

# 國際固體再生燃料標準的比較與策略展望

高銘謙<sup>1+</sup> 莊子賢<sup>2+</sup> 謝依芸<sup>3\*</sup>

## 摘要

空氣污染防制方案自2024年起展開第二階段，國發會亦於2022年發布「臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明」，顯示減少空污排放和廢棄物減量是當務之急。固體再生燃料製造涉及高熱值的廢塑膠、廢紙、廢木材，不僅有助於解決焚化爐容量不足和廢棄物逐年增加的問題，還能替代傳統煤炭，減少石化燃料使用和降低二氧化碳排放。然而，自從環境部於2019年推廣固體再生燃料以來，關於其安全性的質疑不斷，尤其是擔憂含有廢塑膠的固體再生燃料燃燒可能產生戴奧辛，對公眾健康造成威脅的擔憂。多數文獻聚焦於燃燒後的戴奧辛排放數值，較少進行深入的健康風險量化。本研究通過比較臺灣、日本、韓國、德國及歐盟的法規，分析了固體再生燃料的品質標準以及戴奧辛和重金屬的排放限值，指出臺灣現有法規在控制重金屬含量方面需進一步加嚴。此外，研究利用戴奧辛、鉛、鎘、砷的法規周界標準值，評估直接吸入途徑的致癌風險，確認現行法規已提供基本的公眾健康保護，無需過度擔心。這增強了對固體再生燃料影響健康的全面評估，為未來政策的提升提供了指引。

**關鍵詞：**固體再生燃料(SRF)，空氣污染防制，環保標準比較，致癌風險評估，戴奧辛排放

## 1. 前言

### 1.1 政策背景

隨著環保意識的提升，空氣污染對健康的威脅日益受到關注。我國政府積極修訂《空氣污染防制法》(簡稱空污法)，通過持續更新法規、強化空氣污染物質濃度監測以及設定排放上限等多項措施，逐步減少空氣污染排放。2018年最新修訂的空污法推動了環境部以四年

為一個周期制定和執行空氣污染防制方案，並定期檢討其成效。

在《第一期空氣污染防制方案》(2020–2023年)期間，政府成功將全國PM<sub>2.5</sub>年平均濃度降至少於15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，達到預設目標。本階段措施涵蓋固定污染源、逸散污染源、移動污染源及綜合性管理四大方向(環境部，2024)。其中，固定污染源的管理策略包括改進鍋爐排放並推廣老舊鍋爐的汰舊換新，這一部分尤為關鍵，因鍋爐排放占整體燃燒排放量的10%至

<sup>1</sup>國立臺灣大學土木工程學系 學士生

<sup>2</sup>國立臺灣大學化學工程學系 學士生 <sup>+</sup>作者貢獻相同

<sup>3</sup>國立臺灣大學土木工程學系、化學工程學系(合聘)副教授

\*通訊作者，電話：02-3366-4259，電郵：iyhsieh@ntu.edu.tw

收到日期: 2024年08月28日

修正日期: 2024年11月08日

接受日期: 2024年11月17日

20%，對提升空氣品質具有顯著影響(行政院環境保護署空保處，2018)。在此期間，環境部與經濟部工業局合作，通過改造或補助直接換新，累計改善超過七千座工業及商業鍋爐，使燃料結構由原先的燃氣24%、重油與生煤64%、柴油12%轉變為燃氣73%、重油與生煤18%、柴油9%(環境部，2023a)。

隨著《第二期空氣污染防制方案》於2024年開始推動，如何進一步減少無法轉為燃氣的燃煤鍋爐所產生的污染排放，成為一個新的研究課題(大氣環境司2023)。此外，國家發展委員會於2022年公布「臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明」(國家發展委員會，2022)，強調資源循環零廢棄作為十二項關鍵戰略之一，旨在促進物質回收與再利用，同時減少廢棄物的產生。這一策略已被證實可有效減少碳排放(環境部，2023b)。

隨著我國事業廢棄物量逐年增加，公有焚化爐的老化與維修需求日益迫切，導致處理家庭垃圾的能力受到嚴重影響。目前，全國有約84萬噸垃圾暫存於各地掩埋場，堆積問題日趨嚴重(林良齊，2024)。為了應對這一挑戰，政府不僅在建設更多的焚化設施，包括預計在2027年完工的5座新焚化爐以及12座專門處理事業廢棄物的設施，而且計畫到2036年解決當前的垃圾堆積問題(陳政偉，2024)。這一系列措施顯示了廢棄物處理和減量是我們面臨的重要環境議題(張岱屏等，2024)。

## 1.2 固體再生燃料的推動與挑戰

為解決燃煤碳排和廢棄物減量這兩大問題，環境部(原環保署)自2019年起推動可燃廢棄資源的燃料化。具高熱值的廢塑膠、廢紙、廢木材等適燃材料經過分揀後製成固體再生燃料(Solid Recovered Fuel, SRF)，這不僅能減輕焚化爐的負擔，還能提升發電效率，並減少化

石燃料的使用和污染排放(蔡文田，2021)。

固體再生燃料具有顯著的低碳排放優勢，涉及提升能源效率和生物質含量。從能源效益角度來看，固體再生燃料用於工業鍋爐和燃燒裝置的總能效遠超過垃圾焚燒爐的能效。臺灣的廢棄物焚燒發電效率約為18%至20%，而使用固體再生燃料的鍋爐發電效率超過25%，特別是蒸汽鍋爐可達75%以上。二氧化碳排放量可根據廢棄物的總量、水分和碳含量、氧化系數以及生物質碳的比例計算。垃圾焚燒發電的二氧化碳約一半來自生物質燃燒，占總排放量的50%以上。因此，固體再生燃料的成分和比例對二氧化碳排放量和熱值非常關鍵，需要深入了解其組成以精確計算其環境效益(張瓊芬與張家驥，2022)。文獻指出，平均碳含量為87%的煤炭與60.77%碳含量的固體再生燃料相比，假設其中23%為來自紙張、木頭的生物碳，每替代一公噸煤炭可減少約1.29公噸的二氧化碳(Ferronato *et al.*, 2024)。

即便臺灣已逐步降低燃煤鍋爐的使用比例，煤炭在能源供應中的比例仍高達42.2%，顯示燃煤仍是不可或缺的能源組成部分(經濟部能源署，2024)。現階段，臺灣固體再生燃料的年產量大約20萬公噸，每1.11公噸固體再生燃料可替換1公噸煤炭的熱量，這意味著每年可減少約18萬公噸的燃煤使用。雖然這一數量與全國燃煤發電所需的2,800萬公噸相比仍然微小，僅占0.6%，但考慮到固體再生燃料的潛在年產量可達60萬公噸，若技術持續進步並擴大生產規模，其未來潛在的環境利益將顯著提升。

然而，固體再生燃料主要由廢棄物製成，其中包括廢塑膠，這引起了公眾對其可能含有高濃度污染物的疑慮，特別是燃燒時可能釋放的戴奧辛和重金屬(曾學仁，2023)。目前的研究主要關注於固體再生燃料燃燒後的戴奧辛和重金屬排放量，如韓國商業焚化爐使用固體

再生燃料進行戴奧辛排放減量研究(Son *et al.*, 2022)，以及探究廢木材製成的垃圾衍生燃料(Refuse Derived Fuels, RDF)及城市固體廢棄物(Municipal Solid Wastes, MSW)燃燒後的戴奧辛排放情況(Svensson Myrin *et al.*, 2014)。同時，亦有研究探討回收廢潤滑油製成固體再生燃料在混燒過程中對戴奧辛排放的影響(Kuo *et al.*, 2021)。這些研究雖關注排放量，但仍缺乏將這些污染物濃度轉化為具體健康風險的量化研究。

本研究從各國法規的比較出發，分析臺灣法規的不足，並評估公眾對固體再生燃料使用的疑慮。目前經濟部產業發展署配合環興科技股份有限公司進行了固體再生燃料的試燒實驗，並提供106至108年間在流體化床式鍋爐進行的試燒數據。這些試燒結果涵蓋了多種燃料配比，包括純燒煙煤、煙煤與紡織污泥混燒、煙煤與廢塑膠固體再生燃料混燒以及煙煤、紡織污泥與紡織殘料混燒等，詳細數據見於表1(經濟部工業局，2023)。

