



燃燒與高溫脈衝波反應器PDR技術
COMBUSTION & PDR TECHNOLOGY

張榮興/豐映科技股份有限公司

COMBUSTION 燃燒



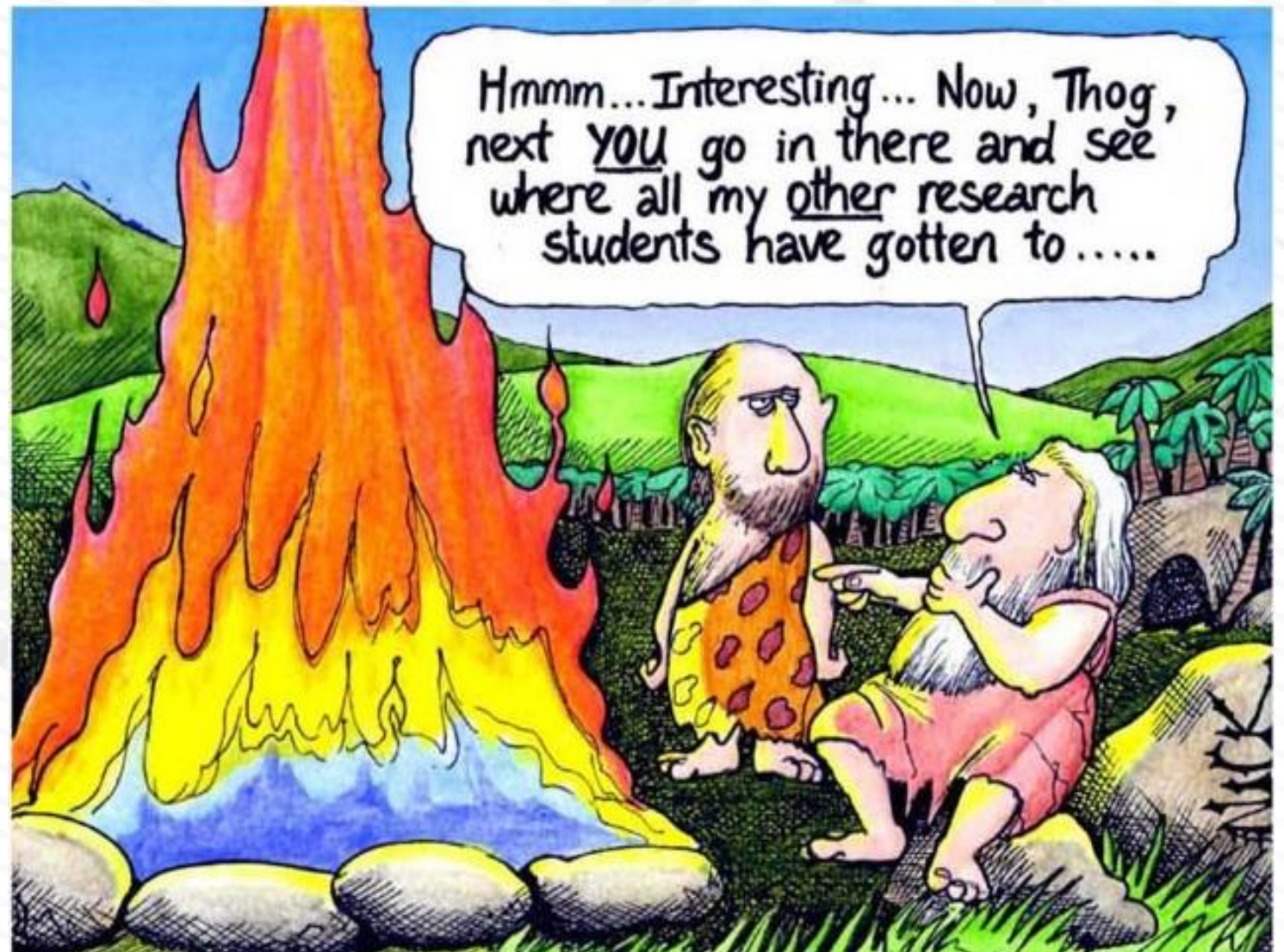
密西根大學的 George Granger Brown 於1928年舉行的第一屆燃燒研討會—

燃燒是人類進化過程中最重要的化學反應。

人類與動物都仰賴燃燒提供維生所需要的能源。

由洪荒而文明，人類最明顯的成長即來自於對燃燒或火焰的控制；

展望未來，人類的進步仍將或多或少仰賴更先進更有效率的燃燒控制。



VOC處理--我們該關心什麼？

- 可控制的燃燒 VS 失控的燃燒
- 如何避免發生意外？
- 如何有效處理？
- 如何避免二次污染？
- 如何降低處理成本？

介紹與討論範圍：

- 燃燒基本安全知識
- 燃燒理論
- 高濃度VOC廢氣處理技術



COMBUSTION & PDR TECHNOLOGY

燃燒基本知識

Definitions 定義



➤ Deflagration 燃燒

- a flame spread rate of less than the speed of sound.
(subsonic) 低於音速的火焰傳遞

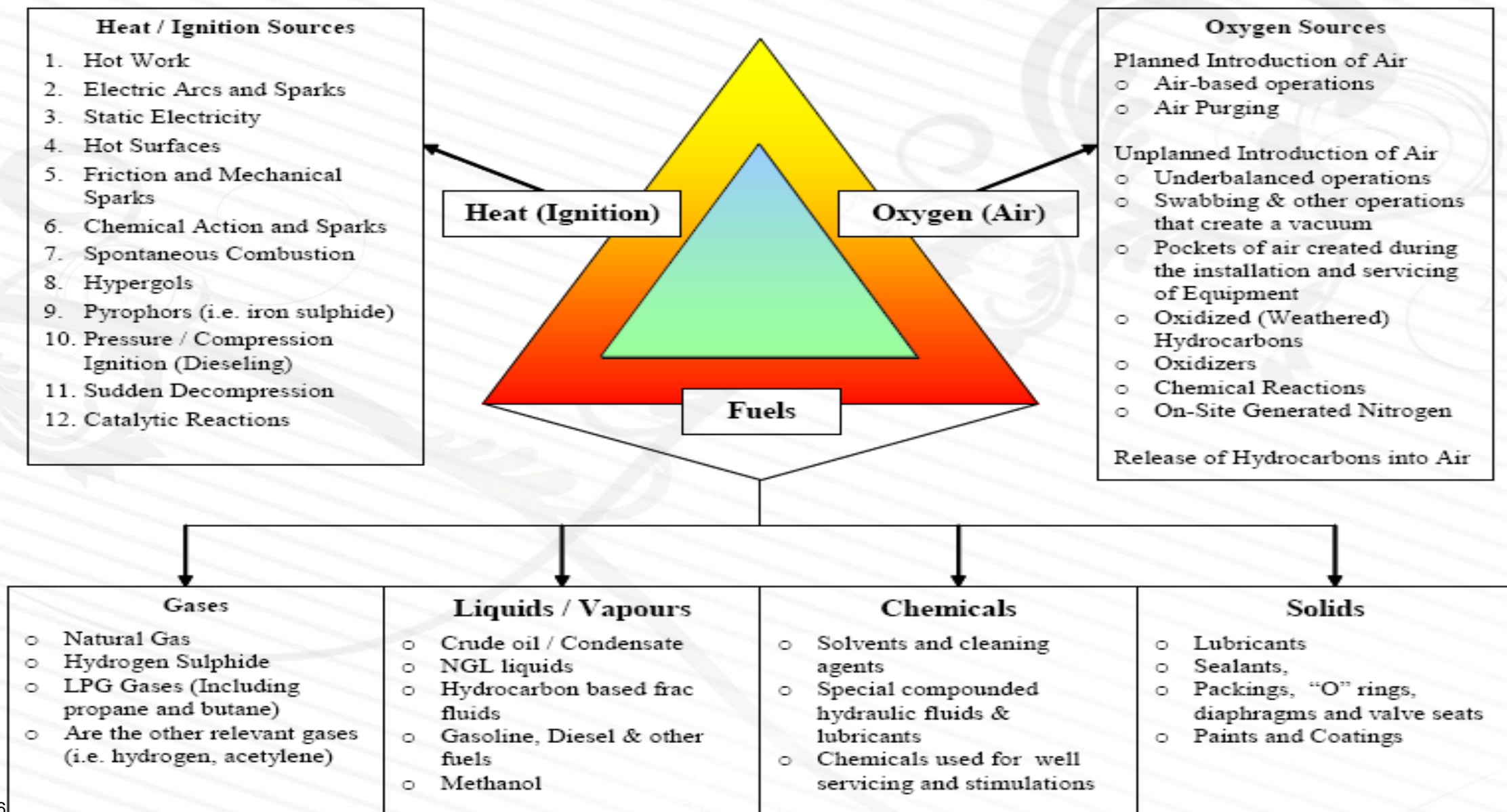
➤ Explosion 爆炸

- a rapid release of high pressure gas into the environment.
- 高壓氣體快速釋放到環境

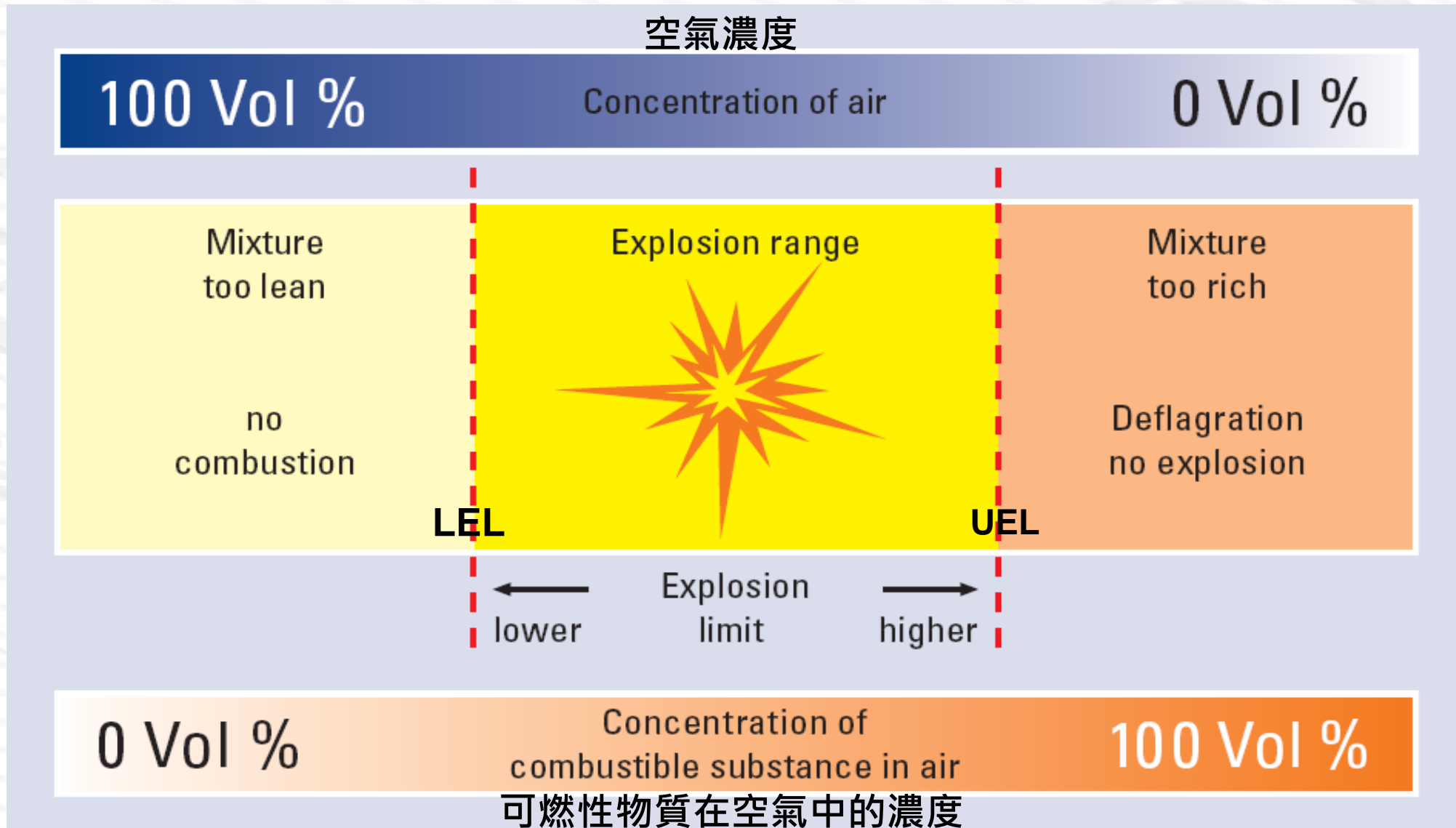
➤ Detonation 爆轟

- a flame spread rate that is above the speed of sound.
(supersonic) 倍音速的火焰傳遞

The Fire Triangle 燃燒三要素



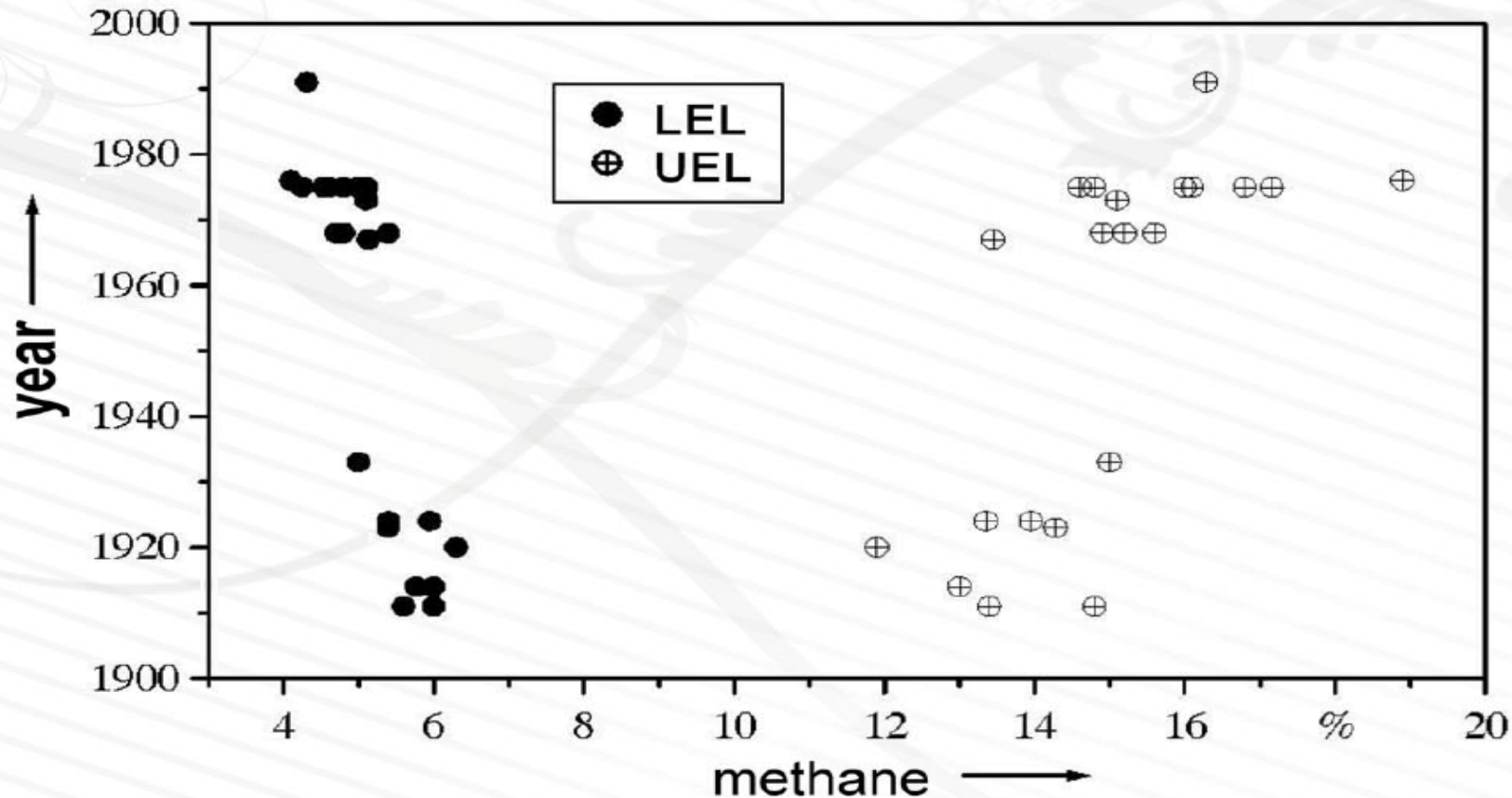
Explosion Limits 爆炸範圍



History of methane explosion limits



- First reported explosion limits of methane by Davy (1816, 100 cm³ narrow necked bottle, top ignition via candle flame):
- LEL = 6.2 (burning without explosion) LEL = 6.7 (diminished violence) UEL = 14.3

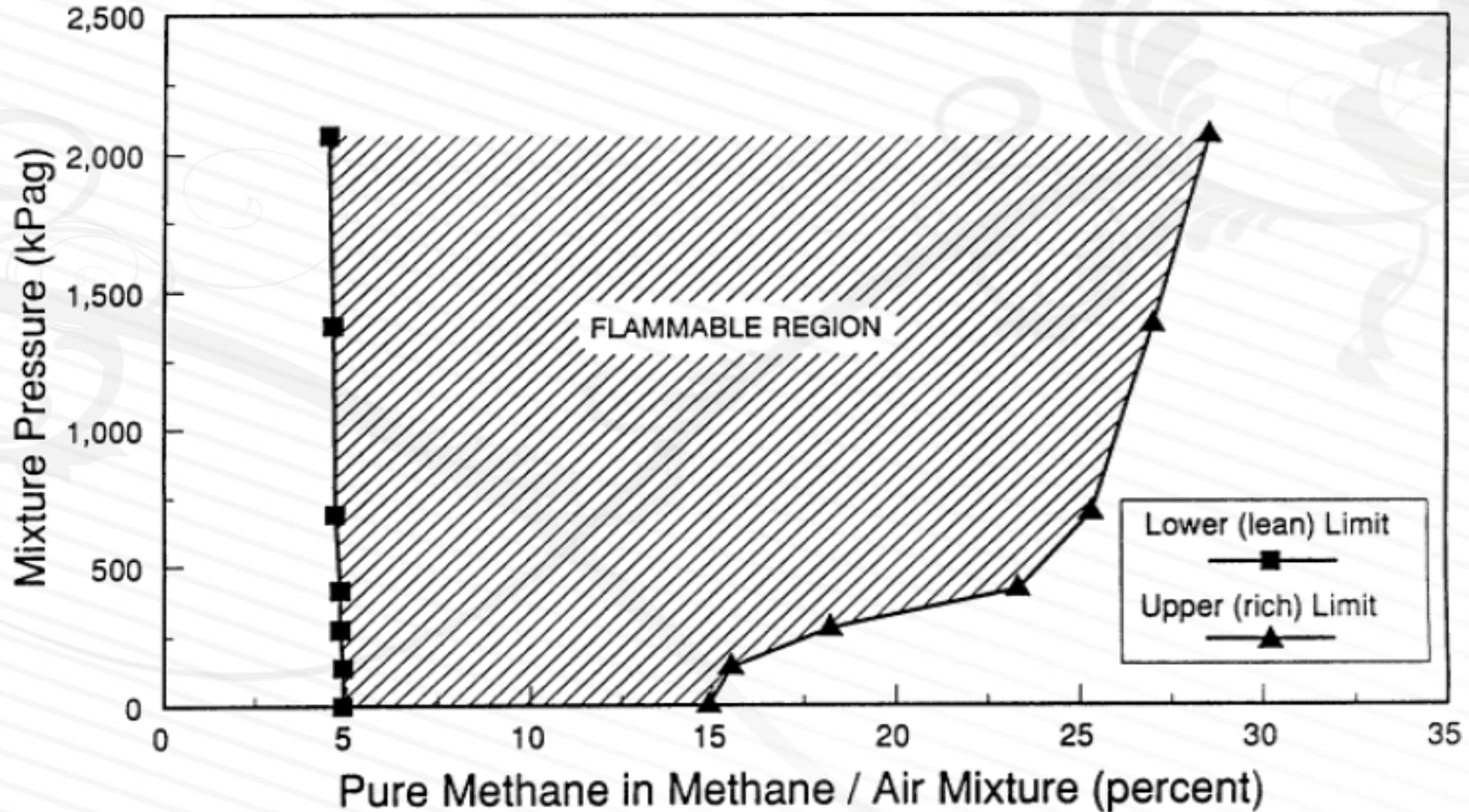


Explosion Limits of Selected Gases and Vapors

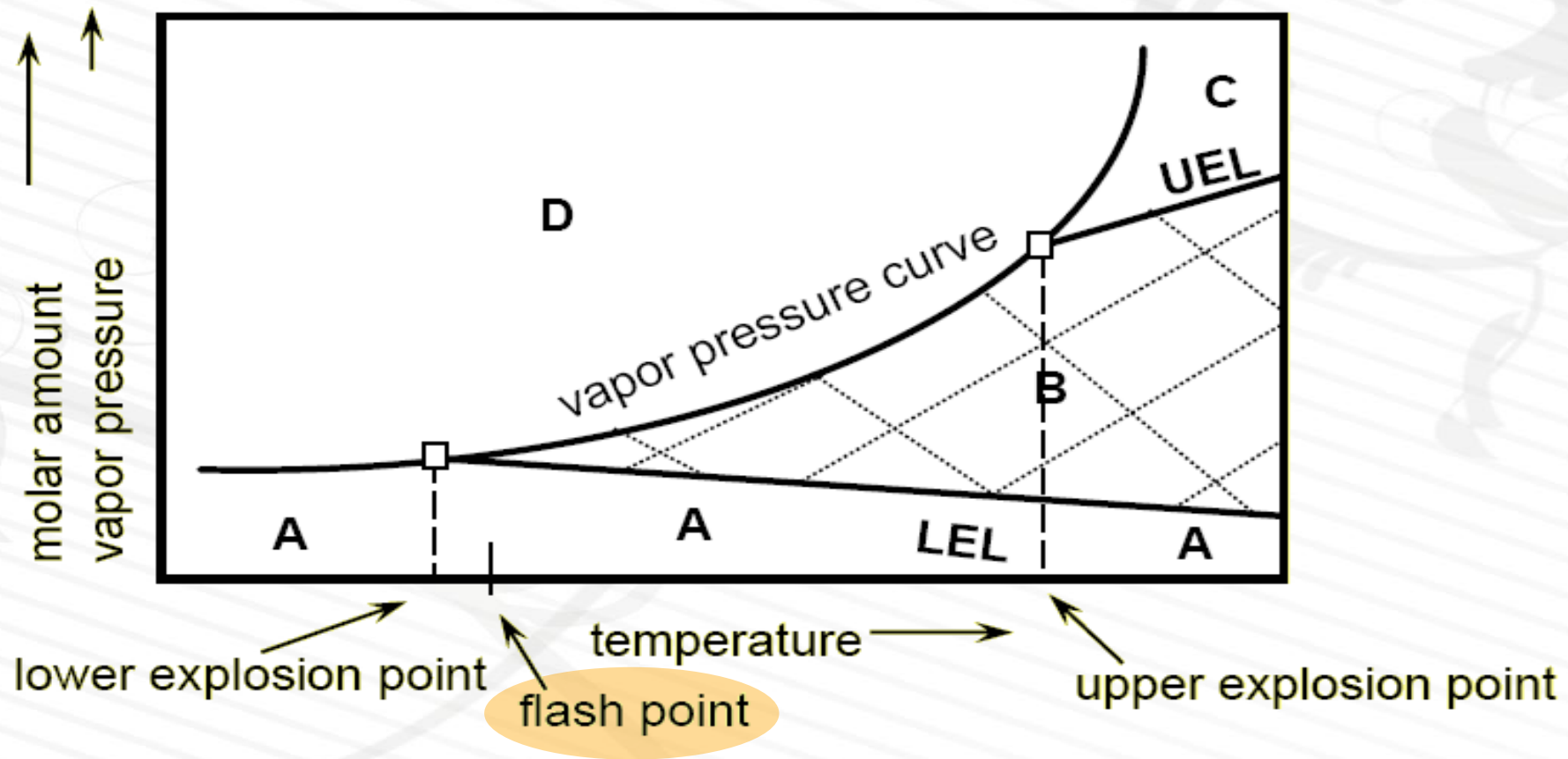


Substance designation	Lower explosion limit [Vol. %]	Upper explosion limit [Vol. %]
Acetylene	2,3	100 (self-decomposing!)
Ethylene	2,4	32,6
Gasoline	~ 0,6	~ 8
Benzol	1,2	8
Heating oil/diesel	~ 0,6	~6,5
Methane	4,4	17
Propane	1,7	10,8
Carbon disulphide	0,6	60,0
Hydrogen	4,0	77,0

Flammable Region



Explosion point, Flash point



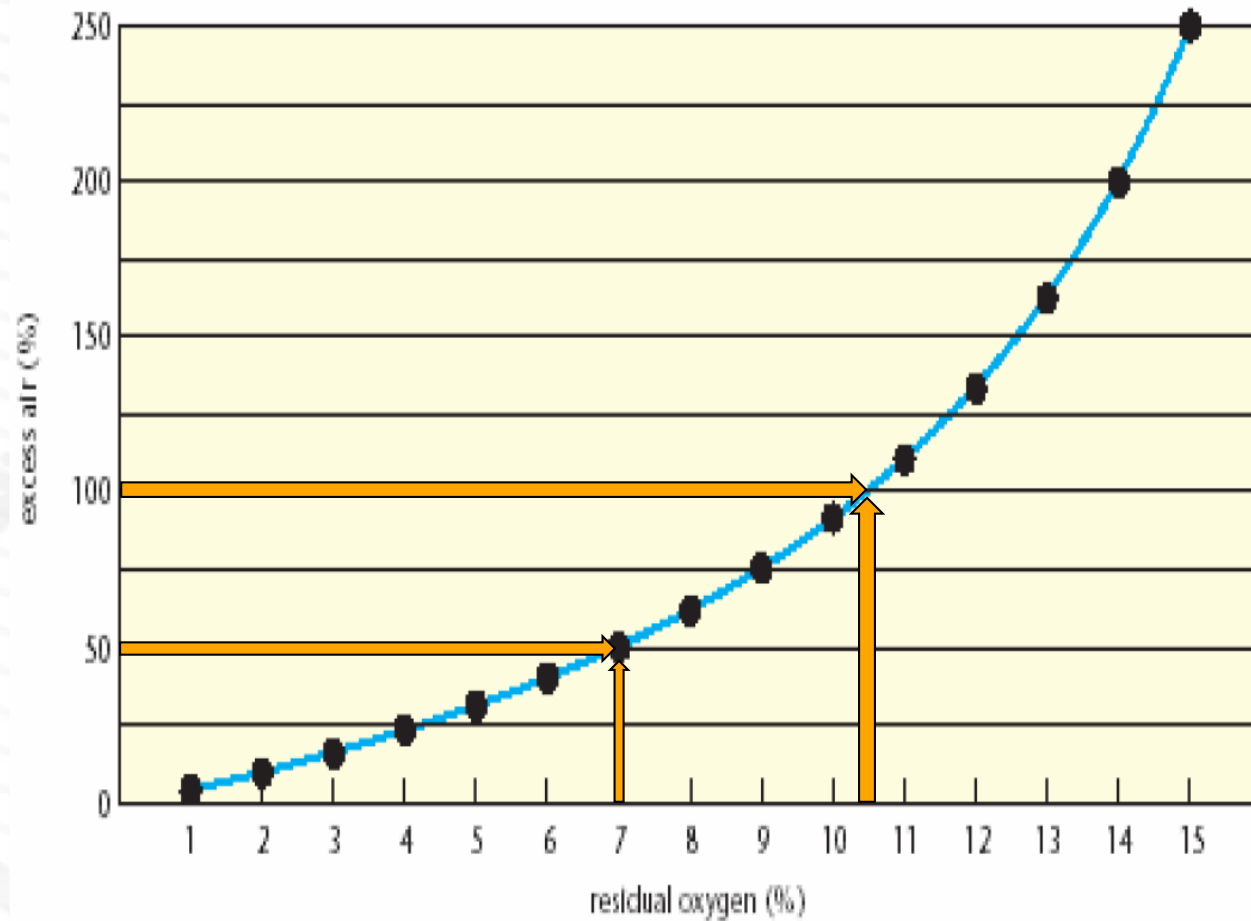
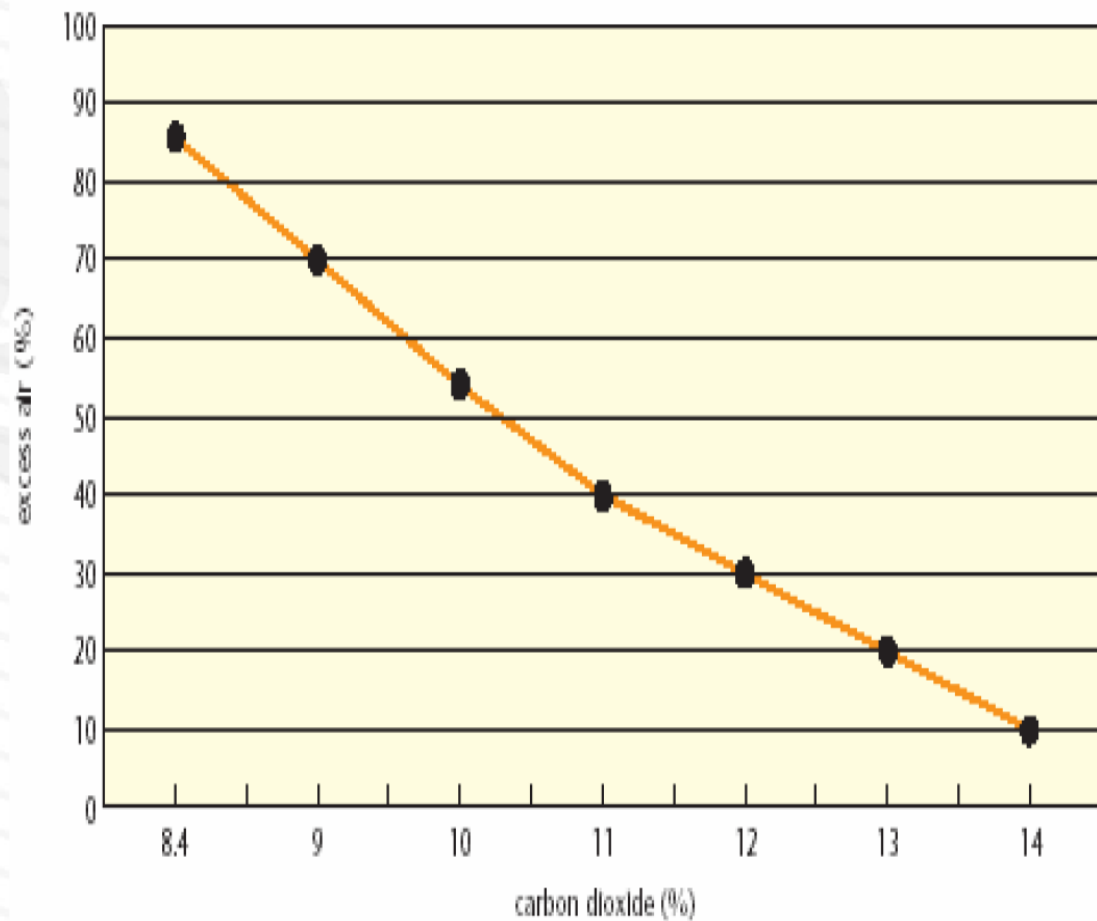
A = not explosive (to lean)

 B = **explosive**

C = not explosive (to rich)

D = hybrid mixtures possible

O2與CO2



Flame propagation in explosive atmospheres



- If a combustible mixture can be ignited, the question arises how the explosion can propagate under given conditions.
- The following characteristics describe the reaction propagation:
 - Detonation limits 爆炸濃度範圍
 - Propagation speed of deflagrations 燃燒傳播速度
 - Maximum experimental safe gap. 最大試驗安全間隙



