

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

LCD 廠目前的發展趨向於大世代的面板廠，由於客戶對產品的要求更加嚴苛，所以導致 LCD 廠於無塵室的建造及設備無塵等級的要求是非常重視，在半導體廠中，以機械標準介面 (Standard Mechanical Interface, 簡稱 SMIF) 作為使晶圓能處於在 Class 1 的一個無塵環境中，由於晶圓透過 SMIF 的設備傳送至每一道製程機台進行加工時，避免掉很多粉塵微粒子的影響，也大幅降低了無塵室建造的成本，由於 LCD 廠的面板並非與半導體晶圓傳送相同而是在一個開放式的卡匣中，這也導致粉塵微粒子更容易影響到面板的製程良率，所以面板廠潔淨室中的自動搬送系統 (Automated Material Handling System, 簡稱 AMHS) 就扮演了一個非常重要的角色，將 AMHS 維持在一定標準的潔淨度就變成是一個很重要的且非常棘手的問題。

從國際顯示製程前瞻技術研討會及展示會 (International Display Manufacturing Conference & Exhibition, 簡稱 IDMC)[2]，就有明確提出 LCD 無塵室機台規劃及擺設由小世代至大世代的演變下幾個重要的論點如下：

1. 須縮短玻璃面板的傳送時間為一個目標。
2. 須在有限空間內擺設最多設備，以降低無塵室建造所需的空間及花費。
3. 多功能的製程選擇性。
4. 在有限空間內發揮最大的產能。

而衍生所謂的設備與自動倉儲系統連接在一起的情形產生，這就導致產品的製程良率與倉儲間的關係更密不可分。

根據收集的資料中發現大多研究無塵室的流場多以物體為靜止不動的條件下去做分析，且在倉儲系統與機台間相對關係的分析資料上就更少，由於倉儲系統於搬送為動態過程，且儲存製程設備所需的玻璃，因此能朝這方面去研究，能使倉儲系統能保持在一個最乾淨的環境中，減少與機台間的微粒子影響，對於潔淨室的研究開發將會是一大突破，且在維持無塵室

產品高良率上會是非常有幫助的。

1.2 文獻回顧

馮天駿[1]利用原始設計分析出內部流場之均勻度與粒子滯留情形，針對氣流夾區域裝設擋板及配置整流板之兩種方案，與原始設計相比較其差異性，以及針對不同之塵埃粒徑、入口風速及自動運載裝置之速度做模擬分析，以了解參數變化對於整體流場之影響，並且由模擬的結果可知，為了使整體潔淨度提高及污染微粒迅速排除，氣流夾層區域必須控制得當，以避免內部迴流的發生，才得以達到最佳效能。

Yasuo Uozumi[2]於 IDMC 中介紹目前 LCD 產業世代的發展程由 1994~1995 年的第二代而當時的玻璃大小為 360mm X 460mm，400mm X 500mm 當時傳送並非全自動方式，1995~1997 年進入第三代，玻璃大小為 550mm X 650mm，此時開始了全面自動化，以潔淨室無人搬運車(automatic guided vehicle, 簡稱 AGV)當作全場自動化的應用，1999~2001 年進入第四代，玻璃大小為 730mm X 920mm，此時進入多元化的時代，挑高的自動倉儲系統，AGV 及高可靠度低成本的潔淨室無人軌道搬運車(rail guided vehicle, 簡稱 RGV)都開始運用於此世代，2002 年後至今由第五代、第六代、第七代、第八代，正式進入大世代由於面板面積過大開始全面將製程設備與倉儲系統聯結在一起，也提出 AMHS 未來會朝向一片一片玻璃傳送方式(Tray handing system)。

江文琪[3]以潔淨室中微環境為主要研究方向，深入探討其中之高潔淨區域-面板儲存區($0.1\mu\text{m}$ 微粒子)，著重於內部流場與污染粒子分佈的探討。研究內容包含：內部流場分析、開孔率配置以及塵埃粒子的沉積改善。利用有限體積法的軟體 FLUENT 來分析計算其結果，並採用暫態之動態網格(Moving Mesh)的方式，分析真實物體運動狀態之流場分析，以模擬現實狀況中，移動物體對內部氣流所造成之重大影響，由模擬的結果得知，為了使潔淨度提高及污染微粒排除迅速，潔淨室內部氣流分佈必須相當均勻，且避免迴流的發生，才得以達到最佳效能。

謝亞叡[4]利用套裝軟體 STAR-CD 作為進行模擬的工具，並以速度列車於單向或雙向軌道通行及有無開放旁通釋壓閥等參數進行了模擬分析，發現流場會在列車通過釋壓設備時產生壓力波峰值，而列車以時速 40、65 及 80 公里在雙向軌道通車過站時其壓力極值分別為 501.8、1549 及 2006 Pa；同時也利用改變釋壓井設計參數的不同找出最佳設計來將流場中壓力極值降到最低。

黃富加[5]研究工作台周圍的高架地板特性與 FFU 入口風速的變化，與潔淨室內流場均勻性之影響，且實際實驗量測潔淨室流場分析其流場特性分析且與模擬互相比較，實驗結果顯示，潔淨室其他 FFU 入口速度遵 0.5m/s 時，可以降低兩側 FFU 的入口速度為 0.3m/s。

Hu 等人[6]提出位於週遭環境與微環境(製程區域)間，新設計者增加緩衝區的構想，其評估結果顯示確實是使微環境能夠維持良好的清潔，有效的防止污染物從週遭環境越過到製程區域。除了微環境設計能有效降低製程污染外，然而能有效排出空氣帶走的微粒之高等級層流特性的無塵室要被設計；因此在無塵室內的速度分佈必然是均勻的，來提升產品的良率，所以氣體移動的方向與分佈就十分重要。

Yang 等人[7]以數值方法去討論無人移動之自動載具對整個室內流場影響，結果發現無人載具的速度與晶圓匣的位置是產生回流區的主要因素，間接影響產品良率。另外在設備附近的操作人員也因本身的走動會引起整個流場的變化，導致身上與環境中的微粒的傳播更強烈，加重污染整個製程。接著 Yang 與 Fu[8]使用有限元素法分析操作者來回走動至工作台之間的流場型態，結果顯示回流區會發生在操作者與工作台的周圍，而回流區便是產生污染微粒的源頭。

陳石法[9]分析在潔淨室內移動物體對器流流場與塵粒過散的影響及槽道中移動凸塊對熱傳增益的效果，此種物體與流體交互作用所誘導的流場、溫度廠及濃度場變化屬於動態的移動邊界問題。首先探討 AGV 移動及晶圓匣放置位置對氣流流場的影響，其次探討潔淨室內工作平台有/無加裝氣廉下，工作人員移動對氣流流場與為例子擴散的影響，分析解果得知當物體在流動的流體中運動時，物體推擠流體和流體填補因物體移動所產生

空洞的現象。此外，由捷竟是排除粒子的觀點而言，相對較小的工作人員或 AGV 移動速度及相對較大的氣流進口速度，有利於微粒子的排除。加裝氣簾能有效保護工作人員免於有害氣體之危害，但 AGV 上晶圓匣的放置位置則影響不大。

顏銘志[10]利用一緩衝區之設計，以垂直氣流控制方法避免微環境開啟時與外在環境之交叉污染，並進一步量測與分析此緩衝區之流場。研究內容也包括模擬操作人員對氣流場之干擾，及造成交叉污染的可能性，並分為數值模擬與實驗驗證兩部分。研究結果顯示，數值模擬與實驗量測之氣流場與微粒子污染濃度均非常吻合，利用垂直氣流形成緩衝區之設計，作為高污染區與清淨製程區的緩衝範圍，可以有效的避免微環境開啟時與外在環境之交叉污染。而微環境門開口之高度，也顯著的影響流場紊流強度與微粒子濃度擴散範圍，操作人員所造成的污染也可有效隔絕，其均可作為日後設計之參考依據。而數值模擬可瞭解微環內之氣流動態，也可為改善流場的預測模式。

蔡俊宏[11]之技術專欄中敘述在無塵室之污染微粒散播相關的氣流狀態，如流場產生的混合層效應、不均勻之噴出面、氣流內障礙物、間隔之間隙的影響、機台高溫的發熱面所引起的自然對流、高架地板的影響與氣流分流點的影響，這些流場皆關係著微粒的傳播狀態。蔡俊宏[12]利用紊流強度來解釋污染微粒子的傳遞與擴散途徑，若紊流較強的區域則易產生微粒子的擴散與沉積。

Tannou[13]使用計算流體動力學研究潔淨室內微環境的流場。Chung 等人[14]利用數值模擬探討潔淨室中設置兩個進氣口及兩個排氣口，在不同擺設位置及排列組合的情形下，再配合不同的進氣速度，對其所得的氣流分佈情形進行研究分析，研究結果顯示進排氣口擺設相對位置的變化，對於氣流分佈的影響相當重要。

Tannous[15]以 PHOENIC 商用數值軟體模擬迷你環境及 SMIF(Standard Mechanical Interface)內之流場及壓力場，文中探討三個例子(100%、70%、45%過濾器覆蓋率分別配合 50%、50%、70%的底部開孔率)，結果顯示 100%的過濾器配合 50%的底部開孔率可滿足較佳的潔淨度及正壓要求。

Marvell[16]彙整微環境系統內，作用在氣流及污染輸送的影响因素，結果顯示進風口位置的大小變化及進風口速度的大小為影响氣流分佈的主要因素，其速度大小的決定與室內潔淨度等級存在著正比的關係；但當入口覆蓋面積越小時，氣流的分佈均勻性就越差，因此為了兼顧氣流的均勻性，可改變入口速度分佈來達到目的，以有效排除污染物，達到 class1 甚至 class0.1 等級之微環境。另外也可試著改變入口氣流的方向及局部面積入口速度之大小，以減少產生迴流的可能性來改善潔淨室內潔淨度。

1.3 研究方法

在此章節中將會分成四個部份分別做討論，第一部份先針對自動倉儲的微粒子來源做一個詳細的探討，因為現有蒐集資料文獻中雖有探討微粒子在無塵室的移動，但並未詳加討論可能的發生的來源；第二部份針對目前實際上現有的自動倉儲不同的設計方式以STAR-CD套裝軟體探討其流場分佈，分別針對靜態及動態兩方面做討論；第三部份將整合上述兩部分討論其微粒子可能造成對自動倉儲內所儲存面板的影響，分別針對七個位置做探討，驗證STAR-CD軟體與實際現狀；第四部份則針對如何減少微粒子影響製程產品方式做討論。

本文所探討的自動倉儲其長寬高分別為 10.9m * 5.4m * 5.8m ，裡面共有四層棚位可以擺放面板，其餘相關設定如同後面章節 3.4 所做的說明。

第二章 雷射粒子計數

本論文所使用儀器為 LightHouse 公司產品，型號為 SOLAIR 3100 Plus 可量測範圍 $0.3\ \mu\text{m} \sim 25\ \mu\text{m}$ 的雷射粒子計數器，如圖 2-1。

2.1 雷射粒子計數器簡介

雷射粒子計數器在無塵室中被廣泛的利用在環境潔淨度的追蹤及量測，其廠牌眾多，針對本論文所使用的雷射粒子計數器做介紹，其本身有以下幾個本身的特色：

1. 靈敏度： $0.3\ \mu\text{m}$ 的靈敏度
2. 流率為 $1.0\ \text{CFM}$ ($28.3\ \text{LPM}$)
3. 同時察看 6 個大小的微粒子
4. 符合 JIS 標準
5. 5.7 吋觸控式螢幕
6. 大的儲存記憶體(3000 筆資料)
7. 4 個環境感知器



2.2 雷射粒子計數器使用方法

此雷射粒子計數器使用上是非常方便，當使用前先進入下方CFG按鍵中進入作設定，設定中包含很多如時間、日期、量測時間、查看範圍、循環量測次數……等，當設定完基本參數後按下MAIN按鈕幾可跳出，就可以開始量測，量測時壓下左下角的STAR壓下左下角的STAR即可開始量測，若在此時壓下左下角的STOP即可馬上停止量測，若梁側自動停止時右下角畫面會自動出現FINISHED。

當使用雷射粒子計數器時需注意下列幾點，避免量測時所產生的誤差：

1. 避免量測時人員走動影響量測結果
2. 避免放置震動設備上影響量測結果
3. 避免量測時擺放至過多電子儀器附近影響量測結果

4. 第一次使用前先將偵測延伸管內的微粒子清除乾淨，避免影響量測結果
5. 選用無塵室專用雷射粒子計數器，避免因計數器吸入的微粒子排出後影響量測結果

2.3 自動倉儲微粒子量測方式

由於自動手臂搬送系統於靜止時量測方式並無太大的困難，但由於動態量測時就會遇到一些需克服的地方，為了避免量測時的干涉狀況發生以及安全性的考量，所以量測手法就非常的重要。

量測位置如表2-1，其量測方式如下

1. 將雷射粒子計數器放置於FFU前方3mm處量測FFU部數值
2. 將雷射粒子計數器放置於儲存區中央位置量測數值
3. 將雷射粒子計數器放置於自動搬運手臂上方移動處及走行輪處先量測靜態不移動的數值
4. 將雷射粒子計數器放置於自動搬運手臂下方排風處先量測靜態不移動的數值
5. 將雷射粒子計數器放置於自動搬運手臂旋轉部下方先量測靜態不移動的數值
6. 將雷射粒子計數器放置於自動搬運手臂上方移動處及走行輪處，自動手臂此時只做單獨走行運動
7. 將雷射粒子計數器放置於自動搬運手臂下方排風處先量測，自動手臂此時只做單獨上升下降運動
8. 將雷射粒子計數器放置於自動搬運手臂旋轉部下方量測，自動手臂此時只做單獨旋轉運動

表 2-1 自動倉儲微粒子來源套討

自動倉儲的微粒子來源探討			
	區域	部	量測位置
1	FFU部		FFU出風口前3mm位置
2	面板儲存區		儲存區中央位置
3	自動搬運手臂	走行	自動搬運手臂上方移動處及走行輪
		升降	自動搬運手臂下方排風處
		旋轉	自動搬運手臂旋轉部下方



圖 2-1 雷射粒子計數器

第三章 數學模式與數值方法

在數值解析計算方面，解Navier-Stokes方程式的數值方法很多，包括隱式(Implicit)與顯式(Explicit)的有限差分法(Finite Difference Method)、有限體積法(Finite Volume Element)與有限元素法(Finite Element Method)等三大類。本文所使用的數值軟體為Star-CD套裝軟體，來模擬分析倉儲系統內部流場之情形，其計算方法乃根據Patankar[19]所提出之半隱性壓力聯算則(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation，簡稱為SIMPLE 法則)，可用於模擬流體速度、壓力、熱傳、質傳及化學反應過程等。

然而在網格方面，Star-CD使用結構化網格與非結構化網格兩種，其中非結構化網格(Unstructured Mesh)系統可處理較複雜的幾何外型問題，使建立網格與模擬分析上更加有彈性。

本文所採用的數值方法為半隱性SIMPLE 法之有限體積法與RNG $k-\epsilon$ 紊流模式，來解三維不可壓縮之平均雷諾Navier-Stokes方程式。以下則分別針對本研究所使用之紊流模式、數值計算方式及數值條件做介紹。

3.1 統御方程式

為簡化流場計算之複雜性，本研究擬對流場做如下之假設：

1. 三維流場之紊流場
2. 穩態，不可壓縮牛頓流體
3. 不考慮環境溫度之影響
4. 不考慮相變化之影響
5. 無任何的化學反應
6. 壁面為絕熱
7. 壁面不可滑移條件

基於上述之假設，流場必須符合質量守恆與動量守恆，即滿足連續方程式與動量方程式。

(1) 連續方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \chi_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3-1)$$

其中

ρ : 為密度

t : 為時間

χ_j : 為座標軸方向

u_j : 為 j 方向上的絕對速度。

(2) 動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial \chi_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial \chi_i} \quad (3-2)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial \chi_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \quad (3-3)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \chi_i} \right) \quad (3-4)$$

其中

t : 為時間

x_i : 為卡氏座標 ($i=1, 2, 3$)

u_i : 為流體在 χ_i 方向的絕對速度

$\overline{u_j}$: 為流體和座標系統的相對速度

p : 為全壓

τ_{ij} : 為應力張量 (Stress Tensor)

s_i : 為動量源項 (Momentum Source Term)

δ_{ij} : 為 Kronecker delta

s_{ij} : 為剪應變率張量。



3.2 紊流模式

由於紊流中所有的性質會隨時間與空間的方向，在一個平均值上下迅速且不規則的變動，所以大多數學者皆認同在紊流的理論分析中，可將瞬

時量視為時間平均部份和擾動部份之和。代入Navier-Stokes 方程式，並取其時間平均，整理可得雷諾平均方程式 (Reynolds Averaged Equation)：

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \chi_j} = \rho \bar{f}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \chi_i} + \frac{\partial}{\partial \chi_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \chi_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \quad (3-5)$$

其中對流項所產生的六個雷諾應力 (Reynolds Stress) $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ ，造成方程式個數少於變數個數的現象，即只擁有四個傳遞方程式 (連續方程式及三個不同方向之雷諾平均方程式)，卻欲求解十個未知變數 (平均壓力、三項平均分速及六個雷諾應力) 的情況。為了解決這個問題，便需要仰賴紊流模式的引入。

鑑於近年來學者們對於紊流模式的努力，已有許多不同的紊流模式產生，其主要可分為三種型態：單方程式模式 (One Equation Model)、雙方程式模式 (Two Equations Model) 及應力模式 (Stress Equation Model)。而在雙方程式模式方面，紊流效應是以等方向性之渦流或紊流黏滯係數來表示，並以紊流動能 k 值和紊流耗散率 ε 值來計算。

Jones 和Launde[20]所提出的標準 $k - \varepsilon$ 模式為大家所熟悉的模式之一。其半經驗模式公式是基於流場為完全紊流和忽略分子黏性效應的假設而導出，所以標準 $k - \varepsilon$ 模式比較適合於完全紊流流場型式。但由於此模式對於多種不同的紊流流場型式，仍有可接受的準確性，並且具簡單、經濟效應等優點，故可解釋此模式在流場和熱傳模擬應用的普遍性。

對於低雷諾數的紊流問題，RNG $k - \varepsilon$ 模式[21]比起標準 $k - \varepsilon$ 模式，更能獲得正確解，比較符合潔淨室內部流場問題。主要是因為此模式不同於在完全紊流條件下之標準 $k - \varepsilon$ 模式，RNG Method 是利用嚴謹統計方法來導出適合低雷諾數流場之傳遞方程式，對於室內只有局部紊流區域的流場，其具有相當高準確性。故本文採用此模式進行模擬，其是先將雷諾平均方程式中六個雷諾應力以 Boussinesq 假說[22]來表示：

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \chi_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial \chi_i} + \rho k \right) \delta_{ij} \quad (3-6)$$

$$k \equiv \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2} \quad (3-7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-8)$$

此模式所提出的紊流動能和耗散率傳輸方程式為：

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (3-9)$$

$$u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu \mu^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \eta_1 \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3-10)$$

$$\mu_{\text{wff}} = \mu + \mu_t \quad (3-11)$$

$$P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3-12)$$

$$P_B \equiv - \frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3-13)$$

其中

k : 為紊流動能

μ_t : 為紊流黏滯係數

$\sigma_{h,t}$: 為紊流的Prandtl係數。

平均應變率張量 S 及 h 分別為：

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3-14)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-15)$$

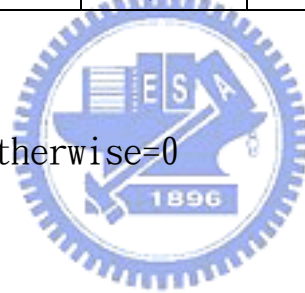
$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3-16)$$

其中 C_μ 與 f_μ 為經驗係數，在此設為常數，其中 σ_ε 、 $\sigma_{\varepsilon 1}$ 、 $\sigma_{\varepsilon 2}$ 、 $\sigma_{\varepsilon 3}$ 與 $\sigma_{\varepsilon 4}$ 分別為經驗係數值，其值參見下表3-1所示

表3-1 RNG $k-\varepsilon$ 紊流經驗係數表

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$
0.085	0.719	0.719	1.42	1.68	0或1.42	-0.387

$C_{\varepsilon 3} = 1.42$ for $P_B > 0$, otherwise = 0



3.3 壁函數

壁面設為無滑移邊界 (no slip condition)。

$$u=0, v=0, w=0$$

一般而言固體邊界適用於無法移動的邊界設定，如牆面、地板、天花板、阻礙物的接觸面，都可以使用此設定。

$$u=0, v=0, w=0 \quad [\text{m/s}]$$

k 與 ε 則採用 Near-Wall model 處理

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{k} \ln(Ey^+) & y^+ > y_m^+ \end{cases} \quad (3-17)$$

其中：

$$u^+ = (u - u_w) / u_\tau \quad (3-18)$$

u ：流體切線速度

u_w ：壁面速度

$$u_\tau : (\tau_w / \rho)^{1/2} \quad (3-19)$$

τ_w ：壁面剪應力

$$y^+ = \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y / \mu \quad (3-20)$$

k 為經驗係數，等於0.42， E 為經驗係數，等於9.0，而 y_m^+ 滿足下列方程式

$$y_m^+ - \frac{1}{k} \ln(Ey_m^+) = 0 \quad (3-21)$$



3.4 邊界條件設定

在邊界條件設定必須考慮實體運作情況，意即需符合物理現象，否則將影響模擬計算結果的真實性。本研究邊界包含：入口邊界條件(Inlet Boundary Condition)、出口邊界條件(Outlet Boundary Condition)及固定邊界條件(Wall Boundary Condition)。分項說明如下：

1. 入口邊界條件

在入口處條件作為初始計算之用途。於倉儲系統中之空氣皆經過濾網機組(Fan-Filter Unit簡稱, FFU)，吹至倉儲系統內，其分佈的方式有許多種，有分佈於上方、左右兩側、下方及混合型，本文採用左右兩側分佈方式作為倉儲系統的入口模式，且入口速度為0.5 m/s。

2. 出口邊界條件

於實際的倉儲系統中，其系統出口皆於高架地板銜接，排至無塵室回風式，使其倉儲內部為正壓狀態，而較口語化說明也就是倉儲系統內部氣體皆往外排出，本文中有對多種出口加以探討。

3. 固定邊界：

在固定邊界上，除了流場不同方向之速度值，為適用於無滑動條件（即 $u = v = w = 0$ ）外，其餘紊流動能值、紊流耗散率值大小，均假設其垂直壁面之通量為零，即 $\frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = \frac{\partial C}{\partial n} = 0$

3.5 粒子運動統御方程式

微小粒子的運動極為繁雜，為簡化起見，以下基本假設視為成立：

1. 工作流體為牛頓流體，流場不會因粒子加入而有所改變。
2. 粒子為球型剛體，運動時相互間無碰撞及合併狀況發生。
3. 不考慮溫度及濃度的影響。

基於上述假設，粒子的運動方程式可以下列描述：

(1) 動量方程式：

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_{am} + \vec{F}_b \quad (3-22)$$

其中 \vec{F}_{dr} 為 drag force

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |\vec{u} - \vec{u}_d| (\vec{u} - \vec{u}_d) \quad (3-23)$$

且 A_d 為粒子 cross-sectional area

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}_d^{0.687}) / \text{Re}_d & , \text{Re}_d \leq 10^3 \\ 0.04 & , \text{Re}_d > 10^3 \end{cases} \quad (3-24)$$

$$\text{Re}_d \equiv \frac{\rho |\vec{u}_d - \vec{u}| D_d}{\mu} \quad (3-25)$$

\vec{F}_p 為壓力

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p \quad (3-26)$$

V_d 為粒子體積

∇p 為壓力梯度

\vec{F}_{am} 為吸收粒子動量所改變的力

$$F_{am} = -C_{am} \rho V_d \frac{d(\vec{u}_d - \vec{u})}{dt} \quad (3-27)$$

$C_{am}=5.0$ 稱為 virtual mass coefficient

\vec{F}_b 為 general body force

$$\vec{F}_b = m_d [\vec{g}] \quad (3-28)$$



3.6 數值方法

本文利用數值方法，求解移動物體其周圍流場的變化，此數值方法乃是應用流體力學輔助軟體STAR-CD計算，紊流流場k-ε模式及不可壓縮流模式，解二維暫態Navier-Stokes equations，並利用有限容積法(finite-volume)以及PISO演算法來計算整個流場，物理變數定義於每個控制容積中心做積分而求得，如圖3-1所示，計算過程流程圖示於圖3-2。

有限體積法的守恆方程式(conservation equations)可表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \phi) + \text{div} (\rho \vec{u}_r \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) = S_\phi \quad (3-29)$$

其中 $\vec{u}_r = \vec{u} - \vec{u}_c$ 為流體速度 \vec{u} 與局部速度 \vec{u}_c 之相對速度， ϕ 為任意相關變數， Γ_ϕ 和 S_ϕ 分別為擴散係數(diffusion)和來源係數(source)。

將(3-29)式積分後可得：

$$\frac{d}{dt} \int_{V_P} \rho \phi dV + \sum_j \int_{S_j} (\rho \vec{u}_r \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) \cdot d\vec{S} = \int_V S_\phi dV \quad (3-30)$$

根據 (3-30)式，對各項作離散：

1. 擴散項(diffusion terms)

$$T_2 \approx \sum_j (\rho \vec{u}_r \phi \cdot \vec{S}) - \sum_j (\Gamma_\phi \text{grad} \phi \cdot \vec{S}) \equiv \sum_j C_j - \sum_j D_j \quad (3-31)$$

擴散項用中點近似法可下列來表示：

$$D_j \approx \Gamma_{\phi,j} \left[f_j^l (\phi_N - \phi_P) + \left\{ \text{grad} \phi \cdot \vec{S} - f_j^l \text{grad} \phi \cdot \vec{d}_{PN} \right\}_j \right] \quad (3-32)$$

其中 f_j 為幾何因子， \vec{d}_{PN} 為P到N之向量， $\Gamma_{\phi,j}$ 為面擴散係數。



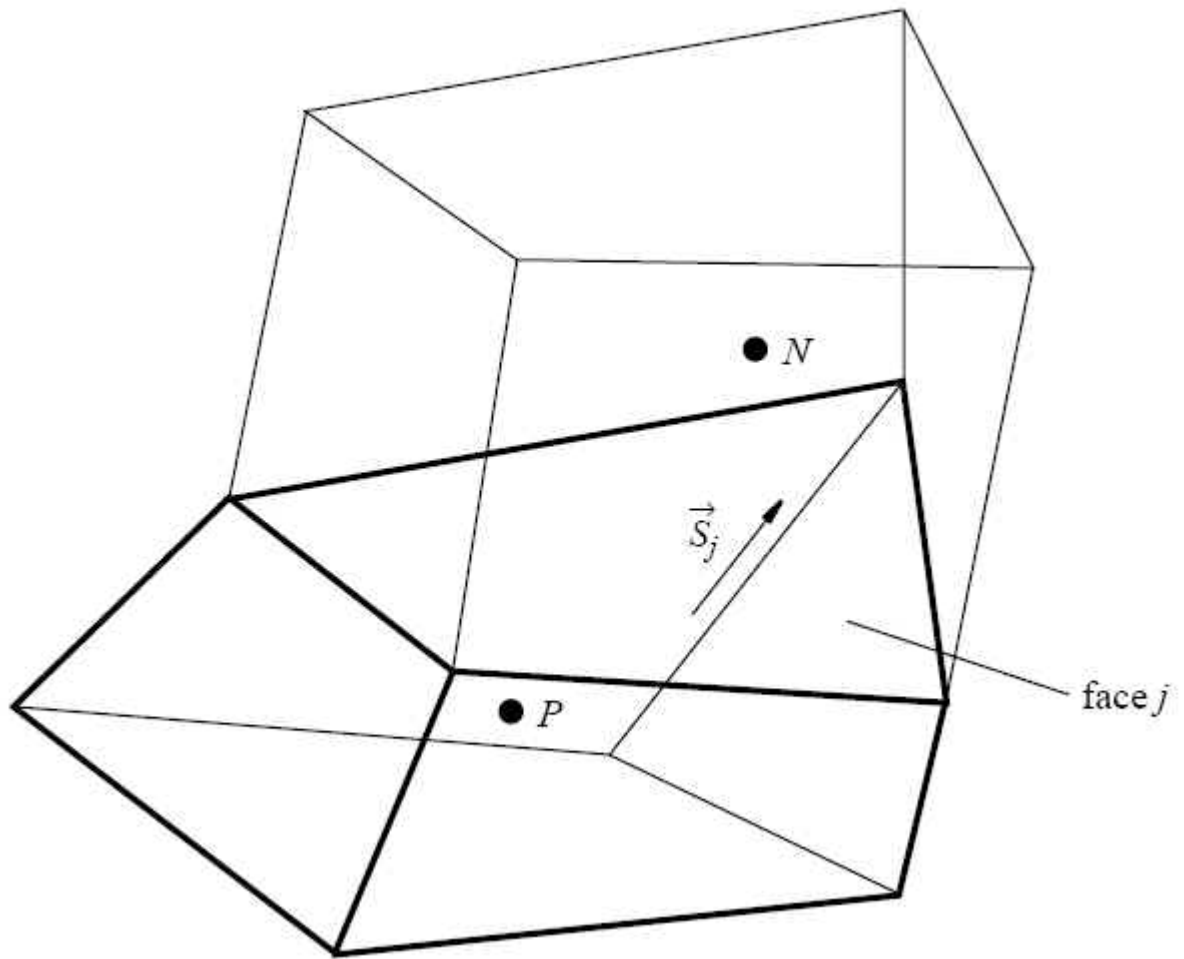


圖3-1 相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖

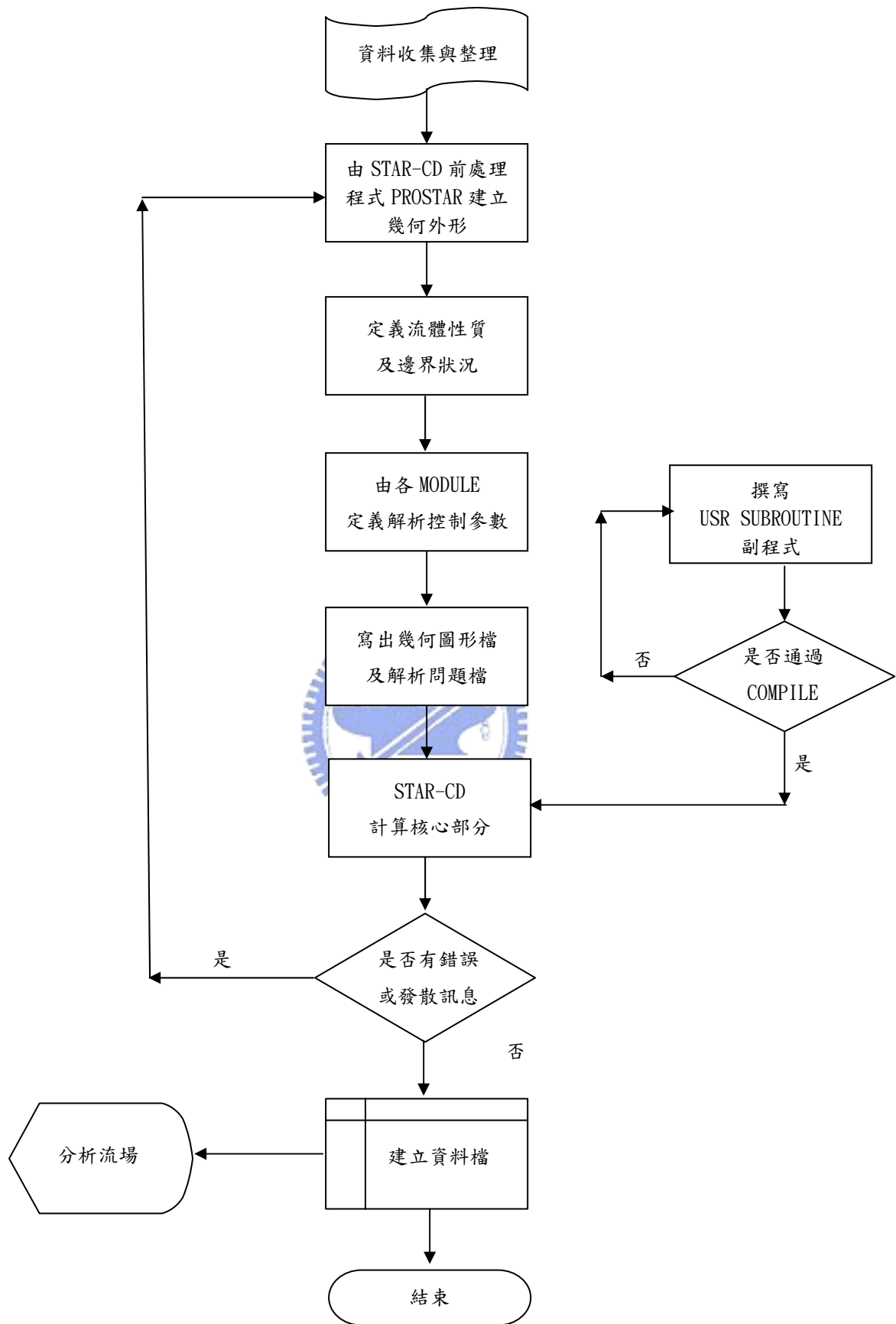


圖3-2 計算流程圖

2. 來源項(source term)

$$T_3 \approx S_1 - S_2 \phi_p \quad (3-33)$$

3. 對流項

對流項以Upwind Differencing Scheme處理，根據(3-31)式的推導，對流項可由下列表示：

$$C_j^{UD} \equiv F_j \begin{cases} \phi_p & , \quad F_j \geq 0 \\ \phi_{N+} & , \quad F_j < 0 \end{cases} \quad (3-34)$$

