空氣污染與噪音類

固定源汞排放管制介紹與空品監測分析

陳秉圻 *、陳怡伶 *、羅鈞 *、周劍平 **、謝仁碩 ***、林怡君 ***
謝知行 ***

摘　　要

汞沸點低、經高溫燃燒後主要以氣態形式存在，且不易被空污防制設備捕捉，為具長程傳輸能力之有害空氣污染物；氣態汞排放於大氣後最終會透過生物體機制轉換成為甲基汞，該物質對人體及環境會產生巨大危害；鑒於日本過去曾發生甲基汞公害事件、影響深遠，聯合國環境總署爰於 2013 年通過「水俁公約」，要求以生活中淘汰汞、工業製程中減少汞及降低固定源汞排放 3 大管制目標，降低汞對人體及環境之危害；其中與固定污染源減排有關且被列為應優先管制之 3 大行業分別為廢棄物焚化爐、燃煤鍋爐及水泥旋窯。

環保署基排放管制權責，歷經多年努力在法規部分已發布廢棄物焚化爐、燃煤鍋爐及一般性固定源有害重金屬之汞有關 3 項排放標準，目前配合循環經濟之政策推動，刻正對水泥旋窯進行汞排放現況調查、國外資料蒐集，以增訂合宜水泥業汞排放標準；此外，持久以來透過排放量更新及排放檢測，以瞭解國內汞排放結構及排放特性；在大氣濃度掌握部分，從 2006 年起即逐年進行國內氣狀汞及粒狀汞空品監測，以瞭解一般大氣現況，歷年一般空品站平均濃度介於 2.0~4.0ng/m^3 且逐年降低，粒狀汞較氣狀汞低，粒狀汞 / 氣狀汞比例約 1.2%~10.9%；另對排放源集中區監測評估主要排放源對周遭環境衝擊，分別選定排放源集中之高雄、宜蘭及台中地區，以 Tekran Model

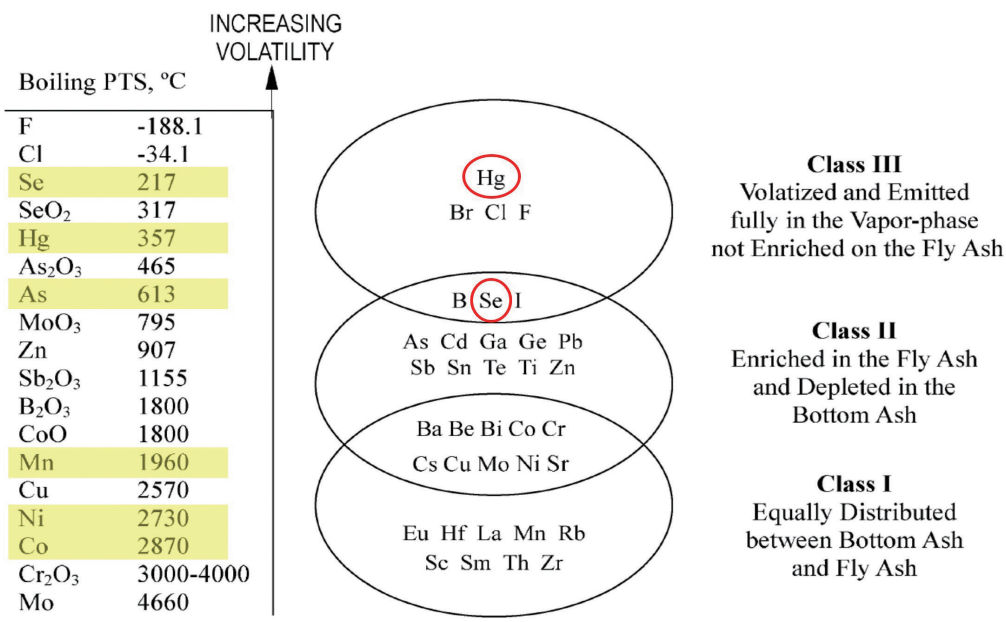
2537x 汞自動連續儀器進行元素汞、粒狀汞及反應性汞長時間連續監測；監測結果顯示元素汞平均濃度分別為：臨海工業區 5.27ng/m^3、蘇澳地區 3.57ng/m^3、台中港附近 2.60 ng/m^3，顯示臨海工業區受排放源影響濃度較為偏高。

【關鍵字】汞、水俁公約、有害空氣污染物(HAPs)

* 環興科技股份有限公司 環境規劃一部
** 財團法人工業技術研究院 能源與環境研究所
*** 行政院環境保護署 空氣品質及噪音管制處

一、前言

重金屬種類繁多且具型態多樣、流布廣泛、無法被分解等多重特性；在環境中遵循物質不滅定律、不同控制技術也僅能做到相的移轉而無法予以破壞去除；如重金屬為有害類型又長期累積於人體及環境中，勢將會產生重大危害。依據國外對煤燃燒研究顯示 (圖 1)，煤中含有之重金屬經高溫燃燒後，多數沸點高之重金屬因不易揮發，將會附著於細小顆粒上；若透過良好除塵設備，可將其有效捕集在飛灰中，避免排放於大氣；惟有汞較為特殊，其沸點低、易揮發，故高溫燃燒後排放主要以氣態為主，如僅使用集塵設備難以捕捉，管制上也是最為棘手 (Xu,2004)。



資料來源：Xu, M. (2004). Status of trace element emission in a coal combustion process: a review. Fuel Processing Technology

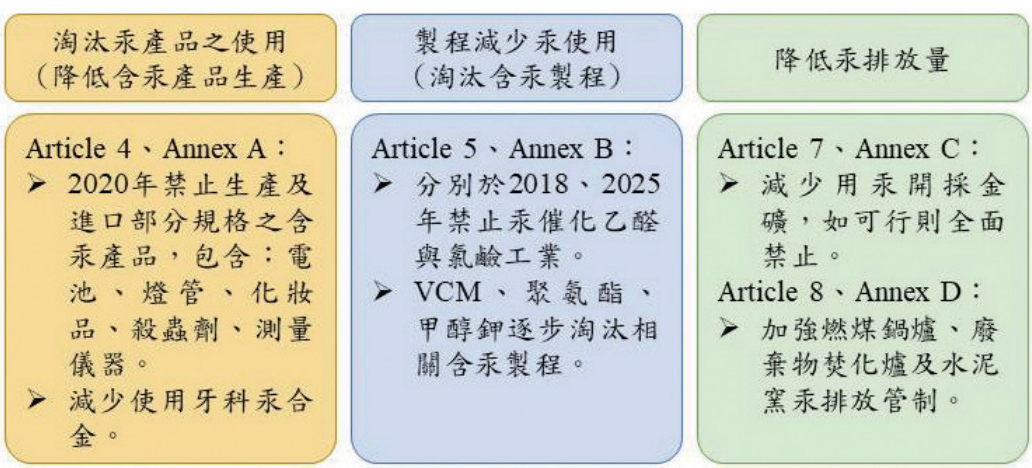
圖 1　燃煤中金屬元素特性分析示意圖

依國內外對燃煤研究指出，經燃燒後汞之廢氣樣態，主要以 3 種型態分布存在：元素汞 (GEM)、氧化汞 (RGM) 及粒狀物結合汞 (PHg)(Galbreath 等人，2000 年)。其中 PHg 因附著於飛灰上，可經由除塵設備予以移除；RGM 較易溶於水，透過濕式

除酸設備 (WFGD) 可將其捕捉於石膏或脫硫廢水中；GEM 則不溶於水且以氣態形式為主，但利用觸媒氧化設施 (SCR) 可將其轉化為 RGM 而予以移除，或直接以活性碳吸附捕捉，然國際間燃煤電廠安裝活性碳除汞之案例不多，而最終未被捕捉之汞就會自煙囪排放於大氣。

進入大氣之 GEM 在經過長時間傳輸過程經化學反應會逐漸被氧化成 RGM，最終經乾溼沈降至地表或水體中，RGM 一旦進入地表水體中，在微生物催化反應作用下，最終將會轉換為甲基汞 (methyl- mercury)；甲基汞經生物濃縮會對人體神經系統產生重大危害，在魚體內濃度累積型態尤為明顯，縱使遠在地球兩端南北極之地區，雖無任何汞排放源，但魚體內仍可檢驗出甲基汞存在。

鑒於汞會透過生物鏈累積而對人體產生重大且不可回復之影響，日本水俣病公害案例已證實甲基汞對人體危害甚鉅，故聯合國環境總署 (以下簡稱 UNEP) 於 2013 年 10 月在日本九州地區熊本縣簽署全球「水俣公約」，公約中明確提出 3 大管制策略包括：降低日常生活汞生產與使用、減少工業製程汞使用及降低固定源汞排放量；其中廢棄物焚化爐、燃煤電廠及水泥旋窯等 3 大主要排放源就明確被列入應減排之對象 (UNEP 水俣公約管制策略架構整理如圖 2)。