此外，象騰顧問股份有限公司於111年進行了「新竹縣一般性廢棄物分選轉製固體再生燃料供應事業單位評估與監督計畫」(象騰顧問股份有限公司，2022)，台灣水泥亦參與了水泥窯替代燃料的研究，並獲得產業發展署補助開展「水泥窯高熱值固體再生燃料混燒與潔淨整

合系統開發計畫」。當鍋爐或水泥窯使用固體再生燃料進行混燒時，燃料特性可能會影響鍋爐的熱效率，導致效率下降(陳光熙與張耀元，2021)。

前述這些研究主要集中於如何優化固體再生燃料的投放量和投放時機，以實現更低的排放和更高的熱效率。在排放檢測方面，目前僅依據現行環保法規，未提供更詳細的數據。因此，本研究根據現行針對鍋爐的排放法規進行健康風險評估，以檢驗法規的完整性。未來希望獲得更多關於固體再生燃料混燒鍋爐的詳細數據，以進一步檢驗固體再生燃料的檢測。

## 2. 方法與資料

本研究從三個面向來探討我國固體再生燃料相關法規是否充足：燃料本身的品質規範、燃燒後排放端的排放限值訂定，以及法規訂定的排放限值上限對人民透過呼吸途徑暴露造成的致癌風險。

### 2.1 固體再生燃料品質標準

為確保固體再生燃料的品質標準達到國際水準，本研究參考了日本、韓國、德國及歐盟等先進國家的相關法規。我們將這些國家的規範彙整成一張總表格(表2)，表格的項目為各

表1 流體化床式鍋爐固體再生燃料試燒結果分析(106~108年)

分析項目 / 燃料配比	純燒煙煤 (100%)	煙煤+紡織污泥 (84%:16%)	煙煤+廢塑膠SRF (84%:16%)	煙煤+紡織污泥+ 紡織殘料 (84%:12%:4%)
實際產能 (與許可蒸氣量相比)	65%	81%	54%	81%
鍋爐熱效率	93%	95%	88%	90%
環保法規符合度	全數符合	全數符合	全數符合	全數符合
支出成本節省比例	-	4.3%	14.3%	13.7%
減碳比例	-	1.9%	12.1%	6.9%

資料來源：環興公司。

表2 各國固體再生燃料(SRF)品質標準

各國 SRF品 質標準	臺灣		日本					南韓				
項目	單位	數值	單位	限值				單位	限值			
				RPF- coke	A	B	C		SRF		Bio-SRF	
									成形	非成形	成形	非成形
物理特性												
水分		-	%	≤3	≤5			wt%	≤15	≤25	≤10	≤25
淨熱值 /低位 發熱量	MJ/kg	≥10		-	-	-	-	MJ/kg	≥14.65		≥12.56	
總熱值		-	MJ/kg	≥33	≥25				-	-	-	-
灰分		-	%	≤5	≤10			wt%	≤20		≤15	
直徑		-		-	-	-	-	mm	≤50	≤50	≤120	
長度		-		-	-	-	-	mm	≤100	≤50	≤100	≤120
顆粒型 式		-		-	-	-	-		-	-	-	-
尺寸		-		-	-	-	-		-	-	-	-
化學特性												
氯	%	≤3	%	≤0.6	≤0.3	0.3~≤0.6	0.6~≤2	wt%	≤2		≤0.5	
汞	mg/MJ	≤0.15		-	-	-	-	mg/MJ	≤0.07		≤0.05	
鎘	mg/MJ	≤0.5		-	-	-	-	mg/MJ	≤0.34		≤0.40	
鉛	mg/MJ	≤15		-	-	-	-	mg/MJ	≤10		≤8	
砷		-		-	-	-	-	mg/MJ	≤0.9		≤0.4	
鉻		-		-	-	-	-	mg/MJ	-	-	≤5.6	
銻		-		-	-	-	-		-	-	-	-
鈷		-		-	-	-	-		-	-	-	-
錳		-		-	-	-	-		-	-	-	-
鎳		-		-	-	-	-		-	-	-	-
鉈		-		-	-	-	-		-	-	-	-
釩		-		-	-	-	-		-	-	-	-
硫		-		-	-	-	-	wt%	≤0.6			
錫		-		-	-	-	-		-	-	-	-

資料來源：本研究整理。

表2 各國固體再生燃料(SRF)品質標準(續)

各國SRF 品質標準	德國(共同焚燒)			歐盟 ISO21640					
項目	單位	限值		單位	限值(分一到五等級)				
		中位數	80%位數		1	2	3	4	5
物理特性									
水分	-	-	-	-	-	-	-		
淨熱值/低位發熱量		-	-	MJ/kg ar	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
總熱值		-	-		-	-	-	-	-
灰分		-	-		-	-	-	-	-
直徑		-	-		-	-	-	-	-
長度		-	-		-	-	-	-	-
顆粒型式		-	-		-	-	-	-	-
尺寸		-	-		-	-	-	-	-
化學特性									
氯		-	-	% (d)	≤0.2	≤0.6	≤1.0	≤1.5	≤3
汞	mg/MJ	≤0.038	≤0.075	Mg/MJ (中位數)	≤0.02	≤0.03	≤0.05	≤0.10	≤0.15
				Mg/MJ (80%位數)	≤0.04	≤0.06	≤0.10	≤0.20	≤0.30
鎘	mg/MJ	≤0.25	≤0.56		-	-	-	-	-
鉛	mg/MJ	≤12	≤25		-	-	-	-	-
砷	mg/MJ	≤0.31	≤0.81		-	-	-	-	-
鉻	mg/MJ	≤7.8	≤16		-	-	-	-	-
銻	mg/MJ	≤3.1	≤7.5		-	-	-	-	-
鈷	mg/MJ	≤0.38	≤0.75		-	-	-	-	-
錳	mg/MJ	≤16	≤31		-	-	-	-	-
鎳	mg/MJ	≤5	≤10		-	-	-	-	-
鉈	mg/MJ	≤0.063	≤0.13		-	-	-	-	-
釩	mg/MJ	≤0.63	≤1.6		-	-	-	-	-
硫		-	-		-	-	-	-	-
錫	mg/MJ	≤1.9	≤4.4		-	-	-	-	-

資料來源：本研究整理。

表2 各國固體再生燃料(SRF)品質標準(續)

SRF品質標準	德國SRF認證商標(非強制)					
項目	單位	BPGTM 1	BPGTM 2	BPGTM 3	SBSTM 1	SBSTM 2
物理特性						
水分	%, ar	<35	<20	<12.5	<35	<20
淨熱值/低位發熱量	MJ/kg, ar	16-20	20-24	23-27	13-18	18-23
總熱值						
灰分	mg/MJ, d	<1.0	<0.625	<0.333	<1.111	<0.652
直徑						
長度						
顆粒型式						
尺寸						
化學特性						
氯	%, dm	<1.0	<1.0	<1.0	<0.7	<1.0
汞	mg/MJ, d	<0.025	<0.021	<0.019	<0.056	<0.043
鎘	mg/MJ, d	<0.45	<0.375	<0.333	<0.5	<0.391
鉛	mg/MJ, d	<5.0	<4.167	<3.704	<22.222	<17.391
砷	mg/MJ, d	<0.5	<0.417	<0.37	<0.556	<0.435
鉻	mg/MJ, d	<6.0	<5.0	<4.444	<13.889	<10.87
銻	mg/MJ, d	<6.0	<5.0	<4.444	<6.667	<5.217
鈷	mg/MJ, d	<0.6	<0.5	<0.444	<0.667	<0.522
錳	mg/MJ, d	<5.0	<4.167	<3.704	<22.222	<17.391
鎳	mg/MJ, d	<2.5	<2.083	<1.852	<8.889	<6.957
鉭	mg/MJ, d	<0.05	<0.042	<0.037	<0.056	<0.043
鈮	mg/MJ, d	<0.75	<0.625	<0.556	<1.389	<1.087
硫	%, dm	<0.2	<0.3	<0.3	<0.5	<0.8
錫	mg/MJ, d	<3.5	<2.917	<2.593	<3.889	<3.043

資料來源：本研究整理。BPG 1™、BPG 2™ 和 BPG 3™，分別對應火力發電廠、水泥窯和石灰窯的使用需求。SBS 1™ 和 SBS 2™，分別適用於褐煤發電廠及煤炭發電廠和水泥窯。



