

# 開環式廢氣淨化系統洗滌水排放之數值分析

朱永安\*<sup>1</sup> 林宗岳\*

\*財團法人中國驗船中心 研究處研發組

關鍵詞：硫氧化物，廢氣清洗系統準則、開環式洗煙器，紊流噴流，滴定曲線

## 摘要

2015 年國際海事組織(IMO)海洋環境保護委員會(MEPC)第 68 次會議決議案，船舶排煙淨化系統(EGC System)須符合規定，確認排煙硫氧化物有效過濾，其型式可細分為閉環式、開環式、以及混合式三種。其中對於開環式洗煙器處理水的規定之一，為在船舶靜止狀況下從舷外 4 米處測量的洗滌水之 pH 值不得低於 6.5。此問題可從兩方面領域知識理解，第一為紊流噴流(Turbulent Jet)描述洗滌水與海水之混合流場現象；第二為洗滌水與海水之酸鹼中和的化學反應。本研究以 CFD 方式建立一均勻噴流，從圓形孔流入開放靜止水域，模擬流場之速度分佈與體積分率。模擬結果顯示軸向速度分布與實驗有良好吻合趨勢，且流場特徵所圍成之核心區廣義角正確呈現約 12°，明確解析核心區域裡的非混合區段、過渡區段、和穩定發展區段。海水之體積分率以乾淨海洋模型之標準滴定曲線轉換為 pH 值，代入流場方可捕捉 pH 為 6.5 之等值面，以檢視其與排放孔距離是否符合公約規定。計算結果顯示噴流速度與流場之流速幾乎成正比關係，意即不影響分佈現象；但管徑對混合效率卻有決定性的影響。依照上述結論推測，排放出口處之幾何設計，諸如使用導流片或擴散器等附屬裝置，對於整順噴流以及加強混和至關重要。

## 前言與文獻

國際海事組織(IMO)海洋環境保護委員會(MEPC)於 2016 年 10 月第 70 次會議通過之 MEPC.280(70)決議案，修訂「防止船舶污染國際公約(MARPOL)」附則 VI「防止船舶空氣污染規則」第 14.1.3 條之規定。為保護地球生態海洋環境，外籍船舶及航駛國際航線之國籍船舶，進入我國國際商港區域，自西元 2019 年 1 月 1 日起應採用含硫量以重量計 0.5% 以下之低硫燃油或符合公約規定標準、減排方面所要求同等有效之任何器具、裝置及替代燃料。然而，由於未來低硫燃油的供應量及價格尚不確定，引起的營運成本壓力亦難預測，越來越多的船東及設計者於新造船時，考慮選擇廢氣淨化系統(EGC System)作為主要替代方案；EGC 又可分為開環式、閉環式、以及混合式等三種，其中開環式之原理為抽取海水以霧化後通

過排煙，吸附硫氧化物後之廢水排放回海洋。經廢氣淨化系統排出之洗滌水需符合規定，其中舷外監測係在船舶靜止狀態下，距離舷外 4 米處的洗滌水 pH 值不得低於 6.5。議案中表明 pH 值的驗證可用實船監測，或使用計算流體力學方式獲得。

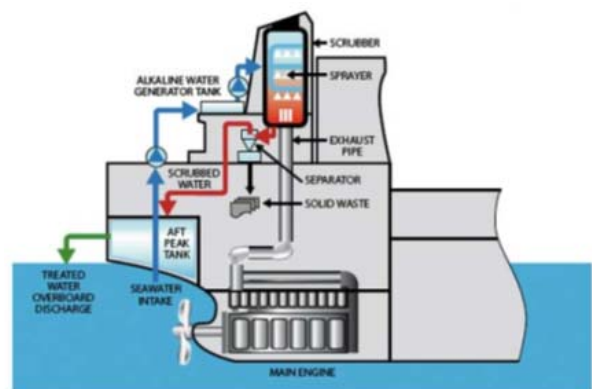


圖 1 開環式廢氣淨化系統

<sup>1</sup> 聯絡作者 (yachu@crclass.org)

在環境流體力學上，此經典且古老的問題可被描述為一紊流噴流(turbulent jet flow)現象。Hussein 等人(1994)以不同的實驗量測方法進行圓管噴流實驗，發現中心軸軸向速度有一衰減率。與一虛擬原點，Pope(2000)將實驗經驗做歸納，為後續學者紊流研究之重要參考依據。數值方面，Ashforth-Frost 等人(1996)以標準  $k-\epsilon$  紊流模型，成功模擬二維邊牆射流(wall jet)之速度場與紊流動能。Boersma 等人(1997)以及 Le Ribault 等人(1999)分別以 DNS (Direct Numerical Simulation)與 LES (Large Eddy Simulation)之數值方法模擬三維紊流噴流與結果比較良好。

