

出國報告（出國類別：開會）

參加「聯合國汞水俣公約」工作小組會議
或其他汞議題相關國際會議

服務機關：行政院環境保護署毒物及化學物質局

姓名職稱：吳春生科長、黃佑榮技正

派赴國家/地區：視訊會議

出國期間：111年7月25日至111年7月29日

報告日期：111年10月19日

摘要

本次第 15 屆「2022 全球汞污染國際會議(International Conference on Mercury as a Global Pollutant, ICMGP)」於 2022 年 7 月 25 日至 29 日採視訊方式辦理，為期五天，本次會議主軸為「減少汞排放以實現更綠色的世界」，並匯集來自工業界、政府、研究機構、非政府組織 (NGO) 和學術界的代表參加。本次會議目的為交流減少全球環境汞的排放和暴露的各項實際的措施，並瞭解全球各地實施《聯合國汞水俣公約》(下稱公約)的效益。

會議主要議題包括：在不斷變化的世界中應對全球汞挑戰、汞處理及減排、淡水生態系統中的汞、在氣候不確定性下評估公約效益、手工和小規模金礦開採的汞、汞暴露於野生動物、鳥類和魚類的風險評估、我們在執行公約方面做得如何？生物群中的全球汞濃度：將其作為全球監測框架的基礎、人體接觸汞和風險評估、極地生態系統中的汞、在瞭解汞和人類健康影響方面取得進展、陸地生態系統中的汞、南半球的汞、大氣汞循環：來源和排放、汞分析和形態分析的量測溯源性、受污染場地中的汞，以及海洋生態系統中的汞。

由上述主題可知本次會議針對汞的來源、使用、排放／釋放至廢棄各階段的管理及監測的工作，以及含汞產品的替代、公約執行的效益評估等皆有深入之探討。另外，本次會議亦可瞭解全球汞監測的工作，透過調查及監測相關數據追蹤各項污染控制的措施，可促進監管和治理應對和改革。此外，聯合國永續發展目標 (SDGs) 中多個項目與汞管理相關的挑戰具關連性，因此，對於汞採取相關行動除了可以解決面臨的汞問題，亦可以進而達成永續發展的目標。

臺灣將持續關注公約最新發展，加強跨部會協力合作，推動減少汞之源頭使用，管制含汞產品，強化相關監測，鼓勵產業使用無汞替代品，加強含汞廢棄物管理，減少汞向環境之排（釋）放，以生命周期為基礎彙整各項效益評估指標，再反饋我國於汞管理需強化的面向，每年持續精進汞相關管理措施，共同達成維護環境安全，營造健康永續之生活環境。

目 次

一、會議背景及目的.....	1
二、會議議程及內容重點整理	1
三、心得與建議	21

一、會議背景與目的

為瞭解全球關於汞的相關技術研究、政策制定及監測等相關，以作為我國推動聯合國汞水俣公約相關管制策略制定參考，故於今(2022)年派員參加第 15 屆「2022 全球汞污染國際會議(International Conference on Mercury as a Global Pollutant, ICMGP)」，本次會議於臺灣時間 2022 年 7 月 25 日至 29 日舉行，為期五天，採視訊會議形式辦理，本次會議主軸為「減少汞排放以實現更綠色的世界」，並匯集來自工業界、政府、研究機構、非政府組織 (NGO) 和學術界的代表參加，本次會議目的為交流減少全球環境汞的排放和暴露的各項實際的措施，並瞭解全球各地實施公約的效益。

聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP)針對全球汞污染問題制訂汞水俣公約(Minamata Convention on Mercury)，公約於 2017 年 8 月 16 日正式生效。為符合國際管理趨勢，我國已制定「執行聯合國汞水俣公約推動計畫」(2016 年 6 月 27 日奉行政院核定) 作為跨部會共同推動汞管理之依據。並由行政院環境保護署、農業委員會、衛生福利部、經濟部、財政部及勞動部等部會署依據管理計畫及權責執掌，由汞的貿易供應、使用、向環境之排釋放至廢棄物處理處置等面向已有諸多管制措施及成效。另我國以公約效益評估指標項目及我國歷年汞成果報告資料為基礎，擬訂我國汞管理效益評估指標，並彙整我國汞管理之成果及效益，經由本次會議可瞭解及參考其他國家效益評估之方法及成果，賡續精進我國管理措施，以達成管理策略之最佳效力，保障民眾健康與降低環境危害，逐步邁向無汞家園。

二、會議議程及內容重點整理

(一) 視訊會議議程

「2022 全球汞污染國際會議(ICMGP)」會議主要議題如下列所示：

- 在不斷變化的世界中應對全球汞挑戰
- 汞處理／減排
- 淡水生態系統中的汞
- 在氣候不確定性下評估公約效益
- 手工和小規模金礦開採的汞
- 汞暴露於野生動物、鳥類和魚類的風險評估
- 我們在執行公約方面做得如何？
- 生物群中的全球汞濃度：將其作為全球監測框架的基礎
- 人體接觸汞和風險評估

- 極地生態系統中的汞
- 在瞭解汞和人類健康影響方面取得進展
- 陸地生態系統中的汞
- 南半球的汞
- 大氣汞循環：來源和排放
- 汞分析和形態分析的量測溯源性
- 受污染場地中的汞
- 海洋生態系統中的汞

「2022 全球汞污染國際會議(ICMGP)」議程

TIME (UTC)	MONDAY 25TH JULY	
05:30	WELCOME/OPENING	
06:00 - 07:30	Addressing global Hg challenges in a changing world	Mercury Treatment/ Abatement
07:30 - 08:00	Q&A	
08:00 - 08:30	Break	
08:30 - 10:00	Mercury in Freshwater Ecosystems	Special Session - Assessing the effectiveness of the Minamata Convention on Mercury under climate uncertainties
10:00 - 10:30	Q&A	
10:30 - 11:30	SOCIAL MIXER	
11:30 - 13:00	Mercury in Freshwater Ecosystems	Special Session - Artisanal and Small- Scale Gold Mining – challenges and solutions
13:00 - 13:30	Q&A	
13:30 - 14:00	Break	
14:00 - 14:30	WELCOME/OPENING	
14:30 - 15:00	PLENARY 1 - CLIMATE CHANGE	
15:00 - 15:30	Q&A	
15:30 - 17:00	Risk Assessment of Hg exposure to wildlife, birds and fish	How are we doing in implementing the Minamata Convention?
17:00 - 17:30		Q&A
17:30 - 18:00	Q&A	Break

TIME (UTC)	TUESDAY 26TH JULY	
-------------------	--------------------------	--

06:00 - 07:00	Minamata Storyteller	
07:00 - 09:00	Special Session - Global mercury concentrations in biota: their use as a basis for a global monitoring framework	Human Exposure and Risk Assessment of Hg
09:00 - 09:30	Q&A	
09:30 - 10:00	Break	
10:00 - 11:30	Mercury in Polar Ecosystems	Progress in understanding Hg and human health impacts
11:30 - 12:00	Q&A	
12:00 - 12:30	Break	
13:00 - 14:00	PLENARY 2 - HEALTH	
14:00 - 14:30	Q&A	
14:30 - 15:00	Emerging Researcher Presentation	
15:00 - 16:30	Mercury in the Terrestrial Ecosystems	Special Session - Climate-Driven Perturbations of Arctic Mercury Cycling
16:30 - 17:00		Q&A
17:00 - 17:30	Q&A	Break
17:30 - 18:00	SOCIAL MIXER	

TIME (UTC)	WEDNESDAY 27TH JULY	
06:00 - 06:30	Emerging Researcher Presentation	
06:30 - 08:00	Special Session - Mercury in the Southern Hemisphere	Mercury in Artisanal Gold Mining
08:00 - 08:30	Q&A	
08:30 - 09:00	Break	
09:00 - 10:00	PLENARY 3 - EMERGING RESEARCHERS	
10:00 - 10:30	Q&A	
10:30 - 11:30	SOCIAL MIXER	
11:30 - 13:00	Special Session - Mercury in the Southern Hemisphere	Mercury in Artisanal Gold Mining
13:00 - 13:30	Q&A	
13:30 - 14:00	Break	
14:00 - 15:30	Atmospheric Hg cycling: Source & Emissions	Special Session - Metrological Traceability for mercury analysis and speciation

