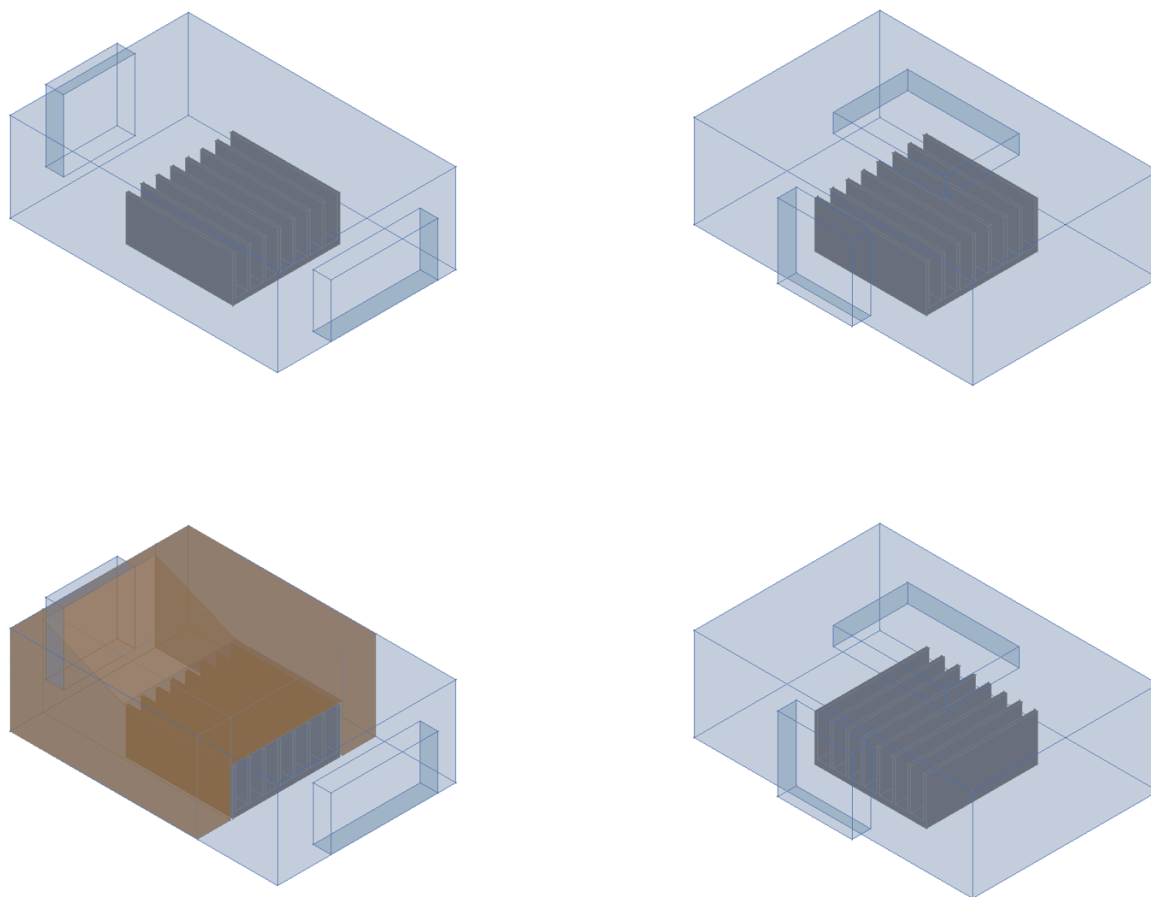


圖 2 左上 A 前面 40×40 風扇口、背面 60×30 出風口。右上 B 側面 40×40 風扇口、頂面 60×40 出風口。左下 A + 導風罩（橘色）漏斗把風從風扇口導到鰭片高度，頂蓋與側擋牆和鰭片留 1.5 mm 組裝間隙。右下 B + 鰭片轉 90° 鰭片通道開口正對側面進風口。

機殼內部 150 × 100 × 50 mm	散熱片 60 × 60 × 25 mm	鰭片 8 片 × 1.5 mm，間距 6.86 mm
基板 3 mm	晶片（熱源） 20 × 20 mm，15 W	鋁 6063 k 200 W/m·K
風扇（固定風量） 2 L/s，紊流強度 5 %	機殼壁面 絕熱（保守）	