其中

$$F_j \equiv (\rho \vec{u}_r \cdot \vec{S})_j \quad (3-35)$$

F_j 為通過面 j 和 ϕ_j 的質通量如圖3-3所示，輔助值 ρ 和 Γ 由線性內插得到。

綜合上述，(3-30)式可表示為：

$$\frac{(\rho V)^n - (\rho V)^0}{\delta t} + \sum F_j = 0 \quad (3-36)$$

或

$$A_p \phi_p^n = \sum_m A_m \phi_m^n + s_1 + B_p \phi_p^0 \quad (3-37)$$

和

$$A_p \equiv \sum_m A_m + s_2 + B_p \quad (3-38)$$

其中

1. A_m 為對流(Convection)或擴散(Diffusion)的影響。

2. 計算通量為所有相鄰點的總和。

$$3. B_p \equiv \frac{(\rho V)^0}{\delta t} \quad (3-39)$$

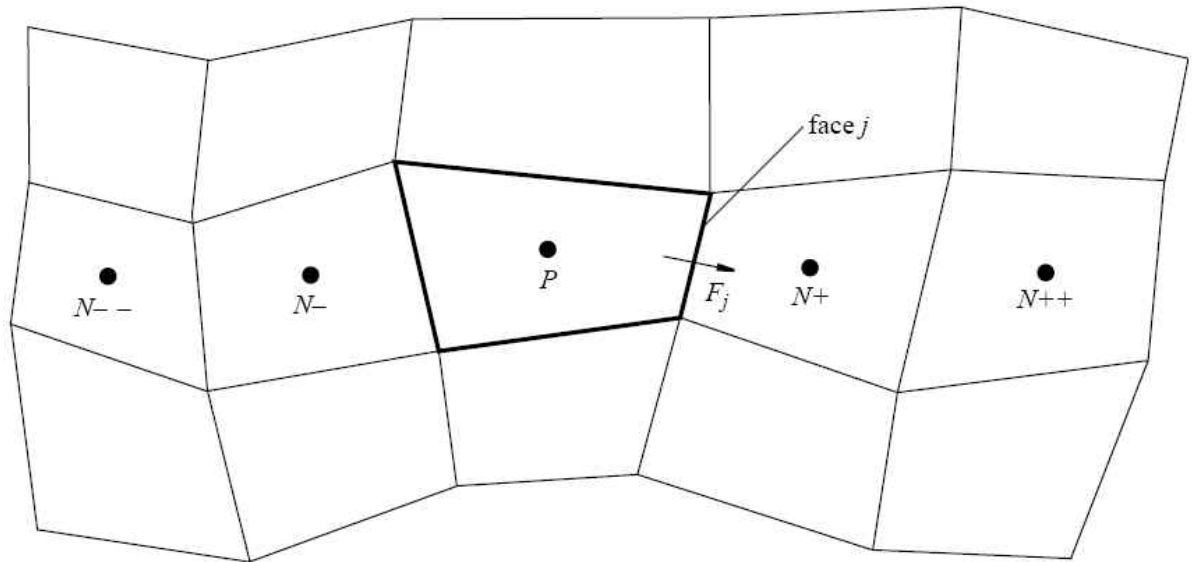


圖3-3 對流通量示意圖

3.7 PISO數值計算

1. 基本方程式：

(1)有限容積動量方程式：

$$A_p u_{i,p}^n = H(u_{i,m}^n) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_1 + D_p (P_{N+}^n - P_{N-}^n) \quad (3-40)$$

其中

$$H(u_{i,m}) \equiv \sum_m A_m u_{i,m} \quad (3-41)$$

而 $D_p (P_{N+}^n - P_{N-}^n)$ 近似於有限容積法的壓力梯度 $\partial p / \partial \chi_i$ ， D_p 為幾何係數，如圖 3-4。

(2)有限容積連續方程式：

$$B_p^n - B_p^0 + \sum_j (\rho^n u_j^n S_j) = 0 \quad (3-42)$$

u_j 為格點單位面積 S_j 的正向速度



為了計算質通量(mass flux)以及推導壓力方程式，方程式改用點表示法，由(3-39)式可推導出：

$$\bar{A}_p u_j^n = \bar{H}(u_{i,m}^n) + \bar{B}_p^0 u_{i,p}^0 + \bar{s}_1 + \bar{D}_p (P_p^n - P_{N+}^n) \quad (3-43)$$

將(3-42)式代入(3-43)式可推導出壓力方程式：

$$A_p P_p^n = \sum_m A_m P_m^n + s_1 \quad (3-44)$$

其中 s_1 為來源項(source term)，為點速度 u_i^n 和 u_i^0 的函數。

2. 解析過程：

(1)預測計算階段(predictor term)：

$$A_p u_{i,p}^{(1)} = H(u_{i,m}^1) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_l + D_p (P_{N+}^0 - P_{N-}^0) \quad (3-45)$$

其中 $P^{(0)}$ 為剛開始計算時的壓力值，初步暫時解 u_j^1 可由方程式(3-41)式得到。

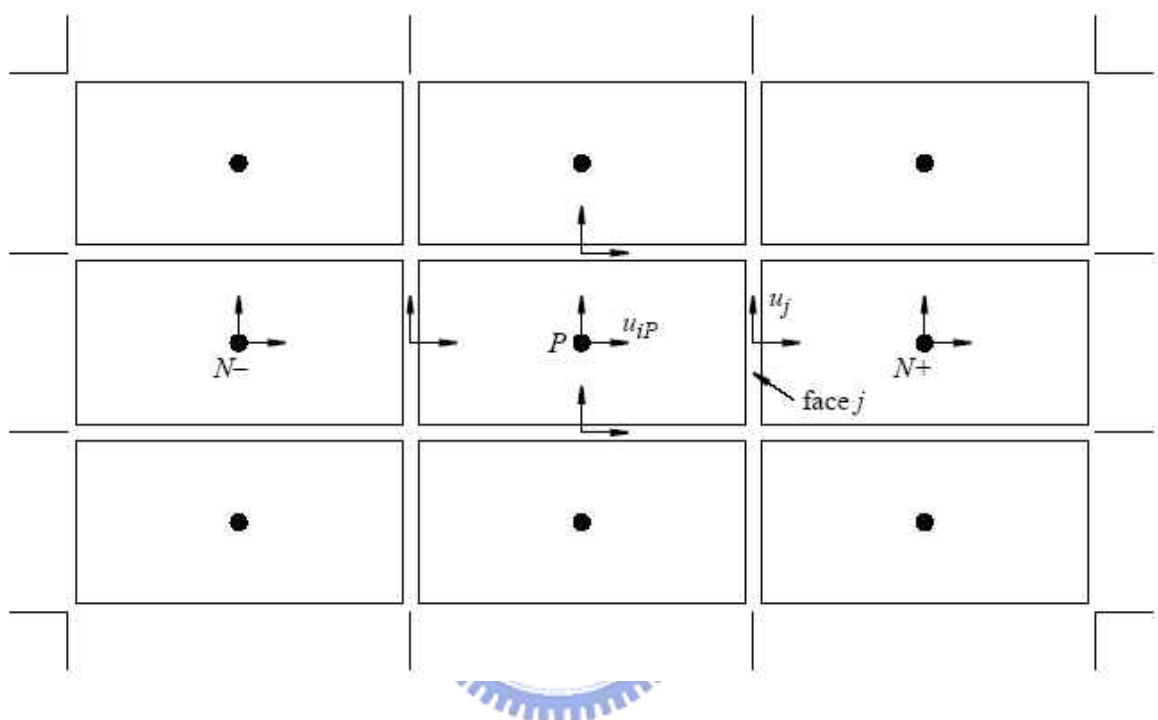


圖3-4 PISO示意圖

(2) 第一次修正計算階段(first corrector stage)：

動量方程式的運算可用以下表示：

$$A_p u_{i,p}^{(2)} = H(u_{i,m}^{(1)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s_l + D_p (P_{N+}^{(1)} - P_{N-}^{(1)}) \quad (3-46)$$

壓力方程式可表示如下：

$$A_p P_p^{(1)} = \sum_m A_m P_m^{(1)} + s_l \quad (3-47)$$

可解得壓力場 $P^{(1)}$ ，其中 s_l 為已知點速度 u_i^1 和 u_i^0 的函數，下次運算速度 u_i^2 和 u_j^2 可以由(3-45)式計算得到。

(3)外加修正計算階段(additional corrector stage)

$$A_p u_{i,p}^{(q+1)} = H(u_{i,m}^{(q)}) + B_p^0 u_{i,p}^0 + s + D_p (P_{N+}^{(q)} - P_{N-}^{(q)}) \quad (3-48)$$

$$A_p P_p^{(q)} = \sum_m A_m P_m^{(q)} + s_1 \quad (3-49)$$

$q=1, 2, 3, \dots$ 為修正計算等級，其中 A_p 為常數，只要增加 q 值即可完成數值解析得到的近似值。

STAR-CD計算流場時是以下兩項作為收斂條件

1. 每一個時間步階(time step)的疊代次數。
2. 每一次疊代後所有控制容積內的殘值改變率小於給定值，即：

$$C_\phi^K = \sum (|B_p^n \phi_p^n| - |B_p^0 \phi_p^0|) < \text{給定值}$$



3.8 暫態滑移網格(sliding mesh)

本文主要分析搬運手臂於倉儲系統移動時流場的情形，處理方式則使用滑移網格進行。如圖3-5所示。由圖3-5可知，靠近交界面上的節點(vertex number)分別為1至6點及11至16點。而在網格中心的編號則為上下交界面定義的交界面號碼(boundary number)，其分別為1至5及6至10。在滑移過程中，則以 ∇t 時間乘上對應的角速度或移動速度(視移動為等角速度移動或是平移移動)，則此值為位移距離。首先移動下面網格之後改變各網點位置連接關係，之後再移動交界面位置，最後再次移動下面從屬網格以恢復原本因移動而扭曲的網格，並且更新上下邊界的連接關係，如原本(1)部分1和6之邊界相接，之後(4)則改為2和6相接臨。網點亦是如此。而在每一步進時均計算整個區域內流場關係，以達到暫態移動的效果。此暫態滑移網格計算方式於每一次時間步進時， ∇t 不可過大，不可超過一個網格距離，否則位移距離會過大，會造成網格修正的困難度及扭曲過於嚴重，使得流場發散而無法收斂。

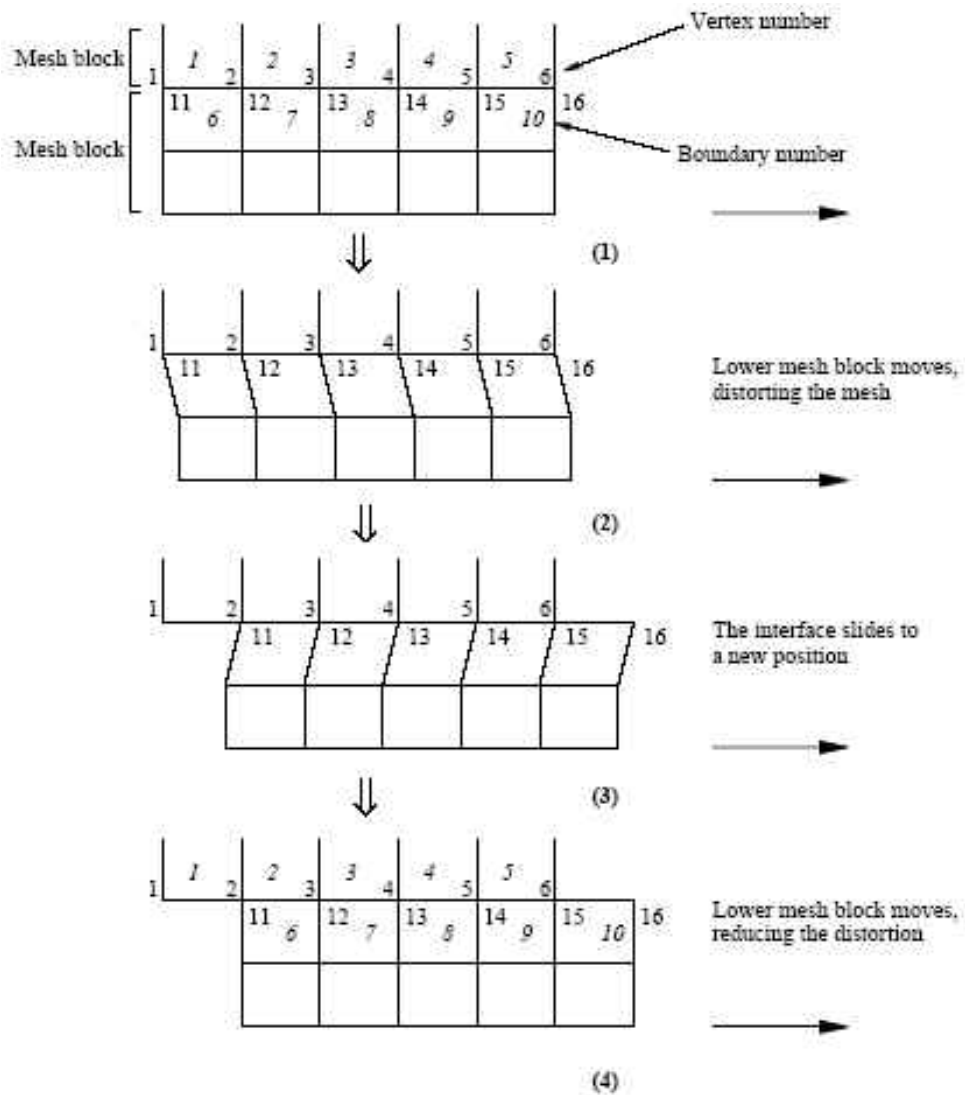


圖 3-5 移動網格進行方式示意圖

3.9 網格建立

以目前 TFT LCD 廠中所稱的 Inline 設備也就是連接設備與自動倉儲系統，如圖 3-6 所示，由圖中可以很清楚看出，其 Inlet 部分為自動倉儲系統左右兩側及機台上端，由多個 FFU 所組成，本文中設定每個 FFU 以 0.5 m/s 的速度流向倉儲內側，而 FFU 前方為面板儲存區，而 Outlet 部份，分別位於倉儲系統中間走道下方及機台下方，其氣體排出可分為兩部分，一部分

由自動倉儲內 FFU 回收利用，其餘排至無塵式的回風區，而中間走道是屬於自動倉儲系統中最重要部份，自動搬運手臂，行走速度本文設定為 120 m/min.，圖 3-7 為實際自動搬運手臂，本文中分別針對面板儲存設備分析所需，建立兩個不同條件網格，一種為只有單獨一個設備與自動倉儲連結，如圖 3-8 所示，建立的網格數共 495,839，圖 3-9 所示黃色區域表示自動倉儲系統內所儲存的面板，圖 3-10 表示設備機台與自動倉儲銜接開口位置網格，以 STAR-CD Cell Table 中將非連通處以藍色 Baffle 方式設定隔開，再來就設定相關 Inlet 及 Outlet 位置，如圖 3-11 所示，紅色左右及機台上方為 Inlet 部份，其黃色箭頭為 FFU 氣流方向及大小，下方綠色部分為 Outlet 設定位置，另一種為兩個設備與自動倉儲連結，如圖 3-12 所示，建立的網格數共 599,258，圖 3-13 所示黃色區域表示自動倉儲系統內所儲存的面板，圖 3-14 表示設備機台與自動倉儲銜接開口位置網格，以 STAR-CD Cell Table 中將非連通處以藍色 Baffle 方式設定隔開，接著就設定相關 Inlet 及 Outlet 位置，如圖 3-15 所示，紅色左右及機台上方為 Inlet 部份，其黃色箭頭為 FFU 氣流方向及大小，下方綠色部分為 Outlet 設定位置。

接下來針對多個進出口的自動倉儲設備做網格的建立，其進出口包含兩個設備與自動倉儲連結以及兩個 AVB 進出口及兩個 CSC 進出口以一個 MGV 進出口，如圖 3-16 所示，建立的網格數共 13,968 個，在 Inlet 及 Outlet 的設定分佈如圖 3-17 所示紅色代表 Inlet 邊界，其黃色箭頭為 FFU 氣流的方向及大小，綠色部分為 Outlet 的設定位置，再來針對自動倉儲動態網格建立如圖 3-18 所示，建立的網格數共 12,332 個，包含了五個進出口，在邊界設定上如圖 3-19 及圖 3-20 所示，紅色部分表示為 Inlet 其黃色箭頭為 FFU 氣流的方向及大小，橘色部分為 Pressure 的邊界，然後粉紫色為 Attach 的邊界，此為網格移動的邊界指定。

接著探討微粒子與自動倉儲內的軌跡變化，先針對若只有兩個機台進出口的自動倉儲系統做微粒子分佈的設定，如圖 3-21 所示，一共分成十二個位置做探討，V1~V3 為微粒子來源來自於自動倉儲的上方，且不靠近機台進出口，V4~V6 為微粒子來源來自於自動倉儲的上方，但靠近機台進出口處，V7~V9 為微粒子發生源位於自動倉儲中間高度且接近機台進出口處，V10~V12 為微粒子發生源位於自動倉儲中間高度但不靠近機台進出口處，接下來針對多個進出口的自動倉儲內的微粒子軌跡變化做分佈設定，如圖

3-22 所示，一共分成十八個位置做探討，V1~V3 為微粒子來源來自於自動倉儲的上方，且不靠近機台進出口，V4~V6 為微粒子來源來自於自動倉儲的上方，但靠近機台進出口處，V7~V9 為微粒子來自於自動倉儲的上方，但靠近 CSC 出口，V10~V12 為微粒子來自於自動倉儲的上方，但靠近 CSC 入口，V13~V15 為發生於微粒子來自於自動倉儲的上方，但靠近 AGV 入口，V16~18 為發生於微粒子來自於自動倉儲的上方，但靠近 MGV 進出口。