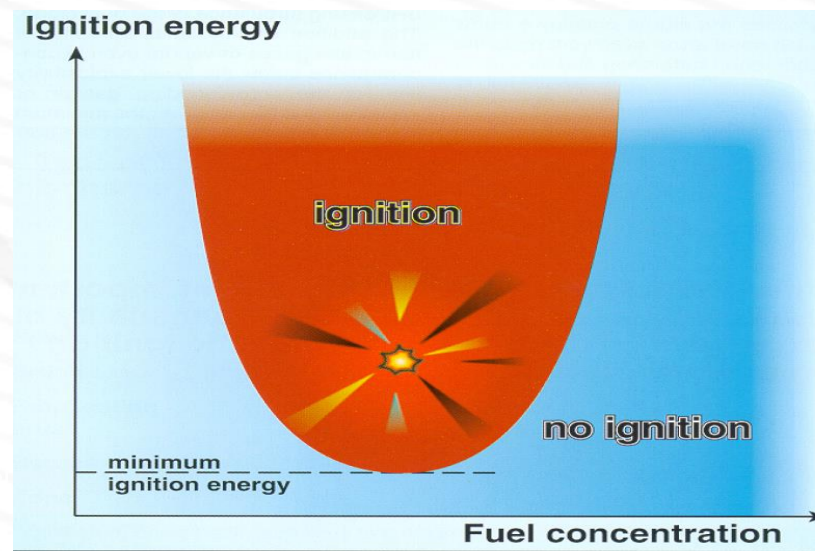
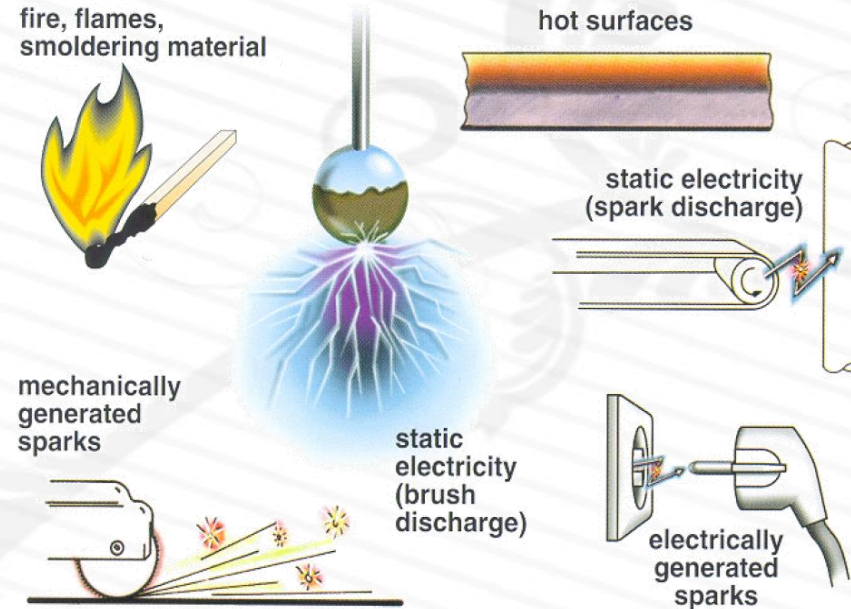
Basic principles of explosion protection

Preventing the formation of an explosive atmosphere

Avoidance of the ignition of an explosive atmosphere

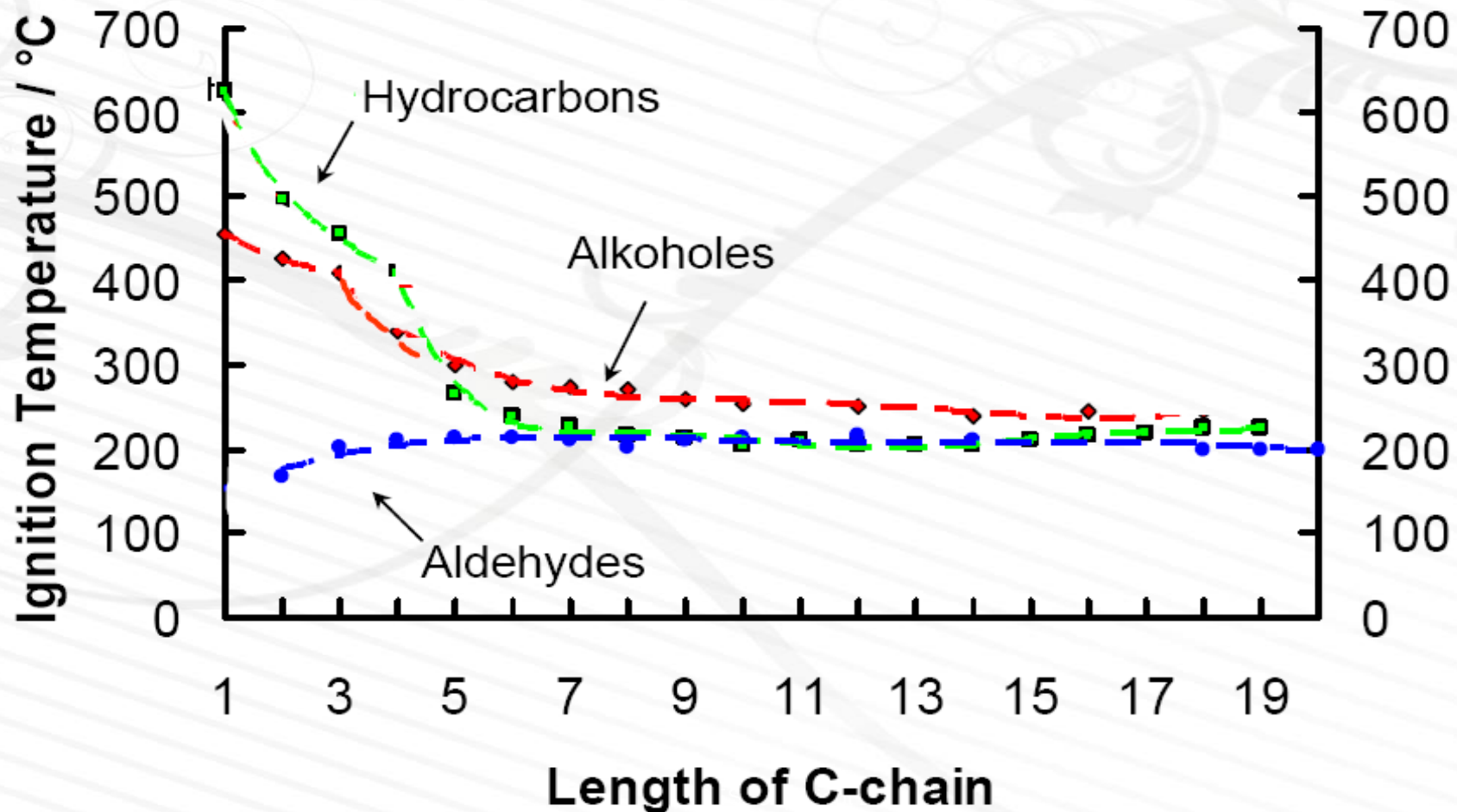
Mitigation of the effects of an explosion to an acceptable extent

Examples of possible ignition sources



Ignition of explosive atmospheres

- Ignition process is strongly dependent on the reaction mechanism!
- Variation of auto-ignition temperature with C-chain length



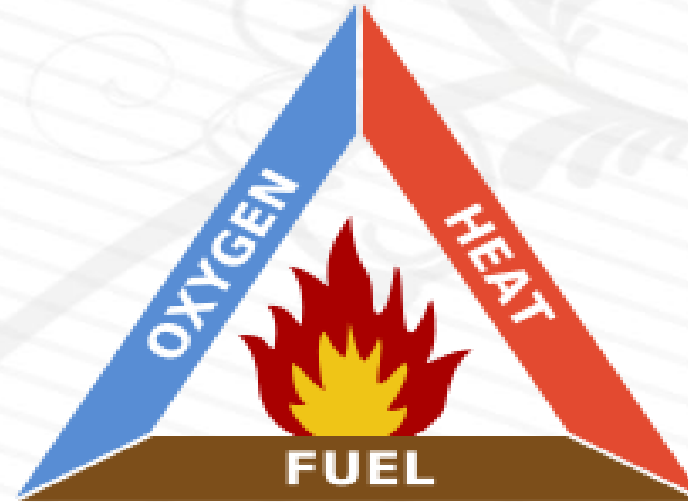
Solvent Tank Explosion



燃燒化學反應

- $C_m H_n + (m+n/4) O_2 = mCO_2 + n/2 H_2O$
- $S + O_2 = SO_2$
- $SO_2 + 1/2 O_2 = SO_3$
- $Cl + 1/2 H_2 = HCl$

- $N_2 + O = NO + N$
- $N + O_2 = NO + O$
- $N + OH = NO + H$
- $NO + 1/2 O_2 = NO_2$



燃燒可用化學反應表達



$$R_a = A * e^{-E/RT} C_A C_B$$

Rate Coefficient:

$$k = A T^B \exp(-C/RT)$$

Equilibrium Constant:

$$K = D T^E \exp(-F/T)$$

No	Reaction	A	B	C/(K)
1	$N_2 + O \leftrightarrow N + NO$	2.6×10^{14}	0.0	38390
2	$N + O_2 \leftrightarrow NO + O$	6.4×10^9	1.0	3162
3	$N + OH \leftrightarrow H + NO$	6.3×10^{11}	0.5	0.0
4	$NO + HO_2 \leftrightarrow NO_2 + OH$	1.4×10^{15}	0.0	705
5	$NO + O + N_2 \leftrightarrow NO_2 + N_2$	1×10^{17}	0.0	0.0
6	$N_2O + O \leftrightarrow NO + NO$	7.1×10^{14}	0.0	14100
7	$N_2 + O + N_2 \leftrightarrow N_2O + N_2$	5.5×10^{13}	0.0	10770
8	$NO_2 + O \leftrightarrow NO + O_2$	5.8×10^{10}	0.5	0.0
9	$N_2O + H \leftrightarrow N_2 + OH$	7.6×10^{13}	0.0	7654
10	$CH_2 + OH \leftrightarrow CH + H_2O$	4.47×10^{13}	0.0	1511
11	$CH_2 + NO \leftrightarrow HCN + OH$	1.39×10^{12}	0.0	-554
12	$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$	4.4×10^{12}	0.0	11060
13	$CH + O_2 \leftrightarrow O + CHO$	3.3×10^{13}	0.0	0.0
14	$CH + OH \leftrightarrow CHO + H$	3.0×10^{13}	0.0	0.0
15	$HCN + O \leftrightarrow CN + OH$	2.7×10^9	1.58	13394
16	$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O$	4.36×10^{12}	0.0	45171
17	$CN + OH \leftrightarrow NCO + H$	6.0×10^{13}	0.0	0.0
18	$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO$	5.6×10^{12}	0.0	0.0
19	$NCO + OH \leftrightarrow NO + CO + H$	10^{13}	0.0	0.0
20	$NCO + NO \leftrightarrow N_2O + CO$	10^{13}	0.0	-196

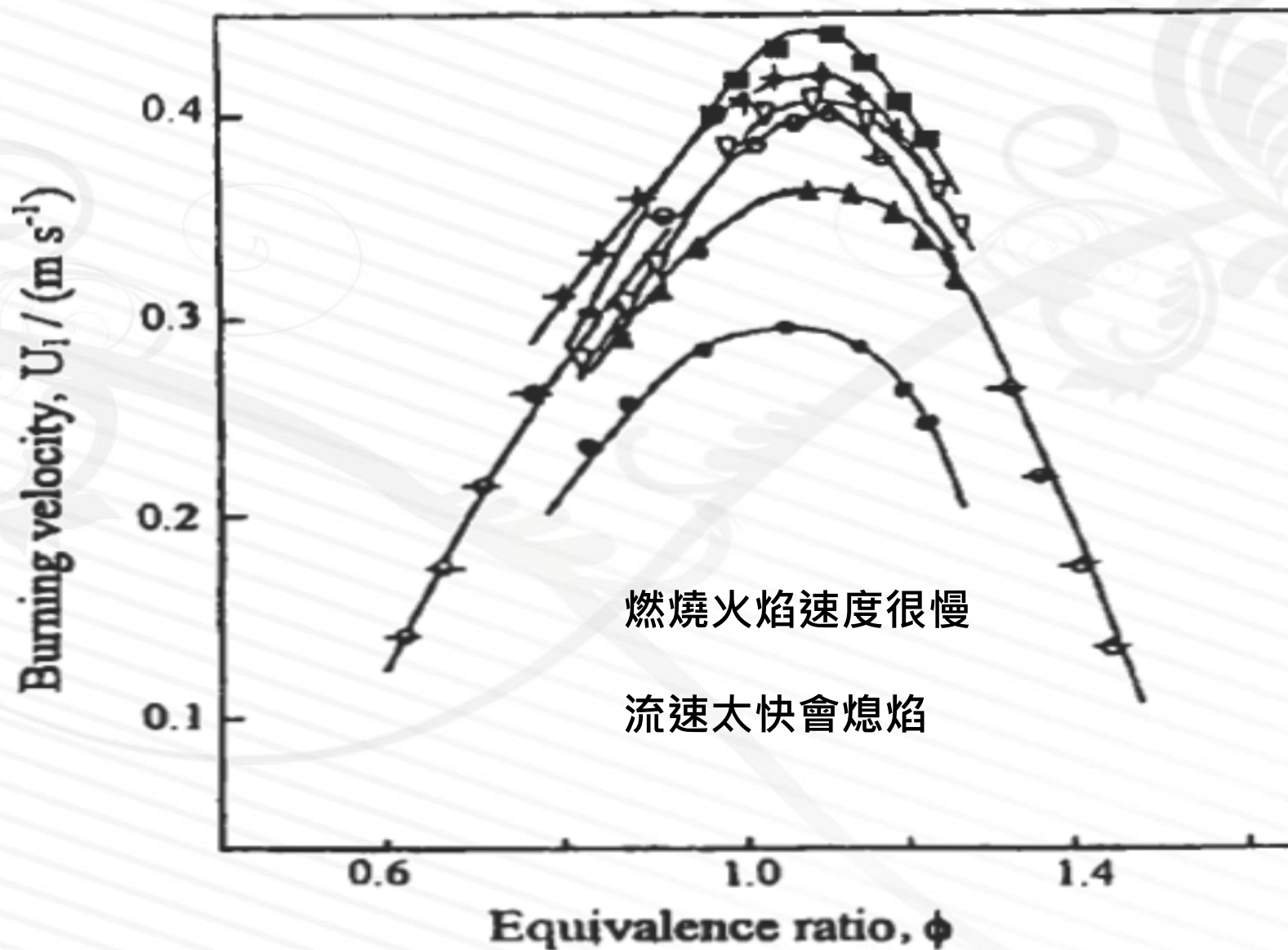
No	Reaction	Ref	A	B	C/(K)	D	E	F/(K)
1	$\text{OH}+\text{H}_2\leftrightarrow\text{H}_2\text{O}+\text{H}$	137	1.10×10^9	1.3	1825	0.21	0.0	-7640
2	$\text{H}+\text{O}_2\leftrightarrow\text{OH}+\text{O}$	97,98	1.80×10^{14}	0.0	8450			
3	$\text{O}+\text{H}_2\leftrightarrow\text{OH}+\text{H}$	137	1.80×10^5	2.5	3300			
4	$\text{H}+\text{O}_2+\text{H}_2\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{H}_2$	137	2.80×10^{18}	-0.86	0.0	0.745	0.0	-2338
	$\text{H}+\text{O}_2+\text{N}_2\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{N}_2$		3.75×10^{20}	-1.72	0.0			
	$\text{H}+\text{O}_2+\text{O}_2\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{O}_2$		3.00×10^{20}	-1.72	0.0			
	$\text{H}+\text{O}_2+\text{H}_2\text{O}\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{H}_2\text{O}$		9.40×10^{18}	-0.76	0.0			
	$\text{H}+\text{O}_2+\text{CO}\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{CO}$		2.10×10^{18}	-0.86	0.0			
	$\text{H}+\text{O}_2+\text{CO}_2\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{CO}_2$		4.10×10^{18}	-0.86	0.0			
	$\text{H}+\text{O}_2+\text{CH}_4\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{CH}_4$		5.60×10^{18}	-0.86	0.0			
5	$\text{H}+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{OH}+\text{OH}$	137	2.20×10^{14}	0.0	710			
6	$\text{H}+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{O}+\text{H}_2\text{O}$	137	5.0×10^{12}	0.0	710			
7	$\text{H}+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{H}_2+\text{O}_2$	137	2.16×10^{13}	0.0	280			
8	$\text{OH}+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2$	137	1.80×10^{13}	0.0	0.0			
9	$\text{O}+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{OH}+\text{O}_2$	137	2.00×10^{13}	0.0	0.0			
10 ^a	$\text{H}+\text{H}+\text{H}_2\leftrightarrow\text{H}_2+\text{H}_2$	137	9.20×10^{16}	-0.60	0.0	0.24	0.0	-5259
	$\text{H}+\text{H}+\text{N}_2\leftrightarrow\text{H}_2+\text{N}_2$		1.00×10^{18}	-1.00	0.0			
	$\text{H}+\text{H}+\text{O}_2\leftrightarrow\text{H}_2+\text{O}_2$		1.00×10^{18}	-1.00	0.0			
	$\text{H}+\text{H}+\text{H}_2\text{O}\leftrightarrow\text{H}_2+\text{H}_2\text{O}$		6.00×10^{19}	-1.25	0.0			
	$\text{H}+\text{H}+\text{CO}\leftrightarrow\text{H}_2+\text{CO}$		1.00×10^{18}	-1.00	0.0			
	$\text{H}+\text{H}+\text{CO}_2\leftrightarrow\text{H}_2+\text{CO}_2$		5.49×10^{20}	-2.00	0.0			
	$\text{H}+\text{H}+\text{CH}_4\leftrightarrow\text{H}_2+\text{CH}_4$		5.49×10^{20}	-2.00	0.0			
11	$\text{H}+\text{OH}+\text{M}\leftrightarrow\text{H}_2\text{O}+\text{M};$ $\text{M}=\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{CO}_2,$ $\text{M}=\text{H}_2\text{O}$	137	1.60×10^{22}	-2.00	0.0			
			8.00×10^{22}	-2.00	0.0			
12	$\text{H}+\text{O}+\text{M}\leftrightarrow\text{OH}+\text{M};$ $\text{M}=\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{CO}_2,$ $\text{M}=\text{H}_2\text{O}$	137	6.20×10^{16}	-0.60	0.0			
			3.10×10^{17}	-0.60	0.0			
13	$\text{OH}+\text{OH}\leftrightarrow\text{O}+\text{H}_2\text{O}$	137	$e(27+1.5$ $\times 10^{-3T})$					
14	$\text{OH}+\text{CO}\leftrightarrow\text{CO}_2+\text{H}$	137	1.50×10^7	1.3	-385	3.8×10^{-7}	1.2	-13067
15 ^b	$\text{O}+\text{CO}+\text{M}\leftrightarrow\text{CO}_2+\text{M};$ $\text{M}=\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{CO}_2,$ $\text{CH}_4 \& \text{H}_2\text{O}$	137	5.40×10^{15}	0.0	2300			
16 ^c	$\text{H}+\text{CO}+\text{M}\leftrightarrow\text{CHO}+\text{M};$ $\text{M}=\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{CO}_2,$ $\text{CH}_4 \& \text{H}_2\text{O}$	137	5.00×10^{14}	0.0	755	1.7	0.0	-7080
17	$\text{CHO}+\text{O}_2\leftrightarrow\text{HO}_2+\text{CO}$	137	3.3×10^{13}	-0.4	0.0			
18	$\text{CHO}+\text{H}\leftrightarrow\text{H}_2+\text{CO}$	-	1.2×10^{14}	0.0	0.0			
19	$\text{CHO}+\text{OH}\leftrightarrow\text{CO}+\text{H}_2\text{O}$	137	1.0×10^{14}	0.0	0.0			
20	$\text{CHO}+\text{O}\leftrightarrow\text{OH}+\text{CO}$	-	3.0×10^{13}					
21	$\text{CH}_2\text{O}+\text{H}\leftrightarrow\text{CHO}+\text{H}_2$	137	1.0×10^4	3.0	700	10.6	0.0	-7778
22	$\text{CH}_2\text{O}+\text{OH}\leftrightarrow\text{CHO}+\text{H}_2\text{O}$	137	3.0×10^{13}	0.0	600			
23	$\text{CH}_2\text{O}+\text{O}\leftrightarrow\text{CHO}+\text{OH}$	137	1.8×10^{13}	0.0	1540			

No.	Reaction	Ref.	A	B	C/(K)	D	E	F/(K)
24	$\text{CH}_4+\text{H}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{H}_2$	28	2.2×10^4	3.0	4400	29.3	0.0	355
25	$\text{CH}_4+\text{OH}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{H}_2\text{O}$	153	1.6×10^7	1.83	1400	6.15	0.0	-7285
26	$\text{CH}_4+\text{O}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{OH}$	28	1.2×10^7	2.1	3840	66.51	0.0	1293
27	$\text{CH}_3+\text{O}\leftrightarrow\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$	28	7.0×10^{13}	0.0	0.000	0.072	0.0	-35100
28	$\text{CH}_3+\text{O}\leftrightarrow\text{CHO}+\text{H}_2$	28	1.4×10^{14}	0.0	860	0.784	0.0	-42878

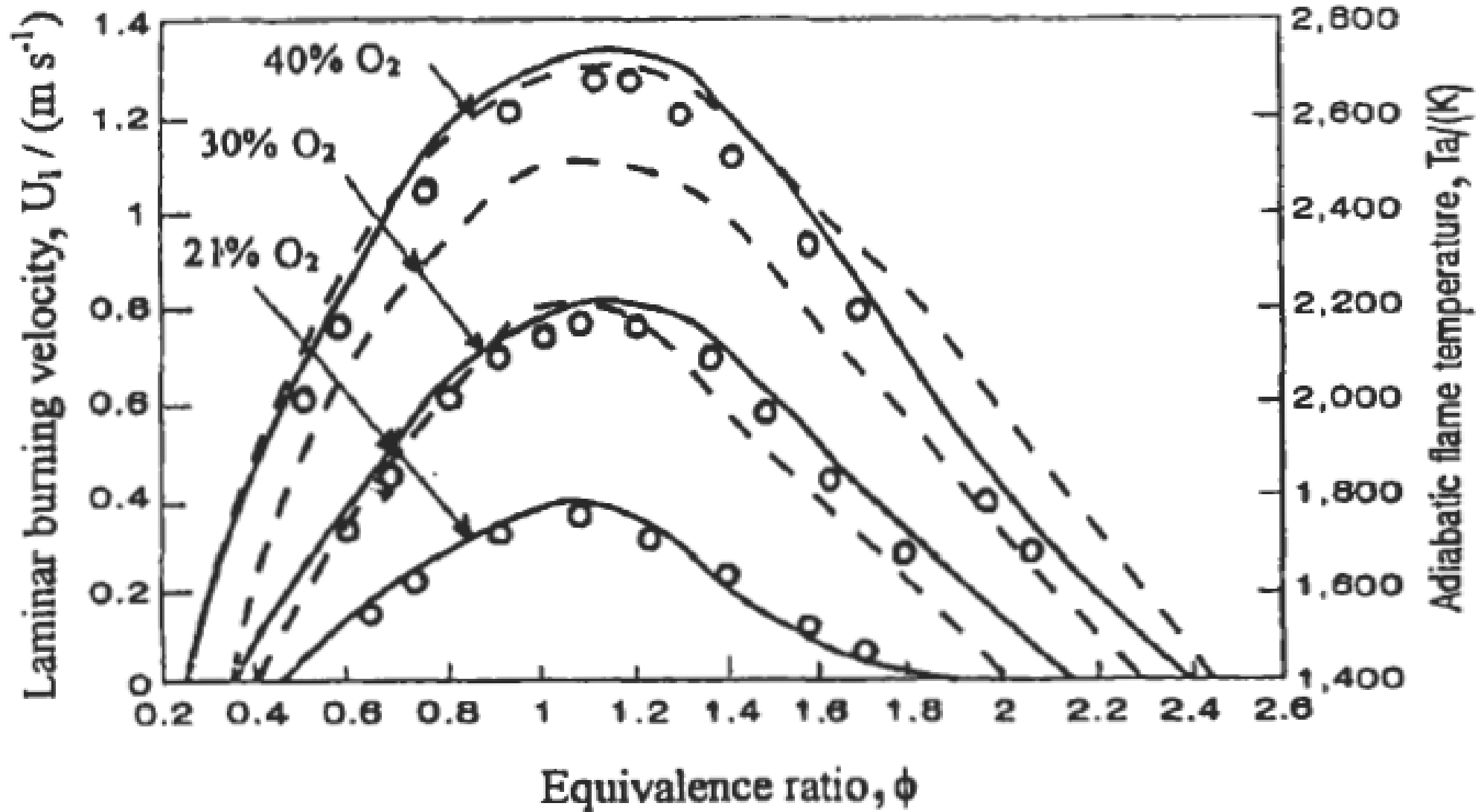
No	Reaction	Ref.	A	B	C/(K)	D	E	F/(K)
29	$\text{CH}_3+\text{CHO}\leftrightarrow\text{CH}_4+\text{CO}$	61, 143	1.0×10^{12}	0.0	0.0	-	-	-
30	$\text{CH}_3+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{CH}_4+\text{O}_2$	61, 143	2.0×10^{12}	0.0	0.0	-	-	-
31	$\text{CH}_3+\text{HO}_2\leftrightarrow\text{CH}_3\text{O}+\text{OH}$	61, 143	2.0×10^{13}	0.0	0.0	-	-	-
32	$\text{CH}_3\text{O}+\text{H}\leftrightarrow\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2$	61, 143	5.0×10^{13}	0.0	0.0	-	-	-
33	$\text{CH}_3\text{O}+\text{OH}\leftrightarrow\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2\text{O}$	61, 143	2.5×10^{13}	0.0	0.0	-	-	-
34	$\text{CH}_3\text{O}+\text{O}\leftrightarrow\text{CH}_2\text{O}+\text{OH}$	61, 143	2.5×10^{13}	0.0	0.0	-	-	-
35	$\text{CH}_3+\text{CH}_3\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_6$	61, 143	2.8×10^{14}	-0.4	0.0	5.33×10^{-7}	0.0	-43880
36	$\text{C}_2\text{H}_6+\text{H}\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}_2$	61, 143	5.5×10^2	3.5	2620	21.7	0.0	-1140
37	$\text{C}_2\text{H}_6+\text{OH}\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}_2\text{O}$	153	3.54×10^6	2.12	439.3	-	-	-
38	$\text{C}_2\text{H}_6+\text{O}\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_5+\text{OH}$	153	8.98×10^7	1.92	2864	-	-	-
39	$\text{C}_2\text{H}_5+\text{O}_2\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_4+\text{HO}_2$	61, 143	2.0×10^{12}	0.0	2510	-	-	-
40	$\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{CH}_3$	61, 143	4.8×10^{13}	0.0	0.0	-	-	-
41	$\text{C}_2\text{H}_5+\text{O}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{CH}_2\text{O}$	61, 143	5.0×10^{13}	0.0	0.0	-	-	-
42	$\text{C}_2\text{H}_5+\text{C}_2\text{H}_5\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_4+\text{C}_2\text{H}_6$	61, 143	1.4×10^{14}	0.0	0.0	-	-	-
43	$\text{C}_2\text{H}_4+\text{O}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{CHO}$	61, 143	2.0×10^{13}	0.0	1300	-	-	-
44	$\text{C}_2\text{H}_4+\text{OH}\leftrightarrow\text{CH}_3+\text{CH}_2\text{O}$	61, 143	4.0×10^{13}	0.0	760	1.9	0.0	-7910

No.	Reaction	Ref.	A	B	C/(K)	D	E	F/(K)
45	$\text{C}_2\text{H}_4+\text{OH}\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}_2\text{O}$	166	0.7×10^{14}	0.0	1516	1.99	0.0	-7183
46	$\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}_2$	166	1.5×10^{14}	0.0	513	8.64	0.0	448
47	$\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}_2$	166	2.0×10^{13}	0.0	0.0	0.35	0.0	-33020
48	$\text{C}_2\text{H}_5+\text{O}_2\leftrightarrow\text{C}_2\text{H}_4+\text{HO}_2$	166	1.0×10^{12}	0.0	0.0	1	0.0	-3960
49	$\text{C}_2\text{H}_2+\text{O}\leftrightarrow\text{CH}_2+\text{CO}$	240	41×10^7	1.5	854	5.33	0.0	-25510
50	$\text{CH}_2+\text{O}_2\leftrightarrow\text{CO}_2+\text{H}_2$	238	10×10^{13}	0.0	1864	0.003	0.0	-93262

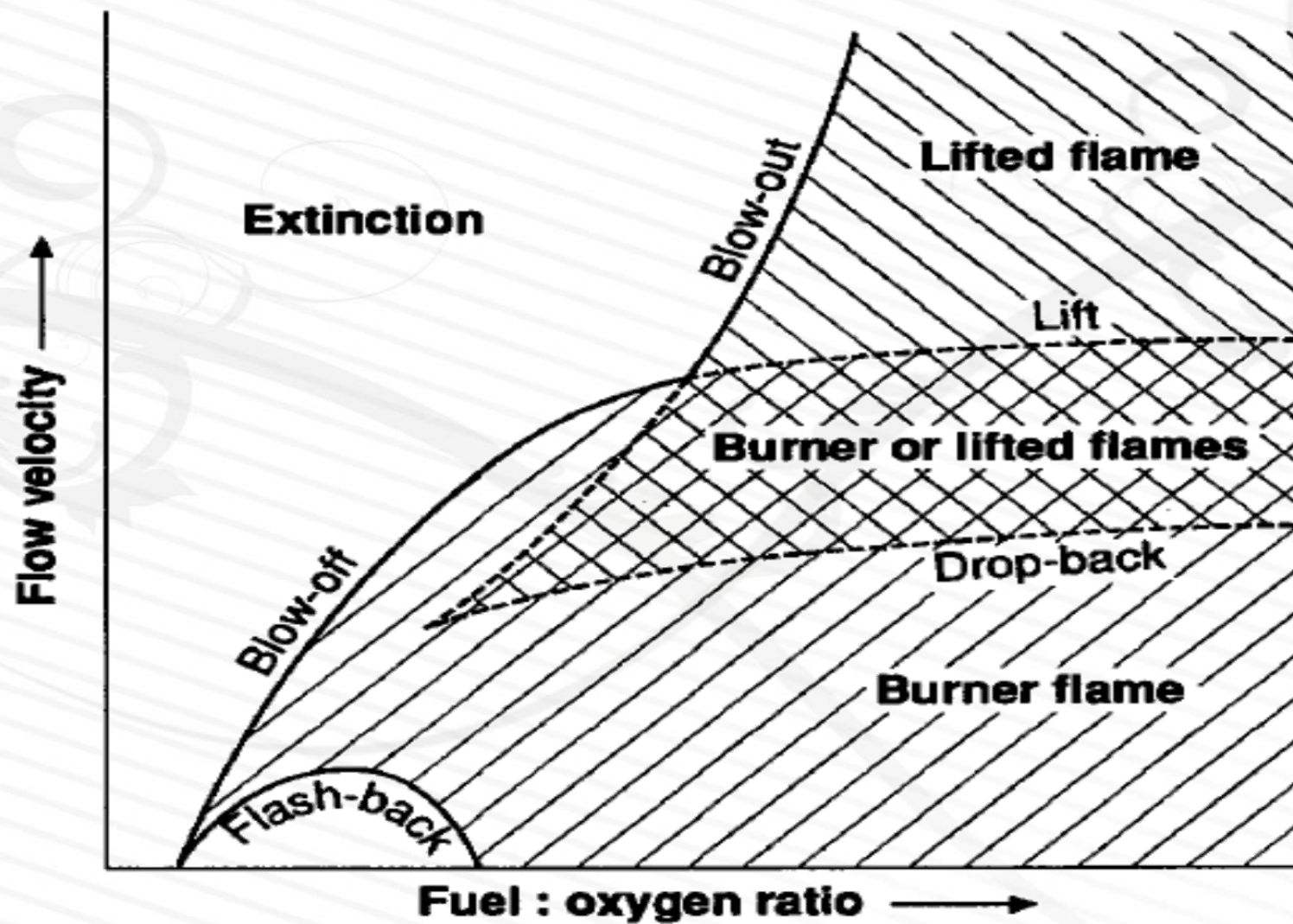
CH₄ / Air Flame , 1 atm



CH₄ / O₂ / N₂ Oxygen Enriched Flame · 1 atm



燃料/空氣比與火焰穩定度



燃燒系統

瞬間快速導入大流量
很容易將火焰吹熄

濃度瞬間快速變化
空燃比變化導致熄火

NO的產生



環保總量管制：**NO_x**是**VOC**廢氣處理最需要注意的問題、減少產生量是最好的對策

■ NO_x

- nitric oxide (NO)
- nitrogen dioxide (NO₂)
- dinitrogen oxide (N₂O)
- dinitrogen tetroxide (N₂O₄)
- dinitrogen pentoxide (N₂O₅)

