

空氣污染與噪音類

燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

李家聿*、辛繼勤**、林楷傑***、賴俊甫****

摘 要

廢氣燃燒塔 (flare) 是專門設計用來燃燒廢氣的。許多燃燒塔利用蒸氣或空氣輔助增加氧氣並促進混合，以確保燃燒時無煙改善視覺污染。影響燃燒效率的參數有很多，例如廢氣熱值，以及蒸氣廢氣比 (Steam to Vent Gas, 簡稱 S/VG) 等。添加適量蒸氣或空氣對燃燒有所助益，但過量添加則可能冷卻火焰並稀釋廢氣，從而降低熱值，不利於燃燒效率。然而，適用於所有燃燒塔的單一 S/VG 是不存在的。廢氣組成、燃燒塔設計會決定適當區間。一般而言，製造商建議值，S/VG 約為 0.1~1 (US EPA, 2012)。然而，實務操作上會因為廢氣量變動大等因素，該建議值難以達成。本文在確保燃燒效率下，提出 S/VG 合理操作區間。

案例顯示，燃燒塔在歲修等非常態使用，通常為高熱值狀態。對照德州研究報告，高熱值下蒸氣廢氣比即使達到 300%，仍可維持 98% 削減率。在常態使用下，廢氣會由燃燒塔廢氣回收系統 (FGRS) 回收，作為燃料氣使用，進而導致燃燒塔無排放。但此時仍會有最低蒸氣量，以維持系統應變且避免水錘作用。

目前，環保法規規定使用蒸氣輔助燃燒型式之廢氣燃燒塔，其蒸氣量與廢氣量之重量比較無彈性且未考量廢氣熱值。實務顯示個案狀況有所不同，建議提供彈性操作區間。本研究可提供環保機關審查操作區間，或做為推動相關法令修訂參考。

2 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

【關鍵字】揮發性有機物、排放減量、節能減碳

- | | |
|-------------------|-----|
| * 中油煉製事業部大林煉油廠環保組 | 工程師 |
| ** 中油煉製事業部 | 執行長 |
| *** 環興科技股份有限公司 | 工程師 |
| **** 經濟部工業局 | 科長 |

一、前言

廢氣燃燒塔 (flare) 是石化產業 (含煉油廠) 相當常見的終端處理設備，在正常操作過程中，燃料氣呈現動態的平衡，廢氣經由燃氣回收系統 (FGRS)，利用隔離槽造成的壓力差回收、淨化後，回到廠內作為燃料循環使用，能有效避免酸性廢氣逆流至燃燒塔排出；然而在燃料氣壓力超出安全設定壓力或燃料氣品質不良 (氫氣、蒸氣及其他可能影響監測數據之物質含量過高) 及其他不確定因素發生時，則會使用燃燒塔緊急處理，因此燃燒塔除了是調節系統壓力的工安設備，也是環保關注的重點設備。

富含碳氫化合物之廢氣於燃燒時，燃燒區若無足夠之氧氣混入，常因燃燒不完全而伴隨黑煙之產生，故案例廠廢氣燃燒塔透過添加額外蒸氣輔助燃燒，於焰頂處使用蒸氣噴嘴將蒸氣噴入火焰中，藉以增加焰頂處空氣紊流效應，促使燃燒塔燃燒更完全；然而燃燒塔燃燒時，混入過量的蒸氣或一般空氣，將導致過度充氣 (over-aerated) 而降低出口火焰溫度，反而產生廢氣破壞移除率 (Destruction Removal Efficiency, DRE) 降低、未燃燒完全之碳氫化合物 (Unburnt hydrocarbon, UHC) 排放、燃燒效率 (Combustion Efficiency, CE) 降低及隆隆聲響 (John Zink Company LLC, 2021)。燃燒塔使用不同的蒸氣 / 空氣量與廢氣之重量比與燃燒情形如圖 1 所示。



圖 1 燃燒塔使用不同的蒸氣 / 空氣量與廢氣之重量比與燃燒情形
(John Zink Company LLC, 2021)

4 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

我國環保署針對燃燒塔之操作規範，可參考 102 年 1 月 3 日修正發布之「揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」，其中第 5 條規範蒸氣及廢氣重量比應介於 0.15~0.5，係避免廢氣燃燒塔之 DRE 不足之問題，法規關範內容如表 1 所示。