上述實驗和計算文獻中指出，一個圓形噴流以排放速率  $U$  之均勻流從直徑  $d$  之圓管流入靜止之相同流體，其流場具有普遍性(Universality)，意即無論流體種類(空氣或水)或任何條件(出口管徑以及排放速率)，流場特性皆一致，如圖 2 和圖 3 所示。其特性有以下三者：

1. 流場完全發展後，將會呈現圓錐狀之包絡面(envelop)，且與中心軸夾  $11.8^\circ$  之廣義角(universal angle)。於此包絡面上之軸向速度為零，僅有從外場吸進包絡面內的徑向流，此即為噴流之混合和稀釋的關鍵機制。
2. 各斷面之軸向速度量值分布皆呈現高斯分布，僅伸展因子(stretching factor)不同，如圖 4。
3. 中心線上之速度量值  $u_{max}(x)$  與距原點之距離成反比，如圖 5。其中直線之 X 軸截距亦為常數。

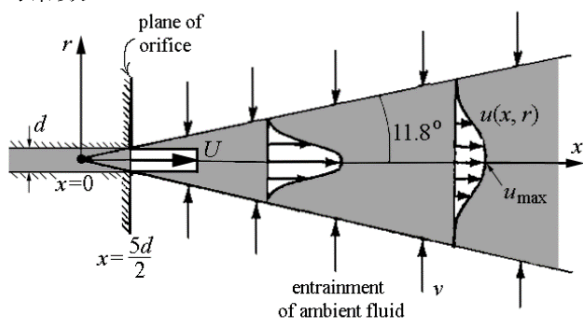


圖 2 圓形噴流示意圖[1]

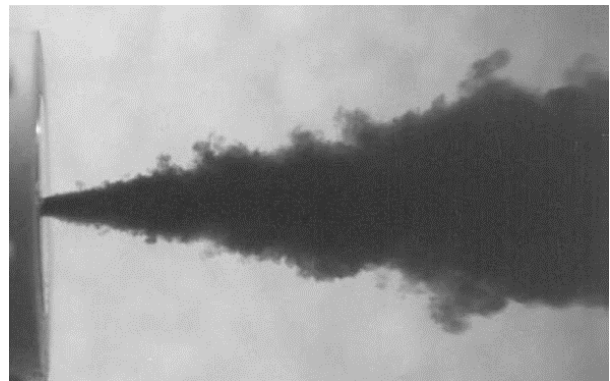


圖 3 圓形噴流實驗[1]

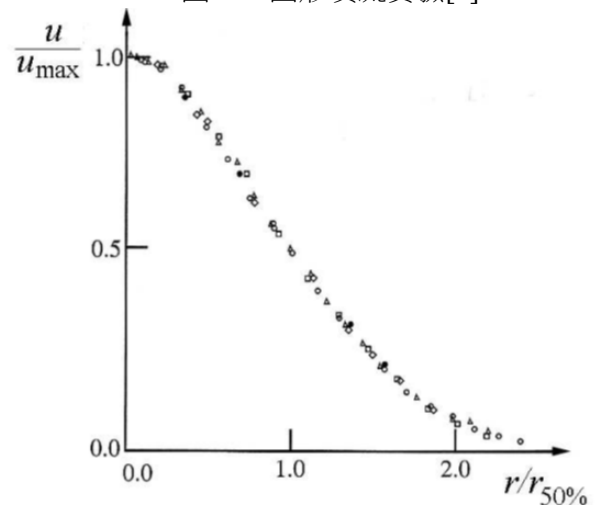


圖 4 軸向速度量值隨徑向位置之變化 [1]

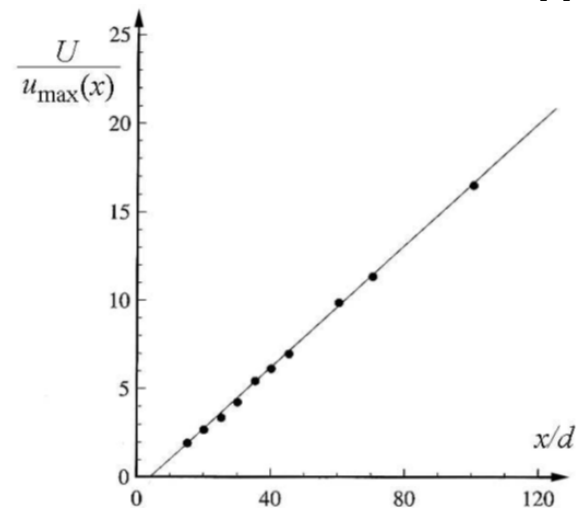


圖 5 中心線上之速度量值隨軸向位置的變化 [1]

