

台灣自來水公司降低鎳、汞濃度風險之探討

*賴明芬、*林正隆、*何承嶧、*洪世政、**郭芷晴、**劉雅瑄、
林進榮、*胡景堯

*台灣自來水股份有限公司、**台灣大學、***宜蘭大學、****臺北醫學大學

摘要

為確保水質安全，環保署因應環境變化及國際趨勢並綜合考量各國標準後，自 109 年 7 月 1 日起加嚴修訂我國重金屬鎳、汞之飲用水水質標準。鎳管制標準由 0.07 mg/L 加嚴至 0.02 mg/L；汞管制標準由 0.002 mg/L 加嚴至 0.001 mg/L。

本研究針對台灣自來水股份有限公司（以下簡稱台水公司）淨水場原、清、配水進行鎳、汞之歷史資料及水質採樣分析，探討原、清、配水中鎳、汞之分佈現況，並挑選其中高風險淨水場駐場試驗，進行全流程採樣分析，了解淨水場各單元中鎳、汞的處理效能及可能風險來源，並評估後續造成之風險，研擬改善策略。

研究結果顯示，台水公司傳統淨水處理程序對於汞的去除效果較佳，鎳、汞兩元素經分析風險指標不高。惟淨水場中廢水通常含有較高濃度的鎳及汞，易造成淨水處理單元之鎳、汞累積，可藉由降低廢水回收比例、增加原水/回收水的流量比例並申請廢水排放許可，以降低鎳、汞之超標風險。

本研究亦提供鎳、汞水質異常發生時之改善行動方案標準程序，俾利操作單位參考辦理相關改善，以確保飲用水安全。

前言

水中的鎳、汞重金屬是威脅飲用水安全的主要問題之一，自然環境中汞的來源主要有火山活動、森林火災以及岩石風化；人為排放源則為黃金開採、化石燃料燃燒、鐵及非鐵金屬製造業、水泥業等。水中鎳的主要來源是受污染的水源或是與飲用水接觸的金屬（如水壺、水龍頭、水管線等）中浸出。受污染的水源可能是人為污染行為或是源自地質環境中含鎳岩石的溶解。

依據文獻指出，配水系統中腐蝕管線有可能會累積鎳、汞等重金屬，增加飲用水系統的風險。Hg(II)可和氯或硫氧化物形成 Hg(II)化合物，在水處理系統消毒過程中，氧化且含氯的環境有可能讓 Hg(II)於管線中移動，除了管線氧化層外，配水管線內層形成的生物薄膜 (biofilm) 也對 Hg(II)有吸附的作用，讓汞累積於管線中。鎳於配水網絡中有可能從鍍鎳鉻水龍頭、不鏽鋼管網等裝置中，因水質變化、腐蝕、電鍍包覆不完全等原因釋出。

針對鎳、汞可能對人類健康造成危害各國訂定其水質標準如表 1，台灣在參考各國標準及 WHO 指引值後，為確保民眾用水安全，修訂飲用水水質標準，於 109 年 7 月 1 日開始將鎳管制標準由 0.07 mg/L 加嚴至 0.02 mg/L；汞管制標準由 0.002 mg/L 加嚴至 0.001 mg/L。

表 1 各國飲用水水質標準

(單位：mg/L)

水質項目	臺灣 Taiwan 2020	美國 U.S. 2012	日本 Japan 2015	歐盟 E.U. 2015	英國 U.K.	德國 Germany 2016
汞 (Mercury, Hg)	0.001	0.002	0.0005	0.001	0.001	0.001
鎳 (Nickel, Ni)	0.02	-	-	0.02	0.02	0.02
水質項目	世界衛生組織 W.H.O 2017	新加坡 Singapore 2018	澳洲 Australia 2018	加拿大 Canada 2019	印度 Indian	紐西蘭 New Zealand 2018
汞 (Mercury, Hg)	0.006	0.006	0.001	0.001	0.001	0.007
鎳 (Nickel, Ni)	0.07	0.07	0.02	-	-	0.08

研究方法

本研究分四個部分進行，首先篩選台水公司 103 年至 108 年間水源、混合後原水、清水及配水等水質中鎳、汞數據超過台水公司的內控值（109 年 7 月 1 日新標準的 8 折），計有 36 座淨水場其風險，並進行歷史資料分析。同時，亦針對此 36 座淨水場進行實場採樣分析原水、清水及配水中鎳、汞之濃度分布。

第二部分利用實驗室杯瓶試驗探討不同變因下鎳、汞的去除效果。探討的變因包括(1)混凝劑的種類與濃度、(2)原水初始 pH 值、(3)接觸時間、(4)提高鹼度、(5)雙混凝劑等，以初步得知鎳、汞的最佳去除條件。

