



國立臺灣大學工學院環境工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

當前聯合國、歐盟及美國對全氟與多氟烷基物質之
管理策略與執行

Current Management Strategies/Practices for Per- and
Polyfluoroalkyl Substances — the United Nations,
the European Union, and the United States

何姿萱

Tzu-Hsuan Ho

指導教授：駱尚廉 博士

Advisor: Shang-Lien Lo, Ph.D.

中華民國 112 年 8 月

August, 2023

致謝

感謝駱尚廉老師給予我機會參與行政院環境保護署毒物及化學物質局的國家化學物質管理推動量能提升計畫，工作雖然繁重，但獲益良多，老師總是提點我的缺點，並從旁予以協助，我才能以此完成我的碩士論文。感謝口試委員郭繼汾博士和李育輯博士以淵博的知識針對我的碩士論文提供寶貴建議，讓我的碩士論文更臻於完整。

感謝實驗室的林維鴻學長指導並協助我一同完成為期兩年的化學局計畫，學長總是豪不避諱地指出我的錯誤，並很有耐心地解答我的疑惑。感謝財團法人環境與發展基金會的蔡人傑博士和李宜亭學姐，以及毒物及化學物質局的劉怡焜組長和林宏達科長，您們在工作上總是不吝給我鼓勵，能夠和各位厲害的先進們一起工作我感到非常榮幸。

感謝曾子維同學和蔡涵涵同學日常的關心和陪伴，你們是我在研究所最美好的回憶。感謝嘍仔、Thinn、Q仔、芸仔及阿縵，你們是我生命裡的小太陽。感謝我的家人支持我念完研究所，你們的愛是支撐我前行的動力。

何姿萱 謹誌

2023年 癸卯年夏


中文摘要



全氟與多氟烷基物質 (Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS) 為一族種類繁多的人造化學品，從 20 世紀初被合成以來，被作為防污、防油及界面活性劑，廣泛應用在用在工業與商業之中。直到 2000 年，美國主要的 PFAS 製造商 3M 公司 (Minnesota Mining and Manufacturing Company) 與美國環境保護署 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 達成協議，承諾將淘汰全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctanesulfonic acid, PFOS) 的製造和使用。以 3M 的自我管制 (Self-regulatory) 聲明為契機，國際對 PFAS 的污染問題日趨重視，斯德哥爾摩公約於 2009 年將 PFOS、其鹽類及全氟辛烷磺酰氟 (Perfluorooctane sulfonyl fluoride, PFOSF) 納入附件 B 列管，UNEP 成立的國際化學物質管理策略方針 (The Strategic Approach to International Chemical management, SAICM) 亦隨後將 PFAS 列為新興政策議題 (Emerging Policy Issue, EPI)，建議各國應優先採取行動應對 PFAS 的污染問題。

SAICM 最初成立的宗旨，係為健全管理化學品的整個生命週期，在 2020 年以前，最大程度地減少化學品的使用和生產對人類健康與環境之重大不良影響。遺憾的是，於 2019 年發表全球化學品展望第二版 (Global Chemicals Outlook II, GCO II) 報告指出，各國無法如期實現 2020 年以前將化學品與廢棄物的不良影響最大程度地減少之目標，於是 SACIM 在同年制定 2020 年以後的化學品與廢棄物之健全管理策略。為持續解決 EPI，UNEP 於 2020 年發布關注議題的評估報告，認為在 PFAS 的管理上，應加速淘汰斯德哥爾摩公約所規範的 PFAS；定期評估管理方法和現況，以達到淘汰長鏈 PFAS 之目的；以及促進定期之訊息交流，對未列入斯德哥爾摩公約的 PFAS 加速採取行動，以期過渡至更安全的替代品。

歐盟於 2019 年底提出綠色新政 (European Green Deal)，最終目標是在 2050 年以前達到氣候中和 (Climate neutral)，為促成計畫，並於無毒環境 (Toxic-free environment) 的願景下推動化學品永續發展策略 (Chemicals strategy for



sustainability, CSS), 該策略將 PFAS 作為優先關注的化學品, 以此展開各種行動, 例如於 2022 年提議修訂化學物質和混合物分類、標示與包裝 (Classification, labelling and packaging of chemicals, CLP) 規章, 並預告下一步的行動將會修訂化學品註冊、評估、許可和限制 (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH) 法規, 顯示歐盟以更系統化的方式管理 PFAS 之企圖心。

美國為應對 PFAS 污染最具經驗的國家之一, USEPA 於 2021 年發布之 PFAS 策略路線圖: 環保署自 2021 年至 2024 年的行動承諾 (PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021—2024), 以研究、嚴格及整治作為中心指引, 輔以 PFAS 的生命週期管理、源頭管理、追究污染責任、彌補技術與資訊缺口, 以及保護弱勢族群等五大原則, 執行為期三年的 PFAS 管理策略。

我國缺乏足夠的天然資源, 仰賴貿易出口賺取貿易順差, 因此必須時刻注意國際化學品管理的法規趨勢, 加之積體電路 (Integrated Circuit, IC) 為我國出口貿易額比重最大的貨品類別, 半導體製程迄今仍缺乏非氟化替代品, 故此我國有必要關注國際的 PFAS 管理策略趨勢。本研究將使用文獻整理的方式, 回顧 PFAS 的定義、分類、物化性質、暴露及對人類健康的危害, 再來蒐集並整理聯合國、歐盟及美國 2020 年以後對 PFAS 的管理策略趨勢, 接著分析聯合國、歐盟及美國管理 PFAS 所面臨的挑戰, 在取其精華, 去其糟粕之後, 參考 SAICM beyond 2020 制定的化學品與廢棄物管理的策略目標, 提出我國 PFAS 管理策略的初步建議。


關鍵字：全氟與多氟烷基物質、化學品管理、國際化學物質管理策略方針、持久性有機污染物、斯德哥爾摩公約。

Abstract



Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS), as a diverse family of synthetic chemicals, have been widely used in industries and commercial applications since their synthesis in the early 20th century for their anti-stain, anti-oil, and persistent properties. In 2000, the major PFAS manufacturer, Minnesota Mining and Manufacturing Company (3M Company), reached an agreement with the United States Environmental Protection Agency (USEPA) to phase out the production and use of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS). This agreement, along with 3M's self-regulatory statement, led to increased global attention to PFAS pollution. In 2009, PFOS, its salts, and perfluorooctane sulfonyl fluoride (PFOSE) were listed under Annex B of the Stockholm Convention. The Strategic Approach to International Chemical Management (SAICM), established by the United Nations Environment Programme (UNEP), subsequently categorized PFAS as an Emerging Policy Issue (EPI) and recommended countries to prioritize actions to address PFAS contamination.

The initial purpose of SAICM was to ensure sound management of chemicals throughout their life cycle and minimize the significant adverse effects of chemicals on human health and the environment by 2020. However, the Global Chemicals Outlook II (GCO II) report published in 2019 indicated that countries were unable to achieve the goal of minimizing the adverse impacts of chemicals and waste by 2020. Therefore,



SACIM developed a sound management strategy for chemicals and waste after 2020. In 2020, UNEP released an assessment report on PFAS as a focus issue, suggesting the accelerated phase-out of PFAS regulated by the Stockholm Convention, regular evaluation of management methods and status, and promotion of regular information exchange to expedite action on PFAS not covered by the convention, with the aim of transitioning to safer alternatives.

In late 2019, the European Union (EU) introduced the European Green Deal, with the ultimate goal of achieving climate neutrality by 2050 and promoting a toxic-free environment. As part of this vision, the EU initiated the Chemicals Strategy for Sustainability (CSS) and identified PFAS as a priority chemical. Various actions have been taken, such as proposing revisions to the Classification, Labelling, and Packaging of Chemicals (CLP) regulation in 2022 and announcing future steps to revise the Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals (REACH) regulation. These initiatives demonstrate the EU's systematic approach to managing PFAS.

As one of the countries with extensive experience in addressing PFAS contamination, USEPA released the PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021—2024 in 2021. The PFAS strategic roadmap focuses on research, restrict, and remediate, supported by five principles: Consider the lifecycle of pfas, get upstream of the problem,

hold polluters accountable, ensure science-based decision-making and prioritize protection of disadvantaged communities.



Due to a lack of natural resources and reliance on trade exports to generate trade surpluses, Taiwan must constantly pay attention to the regulatory trends in international chemical management. Additionally, since integrated circuits (ICs) are the largest category of goods in terms of export trade, and the semiconductor process still lacks non-fluorinated alternatives, it is necessary for Taiwan to be aware of international trends in PFAS management strategies. This study will review the definition, classification, physicochemical properties, exposure, and health hazards of PFAS through literature review. It will then gather and organize the management strategy trends of the United Nations, the European Union, and the United States regarding PFAS after 2020. By analyzing the challenges faced by the research subjects and learning experience from them, this study will provide preliminary suggestions for Taiwan's PFAS management strategy, taking into consideration the goals set forth in SAICM beyond 2020.

Keywords: Per- and Polyfluoroalkyl Substances, Chemical Management, Strategic Approach to International Chemical Management, Persistent Organic Pollutants, Stockholm Convention

目錄



致謝.....	i
中文摘要.....	ii
Abstract	iv
圖目錄.....	ix
表目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究範圍與目的.....	5
第二章 PFAS 的文獻回顧	7
2.1 PFAS 的定義與分類	7
2.2 PFAS 的物理與化學性質	11
2.3 PFAS 的用途與暴露	11
2.4 PFAS 對人類健康的影響	14
2.5 PFAS 的管理策略與淨零排放之關聯性.....	15
第三章 聯合國的 PFAS 管理策略趨勢	18
3.1 斯德哥爾摩公約.....	18
3.2 關注議題的評估報告.....	20
3.3 SAICM beyond 2020.....	22
第四章 歐盟的 PFAS 管理策略趨勢	26
4.1 綠色新政.....	26
4.2 提案修訂 CLP 規章.....	27
4.3 提案限制在消防泡沫中使用任何 PFAS.....	29
4.4 提案限制在消防泡沫以外的所有用途中使用任何 PFAS.....	30
4.5 在食品中污染物質之最大限量中增修 PFAS 標準.....	31

4.6 在飲用水指令中增修 PFAS 標準.....	32
第五章 美國的 PFAS 管理策略趨勢	33
5.1 2020 財政年度國防授權法	33
5.2 PFAS 策略路線圖	35
第六章 結果與討論.....	52
6.1 綜合比較聯合國、歐盟及美國對 PFAS 的管理作為.....	52
6.2 綜合比較聯合國、歐盟及美國在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之挑戰.....	53
6.3 初步建議我國的 PFAS 管理策略.....	56
第七章 結論與建議.....	60
7.1 結論.....	60
7.2 建議.....	62
參考文獻－中文部分.....	64
參考文獻－外文部分.....	65



圖目錄

圖 1、杜邦公司、華盛頓市、帕克斯堡市及俄亥俄河的相對位置圖	2
圖 2、PFAS 定義的範圍由寬鬆至嚴謹、涵蓋種類由多至少之示意圖	8
圖 3、PFAS 的分類架構圖	10
圖 4、PFOA 的化學結構圖	11
圖 5、PFAS 在國際上優先關注的應用領域與主要考量之示意圖	13
圖 6、淨零排放之國際發展趨勢圖	16
圖 7、REACH 法規和 CLP 規章的關係示意圖	27
圖 8、USEPA 在 PFAS 策略路線圖中的組織架構與職責分工圖	38
圖 9、PFAS 國家資料庫涵蓋的數據來源與可能的資料缺口之示意圖	51



表目錄

表 1、PFAS 暴露對健康的影響.....	15
表 2、斯德哥爾摩公約各個附件的列管數目、列管標準及締約方義務.....	18
表 3、斯德哥爾摩公約列管之 PFAS.....	19
表 4、SAICM beyond 2020 管理化學品與廢棄物之策略目標和具體子目標.....	23
表 5、CLP 規章新增的危險類別、代碼和危害說明.....	28
表 6、含 PFAS 消防泡沫之限制提案的緩衝期與對應用途.....	29
表 7、歐盟針對食品中四種 PFAS 設定的最大限量.....	31
表 8、歐盟飲用水指令對總 PFAS 定義的 20 種 PFAS.....	32
表 9、USEPA 總部組織負責之環境法.....	36
表 10、USEPA 各辦公室在 PFAS 策略路線圖的行動計畫彙整表.....	46
表 11、綜合比較聯合國、歐盟及美國對 PFAS 的管理作為.....	53

第一章 緒論



1.1 研究背景與動機

化學品在人類文明的發展上扮演極其重要的角色，工業革命以前，前人已知曉利用氯化鈉來防腐、在油脂中加入鹼液來製造用於清潔的肥皂 [9]，以及使用硝酸和硫磺來生產炸藥 [10]，自 18 世紀工業革命以後，人類對化學品的需求與日俱增，從用於印刷和紡織業的化學染料、促進農作物生產的化學肥料到提升公共衛生的藥物，化學製品遍及日常的方方面面，吾等不僅得以維持更高的生活品質，平均壽命也因此大幅提升；在全球人口快速地增長下，為追求更大的福祉，化學品與人類文明的發展愈加密不可分。然而，如同文學巨擘瑞秋卡森 (Rachel Carson) 在寂靜的春天 (Silent Spring) 中提及的一般，不當使用缺乏評估之化學品，其附帶的後果可能遠遠超乎預期 [11]。化學品妥善管理的重要性不只侷限於整治受污染的場址所負擔的成本或對受害者進行的賠償，而是當具有持久特性的化學品暴露在環境時，需要花費數十年甚至上百年才能從環境中完全去除，可謂之覆水難收。

全氟與多氟烷基物質 (Per- and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS) 便屬於此類持久性化學品，聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 早在 1938 年便由美國杜邦公司 (E. I. du Pont de Nemours and Company) 的科學家首次合成，最初的應用是在曼哈頓計畫下用來分離六氟化鈾 (Uranium hexafluoride) 的同位素 [12]，但科學家逐漸意識到 PFAS 的穩定性、疏水性及抗油性賦予其多種可能之工業用途 [13]，美國 3M 公司 (Minnesota Mining and Manufacturing Company) 隨後於 1950 年代開始使用電化學氟化 (Electrochemical fluorination, ECF) 方法製造全氟辛酸 (Perfluorooctanoic acid, PFOA) 與全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctanesulfonic acid, PFOS) [14]，爾後杜邦公司向 3M 公司購買 PFOA 用以製造 PTFE 等氟化聚合物 [15]，並於 1946 年將 PTFE 註冊為鐵氟龍 (Teflon) 以進行商業化 [13]。鐵氟龍作為 PFAS 最標誌性的化學品之一，其熟為人知的用途係用於炊具的塗層，使用鐵氟龍製造的不沾鍋烹飪時，比傳統炊具更不容易黏著在表層，便於清潔，因此為杜邦公司

帶來可觀的收益。至此以後，無數的 PFAS 被陸續研發出來，廣泛地運用在工業與商業之中。

大部分的人為化學品污染就像肝癌患者一樣，病灶孳生的前數十年看似相安無事，直至死亡悄然而致；在當地居民意識到土壤、空氣及飲用水受到污染前，已然身受其害。杜邦公司於 1951 年起，在西維吉尼亞州伍德郡之華盛頓市毗鄰俄亥俄河處，使用 PFOA 製造氟化聚合物，並在數十年間掩埋數百噸的 PFOA 廢棄物；PFOA 的釋放更受到工廠區域的主要風向影響，隨著長年吹拂的南風與西南風 [16]，污染從俄亥俄河往下游之帕克斯堡市蔓延，導致當地居民嚴重的 PFOA 暴露，如圖 1 所示。

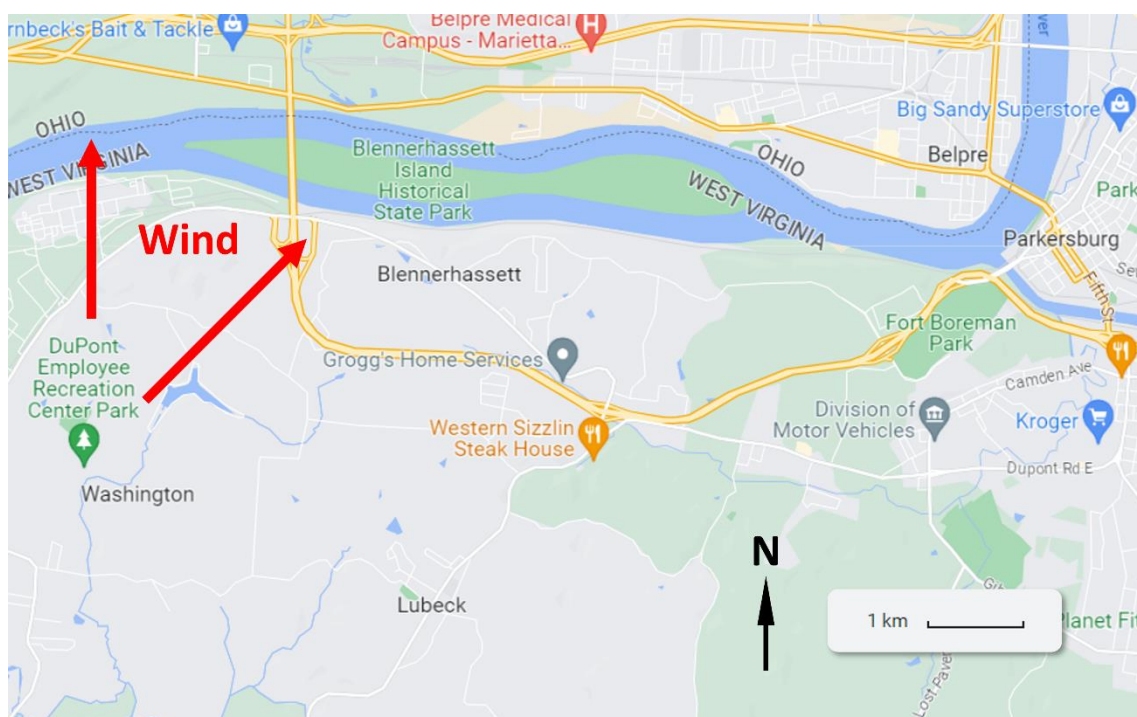
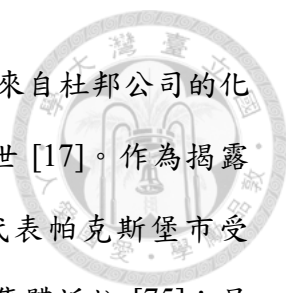


圖 1、杜邦公司、華盛頓市、帕克斯堡市及俄亥俄河的相對位置圖


(Source: Google map)

數十年後，帕克斯堡市的一名農夫終於意識到他飼養的牛隻陸續死亡，很可能肇因於俄亥俄河上游杜邦公司的污染，因而於 1999 年雇請律師羅伯比爾特



(Robert Bilott) 對杜邦公司提起個人訴訟；但此舉無法及時遏止來自杜邦公司的化學污染，在長時間的 PFOA 暴露下，該農夫幾年後便罹癌去世 [17]。作為揭露 PFAS 危害性的吹哨人，羅伯比爾特律師進一步於 2001 年代表帕克斯堡市受 PFOA 污染的飲用水影響之七萬名當地居民，對杜邦公司提起集體訴訟 [75]；另一方面，3M 公司支助對 PFAS 暴露的研究結果顯示，人類與野生動物體內普遍存在 PFOS，3M 公司最終於 2000 年與美國環境保護署 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 達成協議，承諾將淘汰 PFOS 的製造和使用 [76]。以 3M 公司的自我管制 (Self-regulatory) 聲明為契機，經濟合作暨發展組織 (Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD) 對 PFOS 展開一系列的評估，於 2002 年發布初步的危害評估指出 [18]，PFOS 在環境中與哺乳動物體內具持久性；歐盟同意 OECD 的結論 [19]，認定 PFOS 為具持久性、生物累積性及毒性 (Persistent, bio-accumulative and toxic, PBT) 的物質，並符合斯德哥爾摩公約 (The Stockholm Convention) 對於持久性有機污染物 (Persistent organic pollutants, POPs) 的定義，經過進一步的風險評估後，於 2006 年要求成員國應立法限制 PFOS 的使用。

