

藉由AEC-Q004規範助力IC設計業者進入汽車供應鏈

◎宜特科技 產業服務部 林忠逸

前言

在汽車產業中，IATF 16949 被視為進入汽車供應鏈的「基本門票」。

對於具備設計與製造一體化能力的IDM (Integrated Device Manufacturer，整合半導體元件製造商)而言，通常已取得IATF 16949認證，以確保其製程品質管理系統符合車廠與Tier 1的嚴格要求。台灣IC設計業者則必須與這些已取得IATF 16949認證的IDM競爭車用市場，在缺乏自有製程的情況下，如何展現等同車規品質水準，成為其能否進入汽車供應鏈的關鍵挑戰。

因此，AEC (Automotive Electronics Council，國際汽車電子協會)特別在其零缺陷管理體系中提出AEC-Q004《Automotive Zero Defect Framework》，要求Fabless業者在設計防錯與可靠度驗證階段即納入Mission Profile參數，並透過對代工與封測夥伴的品質監督與統計防錯機制，確保車用元件能在設計與製造兩端均達到車規壽命與可靠度要求。

本文以AEC-Q004為軸，將車廠推動的零缺陷文化透過六大支柱落地於半導體供應鏈，並以AEC-Q的統計防錯 (PAT、SYL、SBL)與三層防線 (Physical/Electrical/Statistical)構築設計—製造—測試的閉環；同時結合IATF 16949、AEC-Q100、ISO 26262與ASP外包治理，使Fabless得以以統一品質語言與Foundry/OSAT對接，滿足車規壽命與可靠度要求，邁向系統化零缺陷。

一、車用晶片嚴格的Mission Profile與壽命要求

車用晶片需滿足長時間(如15年

壽命，或約1萬小時以上的動態運作)、溫度範圍 - 40°C 至 +125°C 甚至更高、啟動週期超過數萬次。因此，設計階段須納入工作溫度、操作時間及必要之P/E週期，以確保在長期操作後仍具資料保持能力。因此，AEC要求在設計防錯與可靠度驗證階段即納入Mission Profile參數以確保車用元件能符合預期的設計與生產的目的。

二、車廠驅動的零缺陷品質文化

歐系車廠如BMW、Volkswagen、Audi自2018年起積極推動「零缺陷 (Zero Defect)」理念，要求半導體供應鏈從設計、製造到測試皆以風險思維貫穿。前述車廠供應商管理文件中明確提出，半導體供應鏈需建立貫穿IATF 16949、AEC-Q100與AEC-Q004的品管與防錯機制，並以零缺陷為長期目標。前述需求趨使AEC於2020年提出AEC-Q004，以具體化零缺陷實施框架。

三、AEC-Q004與IATF16949/ISO26262/AEC-Q100的整合關係

AEC-Q004《Automotive Zero Defect Framework》於2020年由AEC發佈，AEC-Q004並非取代現有標準，而是作為跨標準的零缺陷延伸框架，使設計、製造與測試流程形成統一語言。AEC-Q004依據「零缺陷導向」作為系統性延伸，整合IATF16949的流程導向、AEC-Q100的應力與可靠度測試、ISO 26262的功能安全思維，並以統計防錯與持續改善形成閉環管理。