美國有關燃燒塔之法規規範，參考 SCAQMD Rule 1118 及 US EPA 40CFR63 Subpart CC (Refinery MACT 1)，雖同樣存在針對母火維持、總淨熱值及排放速度之規範，惟均無有關 S/VG 之相關規範，而是要求依燃燒塔之無煙能力 (smokeless capacity) 設計規範操作。若有微量黑煙產生，其連續 2 小時累積不能超過 5 分鐘，因此有關蒸氣用量的許多討論，僅以提供給設計者參考為主，最後由業者或製造商決定如何運用及操作。另美國 EPA 亦與許多煉油廠簽訂了一系列的同意令 (Consent Decrees) 加強管理，參考密西根州與印第安那州發布之同意令，其中有關燃燒效率之規範，首先規定蒸氣量與輔助燃料量均須由全自動系統控制，藉此將廢氣量、熱含量和蒸氣量都由業者按個燃燒塔特性自動調整；另規範 S/VG 應小於 3.0 (重量比) 或 2.7 (體積比)，小時平均值；其次燃燒效率應符合 98% 之燃燒效率。

表 1 揮發性有機物空氣污染管制及排放標準第 5 條 (摘錄)

第 1 項	廢氣燃燒塔之母火不可熄滅，且應使用獨立穩定之燃料系統。使用蒸氣輔助燃燒型式之廢氣燃燒塔，其蒸氣量與廢氣量之重量比應介於百分之十五至百分之五十。但因製程特性報經主管機關核可者，不在此限。	
第 2 項	廢氣燃燒塔之設計及操作條件應符合下表之規定：	
	輔助燃燒型式	總淨熱值 (HT) 與排放速度限值 (V) 符合下列三者之一： (1) $HT \geq 12 \text{ MJ/Nm}^3$ ， $V < 17 \text{ m/sec}$ (2) $HT > 40 \text{ MJ/Nm}^3$ ， $17\text{m/sec} \leq V < 114 \text{ m/sec}$ (3) $40 \text{ MJ/Nm}^3 \geq HT \geq 12 \text{ MJ/Nm}^3$ ， $V < V_{\max}$ 且 $V < 114 \text{ m/sec}$

故上述 S/VG 規範與我國規範之 0.15~0.5 有所差異，應屬管制觀念之不同，美國僅訂定最高上限，避免 DRE 降低太多，或甚至吹熄火種，故燃燒塔操作自動化後，業者可自行設定參數，以符合黑煙排放、燃燒效率及操作成本等各項需求。有關我國與美國有關燃燒塔之規範項目比較，如表 2 所示。

表 2 我國與美國有關燃燒塔之規範項目比較

	屬性	燃燒塔規範項目			
		總淨熱值	排放速度	蒸氣 / 廢氣比	燃燒效率
揮發性有機物空氣污染管制及排放標準	中央法令	O	O	O	X
US EPA 40CFR63 Subpart CC	中央法令	O	O	X	X
SCAQMD Rule 1118	地方法令	O	O	X	X
Consent Decree: Marathon Petroleum Company LP, and Catlettsburg Refining, LLC	與指定業者協議	O	O	O	O
Consent Decree: BP Products North America Inc.	與指定業者協議	O	O	O	O

相對於環保署，我國地方環保局考量重點以社會觀感為主，往往更重視燃燒不完全所導致燃燒塔產生明顯粒狀污染物（黑煙或煙塵）散佈於空氣中的視覺污染，以往煉油廠皆以違反空污法第 32 條第 1 項第 1 款作為裁處；現今，燃燒塔的管理除了需要無煙燃燒外，還必須注意輔助蒸氣的用量，這對燃燒塔管理上，形成一鉅大挑戰。

二、蒸氣 / 廢氣比 (S/VG) 與 DRE 變化關係

由於目前我國環保法規規範，使用蒸氣輔助燃燒型式之廢氣燃燒塔，其 S/VG 與國外差異較大；以下整理國外針對燃燒塔之相關研究文獻，探討蒸氣 / 廢氣比、DRE 及其他操作參數之關係。

1. 美國德州燃燒塔破壞效率實驗 (TCEQ 2010 Flare Study)

美國德州環境品質委員會於 2010 年，為探討於不同廢氣流量、不同 S/VG、及淨熱值之情形下，破壞移除率 (DRE) 與燃燒效率 (CE) 之關係，且是否仍能達到規範之 DRE 不小於 98% 條件，實驗區間在燃燒塔起煙點 (Incipient Smoking Point, ISP) 及鼻煙點 (Snuff Point) (圖 1 (右)) 之間，實驗結果如下：