彼時，PFAS 的污染問題恰巧趕上化學品管理的風口浪尖，聯合國環境規畫署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 協同世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 於同年舉行第一屆國際化學品管理大會 (International Conference on Chemicals Management, ICCM)，簽署通過國際化學物質管理策略方針 (The Strategic Approach to International Chemical management, SAICM)，初步目標為在 2020 年以前將化學物質的生產、使用和處置對環境造成的不利影響降至最低 [20]。SAICM 成立的初衷之一，起因於許多發展中的國家缺乏化學物質管理的能力，儘管 UNEP 自 1976 年成立以來，已領導各國在化學品管理的策略上採取諸多作為，但全球的空氣、水及土壤仍飽受化學危害，污染曠日彌久，故此各國更須合作互助，建立一致性的化學物質管理策略方針 [21]。2009 年是 PFAS 污染問



題備受關注的一年，斯德哥爾摩公約有鑒於 POPs 之慢性毒性與生物累積性，於 5 月上旬將 PFOS、其鹽類及全氟辛烷磺醯氟 (Perfluorooctane sulfonyl fluoride, PFOSF) 納入附件 B 列管 [22]，於 5 月下旬召開的第二屆國際化學品管理大會，旋即通過全氟碳化物並過渡至更安全的替代品 (Perfluorinated chemicals and the transition to safer alternatives) 之管理決議，SAICM 將 PFAS 列為新興政策議題 (Emerging Policy Issue, EPI) [77]。隨著國際逐漸意識到 PFAS 對人類健康與環境造成之危害，對 PFAS 的危害研究與風險評估如雨後春筍，各國也陸續採取行動應對 PFAS 污染問題。

我國缺乏足夠的天然資源，仰賴貿易出口賺取貿易順差，因此必須時刻注意國際化學品管理的法規趨勢，加之缺乏相應的化學品管理量能，無法一一針對所有化學品進行國家級的健康風險評估，所以即時掌握先進國家的化學品管理進度，不但能夠節省管理量能、防止商品因為不合法規而導致出口重挫，也能避免違反世界貿易組織 (World Trade Organization, WTO) 在技術性貿易障礙 (Technical Barriers to Trade, TBT) 的協定 [23]。根據經濟部國際貿易局統計自 2020 年 1 月至 2023 年 4 月的出口貿易資料，積體電路 (Integrated Circuit, IC) 為出口貿易額比重最大的貨品類別，佔出口貿易總額的 36.6% [5]，足見半導體製程對我國出口貿易的重要性；然而半導體製程迄今仍缺乏非氟化替代品 [24]，故我國有必要關注國際的 PFAS 管理策略，以制定並採取因應作為。



1.2 研究範圍與目的

他山之石，可以為錯。當前先進國家的 PFAS 管理策略大多都是先對 PFAS 展開暴露評估與健康風險評估後，繼而採取相應的風險管理措施，例如制定各個環境介質的 PFAS 健康準則含量 (Health-Based Guidance Value) 與法規限值、整治已受污染的場址以及研發安全的替代品等。但各國擁有不同的產業型態和管理量能，採取的措施亦不盡相同，我國如何從中汲取 PFAS 的管理經驗，將之去蕪存菁、學以致用，實屬不易。本研究的範圍與選擇理由如下：

1. 聯合國：

自 UNEP 於 1995 年首次針對 POPs 採取國際層面的管理行動以來 [25]，便持續扮演領導國際管理化學品與應對 POPs 污染的角色，UNEP 領導的斯德哥爾摩公約是國際層面管理 PFAS 最為關鍵之平台 [26]。由於許多發展中的國家缺乏化學物質管理的能力，世界各地的空氣、水和土壤持續飽受化學污染，污染曠日彌久，UNEP 遂於 2006 年成立 SAICM，提供利害關係人能夠討論與研析化學品管理政策的國際論壇，以此制定化學品健全管理的政策框架。SAICM 於 2009 年將 PFAS 過渡至更安全的替代品列為應該優先解決的 EPI [77]。

2. 歐盟：

歐盟於 2019 年底提出綠色新政 (European Green Deal)，最終目標是在 2050 年以前達到氣候中和 (Climate neutral) [27]，為促成計畫，歐盟在無毒環境 (Toxic-free environment) 的願景下推動化學品永續發展策略 (Chemicals strategy for sustainability, CSS)，該策略將 PFAS 作為優先關注的化學品 [28]，以此展開各種行動，例如於 2022 年提議修訂化學物質和混合物分類、標示與包裝 (Classification, labelling and packaging of chemicals, CLP) 規章 [29]，並預告下一步的行動將會修訂化學品註冊、評估、許可和限制 (Registration,

Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH) 法規 [30]，顯示
歐盟以更系統化的方式管理 PFAS 之企圖心。



3. 美國：

美國為世界上最早大規模生產 PFAS 的國家 [14]，也是面臨 PFAS 污染問題的先驅國家，具有豐富的 PFAS 管理經驗，例如 3M 公司於 2000 年與 USEPA 達成自願性淘汰的協議 [76]，是促使 OECD 等國際組織採取行動來評估 PFAS 的契機 [18]。USEPA 於 2021 年發布之 PFAS 策略路線圖：環保署自 2021 年至 2024 年的行動承諾 (PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021—2024) 是目前國際最透明、完整的國家級 PFAS 管理計畫 [31][1]。

有鑒於 PFAS 長達近百年的製造與發展歷史，前人對 PFAS 的研究、應用及危害已有長足地研究，故本研究首先將使用文獻整理的方式，回顧 PFAS 的定義、分類、物化性質、暴露、對人類健康的危害，以及 PFAS 的管理策略與淨零排放之關聯性；接著蒐集並整理聯合國、歐盟及美國對 PFAS 的管理策略與執行，比較三者的管理作為、範疇及流程後，研究其在政策發展的脈絡、管理成效及面臨挑戰之差異性；在取其精華，去其糟粕之後，參考 SAICM 在 2020 年以後的化學品與廢棄物之健全管理策略框架 (SAICM beyond 2020)，從中指出適合我國參考的管理做為及其可行因素。本研究之目的如下：

1. 文獻回顧 PFAS 的定義、分類、物化性質、暴露、對人類健康的危害，以及 PFAS 的管理策略與淨零排放之關聯性。
2. 蒐集並整理聯合國、歐盟及美國之 PFAS 管理策略與執行，比較三者的管理作為和面臨挑戰之差異性。
3. 參考 SAICM beyond 2020，對我國管理 PFAS 的策略提出初步建議及其可行因素。



第二章 PFAS 的文獻回顧

2.1 PFAS 的定義與分類

迄今，全球並未有統一的 PFAS 定義 [24]，各國使用不同定義對數目龐大的 PFAS 採取管理行動，將極大掣肘 PFAS 的管理策略。舉例來說，一種化學物質在某些國家被列管為 PFAS，但在其它國家可能會因為定義問題而不被認定為 PFAS，導致此類化學物質仍被允許在部分地區合法使用；3M 公司支助的一項生物監測研究早在 2001 年得出結論 [32]，即使遠在北極的哺乳動物之肝臟與血液，也能監測到 PFOS，因為 PFAS 作為 POPs 能夠在環境中長距離的移動，所以全球應盡快制定一致的 PFAS 定義。本研究依照定義提出之時間先後順序，列舉聯合國、歐盟及美國採納的 PFAS 定義之來源與標準如下：

1. OECD 於 2018 年提出的定義 [33]：OECD 與 UNEP 於 2018 年共同編纂一份彼時在全球市場銷售的 PFAS 清單，將 PFAS 定義為 $-C_nF_{2n} - (n \geq 3)$ 或 $-C_nF_{2n}OC_mF_{2m} - (n \geq 1 \text{ and } m \geq 1)$ ，該清單總共包含 4730 個化學文摘社 (Chemical Abstracts Service, CAS) 編號。此定義有四種侷限性：
 - (1) 沒有將在全氟化碳兩端有官能基的化學品納入定義，例如全氟烷基二酸 (Perfluoroalkyl dicarboxylic acids)。
 - (2) 無法一致性地處理有無全氟烷基側鏈的全氟環狀脂肪族同系物。
 - (3) 沒有將在環境與生物體內可被降解、帶有一個或多個芳香環的非氟化官能基納入定義。
 - (4) 使用定義含糊的術語：高度氟化 (Highly fluorinated)。
2. 美國於 2019 年在 2020 財政年度國防授權法 (National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2020, NDAA Act 2020) 提出的定義 [24]：一種完全人造的化學品，可以是碳原子都全氟化，或是混合全氟化、部分氟化及非氟化的碳原子。

3. OECD 於 2021 年提出的定義 [34]：因為 PFAS 分析方法進步，能夠定性過去未知的 PFAS，且為改善 2018 年的定義之侷限性，PFAS 被定義為任何至少含有一個完全氟化的甲基 (CF_3-) 或亞甲基 ($-\text{CF}_2-$) 碳原子（不與任何 H、Cl、Br 和 I 鍵結）的化學品。符合此定義之 PFAS 超過一萬多種。

隨著 PFAS 的定義標準由寬鬆至嚴謹，其涵蓋之化學品數目由多至少，如圖 2 所示 [24]。若採用過於嚴謹的 PFAS 定義方法，會致使許多與 PFAS 性質相似的化學品沒有被納入標準，管理成效不彰；但並非一味地採取最寬鬆的 PFAS 定義方法就能促成有效管理，仍須配合分析方法的技術發展、管理成本的考量，輔以階段式、滾動式之政策。聯合國與歐盟均先後採取 OECD 於 2018 年與 2021 年提出的定義 [78][79]，但 USEPA 依據毒性物質管理法 (Toxic Substances Control Act, TSCA)，可以自由採取不同的 PFAS 定義，並按照需求調整，所以本章節僅提出美國當前採取的 PFAS 定義中最最具指標性者 [24]。

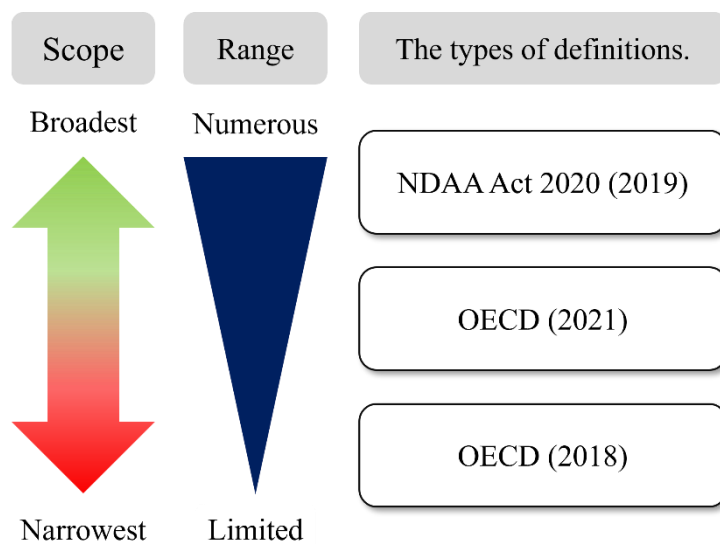



圖 2、PFAS 定義的範圍由寬鬆至嚴謹、涵蓋種類由多至少之示意圖



PFAS 族 (Family) 可以分為聚合或非聚合物組 (Class)，最著名的 PFAS 聚合物是含氟聚合物子組 (Subclass) 中的 PTFE，被杜邦公司用來製造不沾鍋；非聚合物組可以繼續往下區分為全氟或多氟烷基物質子組，目前國際對 PFAS 的研究與管理量能大多挹注在全氟烷基物質子組中之 PFOA 與 PFOS [26]。故以下列舉國際當前較為關注的全氟烷基物質子組下之種類 (Group)，並繪製 PFAS 的分類架構如圖 3 所示 [35][80]。

1. 全氟羧酸 (Perfluoro carboxylic acids, PFCAs)：其化學組成為氟化甲基的碳鏈，一端為羧基 ($-\text{COOH}$)，OECD 定義含 8 個碳以上之 PFCAs 屬於長鏈，反之為短鏈 [80]。10 個碳以下之 PFCAs 子類 (Subgroup) 依照碳數排序分別為全氟丁酸 (Perfluorobutanoic acid, PFBA)、全氟戊酸 (Perfluoropentanoic acid, PFPA)、全氟己酸 (Perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟庚酸 (Perfluoroheptanoic acid, PFHpA)、PFOA、全氟壬酸 (Perfluorononanoic acid, PFNA) 及全氟癸酸 (Perfluorodecanoic acid, PFDA)。
2. 全氟磺酸 (Perfluoroalkane sulfonic acids, PFSA)：其化學組成為氟化甲基的碳鏈，一端為磺酸基 ($-\text{SO}_2\text{OH}$)，OECD 定義含 6 個碳以上之 PFSA 屬於長鏈，反之為短鏈 [80]。10 個碳以下之 PFSA 子類依照碳數排序分別為全氟丁烷磺酸 (Perfluorobutanesulfonic acid, PFBS)、全氟戊烷磺酸 (Perfluoropentane sulfonic acid, PFPS)、全氟己烷磺酸 (Perfluorohexanesulfonic acid, PFHxS)、全氟庚烷磺酸 (Perfluoroheptane sulfonic acid, PFHpS)、PFOS、全氟壬烷磺酸 (Perfluorononane sulfonic acid, PFNS) 及全氟癸烷磺酸 (Perfluorodecane sulfonic acid, PFDS)。
3. 全氟醚酸 (Perfluoroalkyl ether acids, PFEAs)：目前國際開始關注分類為 PFEAs 之六氟環氧丙烯二聚酸 (Hexafluoropropylene oxide dimer acid, HFPO-DA)，常以 Gen X 代稱，被製造商藉此代替全氟辛酸銨 (Ammonium perfluorooctanoate, APFO)，作為 PTFE 製程中的介面活性劑與聚合物加工助劑 [80]。

圖 4 為 PFOA 的化學結構 [36]，由於分子含有 8 個碳原子，杜邦公司的內部文件遂以 C8 代稱此類化學物質 [17]，加之杜邦公司於 2005 年與帕克斯堡市的集體訴訟案件達成和解，由三名公正、獨立的科學家組成的 C8 科學小組 (C8 Science Panel) 成立 [81]，法院要求杜邦公司負責支助 C8 科學小組來蒐集帕克斯堡市受污染影響的七萬名居民之血液樣本與病史，以確認飲用水的 PFOA 暴露會導致之健康影響，奠定 PFOA 的流行病學調查之基礎，PFOA 便從此以 C8 的代稱廣為人知。另外，碳數大多時候能夠有效地作為物理與化學特性、生物累積性、蛋白質結合特徵及環境宿命的預測指標 [35]，因此 OECD 在綜合考量下，將碳數作為區分長鏈與短鏈全氟烷基物質的標準 [37]。

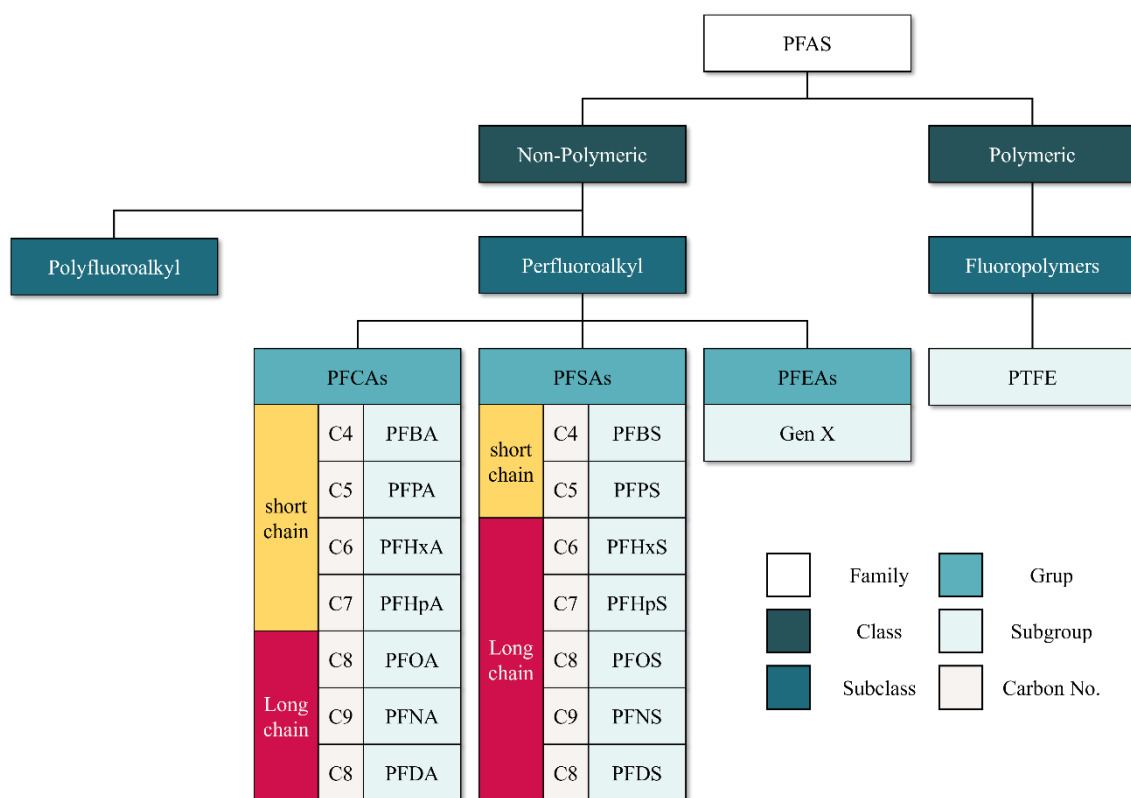


圖 3、PFAS 的分類架構圖

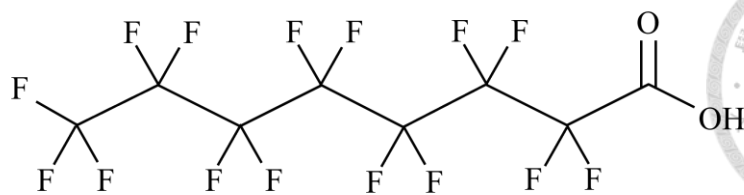


圖 4、PFOA 的化學結構圖


2.2 PFAS 的物理與化學性質

PFAS 基本的化學結構係由碳與氟的單鍵 (C-F) 組成，根據價鍵理論 (Valence bond theory)，原子鍵結的強度與原子軌域 (Atomic orbital) 的重疊程度呈正相關，隨著重疊程度越高，鍵結強度也越大 [36]。PFAS 的主要物化性質與氟原子的特性相關：

1. 電負度 (Electronegativity) 高：氟是元素週期表中電負度最高的原子 [38]，當氟與碳鍵結時會比其它原子更吸引共用電子對，使得 C-F 成為有機化學中最強的共價鍵 [39]，造就 PFAS 極為穩定的性質；另外，高電負度也導致 C-F 的電子分布不均勻，具有極性 [39]，容易與羧酸或磺酸官能基結合，此類 PFAS 為強酸。
2. 最小的鹵素原子：C-F 中的氟原子半徑僅有 0.72 Å，較高的電子密度屏蔽碳原子，不容易受其它分子的電子雲影響，使 PFAS 具有穩定的性質 [82]。
3. 極化度 (Polarizability) 低：氟原子的低極化度同樣使得 C-F 的電子雲密度不容易受其它分子的影響，故表面能 (Surface energy) 和分子間的作用力低，若與親水性高的官能基結合，例如羧酸，便會賦予 PFAS 可以作為表面活性劑的疏水性與疏油性 [82]。

