

<p>113 年 05-06 月號</p>			<p>&lt;雙月刊&gt;</p>
---------------------------	---	--	--------------------

## 環境工程技師公會會訊

- ◎ 發行人：楊基振
- ◎ 發行所：台灣省環境工程技師公會 (<http://www.tpeea.org.tw>)
- ◎ 協助策劃：中華民國環境工程技師公會全國聯合會
- ◎ 編輯：台灣省環境工程技師公會學術委員會
- ◎ 主編：廖寶玫
- ◎ 發行地址：台北市長安西路342號4樓之1
- ◎ 電話：02-25550353
- ◎ 傳真：02-25591853

### 本期要目

	頁次
■ 主編的話	2
■ 會務報告	3
■ 重要法令	4
■ 行政院公共工程委員會核備 113 年 05 至 06 月訓練積分課程表	8
■ 環保訊息	11
■ 論述園地	15
廢(污)水處理新挑戰-全氟化合物-許國恩技師	15
計算流體力學於廢污水處理工程設施之應用- 蔡任斌研究員、黃育德組長、許國恩技師	29
■ 徵稿啟事	41
■ 各公會會員大會、理監事會會議紀錄	42

## 主編的話

新興污染物 (Emerging Contaminants) 主要為新認定或之前未確認、未受法規規範、即使其以低濃度存在，仍可能對生態環境或人體健康造成危害風險的化學污染物，隨著檢測技術的發展，越來越多此類微量甚至超微量污染物無所遁形。其中，全氟及多氟烷基物質 (Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 為近年全球所關注的熱門議題，我國也已因應國際趨勢將PFAS議題納入加強管制及相關評估調查作業，並已研擬「全氟及多氟烷基物質(PFAS)管理行動計畫」草案，推動跨部會管理。

中興工程顧問社環境工程研究中心實驗室具備超微量分析技術，長期參與新興污染物相關調查評估，本期論述園地第一篇邀請環境檢測技術組組長許國恩技師分享「廢(污)水處理新挑戰-全氟化合物」，文中介紹全氟化合物基本特性及臺灣產業使用情形，並歸納特定事業全氟化合物廢(污)水調查結果，及國外已採行之廢(污)水處理技術。在可見的未來，各國將積極推動PFAS的管理並制定相關管制與排放標準，本篇論文將全氟化合物自源頭至管末處理完整介紹，內容極具參考價值。

第二篇「計算流體力學於廢污水處理工程設施之應用」，由同樣任職於中興工程顧問社環境工程研究中心之蔡任斌研究員撰寫，內容從計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的理論基礎、發展到模擬流程、計算方法與模型進行系統的介紹，最後以兩個實際案例展現在廢污水處理工程設施之應用。CFD工具借助現代電腦之演算能力，成為一種強大的模擬工具，應用在廢污水處理設施的設計、驗證、營運、操作、管理各階段，可大節省所需之成本與時間，並提升效益與品質，可預期將來此類技術在環境工程設計的應用上相當具有潛力，值得持續投入與開發。

本期兩篇論述介紹的內容與技術都相當具有前瞻性，期望可以對各位技師先進有所助益，也祝大家鴻圖大展，事業再創新高！

## 會務報告

1. 113 年度會員大會將於 7 月 6 日召開。
2. 113 年度常年會費繳費通知及記事本已於 112 年 11 月 20 日寄出，敬請尚未繳納 113 年度常年會費（金額 4,000 元）之會員儘速繳納。  
公會匯款資訊如下：
  - 戶名：台灣省環境工程技師公會
  - 銀行匯款資料：台灣企銀(050)營業部 帳號：01012241581
  - 郵局劃撥帳號：18091292
3. 會員若有更動執業資料、受聘公司、地址、電話、Email...等相關資料，煩請告知公會以便及時修改檔案。
4. 公會網站廣告刊登：
  - (1) 費用：
    - 會員(即會員之執業機構、所營公司或受聘公司)：  
5,000 元/年；一次繳交 5 年 20,000 元；一次繳交 10 年 37,500 元。
    - 非會員：  
6,000 元/年；一次繳交 5 年 24,000 元；一次繳交 10 年 45,000 元。
  - (2) 刊登辦法：  
請繳交費用後，將貴公司或事務所之 LOGO(尺寸：288 \*93)及網址 MAIL 至公會。
5. 會訊廣告刊登：
  - (1) 費用：8,000 元/期
  - (2) 刊登辦法：  
請繳交費用後，將投放廣告內容 PDF 檔(尺寸：A4 紙)MAIL 至公會。

## 重要法令

### 行政規則公告

1. 環境部中華民國 113 年 3 月 6 日環部空字第 1131014325 號公告，預告修正「機車耐久測試方法及程序」草案。
2. 國家環境研究院中華民國 113 年 3 月 6 日環研教字第 1135103014 號函，修正「行政院環境保護署環境保護人員訓練所對民間團體、傳播媒體及學校補(捐)助要點」，且名稱修正為「國家環境研究院對民間團體、傳播媒體及學校補(捐)助要點」，自即日生效。
3. 環境部中華民國 113 年 3 月 7 日環部空字第 1131014747 號令，廢止「空氣污染防治法修正公布施行後過渡期間執行原則」，並自即日生效。
4. 環境部中華民國 113 年 3 月 7 日環部綜字第 1130004221 號令，修正「行政院環境保護署公害糾紛督導處理小組組織規程」部分條文，名稱並修正為「環境部公害糾紛督導處理小組組織規程」。
5. 環境部中華民國 113 年 3 月 8 日環部化字第 1138104493 號令，修正「環境用藥許可證申請核發作業準則」第五條、第十一條。
6. 環境部中華民國 113 年 3 月 11 日環部化字第 1138104495 號令，修正「環境用藥販賣業及病媒防治業許可執照申請核發作業準則」第四條、第十一條。
7. 環境部中華民國 113 年 3 月 13 日環部授研字第 1135103043 號公告，修正「環境檢驗測定機構實驗室品質系統基本規範」，自即日生效。
8. 環境部中華民國 113 年 3 月 14 日環部化字第 1138102890 號公告，修正「行政院環境保護署所主管災害緊急應變警報訊號之種類、內容、樣式、方法及其發布時機」公告事項第五項，名稱並修正為「環境部所主管災害緊急應變警報訊號之種類、內容、樣式、方法及其發布時機」，並自即日生效。
9. 環境部中華民國 113 年 3 月 14 日環部保字第 1131017054 號令，修正「環境保護公益信託許可及監督辦法」。
10. 環境部資源循環署中華民國 113 年 3 月 14 日環循處字第 1136103634 號函，修正「非填充食品之塑膠再生商品推動作業要點」第 1、15 點，自即日生效。
11. 環境部中華民國 113 年 3 月 14 日環部水字第 1131017255 號函，訂定「環境部補助廢污水處理技術創新及研究發展計畫作業要點」，自即日生效。
12. 環境部中華民國 113 年 3 月 18 日環部循字第 1136105115 號公告，預告修正「公民營廢棄物清除處理機構申請許可案件收費標準」草案。
13. 行政院中華民國 113 年 3 月 18 日院臺環字第 1131003469 號令，修正「行政院緊急公害糾紛處理小組組織規程」。
14. 環境部中華民國 113 年 3 月 20 日環研證字第 1135103603 號函，修正「機動車輛排放空氣污染物及噪音檢驗測定機構許可證申請須知」，自即日生效。

15. 國家環境研究院中華民國 113 年 3 月 21 日環研證字第 1135103601 號函，修正「環境檢驗測定機構許可證申請須知」，自即日生效。
16. 環境部中華民國 113 年 3 月 27 日環部授研字第 1135103998 號公告，預告廢止「水中油脂檢測方法—索氏萃取重量法 (NIEA W505.54B)」草案。
17. 環境部中華民國 113 年 3 月 27 日環部授研字第 1135103986 號公告，預告訂定「水中油脂檢測方法—索氏萃取重量法 (NIEA W505.55B)」草案。
18. 環境部中華民國 113 年 3 月 27 日環部授研字第 1135103976 號令，修正「機動車輛排放空氣污染物及噪音檢驗測定機構許可證申請審查作業要點」部分規定，並自即日生效。
19. 環境部中華民國 113 年 3 月 28 日環部授研字第 1135103946 號令，修正「環境檢驗測定機構許可證申請審查作業要點」部分規定，並自即日生效。
20. 環境部中華民國 113 年 3 月 28 日環部授研字第 1135104080 號公告，預告廢止「水中油脂檢測方法—液相萃取重量法 (NIEA W506.23B)」草案。
21. 環境部中華民國 113 年 3 月 28 日環部保字第 1131018750 號函，訂定「風力發電離岸系統開發行為環境影響評估初審作業要點」，自即日生效。
22. 環境部中華民國 113 年 3 月 28 日環部管字第 1137108525 號函，修正「行政院環境保護署環境衛生用藥劑及防疫物資管理要點」，名稱並修正為「環境部環境衛生用藥劑及防疫物資管理要點」，自即日生效。
23. 環境部中華民國 113 年 3 月 29 日環部授研字第 1135104136 號公告，預告廢止「水中油脂檢測方法—固相萃取重量法 (NIEA W507.51C)」草案。
24. 環境部中華民國 113 年 3 月 29 日環部授研字第 1135104121 號公告，預告訂定「水中油脂檢測方法—固相萃取重量法 (NIEA W507.52C)」草案。
25. 環境部中華民國 113 年 4 月 1 日環部授研字第 1135104235 號函，「行政院環境保護署協助各級環保機關環境樣品檢驗業務辦理原則」自即日停止適用。
26. 環境部中華民國 113 年 4 月 2 日環部空字第 1131021768 號令，修正「違反固定污染源逸散性粒狀污染物空氣污染防制設施管理辦法之缺失記點及處理原則」第二點，除附表二自中華民國一百十五年七月六日生效外，自一百十三年七月六日生效。
27. 環境部中華民國 113 年 4 月 3 日環部循字第 1136003746 號令，修正「行政院環境保護署再生資源回收再利用促進委員會組織規程」第二條、第三條、第六條，名稱並修正為「環境部再生資源回收再利用促進委員會組織規程」。
28. 行政院中華民國 113 年 4 月 8 日院授主基法字第 1130200631A 號令，修正「土壤及地下水污染整治基金收支保管及運用辦法」。
29. 環境部中華民國 113 年 4 月 8 日環部水字第 1131023034 號公告，公告「112 年全國水污染防治許可證 (文件) 登記之前 50% 之每日核准排放量平均值」。



30. 環境部中華民國 113 年 4 月 9 日環部授研字第 1135104387 號公告，預告訂定「水中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀火焰離子化偵測器法 (NIEA W901.51B)」草案。
31. 環境部中華民國 113 年 4 月 9 日環部授研字第 1135104390 號公告，預告廢止「水中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀／火焰離子化偵測器法 (NIEA W901.50B)」。
32. 環境部中華民國 113 年 4 月 12 日環部保字第 1131022605 號令，修正「環境保護財團法人設立許可及監督辦法」。
33. 環境部資源循環署中華民國 113 年 4 月 12 日環循綜字第 1136107356 號函，訂定「環境部資源循環署對民間團體、傳播媒體及學校補(捐)助要點」，自即日生效。
34. 環境部中華民國 113 年 4 月 15 日環部授管字第 1137110562 號函，「土壤及地下水污染整治基金管理會設置要點」自即日停止適用。
35. 環境部中華民國 113 年 4 月 17 日環部保字第 1131024797 號令，修正「環境教育法施行細則」第七條。
36. 環境部中華民國 113 年 4 月 17 日環部空字第 1131023819 號令，修正「機車排放空氣污染物檢驗站設置及管理辦法」部分條文。
37. 環境部中華民國 113 年 4 月 17 日環部授管字第 1137110350 號函，修正「行政院環境保護署垃圾資源回收(焚化)廠查核評鑑要點」規定，名稱並修正為「環境部垃圾能資源回收(熱處理)廠查核評鑑要點」，自即日生效。
38. 環境部中華民國 113 年 4 月 18 日環部循字第 1136106937 號令，修正「事業廢棄物清理計畫書審查管理辦法」部分條文。
39. 環境部中華民國 113 年 4 月 18 日環部授研字第 1135104784 號公告，預告廢止「水中臭度檢測方法—初嗅數法 (NIEA W206.52C)」草案。
40. 環境部中華民國 113 年 4 月 18 日環部授研字第 1135104778 號公告，預告訂定「水中臭度檢測方法—初嗅數法 (NIEA W206.53C)」草案。
41. 環境部中華民國 113 年 4 月 18 日環部授管字第 1137110794 號函，訂定「應加速改善場址採行風險管理措施之申請補助作業原則」，自即日生效。
42. 環境部中華民國 113 年 4 月 19 日環部空字第 1131023822 號公告，公告「補助機器腳踏車排放空氣污染物定期檢驗站執行定期檢驗費用標準」自即日起停止適用。
43. 環境部中華民國 113 年 4 月 24 日環部化字第 1138107286 號公告，修正「列管毒性化學物質及其運作管理事項」公告事項第一項及第二項附表二、第三項附表三、第四項附表四，並自即日生效。
44. 環境部中華民國 113 年 4 月 25 日環部循字第 1136105220 號公告，預告修正「應標示回收相關標誌之物品或容器責任業者範圍、標誌圖樣大小、位置及其他應遵行事項」草案。

