

蓄熱式燃燒技術

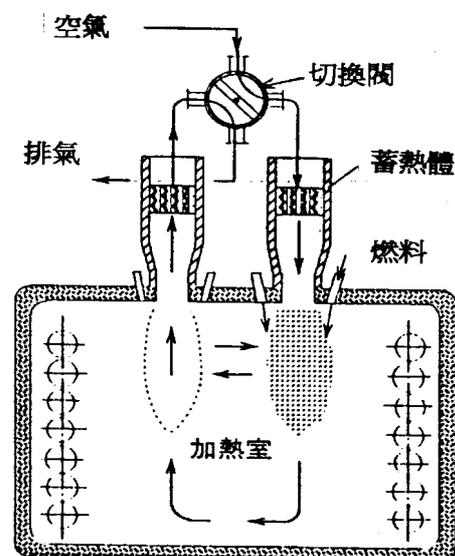
陳文杰 研究員
工研院能資所 潔淨能源組

壹、技術/設計原理

蓄熱燃燒技術是利用陶瓷材料作為熱交換的介質，將燃燒後的高溫煙氣熱能回收並用來預熱燃燒所需的空氣；藉由陶瓷材料的高蓄熱能力特性，可將燃燒空氣預熱至 800 以上，因此使得火焰的穩定區域擴大，有助於火焰穩定性提昇。此外，蓄熱燃燒技術是採用交替式的燃燒方式，此交替式的燃燒方式，不但可促進加熱爐內熱流場的均勻化，更可大幅提高加熱爐內的平均熱通量，而獲致高效率的熱傳目的。因此，蓄熱燃燒技術具有燃燒熱效率提昇、節省燃料耗用及設備體積小型化的特性。而就蓄熱燃燒技術的開發與推廣而言，可對國家競爭力、產業及環境保護等創造三贏的標的："節約能源 30%"--降低 CO₂ 排放、提升燃料使用效率；"縮小爐膛體積 20%"--工業爐性能提昇、提高產品品質；及"大幅降低氮氧化物排放"--環境保護的正面效益。

一、蓄熱燃燒系統的主要構成

蓄熱燃燒系統(如右圖所示)主要由燃燒器、蓄熱體及切換機構三者組合而成。其中成對的兩隻燃燒器係採週期性的交互切換運轉，當燃燒器 A 進行燃燒時，燃燒器 B 則作為爐氣排放的通道。此時燃燒空氣經過 A 邊的蓄熱體先行被預熱後進入燃燒器 A，供給燃燒所需的氧氣；燃燒後所產生的高溫爐氣則經過燃燒器 B，由 B 邊的蓄熱體吸收其熱能後變成低溫的煙氣排出。之後，由於切換機構的切換動作，導

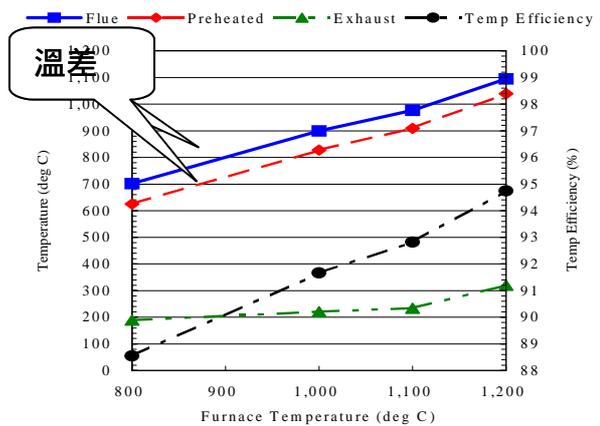




引改變了燃燒空氣與排放煙氣的流動方向，同時進入了此運作的下半週期。此時，燃燒器 B 開始成為燃燒的運轉，而原先的燃燒器 A 反過來作為爐氣排放的通道；燃燒空氣則利用原先 B 邊蓄熱體吸收的熱能先行預熱後進入燃燒器 B 進行燃燒動作；蓄熱燃燒系統就是如此週而復始的進行切換運轉的動作。