溫度與流場

每張圖四格排列相同：左上 A、右上 B、左下 A + 導風罩、右下 B + 鰭片轉 90°。除圖 7 外，四格用同一色階，可直接比較。

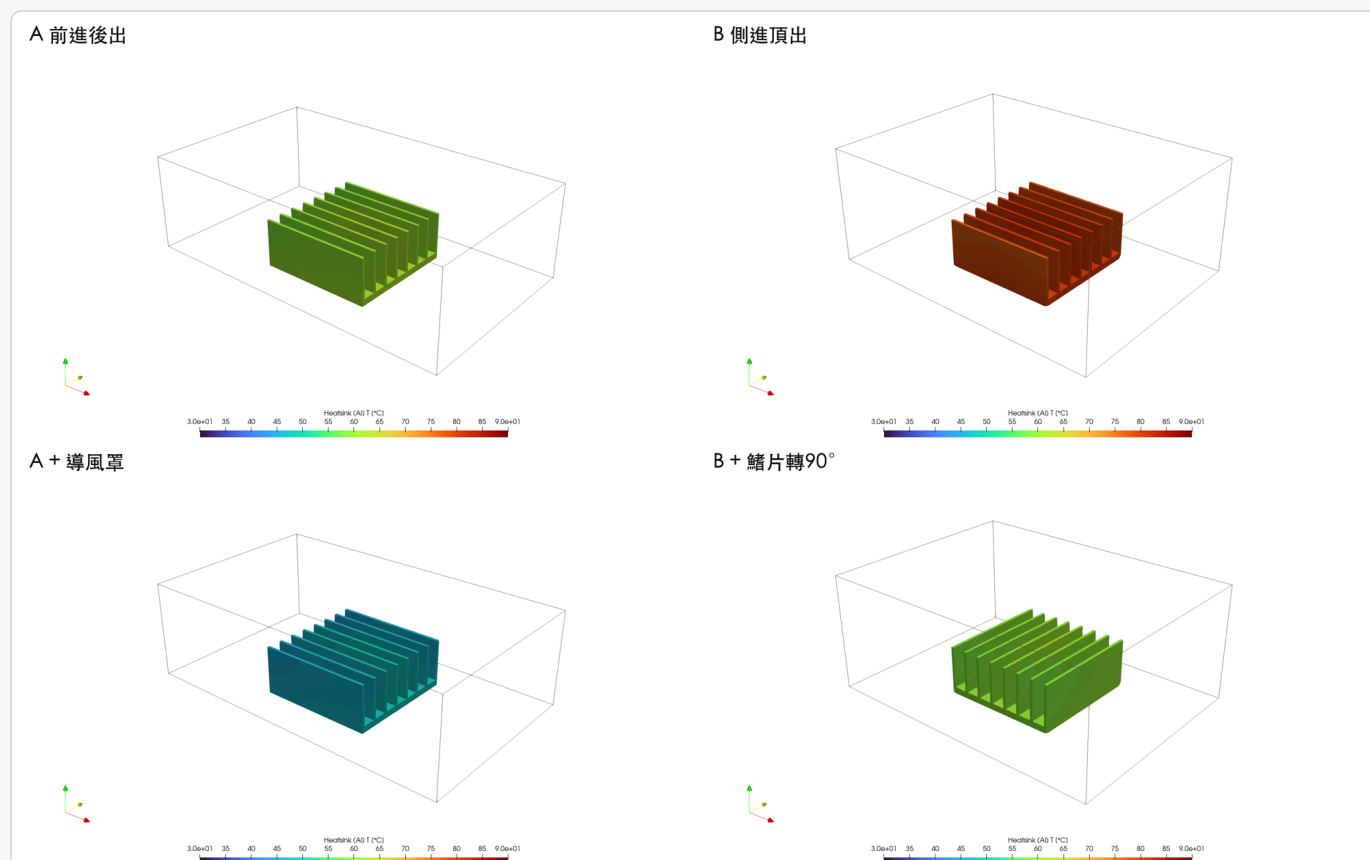
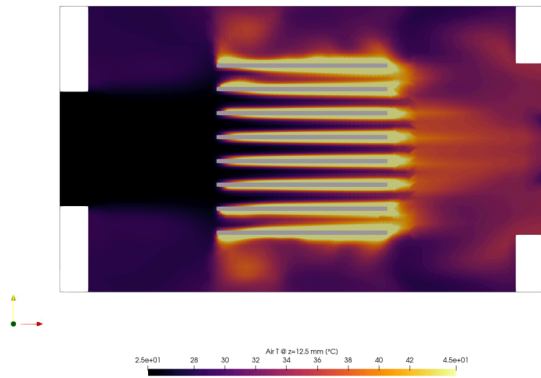
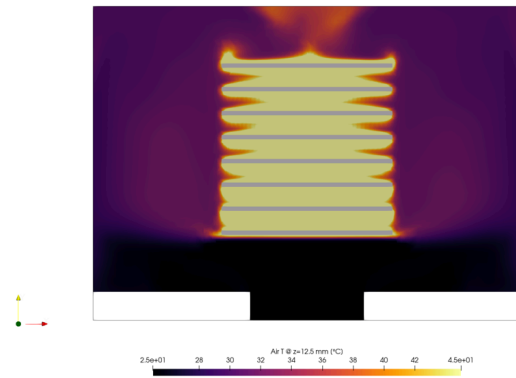