45. 環境部中華民國 113 年 4 月 26 日環部人字第 1131027693A 號公告，預告修正「行政院環境保護署及所屬各機關公務人員交代條例施行細則」草案，其名稱並修正為「環境部及所屬各機關（構）公務人員交代條例施行細則」。
46. 環境部中華民國 113 年 4 月 29 日環部氣字第 1139103882 號公告，預告訂定「碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標」草案。
47. 環境部中華民國 113 年 4 月 29 日環部氣字第 1139104365 號公告，預告訂定「自主減量計畫管理辦法」草案。
48. 環境部中華民國 113 年 4 月 29 日環部氣字第 1139103859 號公告，預告訂定「碳費收費辦法」草案。
49. 環境部中華民國 113 年 4 月 29 日環部空字第 1131024107 號公告，預告修正「空氣品質標準」第三條、第四條草案。

**行政院公共工程委員會核備 113 年 05 至 06 月訓練積分課程表**

\*本項課程表係轉達工程會核備之積分課程資訊，細節請技師先進洽詢主辦單位

序號	課程名稱	課程時間	主辦單位	聯絡電話
1	113 年【環境檢驗人員訓練課程】-第三梯次	2024/05/07 ~ 2024/05/18	中華民國環境檢驗測定商業同業公會	聯絡人：蘇甯某 電話：0277315622 信箱：best@envilab.org.tw
2	工程法務系列-工程驗收保固作業程序及常見爭議實務	2024/05/08 ~ 2024/05/08	財團法人台灣營建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
3	LEED V4 AP 國際綠建築認證班	2024/05/09 ~ 2024/05/10	綠矩整合有限公司	聯絡人：吳依蓁 電話：04-2321-8867 信箱： jennywu@greenmatrixes.com
4	智慧建築評估手冊說明會_測試	2024/05/10 ~ 2024/05/10	社團法人台灣智慧建築協會	聯絡人：羅小姐 電話：02-27528072 信箱：tiba.org.tw@gmail.com
5	限制競爭(資格、規格)態樣、避免與解套	2024/05/10 ~ 2024/05/10	中華產業發展與品質管理協會	聯絡人：蔡專員 電話：07-5566909 信箱：service@iqma.org.tw
6	2024.5 建築物耐震能力初步評估與詳細評估系列講習會	2024/05/11 ~ 2024/05/11	中國土木水利工程學會、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、中華民國...(略)	聯絡人：吳玕璇 電話：02-2392-6325 #22 信箱：service@ciche.org.tw
7	營建產業 ESG 永續報告書撰寫指引	2024/05/15 ~ 2024/05/15	財團法人台灣營建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
8	內政部建築研究所 112 年度研究成果發表講習會-A2	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
9	內政部建築研究所 112 年度研究成果發表講習會-B1	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
10	內政部建築研究所 112 年度研究成果發表講習會-B2	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
11	內政部建築研究所 112 年度研究成果發表講習會-D1	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw



12	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-D2	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
13	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-F1	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
14	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-F2	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
15	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-A1	2024/05/16 ~ 2024/05/16	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
16	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-C1	2024/05/17 ~ 2024/05/17	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
17	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-C2	2024/05/17 ~ 2024/05/17	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
18	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-E1	2024/05/17 ~ 2024/05/17	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
19	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-E2	2024/05/17 ~ 2024/05/17	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
20	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-F3	2024/05/17 ~ 2024/05/17	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
21	內政部建築研究所 112 年度研究成果發 表講習會-F4	2024/05/17 ~ 2024/05/17	內政部建築研究 所	聯絡人：許佳娟 電話：(02)86676111#216 信箱：jennyhsu@tabc.org.tw
22	AIGC 應用於工程技 術-AIGC 的外掛和 自動化導入職場工 作流案例(數據分析 與自動化)	2024/05/24 ~ 2024/05/24	財團法人中興工 程顧問社	聯絡人：褚琴琴 電話：02-87919198*453 信箱：cherry@sinotech.org.tw
23	污染場址的現地圍 封及固化與穩定化 處理技術介紹	2024/05/24 ~ 2024/05/24	台灣塑膠工業股 份有限公司	聯絡人：杜永昌 電話：0913723103 信箱：aquariusss0129@gmail.com
24	工程法務系列-如何 導入工程合約管理 機制以有效預防履 約風險	2024/05/24 ~ 2024/05/24	財團法人台灣營 建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw

25	機電工程估價估算 系列課程-機電工程 成本估價實務	2024/05/29 ~ 2024/05/29	財團法人台灣營 建研究院	聯絡人：胡小姐 電話：02-89195094 信箱：vicky@tcri.org.tw
26	113「公共工程經費 電腦估價系統」 PCCES 4.3	2024/05/30 ~ 2024/05/31	滕嘉企業社	聯絡人：梁韶芸 電話：0227088090 信箱：yilinp@ms44.url.com.tw
27	工程法務系列-工期 展延及費用補償之 理論與爭訟實務兼 論鑑定程序	2024/05/31 ~ 2024/05/31	財團法人台灣營 建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
28	營建產業 ESG 永續 報告書撰寫指引	2024/06/05 ~ 2024/06/05	財團法人台灣營 建研究院	聯絡人：楊小姐 電話：02-89195033 信箱：cindy.yang@tcri.org.tw
29	機電工程估價估算 系列課程-機電工程 識圖點料電力系統 工程圖面數量計算 實務	2024/06/26 ~ 2024/06/26	財團法人台灣營 建研究院	聯絡人：胡小姐 電話：02-89195094 信箱：vicky@tcri.org.tw

**環保訊息**(資料來源：環境部)

- 113/03/07 **【環境部啟動地方氣候變遷調適執行方案】**  
國家氣候變遷調適行動計畫(112-115年)於去(112)年10月4日經行政院核定，環境部表示：直轄市、縣(市)政府應於1年內完成訂修氣候變遷調適執行方案。由於是地方政府首次擬定，所以，環境部於6日邀集專家學者、16部會機關與22個直轄市、縣(市)政府相關局處單位合計300餘人參與調適工作研商交流會，啟動地方推動調適執行方案。
- 113/03/08 **【環境部提醒事業於4月30日前完成溫室氣體排放量盤查登錄】**  
「溫室氣體排放量盤查登錄及查驗管理辦法」已於去年9月修正發布，環境部提醒特定行業別及全廠(場)溫室氣體排放量達每年2.5萬公噸二氧化碳當量之製造業，應於4月30日前，完成112年溫室氣體排放量盤查，並將溫室氣體排放量清冊及溫室氣體盤查報告書，登錄於事業溫室氣體排放量資訊平台(網址：<https://ghgregistry.moenv.gov.tw>)。
- 113/03/08 **【環境部發布修正「環境用藥許可證申請核發作業準則」】**  
環境部為加強管理核發機關審查程序相關規定，新增中央主管機關受理環境用藥許可證申請(含變更、展延)之審查原則，發布修正「環境用藥許可證申請核發作業準則」第5條、第11條。
- 113/03/11 **【環境部發布修正「環境用藥販賣業及病媒防治業許可執照申請核發作業準則」】**  
環境部為加強管理核發機關審查程序相關規定，新增地方主管機關受理環境用藥販賣業及病媒防治業許可執照申請之審查原則，發布修正「環境用藥販賣業及病媒防治業許可執照申請核發作業準則」第4條、第11條。
- 113/03/13 **【環境部公布第1屆碳費費率審議會委員名單，並訂於3月15日召開第1次審議會】**  
為組成碳費費率審議會，環境部前於112年12月1日訂定發布「碳費費率審議會設置要點」，該部依設置要點完成相關遴選作業後，於今日公布第1屆碳費費率審議會委員名單。審議會由該部次長擔任召集人、氣候變遷署署長擔任副召集人，並包含機關代表委員5位、民間團體代表委員6位及學者專家8位，共計由21位委員組成。

- 113/03/15 **【環境部召開首次碳費費率審議會】**  
環境部今(15)日下午召開第 1 次碳費費率審議會，由召集人施文真次長主持，今日會議共有 20 位委員出席，會中就碳費費率審議會任務、運作規定、碳費徵收子法規劃及碳費徵收需考量因素進行報告，讓委員針對碳費議題有通盤了解，以利未來審議會能順利運作。
- 113/03/18 **【環境部預告修正公民營廢棄物清除處理機構申請許可案件收費標準】**  
公民營廢棄物清除處理機構申請許可案件收費標準於 91 年 1 月 2 日訂定發布，後續於 95 年 8 月 11 日修正，鑑於物價指數調整、審查程序與人力需求成本逐年增加，另地方政府亦反映收費價格已不敷審查使用，因此，環境部檢討修正現行收費基準，使審查費用收取更臻合理化。
- 113/03/20 **【2050 淨零轉型論壇 各方齊力共商中央地方氣候治理策略】**  
2050 淨零排放目標需各級政府與國民、事業、團體共同推動。環境部本(20)日於「2050 淨零城市展」，以「氣候法制-中央地方齊力邁向淨零」為題舉辦「淨零轉型論壇」。由國立臺北大學李育明特聘教授主持，並邀請中央、地方、學者專家及民間團體分享實踐經驗並暢談中央地方氣候治理議題，從法規、策略、人力、經費等 4 大面向提出具體建言，冀促使中央地方攜手合作加速減碳，共同為 2050 淨零轉型努力。
- 113/03/21 **【環境部首屆「淨水永續獎」頒獎鼓勵廢水能資源化】**  
響應聯合國 3 月 22 日「世界水日 World Water Day」保護水資源，環境部今(21)日辦理首屆「淨水永續獎」頒獎，表揚 14 家績優廠商及其協力廠商，肯定業者廢水處理能資源化與智慧創新的努力。環境部亦發布「補助廢(污)水處理技術創新及研究發展計畫執行要點」，每年將籌措至少 2,000 萬元獎勵業者創新從傳統去除污染物轉換為能資源化利用，助攻減碳與資源循環。
- 113/03/26 **【環境部召開第 2 次碳費費率審議會】**  
環境部今(26)日下午召開第 2 次碳費費率審議會，由召集人施文真次長主持，今日會議共有 19 位委員出席，環境部於會中先就碳費費率之經濟衝擊評估方法及國際碳定價實施情形進行報告，委員也就國際實質碳價格代表性及我國碳費費率設計進行討論，會中也決議費率審議應以科學為基礎，先充分瞭解我國碳費相關子法配套機制後，再以 2030 年為期規劃分階段調升費率(含：一般費率、優惠費率)，給予產業明確之價格訊號，以引導產業及早規劃中長期減碳路徑。



- 113/03/28 **【環境部公布離岸風電環評初審要點，提升行政效率，減少浪費】**  
環境部於今日（113 年 3 月 28 日）公布離岸風電環評初審要點及「風力發電離岸系統開發行為環境影響評估審查事項檢核表」。離岸風電環評初審要點要求風電業者所提送的環評相關書件應納入檢核表，符合檢核表審查事項，即可完成第一階段專案小組初審，取得經濟部遴選資格，後續經濟部完成遴選，實際取得核配發電容量之風電業者，再進入第二階段環評實質審查，除可提升行政效率，更可達成能源轉型及環境保護雙贏目的。
- 113/04/02 **【環境部修正發布「違反固定污染源逸散性粒狀污染物空氣污染防治設施管理辦法之缺失記點及處理原則」】**  
環境部配合 112 年 7 月 6 日修正發布之「固定污染源逸散性粒狀污染物空氣污染防治設施管理辦法」，於今日修正發布「違反固定污染源逸散性粒狀污染物空氣污染防治設施管理辦法之缺失記點及處理原則」明定各項缺失記點基準及處理方式，使地方環保主管機關執行管理辦法時，有一致之處理方式，並符合比例原則。
- 113/04/03 **【環境部啟動淨零人才培訓，開設青年綠領專班】**  
我國 112 年 2 月公布「氣候變遷因應法」，納入 2050 年淨零排放目標，企業面臨碳盤查、減量、碳費開徵及碳關稅等新規範及新營運模式，對綠領人才需求將大幅提升。為因應淨零轉型所需的龐大人才需求，環境部國家環境研究院預計自今年 4 月底起，辦理一系列淨零排放技術訓練課程，尤其針對在學青年開設專班，協助青年綠領職涯發展，並開放對淨零排放有興趣之企業及民眾報名。
- 113/04/08 **【解決產業碳焦慮，環境部展開面對面輔導】**  
環境部氣候變遷署為提升企業碳盤查及減碳能力，於 4 月 9 日、4 月 17 日及 4 月 24 日辦理「碳盤查及自願減量專案輔導」，透過第一手、面對面的輔導說明，教導企業如何進行碳盤查以及進行自願減量工作，讓企業不再碳焦慮！
- 113/04/18 **【環境部修正發布「事業廢棄物清理計畫書審查管理辦法」】**  
環境部為提升事業廢棄物清理計畫書審核機關行政審查效率及審查程序之完整性，並明定相關核准原則，於本(113)年 4 月 18 日修正發布「事業廢棄物清理計畫書審查管理辦法」，修正條文計有 6 條，自發布日施行。