■ Formation of NO_x

- thermal NO_x formation
- fuel NO_x formation
- prompt NO_x formation

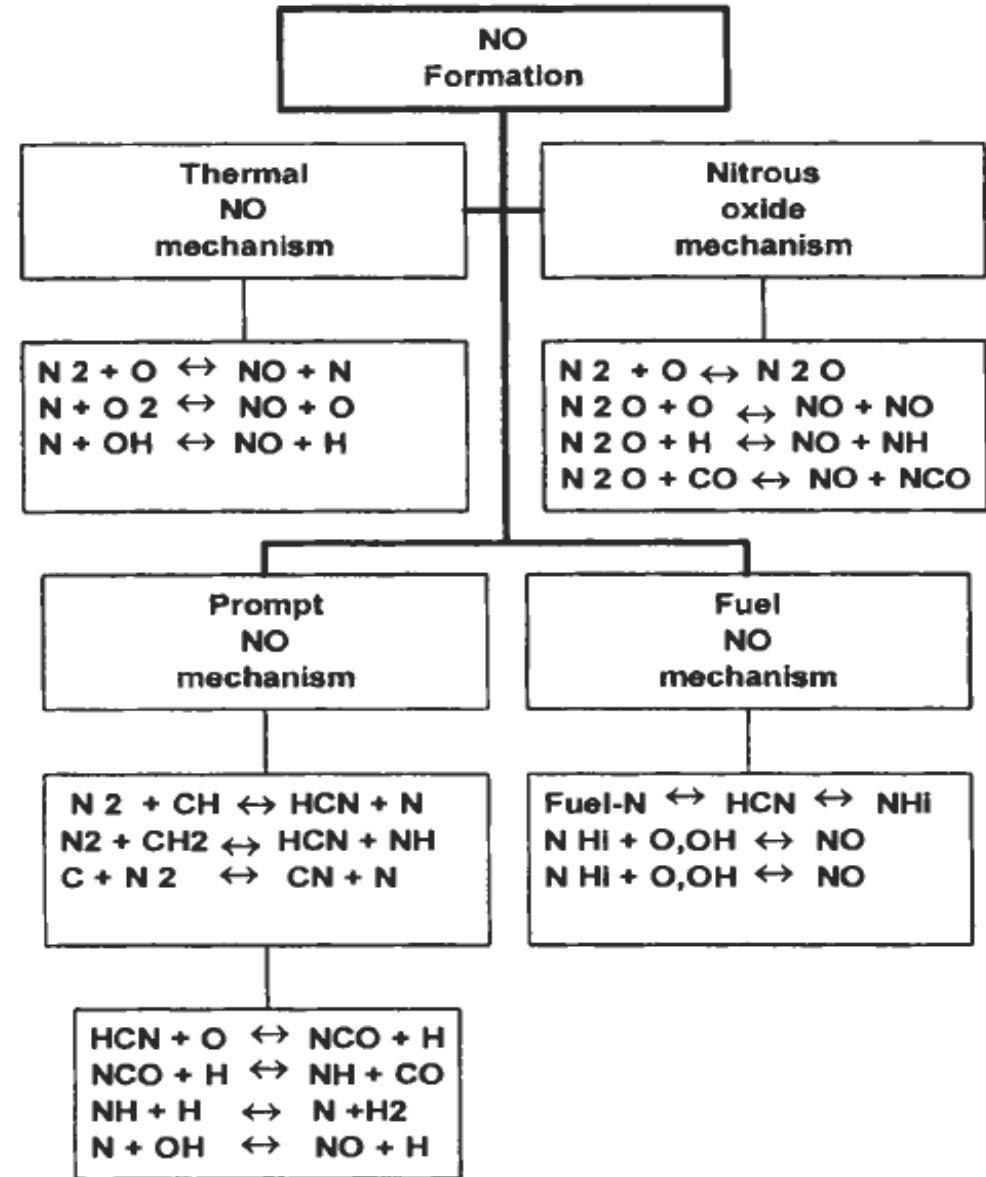
- 最主要為 nitric oxide (NO)
 - its content in flue gas is in the range of: 100 –1000 mg/m³
- 其次為nitrogen dioxide NO₂，約為NO的 5-10%
 - its content in flue gas is in the range of: 10 –100 mg/m³
- N₂O 含量最少：
 - its content in flue gas is in the range of: 1–10 mg/m³

MAJOR SOURCES OF NO_x FORMATION DURING COMBUSTION

燃燒產生的NO_x



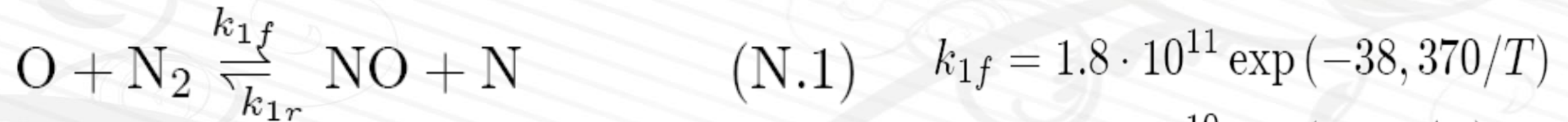
- Air nitrogen (N₂)
 - thermal NO_x
 - prompt NO_x
- Fuel nitrogen (NF)
 - fuel NO_x



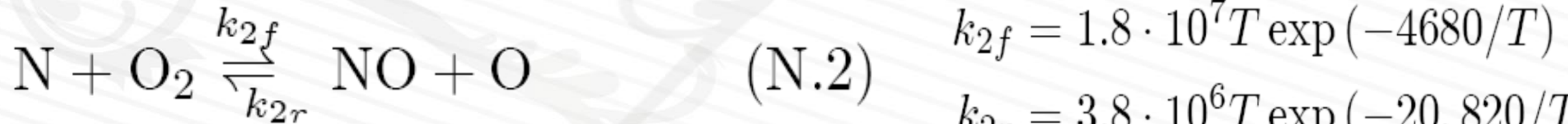
Thermal NO_x Formation



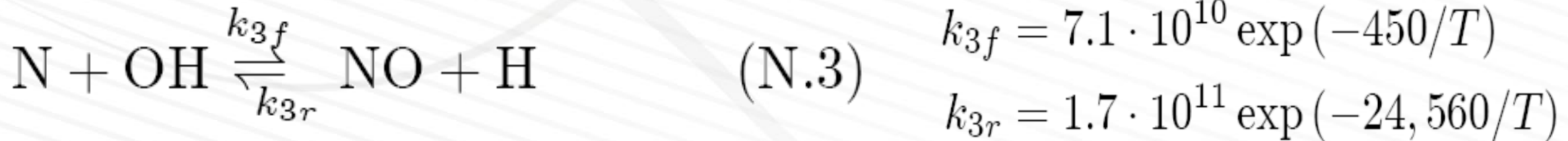
- The basic mechanism for thermal NO production is given by six reactions known as *extended Zeldovich mechanism*:



$$k_{1r} = 3.8 \cdot 10^{10} \exp(-425/T)$$



$$k_{2r} = 3.8 \cdot 10^6 T \exp(-20,820/T)$$



$$k_{3r} = 1.7 \cdot 10^{11} \exp(-24,560/T)$$

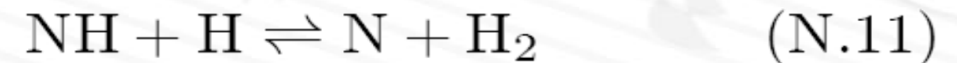
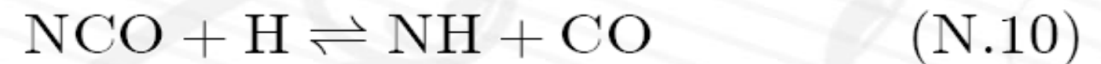
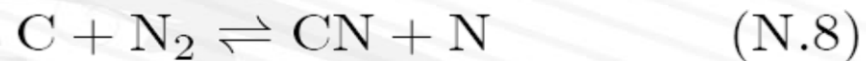
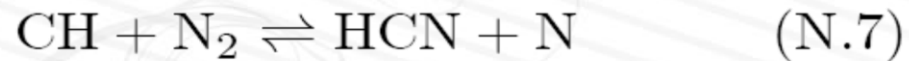
$$[\text{m}^3 / \text{kmol s}]$$

Prompt NO_x formation



- REACTIONS OF HYDROCARBON RADICALS WITH N₂

- There are many hydrocarbon radicals in flame (CH, CH₂, CH₃, C₂H₄, C₂H₅, C₃H₇, C, C₂...), which can react with molecular nitrogen (N₂).



- general

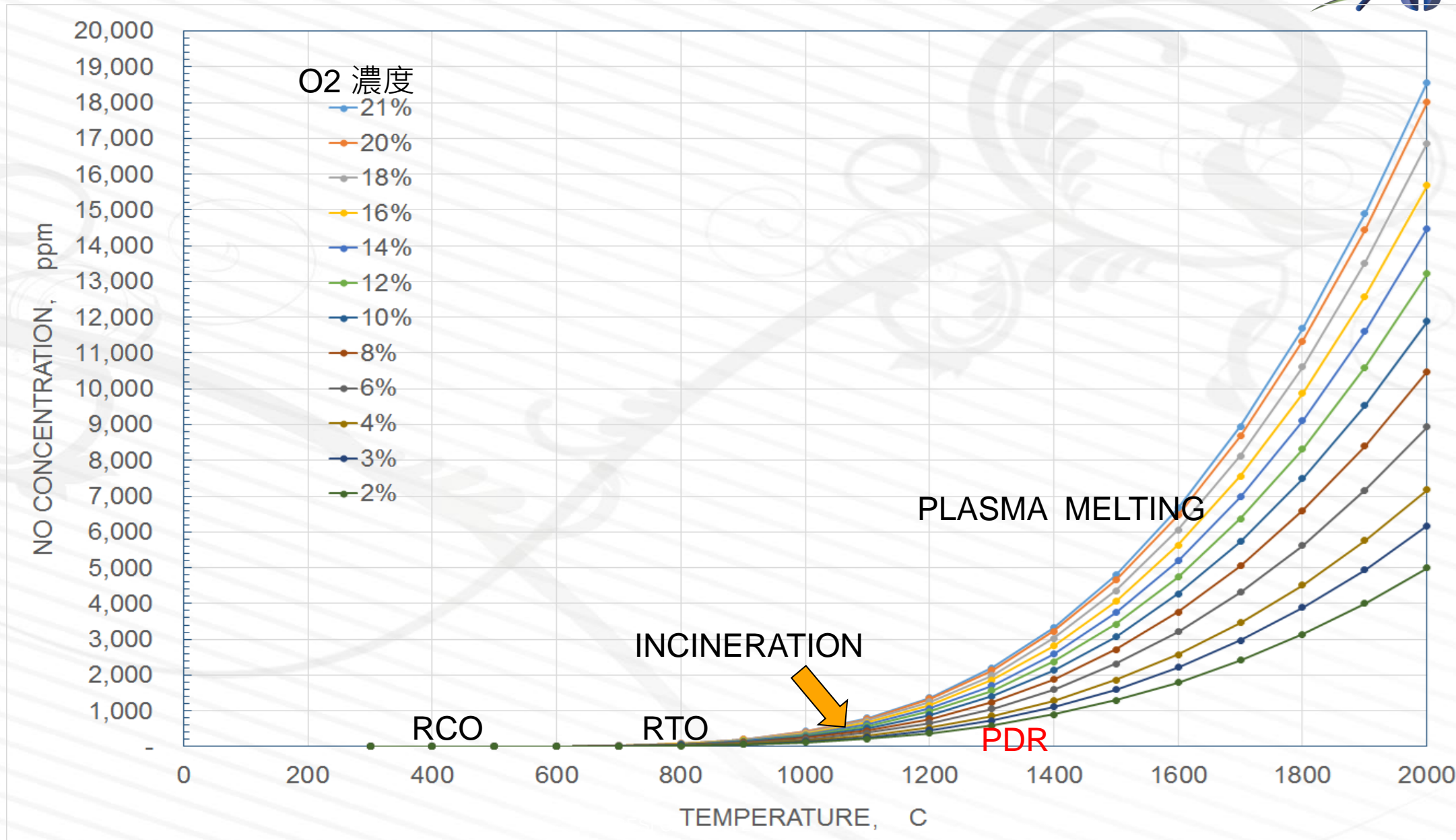
- CH_x+N₂ ↔ HCN and other radicals (CN, NH, N...)

- As a result: HCN, NH_i CN are easily oxidized to NO in flame.

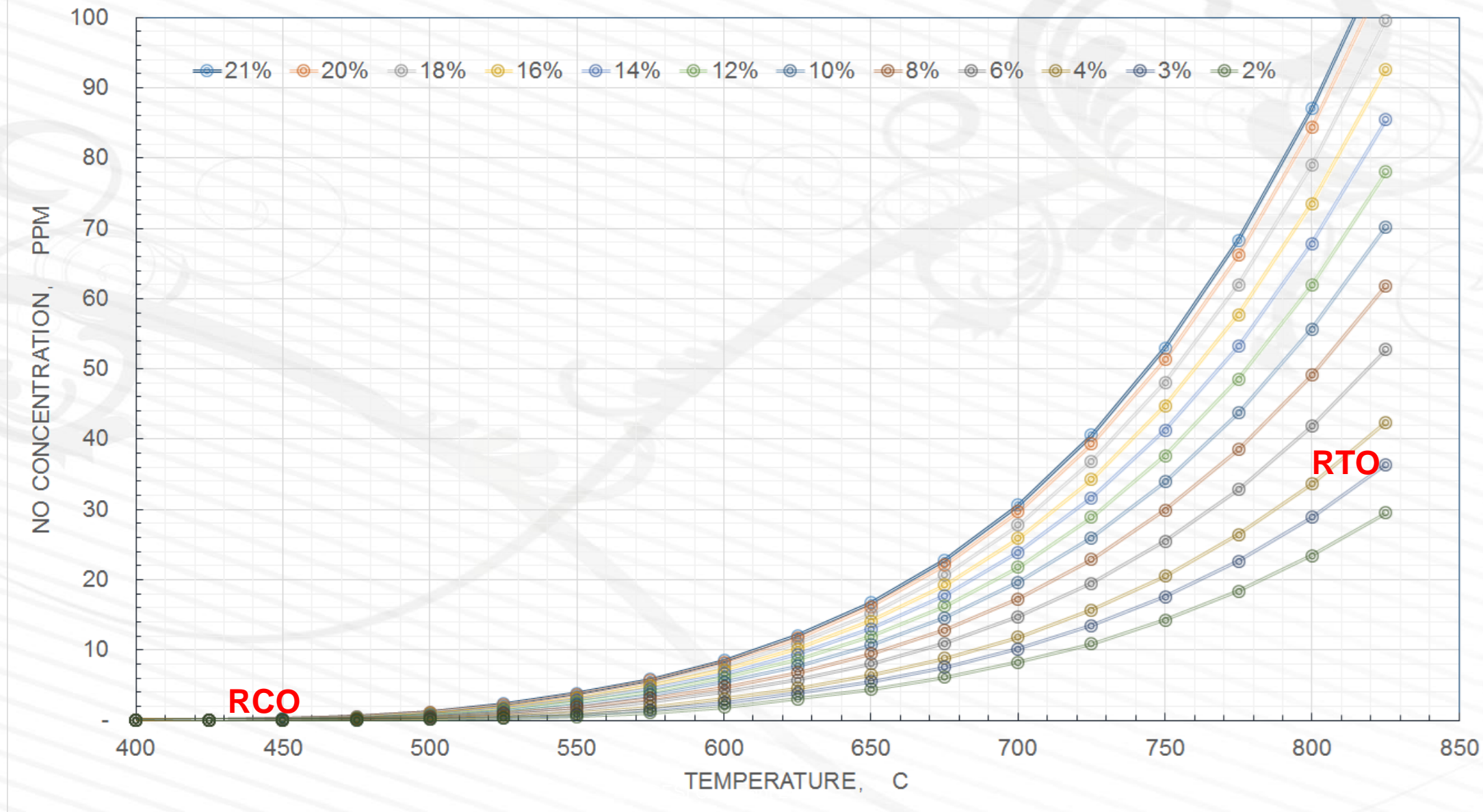
Fuel NO_x formation

- The process where nitrogen in the fuel reacts (oxidizes) with the oxygen in the combustion air to form NO_x.
- $N_{\text{Complex}} + \text{OH} \leftrightarrow \text{NO} + \text{X}$
- $N_{\text{Complex}} + \text{NO} \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{X}$

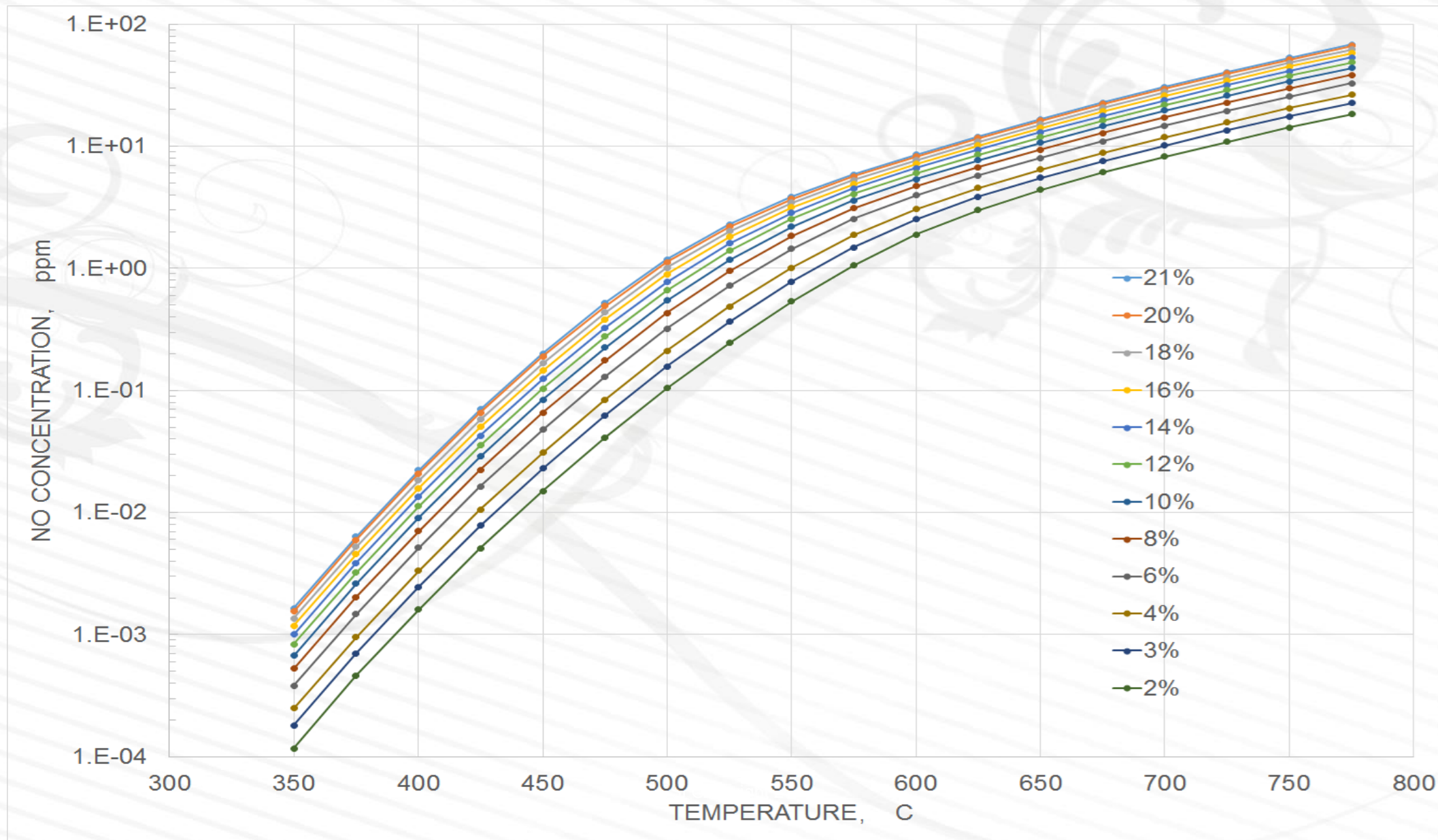
NO與溫度及氧氣濃度關係



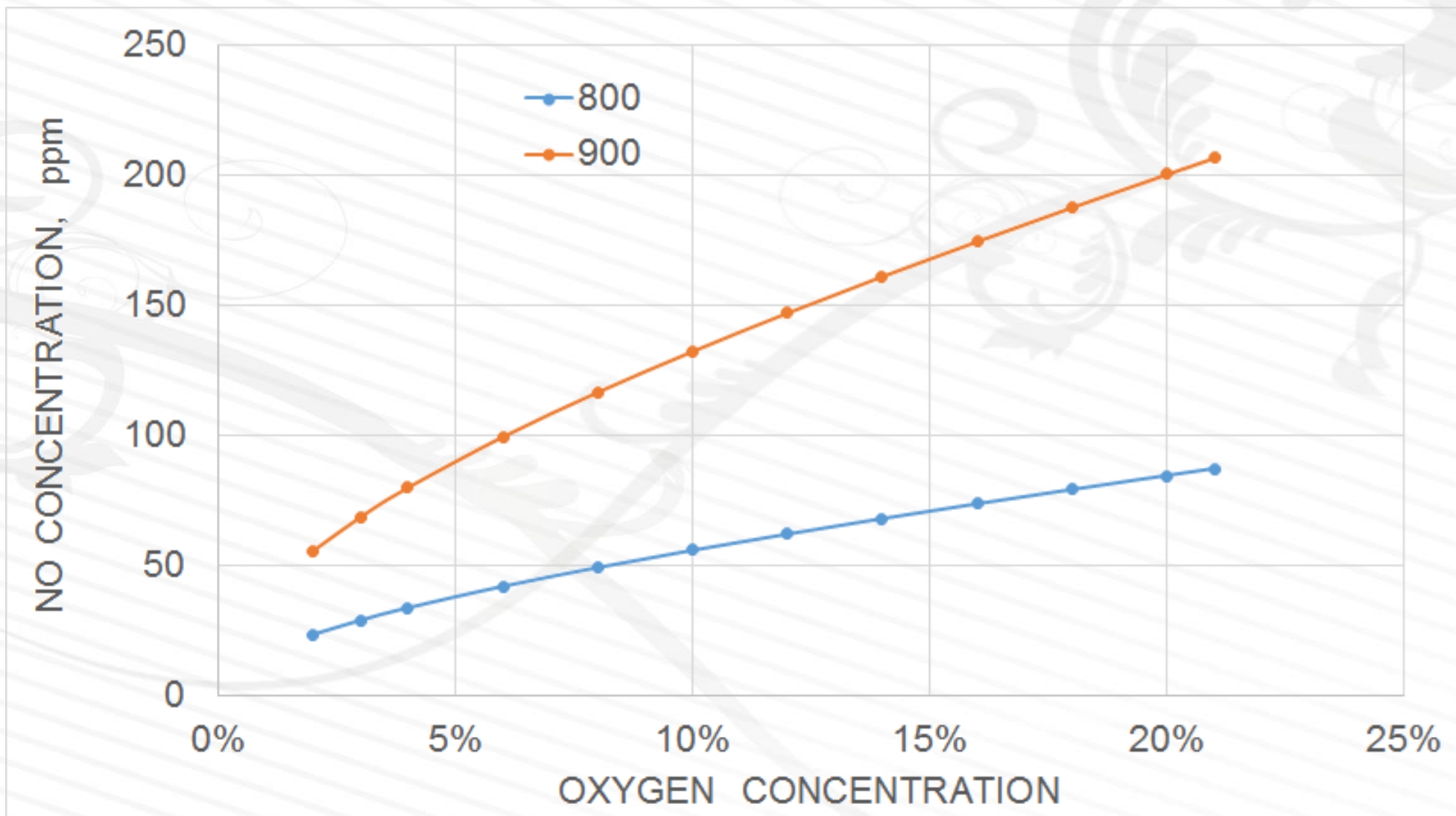
NO與溫度及氧氣濃度關係



NO與溫度及氧氣濃度關係



氧氣濃度對NO的影響



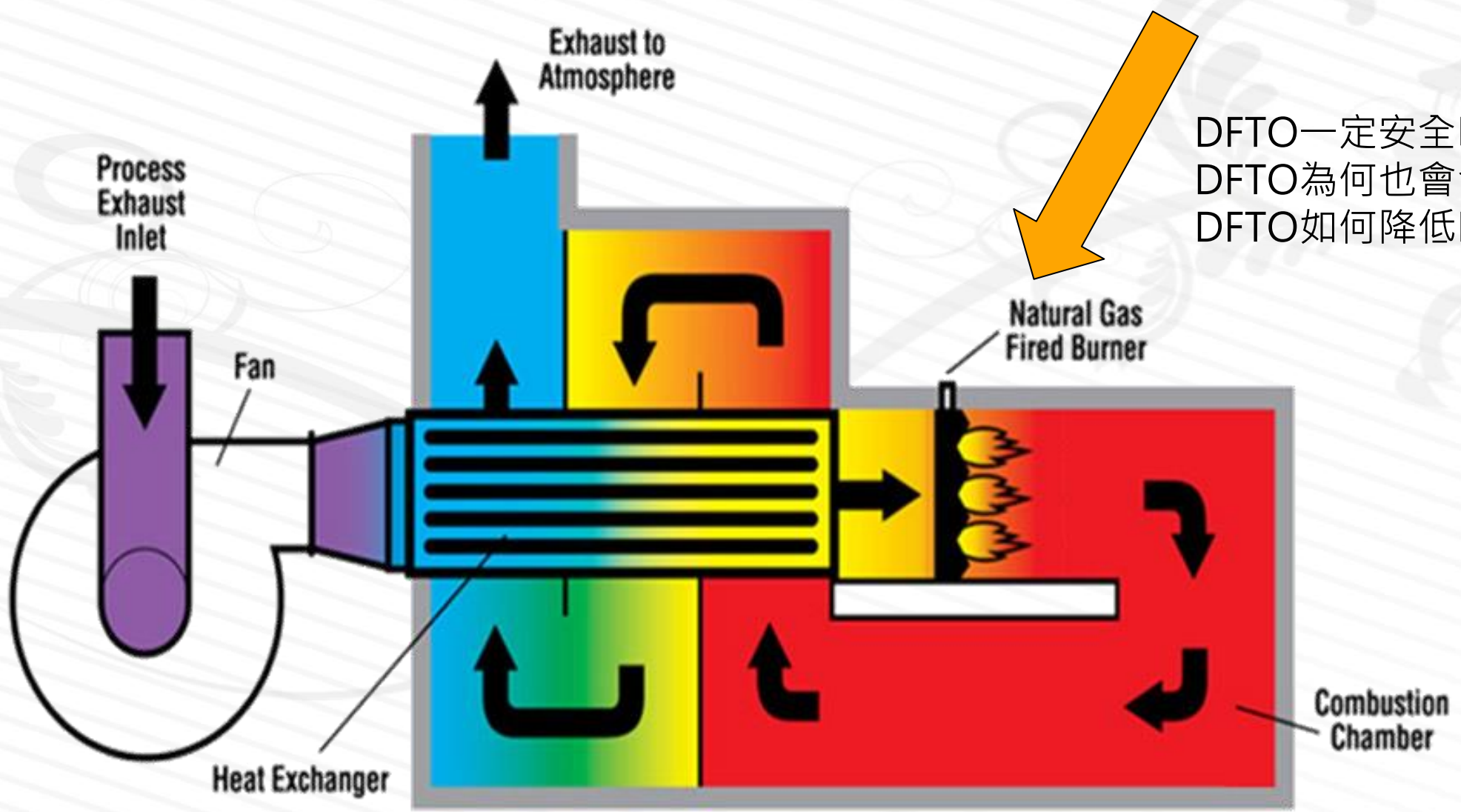


VOC廢氣熱處理技術

豐映科技股份有限公司

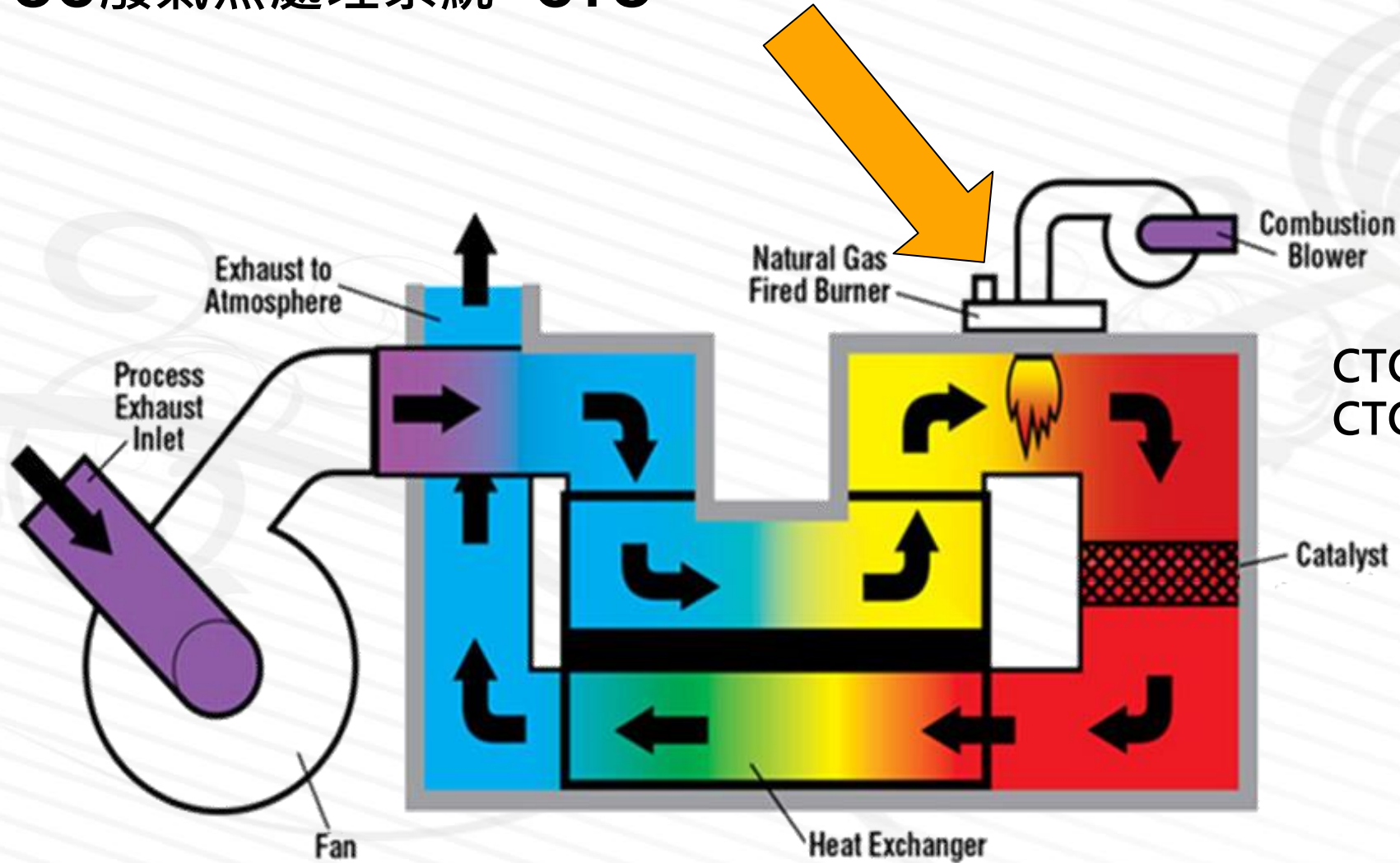
技術種類	已成熟技術	發展中技術
物理處理法	冷凝去除法 活性炭吸附法 沸石吸附法 吸附脫附提濃法	結構化吸附體
化學處理法	觸媒轉化	超低溫觸媒轉化
熱處理法	直接焚化法(DFTO) 催化焚化法 (CTO) 再生式熱氧化法(RTO) 再生式觸媒轉化 (RCO) 熱回收式焚化法	電漿熱處理法

VOC廢氣熱處理系統--DFTO



DFTO一定安全嗎？
DFTO為何也會發生爆炸意外？
DFTO如何降低NOx的產生？

VOC廢氣熱處理系統--CTO

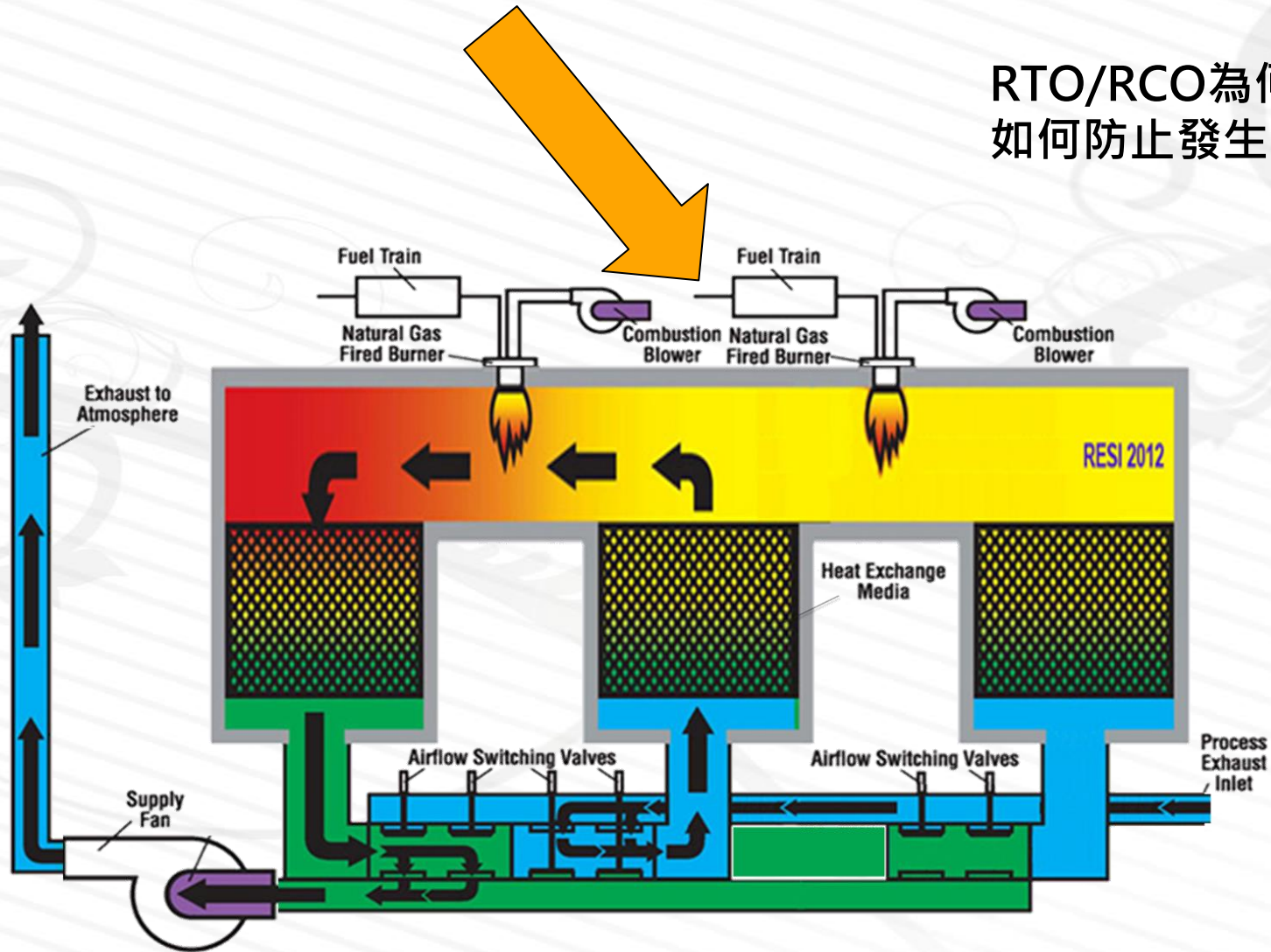


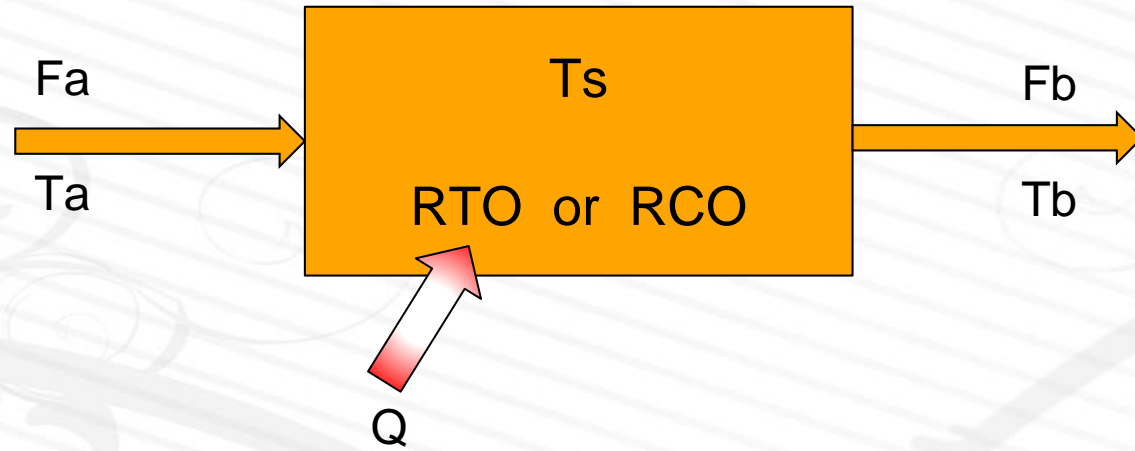
CTO有什麼優點？缺點？
CTO為何也會發生爆炸意外？

VOC廢氣熱處理系統—RTO/RCO



RTO/RCO為何也會發生爆炸意外?
如何防止發生意外?