2.3 PFAS 的用途與暴露

PFAS 的種類繁多，用途更是包羅萬象，大量的 PFAS 從發明後的數十年間，被釋放到環境中。以下為 PFAS 在國際上優先關注的應用領域與暴露情況：

- 
1. 消防泡沫：水成膜泡沫 (Aqueous film forming foam, AFFF) 最早於 1960 年代由 3M 公司與美國海軍合作研發 [83]，用於消防救火，彼時的主要成分為長鏈 PFAS。此類應用是國際上最早採取法規或自願性措施來淘汰的 PFAS 用途 [26]，其背後重要的原因是不僅是含 PFAS 的 AFFF 會導致消防員的職業暴露，而是持久性的 PFAS 製成 AFFF 後，成為高移動性 (Mobility) 的持久性污染源。在斯德哥爾摩公約將長鏈 PFAS 列管後，業者轉為使用短鏈 PFAS 替代，雖然短鏈 PFAS 的生物累積性比長鏈 PFAS 低，但擁有更高的移動性 [40]，在移動性本就很高的消防泡沫中，讓 PFAS 污染問題更加嚴峻，使用後的 AFFF 幾乎不可能全數回收，大量的 PFAS 會因此進入土壤、地下水及河川，擴大污染範圍。
 2. 農藥：PFAS 在農藥中可以作為消泡劑 (Anti-foaming agents)、殺蟲劑 (Insecticides agents) 及惰性添加劑，即使部分先進國家已禁止使用許多含 PFAS 的農藥，但其它國家和地區仍在持續使用。另外，農藥的塑膠包裝容器經常會使用稀釋的氟氣 (Fluorine gas) 對高密度聚乙烯 (High-Density Polyethylene, HDPE) 容器進行氟化處理，用以提高農藥容器的穩定性，並降低容器的滲透性、反應性及溶解性，然而 PFAS 可能會從這些氟化的 HDPE 容器中釋放，並污染裝在容器中不含 PFAS 的農藥 [14]。亦即，使用含 PFAS 或受 PFAS 污染的農藥，將致使 PFAS 直接被釋放並污染環境，若各國未能一致地禁用含 PFAS 的農藥以及氟化處理農藥容器的方法，農藥應用的 PFAS 污染將無法全面遏止。
 3. 食品接觸材料 (Food Contact Materials, FCM)：除了受 PFAS 污染的飲用水與食物，食入暴露的 PFAS 來源還包含食品包裝與接觸材料，例如炊具塗層及食品接觸的紙類與紙板之防油劑。PTFE 作為炊具塗層的材料，擁有極高的熱穩定性，因此炊具塗層來源的 PFAS 暴露量最小 [24]。食品接觸的紙類與

紙板之防油劑作為最直接接觸消費者的用途，是目前國際管理 PFAS 最關注的應用之一。

4. 紡織品：具疏水性與疏油性的 PFAS 被用作紡織品的添加劑。有研究指出，兒童體內的 PFOS 以每公斤換算，比成人體內還高，除了食入受 PFAS 污染的食物，這是因為兒童比成人吸入與皮膚接觸更多含有 PFAS 的地毯；室內灰塵是吸入 PFOS 的主要暴露來源，肇因於含有 PFAS 的紡織品之釋放 [41]。

國際選擇管理 PFAS 的優先領域，可能基於兩種考量因素，如圖 5 所示。第一種考量主要是關注在直接將 PFAS 釋放到環境中的影響，此類 PFAS 用途對人類健康的危害是透過污染飲用水與食物，經由食入途徑暴露人體，不僅如此，持久性的 PFAS 難以在環境中被自然降解，若不及時禁止或限制此類用途，環境中的 PFAS 含量將與日俱增，優先管理 AFFF 與農藥的考量屬於第一種；第二種考量則將關注點放在 PFAS 的直接暴露對人體的危害，暴露評估可以協助執政者分辨出 PFAS 直接暴露最大的用途來源，藉由禁止或限制此類用途，將極大地降低直接暴露的危害，優先管理 FCM 與紡織品的考量屬於第二種。

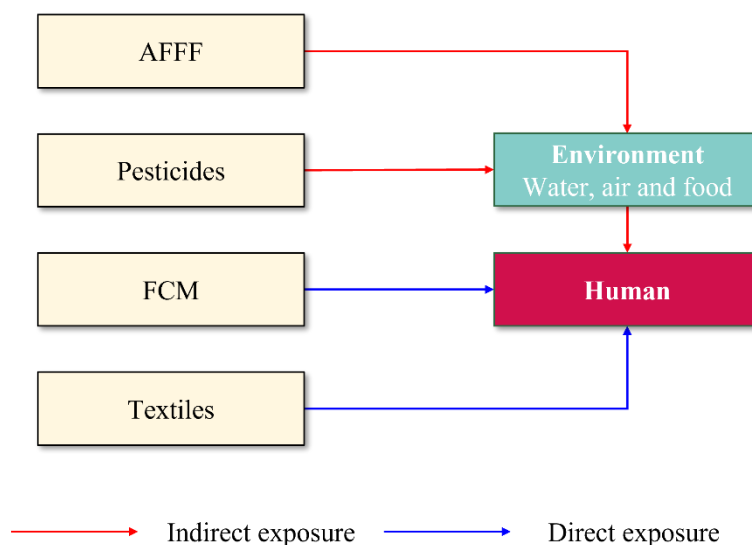



圖 5、PFAS 在國際上優先關注的應用領域與主要考量之示意圖



另外，PFAS 的所有用途並不會只侷限在間接暴露或直接暴露，譬如消防員長期使用含 PFAS 的 AFFF 救災，仍有職業暴露的風險之虞，屬於直接暴露；在 FCM 的用途上，PFAS 可能會在生命週期的不同階段釋放到環境，從而污染水源或食物，導致間接暴露，例如製造與處置階段。

2.4 PFAS 對人類健康的影響

迄今為止，流行病學研究大多聚焦在 PFOA 與 PFOS，僅少數研究範圍包含 PFHxS，上述 PFAS 都是斯德哥爾摩公約列管之種類，科學界對其它 PFAS 的研究仍極為缺乏。由於不同的研究對象與暴露程度也會影響到研究的結果，為客觀、扼要地總結 PFAS 對人類健康的影響，本研究參考美國科學和技術政策辦公室 (Office of Science and Technology Policy, OSTP) 下轄之國家科學技術委員會 (National Science and Technology Council, NSTC) 於 2023 年 3 月發布之 PFAS 報告 (Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) report)，描述 PFAS 對人類健康影響的方法 [24]，彙整來自國際癌症研究署 (International Agency for Research on Cancer, IARC) [42]、歐盟食品安全局 (European Food Safety Authority, EFSA) [43]、C8 科學小組 [84]、USEPA [44][45] 及美國毒性物質與疾病登記署 (Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR) [46] 的研究成果，超過半數以上認定為 PFAS 暴露會導致的人類健康影響，將作為目前 PFAS 流行病學研究的共識 (詳見表 1)，分別為：

1. 睪丸癌和腎癌。
2. 肝損傷。
3. 膽固醇增加。
4. 對接種疫苗之免疫反應力下降。
5. 嬰兒的出生體重輕微下降。
6. 妊娠高血壓與子癩前症。

表 1、PFAS 暴露對健康的影響

健康影響	IARC	EFSA	C8 科學小組	USEPA	ATSDR
睪丸癌	√ (PFOA)	×	√ (PFOA)	√ (PFOA, PFOS)	×
腎癌	√ (PFOA)	×	√ (PFOA)	√ (PFOA, PFOS)	×
肝損傷	×	√ (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS)	×	√ (PFOA, PFOS)	√ (PFOS, PFHxS)
膽固醇增加	×	√ (PFOA, PFOS, PFNA)	√ (PFOA)	√ (PFOA, PFOS)	√ (PFOA, PFOS, PFNA, PFDA)
對接種疫苗 之免疫反應 力下降	×	√ (PFOA, PFOS)	×	√ (PFOA, PFOS)	√ (PFOA, PFOS, PFDA)
嬰兒的出生 體重下降	×	√ (PFOA, PFOS)	×	√ (PFOA)	√ (PFOA, PFOS)
妊娠高血壓 與子癩前症	×	×	√ (PFOA)	√ (PFOA, PFOS)	√ (PFOA, PFOS)

√：同意為 PFAS 暴露的健康影響。

×：不同意為 PFAS 暴露的健康影響或未提及。

2.5 PFAS 的管理策略與淨零排放之關聯性

隨著巴黎協議 (Paris Agreement) 於 2015 年提出將全球平均氣溫之上升維持在 1.5°C 內，並於 2050 年以前達到人為排放源和溫室氣體匯之平衡 (A balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases) [47]，淨零 (net zero) 思潮已逐漸成為各國提交國家自定貢獻 (Nationally Determined Contributions, NDC) 的核心理念；聯合國政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2016 年發布的特別報告

(Special Report) 中指出，為將全球平均氣溫之上升維持在 1.5°C 內，應於 2030 年前將人為二氧化碳的淨排放量減少大約至 2030 年之 45%，並於 2050 年前達到二氧化碳之淨零排放 [48]；2017 年，瑞典成為世界上首個立法設定溫室氣體的淨零排放目標之國家 [49]；歐盟於 2019 年提出綠色新政，規劃一系列涵蓋多重領域之政治藍圖與策略，計畫在 2050 年前達到溫室氣體之淨零排放 (No net emissions of greenhouse gases in 2050) [27]；我國之國家發展委員會亦於 2022 年公布臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，制定能源轉型、產業轉型、生活方式轉型及社會轉型等四大轉型策略，以及科技研發和科技創新等兩大治理基礎 [1]，以此引導產業轉型，促進經濟成長和永續發展。淨零排放之國際發展趨勢如圖 6 所示。

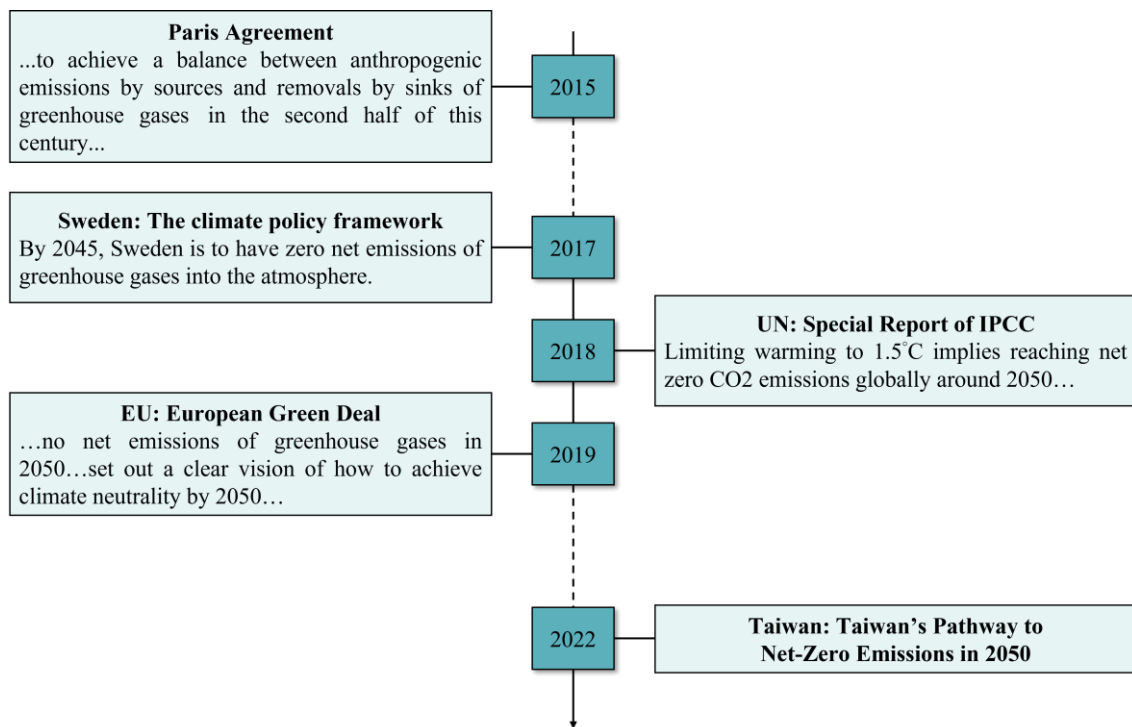



圖 6、淨零排放之國際發展趨勢圖

世界氣象組織 (World Meteorological Organization) 指出 2023 年 6 月是有紀錄以來最熱的 6 月 [50]，並且 2023 年 7 月已歷經有史以來最熱的三週，有望成為史



上最熱的月份 [51]，顯示全球暖化的問題已迫在眉睫，各國應加快行動以達成溫室氣體之淨零排放。化學工業在全球人為的二氧化碳排放中佔 5% [52]，是為達到淨零排放必須轉型的關鍵產業，化學工業作為能源密集的產業，其溫室氣體的排放主要來自兩個來源 [53]：

1. 打破和重組化學鍵所需的能量：化學工業中約 60% 的溫室氣體排放來自燃燒燃料以產生蒸汽、熱量及壓力來提供打破和重組化學鍵所需的能量。
2. 化學反應產生的二氧化碳、氮氧化物 (NO_x) 及其它溫室氣體：化學工業中約 40% 的溫室氣體排由化學反應產生。

歐盟環境署 (European Environment Agency) 的報告指出，工業的溫室氣體排放有 75% 是來自八種化學品的生產：氨 (Ammonia)、乙烯 (Ethylene)、丙烯 (Propylene)、硝酸 (Nitric acid)、碳黑 (Carbon black)、己內醯胺 (Caprolactam)、碳酸鈉 (Sodium carbonate) 及氟化物 (Fluorochemicals) [53]，其中氟化物占八種化學產品的溫室氣體排放之 10%。故此，本研究之目標符合國際淨零排放之策略趨勢。

第三章 聯合國的 PFAS 管理策略趨勢



3.1 斯德哥爾摩公約

國際管理 POPs 之濫觴起源於 UNEP 於 1995 年針對阿特靈 (Aldrin)、可氣丹 (Chlordane)、滴滴涕 (Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane, DDT)、地特靈 (Dieldrin)、安特靈 (Endrin)、飛佈達 (Heptachlor)、六氯苯 (Hexachlorobenzene)、滅蟻樂 (Mirex)、多氯聯苯 (Polychlorinated biphenyls, PCBs)、多氯二聯苯戴奧辛 (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins)、多氯二聯苯呋喃 (Polychlorinated dibenzofurans) 及毒殺芬 (Toxaphen) 等 12 種 POPs 採取行動 [25]，呼籲各國減少和去除此類化學品的使用與排放。經過數年的努力，斯德哥爾摩公約作為國際層面最重要的 PFAS 管理平台，於 2001 年通過，其目的為防止環境與人類健康受到 POPs 危害，上述 12 種 POPs 分別被列入附件 A、B 及 C，以達到禁用、限用及減少無意排放目的。三種附件之列管數目、列管標準及締約方義務詳見表 2 [54]。

表 2、斯德哥爾摩公約各個附件的列管數目、列管標準及締約方義務

附件	列管數目	列管標準	締約方義務
A	27 種	經過 POPs 審查委員會評估後，決定應予以禁用的 POPs。	<ul style="list-style-type: none"> 締約方在可接受用途或特定豁免外，必須禁止並執行必要的法律或行政手段暫停此類 POPs 的生產、進口和出口。 以環境無害化的方式管理庫存、運輸和處置廢棄物。
B	2 種	經過 POPs 審查委員會評估後，決定應予以限用的 POPs。	<ul style="list-style-type: none"> 締約方在可接受用途或特定豁免外，必須限制此類 POPs 的生產與使用。 以環境無害化的方式管理庫存、運輸和處置廢棄物。
C	7 種	人為無意排放的 POPs，通常肇因於不完全燃燒，或為製程的副產物。	<ul style="list-style-type: none"> 公約生效的兩年內，締約方必須採取措施，減少此類 POPs 的人為排放總量，最終降至零排放。 公約生效的四年內，在無意排放源實施最佳可行技術最佳環境實踐。

斯德哥爾摩公約管理 PFAS 的方式是選定一種 PFAS 作為最基本的母體化合物 (Parent compound)，與能夠降解為此類 PFAS 的前驅物 (Precursors) 一同管理。此類管理方法會導致製造業者轉而使用其它擁有類似化學性質的 PFAS 作為替代品 [26]，譬如 PFOS、其鹽類及 PFOSF 早在 2009 年就成為被斯德哥爾摩公約首個納入附件 B 的 PFAS，締約方得在可接受用途或特定豁免外，限制此類 POPs 的生產與使用；由於 PFHxS、其鹽類及其相關化合物有 6 個碳，與 8 碳的 PFOS、其鹽類及 PFOSF 有相似的性質和用途，因此 PFHxS 被業者用來取代 PFOS 被公約限制的多種用途 [55]。

有鑒於此，斯德哥爾摩公約在對 PFHxS、其鹽類及其相關化合物進行風險管理評估和替代品評估後，最終認定此化學品具有對人類健康和環境造成重大之不利影響之虞，使用此種 PFAS 作為滅火泡沫等用途之替代品，實屬不智，且 PFHxS、其鹽類及其相關化合物的所有應用皆有技術上可行且已投入的替代品，故於 2022 年舉行之第十屆締約國大會 (Conference of the Parties, COP)，將 PFHxS、其鹽類及其相關化合物列入公約附件 A 列管，沒有任何豁免。截至第十屆 COP，公約列管之 PFAS 如表 3 所示 [54][56]。

表 3、斯德哥爾摩公約列管之 PFAS

PFAS 種類	列管時間	列管附件	重要的豁免規定
PFOA、其鹽類及其相關化合物	2019 年	A	<u>生產豁免</u> <ul style="list-style-type: none"> 僅有部分國家得生產含此 POPs 之消防泡沫，其餘締約國皆不能出口與進口含有 PFOA、其鹽類及其相關化合物之消防泡沫。 無其餘用途的生產豁免。 <u>使用豁免</u> <ul style="list-style-type: none"> 包含半導體製程（光刻或蝕刻）在內的 11 種豁免。
PFOS、其鹽類及 PFOSF	2009 年	B	<u>生產豁免</u> <ul style="list-style-type: none"> 除了為生產用於控制切葉蟻之氟硫胺



PFAS 種類	列管時間	列管附件	重要的豁免規定
			(sulfluramid) 外，沒有任何生產豁免。
			<u>使用豁免</u> <ul style="list-style-type: none"> • 農業用途：氟硫胺。 • 只用於閉鎖系統的金屬電鍍。 • 已安裝、用於撲滅 B 類火災的滅火泡沫。
PFHxS、其鹽類及其相關化合物	2022 年	A	<u>生產豁免</u> <ul style="list-style-type: none"> • 無。 <u>使用豁免</u> <ul style="list-style-type: none"> • 無。

另外，加拿大於 2021 年提案將長鏈 PFCAs、其鹽類及其相關化合物納入公約列管 [57]，最重要的原因便是公約對 PFOA、其鹽類及其相關化合物的定義，不包含 8 個碳以上的 PFCAs，各國仍可以在法律沒有限制的情況下使用這些 PFAS。不少研究已經在各種環境介質與生物體內監測到長鏈 PFCAs，因此將範圍限制在 9 到 21 碳的長鏈 PFCAs、其鹽類及其相關化合物，交由 POPs 審查委員會評估。

3.2 關注議題的評估報告

關注議題的評估報告於 2020 年發布，目的旨在為第五屆聯合國環境大會 (UN Environment Assembly, UNEA) 針對關注議題之現況討論作準備，此報告從以下四個面向評估 PFAS 在內的 SAICM 八個 EPI 與 CO II 提及的 11 個具有新興風險證據之化學品議題，共 19 種關注化學品 [26]：

1. 介紹：簡要地介紹物質的定義、特性及用途。
2. 列入關注問題的理由：描述該物質對自然環境和人類健康造成的影響。
3. 現有的手段與行動：該物質現有的國際層級、國家層級和區域層級之管理手段與行動，例如公約、國家管理計畫或自我管制政策等。



4. 機會和挑戰：依據該物質當下在化學品管理上遇到的挑戰，著眼現況、放眼未來，提出可能的解決方案。

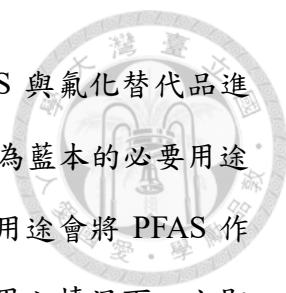
PFAS 關注議題的結論指出，過去幾十年間，許多針對 PFAS 危害性的研究如火如荼地展開，現今對於部分長鏈 PFAS 的危害、暴露、風險和處理方面之知識，已取得實質性的進展，然而 PFAS 之種類繁多，多數 PFAS 和非氟化替代品缺乏相應之關注度，尤其是非氟化替代品的危害特性仍有巨大的知識缺口亟需彌補。本報告認為目前管理 PFAS 應掌握的機遇與可能面臨的挑戰為以下三點：