6 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

(1) 以相同熱值及流量，不同蒸氣 / 廢氣重量比與 DRE 變化關係

實驗使用由丙烯組成熱值 350 BTU/scf (相當於 11 MJ/m³) 及廢氣流量 2,342 lb/hr (相當於 1,062 kg/hr) 之氣體，以不同 S/VG 分別為 0.29、0.54 及 1.05 測試 DRE。可得知於低廢氣熱值及高流量之情形下，介於國內標準 0.15~0.5 之蒸氣廢氣確實有較高之 DRE，如圖 2 所示；惟實驗未考慮實廠上使用廢氣燃燒塔，是在緊急處理情況下之工安設備，廢氣流量的增減速度以及物種熱值的變化是不可控的。

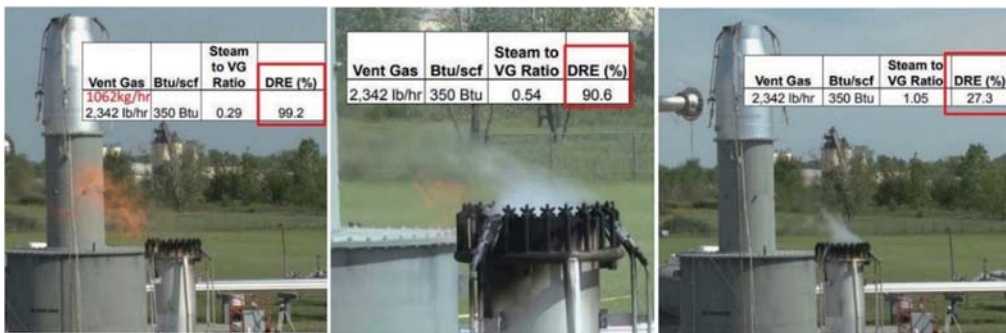


圖 2 相同熱值及流量下不同 S/VG 與 DRE 之關係 (TCEQ 2010 Flare Study)

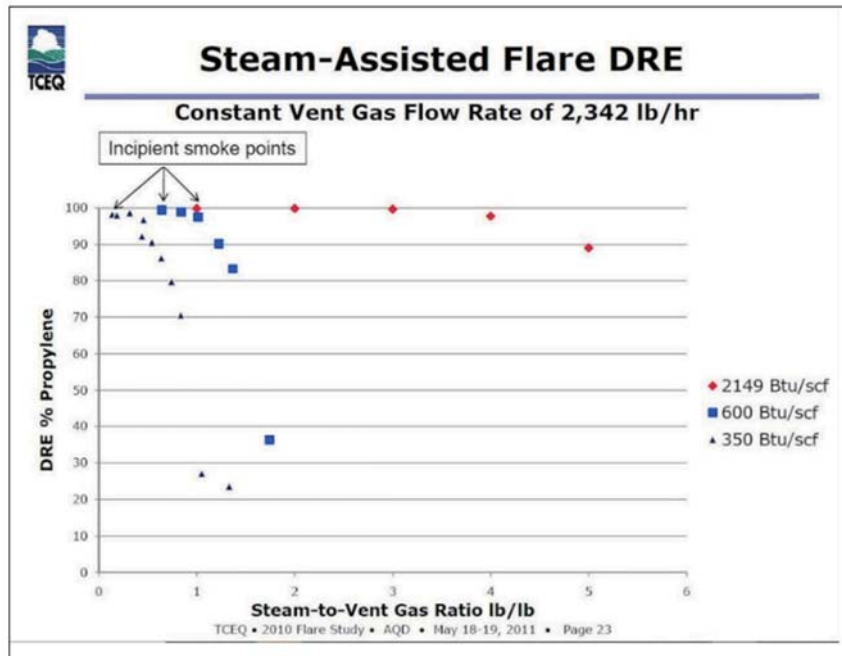


圖 3 相同流量下，不同熱值及 S/VG 與 DRE 之關係 (TCEQ 2010 Flare Study)

(2) 以相同流量，測試不同熱值及蒸氣 / 廢氣重量比與 DRE 變化關係

同樣以丙烯組成 3 種不同熱值，分別為 2,149 BTU/scf、600 BTU/scf 及 350 BTU/scf (相當於 80 MJ/m³、22 MJ/m³、11 MJ/m³) 之氣體，以不同 S/VG 輔助燃燒測試廢氣之 DRE。可得知於熱值 2,149 BTU/scf 時，蒸氣 / 廢氣重量比介於 1.0~3.0 時，DRE 皆為 99.9%，甚至在比例達 4.0 時，DRE 仍還有近 98%，結論顯示 S/VG 操作範圍，隨廢氣熱值呈正相關，如圖 3 所示。