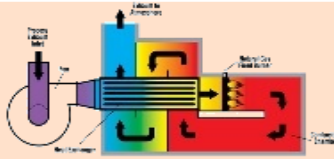
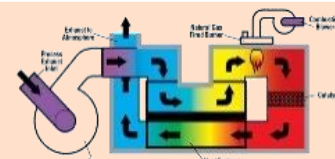
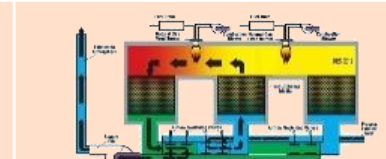
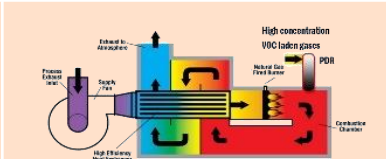
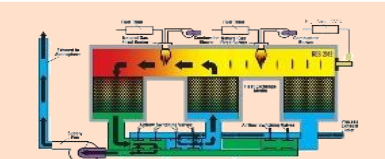


$$F_b h(T_b) - F_a h(T_a) = Q = m h c$$

- 能量需求關鍵在 **$T_b - T_a$**
- 與操作溫度 **T_s** 無關
- **RCO**操作溫度低**NO**濃度低
- 觸媒中毒劣化問題**vs. NO**優勢

VOC廢氣熱處理技術的比較

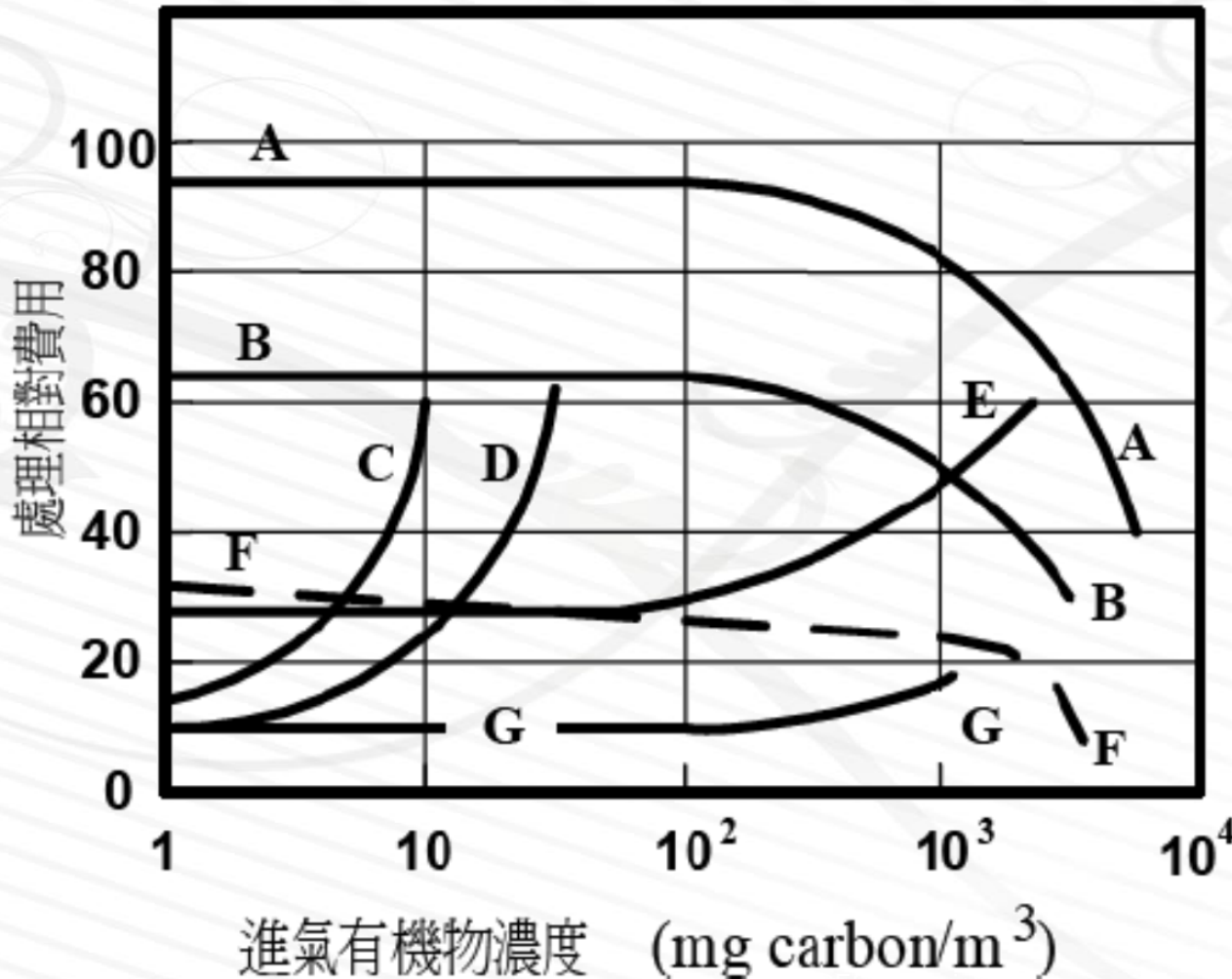


	直燃式焚化爐 DFTO	熱交換型催化 焚化爐RCO	再生蓄熱式 焚化爐RTO	PDR-DFTO (RESI專利)	PDR-RTO/RCO (RESI專利)
系統流程					
操作溫度	750 ~ 850	300 ~ 450	750 ~ 850	750 ~ 850	RTO 750 ~ 850 RCO 350 ~ 450
熱交換	熱交換器	熱交換器	再生型	熱交換器	再生型
熱回收效率	40~70%	40~70%	≥ 95%	≥ 80%	≥ 95%
優缺點	<ul style="list-style-type: none"> 可處理高濃度VOC 能源效率低 易發生熄火、燃爆意外 	<ul style="list-style-type: none"> 濃度限值VOC < 25% LEL 操作溫度低 觸媒容易劣化、中毒 NO濃度特別低 常有超溫燃爆困擾 無法處理高濃度VOC 	<ul style="list-style-type: none"> 濃度限值VOC < 25% LEL 能源效率高 常有超溫燃爆困擾 無法處理高濃度VOC 	<ul style="list-style-type: none"> 能源效率經節熱器、鍋爐而提高 高低濃度VOC分流處理 PDR可承受瞬間超載操作、濃度快速變化、流量快速變化 徹底解決燃爆及超溫困擾 	<ul style="list-style-type: none"> 能源效率高 高低濃度分流處理 PDR可承受瞬間超載操作、濃度快速變化、流量快速變化 徹底解決燃爆及超溫困擾

VOC廢氣處理費用比較



a. 相對費用(以流量10,000 m³/h為評估標準)



A. 火焰焚化/熱回收 DFTO

B. 觸媒焚化/熱回收 CTO

C. 活性碳吸附/碳不再生

D. 活性碳吸附/碳再生

E. 吸附濃縮/脫附焚化

F. 蓄熱式焚化 PDR-RTO/RCO

G. 生物處理



VOC廢氣熱處理的意外事故

豐映科技股份有限公司

聚苯乙烯廠案例

- Styrene → Polystyrene → Expandable Polystyrene (EPS).
- 產能擴增8倍 → Isopentane VOC排氣激增

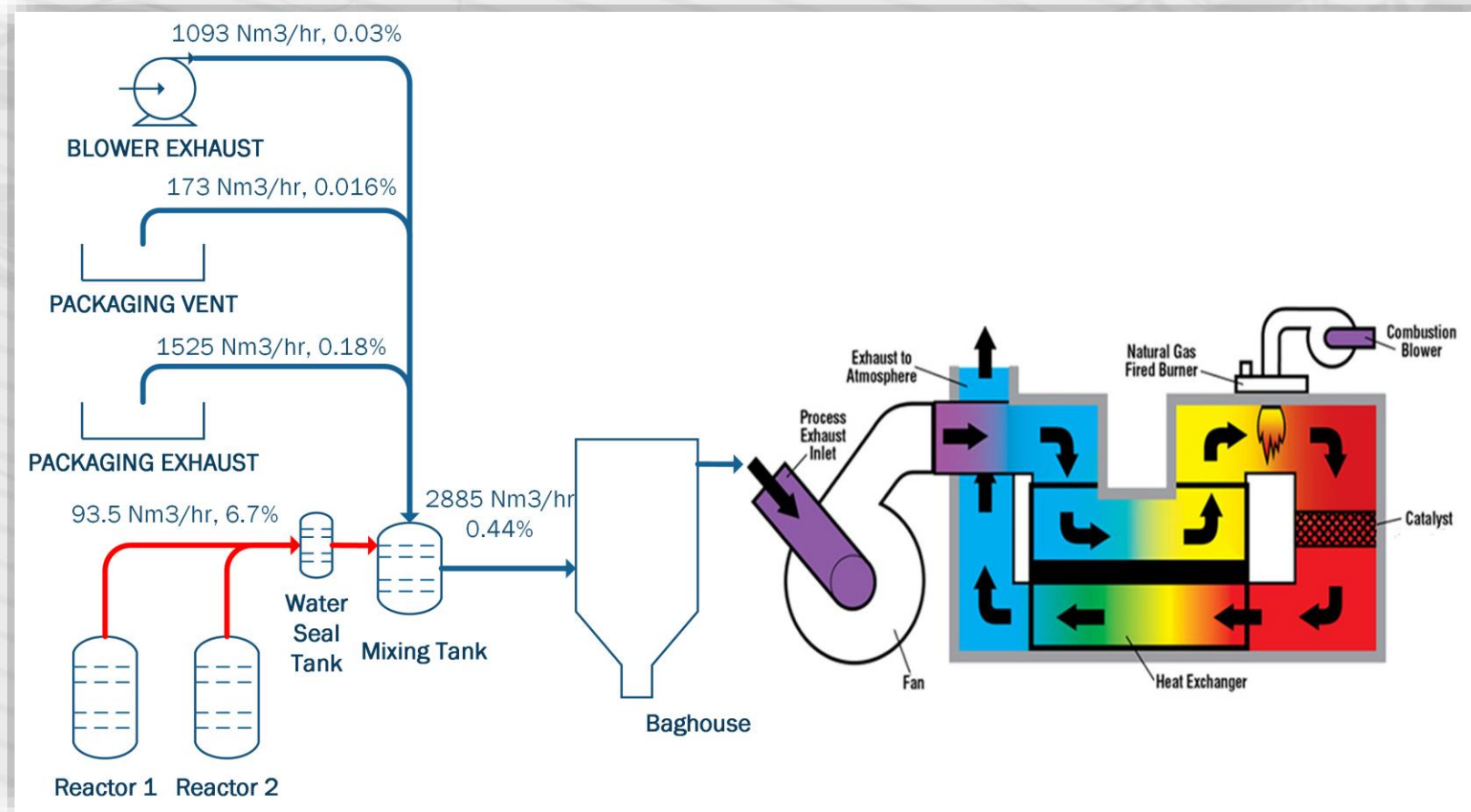
廢氣源	操作模式	平均流量 Nm3/hr	最高流量 Nm3/hr	平均濃度 (%i-C5)	最高濃度 (%i-C5)	其餘成分
反應器排氣X2	批次	93.5	115.6	6.7	8.0	氮氣
輸送機排氣	連續	1093	1130	0.33	0.56	空氣
包裝逸散排氣	連續	173	175	0.016	0.058	空氣
包裝尾氣	連續	1525	1650	0.18	0.32	空氣
RCO原設計基準	連續	3150	3570	0.24	0.30	空氣
計算設計基準	連續	2885	3071	0.44	0.68	空氣

高濃度

聚苯乙烯廠案例



- 採用處理技術—Regenerative Catalytical Thermal Oxidizer
- 高濃度VOC與低濃度VOC混合處理
- 經袋式集塵器去除粒狀物後，利用RCO處理

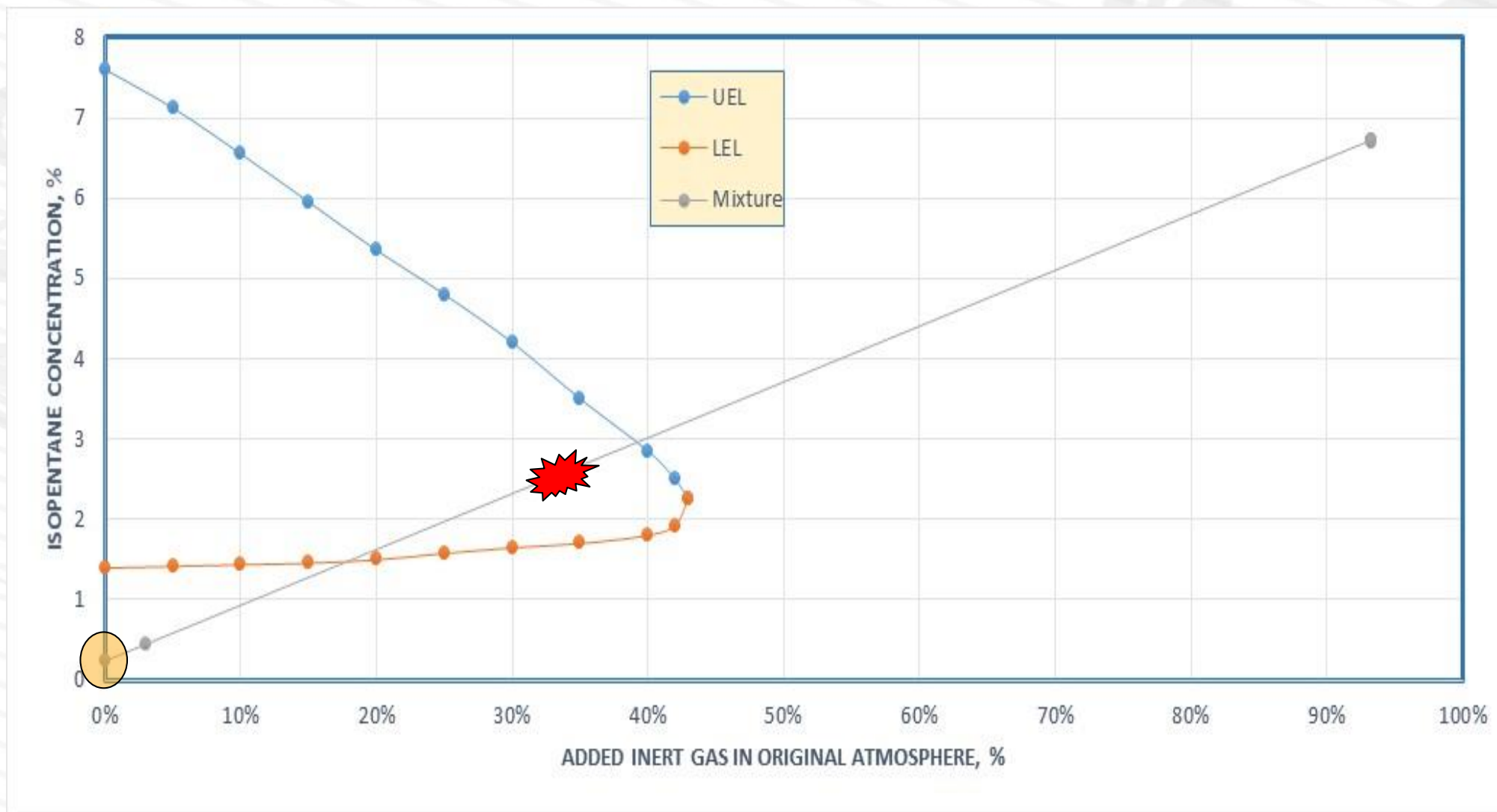


异戊烷 (C5H12)	
分子量:	72.2
沸点:	28
C	
闪火点:	-
51 C	
自燃温度:	126 C

聚苯乙烯廠RCO爆炸案例

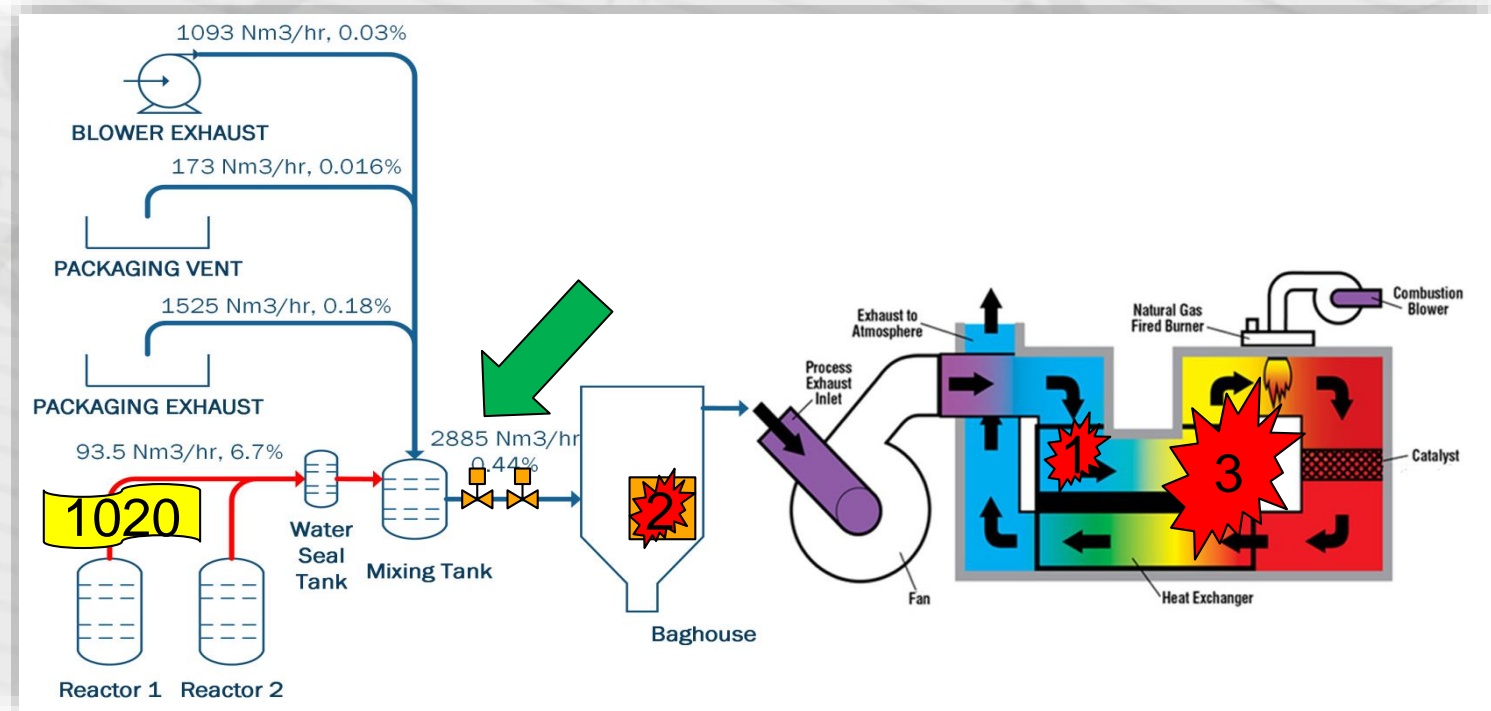


▪ HVOC+LVOC混合—美國賓州案例






聚苯乙烯廠案例--意外發生

- 設備完成後，在試車階段，首先導入低濃度廢氣（LVOC），系統穩定操作，
- 操作一段時間後，決定導入HVOC，結果導入第一股HVOC時，燃燒室在HVOC開始導入後瞬間熄火，系統自動將VOC管道雙重閥門關閉。
- 接著燃燒室內的可燃性氣體又自動點燃，並產生燃爆跳車。 
- 燃燒室經過氣吹後，操作人員按**RESET**，重新啟動燃燒機
- 發生爆炸，造成RCO設備毀損。



案例檢討

- 設計基準的反應器排氣量及濃度，未反應瞬間流量的變化。
- HVOC瞬間導入時，流量計顯示瞬間流量達到1020 Nm³/hr，較原規劃的93.5Nm³/hr大了10倍以上
 - 大量HVOC及氮氣進入RCO，使得RCO的燃燒室熄焰。
 - 接著可燃性氣體在燃燒室內又自動點燃，產生燃爆跳車。
- 燃燒室瞬間熄火後，混合槽上游端的VOC入口雙重閥門自動關閉，切斷VOC的導入。
 - 使得袋式集塵器在燃燒室接著發生爆燃時，瞬間超壓，袋式集塵器的爆裂片爆開 
 - 但由於爆裂片未裝設任何檢測儀及警告裝置，爆裂片爆開後控制室並無任何資訊。
- 袋式集塵器爆裂片破裂後，系統重新開機
 - 空氣由爆裂片位置被吸入，與HVOC混合，氧氣達到13.5%，VOC濃度約2.7% 
 - 氣體一導入RCO就立即發生爆炸，造成RCO部分設備及蓄熱材料毀損。
- VOC的LEL%線上偵測儀並沒有提供即時警告及控制作用
 - 在爆炸發生後，發出VOC濃度超高的警報，但是為時已晚，爆炸已經發生。

案例的啟示



- 以本個案為例，設計上的風險有兩大項：
 - VOC處理系統設計濃度太接近LEL；
 - VOC廢氣混合曲線通過爆炸範圍。
- 當系統管線長期使用，產生冷凝液，遇到日曬升溫可能導致VOC揮發，VOC的濃度可能升高，就可能會有回火或是爆炸風險。
- 若前端化工制程系統如果發生濃度擾動，例如，反應器操作異常，導致HVOC排出濃度因故瞬間升高、或流量瞬間睜大，可能使得混合VOC排氣濃度高於LEL，就有立即發生爆炸的危險。
- 化工產業流量資料常常是平均值，但是瞬間流量及濃度變化常被忽略，一旦瞬間流量及濃度超過限制範圍，一導入燃燒設備，就有可能瞬間發生爆炸事件。
- 若低濃度廢氣LVOC管道因排風機故障、部分生產線停工維護保養，都可能導致混合氣體濃度異常升高，造成爆炸風險。

丙烯酸樹脂 (acrylic resin) 製造廠的火災及爆炸意外

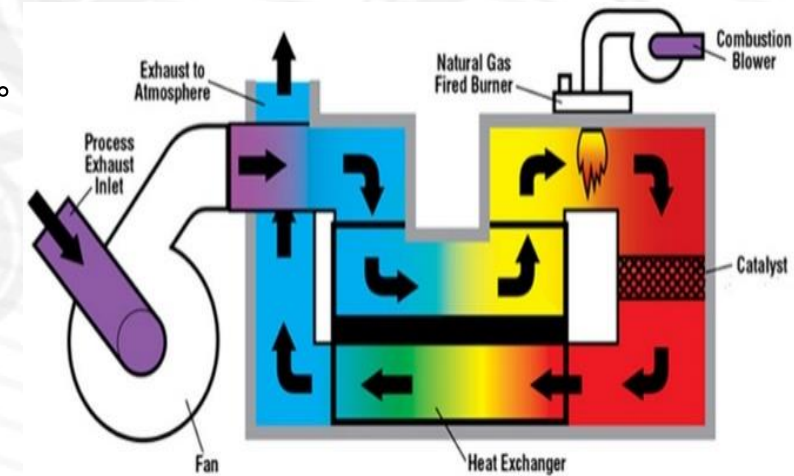


- 丙烯酸樹脂 (acrylic resin) 製造廠的火災及爆炸意外，導致丙烯酸乙酯 (ethyl acrylate) 貯存槽的毀損。

- 使用設備：催化焚化爐 (CTO) 處理丙烯酸乙酯 (閃火點 16°C)廢氣。
 - CTO正常操作狀況下，催化劑床出口溫度約 350°C 至 500°C 。
 - 系統設計當CTO出口溫度過高時，會發出警告並自動跳車。

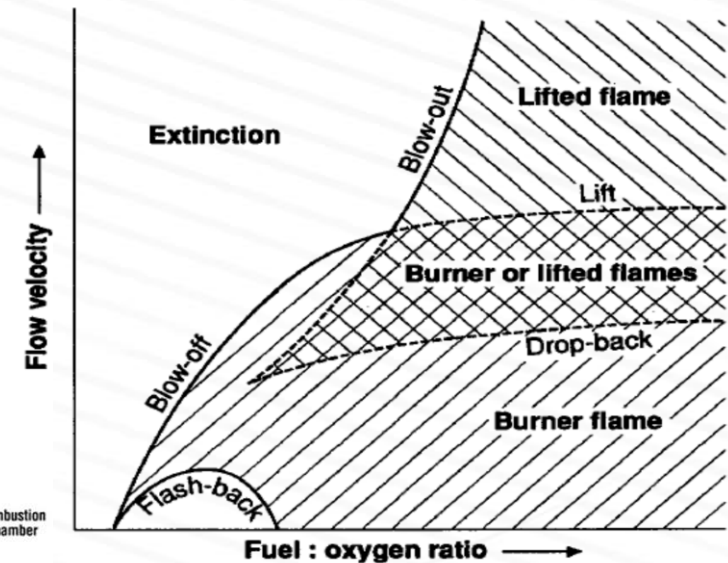
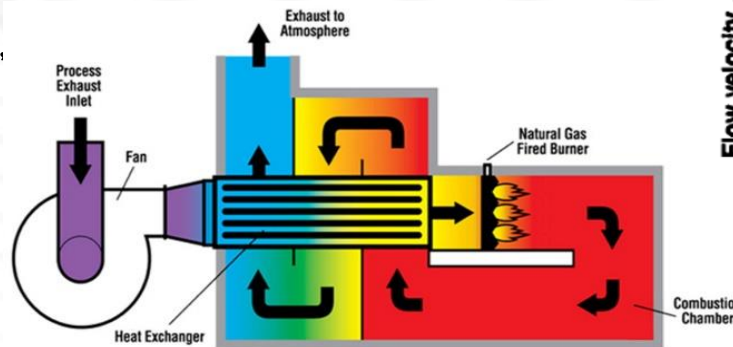
- 意外發生情況：
 - VOC濃度超過設計值，催化劑床出口溫度升高到 640°C 。
 - 系統超溫跳脫時，造成VOC回火，火焰防阻器無法承受VOC氣體連續流動並在火焰防阻器表面點燃，導致火焰防阻器被燒穿，引起VOC廢氣回火爆炸，導致丙烯酸乙酯貯存槽的毀損。

- 事故檢討：
 - CTO設計不當，無法有效控制系統溫度；
 - 火焰防阻器設計及選用不當。



清洗油回收廠的VOC焚化爐產生連續兩起火災及爆炸意外

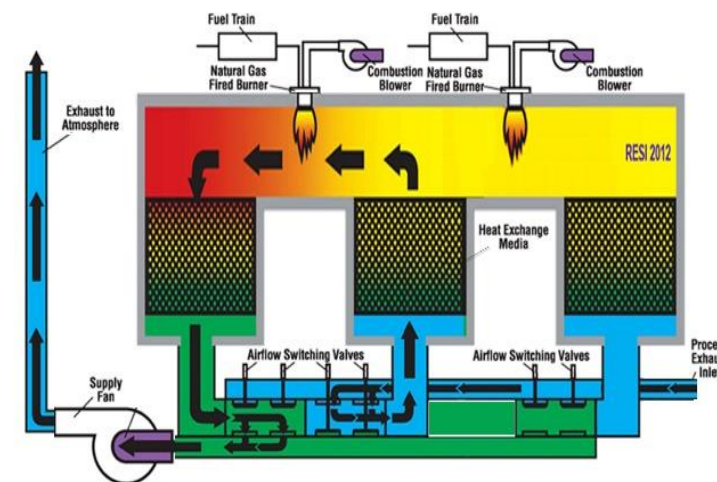
- 使用設備：熱交換型廢氣焚化爐（TO）處理資源回收廠產生的油煙VOC廢氣。
 - 油煙VOC廢氣一股導入TO爐，一股當TO爐發生異常狀況時排到TO爐的煙囪。
 - 導入TO爐的管道裝了火焰防阻器，但是緊急排放管道沒有裝火焰防阻器。
- 意外發生狀況：
 - 上游處理系統溫度失控，導致油氣濃度突升，造成TO爐熄火，接著油氣濃度回到爆炸濃度範圍，使得TO爐發生膛炸毀損。
 - TO爐爆炸瞬間，由於緊急排放管道沒有裝火焰防阻器，導致火焰回朔，接著使得上游處理系統發生爆炸。
- 事故檢討：
 - TO爐的燃燒控制及爆炸風險缺乏認知與知識，
 - 油品處理及貯存區缺乏良好的溫度控制，
 - TO爐安全連鎖設計不當，
 - 火焰防阻器設置不當。