1. 加速淘汰斯德哥爾摩公約所規範的 PFAS：

目前斯德哥爾摩公約作為國際層面上管理 PFAS 最為關鍵的平台，協助各國管理 PFAS 並過渡至更安全的替代品，輔以各國的監管和自願行動，但是斯德哥爾摩公約至今仍規定對 PFAS 的多項豁免，這些豁免是 POPs 審查委員會在評估期間建議不應豁免之行為，包含生產和使用，POPs 審查委員會認為許多 PFAS 的豁免可能會對人類和生態系統造成大量之環境暴露，故需要加速淘汰公約列管的 PFAS。舉例來說，截至 2019 年 11 月，斯德哥爾摩公約的 183 個締約國中，只有其中 86 個締約國將 PFOS 納入其國家實施計畫，比例低於 50%，彼時距離 PFOS 自 2009 年 5 月被列入公約以來，已逾十年。另外，還應採取相應的行動措施以避免 PFAS 的生產、使用和暴露轉移到監管能力較不嚴格的國家。

2. 定期評估管理方法和現況，以達到淘汰長鏈 PFAS 之目的：

現有大多數之儀器均採取逐一檢測的化學方法，使政府需要大量時間、社會和人力資源來評估和管理數以千計的 PFAS。為克服此障礙，斯德哥爾摩公約將母體化合物與前驅物視為一個整體來評估和管理，但這種分組策略不能有效地解決 PFAS 污染問題，因為 PFAS 的生產和使用者會使用具有相似結構和特性的新型 PFAS 取代被斯德哥爾摩公約列管之現有 PFAS。因此，需



要制定新的監管與自願方法來針對市面上各式各樣的 PFAS 與氟化替代品進行評估和管理。另外，以蒙特婁議定書 (Montreal Protocol) 為藍本的必要用途 (Essential use) 概念逐漸成為管理 PFAS 方法之選項，必要用途會將 PFAS 作為一個或多個組進行管理，在技術上有更安全的替代品可用之情況下，立即淘汰對人類健康和自然環境有害、且對社會運作不重要的 PFAS 用途。

3. 促進定期之訊息交流，對未列入斯德哥爾摩公約之 PFAS 加速採取行動，以期過渡至更安全的替代品：

現今管理長鏈 PFAS 之效率不佳，肇因於訊息不流通之故，導致管理量能重複挹注。例如，政府投入大量的資源來蒐集 PFAS 的化學特性、生產和用途資訊，但製造商通常已掌握上述訊息，未能有效分享。另外，針對 PFAS 的化學品評估報告（危害確認、劑量效應評估暴露量評估、風險特徵描述、社會和經濟效益及可行性評估等）和設定的指導值，從地方、國家、區域到全球範圍的利益相關者和政府亦未取得良好之訊息交流，導致分別挹注大量的行政、人力和經濟資源，只為取得這些重複的已知訊息。UNEP 建議各界應促進定期之訊息交流，針對未列入斯德哥爾摩公約的 PFAS 加速採取聯合之行動措施，例如通過 OECD、聯合國全球全氟化合物小組 (UNEP Global Perfluorinated Chemicals Group) 或其他國際論壇交流訊息，並提高下游之利益相關者的參與，包含 PFAS 之工業使用者、零售商以及保險公司。具體的訊息交流範圍包括填補知識和資料缺口，以確保所有 PFAS 和其替代品的化學訊息一致且維持公開性，以期過渡至更安全的替代品。

3.3 SAICM beyond 2020

SAICM 最初成立的宗旨，係為健全管理化學品的整個生命週期，在 2020 年以前，最大程度地減少化學品的使用和生產對人類健康與環境的重大不良影響 [20]。遺憾的是，於 2019 年發表全球化學品展望第二版 (Global Chemicals Outlook

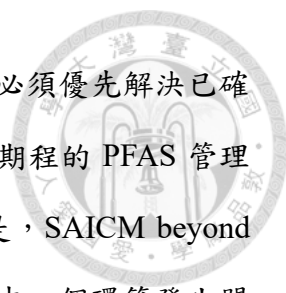
II, GCO II) 報告指出，各國無法如期實現 2020 年以前將化學品與廢棄物的不良影響最大程度地減少的目標 [58]，於是 SACIM 在同年制定 2020 年以後之化學品與廢棄物的健全管理策略 [59] (SAICM beyond 2020)，包含五項策略目標與 20 項具體子目標 [59]，目的是藉由具體目標給予世界各國未來努力的方向。經過 2 年多的滾動式檢討，目前最新版本之 SAICM beyond 2020 於 2022 年發布，但內容仍不完整，還有待續會討論，詳見表 4 [60]。

表 4、SAICM beyond 2020 管理化學品與廢棄物之策略目標和具體子目標

策略目標	具體子目標
<p>策略目標 A：各國有能力建構完整的化學品管理框架，執行化學品與廢棄物的健全管理。</p>	<p>A1. 在 2030 年以前，各國政府均建立和執行化學品與廢棄物管理的法律框架，並具備足夠的管理量能來降低化學品與廢棄物的不良影響。</p> <p>A2. 制定包含整體方向與指引的化學品與廢棄物管理守則，供各國納入法律體制。</p> <p>A3. 在 xxxx 年以前，企業均實施預防與控制措施，應對化學品在所有生命週期的危害。</p> <p>A4. 在 20xx 年以前，有效防止有毒、有害、禁用語限用化學品及廢棄物的非法跨境貿易和流通。</p> <p>A5. 在 2030 年以前，所有國家均全面禁止國內禁用的化學品。</p> <p>A6. 在 2030 年以前，所有國家均擁有毒物資訊中心 (Poison information centres) 來提供化學品風險預防和毒理學知識的培訓，以及臨床毒理學資源照護。</p> <p>A7. 在 2030 年以前，高危害性農藥 (Highly hazardous pesticides, HHPs) 被全面禁止使用。</p>
<p>策略目標 B：建置與公開揭露全面的化學品知識、數據及資訊，驅使利害關係人明智地決策和行動。</p>	<p>B1. 在 20xx 年以前，化學品在整個生命週期的完整資訊均已公開揭露。</p> <p>B2. 在 20xx 年以前，價值鏈的所有利害關係人均能提供可靠的化學品資訊，供決策者制定符合循環經濟的管理策略。</p> <p>B3. 盤查並建置全球化學品的生產與排放數據，包含人體、生物體及環境介質中的流布，並制定一致的研究流程，使不同來源的化學品數據維持可靠性。</p> <p>B4. 在 20xx 年以前，所有利害關係人均使用標準化的工具、指引和最佳可行實踐 (best available practices) 來評估與管理化學品、預防危害、降低風險及檢測分析。</p> <p>B5. 在 20xx 年以前，開發並實施能提升化學品的安全、永續性及安全替代品之教育和培訓計畫。</p>

策略目標	具體子目標
	B6. 在 20xx 年以前，全球政府均立法實施統一分類和標籤制度 (Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals, GHS)。
策略目標 C：優先解決已確定的關注議題。	C1. 對已知關注議題建立和實施能降低危害的管理策略與行動計畫，應規劃對應的期程。
策略目標 D：在產品價值鏈中建置安全替代、創新與永續的管理策略，以增進人類和環境的福祉、預防及降低風險。	<p>D1. 企業持續挹注資金來推動創新的綠色永續化學、清潔生產及化學品的生命週期管理。</p> <p>D2. 政府實施鼓勵使用永續與安全替代品的政策，包含清潔生產技術，以此促進循環經濟。</p> <p>D3. 在 20xx 年以前，企業將化學品與廢棄物的健全管理策略納入投資標的與商業模式，並應用國際公用的報告標準。</p> <p>D4. 在研究與創新計畫中納入永續精神，藉由安全替代品來優先處理產品中的有害化學品。</p> <p>D5. 在 2030 年以前，政府實行政策來支持非化學替代品的研究與開發，例如使用農業生態技術取代 HHPs。</p> <p>D6. 在 20xx 年以前，對大量使用化學品的產業別（例如紡織、電子、建築及農業）制定和實施永續化學品與廢棄物管理策略；還應篩選優先關注的化學品，制定標準與行動策略，減少產品價值鏈中化學品的參與。</p> <p>D7. 在 20xx 年以前，政府和企業在化工產業與供應鏈中實施有效的職業健康與安全管理、環境保護策略。</p> <p>D8. 在 20xx 年以前，制定對第三方標準、標籤和認證方法的最低要求及定期審查機制，所有營利機構均由政府或利害關係人負責監督。</p>
策略目標 E：在決策過程中貫徹化學品與廢棄物的健全管理，實現永續發展。	<p>E1. 在區域、國家、地方發展策略內納入化學品與廢棄物的健全管理。</p> <p>E2. 加強利害關係人之間的合作關係，實現化學品與廢棄物的健全管理。</p> <p>E3. 集結利害關係人的財務與非財務資源，實現化學品與廢棄物的健全管理。</p> <p>E4. 分析並降低開發中國家和先進國家的化學品與廢棄物在管理量能上的差異。</p> <p>E5. 內化外部成本化與建立外部成本回收機制</p> <p>E6. 所有利害關係人在決定化學品與廢棄物管理的優先事項上取得共識，協力應對氣候變遷、生物多樣性及人權等關鍵議題。</p>

x: 尚未決定期限範圍。



PFAS 在 SAICM beyond 2020 的策略目標 C 中，被認為是必須優先解決已確定的關注議題之一，SAICM 建議的具體策略為制定並實施包含期程的 PFAS 管理計畫，以此減少 PFAS 對人類健康與環境的危害。必須注意的是，SAICM beyond 2020 的策略目標彼此之間能夠相輔相成，也能互為掣肘，若其中一個環節發生問題，其它的策略目標也會因此大受影響。

另外，SAICM beyond 2020 還另外討論是否加入可衡量指標 [61]，幫助政府、企業等利害關係人評估化學品與廢棄物管理的成效，指標來源除將參考各個化學品公約。可衡量指標的其中一個例子，包含斯德哥爾摩公通過分析空氣、人類及環境介質中持久性有機污染物濃度的變化趨勢，來衡量締約國的執行進展。

第四章 歐盟的 PFAS 管理策略趨勢



4.1 綠色新政

2020 年以後歐盟對 PFAS 的管理策略主要以綠色新政為中心來進行，這是一項於 2019 年提出、最終目標是在 2050 年以前達到氣候中和 [27]。為促成計畫，歐盟規劃一系列涵蓋農業、工業、交通及經濟等多重領域之政治藍圖與策略，其中與 PFAS 管理最直接相關的為無毒環境下的化學品永續發展策略 (CSS)。與 SAICM beyond 2020 相同，CSS 將 PFAS 認定為歐盟關注化學品 [28]，以必要用途為管理 PFAS 的核心概念，達成淘汰 PFAS 所有非必要用途與研發安全、非持久性 PFAS 替代品之目的。

CSS 肯定 PFAS 在藥品與醫療器材用途對社會至關重要 [62]，因為這些需要植入人體內的器材如手術用人工血管 (Vascular Grafts)、心臟血管支架及手術網片 (Surgical Mesh) 等應用都由具穩定性、疏水性和疏油性的 PFAS 製造而成；另一個必要用途的例子為職業防護用的紡織品，因為替代品無法提供和 PFAS 一樣有效的防油和防水性，無法維持相同的保護能力，故此類 PFAS 用途仍應繼續使用。上述兩種必要用途的例子皆有列入斯德哥爾摩公約的 PFOA 使用豁免。

以下為 CSS 於 2020 年以後推動的 PFAS 管理策略，將依序在第 4.2 節到 4.6 節介紹：

1. 提案修訂 CLP 規章。
2. 提案限制在消防泡沫中使用任何 PFAS。
3. 提案限制在消防泡沫以外的所有用途中使用任何 PFAS。
4. 在食品中污染物質之最大限量中增修 PFAS 標準。
5. 在飲用水指令中增修 PFAS 標準。

4.2 提案修訂 CLP 規章

CSS 認為 REACH 法規第 68 條第 2 項所使用的風險管理通用方法 (Generic approach to risk management) 是維護歐盟化學品安全的一大功臣 [28]，此方法不會進行風險評估、不考慮化學品的使用情況，只要此化學品符合歐盟對致癌性、生殖細胞致突變性 (Germ cell mutagenicity) 及生殖毒性 (Reproductive toxicity) 的標準，能立即將此類物質加入 REACH 法規的限制清單，以此控制有毒化學品的暴露 [63]。必須注意的是，風險管理通用方法仍遵守必要用途的原則。

為達成綠色新政對無毒環境的願景，CSS 決定藉由修訂 REACH 法規第 68 條第 2 項的化學品類別，將 PFAS 在內的有毒化學品納入風險管理通用方法 [29]。因為此項行動涉及新增化學品的危險類別，歐盟必須修訂完 CLP 規章後，才能修訂 REACH 法規來擴展風險管理通用方法。這是因為 REACH 法規與 CLP 規章不僅同為歐盟重要的化學品管理政策，也是相輔相成的關係，REACH 法規能藉由賦予化學品製造商或進口商提供化學資訊的責任，使政府得到化學物質的訊息；CLP 規章則根據這些訊息更新化學物質的危險類別，並奠定 REACH 法規和其它化學品管理政策的基礎 [30]。REACH 法規和 CLP 規章的關係示意圖如圖 7 所示。

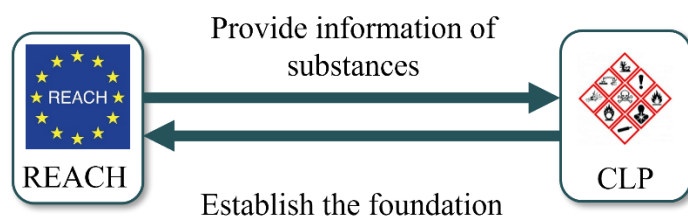


圖 7、REACH 法規和 CLP 規章的關係示意圖

因此，自 2019 年歐盟綠色新政通過以來，歐盟於同年針對 REACH 法規以外的所有化學品管理政策，包括 CLP 規章在內，展開合適度檢視 (Fitness check)，並依據合適度檢測的結果，於 2022 年 12 月 19 日提議修訂 CLP 規章，草案亦提交

至 GHS 於 2023 到 2024 年的工作計畫 (Work Programme)，以維持全球化學品分類的一致性。歐盟最終通過新增危險類別的提案，已於 2023 年 4 月 20 日生效，表 5 彙整新的危險類別、代碼和危害說明，新的危險類別能夠協助歐盟篩選與管理 PFAS 的優先層級 [64]。

表 5、CLP 規章新增的危險類別、代碼和危害說明

危險類別	危險代碼	危害說明
第一類人類 EDCs	ED HH 1	可能導致人類內分泌紊亂。
第二類人類 EDCs	ED HH 2	懷疑會導致人類內分泌紊亂。
第一類環境 EDCs	ED ENV 1	可能導致環境內分泌紊亂。
第二類環境 EDCs	ED ENV 2	懷疑會導致環境內分泌紊亂。
PBT 物質	PBT	在環境、動物及人類體內累積。
非常持久性、非常生物累積性及毒性 (Very persistent, bio-accumulative and toxic, vPvB) 物質	vPvB	在環境、動物及人類體內大量累積。
持久性、移動性及毒性 (Persistent, mobile and toxic, PMT) 物質	PMT	可能持久地擴大水資源的污染。
非常持久性、移動性及毒性 (Very Persistent, mobile and toxic, vPvM) 物質	vPvM	可能非常持久地擴大水資源的污染。



4.3 提案限制在消防泡沫中使用任何 PFAS

歐盟化學總署 (The European Chemicals Agency, ECHA) 在評估消防泡沫中 PFAS 後，認定此類 PFAS 用途對人類健康和環境有重大危害之虞，應根據 REACH 法規禁止在消防泡沫中使用任何 PFAS，於 2022 年提交限制提案。有鑒於消防泡沫中的 PFAS 成分實屬於商業機密，以前消防泡沫的主要成分為 8 碳的 PFOA，在斯德哥爾摩公約禁止使用後，製造業者轉而研發 6 碳 PFAS 與其它更短鏈的 PFAS，為避免重蹈覆轍，本提案限制的 PFAS 採用 OECD 於 2021 年對 PFAS 之新定義，以避免消防泡沫的製造者轉而使用未受法規限制的 PFAS，目前正在由風險評估委員會 (Committees for Risk Assessment, RAC) 與社會經濟分析委員會 (Socio-Economic Analysis, SEAC) 審核中。此限制保留 10 年的緩衝期，以便製造者研發和測試替代品，並依照對滅火效能的要求程度，分階段逐步淘汰含 PFAS 的消防泡沫，詳見表 6 [79]。

表 6、含 PFAS 消防泡沫之限制提案的緩衝期與對應用途

限制要求	緩衝期	用途
PFAS 禁止單獨使用或作為摻入成分或混合物，用於總 PFAS 濃度大於 1 ppm 的消防泡沫混合物，於歐盟販賣或出口。	18 個月	<ul style="list-style-type: none">• 消防訓練與滅火測試。• 工業火災以外的市立消防系統。
	3 年	<ul style="list-style-type: none">• 民用船舶。
	5 年	<ul style="list-style-type: none">• 國防。• 民航。• 濕式滅火裝置、攜帶式滅火器等即用消防滅火設備。• 未提及的所有用途。
	10 年	<ul style="list-style-type: none">• 工業火災。

4.4 提案限制在消防泡沫以外的所有用途中使用任何 PFAS

繼 ECHA 提交 PFAS 在消防泡沫用途的限制提案後，德國、丹麥、荷蘭、挪威及瑞典進一步於 2023 年提案禁止在消防泡沫以外的所有用途使用任何 PFAS [78]。基於同樣的理由，此提案同樣採用 OECD 於 2021 年提出的 PFAS 定義，並保留 18 個月的緩衝期；另外，基於 PFAS 各種必要用途，例如藥物與醫療器材、半導體製程、實驗精密設備及職業防護裝備，在最長達 12 年的排除期 (Derogation period) 結束前，應遵守以下限制要求：

超過以下濃度的 PFAS 禁止以單獨使用、作為摻入成分、作為混合物及作為成品等形式，於歐盟生產、使用及販售：

1. 聚合物以外的任何 PFAS 使用目標性分析 (Targeted analysis) 方法：25 ppb。
2. 降解聚合物以外的任何 PFAS 後，使用目標性分析總 PFAS：250 ppb。
3. 含聚合物的任何 PFAS：50 ppm。

必須注意的是，ECHA 沒有發布 PFAS 的標準分析方法，只有彙整能檢測不同環境介質與產品中 PFAS 的分析技術與來源，包含由 USEPA 研發的程序，並標示建議採取但不強制使用的方法。

4.5 在食品中污染物質之最大限量中增修 PFAS 標準

歐盟針對境內銷售的肉類、蛋類及魚類設定 PFAS 之最大限量 (Maximum levels)，已於 2023 年 1 月 1 日生效，彙整至表 7 [65]。然而，新的限制法規強度仍低於歐盟食品安全局 (EFSA) 於 2020 年針對食品中四種 PFAS 進行健康風險評估，所提交的安全閾值：PFOA、PFOS、PFNA 及 PFHxS 的每週容許攝取量 (Tolerable Weekly Intake, TWI) 為 4.4 ng/kg wet weight [43]。