15:30 - 16:00	Q&A	
16:00 - 17:30	Atmospheric Hg cycling: Source & Emissions	Special Session - Selenium-mercury interactions in aquatic food webs: The state of the science and future research directions
17:30 - 18:00	Q&A	

TIME (UTC)	THURSDAY 28TH JULY	
06:00 - 07:00	PLENARY 4 - INDUSTRIAL	
07:00 - 07:30	Q&A	
07:30 - 09:00	Mercury in Contaminated Sites	Special Session - Mercury in the Southern Hemisphere
09:00 - 09:30	Q&A	
09:30 - 10:00	Break	
10:00 - 11:30	Mercury in Marine Ecosystems	Mercury in Contaminated Sites
11:30 - 12:00	Q&A	
12:00 - 13:30	Mercury in Marine Ecosystems	Energy/ Fossil Fuels
13:30 - 14:00	Q&A	
14:00 - 14:30	Break	
14:30 - 15:00	LAA Winner Presentation	
15:00 - 16:30	Mercury in Marine Ecosystems	Special Session - New developments in understanding reactive mercury concentrations and chemistry
16:30 - 17:00	Q&A	
17:00 - 18:00	SOCIAL MIXER	

TIME (UTC)	FRIDAY 29TH JULY	
06:00 - 07:30	Special Session - Meta-omic and geochemical approaches to linking microbial activity to biogeochemical mercury cycling	
07:30 - 08:00	Q&A	
08:00 - 08:30	CLOSING VIDEO	
08:30 - 09:00	Break	
09:30 - 11:00	Special Session - Meta-omic and geochemical approaches to	

	linking microbial activity to biogeochemical mercury cycling
11:00 - 11:30	Q&A
11:30 - 12:00	CLOSING VIDEO
13:00 - 14:30	Special Session - Climate-Driven Perturbations of Arctic Mercury Cycling
14:30 - 15:00	Q&A
15:00 - 15:30	CLOSING VIDEO

(二) 視訊會議內容概要

1. 大會專家演講

(1) 汞研究和發現造成澳洲政策和實踐之變化(Mercury Research and Findings that Lead to Change in Policy and Practices in Australia. Larissa Schneider)

以科學為依據的決策對於為可持續未來奠定基礎至關重要。儘管澳洲於 2021 年批准了汞水俣公約，但人們對澳洲汞的來源、地理分佈和環境濃度認識甚少。同樣地，對汞排放的監管和治理影響，以及這些影響將如何履行公約規定的未來義務也很少受到關注。

為了改變這現狀，2020 年澳洲成立了一個汞研究人員網路 (www.mercury-australia.com.au)，以促進澳洲的汞研究和研究與政策間的聯繫，目前相關研究已逐步增加，多分布於坎培拉、雪梨、沃隆岡、墨爾本、阿得雷德及考夫斯港（如圖 1）。該演講介紹澳洲汞網路的成功案例：澳洲對人為來源的汞使用及排放進行多學科調查，透過調查及監測相關數據，促進了監管和治理應對和改革，特別是在公約的背景下。這些變化包括 2020 年澳洲逐步淘汰含汞農藥，以及澳洲維多利亞州最大褐煤電站許可證的審查。本演講強調了基礎研究的重要性，以提供在汞研究和治理尚未跟上最新情況的國家找到解決應用問題的辦法。



圖 1 目前澳洲汞研究之地區分布

(2) **終身成就獎獲獎者（美國康乃狄克大學 Robert Mason 教授）介紹-海洋在全球汞迴圈中的作用：一生的旅程(The role of the ocean in the global mercury cycle: A lifetime journey)**

在 20 世紀，日本水俣事件強調了人為汞污染和對人類健康的影響，這使人們意識到，在人類活動中使用汞並因過程產生的汞釋放會產生嚴重後果。Robert Mason 教授於 1987 年開始研究生涯，當時新技術正在改變測量海水中低濃度汞的能力，且樣品並不會受到污染，以及可確定不同的汞形式－無機汞(Hg(II))、元素汞(Hg(0))、甲基汞(MMHg)和二甲基汞(DMHg)。Robert Mason 教授論文研究顯示，DMHg 在上游水域無所不在，兩種形式的甲基汞在低氧水中都更高。Robert Mason 教授和其他人的研究也證實了海洋表層水中元素汞的存在，其濃度是相對於大氣的過飽和濃度，這表明海洋是一個大型的大氣汞來源。這些想法刊載在 1994 年發表的全球汞建模論文中，該論文估計了人類活動對生物圈中汞的影響。從那時起，Robert Mason 教授參與了許多海洋，沿海環境和淡水的研究，並在 Robert Mason 教授職業生涯中專注於不同的方面，包括大氣和空氣-海洋交換研究，水層轉換(column transformations)，如氧化和還原，甲基化和去甲基化，以及汞形式的生物積累在水生食物鏈的基礎。

(3) **水俣病患者親身經歷分享(Minamata Storyteller)**

大會於 7 月 26 日邀請水俣病患者緒芳正實先生現身說法，分享親身經歷。緒芳先生自小居住於水俣市，在演講中他以說故事的方式分享了原本平靜的小漁村如何逐漸受到水俣病所帶來的危害及痛苦，他的祖父在 1959 年過世，父親也在 1971 年過世，整個家族因水俣病而遭受巨大的改變與歧視。在演講中他詳述了他從原本的逃避心態到後來決定勇於面對水俣病的心路歷程，也提到在這過程中，為了向政府申請申請認定為水俣病患者，前後約十年間所做的努力，而目前仍有約 300 名患者尚待政府的認定。最後，他呼籲大家應持續關注汞議題，並希望能藉由他們的經驗及汞水俣公約執行，讓這樣的事件能夠不再發生（圖 2）。



圖 2 水俣病患者親身經歷分享

2. 研討會議題內容摘要

(1) 臺灣東部海域大氣中汞的變化和遠距離傳輸 (Spatiotemporal Variation and Long-range Transport of Atmospheric Speciated Mercury in the Eastern Waters of Taiwan Island. Chung-Shin Yuan, I-Chien Du, Kuan-Chen Chiang)

國立中山大學袁中新教授在研討中報告了臺灣東部海域大氣中汞的變化和遠距離傳輸。本研究選擇了位於綠島、墾丁角和東沙群島的三個地點同時對氣態元素汞(GEM)、氣態氧化汞(GOM)和顆粒結合汞(PHg)進行採樣，以確定其空間分佈、季節變化和長程傳輸路線。在臺灣島東部海域大氣中，綠島的 GEM、GOM 和 PHg 濃度普遍最高，而東沙群島的濃度則最低。現場測量結果表明，GEM 是大氣中的主要汞種。春、冬季的 GEM 和 PHg 的濃度高於夏、秋季。GOM 的季節性趨勢則相反。在暖季，乾淨的大氣主要從西太平洋吹來，導致 TGM(=GEM+GOM)的濃度比寒冷季節低得多。污染氣團的主要傳輸路線主要來自中國大陸、朝鮮半島和日本群島，並普遍經過人口稠密的城市和工業區。總體而言，亞洲大陸出流(ACOs)被輸送到華北沿海地區，然後順時針轉向綠島和墾丁半島，由於反氣旋高壓系統佔據了蒙古高原，將大氣中的汞吹向背風水域（圖 3）。



簡報者：國立中山大學袁中新教授

汞排放途徑

研究目的

大氣汞測值

圖 3 「臺灣東部海域大氣中汞的變化和遠距離傳輸」簡報資料

(2) 使用不同類型採樣器的濕式汞沉降測量的可變性 (Variability of Wet Mercury Deposition Measurements Using Different Types of Samplers. Guey-Rong Sheu, Da-Wei Lin, Kohji Marumoto, David Gay, David Schmeltz, Chihwei Chang)