二、燃燒空氣高溫預熱—熱能有效回收

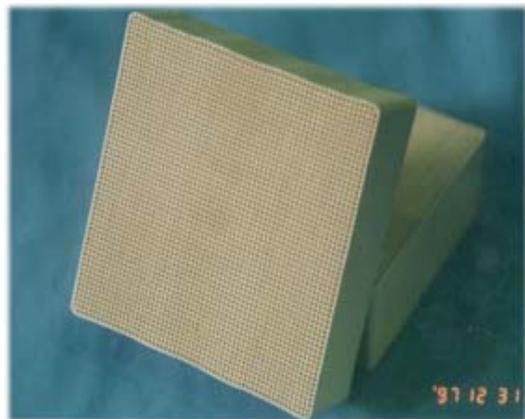
與傳統的熱交換器比較，蓄熱燃燒技術所產生的高溫預熱空氣與排氣的溫度差只有 50~80 左右，充分顯示其高溫熱交換的優越性。另外，四向切換閥的切換時間設定也會影響高溫熱交換的效率，從研究中觀察，30 秒的切換操作時間，最具經濟效益。另由於一般燃料的自然著火溫度介於 560~660 之間，因此凡超過 800



的預熱空氣，因其高於自然著火溫度，其所顯現的超高溫預熱空氣燃燒範圍，具有相當優越的燃燒特性，如：燃燒火焰的穩定性、溫度場均勻化及低氮氧化物排氣等。

三、陶瓷材料蓄熱體

蓄熱體在蓄熱燃燒系統的應用中，係用來吸收高溫燃氣之熱能，並將此熱能傳遞給燃燒所需的空氣，將空氣預熱至 800 以上。由於此一熱交換的動作必須在短時間內完成，因此蓄熱體的熱傳面積及其熱傳效率要求是相當高的。此外，對於蓄熱體本體的耐熱性、耐熱衝擊性及小型化要求，在實務上亦是必須特別注意的部份。



右圖是一種蜂巢狀的陶瓷蓄熱體結構，相較於球型的陶瓷蓄熱體來說，在同樣體積的條件下，其性能的比較概況如下表所示；其重點為：(1)蜂巢狀蓄熱體的傳熱面積約為球狀蓄熱體的 5 倍。(2)蜂巢狀蓄熱體的壓損約為球狀蓄熱體的 1/4。(3)蜂巢狀蓄熱體的重量約為球狀蓄熱體的 1/10。由於蜂巢狀陶瓷蓄熱體具有輕薄短小及高熱傳面積的特性，因此展現出較高效率的熱回收；在溫度效率 90% 以上的設計，蜂巢狀的陶瓷蓄熱體結構相當輕薄短小，因此在重量與體積等因素的實務設計及應用上，有其特性存在。

	球型陶瓷蓄熱體結構	蜂巢狀陶瓷蓄熱體結構
壓力損失	4 倍	1 倍
傳熱面積	1 倍	5 倍
溫度效率	0.75	0.9
阻塞	有	無
比較基準：陶瓷蓄熱體總體積：300mmL*300mmW*300mmH 切換時間：30 秒		

陶瓷蓄熱體的材質選用方面，基於耐熱性、耐熱衝擊性等因素的要求，可選用堇青石、模來石及高鋁質等成分的陶瓷材料，配合不同尺寸大小的蜂巢狀陶瓷蓄熱體製作與堆疊，來完成蓄熱體的組裝與應用。