- 113/04/24 **【接軌國際斯德哥爾摩公約 環境部新增列管全氟己烷磺酸及其鹽類與相關化合物】**  
為因應聯合國持久性有機污染物「斯德哥爾摩公約」將全氟己烷磺酸及其鹽類與相關化合物納入附件 A 消除清單，環境部公告將其增列為第一類毒性化學物質，並訂定運作管理規定，同時因應全氟辛烷磺酸、全氟辛烷磺酸鋰鹽、全氟辛烷磺醯氟及全氟辛酸用於泡沫滅火設備中 B 類火災之滅火泡沫已屆斯德哥爾摩公約得使用之規定期限，配合刪除其得使用用途，接軌國際管理趨勢。
- 113/04/29 **【環境部預告修正「空氣品質標準」務實穩健改善空品】**  
環境部 4 月 29 日預告修正「空氣品質標準」草案，除國人最為關心的細懸浮微粒（PM<sub>2.5</sub>）標準，年平均值將由 15 微克每立方米（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）加嚴至 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，本次亦同步加嚴懸浮微粒（PM<sub>10</sub>）、臭氧（O<sub>3</sub>）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）、一氧化碳（CO）等污染物濃度標準（詳如附表）。另修正各縣市轄內所有監測站須全數符合標準，才能劃定為二級空氣污染防制區，取代過往以所有測站濃度平均值判定達標與否的方式，以務實穩健可達成為目標，逐步落實全民呼吸健康平權。
- 113/04/29 **【環境部預告「碳費收費辦法」、「自主減量計畫管理辦法」及「碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標」三項草案】**  
建構我國碳定價制度及穩定推動減碳工作，環境部依據氣候變遷因應法預告「碳費收費辦法」、「自主減量計畫管理辦法」及「碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標」等三項草案。今日預告的三項草案是建構未來實施碳費的配套機制，搭配一般及優惠費率，促使收費對象加快、加大減量腳步。



## 廢（污）水處理新挑戰-全氟化合物

許國恩技師

財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心 組長

### 一、前言

聯合國 2015 年宣布「2030 永續發展目標」(Sustainable Development Goals, SDGs)，共計 17 項核心指標，其中目標 6「淨水與衛生」與水資源水量與水質管理具高度關聯性，伴隨著環境永續思潮，社會大眾對於水體品質及事業廢（污）水排放水質等級要求愈臻提高，早期廢（污）水處理主要著重於生化需氧量、化學需氧量和懸浮固體等傳統污染物及銅、鋅、鎳等重金屬之移除；環境部自 100 年起考量氮磷對環境之危害性，遂陸續針對高科技產業及科學工業園區、石化產業及石化專區、金屬表面處理業、電鍍業、製革業（生皮製成成品皮者）、工業區等對象增列氮磷管制；另亦針對特定事業新增含氯或含苯有機物及應揭露污染物（如 N-甲基吡咯烷酮、2-甲氧基-1-丙醇）等放流水標準管制項目，強化廢（污）水微量有機化合物管理。

此外，環境檢測技術日益精進，國內外紛紛採用液相層析串聯質譜儀 (Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry, LC-MS/MS) 等精密儀器分析廢（污）水所含微量「新興污染物」(Emerging Contaminants)，其濃度數量級由毫克/公升 (mg/L)，變為微克/公升 ( $\mu\text{g/L}$ ) 或奈克/公升 (ng/L)，前述「新興污染物」係指「新認定或之前未確認」、「未受法規規範」或「環境中達一定濃度時，對人體健康及生態環境具有風險性」的化學污染物。新興污染物一般包含環境中不易分解之持久性有機物 (Persistent Organic Pollutants, POPs)、個人照護醫藥用品 (Pharmaceutical and Personal Care Products, PPCPs)、內分泌干擾物 (Endocrine-disrupting Compounds, EDCs) 和環境荷爾蒙 (Environmental Hormone) 等。

近年來電影黑水風暴 (Dark Waters) 所探討之「永遠化學品-全氟化合物」議題已引起全球高度關注，包含工業製程改善及替代化學品研發、飲用水、廢（污）水及地面水體水質等環境管理管制標準訂定、污染源改善採用之廢（污）水處理技術等，臺灣接軌國際趨勢，已著手進行調查分析及管理策略評估，本文主要目的係說明全氟化合物基本特性及臺灣產業使用情形，並歸納特定事業全氟化合物廢（污）水調查結果，及

國外已採行之廢（污）水處理技術，提供各界先進參考。

## 二、全氟化合物基本特性

全氟化合物（或稱為全氟/多氟烷基化合物，Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS）泛指化學結構中具強碳氟鍵（C-F）之化合物，其結構含疏水端（C-F 骨架）與親水端（通常為羧酸官能基或磺酸官能基），具防水、防油與化學及熱穩定等特性，適合作為界面活性劑，廣泛應用於紡織、皮革、紙製品、硬鉻電鍍及半導體業等，全氟化合物於 1940 年代由明尼蘇達礦業製造公司（現今的 3M 公司）研發，大量生產及使用迄今已超過 70 年。全氟化合物包含全氟烷基羧酸鹽（Perfluoroalkyl Carboxylates, PFACs）和全氟烷基磺酸鹽（Perfluoroalkyl Sulfonates, PFASs）等類別，其中以全氟辛烷磺酸（Perfluorooctanesulfonic Acid, PFOS）與全氟辛酸（Perfluorooctanoic Acid, PFOA）兩化合物使用歷史最久遠，因具生物毒性及生物累積性，斯德哥爾摩公約（Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants，簡稱 POPs 公約）於 2005 年列管 PFOS 及其鹽類和全氟辛烷磺醯氟，2019 年列管 PFOA 及其鹽類，另 2022 年第十次締約國大會新增列管全氟己烷磺酸（Perfluorohexane Sulfonic Acid, PFHxS）及其鹽類。臺灣環境部化學物質管理署已將 PFOS 和 PFOA 列管為毒性化學物質，另 112 年 7 月 11 日預告修正「列管毒性化學物質及其運作管理事項」，預計將 PFOS 及 PFOA 等管制濃度 0.01% 修正為全濃度，並新增列管 PFHxS（編按：已於 113 年 4 月 24 日公告）。另隨著 PFOA 等物質陸續禁限用，化學品供應商亦持續研發推動六氟環氧丙烷二聚酸 HFPO-DA（俗稱 GenX）等替代化學品（常見之 PFAS 化學式如圖 1）。

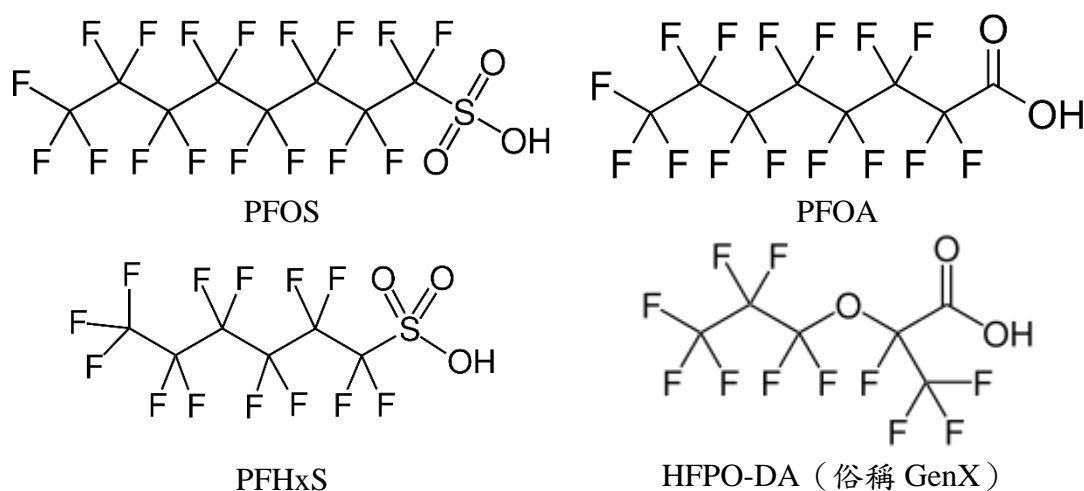


圖 1 常見全氟化合物

一般而言，研究常以辛醇/水分配係數 ( Octanol-water partition coefficient,  $K_{ow}$ ) 判斷化合物之疏水性 (Hydrophobicity)，當化合物  $\log K_{ow}$  大於 4.0 時，表示該物質具較高吸附潛勢，其中 PFOS 和 PFOA 等全氟化合物  $\log K_{ow}$  多大於 2，屬中度、高度吸附潛勢之有機污染物。另可以有機碳分配係數 (Organic Carbon-water Partition Coefficient,  $K_{oc}$ ) (mL/g) 作為化合物與土壤吸附強弱之判斷指標，如 PFOS 和 PFOA 之  $K_{oc}$  值均大於 500，與土壤之吸附力強、流動性較低。

### 三、國內外水資源全氟化合物管理管制規定

國內外為避免全氟化合物進入水體對環境生態及人體健康造成影響，已陸續針對事業廢（污）水、環境水體或飲用水訂定管理管制規定，茲將相關規定歸納說明如下：

#### (一) 美國

美國環保署於 2023 年 1 月發布「15 號放流水指引規劃」(Effluent Guidelines Program Plan 15)，規劃針對有機化學品、塑膠和合成纖維業和金屬表面處理業等特定事業訂定 PFOS 和 PFOA 等全氟化合物放流水標準管制規定。另基於飲用水 PFAS 風險管理，2016 年公布 PFOS 及 PFOA 加總之累積健康公告數值 (Health Advisory Level) 為  $0.07 \mu\text{g/L}$ ；考慮除飲用水以外之食品、空氣、消費品等潛在污染來源風險，2022 年更新終身健康公告數值 (2022 Lifetime Health Advisory Level)，PFOA、PFOS 和 PFBS 限值分別為  $4 \times 10^{-6}$ 、 $2 \times 10^{-5}$  以及  $2 \mu\text{g/L}$ 。此外，美國環保署刻正制訂「國家初級飲用水法規」(National Primary Drinking Water Regulation, NPDWR)，規劃針對飲用水中 PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS、PFBS、HFPO-DA (又稱為 GenX) 等 6 項 PFAS 制定具法律強制性之最大污染限值 (Maximum Contaminant Levels, MCLs)，其中 PFOA 和 PFOS 之 MCL 為  $0.004 \mu\text{g/L}$ 。

另密西根州、威斯康辛州和麻薩諸塞州等州政府已啟動污染源調查及水污染許可管理管制，如密西根州環境大湖和能源部 (The Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy, EGLE) 針對地面水水質訂定 PFOS、PFOA 及 PFBS 水質基準 (Water Quality Standards, WQS)。地面水作為飲用水水源時，PFOS 基準為  $11 \text{ ng/L}$ ，若非屬作為飲用水水源時，基準值為  $12 \text{ ng/L}$ ；PFOA 部分，地面水作為飲用水水源時，基準為  $66 \text{ ng/L}$ ，若非屬作為飲用水水源時，基準值為  $170 \text{ ng/L}$ ；PFBS 部分，地面水作為飲用水水源時，PFBS 基準為  $8,300 \text{ ng/L}$ ，若非屬作為飲用水

水源時，基準值為 670,000 ng/L。此外，針對工業廢水排入污水下水道系統訂定工業前處理計畫 (Industrial Pretreatment Programs, IPP)，規範納管對象應採行適宜之處理技術和管理措施，依據 IPP 之 PFAS 計畫提供放流水結果和污染源潛在趨勢等資訊將污水處理廠予以分類，並於排放許可證規範 PFAS 監測頻率、監測頻率減少方案、污染物最小化和污染源評估計畫、矯正行動計畫 (Corrective Action Plan) 和申報規定 (Reporting Requirements) 等。

## (二) 日本

日本環境省 2010 年訂定含全氟辛烷磺酸及其鹽類廢棄物處理指引「Technical Guideline for the Environmentally Sound Treatment of PFOS Wastes」，該指引係適用於含 PFOS 及其鹽類製造過程或使用含 PFOS 及其鹽類產品所產生之固態或液態事業廢棄物處理，針對含有全氟辛烷磺酸及其鹽類之廢棄物去除效率 (Destruction rate) 須達 99.999%，經由處理程序排放之放流水 PFOS 濃度須低於 0.002 mg/L，殘餘廢棄物濃度須低於 3 mg/kg，放流水 PFOS 標準值係依據飲用水參考濃度 0.0002 mg/L 以及水體稀釋能力 (以稀釋倍數 10 倍) 計算。此外，日本環境省 2020 年 (令和 2 年) 提出 PFOS 和 PFOA 水資源管理暫定基準，兩化合物自來水暫定水質管理目標合計濃度為 50 ng/L；針對公共水域和地下水等水環境之 PFOS 和 PFOA 監測暫定基準，合計濃度為 50 ng/L。