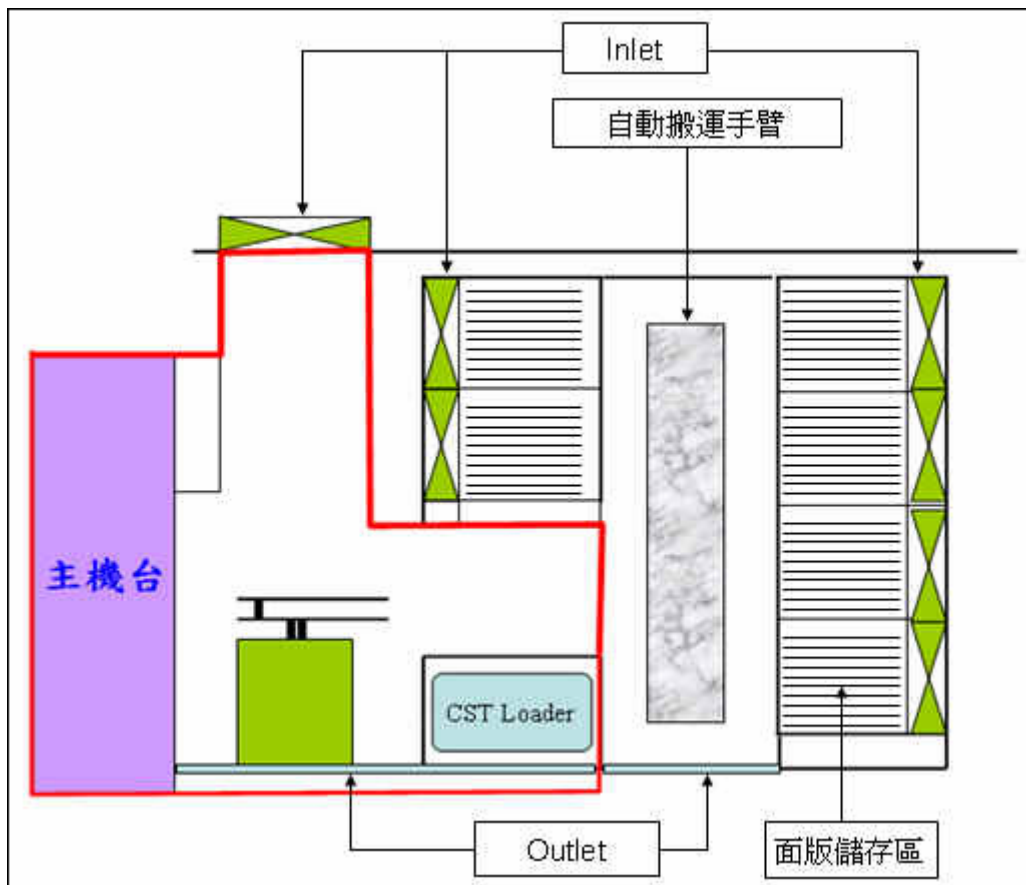


圖 3-6 設備與自動倉儲系統示意圖



圖 3-7 自動倉儲系統

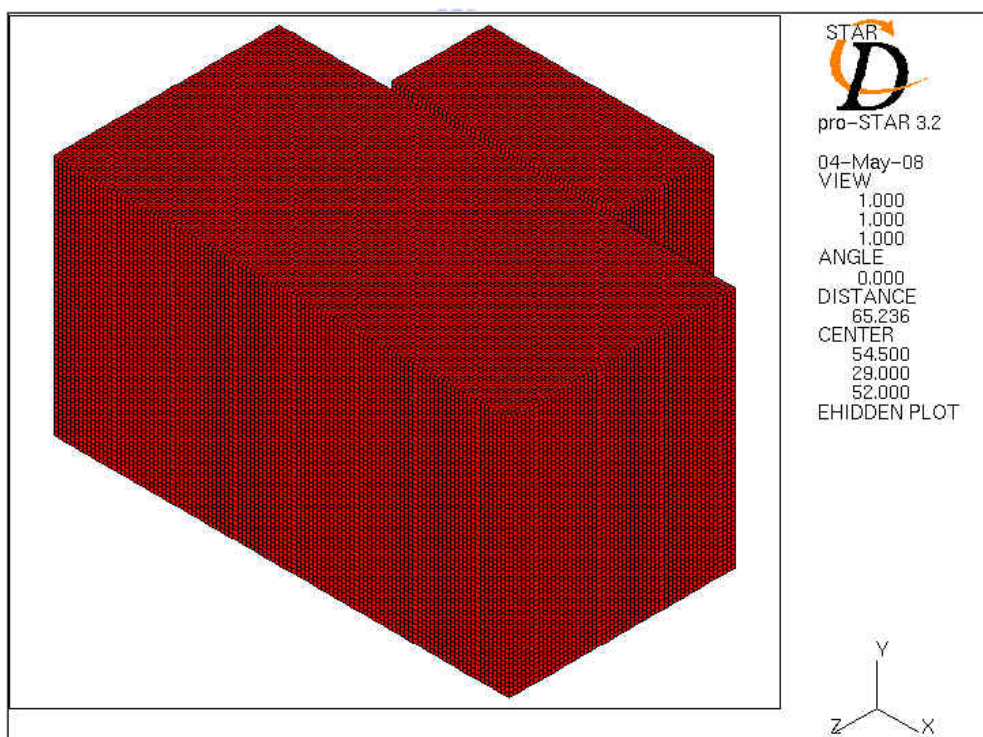


圖 3-8 一個 Inline 設備網格示意圖

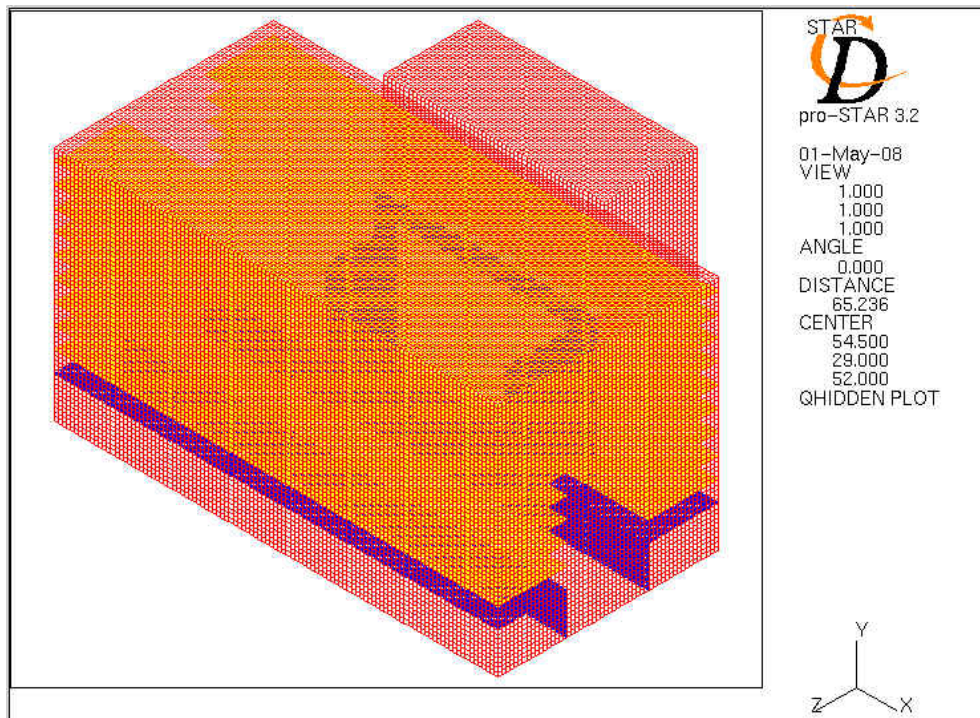


圖 3-9 面版儲存相關位置示意圖

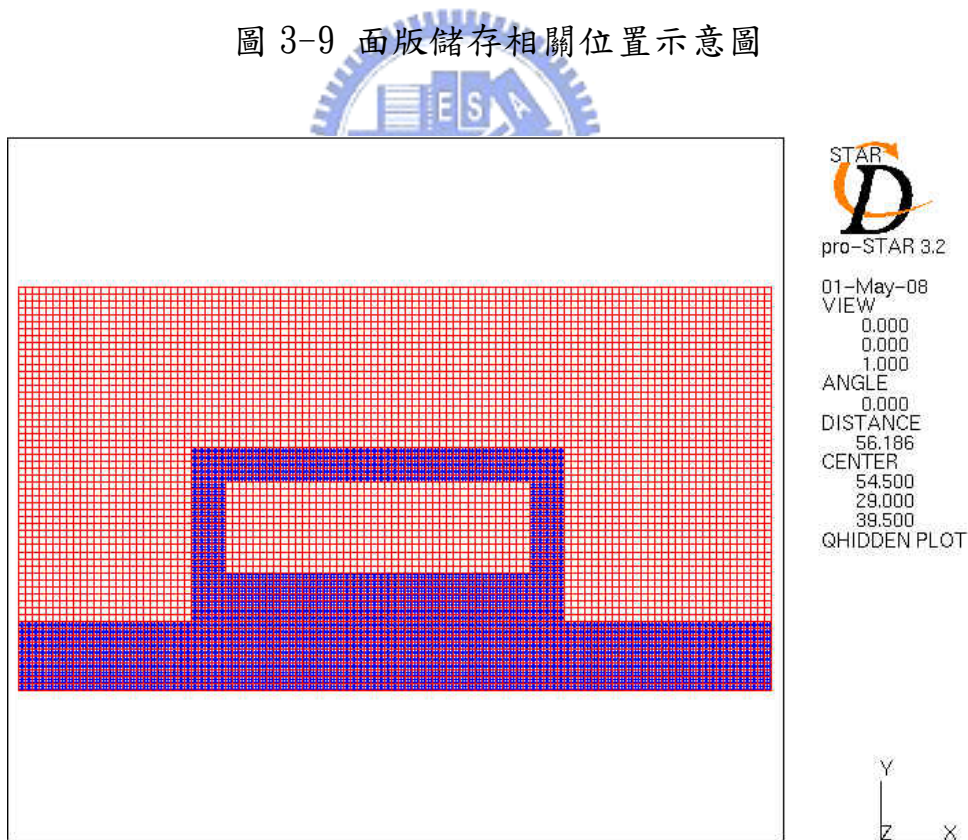


圖 3-10 設備與自動倉儲系統相關網格位置示意圖

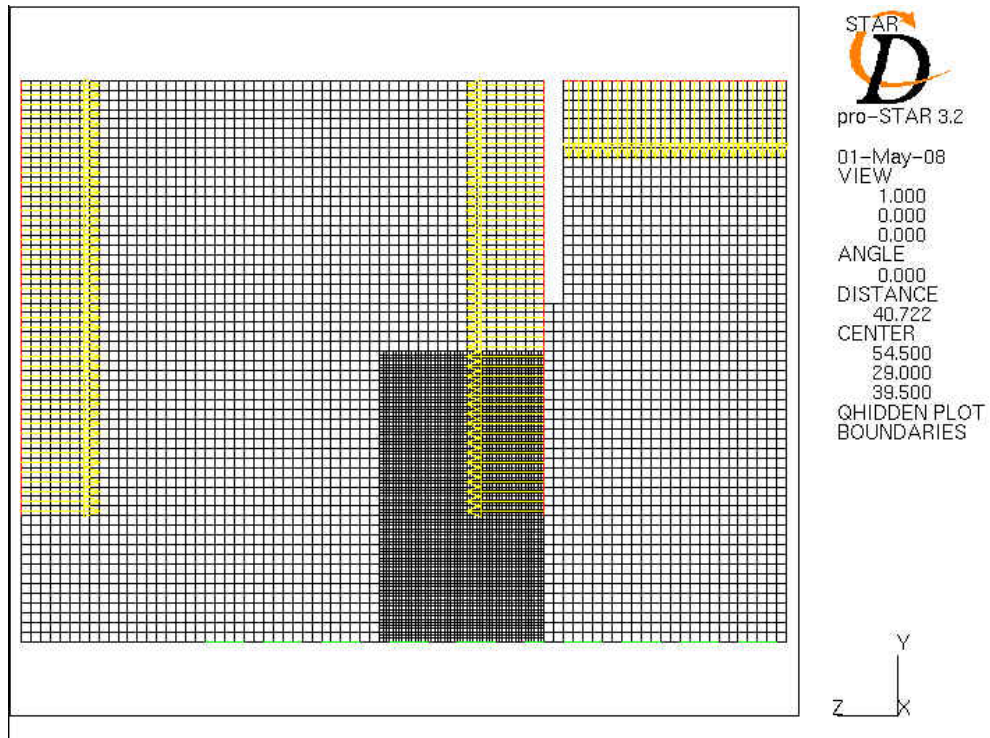


圖 3-11 Inlet 及 Outlet 位置示意圖

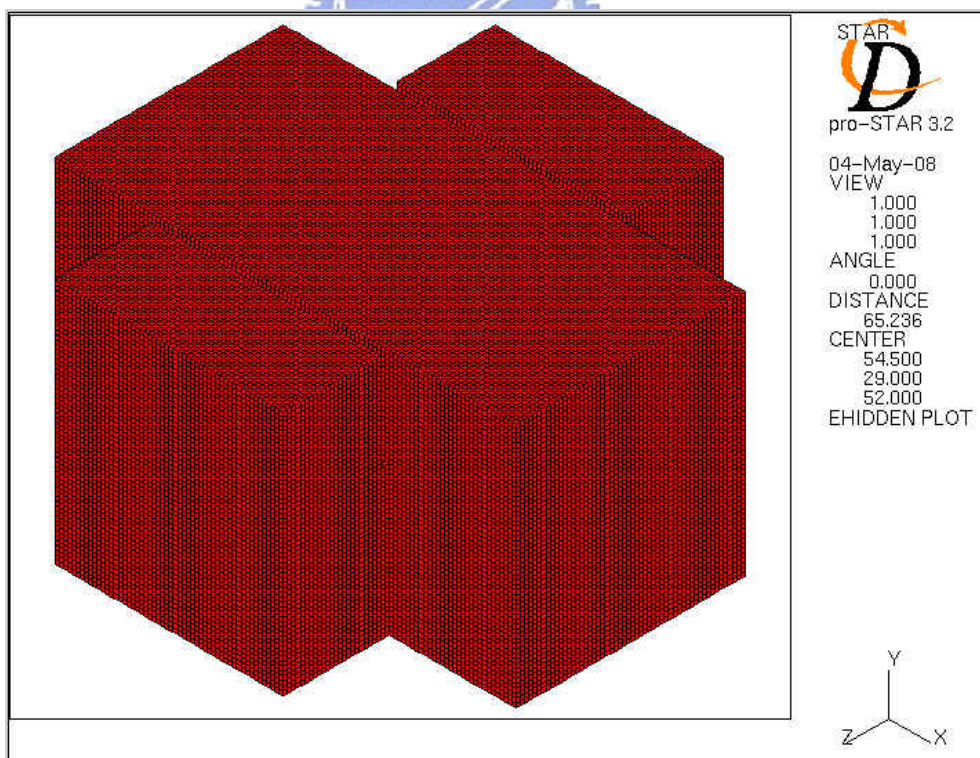


圖 3-12 兩個 Inline 設備網格示意圖

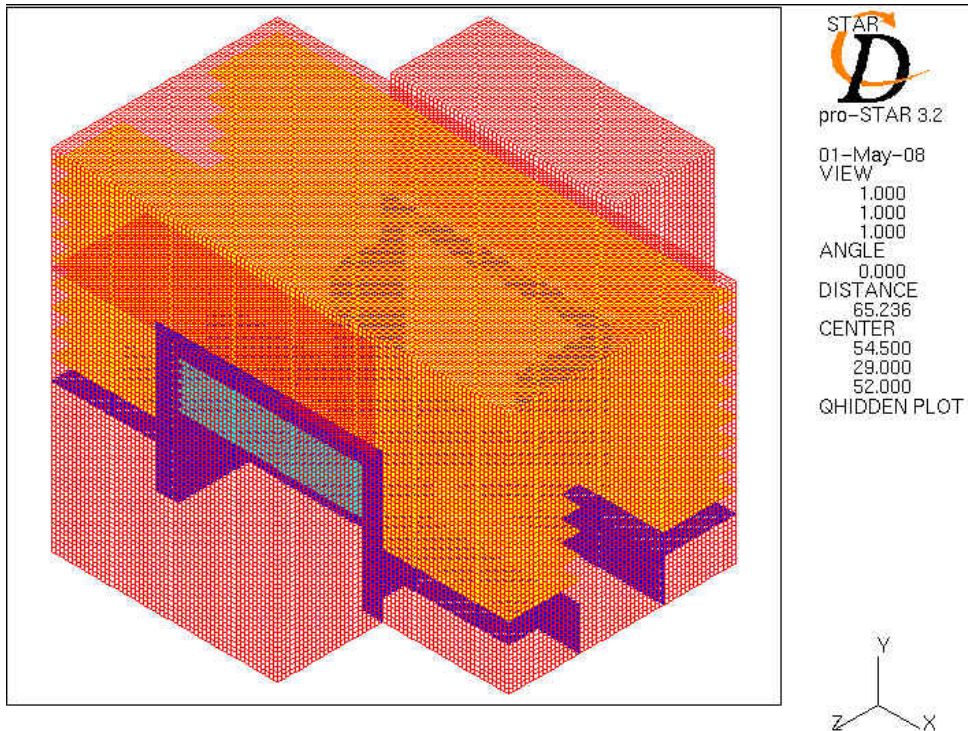


圖 3-13 面版儲存相關位置示意圖



圖 3-14 設備與自動倉儲系統相關網格位置示意圖

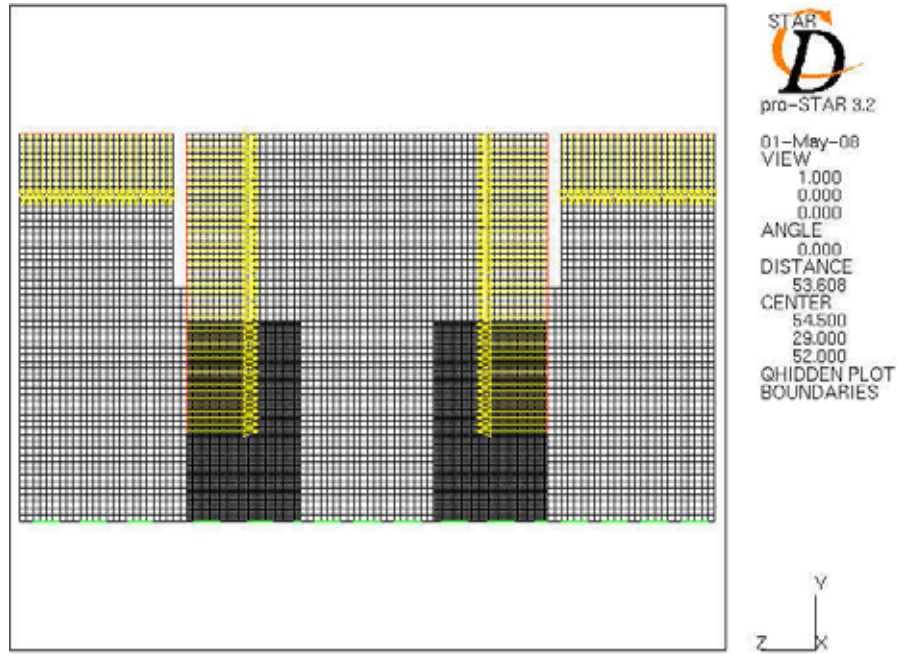


圖 3-15 Inlet 及 Outlet 位置示意圖

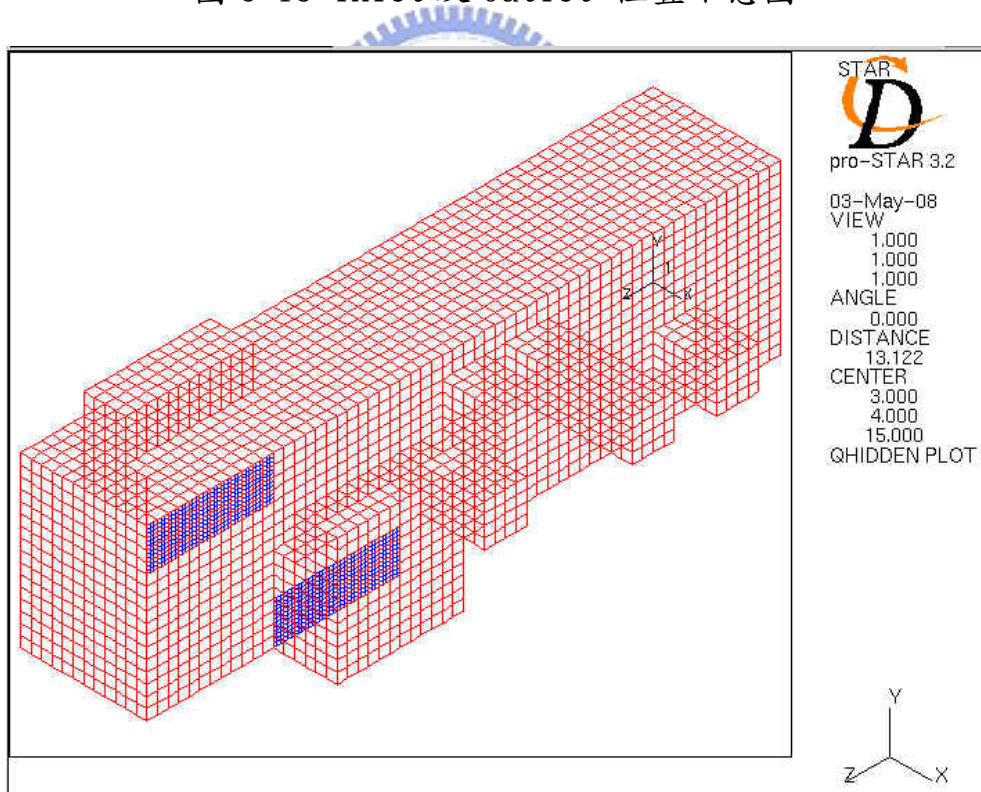


圖 3-16 多個進出口網格示意圖

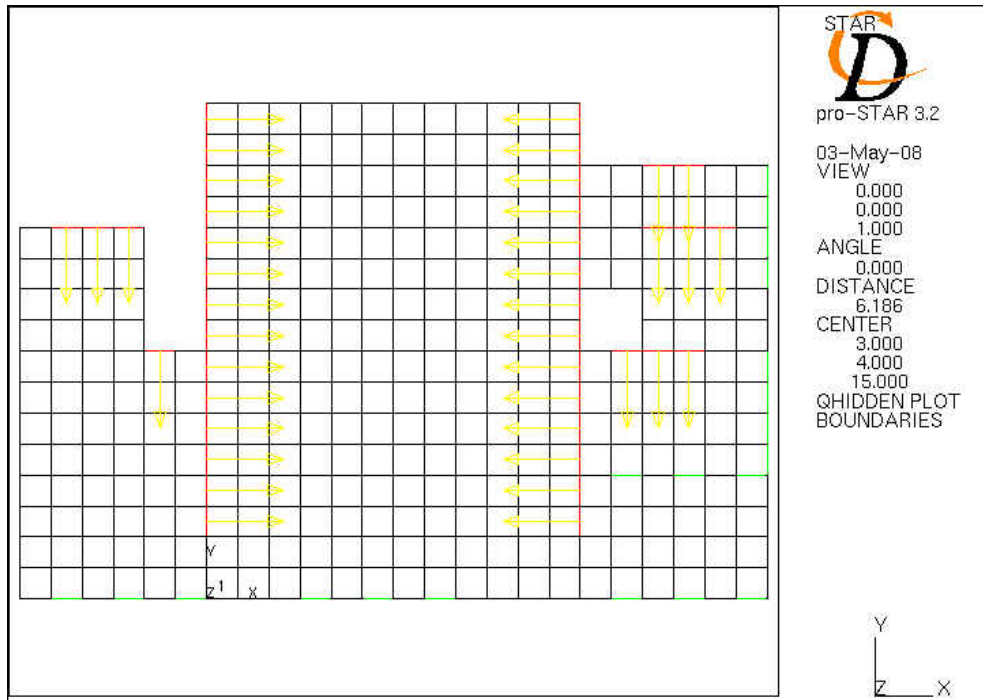


圖 3-17 多個進出口 Inlet 及 Outlet 位置示意圖

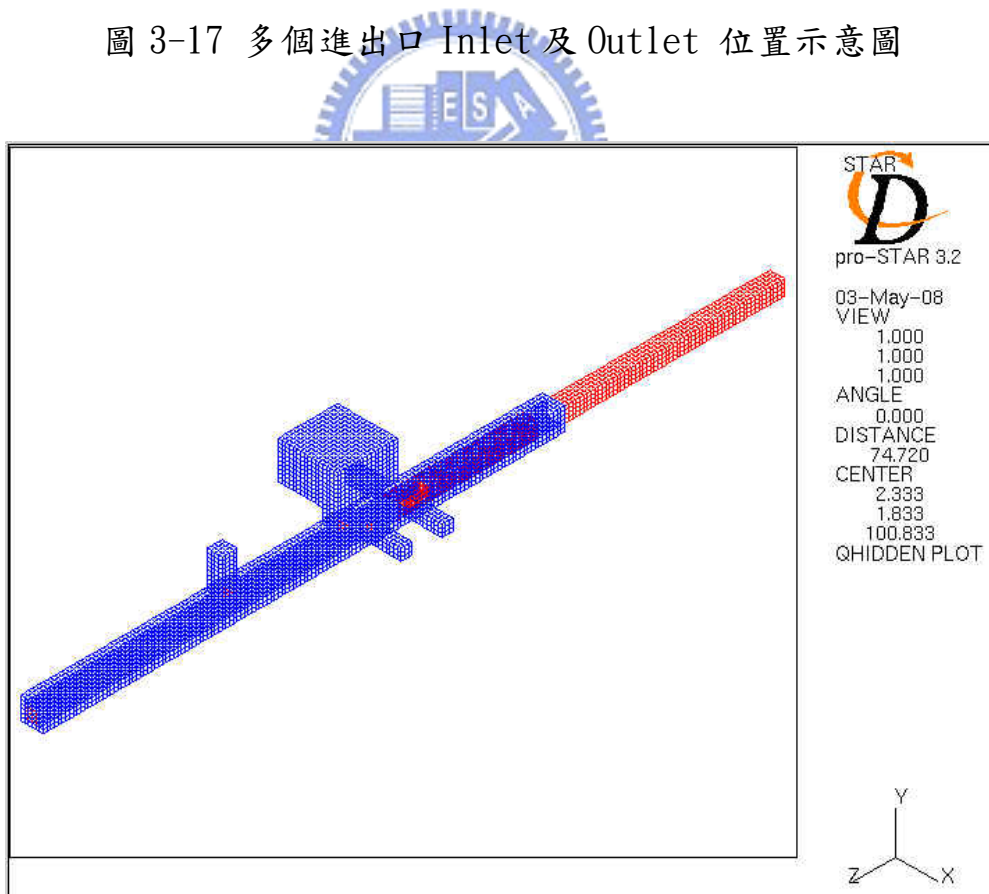


圖 3-18 自動倉儲移動網格示意圖

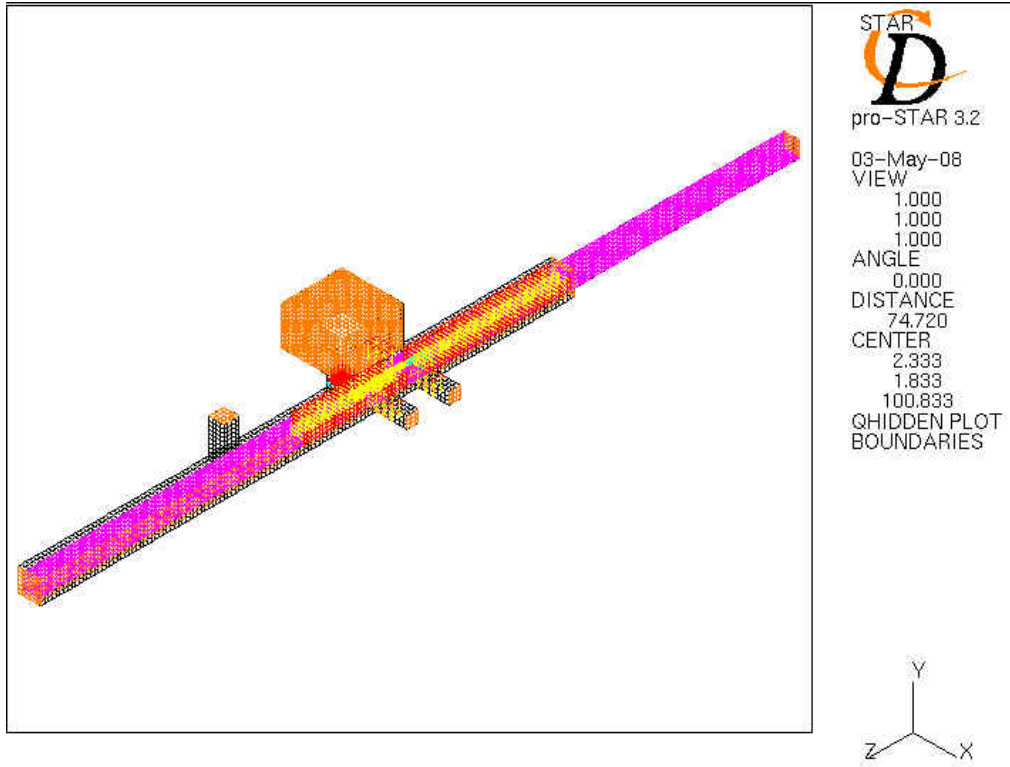


圖 3-19 自動倉儲移動網格邊界示意圖

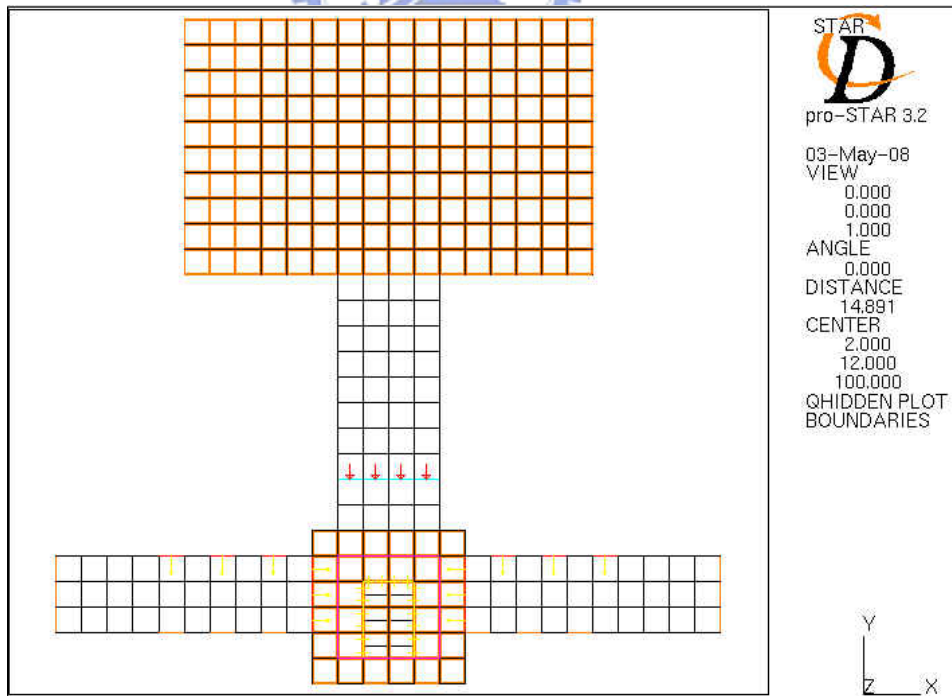


圖 3-20 自動倉儲移動網格邊界示意圖

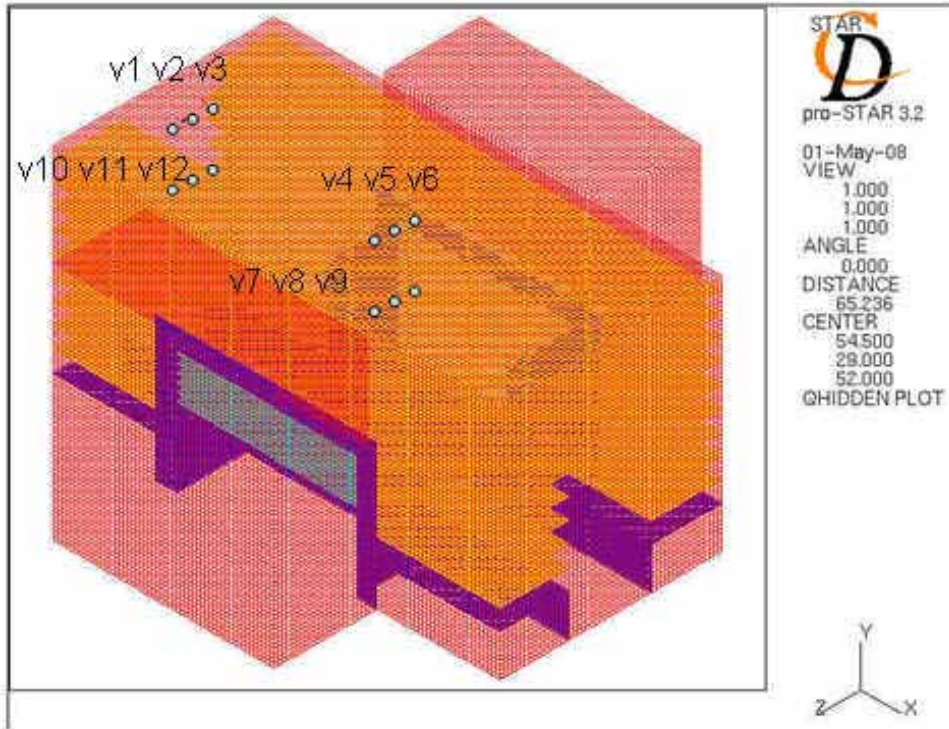


圖 3-21 Particle 發生源相對位置圖

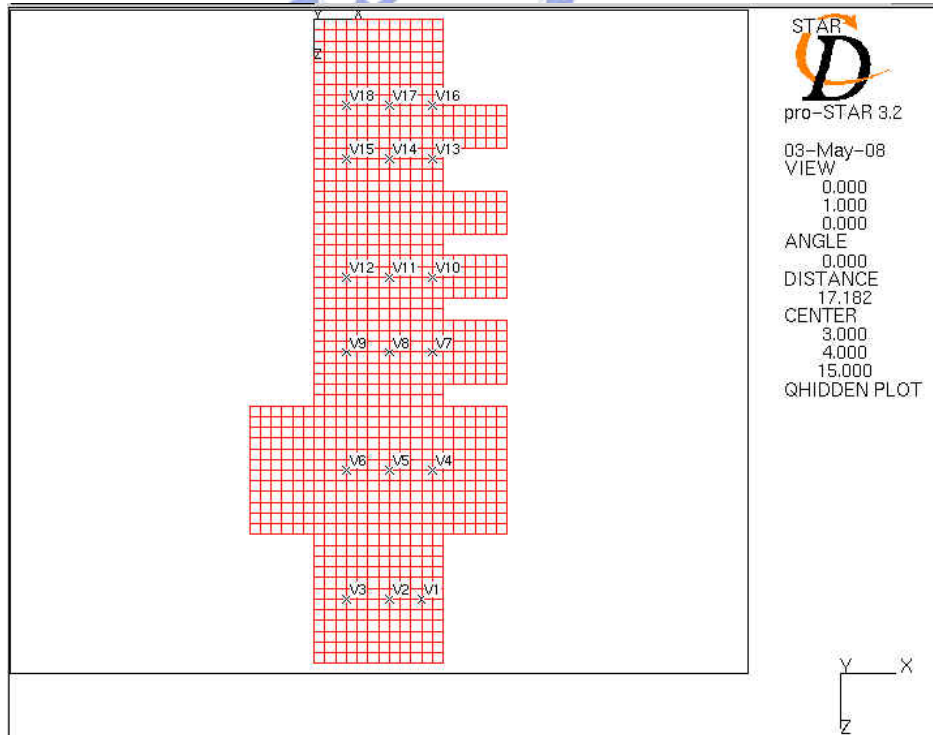


圖 3-21 Particle 發生源相對位置圖

第四章 結果與討論

在這次研究中，應用 STAR_CD 軟體模擬倉儲系統的流場，使用暫態移動的網格作為模擬的條件，由實際五代場倉儲系統尺寸，實際的環境條件設定模組的條件邊界，也包含倉儲與機台間實際關係位置，在以求解器求且，得其結果，在以實際狀況作為驗證，此次研究方法與流程如下：

1. 使用雷射粒子計數器(laser particle counter)分析倉儲系統的微粒子來源。
2. 應用 STAR_CD 軟體分析倉儲系統流場，共分成三個變數，如下表 4-1：

表 4-1 流場趨勢分析變數表

儲存設備流場趨勢分析	
case	變數
一個 Inline Tools	共三個出入口
兩個 Inline Tools	共五個出入口
多個進出口	兩個 Inline Tools 共五個出入口並包含 AGV Ports 兩個 & MGV Port 一個 & CSC Port 兩個

3. 應用 STAR_CD 軟體分析製程產品於倉儲系統內不同位置會受 Particle 影響的情形，如下表 4-2：

表 4-2 微粒子分析變數表

Particle 影響的情形分析	
	Position
Case1	Inline tools 上
Case2	AGV 進出口上
Case3	MGV 進出口上
Case4	CSC 進出口上
Case5	棚位第一層
Case6	棚位第二層
Case7	棚位最高層

4.1 自動倉儲的微粒子來源探討

無塵室的倉儲搬運系統與一般物流業的搬送系統其功能上是大同小異，其差別是在無塵室的設備必須符合一個低發塵量的設計，所以在材質及潤滑油上的選用是非常重要的，由這些設備中不難見設備商在設計方面的用心，但對於目前 TFT-LCD 廠的自動倉儲而言，並沒有辦法使自動手臂於移動搬送時不產生任何微粒子，所以如何使微粒子不影響製程產品對於倉儲而言是一件很大的工程。

自動倉儲系統的最主要結構可分為 FFU 部，面板儲存區，自動搬運手臂等三大部分，所以分別針對這三個部分去做量測，而在自動搬運手臂部分又可細分為走行、升降及旋轉三部份，如表 4-3 所示。

表 4-3 自動倉儲系統微粒子分析表

自動倉儲的微粒子來源探討			
	區域	部	量測位置
1	FFU 部		FFU 出風口前 3mm 位置
2	面板儲存區		儲存區中央位置
3	自動搬運手臂	走行	自動搬運手臂上方移動處及走行輪
		升降	自動搬運手臂下方排風處
		旋轉	自動搬運手臂旋轉部下方

由圖 4-1 所示，使用雷射粒子計數器(laser particle counter)，來作為量測儀器，此儀器為 LightHouse 公司產品，型號為 SOLAIR 3100 Plus 可量測範圍 $0.3\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ 。

針對 FFU 部份量測，此時自動手臂為靜止不動，發現這部分量測的數據皆為 0 顆，這也表示空氣經由 FFU 後為乾淨無 $0.3\mu\text{m}$ 以上的微粒子，其結果如下表 4-4。

4-4 FFU 部量測結果表

FFU 部			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	0	0	0
0.5 μ	0	0	0
1.0 μ	0	0	0
3.0 μ	0	0	0
5.0 μ	0	0	0

針對面板儲存區部份量測，此時自動手臂為靜止不動，發現這部分量測的數據皆為 0 顆，這也表示空氣經由 FFU 吹至面板儲存區為乾淨無 $0.3\mu\text{m}$ 以上的微粒子，結果如表 4-5。

表 4-5 面板儲存區量測結果表

面板儲存區			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	0	0	0
0.5 μ	0	0	0
1.0 μ	0	0	0
3.0 μ	0	0	0
5.0 μ	0	0	0

針對倉儲手臂區之走行部量測，先測量倉儲手臂靜止不動時的前值，在測量倉儲手臂只有作走行移動時的後值，量測位置於手臂最上方移動處發現倉儲手臂位未移動時其 $0.3\mu\text{m}$ 的數量約介於 0~1 顆，其於數據皆為 0 顆，結果如表 4-6，但走行時就可發現其微粒子數量就會增加，最大可到 $3\mu\text{m}$ ，如表 4-7，這也就表示手臂只作走行移動時其上方會有微粒子的產生，由上方結構可看出為上方滾輪與滑軌間移動磨擦所產生的來源，如圖 4-2 所示。

4-6 倉儲手臂靜止時結果表

倉儲手臂靜止時(量測位置於手臂最上方)			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	1	0	1
0.5 μ	0	0	0
1.0 μ	0	0	0
3.0 μ	0	0	0
5.0 μ	0	0	0

4-7 倉儲手臂走行移動時結果表

倉儲手臂走行時(量測位置於手臂最上方)			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	62	50	45
0.5 μ	30	31	23
1.0 μ	14	25	19
3.0 μ	0	2	2
5.0 μ	0	0	0

針對倉儲手臂區之走行部量測，先測量倉儲手臂靜止不動時的前值，在測量倉儲手臂只有作走行移動時的後值，量測位置於手臂最下方移動處發現倉儲手臂位未移動時其 0.3 μm 的數量約介於 0~3 顆，其於數據皆為 0 顆，結果如表 4-8，但走行時就可發現其微粒子數量就會增加，最大可到 5 μm ，如表 4-9，可得知手臂做走行移動時其下方會有微粒子的產生，由下方結構可看出，倉儲手臂走行輪與皮帶間及走行輪與接觸軌道間移動磨擦所產生的來源，如圖 4-3 所示。

4-8 倉儲手臂靜止時結果表

倉儲手臂靜止時(量測位置於手臂最下方)			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	2	0	3
0.5 μ	0	0	0
1.0 μ	0	0	0
3.0 μ	0	0	0
5.0 μ	0	0	0

4-9 倉儲手臂走行移動時結果表

倉儲手臂走行時(量測位置於手臂最下方)			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	157	122	204
0.5 μ	57	46	87
1.0 μ	16	14	34
3.0 μ	2	1	4
5.0 μ	2	0	2

針對倉儲手臂區升降部量測，先測量倉儲手臂靜止不動時的前值，在測量倉儲手臂只有作升降移動時的後值，量測位置於手臂下方升降處排風前方，發現倉儲手臂位未做任何移動時其 0.3 μ m~5.0 μ m 的數量最大值約 23 顆，結果如表 4-10，但手臂升降時就可發現其微粒子數量就會大量增加，最大可到 5 μ m 以上，如表 4-11，這也就表示手臂只作升降移動時其下方會有微粒子飄出，由目前 TFT-LCD 所使用的自動倉儲系統，搬送手臂結構上其升降部為馬達帶動皮帶或馬達帶動鏈條為主，如圖 4-4 所示，所以運用在無塵室時會將皮帶或鍊條包覆起來，是為了確保微粒子能在掌控的範圍內，因此在外部會有風扇或 FFU 將微粒子控制在固定範圍排出，其主要目的是要將包覆內的區域變為負壓，不會使微粒子因手臂於上下移動時，由其他縫隙竄出，而影響製程產品。

表 4-10 倉儲手臂靜止時結果表

倉儲手臂靜止時			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	18	23	16
0.5 μ	3	10	10
1.0 μ	4	4	6
3.0 μ	0	1	1
5.0 μ	0	0	0

4-11 倉儲手臂升降時結果表

倉儲手臂升降時			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	349	367	583
0.5 μ	143	200	373
1.0 μ	20	74	152
3.0 μ	13	10	44
5.0 μ	8	10	20

針對倉儲手臂區旋轉部量測，先測量倉儲手臂靜止不動時的前值，在測量倉儲手臂只有作旋轉移動時的後值，量測位置於手臂旋轉部下方，發現倉儲手臂位未做任何移動時其 0.3 μ m 的數量最大值約 0~1 顆，結果如表 4-12，若手臂只有旋轉運作時，其微粒子數量就會增加，最大可到 5 μ m 以上，如表 4-13，由上述的資料可得知，手臂只有旋轉運作時，手臂旋轉部下方會有微粒子飄出。

表 4-12 倉儲手臂靜止時結果表

倉儲手臂靜止時			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	1	1	0
0.5 μ	0	0	0
1.0 μ	0	0	0
3.0 μ	0	0	0
5.0 μ	0	0	0

表 4-13 倉儲手臂旋轉時結果表

倉儲手臂旋轉時			
Particle size	第一次量測數量	第二次量測數量	第三次量測數量
0.3 μ	18	15	16
0.5 μ	4	7	5
1.0 μ	3	3	5
3.0 μ	1	0	1
5.0 μ	1	0	0

由上面幾個實驗可以發現當搬送手臂移動時因摩擦就會產生微粒子，雖然機台於設計時會盡量減少微粒子的產生，但並無法百分之分使微粒子消失在移動的狀態中，以上幾個測量數據比較下來，其升降部分所產生的微粒子是最多的，其微粒子的流場分佈情形將會在 4-3 節探討。



圖 4-1 雷射粒子計數器



圖 4-2 滾輪與滑軌示意圖



圖 4-3 滾輪與滑軌示意圖

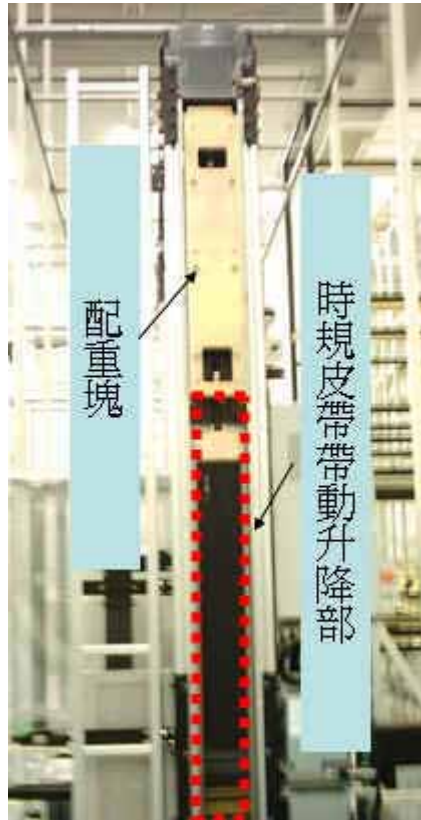


圖 4-4 升降部示意圖

4.2 自動倉儲靜態與動態流場分析探討

4.2.1 自動倉儲靜態探討

本文以 STAR-CD 套裝軟體分析自動倉儲靜態流場，先探討一個 Inline 設備與自動倉儲間流場之關係，分別將流場分為五個區域探討，如圖 4-5 所示，由分析結果得知自動倉儲內其氣流大多由倉儲流向機台，如圖 4-6 所示。第一區域為面板存放區，其氣流經由 FFU 流出後，均以水平方向向倉儲中間流動，由圖中並未發現擾流的情形，如圖 4-7；第二區為自動倉儲中間走道，即搬運手臂活動區域，其流場由中間分別向機台及向下 Outlet 處排出，如圖 4-8 所示；第三區域為製程面板擺放工作區，由分析結果可發現，此流場速度於最下層為全區最大，其速度為 6~7.4 m/s，流場經過製程面板間方向會被導正為水平，如圖 4-9 所示；第四區域為製程面板擺放下位區，此區域明顯可看出有擾流的情形發生，如圖 4-10 所示；最後為第

五區域機台設備端，其流場由第三區排出後流向本區的 Outlet，如圖 4-11 所示。

第二個部分探討兩個 Inline 設備與自動倉儲間流場之關係，將分析區域分成八個，如圖 4-12 所示，機台一與機台二 Outlet 數量不等，機台二 Outlet 比機台一 Outlet 多出百分之二十，其餘設定皆相同，以分析流場的變化，如圖 4-13 所示，由分析結果得知自動倉儲內其氣流分別由倉儲流向機台一及機台二，如圖 4-14 所示，分別對八個區域做探討，第一個區域為面板存放區，其氣流經由 FFU 流出後，均以水平方向向倉儲中間流動，由圖中並未發現擾流的情形，如圖 4-15；第二區為自動倉儲中間走道，即搬運手臂活動區域，其流場由中間分別向機台及向下 Outlet 處排出，如圖 4-16 所示；第三區域為機台一製程面板擺放工作區，由分析結果可發現，流場經過製程面板間方向會被導正為水平，其速度約為 0.8~1.6 m/s，如圖 4-17 所示；第四區域為機台一製程面板擺放下位，此區域明顯可看出有擾流的情形發生，如圖 4-18 所示；第五區域為機台一設備端，其流場由第三區排出後流向本區的 Outlet，如圖 4-19 所示；第六區域為機台二製程面板擺放工作區，由分析結果可發現，流場經過製程面板間方向會被導正為水平，其速度最大可至 5.374 m/s，如圖 4-20 所示；第七區域為機台二製程面板擺放下位，此區域明顯可看出有擾流的情形發生，如圖 4-21 所示；第八區域為機台二設備端，其流場由第六區排出後流向本區的 Outlet，如圖 4-22 所示，由上述結果可發現由於機台二 Outlet 比機台一 Outlet 面積多出百分之二十，其氣體流量大多由機台二排出。