表2 各國固體再生燃料(SRF)品質標準(續)

各國SRF品質標準	單位	奧地利(共同焚燒)		奧地利(水泥窯共同焚燒)	
項目		限值		限值	
		中位數	80%位數	中位數	80%位數
物理特性					
水分					
-	-				
淨熱值/低位發熱量	MJ/kg	12-18(中等)18-25(優質)	12-18(中等)18-25(優質)		
總熱值		-	-		
灰分		-	-		
直徑		-	-		
長度		-	-		
顆粒型式		-	-		
尺寸		-	-		
化學特性					
氯	%, dm	-	-		
汞	mg/MJ, d	0.075	0.15	0.075	0.15
鎘	mg/MJ, d	0.17	0.34	0.23	0.46
鉛	mg/MJ, d	15	27	20	36
砷	mg/MJ, d	1	1.5	2	3
鉻	mg/MJ, d	19	28	25	37
銻	mg/MJ, d	7	10	7	10
鈷	mg/MJ, d	0.9	1.6	1.5	2.7
錳	mg/MJ, d				
鎳	mg/MJ, d	7	12	10	18
鉈	mg/MJ, d				
釩	mg/MJ, d				
硫	%, dm	-	-		
錫	mg/MJ, d				

資料來源：本研究整理，根據奧地利法規規定，水泥窯共同焚燒限值適用於水泥熟料燒製的工廠。

表2 各國固體再生燃料(SRF)品質標準(續)

各國SRF品質標準	單位	奧地利(發電廠共同焚燒)			
項目		限值(熱輸出≤10%)		限值(熱輸出≤15%)	
		中位數	80%位數	中位數	80%位數
物理特性					
水分	-	-			
淨熱值/低位發熱量		12-18 (中等) 18-25 (優質)		12-18 (中等) 18-25 (優質)	
總熱值		-	-		
灰分		-	-		
直徑		-	-		
長度		-	-		
顆粒型式		-	-		
尺寸		-	-		
化學特性					
氯	%, dm	-	-		
汞	mg/MJ, d	0.075	0.15	0.075	0.15
鎘	mg/MJ, d	0.27	0.54	0.17	0.34
鉛	mg/MJ, d	23	41	15	27
砷	mg/MJ, d	2	3	2	3
鉻	mg/MJ, d	31	46	19	28
銻	mg/MJ, d	7	10	7	10
鈷	mg/MJ, d	1.4	2.5	0.9	1.6
錳	mg/MJ, d				
鎳	mg/MJ, d	11	19	7	12
鉈	mg/MJ, d				
釩	mg/MJ, d				
硫	%, dm	-	-		
錫	mg/MJ, d				

資料來源：本研究整理，根據奧地利法規，限值適用於以硬煤或褐煤為主的鍋爐，用於發電和區域供熱，廢棄物焚燒的熱輸出比例不得超過15%。



國規範項目的聯集，以便在第三章節「結果與討論」中對臺灣現有的規範進行深入分析與比較。這些比較專注於熱值、氯、汞、鎘、鉛等關鍵品質指標，將在該章節中進一步探討。

自2007年，《能源科技研究發展白皮書》提及臺灣開始應用固體廢棄物衍生燃料(RDF-5)，此燃料是將生質物和廢棄物經過破碎、分選、乾燥、添加劑混合和壓製成錠狀燃料(經濟部能源署，2007)。美國材料試驗學會根據RDF的處理後特性，將其分為7類(表3)，其中RDF-5是較高等級，而RDF-1則為生垃圾，僅適用於焚化爐，需額外添加助燃劑，轉化效率低且易產生戴奧辛等污染物(張瓊芬與張家驥，2022)。

自2018年起，歐盟開始將家庭、商業和工業廢棄物轉化為固體再生燃料，進一步制定了EN 15359技術規範，根據淨熱值、氯含量和汞含量對這些燃料進行分級。相較於傳統的RDF，固體再生燃料具有更細的粒徑和更低的含水量，並對化學成分和粉塵進行了更嚴格的控制(陳映竹與陳宜蓁，2021)。進一步地，歐盟訂立了ISO 21640 (International Organization for Standardization, ISO)標準，取代之前的歐洲

標準，此標準依據淨熱值、氯含量和汞含量，將固體再生燃料分為五個等級，確保了其在安全性、環保性和可操作性上的標準化，以提升資源再利用效率(張瓊芬與張家驥，2022)。

臺灣的固體再生燃料規範起源於2010年環境部制定的《固體再生燃料製造技術指引與品質規範》，該規範於今年(2024年)進行了第七次修正。這些修正不僅提高了汞含量的標準，也引入了淨熱值、氯和汞含量的分級制度，使標準更為嚴格且具體(環境部資源循環署，2020)。

在國際上，如日本，有劃分出更高級的廢棄物衍生燃料(Refuse derived Fuels, RDF)，是以紙張、廢塑膠為主的廢棄紙塑複合固體廢棄物衍生燃料(Refuse derived paper and plastics densified fuel, RPF)，並輔以廢纖維、木屑或橡膠。2010年，日本標準協會編寫的《廢棄物由来の紙，プラスチックなど固形化燃料》中，詳細描述了與RPF工業規格相關的JIS.Z 7311品質標準，其中包括根據氯含量進行的分級。這些規格強調了對環保材料標準的重視和分類方法的精確性(日本標準協會，2010)。

在韓國，固體再生燃料的分類基於使用的

表3 美國材料試驗學會針對固體廢棄物衍生燃料(RDF)之分類

類別	定義
RDF-1 (MSW)	都市廢棄物直接作為燃料，但不含巨大廢棄物
RDF-2 (c-RDF)	廢棄物破碎成粗顆粒，亦可經磁選回收金屬後，95 wt% 通過6-inch 篩網
RDF-3 (f-RDF)	廢棄物經過進一步破碎，並去除金屬、玻璃及其他無機物後，95 wt% 通過2-inch 篩網
RDF-4 (p-RDF)	可燃物處理成粉狀，95 wt% 通過0.035-inch篩網
RDF-5 (d-RDF)	可燃物壓密成柱狀、球狀、磚塊狀或其他形狀
RDF-6	可燃物處理成液狀(無分類標準)
RDF-7	可燃物處理成氣狀(無分類標準)

資料來源：張瓊芬，張家驥，2022。

生質原料，如廢紙和廢木材，分成一般的以及生物固體燃料產品(Biomass-Solid Refuse Fuel, Bio-SRF)，又根據其形態分為成形或非成形。這些燃料根據熱值、汞、氯和硫的含量進行了細致的分級，具體分類詳見表4。韓國對進口固體再生燃料的存放也有特定規定。然而，本文聚焦於國內製造的標準，因此不深入討論進口燃料的規定(韓國環境部，2024)。

在德國，固體再生燃料和木材回收品質保證協會(BGS e.V.)在2022年更新了 RAL-GZ 724 品質認證系統，這是一套旨在保證固體再生燃料質量的系統，也包括了商標管理體系來滿足市場需求。這套系統不僅作為德國的國家標準在歐洲廣泛應用，還在推進至國際標準ISO層級，以提升其國際認可度(Hams and Flamme, 2022)。此外，這一商標系統幫助市場辨識符合特定標準的廢棄物衍生燃料，並對不同的應用場景進行分類，提供具體的品質指導。雖然此系統非強制性的，但其在市場上高度認可，對保障固體再生燃料的品質穩定性和適用性提供了重要保障。

根據RAL-GZ 724品質認證系統，BGS e.V.建立了兩個商標BPG™和SBS™，用於區分

不同來源的固體再生燃料並按用途進行分類。BPG™商標指的是主要由工業和商業廢物製成的固體再生燃料，根據具體的工業用途分為三個級別：BPG 1™適用於火力發電廠，BPG 2™適用於水泥窯，BPG 3™適用於石灰窯。SBS™商標則用於標記由市政和建築拆除廢物製成的固體再生燃料，並分SBS 1™和SBS 2™兩個級別，分別適用於褐煤發電廠和煤炭發電廠以及水泥窯。

2016年，德國產出約300萬噸固體再生燃料，其中約50萬噸獲得RAL認證，被廣泛應用於各類設施。在水泥窯中，約220萬噸固體再生燃料被用作替代燃料，占總替代燃料使用量的67%。這一商標認證系統，雖非強制性，但通過確保燃料的品質穩定和適用性，對促進替代燃料市場的接受度發揮了重要作用。