國立中央大學許桂榮教授於研討會中發表使用不同類型採樣器的濕式汞沉降測量的可變性研究成果。濕式汞沉降通常通過分析濕式沉降採樣器收集的雨水樣本中總汞濃度來進行量化。然而，全球沒有標準的濕沉降採樣器類型。例如，北美汞沉降網路 (MDN) 的一些採樣點使用 N-CON 採集器，而亞太汞監測網路 (APMMN) 和臺灣的濕汞沉積監測網路則使用 MIC-B 型採集器。日本使用的是 KASC-02 採集器。這些濕沉降採樣器的形狀、感測器、採樣鏈以及採樣效率各不相同，這可能導致由不同類型的採樣器採集的雨水樣本的汞濃度出現測量偏差。為了解決這個問題，2020-2021 年在國立中央大學校園內進行了採樣器間的比較研究。一個 N-CON、一個 KASC-02 和兩個 MIC-B 濕沉降採樣器並排設置，同時收集每週的雨水樣本。兩個 MIC-B 採樣器之間的雨水汞濃度具有良好的相關性 ($R^2=0.97$)。N-CON 和 MIC-B 採樣器之間的雨水汞濃度也有很好的相關性 ($R^2 = 0.97$)，N-CON 的雨水汞濃度比 MIC-B 樣本的低 16%。KASC-02 和 MIC-B 採樣器之間的雨水汞濃度也有很好的相關性 ($R^2 = 0.96$)，斜率為 0.99，表明 KASC-02 和 MIC-B 採樣器之間的一致性非常好 (圖 4)。



圖 4 「使用不同類型採樣器的濕式汞沉降測量的可變性」簡報資料

(3) 中國人為汞釋放的生命周期影響評估 (Life Cycle Impact Assessment of Anthropogenic Mercury Release in China. [Habuer, Takeshi fujiwara, Masaki Takaoka](#))

人為活動和長期大氣遷移導致全球汞在自然環境濃度持續增加。瞭解汞的影響，並確定改善人為活動對環境的影響的主要因素，將有助於實行無害環境的汞管理。

目前，尚無進行任何調查來評估人為來源造成的汞排放對環境的影響。此研究採用生命周期影響評估來確定造成中國元素汞排放造成的總體環境負荷的主要因素（圖 5）。此外，還對 2016-2020 年的人為汞排放進行了時間序列影響分析。結果顯示，2016-2020 年汞投入總量逐年下降（圖 5）。相較於人類健康影響，汞釋放到環境中對生態系統多樣性的影響較小。陸地排放汞對生態系統多樣性的影響最大，其次是汞排放到空氣中和排放到水中。廢棄物處理和處置過程為汞陸地排放的主要因素。目前可利用的最佳技術可以減少大氣排放的初始分佈。此研究提供了關於汞排放對環境影響的定量資料，促進了汞排放的策略管理。闡明了汞污染的影響對於努力減少這些影響至關重要。

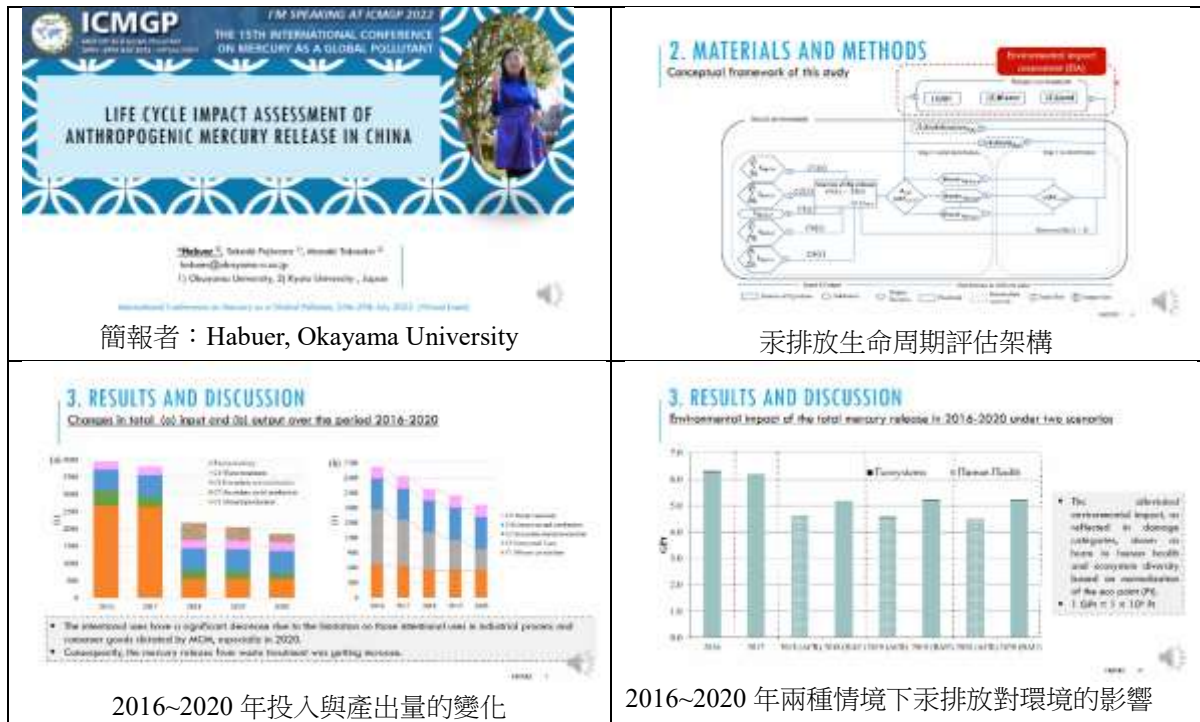


圖 5 「中國人為汞釋放的生命周期影響評估」簡報資料

(4) 逐步淘汰照明中的汞—以具成本效能方式改善公眾和環境健康
(Phasing Out Mercury in Lighting – Cost-Effectively Improving Public and Environmental Health. Michael Scholand, Rachel Kamande, Ana-Maria Carreño and Hannah Blair)

到 2050 年，全球邁向無汞照明可以緩解不斷增長的能源需求，並避免 35 億噸二氧化碳排放。所有螢光燈都含有汞。雖然汞是螢光燈技術功能不可或缺的一部分，但每當脆弱的燈泡破裂時，汞就會釋放到周圍區域。清潔照明聯盟(Clean Lighting Coalition, CLiC)活動正在利用專業知識和清潔照明利益相關者，將全球市場從螢光燈轉向安全、具有成本效益和節能的 LED 照明。

2021 年，CLiC 試圖證明在全球範圍內逐步淘汰螢光燈照明的技術和經濟可行性。該活動吸引了非洲、拉丁美洲和亞太地區超過 35 個國家的合作夥伴組織，蒐集了 1,200 多種含汞螢光燈和改裝 LED 燈泡型號的主要價格和性能數據。研究人員創建了「配對設計」(matched pairs)的產品，比較螢光燈和 LED 燈評估生命週期成本。分析發現，在許多國家，LED 燈已經更便宜，或者價格與緊湊型螢光燈相當。對於取代直管型螢光燈的管狀 LED 燈，LED 稍微貴一些，但在大多數國家，LED 能夠在 1 年內透過節能來平衡增加成本。在南非和烏干達等一些國家，LED 燈管與螢光燈管相同或更便宜，因此投資回收期是即時的。

加速向 LED 的轉型將帶來顯著的環境和健康效益，同時也為消費者和企業提供極具成本效益的解決方案。CLiC 累計計算（2025-2050 年），改用無汞替代品將避免 35 億噸二氧化碳，232 噸汞，並節省全球 1.3 萬億美元的電費，如表 1 所示。

表 1 含汞照明光源向 LED 轉型的好處

類型	好處
經濟面	LED 照明的使用壽命比螢光燈長 2-3 倍並且消耗的電量減少 50%，為人們、企業和政府節省了長期用電成本
環境面	向 LED 轉型將減少環境中 232 公噸的汞
技術面	LED 燈泡廣泛用於全球照明市場，為用戶提供改善照明體驗
氣候變遷	避免 35 億噸的二氧化碳排放，並將全球電力消耗降低約 3%
健康面	LED 不含汞，不會對公眾健康構成風險

2022 年 3 月，在公約第四次締約方大會(COP4)上，137 個締約方於 2025 年逐步淘汰緊湊型螢光燈。此舉將從 2025-2050 年避免 26.2 公噸汞污染和 2.615 億噸二氧化碳排放，同時為用戶節省 778 億美元的能源費用。