表 7、歐盟針對食品中四種 PFAS 設定的最大限量

食品	最大限量 (µg/kg wet weight)				總量
	PFOS	PFOA	PFNA	PFHxS	
蛋。	1.0	0.30	0.70	0.30	1.7
不用於生產嬰幼兒食品之下列魚類肌肉：大西洋鯪、鯉魚、江鱈、黍鯪、歐洲川鱈、美首鱈、鰻魚、竹筴魚、白斑狗魚、歐洲鱈、沙丁魚、歐洲鱸、鮫魚、海七鰓鰻、丁鱈、歐白鮭、文第斯白鮭、銀巨口光魚、鮭魚、鱒魚以及狼魚。	7.0	1.0	2.5	0.20	8.0
不用於生產嬰幼兒食品之下列魚類肌肉：鯉魚、鮰、鱖、紅點鮭、鰻鱺、梭鱸、河鱸、湖擬鯉、香魚以及白鮭魚。	35	8.0	8.0	1.5	4.5
其餘魚類肌肉，以及用於嬰幼兒食品之所有魚類肌肉。	2.0	0.2	0.50	0.20	2.0
甲殼類動物。	3.0	0.70	1.0	1.5	5.0
牛、羊、豬及家禽的肉。	0.30	0.80	0.20	0.20	1.3
羊肉。	1.0	0.20	0.20	0.20	1.6
牛、羊、豬及家禽的內臟。	6.0	0.70	0.40	0.50	8.0
除熊肉以外的所有野生動物肉。	5.0	3.5	1.5	0.60	9.0
除熊內臟以外的所有野生動物內臟。	50	25	45	3.0	50



4.6 在飲用水指令中增修 PFAS 標準

歐盟於 2021 年決議通過飲用水指令修訂案，規定飲用水中總 PFAS 限值為 0.5 µg/L，並於 2023 年 1 月 13 日生效，歐盟成員國將應立法將該限制納入各國之飲用水法規。此處的總 PFAS 將 PFCAs 與 PFSA 從最短鏈的 C4 至長鏈的 C13 都納入定義，共 20 種 PFAS，詳見表 8 [66]。

表 8、歐盟飲用水指令對總 PFAS 定義的 20 種 PFAS

碳數	PFAS 種類	
	PFCAs	PFSA
C4	PFBA	PFBS
C5	PFPA	PFPS
C6	PFHxA	PFHxS
C7	PFHpA	PFHpS
C8	PFOA	PFOS
C9	PFNA	PFNS
C10	PFDA	PFDS
C11	全氟十一烷酸 (Perfluoroundecanoic acid, PFUnDA)	全氟十一烷磺酸 (Perfluoroundecane sulfonic acid)
C12	全氟十二烷酸 (Perfluorododecanoic acid, PFDoDA)	全氟十二烷磺酸 (Perfluorododecane sulfonic acid)
C13	全氟十三烷酸 (Perfluorotridecanoic acid, PFTrDA)	全氟十三烷磺酸 (Perfluorotridecane sulfonic acid)

第五章 美國的 PFAS 管理策略趨勢

5.1 2020 財政年度國防授權法


作為領銜製造 PFAS 的國家，美國州際技術和監管委員會 (Interstate Technology and Regulatory Council, ITRC) 認為 PFAS 的大量生產和商業化始於 1950 年代，彼時美國 3M 公司剛開始使用 ECF 方法製造 PFOA 與 PFOS；隨著 PFAS 的污染日趨嚴重，美國開始注意到 PFAS 的危害性與持久性。自 3M 公司與 USEPA 於 2000 年達成自願淘汰 PFOS 的協議後，雖然美國各部會陸續採取諸多 PFAS 研究與管理行動，但重點大多聚焦在 PFOA 與 PFOS，缺乏對 PFAS 全面性的管理策略，例如 USEPA 於 2006 年與 3M 公司、杜邦公司在內的 8 家 PFAS 製造商達成自願淘汰 PFOA 的協議 [67]。

2020 年以後美國 PFAS 的管理策略起源於 2019 年通過之 2020 財政年度國防授權法 (National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2020, NDAA Act 2020) [31][68]，國防部 (The Department of Defense, DoD) 每年都會藉由此法案編列 DoD 的軍事活動、軍事建設，以及能源部 (Department of Energy, DOE) 的國防活動之預算和支出。雖然目的如此，但美國國會經常會使用聖誕樹草案 (Christmas tree bill) 的方式，附加不見得與母法有關連的條款，提供各種好處給民間團體，附加條款在這種形式中，就像裝飾品一樣，被國會議員掛在聖誕樹上；因為美國總統只能否決整個法案，不能否決法案裡面的單一或多個條款，所以聖誕樹草案能藉此規避美國總統的法案否決權 [85]。

也就是說，NDAA Act 2020 能以此指示 DoD 以外的 USEPA 對 PFAS 展開管理行動來降低 PFAS 危害對美國造成風險，以下為 NDAA Act 2020 要求 DoD 與 USEPA 採取的重要行動：

1. DoD 應妥善處置含 PFAS 的 AFFF。
2. DoD 應共享 PFAS 等污染物的監測數據。



- 
3. DoD 應遵守環境應變補償和責任歸屬綜合法案 (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA) 與安全飲用水法 (The Safe Drinking Water Act, SDWA) 的規定，與各州合作解決 PFAS 污染問題。
 4. DoD 應藉由檢測軍事消防員的血液，來進行 PFAS 的暴露評估。
 5. USEPA 應依據 TSCA，要求製造商提交自 2011 年 1 月 1 日以後所有 PFAS 使用與排放的數據。
 6. USEPA 應依據 TSCA 發布長鏈 PFAS 的重大新用途規則 (Significant new use rules, SNUR)。
 7. USEPA 應依據緊急事故應變計畫與社區知權法 (Emergency Planning and Community Right-to-Know Act, EPCRA) 設立的有毒物質排放清單 (Toxics Release Inventory, TRI)，要求特定行業提交 PFAS 的排放、運輸及廢棄物管理報告，並將更多 PFAS 納入 TRI 報告的要求。
 8. USEPA 應依據資源保護與再生法 (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) 發布 PFAS 與含 PFAS 廢棄物的破壞與處置指南。
 9. USEPA 應著手 PFAS 的研究開發 (Research and development)，包含公開訊息、篩選毒性及暴露評估的優先級別、開發各種環境介質的分析方法、開發 PFAS 污染整治的方法，以及與利害關係人交流資訊。

必須注意的是，NDAA Act 2020 並沒有採納 OECD 對 PFAS 的定義，而是將 PFAS 定義為一種完全人造的化學品，可以是碳原子都全氟化，或是混合全氟化、部分氟化及非氟化的碳原子。

5.2 PFAS 策略路線圖

根據 NDAA Act 2020 的指示，USEPA 於 2021 年 10 月發布 PFAS 策略路線圖：USEPA 於 2021 年至 2024 年的行動承諾 (PFAS Strategic Roadmap: EPA's Commitments to Action 2021-2024) [31]，以研究 (Research)、嚴格 (Restrict) 及整治 (Remediate) 作為 PFAS 策略路線圖的中心指引，輔以 PFAS 的生命週期管理、源頭管理、追究污染責任、彌補技術與資訊缺口，以及保護弱勢族群等五大原則，執行為期三年的 PFAS 管理策略，USEPA 還承諾每年都會向公眾揭露年度執行進展與後續行動 [69]。以下為 PFAS 策略路線圖的中心指引與代表意義：

1. 研究：投資 PFAS 的科學研究來開發創新技術，制定結合科學的有效政策。
2. 嚴格：主動採取管理行動來全面地防止 PFAS 釋放到環境中。
3. 整治：擴展與加快 PFAS 的污染整治。

USEPA 管轄多種與化學品管理相關的環境法，例如淨水法 (Clean Water Act, CWA)、SDWA、未管制污染物監測規則 (Unregulated Contaminant Monitoring Rule, UCMR)、國家主要飲用水條例 (National Primary Drinking Water Regulation, NPDWR)、TSCA、SNUR、TRI、EPCRA、CERCLA、RCRA 及空氣清潔法 (Clean Air Act, CAA)，這些法律分別隸屬 USEPA 內部不同組織來管理。局長辦公室 (Office of the Administrator, AO) 負責協助局長管理行政業務，下轄組織可再分為總部組織 (Headquarters Offices) 和分區組織 (Regional Offices)，總部組織負責制定對應領域或污染物的法規、政策及行動方案，並基於法規推動與管理 PFAS 策略路線圖的行動計畫，有參與 PFAS 行動計畫的部門為水辦公室 (Office of Water, OW)、化學安全與污染預防辦公室 (Office of Chemical Safety and Pollution Prevention, OCSPP)、美國國土與緊急應變辦公室 (Office of Land and Emergency Management, OLEM)、空氣與輻射辦公室 (Office of Air and Radiation, OAR) 及研究與發展辦公室 (Office of Research and Development, ORD)；分區組織分為十個區域



辦公室，每一區的辦公室都要在各自負責的州內執行總部組織的計畫，在 PFAS 策略路線圖的角色亦是如此。USEPA 總部組織負責之環境法整理於表 9，USEPA 在 PFAS 策略路線圖中的組織架構與職責分工詳見圖 8 [86]。

表 9、USEPA 總部組織負責之環境法

總部組織	對應之環境法	對應職責
水辦公室 (OW)	淨水法 (CWA)	管理並預防水污染。範疇包含地表水、地下水及河川底泥，以此制定國家建議水質標準 (National Recommended Water Quality Criteria)、工業廢水排放標準 [70]，以及國家污染排放削減計畫 (National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES) 等 [87]。
	安全飲用水法 (SDWA)	管理飲用水安全。SDWA 規定 USEPA 每五年發布一次未管制污染物監測規則 (UCMR)，要求監測自來水系統中的新興污染物，並賦予 USEPA 對飲用水污染物制定國家主要飲用水條例 (NPDWR) 的權利，將該污染物成為常態飲用水監測的項目 [31]。
化學安全與污染預防辦公室 (OCSPP)	毒性物質管理法 (TSCA)	管理化學品進口和使用安全。TSCA 規定所有基於商業目的將新化學品進口至美國之業者，應於 90 天前提交製造前通知 (Premanufacture notice, PMN)，其中包含新化學品的化學特性、生產量、製程副產物、處置方法及危害數據等資訊 [88]，供 USEPA 風險評估委員會審查，通過審查的化學品便會被列在 TSCA 清單，稱為既有化學品。若 USEPA 認定某既有化學品之用途具有人類健康和環境危害之虞，得根據 TSCA 發布重大新用途規則 (SNUR)，欲使用此既有化學品展開既定用途之業者，必須提交重大新用途通知 (Significant new use notice, SNUN) 供 USEPA 重新審查 [93]，且 USEPA 有權否決業者的申請，或要求業者採取應對措施來降低風險後才能使用。

總部組織	對應之環境法	對應職責
	緊急事故應變計畫與社區知權法 (EPCRA)	管理化學品的儲存安全。根據 EPCRA 設立有毒物質排放清單 (TRI)，要求特定行業提交列在 TRI 中的化學品之排放、運輸及廢棄物管理報告，所有排放報告都會公開在 TRI 資料庫，讓社區居民、民間組織、研究人員及執政者能夠掌握特定場址排放到空氣、水和土壤的有毒化學品，包含名稱、數量、儲存位置及隨時間變化的趨勢 [89]。
美國國土與緊急應變辦公室 (OLEM)	環境應變補償和責任歸屬綜合法案 (OLEM)	CERCLA 係美國用於整治污染場址，以及要求潛在污染責任人支付整治費用的法案，若化學品被列為 CERCLA 的有害物質，USEPA 得要求全美的污染排放設施提交此類化學品的排放數據。該法案包含超級基金企業管理系統 (Superfund Enterprise Management system, SEMS) 管理受污染的超級基金 (Superfund) 場址之地點、污染物數據、整治進度、採取的整治技術及整治成本等資訊；另利用緊急應變通報系統 (Emergency Response Notification System, ERNS) 管理油污與有害物質意外洩漏的資料庫 [24]。
空氣與輻射辦公室 (OAR)	資源保護與再生法 (RCRA) 空氣清潔法 (CAA)	RCRA 係美國管理固體廢棄物與危險廢棄物的法案。 管理固定和移動空氣污染源的排放。CAA 賦予 USEPA 制定國家環境空氣質量標準 (National Ambient Air Quality Standards) 的權力 [90]。
研究與發展辦公室 (ORD)		研發用以定性與定量環境污染物的國家標準方法。

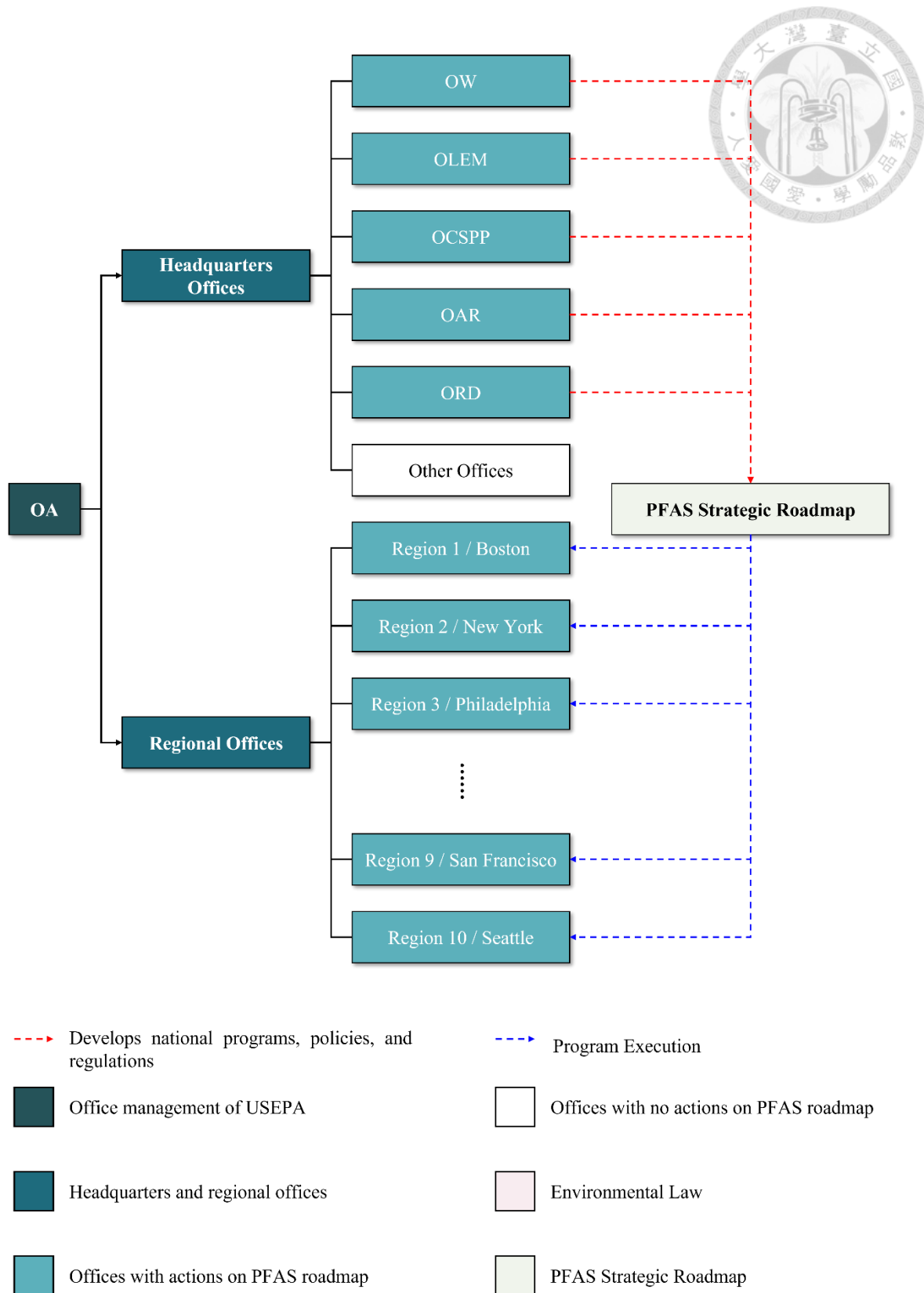


圖 8、USEPA 在 PFAS 策略路線圖中的組織架構與職責分工圖



本章節將分別整理 USEPA 總部組織各辦公室迄今的 PFAS 策略路線圖執行現況，並彙整至表 10 [31][69]。

1. 水辦公室 (OW)。

(1) 監測全美飲用水中的 PFAS。

按照 SDWA 規定，USEPA 每五年會發布一次未管制污染物監測規則 (UCMR)，要求監測自來水系統中的新興污染物。NDAA Act 2020 要求 USEPA 將 PFAS 納入 UCMR 5，以此掌握 PFAS 在美國飲用水中的污染現況。UCMR 5 最終於 2021 年 12 月通過，規定自 2023 年至 2025 年，每年應使用 EPA Method 533 與 537.1 檢測飲用水中的 29 種 PFAS 一次。


(2) 制定 PFAS 的國家主要飲用水條例 (NPDWR)。

SDWA 賦予 USEPA 對飲用水污染物制定 NPDWR 的權利，成為常態飲用水監測的項目。USEPA 於 2021 年 3 月將 PFOA 與 PFOS 正式列為 SDWA 的管制污染物進行控制，並於 2023 年 3 月發布 PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS、PFBS 及 GenX 六種 PFAS 的 NPDWR，目前正在公眾諮詢與審查程序。

(3) 發布 PFAS 的飲用水健康建議書 (Health Advisories)。

USEPA 按照 SDWA 的規定，能針對任何污染物編纂不具法律強制性的飲用水健康建議書，作為美國各部落、州及地方政府管理飲用水的參考依據。OW 將在 ORD 發布 PFBS 與 GenX 的毒性評估後，制定 PFBS 與 GenX 的健康建議書，並更新已於 2016 年發布的 PFOA 與 PFOS 之健康建議書。目前 USEPA 已於 2022 年 6 月發布 PFOA 與 PFOS 的臨時健康建議書與 PFBS 與 GenX 的健康建議書。

(4) 藉由排放限制指引 (Effluent Limitations Guidelines, ELGs) 限制 PFAS 的工業來源排放。



ELGs 係通過制定不同工業類別的廢水排放標準、排放監測，以及污染控制措施要求，在符合經濟效益的情況下，使工業污染最小化 [91]。PFAS 策略路線圖計畫將 PFAS 納入 ELGs 的排放標準，但目前 USEPA 並未完全掌握各個工業類別的 PFAS 排放資訊，仍在彌補資料缺口的階段。

(5) 借助 NPDES 的許可證制度來降低 PFAS 廢水與污水排放。

NPDES 的許可證制度規定污染排放源應遵守排放限制、排放監測及排放報告的要求 [87]，若借助 NPDES 管理 PFAS 的污染源，能以此降低廢水與污水中的 PFAS 排放，並協助 USEPA 獲得 PFAS 的排放數據，依照排放量的多寡，篩選出應該優先研究的工業類別，作為制定 ELGs 的 PFAS 排放標準。USEPA 首先將監測可能排放 PFAS 的場址，並將 PFAS 納入許可證要求的監測項目。

(6) 研發 40 種 PFAS 的分析方法。

按 NDAA Act 2020 的要求，USEPA 與 DoD 合作研究開發 PFAS 的分析方法，最終於 2022 年發布 Draft Method 1633 [71][72]，能夠針對污水、地表水、地下水、土壤、污泥、沉積物、垃圾滲濾液及魚肉組織等八種環境介質，分析多達 40 種 PFAS 的方法，目前已應用在 NPDES 的 PFAS 額外監測要求。雖然 Draft Method 1633 已通過單一實驗室內的認證 (IntraLab validation)，但至今仍未通過實驗室間的認證 (InterLab validation) [24]，因此無法證明 Draft Method 1633 在不同的實驗室也能維持一致的準確度 (Accuracy)、精確度 (Precision)、靈敏度及再現性，故尚未納入 CWA 規定的 PFAS 監測方法，致使將 PFAS 納入 NPDES 與 ELGs 的行動計畫也因此延宕。

(7) 更新飲用水的 PFAS 分析方法。

USEPA 現有之飲用水 PFAS 分析方法僅能分析 25 種 PFAS，為擴展未來 SDWA 列管的 PFAS 種類，USEPA 正在研發新的飲用水分析方法。



(8) 發布 PFAS 地表水質建議標準。

USEPA 預計藉由制定 PFAS 地表水質建議標準，協助部落及州政府管理各自轄區的 PFAS 排放；另外，USEPA 還預計發布 PFOA 與 PFOS 對人類健康和水生生物的建議標準，若其它 PFAS 的毒性評估發布，將以此擴大制定其它 PFAS 的人類健康建議界限 (Health advisory level, HAL)。