作為國際間要求較為嚴格的國家，奧地利對固體再生燃料(SRF)的分類根據應用場景進行，包括水泥窯共燒、燃煤發電機組共燒及單獨焚燒。奧地利的廢棄物焚燒法規(Waste Incineration Ordinance)要求SRF必須符合特定的品質標準，並主要用於能源產生。該法規詳細規範了燃料的原料來源、處理過程及品質要

表4 韓國一般及生物固體再生燃料(SRF、Bio-SRF)品質分級

項目	單位	數值					
		SRF			Bio-SRF		
		1	2	3	1	2	3
物理特性							
低位							
發熱量	MJ/kg	≥14.65	≥20.93	≥25.12	≥12.56	≥13.81	≥15.07
化學特性							
氯	wt%	≤2	≤1	≤0.5	≤0.5	≤0.3	≤0.1
汞	mg/kg	≤0.07	≤0.02	≤0.008	≤0.05	≤0.02	≤0.007
硫	wt%	≤0.6	≤0.4	≤0.2	≤0.6	≤0.1	≤0.05

資料來源：《資源循環使用法施行細則》附錄7-2，2024。

求，並強調SRF必須經過充分預處理，符合歐洲標準EN-15539的相關要求。

2015年，奧地利的SRF產量約為280萬噸，其中100萬噸來自城市廢棄物，產生了18萬噸的SRF-EoW（達到廢棄物終結狀態的燃料產品）。當年國內共有53座工業發電廠投入運作，處理約100萬噸的廢棄物，主要是廢木材、造紙工業殘渣、廢塑膠等。水泥窯在2015至2016年間使用了約50萬噸的替代燃料，其中以廢塑膠為主要成分。奧地利將SRF依熱值及品質分為中等品質（淨熱值在12至18 MJ/kg之間）及優質（淨熱值在18至25 MJ/kg之間），這些燃料必須符合廢棄物歐盟列表代碼EWC 191212的規範，並根據不同用途有強制的限值要求。此外，固體再生燃料的品質控制系統在奧地利已被法規化，並受到嚴格的監管，以確保廢棄物在不同產業中的再利用符合環保標準(Martignon, 2020)。

透過對國際規範的詳細盤點與比對，不僅能提升本地標準的全球競爭力，同時也可以明確指出改進的方向。這樣的努力將確保我們在環境保護和產品質量方面的雙重目標得以實現。

## 2.2 戴奧辛及重金屬排放限值

本節深入盤點了臺灣、日本、韓國、德國及歐盟是否針對固體再生燃料污染物排放訂有相關規定，尤其是戴奧辛及重金屬，這些是臺灣推行固體再生燃料時公眾最擔憂的健康風險因素。德國和歐盟把固體再生燃料當作廢棄物處理的一部分，適用現有的廢棄物燃燒排放標準。而臺灣、日本和韓國則是只有固定污染源排放標準的規範，其中焚化爐的標準尤其嚴格。為了保證比較的一致性，本文選擇這三國與戴奧辛及重金屬排放相關的法規做為比較基礎，具體比較結果列於表5。

在表5中，戴奧辛的單位中使用的毒性

當量(Toxicity Equivalency Quantity of 2, 3, 7, 8-tetra-chlorinateddibenzo-p-dioxin, TEQ)是一種衡量戴奧辛類化合物毒性的指標。戴奧辛包含多種物質，每種物質根據其毒性當量因子計算，經過加總後得到總毒性當量，以便於計算戴奧辛的整體毒性。戴奧辛排放主要關聯於含氯物質，特別是PVC塑膠。當這類廢塑膠進入焚化爐進行燃燒而未妥善控制時，會產生並釋放戴奧辛。因此，固體再生燃料中控制氯含量的檢測和方法對於抑制戴奧辛的生成是關鍵。此類燃料原料主要包括廢樹脂、廢塑膠混合物及廢塑膠等，需要對這些含氯成分進行嚴格控制，以從源頭減少戴奧辛的產生(環境部資源循環署，2024；陳亭瑋，2017)。

臺灣雖然目前尚未制定固體再生燃料燃燒後污染物排放量的相關法規，故採用已有20年應用歷史的RDF-5排放標準，本研究以《固定污染源有害空氣污染物種類及排放限值》、《固定污染源有害空氣污染物排放標準》及《固定污染源戴奧辛排放標準》內容作為參考；其中戴奧辛及重金屬之排放限值來自《固定污染源有害空氣污染物種類及排放限值》，而戴奧辛及重金屬之排放標準則分別來自《固定污染源戴奧辛排放標準》及《固定污染源有害空氣污染物排放標準》。在《空氣污染防制法》下，違反這些排放規定可能面臨嚴重的行政或刑事處罰，顯示這些規範的執行力度和嚴格性。此外，排放標準通常需考量排放源的具體條件如煙囪高度和周圍環境等因素，使得每個案例都需進行個別評估以確保遵守規範。本研究將排放限值與排放標準並陳，提供一個統一且明確的指標(環境部，2018；環境部，2021；環境部，2023c；環境部，2024)。

日本的《空氣污染防制法》由中央環境省制定，同時授權地方政府訂立更嚴格的標準，使法令更具概念性與彈性。法規不僅規範

表5 德國、歐盟與臺灣空污排放限值

項目	臺灣			日本		韓國		德國		歐盟 (2007/01/01後)	
	排放限值	排放標準	單位	數值	單位	數值	單位	數值	單位	數值	單位
戴奧辛	10	0.5	ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.1	ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.1	ng-TEQ/Sm <sup>3</sup>	0.03	ng/m <sup>3</sup>	0.1	ng/Nm <sup>3</sup>
汞	1.0	依法規方法計量	mg/Nm <sup>3</sup>	-		0.05	mg/Sm <sup>3</sup>	0.01	mg/m <sup>3</sup>	0.05	mg/Nm <sup>3</sup>
鉍	0.05	依法規方法計量	mg/Nm <sup>3</sup>	-		-		-		-	
銅	10	0.1	mg/Nm <sup>3</sup>	1.0	mg/Nm <sup>3</sup>	0.02	mg/Sm <sup>3</sup>	總計 0.006	mg/m <sup>3</sup>	總計 0.05	mg/Nm <sup>3</sup>
鉈	-	-		-		-					
銻	-	-		-		-		總計 0.2	mg/m <sup>3</sup>	總計 0.5	mg/Nm <sup>3</sup>
砷	0.08	依法規方法計量	mg/Nm <sup>3</sup>	-		0.2	ppm				
鉛	10	1	mg/Nm <sup>3</sup>	10-30	mg/Nm <sup>3</sup>	0.2	mg/Sm <sup>3</sup>				
鉻	0.03	依法規方法計量	mg/Nm <sup>3</sup>	-		0.2	mg/Sm <sup>3</sup>				
鈷	-	-		-		-					
銅	-	-		-		4	mg/Sm <sup>3</sup>				
錳	-	-		-		-					
鎳	0.6	依法規方法計量	mg/Nm <sup>3</sup>	-		2	mg/Sm <sup>3</sup>	-		-	
釩	-	-		-		-					
錫	-	-		-		-					
鋅	-	-		-		4	mg/Sm <sup>3</sup>	-		-	

資料來源：本研究整理。



了基本的污染物種類，如粉塵、揮發性有機物(VOC)、苯和氯化氫(HCl)，也明確規定了管制措施，包括事故後的復原程序和向地方政府的通報要求(日本環境省，2022a)。此外，針對戴奧辛問題，日本特別訂有《戴奧辛特別措施法》，該法明確制定了環境總量控制、排放量限制和具體的管理措施。對於戴奧辛排放，日本針對不同類型的設施設有差異化的排放標準，我們選取最嚴格的標準值，也就是每小時處理四公噸以上廢棄物的大型焚化爐所適用的標準作為參照(日本環境省，2022b)。其中，每小時處理四公噸以上廢棄物的大型焚化爐所適用的標準尤為嚴格。

韓國的空氣污染物排放規範大多整合於《空氣品質保護法施行細則》中，該法分為一般排放標準及年排放超過十噸的單一污染物的更嚴格標準(標準提高至為一般排放之二分之一左右)。本研究選取一般排放標準進行分析，以期達到廣泛通用的比較結果。此外，韓國透過《永久性污染物允許排放標準》對戴奧辛的排放進行規範，並根據不同的排放設施設定了具體的排放限值。我們選取與日本相同的規定(即每小時去化四公噸以上廢棄物的焚化爐)，使比較更有一致性(韓國環境部，2022；韓國環境部，2023)。

