

長生命週期嵌入式平台的 儲存可靠性

長生命週期產品對穩定嵌入式儲存的需求

長生命週期的嵌入式平台通常會在設備中運作長達十年以上。一旦部署完成，後續幾乎不會再進行維護或更換，因此，元件的運作特性必須在整個使用生命週期內維持穩定。



初始驗證僅能反映裝置在當時的狀態。後續供應鏈中的版本變更，可能導致時序餘裕、ECC 容錯空間改變，或影響抹寫均衡等背景作業的運作。這些變化通常無法透過標準驗證流程發現，卻可能在實際運作環境中逐漸顯現，造成間歇性錯誤、延遲增加，或發生非預期的資料復原事件，進而影響系統的可靠性。

嵌入式儲存系統高度敏感，因為其運作特性取決於控制晶片、NAND、韌體與電源條件在實際應用環境中的整體交互作用，而非單一元件的獨立表現。

上述任一層面的變更，都可能導致延遲變化、降低 ECC 容錯空間，或改變垃圾資料回收與抹寫均衡等背景作業的運作。這些影響未必能在驗證階段立即顯現，而往往會在系統承受高負載時浮現，例如在持續寫入、低電壓事件或溫度極限等情境下。此時，背景作業與主機存取相互爭取系統資源，錯誤率也開始攀升。

商用快閃記憶體市場發展迅速，NAND 製程持續微縮、控制晶片不斷更新，韌體也持續修正。這些更新雖然有助於降低成本並且提升儲存容量，但也會改變裝置的運作特性。這與長生命週期產品的需求形成落差，因為此類設計的前提是，經過驗證的裝置應在整個使用生命週期內維持一致的運作表現。

儲存裝置的選型必須在產品開發初期完成。雖然裝置會在既定的驗證條件下完成驗證，但這些條件無法完整反映實際部署環境。系統部署後，往往需要面對溫度循環、不穩定的供電、振動，以及不均勻的寫入負載等情況。在這類環境下，讀取干擾、資料保存能力衰退及寫入放大等失效機制將逐漸主導運作。隨著延遲波動增加，ECC 容錯空間會更快被消耗，而背景運作也開始干擾主機存取效能。

在這種情況下，額定效能數據已不再具有參考價值。真正重要的是，儲存裝置在持續高負載運作下的實際表現，以及這些運作特性能否在整個使用生命週期內維持穩定。

長生命週期設計中的整合式儲存

採用獨立 NAND 與控制晶片的架構，會隨著時間的改變，引入難以控制的變數。隨著 NAND 版本更新、控制晶片變更及韌體更新，其運作特性未必能與最初完成驗證的配置保持一致。

將控制晶片與 NAND 整合於單一受管理的儲存裝置中，可大幅降低系統對元件配對的依賴。快閃記憶體管理機制、ECC 與韌體皆共同開發與驗證，而非仰賴外部元件的搭配，可降低產品生命週期後期因元件替換，而導致運作特性改變的風險。

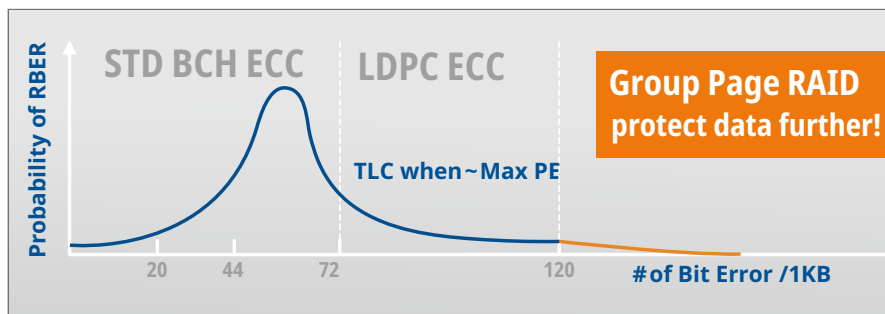
對於長生命週期的系統而言，這一點至關重要，因為驗證的對象是特定的裝置配置，而非僅是符合某項介面規格。NAND 世代或製程的變更，可能影響錯誤率、耐久性以及延遲特性。當這些變化由儲存裝置內部統一管理時，對主機系統的影響便能受到控制。

Ferri 系列產品採用此設計理念，並使用受控的 BOM 配置與生命週期管理機制，避免不同 NAND 版本成為可任意替換的元件。如此可確保量產品與驗證樣品之間維持高度一致性，降低因元件變更所帶來的系統風險，並提升長期部署的可靠性。

NAND 耗損與資料完整性管理

NAND 特性會隨著寫入／抹除次數 (P/E Cycle) 及資料保存時間延長而逐漸劣化。原始位元錯誤率會隨之上升，資料保存餘裕縮減，而讀取干擾也會因重複讀取而持續累積。