逐步淘汰含汞、低效的照明是一項務實可行的行動，對地球具有示範性的共同利益。雖然 COP4 取得了進展，但在即將到來的 2023 年 COP5 上，剩餘的直管型螢光照明必須逐步淘汰。如果成功，清潔照明聯盟運動將通過加速全球過渡到清潔、節能 LED 照明，實現長期的公共衛生、經濟和環境效益。



圖 6 含汞照明光源逐漸被 LED 取代

(5) 澳洲二十年來人為汞排放量的變化 (Two Decades of Changing Anthropogenic Mercury Emissions in Australia. Stephen MacFarlane, Jenny A. Fisher, Hannah M. Horowitz, Viral Shah)

在澳洲，過去對人為汞排放量的估計差異高達三倍，現有清單不是過時，就是不準確，且有些清單缺乏針對澳洲的輸入數據。

澳洲新制定的 2000-2019 年澳洲人為汞排放 20 年清單，該清單儘可能使用澳洲本土的數據，並納入過去澳洲清單中未包括的流程，例如含汞產品廢棄處置之延遲釋放效應。研究顯示，在過去二十年，澳洲的人為汞排放量中減少了 2 倍以上，其中黃金生產業降幅最大，其次是褐煤發電廠和商業產品廢棄物，只有鋁行業的汞排放量顯著增加(圖 7)。使用全球三維化學遷移模型(GEOS-Chem)，顯示排放量的減少導致澳洲大陸的汞沉積量略有減少，每年氧化汞沉積量比 2000 年的排放量低約 3-4%。此研究說明，澳洲的排放量在最近的全球排放清單中沒有準確表示，而且清單之間的差異對汞沉積的影響大於排放趨勢。總體而言，這項工作顯示澳洲從公約中受益匪淺，預計澳洲和全球人為排放量的減少將使澳洲的汞沉積更進一步減少。

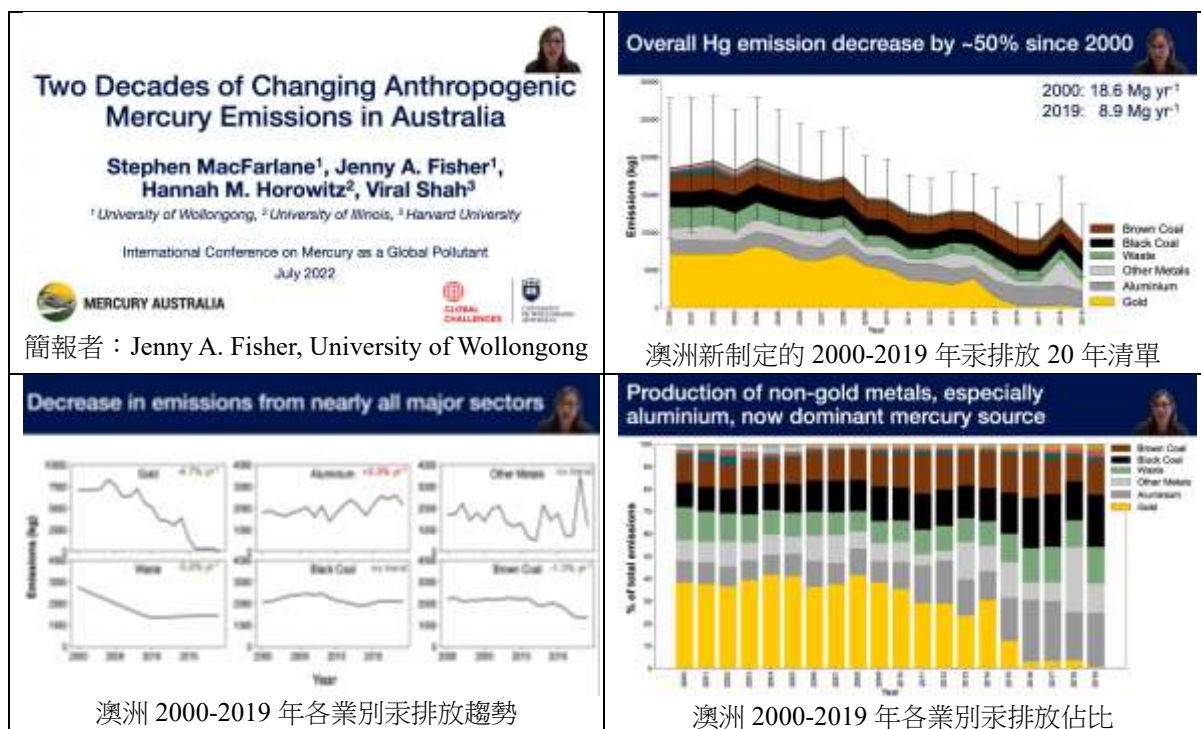


圖 7 「澳洲二十年來人為汞排放量的變化」簡報資料

(6) 國家汞評估-對挪威汞法規和政策有效性的評估 (**National Mercury Assessment – An Evaluation of the Effectiveness of Norwegian Mercury Regulations and Policies.** Hans Fredrik Veiteberg Braaten, Katrine Aspmo Pfaffhuber, Heli Routti, Helle Katrine Knutsen, Michael Bank, Oleg Travnikov, Joel Ormala, Caroline Enge, Cathrine Brecke Gundersen, Sabine Eckhardt, Kjetil Tørseth, Kristine Vejrup, Anne-Lise Brantsæter)

挪威評估了以下各項之間的相互關聯性：(a)國家和區域汞政策和法規，(b)汞的排放、釋放、使用和暴露途徑（圖 8），以及(c)2000-2020 年期間測量的環境、生物群和人類中的汞濃度。隨著對汞污染及其影響的認識和認識的提高，挪威對汞的使用進行了嚴格的管制。由於挪威立法相較於公約有更嚴格的要求，因此當挪威加入公約時，不需要對現行法律進行任何修改。挪威空氣中的汞和濕沉降正在減少。汞排放量減少幅度最大的是金屬工業（圖 8），業者在利用和實施技術解決方案方面取得了成功。更嚴格的环境法規、監測和許可支持了成功的汞修復工作。歐洲大陸是挪威監測點人為汞的主要來源。海洋和淡水魚類以及北極哺乳動物的數據表明，時間變化及物種間的汞評估是複雜的。在分析時間變化的因素時，汞於沉降後的相關過程（作用）也是重要的。例如，北極熊和北極狐體內的汞濃度與汞的沉積通量率或空氣濃度無關過程，這顯示甲基汞的吸收和營養轉移涉及多種暴露方式和幾個綜合過程。儘管如此，一些數據表明，海洋和淡水魚類物種對區域尺度上汞排放的時空變化有反應。人類生物監測數據記錄了孕婦血液總汞的減少，這些數據部分可以通過報告的牙科汞合金牙齒填充物數量來解釋。血液汞隨著母親的魚類消費量、母親年齡和教育狀況的增加而增加，居住在沿海和挪威西部的受試者的血汞含量更高。