接著依據前述 36 座淨水場之水質數據分析，擇定其中 6 座高風險淨水場進行駐場試驗及全流程採樣分析，剖析可能之風險來源，並提供汞、鎳問題淨水操作建議或改善方針。

最後，綜整本研究之成果，建立台水公司鎳、汞風險改善行動方案及改

善標準作業流程等，俾利台水公司確實管控鎳、汞超標風險。

結果與討論

(一)36 座淨水場歷史數據分析

台水公司針對歷史水質數據挑選出 36 座可能超新標之淨水場並統計分析 103 年至 108 年間水源、混合後原水、清水及配水之濃度分布，結果如表 2 及圖 1。

本次統計汞共有 2086 筆數據，其中有 67 筆超過內控值(>0.0008 mg/L)、40 筆超新標(>0.001 mg/L)，但均都符合當時之水質標準，若以超新標佔比趨勢來看，則以混合後原水佔比 2.6%最高，其次為配水系統 2.4%。

鎳則共有 1971 筆數據，其中有 19 筆超過內控值(>0.016 mg/L)、14 筆超新標(>0.02 mg/L)，若以超新標佔比趨勢來看，則以配水系統 2.4%最高。

歷史資料之鎳及汞雖皆有超新標及超內控的數據，但兩者之 ND 值亦皆佔所有數據之 50%以上，因此淨水場雖有偶有超標之機率但比例不高。

表 2 36 座淨水場鎳、汞之歷史數據分析

檢項	類別	平均值	最大值	超新標個數	超內控個數	超新標比例	ND 數	樣品數
鎳	水源	0.00142	0.02400	2	5	0.3%	387	699
	混合後原水	0.00139	0.07200	2	3	0.4%	272	481
	清水	0.00137	0.04990	4	4	0.7%	322	536
	配水系統	0.00176	0.07170	6	7	2.4%	164	255
統計		0.00144	0.07200	14	19	0.7%	1145	1971
汞	水源	0.00022	0.00158	14	23	1.9%	674	756
	混合後原水	0.00022	0.00176	14	22	2.6%	471	543
	清水	0.00021	0.00176	6	14	1.1%	472	536
	配水系統	0.00022	0.00143	6	8	2.4%	214	251
統計		0.00022	0.00176	40	67	1.9%	1831	2086

說明: 1. 水源係指尚未進入淨水場之水來源; 混合後原水為進入淨水場中, 可能混合多種水源之原水; 清水是指經過各淨水單元處理後可供飲用之水; 配水是配送至用戶端的水。
2. ND 值以低於當年度 1/2 MDL 計算。

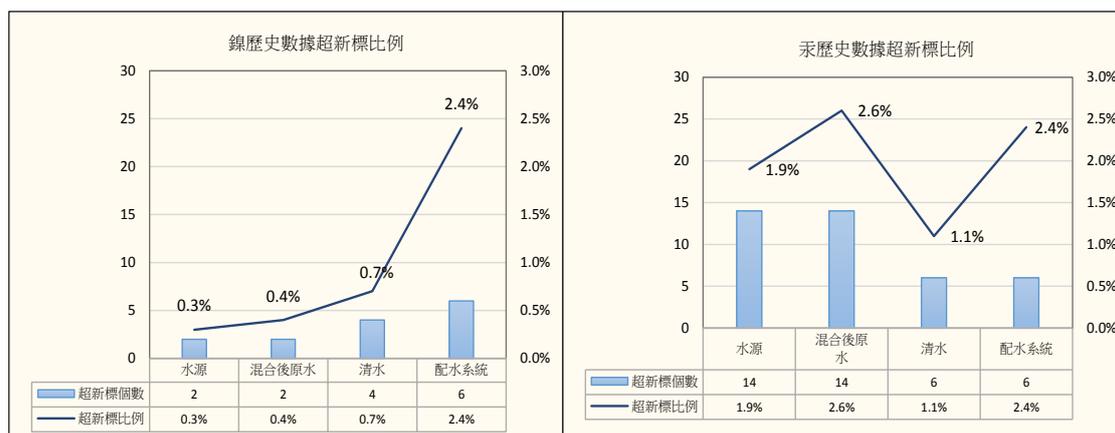


圖 1 鎳、汞歷史數據超新標比例

(二) 實場採樣分析

除了歷史數據分析外, 本研究亦實場採集 36 座淨水場之原、清、配水樣品, 並以感應耦合電漿質譜儀 (ICP-MS) 分析其濃度分布狀況。結果如表 3 所示, 鎳元素在實場分析中, 僅有一筆清水超出新標準內控值(>0.016mg/L), 數值為 0.01650 mg/L, 但仍符合水質標準, 而汞元素最大數值為原水 0.00045 mg/L, 且原、清、配水皆無超新標或超內控之數值。