飲料工廠的三床式RTO發生一連串爆炸



- 處理設備：大型的三床式RTO (大約 21m x 5m x 9m 高)處理印刷乾燥爐所產生的VOC廢氣。
 - VOC管道有裝設多組VOC偵測儀，當VOC濃度高於LEL的20%以上，會發出警告，並將VOC廢氣緊急排放到緊貼著RTO入口端的緊急排放口。
 - VOC偵測系統也會在VOC濃度達到LEL的40%以上，自動停止上游端噴漆乾燥爐的操作。
- 意外發生狀況：
 - RTO底部沉積的溶劑被點燃，火焰緩慢往上游蔓延
 - VOC管道發生小火災，煙道殘留有機樹脂廢棄物被點燃，產生高濃度VOC氣體。
 - 氣體在VOC偵測儀發出警告前，到達RTO瞬間引起RTO發生爆炸。
 - RTO發生爆炸瞬間，RTO入口端煙道上的爆裂片爆開。
 - 爆裂片設計不恰當，無法卸載系統發生爆炸產生的壓力，導致RTO毀損。
 - 煙道自動滅火系統作動，將火焰熄滅。
- 事故檢討：
 - RTO入口未裝設火焰防阻器
 - 煙道的自動滅火系統未設溫度檢測，自動啟動滅火系統。



處理氫氣、氨氣及吡啶廢氣的RTO爐發生爆炸

- 處理設備：RTO廢氣焚化爐；RTO焚化爐使用丙烷當輔助燃料。
 - RTO焚化爐底部設有一套濕式洗滌塔。
 - VOC廢氣先經過洗滌塔洗滌，然後進入RTO爐焚化。
- 意外發生情況：
 - 由於洗滌塔長期操作，氨水及吡啶濃度逐漸升高。
 - 爆炸事件發生前，RTO爐底部沉積的吡啶（沸點115.2 C，爆炸範圍1.8%–12.4%）先被點燃
 - 火焰蔓延到洗滌塔，接著洗滌塔內的VOC被點燃，氨氣及吡啶快速釋出
 - 高濃VOC氣體沖至RTO底部，瞬間產生爆炸。
- 事故檢討：
 - 系統風險操作評估（HAZOP）需要重新來過；
 - RTO、上游的洗滌塔、管道、制程，都應該納入HAZOP檢討。

預防廢氣處理系統爆炸的安全對策措施


- **VOC廢氣處理設備的規劃**，要妥善考慮各種可能工況
- **高溫熱處理的VOC廢氣處理設備**必須保持母火常燃
- **高濃度VOC廢氣**要採用適當處理對策
 - 預處理或回收
 - 不宜加空氣稀釋或與低濃度VOC廢氣混合稀釋
 - 必須有適當措施避免回火發生燃爆意外
 - 高濃度VOC廢氣必須與低濃度VOC廢氣分流處理
- **低濃度VOC廢氣**也要有適當的防爆處理對策
 - 設置火焰防阻器或加裝適當的壓力爆裂片
 - 以爆炸下限25%(v/v)為濃度設防值
 - 廢氣管道必要時應加裝爆裂片，保護系統設備
- **VOC廢氣處理設備**必須採用防爆設計



VOC廢氣管道安全設計要點

- VOC廢氣管道設計、安裝時須應考慮有一定的斜度，方便積液的收集與排除
 - 避免積液過多導致廢氣管變形和殘留的混合物過多引起二次爆炸
 - 廢氣支管與總管連接處加裝阻火器，以防事故狀態下的火災蔓延
 - 廢氣管道應進行定期清洗

氣體	位置	最高流速	備註
高濃度VOC廢氣	管道	15 m/s	需設有傾斜度、廢液收集緩衝槽、廢液收集系統
低濃度VOC廢氣	管道	15 m/s	需設有傾斜度、廢液收集管、清理口
廢排氣	管道、煙囪	20 m/s	排風機出入口
廢排氣	煙囪出口	30 m/s	提高Gas Plume上升高度



預防廢氣處理系統爆炸的安全對策措施

豐映科技股份有限公司

■ 高濃度VOC廢氣

- 易燃、易爆
- 濃度、流量變化快
- 夾帶粉體
- 易產生冷凝
- 傳統技術容易產生爆炸意外

■ 低濃度VOC廢氣

- 常含水分
- 熱值偏低
- 流量大
- 夾帶粉體
- 傳統技術容易回火

案例—橡膠廠VOC廢氣處理 (1)



高濃度VOC廢氣 @ 50 C

最大操作量：	410	Nm ³ /hr			
成分組成	分子量	mol%	爆炸下限 LEL%	爆炸上限 UEL%	自燃溫度 (°C)
空氣	29	37.50%			
氫氣	2	39.60%	4	74.2	573.8
水	18	10.40%			
甲烷	16	7.90%	5	15.4	537
丁醛	72	1.80%	1.9	12.5	218
丁醇	74	1.20%	1.45	11.25	343
戊烷	72	1.20%	1.5	7.8	260
丁烷	58	0.30%	1.8	8.4	287
甲基丁醇	88	0.10%	1.2	9	340

- 廢氣含VOC、氧氣，有爆炸風險。
- 廢氣含水分10.4%

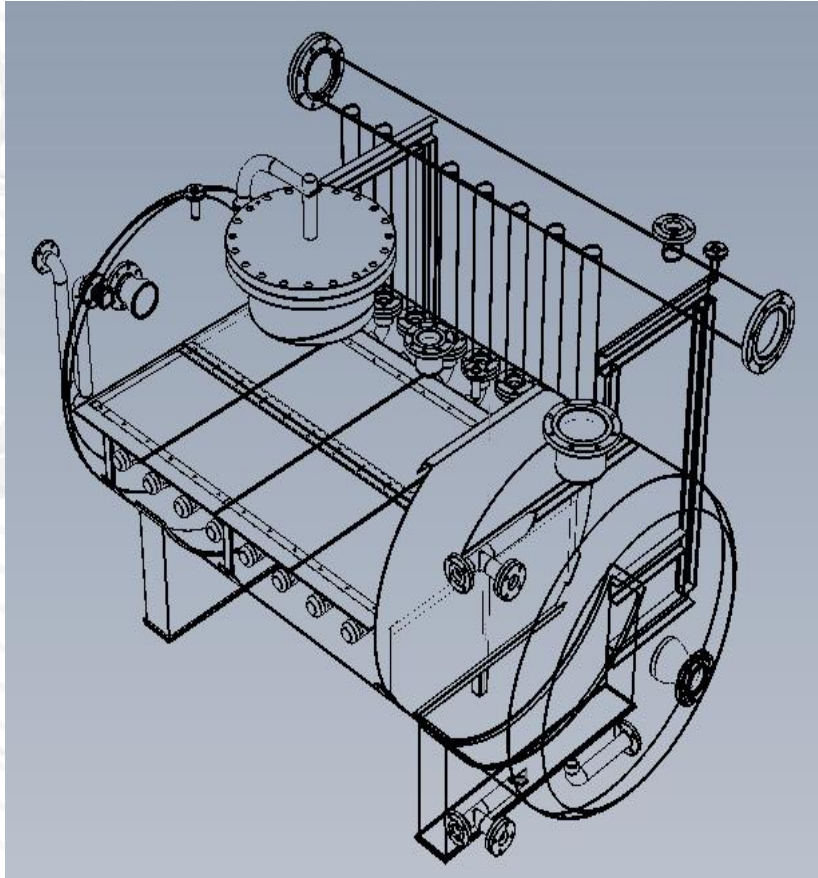
低濃度VOC廢氣 @ 100 C

成分組成	分子量	mol%	爆炸下限 LEL%	爆炸上限 UEL%	自燃溫度 (°C)
Hexane	86.18	0.0008%	1.2	7.7	234
ENB	120.19	0.0006%			
水	18	20.5833%			
Air	28.9	79.4152%			

- VOC濃度極低。
- 廢氣含水分20.58%

	高濃度VOC廢氣	低濃度VOC廢氣
前處理	防爆水封過濾系統 防爆緩衝槽	臥式濕式旋風分離器 多管式旋風分離器 袋式集塵器 濃縮系統 矽藻土轉輪濃縮器 活性炭吸附、脫附
處理技術	高溫脈衝波反應器 (PDR) 廢氣燃燒機	RTO RCO DFTO

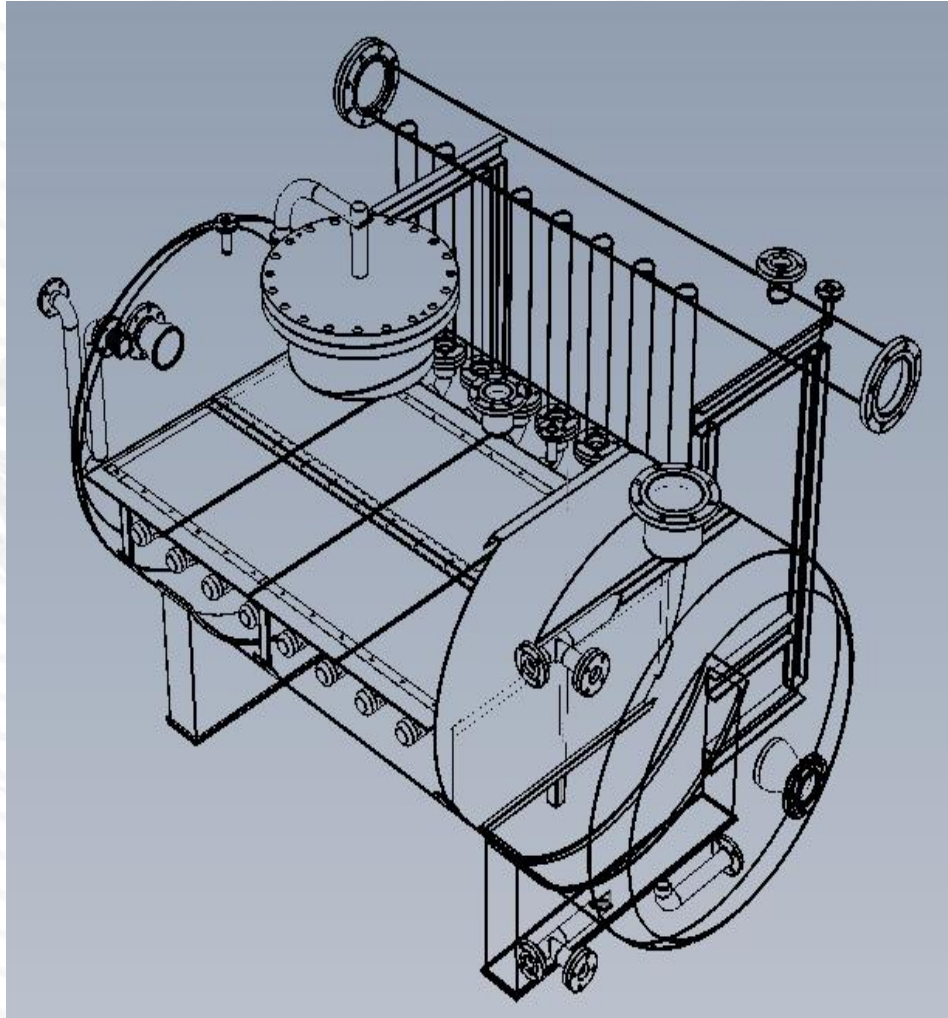
技術	使用範圍	使用濃度範圍
防爆水封槽	高濃度VOC廢氣的 防火、去除粒狀物、 除水	無限制
臥式濕式旋風 分離器	低濃度VOC廢氣的 防火、去除粒狀物、 除水	0-5000 ppm



- 流體力學分散氣泡
- 防阻回火

附屬設備

- 粉體連續過濾模組
- 重力油水分離器
- 降溫熱交換器
- 除霧器

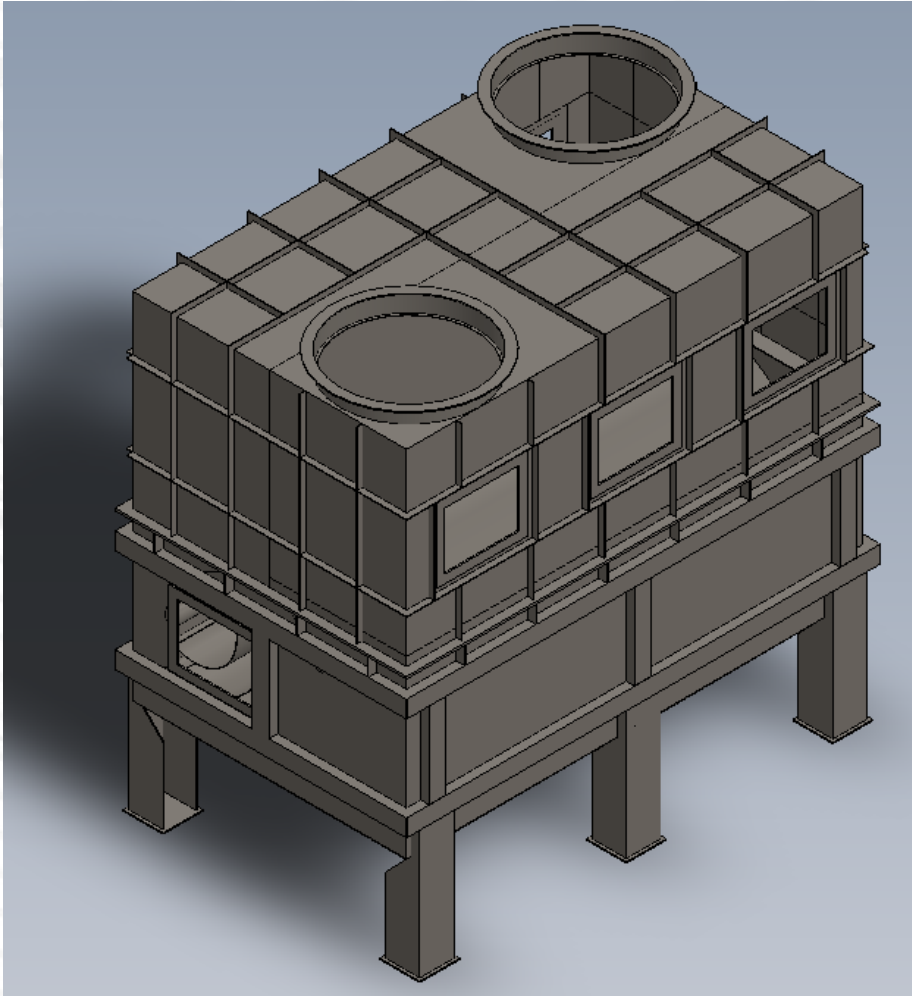


- 使用于高濃度VOC廢氣
- 水封防阻回火

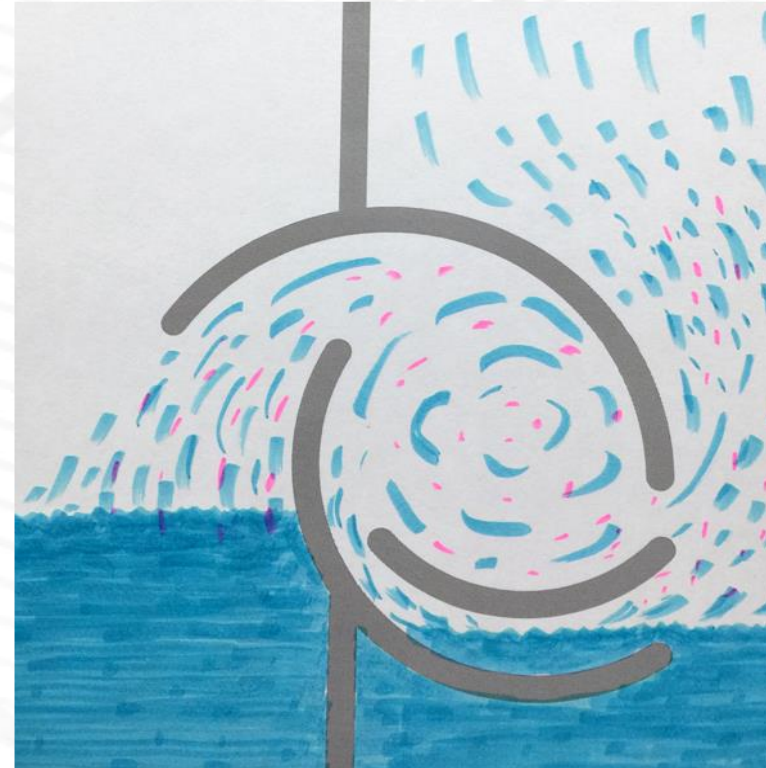
主要功能

- 防止高濃度VOC廢氣產生回火意外
- 粉體連續過濾模組去除VOC廢氣中的粉體
- 重力油水分離器將VOC冷凝液分離，利用輸送系統打到VOC處理設備焚化
- 降溫熱交換器控制VOC廢氣的水分含量
- 除霧器徹底去除氣體流動帶出的液滴

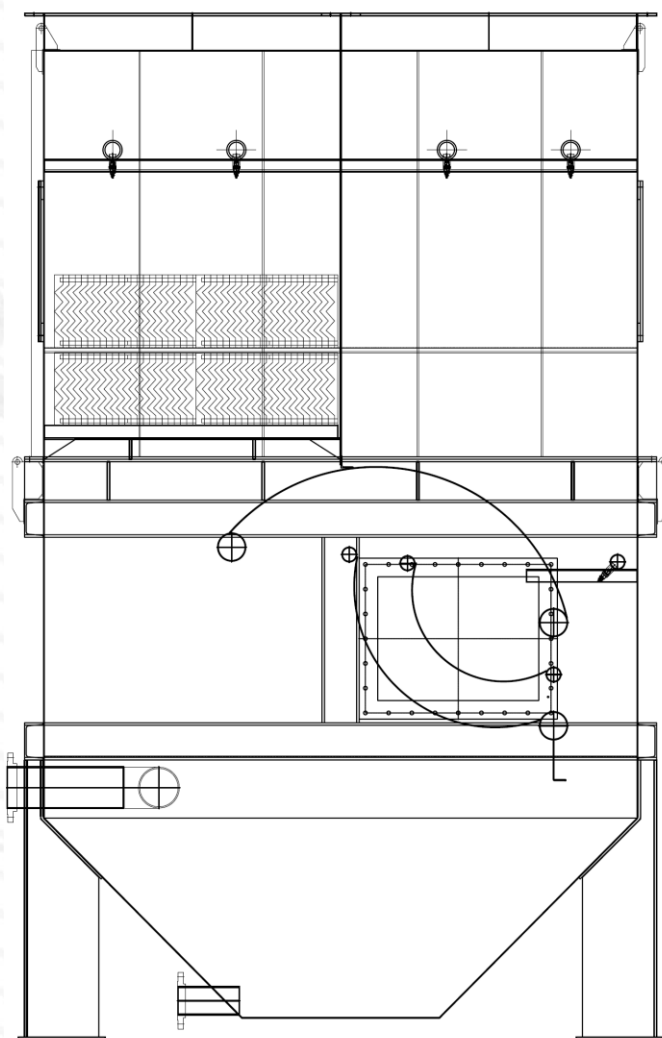
RESI 臥式濕式旋風分離器基本原理



- 粉體增濕、液滴包覆
- 旋風離心力分離



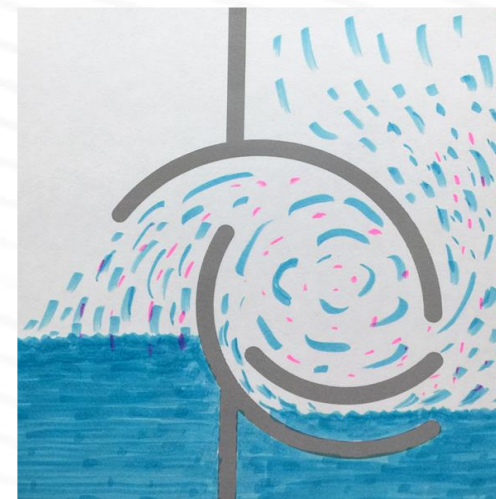
RESI 臥式濕式旋風分離器

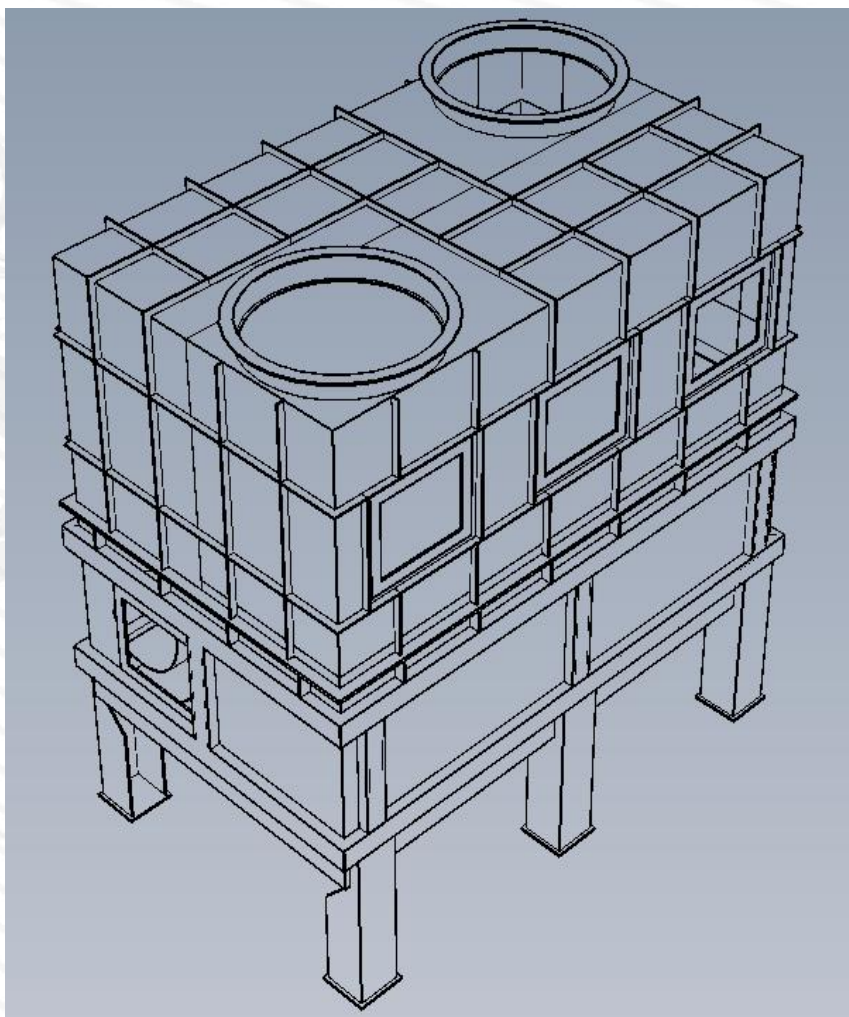


- 高效率霧化增濕
- 臥式旋風分離

附屬設備

- 粉體連續過濾模組
- 重力油水分離器
- 降溫熱交換器
- 除霧器



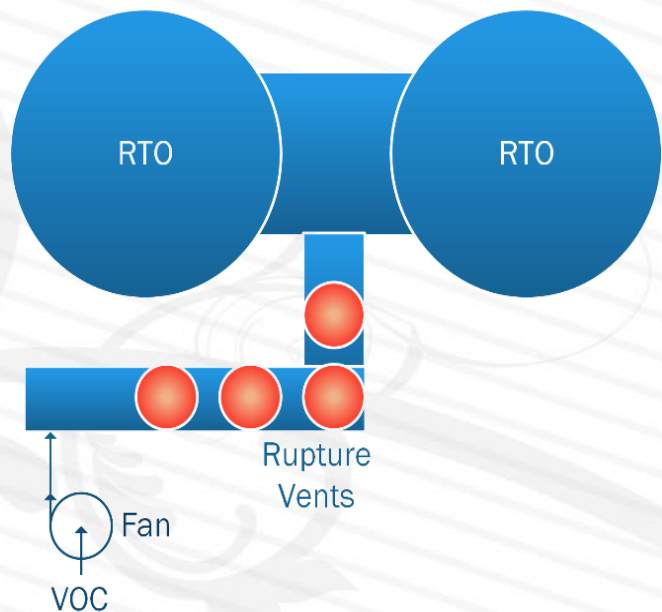


- 使用於低濃度VOC廢氣
- 水封防阻回火、有效分離粉體

主要功能

- 粉體連續過濾模組去除VOC廢氣中的粉體
- 重力油水分離器將VOC冷凝液分離，利用輸送系統打到VOC處理設備焚化
- 降溫熱交換器控制VOC廢氣的水分含量
- 除霧器徹底去除氣體流動帶出的液滴

增設防爆蓋—低強度結構排氣



		Section 1	Section 2	Section 2
Internal Surface Area	m ²	25.13	142.75	142.75
P_{vent}	Bar	0.0791	0.2836	0.1595
P_{design}	Bar	0.0791	0.0900	0.0900
A_{vent}	m ²	4.02	12.06	16.08
Diameter	m	1.60	1.60	1.60
Number of Vents		2	6	8

依據NFPA-68計算建議：

Section 2&3 不可分離。必須一起計算。

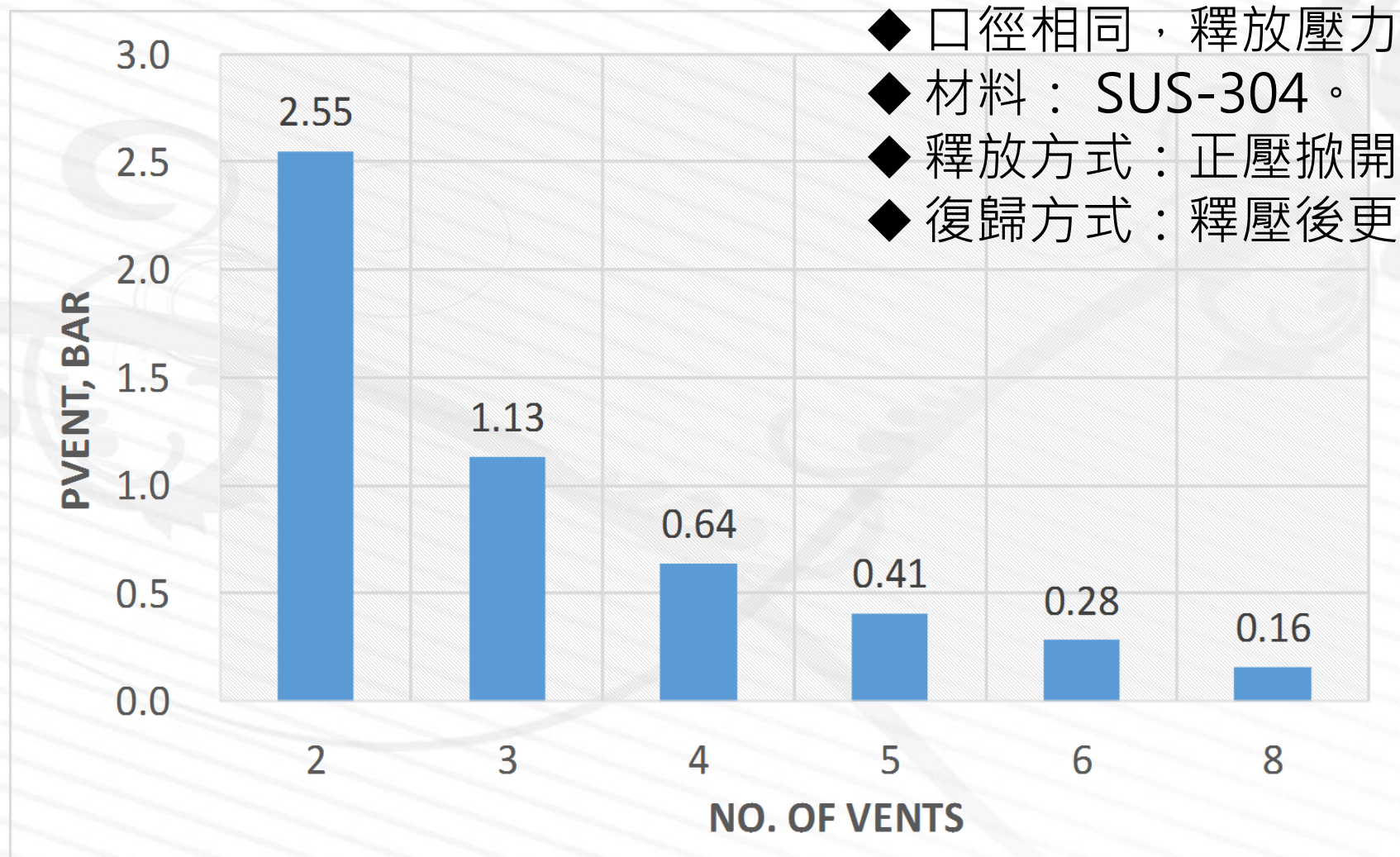
section 1 作兩組防爆蓋，D=1600 mm；釋放壓力0.0791 Bar。

section 2 作六組防爆蓋，D=1600 mm；釋放壓力0.2836 Bar。

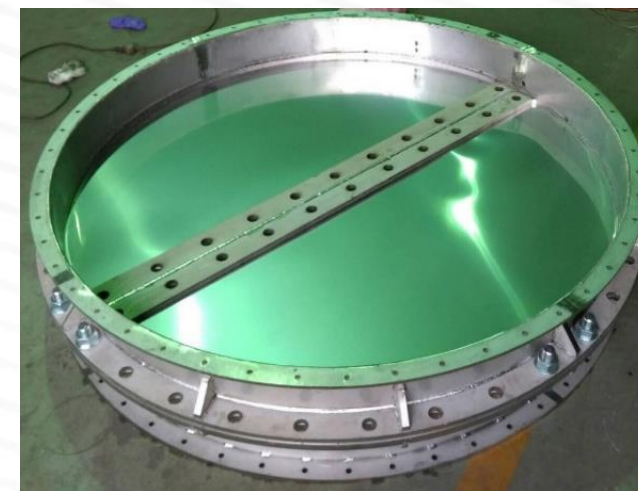
section 2 作八組防爆蓋，D=1600 mm；釋放壓力0.1595 Bar。

作動時，防爆蓋會破裂作系統保護。

增設防爆蓋—低強度結構排氣



- ◆ 口徑相同，釋放壓力均設定900 mmH₂O。
- ◆ 材料：SUS-304。
- ◆ 釋放方式：正壓掀開破裂片上蓋。
- ◆ 復歸方式：釋壓後更換劈裂片復歸。



The information contained herein is the exclusive property of RESI and shall not be distributed, reproduced, or disclosed in whole or in part without prior written permission of RESI.

