

STP Part 2: The Election Process

IEEE 802.1D Spanning Tree Protocol — 完整選舉流程與實戰圖解筆記

主題: Spanning Tree Protocol (STP 2 - Election Process) 標準規範: IEEE 802.1D

核心角色: Root Bridge / Root Port / Designated Port / Blocking Port

1. STP 基礎概念與 BPDU 封包結構

在二層區域網路 (LAN) 中，為了避免單點故障 (Single Point of Failure) 並提供高可用性，網路工程師會在交換機之間建構備援鏈路 (Redundant Links)。然而，未經控制的二層物理環路會引發廣播風暴 (Broadcast Storm)、多重幀複製 (Multiple Frame Copies) 以及 MAC 地址表不穩定 (MAC Table Instability)。Spanning Tree Protocol (STP, IEEE 802.1D) 的核心使命，即是在物理環路中自動計算出無環路的邏輯樹狀拓撲，將多餘的備援路徑置於阻塞 (Blocking) 狀態。

Bridge Protocol Data Unit (BPDU) 類型與欄位分析

STP 交換機之間透過傳遞 BPDU (橋接協定資料單元) 幀來交換網路拓撲資訊與進行選舉。所有 STP BPDU 皆發送到 IEEE 預留的 Multicast MAC 地址 **01:80:C2:00:00:00**。根據筆記與協議規範，BPDU 主要分為兩種型態：

- **Configuration BPDU (配置 BPDU)**：由 Root Bridge 生成並沿著樹狀結構向外發送，用於全網 STP 選舉、拓撲計算與週期性維持（預設每 2 秒發送一次 Hello 封包）。其重要欄位包含 Root ID、Root Path Cost、Bridge ID、Port ID、Message Age、Max Age (預設 20s)、Hello Time (預設 2s) 與 Forward Delay (預設 15s)。
- **Topology Change Notification (TCN) BPDU (拓撲變更通知 BPDU)**：當下游交換機偵測到鏈路 Up/Down 變更時發起，沿上游傳遞至 Root Bridge，通知全網將 MAC 地址表老化時間 (Aging Time) 從預設 300 秒暫時縮短為 Forward Delay (15 秒)，以快速刷新失效的 MAC 映射。

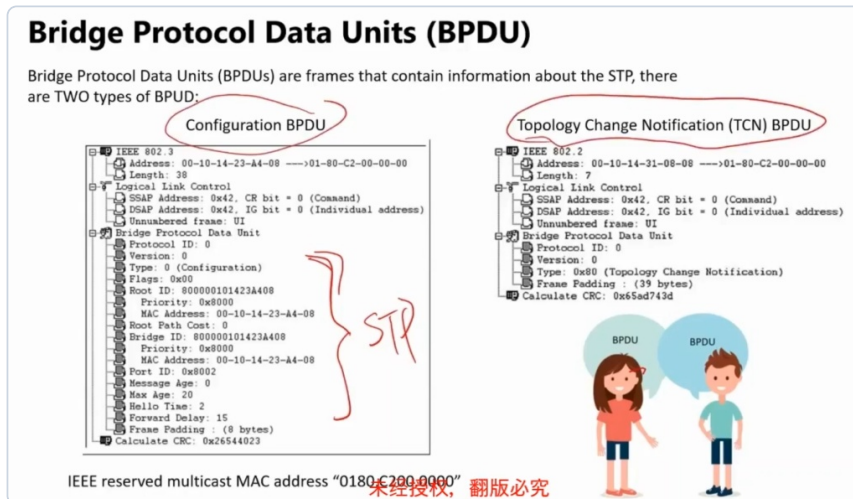


圖 1：Configuration BPDU 與 Topology Change Notification (TCN) BPDU 封包內容與結構剖析

關鍵原理：802.1D 與 VLAN 的關係

原始的 IEEE 802.1D (Classic STP) 是不具備 VLAN 感知能力 (Not VLAN-aware) 的。在 IEEE 開發 802.1D 規範的早期，二層網路中尚未引進 VLAN (IEEE 802.1Q) 的概念。因此，在傳統 802.1D 環境中，無論整個網路劃分了多少個 VLAN，均僅運行單一的 Spanning Tree 實例 (Single Spanning Tree, CST)。直到後來 Cisco 推出 PVST/PVST+ 系統，才實現了多 VLAN 獨立選舉機制。