德國將固體再生燃料視為廢棄物處理的一環，因此在本研究中，我們參考了《聯邦排放控制法》中對廢棄物焚燒的相關規範。此法律對協同焚燒提供了詳細的規定，包括混燒比例及廢棄物種類等方面。在汞的排放限值方面，選擇的是日平均值作為基準，該法也設有半小時平均值，但因其相對寬鬆，故未在本研究的比較表(表5)中列出。對於其他重金屬和戴奧辛的排放限值，本研究選擇了適用於大型燃燒設施的嚴格標準，這些標準與日本和韓國針對大型焚化爐的規範相似，從而確保標準的一致性

和嚴謹性(德國環境部，2024)。

在歐盟，除非成員國有特殊規定，否則固體再生燃料通常被視為廢棄物(如上述的德國)，且常用於與其他燃料混燒。根據《廢棄物焚燒指令》(2000/76/EC)，該指令提供了對廢棄物協同焚燒的詳細規範，涵蓋戴奧辛、重金屬以及氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、硫氧化物(SO<sub>x</sub>)、一氧化碳(CO)等常見空氣污染物的排放限值。該指令還規定了排放限值的加權方法，根據廢棄物與混燒燃料的產氣量比例進行調整，確保廢棄物產熱至少占總產熱的百分之十，若低於此比例則按百分之十計算。這一規範有助於確保焚燒過程的環境衝擊得到有效控制(Communities, 2000)。

## 2.3 固定污染源致癌風險評估

本研究原先計劃使用臺灣實際的固體再生燃料燃燒與排放數據來評估其對健康的潛在風險。然而，從2019到2022年，固體再生燃料的製造量從5萬公噸增至約20萬公噸，涉及28家製造商和14家使用商，由於原料多樣化(包括廢塑膠、廢紙、廢木材等)，排放係數的變異相對增大，數據收集變得更加困難。另外，根據前言所述，大多數固體再生燃料的研究和實驗主要集中在如何優化投放量及時機，目的是實現更低的排放量和更高的熱效率。當前的排放檢測僅根據現行的環保法規進行，尚未能提供更詳細的數據。因此，本研究選擇使用具有20年實際應用歷史的RDF-5排放標準來進行致癌風險評估。在控制方面，RDF-5作為固定污染源，在燃燒過程中需遵循《固定污染源戴奧辛排放標準》和《固定污染源有害空氣污染物排放標準》。

本研究所建立的風險計算流程可為未來固體再生燃料的進一步試燒或數據分析提供參考，若未來能獲得更全面的試驗數據，將有助

於更精確地評估健康風險，為政策制定和標準修訂提供科學依據。

在進行健康風險評估的過程中，我們參考了邱心怡針對臺中電廠及興達電廠的研究(邱心怡，2009)，該研究使用了實際測得的戴奧辛與重金屬排放數據來計算周邊社區居民可能因各種途徑(例如呼吸和飲水)接觸到的污染物所帶來的整體健康風險，使用方法與法規《健康風險評估技術規範》中附件三、暴露量評估的致癌風險度數值估算相同(環境部，2011)。由於邱心怡的研究包含了實地數據、詳盡的計算過程以及針對固定污染源的個案研究，使其成為一個具體且具參考價值的健康風險評估範例。研究顯示，大多數的致癌風險來自於直接呼吸途徑，其中戴奧辛、鉛、砷和鎘的累積暴露對健康的負面影響尤為顯著。本研究採用了這些污染物的環境周界標準值(戴奧辛為排放標準)(表6)作為直接暴露的上限來估算致癌風險，這些數據未包括大氣稀釋的可能影響，因此提供了一種保守的風險評估方法。

表6 污染物及其周界標準值

污染物	周界標準值	單位
戴奧辛	0.5	ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>
鉛	1	μg/Nm <sup>3</sup>
砷	0.07	
鎘	0.17	

資料來源：環境部，2006；環境部，2021。

在本研究中，我們通過將每日平均暴露劑量與致癌斜率因子(Cancer Slope Factor, CSF)相乘來計算直接呼吸途徑的致癌風險(方程式(1)、(2))。致癌風險沒有單位；舉例來說，風險為 $10^{-4}$ 表示每一萬人中可能有一人罹癌。這一分分析方法符合美國環保署指南，該指南認可的致癌風險範圍是每一萬人至每千萬人中有一人。這種統計方法對於環境健康評估中管理

暴露於致癌物質的風險以及在大規模人群中揭示潛在健康影響非常有用(U.S. Environmental Protection Agency, 1989)。

$$ADD_{ij} = [C_i] \times \left[ \frac{IU_{ij}}{BW} \right] \times \left[ \frac{EF \times ED}{AT} \right] \quad (1)$$

$$Risk_i = ADD_i \times CSF_i \quad (2)$$

其中，每日平均暴露劑量 $ADD_{ij}$  (Average Daily Dose, ADD)為每日平均從接觸介質 $i$  (如飲用水、食物)、暴露途徑 $j$  (如直接呼吸、飲用水)接觸之劑量(mg/day·kg)， $C_i$ 為污染物於接觸介質 $i$ 之濃度(mg/L)， $IU$ 為吸收頻率(如呼吸頻率、飲水量) (L/day)， $EF$ 為人與接觸介質之接觸頻率(day/yr)， $ED$ 為人與接觸介質之接觸期間(yr)， $AT$ 為暴露發生的平均時間(day)， $BW$ 為平均體重(kg)。

如表7所示，本研究以成人為例，假設居住期間(即 $ED$ )為30年，使用19到44歲成人平均體重(即 $BW$ )作為代表，男性為75.4公斤，女性為58.7公斤(衛生福利部國民健康署，2022)，成人的平均呼吸量(即 $IU$ )沿用邱心怡的研究，設為0.533立方米/小時，相當於12792 L/day。我們使用的污染物濃度為法規規定的周界標準值，且不考慮大氣稀釋影響，並將濃度單位統一以 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 表示，也方便計算與單位換算。以上數值代入方程式(1)與(2)後，即可加總得到總致癌風險，其計算結果將在第三章節「結果與討論」中詳細報告。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 國際標準之比較

本研究對比了臺灣、日本、韓國、德國及歐盟在固體再生燃料的熱值、氯、汞、鎘、和鉛等關鍵指標的國際標準，以揭示不同國家在

表7 戴奧辛、鉛、砷、鎘等透過直接呼吸途徑計算致癌風險之參數

	污染物濃度 ( $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ )	呼吸量 ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	平均體重 (kg)	暴露延時 (yr)	致癌斜率因子 (-)
戴奧辛	$5 \times 10^{-4}$	0.533	男性：75.4 女性：58.7	30	150000
鉛	1				0.04
砷	0.07				6.3
鎘	0.17				15

資料來源：本研究整理。

環境保護和能源效率標準制定上的差異。詳細表格請參考表2。

首先，從熱值來看，不同國家及地區採用了各自的測量和分級方法。例如，臺灣和歐盟包含德國和奧地利皆使用淨熱值，而韓國則使用低位發熱量，皆是用來衡量燃燒過程中由水分轉化為氣態所釋放的熱量。日本則採用總熱值，這意味著其熱值計算基於燃燒時水分凝結成液態所釋放的熱量，包括因水分汽化而帶走的熱量損失。這顯示出不同測量方法在國際間應用的差異，這對於能源的有效利用尤其重要。

臺灣對固體再生燃料的最低熱值要求為10 MJ/kg，而歐盟將熱值分為五級，最低標準為3 MJ/kg以上。韓國對其固體再生燃料和生物質固體再生燃料的最低標準分別定為3,500 kcal/kg和3,000 kcal/kg，轉換為14.63 MJ/kg和12.54 MJ/kg。日本的總熱值標準為25 MJ/kg，在扣除淨熱值與總熱值間的差值(約300-400 kcal/kg，即1.25-1.67 MJ/kg)後，仍被認為是所有國家中最嚴格的規範。而德國的商標分級和奧地利規範將其分得更為詳細，最低標準分別為德國SBS™ 1商標的13-18 MJ/kg以及奧地利的中等固體再生燃料12-18 MJ/kg。最高標準則為BGP™ 3商標的23-27 MJ/kg以及優質固體再生燃料18-25 MJ/kg。