接下來探討多個進出口時自動倉儲間流場之關係，將分別針對七個進出口做探討，進而分析流場的變化，如圖 4-23 所示；由分析結果得知自動倉儲內其氣流分別由倉儲內部流向 AGV 進出口、MGV 進出口、CSC 進出口及兩個機台，由於進出口數量變多導致其流場內最大流速明顯下降，流場於 MGV 進出口可明顯發現其氣流會以較高的速度由進出口排出，但由於進出口離地約高 2M，所以自動倉儲靠近 MGV 進出口下方會有微小擾流產生如圖 4-24 所示；接著探討 AGV 入口流場，由於其入口高度與 MGV 入口高度相近，所以也可以發現相同的情形，雖然大部分氣體由 AGV 入口排出，但自動倉儲靠近 AGV 入口下方會有微小擾流產生如圖 4-25 所示；在 AGV 出口流場部分，其結果與 AGV 入口的流場分佈大致相同如圖 4-26 所示；接著針對 CSC

入口流場探討，可明顯發生其氣流會由 CSC 入口排出由於 CSC 高度約 5M 所以可發現此處的最大流速較下方的 AGV 或 MGV 進出口流速來的小，也由於高度較高其擾流部分較不明顯如圖 4-27 所示，而 CSC 出口部分其高度與入口相同，所以其流場結果大致與 CSC 入口類似，如圖 4-28 所示；最後探討兩個機台進出口流場變化的部分，其結果發現與第二部分所探討兩個機台的流場狀況相似，由於在此案例中進出口數量變多導致分佈於兩機台內的最大流速也明顯變小，但與第二部分所發現的擾流區域大致相同，如圖 4-29 所示，只是在流速大小的差別。

4.2.2 自動倉儲動態探討

接著探討自動倉儲動態流場部分，分別針對自動倉儲內搬運手臂移動至各進出口時其流場的變化，如圖 4-30、圖 4-31 及圖 4-32 所示；當搬運手臂移動前進時，手臂前方是高壓區而手臂後方是低壓區，所以四周的氣體會跟隨手臂前進，以填補後方的低壓區，如圖 4-33 及圖 4-34 所示；接著針對手臂接近進出口時可發現當手臂接近進出口前端時由於前方高壓區的氣體會由進出口加速排出，如圖 4-35 所示；當手臂離開進出口時由於後方會產生低壓區，所以會由四周的氣體進行填補，所以發現進出口的流速有由大變小的狀況發生如圖 4-36 所示，由上剖面發現更可看到低壓區及高壓區的氣流變化如圖 4-37 及圖 4-38 所示；當自動手臂經過三個進出口時，由上剖面圖可明顯發現其高壓區氣流推開去填補其他低壓區的趨勢，而自動手臂後面低壓區部分四周的空氣進入做填補的動作，所以當自動手臂經過三個進出口時其進出口的流速也會有由大變小的狀況，如圖 4-49 以圖 4-40 所示。