資料來源：UNEP and Minamata Convention on Mercury (2019), Minamata Convention on Mercury

圖 2　聯合國環境總署水俣公約 3 大管制策略架構圖

國內對汞排放管制工作起步甚早，早於 1993 年發布廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準時，就已對汞訂定管制濃度值，要求加強廢棄物中含汞物質回收及強化管末處理設備，期有效降低汞排放濃度；而配合國際間對燃煤發電所排放汞應共同管制趨勢，環保署亦於 2014 年在修訂電力業空氣污染物排放標準中，特別增列汞排放標準值，要求燃煤電廠需以完善防制設備或選購低汞煤源，以符合排放標準值。

而水泥窯在全球推動循環經濟過程中扮演極為關鍵角色，利用旋窯燃燒溫度高及停留時間長等操作特性，可有效破壞分解有害物質，且若廢棄物中含有水泥所需原料成分亦可減少原物料使用量，充分達到資源再利用目的；惟廢棄物若含有汞成分，經過高溫煅燒後會再釋出，在防制上就會相當棘手，目前正以全方位政策推動考量、排放特性研究及參採國外管制標準，期能研訂出適切之水泥業汞排放標準，並以不影響循環經濟推動且可與國際間相互接軌之排放標準值為最高原則。

本文係針對歷年來有關國內汞排放管制工作，包括：標準研訂、排放結構及主要業別排放特性進行介紹，並針對長期以來對國內大氣汞監測結果進行分析。

二、甲基汞公害案例介紹 - 日本水俣病

水俣病是在日本、甚至是全球所發生過之最大規模汞公害疾病、震驚國際，談及對汞管制必要性，就需先行介紹甲基汞在日本所造成之水俣病公害事件。此一疾病肇因於 1909 年 1 家「新日本窒素肥料」公司在九州地區之熊本縣、水俣市附近設立運轉；該公司原本以生產肥料為主，後續於 1932 年起開始生產乙醛 (Acetaldehyde)，但該製程會有副產品甲基汞伴隨產生。由於早年環保意識不足，該工廠遂將含有甲基汞的廢水在未經處理下就直接排放至附近水俣灣 (Bay) 海域中，前後歷經有 20 餘年；直至 1956 年水俣病的病症被陸續發現確認，日本政府遂展開原因調查，在 1959 年由熊本大學發布正式調查結果，證實該病症主因係水俣灣附近魚貝類已遭受到甲機汞污染，當地民眾在長期食用被污染的魚貝類後，導致甲基汞侵蝕人體腦神經系統而引發的大規模疾病。

在 1962 年更陸續發現，懷孕中的婦女因為食用被甲基汞污染的魚類，會經由胎盤造成胎兒水銀中毒而產下類似腦性小兒麻痺的先天性水俣病患者，日本政府於 1968

年正式發布水俣病為甲基汞污染事件後，該窒素工廠也正式停工，但甲基汞污染該海灣時間已長達 30 餘年，最終透過食物鏈累積危害居民，已造成無法挽回之悲劇，相關日本水俣病污染案例發生沿革整理如圖 3 所示。

資料來源：

內文：新潟県 (令和元年度改訂), 新潟水俣病のあらまし , https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/seikatueisei/1195661749709.html

圖片：Wikimedia Commons (2008) , File:Minamata map illustrating Chisso factory effluent routes jp.png, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minamata_map_illustrating_Chisso_factory_effluent_routes_jp.png

圖 3　日本水俣病污染事件發生沿革

在醫學上早已證實甲基汞會對人體神經系統產生巨大危害，而日本水俣病對人民所造成之典型症狀包括：手足麻痹、運動神經失調、視力狹窄、聽力及語言障礙、平衡機能喪失、眼球運動機能障礙、肢體劇烈顫抖等；依據日本環境部統計資料顯示，至 2013 年 5 月，被確診水俣病患有 2,977 人，因時間過於久遠，其中有 2,331 人已經死亡，而日本政府於 1995 年支付受四肢受到週期性抽動症影響病患政治和解金約 11,000 人，爾後於 2020 年公布《水俣病特別措施法》，該法案援助的申請人數已高達 65,151 人，相關數據仍不斷更新中。

水俣病公害事件對日本政府及人民已造成無法彌補之傷害，也給予世界各國在汞管制方面有相當大警惕，各國均需以全方面管制策略著手，對汞需做到降低、減少及減排等減量措施，確保民眾免於再受到汞危害。

三、我國固定污染源汞排放管制介紹

3.1 排放標準研訂

在汞排放標準研訂部分，目前已發布 3 項與汞有關排放標準整理如表 1 所示；其中「廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準」早於 1992 年即發布實施，該標準中訂有汞排放標準值，後續於 2006 年加嚴排放標準值；此外，於 2004 年修訂「電力設施空氣污染物排放標準」時，特別針對汽力機組及燃煤汽電共生鍋爐增訂汞排放標準值；而近年來為加速有害空氣污染物 (Hazardous Air Pollutants, HAPs) 排放管制，於 2021 年 2 月發布第一批「固定污染源有害空氣污染物排放標準」，率先針對 15 項 VOCs 及 7 項有害重金屬訂定管道及周界標準，而備受關注之汞即列為首批優先管制對象。

表 1　我國已發布與重金屬汞相關排放標準彙整表

法規名稱	發布 / 修正日期	實施標準[註 1]
(一) 固定污染源空氣污染物排標準	1992/04/10 發布 2021/06/29 修正	其他空氣污染物 (重金屬包含：汞、鎘、鈷、鉻、銅、鎳、鉑、錳、鎢、硒、銻、鉬等)，依[註 1] 所列方法計算
(二) 廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準	1992/11/30 發布 2006/12/25 修正	2007 年 1 月 1 日 (含) 以後設立之廢棄物焚化爐 (一) 處理量未達 4 公噸 / 小時 ＊汞及其化合物：0.05 mg/Nm³ (二) 處理量 4 公噸 / 小時以上 ＊汞及其化合物：0.05 mg/Nm³ 2007 年 1 月 1 日前設立之廢棄物焚化爐 (一) 處理量未達 4 公噸 / 小時 ＊汞及其化合物：0.1 mg/Nm³ (二) 處理量 4 公噸 / 小時以上 ＊汞及其化合物：0.05 mg/Nm³

<table>
<tr><td>(三) 電力設施空氣污染物排放標準</td><td>1994/05/04 發布
2004/12/01 修正增訂汞標準</td><td colspan="3">汞及其化合物：
(一) 汽力機組：固體燃料新設污染源 2μg/Nm³
固體燃料既存污染源 5μg/Nm³
(二) 汽電共生設備鍋爐以總熱效率換算：
固體燃料新設污染源：2~3μg/Nm³
固體燃料既存污染源：5 ~13μg/Nm³</td></tr>
<tr><td rowspan="3">(四) 固定污染源有害空氣污染物排放標準</td><td rowspan="3">2021/02/26 發布</td><td>適用對象</td><td>汞排放管道標準值</td><td>汞周界標準值</td></tr>
<tr><td>新設</td><td rowspan="2">依註 1 所列方法計量</td><td rowspan="2">1 μ g/m³</td></tr>
<tr><td>既存</td></tr>
</table>

註 1：固定污染源有害空氣污染物排放標準中未列排放管道排放標準之有害空氣污染物，應依下列方法計算其排放管道之排放標準：

(1) 低排放管道，即 h ≦ 6m(公尺) 時。

$q=a \cdot b^2$

b : 污染源之排放管道口至該污染源周界之最短水平距離，其單位為 m(公尺)。

(2) 較高排放管道，即 h>6m 時。

(a) b ≧ 5（h-6）

$q=a \cdot b'^2$

b' : 污染源之排放管道口至該污染源周界線上垂直高度 6m(公尺) 處之最短距離，其單位為 m(公尺)。

(b) b < 5（h-6）

$q=a \cdot b''^2$

b"：以污染源之排放管道口中心為頂點向下十二度俯角所形成之圓錐與他人建築物（無人留守之倉庫除外）相交時，自該排放管道口中心至該建築物之最短距離，其單位為 m(公尺)。

(c) b < 5（h-6）且無前述 2. 之狀況，即污染源距離建築物甚遠或建築物低於 6 m(公尺)，致以污染源之排放管道口中心為頂點向下十二度俯角所形成之圓錐與他人建築物並無相交時。