(3) 其它研究結論

- A. 為了達成 98%DRE 之最佳操作點，是在接近燃燒塔起煙點 (ISP) 附近。
- B. 高熱值下，達成 98%DRE 之 S/VG 區間較寬，低熱值下，達成 98%DRE 之 S/VG 區間狹窄，尤其當 S/VG 過量使火焰消失，燃燒塔 DRE 不佳。
- C. 廢氣熱值 350 and 600 Btu/scf，S/VG 小於 1.1 可以達成 98%DRE。
- D. 廢氣熱值 2,149 Btu/scf，S/VG 小於 3.3 可以達成 98%DRE。
- E. 蒸氣注入點影響不同，由中心注入 (center steam) 在特定狀況下可能會導致 DRE 不佳。
- F. 對於蒸氣輔助和空氣輔助燃燒塔，廢氣成分 (丙烷與丙烯) 對燃燒特性的影響遠小於蒸氣或空氣量和廢氣熱值。

2. 美國埃克森美孚化學公司 (Flare Steam-Assist Optimization, 2012)

透過目視燃燒塔火焰狀況探討法規符合度，如圖 4。圖 4 左一為明顯黑煙狀況違反無煙燃燒規定；左二為起煙點 (ISP)，在符合法規下其所需的空氣或蒸氣量最少，可以兼顧無煙燃燒及最佳 DRE；左三至左五顯示 S/VG 增加之下，火焰變透明，其 DRE 會下降；右一為鼻煙點，為蒸氣煙流且看不到火焰，DRE 將顯著低於 98% 違反規定。



圖 4 不同 S/VG 之燃燒塔運行樣態 (Flare Steam-Assist Optimization, 2012)

8 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

以目前國內揮發性有機物空氣污染管制排放標準第 5 條規定，S/VG 應介於 15~50%，經查應是參考 API 521 訂定，似僅考量到低熱值狀況。圖 3 中不同熱值之 ISP、98%DRE 之 S/VG 區間皆不同，高熱值時 ISP 約為 1，而且 98%DRE 之區間，約為 1~3.3。

三、研究方法

參考 2010 年美國德州燃燒塔破壞效率實驗，在此實驗中，獲得了單一廢氣流量不同熱值及不同蒸氣廢氣重量比下之破壞去除率之實驗圖 (圖 3)，推導 S/VG 及 DRE 數值，如表 3 所示。此外藉由燃燒塔所屬工場之 DCS (圖 5)，紀錄案例廠使用廢氣燃燒塔時之蒸氣用量、廢氣流量及廢氣成分熱值，進一步推算廢氣之破壞去除率。

表 3 以圖 3 實驗圖推導其蒸氣 / 廢氣重量比及 DRE 數值

熱值 (BTU/FT ³)	蒸氣/廢氣 重量比	DRE(%)	熱值 (BTU/FT ³)	蒸氣/廢氣 重量比	DRE(%)	熱值 (BTU/FT ³)	蒸氣/廢氣 重量比	DRE(%)
2149	1	99.9	600	0.65	99.5	350	0.1	98
	2	99.9		0.85	99		0.3	98
	3	99.5		1	98		0.45	96
	4	98		1.25	90		0.55	90
	5	89		1.45	83		0.75	80
			1.75	36	0.85		70	
					1.1		27	