(9) 監測湖泊魚類組織的 PFAS 含量，以及評估人類暴露 PFAS 的生物標記 (Biomarker)。


有鑒於普通人的 PFAS 暴露主要來自食入受污染的飲用水與食物，加之 USEPA 迄今為止的監測研究指出，美國五大湖和河川中將近 100% 的魚類體內有含量不等的 PFAS，因此 USEPA 預計於 2022 年夏季對美國湖泊魚類組織首次進行 PFAS 監測，以此掌握自給漁民的 PFAS 暴露情況。另外，USEPA 分析美國衛生與公共服務部 (Department of Health and Human Services, HHS) 的疾病管制中心 (The Centers for Disease Control and Prevention, CDC) 每兩年對具有代表性的 2000 名美國人展開之國家健康營養調查 (National Health and Nutrition Examination Survey, NHANES) 結果，發現吃魚與否會影響到人體血液中的 PFAS 濃度變化，可能為 PFAS 暴露的生物標記之一，目前正在持續研究。

(10) 完成污泥中 PFOA 與 PFOS 的風險評估。

CWA 允許無害處理過的污泥作為高爾夫球場鋪面、自家花園及農業堆肥等用途，但考慮到污泥可能同樣含有 PFAS，故 USEPA 正在對污泥中 PFOA 與 PFOS 進行風險評估，未來將依據風險評估的結果，決定是否設定污泥的 PFAS 法規限值、監測及報告要求，避免污泥再利用造成人類健康與環境的危害。

2. 化學安全與污染預防辦公室 (OCSPP)。

(1) 制定 PFAS 國家試驗策略 (Testing strategy)。



由於目前 PFOA 與 PFOS 以外的 PFAS 對人類健康和環境的毒性數據缺乏，無法有效地篩選管理 PFAS 的優先層級；為彌補資料缺口，USEPA 遂於 2021 年發布 PFAS 國家試驗策略，依據 TSCA 要求 PFAS 製造商提供 PFAS 所需資訊與 PFAS 國家試驗策略的研究資金。

- (2) 對尚未列入 TSCA 清單的 PFAS 取消低量豁免 (Low-volume exemptions, LVEs)。

TSCA 是美國化學品管理的重要法案，只有通過 TSCA 審查的化學品會被列在 TSCA 清單，以下稱為既有化學品；尚未列入 TSCA 清單的化學品，以下稱為新化學品；尚未列入 TSCA 清單的 PFAS，以下稱為新 PFAS。按照 TSCA 規定，所有基於商業目的往美國進口新化學品的業者，應於 90 天前提交製造前通知 (PMN)，其中包含新化學品的化學特性、生產量、製程副產物、處置方法及危害數據等資訊 [88]，供 USEPA 風險評估委員會審查，通過審查的化學品便會被列在 TSCA 清單；若新化學品每年生產量少於 1 萬公斤，便可享有 LVEs [92]，只要通過 30 天的快速審查就能進入市場。為避免更多新 PFAS 使用 LVEs 的方式逃脫嚴格的 PMN 審查，USEPA 於 2021 年宣布將嚴格執行 PFAS 的 PMN 審查。

- (3) 避免已停止使用之 PFAS 開啟新的用途。

已經被列於 TSCA 清單的 PFAS，以下稱既有 PFAS。雖然目前許多既有 PFAS 已經停止製造和生產，但是在 2016 年 TSCA 修法之前，就列入 TSCA 清單的既有 PFAS，基於法律的不溯及既往原則，不受 TSCA 的任何限制，因而導致業者能自由地重新開始使用。USEPA 正在考慮如何避免既有 PFAS 開啟新的用途或重拾舊途，其中一個可行的方法是利用重大新用途規則 (SNUR)。按照 TSCA 的規定，USEPA 有權對既有 PFAS 之新用途發布 SNUR，若業者打算使用既有 PFAS 展開此類用途，必須提交重大新用途通知 (SNUN) 供 USEPA 重新審查 PFAS 對人類健康和環境



的危害風險 [93]，USEPA 有權否決業者的申請，或要求業者採取應對措施來降低風險後才能使用。

(4) 重新檢視已通過 TSCA 審查的既有 PFAS。

USEPA 考慮到過去對 PFAS 的應對措施有疏漏之虞，開始重新檢視審查過的既有 PFAS，並決定展開多項補救計畫。USEPA 自 2021 年起，鼓勵過去已通過 LVEs 的既有 PFAS 製造商自願退出，並重新提交 PMN 給 USEPA 審查。另外，USEPA 已針對現有 PFAS 的部分應用，提出 SNUR，只有在 USEPA 確定製程安全無虞，業者才能開啟 PFAS 的新用途。

(5) 取消 PFAS 在 TRI 報告的微量豁免 (de minimis eligibility)。

TRI 係依據 EPCRA 設立，某些行業必須向 USEPA 提交所有列在 TRI 內之化學品的年度排放、運輸及廢棄物管理報告，所有排放報告都會公開在 TRI 資料庫，讓社區居民、民間組織、研究人員及執政者能夠掌握特定場址排放到空氣、水和土壤的有毒化學品，包含名稱、數量、儲存位置及隨時間變化的趨勢 [89]。NDAA Act 2020 指示 USEPA 應利用 TRI 要求特定行業提交 PFAS 的排放、運輸及廢棄物管理報告，但許多行業基於 PFAS 在 TRI 報告的微量豁免，毋須提交 PFAS 的 TRI 報告，致使 USEPA 只能獲得有限的 PFAS 排放、運輸、儲存及處置數據，故 USEPA 計畫將 TRI 的 PFAS 歸類為特別關注化學品 (Chemicals of Special Concern)，並取消所有特別關注化學品的微量豁免；另外，USEPA 還計畫將更多種類的 PFAS 納入 TRI。

(6) 盤查 2011 年以後之 PFAS 使用與排放數據。

NDAA Act 2020 指示 USEPA 應依據 TSCA，要求製造商提交自 2023 年 1 月 1 日起所有 PFAS 使用與排放的數據，作為制定法規的參考依據。

4. 美國國土與緊急應變辦公室 (OLEM)。



- (1) 提議將部分 PFAS 列為 CERCLA 有害物質。

CERCLA 係美國用於整治污染場址，以及要求潛在污染責任人支付整治費用的法案，若化學品被列為 CERCLA 的有害物質，USEPA 得要求全美污染排放設施提交此類化學品的排放數據。為了提升 PFAS 污染排放的透明性，並使 PFAS 污染者負責整治費用，USEPA 於 2022 年 9 月提案將 PFOA 與 PFOS 列為 CERCLA 有害物質；2022 年 5 月，USEPA 更進一步將 PFOA、PFOS、PFHxS、PFNA 及 GenX 納入整治污染場址時，用來評估化學品對人類健康與環境危害層級的風險優先清單 (Risk-Based Priority List, RBPL)，以此決定優先整治的區域和資源分配。

- (2) 發布 PFAS 與含 PFAS 廢棄物的破壞與處置指南。

RCRA 是美國管理固體廢棄物與危險廢棄物的法案，NDAA Act 2020 指示 USEPA 依據 RCRA 發布 PFAS 與含 PFAS 廢棄物的破壞與處置指南，過渡指南已於 2020 年 12 月提交，目前仍在制定階段。

5. 空氣與輻射辦公室 (OAR)。

- (1) 奠定空氣中 PFAS 分析的技術基礎。

迄今為止，PFAS 尚未被因為 USEPA 尚未確定 PFAS 的空氣排放源、對 PFAS 在空氣中的環境宿命與移動機制仍一知半解；另外，USEPA 在缺乏符合成本效益的緩解技術與充分認證的分析方法之情況下，無法將 PFAS 列為 CAA 的有害空氣污染物 (Hazardous air pollutants, HAPs) 來管理，因此奠定空氣中 PFAS 分析的技術基礎是目前當務之急。

6. 研究與發展辦公室 (ORD)。

- (1) 發布 Gen X、PFBA、PFHxA、PFHxS、PFNA 和 PFDA 的毒性評估。

USEPA 對 PFOA 與 PFOS 以外的 PFAS 缺乏足夠的科學認知，因此規劃評估 C8 以外的其它 PFAS 的毒性危害，以提升對 PFAS 的科學認知。

Gex X 的毒性評估已於 2021 年 10 月發布，其它 PFAS 的毒性評估仍在整合風險資訊系統 (Integrated Risk Information System, IRIS) 內進行評估。

(2) 研發與認證分析環境中 PFAS 的方法。

USEPA 目前已開發的檢測技術，都是使用高效液相層析串聯質譜儀 (Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry, LC/MS/MS) 來分析不同環境介質中的 PFAS，但是至今仍只有 EPA Method 533、EPA Method 537.1、Method 8327、SW-846 Test Method 8327 與 SW-846 Test Method 3512 通過實驗室內與實驗室間認證 [24]，代表 PFAS 的分析方法中，只有飲用水、地下水、地表水及污水四種環境介質，具有國家標準的分析方法，能夠納入 USEPA 的環境法內，作為執法與監管的依據。其他環境介質的檢測技術仍缺乏充分的認證，可能會阻礙管理 PFAS 的行動，故必須持續研發與認證分析環境中 PFAS 的方法。

表 10、USEPA 各辦公室在 PFAS 策略路線圖的行動計畫彙整表

辦公室	計畫內容	相關法案/ 法規/計畫	執行現況
OW	監測全美飲用水中的 PFAS，以此掌握 PFAS 在美國飲用水中的污染現況。	SDWA, UCMR	UCMR 5 已於 2021 年 12 月通過，規定自 2023 年至 2025 年，每年應使用 LC/MS/MS 檢測飲用水中的 29 種 PFAS 一次。
	制定 PFAS 的 NPDWR，常態監測飲用水中的 PFAS。	SDWA, NPDWR	PFOA 與 PFOS 於 2021 年 3 月正式列為 SDWA 的管制污染物；於 2023 年 3 月發布 PFOA、PFOS、PFNA、PFHxS、PFBS 及 GenX 六種 PFAS 的 NPDWR，目前正在公眾諮詢與審查程序。
	發布飲用水的 PFAS 健康建議書，作為地方政府管理飲用水的參考依據。	SDWA	於 2022 年 6 月發布 PFOA 與 PFOS 的臨時健康建議書與 PFBS 與 GexX 的健康建議書。
	藉由 ELGs 限制 PFAS 的工業來源排放。	CWA	目前仍未掌握各個工業類別的 PFAS 排放資訊，仍在彌補資料缺口的階段。
	借助 NPDES 的許可證制度來降低 PFAS 廢水與污水排放。	CWA	目前尚未發布許可證的 PFAS 監測指引，因為能夠用於監測 PFAS 的 Draft Method 1633 尚未通過實驗室間的驗證。
	與 DoD 合作研發出能在八個環境介質中分析 40 種 PFAS 的方法，稱為方法草案 1633，目前已應用在 NPDES 的 PFAS 額外監測要求。	CWA	Draft Method 1633 至今仍未通過實驗室間的認證，無法正式納入 CWA 規定的 PFAS 監測方法，故將 PFAS 納入 NPDES 與 ELGs 的行動計畫也因此延宕。
	更新飲用水的 PFAS 分析方法，增加可分析的 PFAS，以擴大 SDWA 列管的 PFAS 種類，	SDWA	仍在研發階段。
	發布 PFAS 地表水質、人類健康和水生生物的建議標準，以此協助地方政府管理轄區內的 PFAS 排放。	CWA	PFOA 與 PFOS 的地表水質建議標準草案已於 2022 年 4 月發布。
監測湖泊魚類組織的 PFAS 含量，以此掌握自給漁民的 PFAS 暴露情況，並評估人類暴露 PFAS 的生物標記。	CWA	仍在調查階段。	



辦公室	計畫內容	相關法案/ 法規/計畫	執行現況
	對污泥中 PFOA 與 PFOS 進行風險評估，以避免污泥再利用造成人類健康與環境的危害。	CWA	仍在評估階段。
OCSPP	藉由制定 PFAS 國家試驗策略，篩選管理 PFAS 的優先層級。	TSCA	於 2021 年發布 PFAS 國家試驗策略。
	避免新 PFAS 使用 LVEs 的方式逃脫嚴格的 PMN 審查。	TSCA	於 2021 年宣布將嚴格執行 PFAS 的 PMN 審查。
	USEPA 正在考慮如何使用 SNUR 來避免既有 PFAS 開啟新的用途或重拾舊途。	TSCA, SNUR	仍在制定階段。
	考慮到過去對 PFAS 的應對措施可能疏漏之虞，USEPA 重新檢視已通過 TSCA 審查的既有 PFAS，並決定展開多項補救計畫。例如鼓勵自願退出已通過的 LVEs、發布 SNUR 來重新審查危害風險。	TSCA, SNUR	於 2021 年呼籲 PFAS 製造商自願退出 LVEs。
	許多行業基於 PFAS 在 TRI 報告的微量豁免，毋須提交 PFAS 的 TRI 報告，故 USEPA 計畫將 TRI 的 PFAS 歸類為特別關注化學品，並取消所有特別關注化學品的微量豁免。	EPCRA	仍在制定階段。
	基於 TSCA 要求製造商提交 2011 年以後之 PFAS 使用與排放數據，作為制定法規的參考依據。	TSCA	仍在公眾諮詢與評估階段。
OLEM	提議將 PFAS 列為 CERCLA 有害物質有助於提升 PFAS 污染排放的透明性，並使 PFAS 污染者負責整治費用。	CERCLA	於 2022 年 9 月提案將 PFOA 與 PFOS 列為 CERCLA 有害物質，目前仍在評估階段；2022 年 5 月，USEPA 將 PFOA、PFOS、PFHxS、PFNA 及 GenX 納入 RBPL。
	發布 PFAS 與含 PFAS 廢棄物的破壞與處置指南。	RCRA	仍在制定階段。

辦公室	計畫內容	相關法案/ 法規/計畫	執行現況
OAR	在缺乏能用的緩解技術和分析方法的情況下，USEPA 無法將 PFAS 納入 CAA 管理，因此奠定空氣中 PFAS 分析的技術基礎是目前當務之急。	CAA	仍在努力階段。
ORD	發布 Gen X、PFBA、PFHxA、PFHxS、PFNA 和 PFDA 的毒性評估，提升對 PFAS 毒性危害的認知。	IRIS	Gex X 的毒性評估已於 2021 年 10 月發布，其它 PFAS 的毒性評估仍在評估階段。
	PFAS 的分析方法中，只有飲用水、地下水、地表水及污水四種環境介質，具有國家標準的分析方法，其他環境介質的檢測技術仍缺乏充分的認證，可能會阻礙管理 PFAS 的行動，因此必須持續研發與認證分析環境中 PFAS 的方法	CWA	於 2018 年及 2019 年發布 EPA Method 537.1 與 EPA Method 533；於 2022 年發布 SW-846 Test Method 8327 及 SW-846 Test Method 3512。



除了上述由 USEPA 總部組織的辦公室執行的行動計畫，PFAS 策略路線圖還執行多項跨部門 (Cross-Program) 的行動計畫。此類行動必須仰賴總部組織、分區組織，甚至其它部會共同完成。以下為 PFAS 的跨部門合作計畫 [24][31]：

1. 調查受 PFAS 污染地區居民的生活衝擊。

USEPA 計畫與美國各州所有受 PFAS 污染所影響地區的居民接觸，調查他們經歷的生活衝擊，以此制定合適的應對措施與維護環境正義。至 PFAS 策略路線圖發布的一年間，USEPA 的區域辦公室已舉行多次公眾座談與網路研討會。

2. PFAS 污染的流布調查與數據蒐集。

USEPA 將借助環境法來執行 PFAS 污染的流布調查與數據蒐集，盤查國內所有 PFAS 的污染來源與數量，並依法要求污染責任人提交 PFAS 的危害、暴露及排放數據。



3. 建立 PFAS 國家資料庫。

USEPA 計畫使用線上法規遵循歷史資料庫 (Enforcement and Compliance History Online, ECHO) 統整 PFAS 的流布調查與數據蒐集所取得的所有資訊，建立公開透明的 PFAS 國家資料庫，促進執政者、研究員及公眾的資訊交流能力。ECHO 的 PFAS 的資料分為四類來源：受 PFAS 污染的地區、飲用水監測數據、環境監測數據及 PFAS 使用數據，如圖 9 所示。以下為四類 PFAS 資料涵蓋的來源與可能的資料缺口。

(1) 受 PFAS 污染的地區。

A. CERCLA 利用超級基金企業管理系統 (SEMS) 管理受 PFAS 污染的超級基金 (Superfund) 場址之地點、污染物數據、整治進度、採取的整治技術及整治成本等資訊。

B. CERCLA 利用緊急應變通報系統 (ERNS) 管理油污與有害物質意外洩漏的資料庫，包含意外洩漏的 PFAS 資料與數據。

C. DoD 根據 NDAA Act 2020 的指示，調查受到 PFAS 污染的軍事場址與含水層，並展開整治行動。目前尚未有特定的系統管理 DoD 的整治地點、污染物數據、整治進度、採取的整治技術及整治成本等資料。

(2) 飲用水監測數據。

A. 基於美國幅員廣袤，偏遠地區居民的飲用水來源大多是私井 (Private wells)，然 USEPA 不對私井進行監管，私井的擁有者必須自行負責飲用水的安全性；研究指出，美國估計至少超過 2300 萬家戶使用私井，致使 PFAS 污染現況形成巨大的資料缺口。

B. SDWA 利用 UCMR 對公共給水系統 (Public Water Systems, PWS) 進行監測，預計 UCMR 5 的 PFAS 監測數據將上傳至 PFAS 國家資料庫。

(3) 環境監測數據。

A. 目前缺乏污泥與 PFAS 污染的超級基金場址周圍環境介質之監測資料。



B. 利用 USEPA 與隸屬於內政部 (Department of the Interior, DOI) 的美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 管理與維護之水質網 (Water Quality Portal, WQP)，彙整對空氣、土壤、沉積物、地下水、地表水及生物群等環境介質的 PFAS 監測資料。

C. 利用 HHS 下的 ATSDR 彙整美國各州的普通居民血液與組織之 PFAS 含量。

(4) PFAS 使用數據。

A. EPCRA 利用 TRI 彙整 PFAS 使用者的排放、儲存、運輸及廢棄物管理資料。

B. CWA 利用 NPDES 的排放監測報告 (Discharge Monitoring Report, DMR) 蒐集 PFAS 之使用與排放資料。

C. TSCA 利用化學數據報告 (Chemical Data Reporting, CDR) 蒐集 PFAS 的生產與進口資料。

D. RCRA 利用 RCRA 資訊系統彙整合 PFAS 廢棄物的管理資料。

4. 建立 PFAS 自我管制計畫。

除了制定法律強制性的管理措施，USEPA 還將額外建立自我管制計畫，呼籲各行各業自願性減少 PFAS 的製造、使用及排放。PFAS 策略路線圖最新的年度進展報告中，USEPA 將 HHS 的食品藥物管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 於 2020 年和部分 FCM 業者達成自願性逐步淘汰 PFAS 的協議 [94]，作為其它美國部會的 PFAS 管理成果範例。