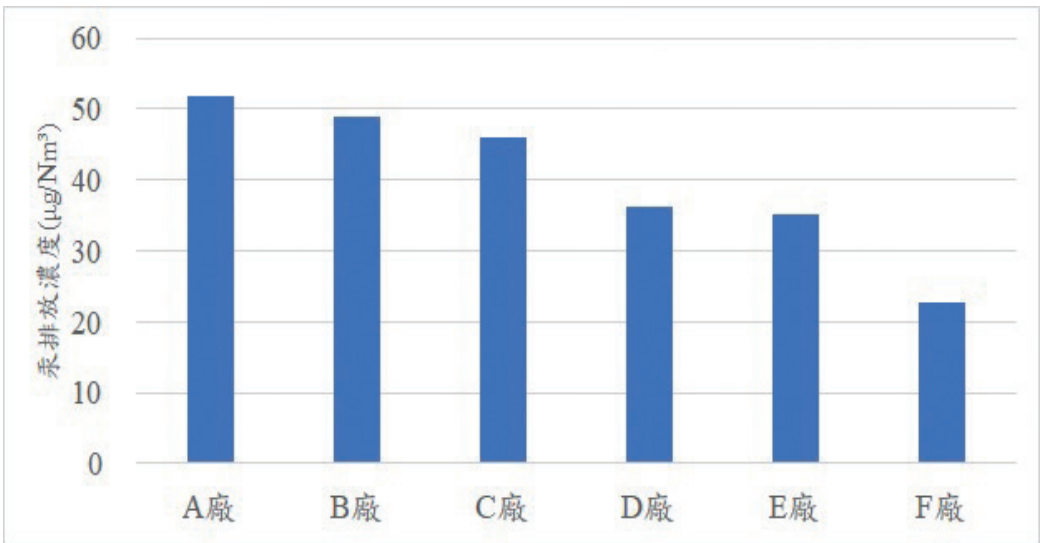
$q=a \cdot 25 \cdot (h-6)^2$

針對水泥業部分，如前所述，水泥旋窯具有燒溫度高等等製程特性，國內外業者均利用此一特性，可代為焚化有害廢棄物，若廢棄物中含有許多水泥所需原料物質，亦可節省原物料使用量充分達到資源再利用目的，故水泥窯在全球推動循環經濟過程中扮演極為重要角色。

惟原料、燃煤或代處理之廢棄物中會含有微量汞，且既有空污防制設備 (僅有除塵、SNCR 等) 對汞的移除效果有限，目前正參採國外管制標準、國內排放現況及廢棄物資源化再利用觀點評估，以研訂出適用於我國之汞排放標準；蒐集世界各國有關水泥業空氣污染物排放標準整理如表 2 所示。目前歐盟、美國及中國有特別針對汞訂出排放標準，除美國標準值相較嚴格外，普遍各國標準值大都為 50μg/Nm^3，依據行政院環保署於 2022 年針對國內六座水泥窯現行生料磨煙囪進行汞排放檢測，結果整理如圖 4；由檢測結果發現，現行排放濃度大都可符合歐盟等國排放標準。一般在排放標準發布後，也隨時參採技術發展趨勢、國外最新管制標準及國內排放現況，機動對標準值進行檢討、加嚴，使我國排放管制標準可與國外趨勢接軌。

表 2　水泥業相關空氣污染物排放標準彙整表

空氣污染物	我國			歐盟 (2013)	德國 (2007)	美國 (2007)	中國大陸 (2014)
	現行標準 (2021)	宜蘭縣 (2014)	高雄市 (2017)				
NO_x (ppm)	220 (CEMS 8 小時內有效數據算術平均值)	350、400 (連續 2 小時)	350(連續 24 小時) 250(每 2 小時)	<98~220	<98~220	160~200	195 (特定地區 156)
粒狀物 (mg/Nm^3)	30	-	-	30	20	6~20	30 (特定地區 156)
SO_x (ppm)	100	-	-	<18~140	18	30	70
Hg (μg/Nm^3)	78~1,236 (固定源標準)	-	-	50	50 (原 30)	13	50
總 F (mg/Nm^3)	4~65 (固定源標準)	-	-	1	1	-	5 (特定地區 3)



資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

圖 4　我國水泥窯汞排放濃度現況分析圖 (2022 年)

3.2 排放結構分析

依據 UNEP 與 the Arctic Monitoring and Assessment Programme (以下簡稱：AMAP) 共同合作於 2019 年發表全球汞排放量顯示，以 2015 年為基準年，推估全球汞排放量約為 2,220 (2,000~2,820) 公噸 / 年，其中以小規模人工金礦冶煉、水泥窯、非鐵金屬初級冶煉 (鋁、銅、鉛、鋅)、煤燃燒及廢棄物焚化等業別是現行全球汞主要排放源，相關資料整理如表 3 所示；如以地理區位來看，有 49% 排放貢獻量是源於亞洲 (包含：東亞及東南亞地區)，其次則為南美洲 18.4%。

雖然小規模人工冶煉金礦及非鐵金屬初級冶煉該 2 項業別在國際間而言是汞最主要排放源，但該 2 項製程有地區特殊性 (在國內即不存在該 2 項業別)；而與一般民生有息息相關之水泥窯、燃煤電廠及廢棄物焚化等行業則是各國皆有之主要排放源，故被列入水俣公約要求減排對象。

表 3　世界各國各業別汞排放量彙整表 (2015 年基準年)

行業別	汞排放量 (範圍)，公噸	占比 (%)
1 人工小規模金礦冶煉 (ASGM)	838 (675~1,000)	37.7
2. 生質燃燒 (家戶、工業及電廠)	51.9 (44.3~62.1)	2.33
3. 水泥製造業 (原料及燃料 , 包含：煤)	233 (117~782)	10.5
4. 火化場	3.77 (3.51~4.02)	0.17
5. 鹼氯生產 (汞製造程序)	15.1 (12.2~18.3)	0.68
6. 非鐵金屬初級冶煉 (鋁、銅、鉛、鋅)	228 (154~338)	10.3
7. 大規模金礦製造業	84.5 (72.3~97.4)	3.8
8. 汞製造業	13.8 (7.9~19.7)	0.62
9. 石油煉製業	14.4 (11.5~17.2)	0.65
10. 初級鋼鐵製造業	29.8 (19.1~76.0)	1.34
11. 固定源煤燃燒 (家戶 / 住宅及交通運輸)	55.8 (36.7~69.4)	2.51
12. 固定源氣燃燒 (家戶 / 住宅及交通運輸)	0.165 (0.13~0.22)	0.01
13. 固定源油燃燒 (家戶 / 住宅及交通運輸)	2.70 (2.33~3.21)	0.12
14. 固定源煤燃燒 (工業製程)	126 (106~146)	5.67
15. 固定源氣燃燒 (工業製程)	0.123 (0.10~0.15)	0.01
16. 固定源油燃燒 (工業製程)	1.40 (1.18~1.69)	0.06
17. 固定源煤燃燒 (電廠)	292 (255~346)	13.1
18. 固定源氣燃燒 (電廠)	0.349 (0.285~0.435)	0.02
19. 固定源油燃燒 (電廠)	2.45 (2.17~2.84)	0.11
20. 煉鋼二次冶煉 (電弧爐)	10.1 (7.65~18.1)	0.46
21. 氯乙烯製程 (使用汞觸媒)	58.2 (28.0~88.8)	2.6
22. 產品生產之副產廢棄物	147 (120~223)	6.6
23. 一般廢棄物焚化 (可控制燃燒源)	15.0 (8.9~32.3)	0.67
總計	2,220 (2,000~2,820)	100

資料來源：Technical background report to the global mercury assessment 2018，AMAP/UN Environment 2019

至於國內排放量結構，依據環保署推估 2021 年我國汞排放量為 1.684 公噸，各行業別排放量整理如表 4 所示，若與全球汞排放量相較 (2015 年全球排放量)，國內汞排放總量相當低；而 UNEP 所要求減排之行業別水泥旋窯、燃煤電廠及燃煤汽電共生鍋爐及廢棄物焚化爐，皆是國內汞主要排放源，國際間要求減排對象與國內主要排放源相當一致。

表 4　我國行業別汞排放量彙整表 (2021 年基準年)

編號	污染源	國內數量	活動強度		汞排放量		
			年活動量	單位	公噸 / 年	不確定性	比例
1	大型垃圾焚化爐	61	6,275,157	公噸廢棄物	0.168	6.18%	9.95%
2	中型一般廢棄物焚化爐	1	4,984	公噸廢棄物	0.000	7.07%	0.01%
3	有害廢棄物焚化爐	2	87,442	公噸廢棄物	0.003	4.35%	0.17%
4	醫療焚化爐	12	44,908	公噸廢棄物	0.002	3.43%	0.09%
5	事業廢棄物焚化爐	94	615,638	公噸廢棄物	0.020	4.39%	1.52%
6	火化場	36	186,868	具遺體	0.007	11.5%	0.42%
7	車輛燃料－汽油車	-	7,849,589	萬公里車行里程	0.006	42.4%	0.60%
	車輛燃料－輕型柴油車		1,447,614	萬公里車行里程	0.000	42.4%	
	車輛燃料－重型柴油車		1,053,499	萬公里車行里程	0.000	42.4%	
	車輛燃料－機車		5,162,047	萬公里車行里程	0.004	42.4%	
	車輛燃料燃燒－油氣雙燃料車		34,747	萬公里車行里程	0.000	42.4%	
	車輛燃料燃燒－油電車		165,691	萬公里車行里程	0.000	42.4%	
	車輛燃料燃燒－特種車		98,042	萬公里車行里程	0.000	42.4%	
8	燃煤發電鍋爐	21	32,477	千公噸燃煤	0.141	1.81%	8.34%
9	燃煤汽電共生鍋爐	70	15,691	千公噸燃煤	0.147	1.88%	8.68%