四、四向切換閥

蓄熱燃燒系統於實際操作時，係利用燃燒器本身作為進/排氣的通道，故需有一組機構能隨著燃燒器在切換過程中，去控制空氣及廢氣的進出，使一對燃燒器可以同時交替扮演點火燃燒及排放廢氣的雙重角色。傳統使用四個電磁閥或控制閥來完成這些動作，而如右圖所示的四向切換閥也是一種新穎的設計，此型四向閥的作動原理與前者類似，且對於此四向切換閥閥體的氣體洩漏量要求，一般設計上會要求在最大風量的 3~5% 以內，亦確保四向切換閥的氣密功能。

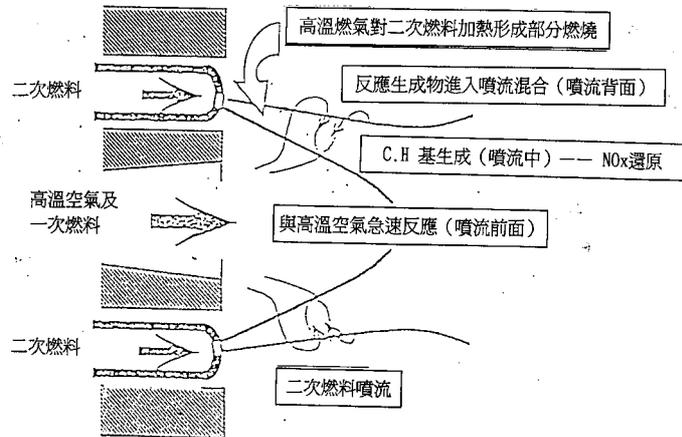
五、控制氮氧化物原理

在蓄熱燃燒的系統中，當爐溫升高時，燃燒空氣的預熱溫度亦隨之提高，





所以火焰的最高溫度也隨之增加。因此在理論上，熱態氮氧化物(Thermal NO) 的生成量會明顯的增加，這也就是蓄熱燃燒在實務應用上必需立即克服的技術問題。目前，蓄熱燃燒可藉由分段燃料的供應(即總燃料流量分成一次及二次等兩迴路來供應)的技術來減低氮氧化物的生成，在此稱之「階段燃料」燃燒的氮氧化物控制技術。



此種階段燃料燃燒大致上可將燃燒火焰分成三個階

段：(1)一次火焰形成：一次燃料與高溫空氣之部分反應，此區域由於高富氧區，故可降低局部火焰峰溫，達到降低部分 Thermal NO 的目的。(2)二次火焰形成：一次燃料反應後之高溫混合氣，繼續再與二次燃料反應，此時即可在二次火焰區形成一缺氧的還原區，可進一步的將 NO 在還原成 N_2 。(3)在氧化火焰形成：將所有未燃氣體完全燃燒。

對於蓄熱式燃燒的氮氧化物控制，一般是基於以下的幾個想法及氮氧化物控制機制圖說來說明：

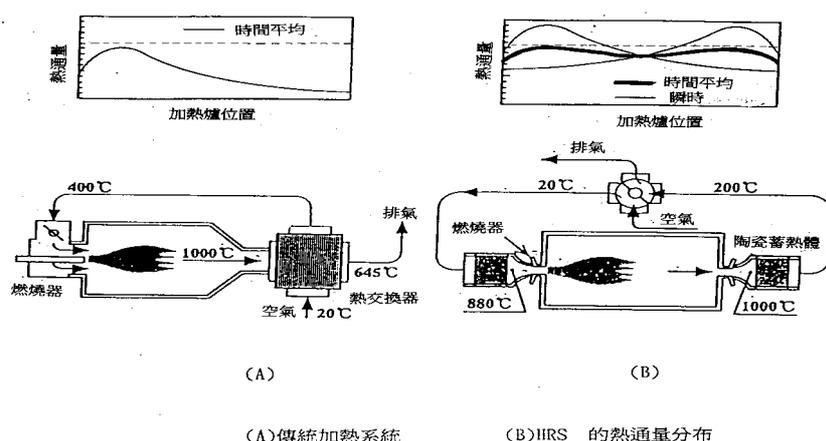
- 1.從二次燃料供給部開始的燃料噴流受到高溫燃氣的預熱，可以形成高當量比的碳氫化合物(CH_i , $i = 0, 1, 2$)氣流，具有還原氮氧化物的效果。
- 2.由於二次燃料噴流的外周圍表面與高溫空氣混合區的混合燃氣溫度相當高，開始生成高濃度的氮氧化物。
- 3.二次燃料噴流與高溫空氣流以某一角度交會，使二次燃料噴流內部形成迴流區，前述噴流外周表面生成的高濃度氮氧化物氣流，便與噴流內部的高當量比碳氫化合物氣流混合，產生氮氧化物的還原反應。
- 4.燃燒器從上游至下游設計上無階段之分，而係連續自動生成階段燃燒的效果。一次燃料的供給量係根據爐溫的高低來調整，以便產生上述先行生成