而在實際排放管設計上，為使洗滌水與外界流場充分混合，排放管大多具有導流板與多個支流管，如圖 6。此外，在開放水域之海水

與洗滌水之因為溫度差異導致密度的改變，亦可能影響流體混合。本文將以圓管噴流實驗為研究基礎，建立一套以計算流體力學方法分析開環式廢氣淨化系統洗滌水之程序。

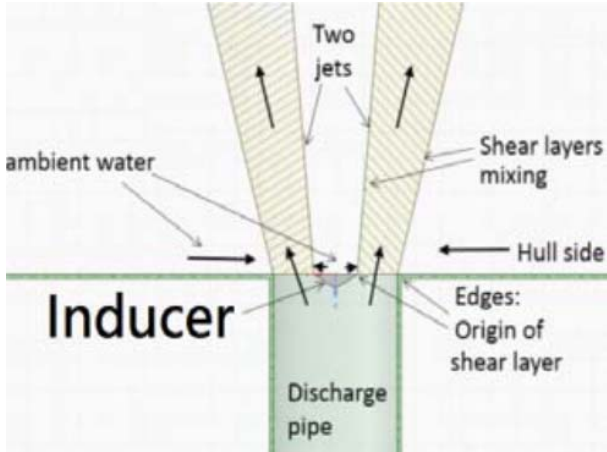


圖 6 具有導流板與多個支流管排放管

### 圓管噴流計算設定

本文參考 Pope 所歸納之實驗資料[1]進行紊流混合計算與驗證，使用 RANS 軟體 Star-CCM+，表 1 為計算流域之入流參數，流體為等溫純水，依照圖 2 建立圓柱形計算流域如圖 7 所示。網格方面使用卡氏座標網格自動生成，並於頂角為 11.8°之圓錐包絡面位置進行體積加密，並在入口處靠中心軸附近另行體積加密，整體網格外觀如圖 8 所示，總網格數約為 971 萬。

表 1 計算流域之入流參數

$Re$	1.00E+05
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	997.6
$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	8.89E-04
$d$ (m)	0.1
$U$ (m/s)	0.89



圖 7 計算流域之側視圖

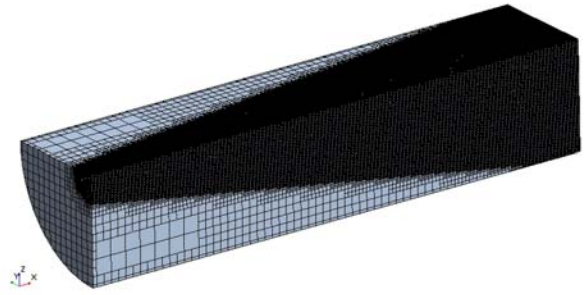


圖 8 網格佈置(1/4 計算流域)

為了滿足實驗之條件：從管中流出之流體，以均勻入流方式，流入初始未受擾動而靜止之相同流體，因此，位於左側小管徑之入口平面採用速度入流(velocity inlet)，以便指定其入流速度。右側大管徑之側面與位於右側大管徑之圓平面採用壓力出口(pressure outlet)，使疊代計算後之出口流場附近之壓力與外部壓力趨於一致；入流管面及牆面皆採取無滑移壁面邊界條件(no-slip wall)，整體計算流域之邊界設定，如圖 9 所示。

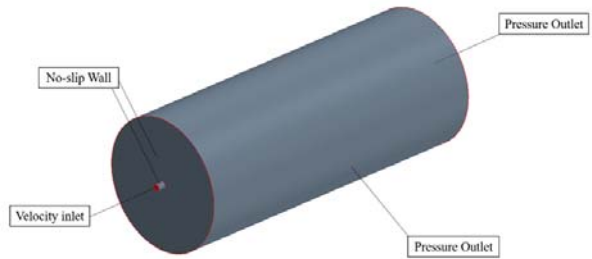


圖 9 邊界條件之設定

因為所模擬之流場雷諾數已達  $10^5$ ，屬於紊流狀態，因而紊流模型採用  $k-\epsilon$  realizable。為直接得到此流場已完全發展之穩態狀況，與實驗之資料驗證結果，採用穩態方式進行疊代計算。此外，兩相流體界面追蹤之數值方法有二：二相流法(Volume of Fraction, VoF)或被動純量法(Passive scalar)。VoF 法是指定兩處不同的水(H<sub>2</sub>O)為不同之 Eulerian Phase，利用物種質量分率  $M'$  分別求解完兩相流後，再指定  $M'$  以追蹤該流體。體網格皆充滿主要相，其值為 1，充滿次要相，其值為 0，而若該值介於 0 和 1 之間，代表體網格以該值充滿主要相，其餘為次要相。Passive scalar 法是指定兩處不同的水(H<sub>2</sub>O)為同一個 Phase，直接指定所欲觀測流