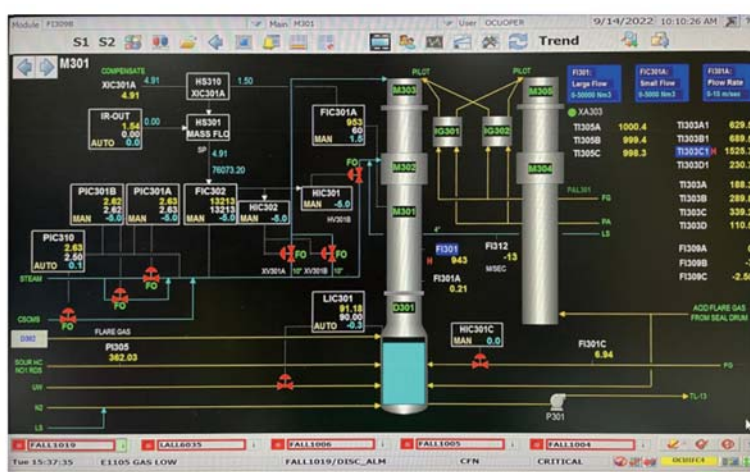


圖 5 廢氣燃燒塔 DCS 監控畫面

四、結果與討論

1. 廢氣物種分析頻率為 15 分鐘，蒸氣量的調整有時間誤差

一般氣相層析儀 (GC-MS) 分析週期為 15 分鐘，甚至更久，且低濃度的誤差值更大，一般石化產業中，煉油廠處理油品製造最前端之原油，除有熱值高的特質以外，也有物種變化大之特性，且案例廠的 GC-MS 量測頻率為 15 分鐘，是故 Flare 在這個時間所調整的蒸氣量是根據前 15 分鐘的廢氣重量所做的調整，蒸氣量的調整有 15 分鐘的誤差，因此在實場操作上，廢氣的流量及熱值 (物種分析) 是時刻在變化的，S/VG 無法精準的控制 在 15~50% 之間。

2. 維持蒸氣流量之必要性

在快速關閉蒸氣閥時，會引起可壓縮流體在管道中發生振蕩壓力衝擊。這種振蕩的壓力波動我們稱為蒸氣錘 (水錘) 現象，通常會在毫秒內發生，管道中可能產生劇烈振動和衝擊，導致設備損壞、破裂。

因此為維持系統穩定，平常無廢氣的情況下皆須保持一定流量之蒸氣，否則將導致蒸氣瞬間冷卻為水，堵塞管線，並在蒸氣再度開啟時，將可能導致燃燒塔噴出水柱，損害鄰近工廠之財務問題。

另外，燃燒塔是石化工廠緊急調節燃氣平衡之工安設備，廢氣流量是不可控的，工廠除了要確保 DRE 外，也要保證燃燒塔能無煙燃燒，避免因燃燒不完全產生黑煙，造成視覺污染，影響社會觀感。

3. 民國 100 年 VOCs 法規制定時空背景與現況之差異

民國 100 年是燃燒塔使用的重要分水嶺，在此之前，燃燒塔使用並未有法規約束及管理，石化製程的燃燒塔被經常的使用，因而導致似乎燃燒塔有火才表示工場有正常運作。當時石油在蒸餾、精煉、儲輸的過程中產生大量之油氣，大部分是藉由燃燒塔燃燒處理，因此在廢氣流量及蒸氣量可保持穩定排放之下，S/VG 達 15~50% 技術上是有其可行性。

10 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

直至民國 100 年，環保署公布揮發性有機物空氣污染管制及排放標準第二次修正法案，新增第 4 條：「公私場所正常操作下排放之廢氣，不得使用廢氣燃燒塔處理。」，以及該法第 7 條以廢氣燃燒塔使用計畫書，限制各工廠使用燃燒塔的頻率後，各家公私場所陸續在燃燒塔前端裝設燃料氣回收系統 (FGRS)，以胺洗或鹼洗的方式去除石化製程可燃氣體含硫份後，回收作為製程燃料使用，一方面可節省燃料，使用相對潔淨的能源，另一方面也能減少污染排放，消弭因燃燒不完全，所致視覺污染之負面觀感。

以案例廠為例，未加裝 FGRS 前，每日廢氣排放量約為 300~700 kNm³，然而在設置 FGRS 以後，在正常操作狀況下，廢氣排放量降為 0 kNm³，並且在工場開停車、緊急狀況及其他主管機關核可之使用情形下，才會使用到燃燒塔，因此廢氣排放量有明顯下降的趨勢，如圖 6 所示。

該廠在裝設 FGRS (於民國 104 年 9 月建置完成，10 月開始操作) 前，其中 1 座高空燃燒塔 104 年 9 月份平均廢氣流量為 111.3 kNm³/日，經廢氣人工採樣分析報告密度約為 0.93，換算其重量約為 89,027.7 公斤/日，其燃燒塔設計蒸氣使用量為 30,000 公斤/日，因此 S/VG 之平均為 33.7%，介於 15%~50% 之法規要求，顯然在民國 100 年前未加裝廢氣回收系統時，S/VG 較易符合現行法規。