2. STP 選舉四大核心步驟 (The Four-Step Election Process)

當網路中啟動 STP 後，交換機透過交換 BPDU，嚴格按照以下四個順序步驟完成拓撲建構與角色評選：

步驟	選舉目標	評選依據與 Tie-Breaker 裁決順序	數量與分布
1	Elect Root Bridge	Lowest Bridge ID (BID)	全網 (L2 Domain) 僅 1 個
2	Elect Root Ports (RP)	Lowest Path Cost → Lowest Sender BID → Lowest Sender Port Priority → Lowest Sender Port ID	每台非根交換機 1 個
3	Elect Designated Ports (DP)	Lowest Path Cost → Lowest BID → Lowest Port Priority → Lowest Port ID	每個物理網段/衝突域 1 個
4	Elect Blocking Ports (BP)	未成為 Root Port 或 Designated Port 的其餘所有埠皆進入 Blocking 模式	依據備援鏈路數量而定

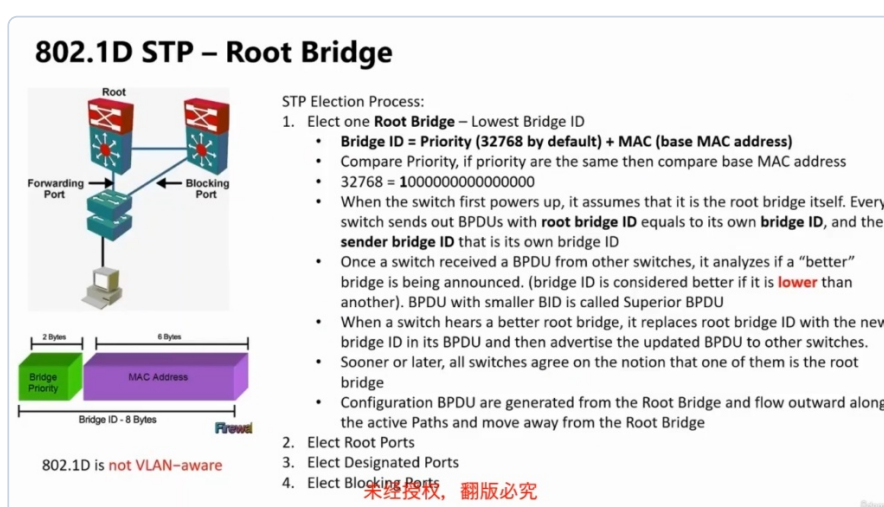


圖 2：802.1D STP 核心選舉流程與 Root Bridge 及 Bridge ID (8 Bytes) 結構概覽

3. 步驟一：根橋接器選舉 (Elect Root Bridge)

根橋接器 (Root Bridge) 是整個 STP 邏輯樹狀拓撲的樹根。全網所有路徑成本 (Path Cost) 均以 Root Bridge 為起點進行累加計算。

Bridge ID (BID) 結構組成

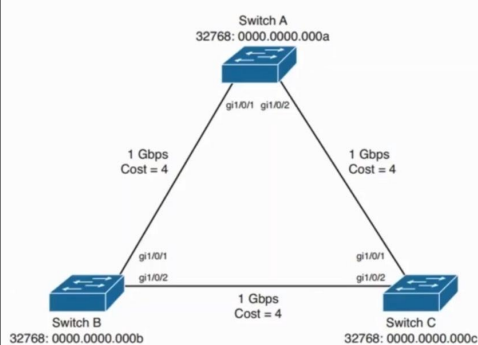
Root Bridge 的選舉完全由 **Bridge ID (BID)** 決定，BID 總長度為 8 Bytes (64 bits)：

- **Bridge Priority (橋接器優先權 - 2 Bytes / 16 bits)**：預設值為 32768 (二進位 1000000000000000)。
- **Base MAC Address (基本 MAC 地址 - 6 Bytes / 48 bits)**：交換機背板或主控板的固定實體 MAC 地址。

Root Bridge 選舉規則與運作細節：

- **最小 BID 獲勝**：全網中 Bridge ID 最小者 (Lowest BID) 順利當選 Root Bridge。
- **優先比較 Priority**：交換機首先比較 Priority，數值越小越優先。
- **Priority 相同時比較 MAC**：若 Priority 相同，比較 Base MAC Address，數值越小者 (Lowest Base MAC) 獲勝。
- **動態宣告與收斂**：交換機開機初始，皆自我假定为 Root Bridge，發送 Root ID = 自己 BID 的 BPDU。當接收到來自其他交換機更小的 BID (Superior BPDU) 時，立即改為採納並轉發新的 Root ID。最終全網收斂達成共識。

802.1D Example of Root Bridge Election



Keep in mind that the bridge ID consisting of two parts: **Bridge Priority** and **MAC Address**. When bridge priorities are equal, MAC Address will be the tie breaker.