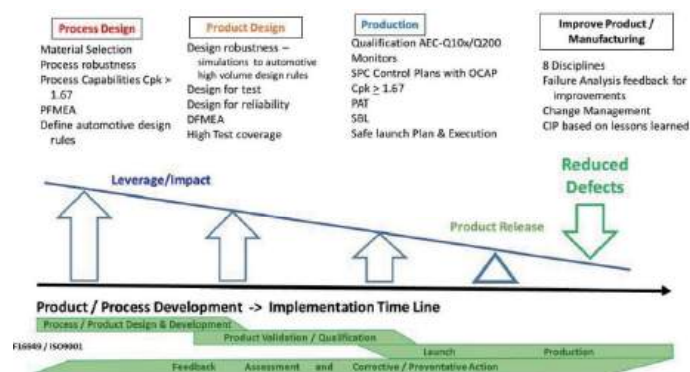


圖1 AEC-Q004 零缺陷實施架構

表1 各主流車規標準與AEC-Q004的對應

標準	核心目的	AEC-Q004 對應
IATF 16949	品質管理與流程改善	統合防錯流程、連結核心工具 (FMEA, SPC, PPAP)
AEC-Q100	產品應力與可靠度驗證	導入 Mission Profile 與持續監控
ISO 26262	功能安全與風險思維	結合安全目標與可靠度要求

AEC-Q004 透過此整合，讓車用晶片供應鏈中的設計、製造與測試能以統一語言運作。

四、AEC-Q004 六大支柱

AEC-Q004目的在於建立可與現有車規供應鏈並行的零缺陷管理框架。該框架透過六大支柱（Six Pillars）構成完整閉環：

- 1.設計防錯（DFMEA、DFT、DFM、DFR）
- 2.外包製程監督（PFMEA、CP、SPC）
- 3.測試與良率分析（SPC、PAT）
- 4.應用程度評估（ISO 26262、車用環境）
- 5.持續改善（ORT、SPC、CIP）
- 6.問題解決（EFA、PFA、8D、FTA）

上述六大支柱可視為Fabless與Foundry/OSAT在品質語言上的共通基礎。

Zero Defect 架構的六大支柱



圖2 Zero Defect 六大支柱

眾所周知，IATF 16949是汽車產業的品質管理共通語言。其透過與六大核心工具達到防錯效果，而AEC-Q004能讓IC設計公司與Foundry、OSAT、Tier1供應商在流程、風險與驗證方法上使



用一致邏輯，避免「設計端語言」與「製造端語言」斷層。有鑑於AEC-Q004的六大支柱描述的是管理方向，而IATF 16949核心工具提供了具體操作手段：

- 1.FMEA支撐「設計防錯」與「應用與能力」的風險預防；
- 2.APQP/Control Plan對應「製程監督」，確保製造流程有計畫、有控制；

- 3.SPC/MSA支援「測試與良率分析」，以統計手段量化變異與量測信度；
- 4.PPAP/CIP對應「持續改善」，確保產品變更與量產品質穩定；
- 5.CAPA/8D則落實「問題解決」的再發防止。

彙整AEC-Q004六大支柱與IATF16949核心工具之對應關係，如下表：

表2 AEC-Q004與 IATF16949 核心工具對照表

AEC-Q004 支柱	主要內容	對應 IATF 16949 核心工具
設計防錯	DFMEA、DFT、DFR、Redundancy、Design Review	FMEA
外包製程監督	PFMEA、Control Plan、SPC、OCAP、Process Audit	APQP / Control Plan
測試與良率分析	PAT、SBL、SYL、Yield Monitoring、Data Collection	SPC / MSA
應用與能力	Mission Profile、Derating、ISO 26262、Stress-Strength Analysis	DFMEA / MSA
持續改善	Wafer Monitoring、Defect Tracking、CIP、ORT	PPAP / CIP
問題解決	8D、FTA、EFA、PFA、Root Cause Analysis	CAPA / Problem Solving Process

五、統計防錯機制：Outlier、SYL、SBL

AEC-Q001《Part Average Testing》與AEC-Q002《Statistical Yield Analysis》是AEC所制定的兩項核心統計防錯規範，兩者共同構成AEC-Q004零缺陷架構中「統計防錯（Statistical Defect Prevention）」的基礎，AEC-Q001與AEC-Q002定義了Outlier(異常元件)與良率統計界限，用以過濾異常批次與異常分佈的產品。