表 3 實場採樣分析

檢項	類別	平均值	最大值	ND 數	樣品數
鎳	原水	0.00080	0.00260	1	36
	清水	0.00110	0.01650	5	36
	配水	0.00040	0.00130	4	36
統計		0.00070	0.01650	10	108
汞	原水	0.00020	0.00045	5	36
	清水	0.00021	0.00031	5	36
	配水	0.00023	0.00037	6	36
統計		0.00021	0.00045	10	108

(三)實驗室杯瓶試驗探討不同變因下
鎳、汞之去除效果

利用實驗室杯瓶試驗分別探討不同變因下鎳、汞的去除效果。探討的變因包括(1)混凝劑的種類與濃度、(2)原水初始 pH 值、(3)接觸時間、(4)添加 Ca(OH)₂ 提高鹼度、(5)雙混凝劑等，分別探討說明如下，相關研究數據如表 4~表 8 所示，各種不同方法對鎳、汞的最佳去除效果彙整如表 9：

(1)混凝劑的種類與濃度：探討淨水場常用混凝劑如硫酸鋁、多元聚氯化鋁、氯化鐵對去除鎳、汞的影響。由實驗結果得知，三種混凝劑對汞的去除率都可達 50% 以上，而以氯化鐵最好可達 60%，但相較之下鎳的去除率較差，即使是氯化鐵最高也只有 20% 左右。

表 4 不同混凝劑種類與濃度之影響

變因	汞去除率	鎳去除率	反應後濁度值	pHr	
混凝劑	混凝劑量 (mg/L)	%	%	NTU	
PACl	2	49.9	13.8	0.72	7.49
	4	58.4±4.0	13.8	0.83	7.45
	6	59.8	13.8	0.54	7.40
	10	56.2	12.9	0.19	7.43
	15	53.4	14.7±2.4	0.22	7.31
	30	51.3	12.9	0.29	7.18
FeCl ₃	2	22.5	15.6	0.28	7.33
	4	21.3	15.6	0.36	7.55
	6	35.2±7.1	13.8	0.43	7.48
	10	42.8	17.3	0.37	7.21
	15	61.9	17.4±4.1	0.29	7.14
	30	60.6	19.2	0.43	7.05
Alum	2	28.7	8.4	0.57	7.43
	4	30.6	5.8	0.57	7.35
	6	32.6±4.1	11.1±2.3	1.40	7.35
	10	44.3	7.6	0.92	7.35
	15	45.3	7.6	1.25	7.34
	30	54.1	7.6	1.72	7.20

(2)原水初始 pH 值：研究調整不同初始 pH 值時，對去除鎳、汞的影響。同時考量反應後濁度及 pH 值，藉由實驗得知使用上述硫酸鋁、多元聚氯化鋁、氯化鐵三種混凝劑時，其初始 pH 值調配在 7~8 可獲得較佳的鎳、汞去除率。

表 5 不同初始 pH 值之影響

變因	汞去除率	鎳去除率	反應後濁度值	pHr	
混凝劑	調整 pH _i	%	%	NTU	
PACl	4	0.0	0	0.4	4.0
	5	1.2	0	0.5	5.5
	6	32.3±2.1	11.4	0.1	6.0
	7	39.1	17.7±2.6	0	7.3
	8	34.8	23.1	0	8.0
	9	39.5	22.2	0	9.5
FeCl ₃	4	0	13.1	0.49	4.0
	5	37.1	16.9	0.1	5.45
	6	45.0	19.2	0.35	6.04
	7	49.1	19.7±2.8	0.29	7.32
	8	50.0	13.2	0.58	8.0
	9	54.3	17.7	2.23	9.45
Alum	4	13.0	4.4	0.29	4.1
	5	14.2	11.7	0.85	5.0
	6	28.5	11.5	0.29	6.5
	7	37.7±4.1	26.3	0.16	7.2
	8	30.6	26.3±3.0	0.00	7.5
	9	37.5	34.1	0.18	9.6

(3)接觸時間：比較鋁系和鐵系混凝劑在不同接觸(慢混)時間下，對去除鎳、汞的影響。研究結果發現，對於汞而言，當慢混時間超過 60 分鐘時，2 種混凝劑的去除率皆反向降低，這可能時因為過長的攪拌時間反而影響膠羽的沈澱。對於鎳而言，增加慢混時間會增加去除率，但仍以 60 分鐘為最具效益之攪拌時間。