## (三) 歐盟

歐盟 2000 年制定水框架指令 (Water Framework Directives, WFD) (2000/60/EC)，針對對水生環境造成重大風險的物質建立「優先物質清單」(List of Priority Substances)，並予以區分為「優先物質」(Priority Substances) 及「優先危險物質」(Priority Hazardous Substances)。2008 年提出環境品質標準指令 (Environmental Quality Standards Directives, EQSD) 文件 (Directive 2008/105/EC) (亦為 WFD 修正文件)，將 PFOS 列入優先物質或優先有害物質候選清單。2013 年訂定地表水及生物體之「環境品質標準」(Environmental Quality Standards, EQS)，包含內陸地表水和其他地表水之年平均濃度 (AA-EQS) 及最大允許濃度，其中其他地表水 (除內陸以外之地表水) PFOS 之 AA-EQS 為 0.00013 µg/L 及 MAC-EQS 為 7.2 µg/L，以及對生物體 (魚類) 之 EQS 為 9.1 µg/kg (濕重)。

另歐盟 2022 年提出修訂地表水優先物質清單提案，預計以 PFOA、PFOS、PFHxS、PFBS (PFOS 之替代)、HFPO-DA (Gen X，為 PFOA 之替代品) 等 24 項 PFAS 取代原先的 PFOS 項目，並提供其與 PFOA 之毒性相對效力因子 (Relative potency factors, RPFs)，以利加總計算濃度；另提出其他地表水 (除內陸以外之地表水) AA-EQS 建議值為 0.0044  $\mu\text{g/L}$  (以 PFOA 毒性當量濃度計算) 之提案。

## 四、廢 (污) 水全氟化合物來源及調查現況

臺灣目前尚未訂定地面水體及廢 (污) 水之全氟化合物相關管理管制基準，但高科技產業和印染整理產業已接軌國際趨勢，採行源頭化學品管理方式，控管廢水排放全氟化合物之污染風險。臺灣目前無全氟化合物製造廠商，事業使用之含 PFAS 化學品均為進口，且多以混合物方式微量添加於製程化學品，依據公告列管毒性化學物質得使用用途一覽表規定，PFOS 得使用於封閉系統中硬金屬電鍍等，PFOA 得使用於半導體的光刻或蝕刻製程，或具撥油、撥水性之勞工用紡織品之製造等用途。事業製程若使用含 PFAS 化學品，其製程作業廢水可能含有 PFAS，因傳統生物處理或混凝沉澱對 PFAS 移除效率有限，其處理後之放流水甚或其地面水體或地下水均可能含有 PFAS；另該類化合物具高度疏水性，廢 (污) 水處理過程可能會吸附於污泥，或累積於底泥或土壤等環境介質。以下針對製程可能使用含 PFAS 化學品之事業歸納其化學品用途及歷年廢 (污) 水 PFOS、PFOA 等 PFAS 水質調查結果。

### (一) 作為微影製程之光阻劑

晶圓製造及半導體製造業和光電材料及元件製造業等高科技產業黃光與顯影製程使用之光阻劑、光阻去除液、稀釋劑、基板洗淨劑、光阻稀釋液、配向膜等化學品均含微克/公升數量級濃度 PFOA 和 PFOS 等 PFAS，其中以 PFOA 檢出頻率較高，濃度介於 0.4~11.6  $\mu\text{g/L}$ ，PFOS 最高檢出濃度為 5.22  $\mu\text{g/L}$ <sup>[1]</sup>，因其含量甚微，化學品供應商多未將此微量成分標示於物質安全資料表。近年來臺灣光電半導體產業協會接軌國際趨勢，已陸續廢除使用 PFOS 及 PFOA，並進行化學品替換使用。

隨高科技產業採行化學品替代使用，廢水 PFOS 和 PFOA 濃度已有降低趨勢，環境部 2010 年調查科學工業園區放流水 PFOS 最高檢出濃度為 4.60  $\mu\text{g/L}$ <sup>[2]</sup>，2017 年降為 0.007  $\mu\text{g/L}$ <sup>[3]</sup>。另環境部 2023 年調查某晶圓製造及半導體製造業 1 股原廢水以全氟丁酸 (PFBA) 及全氟戊酸 (PFPeA) 檢出濃度較高 (分別為 0.644 和 0.216  $\mu\text{g/L}$ )，占 18 項 PFAS 檢測標的檢

出濃度 78%，PFOA 濃度為 0.0339  $\mu\text{g/L}$ ，PFHxS 和 PFOS 均低於方法偵測極限；另 1 股原廢水全氟丁烷磺酸(PFBS)檢出濃度較高(0.219  $\mu\text{g/L}$ )，占 18 項 PFAS 檢測標的檢出濃度 68%，PFHxS、PFOS 和 PFOA 檢出濃度介於 0.00220~0.0116  $\mu\text{g/L}$ ；兩股原廢水其餘 C9 以上等 8 項長鏈 PFAS (包含全氟壬酸、全氟壬烷磺酸鹽、全氟癸酸、全氟癸烷磺酸、全氟十一烷酸、全氟十二烷酸、全氟十三烷酸、全氟十四烷酸)濃度介於 ND~0.0216  $\mu\text{g/L}$ <sup>[4]</sup>。

## (二) 作為撥/潑水劑、防水性塗料

PFAS 具防水和防油等特性，可用於紡織業、印染整理業、製革業或造紙業等，作為防水塗料或機能性產品表面塗層，依客戶訂單需求，得使用不同劑型之撥/潑水劑；另化工藥劑供應商配合產業客戶端使用需求，亦可能產製含 PFAS 之撥/潑水劑等化學品。常見撥/潑水劑或防水劑包含碳八(C8)、碳六(C6)、碳四(C4)等含氟撥/潑水劑及無氟(PFAS free)撥/潑水劑(如有機矽類、丙烯酸類、聚氨酯類等)四類，一般而言，PFAS 碳鏈愈長，防水抗污效果愈佳。隨著國際對於 PFAS 強化管理管制，目前國外長鏈 PFAS 之供應商均已陸續停止生產，國內廠商配合客戶要求亦已陸續減少碳八撥/潑水劑使用，改使用碳六(PFHA)或無氟化物撥/潑水劑，以符合藍色標誌標準(bluesign® standard)或紡織、皮革和鞋類產業所組成之有害化學物質零排放聯盟(Zero Discharge of Hazardous chemicals, ZDHC)推動有害物質零排放之積極作為。

環境部 2019 年調查臺灣 8 家印染整理業原廢水 PFOS 和 PFOA 濃度介於 ND~0.0243 和 ND~0.103  $\mu\text{g/L}$ ，各廠 PFOS 和 PFOA 檢出濃度與撥/潑水劑使用量無直接關聯性，惟若製程僅使用無氟撥/潑水劑或未使用撥/潑水劑，其廢水 PFOS 或 PFOA 檢出濃度相對較低。某廠使用無氟撥/潑水劑，原廢水和放流水 PFOS 低於方法偵測極限，PFOA 分別為 0.00970 和 0.00855  $\mu\text{g/L}$ ；另一廠則幾乎未使用撥/潑水劑，原廢水 PFOS 和 PFOA 均低於方法偵測極限，放流水檢出微量 PFOA (0.00580  $\mu\text{g/L}$ )，PFOS 低於方法偵測極限<sup>[5]</sup>。前述印染整理業廢水 PFOS 和 PFOA 調查結果與澳洲 (PFOS 為 ND、PFOA 為 0.076 和 0.0014  $\mu\text{g/L}$ )<sup>[6]</sup>和中國大陸 (PFOS 為 0.0031~0.0087  $\mu\text{g/L}$ 、PFOA 為 0.130~0.140  $\mu\text{g/L}$ )<sup>[7]</sup>相近。

環境部 2022 年針對某製造 C6 撥/潑水劑和無氟撥/潑水劑化工業進行水質調查，原廢水以全氟戊酸(PFPeA)(C5)、全氟辛酸(PFOA)(C8)、全氟庚酸(PFHpA)(C7)和全氟丁酸(PFBA)(C4)檢出濃度較高，介於 0.238~0.848  $\mu\text{g/L}$ <sup>[8]</sup>。美國環保署調查 6 家 PFAS 製造廠和 7 家 PFAS



配方廠放流水 PFAS，結果顯示 PFAS 製造廠放流水 PFOA 和 PFOS 平均濃度分別為 3.77 和 3.37  $\mu\text{g/L}$ （最高檢出濃度分別為 430 和 21.2  $\mu\text{g/L}$ ），PFAS 配方廠放流水 PFOA 和 PFOS 平均濃度分別為 0.116 和 0.034  $\mu\text{g/L}$ （最高檢出濃度分別為 1.6 和 0.153  $\mu\text{g/L}$ ）；另各工廠放流水短鏈全氟羧酸 PFCA<sub>s</sub> 和全氟磺酸 PFSA<sub>s</sub> 平均濃度高於長鏈 PFCA<sub>s</sub> 和 PFSA<sub>s</sub><sup>[9]</sup>。

### (三) 作為硬鉻電鍍鉻霧抑制劑

硬鉻電鍍製程為避免鍍液中的氣體脫離液面時爆裂，會於鍍槽添加鉻霧抑制劑降低鍍液表面張力，常見鉻霧抑制劑為含氟的界面活性劑，其中德國 50%PFOS 係用於硬鉻電鍍之表面處理程序<sup>[10]</sup>。德國聯邦環境局調查電鍍業藥劑 PFOS 濃度介於 43~580  $\text{g/L}$ <sup>[11]</sup>。國內部分電鍍業及金屬表面處理業之硬鉻製程廠商採取密閉式鍍槽搭配抽風設備以減少鉻氣逸散，另仍有廠商使用鉻霧抑制劑（含全氟化合物），鍍件所夾帶製程化學品經水洗程序會進入廢水處理程序。國際上目前已有 6:2 氟調聚物化合物、F-53、F-53B 等取代金屬電鍍含 PFOS 化學品。

環境部 2020 年調查 3 家製程有使用鉻霧抑制劑之電鍍業或金屬表面處理業，原廢水 PFOS 濃度介於 31.3~744  $\mu\text{g/L}$ ，放流水濃度介於 22.6~173  $\mu\text{g/L}$ ，其中 1 廠廢水處理程序除化學混凝沉澱外，另設活性碳吸附設施，其 PFOS 去除率可達 96%；另有 1 家製程採密閉式抽氣方式，未添加鉻霧抑制劑，原廢水和放流水檢出微量 PFOS（濃度分別為 0.0447 和 0.0352  $\mu\text{g/L}$ ），相較於前述有使用鉻霧抑制劑廠商原廢水 PFOS 濃度差異達 4 個數量級；4 家鍍鉻製程之電鍍業或金屬表面處理業，原廢水 PFOA 濃度介於 ND~0.00894  $\mu\text{g/L}$ <sup>[12]</sup>。美國研究指出 47 家鍍鉻工廠製程廢水 6:2 FTSA 濃度（最高檢出濃度 3,140  $\mu\text{g/L}$ ，平均濃度 532  $\mu\text{g/L}$ ）高於其他 PFAS，另儘管含 PFOS 鉻霧抑制劑已淘汰，但部分鍍鉻工廠廢水仍有檢出 PFOS（最高檢出濃度 240  $\mu\text{g/L}$ ，平均濃度為 4.86  $\mu\text{g/L}$ ）<sup>[9]</sup>。另芬蘭硬鉻電鍍廢水 PFOS 檢出濃度 1,400~18,000  $\mu\text{g/L}$ <sup>[13]</sup>。

## 五、廢（污）水全氟化合物處理技術

因 PFAS 碳-氟鍵具強鍵結力，較難進行生物分解、水解、氧化與光分解，傳統沉砂池、生物處理或消毒等程序對 PFOS 或 PFOA 等 PFAS 並無法有效去除，目前常用之廢（污）水 PFAS 去除技術包含活性碳吸附、離子交換樹脂、薄膜分離、泡沫分離（Foam Fractionation）、焚化和熱處理、高級氧化和還原，茲將其去除效率及使用考量因子歸納如表 1 所示<sup>[9]</sup>。

### (一) 活性碳吸附

活性碳吸附為目前去除水中 PFAS 之主流技術，係藉吸附劑表面結構或官能基特性，與目標污染物產生物理或化學吸附，達成與溶劑分離之目的，常見吸附劑包含顆粒活性碳 (Granular Activated Carbons, GAC) 或粉狀活性碳 (Powdered Activated Carbon, PAC)。活性碳因比表面積高，可有效吸附水中 PFAS，影響其吸附效率之因素包含活性碳類型 (孔隙結構、表面積、官能基團等)、PFAS 特性 (鏈長、官能基團等) 及水質特性 (pH、TOC 等)，一般而言，活性碳對 PFOA 和 PFOS 等 C8 以上之長鏈 PFAS 具良好吸附效果，PFBS 等短鏈 PFAS 吸附效果則較不理想，整體吸附效率可達 80%~90%；PAC 相較 GAC 有較高之比表面積，惟直接添加於水中後，需再進一步分離，實際使用案例相對較少。此外，活性碳有吸附容量限制，需定期更換，且吸附飽和之活性碳需進一步處理。