10	燃煤蒸汽鍋爐	364	6,532	千公噸燃煤	0.103	25.7%	6.19%
11	燃油鍋爐	4,500	391,159	公秉燃油	0.010	4.22%	0.23%
12	燃材及其他燃料鍋爐	265	2,996	公噸燃料	0.004	22.45%	0.62%
13	水煤漿鍋爐	12	159,366	公噸燃料	0.002	6.23%	0.10%
14	水泥旋窯	13	11,193,347	公噸熟料	0.347	2.60%	20.6%
15	瀝青拌合	113	8,763,278	公噸瀝青產量	0.078	10.97%	4.61%
16	燒結爐	6	19,765,788	公噸燒結礦	0.220	3.12%	13.0%
17	電弧爐 - 一般碳鋼	21	8,488,125	公噸鋼胚	0.205	6.48%	12.1%
18	電弧爐 - 不鏽鋼	6	1,214,032	公噸鋼胚	0.022	4.42%	1.32%
19	電弧爐 - 合金鋼	4	96,944	公噸鋼胚	0.006	9.87%	0.38%
20	煉鋼業集塵灰高溫冶煉設施	7	340,802	公噸集塵灰	0.131	4.11%	7.77%
21	非鐵金屬冶煉 - 銅二級冶煉	131	315,487	公噸進料	0.012	6.74%	0.72%
22	非鐵金屬冶煉 - 鋁二級冶煉	327	871,777	公噸進料	0.023	4.25%	1.38%
23	非鐵金屬冶煉 - 鉛二級冶煉	10	80,003	公噸進料	0.000	7.08%	0.02%
24	非鐵金屬冶煉 - 鋅二級冶煉	5	13,000	公噸進料	0.000	20.6%	0.00%
25	非鐵金屬冶煉 - 鎂二級冶煉	3	3,791	公噸進料	0.000	15.0%	0.01%
26	稻草露天焚化	-	35,639	公噸稻草焚燒量	0.002	42.4%	0.12%
27	農業廢棄物燃燒	-	75,306	公噸農廢焚燒量	0.015	42.4%	0.86%
28	紙錢燃燒	-	205,013	公噸紙錢燃燒	0.005	42.4%	0.27%
總計					1.684	2.15%	100%

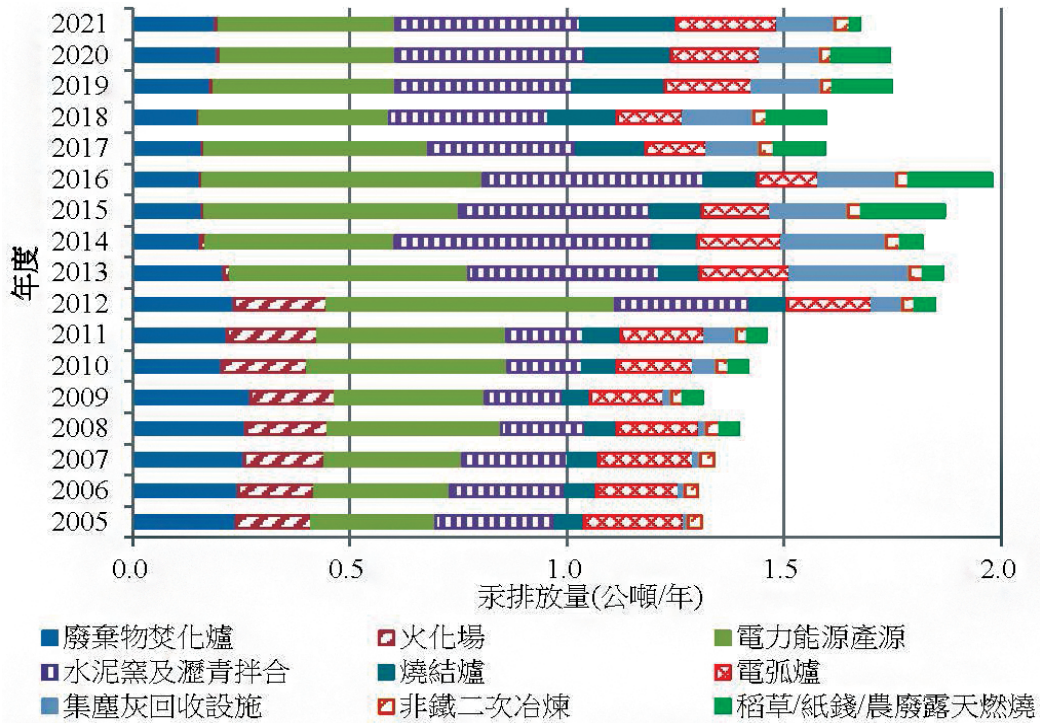
資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

水泥窯為現行國內最大汞排放源，除本身原料 (石灰石等) 及燃料 (煤) 中就含有微量汞，加上國內目前許多燃煤電廠飛灰、底灰、脫硫石膏、氟化鈣污泥及焚化廠水洗飛灰等都投入水泥窯中，該等廢棄物原本就含有汞，在旋窯高溫煅燒後汞會不斷地再度釋出，再加上因為節能因素，製程有高溫廢氣循環預熱設計，造成氣態汞在製程中不斷累積循環，是造成水泥業排放量大原因；至於燃煤電廠及燃煤汽電共生鍋爐，雖然其煤用量活動強度大，但國內煤源主要都來自印尼、澳洲等地，汞含量原本就不高且空污防制設備完善，對汞有相當好的移除效果，可有效降低排放於大氣濃度，整體排放量並不大。

在排放量結構上也發現與煉鋼之燒結製程及電弧爐碳鋼之汞排放量比例並不低；目前雖國際間尚未有任何國家針對煉鋼製程所排放汞進行立法管制，但也應是減排之對象。其中燒結爐汞來源應是粉鐵礦及冶金煤均挖取自於地殼中，原本就可能含有相當微量之汞經燃燒後釋出，再加上現行燒結製程之空污防制設備配置順序 (ESP+FGD+SCR) 不同於燃煤電廠 (SCR+ESP 或 BH+FGD)，縱使燒結 SCR 可將 GEM 轉換為 RGM，但後端缺乏 FGD 來去除 RGM，反而直接排放於大氣中，對整體汞移除效果並無太大幫助，建議可從低汞原料及燃料著手，並檢討現行空污防制設備搭配除汞技術是否具有調整空間，方能有效降低汞排放量。

電弧爐碳鋼廠汞來源應是與廢鐵雜質良窳有關，現行電弧爐末端空污防制設備僅有袋濾集塵器 (BH)，僅能針對 PHg 有效，建議應強化廢鐵品質管控，降低汞排放量。從整體排放量結構來看，主要排放源仍以固定污染源為主 (約佔 95% 以上)，移動源及露天燃燒逸散源並非主要排放源。

整理歷年來國內各主要排放源汞排放量變化如圖 5，從 2005 年至 2021 年國內汞排放介於 1.30 公噸 / 年 ~1.98 公噸 / 年，歷年排放量變化均不大且主要排放源也相當類似；唯有火化場排放量推估早期數據較為缺乏，故使用國外排放係數，後續透過國內實際檢測建立本土化係數以推估排放量 (自 2013 年起)，故排放量有明顯降低。



資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

圖 5　我國歷年主要行業別汞排放變化趨勢圖

3.3 排放特性探討

如前所述，國內外對燃煤電廠汞排放特性研究調查發現，汞燃燒後在煙氣中以 GEM、RGM 及 PHg　3 種型態存在，可依不同型態特性採用不同移除機制。在現行嚴格電力業空氣污染排放標準管制下，國內燃煤電廠都會安裝完善除酸、除塵防制設備，空污防制設備依序為：SCR+ESP 或 BF+FGD，除可有效降低一般污染物濃度以符合排放標準外，對汞的捕捉效果也相當良好，一般燃煤機組空污防制設備對汞的有效捕集率大約可達 70%~90%。

為瞭解國內燃煤電廠汞廢氣經過不同防制設備實際狀況，環保署於 2012 年委託中興工程顧問公司選擇國內 2 處電廠 (分別位於南部及東部) 進行排放汞物種特性調查分析，調查結果如表 5 所示；由表中數據可以發現，在燃煤鍋爐出口後端，汞物種均以粒狀汞 (PHg) 所占比例最高；經過第一道空污防制設備 SCR 後，由於觸媒會將大部分 GEM 氧化成為 RGM，所以 GEM 濃度降低而 RGM 升高，但總汞濃度差異不大。