1.Outlier：

以Part Average Test (PAT)找出異常樣本。PAT是AEC-Q所規範的統計防錯方法，用於在同一批晶片（Lot）中找出電性參數異常偏離的個別樣本。其原理是：在同批生產的所有晶粒中，針對關鍵電性測項（如漏電流、閾值電壓等），建立統計分佈並計算平均值與標準差。若

某顆晶粒的測試數據超出平均值 $\pm n\sigma$ ，即視為異常樣本（Outlier）。這些異常樣本雖可能仍在規格範圍內，但其偏離群體趨勢的行為顯示潛在缺陷或製程不穩，因此須在出貨前剔除或進行工程分析。PAT的目的在於以統計方式提前篩出「隱性不良（latent defect）」晶粒，防止早期失效，實現車規零缺陷品質目標。

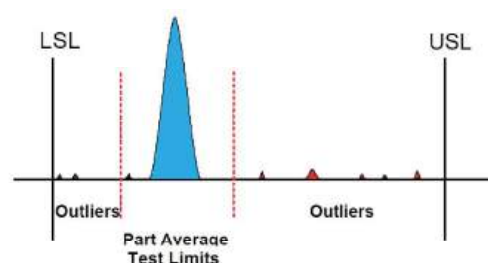


圖3 Part Average Test (PAT) 統計概念



2.SYL (Statistical Yield Limit)：

良率低於平均值-3 σ 批次需剔除。
在 AEC-Q統計防錯架構中，SYL是用來偵測批次良率異常偏低的警示指標。當某批次的整體良率低於長期平均值的-3 σ 時，代表該批次表現已超出正常變異範圍，極可能隱含製程、設備、原材料或測試條件的異常。這樣的批次若不剔除，將使潛在失效流入後段或客戶端，違反零缺陷原則。

3.3.SBL (Statistical Bin Limit)：

當某一測試分類 (Bin) 的良率比例高於長期平均值的+3 σ 時，代表該批次的測試結果顯著偏離常態分佈，可能是測試條件放寬、分類設定錯誤或測試覆蓋不足所造成的「假性高良率」現象。為防止潛在缺陷或測試異常被掩蓋，需啟動批次調查，以確認良率提升

是否真為製程改善或系統異常，確保零缺陷管理的真實性與可追溯性。

六、AEC-Q004 的三層防錯架構

AEC-Q004將六大支柱橫向展開，同時縱向分為三層防錯架構，以確保從設計到量產的全流程風險防控：

- 實體層 (Physical)：製程SPC、OCAP (Out-of-Control Action Plan)。
- 電性層 (Electrical)：EDS (Electrical Die Sort), Test Coverage。
- 統計層 (Statistical)：PAT、SBL、SYL、Outlier Control。

AEC-Q004以三層防線確保六大支柱的落實，使零缺陷管理由設計延伸至量產與改善階段，形成從實體特徵、電性行為到統計監控的完整閉環。

表3 AEC-Q004 三層防線 × 六大支柱交叉矩陣

項目	實體層 (Physical)	電性層 (Electrical)	統計層 (Statistical)
設計防錯	● 設計階段導入 DFR 與 DFM 以避免結構性失效 ● 考量 Process Capability (Cpk $\geq$ 1.67)	△ 於設計階段考量 Test Coverage 與 DFT 架構	△ 設計階段建立 SC List 以支持統計分析
外包製程監督	● 監督 Foundry 製程能力與 SPC 穩定性● OCAP 異常行動計畫	○ 透過 CP 與 Audit 確保 Electrical Test 站點穩定	● PFMEA / SPC 資料閉環回饋
測試與良率分析	△ 以結構性 Defect 分析支持良率改善	● PAT 統計、Bin 分佈	● Outlier / SYL / SBL 批次管控
應用與能力評估	△ 依車規 Mission Profile 評估材料與 Package 熱應力	● 驗證電性壽命 (HTOL、HAST) 與 ISO 26262 ASIL 需求	△ 以 Stress-Strength Model 支持可靠度統計驗證
持續改善	● 導入製程監控指標、定期 Cpk 追蹤	○ 透過 SPC 支援改善	● CIP 與 Wafer Level Yield Trend 改善
問題解決	○ 針對 Physical Defect 實施 FA / EFA 分析	● 藉 FA / 8D 追溯 Fail 模式與根因	● 以 FTA 統計模式支援根因驗證