As all of switches have equal bridge priority values. Therefore the switch with lower MAC Address – Switch A – has been elected as the root bridge.

未经授权，翻版必究

圖 3：802.1D Root Bridge 選舉實例（當 Priority 均為 32768 時，MAC 地址最小的 Switch A 勝出）

實例分析 (參照圖 3)： Switch A、Switch B 與 Switch C 的 Priority 均為預設值 32768。進一步比較 MAC 地址：

- Switch A: 32768: 0000.0000.000a
- Switch B: 32768: 0000.0000.000b
- Switch C: 32768: 0000.0000.000c

Switch A 具備最小 MAC Address，因此成功獲選為整個網路的 **Root Bridge**。

4. 步驟二：根埠選舉 (Elect Root Ports)

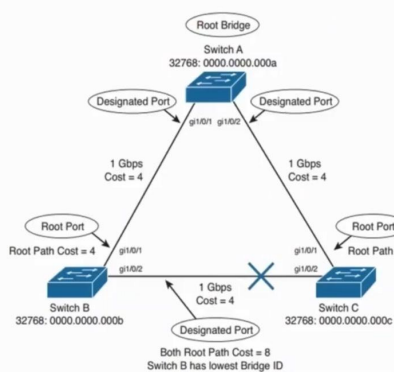
當 Root Bridge 選出後，每一台**非根交換機 (Non-Root Switch)** 必須在自己的介面中選出一個「通往 Root Bridge 最短路徑」的埠，稱為 **Root Port (RP)**。Root Bridge 本身無 Root Port。

Root Path Cost 計算與 Tie-Breaker 裁決順序

非根交換機若有多個介面可通往 Root Bridge，將依照以下嚴格的四階層順序進行 Tie-Breaker 比對：

1. **Lowest Path Cost to Root Bridge (最低累積根路徑成本)：** 成本記載於 BPDU 內，**僅在入口埠 (Inbound Port) 接收 BPDU 時累加該介面的 Cost**。
2. **Lowest Sender BID (最低發送方 Bridge ID)：** 若 Path Cost 相同，比較對端 (上游發送者) 的 BID。
3. **Lowest Sender Port Priority (最低發送方埠優先權)：** 若發送方 BID 亦相同，比較對端埠 Priority (預設 128)。
4. **Lowest Sender Port ID (最低發送方埠號)：** 最終比較對端發送埠的 Port ID (Port ID = Port Priority + Port Number)。

802.1D STP – Root Port



STP Election Process:

1. Elect one Root Bridge – Lowest Bridge ID
2. Elect **Root Ports (RP)**
 - No RP on Root Bridge
 - RP is the port closest to Root Bridge
 - RP is upstream facing towards Root Bridge
 - Election Order:
 - 1) Lowest Path Cost to Root Bridge
 - Cost is inside BPDU
 - Only calculate on inbound port
 - 2) Lowest Sender BID
 - 3) Lowest Sender Port Priority (128 default)
 - 4) Lowest Sender Port ID
 - Port ID = priority (128 default) + port number
3. Elect Designated Ports
4. Elect Blocking Ports

Link Speed	Cost (Revised IEEE Spec)	Cost (Previous IEEE Spec)
10 Gbps	2	1
1 Gbps	4	1
100 Mbps	19	10
10 Mbps	100	100

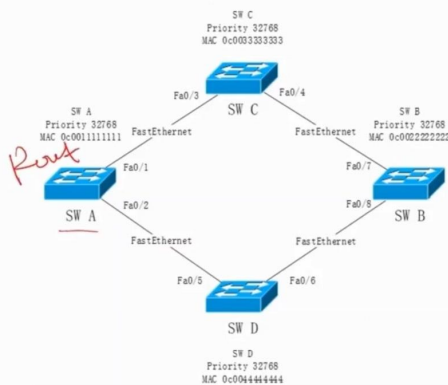
圖 4：Root Port 選舉原則與 IEEE 速率對應 Path Cost 標準對照表

IEEE 速率與 Path Cost 對照表

Link Speed (鏈路速率)	Cost (Revised IEEE Spec - 802.1t)	Cost (Previous IEEE Spec - 802.1d Original)
10 Gbps	2	1
1 Gbps	4	1
100 Mbps	19	10
10 Mbps	100	100