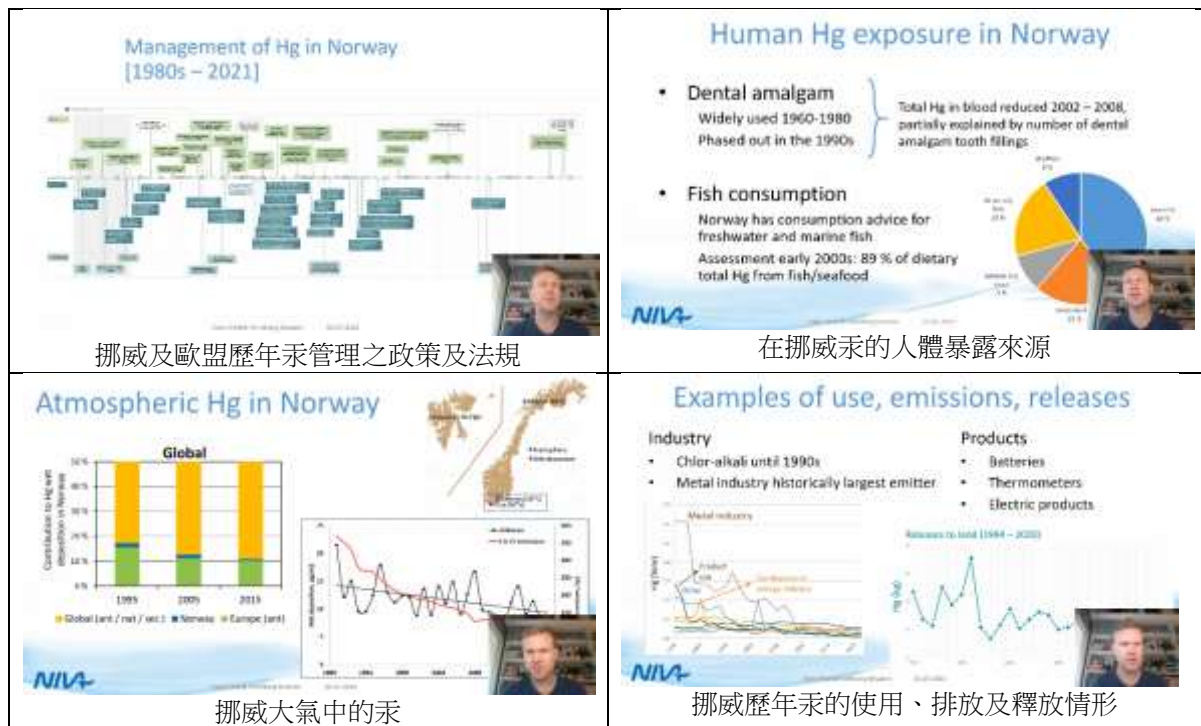


圖 8 「國家汞評估-對挪威汞法規和政策有效性的評估」簡報資料

(7) 美國汞排放控制的好處 (The Benefits of Controls of Mercury Emissions in the U.S., Charles Driscoll, Benjamin Geyman, Colin Thackray, Elsie Sunderland)

自 1970 年代以來，燃煤發電機組（發電廠）一直是美國汞排放的最大來源之一（圖 9）。儘管美國國會通過 1990 年《清潔空氣法》修正案建立了一個監控管理電力公司汞排放的機制，但該機制監管地位一直受到挑戰。2011 年頒布的《汞和空氣毒物標準》已導致汞排放和環境汞濃度顯著下降（圖 9）。

在此專題介紹中，討論美國汞排放的模式和來源、汞在環境中的循環以及與汞接觸相關的人類和生態健康風險（圖 9），並總結美國聯邦汞排放法規的歷史，觀察到環境和人類健康對監控管理的反應，以及科學研究的最新進展，這些進展為瞭解減少汞負荷對環境的好處提供了定量資訊。該研究建議對美國燃煤公用事業公司汞排放的監管效益進行科學分析。

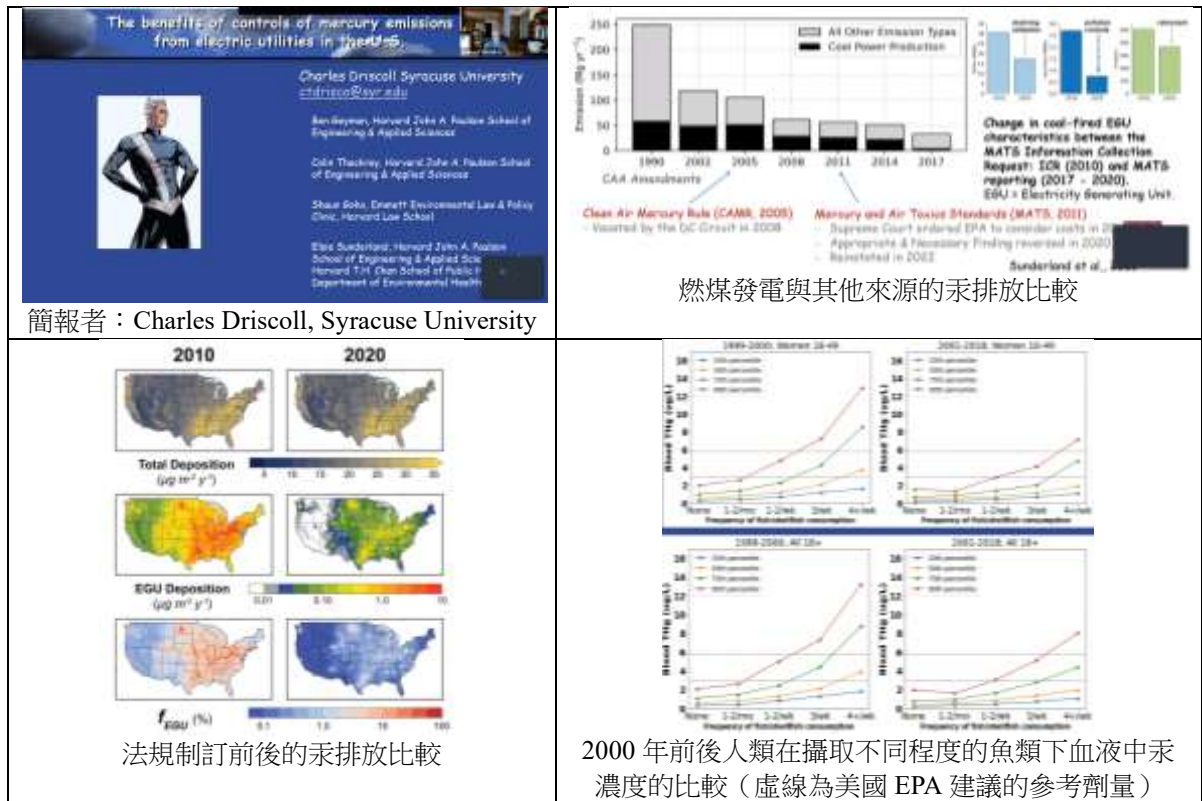


圖 9 美國汞排放控制的好處簡報資料

(8) 瑞士陸地野生動物中的汞濃度：長期生物監測方法 (Mercury Concentrations in Terrestrial Wildlife in Switzerland: A Long-term Biomonitoring Approach. Sabnam Mahat, Marie-Pierre Ryser, Adrien Mestrot)

汞作為全球污染物在陸地系統的宿命尚未得到充分研究，儘管據估計，大氣中的大部分汞沉積在陸地環境中。因此，關於總汞(THg)和甲基汞(MeHg)的轉移和生物蓄積，在陸地環境中相關風險的數據很少。此外，需要定期評估公約的影響，這意味著須對陸地環境中的汞濃度進行監測和量化。此研究的重點是瑞士陸地野生動物中 THg 和 MeHg 的生物累積，旨在制定一項長期的生物監測計劃。

研究分析了 2019 年至 2020 年間在瑞士不同地區採樣的 85 隻歐洲兔(Capreolus capreolus)的肌肉、肝臟和腎臟組織 (圖 10)。在肌肉中發現了甲基汞占總汞最高之比例，其次是肝臟和腎臟。再者，研究了 THg 和 MeHg 與年齡和性別的關係。然後將這項研究的濃度與 1984 年至 1998 年間在瑞士收集的兔組織的進行了比較 (圖 11)，結果發現歐洲兔的腎臟中汞濃度相較於先前研究有上升趨勢，而在肝臟及肌肉中汞濃度相較於先前研究則有顯著下降。最後，將組織中測得的濃度與瑞士大氣中的汞沉積進行比較。

Results : T-Hg Roe deer (2019-2020)