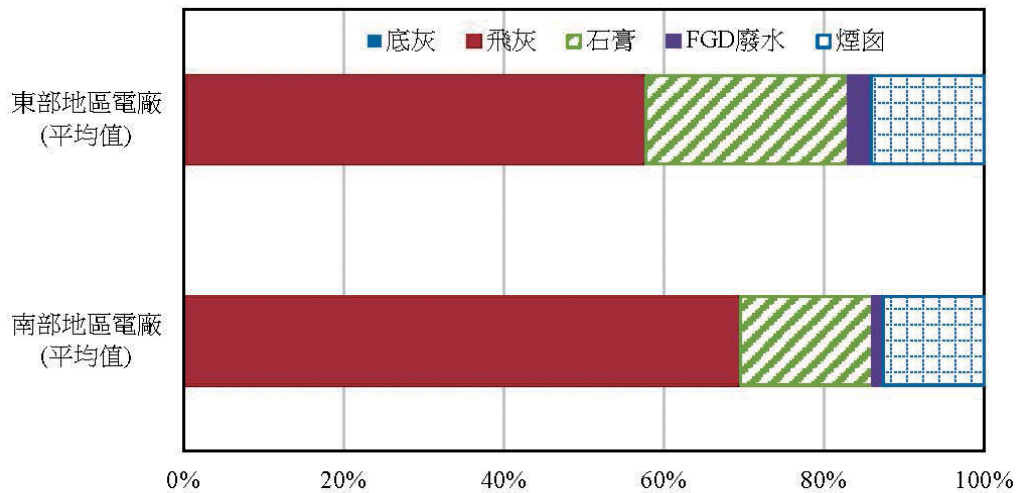
再經過除塵設備 (ESP) 後，PHg 大部分都已被移除；最後廢氣經過濕式脫硫設備 (FGD)，大部分 RGM 也被捕集於脫硫廢水中，故最終所排放之總汞以 GEM 比例最高，最終排放濃度能符合既有電力業汞排放標準 (既存標準 5 μg/Nm^3)，2 處電廠空污防制設備對汞去除率分別為 87.3% 及 87.8%，移除汞效率應屬相當良好。

表 5　2 座燃煤電廠不同空污防制設備汞物種分析結果彙整表

電廠名稱	汞物種	汞排氣濃度（ μg/Nm^3)				去除率
		鍋爐出口	SCR 後	ESP 後	FGD 後 (煙囪)	
南部地區電廠 (平均值)	Hg_p	3.31	2.89	0.036	0.010	98.8%
	Hg^{2+}	0.018	0.432	0.391	0.106	-
	Hg^0	1.013	0.410	0.380	0.431	-
	Hg_{Total}	4.33	3.74	0.807	0.548	87.3%
東部地區電廠 (平均值)	Hg_p	4.06	4.10	0.028	0.076	99.3%
	Hg^{2+}	0.044	1.19	1.85	0.131	-
	Hg^0	2.85	0.674	0.620	0.644	-
	Hg_{Total}	6.95	5.97	2.50	0.851	87.8%

資料來源：行政院環境保護署 (2013)，固定污染源戴奧辛及重金屬排放區域總量管理計畫，EPA-101-FA12-03-A060。

進一步探討最終汞流布去向，其分析結果整理如圖 6 所示，2 座電廠結果相當一致，大部分汞主要被捕捉於飛灰中，其次則於石膏中，排放於大氣比例分別為 12.6% 及 14.1%，比例並不高。



資料來源：行政院環境保護署 (2013)，固定污染源戴奧辛及重金屬排放區域總量管理計畫，EPA-101-FA12-03-A060。

圖 6　國內 2 座燃煤電廠汞最終流布分析示意圖

四、大氣汞空品監測

為進一步瞭解汞排放管制對空品之影響，環保署自 2007 年底開始持續針對一般空品站及排放源集中區進行大氣汞監測作業；茲將監測結果分析如下：

4.1 一般空品站

一般空品站之大氣汞監測係依據環檢所公告之「空氣中汞檢測方法－冷蒸氣原子螢光光譜儀法」(NIEA A304.10C) 手動式監測方法，而粒狀汞則使用置於開放式鐵氟龍濾紙匣中之玻璃纖維濾紙採集，使用真空泵將空氣吸引進入粒狀採樣系統。採集之樣品使用雙金汞齊－冷蒸氣原子螢光光譜儀 (cold vapor atomic fluorescence spectrometry, CVAFS) 分別檢測氣狀及粒狀汞，氣狀汞以 CVAFS 直接測定吸附管採集

的氣狀汞總量，檢測 PHg 需先用酸萃取玻璃纖維濾紙，再以氯化亞錫還原為汞原子，以惰性氣體 (N_2) 吹萃取液釋放出汞原子並以塗覆金之玻璃珠吸附管收集，接著用雙金汞齊 CVAFS 測定收集在吸附管中汞的總量，再送回實驗室進行分析。相關監測結果說明如下：

一般空品站監測選定原則係以一縣市、一測站為原則 (監測站整理如表 6 所示)，以建立各縣市環境背景資料庫；監測頻率部分，每一測站至少監測 2 次 / 年以上，每次監測時間以手動式連續採 24 小時以上，然後將採集樣品送回實驗室分析，本項監測工作持續迄今。而排放源集中區之監測係針對國內重大排放源較集中區已自動連續監測設備長期監測；茲針對監測結果說明如下：

表 6　國內一般空品站大氣汞監測地點彙整表

測站編號	縣市	監測地點	測站編號	縣市	監測地點
1	新北市	萬里站 (綜合商場)	12	雲林縣	崙背站 (崙背國中)
2	新北市	汐止站 (忠厚市場)	13	嘉義縣	新港站 (新港國小)
3	臺北市	松山站 (松山國小)	14	嘉義市	嘉義站 (嘉義大學新民校區)
4	桃園縣	桃園站 (西門國小)	15	臺南市	新營站 (新營國小)
5	新竹縣	湖口站 (信勢國小)	16	臺南市	臺南站 (中山國中)
6	新竹市	新竹站 (東門國小)	17	高雄市	仁武站 (八卦國小)
7	苗栗縣	苗栗站 (苗栗縣議會)	18	高雄市	楠梓站 (楠梓國小)
8	臺中市	大里站 (大里市公所)	19	屏東縣	屏東站 (中正國小)
9	臺中市	西屯站 (啟聰學校)	20	宜蘭縣	宜蘭站 (復興國中)
10	南投縣	南投站 (康壽國小)	21	花蓮縣	花蓮站 (中正國小)
11	宜蘭縣	宜蘭站 (復興國中)	22	台東縣	台東站 (台東縣政府)

資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

整理我國及世界各國有關重金屬空品基準如表 7 所示，其中與大氣汞有關環境基準部分，WHO 訂定基準濃度為 1,000 ng/m^3(年均值)，日本大氣汞空品指針值為 40 ng/m^3(年均值)，而我國並未針對大氣汞訂定環境空品基準。

表 7　我國與世界各國重金屬空氣品質標準及基準值彙整表

國家 / 組織	項目	重金屬物質		標準 / 基準值	單位	計算基準	備註
我國	空氣品質標準	鉛	Pb	150	ng/m³	3 個月移動平均值	-
美國	空氣品質標準	鉛	Pb	150	ng/m³		-
歐盟	空氣品質限值 (Limit value)	鉛	Pb	500	ng/m³	年平均值	2005/01/01 起
	空氣品質目標值 (Target values)	砷	As	6	ng/m³	年平均值	2012/12/31 起
		鎘	Cd	5	ng/m³	年平均值	2012/12/31 起
		鎳	Ni	20	ng/m³	年平均值	2012/12/31 起
WHO	空氣品質基準值 (Guideline Values) 針對非致癌物質	鎘	Cd	5	ng/m³	年平均值	-
		鉛	Pb	500	ng/m³	年平均值	-
		錳	Mn	150	ng/m³	年平均值	-
		氣態汞	Hg	1,000	ng/m³	年平均值	-
		釩	V	1,000	ng/m³	24 小時值	-
	空氣品質基準 (Guidelines) 針對致癌物質	砷	As	-	ng/m³	-	-
		六價鉻	Cr^{6+}	-	ng/m³	-	-
		鎳	Ni	-	ng/m³	-	-
日本	降低有害大氣污染物健康風險指針值	汞	Hg	40	ng/m³	年平均值	-
		鎳	Ni	25	ng/m³	年平均值	-
		砷及無機砷	As	6	ng/m³	年平均值	2010/10/15 新增
		錳及無機錳	Mn	140	ng/m³	年平均值	2014/4/30 新增