該廠裝設 FGRS 後，除了能回收廢氣作為替代燃料，亦有減碳的效果。累計 104 年至 110 年循環使用的燃料氣量，以碳排放係數 (1.7565346531 噸 CO₂/kNm³) 計算，減碳量約有 495,690 噸 CO₂。(相當於 1,274 座大安森林公園碳吸附量)

承上所述，以現有的技術而言，廢氣的排放不再是連續性，而轉變是批次式排放，因此當燃氣系統壓力過大，燃料氣排放至燃燒塔處理時，廢氣流量會由 0 kNm³ 開始變化，而法規規定 S/VG 需介於 15~50%，已變成有其實務上的困難 (因為流量時刻在變化，而上游廢氣組成又一直在改變)。除此之外，原廠 John Zink 公司建議：「廢氣大量排放時，可能需要 200~300% 的 S/VG 來保持無煙燃燒。」，因此為因應未知廢氣成分，必須維持一定量之蒸氣量，無法以固定之 S/VG 去尋求高 DRE。

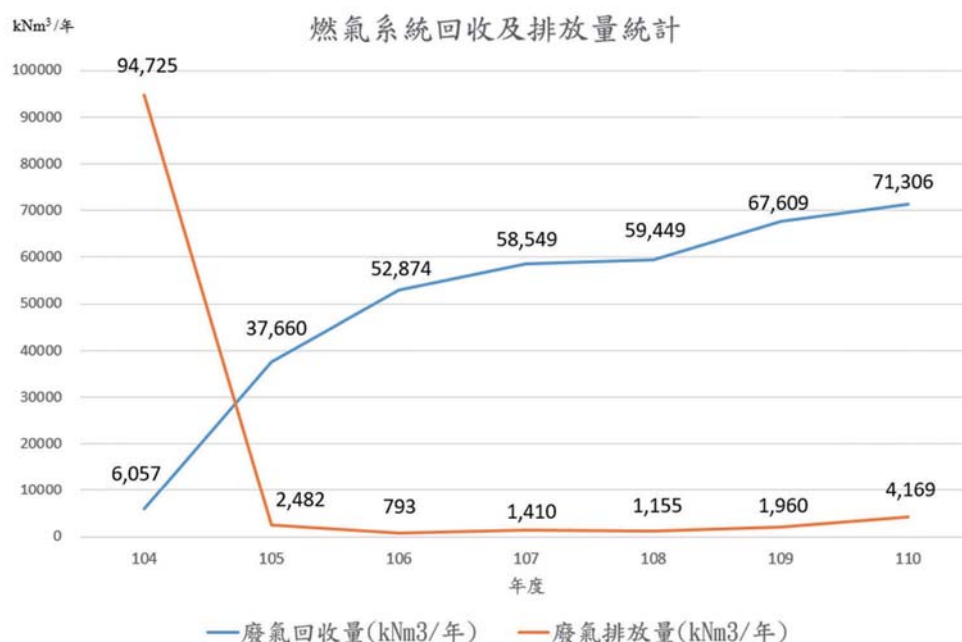


圖 6 案例廠裝設 FGRS 後廢氣回收及排放量

註：原彩圖請至產業綠色技術資訊網站下載 <https://proj.ftis.org.tw/eta/index.aspx>

4. 案例廠案例分析

111 年 4 月 22 至 111 年 4 月 23 日案例廠使用第三高空燃燒塔 (編號：A018) 處理廢氣 (由烯烴轉化工場管轄操作)，S/VG 超出法規 15%~50%，違反空污法第 23 條第 1 項，分析案例廠於該 2 日之廢氣熱值，維持在大約 2,100 BTU/scf (如表 4)。若以圖 3、2010 年德州破壞效率實驗之圖表，以內插法的方式帶入案例廠本次事件加以分析，可發現 DRE 大多數情況下皆達到 99.9%，僅有少數幾筆 15 分鐘數據會因廢氣流量瞬間驟降而低於 89%，如表 4。因此 S/VG 是必須依據廢氣熱值高低而定，方能保證 DRE 之效能良好。

12 燃燒塔蒸氣廢氣比合理操作區間檢討

表 4 案例廠 111 年 4 月 22 日至 111 年 4 月 23 日燃燒塔破壞移除率 (DRE)