表 6 不同慢混時間之影響

變因	汞去除率	鎳去除率	反應後濁度值	pHr	
混凝劑	慢混時間 (min)	%	%	NTU	
PACl	15	38.3	14.3	0.16	7.30
	30	55.2±4.0	17.2	0.03	7.26
	60	60.3	17.5	0.03	7.44
	120	68.1	22.2±2.3	0.11	7.52
	240	58.9	25	0.04	7.61
FeCl ₃	15	26.1	5.1	0.15	7.19
	30	59.5±2.9	12.8	0.12	7.21
	60	72.2	13.1	0.08	7.37
	120	55.3	16.2±1.5	0.22	7.28
	240	50.2	18.4	0.25	7.53

(4)提高鹼度：本研究以添加 Ca(OH)₂ 提高 pH 值形成 CaCO₃ 顆粒吸附汞或鎳，再以氯化鐵掃除沉澱，觀察汞、鎳去除效果。結果發現，當添加足夠量 Ca(OH)₂ 時，鎳的去除率可達 90% 以上，相較之前測試效果可說大幅改善去除效果，但是汞的去除率卻呈相反下降的情形，而且過多的鹼劑使得最終 pH 值達 10 以上，已超出飲用水水質標

準，同時濁度亦隨之升高，反而不利淨水場出水。

表 7 添加 Ca(OH)₂ 提高鹼度之影響

變因	Ca(OH) ₂ (mg/L)	汞去除率 %	鎳去除率 %	反應後濁度值 NTU	pH _f
混凝劑	50 (9.6)	62.1	44.1	0.82	7.3
FeCl ₃	100 (10.5)	32.5±1.3	94.5±3.4	2.13	10.1
	200 (10.9)	15.7	98.2	7.58	10.7

(5)雙混凝劑：台水公司部分淨水場具有氯化鐵和多元聚氯化鋁併用的雙混凝劑系統，在固定 FeCl₃ 添加量為 30mg/L 的條件下，添加不同量之 PACl，實驗結果發現，PACl 濃度在

15 mg/L 至 90 mg/L，可獲得汞去除率為 60%-70%左右，鎳的去除率為 30% 左右，顯示雙混凝劑對於汞和鎳的去除率均有提升。

表 8 雙混凝劑併用之影響

變因	FeCl ₃	PACl(mg/L)	汞去除率 %	鎳去除率 %	反應後濁度值 NTU	pH _f
FeCl ₃ mg/L	15	30	61.0	31.1	0.47	7.1
	30	30	69.3	28.5	0.83	6.4
	60	30	60.7	22.9±1.4	1.14	6.3
	90	30	64.3±3.8	27.5	1.44	6.0

表 9 鎳、汞最佳去除率方法彙整

淨水技術的優化		鎳的最佳 去除率(%)	汞的最佳 去除率(%)	註解
方法一	最適混凝劑種類、 最適濃度、最佳 pH 值	13%-17%	60%	汞的最佳條件是 FeCl ₃ :15 mg/L 或 PACl:6 mg/L、pH=中 性 鎳的最佳條件是 FeCl ₃ :8 mg/L、pH=中性
方法二	延長慢混接觸時間	13%	72%	15 mg/L 氯化鐵延長慢混接觸 時間至 60 分鐘
方法三	雙混凝劑	30%	70%	30 mg/L FeCl ₃ 再添加 30 mg/L PACl

原水條件: pH=7.0~8.0、濁度=2NTU

(四)駐場試驗

參照前述 36 座淨水場之歷史水質數據分析，擇定其中 6 座高風險淨水場進行駐場試驗及全流程採樣分析，剖析可能風險來源。駐場試驗分為三階段，第一階段進行水源、原水、各淨水單元 (依現場狀況決定採樣點)、清水及配水等鎳、汞全流程採樣分析，了解各單元對鎳、汞的處理效能及可能風險來源。第二階段是以駐場的淨水場現況為考量，執行鎳、汞去除之杯瓶

試驗，並測試不同混凝劑、加藥量等不同變因。第三階段是彙整第一與第二階段所得結果，經與淨水場人員討論後，提供汞、鎳問題之實際可行操作建議或改善方針。

本研究擇定 6 座淨水場進行駐場試驗，而各場因水質特性、淨水單元各不相同而有不同之操作及去除機制，本篇報告僅以其中一場淨水場做為代表說明駐場試驗結果，以 FY 淨水場為代號，說明如下：

(1)背景資料

FY 淨水場共分二期建置，分為一、二期共設計出水量 60 萬噸，目前出水量約 75 萬噸，淨水設備在一、二期亦略有不同。

(2)水質資料

FY 淨水場以地面水為水源，因豐枯水期或大雨、颱風等因素，有時會使濁度飆高至數千，相關原水水質資料如表 10。

表 10 FY 場水質資料

檢測項目	原水	清水
濁度 (NTU)	枯水期	0.14 - 0.45
	豐水期	0.13 - 1.35
鹼度 (mg/L)	44 - 156	50 - 101
pH 值	7.65 - 8.45	6.96 - 7.93