目前國際已有以 GAC 處理廢 (污) 水之 PFAS 實際案例，如密西根州 EGLE 啟動都市和工業污染源排放監測，並針對放流水 PFOS 濃度超過水體水質基準之污水處理廠推動納管廠商減量，促使污水處理廠排放 PFOS 濃度大幅降低，如 Lapeer 污水處理廠要求納管廠商增設廢水活性碳處理程序，改善前放流水 PFOS 濃度介於 710~2,000 ng/L，增設活性碳後放流水 PFOS 濃度降至 57~770 ng/L，經調整最適化操作後，放流水 PFOS 濃度介於 17~54 ng/L (變化如圖 2 所示) [14]。

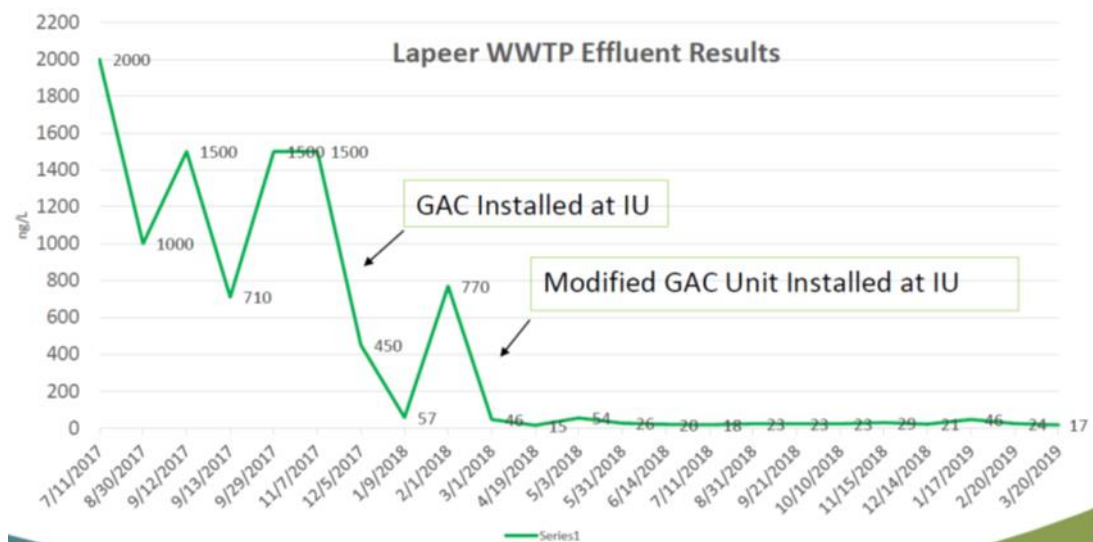


圖 2 密西根州 Lapeer 污水處理廠放流水 PFOS 濃度變化 [14]

## (二) 離子交換樹脂

離子交換樹脂由不溶於酸鹼及水的高分子聚合物製成，表面帶有正電或負電的官能基，若樹脂表面帶負電官能基，可吸附溶液中帶正電的分子，稱為陽離子交換樹脂 (Cationic Exchange Resins, CER)；若樹脂表面帶正電官能基，則可吸附溶液中帶負電的分子，稱為陰離子交換樹脂 (Anionic Exchange Resins, AER)。另離子交換樹脂可分為單次使用型或重複利用型兩類，前者於飽和吸附量而發生貫穿 (Breakthrough) 現象時，即予以更換，取出之廢樹脂則以焚化處理；重複利用型則於發生貫穿現象時不須更換，可直接利用溶劑進行脫附及濃縮 PFAS，再生後樹脂可重複利用 (但樹脂重複利用次數有所限制，因其吸附容量會逐漸下降)，濃縮之 PFAS 需進一步處理，考量其處理成本，單次使用型較適用於污染濃度較低之情形；重複利用型因可再生使用，較常應用於污染濃度較高之情形。因 PFAS 通常帶負電性，使用 AER 對 PFAS 具高度選擇性，可將多數 PFAS 濃度處理到偵測極限以下。PFAS 中 PFASs 對離子交換樹脂的親和力優於 PFCAs，另隨碳鏈增加親和力隨之增強；此外，離子交換樹脂對 PFAS 的吸附效能會受到廢 (污) 水其他有機或無機污染物競相吸附之影響，進而降低其標的污染物之吸附效能。

目前國際已有使用高度選擇性的離子交換樹脂處理 PFAS 之實績，常見應用於處理水中 PFAS 離子交換樹脂包含 AMBERLITE™ PSR2 Plus (DuPont Water Solutions 製造)、Purofine® PFA694E (Purolite 製造)、CalRes 2301 (Calgon Carbon Corporation 製造)、Sorbix PURE LC (ECT2 Inc. 製造)、ResinTech SIR-110-HP (ResinTech Inc. 製造) 等。美國東南部某紡織業因製程使用含 PFAS 撥水劑，其含 PFAS 廢水排放至鄰近瀉湖造成污染，藉由導入 ECT2 離子交換樹脂系統，將廢水 PFOS 和 PFOA 濃度降低至 70 ng/L 以下<sup>[15]</sup>。美國賓州賀實姆鎮淨水場設置 1 座 20 立方英尺離子交換樹脂處理系統，其中裝有 Purofine® PFA694E 單次使用型樹脂 (Purolite 製造)，可將水體中的 PFAS 濃度處理至偵測極限以下<sup>[16]</sup>。

## (三) 薄膜分離 (Membrane Fractionation)

薄膜分離法係利用薄膜構造與分子粒徑、電位分布等差異，使溶質及溶液分離，其中逆滲透膜係利用壓力為驅動力進行分離，常見薄膜型式包含微濾 (Microfiltration, MF) 和超濾 (Ultrafiltration, UF)、奈濾 (Nanofiltration, NF) 和逆滲透 (Reverse osmosis, RO) 等，研究顯示 MF 和 UF 對 PFAS 分離效率不佳<sup>[17]</sup>，NF 和 RO 對 PFAS 具良好之分離效果<sup>[18]</sup>，惟相較活性碳和離子交換樹脂其操作成本較高，另薄膜須經適當前處理，

以避免膜件受到污堵，另高濃度濃縮液仍需進一步處理。

#### (四) 泡沫分離 (Foam Fractionation)

泡沫分離係在水中加入界面活性劑，並藉由曝氣將水中具有表面活性 (Surface-active) 的分子分離，並富集形成泡沫。此技術屬濃縮技術，用以將分子性質類似、對泡沫表面具有親和力分子由溶液中萃取，將水中 PFAS 予以分離，此技術適用於分子鏈較長、氣液相吸附比率 (Gas-water Adsorption Ratio) 較高的 PFAS，因此類分子通常對氣泡表面具較高的親和力，例如 PFDS、PFHpS、PFHpA 及 PFNS 等，研究指出經 60 分鐘曝氣後，前述化合物可達幾乎去除；然 PFHxA、PFBS 及 PFPeS 等化合物去除率變化較大。相較於 GAC 或薄膜分離等技術，泡沫分離具有消耗品用量少、適用水質變化範圍較大等優勢。

泡沫分離屬新興處理技術，國際已有現地模場應用案例，如澳洲奧克雷陸軍航空中心 (Army Aviation Centre Oakey) 因使用含 PFAS 之水成膜泡沫 (Aqueous Film Forming Foam, AFFF) 導致污染地下水，爰設置 250 m<sup>3</sup>/day 現地試驗場進行為期 1 年試驗，其地下水 PFOS、PFHxS 及 PFOA 去除率達 99.5% 以上<sup>[19]</sup>。

#### (五) 焚化和熱處理

飽和活性碳或離子交換樹脂等固體廢棄物、AFFF 或高濃度 PAFS 廢液可經焚化或熱處理予以分解，其溫度一般介於 200~1,400° C (與化合物種類有關)，PFAS 因氟之負電性及其化學穩定性，相較於其他鹵化物較不易分解。採行焚化和熱處理技術時，需須留意 PFAS 分解不完全可能會形成小分子 PFAS 或混合鹵化物有機副產品等不完成燃燒產物 (Products of incomplete combustion, PICs)，目前美國環保署刻正積極研究 PFAS 最適之分解溫度、反應時間和 PICs 生成潛勢等，以及含 PFAS 煙道氣釋放和可能之地面沉降<sup>[9]</sup>。

#### (六) 高級氧化和還原

藉由添加氧化劑或還原劑，經一系列氧化還原反應破壞 PFAS 化學結構，包含脫氟、減少碳鏈長度等，直到完全降解為 CO<sub>2</sub>、F<sup>-</sup>和 H<sub>2</sub>O，若反應不完全時，可能增加 PFAAs 和前驅物濃度，多數高級氧化和還原技術不會產生固體或液體廢棄物需再進一步處置。高級氧化程序包含臭氧、零價鐵、過硫酸鹽、電化學氧化和超臨界水氧化 (Supercritical water oxidation, SWCO) 等，其中 SWCO 係針對液體或固體施加高溫 (大於

705°C) 和高壓 (大於 221.1 bar) 以加速催化反應，研究顯示 SWCO 對含有 PFAS 稀釋後之 AFFF、薄膜濃縮液和掩埋場滲出液等，去除率高達 99%<sup>[20]</sup>。高級還原程序係於強鹼性系統使用帶正電之自由基引發還原反應降解 PFAS，實驗室規模研究顯示 pH 介於 9~12 時，PFAS 降解率介於 70%~99.9%<sup>[21][22]</sup>。

表 1 PFAS 可行之處理技術及其考量因子<sup>[9]</sup>

處理技術	PFAS 去除效率	使用之考量因子
活性碳吸附 (包含粉狀或粒狀)	PFOA：大於 99% <sup>註</sup> PFOS：大於 99% <sup>註</sup> PFBA：大於 99% <sup>註</sup> PFBS：大於 99% <sup>註</sup> HFPO-DA：大於 93% <sup>註</sup> 6:2 FTSA：大於 88%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 短鏈 PFAS 相對長鏈去除效率較不理想</li> <li>■ PFCAs 相較 PFASs 去除效率較不理想</li> <li>■ 吸附速率對水溶液化學成分較敏感(如吸附率較低與 pH 值較高或廢水中有機物含量較高有關)</li> <li>■ 飽和吸附劑需要熱再生或廢棄處理</li> <li>■ GAC 已有商用實績(應用於有機化學品或鍍鉻設施設施)</li> </ul>
離子交換樹脂 (可用以移除帶電 PFAS)	PFOA：大於 99% <sup>註</sup> PFOS：90-99% <sup>註</sup> PFBA：大於 99% <sup>註</sup> PFBS：大於 99% <sup>註</sup> HFPO-DA：大於 99% <sup>註</sup> 6:2 FTSA：大於 99%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 可針對帶電 PFAS 進行客製化處理</li> <li>■ PFAS 選擇性樹脂成本較高，但針對特定 PFAS，去除率相對活性碳處理較高</li> <li>■ 交換速率取決於 PFAS 類型、進流濃度、樹脂性能和溶液離子強度</li> <li>■ 飽和樹脂需要再生或廢棄處理，單次使用型樹脂會有飽和吸附廢棄物問題；重複利用型樹脂無法無限制再生，且需考量高濃度 PFAS 濃縮廢液之問題</li> <li>■ 已有商用實績</li> </ul>
薄膜分離	PFOA：大於 99% <sup>註</sup> PFOS：大於 99% <sup>註</sup> PFBA：大於 99% <sup>註</sup> PFBS：大於 99% <sup>註</sup> HFPO-DA：大於 99% <sup>註</sup> 6:2 FTSA：大於 99% <sup>註</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 相較於傳統處理方法或吸附，其設置成本和能源需求較高</li> <li>■ 可有效去除水中大部分 PFAS</li> <li>■ 未經預處理易阻塞</li> <li>■ 高濃度 PFAS 濃縮廢液必須進一步處理</li> </ul>
泡沫分離	PFOA：大於 99% PFOS：大於 99% PFHxS：大於 99%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 適用於分子鏈較長、氣液相吸附比率較高的 PFAS</li> <li>■ 具消耗品用量少、適用水質變化範圍較大等優勢</li> <li>■ 具有現地模場應用案例</li> </ul>

處理技術	PFAS 去除效率	使用之考量因子
焚化、熱處理	PFAS 分解溫度介於 200~1,400°C(與化合物種類有關)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 可用於再生 GAC 等固體吸附劑，亦可同時破壞 PFAS，高溫分解碳氟鍵同時亦可能會破壞吸附劑</li> <li>■ PFAS 分解不完全時可能增加 PFAA 和前驅物濃度</li> </ul>
高級氧化、還原	去除率高達 99%	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 需要高能量或化學催化劑引發反應</li> <li>■ 藉由預處理，以產生高濃度之濃縮 PFAS，可降低能源消耗需求</li> <li>■ PFAS 分解不完全時可能增加 PFAAs 和前驅物濃度</li> </ul>