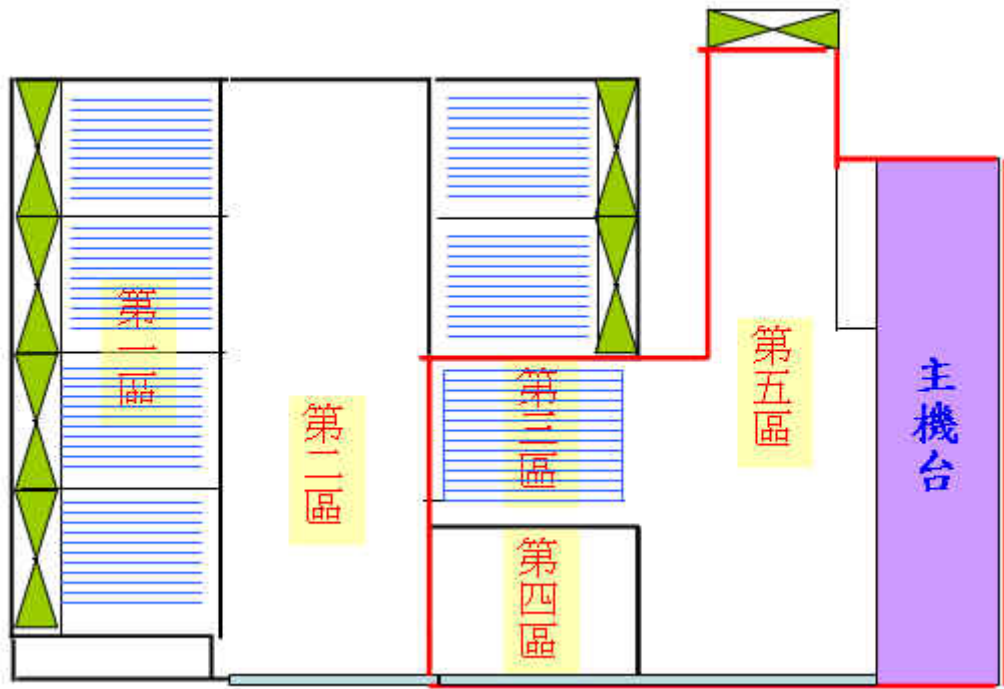


圖 4-5 一個 Inline 設備靜態流場分析區域圖

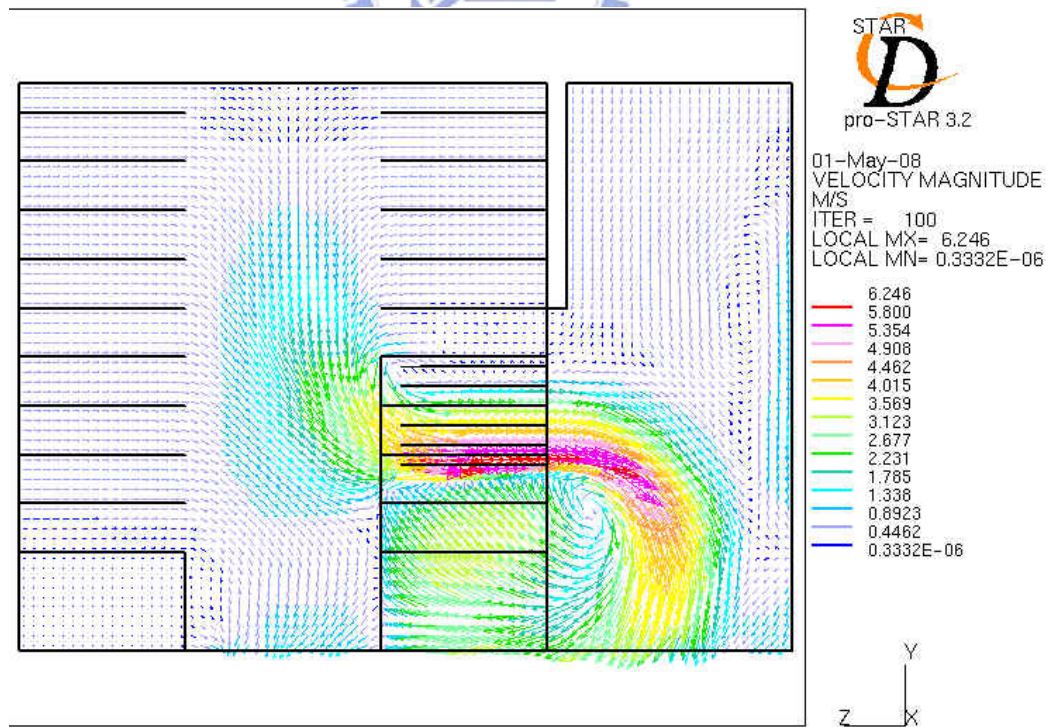


圖 4-6 一個 Inline 靜態流場分析全圖

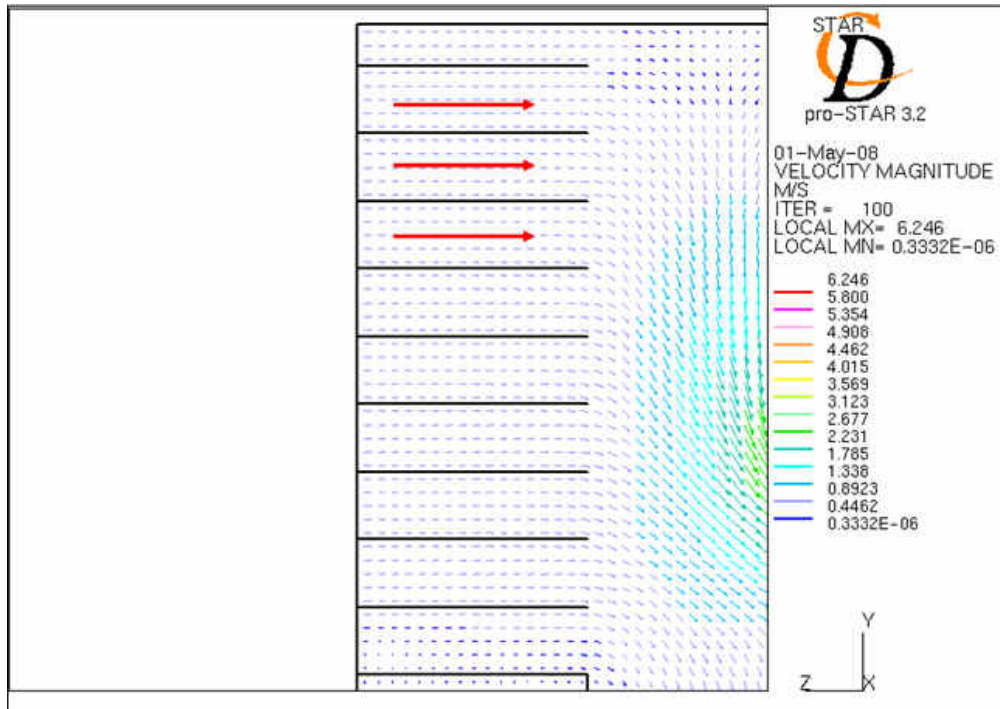


圖 4-7 一個 Inline 設備流場分析第一區域圖

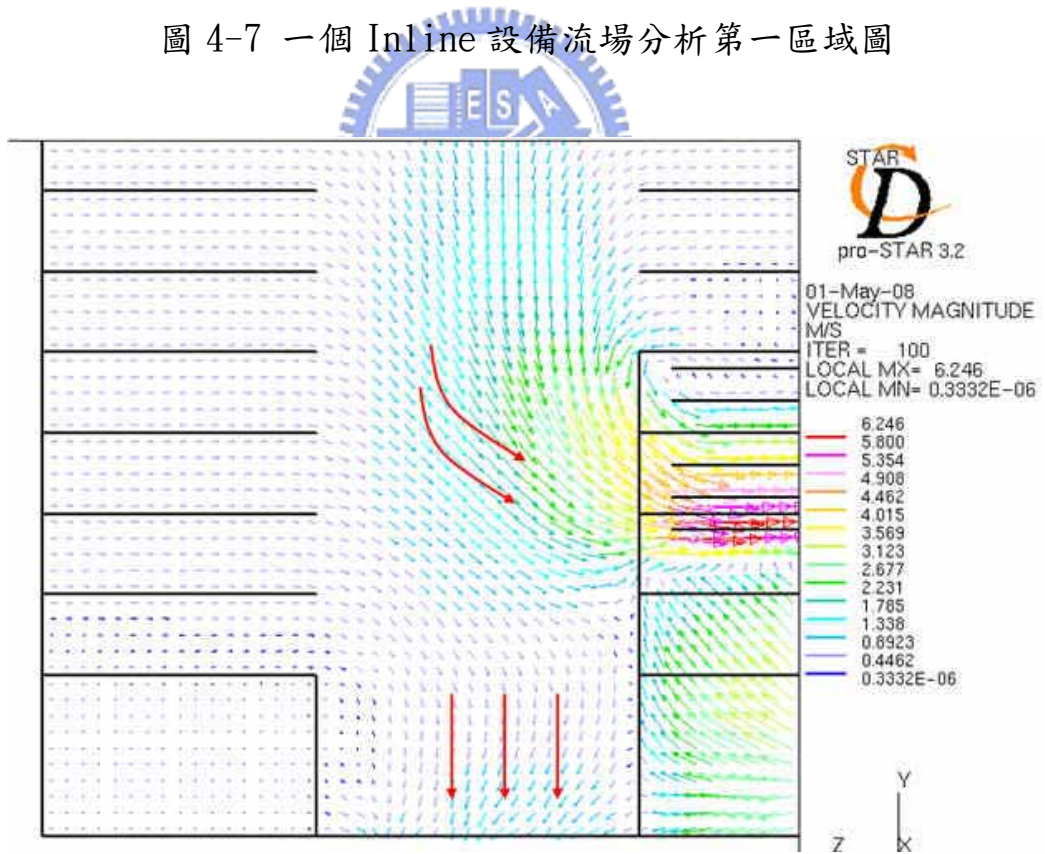


圖 4-8 一個 Inline 設備流場分析第二區域圖

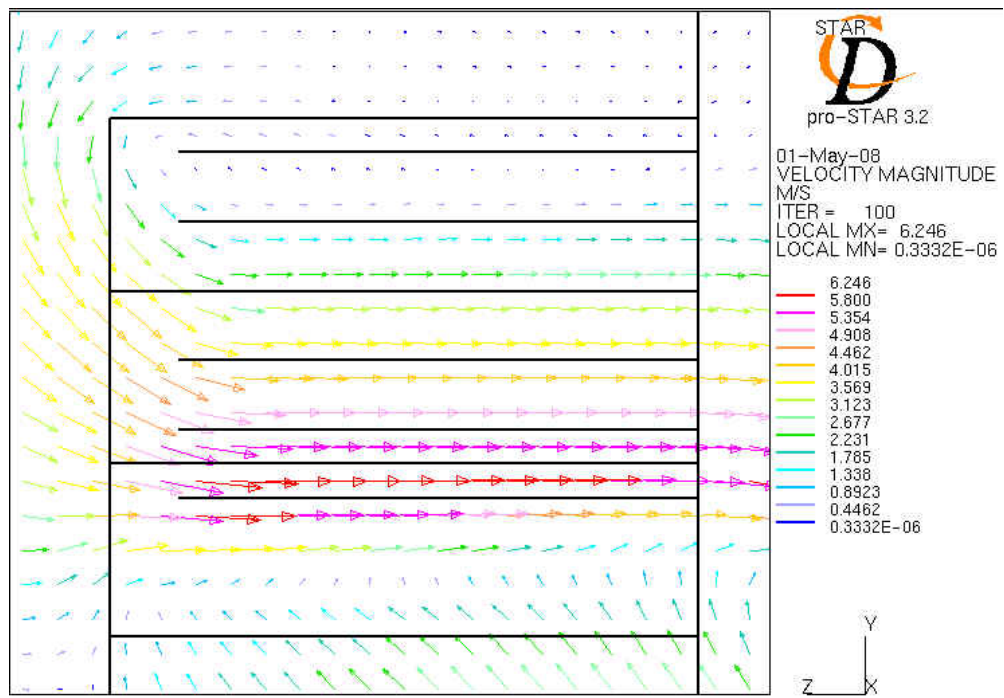


圖 4-9 一個 Inline 設備流場分析第三區域圖

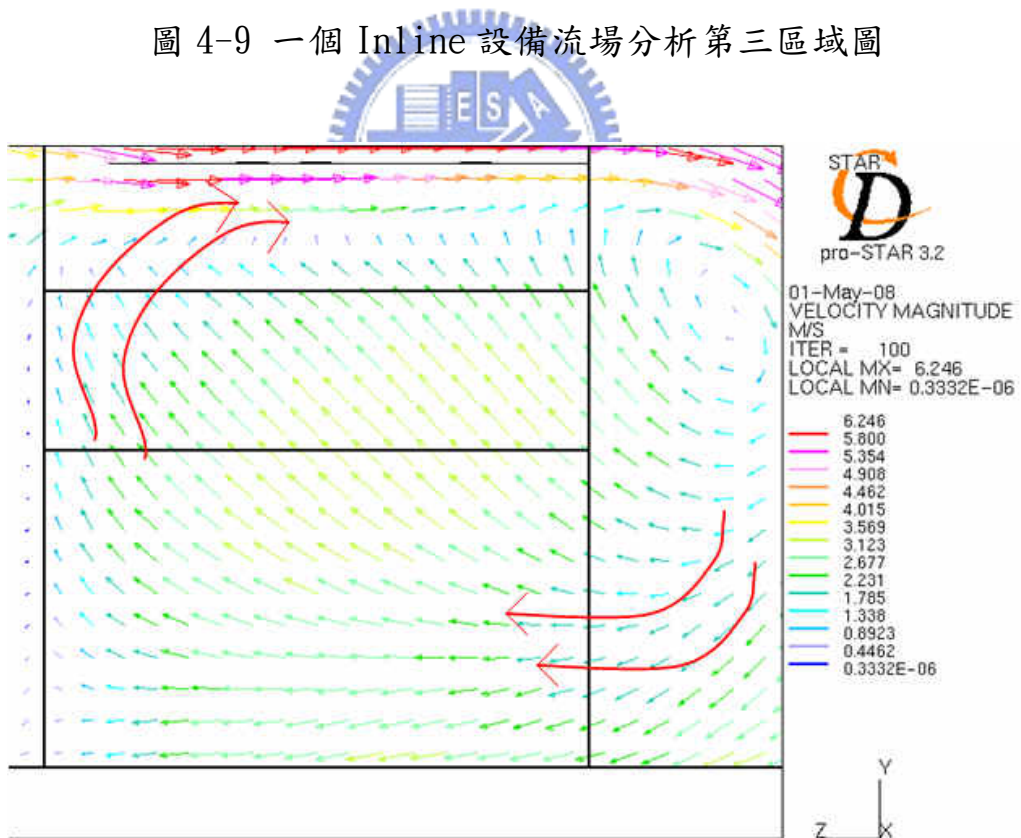


圖 4-10 一個 Inline 設備流場分析第四區域圖

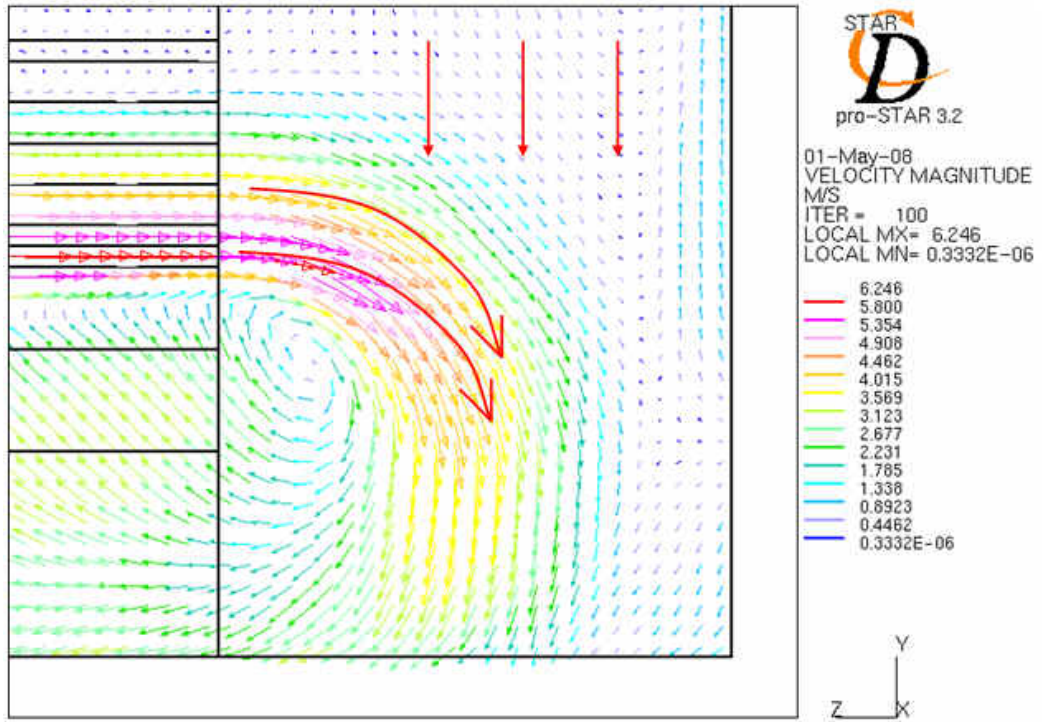


圖 4-11 一個 Inline 設備流場分析第五區域圖

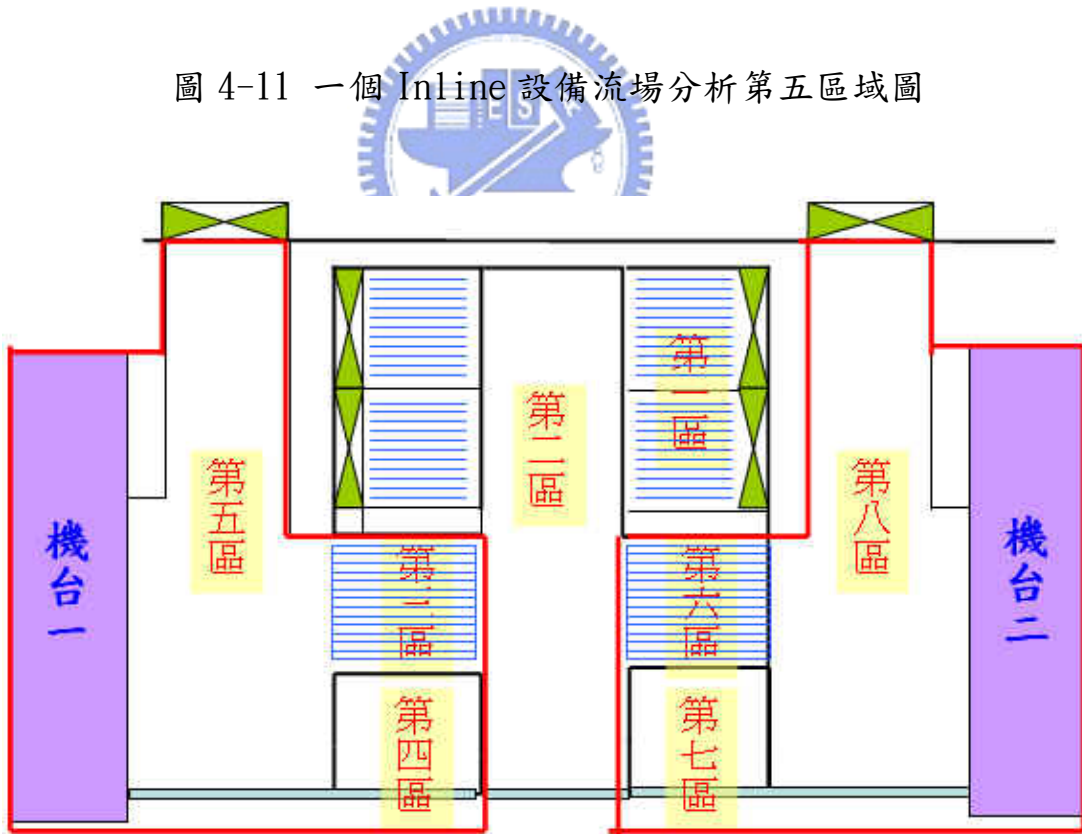


圖 4-12 二個 Inline 設備流場分析區域圖

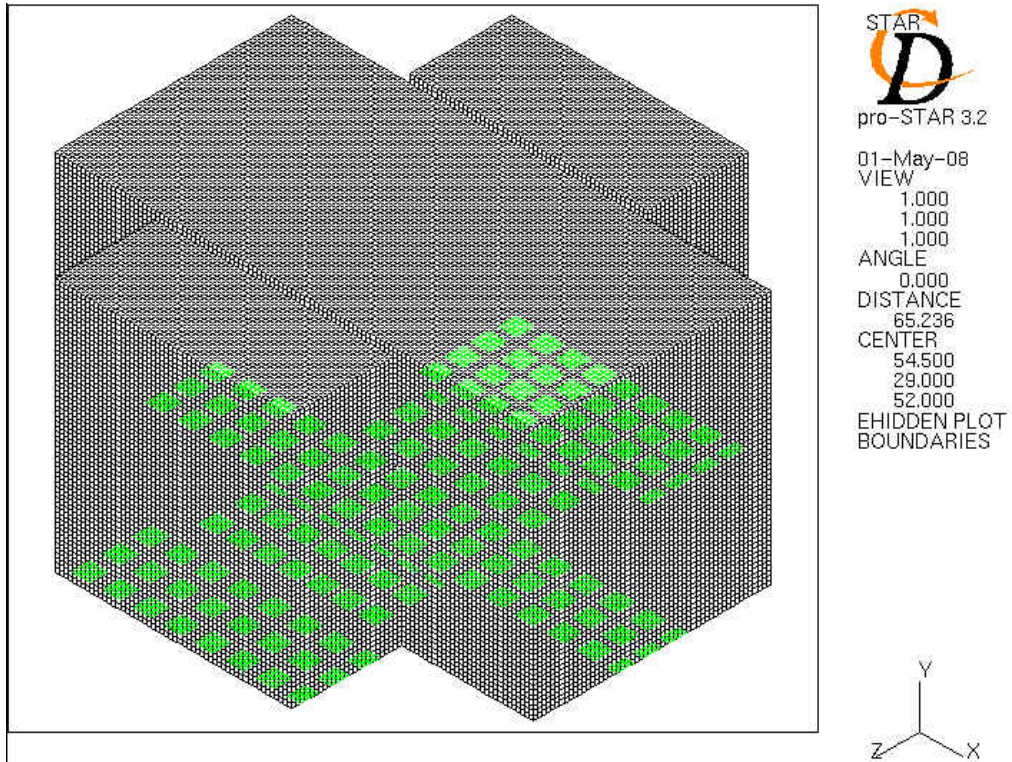


圖 4-13 兩設備 Outlet 分佈圖

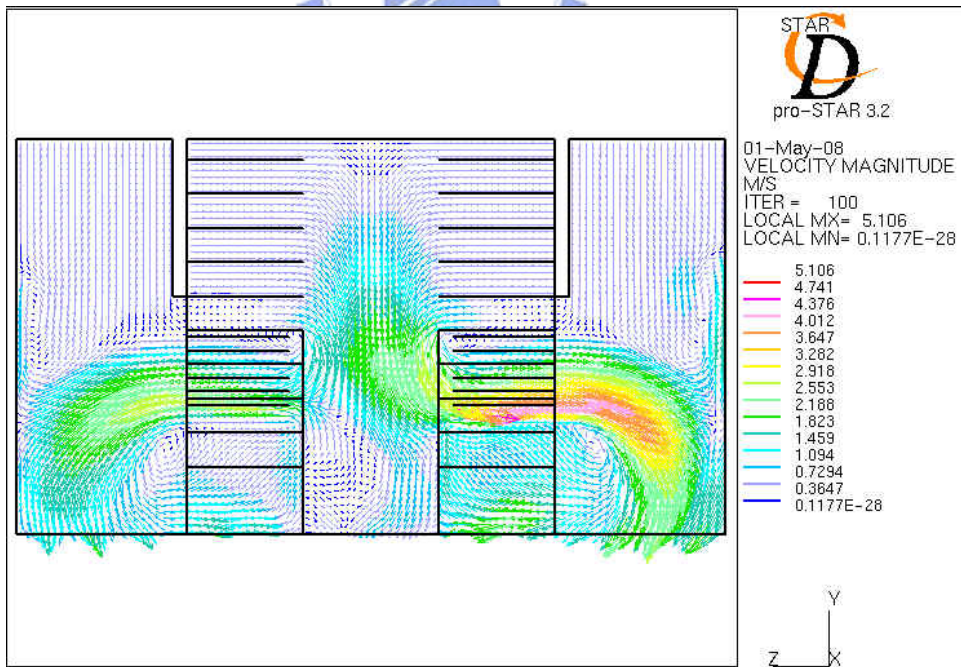


圖 4-14 兩個 Inline 設備靜態流場分析全圖

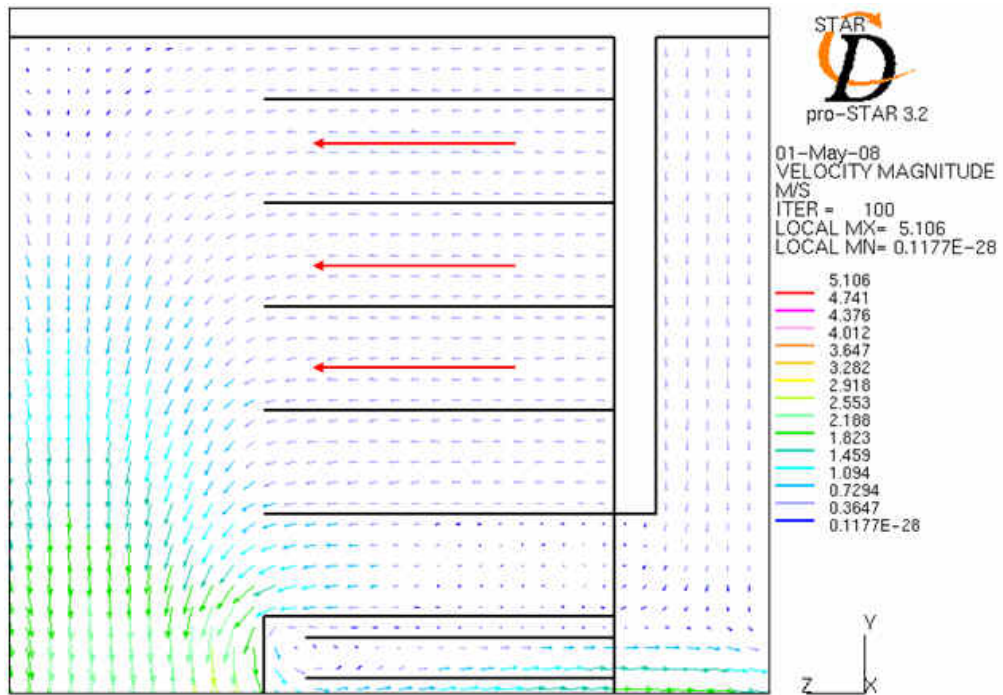


圖 4-15 兩個 Inline 設備靜態流場分析第一區域圖

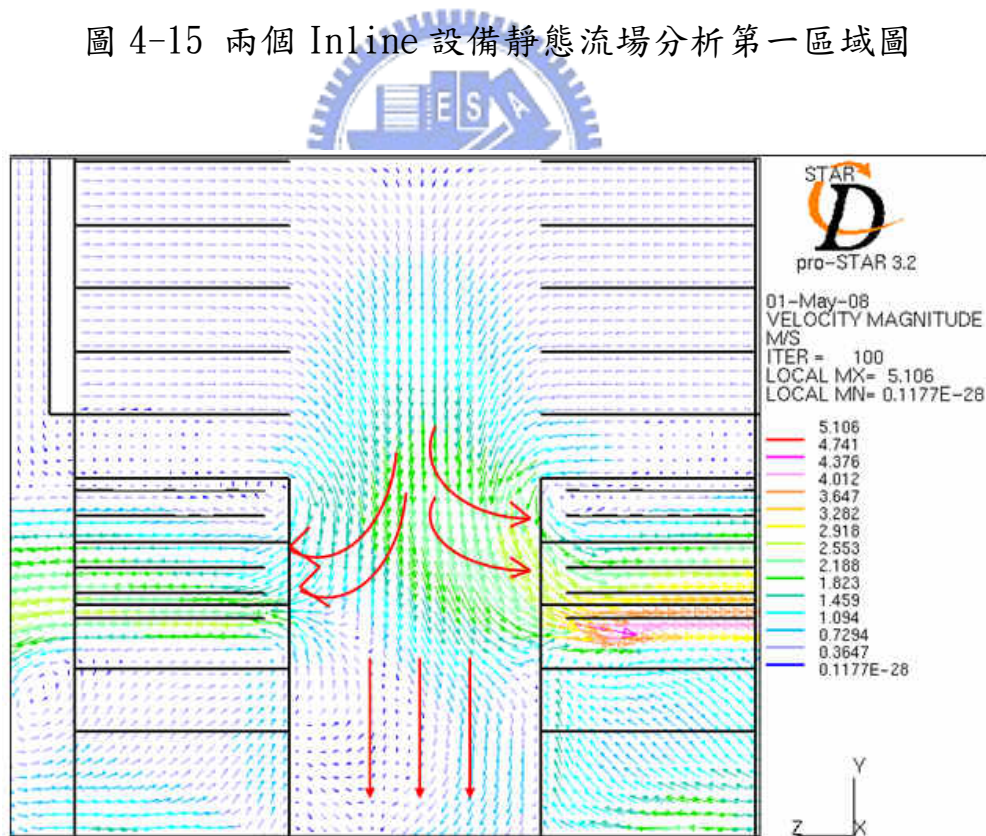


圖 4-16 兩個 Inline 設備靜態流場分析第二區域圖

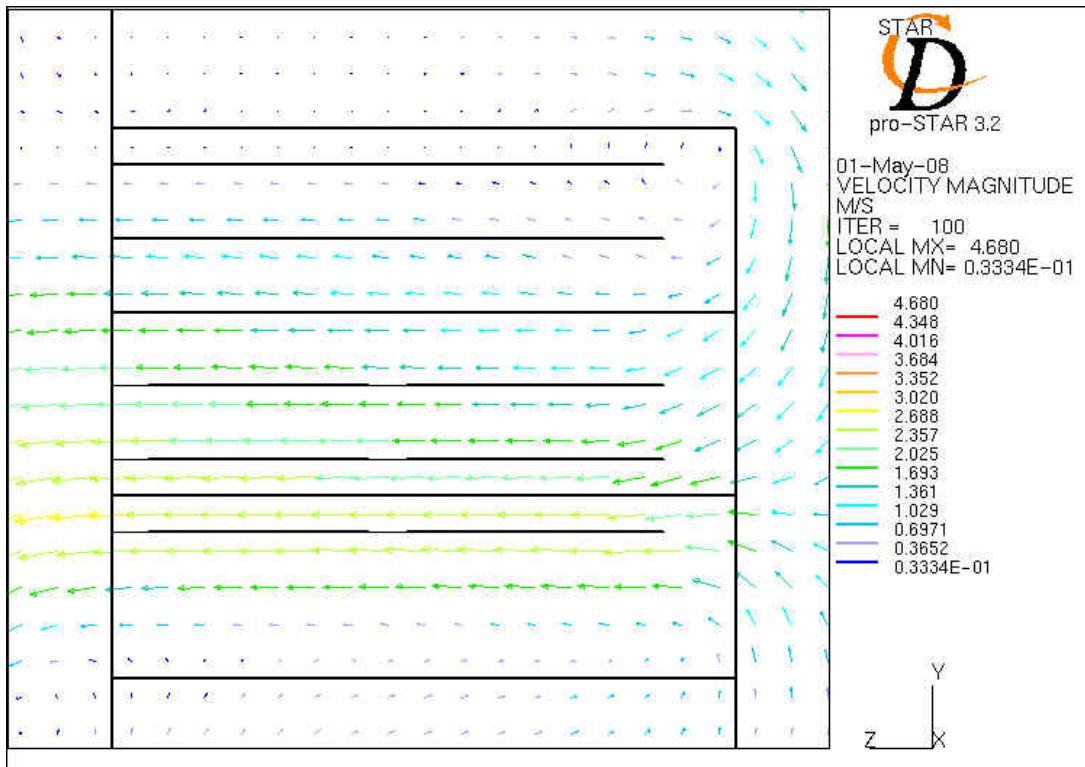


圖 4-17 兩個 Inline 設備靜態流場分析第三區域圖

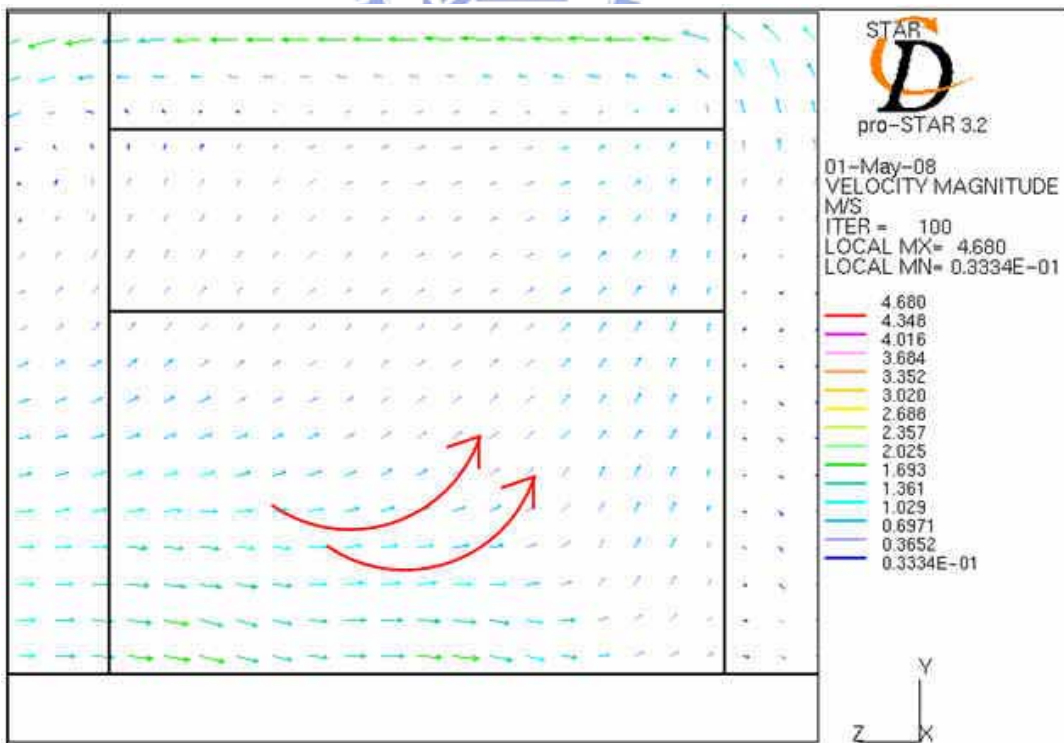


圖 4-18 兩個 Inline 設備靜態流場分析第四區域圖

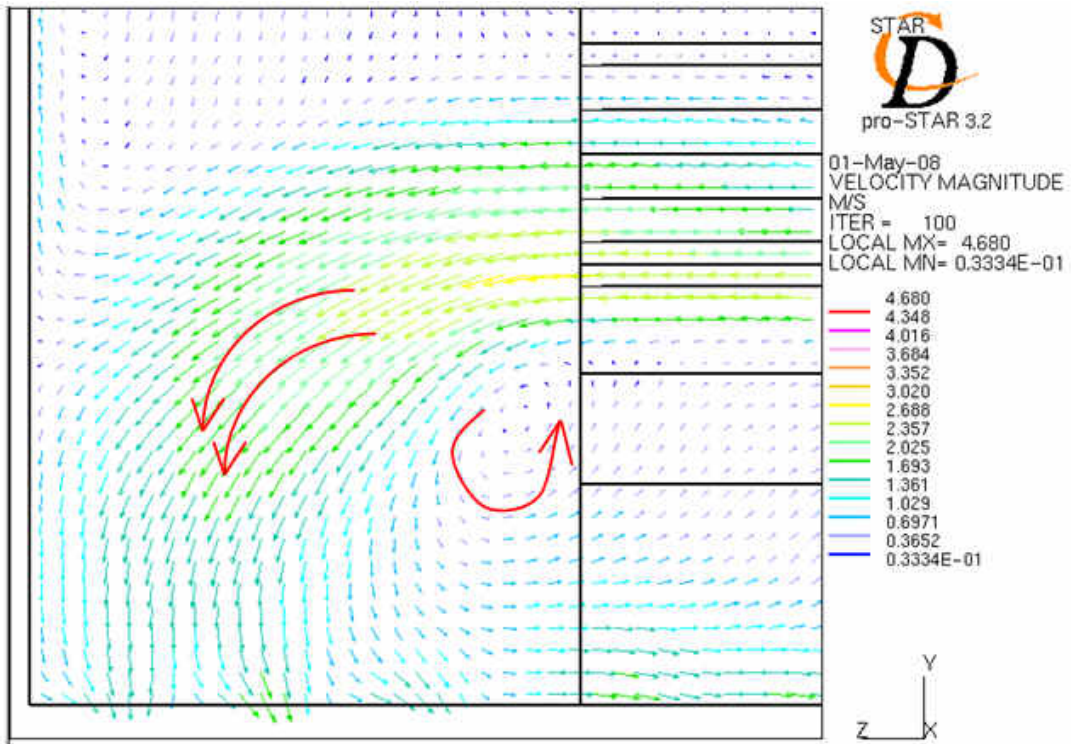


圖 4-19 兩個 Inline 設備靜態流場分析第五區域圖

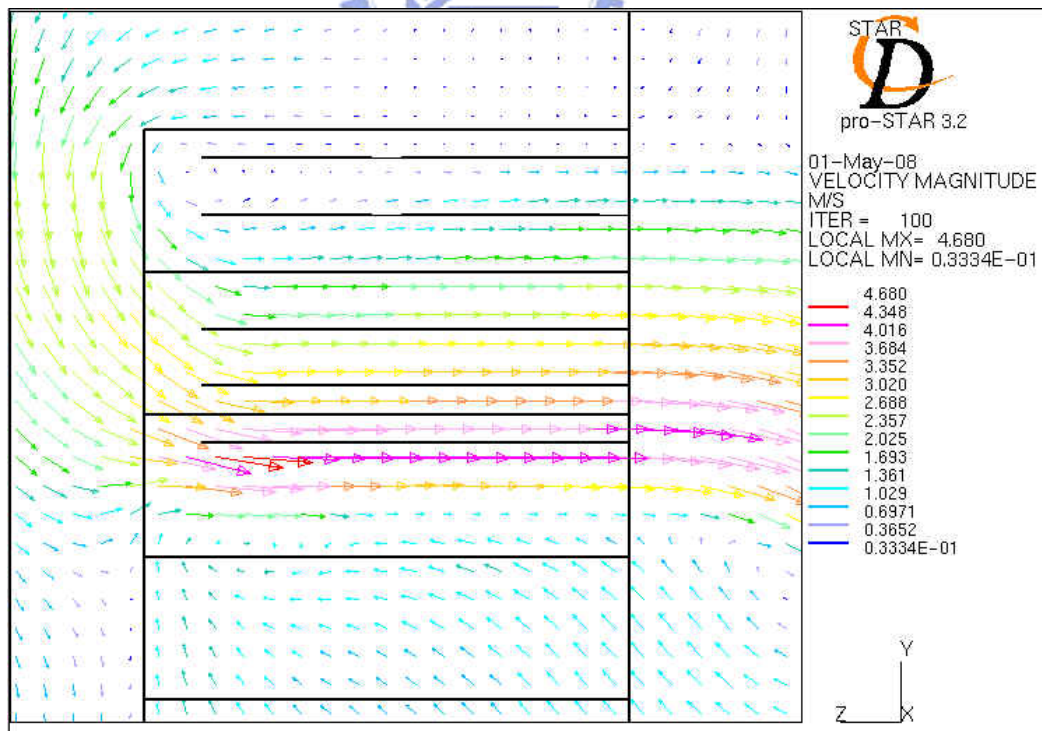


圖 4-20 兩個 Inline 設備靜態流場分析第六區域圖

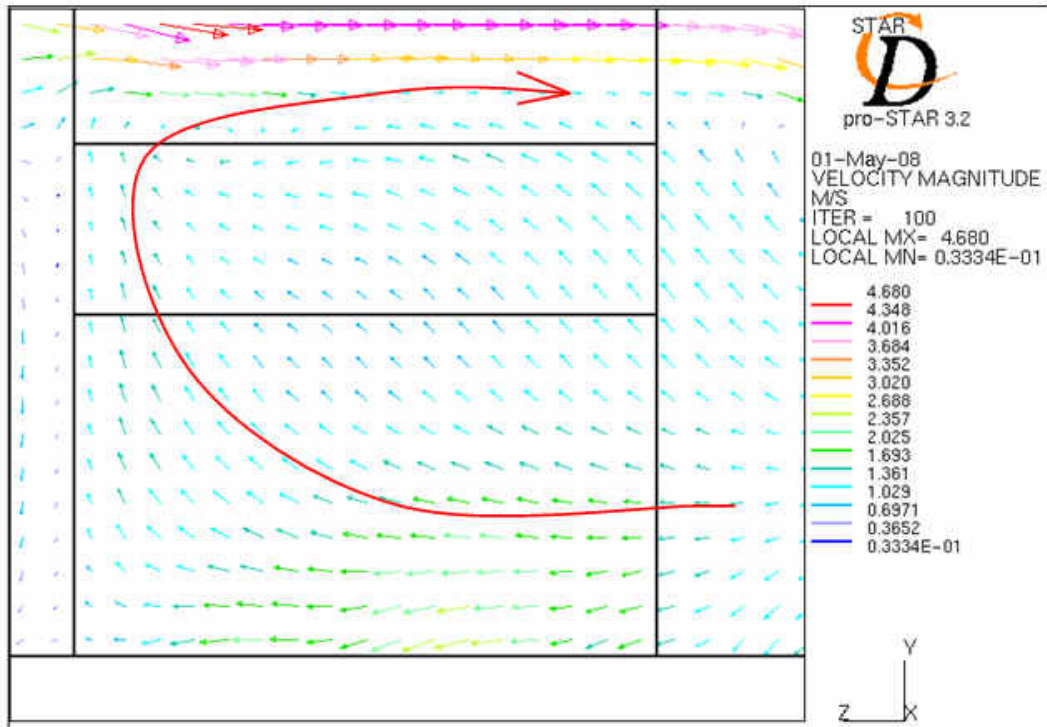


圖 4-21 兩個 Inline 設備靜態流場分析第七區域圖

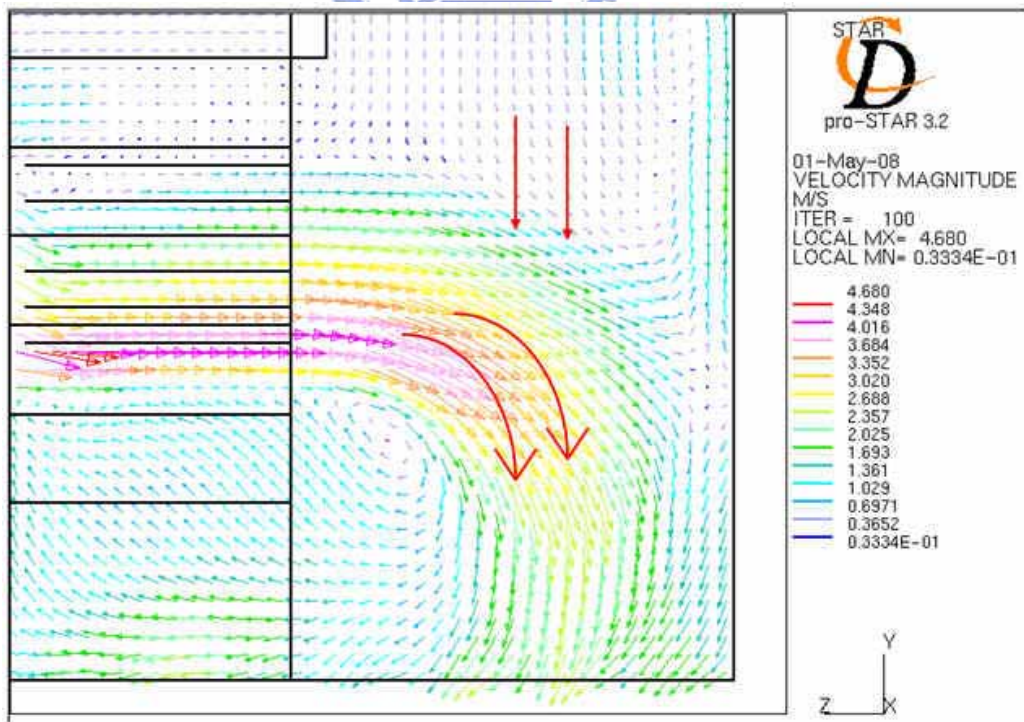


圖 4-22 兩個 Inline 設備靜態流場分析第八區域圖

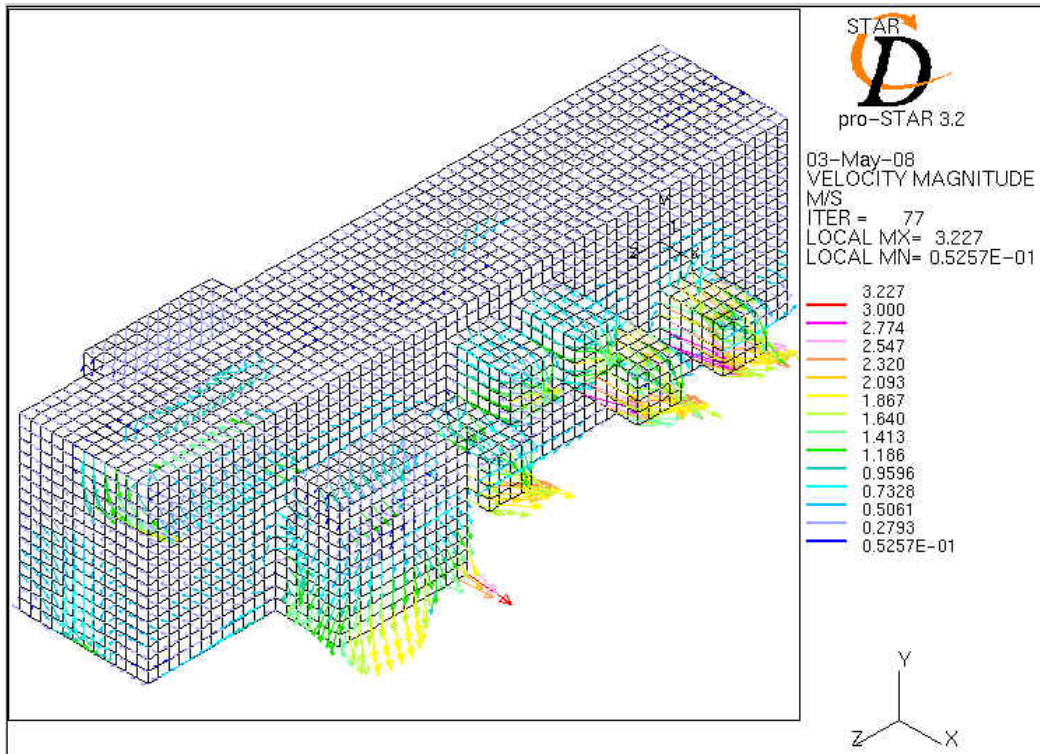


圖 4-23 多個進出 Port 靜態流場分析全圖

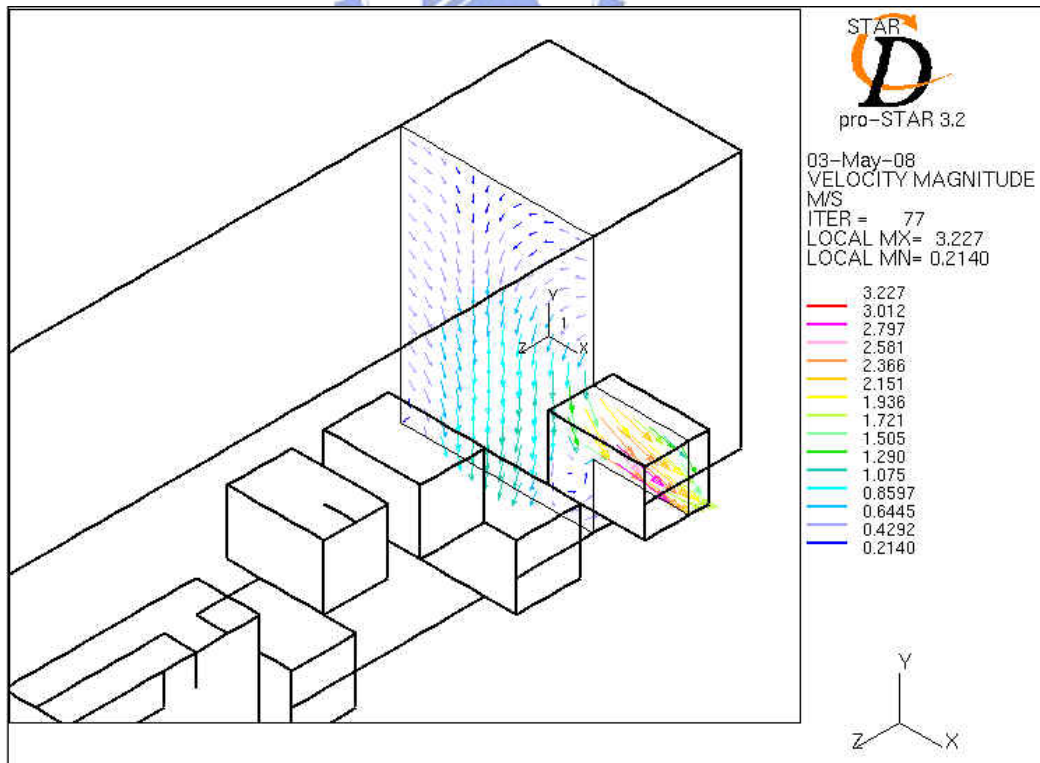


圖 4-24 MG V Port 靜態流場剖面圖

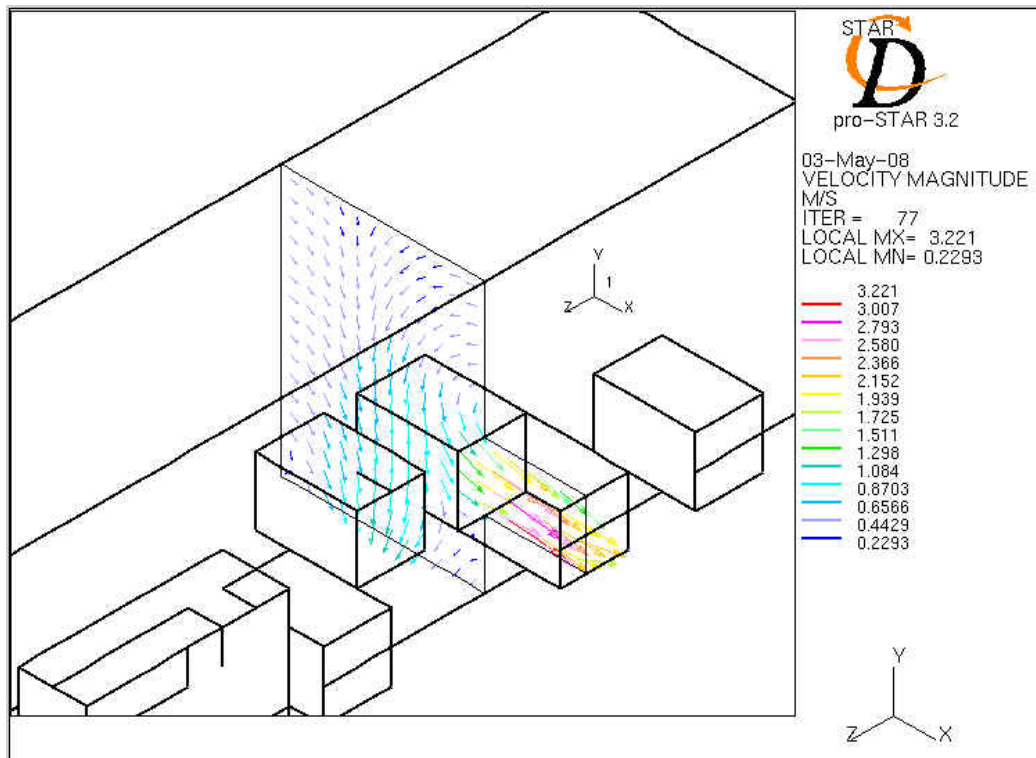


圖 4-25 AGV In Port 靜態流場剖面圖

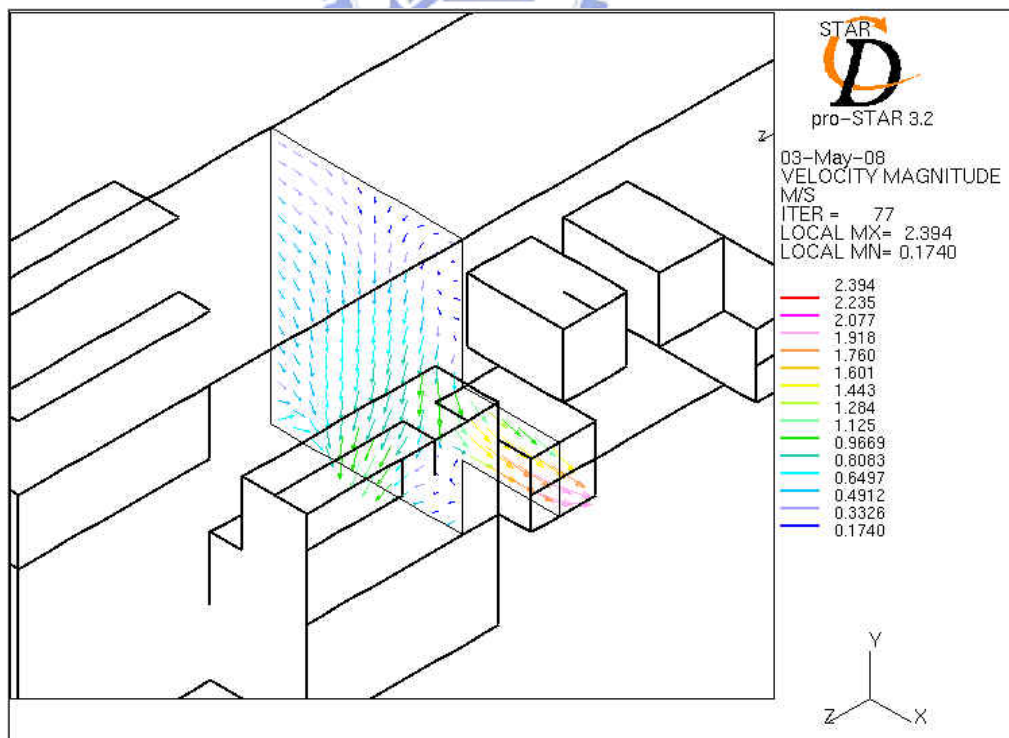


圖 4-26 AGV Out Port 靜態流場剖面圖

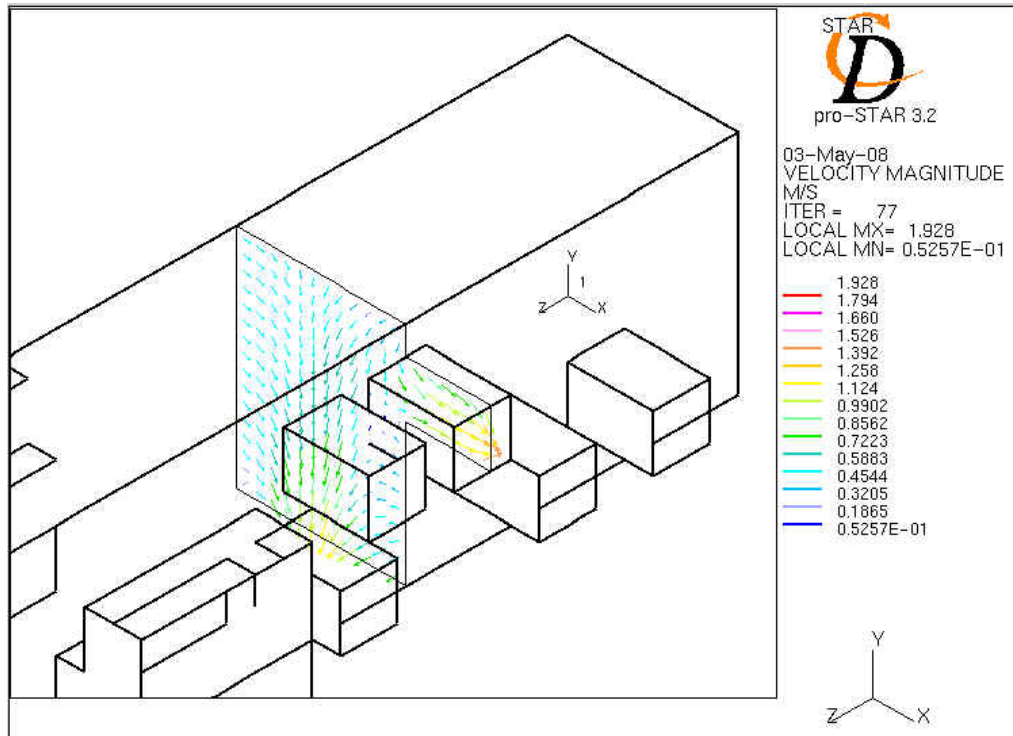


圖 4-27 CSC In Port 靜態流場剖面圖

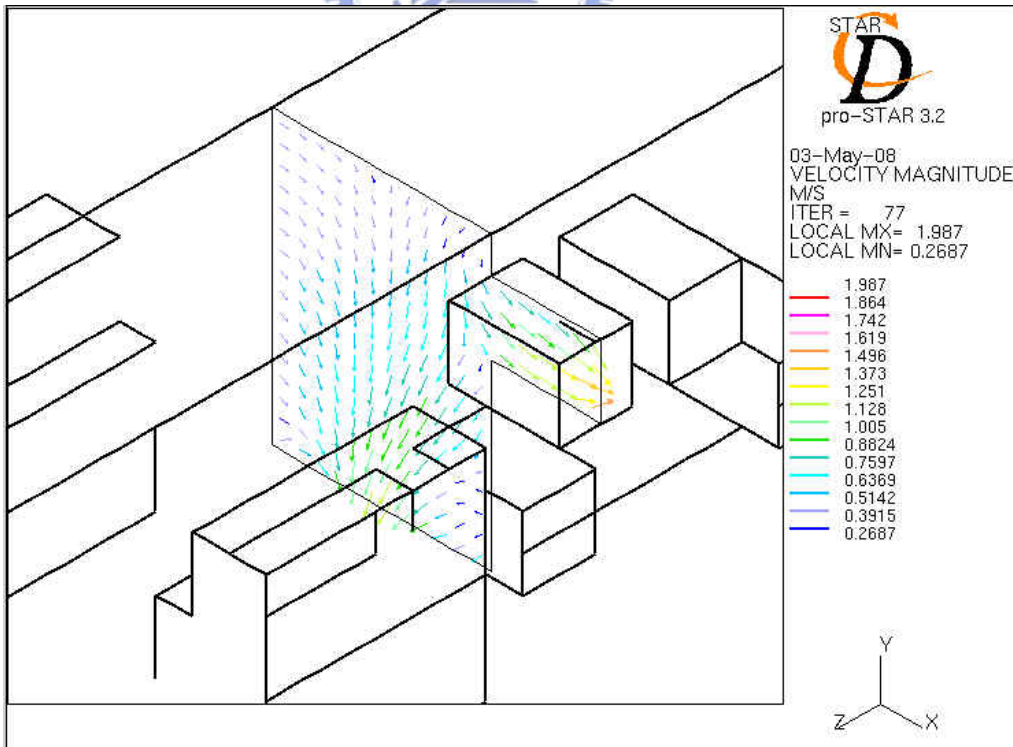


圖 4-28 CSC Out Port 靜態流場剖面圖

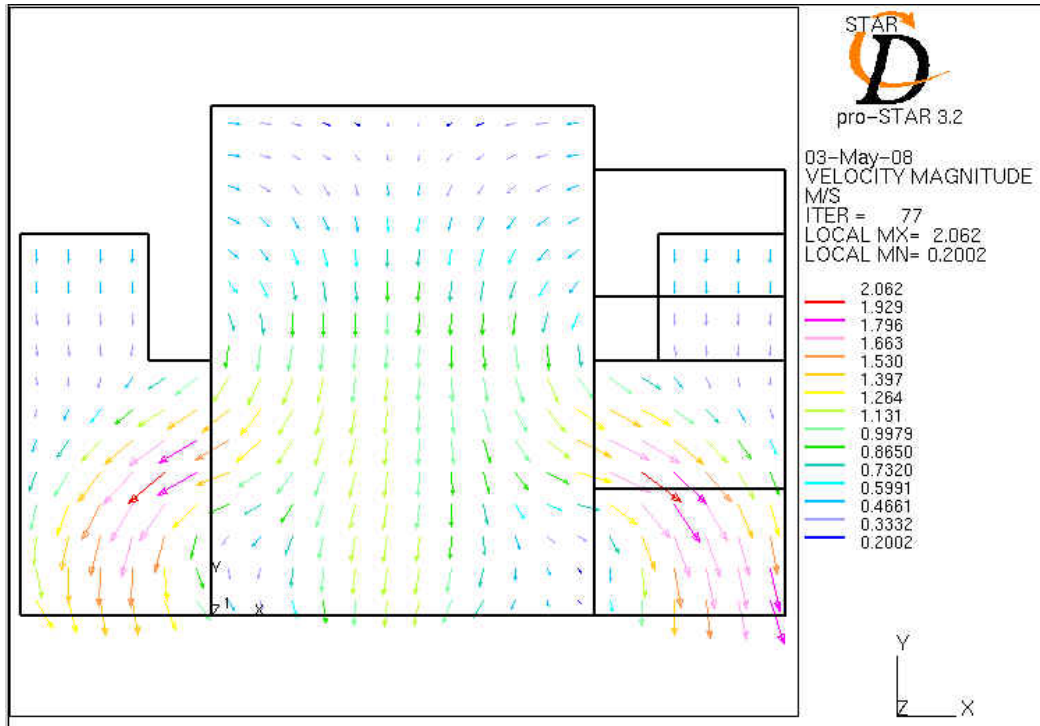


圖 4-29 機台 Port 靜態流場剖面圖

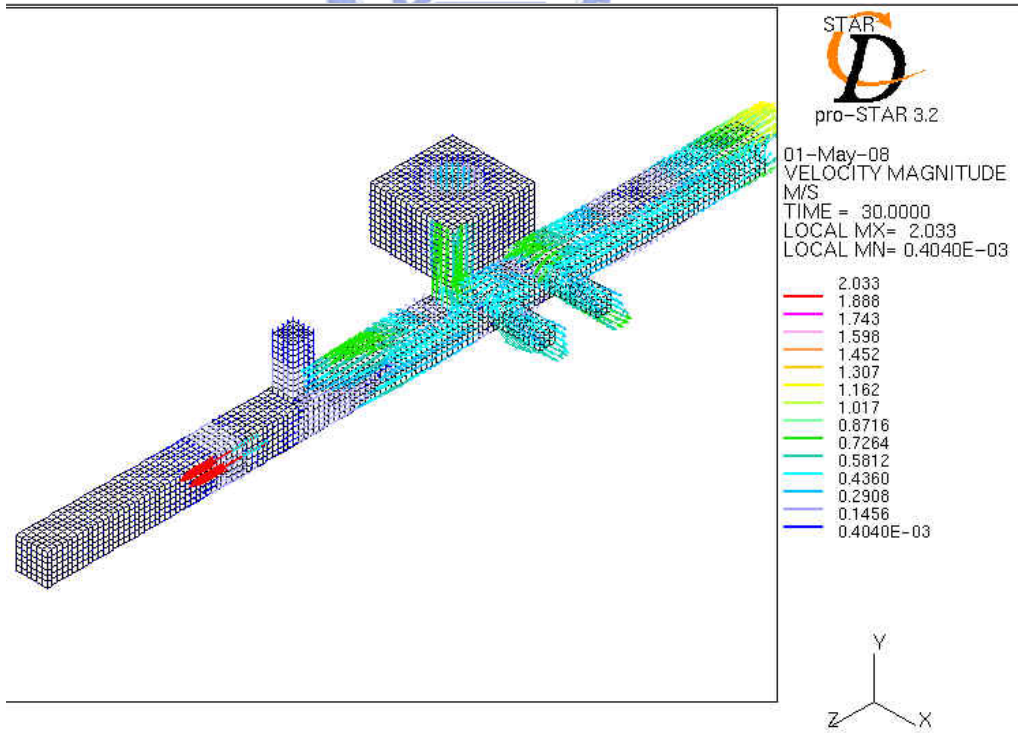


圖 4-30 自動倉儲動態流場變化全視圖

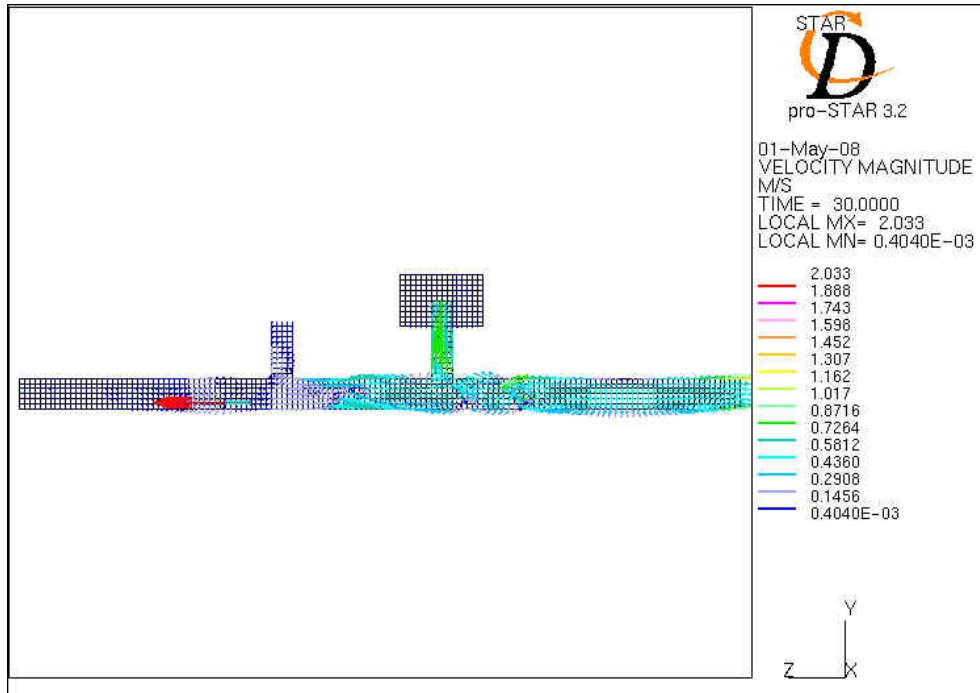


圖 4-31 自動倉儲動態流場變化正視圖

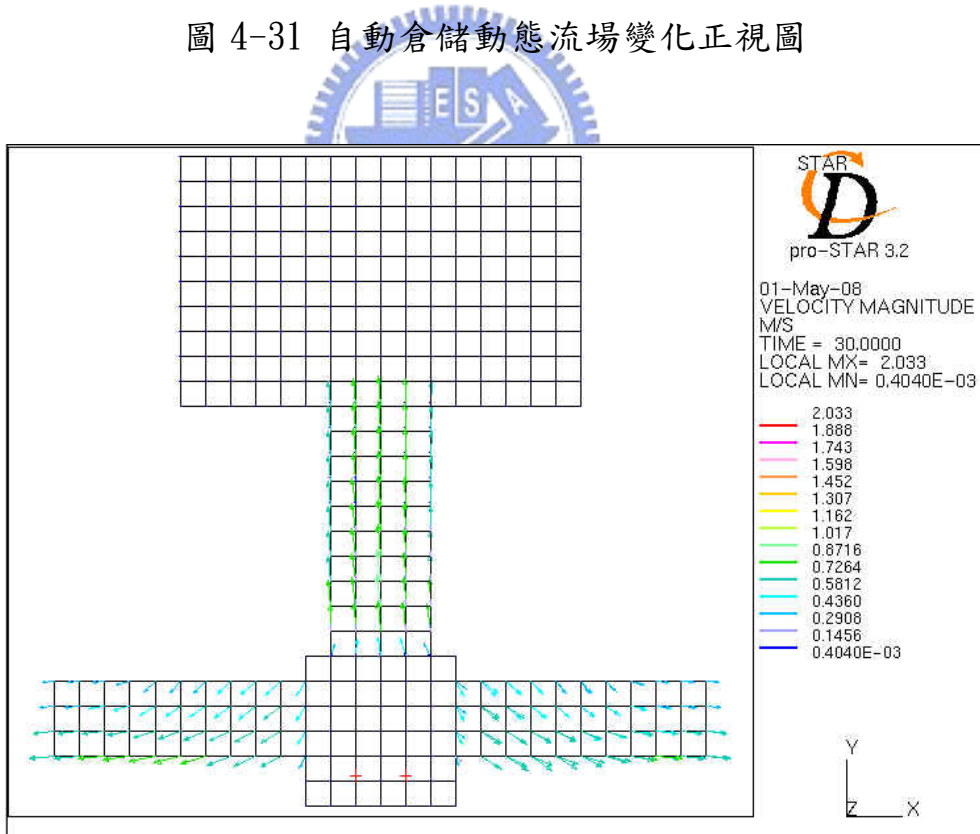


圖 4-32 自動倉儲動態流場變化側視圖