(3)淨水流程及全流程採樣分析

FY 淨水場的淨水流程如圖 2 所示，而各單元全流程採樣分析數據彙整如表 11。由全流程數據可知，沉澱

單元中鎳、汞的去除效果不佳，主要是藉由快濾池才有比較好的去除率。但當快濾池經反沖洗後，排入廢水池，導致廢水池水中鎳、汞濃度明顯升高。若遇到廢水池上澄液回收與水源混合時，原水鎳、汞就有超過新的飲用水水質標準的可能而造成風險，而當快濾池剛反沖洗後，因濾料間孔隙較大或反沖洗廢水排放不完全，可能會讓含汞鎳的細小膠羽進到清水中，導致汞鎳濃度升高。因清水池容量僅 4 萬噸，水力停留時間不長，可能會因調節能力不足而增加超標風險。

表 11 FY 淨水場全流程採樣數據

水樣類別	濁度 (NTU)	餘氯 (mg/L)	pH	汞 (mg/L)	鎳 (mg/L)
地面水	4.55	-	8.57	0.00033	0.00124
備援水源	4.26	-	8.76	0.0005	0.00153
一期沉澱水	5.6	-	8.76	ND	0.00135
一期過濾水	0.75	0.15	8.28	0.00005	0.00024
二期沉澱水	10.3	0.32	8.31	0.00042	0.0021
二期過濾水	0.43	0.04	8.09	0.00006	0.00028
清水	0.34	0.71	7.88	0.00006	0.00025
配水	0.31	0.59	7.96	0.00005	0.00034
一期廢水	15.4	x	8.02	0.00879	0.0024
二期廢水	154	x	8.14	0.0077	0.00638

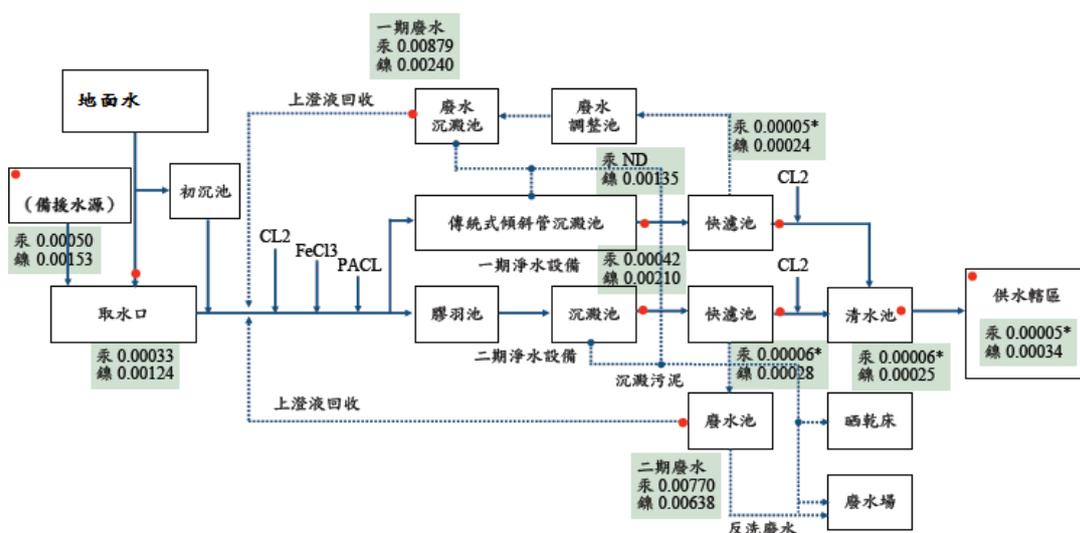


圖 2 FY 淨水場淨水流程(圓點為駐場採樣點)

(4)杯瓶試驗

杯瓶試驗當日原水濁度 3.8 NTU、pH 值 8.17，進行最佳混凝劑量及雙混凝劑去除鎳汞效能評估。添加汞 (0.01 ppm)、鎳 (0.2 ppm) 濃度，在現場操作參數下執行實驗。以六連式瓶杯試驗機 (採用水溫 25°C 之條件) 先 300 rpm 快混 5 秒，再調為 55 rpm 慢混 5 分鐘，後靜置 10 分鐘，再收集上澄液 200 毫升。首先分析 pH 值與濁度值，再以硝酸酸化至 pH ≤ 2 ，採用 ICP-MS 分析汞鎳濃度。