體粒子之 **Passive scalar** 來追蹤該流體。前者比後者更具通用性，能處理兩種不同種類的流體混合。若兩流體性質完全一樣，僅以一純量數值進行標記，則可採用後者。本文將初始之靜止流體標記為 0.0，入流流體標記為 1.0。

### 圓管噴流計算結果

使用 VoF 或 Passive Scalar 方法之數值殘差如圖 10，兩者皆能於數千次疊代達到穩定收斂，惟後者之殘差較前者小一個數量級，殘差穩定性也較佳。由此可知，採用 **Passive scalar** 法來加速本案例流場之收斂與提升精度確實效果較佳，是故往後將以 **Passive Scalar** 法之結果進行討論。

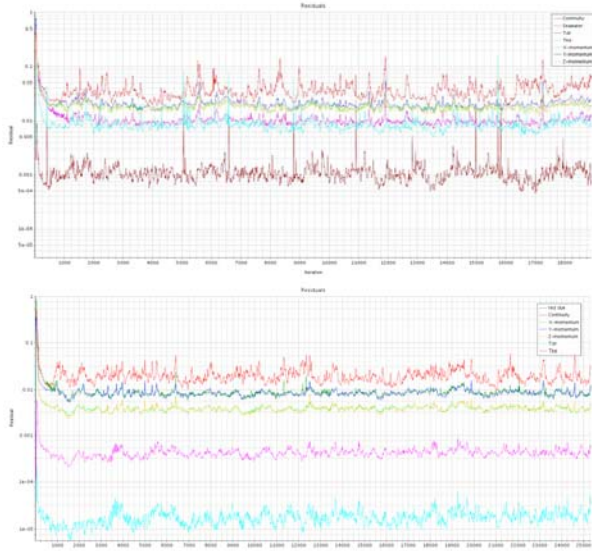


圖 10 數值殘差疊代歷程，VoF (上) 和 Passive Scalar (下)

除了在出口鄰近受邊際效應影響之流體，通過管子入流平面中心點並與中心軸之夾角為  $11.8^\circ$  之平面，與軸向速度為 0 之包絡面呈現良好之吻合狀況，如圖 11 所示。此外，依照圖 3 之概念，亦將各斷面上軸向速度之分布繪製成向量分布圖，並與互相比較，如圖 12 所示。接著，將各斷面軸向速度量值分析後發現，與實驗值有良好之吻合結果，並且如實驗之結論所述：在此雷諾數下，在經無因次化後，不同斷面位置皆有相似之軸向速度量值分布，而且呈現高斯分布。

最後，由圖 13 可知同樣在此雷諾數下，各軸向位置之中心線上速度都呈現反比關係，雖然仍存在一定誤差，但已可證實距離排放出口越遠，中心線上速度量值越小之趨勢。直線之延伸與 X 軸之截距和圖 3 所述之常數相近。在此折角以內之範圍內，直線為一定值 1，意即軸向速度與入流速度一致，此區域內沒有發生混合現象。下節將會分析流場的混合率及其對應之酸鹼值。