在氯含量的規範上，臺灣與歐盟的標準較

為寬鬆，皆將含氯量分成五級，最高限制在3%相比之下，日本與韓國的標準則更為嚴格，最高只允許2%，德國在商標的非強制限制下甚至達到了0.7%，顯示出對環境保護的嚴格態度。值得一提的是，日韓皆以三級分類，細項稍有不同，其中韓國針對生物質固體再生燃料較為嚴格，推估可能原因為其原料為生質廢棄物，污染程度較低。

對於汞的規範，臺灣與歐盟對汞的限制相對一致，不過臺灣採用的是平均值，與歐盟規範的中位數在統計上代表的意義並不相同，後續鎘和鉛也有這樣的區別。除此之外，歐盟還要求檢驗數據的第80百分位數亦須同時符合標準(中位數的兩倍值)詳細規範整理於表2的歐盟ISO21640；這表示若一固體再生燃料產品的汞含量檢驗數據中位數值符合分級3，但第80百分位數僅符合分級4，其仍被歸類在分級4的產品等級。這種嚴謹的做法有助於確保汞排放對環境的影響降到最低。此外，德國和歐盟的對照顯示其標準的嚴格程度約落在分級3中，奧地利則落在分級4中，不算特別嚴格或寬鬆。但德國商標與臺灣計算方式皆為平均值可以直接相互比較，細分下來後，則落在1-4級。韓國的標準規範範圍廣泛，與歐盟相比約落在分級1-4之間，從嚴格到相對寬鬆的分級皆有。值得一提的是，日本並沒有針對任何重金屬做出含量限制，包含本研究比較的汞、鎘、鉛都是。



鎘和鉛的分析中，各國間的標準差異不大，但德國和奧地利的標準相對嚴格。在鎘的部分，韓國的固體再生燃料與生物質固體再生燃料並無差異，其標準與臺灣亦一致；德國中位數標準數值僅臺灣及韓國的一半，80%位數 0.56 mg/MJ 則略大於臺灣的 0.5 mg/MJ，德國商標和奧地利各項分級中則有比 0.56 mg/MJ 更嚴格的限制，其中德國商標使用平均值故可以直接與臺灣比較，其中最低標準即為 0.5 mg/MJ 剩餘的都有更低的排放量需要滿足。在鉛的部分，韓國的生質固體再生燃料規定較固體再生燃料來得嚴格，而臺灣與韓國對固體再生燃料的規定一致都是 150 mg/kg，但經由不同熱質換算後韓國有更嚴格的限制標準，德國的標準中位數 12 mg/MJ 以及 80% 位數 25 mg/MJ，臺灣的規定 15 mg/MJ 介於德國的中位數與 80% 位數之間，僅略高於中位數。德國商標及奧地利則落在 15 mg/MJ 的上下，德國商標有嚴格至 3.7 mg/MJ 也有高至 22.2 mg/MJ，奧地利的中位數限制從 15 mg/MJ 至 23 mg/MJ、80% 位數則從 27 mg/MJ 至 41 mg/MJ 德國的分類方式和檢測的嚴謹度對臺灣與韓國等國的相關法規提出了潛在的改進方向。

### 3.2 擴展品質規範的範疇

基於 3.1 章節詳細對比各國在熱值、氯、汞、鎘、和鉛等關鍵指標的規範之上，本節進一步探討臺灣固體再生燃料的品質規範，如何與國際標準對齊，並指出可進一步精進的領域。

首先，臺灣在熱值與氯含量的規範上直接參考了歐盟的標準，顯示出臺灣在這些方面已對國際標準進行了充分的參考與調整，確保符合全球一致的環境要求。對於汞的管制，臺灣與歐盟在限制值上相對一致，但臺灣採用的是平均值，而歐盟則是中位數，兩者在統計意義

上有所不同。此外，歐盟要求的檢測標準較為嚴謹，不僅須符合中位數的限值，還規定第 80 百分位數值不得超過標準的兩倍。這意味著即使某固體再生燃料產品的汞含量中位數符合分級 3，但若第 80 百分位數僅符合分級 4，其仍被視為分級 4 的產品。歐盟此規範的嚴格要求進一步確保汞排放的環境影響被控制在最低限度。此外，鎘和鉛的燃料每公斤含量標準與韓國一致，進一步證實了臺灣規範的國際兼容性。

然而，臺灣的法規尚未覆蓋所有重要的環境和健康因素。例如，由表 1 中可以觀察到，日本和韓國對水分和灰分的含量有明確的規定，這些指標直接影響燃料的燃燒效率和熱值釋放。另外奧地利與德國都有因應不同使用情景設立不同的標準也是臺灣可以效仿並學習的。

德國和奧地利對重金屬的規範更為全面，除了汞、鎘、鉛三種重金屬臺灣亦有規定外，還包括砷、鉻、銻、鈷、錳、鎳、鉍、釩、錫等多種對環境與人體健康可能造成影響的元素。這些重金屬的納入，反映了對燃料品質的嚴格控制對保護公眾健康的重要性。

重金屬對人體的神經系統、呼吸系統、皮膚和內臟器官等可能造成的危害，特別是在燃燒過程中釋放到大氣中後，通過呼吸或皮膚接觸進入人體，對公共健康的影響不容忽視。砷會對人類呼吸道產生刺激，為已知的致癌物；三價鉻是人體必需的營養素，然而六價鉻是致癌物質，會對呼吸道、皮膚粘膜產生傷害；鈷進入人體後對於內臟包含心、肺、肝、腎可能造成傷害；暴露在高濃度錳中時，人體的行為及神經系統會受到損傷，導致動作遲緩，亦會刺激肺臟；大約一至二成的人口對鎳過敏，會造成皮膚起疹子、支氣管炎；鉍中毒會危害神經系統，造成末梢神經發麻，短期大量攝取亦有可能嘔吐、腹瀉、掉髮；釩則可能會導致肺部損傷、胃絞痛；錫不易被腸胃吸收，無

機錫化合物會引起胃痛、貧血、肝腎問題。這些因素顯示了對固體再生燃料中重金屬含量的嚴格規範的必要性(國家環境毒物研究中心，2021a；2021b；2021c；2021d；2021e；2021f；2021g；2021h)。

歐盟使用固體再生燃料時會搭配《ISO 21644:2021》，其提供了關於生物質測定的完整規範和標準來取得燃料中的生物質含量。在前言中指出，垃圾焚化發電的能量來源中，大約有一半來自於生物質的燃燒貢獻，因此生物質在整體焚化過程中占有重要比例。此外，2023年已正式發布修訂公告，將生物質測定方法納入固體再生燃料的規範。該公告的落實將使得臺灣的測定標準更為嚴謹和完善，有助於提升國內生物質能源利用的可靠性與環保效益(臺灣生質能技術發展協會，2023)。

因此，提高臺灣固體再生燃料品質規範的全面性不僅是對現有標準的補充，更是對保護環境和民眾健康的重要投資。在未來的政策制定和標準修訂過程中，考慮到上述國際標準的全面性和嚴格性，將有助於臺灣在全球環保標準中保持競爭力，同時確保公共健康安全。

3.3 深化規範的限值

除了3.2節中提及的擴充品質規範範疇，本節進一步分析如何深化我國的環境規範。在重金屬排放標準方面，德國對於汞設定了極為嚴

格的限值，臺灣的現行標準是德國的100倍、韓國、歐盟的20倍之多。至於戴奧辛，德國的排放限值為0.03 ng/m<sup>3</sup>，是最嚴格的標準，相較之下，臺灣的標準顯得相當寬鬆，為德國的16倍。除此之外，對於其他重金屬如鎘、鉛、鎳等，德國、歐盟皆有規範這些重金屬的總量上限，而臺灣的相關標準則明顯高於歐盟規定的上限。這些差異突顯了臺灣在環境規範上與國際標準之間的落差，亦顯示出臺灣在未來修訂排放標準時，有進一步嚴格規範的必要和空間。