時間	廢氣排放量 (Nm ³)	Waste gas 重量(kg)	蒸氣重量(kg)	熱值 (BTU/FT ³)	蒸氣/廢氣重量比(%)	DRE(%)
2022/04/22 20:15						
2022/04/22 20:30	0.000	0.00	1099.06	2072.06	∞	----
2022/04/22 20:45	0.000	0.00	1124.43	2062.37	∞	----
2022/04/22 21:00	0.000	0.00	1061.74	2061.69	∞	----
2022/04/22 21:15	0.000	0.00	1164.37	2029.08	∞	----
2022/04/22 21:30	0.000	0.00	1108.08	2000.42	∞	----
2022/04/22 21:45	0.000	0.00	1129.98	2004.75	∞	----
2022/04/22 22:00	0.000	0.00	1118.34	2033.18	∞	----
2022/04/22 22:15	0.000	0.00	1100.99	2033.18	∞	----
2022/04/22 22:30	0.000	0.00	1092.21	1990.42	∞	----
2022/04/22 22:45	0.000	0.00	1085.78	1974.78	∞	----
2022/04/22 23:00	6649.707	12412.86	1073.06	2016.62	8.64	99.9
2022/04/22 23:15	4184.470	7996.28	1050.86	2100.76	13.14	99.9
2022/04/22 23:30	4055.497	7749.03	1024.89	2100.76	13.23	99.9
2022/04/22 23:45	3648.399	7072.67	1053.35	2111.90	14.89	99.9
2022/04/23 00:00	629.416	1222.85	1047.15	2112.72	85.63	99.9
2022/04/23 00:15	560.616	1089.04	1044.19	2108.10	95.88	99.9
2022/04/23 00:30	0.000	0.00	1073.38	2102.80	∞	----
2022/04/23 00:45	137.778	267.66	1053.43	2104.74	393.57	99.5
2022/04/23 01:00	477.831	933.03	1085.50	2132.37	116.34	99.9
2022/04/23 01:15	492.044	961.21	1087.63	2132.37	113.15	99.9
2022/04/23 01:30	2473.508	4839.00	1059.89	2132.37	21.90	99.9
2022/04/23 01:45	1740.489	3417.36	1116.22	2132.68	32.66	99.9
2022/04/23 02:00	1089.492	2145.77	1074.91	2148.15	50.09	99.9
2022/04/23 02:15	178.844	354.28	1088.12	2178.90	307.14	99.5
2022/04/23 02:30	28.152	55.80	1071.85	2178.90	1920.92	<89.0
2022/04/23 02:45	1028.519	2039.67	1095.86	2155.22	53.73	99.9
2022/04/23 03:00	1954.549	3871.88	1101.30	2151.54	28.44	99.9
2022/04/23 03:15	1604.730	3120.32	1066.25	2095.91	34.17	99.9
2022/04/23 03:30	996.467	1897.25	1063.05	2032.03	56.03	99.9
2022/04/23 03:45	25.573	48.56	1056.91	2036.94	2176.42	<89.0
2022/04/23 04:00	0.000	0.00	1092.80	2106.98	∞	----
2022/04/23 04:15	88.443	171.65	1040.27	2106.98	606.04	<89.0
2022/04/23 04:30	271.923	528.05	1078.74	2106.98	204.29	99.9
2022/04/23 04:45	279.737	544.15	1080.00	2107.02	198.48	99.9
2022/04/23 05:00	590.551	1152.26	1077.55	2120.71	93.52	99.9
2022/04/23 05:15	790.781	1550.44	1052.82	2157.11	67.90	99.9
2022/04/23 05:30	556.960	1091.71	1060.39	2157.11	97.13	99.9
2022/04/23 05:45	404.533	785.45	1087.70	2087.99	138.48	99.9
2022/04/23 06:00	553.632	1069.04	1075.30	2077.25	100.59	99.9
2022/04/23 06:15	1362.266	2633.05	1077.34	2087.05	40.92	99.9
2022/04/23 06:30	852.275	1649.35	1070.88	2098.30	64.93	99.9
2022/04/23 06:45	1177.248	2279.66	1048.64	2101.91	46.00	99.9
2022/04/23 07:00	764.006	1495.61	1080.81	2153.43	72.27	99.9
2022/04/23 07:15	976.332	1911.74	1101.44	2153.43	57.61	99.9
2022/04/23 07:30	0.000	0.00	1115.44	2169.94	∞	----
2022/04/23 07:45	0.000	0.00	1044.11	2178.24	∞	----
2022/04/23 08:00	0.000	0.00	1116.39	2181.40	∞	----
2022/04/23 08:15	0.000	0.00	1101.16	2190.12	∞	----

表 4 案例廠 111 年 4 月 22 日至 111 年 4 月 23 日燃燒塔破壞移除率 (DRE)(續)