整合傳統與創新技術……

高溫脈衝波反應器--PDR技術

豐映科技股份有限公司



*“I find out what the world needs,
then I proceed to invent it.”*

技術發展的遠景與目標

● 化工產業VOC廢氣處理的困境

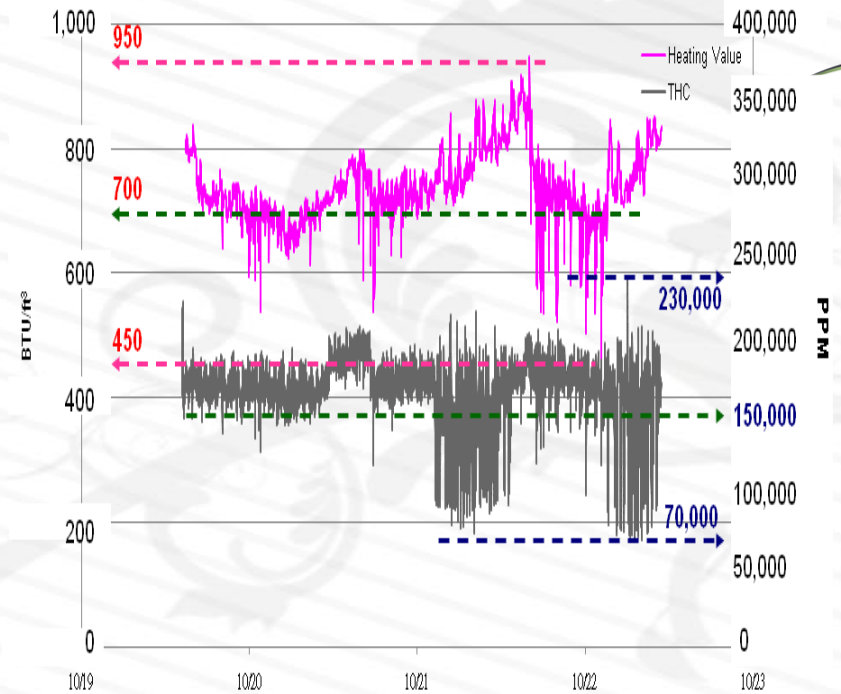
- VOC廢氣濃度變化快速、流量變化快速
- 傳統技術：解決環保問題→
實證 100% 發生爆炸、回火意外

● 傳統火炬已經使用100年

- 能源浪費、環境污染

● 本發明：創新的PDR技術

- 提供安全的VOC處理方案
- 解決污染，回收能源、創造利益
- 在10年內讓世界上一半的火炬熄火！



示範與實證

石化廠實際建廠示範·連續操作



市場拓展策略

技術授權-2016遼寧潤鋒科技集團公司

技術合作-2015台灣中鼎集團之新鼎系統公司

核心技術PDR

發明專利 I 448657

新型專利 M440814

中國發明專利 ZL 2012 1014 3533.6

發展系統整合技術

發明專利 I504844

新型專利 M464636

中國發明專利 ZL 2012 1054 8700.5

發展防爆技術

發明專利 I 432666

新型專利 M429791、M429756

8項 工研院防爆認證

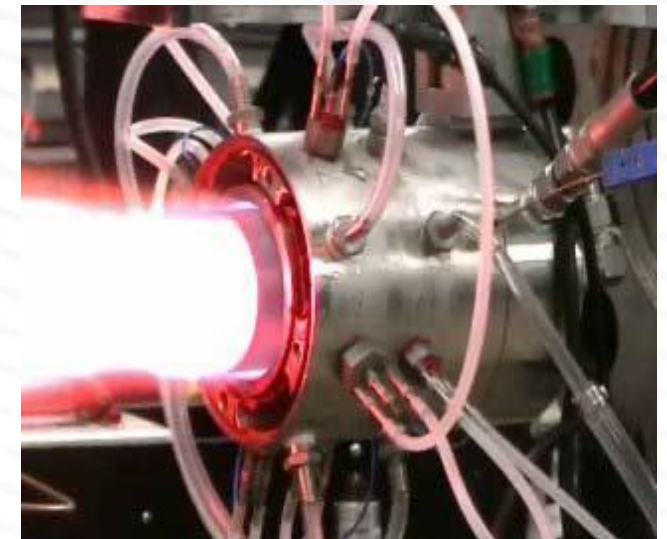
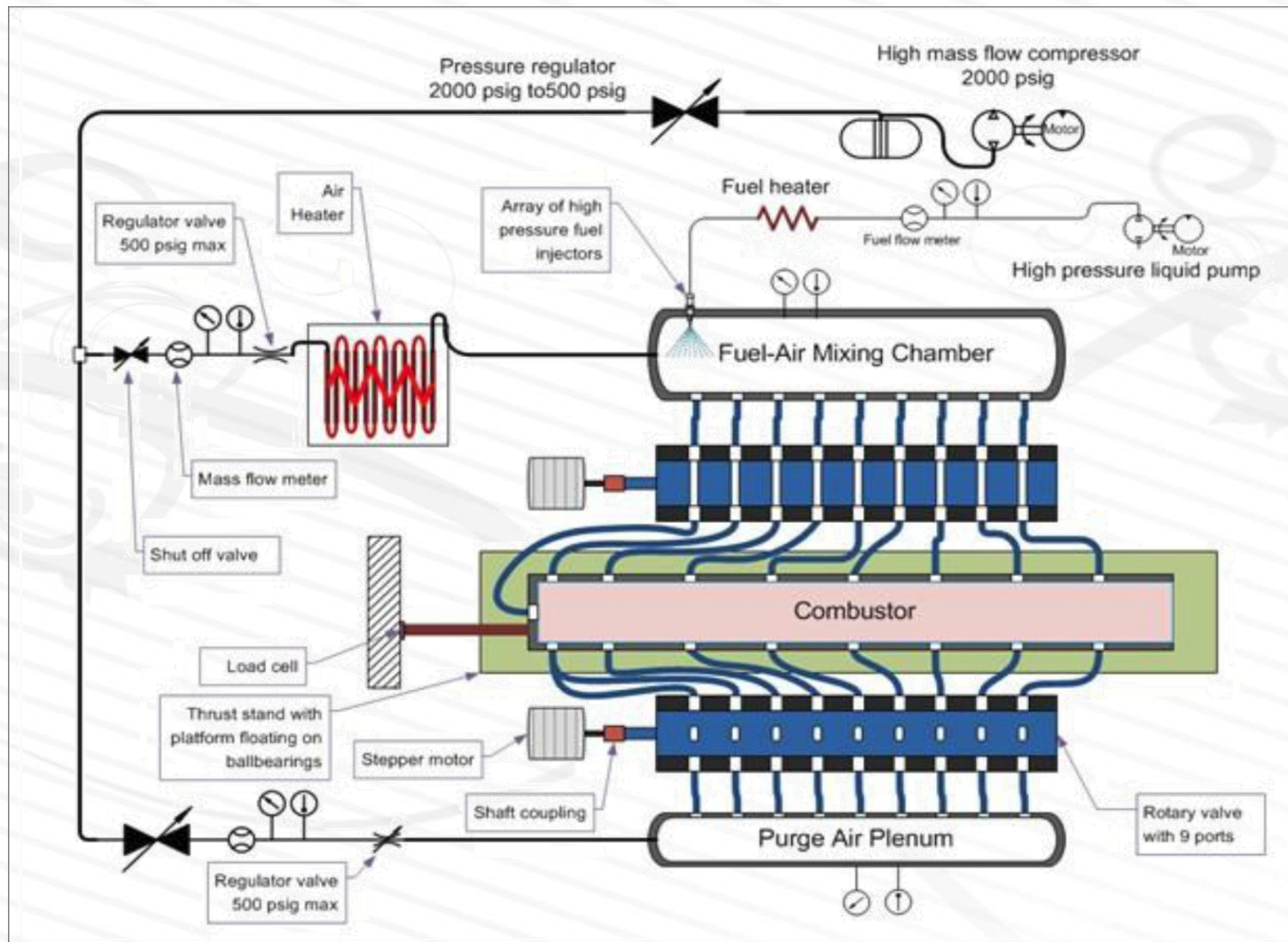
防爆VOC廢氣處理暨能源回收技術 (發明人：張榮興)



專利編號		專利名稱
發明專利	I 448657	一種使用氣體逆流爆轟衝擊波的連續化學反應方法及應用該方法之爆轟反應器
新型專利	M440814	用於有害化學廢氣處理的高溫脈衝波反應器
發明專利	ZL 2012 1014 3533.6	一種連續化學反應方法及應用該方法之爆轟反應器
發明專利	I504844	一種揮發性有機化學廢氣處理並回收能源的方法及使用該方法的蓄熱再生氧化型蒸氣鍋爐
新型專利	M464636	可產生蒸汽的蓄熱再生型氧化器
發明專利	ZL 2012 1054 8700.5	一種揮發性有機化學廢氣處理並回收能源的方法及裝置

專利編號		專利名稱
發明專利	I 432666	保護法蘭洩漏的火焰防阻器及火焰防阻元件
新型專利	M429791	保護法蘭洩漏的火焰防阻器
新型專利	M429756	火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00217號	FA-50、FA-25火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00218號	FA-80火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00219號	FA-100火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00425號	FA-150火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00427號	FA-125火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00216號	DFA-50、DFA-25火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00217號	DFA-100、DFA-80火焰防阻器
防爆認證	工電2013第00426號	DFA-150、DFA-125火焰防阻器

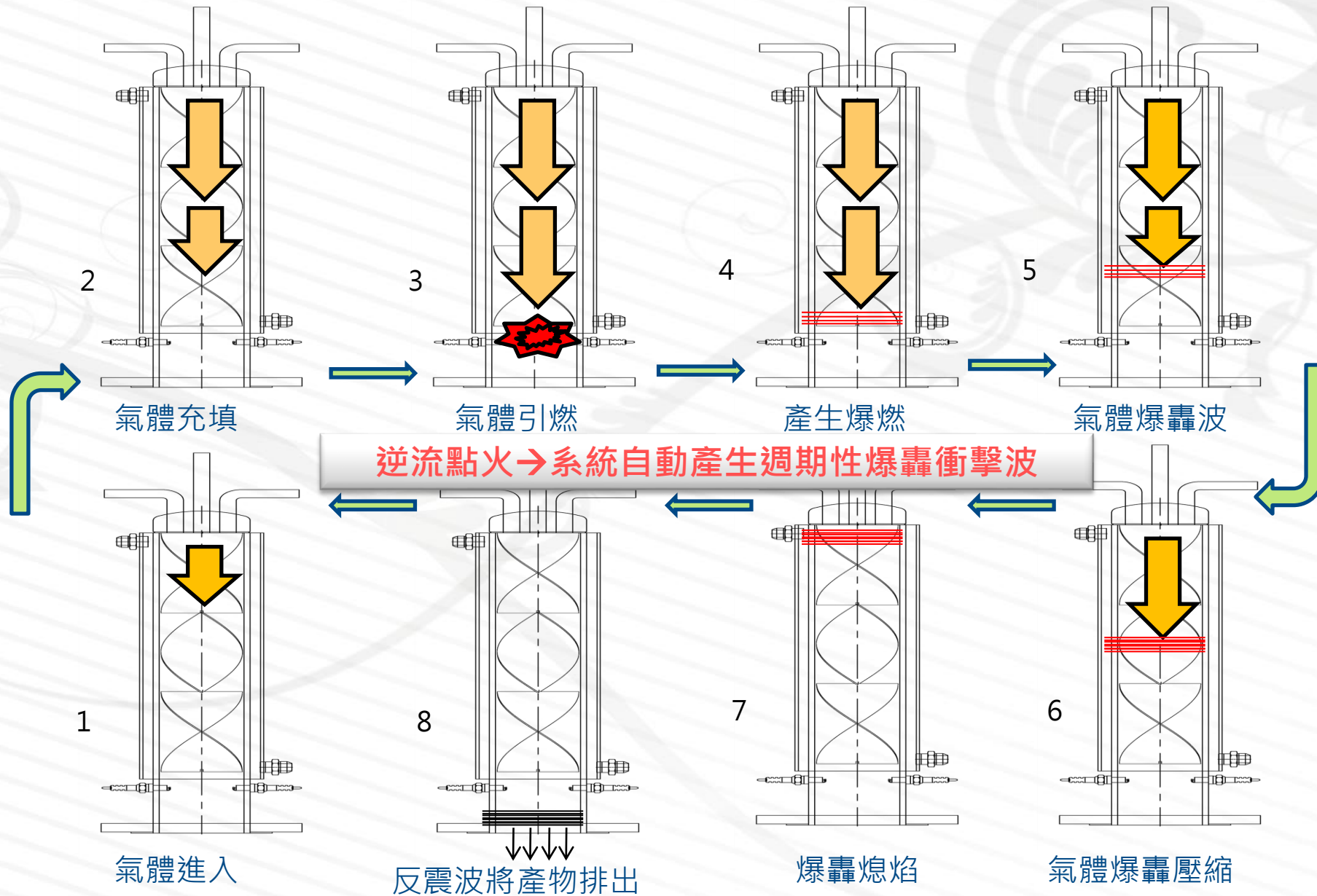
Pulse Detonation Engine, USA, 2011

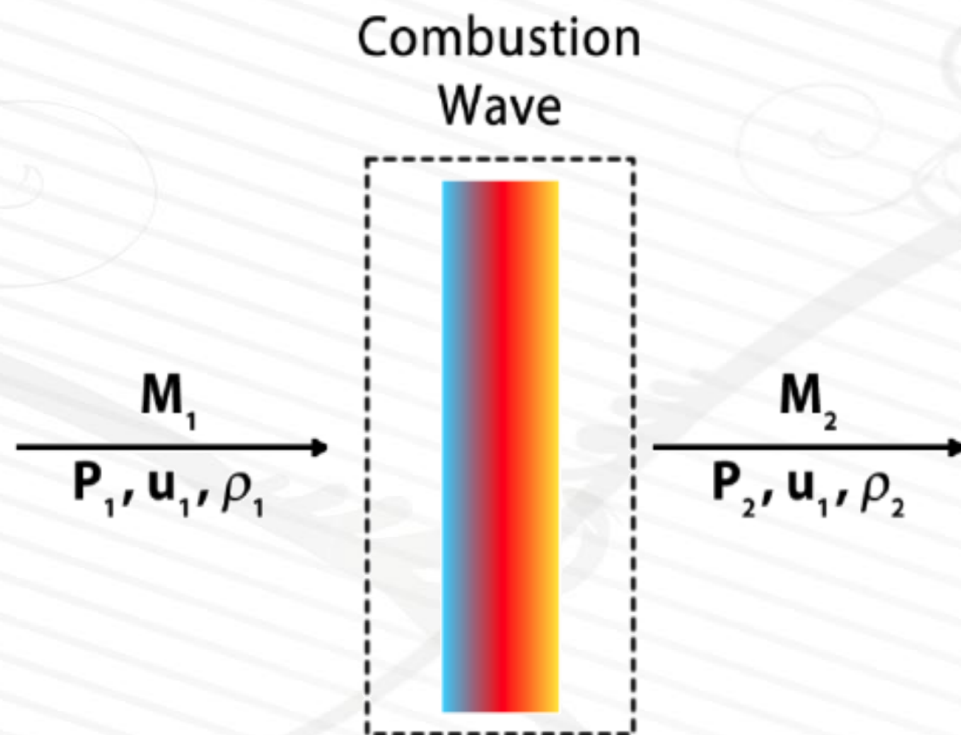


Pulse Detonation Engine, Soviet Union · 2016



創新的高溫脈衝波反應器 Pulse Detonation Reactor (PDR)





創新實證的VOC處理技術



發明基本原理

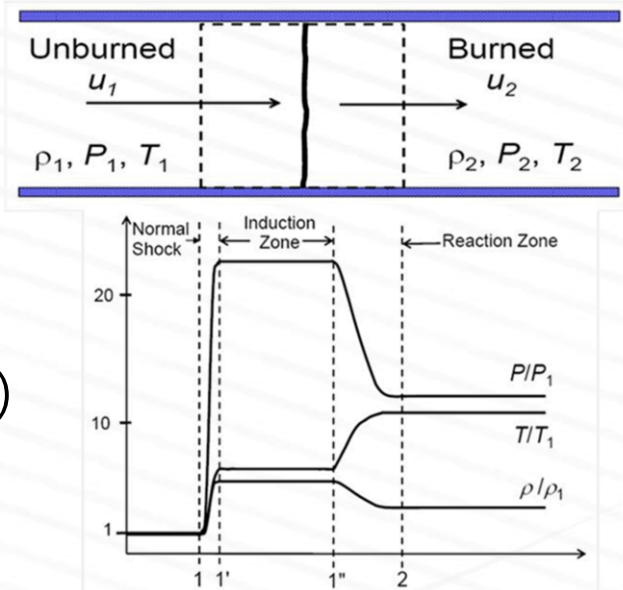
- 在可控制的空間、利用可控制的逆流爆轟技術進行VOC廢氣破壞
- 類似汽車引擎的高溫爆轟反應器
 - 能量密度：爆轟技術/燃燒技術=10⁸倍
 - 利用高溫脈衝波徹底破壞VOC；操作安全、性能穩定

創新技術的實體驗證

- 在國內石化廠進行實際建設使用、驗證

理論分析

- 質量守恆： $\rho_1(D-u_1) = \rho_2(D-u_2)$ (1)
- 動量守恆： $P_2 - P_1 = \rho_1(D-u_1)(u_2 - u_1)$ (2)
- 能量守恆： $E_2 - E_1 = \frac{1}{2}(P_2 + P_1)(V_1 - V_2) + \lambda Q$ (3)
- 狀態方程式： $E = E(P, V)$ (4)
- C-J條件： $D - u_2 = C_2$



- 將質量守恆 (1) 、能量守恆 (2) 方程式用無因次參數表達，可以得到火焰速度與波面兩側狀態參數的關係式

- $$\frac{P_1}{P_2} - 1 = \gamma_1 M_1^2 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (5)$$

- $$M = \frac{(D_2 - u_1)}{c_1} \quad (6)$$

- 其中M為火焰面相對於前驅衝擊波通過後的狀態的馬赫數，c為音速。

- 將能量守恆、狀態方程式用無因次表示可以得到Hugoniot方程式，

- $$\left(\frac{P_2}{P_1} + \alpha\right) \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - \alpha\right) = \beta \quad (7)$$

- 其中

- $$\alpha = \frac{\gamma_2 - 1}{\gamma_2 + 1} \quad (8)$$

- $$\beta = \alpha \left[\left(\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} + \frac{2\gamma_1 H}{c_1^2} \right) - \alpha \right] \quad (9)$$

聯立求解方程式 (5) 和方程式 (7) , 可求得火焰陣面後的氣體密度參數與壓力參數為 :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\gamma_1(\gamma_2+1)}{\gamma_2(\gamma_1+v+A)} \quad (10)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\gamma_1+v+\gamma_1 A}{(\gamma_2+1)v} \quad (11)$$

其中

$$v = \frac{1}{M_1^2} = \frac{c_1^2}{(D_2-u_1)^2} \quad (12)$$

$$A = \sqrt{\left[\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} - v \right)^2 - Kv \right]} \quad (13)$$

$$K = 2 \left[\frac{\gamma_1(\gamma_2-\gamma_1)(\gamma_2+1)}{\gamma_2^2(\gamma_1-1)} + \frac{\gamma_1^2(\gamma_2-\gamma_1)H}{\gamma_2^2 c_1^2} \right] \quad (14)$$

- CJ爆轟速度或者CJ爆燃速度值可以通過唯一解的條件A=0得出，其對應的CJ壓力 P_{CJ} 及CJ氣體體積 V_{CJ} 分別為：

- $$u_{CJ} = \frac{D - \frac{\gamma_1 P_1}{\rho_1 D}}{\gamma_1 + 1} \quad (15)$$

- $$P_{CJ} = \frac{P_1 + \rho_1 D^2}{\gamma_1 + 1} \quad (16)$$

- $$V_{CJ} = \frac{\gamma_1 (P_1 + \rho_1 D^2)}{(\gamma_1 + 1) \rho_1^2 D^2} \quad (17)$$

- 其中

- $$D = \sqrt{\frac{2\gamma P_1 + 2(\gamma_1^2 - 1)\rho_1 H + \sqrt{[2(\gamma_1^2 - 1)\rho_1 H]^2 + 2\gamma_1(\gamma_1^2 - 1)P_1\rho_1 H}}{2\rho_1}} \quad (18)$$

- $$v_{CJ} = \frac{1}{M_{CJ}^2} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{K}{2}\right) \pm \left[\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{K}{4}\right) K\right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

爆轟與燃燒的比較

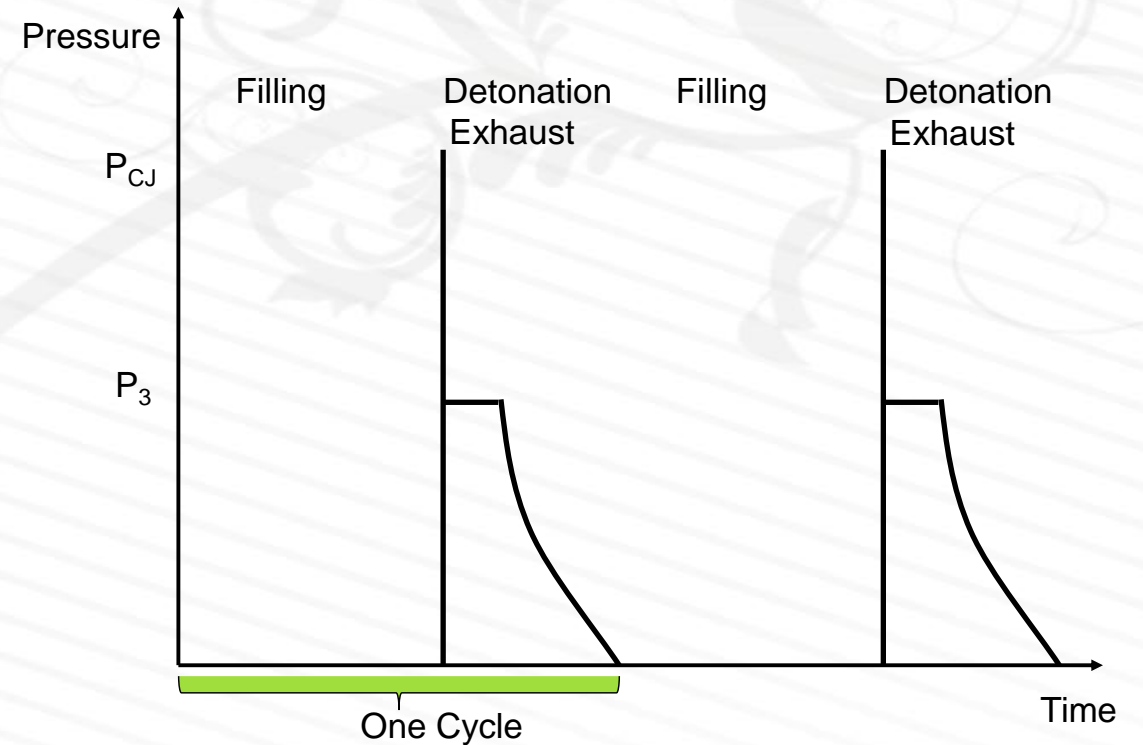
■ 爆轟

- 爆轟是以反應波的形式按照一定的速度傳播前進、自動進行。
- 爆轟衝擊波傳遞速度 D 為燃燒熱函數
 - 氣體的燃燒熱越大，則爆轟衝擊波傳遞速度 D 也越大。
- 爆轟是利用爆炸衝擊波的強大衝擊壓縮作用將能量傳遞給未燃燒反應物。
- 爆轟衝擊波速度遠大於聲速
 - 其速度一般高達每秒數千公尺
- 爆轟衝擊波的傳遞速度極快，且幾乎不受外界條件的影響，其爆轟速度在一定條件下是一個固定的常數。

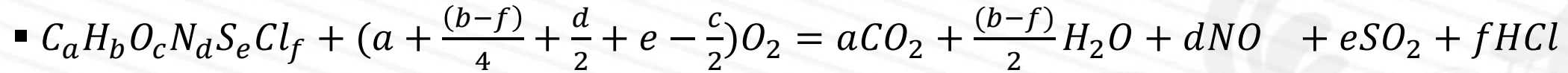
■ 燃燒

- 燃燒反應的能量是經由熱傳導、熱輻射及燃燒氣體產物的擴散作用傳遞到尚未燃燒的反應物；
- 燃燒反應的傳遞速度通常低於音速，每秒數毫米到每秒數公尺；
- 傳統的燃燒過程的傳播，易受外界條件尤其是環境壓力的影響；

- 高溫脈衝波反應器PDR會根據高濃度VOC廢氣的流量而重複產生高溫脈衝波，其頻率可以從每秒幾次到每秒數千次。



PDR理論分析-- VOC廢氣及空氣在反應器中充填



- 假設VOC廢氣及空氣混合物在PDR內的流速為 Q (m^3/s)，PDR的直徑為 D_t (m)，PDR點燃點到燃料供應端底部的長度為 L (m)。則VOC廢氣充填PDR反應器所需時間為：

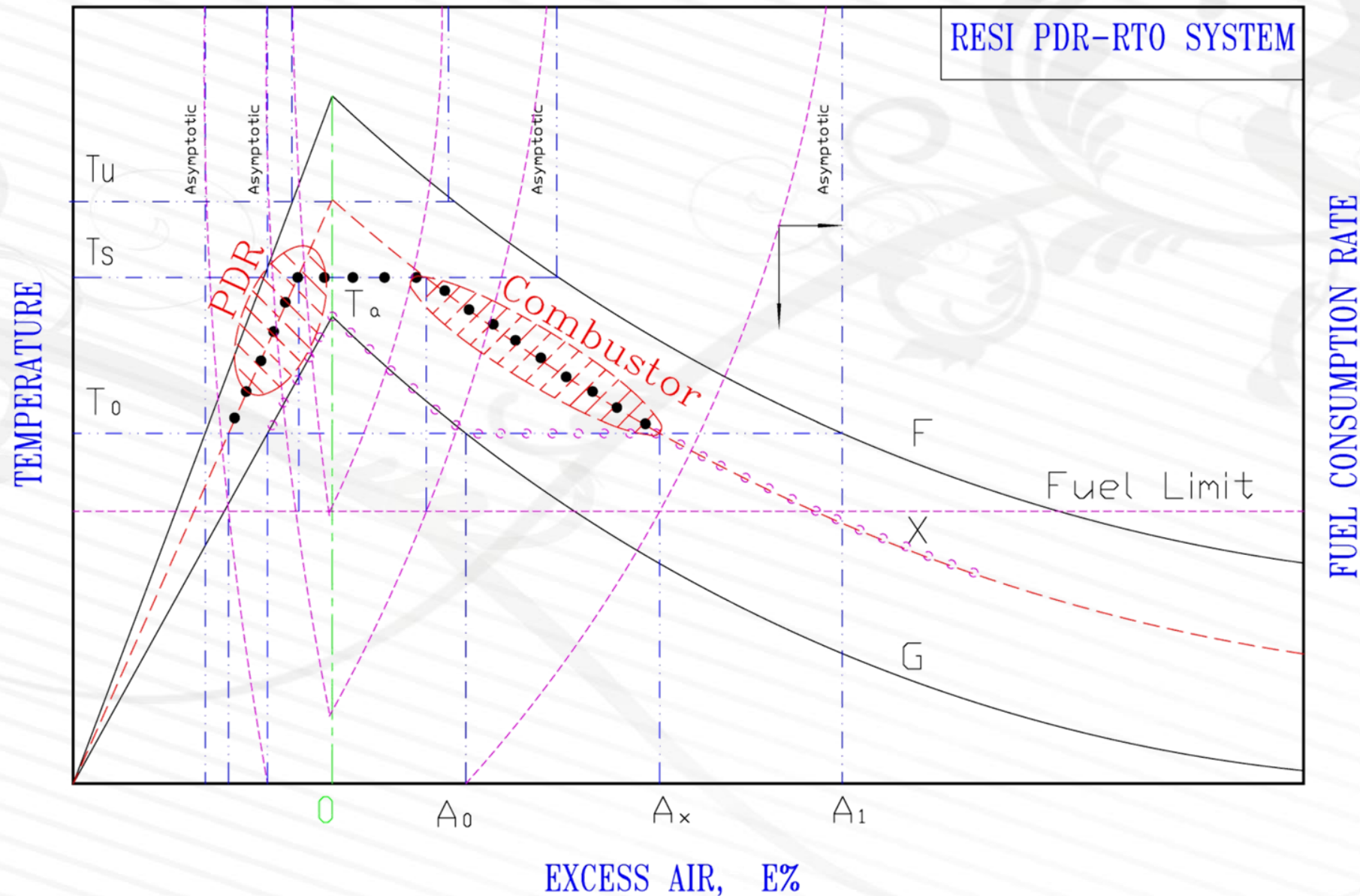
$$t_f = \frac{V}{Q} = \frac{\pi}{4} D_t^2 L / Q \quad (20)$$

- 其中

$$Q = Q_{VOC} \left\{ 1 + (1 - \omega\%) \frac{\varphi \varepsilon}{0.21} \right\}$$

$$\varphi = \text{VOC廢氣燃燒的理論計量空氣比} ; \varphi = a + \frac{(b-f)}{4} + \frac{d}{2} + e - \frac{c}{2}$$

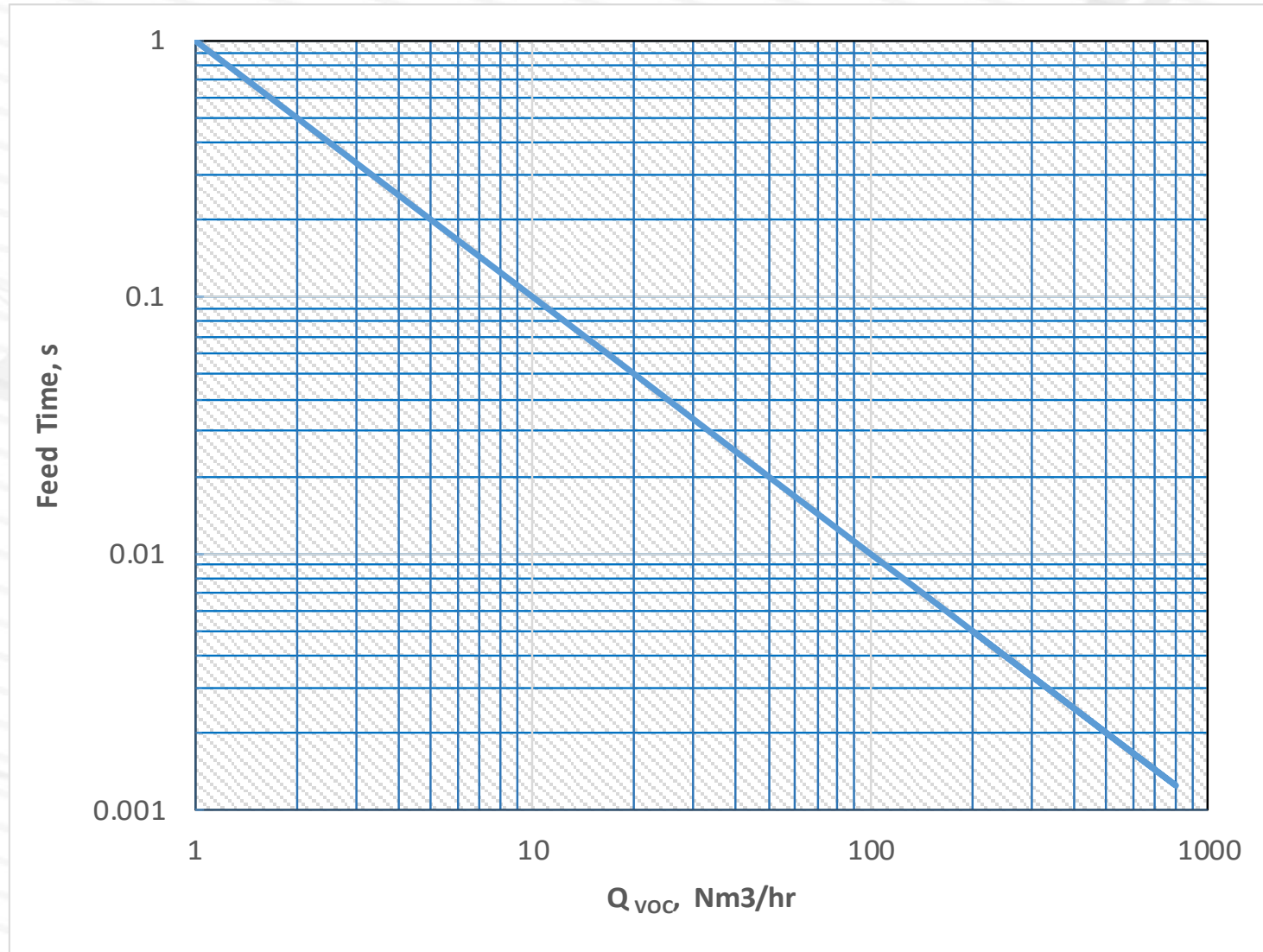
- ε =空氣化學計量比， $\varepsilon=1$ 表示等於理論計量空氣，亦即過剩空氣比等於0的情況。如圖-8所示，PDR通常操作在 $\varepsilon < 1$ 。



PDR理論分析-- VOC廢氣及空氣在反應器中充填

- 以環己烷 (C_6H_{12} 50% , N_2 50%) 為例
 - PDR : 直徑80 mm , 長度1.0 m
 - VOC廢氣流量為 $Q_{VOC} = 200$ NCM且空氣化學計量比 $\varepsilon = 0.8$ 。
- $\omega\% = 50\%$; $a = 6$, $b = 12$, $c = d = e = f = 0$, 因此 , $\varphi = a + \frac{(b-f)}{4} + \frac{d}{2} + e - \frac{c}{2} = 9$ 。
- 混合氣體流量為 $Q = Q_{VOC} \left\{ 1 + (1 - \omega\%) \frac{\varphi \varepsilon}{0.21} \right\} = Q_{VOC} \{ 1 + 21.43\varepsilon \} = 3628.6$ CMH。
- $t_f = \frac{V}{Q} = \frac{\pi}{4} D_t^2 L / Q = 0.005$ 秒。
- 混合氣體的充填時間 t_f 與VOC廢氣流量 Q_{VOC} 成反比 , VOC廢氣流量越快混合氣體的充填時間 t_f 越短。