3.4 致癌風險量化初探

在探討致癌風險時，應考慮性別差異因素。本研究分別針對國人男性與女性的體重計算致癌風險，以提供更具體的風險評估。男性的平均體重為75.4公斤，女性為58.7公斤，根據這些數據，利用法規所設定的周界標準值估計戴奧辛、鉛、鎘、和砷等污染物的致癌風險。這些計算考慮到污染物濃度以及人體的吸收和暴露時間，提供了性別分析的風險評估。

透過致癌斜率因子和每日接觸劑量的乘積，計算得出男女性的總致癌風險，皆落在百分之一至二左右(表8)。這代表在本研究假定的情境下，每一百人會有一人罹癌；且男性罹癌的風險較女性更低，因其體重較高，可以有效稀釋污染物的接觸濃度。此外，在這些污染

表8 致癌風險計算結果

污染物	每日接觸劑量 (mg/day·kg)	致癌風險(-)	
		男性	女性
戴奧辛	8.13*10 <sup>-8</sup>	1.22*10 <sup>-2</sup>	1.57*10 <sup>-2</sup>
鉛	1.63*10 <sup>-4</sup>	6.51*10 <sup>-6</sup>	8.36*10 <sup>-6</sup>
砷	1.14*10 <sup>-5</sup>	1.71*10 <sup>-4</sup>	2.19*10 <sup>-4</sup>
鎘	2.77*10 <sup>-5</sup>	1.74*10 <sup>-4</sup>	2.24*10 <sup>-4</sup>
	總計	1.26*10 <sup>-2</sup>	1.61*10 <sup>-2</sup>

物中，可以很明顯的發現戴奧辛幾乎主導了整體的罹癌風險值，其造成的致癌風險不論男性或女性皆占了整體風險的九成五以上，這點或許可以歸因於戴奧辛的高毒性。其他重金屬透過直接呼吸途徑造成的致癌風險，每項獨立來看，都符合可接受的風險值範圍(萬分之一至百萬分之一)。不過此結果假定周界標準值代表了民眾的日常接觸濃度，但未考慮大氣中的稀釋效應，實際致癌風險可能更低。此外，考慮到未被規範的其他污染物可能帶來的風險，本章節建議政府逐步加嚴相關法規，以保障公眾的健康安全。

## 4. 結 語

固體再生燃料在降低碳排和減少廢棄物方面展現出顯著的潛力，成為推進環保的重要工具。然而，從生產、製造到使用的全過程中，根據現行法規，仍存在許多需要改進的地方。政府雖然已多次修訂相關規範，但在法規的溝通、消除公眾疑慮以及對空氣質量的嚴格把關上，還需強化以達到國際標準的水平。

本研究透過國際環保法規的比較和提供健康風險的量化評估的方法，指出臺灣在固體再生燃料品質規範上的不足，尤其是在熱值、氯、汞、鎘、鉛等環保指標上，雖與國際標準相匹配，但在如砷和鉻等其他重金屬的限制上明顯落後於如德國和韓國等國的嚴格規範。此外，臺灣的固體再生燃料品質標準應進一步考慮包含更多重金屬的限制，這不僅能減輕燃燒過程中對環境的負擔，同時也是保護公眾健康的關鍵步驟。因此，本研究建議臺灣政府逐步擴大固體再生燃料使重金屬規範，若在製造端不先限制這些物質的含量，依賴於對燃燒排放端的排放限值來管理，將加重排放端的處理負擔，並對國民健康保護形成不足。事先制定嚴

格的固體再生燃料重金屬含量標準，將有助於降低國民的健康疑慮，增強公共安全。

此外，相較於德國和歐盟，臺灣針對戴奧辛和重金屬的排放限值顯得過於寬鬆，而且並非專為固體再生燃料燃燒所設的專用法規。這不僅揭示了臺灣與國際標準之間的落差，也凸顯了臺灣緊縮標準的迫切需求。在未來政策制定和標準修訂中，應考慮如何與國際標準接軌，或透過政府的補助和獎勵措施，鼓勵業者主動更新燃燒技術及後端排放處理設備，進而減少環境負擔及對公眾健康的威脅。

儘管現有的固體再生燃料品質標準及排放限值尚有不足，本研究發現，依據現行法規對戴奧辛、鉛、砷及鎘的排放限值進行試算，其計算出的致癌風險值仍在可接受範圍內。未來可進一步評估正在修訂中的《公私場所固定污染源應符合混燒比例及成分標準之燃料》、《公私場所固定污染源燃料混燒比例及成分標準》及《鍋爐空氣污染物排放標準》。期盼臺灣能與國際標準更緊密接軌，通過更嚴格的法規和有效的政策溝通，為臺灣打造一個更安全、潔淨的生活環境。

## 誌 謝

本文作者感謝環境部空氣污染防治基金科技研究計畫(113-MOENV-H003)的支持，以及環科工程顧問股份有限公司同仁的協助，使本研究得以順利完成。

## 參考文獻

- 大氣環境司，2023。中華民國112年度空氣污染防治總檢討。彭啟明。
- 日本標準協會，2010。廃棄物由来の紙，プラスチックなど固形化燃料。Retrieved from



- <https://kikakurui.com/z7/Z7311-2010-01.html>  
日本環境省，2022a。空氣污染防治法。
- 日本環境省，2022b。戴奧辛特別措施法。
- 行政院環境保護署空保處，2018。加強管制鍋爐空氣污染物排放，環保署訂定發布「鍋爐空氣污染物排放標準」。環境部新聞專區。<https://enews.moenv.gov.tw/Page/3B3C62C78849F32F/2fae7af1-6571-4dfd-a34a-db3b8fa0856a>
- 林良齊，2024。全台垃圾暫置量達84萬噸環境部估：2036年才處理的完。工商時報。<https://www.ctee.com.tw/news/20240607701669-431401>
- 邱心怡，2009。燃煤電廠排放之戴奧辛與重金屬健康風險評估-以台中電廠和興達電廠為例 國立臺灣大學。<http://tdr.lib.ntu.edu.tw/jspui/handle/123456789/42489>
- 國家環境毒物研究中心，2021a。砷。
- 國家環境毒物研究中心，2021b。鈾。
- 國家環境毒物研究中心，2021c。鈷。
- 國家環境毒物研究中心，2021d。鉍。
- 國家環境毒物研究中心，2021e。鉻。
- 國家環境毒物研究中心，2021f。錫及其化合物。
- 國家環境毒物研究中心，2021g。錳。
- 國家環境毒物研究中心，2021h。鎳。
- 張岱屏，陳慶鍾，賴冠丞與葉鎮中，2024。以廢轉能怎麼轉 | 固體再生燃料SRF真的同時解決廢棄物又產生綠能嗎？我們的島。<https://ourisland.pts.org.tw/content/10555>
- 張瓊芬與張家驥，2022。固體再生燃料現況與展望。
- 陳光熙與張耀元，2021。水泥窯替代燃料使用與實務。<https://emis.itri.org.tw/Content/Upload/Manage/Files/9f5d4244-84ee-4993-82f6-51b7cb3a126a.pdf>
- 陳亭瑋，2017。好毒的意外：化學工業的歷史共業「戴奧辛」。環境部化學物質管理署。[https://www.cha.gov.tw/cp-263-2730-6fd8b-1.html#:~:text=1977%20%E5%B9%B4,%E6%89%8D%E6%9C%89%E4%BA%B A%E6%8F%90%E5%87%BA%E6%88%B 4%E5%A5%A7%E8%BE%9B%E6%9C%8 3%E5%87%BA%E7%8F%BE%E6%96%B C%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E7%87%8 3%E7%87%92%E7%9A%84%E9%A3%9B %E7%81%B0%E4%B8%AD,%E4%B8%89 %E5%B9%B4%E5%BE%8C\(1980\)%E7%9 A%84%E7%A0%94%E7%A9%B6%E4%B 9%9F%E8%AD%89%E5%AF%A6%E6%8 8%B4%E5%A5%A7%E8%BE%9B%E6%9 C%83%E5%9C%A8%E7%84%9A%E5%8 C%96%E4%B8%80%E8%88%AC%E5%9E %83%E5%9C%BE%E6%99%82%E7%94% 9F%E6%88%90%E3%80%82%E7%A0%94 %E7%A9%B6%E6%8C%87%E5%87%BA, %E5%A4%A7%E6%B0%A3%E4%B8%AD %E7%9A%84%E6%88%B4%E5%A5%A7% E8%BE%9B%E6%BF%83%E5%BA%A6% E5%BE%9E](https://www.cha.gov.tw/cp-263-2730-6fd8b-1.html#:~:text=1977%20%E5%B9%B4,%E6%89%8D%E6%9C%89%E4%BA%B A%E6%8F%90%E5%87%BA%E6%88%B 4%E5%A5%A7%E8%BE%9B%E6%9C%8 3%E5%87%BA%E7%8F%BE%E6%96%B C%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E7%87%8 3%E7%87%92%E7%9A%84%E9%A3%9B %E7%81%B0%E4%B8%AD,%E4%B8%89 %E5%B9%B4%E5%BE%8C(1980)%E7%9 A%84%E7%A0%94%E7%A9%B6%E4%B 9%9F%E8%AD%89%E5%AF%A6%E6%8 8%B4%E5%A5%A7%E8%BE%9B%E6%9 C%83%E5%9C%A8%E7%84%9A%E5%8 C%96%E4%B8%80%E8%88%AC%E5%9E %83%E5%9C%BE%E6%99%82%E7%94% 9F%E6%88%90%E3%80%82%E7%A0%94 %E7%A9%B6%E6%8C%87%E5%87%BA, %E5%A4%A7%E6%B0%A3%E4%B8%AD %E7%9A%84%E6%88%B4%E5%A5%A7% E8%BE%9B%E6%BF%83%E5%BA%A6% E5%BE%9E)
- 陳政偉，2024。環境部：發展固體再生燃料減少事業廢棄物。中央社。<https://www.cna.com.tw/news/ahel/202406060096.aspx>
- 陳映竹與陳宜蓁，2021。從「固態廢棄物衍生燃料」至「固體回收燃料」之演進。Retrieved 11/7 from <https://coeng.ntut.edu.tw/p/406-1017-106190,r2034.php?Lang=zh-tw>
- 曾學仁，2023。SRF燒廢棄物發電？陳椒華：政府對汙染問題視而不見。聯合新聞網。<https://udn.com/news/story/7266/7573088>
- 象騰顧問股份有限公司，2022。新竹縣一般性廢棄物分選轉製固體再生燃料(SRF)供應