圖 3 散熱片溫度 (30–90 °C)。鋁把熱攤得很平均，每塊散熱片的溫差只有 4–6 °C，所以決定晶片溫度的是整體對流能力，也就是有多少風真正流過鰭片。

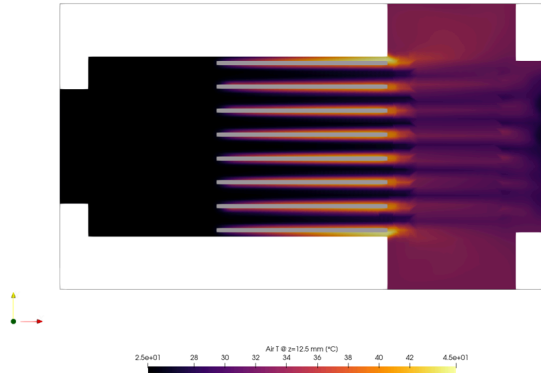
A 前進後出



B 側進頂出



A + 導風罩



B + 鰭片轉90°

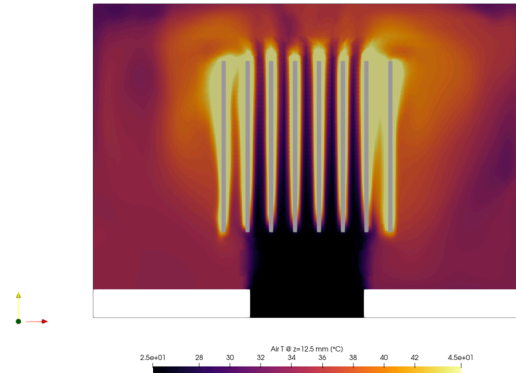
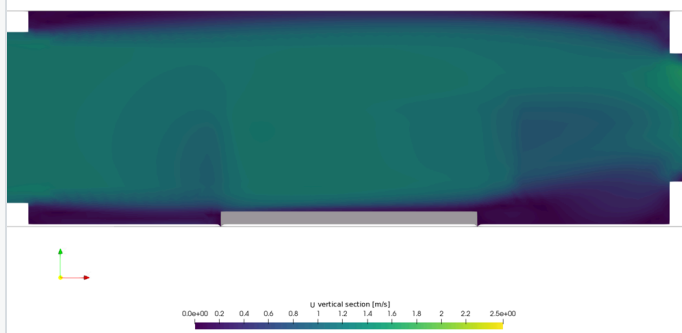
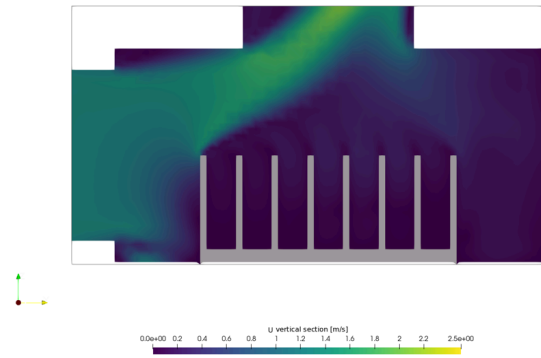