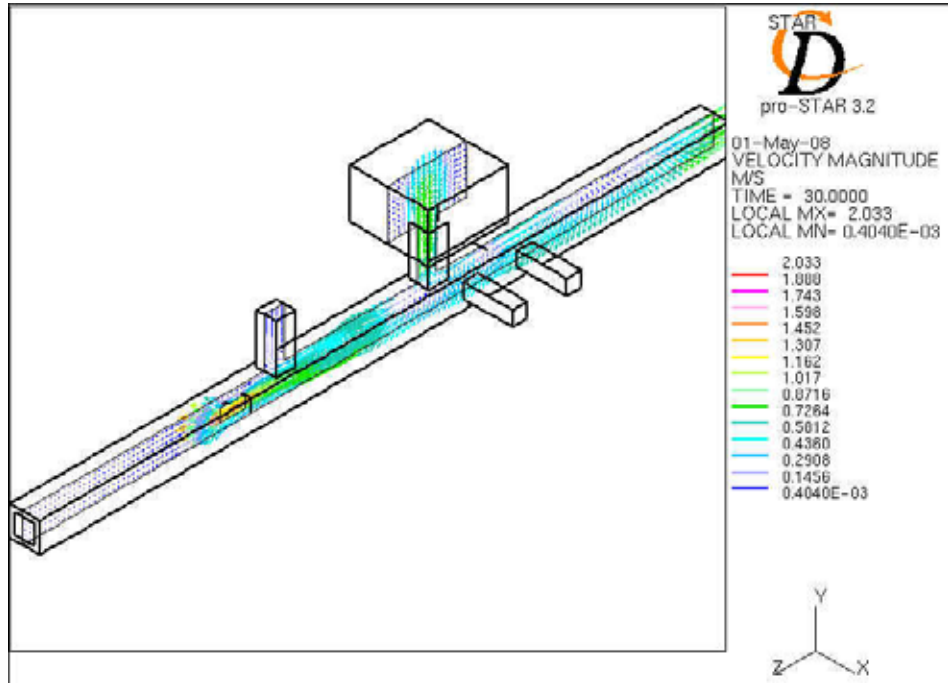


圖 4-33 自動倉儲動態流場變化全視側剖面圖

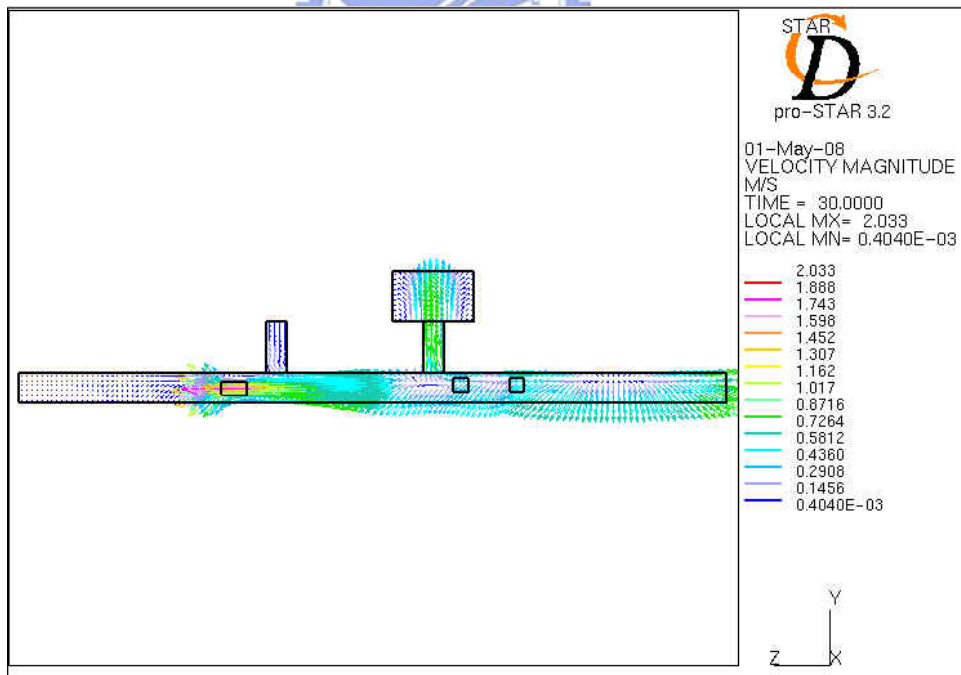


圖 4-34 自動倉儲動態流場變化正視內剖面圖

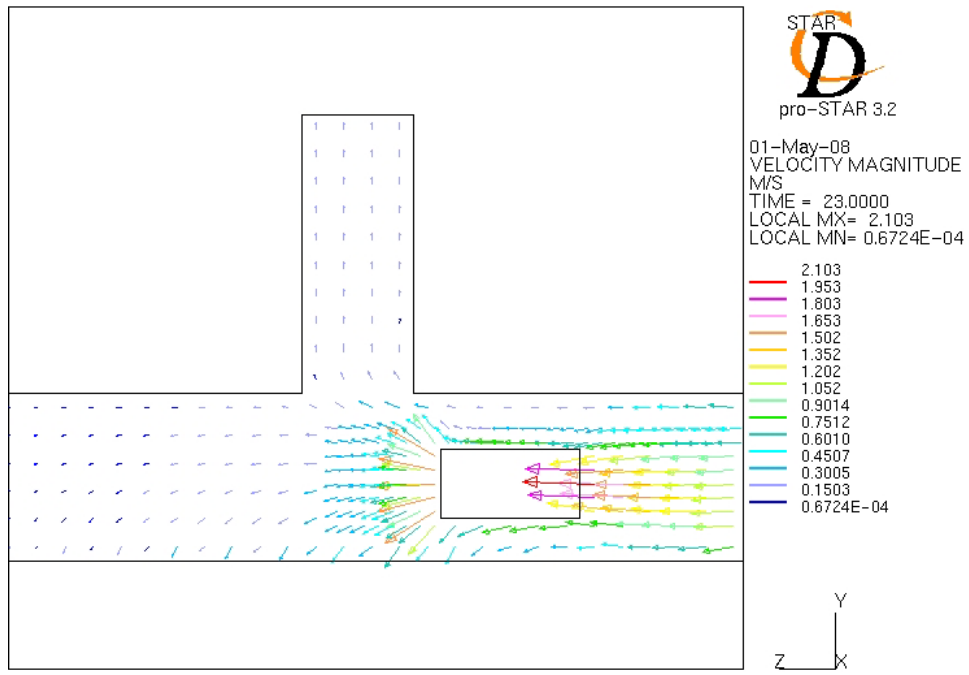


圖 4-35 自動倉儲側視局部移入流場圖

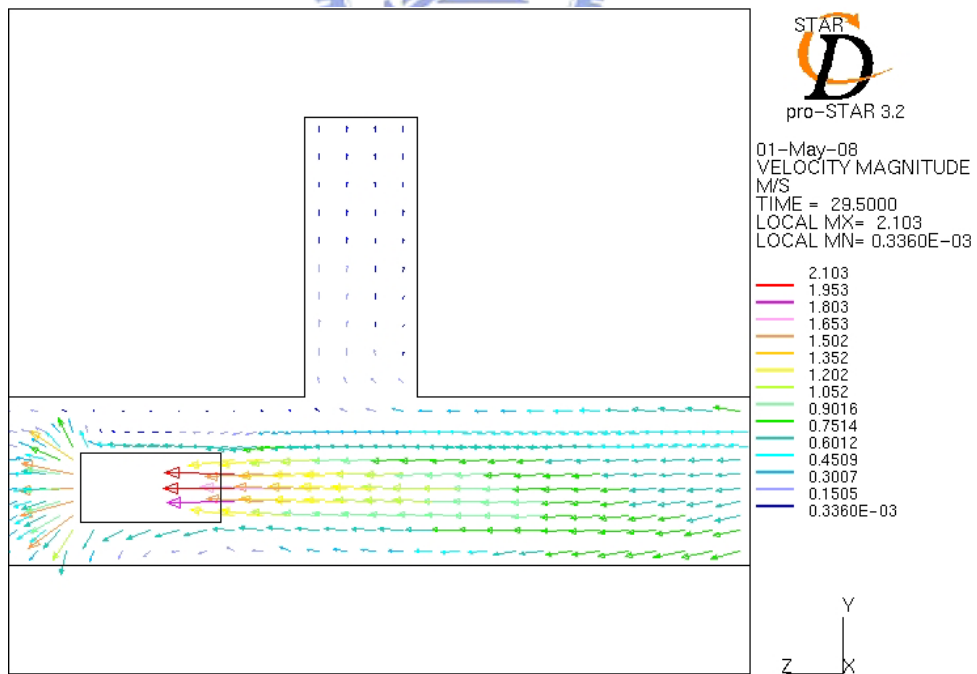


圖 4-36 自動倉儲側視局部移出流場圖

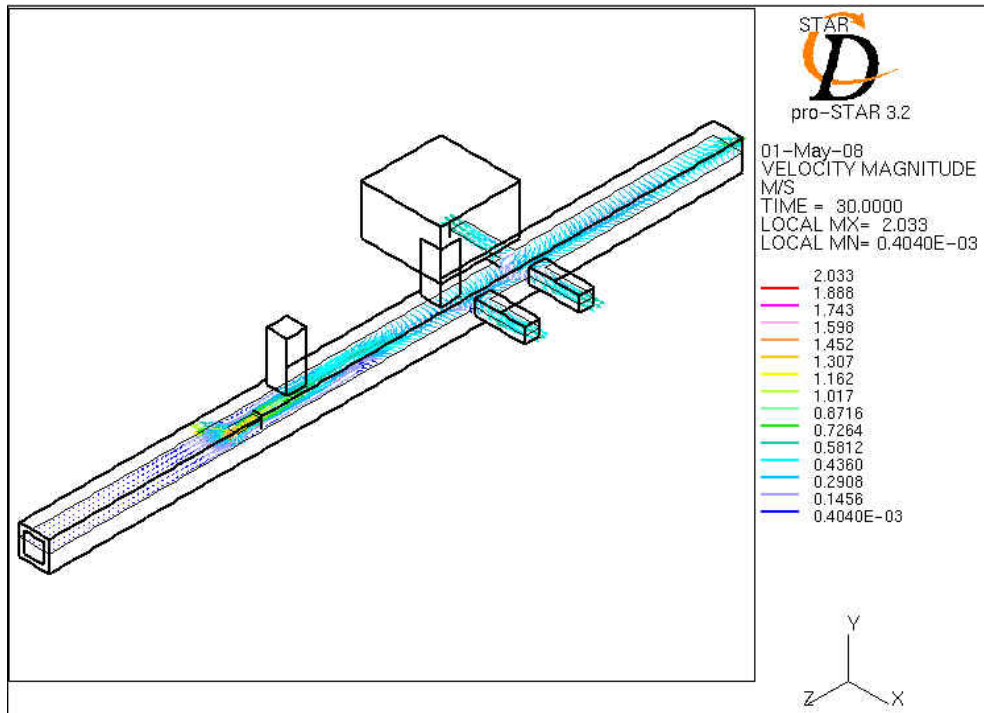


圖 4-37 自動倉儲動態流場變化全視上剖面圖

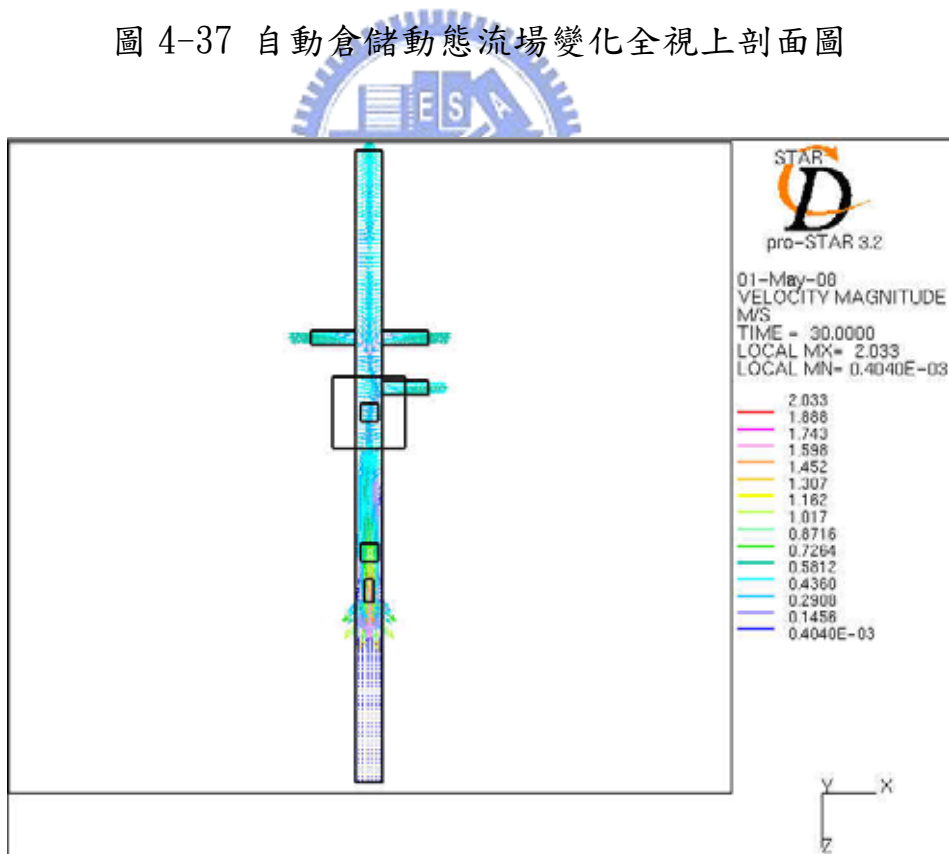


圖 4-38 自動倉儲動態流場變化俯視內剖面圖

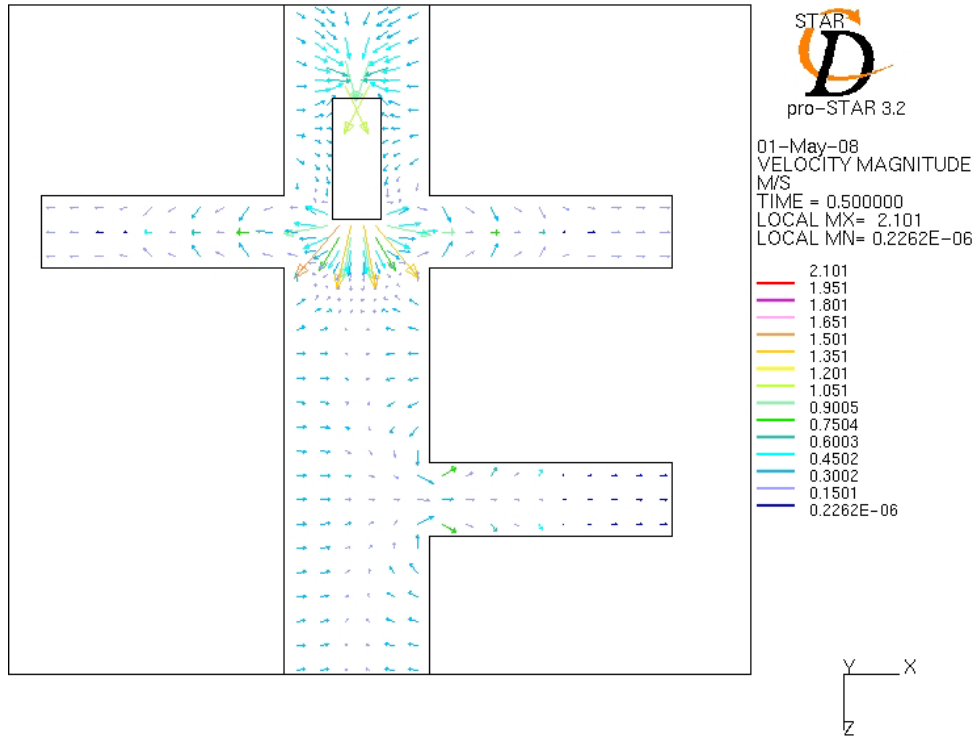


圖 4-39 自動倉儲俯視局部移入流場圖

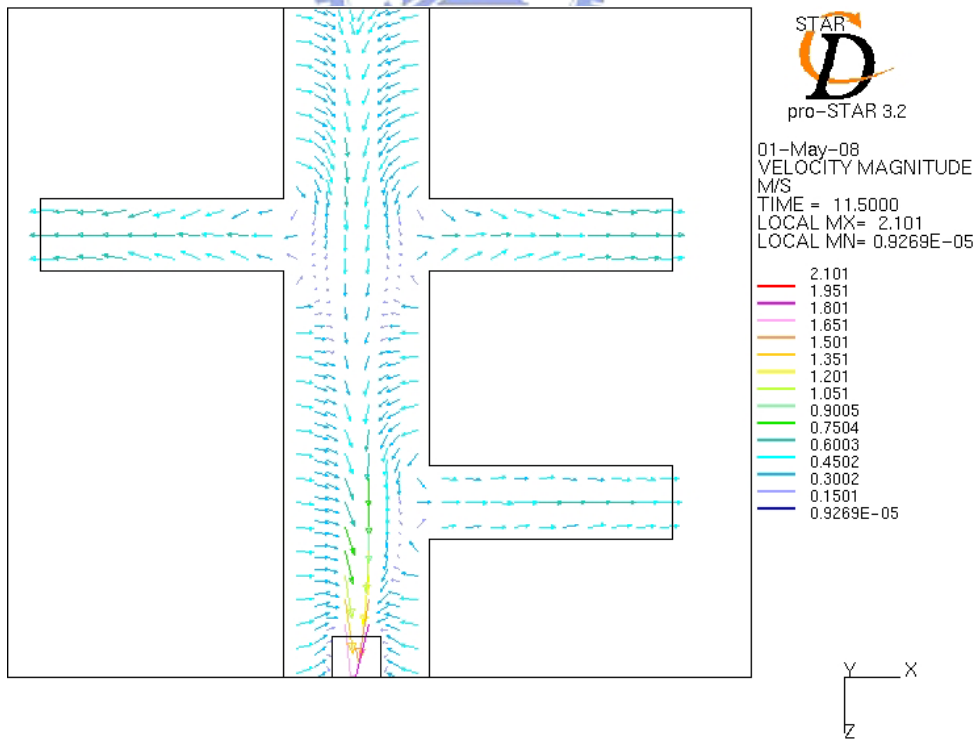


圖 4-40 自動倉儲俯視局部移出流場圖

4.3 微粒子移動軌跡探討

微粒子移動分成兩大部分去做探討，第一部分為微粒子對兩個機台進出口，第二部分為多個進出口時在不同位置微粒子的影響程度。

4.3.1 兩個機台進出口微粒子探討

在兩個機台進出口中，可明顯發現所設定的十二個微粒子來源其軌跡為由上往下至 Outlet 處排出，若遇擾流時其軌跡為不規則方式移動如圖 4-41、圖 4-42、圖 4-43 及圖 4-44 所示；再來針對微粒子來源發生於自動倉儲上方時，可發現其微粒子的軌跡大部分會由上往下直接由下方的 Outlet 處排出，而靠近於機台進出口的部分，其軌跡會延伸至機台內部，如圖 4-45、圖 4-46 及圖 4-47 所示；若再搭配上其流場的分佈變化就可明顯看出其微粒子移動的軌跡與流場有絕對的相關性，也就證明為何靠近機台進出口的微粒子容易進入機台進出口內部，如圖 4-48、圖 4-49 及圖 4-50 所示，接著針對微粒子來源發生於自動倉儲中間高度，可發現其微粒子的軌跡大部分會延伸其機台進出口內部，就算離機台進出口較遠的微粒子來源，也容易流向機台進出口，由於內部擾流所影響大多為不規則軌跡，只有少部分發生源於自動倉儲正中央的微粒子較有機會直接由下方 Outlet 排出，不影響其內部製品，如圖 4-51、圖 4-52 及圖 4-53 所示；在搭配上自動倉儲內其氣流的變化就可明顯看出其微粒子移動的軌跡與流場有絕對的相關性，也就證明為何靠近機台進出口的微粒子容易進入機台進出口內部，如圖 4-54、圖 4-55 及圖 4-56 所示。

4.3.2 多個進出口微粒子探討

在多個進出口中，也可明顯發現所設定的十八個微粒子來源其軌跡為由上往下至 Outlet 處排出，由於多個進出口 Outlet 的分佈為靠近機台部分較自動倉儲後部多，所以可明顯發現其 Z 軸方向流場會往機台端移動，也導致微粒子的軌跡會向機台端移動趨勢，若遇擾流時其軌跡為不規則方式如圖 4-57 及圖 4-58 所示；接著針對微粒子來源於不同位置時的狀況做探討，當微粒子發生於自動倉儲上方且不靠近機台進出口時，其三個微粒子來源皆為由上往下直接由下方 Outlet 處排出，如圖 4-59 所示；當微粒子發生於自動倉儲正上方且靠近機台進出口時，其微粒子大部分會隨著氣

流的方向而流入機台進出口內部，也較容易影響機台上的產品，如圖 4-60 所示；當微粒子發生於自動倉儲上方但靠近 CSC 出口時，可發現靠近 CSC 出口的微粒子會直接由 CSC 出口排出，其餘會經由下方 Outlet 處排出，如圖 4-61 所示；當微粒子發生於自動倉儲上方但靠近 CSC 入口時，可發現靠近 CSC 入口的微粒子會直接由入口端排出，其餘由 CSC 出口端排出，如圖 4-62 及圖 4-63 所示；當微粒子發生於自動倉儲 AGV 入口上方時，可發現其微粒子少部分由下方 Outlet 排出，其餘會由下方 AGV 出口直接排出，如圖 4-64 及圖 4-65 所示；當微粒子發生於自動倉儲 MGV 進出口上方時，可發現其微粒子少部分由下方 Outlet 排出，其餘接近進出口的微粒子會由 AGV 入口處排出，如圖 4-66 所示。

由於微粒子的軌跡會因流場的方向去做移動，所以由以上幾個部分做探討後可明顯發現，在自動倉儲棚位內的產品因有 FFU 維持其潔淨度，所以在外部產生的微粒子不容易移動至自動倉儲存區內，但最下層棚位內的产品受影響的可能性較高，其餘進出口如機台 AGV、MGV 以及 CSC 皆會受微粒子影響。