Root Port Election - Tie-Breaker 深度實例解析

802.1D Example of Root Port Election



1. SW A has smallest MAC so becomes Root Bridge
2. SW A send out BPDU to SW C and SW D with Cost = 0
3. SW C calculate cost based on Fa0/3, SW D calculate cost based on Fa0/5, both become Root Port
4. SW C send BPDU to SW B with cost 19, SW D send BPDU to SW B with cost 19
5. SW B received two BPDU with same cost, SW B calculate cost to Root Bridge based on inbound interface Fa0/7 and Fa0/8. The results is the same.
6. SW B need to compare Sender BID
7. SW C Sender BID is 32768 + 0c003.3333
8. SW D Sender BID is 32768 + 0c004.4444
9. SW C has a better Sender BID
10. SW B Fa0/7 becomes Root Port

未经授权，翻版必究

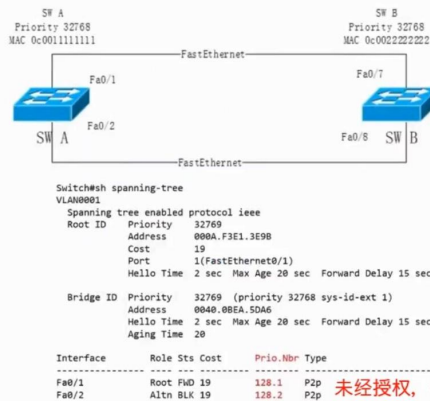
圖 5：Tie-Breaker 實例一：當兩路徑 Path Cost 相同時，比較 Sender BID 選出 Root Port

案例一：比較 Sender BID (參照圖 5)

SW A 為 Root Bridge。SW B 透過 Fa0/7 接至 SW C，透過 Fa0/8 接至 SW D：

- SW B 從 Fa0/7 收到經 SW C 轉發的 BPDU，Inbound Path Cost 累加為 19。
- SW B 從 Fa0/8 收到經 SW D 轉發的 BPDU，Inbound Path Cost 累加為 19。
- 兩路徑 Cost 相同 (19)，進一步比對對端的 **Sender BID**：
 - SW C Sender BID: 32768 + 0c00.3333.3333
 - SW D Sender BID: 32768 + 0c00.4444.4444
- SW C 的 Sender BID 比 SW D 更小，因此 **SW B Fa0/7 勝出獲選為 Root Port**。

802.1D Example of Root Port Election



1. SW A is Root Bridge
2. SW B Fa0/7 and Fa0/8 has same cost to Root
3. Compare Sender BID, it's the same
4. Compare Sender Port Priority, it's the same
5. Compare Sender Port ID
 - Port ID = Port Priority + Port Number
 - SW A Fa0/1 Port ID = 128.1
 - SW A Fa0/2 Port ID = 128.2
 - SW A Fa0/1 has smaller Port ID
 - SW B Fa0/7 is Root Port

圖 6：Tie-Breaker 實例二：雙鏈路直連，Path Cost 與 Sender BID 皆相同，最終比較 Sender Port ID

案例二：比較 Sender Port ID (參照圖 6)

SW A (Root Bridge) 與 SW B 之間採用兩條 FastEthernet 直連鏈路：

- SW B Fa0/7 與 Fa0/8 通往 Root Bridge 的 Path Cost 均為 19。
- Sender BID 均為 SW A (32768 + 0c00.1111.1111)。
- Sender Port Priority 皆為預設 128。
- 比較 SW A 對端發送介面的 **Port ID**：
 - SW A Fa0/1 Port ID: 128.1
 - SW A Fa0/2 Port ID: 128.2
- 128.1 小於 128.2，因此連接至 SW A Fa0/1 的 SW B Fa0/7 順利勝出成為 Root Port。

```
Switch# show spanning-tree VLAN0001
Spanning tree enabled protocol ieee
Root ID    Priority    32769
           Address    000A.F3E1.3E9B
           Cost      19
           Port      1 (FastEthernet0/1)
           Hello Time 2 sec  Max Age 20 sec  Forward Delay 15 sec

Bridge ID   Priority    32769 (priority 32768 sys-id-ext 1)
           Address    0040.0BEA.5DA6
           Hello Time 2 sec  Max Age 20 sec  Forward Delay 15 sec
```