本研究分別探討 PACl、FeCl₃ 濃度各在 1、2、4、6、8、10mg/L 濃度時及雙混凝劑併用(固定添加 PACl 6mg/L，並調控 FeCl₃ 濃度為 1、2、4、6、8、10mg/L)時對鎳、汞去除率的影響。結果如圖 3 所示。

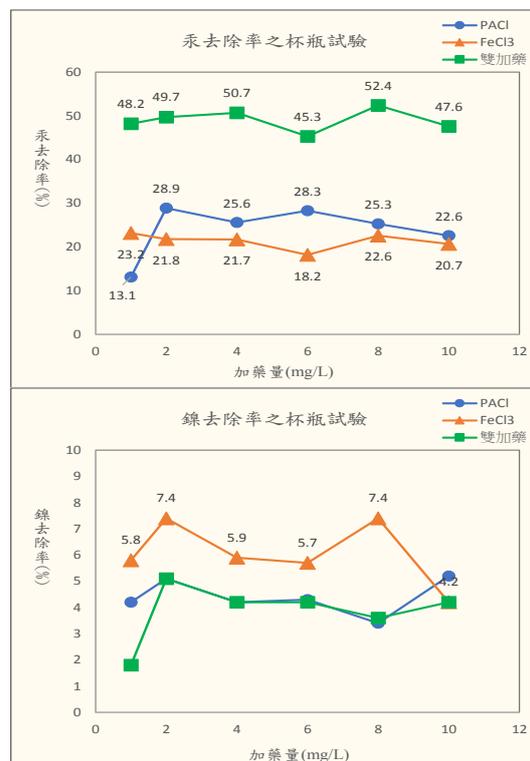


圖 3 鎳、汞駐場之杯瓶試驗

在 FY 場的水質條件下，雙混凝劑方式對汞有最佳的去除效果，可達 50% 左右，但對鎳而言，3 種加藥方式都沒有很好的去除率，皆在 10% 以下，這與前節全流程分析時所述，鎳大多是藉由快濾單元去除的結論一致，混凝沉澱對鎳的去除效果有限。

(5)改善策略

FY 淨水場之設計出水量 60 萬噸，但目前出水量約 75 萬噸，超出設計水量的 1/4，使得沉澱池停留時間不足，僅約 30 分鐘，這使得許多細小的膠羽須以過濾的方式加以去除，而汞、鎳兩元素便是以細小膠羽的型態存在於水中，這使得該場的反沖洗廢水中含有高濃度的鎳、汞兩元素，而該場廢水設施不足，反沖洗廢水直接混入原水回收，使得原水中的鎳、汞元素在場內不斷的循環濃縮，一旦原水稀釋倍數不足，便容易有超標或超內控的情形發生。

建議應提升廢水處理流程處理鎳、汞兩元素的效果，使其可由污泥中排出水場，避免其在場內不斷循環濃縮。亦可考量在廢水處理流程中增加過濾單元去除細小的鎳、汞膠羽，以阻斷其在場內循環的路徑。

淨水場鎳、汞控制改善行動方案

(一)成立「水質異常處理小組」及「淨水場鎳、汞改善技術輔導小組」

依據「台灣自來水股份有限公司水質預警事件作業要點」規定影響健康及可能影響健康的水質檢項超出內控值時，即應由各區處秘書以上擔任召集人並簽報召集「水質異常處理小組」，成員應包含水質課、操作課、工務課及廠所等，並於小組會議需提出預估改善期限及解決方案，俾利建立稽核作業，而水中鎳、汞檢項屬

「影響健康物質」。

為提升各區管理處辦理淨水場鎳、汞改善計畫，可由總管理處邀請各區處具有實務經驗及外部專家學者組成「淨水場鎳、汞改善技術輔導小組」，提供潛在風險淨水場技術諮詢並協助各區處辦理淨水場鎳、汞改善工作，提供各淨水場技術輔導，俾利提供量足、質優的飲用水。

(二) 改善作業標準程序

淨水場鎳、汞含量改善標準作業程序如圖 4，各流程簡述如下：

- (1) 調查淨水場基本資料：詳實蒐集淨水場的基本資料，包括水源調配策略、原水水質資料、各單元鎳、汞濃度（含廢水回收水）、現有設備操作使用情況、供水狀況等，評估淨水單元、廢水處理設備及操作程序是否有效合理之配合應用，並按照水源、操作及水質管理等項目分類淨水場鎳汞含量超出內控值之原因。
- (2) 淨水場水質試驗：辦理實驗室淨水試驗如瓶杯實驗等，提供現場可能的解決方案如強化操作或新增設施。
- (3) 評估改善策略：參考全流程汞鎳分析數據與實驗室淨水試驗結果，依據淨水場汞鎳含量改善策略決策流程圖，同時考量可行性、操作性及經濟性等面向，進行減量策略評估。
- (4) 淨水場實場測試：進入實場測試，蒐集連續操作之監測數據，以為後續改善策略評估之參考。
- (5) 淨水場鎳、汞減量效果評估及改善策略定案：最後再由淨水場的測試結果，分析淨水場鎳、汞含量改善成效，以決定最適合的改善策略。