註：1. 日本執行空氣中重金屬濃度檢測時，採取粒狀物不分徑，以總粒狀物為基準 (有害大気汚染物質測定方法マニュアル（平成 23 年 3 月改訂），http://www.env.go.jp/air/osen/manual2/index.html)。

2. 世界衛生組織之氣態汞空氣品質基準值之設定是依據對人體的影響。該研究指出，目前大氣中監測得之汞濃度不會對人體造成危害，然為制定可供依循的數量化指標，以暴露於汞環境之工人其暴露濃度與尿液中汞含量關係，配合 20 的不確定係數，求得氣態汞之空氣品質基準值為 1 μ g/m³。

資料來源：

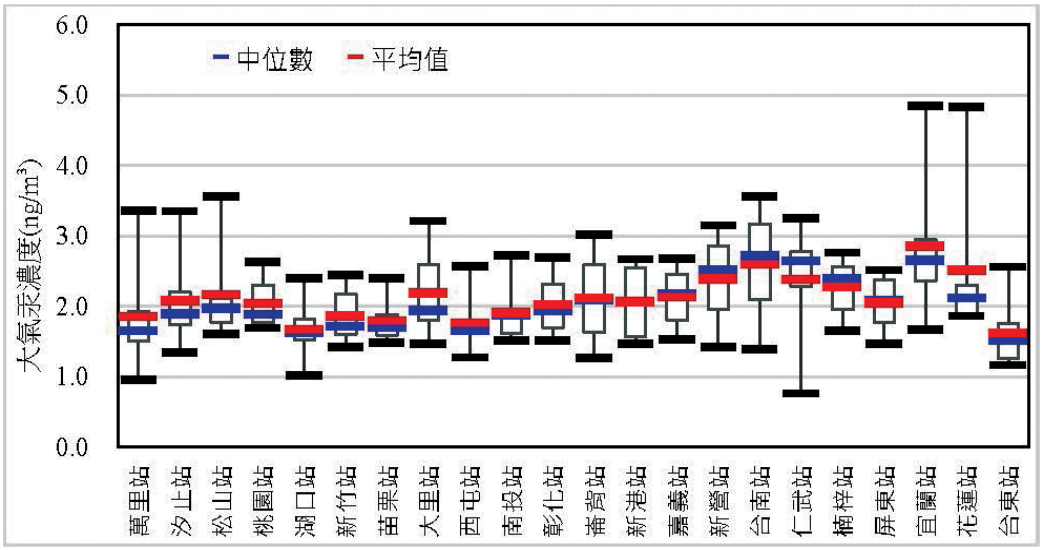
1. NAAQS Table, Commodities Now July 2017, [Online]. Available:https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table

2. WHO air quality guidelines for Europe, 2nd edition, 2000, Commodities Now December 2015, Available: www.euro.who.int/data/assets/pdffile/0005/74732/E71922.pdf

3. Air Quality Standards, Commodities Now December 2015, [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm

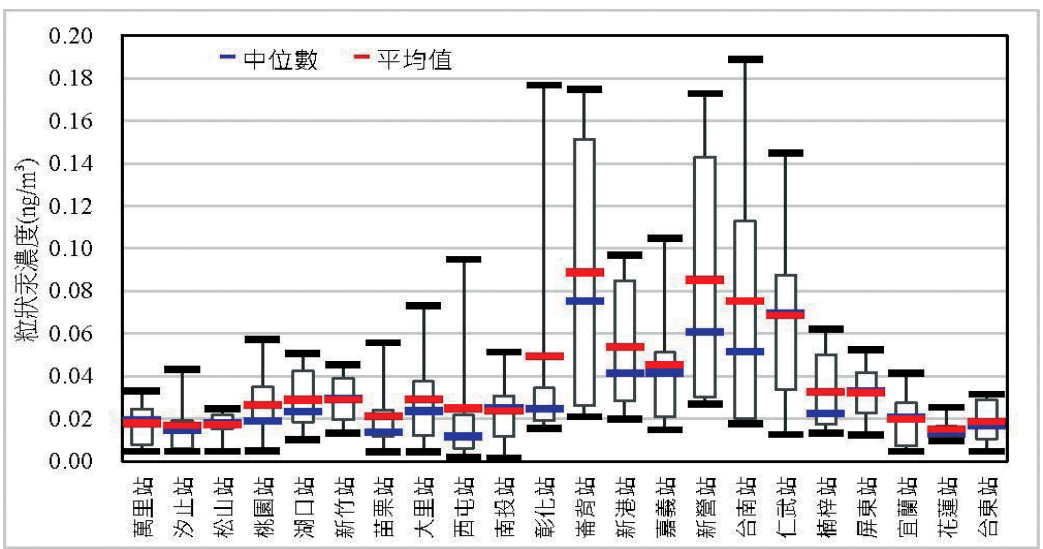
4. 有害大気汚染物質調査結果データの説明 , Commodities Now July 2017, [Online]. Available: http://tenbou.nies.go.jp/envgis_explain/hazardous_air/content.html

綜整由最近 3 年 (2020~2022) 氣態汞監測結果如圖 7、而粒狀汞監測結果如圖 8，其中年平均值有逐年下降趨勢 (2020 年平均值 2.25ng/m^3、2021 年平均值 2.11ng/m^3、2021 年平均值 1.96 ng/m^3)，顯示國內大氣汞濃度逐漸改善。我國一般空品區大氣汞濃度遠低於 WHO 大氣汞 (Hg) 濃度的建議值與日本降低有害污染物健康風險指針值；在濃度部分，國內大氣汞濃度以宜蘭及花蓮地區較高，且這二地區有出現接近 5.0 ng/m^3 高值，推測應是與水泥業較為集中有關。