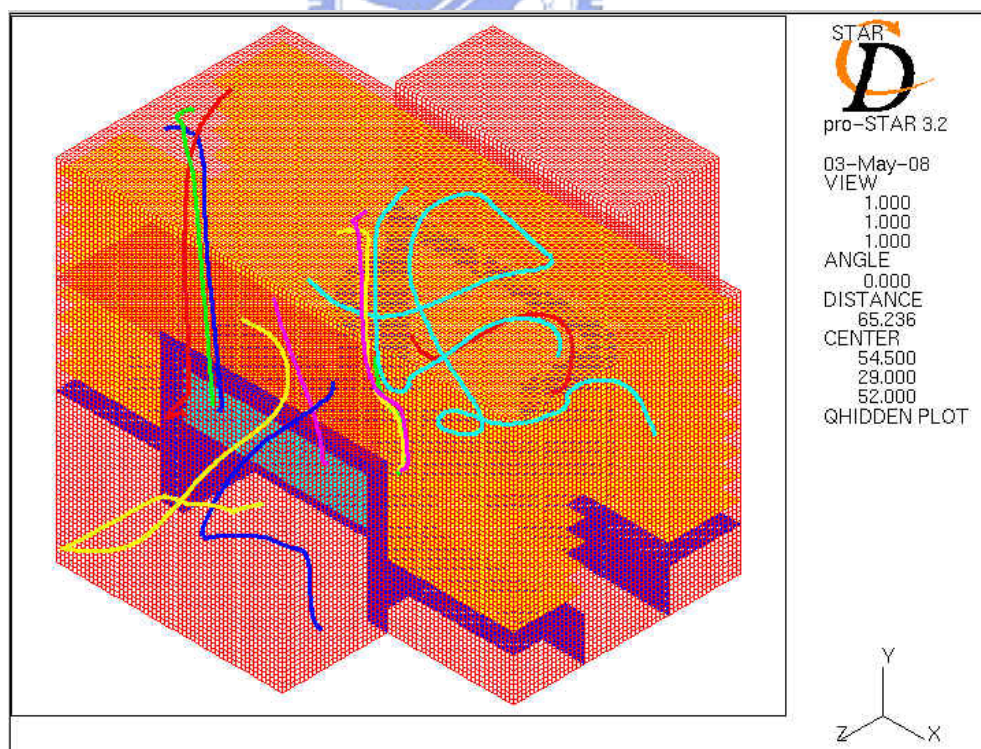


圖 4-41 全部 Particle 軌跡全視圖

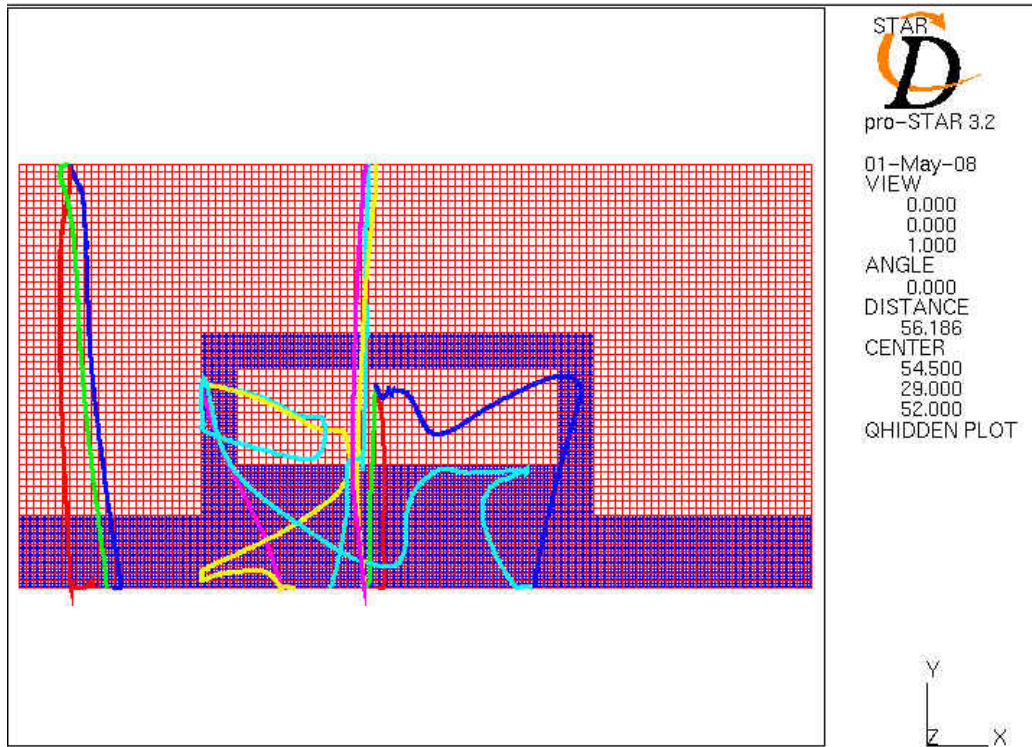


圖 4-42 全部 Particle 軌跡正視圖

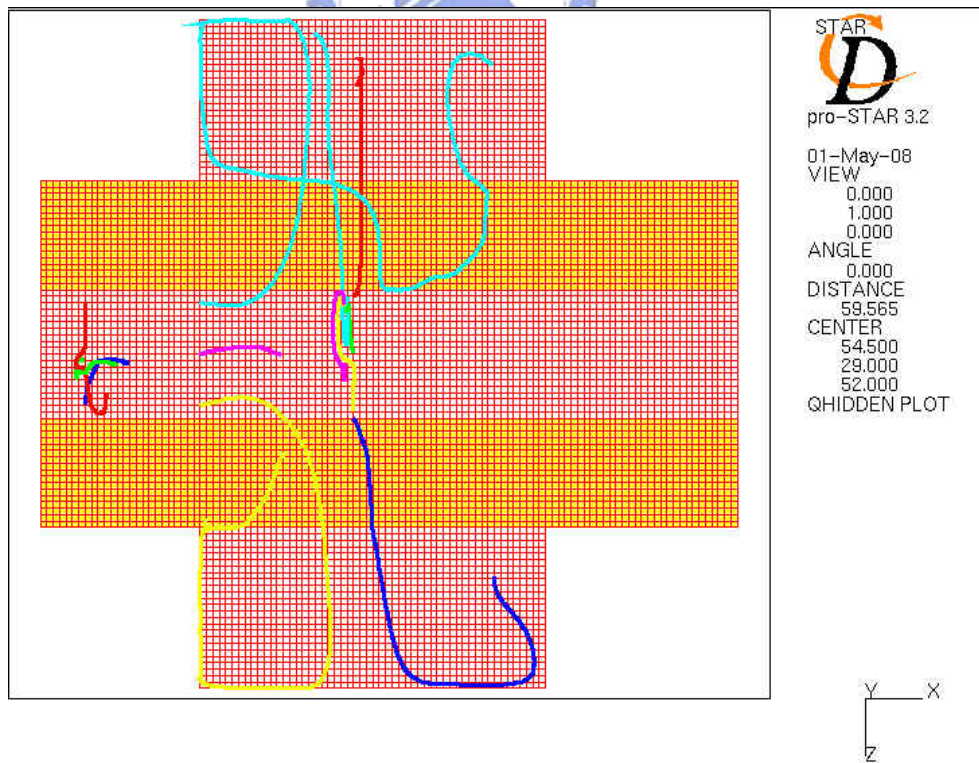


圖 4-43 全部 Particle 軌跡俯視圖

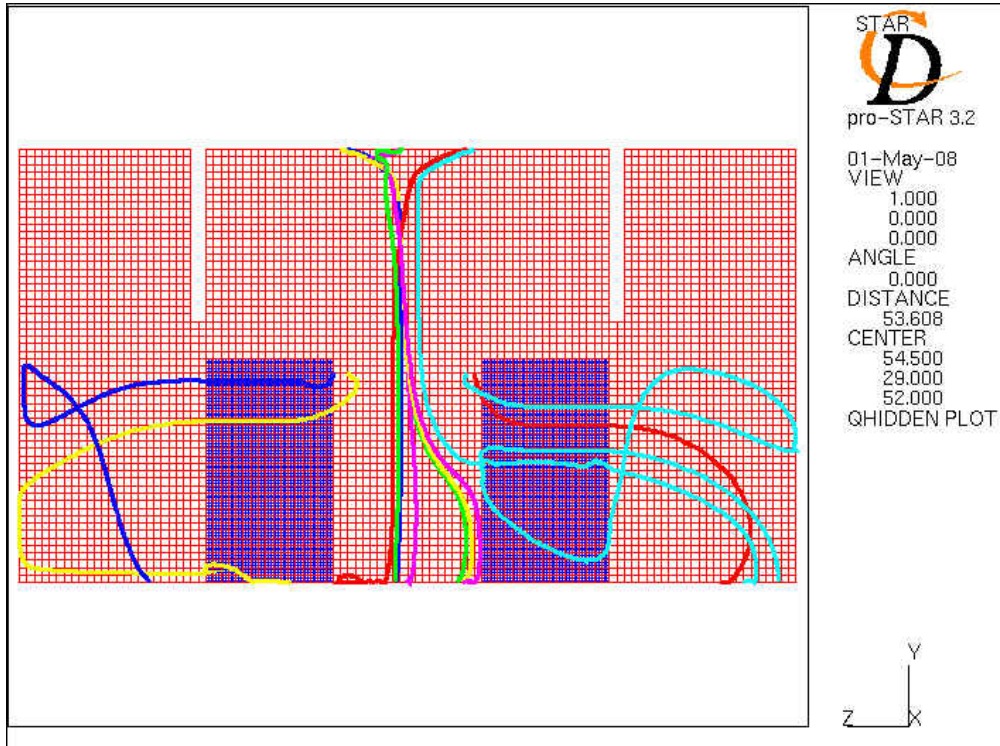


圖 4-44 全部 Particle 軌跡側視圖

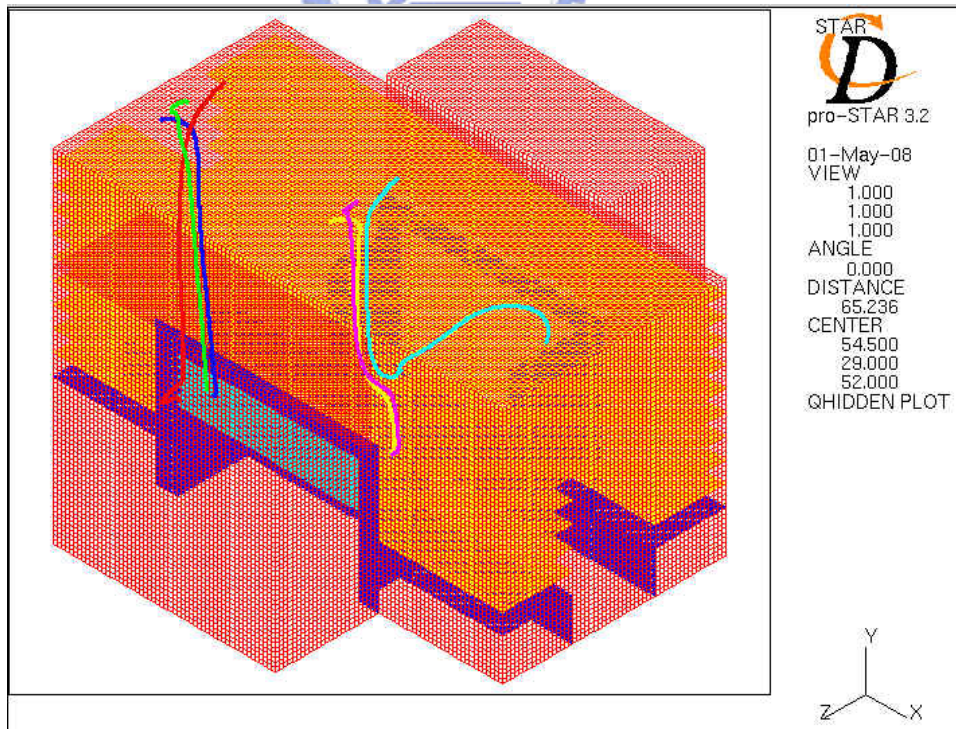


圖 4-45 Particle 發生源於自動倉儲上方時軌跡圖

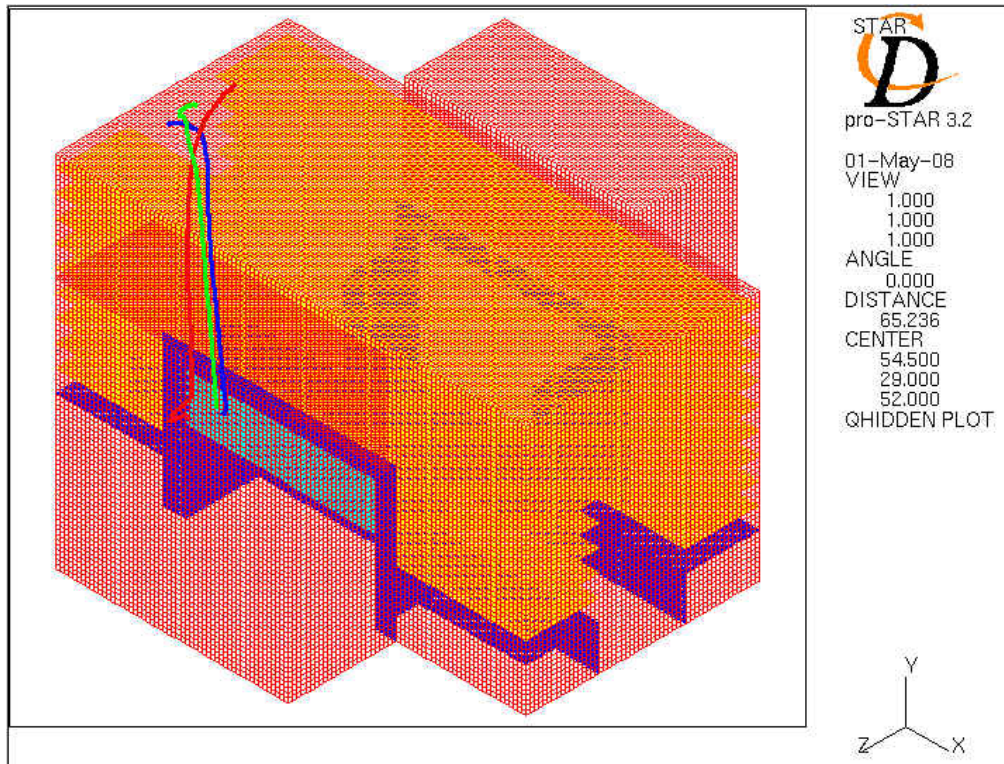


圖 4-46 Particle 發生源於機台 Port 位外側上方時軌跡圖

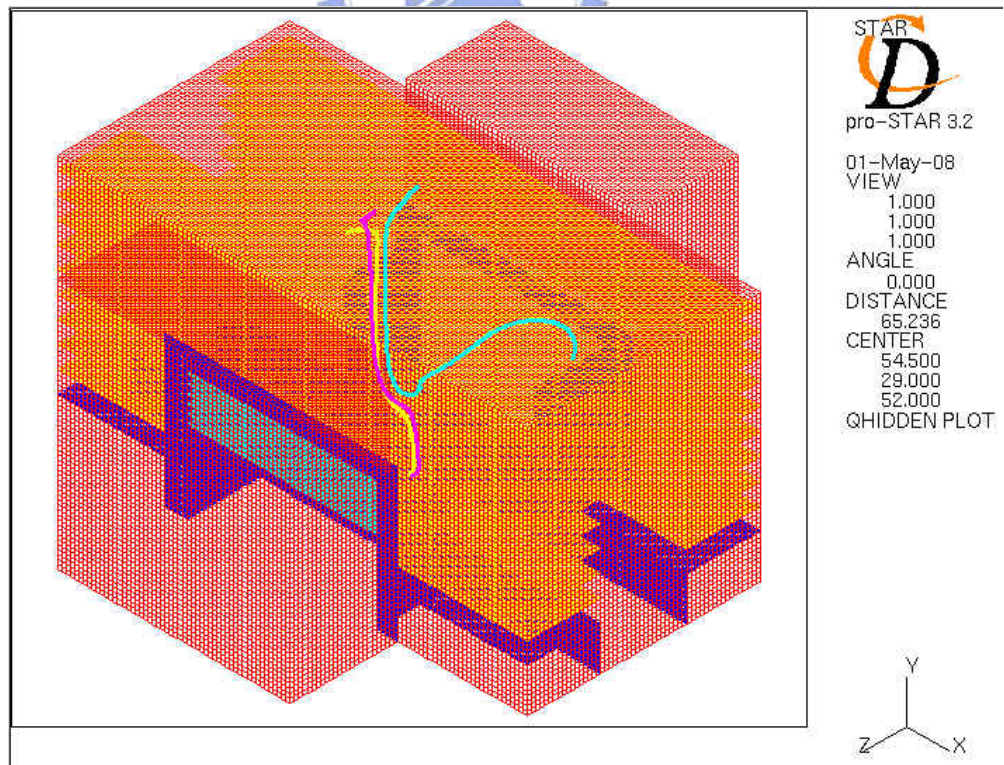


圖 4-47 Particle 發生源於機台 Port 上方時軌跡圖

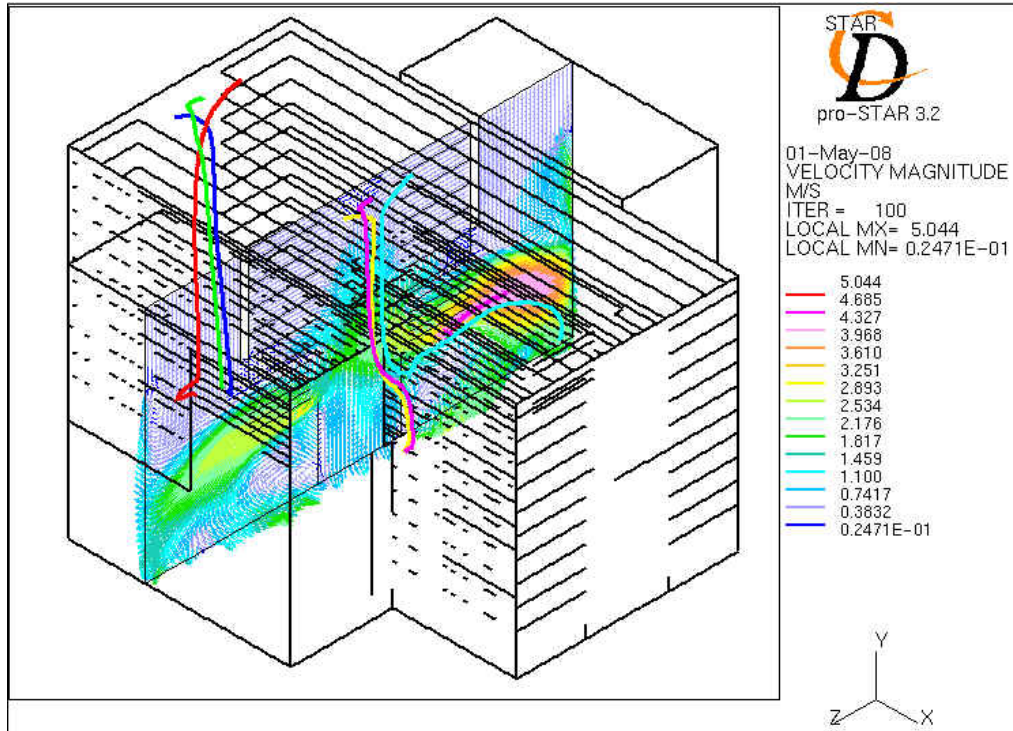


圖 4-48 Particle 發生源於自動倉儲上方時軌跡流場全視圖

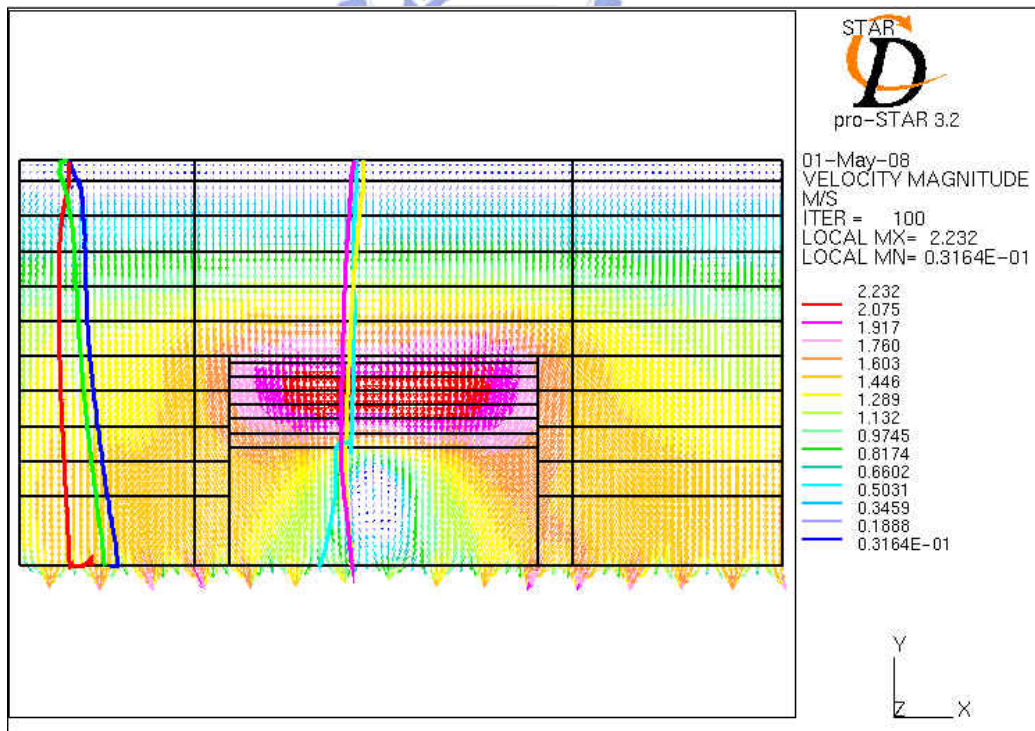


圖 4-49 Particle 發生源於自動倉儲上方時軌跡流場正視圖

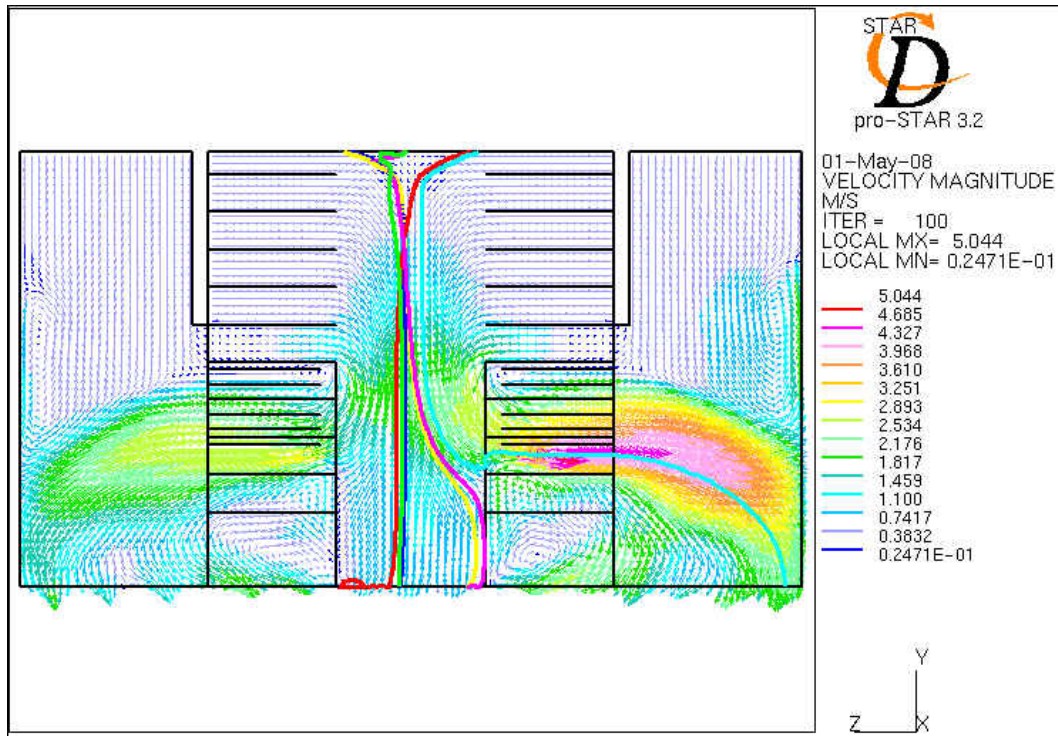


圖 4-50 Particle 發生源於自動倉儲上方時軌跡流場側視圖

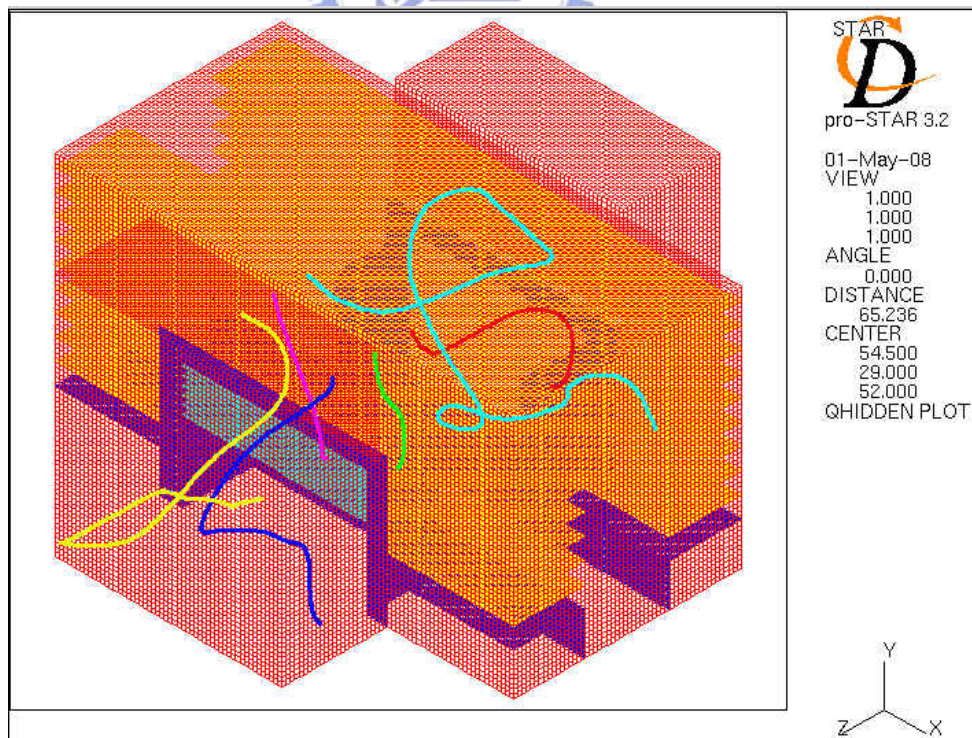


圖 4-51 Particle 發生源於自動倉儲中間位置時軌跡圖

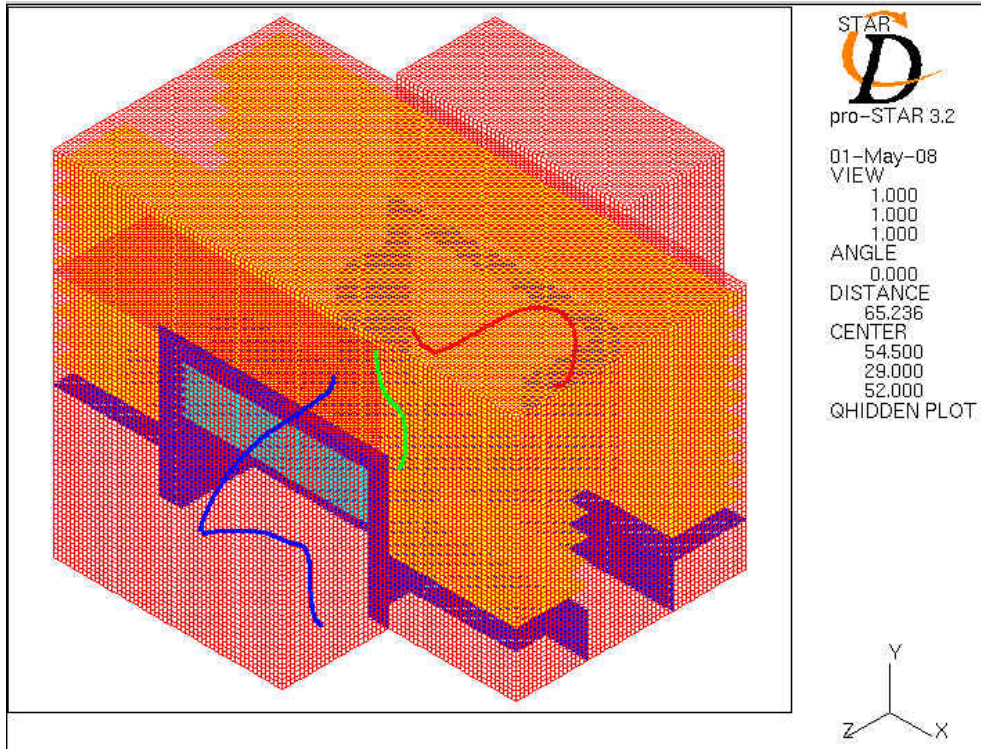


圖 4-52 Particle 發生源於機台 Port 時軌跡圖

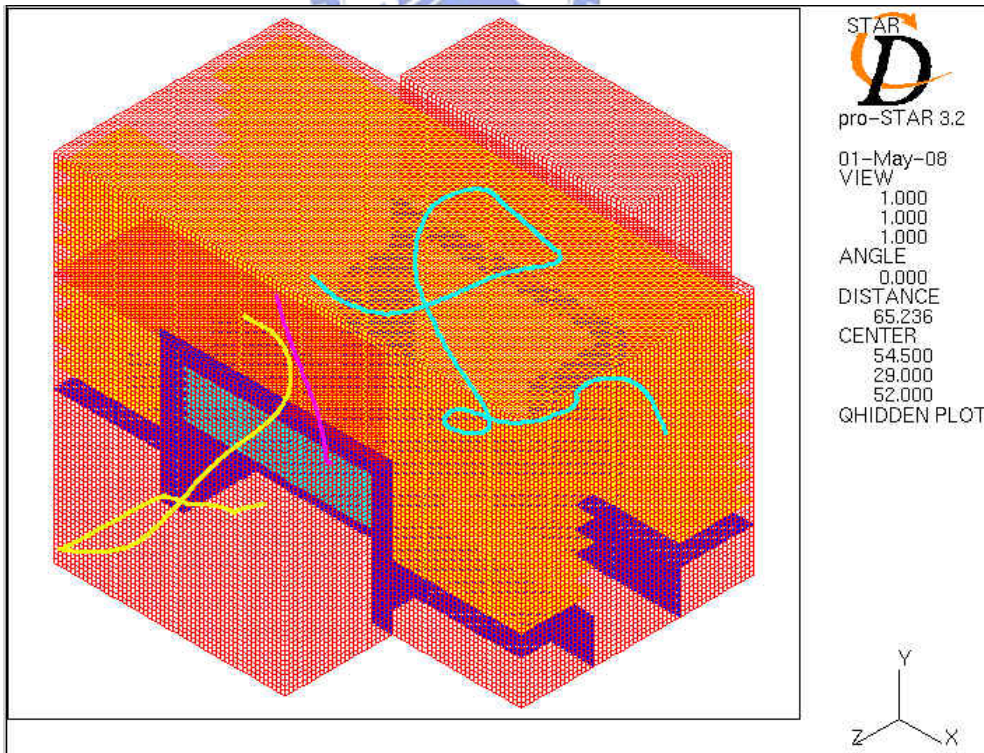


圖 4-53 Particle 發生源靠近機台 Port 時軌跡圖

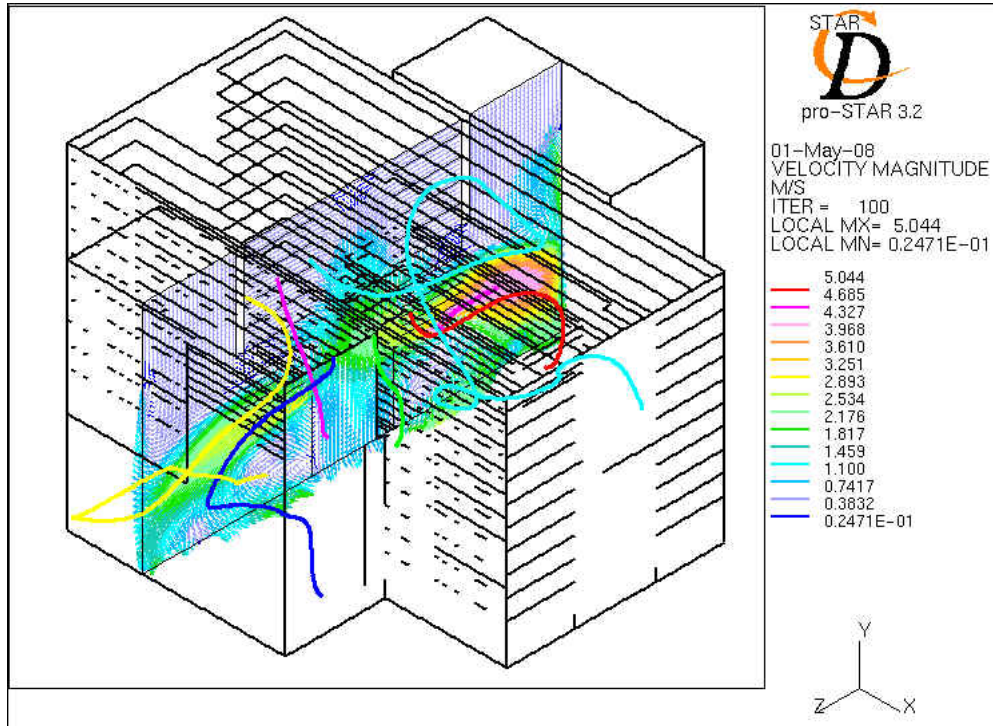


圖 4-54 Particle 發生源於自動倉儲中間位置時軌跡流場全視圖

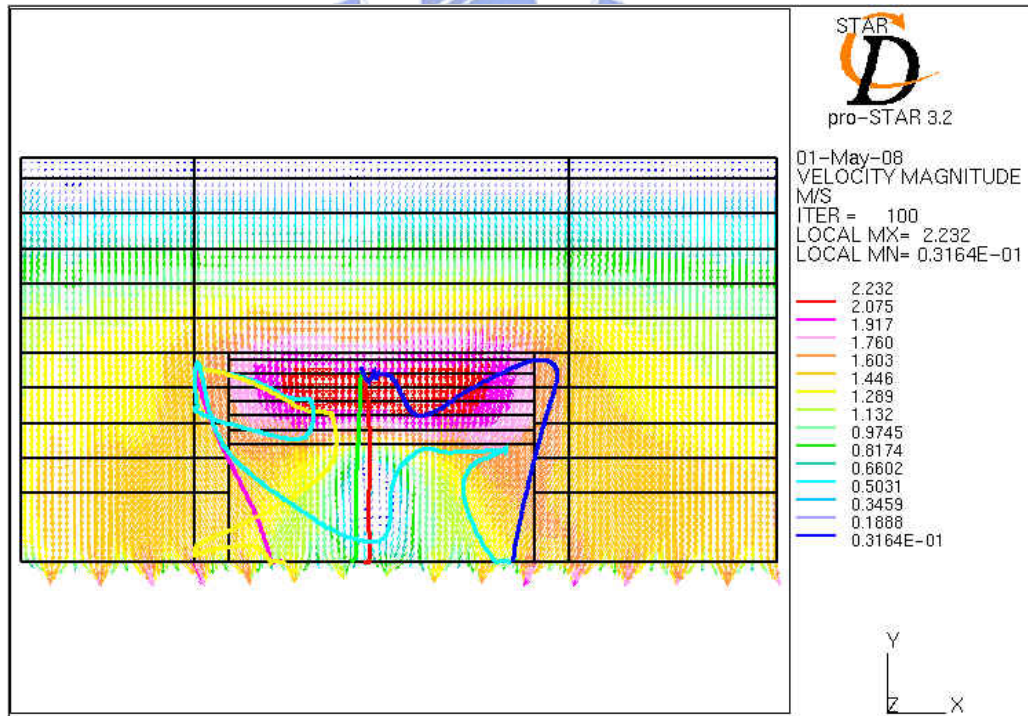


圖 4-55 Particle 發生源於自動倉儲中間位置時軌跡流場正視圖

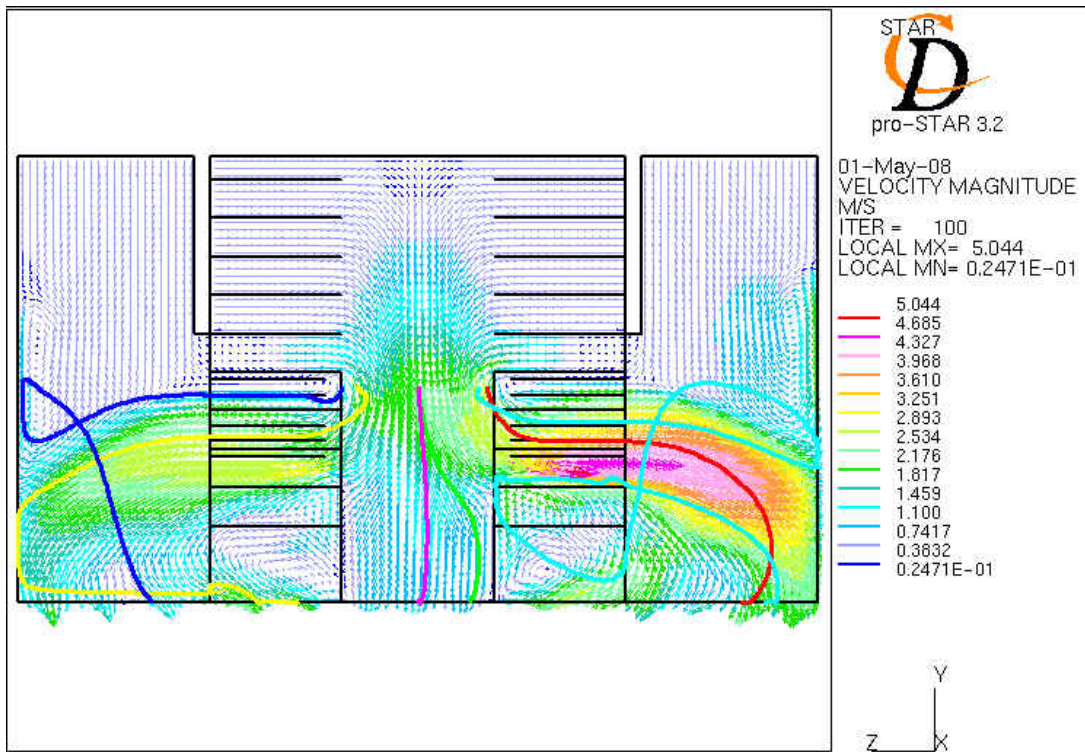


圖 4-56 Particle 發生源於自動倉儲中間位置時軌跡流場側視圖

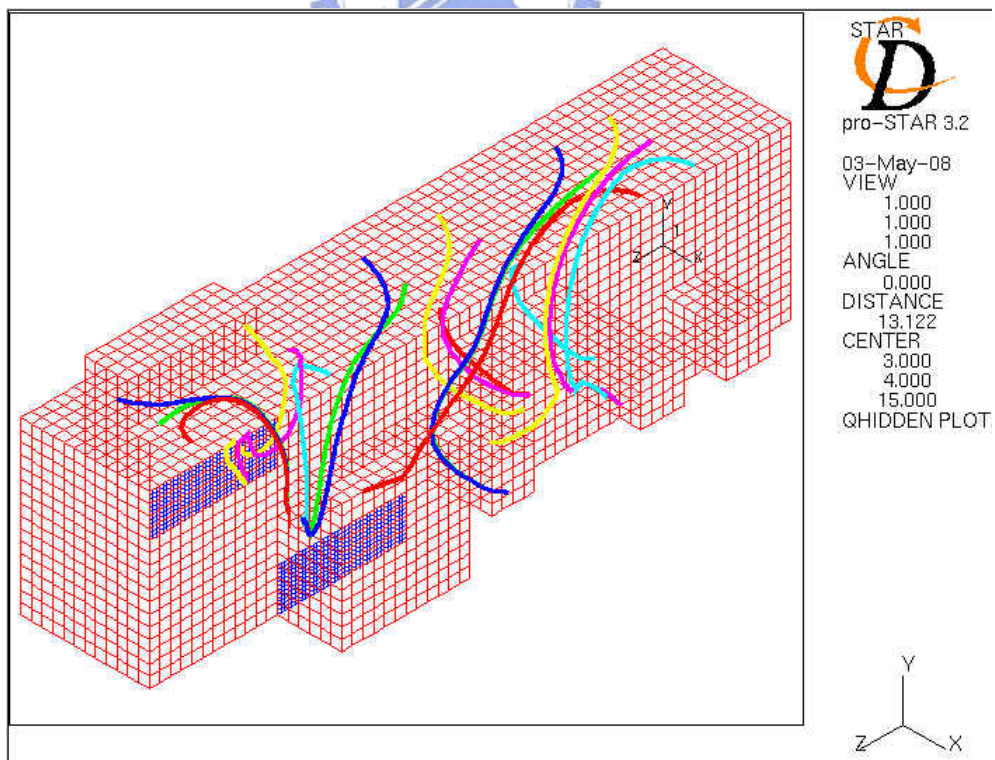


圖 4-57 Particle 發生源於自動倉儲上方時軌跡流場全視圖

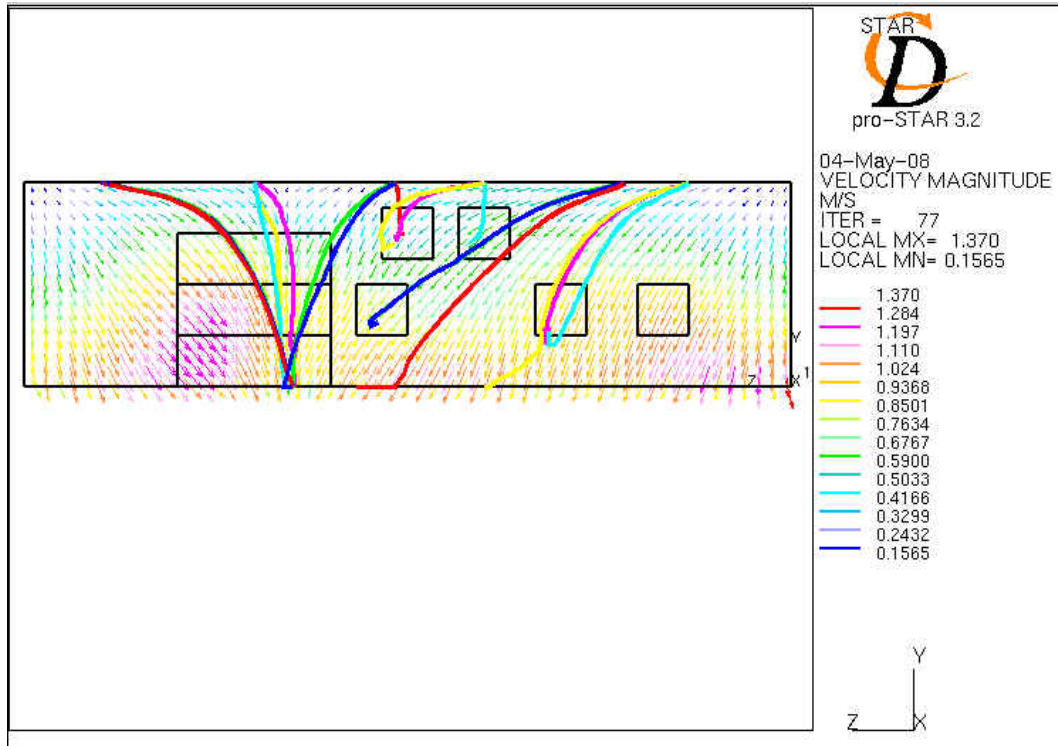


圖 4-58 Particle 發生源於自動倉儲上方時軌跡流場側視圖

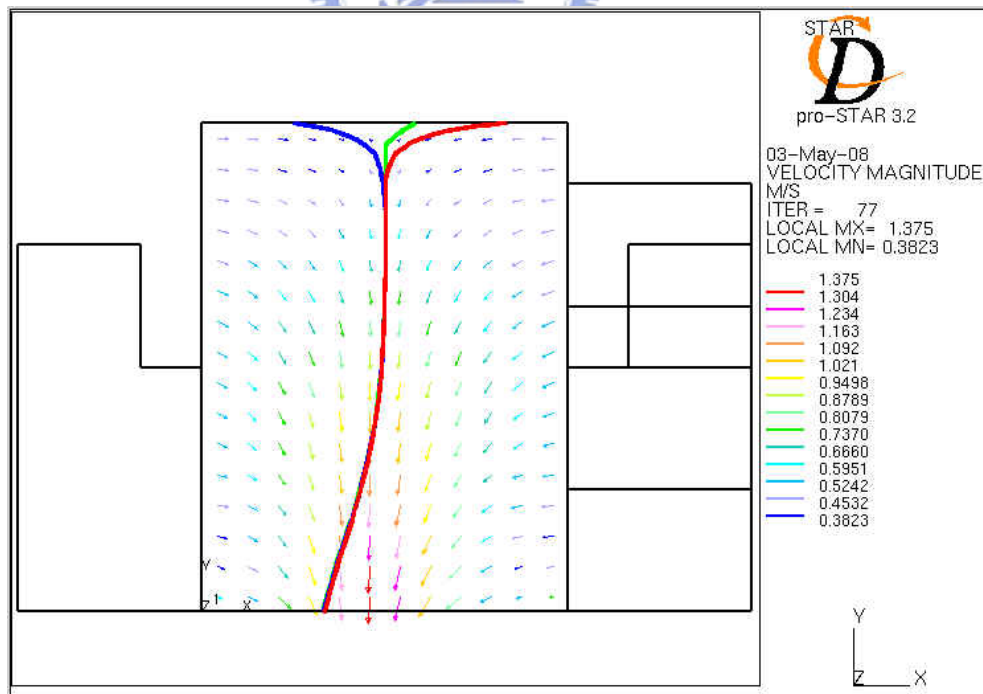


圖 4-59 Particle 發生源於機台 Port 上方外側軌跡流場正視圖

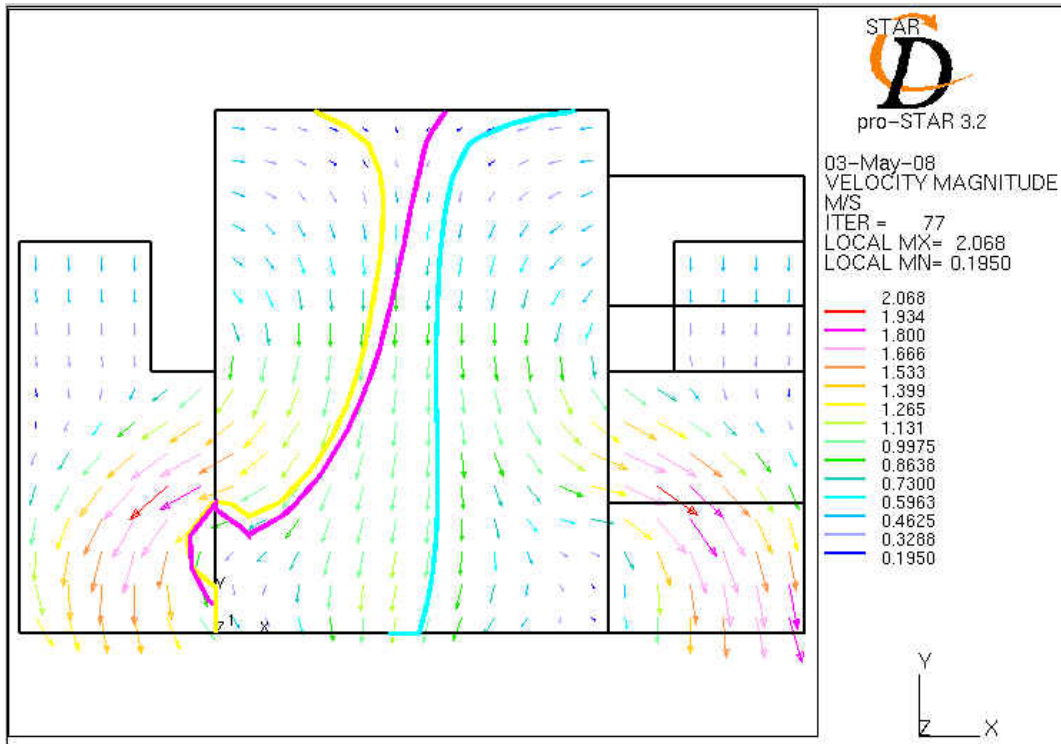


圖 4-60 Particle 發生源於機台 Port 上方軌跡流場正視圖

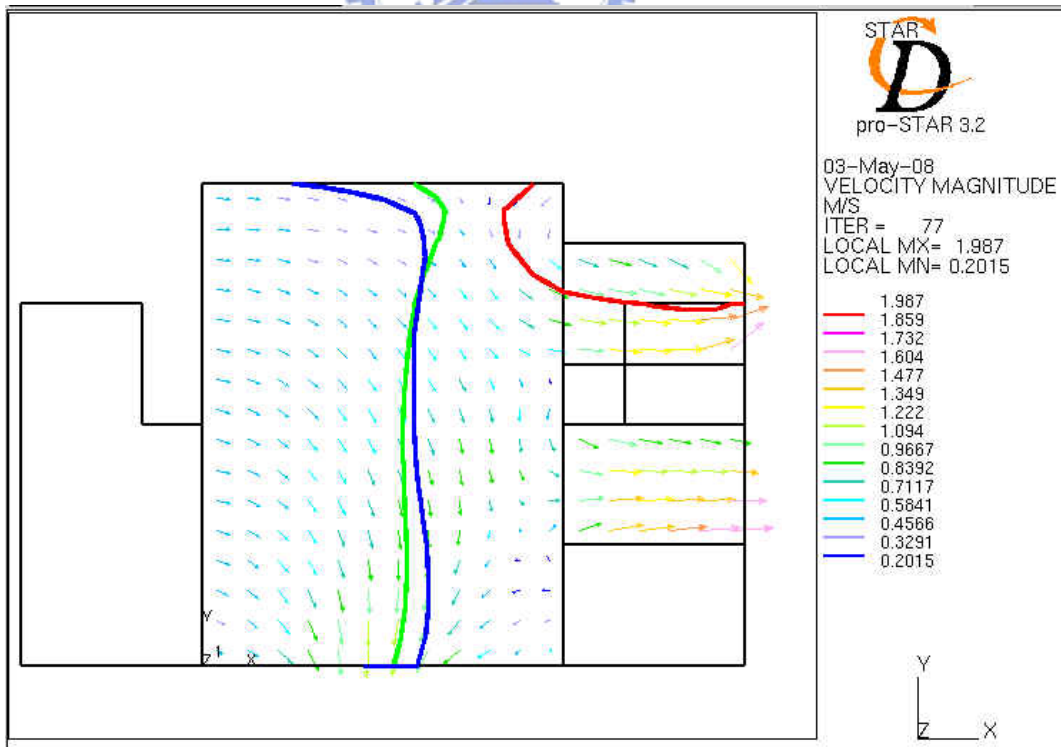


圖 4-61 Particle 發生源於 CSC Out Port 位上方軌跡流場正視圖

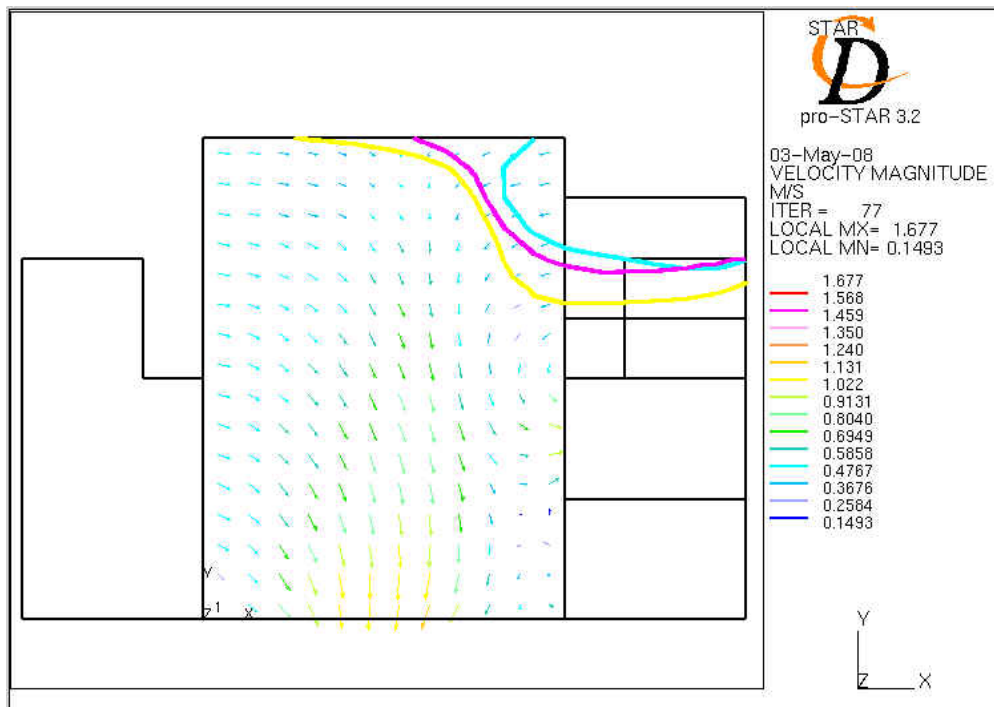


圖 4-62 Particle 發生源於 CSC In Port 位上方軌跡流場正視圖

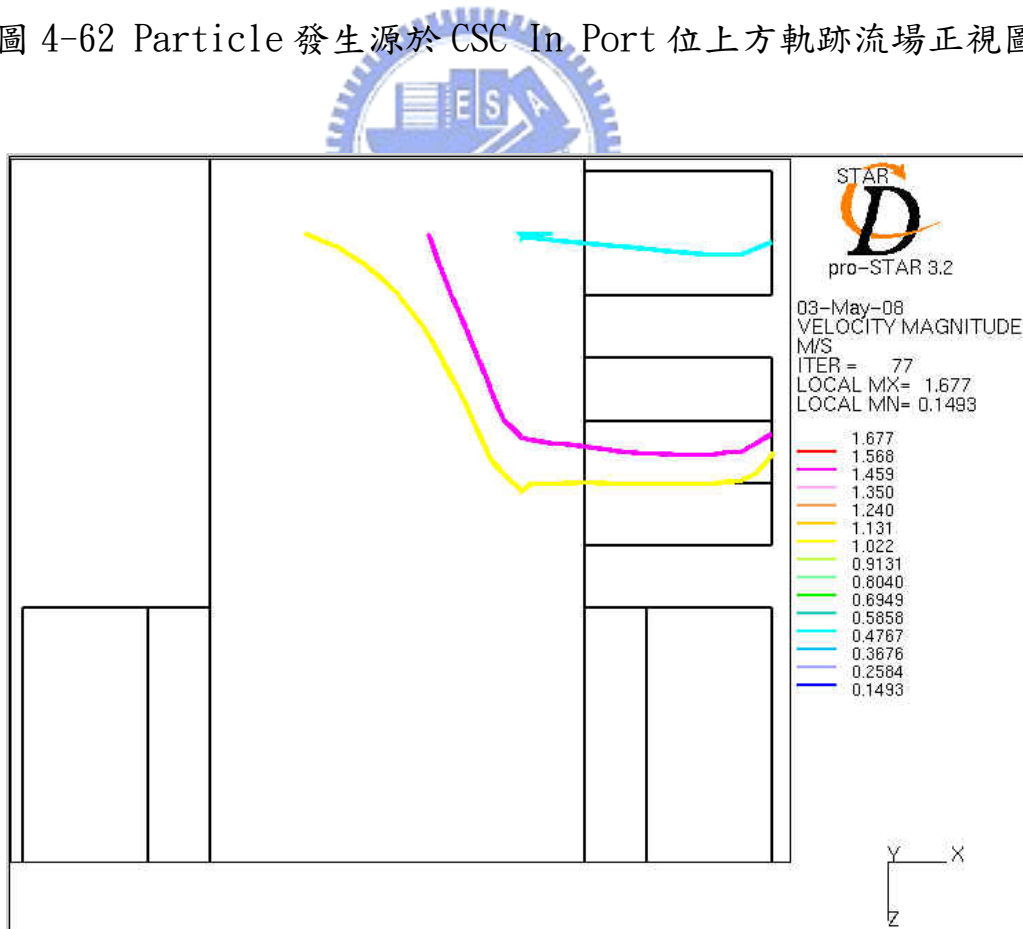


圖 4-63 Particle 發生源於 CSC In Port 位上方軌跡流場俯視圖

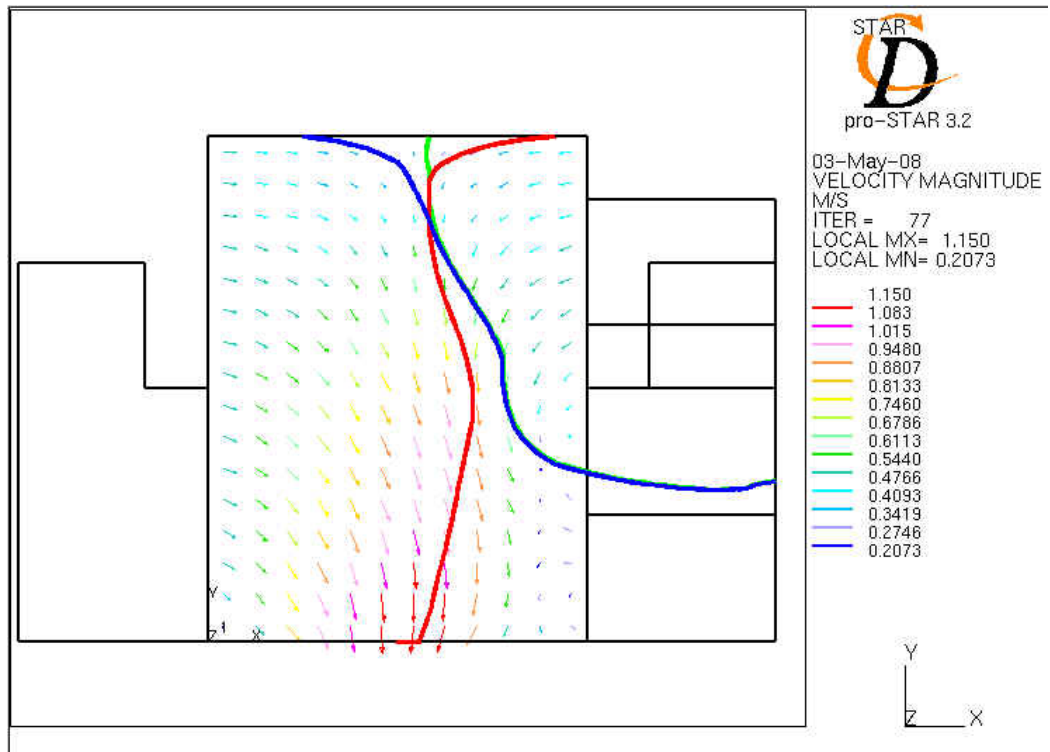


圖 4-64 Particle 發生源於 AGV in Port 位上方外軌跡流場正視圖

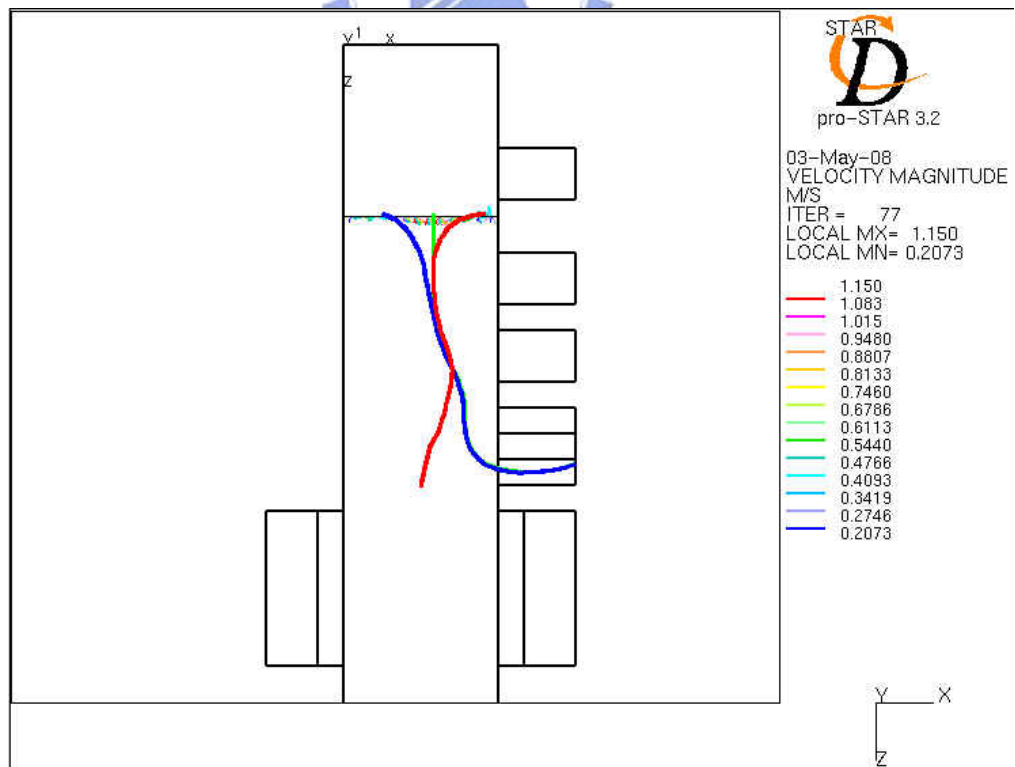
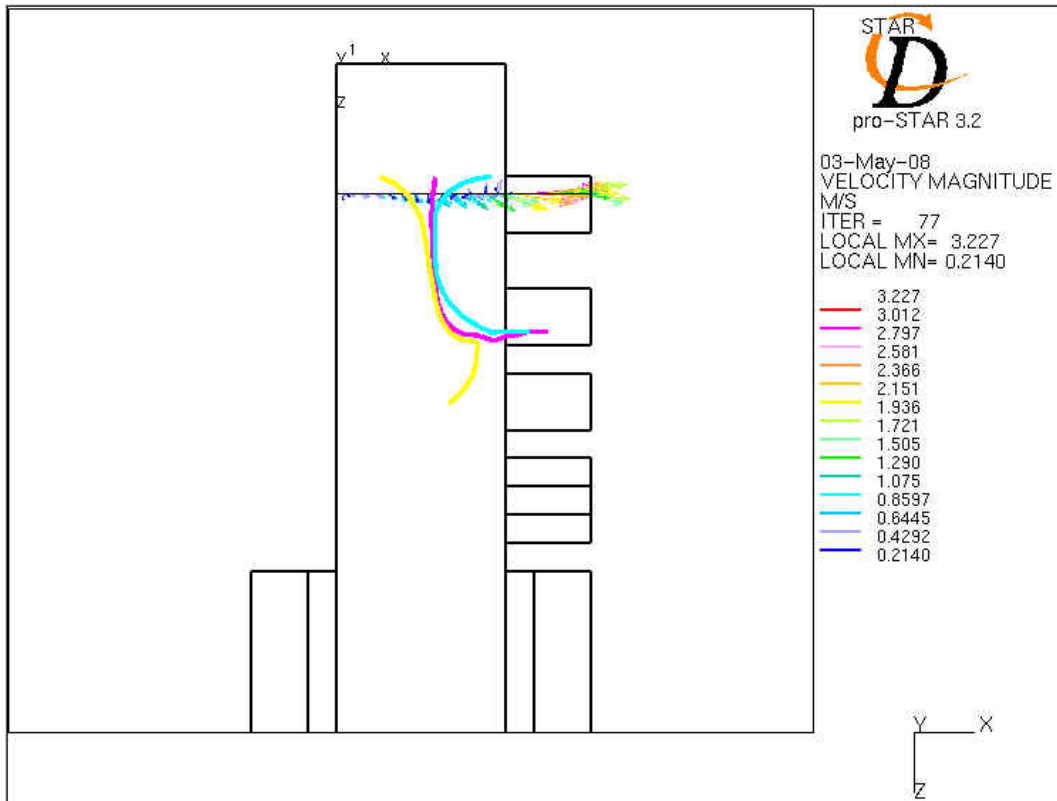


圖 4-65 Particle 發生源於 AGV in Port 位上方外軌跡流場俯視圖



4-66 Particle 發生源於 MGV in Port 位上方軌跡流場俯視圖



第五章 結論與建議

5.1 結論與建議

本論文由一開始先探討自動倉儲微粒子的來源分析，使用雷射粒子計數器來偵測發生的位置，接下來針對自動倉儲靜態與動態的流場做作分析，而且分別以一個機台進出口、二個機台進出口及多個機台進出口等案例進行分析，接著去分析微粒子移動的軌跡及影響，在利用套裝軟體 STAR-CD 軟體的輔助下，將流場及微粒子做可視化的分析，可以明顯發現自動倉儲雖然是一個可以讓生產製品儲存在高潔淨的環境中，但由於機台內部移動時所產生的微粒子，若無法清除或侷限住，將容易移動至機台進出口、AGV、MGV 及 CSC 進出口，所以必須減少製品與這些進出口的擺放時間，才能降低因自動倉儲所產生的微粒子構成的影響，進而提升產品良率，由於自動搬運手臂移動時會造成擾流產生，所以使微粒子有更長的時間於倉儲內移動，也可發現當微粒子進入機台進出口後，其軌跡會隨著流場內的擾流以不規則的方式移動，增加製品受影響的機會，放置於棚位最下層的產品在自動手臂不移動的狀態下，雖然可保有其潔淨度，但自動倉儲移動時，其最下層產品受影響的程度將大為增加。

在此次分析討論中可以發現其機台內部若使用此設計，其內部所產生的擾流會有非常多處，並且微粒子的軌跡就可明顯發現，微粒子會有更長的時間在工作環境中移動才有機會由 Outlet 排出，這也增加了微粒子影響

製品的機會，所以降低微粒子發生的機會及減少微粒子發生的位置，甚至將微粒子侷限或隔絕於固定範圍內，是自動倉儲的重要一門課題。

綜合上述列出以下結論與建議：

結論部分

1. 其 Particle 來源大多來至於機械本身的摩擦
2. 擾流的產生容易使 Particle 無法直接由 Outlet 盡速排出, 而導致 Particle 與製品接觸的機會與時間增加
3. Particle 會往自動倉儲內所有的 Port 位流出, 導致放置於這些 Port 位的製品會與 Particle 接觸的機會與時間增加
4. 當自動搬運手臂移動時會將氣流推擠及吸入這也導致 Particle 在 Port 所滯留的機會及時間加長