PDR理論分析-- VOC廢氣及空氣在反應器中充填



PDR理論分析--起爆

- VOC廢氣與空氣混合物在PDR內被點燃後，藉著PDR內部的氣體混合器作用，很快就轉化成爆轟衝擊波。
 - PDR的點火器使用直流高壓電流供應器提供尖端放電產生電漿點火。
 - 為了確保點火器的正常運作，PDR內部的點火器通常作成多組並聯使用，並附有電流檢測、安全連鎖。
- 進一步確保PDR的操作安全
 - 豐映科技公司通常設定燃燒室溫度保護下限高於VOC廢氣的自燃溫度 $T_{comb} > T_{AIT}$ 。
 - 當燃燒室溫度 T_{comb} 高於VOC廢氣的自燃溫度 T_{AIT} 後，才容許將VOC廢氣導入PDR。

PDR理論分析--爆轟衝擊波逆流

- 爆轟衝擊波是一股伴隨著化學反應的超音速衝擊波。
 - 爆轟衝擊波的速度 U_{CJ} ，
 - 爆轟衝擊波後的壓力 P_{CJ}
 - 為氣體混合物的成分與其熱力學性質的函數。
- 在爆轟衝擊波之後的流體流動速度相對於爆轟波為音速。
- 爆轟衝擊波追逐燃料（即高濃度VOC廢氣）逆流回VOC廢氣供應端，所需時間為：
- $t_1 = L/U_{CJ}$ (21)

- 爆轟衝擊波逆流時間很短
 - 常壓下可燃性氣體與空氣混合物的爆轟衝擊波速度 U_{CJ} 大約為1800 m/s
 - 爆轟衝擊波由點燃起爆點開始逆流到PDR反應器底部所需時間約為0.00056秒。
 - 約只為氣體充填時間的十分之一左右。

PDR理論分析--爆轟產品排出

- 爆轟衝擊波以速度 U_{CJ} 與爆轟衝擊波後的壓力 P_{CJ} 拍擊VOC供應端板後，由於瞬間燃料供應消失，使得爆轟衝擊波熄焰。
- 氣體會由壓力 P_{CJ} 膨脹將燃燒產物排出。

$$t_2 = \alpha L / c_3 \quad (22)$$

- 爆轟衝擊波的頻率：
 - PDR高溫脈衝波反應器週期為充填時間 t_f 、爆轟衝擊波逆流時間 t_1 及爆轟產品排出時間 t_2 的和。

$$f = \frac{1}{t_f + t_1 + t_2} \quad (23)$$

燃料	胞格寬度 λ (mm)	
	氧氣	空氣
氫氣	1.3	10.9
乙炔 C_2H_2	0.109	5.8
甲烷 CH_4	8	280
乙烷 C_2H_6	-	51
丙烷 C_3H_8	2.5	51.3
煤油 $C_{11}-C_{17}$	30	-

- 氣體爆轟波陣面都具有複雜的三維結構。爆轟波在圓管中傳播時，可以觀察到螺旋線的痕跡，故稱此種爆轟為螺旋爆轟。
- 實驗發現除了沿爆轟波傳播方向前進的波外，還有橫向的弱激波在作週期性的脈動。

- 由於PDR高溫脈衝波反應器需要建立穩定的爆轟衝擊波，因此，在設計爆轟反應管時，其管周徑應大於爆轟波的胞格寬度 λ 才有利於產生穩定的爆轟衝擊波，亦即爆轟管的最小管徑為

- $D_t > \lambda/\pi$ (24)

- 根據實驗結果發現爆轟反應管的最小管徑最少應大於20 mm，根據實驗最好採用60 mm以上較好控制。

- 爆轟反應管的長度通常需為氣體爆轟波的胞格寬度 λ 的10倍以上。

- $L > 10 \lambda$ (25)

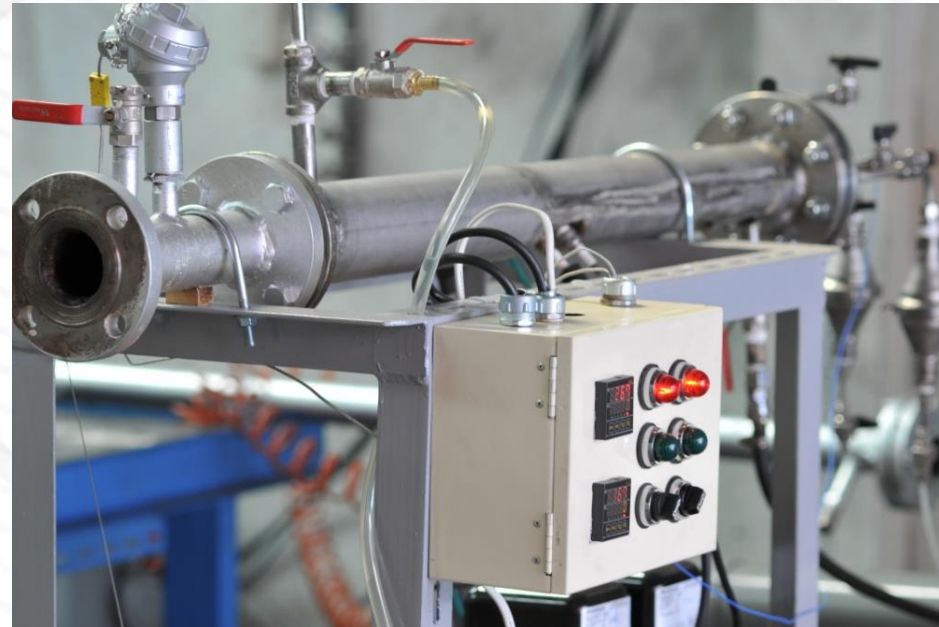
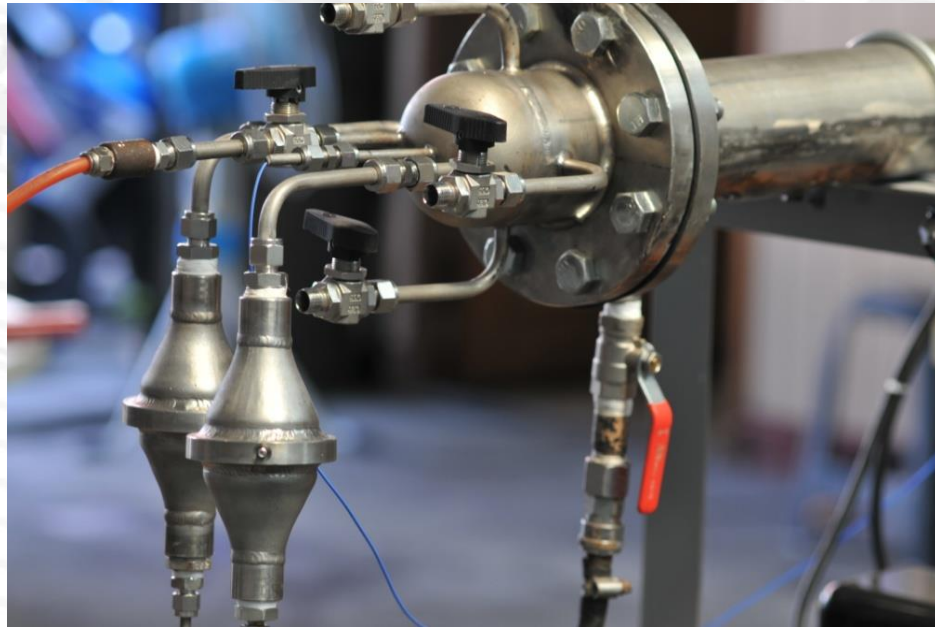
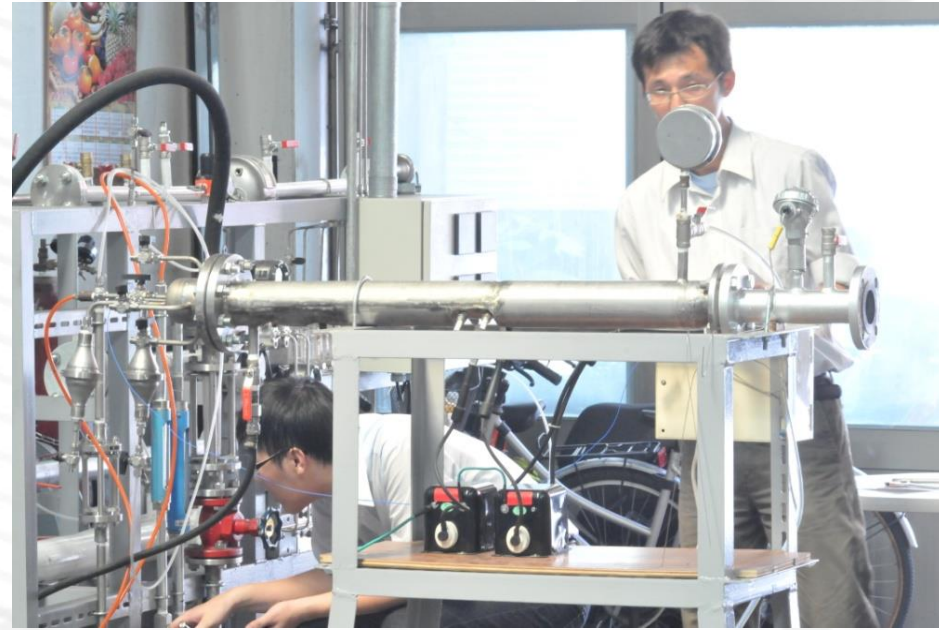
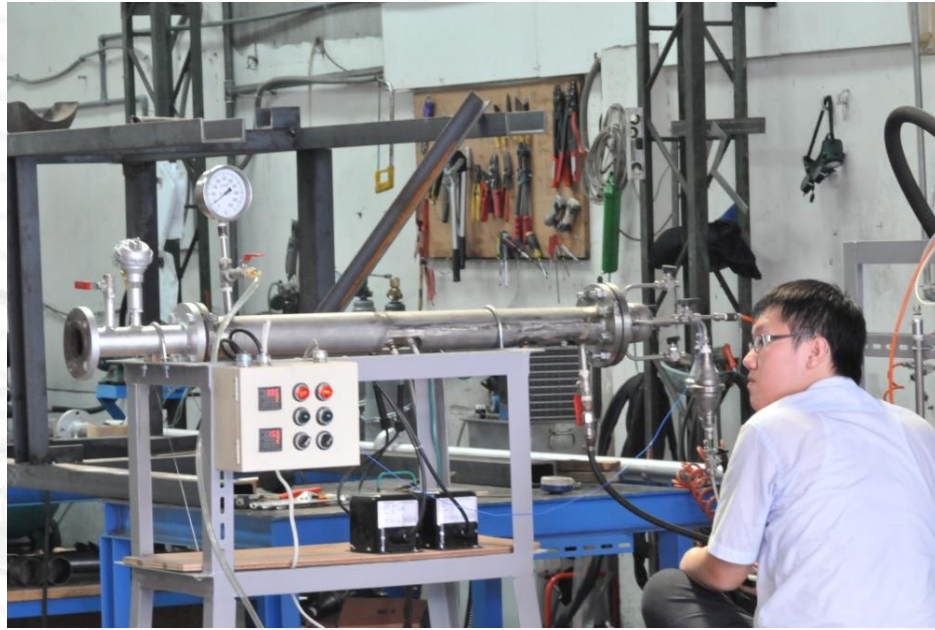
創新的RESI 高溫脈衝波反應器



The diagram shows a cylindrical reactor with a cutaway view revealing internal components. It features two large flanged ports at the top and a smaller port on the side. The text 'RESI - PDR' is printed on the side of the reactor. To the left, there are two rows of callout boxes:

- Top row: PDR (orange arrow) → 關鍵技術 (orange box) → 授權使用 (orange arrow)
- Bottom row: PDR-RTO (orange arrow) → 系統整合技術 (orange box) → 授權生產 (orange arrow)

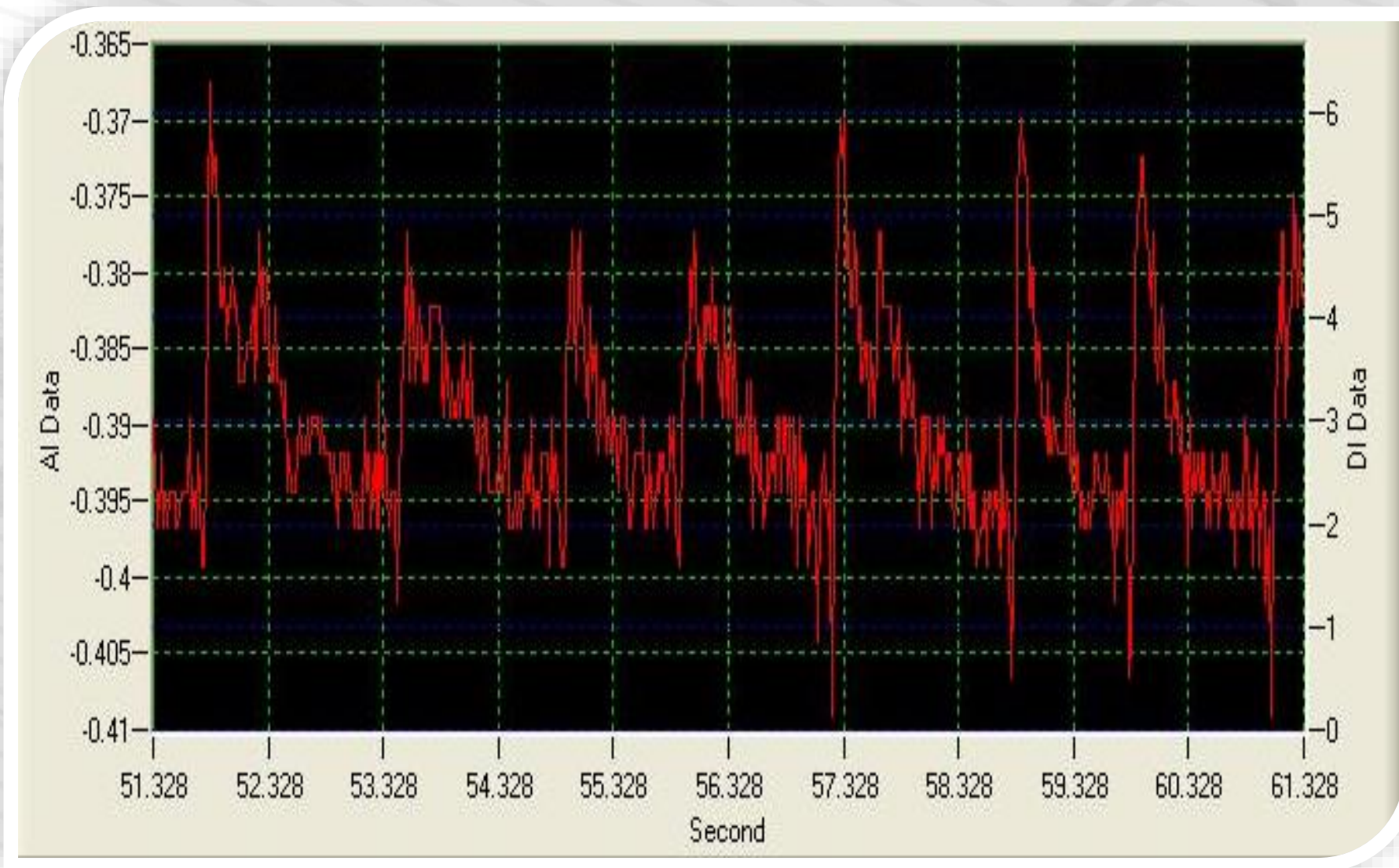
Below the reactor, the text reads: **PDR- Pulse Detonation Reactor**
Patented Technology by RESI.

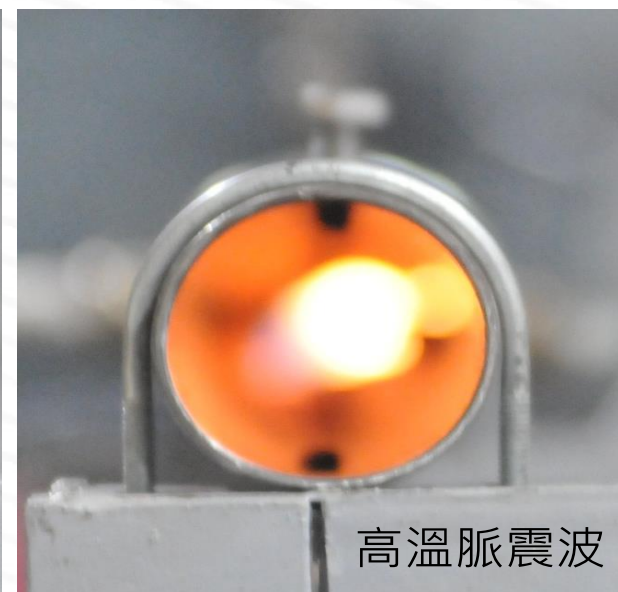
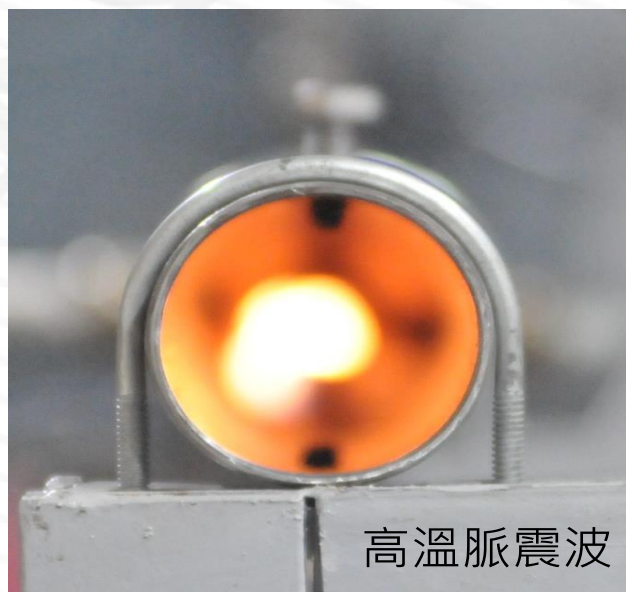
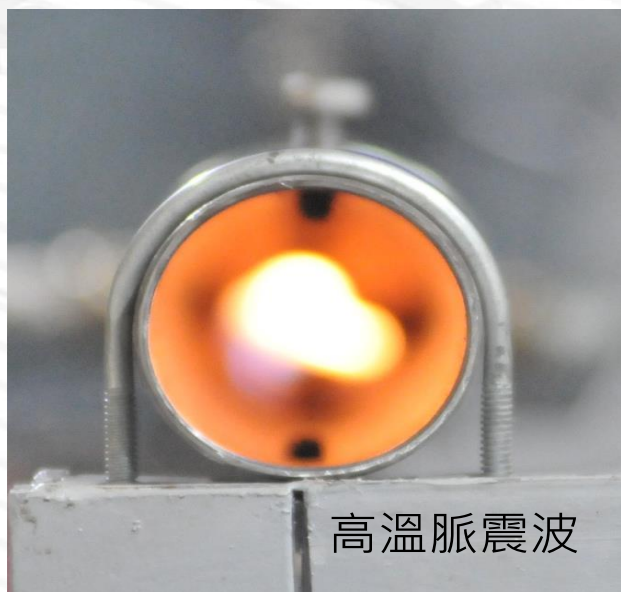
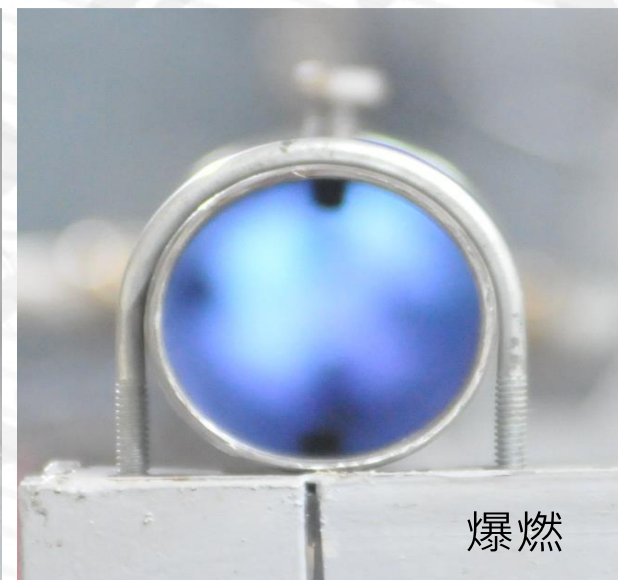
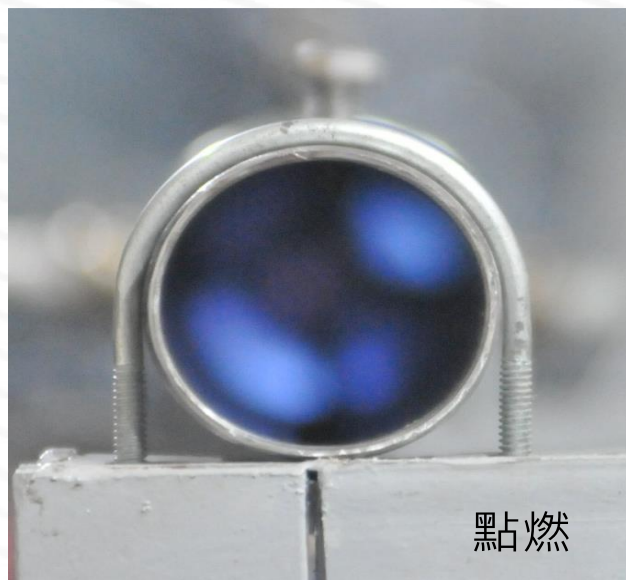
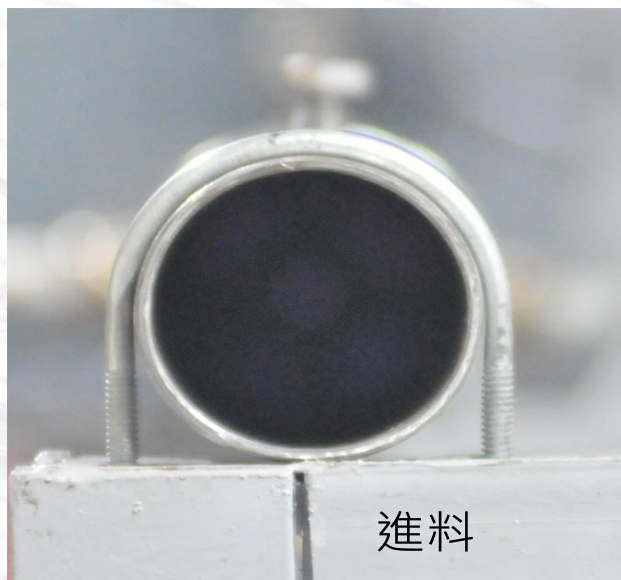


PDR設計具有多重安全保障

- PDR應設有二組以上的多組點火器
 - 任何一組點火器故障，不會影響PDR的安全操作。
 - PDR的點火器應設有電流檢測開關，當電流偏低時，提出點火器故障警告。
- T_{comb} 應設定高於VOC廢氣的自燃溫度 T_{AIT}
 - PDR與密閉空間的燃燒室結合的安全保障
 - 避免PDR故障誤將未處理的VOC廢氣導入燃燒室造成熄火或燃爆意外
- PDR的VOC廢氣進料管線應設有雙重遮斷閥門
 - 當PDR點火器超過一半發生故障、或燃燒室溫度 T_{comb} 低於VOC廢氣的自燃溫度 T_{AIT} 時，自動關閉雙重遮斷閥。
 - 雙重遮斷閥門應採用Fail Close模式設計

高溫脈衝波反應器 脈衝式波動壓力記錄

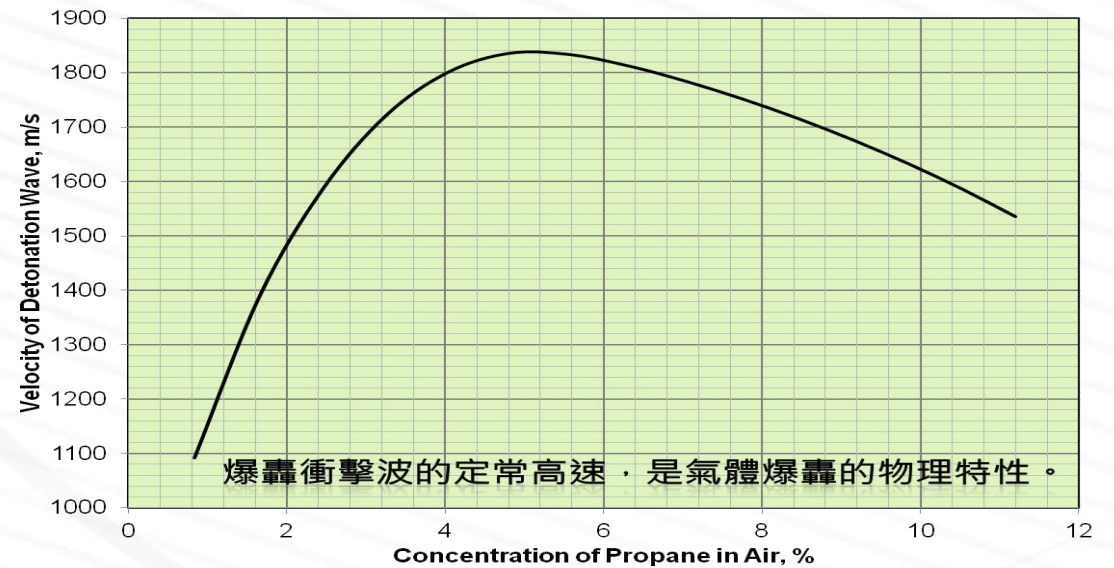
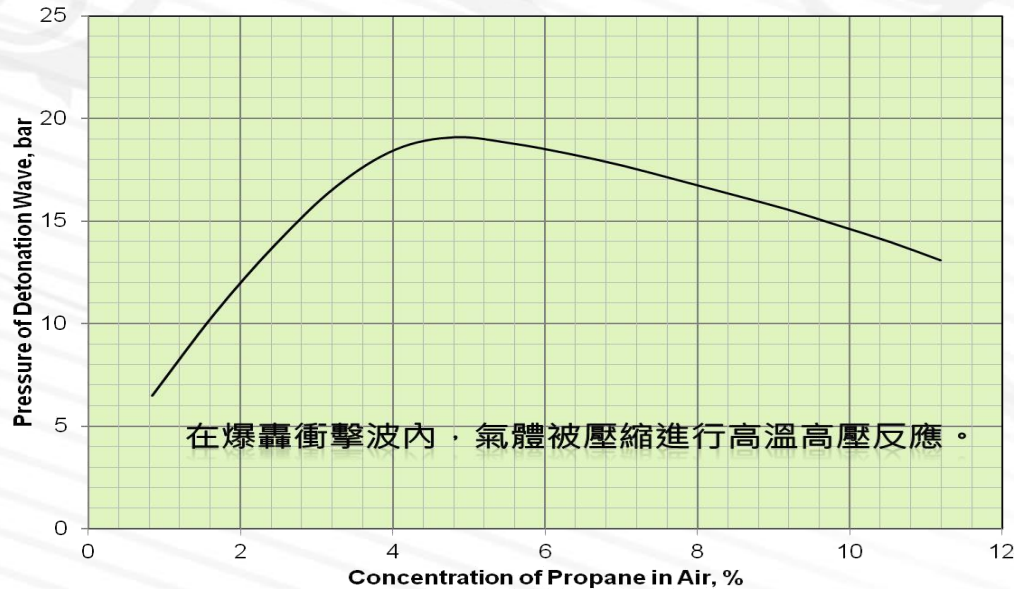
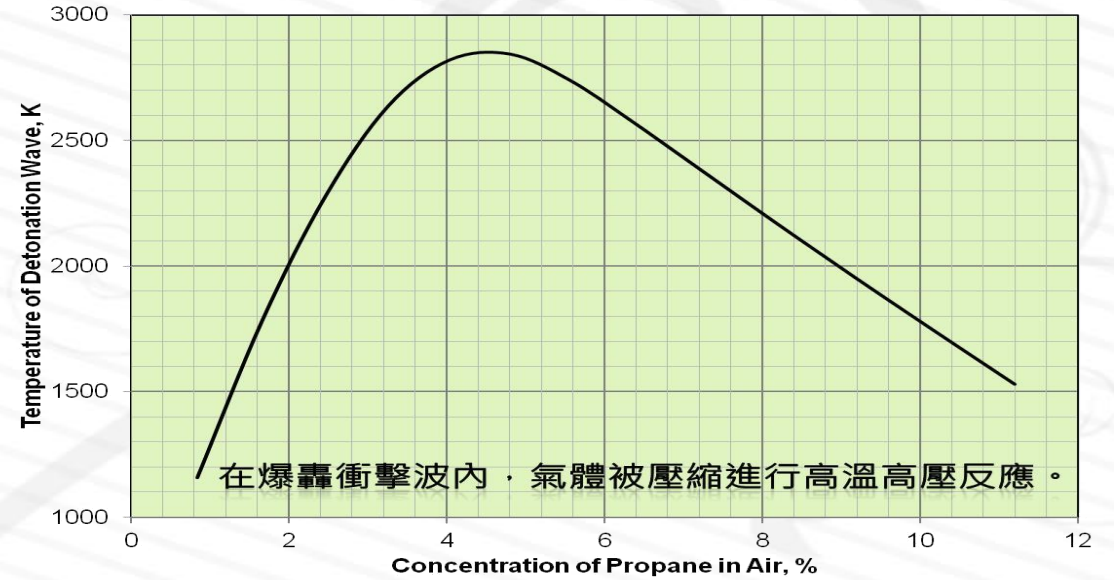




高溫脈衝波反應器 理論分析 (丙烷)



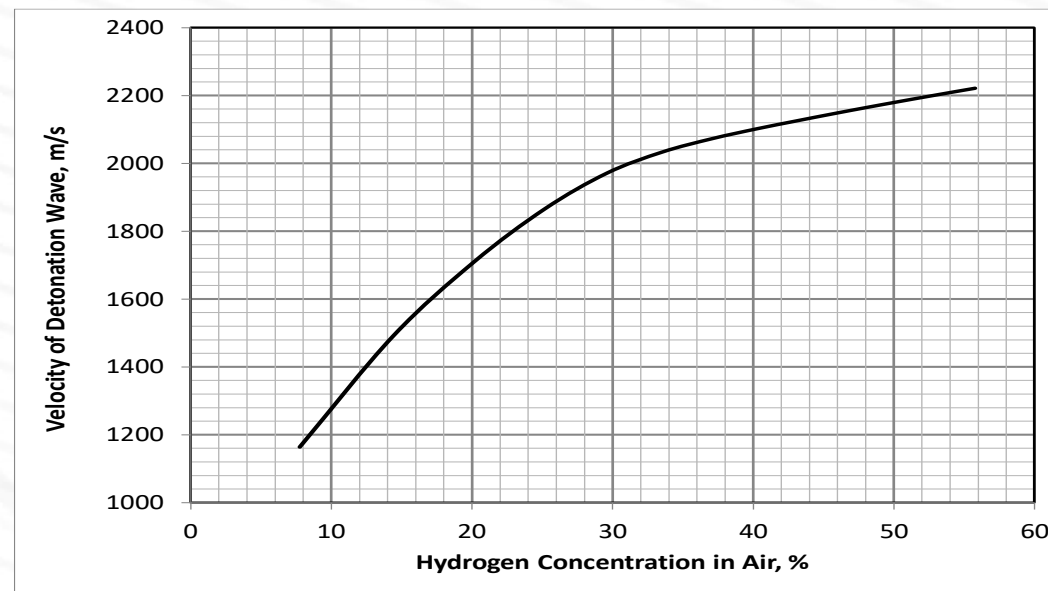
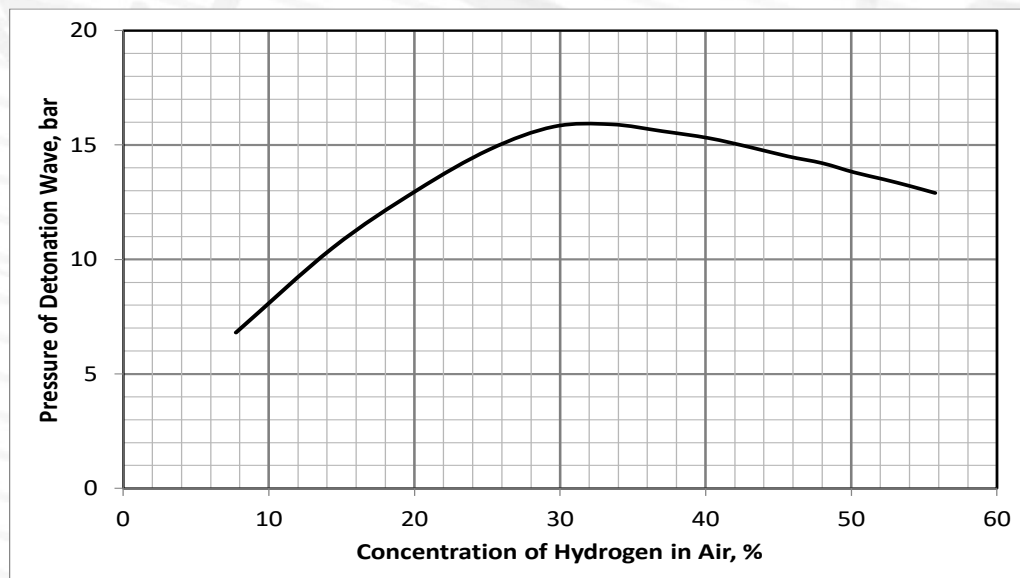
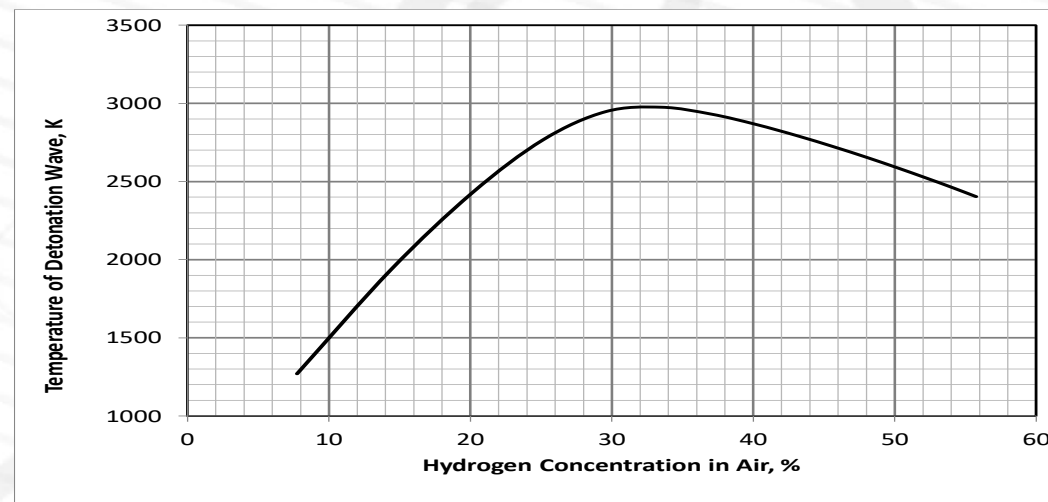
參數	爆轟	爆燃
u_1/c_1	5~10	0.0001~0.03
u_2/u_1	0.4 - 0.7 減速	4 - 6 加速
p_2/p_1	13 - 55 加壓	~ 0.98 稍微減壓
T_2/T_1	8 - 21 升溫	4 - 16 升溫
ρ_2/ρ_1	1.7 - 2.6	0.06 - 0.25