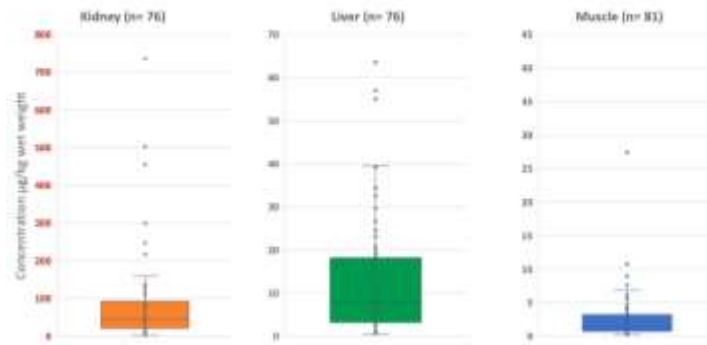


圖 10 歐洲狍的肌肉、肝臟及腎臟中總汞濃度分布情形

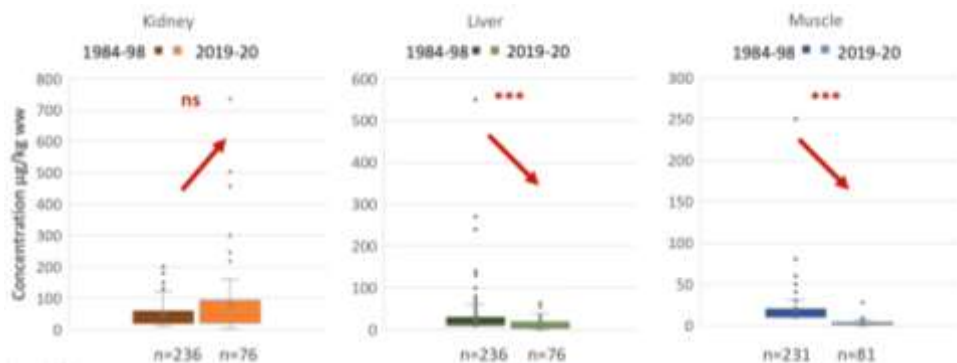


圖 11 此研究與先前研究之歐洲狍總汞濃度分布比較

(9) 從斯德哥爾摩到水俣以及後：汞污染的過去、現在和未來 (From Stockholm to Minamata and Beyond: Past, Present and Future of Mercury Pollution. Henrik Selin, Noelle Selin)

2022 年距離聯合國於 1972 年在瑞典斯德哥爾摩首次舉辦人類環境會議已 50 週年，回顧過去 50 年來關於危險物質方面的國際合作以及未來 50 年的重要事項，此文總結了對於過去 50 年汞排放的變化的理解，以及詳細介紹了公約的作用。此文參考了對主要區域和業別汞排放和隨時間變化的多重估計的數據，以及關於分析進展和條約有效性的文獻。雖然過去 50 年中汞排放的趨勢尚不確定，但所有不同的估計數據都顯示，自斯德哥爾摩會議以來的 50 年中，已經排放了大量的汞。在有史以來人為向空氣中排放的汞中，大約四分之一發生在 1972 年之後。此文研析燃煤發電廠的汞排放以及手工和小規模金礦開採中汞的使用情況，表示這 2 個業別是目前最大的人為汞排放源，由於複雜的生產和消費模式以及全球政策的擴張，使得與可持續發展的聯繫越來越緊密且具有挑戰性，過程和結果指標的結合可用於衡量公約的近期進展和有效性。

此外，聯合國設定的永續發展目標（圖 12）中多個項目與汞管

理具關連性，因此，對於汞採取一些行動除了可以解決面臨的汞問題，亦可以進而達成永續發展目標，例如燃煤電廠的管末汞攔截捕捉技術以及小型採金業的管制，可以防止汞釋放到環境中，保護工人的環境，環境友善管理是保護人體健康的重要工作，攝食量建議指引能對於依賴魚類及海鮮的族群支持其健康與減低損害。然而一些與永續轉型有關的更廣泛行動也具有解決這些汞挑戰的可能性，例如推動潔淨能源與氣候行動，可使得燃煤發電造成的汞排放減少，如圖 12 所示。



圖 12 「從斯德哥爾摩到水俣以及後：汞污染的過去、現在和未來」簡報資料

(10) 汞科學推動公約的實施 (Mercury Science Driving the Implementation of the Minamata Convention. Eisaku Toda)

公約第 19 條規定締約方在研究、開發和監測方面進行合作，以作為決策和執行之依據。

第 19 條提到了各方合作的幾個科學領域（圖 13）。第一個領域是汞的使用、排放和釋放清單。公約 COP4 於 2021 年和 2022 年審議了由技術專家組制定的關於土地和水中汞釋放清單編制方法的指引草案，締約方於準備相關來源之釋放清單時，可以納入考量，並要求秘書處彙整締約方在使用指引時之相關意見作為 COP5 討論參考。

第二個領域是環境和人類中汞的建模和監測。公約秘書處向締

約國大會第四屆會議提交了評估公約成效的全球汞監測指引草案，以及關於金礦場址環境監測的指南。

第三個領域是健康、環境、社會經濟和文化影響評估。公約秘書處正展開兩項關於汞社會經濟影響評估的研究，該研究還涉及對生態系統的影響，將於 2022 年發佈。

第 19 條中提到的另一個領域是與減少產品和製程中的汞使用以及汞向環境的排放有關的技術（圖 13）。公約 COP4 審議了關於使用汞的產品和製程的技術報告，作為公約審查附件 A 及附件 B 受公約管制的產品和製程的一部分。為了在 2023 年召開 COP5，並為了有效執行公約，預計將增進科學和政策之間的互動。

Mercury Science Driving the Implementation of the Minamata Convention
Eisaku Toda
Secretariat of the Minamata Convention on Mercury
International Conference on Mercury as a Global Pollutant, J

簡報者：Eisaku Toda, Secretariat of the Minamata Convention

	COP 1 (2001)	COP 2 (2006)	COP 3 (2011)	COP 4 (2013)	COP 5 (2018)
Inventory	Art 6: Emission Inventory			Art 6: Release Inventory	
Monitoring and modeling				Art 22: Monitoring Guidance	
Assessments					
Commerce and trade	Art 8: Supply and trade				
Control and reduction	Art 7: POPs Art 8: BAT-BEP	Art 10: Storage	Art 12: Contaminated sites	Art 4: Products Amendment to annex A (Art 13: Mercury waste under Basel COP)	

汞公約條文與汞的供應與貿易、使用、排放與釋放及後續處理處置等議題之關係

Decision MC-4/3: Review and amendment of annexes A and B
COP 4 awarded Annex A Part 1 to add the following with phase-out date of 2025:
• Compact fluorescent lamps with an integrated ballast (CFL-i) for general lighting purposes that are 30 watts or less a mercury content not exceeding 5 mg per lamp holder
• Cold cathode fluorescent lamps (CCFL) and external electrode fluorescent lamps (EEFL) of all lengths for electronic displays, not included in the phased lighting
• X-ray gearings to be used in orthodontics
• Short pressure transformers, cold pressure transformers and all pressure vessels except those included in large scale equipment or those used for high precision measurement, of any no suitable mercury leak-detection is available
• Mercury resource gauge
• The bakeware and wheel weights
• Photographic film and paper
• Propellant for satellites and spacecraft
COP 4 awarded Annex A Part 2 to add the following for dental amalgam:
• The fact, shall include or not allow, by taking measures as appropriate, or measures to control production
• The fact shall include or not allow, by taking measures as appropriate, or measures to control shipment for the dental treatment of dentists, of patients under 16 years and breastfeeding women, except when considered necessary by the dental practitioner in the best interests of the patient

公約 COP4 針對含汞產品及牙科汞合金之最新決議

Decision MC-4/3: Review and amendment of annexes A and B
COP 5 decided to consider the phase-out dates of low-mercury-added mercury-added sealed mercury switches of COP 4:
• Cold cathode fluorescent lamps (CFL) for general lighting purposes:
(a) Fluorescent lamps (FL) of 15 watts with a mercury content not exceeding 10 mg per lamp holder or tray
(b) Fluorescent lamps (FL) of 18 watts with a mercury content not exceeding 10 mg per lamp holder or tray
(c) Fluorescent lamps (FL) of 23 watts with a mercury content not exceeding 10 mg per lamp holder or tray
(d) Fluorescent lamps (FL) of 29 watts with a mercury content not exceeding 10 mg per lamp holder or tray
(e) Fluorescent lamps (FL) of 36 watts with a mercury content not exceeding 10 mg per lamp holder or tray
COP 5 decided to further consider of COP 4 adding the production of polyethylene using mercury-containing catalysts to part of Annex B and requested the secretariat to complete information on the availability and technical and economic feasibility of its mercury-free alternatives
COP 5 requested the secretariat to prepare a short report on the technical and economic feasibility of mercury-free processes using alternative materials and catalysts or ethylene listed in it to the COP establishing such feasibility