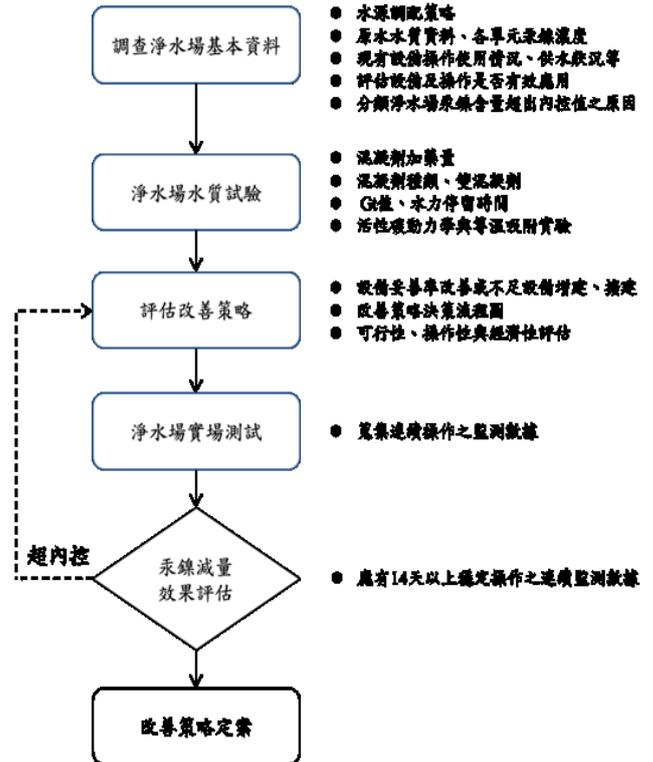


圖 4 淨水場鎳汞含量改善標準作業程序

結論與建議

(一) 結論

- (1) 分析 36 座淨水場歷史數據，在汞的部分，混合後原水超過 109 年新標準比率最高為 2.6%，水源、清水和配水則分別為 1.9%、1.1% 和 2.4%，混合後原水超新標比率高於水源，可能的原因是回收水中累積較高的汞含量，導致水源與回收水混和後超過新標準頻率增加；在鎳的部分，水源、混合後原水、清水和配水超新標準比率分別為 0.3%、0.4%、0.7% 和 2.4%。由此可以見得鎳的主要來源是管線或管件的貢獻，因此隨著水進入給水系統的時間越久，鎳的超過新標準頻率越高。
- (2) 清水超新標準頻率低於原水，可說明台水公司目前傳統淨水技術(化學混凝+沉澱+過濾) 具有去除汞的能

力。

(3)本次實場採樣分析 36 座淨水場的原水、清水以及配水樣本中，汞濃度最高值為 0.00045 mg/L，未有超新標準；鎳濃度最高值為 0.0165 mg/L，雖超內控但未有超過新標準，鎳、汞超標風險值尚低。

(4)實驗室探討各種不同變因下對去除水中汞、鎳的影響，實驗結果指出多元聚氯化鋁和氯化鐵對汞的去除率都可達 60% 左右，在相同的汞去除率之下，多元聚氯化鋁所需添加量可較氯化鐵少一些。

(5)氯化鐵對鎳的去除率約 20% 相對較多元聚氯化鋁（對鎳去除率<15%）為佳。膠羽接觸時間長短和汞的去除有正相關，但是和鎳的去除無顯著關聯性。

(6)在固定 FeCl_3 添加量為 30mg/L 的條件下，添加不同量之 PACl，實驗結果發現，PACl 濃度在 15 mg/L 至 90 mg/L，可獲得汞去除率為 60% - 70% 左右，鎳的去除率為 30% 左右，顯示雙混凝劑對於汞和鎳的去除率均有提升。

(7)擇定 6 座汞、鎳高風險淨水場駐場做各淨水單元全流程採樣分析，發現廢水回收單元的汞鎳濃度均較其他單元高，因此淨水場若實施廢水全回收策略，會使得汞鎳在淨水單元中累積，造成超標風險增加。此外，配水採樣點的管件老舊腐蝕，也可能是水樣中鎳濃度明顯偏高的原因。