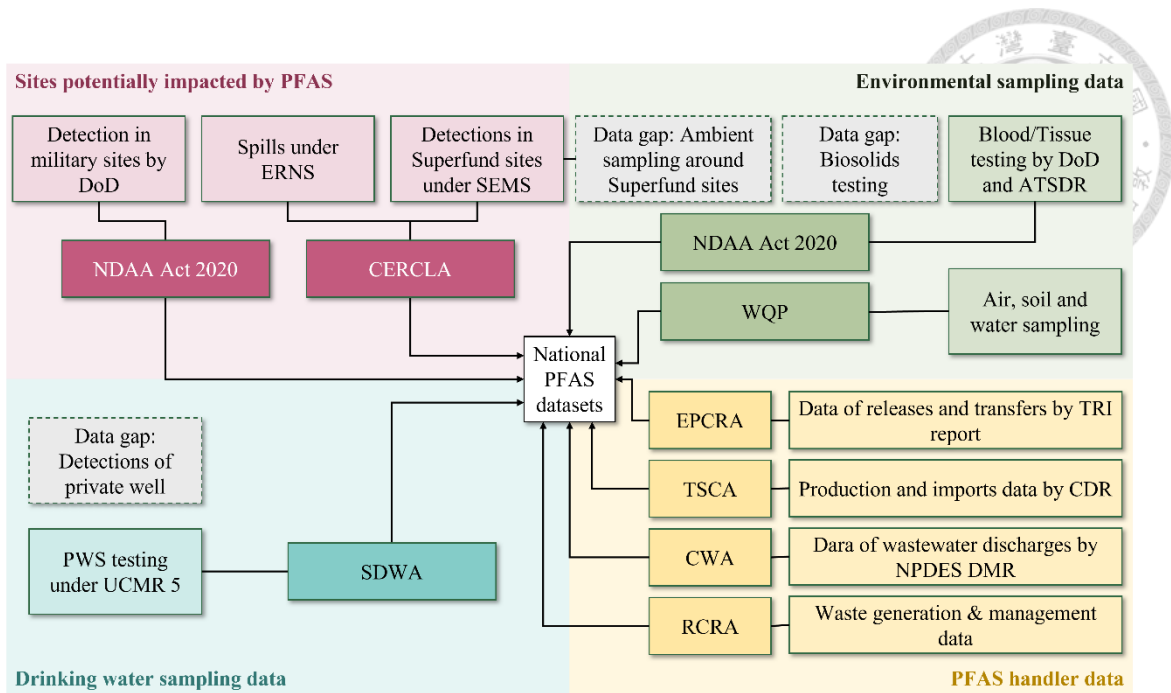


圖 9、PFAS 國家資料庫涵蓋的數據來源與可能的資料缺口之示意圖

第六章 結果與討論



6.1 綜合比較聯合國、歐盟及美國對 PFAS 的管理作為

為綜合比較聯合國、歐盟及美國對 PFAS 的管理作法，本研究將分別對源頭禁用/限用、環境監測，以及健康建議/法規限值，進行綜合比較。

1. 源頭禁用或限用：本研究將此管理作法聚焦在 AFFF、農藥、FCM 及紡織品等四種國際上優先關注的 PFAS 應用領域。聯合國的斯德哥爾摩公約在四種應用領域中，針對 PFOA、PFOS 及 PFHxS 均有源頭禁用或限用之規定；歐盟委員會正在由風險評估委員會 (RAC) 與社會經濟分析委員會 (SEAC) 審核來自 ECHA、德國、丹麥、荷蘭、挪威及瑞典提交的 PFAS 所有用途之限制提案；TSCA 作為美國管理化學品最重要的法案之一，目前已採取諸多作為，從源頭禁用或限制既有 PFAS 和新 PFAS 的使用。
2. 環境監測：本研究將此管理作法的環境介質聚焦在飲用水、地表水/地下水，以及空氣。聯合國的斯德哥爾摩公約為評估管理成效，制定 PFAS 的全球監測計畫，根據環境介質中 PFAS 濃度的趨勢變化，來衡量締約國的執行進展 [73][74]；歐盟綠色新政的化學品永續發展策略 (CSS) 將 PFAS 的環境監測作為解決 PFAS 問題的關鍵行動 [28]，然尚未提出具體策略及可行的分析方法；USEPA 根據 PFAS 策略路線圖對飲用水、地表水/地下水中的 PFAS 進行環境監測，但迄今未有分析空氣中 PFAS 的國家標準方法。
3. 健康建議或法規限值：聯合國已規劃由 WHO 制定 PFAS 的飲用水建議標準，但迄今仍未公布 [95]；歐盟已通過飲用水指令修訂案，設定總 PFAS 的法規限值，並針對歐盟境內銷售的肉類、蛋類及魚類等食品設定 PFAS 之法規最大限量；美國根據 PFAS 策略路線圖，已將 PFOA 和 PFOS 列為 SDWA 的管制污染物，設定飲用水的法規限值，並計畫發布多種 PFAS 的飲用水健康建議書和地表水質建議標準。

表 11、綜合比較聯合國、歐盟及美國對 PFAS 的管理作為

管理作為	聯合國	歐盟	美國
AFFF	√	√	√
源頭禁用/限用			
農藥	√	√	√
FCM	√	√	√
紡織品	√	√	√
環境監測			
飲用水	√	×	√
地表/地下水	√	×	√
空氣	√	×	×
健康建議/法規			
環境介質	√	√	√
限值			
食品	×	√	×

√：已有實際的管理作為或審議中之草案。

×：未有實際管理作為或審議中之草案。

6.2 綜合比較聯合國、歐盟及美國在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之挑戰

1. 聯合國在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之挑戰：

作為國際層面最重要的 PFAS 管理平台，斯德哥爾摩公約管理 PFAS 的方式，種大地影響政府和企業制定管理策略與挹注資源的方向，以此衍生一系列的問題，成為阻礙化學品與廢棄物健全管理的目標。

聯合國在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之最大挑戰，首當其衝的是科學研究的知識缺口 [26]，現今對大部分 PFAS 知之甚少，肇因於研究方向極大偏重在公約列管的三種 PFAS；當執政者缺乏其餘 PFAS 的危害認知與科學基礎，將難以制定合適的管理策略，包含 PFAS 的健康準則含量與法規限值。因為化學品的健康準則含量是根據健康風險評估之結果來制定，而法規限值則是考量健康準則含量、分析技術的偵測極限以及管理成本，這些都無法在缺乏科學知識的情況下推動。另外，PFAS 不是單一的化學品，而是一

族種類繁多的化學品，根據不同的定義方法，可能涵蓋上萬種化學品；斯德哥爾摩公約對 PFAS 的分類方式，將導致業者轉而尋求非公約列管的 PFAS 作為替代品。最典型的例子是 PFHxS，公約於 2020 年基於其危害性與被作為 PFOS 的錯誤替代品等原因，納入附件 A 列管。

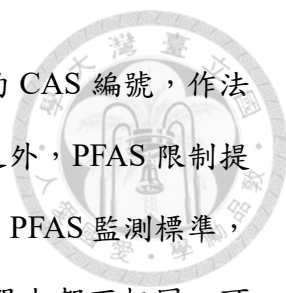
不僅如此，雖然公約列管的三種 PFAS 涵蓋上百種化學品，但所有締約國都能向公約提交生產或使用的豁免申請，還能就特殊情況延長豁免期限 [54]，雖然此規定考慮到開發中國家和先進國家有不同的化學品管理量能，承受經濟衝擊的能力也不同，但 PFAS 的污染問題已刻不容緩。UNEP 在關注議題的評估報告中，建議採取必要用途的概念來篩選管理 PFAS 的優先層級，只有在用途對社會和經濟至關重要的情況下，此類 PFAS 才能享有較長的豁免期，管理資源能因此先行集中在非必要用途之替代品開發。最典型的例子是 PFAS 在藥品與醫療器材的應用，目前此類用途都沒有研發替代品，這是因為此類應用屬於必要用途，不需要為此研發成效較差的替代品。

最後，關注議題的評估報告還點出斯德哥爾摩公約執行的成效不足，即使公約點名列管某項 PFAS，各國管理量能的差異會導致應對行動參差不齊，當國際的管理步調不一致，持久性的 PFAS 會不斷地從管理不足的污染源排放到環境中，從此地傳輸至彼地，最終所有地區都無法倖免於難。

2. 歐盟在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之挑戰：

雖然綠色新政野心勃勃地宣稱，歐盟希望成為國際應對環境變遷的領導者，但在 PFAS 的管理策略與執行所上，歐盟仍沒有足夠的經驗應對數量如此龐大的污染物。歐盟所面臨的挑戰源於針對 PFAS 的所有用途提出之限制提案，是採取 OECD 於 2021 年提出的 PFAS 定義。事實上，OECD 早在下文指出，此定義過於廣義、極為籠統，OECD 無意將其應用於管理目的 [34]。

雖然 PFAS 限制提案仍在審核階段 [78][79]，暫時無法觀察到此定義能否在 REACH 法規內順利執行，且此定義或許可以遏止業者開發新的 PFAS 來




規避禁令，但 REACH 法規過往限制的化學品，都有明確的 CAS 編號，作法與定義籠統的 PFAS 限制提案大相逕庭，更添疑慮。除此之外，PFAS 限制提案禁止任何 PFAS 的所有用途，但並未提供所有限制用途的 PFAS 監測標準，加之具有標準方法的應用只能分析特定的 PFAS，偵測極限也都不相同，可能因此阻礙監管程序。

最重要的是，雖然 PFAS 限制提案使用落日條款 (Sunset clause) 結合必要用途的精神，但從斯德哥爾摩公約衍生之研究空白 (Gaps in research)，致使 PFAS 替代品的資訊極為缺乏，如何制定合理的緩衝期與排除期，是歐盟在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之最大挑戰。

3. 美國在 PFAS 的管理策略與執行所面臨之挑戰：

在 PFAS 的定義方式上，NDAA Act 2020 採用的 PFAS 定義，比 OECD 於 2021 年提出的定義還要寬鬆、涵蓋的 PFAS 數目更多，顯示美國亟欲消除所有 PFAS 的雄心壯志；但 USEPA 依據 TSCA，可以自由採取不同的 PFAS 定義，並按照需求調整 [24]，也就是說，USEPA 仍在研究與開發更妥善的 PFAS 分類方式，在合適的分類研發出來前，將滾動式調整對 PFAS 的管理方式。自 3M 公司於 2000 年與 USEPA 達成自願性淘汰協議以來 [76]，美國在立法管理 PFAS 的策略上，經常輔以非強制性的自我管制政策，可以說是比落日條款擁有更長的時限，在法律強制性的管制政策 (Regulatory policy) 生效前，業者通過悉知政府對 PFAS 的態度與預計採取的管理策略，以此提前從內部尋求合適的替代品。

另外，美國還擔負研發與認證國家標準的分析方法之責任，只有在確定分析方法具備準確度、精確度、靈敏度及再現性等要求，政府才會將其納入法律明定的國家標準。在國家標準研發與認證成功前，政府將輔以自我管制政策，要求特定產業別率先採取行動，例如 USEPA 呼籲業者自願性放棄 LVEs 與在 CDR、DMR 及 TRI 報告內主動加入 PFAS 的數據 [31]。



也就是說，美國在 PFAS 的管理策略與執行所面臨的挑戰在於自我管制政策的成效。因為有能力主動參與自我管制政策的業者，通常侷限在大型企業，其它中小型企業礙於經濟成本考量，可能會拒絕承擔自我管制政策的責任義務，以此耽誤非 PFAS 替代品的研發進展。


6.3 初步建議我國的 PFAS 管理策略

根據聯合國、歐盟及美國的 PFAS 管理策略之研究結果，本研究參考 SAICM beyond 2020 制定的化學品與廢棄物管理的策略目標 [60]，對我國 PFAS 管理策略的初步建議如下：

1. 以必要用途為核心精神，制定階段式、滾動式的 PFAS 管理策略。

第一條建議對應 SAICM beyond 2020 的子目標 C1：對已知關注議題建立及實施能降低危害的管理策略與行動計畫，應規劃對應的期程。雖然我國立法院於 2023 年 5 月 9 日三讀通過環境部組織法，行政院環境保護署將升格為環境部，現有的毒物及化學物質局則升格為化學物質管理署 [90]，但在化學品管理量能上，短期內仍不足以全面管理種類繁多的 PFAS，因此採取階段式、滾動式的管理策略，制定相應的計畫期程，並納入必要用途的核心精神，是我國管理 PFAS 策略之可行方向。

我國可以將 PFAS 的管理策略分為短、中和長期計畫，短期計畫應先開始盤查國內 PFAS 的使用現況與調查環境流布，包含監測國民血液中的 PFAS 含量，並參考斯德哥爾摩公約、歐盟及美國等先進國家的 PFAS 管理策略，因應國情差異截長補短，制定與實施我國初步的 PFAS 管理策略，例如環檢所已參考美國的 Method 533 和 Method 537.1 制定水中全氟與多氟化合物檢測方法—液相層析串聯式質譜儀法 [2] 與土壤中全氟與多氟化合物檢測方法—液相層析串聯式質譜儀法 [3]；中期計畫的期程應設定在 PFAS 盤查與流布調查結束後開始，並篩選應優先管理之 PFAS 層級，制定對應的法規限值、輔



導業者研發 PFAS 替代品，並制定完整的監管法律框架，統整至公開、透明的 PFAS 國家資料庫；長期計畫可以將期程設定在必要用途以外的多數 PFAS 用途已研發出可行的替代品，並集中將資源挹注在必要用途的替代品上，以達到全面淘汰 PFAS 的終極目標。

2. 採納 OECD 於 2021 年對 PFAS 的定義，在研發出更合適的分類策略前，給與各部會彈性定義 PFAS 的自由。

第二條建議沒有對應 SAICM beyond 2020 的策略目標。雖然 OECD 明確指出 2021 年的定義並不是設計來應用在法律框架，但是 PFAS 至今仍沒有統一的定義標準，OECD 於 2021 年的定義仍然是迄今最具指標性的參考定義，故建議我國採納此定義，一方面能表明政府的立場，亦即終將全面淘汰 PFAS 的終極目標，另一方面能防止業者開發新的 PFAS 作為替代品。另外，我國應持續研析國際管理 PFAS 的策略趨勢，制定可行的 PFAS 分類策略，在此之前，應參考美國 TSCA 的作法，修法給予各部會彈性定義 PFAS 的自由，來制定與實施行動計畫。

3. 盤查我國 PFAS 的製造、使用、儲存及排放等數據，調查 PFAS 在我國的環境流布，並統整至公開、透明的國家 PFAS 資料庫。

第三條建議大致對應 SAICM beyond 2020 的子目標 B3：盤查並建置全球化學品的生產與排放數據包含人體、生物體及環境介質中的流布並制定一致的研究流程使不同來源的化學品數據維持可靠性。為篩選管理 PFAS 的優先層級，應考量各種 PFAS 的危害性與污染現況，在危害性的部分，我國的化學品管理量能雖然不足以針對大量的 PFAS 種類都發布國家級的健康風險評估，但可以藉由參考國際的研究資料，進一步了解各個 PFAS 對人類健康與環境的影響；不過，政府無法在沒有掌握各種 PFAS 的污染現況下，篩選出應該優先管理的 PFAS 種類，因此我國 PFAS 管理策略應首先盤查我國 PFAS 的製造、使用、儲存及排放等數據，並調查我國 PFAS 的環境流布，政府不




僅能根據 PFAS 盤查與流布調查的結果，綜合排序出危害性最高、用量最大及污染最嚴重的 PFAS 種類，還能就污染現況，決定在 PFAS 污染整治投入多少比例的資源。

另外，所有 PFAS 盤查與流布調查的資料應能自動化上傳至公開、透明的國家 PFAS 資料庫，政府得以將盤查資料與環境流布的變化趨勢，作為衡量 PFAS 管理策略的執行成果之指標。舉例來說，若能證明人體血液中的 PFAS 含量變化，能作為 PFAS 暴露的生物標記，就能根據國民血液的 PFAS 變化趨勢，衡量特定 PFAS 暴露來源的管理成效。

4. 為中小型提供獎勵誘因與技術援助。

第四條建議大致對應 SAICM beyond 2020 的策略目標 D：在產品價值鏈中建置安全替代、創新及永續的管理策略以增進人類和環境的福祉、預防及降低風險。自我管制政策被 SAICM 認為是 PFAS 管理中，重要的策略之一，甚至 SAICM 本身就是由 UNEP 建立的自願性政治框架，指引各國達成化學品與廢棄物的健全管理。自我管制政策雖然在美國管理 PFAS 的策略趨勢中頗為重要，3M 公司於 2000 年達成的自願性淘汰協議也是推動國際 PFAS 管理的關鍵契機，此類由大企業領導的自我管制政策可謂實例之典範；但是經濟部於 2022 年發布的中小企業白皮書之統計結果顯示 [4]，我國中小企業於 2021 年占全體企業組成的 98% 以上，其中有 18% 為工業類別，根據中小企業發展條例 [7]，中小企業被定義為實收資本額在新臺幣一億元以下，或經常僱用員工數未滿二百人之事業，因此可以合理推測，大部分的中小企業基於經濟成本的考量，應該會拒絕參與自我管制政策，甚至無法獨自研發 PFAS 替代品。有鑒於此，政府應提供相應的獎勵誘因與技術援助，促使中小企業主動尋求非 PFAS 替代品。在獎勵誘因的部分，簡易規劃如下 [8]：

1. 計畫目的：促進綠色永續化學與清潔生產，鼓勵企業實施 PFAS 替代方案，降低 PFAS 的使用量。

- 
2. 獎勵對象：通過我國 PFAS 盤查的結果，統計出各產業之 PFAS 使用量，並制定產業有別的 PFAS 減量之獎勵基準，例如 PFAS 減用比例、PFAS 的替代比例，以及投入替代品研發的規模。
 3. 獎勵的排除對象：製造藥品與醫療器材等必要用途。
 4. 獎勵的等級：
 - (1) 表現超過同業基準區間：給與最多的獎勵。
 - (2) 表現達同業基準區間：給與次多的獎勵。
 - (3) 表現未達同業基準區間：給與最少的獎勵。

最重要的是，這種 PFAS 管理策略應搭配來自政府的技術援助，由政府與企業協力研發可行的 PFAS 替代品，達到保護我國國民健康與環境免於 PFAS 危害的目的。

第七章 結論與建議




7.1 結論

1. PFAS 是一族人造化學品，根據不同定義，涵蓋之化學品數目可達上萬種。PFAS 結構中的 C-F 是有機化學中最強的共價鍵，賦予 PFAS 極為穩定的性質，在環境中持久存在。國際上優先關注的 PFAS 應用領域為消防泡沫、農藥、FCM 及紡織品，最重要的關注點在於持久性的 PFAS 難以被自然降解，若不及時禁止或限制此類用途，環境中的 PFAS 含量將與日俱增，最終人類透過食入受污染的飲用水與食品等途徑暴露於 PFAS，造成睪丸癌和腎癌、肝損傷、膽固醇增加、對接種疫苗之免疫反應力下降、嬰兒的出生體重輕微下降，以及娠高血壓與子癩前症等不良影響。
2. 化學工業在全球人為的二氧化碳排放中佔 5%，是為達到淨零排放必須轉型的關鍵產業。歐盟環境署的報告指出，工業溫室氣體排放有 75% 是來自包含氟化物在內的八種化學品之生產，氟化物占其中溫室氣體排放之 10%。
3. 聯合國 2020 年以後的 PFAS 管理策略主要由斯德哥爾摩公約與 SAICM 主導。公約列管的 PFAS 種類，極大地影響政府和企業制定管理策略與挹注資源的方向，尤其體現在研究空白方面，使得現今研究大多侷限在 PFOA、PFOS 與 PFHxS。斯德哥爾摩公約對 PFAS 的分類方式，也導致業者輕易轉為使用非公約列管的 PFAS 作為替代品，是聯合國 PFAS 管理策略的一大疏漏；SAICM 認為必要用途能幫助執政者將管理資源先行集中在非必要用途之替代品開發，以此解決錯誤替代品的問題。
4. SAICM 最初成立的宗旨在於全面管理化學品的整個生命週期，以在 2020 年之前極大程度上減少化學品對人類健康和環境造成的重大不良影響，但各國未能如期實現在 2020 年之前將化學品與廢棄物的不良影響極大程度地減少的目標，因此 SAICM 針對 2020 年以後的化學品與廢棄物管理策略提出 SAICM