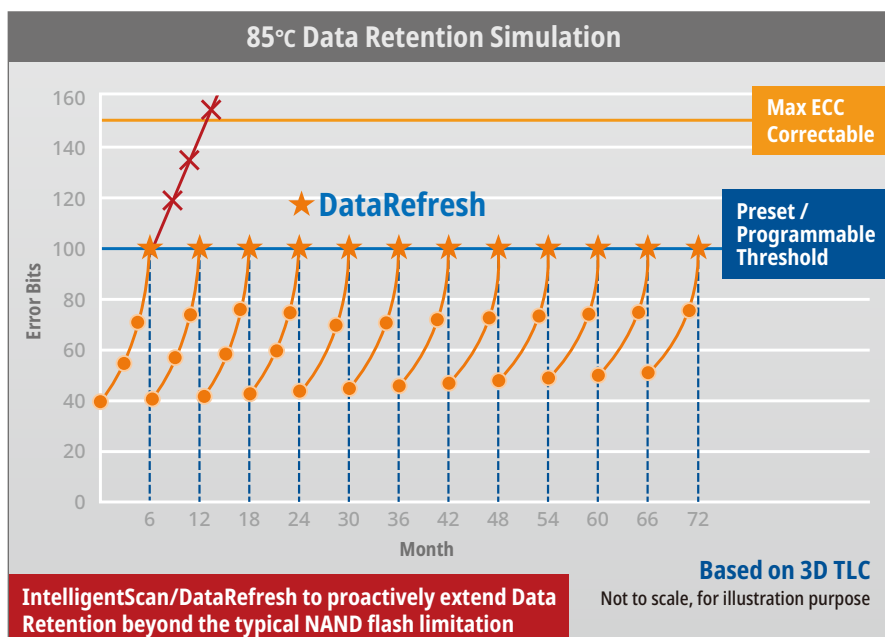
FerriSSD 透過 NANDXtend 來應對此問題，其採用 LDPC 錯誤校正以及內部資料保護機制，在 NAND 隨使用耗損的情況下維持資料完整性。此外，ECC 強度與管理策略會在控制晶片內部進行調整，以延長可用壽命。



NANDXtend 有助於在維持資料完整性的同時，延長 NAND 的使用壽命。

背景管理機制同樣用於處理 NAND 的劣化問題。IntelligentScan 會監控區塊狀態與錯誤率，以識別接近耐久度極限的區域。DataRefresh 則透過資料搬移，維持資料保存餘裕，並降低讀取干擾隨時間累積所造成的影響。

這些機制皆在裝置內部運作，無需主機系統介入，即可有效降低 NAND 老化所帶來的影響，同時減少系統層額外管理儲存裝置的負擔。



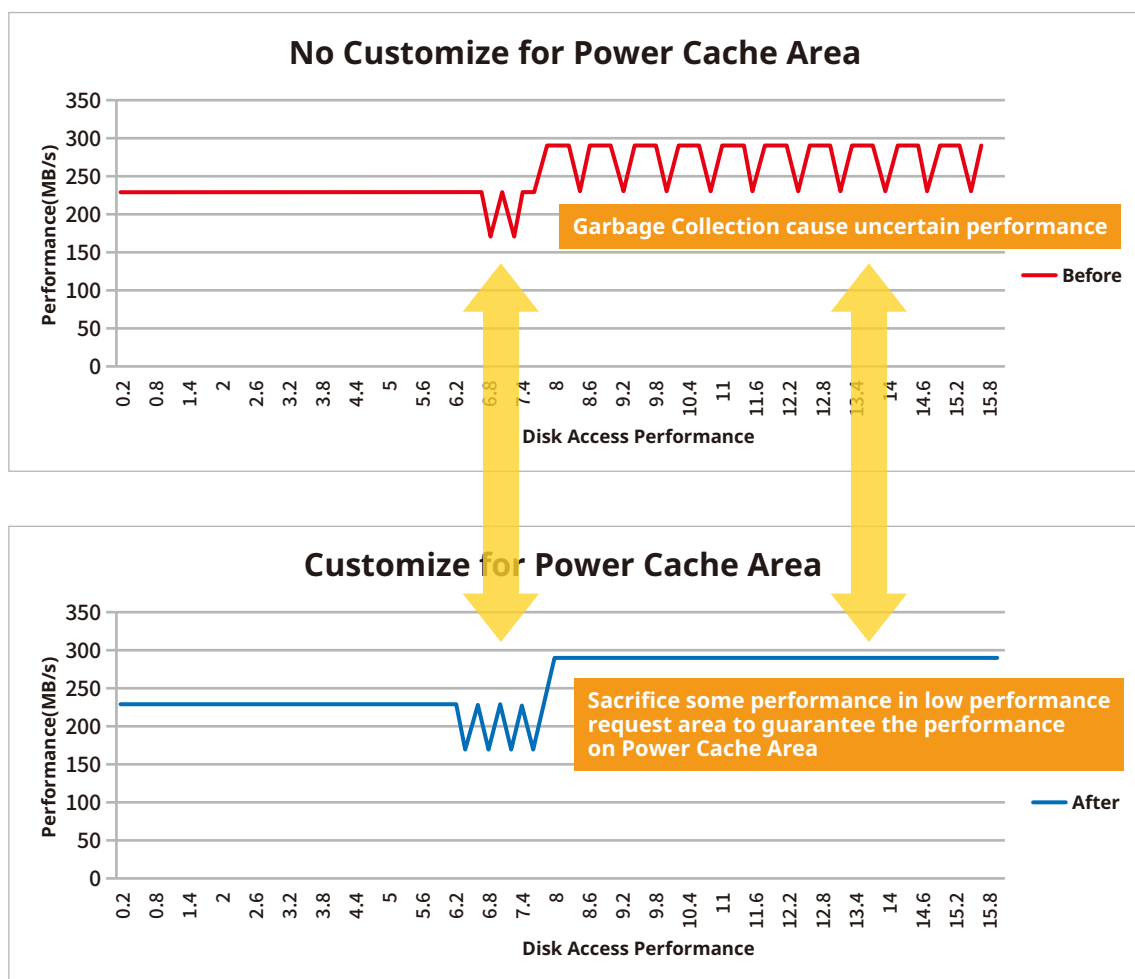
IntelligentScan 與 DataRefresh 可強化資料遺失防護與錯誤修正能力，進而延長 SSD 的使用壽命