符號說明：

- 主要關聯→該層與該支柱之核心對應。
- 輔助關聯→在特定專案中具輔助作用。
- △ 次要關聯→間接支援或延伸應用。

七、IC設計業與與車用外包製程管理 (Automotive Service Package, ASP)

汽車產業對半導體供應鏈的品質要求極高，為符合 AEC-Q004對於

外包監督與持續改善要求，Foundry與 OSAT必須建立IATF 16949品質管理系統，而Fabless IC設計公司須導入ISO 9001並應用六大核心工具(APQP,CP,FMEA,



MSA,SPC,PPAP)與Foundry、OSAT等外包商對接，形成零缺陷文化與風險導向品質管理體系。對此，Fabless車用晶片設計廠商需與Foundry、OSAT

建立Automotive Service Package (ASP)制度。ASP是針對汽車應用的外包管理機制，其核心在於確保代工製程符合車規穩健性。

表4 ASP與商用製程差異對照表

類別	項目	汽車應用要求	ICT產品差異
Route	APQP / PPAP / Control Plan	必須實施	僅部分流程
SPC	Cpk ≥ 1.67	具體門檻要求	視情況
OACAP	Out of Control Action Plan	強制要求	可選用
OQA	PAT、SYL、SBL 統計分析	強制實施	視情況

Fabless IC設計公司透過下列措施，可確保與代工廠間的品質協同符合車規期待：

(1)建立設計－製造－測試三階聯防：

由設計階段的DFMEA辨識潛在失效模式，進而建立SC (Special Characteristics) 清單標示關鍵控制項；接著在製造階段透過PFMEA與Control Plan落實過程風險防控；最後於測試階段以MSA與SPC確保量測系統精度與製程穩定，並以PPAP完成整體設計與製造可追溯性驗證，形成設計－製造－測試層層管控的品質防線。

(2) 外包溝通與監督：

在外包管理層面，需確保代工廠(Foundry與OSAT)製程穩定性，透過SPC (統計製程管制) 監控關鍵製程能力，確保製程變異維持在可控範圍內；同時運用SBL (Statistical Bin Limit) 與SYL (Statistical Yield Limit) 進行良率與測試分佈監測，及早發現異常批次或潛在系統性偏差，確保外包製程與測試結果的穩健性與一致性。

(3)文件化管理：

包含與外包夥伴簽訂車用品質協議，以明確界定雙方的品質責任

與監督要求；同時採用PPAP Level 3文件制，確保產品設計、製程控制與驗證資料具可追溯性與一致性；並依據VDA 6.3稽核原則，定期對供應鏈進行製程與品質管理審查，確保整體外包體系符合車規標準與零缺陷管理要求。

八、結語：AEC-Q004 是 Fabless 跨入車規市場的關鍵語言

- 隨著Tier1與OEM對可靠度與回覆速度的要求提升，IC設計公司需面對下列問題：
- 特殊測試需求與較嚴謹可靠度(如高溫 Qual) 測試
- 客戶稽核(Audit)與快速RMA應變
- 工程變更管理(Change Management)
- 外包供應鏈即時追蹤與應變機制

AEC-Q004是Fabless以品質語言與車廠對話的橋梁。其不僅是一份品質文件，而是一個協同機制。透過六大支柱的連結，IC設計公司得以以「設計防錯、製程監督、統計防錯」三位一體的方式進入零缺陷導向的汽車供應鏈。未來，AEC-Q004將持續作為車用半導體品質管理的共通語言，推動整體產業邁向系統化零缺陷。