資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

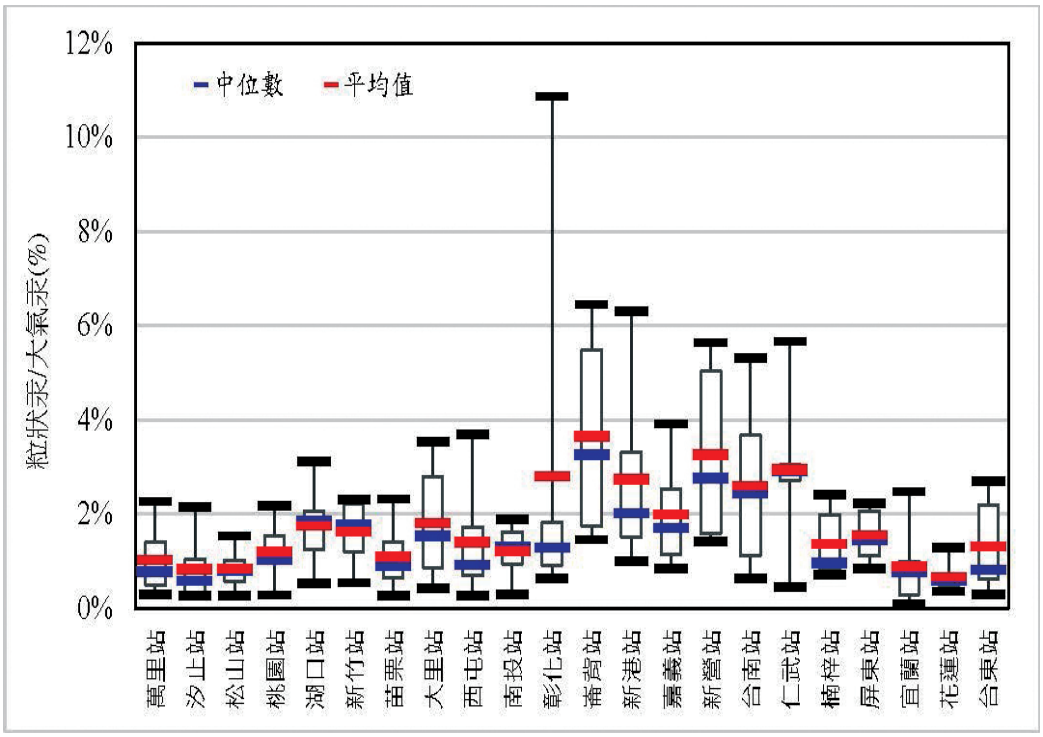
圖 7　近 3 年 (2020~2022 年) 國內各測站大氣汞濃度分布趨勢圖



資料來源：行政院環境保護署 (2023 年)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

圖 8　近 3 年 (2020~2022 年) 國內各測站粒狀汞濃度分布趨勢圖

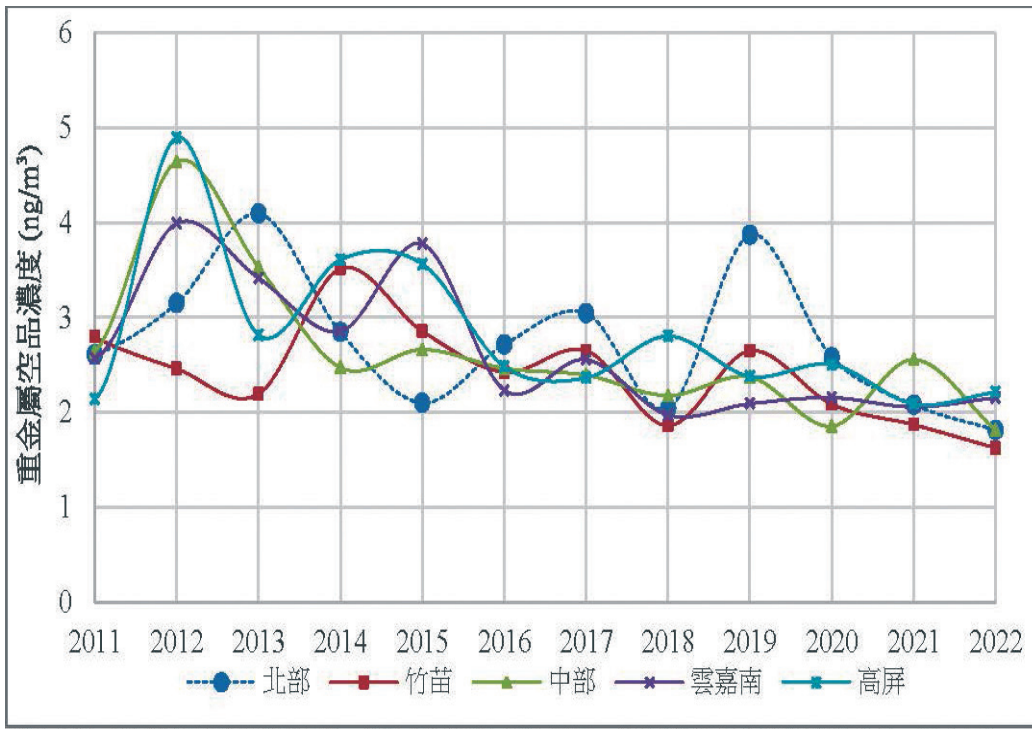
而粒狀汞部分，則以雲嘉南、高屏地區濃度較高，主要應該是與西半部該地區粒狀物濃度原本就較高有相關性，北部地區濃度大約在 0.02 ng/m^3 左右，中南部地區介於 0.049 ~ 0.089 ng/m^3；氣態汞濃度高於粒狀汞，粒狀汞與大氣汞比例約 1.2% ~ 10.9%，整理如圖 9 所示。



資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

圖 9　近 3 年 (2020~2022 年) 國內各測站粒狀汞 / 大氣汞比例圖

由於一般空品站監測係使用手動式採樣、實驗室分析，監測時間僅 24 小時 / 次，若於空品不良季別監測，其結果很容易受到採樣當時氣候條件影響，分析 11 年來 (2011 年 ~2022 年) 國內空品區監測結果整理如圖 10，各空品區濃度變化相當大，例如：北部空品區於 2019 年 2 月監測當時，甚至出現平均濃度接近 4ng/m^3 高值，變異性相當大。



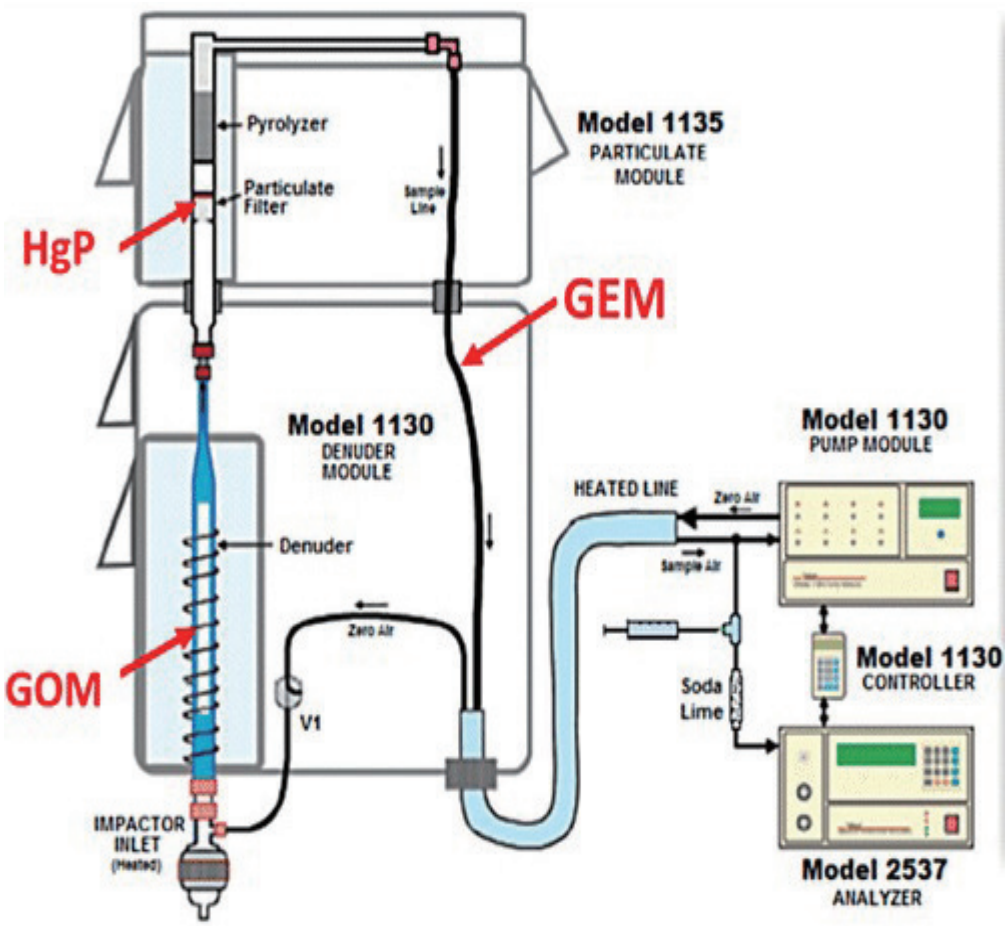
資料來源：行政院環境保護署 (2023)，戴奧辛與重金屬減量推動、溯源採樣及環境監測專案計畫，EPA-111-FA-1203-A084。

圖 10　國內各空品區汞 (Hg) 歷年年平均值分布圖 (2011 年 ~2022 年)

4.2 排放源集中區

除一般空品站大氣汞監測之外，環保署於 2013~2015 年間也對排放源較集中區域以 Tekran 2537X 汞自動連續設備進行汞長期連續監測，目的在於瞭解主要排放源對周遭環境可能衝擊 (行政院環境保護署，2013~2015)，依序選定鋼鐵業集中之高雄臨海工業區 (2013 年)、水泥業集中宜蘭蘇澳地區 (2014 年) 及燃煤電廠、鋼鐵廠附近之台中港工業區 (2015 年)，每一測點均連續監測達 3 個月以上。

Tekran 2537X 設備可連續分析氣態汞 (簡稱 GEM)、粒狀汞 (簡稱 PHg) 及氧化汞 (簡稱 GOM) 等 3 類汞物種，為國際間普遍採用汞自動連續監測設備 (同監資處鹿林山測站)，設備示意詳圖 11。大氣由圖底部泵浦抽入，氣體會先經過氣固分離器 (denuder)，GOM 經過分離器會被吸附；氣體再經過一個石英纖維過濾器，可捕捉粒徑小於 2.5 μm 之微粒以分析 $PHg_{2.5}$ 濃度；最後氣體直接進入分析儀，直接分析得到 GEM。本套設備平均每 5 分鐘可以監測一筆 GEM 數據，每小時 (或 2 小時) 得到一筆 $PHg_{2.5}$ 及 GOM。



資料來源：環境保護署 (2013)，固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫，EPA-102-FA12-03-A096。

圖 11　Tekran 2537X 汞自動連續設備儀器示意圖

3 年排放源集中區汞監測結果整理如表 8 所示；3 個地區元素汞平均濃度分別為高雄臨海工業區 5.27 ng/m^3、蘇澳地區 3.57 ng/m^3、台中港附近 2.60 ng/m^3，粒狀汞及反應性汞濃度相對較低，本文同時蒐集國內其他研究機構所進行之國內大氣汞背景監測資料 (監資處南投鹿林山背景站、台大環工所席行正教授在北部地區水源保護區) 一併比較分析，排放源集中區明顯受到多重排放源影響，濃度較為偏高，尤其在高雄臨海工業區因眾多汞排放源集中，大氣汞濃度明顯較為偏高。