汞管理相關挑戰與聯合國永續發展目標(SDGs)及永續轉型議題之關連性

圖 13 「汞科學推動汞公約的實施」簡報資料

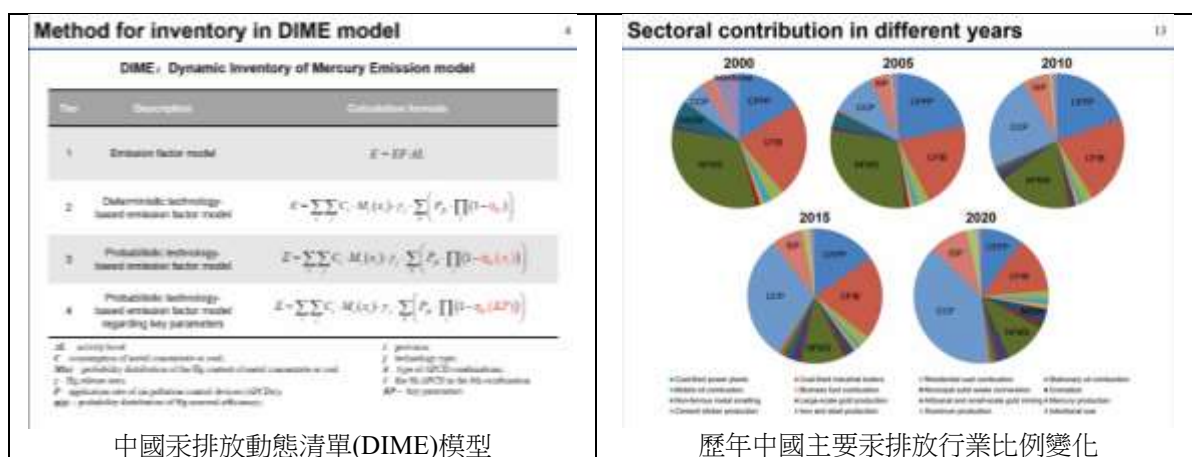
(11) 改進 2000-2020 年中國人為汞排放清單：對汞公約更準確成效評估 (Improved Anthropogenic Mercury Emission Inventories for China from 2000 to 2020: Towards More Accurate Effectiveness Evaluation for the Minamata Convention. Yang Zhang, Lei Zhang, Shuzhen Cao, Yu Zhao)

公約中涉及五個點源類別，包括燃煤發電廠、燃煤工業鍋爐、非鐵金屬冶煉、水泥生產廠和廢棄物焚燒設施。作為最大的人為汞排放國，該研究表示中國應建立相關來源的汞排放清單，並評估控制效果。為了提高這兩方面的能力，這項研究中開發了一個綜合的汞排放動態

清單(Dynamic Inventory for Mercury Emission, DIME)模型 (圖 14)，並用它來建立 2000-2020 年中國人為汞排放的清單。

該研究利用選擇性催化還原系統(selective catalytic reduction systems, SCR)、靜電除塵器(electrostatic precipitators, ESP)和濕煙氣脫硫系統(wet flue gas desulfurization systems, WFGD)組合常用空氣污染控制裝置，開發了一個模型，用於估算非鐵金屬冶煉的汞排放量，及瞭解對汞去除效率。燃煤工業鍋爐的汞排放量是透過區分鍋爐與工業煤炭燃燒中的窯爐和熔爐來計算的，並考慮了更合理的汞去除效率。在估算水泥生產廠的汞排放時，係考慮了超低排放而升級的空氣污染控制裝置。DIME 模型中使用的改進方法為評估公約的有效性提供一種更準確方法。

結果顯示，中國人為汞排放總量從 2000 年的 373 公噸持續增加到 2010 年的 515 公噸，2020 年下降到 366 公噸。從 2003 年起，非鐵金屬冶煉的汞排放量持續下降，主要是由於小型冶煉廠的淘汰和 SO₂ 排放控制的加強，但近年來逐漸趨於平穩。受惠於安裝高效的空氣污染控制裝置，自 2008 年以來，燃煤發電廠和燃煤工業鍋爐的汞排放量呈穩定下降趨勢，特別是 2015 年至 2017 年期間由於超低排放量的空氣污染控制裝置改造，燃煤發電廠的汞排放量呈穩定下降趨勢。由於水泥窯的增建，水泥生產廠的汞排放量從 2000 年到 2014 年顯著增加，然後由於新建脫硫裝置的共同效益而逐漸下降。廢棄物焚燒設施排放汞的持續增長是由於廢物焚燒量的迅速增加。如圖 14 所示。



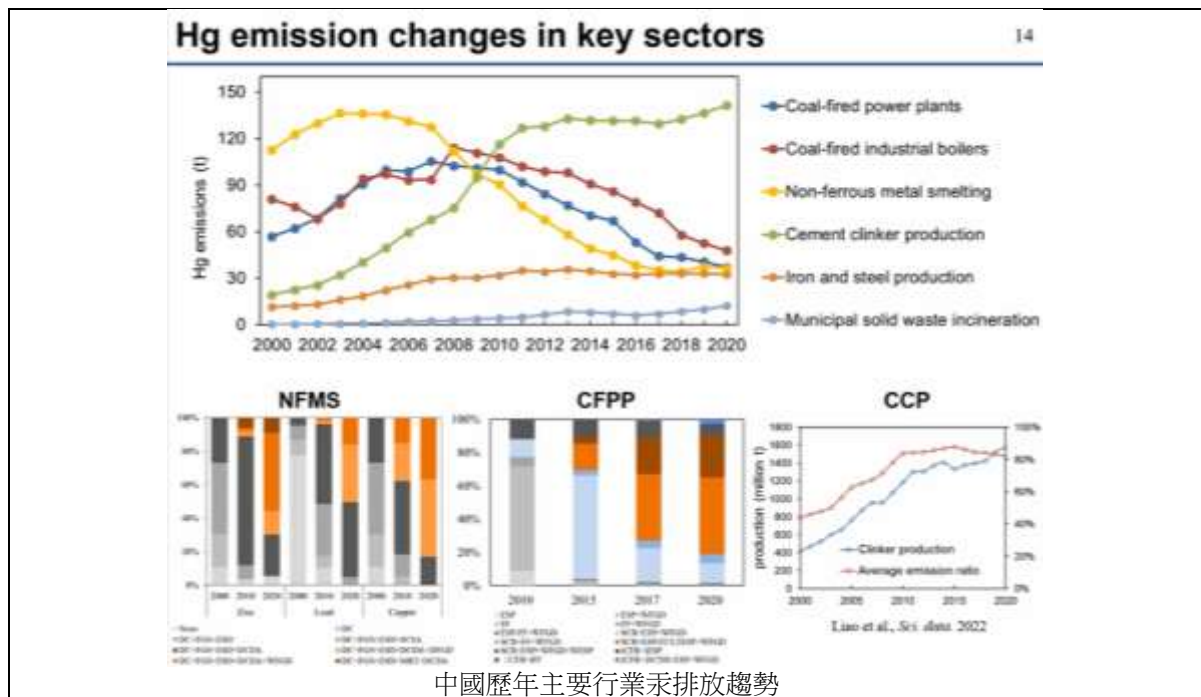


圖 14 「2000-2020 年中國改進人為汞排放清單：對公約更準確成效評估」簡報資料

(12) 參與 BEA 研究的西班牙青少年的魚類攝食量及頭髮中的汞含量
(Fish Consumption and Levels of Mercury in Hair in Spanish Teenagers Participating in the BEA Study. Ana Cañas-Portilla, Esteban López Marta)

魚類中的汞是一個影響全世界人口的議題，即使是已有立法嚴格控制其使用、貿易和消除的國家也是如此。與許多其他地中海國家一樣，西班牙的飲食攝取中占有很大部分是海洋產品（圖 15），這也反映在西班牙人體內的汞含量上。不同的人類生物監測研究調查了西班牙成人及兒童的汞含量，但迄今為止尚未針對青少年體內的汞含量進行研究。