註：去除率係參考美國環保署 PFAS 之飲用水處理能力資料庫 (Drinking Water Treatability Database, DWTD) 報告數據。

## 六、結語

接軌國際管理動態，環境部已陸續將 PFOS、PFOA 等 PFAS 列為毒性化學物質進行管制；產業界目前刻正積極落實源頭自主性管理，以晶圓製造及半導體製造業為例，黃光與顯影製程所使用之光阻劑等陸續改用未含 PFOS 及 PFOA 之替代化學品；另國內紡織產業配合客戶要求亦已改用碳六 (PFHA) 等低氟化物或無氟化物 (PFC-free) 撥/撥水劑。事業透過逐漸減少含 PFOS 或 PFOA 化學藥劑之使用量或改用替代原物料等，降低廢 (污) 水全氟化合物之污染負荷。

美國環保署考量特定產業廢 (污) 水含較高濃度 PFAS，刻正進行其放流水標準檢討，環境部目前亦已針對國內產業進行水質調查分析，並持續配合國際管制趨勢，以及廠商自主管理成效，評估訂定廢 (污) 水管理管制規定之必要性<sup>[4]</sup>。事業廢 (污) 水全氟化合物濃度如有偏高之風險時，除前端源頭減量外，可進一步評估提升既有處理程序去除 PFAS 效能，增設國外已具有實績改善案例之活性碳或離子交換樹脂等單元，以降低廢 (污) 水全氟化合物；此外，產官學研單位亦刻正針對浮除、活化還原、可再生型吸附顆粒和中空纖維納濾膜等 PFAS 新興處理技術進行開發及驗證<sup>[23][24][25]</sup>，預期廢 (污) 水 PFAS 處理技術將成為未來污染改善重點項目，其技術推廣及應用有待環境保護相關從業人員努力，共同守護水環境品質。



## 七、參考文獻

- [1] 羅兆君，電子業放流水中全氟化物流布之研究，碩士論文，國立臺灣大學環境工程研究所，2008。
- [2] 環境部，產業廢水污染調查及管制措施研議計畫（第二年），2010。
- [3] 環境部，產業廢水污染管制與特性分析研議計畫，2017。
- [4] 環境部，112 年事業廢水特性調查及污染防治管理計畫，2023。
- [5] 環境部，事業廢水污染防治及標準管制成效評估計畫，2019。
- [6] Clara, M., Scharf, S., Weiss, S., Gans, O., Scheffknecht, C., Emissions of Perfluorinated Alkylated Substances ( PFAS ) from Point Sources - Identification of Relevant Branches, Water Science Technology, 58, 59-66, 2008.
- [7] Brigden, K., Labunska, I., Pearson, M., Santillo, D. & Johnston, P., Investigation of Hazardous Chemical Discharges from Two Textile-manufacturing Facilities in China, Greenpeace Research Laboratories Technical Note, 2011.
- [8] 環境部，事業廢水水質特性分析及管理評估計畫，2022。
- [9] USEPA, Multi-Industry Per- and Polyfluoroalkyl Substances ( PFAS ) Study - 2021 Preliminary Report, 2021。
- [10] Blepp, M., Willand, W., Umweltberatung, I. I., & Weber, R., Use of PFOS in Chromium Plating - Characterisation of closed-loop systems, Use of Alternative Substances, 2015.
- [11] des Bundesministeriums für Umwelt, Nationale Umsetzung des Stockholmer Übereinkommens zu Persistenten Organischen Schadstoffen ( POPs ) - PBDE und PFOS in Erzeugnissen und im Recyclingkreislauf, 2012.
- [12] 環境部，事業廢水特性調查及管制策略研析計畫，2020。
- [13] Perkola, N. & Sainio, P., Survey of Perfluorinated Alkyl Acids in Finnish Effluents, storm water, landfill leachate and sludge, Environmental Science and Pollution Research, 20, 7979-7987, 2013.

- [14] The Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy, Michigan's IPP PFAS Initiative, 2019.
- [15] ect2 網站，<https://www.ect2.com>，2024。
- [16] Interstate Technology and Regulatory Council 網站，<https://pfas-1.itrcweb.org>，2024。
- [17] 蔡宇庭，水體環境中全氟化合物之流佈與外加電場薄膜處理之研究，博士論文，臺灣大學環境工程學研究所，2011。
- [18] Hang, X. F., Chen, X. R. & Luo, J. Q., Removal and Recovery of Perfluorooctanoate from Wastewater by Nanofiltration, Separation and Purification Technology, 145, 120-129, 2015.
- [19] Burns, D. J., Stevenson, P., & Murphy, P. J. C., PFAS Removal from Groundwaters Using Surface-Active Foam Fractionation, Remediation Journal 1-15, 2021.
- [20] United States Environmental Protection Agency, PFAS Innovative Treatment Team. Research Brief on Potential PFAS Destruction Technology: Supercritical Water Oxidation, 2021.
- [21] Qu, Y., Zhang, C., Chen, P., Zhou, Q., Zhang, W.-X., Effect of Initial Solution pH on Photo Induced Reductive Decomposition of Perfluorooctanoic Acid, Chemosphere, 107, 218-2, 2014.
- [22] Bentel, M., Liu, Z., Yu, Y., Gao, J., Men, Y., Liu, J., Enhanced Degradation of Perfluorocarboxylic Acids (PFCAs) by UV/Sulfite Treatment: Reaction Mechanisms and System Efficiencies at pH 12, Environmental Science & Technology Letters, 2020.
- [23] 科技部，以浮除法回收廢水中的全氟化合物 (PFCs) -新收集劑及新浮除程序之開發 (計畫主持人臺北醫學大學公共衛生學系計畫胡景堯教授)，2019。
- [24] 環境部，以活化還原方式降解地下水中全氟辛酸及全氟辛烷磺酸之研究，2019。
- [25] 環境部，應用地下水抽出處理 (P&T) 系統搭配預濃縮以可再生型吸附顆粒 (RAP) 削減地下水中 PFAS，2024 (計畫執行中)。

# 計算流體力學於廢污水處理工程設施之應用

蔡任斌研究員、黃育德組長、許國恩技師

財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心

E-mail: [tjb@sinotech.org.tw](mailto:tjb@sinotech.org.tw)

[huangyd@sinotech.org.tw](mailto:huangyd@sinotech.org.tw)

[kuoenh@sinotech.org.tw](mailto:kuoenh@sinotech.org.tw)

## 一、前言

隨著我國廢污水處理技術持續提升，已從過去著重污染去除與保護河川水體，發展至水資源循環再利用為目標，而廢污水處理設施之設計與運營效率，直接影響到水資源再利用可行性。傳統的設計評估方法多依賴實驗模型和經驗公式，無法精準預測設施在實際運行中的表現細節。計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）的應用，為廢污水處理設施的設計與營運管理之優化提供了一種快速、低成本且可靠的新途徑。

CFD 係藉由軟體數值模擬方式，針對流體流動和傳輸過程進行預測分析及可視化處理。其適用範疇從流場分布、微粒分析，到化學反應等現象，皆可進行精確模擬，CFD 技術能夠幫助工程師在設計階段，透過預測設備性能，進而優化設計方案，提升廢污水處理效率；CFD 模擬亦可幫助既有設施之營運管理提升，提供優化操作模式模擬，有助於降低處理成本並提升效率。

本文旨在說明 CFD 之原理與功能，並探討在廢污水處理設施工程設計及營運優化之應用，以兩個實際污水處理單元為例，說明模擬應用成果與未來展望。

## 二、計算流體力學之理論基礎

### 2.1 模擬運算之原理

計算流體力學之理論核心為納維-斯托克斯方程式（Navier-Stokes Equations）之解析，此非線性偏微分方程組係基於質量、動能及能量守恆原則，可用於描述和預測特定條件下黏性或非黏性流體之運動，例如速度場、壓力場或溫度分布等，由於此方程組相當複雜，通常無法求得分析解，需藉由數值方法求得近似解。

相較於傳統的流體力學運算，CFD 將流體空間切分為無數網格，並對每一個網格進行迭代運算，以網格之尺寸為基礎，求得該流體空間中任一點的流體運動參數，前述過程通常分為以下步驟：

1. 幾何建模：定義流體流動空間範圍，包含流體本身和與其相關的幾何結構。對於 CFD 而言，建模的品質將直接影響網格及模擬結果準確性。
2. 網格生成：為進行數值模擬，需要將連續流體空間離散化，將其劃分為網格。網格之型態可為方形、四面體、立方體或多邊形，其形態取決於應用需求。
3. 建立物理模型：依據所界定的物理問題特性，選擇適當的物理模型（Model）來描述流體的流動和傳輸過程，例如紊流模型、熱傳遞模型、質量傳輸模型等。並設定適當的邊界條件（例如流體進出口的速度、壓力等）和初始條件。
4. 數值求解和分析：使用適當的數值方法（如有限差分法、有限體積法或有限元素法）來解析方程。
5. 結果後處理：對計算結果進行可視化處理，或依據需求進行數據處理及分析。

由於 CFD 係將流體空間切分為網格，藉上述步驟，CFD 能夠提供對流體流動及其相互作用細部資訊，從而為廢污水處理設施的設計和優化提供參考，從而做出更加精確之決策。

## 2.2 計算流體力學之發展歷程

CFD 之概念由 20 世紀中期開始推展，並在 1970 年代隨著電腦計算能力提升和數值方法技術之發展而迅速推升，直至 1980 到 1990 年代隨商用 CFD 軟體出現，使工程師和科學家更容易進行流體力學分析，並開始逐漸在工程領域普及，例如航太工業和汽車工業的氣動力性能等；至 2000 年後，隨電腦性能大幅提升，CFD 分析技術之適用規模及精細度顯著提升，並已可應用於多相流運動或化學反應，近年 CFD 研究領域則逐漸納入更大尺度的渦流模擬、精度更高的數值模擬等，甚至逐漸將機器學習和人工智能等導入，擴展 CFD 的應用範圍及使用門檻。CFD 技術的發展史與電腦技術之進步密切相關，如今 CFD 技術已經成為了眾多科學和工程領域不可或缺之部分。

### 三、計算流體力學模擬流程

#### 3.1 模擬流程

廢污水處理是 CFD 應用的重要領域之一，可以提供廢污水處理過程中流體流動和污染物傳輸的詳細資訊，例如提供優化反應池幾何形狀、提高沉澱池的去除效率、優化曝氣系統的設計等，CFD 模擬過程可分為四個步驟，說明如下：

1. 問題界定：首先明確定義模擬對象標的及相應所需資訊，基於此來建構合適之幾何結構及選擇定物理模型。
2. 前處理：藉由電腦繪圖軟體建置幾何模型，並由幾何模型分離出流體空間。透過網格繪製軟體，將模型離散化，細分為小塊元素（單一網格），網格數量越多，所需計算時間越長，但計算結果也會越精準。在幾何結構建立之過程，可藉由 CAD 或 SpaceClaim 等工程繪圖軟體製作，並應注意建模軟體與網格繪製軟體之相合性，例如 CAD 軟體所繪製之三維產品可能因接縫不相連，造成網格軟體無法讀取；另外由於欲模擬之對象為流體，可適度簡化不關聯之結構，如設施銘牌、螺絲等，以減少系統負擔。
3. 求解：透過 Fluent 等流體模擬軟體，將物理量、求解方程式、流體或其他項材料物理參數及邊界條件等數值寫入模型，並加以進行迭代運算。由於迭代運算容易產生放大效益，若少數網格品質不良，或模擬物理條件設定不良，可能導致計算結果無法收斂或偏離實際情形，此時須依情況修正建模、網格，或修正物理參數或選用模型，以達精確之結果。
4. 後處理：模擬結果在可接受範圍內時，便進行結果的後處理。利用專門的軟體如 CFD-Post，可以將流體運動視覺化，以二維或三維的形式展示流場情況，並顯示如壓力或流速分佈的相關資訊。

#### 3.2 網格生成之原則及品質評析

##### 3.2.1 網格之數量

CFD 之求解原則係將連續性的幾何結構（即流體空間）劃分為細小網格（Mesh、Cell 或 Grid 皆可稱之），再以每一個網格為單位逐格進行迭代運算，以求得整體幾何結構的流體力學參數。因此網格之數量、形狀及品質對於計算結果之精準性至為重要，網格越精密劃分可得到較精確的模擬結果，然實際上因每次計算時電腦需讀取所有網格數據，網格

數量越多將加重電腦硬體計算負荷，並使運算時間大幅增加，故實務上應綜合考量硬體資源、精準度需求後規劃對應的網格劃分目標，例如對於攪拌機扇葉的流場模擬，應對扇葉附近進行網格加密以提升模擬的精確度；對於遠離扇葉的區域，由於非屬敏感區域，可適度放寬網格大小以減少計算資源負荷。