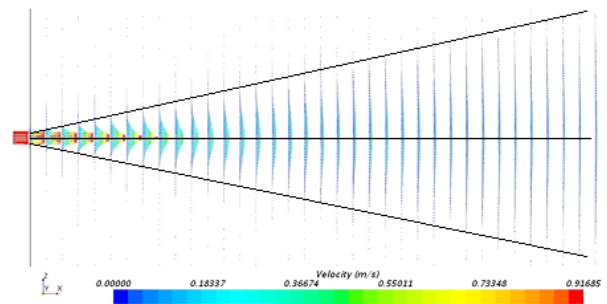


圖 11 不同軸向位置斷面上速度向量與廣義角包絡線

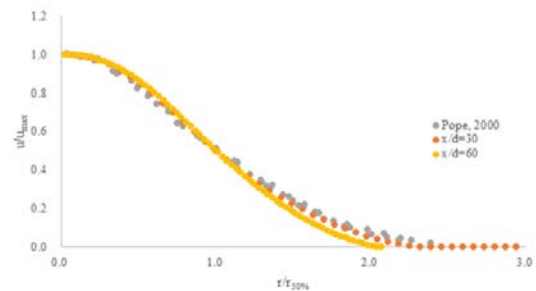


圖 12 不同軸向位置斷面上軸向速度

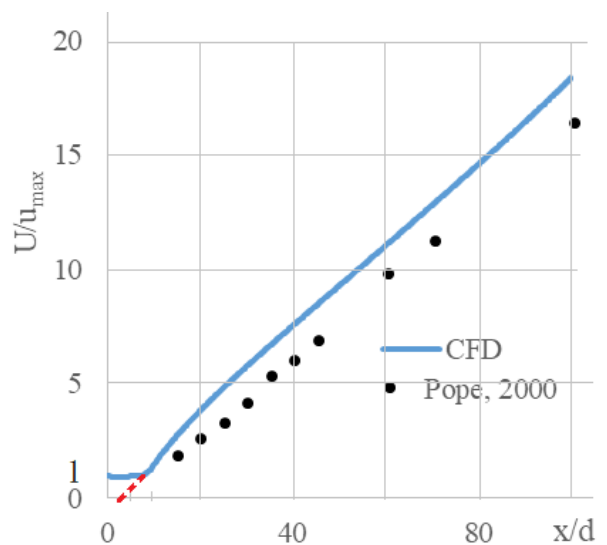


圖 13 中心軸上速度與軸向位置之關係

## 流場混合率與酸鹼值

海水中溶解許多物質，有酸根離子、鹼根離子、以及各式塩類物質，濃度都不一定，所以要用實驗方法得到海水樣本的鹼度。常用已知濃度的硫酸做滴定，佐以量測溶液 pH 值，直到溶液呈現中性為止，並取此時使用掉塩酸的莫耳數，換算原海水的鹼度。本研究使用已知濃度的硫酸做滴定，並一直滴到 pH 值很低為止，pH 對 SO<sub>2</sub> 容積關係曲線即可畫出。

首先，參考海水之標準滴定曲線(Titration curve)，亦稱為乾淨海水模型(Clean Marine Model)，如圖 14，縱軸為 pH 值，橫軸為 SO<sub>2</sub> 之濃度(mmole/kg)。純海水之鹼度為 2200 μmol/l，對應之 pH 值為 8.2。經由單元回歸分析，配得最適曲線方程式，如式(1)。

$$pH = 3.84 - 0.2308SO_2 + \frac{1.403}{0.0403 + e^{[2.766(SO_2 - 0.189)]}} + \frac{9.947}{4.554 + e^{[4.884(SO_2 - 1.888)]}} \quad (1)$$

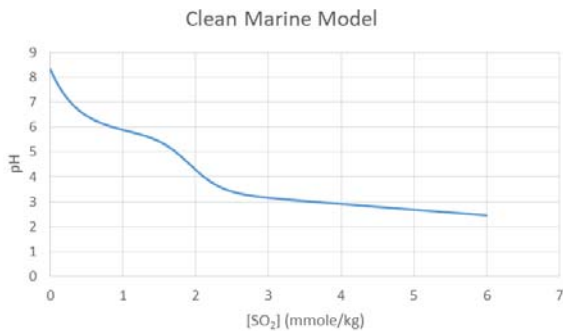


圖 14 海水之滴定曲線

本案例之排放水 pH 值為 2.7，距舷 4 米處之混合溶液 pH 值是法規要求不小於 6.5。以式(1)算得排放水 pH=2.7 和法規要求值 pH=6.5 之 SO<sub>2</sub> 濃度，分別對應到 4.95 和 0.47。接著，可以求得稀釋率 S，定義如下式(2)：

$$S = \frac{C_{pH=2.7}}{C_{pH=6.5}} = \frac{4.95}{0.47} = 10.5 \quad (2)$$

其中， $C_{pH=2.7}$  為排放口(即 pH=2.7)位置之 SO<sub>2</sub> 濃度； $C_{pH=6.5}$  為 pH=6.5 (按公約為距離排放口 4 米處)之 SO<sub>2</sub> 濃度。最後，換算成排放水之容積分率，如下式(3)：

$$\frac{1}{S} \cdot 100\% = 9.5\% \quad (3)$$

意即 pH=2.7 之排放水 9.5 份與 pH=8.2 之乾淨海水 90.5 份混合後可獲得 pH=6.5 之溶液；換言之，於流場中取出體積分率為 0.095 之等值面，其 pH 值皆為 6.5。最後只需檢查此等值曲