不穩定供電條件下的運作特性

供電不穩定是嵌入式系統中常見的情況。當程式寫入或抹除作業進行期間發生電壓下降或瞬間斷電時，可能導致 Mapping Table 或 Metadata 處於不一致的狀態。

若未妥善處理，可能造成位址對應資訊損毀、資料無法存取，甚至引發裝置層級的復原程序，進而影響系統的正常運作。

FerriSSD 內建機制可在供電異常期間維持位址對應資訊的一致性，並於下次重新上電時將裝置恢復至一致且可正常運作的狀態。雖然各產品的實作方式有所不同，但其共同目標都是避免在作業未完成時，關鍵中繼資料因斷電而遭到破壞。



IntelligentFlush™ 能以定速進行資料轉移，讓資料能快速地移轉到安全的儲存區塊。

裝置層級的安全性防護

儲存裝置的可靠性不僅取決於資料完整性，也仰賴完善的安全機制，以防止裝置遭到未經授權的修改。

依不同產品型號而定，FerriSSD 可支援安全開機、韌體驗證及硬體式加密等安全功能，協助系統建立可信任的儲存基礎，並整合至整體系統安全架構之中。

同一系統中的不同儲存角色

嵌入式平台通常同時具有多種儲存需求。對於重視高傳輸效能與低延遲的子系統，可採用以 PCIe NVMe 為基礎的 FerriSSD；而對於受限於功耗、尺寸或成本的控制子系統，則可採用符合 eMMC 5.1 標準的 Ferri-eMMC。

在同一平台中採用來自相同產品系列的儲存裝置，可透過一致的生命週期管理、技術支援及儲存架構，簡化系統整合、產品驗證及供應鏈管理。

當然，不同子系統仍可能因介面規格、功能需求或產業認證（如車用、工業或醫療等）而需要額外驗證。然而，建立在一致的儲存平台之上，仍有助於降低開發複雜度，並提升系統長期維護與管理的效率。

維持產品生命週期的一致性

對於長生命週期系統而言，最大的挑戰之一，是如何讓產品在後續量產及長期供貨期間，持續維持與最初驗證階段相同的行為與特性。

控制晶片、NAND 或韌體等元件的變更，都可能改變裝置的延遲特性、錯誤率及背景管理機制的運作方式。這些差異未必會立即顯現，但隨著產品長時間運作，可能逐漸累積並影響系統穩定性。

採用具備受控配置及完整生命週期支援的儲存裝置，可有效降低上述風險。產品驗證階段所確認的運作特性，能更準確地代表後續量產版本，不僅可降低重新驗證的需求，也能減少因元件變更而導致現場故障的可能性。

這樣的設計同時也能簡化系統開發與後續維護。軟體與硬體開發可建立在穩定且一致的儲存裝置特性之上，而無須持續因應元件版本差異所帶來的變動。

長期穩定運作比峰值效能更重要

對於需要長期部署的嵌入式系統而言，真正重要的並非追求最高的峰值效能，而是在整個產品生命週期中維持穩定且可預期的運作表現。

慧榮科技的 Ferri 產品系列專為長生命週期嵌入式應用而設計，透過內部管理 NAND 的運作特性，並在產品生命週期內維持與驗證階段一致的運作行為。結合整合式架構、完善的生命週期管理，以及 NAND 老化管理機制，Ferri 能在長期部署環境中提供穩定可靠的儲存效能。

對於長生命週期系統而言，真正決定產品可靠性的，不只是規格書上的效能數據，而是儲存裝置是否能在整個使用期間持續維持與驗證階段一致的運作表現。唯有如此，系統才能長期穩定運作，避免在部署多年後出現難以診斷的間歇性故障，降低維護成本與現場服務風險。

如需了解更多 Ferri 系列產品資訊，請造訪
www.siliconmotion.com 或發送電子郵件至 ferri@siliconmotion.com