### 3.2.2 網格之形狀

另一方面，網格形狀之選擇對於模擬結果準確性、計算成本等有重大影響，常見之網格形狀有四面體 (Tetrahedral)、六面體 (Hexahedral)、金字塔 (Pyramid) 及多面體網格等。一般而言四面體網格對複雜幾何形狀有最佳的靈活性，其於網格生成時效率較高，但因其幾何特性，若未妥善細化 (Refine)，容易導致數值擴散 (Numerical Diffusion) (Cliff et al., 2002)；六面體網格之結構規則，更不容易發生數值擴散現象，對於結構化程度較佳之幾何形狀有最佳的模擬效果，其模擬結果具較高的精準度，然生成時效率較低、耗時較多 (Hefny & Ooka, 2009)；由於不同形狀網格有不同之特性，有時涉及複雜模擬問題時會將其混用，金字塔網格常被用於四面體及六面體網格之交界區域，或各種形狀網格交接的區域，而多面體網格則不具特定的型態，為任意多邊形，具較高靈活性並可減少運算所需的網格數量，常被用於複雜的流場模擬中 (Chen, H., Zhou, X., Feng, Z., & Cao, S.-j. (2021).)。

### 3.2.3 網格之品質

此外，由於網格品質直接影響計算之收斂性，其判斷相當重要，常見之網格品質指標有長寬比 (Aspect Ratio)、歪斜率 (Skewness)、正交性 (Orthogonal Quality)、平滑度 (Smoothness) 及體積比 (Volume Ratio) 等，說明如下：

1. 長寬比 (Aspect Ratio)：長寬比係指單位網格中最長邊與最短邊之長度比。較高長寬比可能導致計算不穩定和數值誤差，特別是在解析細長之流場結構時。
2. 歪斜率 (Skewness)：歪斜率係衡量單位網格偏離理想形狀 (例如正六面體或正四面體) 程度之指標。歪斜率越高，網格單元形狀越不規則，這將影響求解品質。
3. 正交性 (Orthogonality)：正交性係衡量網格之間邊與邊之夾角，理想狀態下應接近 90 度。因此較低數值表示正交性較差，容易導致數值擴散，降低計算精度。



4. 平滑度 (Smoothness) : 平滑度係衡量單位網格大小之變化率。理想狀態下網格應平滑變化過渡，突變過大可能導致計算誤差。特別是在敏感度較高之地區，需要特別注意網格之平滑度 (如邊界層內部等)。
5. 體積比 (Volume Ratio) : 體積比係指相鄰單位網格體積比率。理想狀態下相鄰網格體積應該相對一致，避免大的體積差異。

### 3.3 計算方法與模型

考量實際情境下，計算流體力學涉及多種不同的幾何形式 (巨觀或微觀、邊壁特性等)、流體參數 (例如黏度、密度等) 及流態 (層流或紊流) 等，或模擬目的之差異，如是否考量多相流、熱傳導或反應流等，這些條件皆會影響所用之計算模型 (Models)。前述模型係基於對納維-斯托克斯方程不同程度之調適，或引入其他與模擬目的有關之方程式而達成，其目的係簡化計算的難易度及適應不同的模擬目的。

舉例來說，若流體之流態為層流，因速度場不隨時間變化，可藉由分析解解出；若為紊流，則幾乎不可能使用分析解解析納維-斯托克斯方程式，必須導入  $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$  或大渦模擬 (LES) 等近似模型，並求出數值解。又或著涉及固/液體、氣/液體或固/氣/液體等多相流之交互作用之模擬，需引入體積分率 (Volume Fraction) 概念、熱傳導模型則須將熱能納入考慮等。

藉由選擇合適的計算模型，可以有效地節省電腦計算資源，並提供準確的結果，此外由於需求解的問題通常較為複雜，實務上常需要結合多種模型，方能達成目的。

## 四、計算流體力學軟體之應用

本研究使用 Ansys 公司發布之商用 CFD 系列軟體，以 Fluent 作為求解軟體，針對環境工程領域常見之廢污水處理設施進行流體力學模擬，並將結果可視化後加以分析，包含氧化深渠流場分布之情形、進流流速變化對初沉池內部流場之影響等，以實際展示利用計算流體力學進行對現有廢污水處理設施之處理效能進行改進或提升新設設施之設計品質之案例，茲說明如後。

## 4.1 氧化深渠內部流場分布之情形

### 4.1.1 基本資訊與問題界定

本研究透過計算流體動力學 (CFD) 模擬，探討動力裝置對某水資源回收中心氧化深渠內部流場之影響。該氧化深渠的尺寸為長 79.4 公尺、寬 13.4 公尺，共有兩池，共用一進流口及分別設二流出口，依此參數建構該氧化深渠之三維結構模型及繪製網格，詳如圖 4.1-1 所示。該深渠在進流測渠道的中央段設計有一動力推進器，並在流道前後二側設有弧形整流中島，用以導引水流，確保氧化深渠之流體沿環型流道運動，本研究旨在通過模擬開啟動力裝置下之氧化深渠流速場分布進行分析，評估其池體設計之潛在改善建議，尤其是流速分布與死角區域的處理。

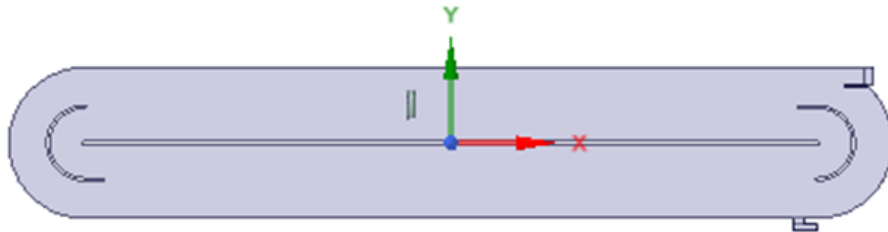


圖 4.1-1 氧化深渠建模示意圖

### 4.1.2 CFD 模擬使用參數

參考該水資中心提供之數據，動力推進器選用旋轉扇葉達加速流體之目的，故採用旋轉式網格，以扇葉之軸心旋轉，該扇葉輸出之功率為 4.6 kW、轉速為 32 rpm，及槳葉直徑為 2.5 m。另該流道設計平均進流量為每日 4,600 CMD，約相當於 0.05 m/s 的流速，由於本研究係探討流速分布，選用黏度模型進行模擬。

由於本研究之雷諾數 (Reynold Number) 遠大於  $10^5$ ，故採用 k-epsilon 紊流模型來模擬流場細節。k-epsilon 紊流模型係通過對紊流動能 (Turbulent Kinetic Energy,  $k$ ) 及紊流動能耗散率 (Dissipation,  $\epsilon$ ) 之求解，來求得流場變化情形。其中紊流動能係指單位質量流體中渦流運動動能，為衡量紊流強度之參數；而紊流動能耗散率則係指單位時間內單位質量流體中紊流動能轉化為熱能之速率，即紊流能量耗散程度，係描述紊流衰減速率之關鍵參數，此模型對於高雷諾數之管道流、反應器內部流動頗為適用，故本研究選用之。

### 4.1.3 CFD 模擬結果

追蹤氧化深渠內自進流口流入之流線（共 5 條），如圖 4.1-2 所示，可知未開啟動力源之情境，渠中流速接近靜滯，且內圈中央隔板附近流線密度極低，說明此處流速極低，而開啟動力源後流速由動力裝置驅動，且其附近流速可達 0.43 m/s，顯見動力源有效提升氧化深渠中的流體流速，然中央隔板附近流線密度仍低，說明此配置下動力源仍未能將流速有效分散至氧化深渠內圈。此外由池面向下 0m、1 m、3 m 及 5 m 等不同深度下氧化深渠中 xy 截面之流速等高線圖（如圖 4.1-3 所示）可知，在中央隔板兩側之流速始終接近 0 m/s，再次說明動力源未能將流體有效分散至中央隔板附近，由於中央隔板及整流中島具有邊壁效應，推測可能係導致流速遲滯之原因。

由此可知，儘管開啟動力源後確實可驅動氧化深渠的流體運動，且整流中島確實有效將流體沿環型渠道引導，卻反而在中央隔板附近產生一流速較低之死角，可能使物質沉降阻滯，進而造成氧化深渠局部缺氧狀態，並影響停留時間，使氧化渠處理效率偏離原設計值。

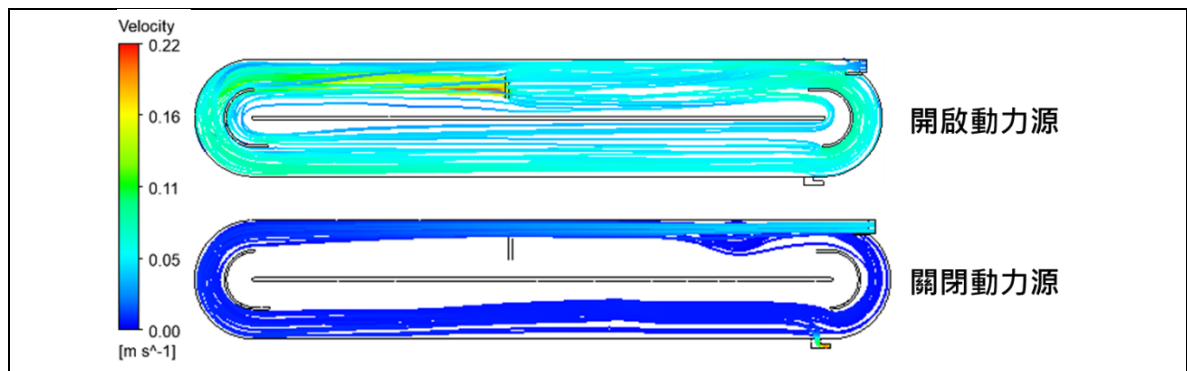


圖 4.1-2 氧化深渠流線運動俯視圖

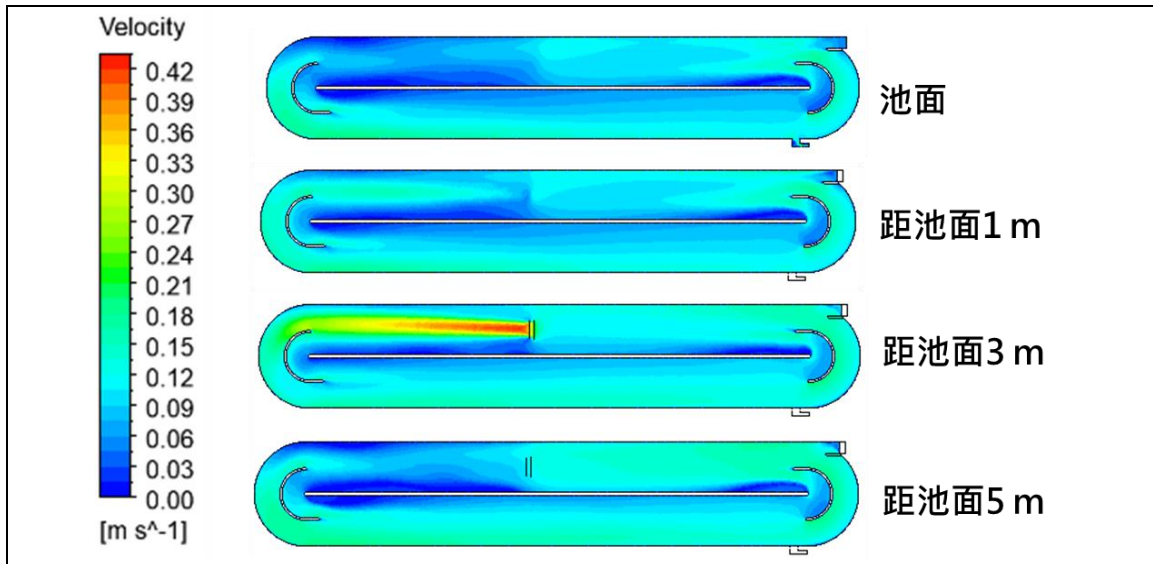


圖 4.1-3 氧化深渠 xy 截面之流速等高線圖

## 4.2 初沉池內部流場模擬

### 4.2.1 基本資訊與問題界定

本研究透過計算流體動力學 (CFD) 模擬，探討不同進流量對初級沉澱池流速場之影響。該沉澱池採平流式設計，並採用國內常見之長方形結構，其長寬分別為 31 公尺及 6.5 公尺，並具有斜面池底及刮泥板，可使水中異狀物隨重力沉降，並沿底面往污泥收集槽流動，本研究旨在評估不同流量下，沉澱池中流速場及流線分布之變化，以作為最佳操作參數之考量參據。

### 4.2.2 CFD 模擬使用參數

本研究基於初沉池之設計圖建立其三維模型，並考量溢流堰鋸齒狀堰體之幾何結構較為複雜，及其幾何尺寸遠小於初沉池整體尺寸，爰將其結構予以簡化 (去除三角堰體結構，如圖 4.2-1)，並建立較細化之網格，並選用四面體網格，初沉池整體網格大小介於 3 cm 至 6 cm，於溢流堰附近則細化至 1 cm。