Interface	Role	Sts	Cost	Prio.Nbr	Type
Fa0/1	Root	FWD	19	128.1	P2p
Fa0/2	Altn	BLK	19	128.2	P2p

5. 步驟三：指定埠選舉 (Elect Designated Ports)

選出 Root Bridge 與 Root Ports 後，必須在每個物理網段 / 鏈路 (Physical Segment) 上選出一個 Designated Port (DP)，負責該 Segment 的 BPDU 發送與數據轉發。

Designated Port 評選順序

1. **Lowest Root Path Cost**：該網段上到達 Root Bridge 累積 Path Cost 最低的交換機介面獲勝。

2. **Lowest BID (Bridge ID)**：若兩端交換機到達 Root 的 Path Cost 相同，比較兩者之 BID，數值小者獲勝。
3. **Lowest Port Priority & Port ID**：若為單台交換機自環 (Self-loop) 狀況，比較 Port ID。

重要定則：Root Bridge 上的所有介面角色

根橋接器 (Root Bridge) 上的所有啟用介面，預設均自動成為 **Designated Port (DP)**！因為 Root Bridge 到達自己的 Root Path Cost 為 0，絕對是全網最小。

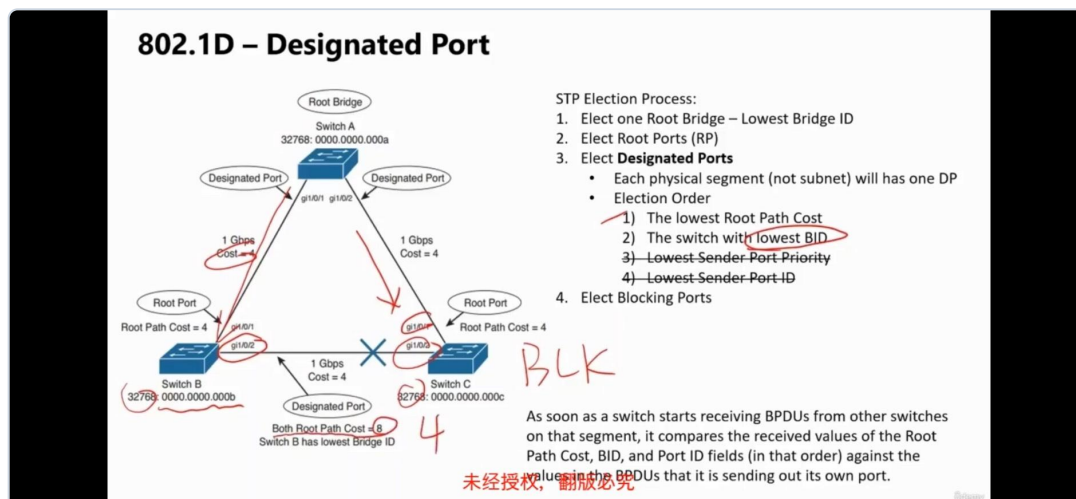


圖 7：Designated Port 選舉原則與 Switch B vs Switch C 競選 DP 分析

分析 Switch B 與 Switch C 之間的 Segment (參照圖 7)：

- Switch B gi1/0/2 到達 Root Path Cost = 4。
- Switch C gi1/0/2 到達 Root Path Cost = 4。
- 兩者 Path Cost 相同 (4)，進一步比較 Bridge ID：
 - Switch B BID: 32768: 0000.0000.000b
 - Switch C BID: 32768: 0000.0000.000c
- Switch B 擁有更小的 BID，因此 **Switch B gi1/0/2 贏得該 Segment 的 Designated Port (DP)**。

6. 步驟四：阻塞埠確定 (Elect Blocking Ports) 與全網綜合實例

Blocking Port (Alternate Port) 運作行為

完成 RP 與 DP 的選舉後，全網剩餘未獲得任何角色的介面將全部進入 **Blocking Mode (阻塞模式)**。

Blocking Mode 嚴格規則：

- **可接收 (Receive BPDU)**：繼續接收並處理 BPDU 封包，以動態監控網路拓撲變更。
- **不轉發 (Discard Frames)**：丟棄所有普通用戶數據幀 (User Data)，且不學習 MAC 地址。
- **不發送 (Cannot Send)**：絕對不主動發送任何數據幀。