圖 4 鰭片半高 $z = 12.5 \text{ mm}$ 的空氣溫度 (25–45 °C)。B 的冷風停在第一片鰭片前，整塊散熱片泡在熱空氣裡。A + 導風罩的每條鰭片通道都有冷風穿過，鰭片邊界層很薄。

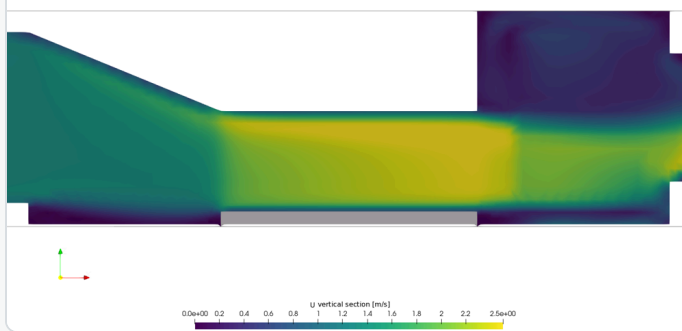
A 前進後出



B 側進頂出



A + 導風罩



B + 鰭片轉90°

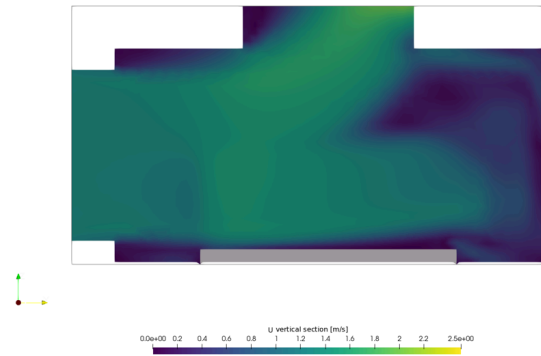


圖 5 垂直切面風速 (0-2.5 m/s)。A 的主流大部分走鰭片上方的空間。A + 導風罩的漏斗把風壓進鰭片高度，通道風速約 2.2 m/s。切面位於兩片鰭片中間，所以只看得到基板。