2022/04/23 08:30	726.971	1468.60	1109.61	2201.96	75.56	99.9
2022/04/23 08:45	327.159	653.42	1096.09	2190.30	167.75	99.9
2022/04/23 09:00	1390.694	2778.52	1119.34	2190.28	40.29	99.9
2022/04/23 09:15	791.289	1576.77	1110.27	2181.00	70.41	99.9
2022/04/23 09:30	462.463	924.64	1108.94	2178.06	119.93	99.9
2022/04/23 09:45	168.627	338.01	1067.71	2183.16	315.88	99.5
2022/04/23 10:00	48.126	96.47	1104.79	2222.97	1145.24	<89.0
2022/04/23 10:15	0.000	0.00	1106.44	2222.97	∞	----
2022/04/23 10:30	0.000	0.00	1098.61	2138.41	∞	----
2022/04/23 10:45	0.000	0.00	1106.21	2107.47	∞	----
2022/04/23 11:00	0.000	0.00	1051.97	2120.37	∞	----

五、結論與建議

高熱值下 S/VG 即使達到 300%，仍可維持 98% 以上之削減率，因此 S/VG 應考量廢氣熱值較高而放寬重量比操作區間。常態廢氣經由 FGRS 回收淨化為燃料使用而無排放下，仍需維持少量蒸氣量，以避免發生蒸氣錘作用外，也要保證在緊急狀況使用燃燒塔時，能達到無煙燃燒。因而在廢氣排放初期，蒸氣量超出 S/VG 難以避免。另因 GC-MS 所監測之物種是來自前 15 分鐘之廢氣，蒸氣量的調整有 15 分鐘的誤差，而廢氣的流量及熱值是時刻在變化的，因此蒸氣量是不可能及時趕上廢氣量的變化。所以適度放寬 S/VG，應可兼顧 DRE 及業者操作之彈性。

此外，未來仍需朝蒸氣廢氣比最佳化操作、及持續廢氣減量來精進。最佳化操作方面，經向原廠 John Zink 尋求解決方法，原廠提供其開發的 1 種 SmokePROOF 控制系統，該系統利用雙波長無煙火炬監測傳感器，直接監測火焰燃燒情形。通過測量火焰底部的碳和氧原子輻射特定波長，即時反饋系統信號，連續監測火焰狀況並直接向蒸氣控制閥與鼓風機提供流量控制信號，以達到接近起煙點 (ISP) 操作。不過此技術要發生黑煙後才能回饋調整蒸氣用量，仍有落後控制及違反現行法規之風險。

持續廢氣減量方面，將朝向不斷精進排氣管理；如計畫性開停爐減排技術，在大修前會召開大修設備及管線吹驅管理討論會議，排定各工場依順序進行吹驅，避免瞬間大量排放而回收不及產生大火及黑煙。此外，落實執行關鍵性設備及機械自動檢查、定期維護，並在歲修期間汰換老舊設備，提升設備妥善率，降低設備故障緊急停俾之狀況，連帶降低燃燒塔使用頻率。

參考文獻

API 521 (2007): PRESSURE RELIEVING AND DE-PRESSURING SYSTEMS

US EPA (2012), EPA Enforcement Targets Flaring Efficiency Violations,

<https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/flaringviolations.pdf>

John Zink Company, LLC (2021), SmokePROOF- Automated Smoke Control,

<https://www.johnzinkhamworthy.com/>

AQMD (2017), Control of Emissions from Refinery Flares,

<https://www.aqmd.gov/home/rules-compliance/compliance/r1118>

US EPA (2018), Requirements for flare control devices, 40 Code of Federal Regulations,

Part 63 Subpart CC, §63.670.

US EPA, Consent Decree: Marathon Petroleum Company LP, and Catlettsburg Refining,

LLC. <https://www.epa.gov/enforcement/consent-decree-marathon-petroleum-company-lp-and-catlettsburg-refining-llc>

US EPA, Consent Decree: BP Products North America Inc.

<https://www.epa.gov/enforcement/consent-decree-bp-products-north-america-inc>

TCEQ (2011), 2010 Flare Study Final Report.

https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OAR-2012-0133-0047/attachment_32.pdf

Judy M. Bigon (2012), Flare Steam-Assist Optimization, ExxonMobil Downstream/

Chemicals SSH&E.

<https://la-awma.org/wp-content/uploads/2017/10/2012-5-3.pdf>