802.1D – Blocking Port

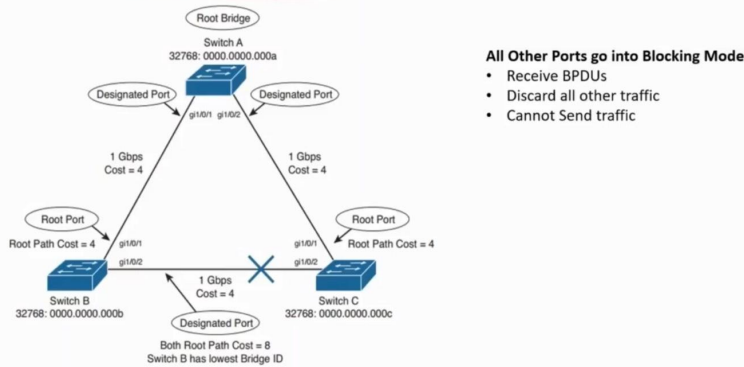


圖 8：Blocking Port 確定，成功建構邏輯無環路拓撲

在圖 8 拓撲中，Switch C 的 gi1/0/2 既非 RP，亦在 DP 競選中不敵 Switch B，因此 **Switch C gi1/0/2 被放入 Blocking 狀態**。

五台交換機大型 Topology 綜合選舉解構

802.1D STP Election Example

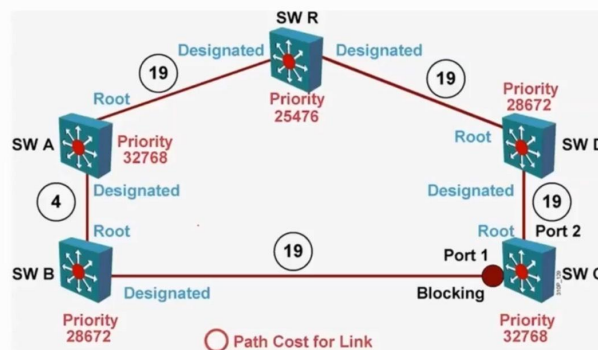


圖 9：五台交換機 (SW R, SW A, SW B, SW C, SW D) 綜合 STP Election 拓撲實例

五台交換機拓撲一步步推演 (參照圖 9)：

1. Step 1: Elect Root Bridge

比較 Priority: SW R (25476)、SW A (32768)、SW B (28672)、SW C (32768)、SW D (28672)。SW R Priority 25476 為全網最小，獲選為 Root Bridge！

2. Step 2: Elect Root Ports (RP)

- **SW A:** 到 SW R 直接鏈路 Cost = 19 → 朝向 SW R 的埠為 **Root Port**。
- **SW B:** 經 SW A 到 SW R (Cost 4 + 19 = 23)；經 SW C 到 SW R (Cost 19 + 19 + 19 = 57) → 朝向 SW A 的埠為 **Root Port**。
- **SW D:** 到 SW R 直接鏈路 Cost = 19 → 朝向 SW R 的埠為 **Root Port**。
- **SW C:** 經 Port 2 到 SW R (Cost 19 + 19 = 38)；經 Port 1 到 SW R (Cost 19 + 4 + 19 = 42) → **Port 2 為 Root Port**。

3. Step 3: Elect Designated Ports (DP)

- SW R 所有連接埠均為 **Designated Port**。
- SW A 與 SW B 間：SW A 到根 Cost 19，SW B 到根 Cost 23 → SW A 下埠為 **Designated Port**。

- SW B 與 SW C 間：SW B 到根 Cost 23, SW C 到根 Cost 38 → SW B 朝右埠為 **Designated Port**。
- SW D 與 SW C 間：SW D 到根 Cost 19, SW C 到根 Cost 38 → SW D 朝下埠為 **Designated Port**。

4. Step 4: Elect Blocking Port

SW C 的 **Port 1** 既不是 RP 也不是 DP，最終進入 **Blocking** 狀態！全網環路成功被解除。

7. 總結與考訊速記重點 (Key Summary)

STP Election 速記口訣：

- **Root Bridge:** 全網 Lowest BID (先比 Priority, 後比 MAC)。
- **Root Port:** 非根交換機上，Lowest Path Cost → Lowest Sender BID → Lowest Sender Port Priority → Lowest Sender Port ID。
- **Designated Port:** 網段上，Lowest Path Cost → Lowest BID → Lowest Port ID (Root Bridge 上的介面全為 DP)。
- **Blocking Port:** 剩餘介面，僅接收 BPDU，不轉發數據流量。
- **標準 Path Cost (802.1t):** 10G = 2, 1G = 4, 100M = 19, 10M = 100。