面是否超出船體舷側 4 米，即可知道有無符合公約。

在流場方面以 Passive Scalar 追蹤排放水和海水的體積分率；因兩種流體密度一致，體積分率亦可視為質量分率。以通過圓管中心的剖面流場進行分析，如圖 15 (上)所示，紅色區域為純排放水，藍色為純海水，仍清楚顯示廣義角所包絡之區域。體積分率隨著距離排放口越遠漸次減小，其等值線繪製於圖上。若將靠近排放口處放大，如圖 15 (下)，則可以看到相似的體積分率分佈。此現象指明管徑作為噴流的特徵長度，亦暗指正規化流速分佈(圖 13)以及混合率(圖 15)只與管徑有關，與入流速度無關。此現象為圓管噴流重要的結論。

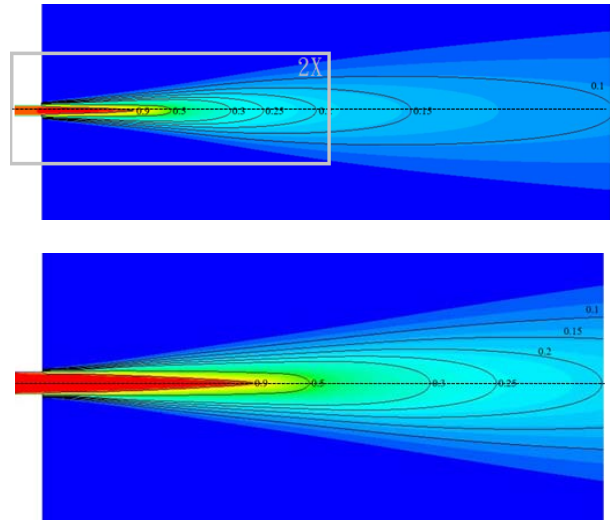


圖 15 流場橫剖面之體積分率，全流場(上)，二倍放大(下)

將流場中線位置的體積分率於不同軸向位置繪製成圖 16，並與理論值[1]進行比對，如式(4)和圖 16 之黑線。

$$M' = 4.66 * d / x \quad (4)$$

此式中之常數 4.66 為實驗所獲得，若  $x/d$  小於 4.66 則  $M'$  為 1.0，且只適用於  $x/d$  大於 20 之完全發展流場。此數學式意謂：

1. 位於 4.66 倍直徑之軸向距離內流場完全不混合，稱為核心區域(Core Region)。
2. 位於 20 倍直徑之軸向距離以上為完全發展流(Fully Developed Region)，其質量分率與距離呈反比關係。
3. 介於以上二者之間為過渡區(Transition)，式(4)不適用。

CFD 計算結果為圖 16 之紅色標記，精準地呈現噴流理論的三個區域：核心區之長度與完全發展區之量值幾乎一致，過渡區因不是式(4)適用範圍，故無法比較。

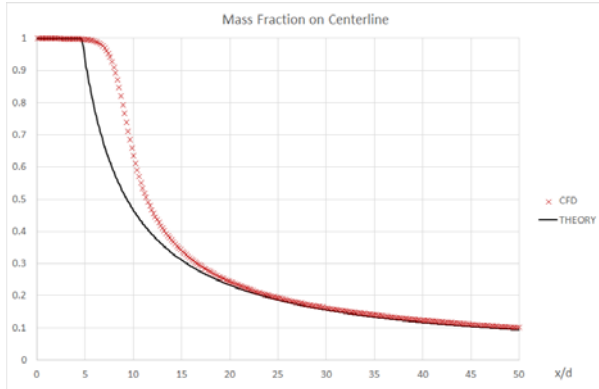


圖 16 流場中線之體積分率

運用前述酸鹼滴定結果與體積分率，pH=6.5 之體積分率為 0.095，管徑為 10 公分為例，可用式(4)直接算出對應之軸向距離：

$$x = 4.66 * d / M' = 4.66 * 0.1 / 0.095 = 4.9 \text{ m} \quad (5)$$

由以上結果可知，距離排放口 4.9 米處之 pH 值為 6.5；以標準滴定曲線以及質量分率曲線皆為單調遞減函數推論：距離 4 米處之 pH 值小於 6.5，不符合公約要求。吾人可換成設計問題，重新計算最大容許管徑以符合公約，如式(6)， $d_{\max}$  為 8.1 公分。

$$4.0 = x > 4.66 * d_{\max} / M' \quad (6)$$

### 排水管路系統之設計考量

從上述討論中可知道，決定 pH=6.5 之混合率的因素為排放水以及海水的酸鹼度。世界各地之海洋表面的鹼度差異甚大，大西洋鹼度較高，太平洋赤道帶則接近中性。所以於系統設定時需要考量航路，取其鹼度最低者(最嚴苛條件)進行計算。另一方面，排放水之酸度取決於主機負荷和海水注入率，越大型的主機需使用更多海水洗滌，盡可能提升排放水之 pH 值。