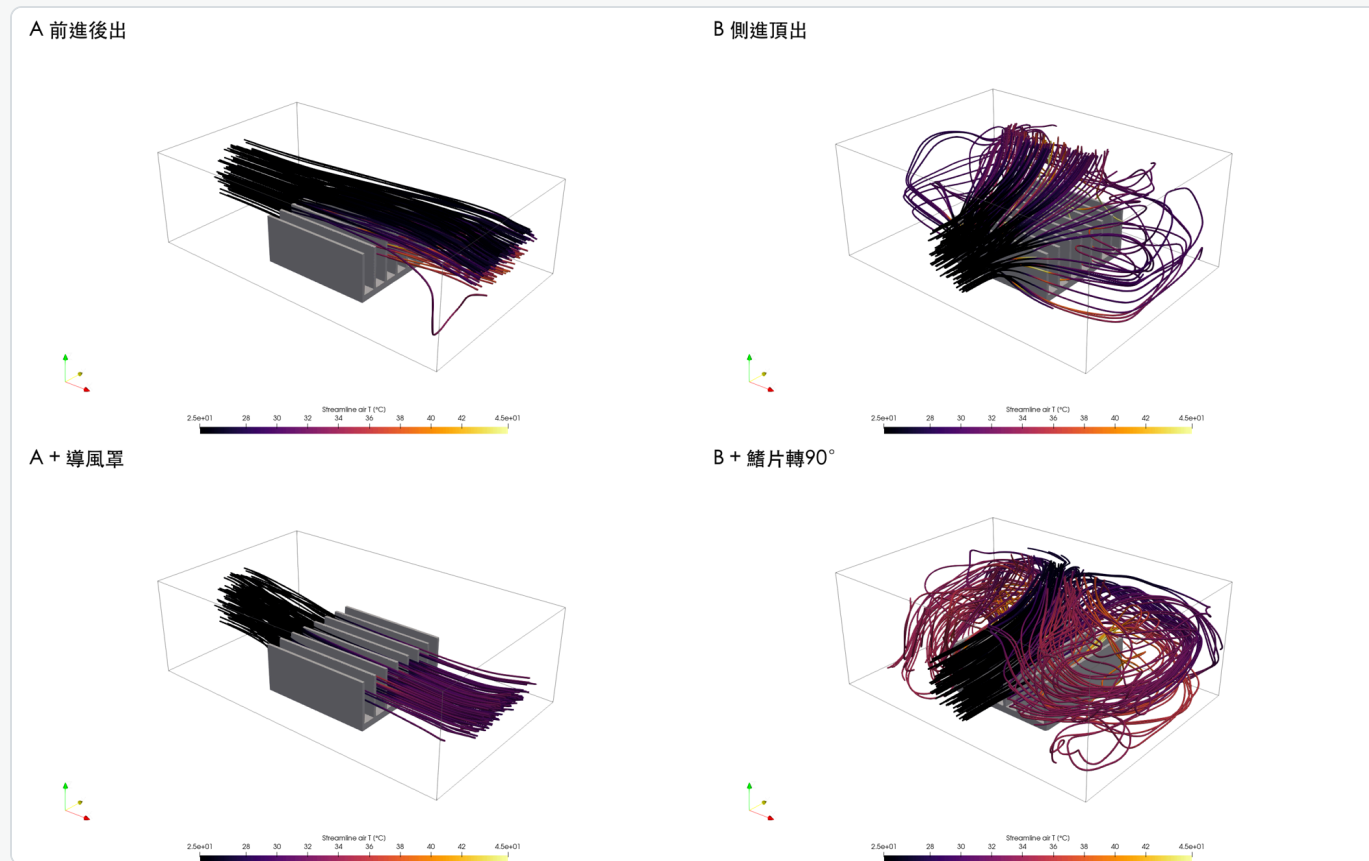
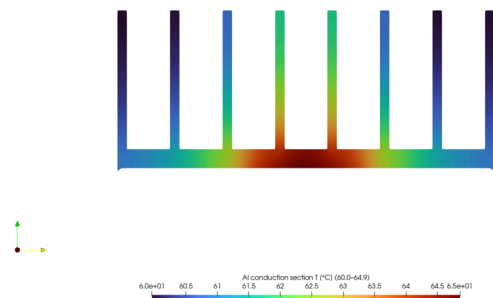
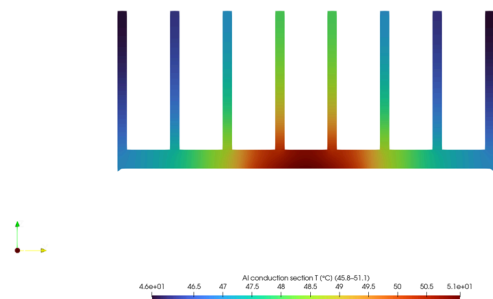