- beyond 2020，利用五大策略目標與具體子目標指引世界各國 2020 年以後的努力方向。
5. 歐盟 2020 年以後的 PFAS 管理策略主要以綠色新政為中心來進行。為了將 PFAS 在內的有毒化學品納入 REACH 法規的風險管理通用方法，歐盟提議修訂 CLP 規章，新增 PBT、vPvB、PMT 及 vPvM 等危險類別，下一步將修訂 REACH 法規，擴大風險管理通用方法涵蓋的危險類別。
 6. 歐盟採納 OECD 於 2021 年的定義提議限制任何 PFAS 的所有用途，但此定義並不是設計來應用在法律框架，且歐盟並未提供所有限制用途的 PFAS 監測標準，可能因此阻礙禁令的實施。雖然 PFAS 限制提案使用落日條款結合必要用途的精神，但從斯德哥爾摩公約衍生之研究空白，致使 PFAS 替代品的資訊極為缺乏，如何制定合理的緩衝期與排除期，是歐盟管理 PFAS 所面臨的最大挑戰。
 7. 美國 2020 年以後的 PFAS 管理策略主要由 NDAA Act 2020 推動，促成 USEPA 發布 PFAS 策略路線圖，以研究、嚴格及整治作為中心指引，輔以 PFAS 的生命週期管理、源頭管理、追究污染責任、彌補技術及資訊缺口，以及保護弱勢族群等五大原則，執行為期三年的 PFAS 管理策略。雖然 NDAA Act 2020 對 PFAS 的定義標準，甚至比 OECD 的定義還要寬鬆、涵蓋的 PFAS 數目更多，但 USEPA 依據 TSCA，可以自由採取不同的 PFAS 定義，並按照需求調整。
 8. 自 3M 公司於 2000 年與 USEPA 達成自願性淘汰協議以來，美國在立法管理 PFAS 的策略上，經常輔以非強制性的自我管制政策；但美國管理 PFAS 所面臨的最大挑戰，同樣在於自我管制政策的成效。因為有能力主動參與自我管制政策的業者，通常侷限在大型企業，其它中小型企業礙於經濟成本考量，可能會拒絕承擔自我管制政策的責任義務，以此耽誤非 PFAS 替代品的研發進展。

- 
9. 根據聯合國、歐盟及美國的 PFAS 管理策略之研究結果，本研究參考 SAICM beyond 2020 制定的化學品與廢棄物管理的策略目標，對我國 PFAS 管理策略的初步建議為：以必要用途為核心精神，制定階段式、滾動式的 PFAS 管理策略；採納 OECD 於 2021 年對 PFAS 的定義，在研發出更合適的分類策略前，給與各部會彈性定義 PFAS 的自由；盤查我國 PFAS 的製造、使用、儲存與排放等數據，調查 PFAS 在我國的環境流布，並統整至公開、透明的國家 PFAS 資料庫；以及為中小型提供獎勵誘因與技術援助。
 10. 建議我國將 PFAS 的管理策略分為短、中和長期計畫，短期計畫應先開始盤查國內 PFAS 的使用現況與調查環境流布，並參考斯先進國家的 PFAS 管理策略，因應國情差異截長補短；中期計畫的期程應設定在 PFAS 盤查與流布調查結束後開始，並篩選應優先管理的 PFAS 層級、制定對應之法規限值、輔導業者研發 PFAS 替代品，以及建立公開之 PFAS 國家資料庫；長期計畫可以將期程設定在必要用途以外的多數 PFAS 用途已研發出可行的替代品，並集中將資源挹注在必要用途的替代品上，以達到全面淘汰 PFAS 的終極目標。

7.2 建議

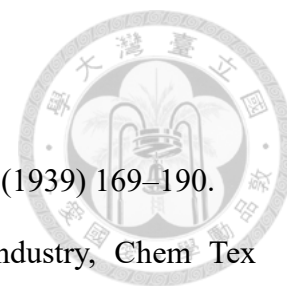
1. 建議就我國 PFAS 盤查與流布調查的結果，選擇 PFAS 使用最多的產業別，在較大的研究時間範圍內，研析各國對特定產業的 PFAS 管理策略趨勢。
2. 從本研究結果可知，研發替代品是 PFAS 管理策略成功與否的關鍵因素，加之 SAICM beyond 2020 的子目標 D5 建議在 2030 年以前，政府實施政策來支持非化學替代品的研究與開發，足見非化學替代品在化學品與廢棄物健全管理的框架內之發展潛力，建議就我國 PFAS 盤查與流布調查的結果，針對使用量最大的 PFAS 用途，研究可行的非化學替代品。
3. 本研究僅針對聯合國、歐盟及美國為研究對象，針對 PFAS 管理策略進行研析與彙整，但世界上許多國家也制定並實施各自的 PFAS 管理策略，並且因

應國情差異，PFAS 管理策略的趨勢也不相同。以澳洲為例，澳洲境內完全沒有生產 PFAS，因此澳洲的 PFAS 管理策略將重點聚焦在禁止 PFAS 的進口和進口 [96]。在考慮研究標的時，除了選擇 PFAS 管理策略的先驅國家，還能就我國 PFAS 的使用量或污染現況，採納國情相似者加以研究。


參考文獻－中文部分

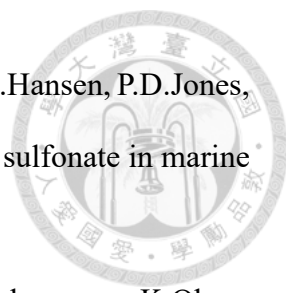
- 
- [1] 國家發展委員會, 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明, (2022).
- [2] 環保署環境檢驗所, 水中全氟與多氟化合物檢測方法－液相層析串聯式質譜儀法, (2020).
- [3] 環保署環境檢驗所, 土壤中全氟與多氟化合物檢測方法－液相層析串聯式質譜儀法, (2020).
- [4] 經濟部, 2022 年中小企業白皮書, 第一版第一刷, 經濟部中小企業處, 臺北市, 2022.
- [5] 經濟部國際貿易局, 中華民國進出口貿易統計. <https://cuswebo.trade.gov.tw/>
- [6] 立法院, 制定環境部組織法.
<https://www.ly.gov.tw/Pages/Detail.aspx?nodeid=33324&pid=229148>
- [7] 法務部全國法規資料庫, 中小企業認定標準.
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0140003>
- [8] 法務部全國法規資料庫, 耗水費徵收辦法.
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCODE=J0110112>

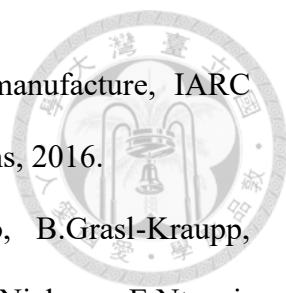
參考文獻－外文部分

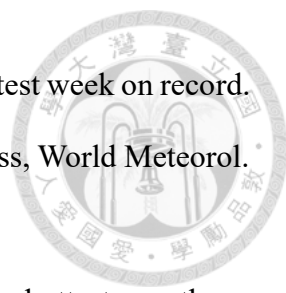


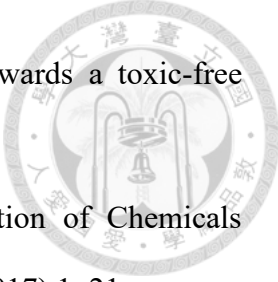
- [9] F.W.Gibbs, The history of the manufacture of soap, *Ann. Sci.* 4 (1939) 169–190.
- [10] G.Kutney, *Sulfur: History, Technology, Applications and Industry*, Chem Tex Publishing, Toronto, 2023.
- [11] R.Carson, *Silent Spring*, Houghton Mifflin, 1962.
- [12] L.G.T.Gaines, Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review, *Am. J. Ind. Med.* (2022) 353–378.
- [13] R.Dams, K.Hintzer, *Fluorinated Polymers: Vol. 2: Applications*, The Royal Society of Chemistry, 2016.
- [14] A.G.Paul, K.C.Jones, A.J.Sweetman, A first global production, emission, and environmental inventory for perfluorooctane sulfonate, *Environ. Sci. Technol.* 43 (2009) 386–392.
- [15] N.Rich, The Lawyer Who Became DuPont’s Worst Nightmare, *New York Times*. (2016) 1–23.
- [16] J.E.Galloway, A.V.P.Moreno, A.B.Lindstrom, M.J.Strynar, S.Newton, A.A.May, A.A.May, L.K.Weavers, L.K.Weavers, Evidence of Air Dispersion: HFPO-DA and PFOA in Ohio and West Virginia Surface Water and Soil near a Fluoropolymer Production Facility, *Environ. Sci. Technol.* 54 (2020) 7175–7184.
- [17] R.Bilott, *Exposure: Poisoned Water, Corporate Greed, and One Lawyer’s Twenty-Year Battle against DuPont*, Simon and Schuster, 2019.
- [18] OECD, Hazard Assesment of PFOS and its salts, ENV/JM/RD(2002)17/FINAL. (2002) 362.
- [19] The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2006/122/ECOF perfluorooctane sulfonates, Regulation. (2006) 166–168.

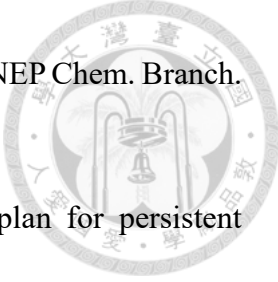
- 
- [20] ICCM, Resolution adopted on 6 February 2006 by the International Conference on Chemicals Management at its first session, Dubai, United Arab Emirates, 4-6 February 2006 Implementation arrangements, 23 (2020) 4–6.
- [21] UNEP, Strategic Approach to International Chemicals Management (SAICM), 2007.
- [22] UNEP, Report of the Conference of the Parties of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the work of its fourth meeting, United Nations Environ. Program. Stock. Conv. Persistent Org. Pollut. Geneva. (2009) 112.
- [23] WTO, WTO Agreement on Technical Barriers to Trade, WHO Drug Inf. 12 (1998) 213–215.
- [24] NSTC, Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) report, 2023.
- [25] L.Ritter, K.R.Solomon, J.Forget, M.Stemeroff, C.O’Leary, A Review of Selected Persistent Organic Pollutants, *Apostila*. (1995) 1–149.
- [26] UNEP, An Assessment Report on Issues of Concern: Chemicals and Waste Issues Posing Risks to Human Health and the Environment, 2020.
- [27] EU, The European Green Deal, *Eur. Comm.* 53 (2019) 24.
- [28] EU, The EU chemical strategy for sustainability towards a toxic-free environment, *Chim. Oggi/Chemistry Today*. 39 (2021) 40–41.
- [29] EU, Proposal for a Regulation amending Regulation (EC) No 1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, 0432 (2016) 1–23.
- [30] EU, Commission sets up rules to identify endocrine disruptors and long-lasting chemicals and to improve labelling, (2022).
- [31] USEPA, PFAS Strategic Roadmap: EPA’s Commitments to Action 2021-2024, *Epa*. 4 (2016) 1–23.

- 
- [32] K.Kannan, J.Koistinen, K.Beckmen, T.Evans, J.F.Gorzelay, K.J.Hansen, P.D.Jones, E.Helle, M.Nyman, J.P.Giesy, Accumulation of perfluorooctane sulfonate in marine mammals, *Environ. Sci. Technol.* 35 (2001) 1593–1598.
- [33] Z.Wang, A.M.Buser, I.T.Cousins, S.Demattio, W.Drost, O.Johansson, K.Ohno, G.Patlewicz, A.M.Richard, G.W.Walker, G.S.White, E.Leinala, A New OECD Definition for Per- And Polyfluoroalkyl Substances, *Environ. Sci. Technol.* 55 (2021) 15575–15578.
- [34] OECD, Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance, *OECD Ser. Risk Manag.* - No.61. (2021) 1–45.
- [35] E.Panieri, K.Baralic, D.Djukic-Cosic, A.B.Djordjevic, L.Saso, PFAS Molecules: A Major Concern for the Human Health and the Environment, *Toxics.* 10 (2022) 1–55.
- [36] C.O.R.Atkins, F.Carey, *Organic chemistry: a brief course*, Mc Graw-Hill, 2013.
- [37] OECD, SYNTHESIS PAPER ON PER- AND POLYFLUORINATED CHEMICALS (PFCS), *Environ. Heal. Safety, Environ. Dir. OECD.* (2013) 1–60.
- [38] 3M, *the Science of Organic*, (1999).
- [39] M.P.KRAFFT, Highly fluorinated compounds induce phase separation in, and nanostructuring of liquid media. Possible impact on, and use in chemical reactivity control, *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.* 46 (2008) 7207–7224.
- [40] J.Reinikainen, N.Perkola, L.Äystö, J.Sorvari, The occurrence, distribution, and risks of PFAS at AFFF-impacted sites in Finland, 829 (2022).
- [41] Danish Environmental Protection Agency, Perfluoroalkylated substances: PFOA, PFOS and PFOSA Evaluation of health hazards and proposal of a health based quality criterion for drinking water, soil and ground water, (2015).

- 
- [42] IARC, Some chemicals used as solvents and in polymer manufacture, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2016.
- [43] D.Schrenk, M.Bignami, L.Bodin, J.K.Chipman, J.delMazo, B.Grasl-Kraupp, C.Hogstrand, L.Hoogenboom, J.C.LebLANc, C.S.Nebbia, E.Nielsen, E.Ntzani, A.Petersen, S.Sand, C.Vlaminckx, H.Wallace, L.Barregård, S.Ceccatelli, J.P.Cravedi, T.I.Halldorsson, L.S.Haug, N.Johansson, H.K.Knutsen, M.Rose, A.C.Roudot, H.VanLoveren, G.Vollmer, K.Mackay, F.Riolo, T.Schwerdtle, Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food, EFSA J. 18 (2020).
- [44] USEPA, Health Effects Support Document for Perfluorooctane Sulfonate (PFOS), United States Environ. Prot. Agency. (2016) 1–245.
- [45] USEPA, Human Health Toxicity Values for Perfluorobutane Sulfonic Acid (CASRN 375-73-5) and Related Compound Potassium Perfluorobutane Sulfonate (CASRN 29420-49-3), (2018) 1–151.
- [46] ATSDR, Toxicological Profile for Perfluoroalkyls - Release May 2021, Agency Toxic Subst. Dis. Regist. (2021) 1–993.
- [47] J.Delbeke, A.Runge-Metzger, Y.Slingenberg, J.Werksman, The paris agreement, Towar. a Clim. Eur. Curbing Trend. (2019) 24–45.
- [48] IPCC, Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Pover, Glob. Warm. 1.5°C. (2018) 1–24.
- [49] Ministry of the Environment and Energy, The Swedish Climate Policy Framework, Gov. Off. Sweden. (2018) 1–5.

- 
- [50] World Meteorological Organization, Preliminary data shows hottest week on record. Unprecedented sea surface temperatures and Antarctic sea ice loss, World Meteorol. Organ. (2023).
- [51] World Meteorological Organization, July 2023 is set to be the hottest month on record, World Meteorol. Organ. (2023).
- [52] P.Gabrielli, L.Rosa, M.Gazzani, R.Meys, A.Bardow, M.Mazzotti, G.Sansavini, Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources, *One Earth*. 6 (2023) 682–704.
- [53] Accenture, NexantECA, The chemical industry’s road to net zero, (2022).
- [54] UNEP, Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPS) - Texts and Annexes, *Secr. Stock. Conv.* (2019).
- [55] UNEP, Initial indicative list of perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds, *UNEP/POPS/POPRC.15/INF/9*. (2019).
- [56] UNEP, POPRC-14 / 1 : Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds, (2018).
- [57] UNEP, Proposal to list long-chain perfluorocarboxylic acids, their salts and related compounds in Annexes A, B and/or C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, (2021).
- [58] UNEP, *Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions*, 2019.
- [59] SAICM, Paper by the Co-Chairs of the intersessional process on the Strategic Approach to International Chemicals Management and the sound management of chemicals and waste beyond 2020, *Saicm/Oewg.3/4 2*. (2019).
- [60] SAICM, Ip co-chairs single consolidated document, (2023).
- [61] SAICM, Proposed CRP on measurability, (2023).

- 
- [62] EU, PAFS on the EU chemical strategy for sustainability towards a toxic-free environment, (2020).
- [63] EU, The Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) Regulation (EC) No 1907/2006, Ec 2074/2005. 10 (2017) 1–21.
- [64] EU, Delegated Regulation 2023/707 amending CLP Regulation (EC) No 1272/2008, (2023) 7–39.
- [65] EU, Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of perfluoroalkyl substances in certain foodstuffs, 2388 (2022) 2020–2023.
- [66] EU, Directive (EU) 2020/2184 on quality of water intended for human consumption, 63 (2021).
- [67] USEPA, 100 percent Participation and Commitment in EPA’s PFOA Stewardship Program, USEPA. (2006).
- [68] USA, S.1790 - 116th Congress (2019-2020): National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2020, (2019).
- [69] USEPA, EPA’s PFAS Strategic Roadmap: A Year of Progress, (2022).
- [70] United States Congress, Water pollution prevention and control: Title 33 — navigation and navigable waters programs, Title 33 — Navig. Navig. Waters Programs. (2018) 326–558.
- [71] USEPA, 2nd Draft Method 1633 Analysis of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous , Solid , Biosolids , and Tissue Samples by LC-MS / MS, (2022).
- [72] USEPA, 3rd Draft Method 1633 Analysis of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous , Solid , Biosolids , and Tissue Samples by LC-MS / MS, (2022).
- [73] J.Weiss, J.DeBoer, U.Berger, D.Muir, T.Ruan, A.Torre, F.Smedes, B.Vrana, F.Clavien, H.Fiedler, PFAS analysis in water for the Global Monitoring Plan of the

- 
- Stockholm Convention: Set-up and guidelines for monitoring, UNEP Chem. Branch. (2015) 1–26.
- [74] UNEP, Second global monitoring report: Global monitoring plan for persistent organic pollutants, Unep/Pops/Cop.8/Inf/38. (2017).
- [75] Right Livelihood, The 2017 laureate of change-maker - Robert Bilott. <https://rightlivelihood.org/the-change-makers/find-a-laureate/robert-bilott/>
- [76] USEPA, EPA and 3M ANNOUNCE PHASE OUT OF PFOS. https://www.epa.gov/archive/epapages/newsroom_archive/newsreleases/33aa946e6cb11f35852568e1005246b4.html
- [77] SAICM, Perfluorinated Chemicals. <https://saicmknowledge.org/epi/perfluorinated-chemicals>
- [78] ECHA, Restriction on the manufacture, placing on the market and use of PFASs. <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>
- [79] ECHA, Restricting the use of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in fire-fighting foams. <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>
- [80] ITRC, 2.2 Chemistry, Terminology, and Acronyms. <https://pfas-1.itrcweb.org/2-2-chemistry-terminology-and-acronyms/>
- [81] C8 Science Panel, Background Information on Settlement and Science Panel. <http://www.c8sciencepanel.org/panel.html>
- [82] ITRC, 4 Physical and Chemical Properties. <https://pfas-1.itrcweb.org/4-physical-and-chemical-properties/>
- [83] 3M, The Facts on PFAS. <https://www.pfasfacts.com/>

- [84] C8 Science Panel, C8 Probable Link Reports.
http://www.c8sciencepanel.org/prob_link.html
- [85] Ballotpedia, Christmas tree bill. https://ballotpedia.org/Christmas_tree_bill
- [86] USEPA, EPA Organization Chart. <https://www.epa.gov/aboutepa/epa-organization-chart>
- [87] USEPA, NPDES Permit Basics. <https://www.epa.gov/npdes/npdes-permit-basics>
- [88] USEPA, Filing a Pre-manufacture Notice with EPA.
<https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/filing-pre-manufacture-notice-epa>
- [89] USEPA, What is the Toxics Release Inventory? <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/what-toxics-release-inventory>
- [90] USEPA, Summary of the Clean Air Act, USEPA. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>
- [91] USEPA, Effluent Guidelines. <https://www.epa.gov/eg>
- [92] USEPA, Low Volume Exemption for New Chemical Review under TSCA.
<https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/low-volume-exemption-new-chemical>
- [93] USEPA, Filing a Significant New Use Notice (SNUN) under TSCA.
<https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/filing-significant-new-use-notice#:~:text=This%20notification%20provides%20EPA%20the,evaluating%20a%20significant%20new%20use.>
- [94] USFDA, Authorized Uses of PFAS in Food Contact Applications.
<https://www.fda.gov/food/process-contaminants-food/authorized-uses-pfas-food-contact-applications>



[95] WHO, PFOS and PFOA in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.

<https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/chemical-hazards-in-drinking-water/per-and-polyfluoroalkyl-substances>

[96] OECD, Overview of risk reduction approaches in Australia.

<https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/countryinformation/australia.htm#:~:text=Overview%20of%20risk%20reduction%20approaches,are%20not%20manufactured%20in%20Australia.>