- 事業單位評估與監督計畫 評估建議計畫書 (修正版)。
- 經濟部工業局，2023。鍋爐種類與操作方法。[https://proj.ftis.org.tw/apc/Subject3/Detail?Name=3\\_5](https://proj.ftis.org.tw/apc/Subject3/Detail?Name=3_5)
- 經濟部能源署，2007。能源科技研究發展白皮書。
- 經濟部能源署，2024。112年發電概況。Retrieved 11/7 from [https://www.moeaea.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu\\_id=14437](https://www.moeaea.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu_id=14437)
- 臺灣生質能技術發展協會，2023。固體再生燃料規範與分析方法增修公告。
- 德國環境部，2024。聯邦排放控制法實施第17號條例(廢物焚燒和共同焚燒條例) Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes.
- 蔡文田，2021。淺談固體再生燃料(SRF)的發展問題。能源教育資源總中心。Retrieved 11/7 from <https://learnenergy.tw/index.php?inter=knowledge&caid=4&id=651>
- 衛生福利部國民健康署，2022。國民營養健康狀況變遷調查成果報告2017-2020年。Retrieved from [https://www.hpa.gov.tw/File/Attach/15562/File\\_18775.pdf](https://www.hpa.gov.tw/File/Attach/15562/File_18775.pdf)
- 環境部，2011。健康風險評估技術規範附件三：暴露量評估。
- 環境部，2018。空氣污染防治法。
- 環境部，2021。固定污染源有害空氣污染物排放標準。
- 環境部，2023a。空氣污染防治方案 (113年至116年)核定版。
- 環境部，2023b。資源循環零廢棄。Retrieved 11/7 from <https://www.moenv.gov.tw/page/98470951F462CE4A>
- 環境部，2023c。固定污染源有害空氣污染物種類及排放限值。
- 環境部，2024。空氣品質改善維護資訊網。Retrieved 10/30 from [https://air.moenv.gov.tw/EnvTopics/AirQuality\\_7.aspx](https://air.moenv.gov.tw/EnvTopics/AirQuality_7.aspx)
- 環境部資源循環署，2020。固體再生燃料(SRF)製造技術指引與品質規範。
- 環境部資源循環署，2024。固體再生燃料製造技術指引與品質規範附表三、可作為固體再生燃料原料之廢棄物種類。
- 韓國環境部，2022。空氣品質保護法施行細則附錄八。
- 韓國環境部，2023。永久性污染物允許排放標準附錄三。
- 韓國環境部，2024。資源循環使用法施行細則。Retrieved from <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsId=007953&ancYnChk=0#0000>
- Communities, O. J. o. t. E., 2000. DIRECTIVE 2000/76/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 December 2000.
- Ferronato, N., C. Giaquinta, F. Conti and V. Torretta, 2024. When solid recovered fuel (SRF) production and consumption maximize environmental benefits? A life cycle assessment. Waste Manag, 178, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.029>
- Hams, S., S. and Flamme, 2022. Perspektiven der Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen nach dem Ausstieg aus der Kohleverstromung. Müll und Abfall. <https://doi.org/https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2022.02.06>
- Kuo, Y.-M., S.-W. Huang and W. Y. Kuan, 2021. Characteristics of Emissions from Reclamation of Solid-recovered Fuel (SRF) in a Cogeneration Plant. Aerosol and Air Quality Research, 21(11). <https://doi.org/10.4209/>

- [aaqr.210112](#)
- Martignon, G. P., 2020. Trends in the use of solid recovered fuels. on the incineration of wast.
- Son, J.-I., S.-J. Lee, S.-I. Park, E.-H. Kwon, H. Namkung, J.-G. Kang and W. Lee, 2022. Emission Characteristics of Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins/Dibenzofurans (PCDD/DFs) in Commercial Bio-SRF and SRF Incineration Plants. *Energies*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/en15082787>
- Svensson Myrin, E., P.-E. Persson and S. Jansson, 2014. The influence of food waste on dioxin formation during incineration of refuse-derived fuels. *Fuel*, 132, 165-169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.083>
- U.S. Environmental Protection Agency, E., 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A) Interim Final

# Comparison and Strategic Outlook of International Solid Recovered Fuel Standards

Dennis Kao<sup>1+</sup>    Tzu-Hsien Chuang<sup>2+</sup>    I-Yun Lisa Hsieh<sup>3\*</sup>

## ABSTRACT

Since the launch of the second phase of the Air Pollution Control Program in 2024 and the publication of the "Taiwan 2050 Net Zero Emissions Pathway and Strategy" in 2022, addressing air pollution and waste reduction has become imperative. Solid Recovered Fuel (SRF), made from high-caloric waste like plastics, paper, and wood, not only helps tackle the increasing waste volume and insufficient incinerator capacity but also substitutes traditional coal, reducing petrochemical fuel use and CO<sub>2</sub> emissions. However, concerns persist about the safety of SRF, particularly the potential dioxin emissions from burning waste plastics, posing health risks. While existing studies primarily focus on measuring dioxin emissions post-combustion, they often overlook a thorough quantification of the associated health risks. This study enhances understanding by comparing regulations from Taiwan, Japan, South Korea, Germany, and the EU, analyzing standards and emission limits for dioxins and heavy metals. It finds that regulations need more stringent updates to address gaps in heavy metal content regulation effectively. Moreover, this research applies regulatory standards for carcinogens like dioxins, lead, cadmium, and arsenic to assess cancer risks through direct inhalation, establishing that current regulations offer basic protection for public health, alleviating excessive concerns. This contribution underscores the necessity for rigorous standards and provides a comprehensive assessment of SRF's impact on health, guiding future policy enhancements.

**Keywords:** Solid Recovered Fuel (SRF), Air Pollution Control, Environmental Standards Comparison, Carcinogenic Risk Assessment, Dioxin Emissions.

---

<sup>1</sup> Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University.

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Chemical Engineering, National Taiwan University.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Department of Chemical Engineering (joint appointment), National Taiwan University.

<sup>+</sup> The authors contribute equally.

\*Corresponding Author, Phone: +886-(0)2-3366-4259, E-mail: [iyhsieh@ntu.edu.tw](mailto:iyhsieh@ntu.edu.tw)

Received Date: August 28, 2024

Revised Date: November 08, 2024

Accepted Date: November 17, 2024