圖 6 流線，以空氣溫度著色。A 的流線大多保持黑色（冷），代表沒有接觸鰭片就離開。B 的流線撞上散熱片側面後往上翻、在機殼內繞圈。

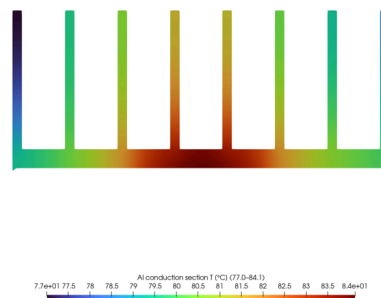
A 前進後出



A + 導風罩



B 側進頂出



B + 鰭片轉90°

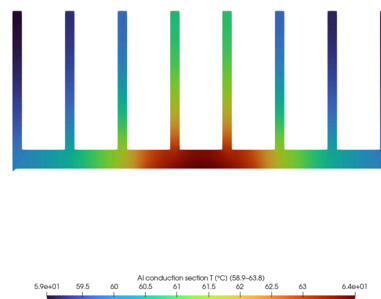


圖 7 鋁內部熱傳導剖面。每格色階依該配置的溫度範圍自動調整，用來看熱從晶片往鰭片擴散的路徑：熱點在晶片正上方的基板，外側鰭片尖端最冷。

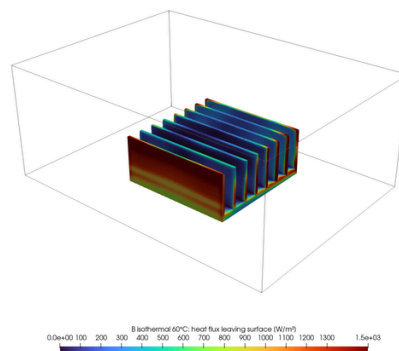
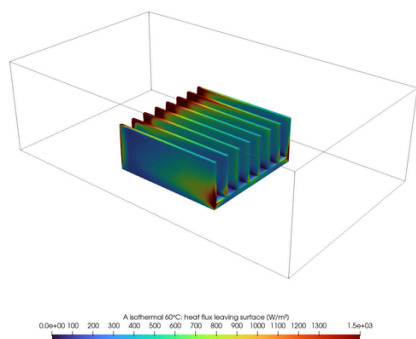


圖 8 等溫檢核：散熱片表面固定 60 °C 時的熱通量 (0–1500 W/m²)。左 A、右 B。A 的鰭片前緣散熱最強，往下游遞減。B 幾乎只有正對進風的那片外側鰭片在散熱。

計算方法與驗證

流程

驗證

1. FreeCAD PartDesign 建立散熱片、流體域與導風罩（全部草圖驅動、可改尺寸）。
 2. 匯出 STL，分為 inlet / outlet / wall 與 heatsink。
 3. snappyHexMesh 以 `locationsInMesh` 一次切出空氣與鋁兩個區域，約 29–35 萬 cells，散熱片表面 0.75 mm。
 4. `chtMultiRegionSimpleFoam` 穩態求解， $k-\omega$ SST 紊流模型並計入浮力，800–1000 步；晶片溫度約 130 步後穩定。
 5. ParaView 6.1 pvbatch 出圖，並存成 state 檔供互動檢視。
- **能量守恆：**四種配置由出風溫升回推的熱量為 15.0–15.5 W，對應設定的 15 W。
 - **等溫交叉檢核：**用 CfdOF 把 A 的散熱片表面固定在 60 °C，得到 $R_{th} = 2.24$ °C/W。CHT 算出的散熱片平均溫度對應 2.41 °C/W，兩者一致。多出的 0.17 °C/W 是晶片熱量在基板內擴散的熱阻。
 - **求解流程驗證：**同一套 CfdOF + OpenFOAM 流程先跑圓管層流 $Re = 100$ ，與 Hagen–Poiseuille 解析解比較，速度剖面誤差 0.9 %、壓降梯度誤差 0.05 %。

限制

- 風扇以固定風量 2 L/s 表示，沒有用風扇曲線。導風罩讓壓降變成 4 倍，實際風量會略為下降；正式設計時請以所選風扇的 P-Q 曲線確認工作點。
- 晶片到散熱片之間的導熱介面（導熱膏或導熱墊）沒有建模。晶片接面溫度要再加上介面熱阻，例如 0.2 °C/W $\times$ 15 W $\approx$ 3 °C。
- B 系列的穩態解在 ± 0.5 °C 內擺盪，等溫版 B 沒有完全收斂，只能當約略參考。排名不受影響。
- 機殼壁面設成絕熱，也沒有計入輻射，所以結果偏保守。
- 網格：鰭片厚度方向只有 2 格。鋁的 Biot 數很小，厚度方向的溫差可以忽略，但若取得準確的壁面熱通量，應再做一次網格加密比較。

由 FreeCAD MCP + CfdOF + OpenFOAM v2312 + ParaView 6.1 產生。數值為穩態 RANS 預估，用於比較設計方案，不取代實機量測。