一旦 pH=6.5 之混合率決定，接著是噴流流場分析。若採用單純的圓管設計，則可快速使用理論公式算出噴流長度。本中心開發簡易的試算表，如圖 17，將酸鹼滴定模型和圓管噴流模型結合，方便檢核是否符合公約規定。上

述計算指出：管徑是唯一的變數，越小越能縮小流場特徵長度以符合規定。於給定排放水流量下，依白努力定理縮小管徑  $n$  倍將增加流速  $n^2$  倍，增加入流背壓  $n^4$  倍；儘管流速不影響混合，但高流速將需使用更高規格的管線及水泵，以因應管內背壓。抑或採用多支小管徑分流以降低管內流速，但此舉將使管線佈置複雜，且需於船殼上開鑿多個安裝槽孔，破壞船體本身水密完整性。

	Value	Criteria
Seawater Alkalinity [umol/l]	2200	500 ~ 2500
Washwater pH	2.70	2.5 ~ 4.0
Nominal Flow Rate [m3/h]	2925	
Inlet Diameter [mm]	250.0	
Num of Struct / Width [mm]	1 0.0	Inducer Design
Num of Discharges / Distance [mm]	5 250.0	Discharge Layout
Discharge Angle [deg]	90.0	
Equivalent Pupil Diameter [mm]	250.0	Deff < 267.0
Discharge / Jet Velocity [m/s]	3.31 3.31	Design Spec.
Reynold's Number	8.28E+04	Re > 3000
Neutralization Model	Dilution Test Clean Marine	Update DR
Dilution Ratio	1 : 3.128 1 : 9.375	Dr < 0.38
Jet Length [m] at pH=6.5	4.81 12.09	
Volume Fraction for pH=6.5	0.242 0.096	for CFD
Jet Interference	NO	
Developed Turbulent Jet	YES YES	
MEPC.259(68) Compliance	NO NO	

圖 17 CR 開環式廢氣淨化系統試算表

另一個維持原管徑的方法為非典型排放口設計，諸如加裝導流板和擴散罩於端部，前者將噴流一分為多道，增加每道噴流與海水的接觸表面積，以提升混合效率；擴散罩則能降底出口流速，紓緩端部高壓。非圓管噴流之流場無法以噴流理論解析，僅能使用 CFD 方式模擬。圖 18 以三噴流式流擴設計為模擬範例，首先使用 CAD 軟體建立幾何模型，再套用前述數值設定進行模擬。網格數與計算時間比起簡易圓管噴流高許多，其模擬結果如圖 19。圖中顯示三道噴流之 pH=6.5 等值曲面，以及距離 4 米處之體積分率，有效提升混合效率。此類設計及施工雖然較繁複，但不失為達成公約規定之好選項。

最後關於排放管路設計次要的因素，包括溫度對流體密度的影響、導流板緣尖銳處恐引發空蝕現象、多個分流管道噴流之間的互相干擾效應、噴流於航行中對推進性能的影響等，有賴更多研究資源投入以克服。