由於本研究係探討流速分布，選用黏度模型 (viscous model)，並採用 k-epsilon 紊流模型對流體之運動進行模擬。另一方面，模擬過程考慮三種不同的進流水流速：高流速 (0.572 m/s)、中流速 (0.286 m/s) 及低流速 (0.143 m/s)，並追蹤自單一進流口截面發出之流線，以評估初沉池內流速場局部變化情形。其中中流速為設計流速，高流速取 2 倍設計流速、低流速則取 2 分之 1 倍設計流速進行模擬。

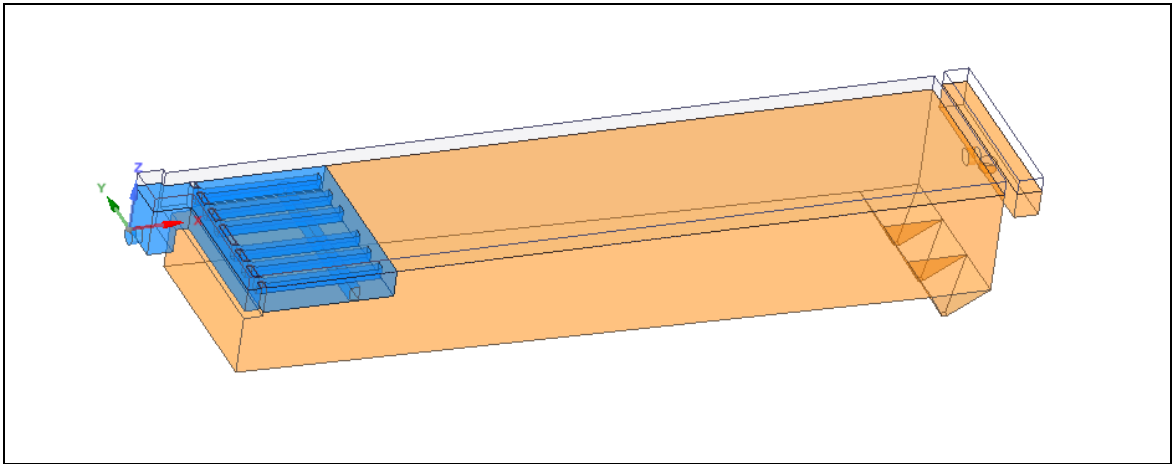


圖 4.2-1 初沉池建模示意圖

### 4.2.3 研究結果

在高、中及低進流速條件下初沉池中流線運動情形如圖 4.2-2 如圖 4.2-3 所示，可知在流體自進水口進入初沉池並接觸溢流堰後，於水體表面形成數道逆流，並以高流速之情形更為明顯，這可能增加初沉池中水體的擾動情形；另一方面，高流速情境下流線進入溢流堰附近區域後，因流速突降而產生明顯擾動，並發生一經過池底之逆流，這可能導致池底沉澱污泥被攪起，而影響沉澱效果及後續的生物處理效率。

比對沉澱池理論模型，相同進流截面積下，流量與流速成正比，流量增加將使沉澱池表面溢流率隨之上升，降低沉澱效率。藉由計算流體力學模擬可知，高流量下流體空間中產生流經池底之流線分布，可能使沉降顆粒揚起，降低沉澱效率，符合理論模型之預測。

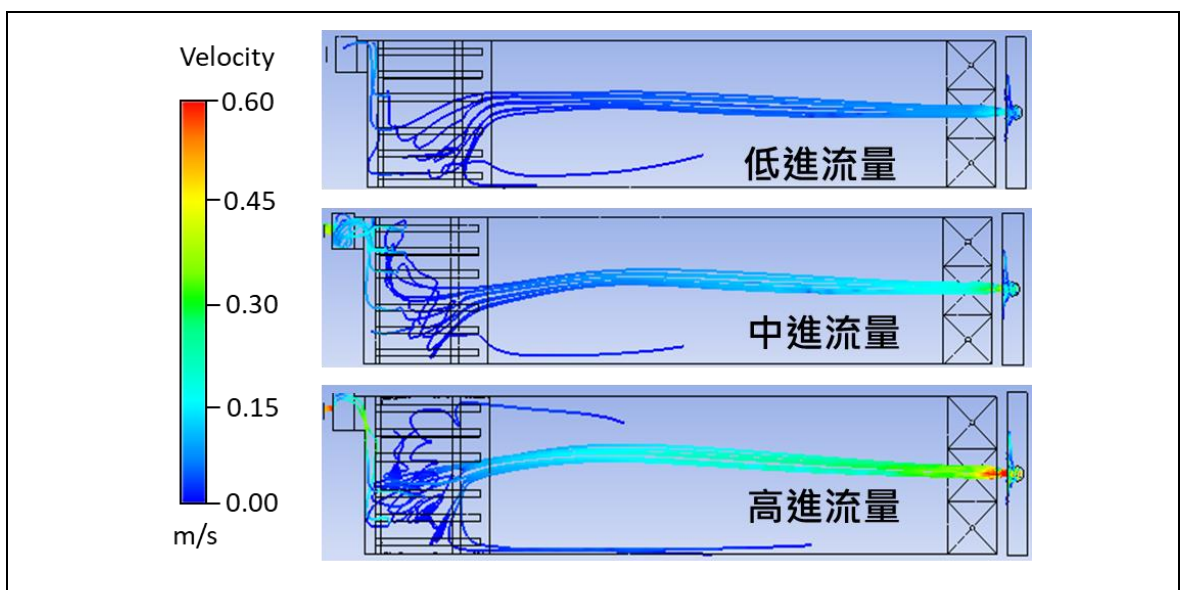


圖 4.2-2 初沉池流線運動俯視圖表單的頂端



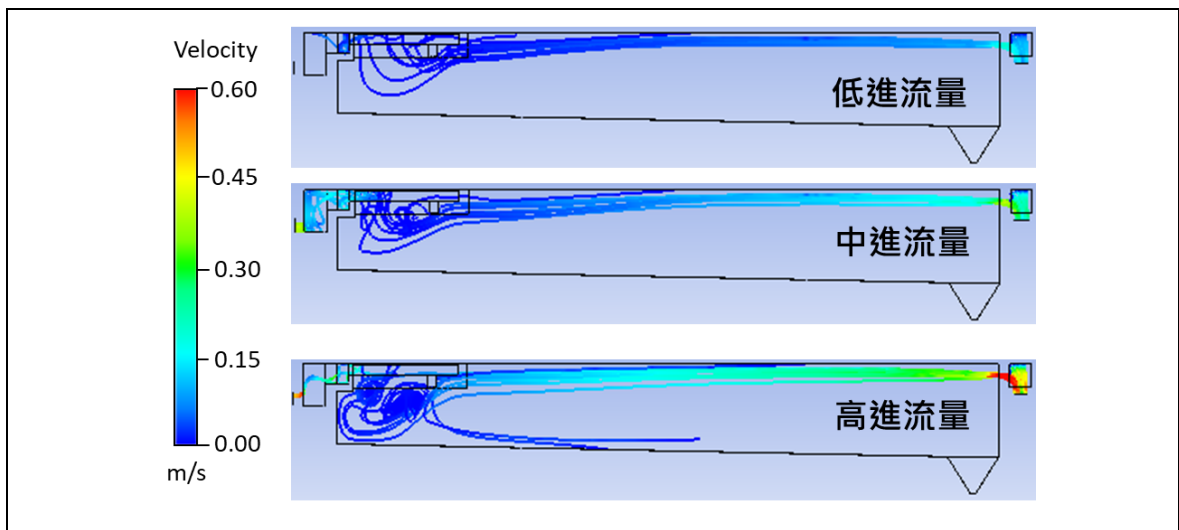


圖 4.2-3 初沉池流線運動側視圖

## 五、CFD 工具的現代應用與優勢

經數十年之發展，CFD 工具借助現代電腦之強大算力，結合流體力學及其他相關物理及化學相關方程式，成為一種強大的模擬工具，具有許多顯著的優勢，已大量應用於學術界、商業界及工程界等各種領域，例如對於實驗流體力學運動而言，由於存在動態相似性不成立的問題，常無法利用縮小模場尺度來達成成本節約，造成設計驗證上的困難性；而藉由 CFD 可在不需實際建造原型情況下進行流體力學分析，大幅節約驗證設計之成本及所需時間，例如對於污水處理廠之各種水利單元，如沉砂池、沉澱池等，藉由 CFD 運算可在設計圖面階段預測設計結構之流場分布，進而評析設計結構之成效，減少設計不良之可能性。

另一方面，藉由 CFD 模擬，工程師可以在工程設計階段即評估優化產品性能，減少設施運轉後工程改善或修正的可能及次數，並大幅加速產品設計之升級迭代；此外 CFD 軟體可導入各種物化模型，達成模擬成果加值之效果，舉例而言，藉由導入多相流、化學反應模型等，更可模擬沉沙池等砂粒於流廠中運動反應、曝氣池中污泥膠羽及氣體之運動情形等；又或導入多相流模型以模擬微觀結構下薄膜之流體運動及壓力變化等，大幅提升工程師對污水處理單元設計品質之掌握及設計之考慮面向。此外，藉著模擬營運中設施之操作參數調整，可在不影響運作現況之前提下了解操作管理方式調整之後之各項流體力學參數，例如在既有污水處理單元運作之前提下，模擬提高污水負荷之情況，作為未來接管率上升後污水處理廠操作方式調整之依據。

## 六、CFD 模擬在工程設計中的挑戰與前景

CFD 之計算係針對大量網格進行大量迭代運算之過程，需消耗大量計算資源，包含對內存空間及中央處理器 (Central Processing Unit, CPU) 之要求，對於愈趨複雜精細的環境工程單元設計或操作管理之模擬，往往需要更加高性能的電腦及大量儲存空間，墊高模擬所需的資本投入；又由於建立合適的幾何建模及模型修整、建立高品質的網格、選用合適物理模型及參數，或對模擬結果的分析解讀，皆需要豐富之流體力學和其他物理化學領域專業知識及大量經驗，因此對專業人才有高度要求，亦將推升執行有效的 CFD 模擬所需成本。

然而對於大規模、高資本投入之工程設計，使用 CFD 事先驗證設計專案之可行性仍具有顯著效益，航空太空工程、大型水利工程等領域皆已大量應用此技術，而在環境工程領域亦已逐漸可見此類技術之投入，可預期將來此類技術或逐漸成為工程設計之必需基礎，值得各界持續投入以便應對日益複雜的模擬需求。展望未來，隨著技術持續進步與創新，及電腦效能持續進步，期許將 CFD 更廣泛地應用於解決環境與能源問題，帶動社會之永續發展與進步。

## 七、參考文獻

- [1] Cliff, S., Thomas, S. D., Baker, T., & Jameson, A. (2002). Aerodynamic shape optimization using unstructured grid methods.
- [2] Hefny, M. M., & Ooka, R. (2009). CFD analysis of pollutant dispersion around buildings: Effect of cell geometry. *Building and Environment*, 44(6), 1699-1706.
- [3] Chen, H., Zhou, X., Feng, Z., & Cao, S.-j. (2021). Application of Polyhedral Meshing Strategy in Indoor Environment Simulation: Model Accuracy and Computing Time. *Indoor and Built Environment*, 31(3), 719-731.
- [4] 許國恩、蔡任斌、黃育德，2023，計算流體力學（CFD）於廢污水處理設施工程設計之應用，財團法人中興工程顧問社成果報告書。
- [5] 內政部營建署，2019，106-107 年度全國公共污水處理廠營運評鑑及碳排放調查計畫結案報告書。

## 徵稿啟事

- 一、本會會訊提供會員及專家學者發表環境領域新知、技術與專業經驗等。
- 二、專題稿件以環境相關理論與實務、環境法規、環境保護理念之論述為原則，採技術報導或論文等撰寫形式皆可，文長以 8000 字以內為原則，所附圖表或照片應清晰，稿件禁止以公司集體智慧，有著作權、業主版權疑問或抄襲複製等情事，以免觸法。
- 三、會訊以雙月刊週期出版，出版日期為奇數月 10 日，投稿稿件須於出版日之 15 日以前，以電子檔案寄(送)抵公會。
- 四、專題稿件稿酬之文字單價為每字新台幣 2 元，原創照片與圖表單價為每幀新台幣 500 元，每篇稿酬以新台幣 12,000 元為上限；特殊專文之稿酬另案處理。
- 五、本會負有以下權利與義務：(一)專題稿件之審閱。(二)提供審閱意見請撰稿者修改或回覆。(三)決定專題稿件刊登與否。專題稿件之審閱及審閱意見之提供，必要時得請相關專長之專家學者擔任。
- 六、會訊為專業交流之發佈管道。具名撰稿者刊登之稿件內容，不代表本會的意見或立場。具名撰稿者應遵守智慧財產權等相關法令，以及無條件負擔因其稿件內容刊登所衍生之責任。

各公會會員大會、理監事會會議紀錄

中華民國環境工程技師公會全國聯合會

無

台灣省環境工程技師公會

無