5. 棚位最下層雖有 FFU 保護, 但由於自動搬運手臂移動時所產生的擾流及 Particle 聚集所以下方擺放製品其危險度最高

建議部分

1. 降低製品停留於 AGV , MGV , CSC Ports 的時間
2. 減少製品在機台 Ports 的等待製程時間
3. 將製品由上往下儲存而減少製品放置於最下層的機會或將下層位置於設計時往上提高, 使儲存棚位整體高度提高, 降低擾流影響
4. 將微粒子侷限或隔絕於固定範圍內, 將影響降至最低

5.2 後續研究

由於本論文是針對動態流程與微粒子間對產品影響可視化做研究，但微粒子種類繁多以及產品材質特性不同，其影響程度也會有所不同，因此建議可針對下列幾點部分做探討研究。

1. 材質特性與微粒子吸附程度之研究
2. 自動倉儲內微粒子控制之研究
3. 自動倉儲 Inlet 與 Outlet 及進出口最佳化設計



參考文獻

1. 馮天駿，「面板儲存櫃之氣流夾層設計與參數化分析」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國九十五年。
2. Yasuo Uozumi，AMHS Layout in LCD Fab，2005 年 IDMC 國際顯示製程前瞻技術研討會及展示會，116~118 頁，台北，民國 94 年 2 月 22 日。
3. 江文琪，「潔淨室面板儲存區之動態流場分析」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國九十四年。
4. 謝亞叡，「隧道中捷運軌道車輛移動之流場模擬」，國立交通大學，碩士論文，民國九十四年。
5. 黃富加，「FFU 世單向流潔淨室流場量測與流場影響因子之分析」，國立交通大學，碩士論文，民國九十二年。
6. Hu, S. C., Chuah, Y. K. and Yen, M. C., " Design and evaluation of a minievironment for semiconductor manufacture processes" , Building and Environment , vol. 37, pp. 201-208, 2002.
7. Yang, S. J., Fu, W. S. and Chen, S. F., " Numerical study of variations of airflow induced by a moving automatic guided vehicle in a cleanroom" , Journal of the Chinese Institute of Engineers, vol. 25, no. 1, pp. 67-75, 2002.
8. Yang, S. J. and Fu, W. S., "A Numerical Investigation of Effects of

- a Moving Operator on Airflow Patterns in a Clean room” , Building and Environment, vol. 37, pp. 705-712, 2002.
9. 陳石法，「矩形空間中移動物體之動態流場與熱傳特性研究」，國立交通大學，博士論文，民國九十年。
10. 顏銘志，「超潔淨無塵室流場分析與改善之研究」，國立台北科技大學，碩士論文，民國八十九年。
11. 蔡俊宏，「潔淨室的氣流特性與潔淨度控制」，中國冷凍空調雜誌， pp. 78-88, 1999 年 6 月
12. 蔡俊宏，「潔淨室的氣流特性與潔淨度控制」，中國冷凍空調雜誌， pp. 73-81, 1999 年 8 月
13. Tannous, A. G.” Air Flow Simulation in a Minienvironment” , Solid State Technology, vol. 39, pp. 201-209, 1996.
14. Kee-Chiang Chung and Shou-Ping Hsu, “Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution” , Building and Environment , vol36, pp989-998, 2001.
15. Tannous, A. G.,” Computational Modeling of Air Flow in a Mini-environment” ,Proceedings-Institute of Environmental Science, pp. 414-420, 1996.
16. Marvell, G., Minienvironment Air Flow Dynamics, Solid State

- Technology, vol. 36, pp. 47-48, 1993.
17. 顏登通，潔淨室設計與管理，全華科技圖書股份有限公司，1995年。
 18. STAR-CD, Version 3.15, Methodology, 2001.
 19. Patankar, S. V. and Spalding, D. B., “A Calculation Procedure for Heat Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows” , International Journal of Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.1787-1806, 1972.
 20. Jones, W. P., and Launder, B. E., 1972, “The Prediction of Laminarization with A Two-Equation Model of Turbulence,” Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.301-314.
 21. Orszag, S. A., Yakhot, V., and Flannery, W. S., Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations, Near Wall Turbulent Flows : Proceedings of the International Conference on Near-Wall Turbulent Flows, pp.1031-1046, 1993.
 22. Wilcox, D. C., Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, La Canada California, pp.103-131,1998.