BEA 研究（Biomonitorización En Adolescentes）是西班牙進行的第一項全國性人類生物監測調查，旨在研究城市中青少年體內的環境污染物。大約 500 名青少年（14-16 歲）從西班牙 11 個大城市的 22 所中學招募。所有參與者都完成了自我管理的問卷調查，並捐贈了頭髮，尿液和血液樣本。通過熱分解汞齊原子吸收光譜法分析頭髮中的總汞。頭髮中總汞的定量極限(LOQ)為 0.01 $\mu\text{g/g}$ ，且需要 3mg 頭髮的樣本進行測定。

研究結果顯示，所有頭髮樣本的總汞含量皆超過 LOQ。研究總人口的幾何平均數(GM)(CI 95%)為 0.86 $\mu\text{g/g}$ (0.76-0.96)，P95 為 3.37 $\mu\text{g/g}$ ，其中性別並沒有顯著差異，但在不同地點之間存在一些差異。

韋爾瓦和阿利坎特這兩個沿海地區的汞含量最高(GM CI 95%= 1.86 $\mu\text{g/g}$ (1.12-2.60); 1.13 $\mu\text{g/g}$ (0.82-1.45))，格拉納達的汞含量最低(0.54 $\mu\text{g/g}$ (0.27-0.81)) (圖 15)。觀察到與白魚、小藍魚(如沙丁魚、鳳尾魚)和大藍魚(如金槍魚、箭魚)的食用頻率有關的統計學顯著差異($p<0.001$) (圖 15)，且約 13%的參與者頭髮中的總汞含量高於糧農組織/世衛組織食品新增劑聯合專家委員會(JECFA)訂定的 2.3 $\mu\text{g/g}$ 。

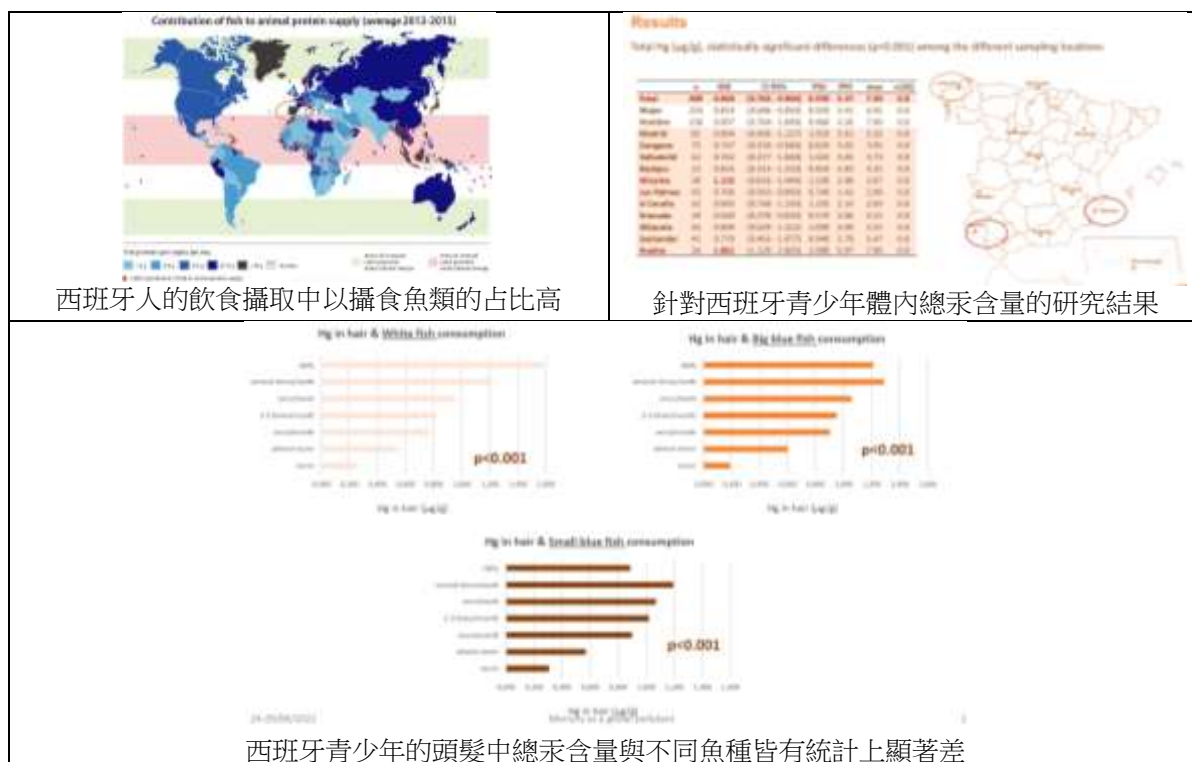


圖 15 「參與 BEA 研究的西班牙青少年的魚類攝食量及頭髮中的汞含量」簡報資料

三、心得及建議

汞不僅存在於自然環境中，也會因人為活動而釋放及排放，而人為活動的排放和長期大氣遷移相結合，導致全球汞的濃度持續增加，故聯合國環境規劃署(UNEP)針對全球汞污染問題制訂汞水俣公約(Minamata Convention on Mercury)，並於 2017 年 8 月 16 日正式生效，旨在遏制汞向環境的排放，並進行全球汞監測的工作，透過調查及監測相關數據追蹤在各項污染控制的措施，可作為法規或標準修正之參考。本次會議各國政府部門、業界、專家學者、非政府組織等的多項研究透過相互交流，促進相關汞污染控制及精進管理。

關於汞的來源、使用、排放／釋放至廢棄各階段的管理及監測的工作，以及含汞產品的替代、公約執行的效益評估等，於此會議中皆有深入之探討。例如：

(一) 在汞排放部分，中國專家學者採用生命週期影響評估造成元素汞排放總體環境負荷的主要因素，並提供關於汞排放對環境影響的定量資料，促進汞排放的

策略管理。另有專家學者說明，研究顯示，在過去二十年，澳洲的人為汞排放量中減少了 2 倍以上，其中黃金生產業降幅最大，其次是褐煤發電廠和商業產品廢棄物，只有鋁行業的汞排放量顯著增加。

(二) 在含汞商品部分，清潔照明聯盟(Clean Lighting Coalition, CLiC)計算(2025-2050 年)，如改用無汞替代品，將可避免 35 億噸二氧化碳，232 噸汞，並節省全球 1.3 萬億美元的電費，故逐步淘汰含汞、低效的照明是一項務實可行的行動，對地球具有示範性的共同利益，在 2023 年 COP5 上，剩餘的直管型螢光照明將逐步淘汰。

(三) 在公約的效益評估部分，在挪威，挪威的法規於公約生效時較公約規範嚴格，因此無需對現行法律和條例進行任何修改，專家指出，挪威空氣中的汞和濕沉降正在減少，更嚴格的環境法規、監測和許可有助於降低汞的排放等污染。另有專家研究指出，在美國觀察環境和人類健康對監控管理的反應，以及科學研究的最新進展，瞭解這些進展為減少汞負荷對環境的好處提供了定量資訊。美國 2011 年頒布的《汞和空氣毒物標準》已使得汞排放和環境汞濃度顯著下降。

(四) 在汞監測部分，於西班牙的飲食攝取中占有很大部分是海洋產品，這也反映在西班牙人體內的汞含量上。不同的人類生物監測研究調查了西班牙成人及兒童的汞含量，但在不同地點之間存在一些差異。

建議：臺灣目前以「執行聯合國汞水俣公約推動計畫」作為跨部會汞管理之依據，並使國內管理措施與國際接軌。未來建議可藉由 IGMCP 等研討會議，關注各國於汞議題之最新趨勢，並持續關注汞公約最新發展，加強跨部會協力合作，推動減少汞之源頭使用，管制含汞產品，強化相關監測，鼓勵產業使用無汞替代品，加強含汞廢棄物管理，減少汞向環境之排(釋)放，以生命週期為基礎彙整各項效益評估指標，再反饋我國於汞管理需強化的面向，每年持續滾動修正汞相關管理措施，共同達成維護環境安全，營造健康永續之生活環境。