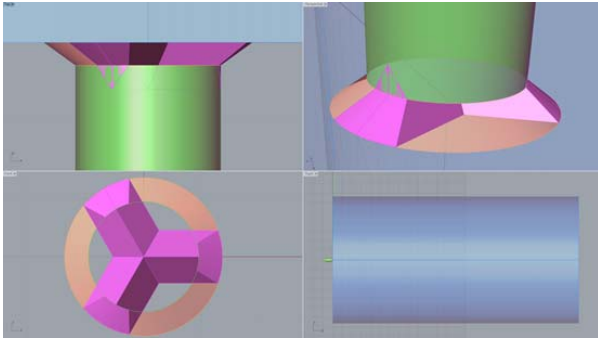


圖 18 非典型排放口設計

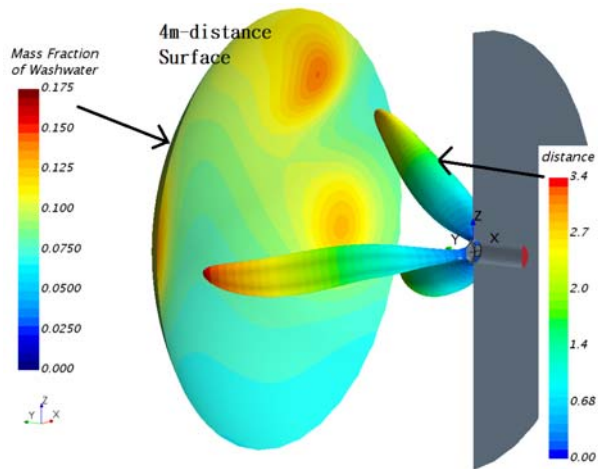


圖 19 三噴流式流場彩現

## 結論

本研究以數值方法探討開環式廢氣淨化系統洗滌水排放之酸鹼值，驗證是否符合國際公約「防止船舶空氣污染規則」第 14.1.3 條之規定。一圓管均勻噴流注入靜止的開放流場，此為典型的流體力學問題，其流場特性具有普遍性，是本研究之理論基礎，並以 CFD 方式進行模擬與驗證，建立一套數值分析方法。如排放口採用單純圓管設計，則可善用流場的普遍性質，快速估算流場的混合效率，以評估噴流之酸鹼值。綜整以下四點特性：

1. 使用不同的管徑與噴流速度設定進行模擬和因次分析，獲得與噴流混合理論一致的數據，明確解析核心區域範圍為  $11.8^\circ$  之圓錐，以及非混合區段長度為 4.66 倍直徑、過渡區段、和穩定發展區段。

2. 流場中線的混合率在大於完全發展區域裡，即直徑 20 倍以上的軸向位置，與距離成反比關係。

3. 海水之體積分率以乾淨海洋模型之標準滴定曲線轉換為 pH 值，代入流場方可捕捉 pH 為 6.5 之等值面，可以檢視其與排放孔距離是否符合公約標準。

4. 噴流速度與流場之流速幾乎成正比關係，意即不影響分佈現象；但管徑對混合效率卻有決定性的影響。

本研究也指出，排放出口處之幾何設計，包含直徑、導流片或擴散器等，對於整順噴流以及加強混和至關重要。對於此類非典型排放口設計，可以應用本研究提出之 CAD 軟體建立幾何模型，再套用前述數值設定進行模擬，以方便製造方達成公約之規定。

## 參考文獻

- Ashforth-Frost, S. and Jambunathan, K., 1996, "Numerical prediction of semi-confined jet impingement and comparison with experiment", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23, pp. 295-306.
- Boersma, B.J., Brethouwer, G. and Nieuwstadt, F.T.M., "A numerical investigation on the effect of the inflow conditions on the self-similar region of a round jet", *Physics of Fluids* 10(4):899, 1998.
- Hessin, H.J., Capp, S.P. and George, W.K., "Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet", *Journal of Fluid Mechanics* 258(-1):31, 2006.
- Le Ribault, C., Sarkar, S. and Stanley, S.A., "Large eddy simulation of a plane jet", *Physic of Fluids* 11(10):3069, 1999.
- POPE S.B., "Turbulent Flows", Cambridge University Press, 2000, ISBN 0-521-59125-2.
- SIEMENS, 2006, STAR-CCM+ v11.06 Theory Guide
- Wärtsilä Ship Power - Exhaust Gas Cleaning, EGC SYSTEM OPEN LOOP PH COMPLIANCE, October 12th, 2015.

# NUMERICAL STUDY ON DISCHARGE STREAM FROM OPEN-LOOP EXHAUST GAS CLEANING SYSTEM

Yung-An Chu<sup>\*1</sup>, Tsung-Yueh Lin<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>R/D Section, Research Department, CR Classification Society, Taipei 10487, Taiwan

Keywords: SO<sub>x</sub> Regulation, Open-loop Scrubber, Turbulent Jet, Titration Curve

## ABSTRACT

Under the regulations of IMO on sulphur oxide (SO<sub>x</sub>) emissions after 2020, exhaust gas cleaning systems (EGCS) or equivalent measures are commonly adopted on ships. For open-loop type of SO<sub>x</sub> scrubbers one of the requirement of pH-value of discharged washwater plume, measured 4 meters externally from the ship at rest, shall be no less than 6.5 during commissioning. The compliance of this requirement will be verified either by means of direct measurement or by using CFD method. The terminology in fluid dynamics describes the problem as turbulent jet flow. An uniform jet inlet from a circular hole into stationary water was built up by using Star-CCM+ in coherence with experiment setup. The axial velocity profiles at several positions were in good agreement with the experiment results, and the universal cone angle about 12 degrees of the core region. The pH determination is based on the titration curve of Clean Marine Model. The iso-contour of pH-value equals to 6.5 was captured before its distance from the discharge point could be examined for checking the compliance to the regulation. The test case also included a configuration with two inline discharging pipes, both equipped with a cross type inducer and diffuser. Different designs showed considerable effects on the mixing performance and the length of streams.