高溫脈衝波反應器 理論分析 (氫氣)



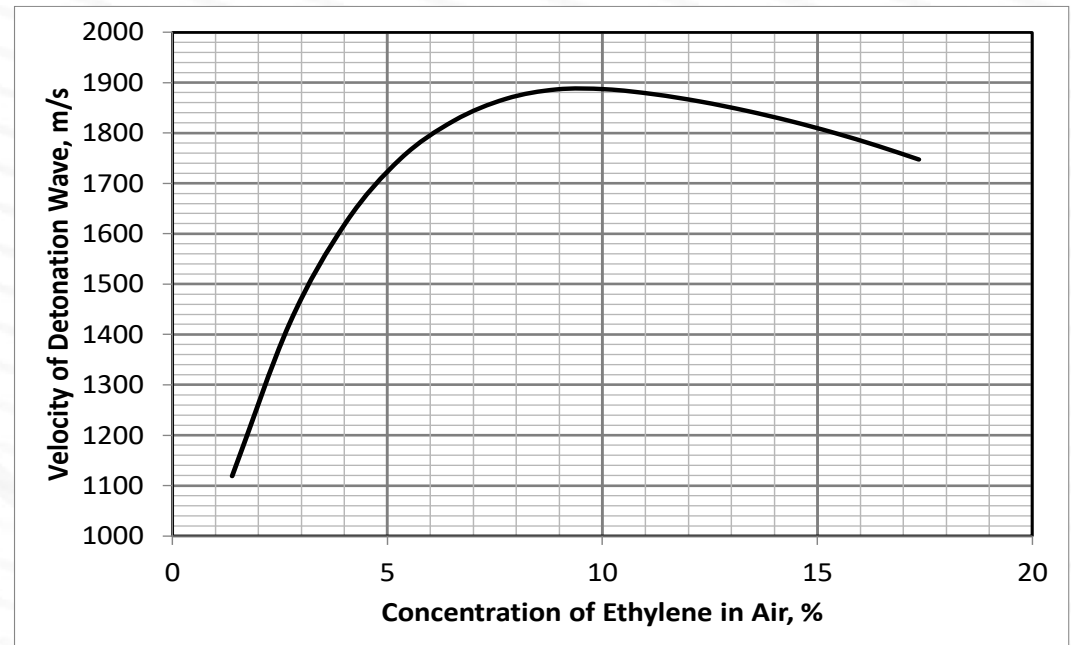
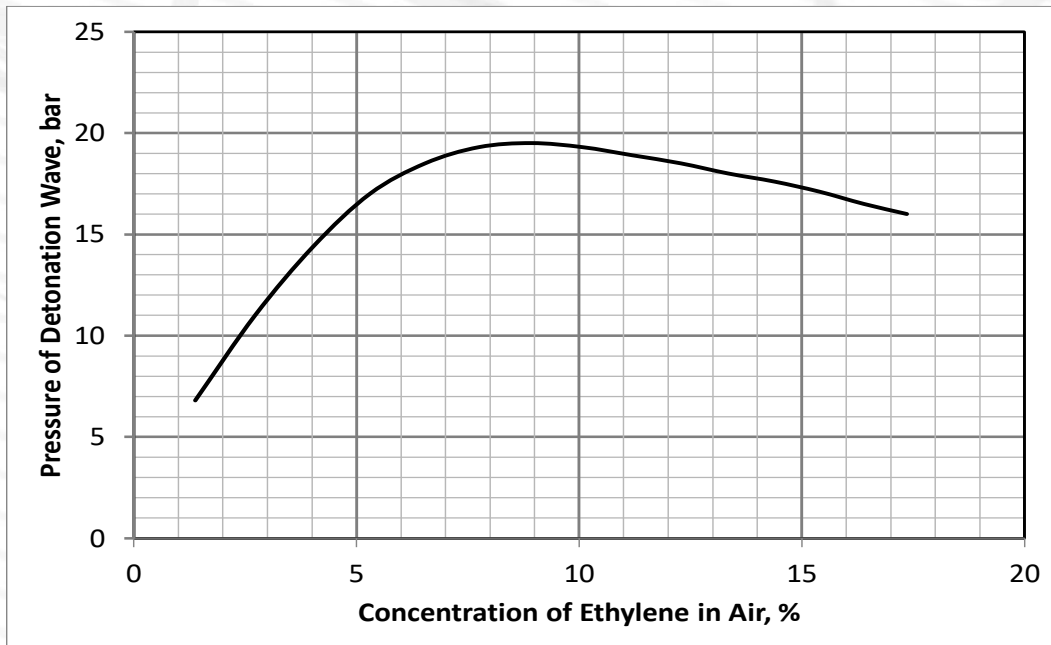
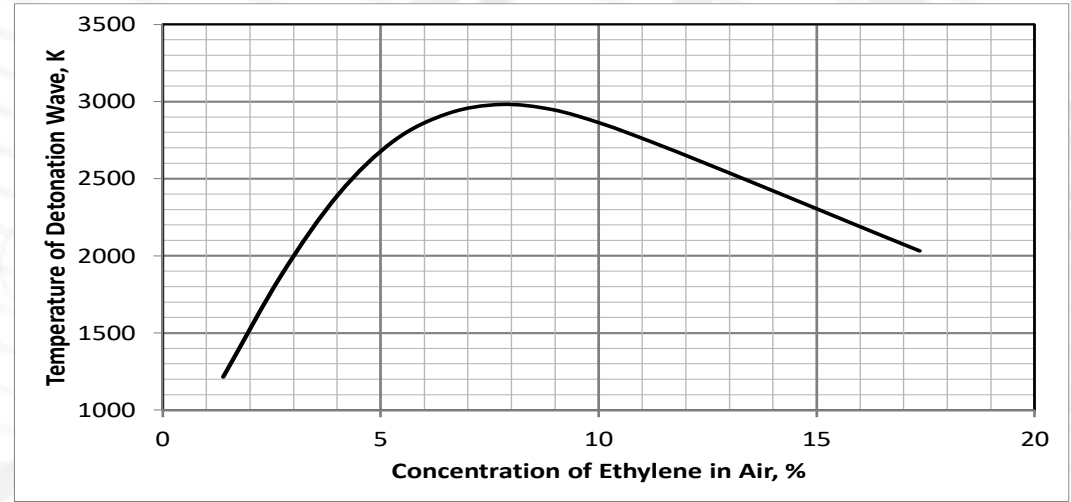
參數	爆轟	爆燃
u_1/c_1	5~10	0.0001~0.03
u_2/u_1	0.4 - 0.7 減速	4 - 6 加速
p_2/p_1	13 - 55 加壓	~ 0.98 稍微減壓
T_2/T_1	8 - 21 升溫	4 - 16 升溫
ρ_2/ρ_1	1.7 - 2.6	0.06 - 0.25



高溫脈衝波反應器 理論分析 (乙烯)

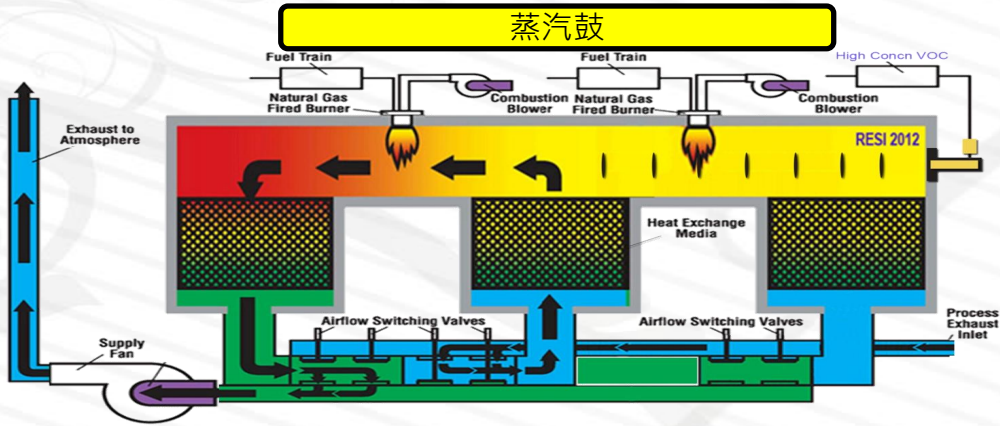


參數	爆轟	爆燃
u_1/c_1	5~10	0.0001~0.03
u_2/u_1	0.4 - 0.7 減速	4 - 6 加速
p_2/p_1	13 - 55 加壓	~ 0.98 稍微減壓
T_2/T_1	8 - 21 升溫	4 - 16 升溫
ρ_2/ρ_1	1.7 - 2.6	0.06 - 0.25

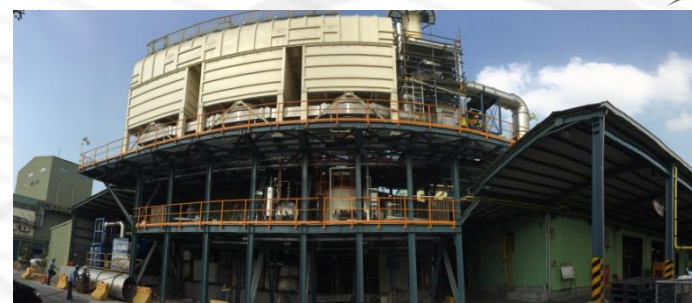


PDR的系統應用：VOC處理及能源回收系統

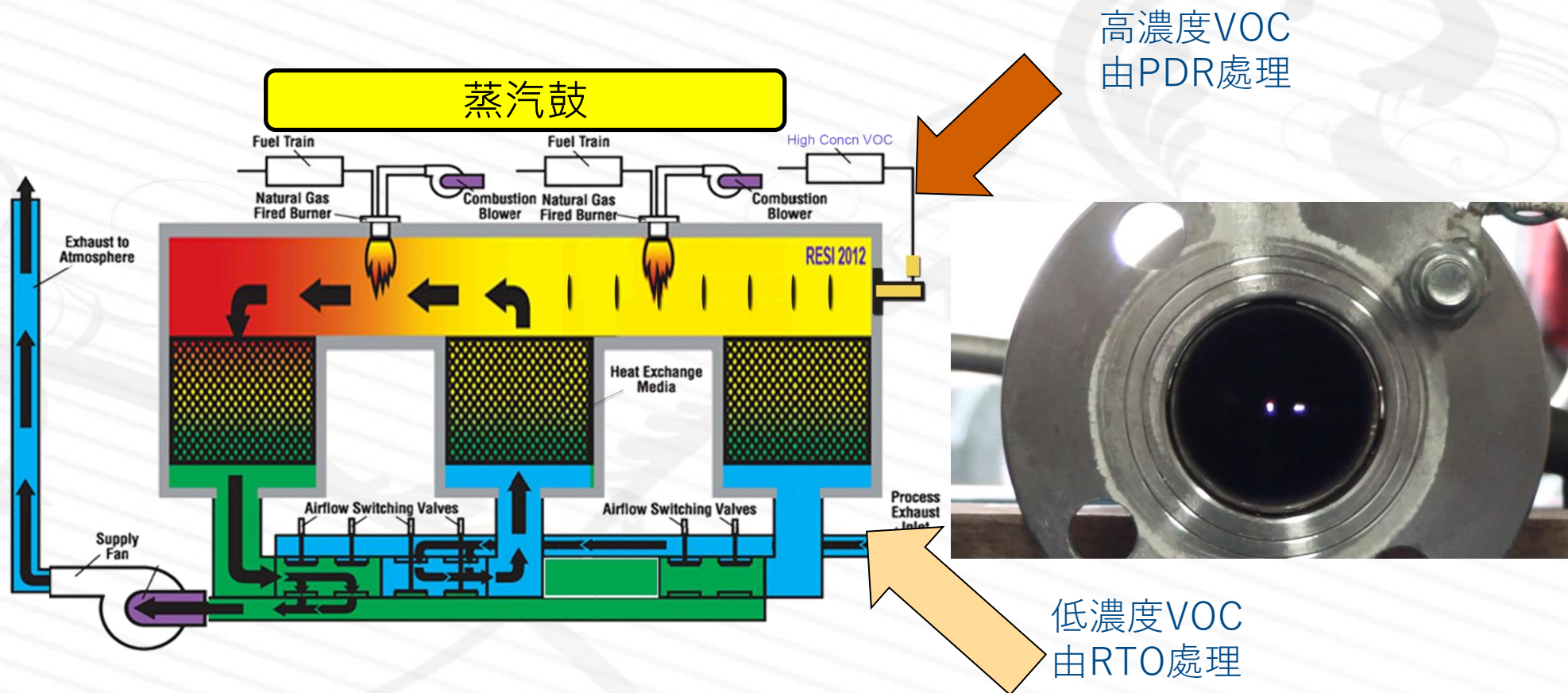
- 整合技術：PDR-RTO BOILER
 - PDR：處理高濃度VOC氣體
 - 3個以上蓄熱床：提高能源效率、破壞效率
 - 內置水管式鍋爐：有效回收能源



Cycle	1	2	3
Bed #1	入氣加熱	負壓淨化	排氣能源回收
Bed #2	負壓淨化	排氣能源回收	入氣加熱
Bed #3	排氣能源回收	入氣加熱	負壓淨化

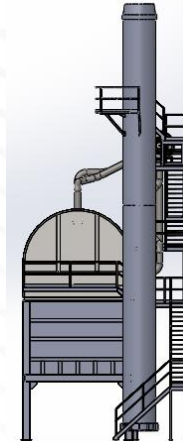
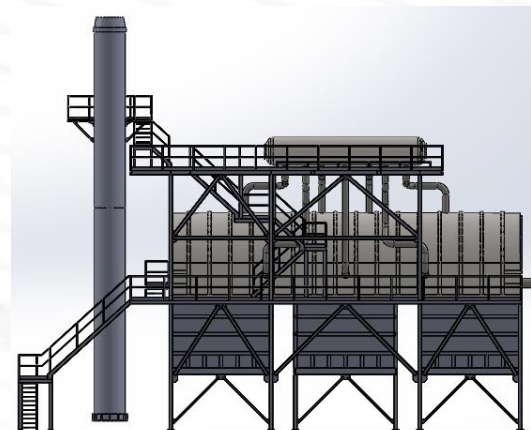
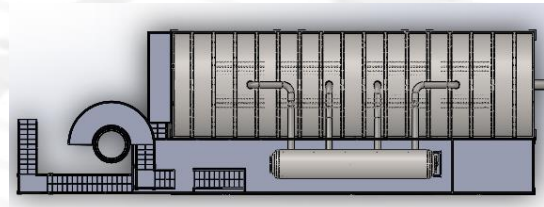
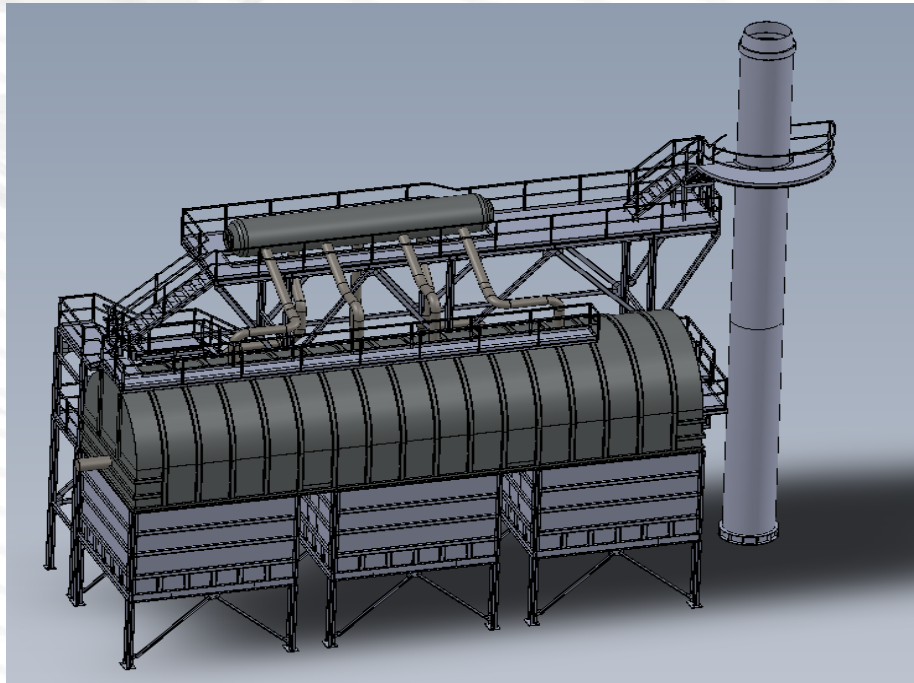


技術解析--高濃度VOC/低濃度VOC分流處理



- 高濃度VOC/低濃度VOC分流處理，杜絕燃爆風險。
- 全系統採負壓操作，避免洩漏。

PDR-RTO : 防爆VOC廢氣處理暨能源回收技術



高溫脈衝波反應器與TO爐的整合技術應用



- 高濃度VOC廢氣 → 高溫脈衝波反應器PDR



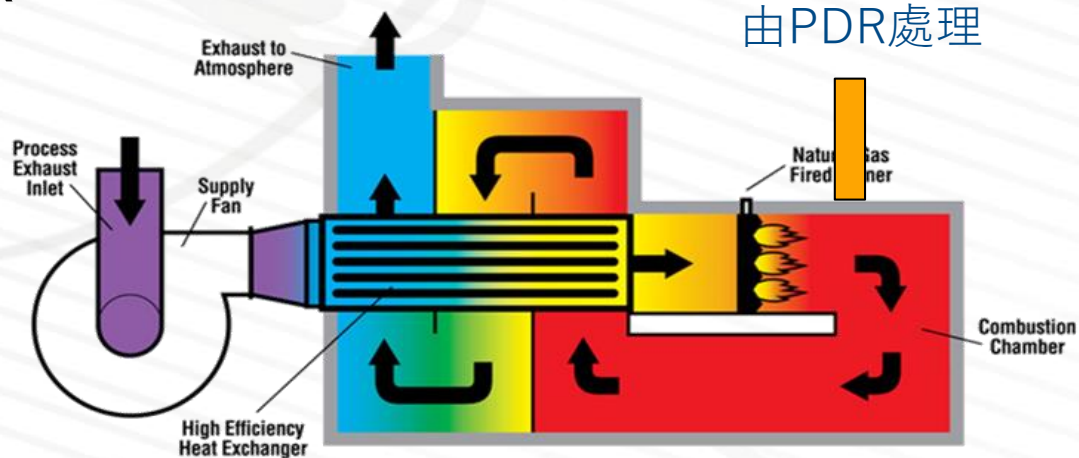
- 低濃度VOC廢氣 → TO



- 能源回收 → 內置水管式鍋爐
– PDR-TO BOILER



高濃度VOC
由PDR處理



高溫脈衝波反應器與RCO爐的整合技術應用

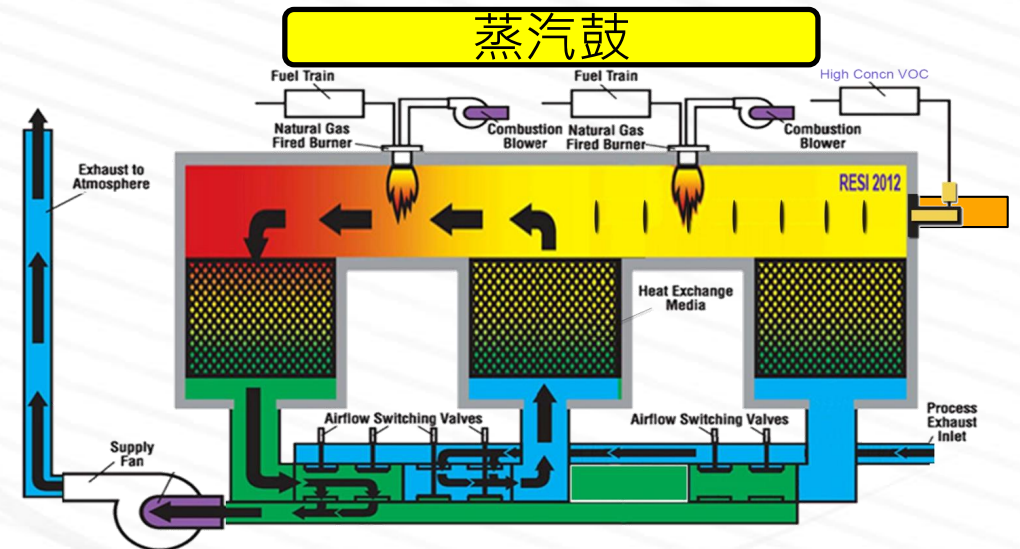
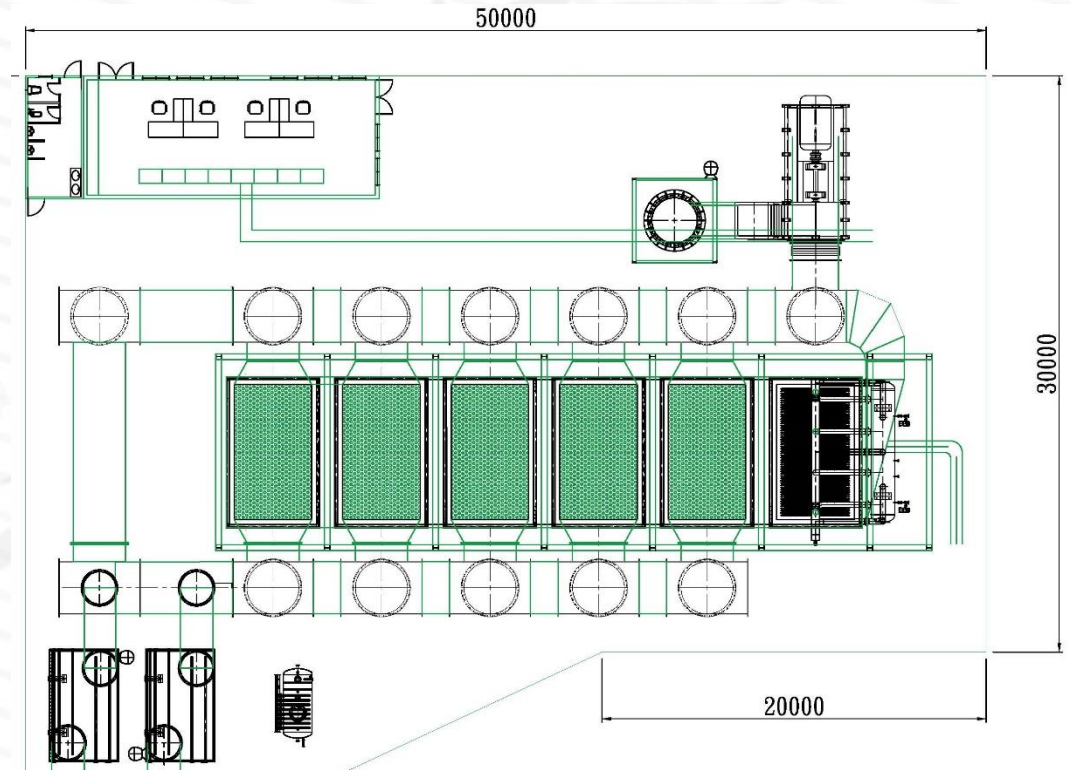
- 高濃度VOC廢氣 → 高溫脈衝波反應器PDR



- 低濃度VOC廢氣 → RCO



- 能源回收 → 內置水管式鍋爐
– PDR-RCO BOILER



案例—橡膠廠VOC廢氣處理 (1)



高濃度VOC廢氣 @ 50 C

最大操作量：	410	Nm ³ /hr			
成分組成	分子量	mol%	爆炸下限 LEL%	爆炸上限 UEL%	自燃溫度 (°C)
空氣	29	37.50%			
氫氣	2	39.60%	4	74.2	573.8
水	18	10.40%			
甲烷	16	7.90%	5	15.4	537
丁醛	72	1.80%	1.9	12.5	218
丁醇	74	1.20%	1.45	11.25	343
戊烷	72	1.20%	1.5	7.8	260
丁烷	58	0.30%	1.8	8.4	287
甲基丁醇	88	0.10%	1.2	9	340

- 廢氣含VOC、氧氣，有爆炸風險。
- 廢氣含水分10.4%

低濃度VOC廢氣 @ 100 C

成分組成	分子量	mol%	爆炸下限 LEL%	爆炸上限 UEL%	自燃溫度 (°C)
Hexane	86.18	0.0008%	1.2	7.7	234
ENB	120.19	0.0006%			
水	18	20.5833%			
Air	28.9	79.4152%			

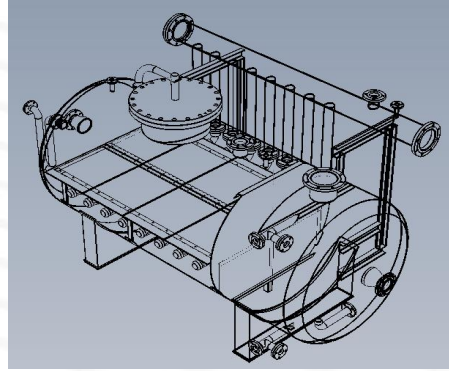
- VOC濃度極低。
- 廢氣含水分20.58%

案例一 橡膠廠VOC廢氣處理 (1)



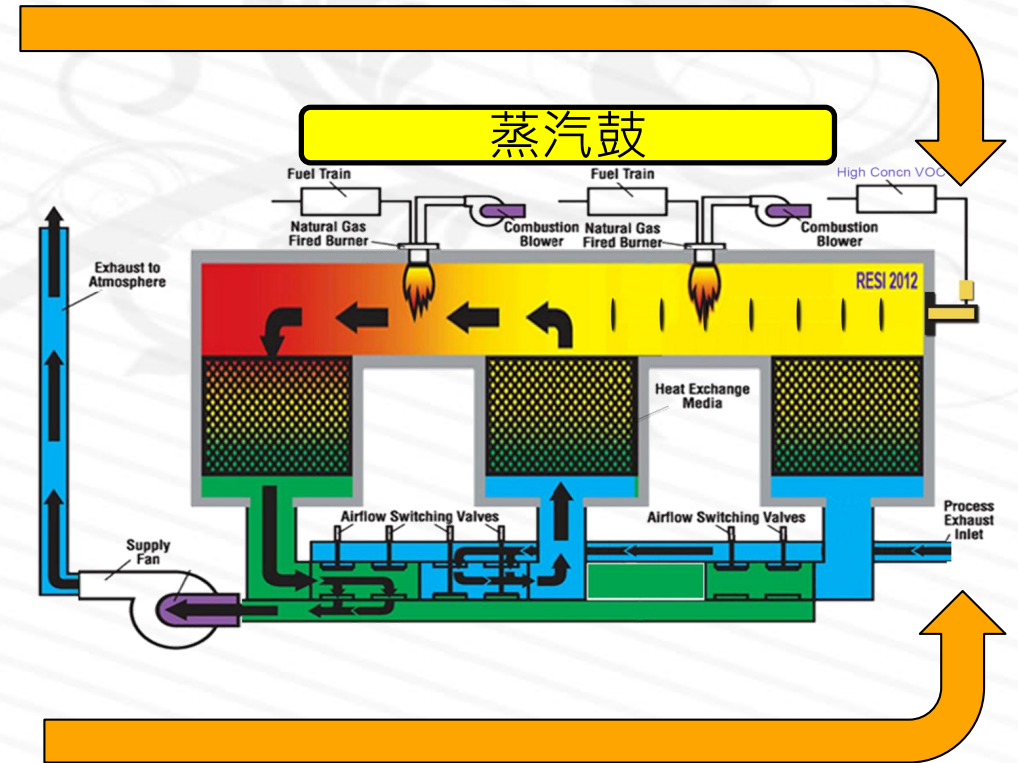
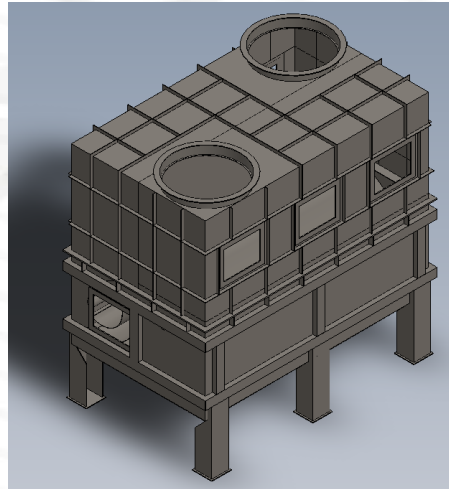
■ 高濃度VOC廢氣 410 NMH

- 先經防爆水封槽：
 - 去除水分並提供安全保護
- 利用PDR處理
- 與RTO或RCO連接進一步徹底處理



■ 低濃度VOC廢氣 42000 NMH

- 先經臥式旋風分離器
 - 去除水分及粉體
- 利用RTO或RCO處理



- 高濃度廢氣禁止稀釋處理，否則很容易發生爆炸風險。
- **RESI發展出來的PDR-RTO/RCO可以安全處理各種濃度範圍的VOC廢氣。**
 - 傳統的RTO/RCO技術處理高濃度VOC廢氣易生意外
 - 容易產生熄火、燃爆等意外
 - 一定會產生超溫及燃爆、回火意外；
 - 陶瓷蓄熱體及陶瓷纖維保溫材料一旦超溫，就會喪失結構強度。
 - PDR技術可以承受VOC廢氣快速的濃度及流量變化
- **化工製程VOC廢氣，一定需要有良好的前處理。**
 - 防爆水封、火焰防阻器
 - 各種除水、除塵技術
- **處理含酸性的VOC廢氣，爐體興建時就需要先做內層防腐蝕工程**
 - 酸性氣體的Diffusion及Dew Point問題，爐壁會很容易被腐蝕。

提供安全可信賴的創新技術

是我們對客戶不變的允諾

豐映科技股份有限公司

<http://www.resi.com.tw>

E-mail: service@resi.com.tw

Telephone: +886-4-2472-6600

Mobile: +886-987-070-398