表 8　國內排放源集中區汞自動連續監測結果彙整表

監測地點	高雄臨海工業區	宜蘭蘇澳地區	臺中港區附近	鹿林山測站 (海拔 2,862m)	台灣北部水源保護區
監測時間	2013/08 ~ 10	2014/07 ~ 11	2015/06~08	2004 ~ 2007	2015~2016
汞物種	GEM	GEM	GEM	GEM	GEM
資料筆數	11,586	11,952	15,182	65,679	34,872
以下數值單位	ng/m^3	ng/m^3	ng/m^3	ng/m^3	ng/m^3
最小值	1.62	0.48	0.54	0.24	0.73
中位數	4.45	2.79	2.29	1.62	2.01
最大值	111	31.6	135	5.75	62.8
平均值	5.27	3.57	2.60	1.73	2.15
標準差	4.81	2.90	2.48	0.61	0.89

資料來源：

1. 固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫，2013 年，EPA-102-FA12-03-A096

2. 固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫，2014 年，EPA-103-FA12-03-A054

3. 固定污染源戴奧辛及重金屬管制策略推動與調查計畫，2015 年，EPA-104-FA12-03-A109

4. 鹿林山測站：Guey-Rong Sheu, Neng-Huei Lin, Jia-Lin Wang, Chung-Te Lee, Chang-Feng OuYang, Sheng-Hsiang Wang, “Temporal distribution and potential sources of atmospheric mercury measure data high- elevation background station in Taiwan,” Atmospheric Environment44, 2010

5. 台灣北部地區水源保護區：Jui-Chi Wang, Hsing-Cheng Hsi “ Monitoring the variation of atmospheric mercury at a clean water reservoir in northern Taiwan,” 台大環境工程學研究所，Feb. 2016

五、結論與建議

汞為影響民眾健康甚鉅之 HAPs，我國對汞排放管制起步甚早，早於 1993 年發布「廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準」中就將重金屬汞納入管制項目，並於 2006 年因應國際管制趨勢將排放標準值予以加嚴；而針對國內排放濃度低但使用量大之燃煤鍋爐，也於 2012 年增訂、發布汞排放標準，並於 2021 年所發布之「固定污染源有害空氣污染物排放標準」中納入一般性重金屬汞之管道及周界標準，依據我國排放量結構顯示，水泥旋窯是下一管制重點行業別；從一般空品站大氣監測結果顯示，現行大氣汞濃度有逐年下降、改善趨勢，顯示管制已有相當良好成效。

HAPs 排放管制是現階段空污排放管制施政重點，故排放管制立法工作仍需持續推動，對於汞而言，許多排放研究調查、空品監測目的在於協助法規研訂及建置環境基線資料庫，仍有賴持續執行，例如：對於法規已生效之行業別持續加強稽查管制，督促業者做好排放管控、辦理環境空品監測及排放調查工作等等。針對上述歷年來排放管制成效介紹及空品解析後，提出以下未來應繼續精進之方向建議：

1. 水泥業是國內主要重大排放源也是國際間共同管制對象，目前立法管制對象除粒狀物、NO_x 及 SO_x 外，汞是一必需面對課題，然排放標準之研訂確實應需多方面考量，參酌國外管制標準、國內排放現況、技術可行及整體循環經濟之政策推動，方為適當之排放標準。
2. 國內鋼鐵業燒結工場及電弧爐碳鋼廠 2 項行業別汞排放量大，目前雖未立法排放管制，但仍應持續推動汞減排，2 項製程既有防制設備僅對 PHg 有較佳移除效果，但汞主要以氣態形式存在，整體去除效率不佳，建議應採源頭管制及既有空污防制設備之檢討，使用含汞量較低之原物料或強化廢鐵品質管制，同樣可以達到減少汞排放量目的。
3. 為建立持久性環境背景基線資料庫，相關一般空品站監測及重大行業別排放檢測建議應持續辦理。

參考文獻

European Environment Agency (Last modified in 2021), Air quality standards, https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards

Guey-Rong S., Neng-Huei ., Jia-Lin W., Chung-Te L., Chang-Feng OuYang, Sheng-Hsiang W. (2010), Temporal distribution and potential sources of atmospheric mercury measure data high- elevation background station in Taiwan, Atmospheric Environment44.

Herminé Nalbandian (2012), Trace element emissions from coal, IEA Clean Coal Centre, CCC/203 ISBN 978-92-9029-523-5

Jui-Chi W. and Hsing-Cheng H. (2016), Monitoring the variation of atmospheric mercury at a clean water reservoir in northern Taiwan, 台大環境工程學研究所 .

Kevin C. Galbreath, Christopher J. Zygarlicke, (2000), Mercury transformations in coal combustion flue gas, Fuel Processing Technology, Volumes 65–66, 2000, Pages 289-310

World Health Organization Regional Office for Europe (　2000), Air quality guidelines for Europe, 2nd ed.

UNEP and Minamata Convention on Mercury (2019), Minamata Convention on Mercury - Text and Annexes, https://www.mercuryconvention.org/en

United States Environmental Protection Agency (Last updated in 2022), NAAQS Table, https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table.

Wikimedia Commons (2008), File: Minamata map illustrating Chisso factory effluent routes jp.png, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Minamata_map_illustrating_Chisso_factory_effluent_routes_jp.png

Xu, M (2004), Status of trace element emission in a coal combustion process: a review. Fuel Processing Technology, 85(2-3), 215–237.

AMAP/UN Environment (2019), Technical background report to the global mercury assessment，https://www.unep.org/globalmercurypartnership/resources/report/technical-background-report-global-mercury-assessment-2018

環境省 (2017), 平成 29 年度　大気汚染状況について（有害大気汚染物質モニタリング調査結果報告），https://www.env.go.jp/air/osen/monitoring/mon_h29/index.html

新潟県 (令和元年度改訂), 新潟水俣病のあらまし , https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/seikatueisei/1195661749709.html

行政院環境保護署 (2022)，資訊網站 https://topic.epa.gov.tw/hg/cp-86-130-e656c-3.html，毒物及化學物質局。

行政院環境保護署 (2007)，「固定污染源毒性空氣污染物（戴奧辛及重金屬）管制規範研擬、控制技術評估及排放清冊調查計畫」結案報告，EPA-95-1606-02-01。

行政院環境保護署 (2008)，「固定污染源毒性空氣污染物（戴奧辛及重金屬）排放清冊調查及管制計畫」結案報告，EPA-96-FA12-03-A115。

行政院環境保護署 (2009)，「固定污染源毒性空氣污染物（戴奧辛及重金屬）排放調查及管制計畫」結案報告，EPA-97-FA12-03-A135。

行政院環境保護署 (2010)，「固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查與健康風險評估計畫」結案報告，EPA-98-FA12-03-A178。

行政院環境保護署 (2011)，「固定污染源戴奧辛、多環芳香烴 (PAHs) 及重金屬排放調查與管制計畫」結案報告，EPA-99-FA12-03-A194。

行政院環境保護署 (2012)，「固定污染源戴奧辛及重金屬排放區域總量管理計畫」結案報告，EPA-101-FA12-03-A060。

行政院環境保護署 (2013)，「固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查及管制計畫」結案報告，EPA-102-FA12-03-A096。

行政院環境保護署 (2014)，「固定污染源戴奧辛及重金屬調查及管制計畫」結案報告，EPA-103-FA12-03-A054。

行政院環境保護署 (2015)，「固定污染源戴奧辛及重金屬管制策略推動與調查計畫」結案報告，EPA-104-FA12-03-A109。

行政院環境保護署 (2016)，「固定污染源戴奧辛及重金屬管制策略與調查計畫」結案報告，EPA-105-FA12-03-A167。

行政院環境保護署 (2017)，「固定污染源戴奧辛及重金屬調查管制及減量策略推動計畫」結案報告，EPA-106-FA12-03-A162。

行政院環境保護署 (2018)，「環境有毒空氣污染物排放調查、監測與管制策略研擬計畫」結案報告，EPA-107-FA12-03-A122。

行政院環境保護署 (2019)，「固定污染源環境空氣戴奧辛及重金屬排放調查與減量推動計畫」結案報告，EPA-108-FA12-03-A093。

羅 鈞、陳怡伶 (2020)，「燃煤發電廠重金屬排放管制標準評析」，中興工程季刊第 148 期，P 51 – P 60。

羅 鈞、陳怡伶、陳秉圻 (2020)，「水泥業重金屬汞排放與廢棄物循環再利用之分析探討」，中興工程季刊第 149 期，P 55 – P 64。

行政院環境保護署 (2020)，「固定污染源戴奧辛及重金屬排放調查、環境空品監測與減量推動計畫」結案報告，EPA-109-FA1203-A163。

行政院環境保護署 (2021)，「固定污染源戴奧辛及重金屬空氣品質監測及輔導減量計畫」結案報告，EPA-110-FA-1203-A124。

行政院環境保護署 (2022)，「戴奧辛及重金屬減量推動、朔源採樣及環境監測計畫」結案報告，EPA-111-FA-1203-A084。