(8)駐場實驗發現汞可藉由化學混凝沉澱去除 20%-30%；水力停留時間較長的話可達 70%，去除機制為電性中和與吸附；砂濾本身對汞無去除效果，但可攔截吸附汞的細小膠羽或形成膠羽

吸附層，因此砂濾單元對於汞的去除能力可達 50%-70%，總和起來汞在傳統的淨水單元可達 70% 以上的去除效果，惟操作條件不佳時（如沉澱池效果不佳；初濾階段等）容易造成清水汞濃度增加。

(9)鎳主要是以帶正二價離子存在水中，在化學混凝沉澱去除率僅 10%；但砂濾吸附效果可達 70% 以上，因此應關注砂濾操作成效與三價正電荷的鐵離子和鋁離子的競爭吸附。

(10)反沖洗水是鎳主要污染來源，鎳主要以溶解態存在水中，導致廢水系統以污泥沉澱後捨棄的比例不高，因此需注意清水鎳濃度有瞬間峰值的問題。

(11)若沉澱池的去除效率高時，顯示膠羽沉澱效果佳，在進入廢水系統時易排除，回收水的汞鎳濃度不會顯著上升，相反地，若以快濾池為主要去除單元時，會因反沖洗水含有細小膠羽，且有較長時間對汞鎳接觸吸附，導致進入廢水回收系統後，將汞鎳再釋出，使得回收水中的汞鎳濃度上升。

(12)由於汞與鎳在廢水回收的過程中不停濃縮循環，當原水水量不足（稀釋倍數過低），或是濃縮時間較長，或廢水處理設備效能不彰等原因，導致其汞鎳超標風險較高。

(13)針對廢水中含有偏高汞鎳含量，可考量申請廢水排放許可，將之處理後放流至水體，減少汞鎳在淨水系統中的循環濃縮，進而影響水質安全

(14)為提升各區管理處辦理淨水場汞鎳改善計畫，成立「水質異常處理小組」及「淨水場鎳、汞改善技術輔導小組」，鎳、汞含量改善標準作業程序包含調查淨水場基本資料、淨水場水質

試驗、評估改善策略、淨水場實場測試、淨水場鎳汞減量效果評估及改善策略定案。

(二) 建議

- (1) 快濾池反沖洗後的廢水通常具有較高濃度的汞與鎳，若此廢水回收進入分水井與原水混合，且稀釋倍率不足時，超標風險便會增高，因此建議淨水場將反洗的廢水排放，避免汞鎳回到淨水流程中繼續累積。
- (2) 建議當廢水濃度超過某一濃度時，應申請廢水排放許可，或是廢水處理單元添加混凝劑或聚合物提高廢水處理效能，或是廢水回收再經快濾桶處理。
- (3) 提升鎳、汞檢驗分析能力，以因應加嚴後的低濃度限值。依照水安全計畫 (Water Safety Plan) 的概念建立淨水場的全流程採樣鎳、汞分析資料庫，以了解鎳、汞的高風險位置。針對發生超標事件的水場，增加鎳、汞採樣分析頻率，由每季一次改為每月一次，並加測回收廢水中之超標金屬濃度，若連續兩年未有超標則恢復正常分析頻率。

參考文獻

1. 黃良銘、王根樹、林財富 (2016)。「飲用水水源及水質標準項目之調查及評估 (3/3)」，行政院環境保護署委託計畫，EPA-105-01J1-02-101。
2. 黃良銘、王根樹、林財富、陳蕪如 (2017)。「106 年飲用水新興污染物研究與水質管理」，行政院環境保護署委託計畫，EPA-05-J106-02-A120。
3. DRINKING WATER INSPECTORATE (2015). Manual on Treatment for Small Water Supply Systems: Updated Report. 53-55.
4. Jamshaid, M., Khan, A. A., Ahmed, K., & Saleem, M. (2018) Heavy metal in drinking water its effect on human health and its treatment techniques – a review. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 12(4), 223-240. doi:10.12692/ijb/12.4.223-240。
5. Schock, M. R., Hyland, R. N., & Welch, M. M. (2008). Occurrence of contaminant accumulation in lead pipe scales from domestic drinking-water distribution systems. *Environmental science & technology*, 42(12), 4285-4291.
6. USGS. (2000) Mercury in the environment. Reston, VA: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey.
7. USEPA (2006). Inorganic contaminant accumulation in portable water distribution systems. Contract 68-C-02-042, Total coliform rule issue paper, Washington.
8. WHO. (2005a) Mercury in Drinking-water - who.int. Retrieved from https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/mercuryfinal.pdf.
9. WHO. (2005b) Nickel in Drinking-water - who.int. Retrieved from https://www.who.int/water_sanitation_health/gdwqrevision/nickel2005.pdf.
10. WHO. (2017) Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization; 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.