碳氫基的效果；爐內溫度高而二次燃料噴流預熱效果佳時，一次燃料甚至可以關閉而不影響燃燒穩定性。

六、蓄熱燃燒在工業爐上的應用原理與特色

1. 熱通量分佈較均勻

如下圖 (A)(B)所示，傳統的加熱爐大多將燃燒器設置於某一固定位置作連續性的燃燒，此一位置的決定必須考量燃燒器與被加熱物的相對關係，使被加熱物及爐體不會位於熱點上。此類型的溫度分佈和熱通量分佈一樣，其最高點均位於火焰基部，然後沿著火焰中心軸往下游的方向逐漸降低，分佈較不均。而蓄熱燃燒則採用偶數燃燒器作間歇性的對燒，若從整個爐體的空間分佈來看，每一個區域在某一瞬間的熱通量因燃燒器的開啟而超過最大容許值，在下一瞬間又因燃燒器的關閉而下降，如此週期性交互切換的結果，熱通量的時間平均值分佈相當均勻，且落在被加熱物及爐體可容許的範圍內，不致有過熱現象，對於爐體空間大而溫度均勻性要求高的工業加熱系統而言，蓄熱燃燒的特性應可符合此一要求。



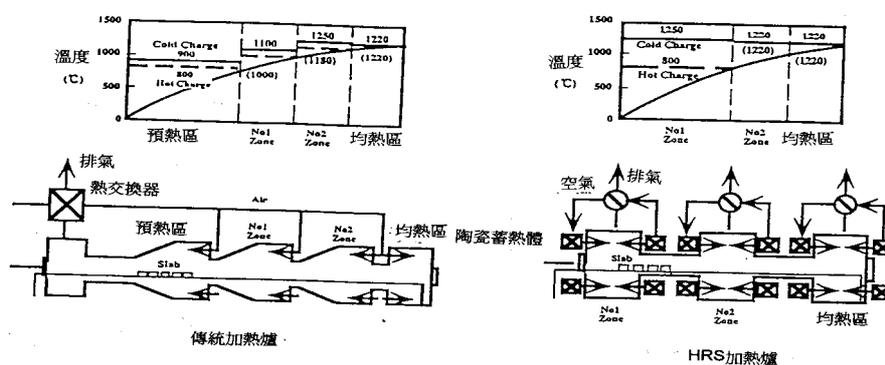
2. 蓄熱燃燒具有良好的區域性熱通量獨立控制機制

以傳統的鋼板加熱爐(如下圖 (A))為例；燃氣係經由均熱區、加熱區及預熱區，最後再由共同煙道排出。由於上游加熱區、均熱區的大量燃氣均會流





經下游的預熱區，使得此區的爐氣溫度不易保持高溫狀態，連帶的使加熱所需的爐體長度，無法有效的縮減。而下圖 (B) 所示的蓄熱燃燒系統則採取不同的作法，將每一加熱區分別由一對或幾對燃燒器負責，每一對燃燒器個別作交互切換操作，燃燒後的燃氣立即由燃燒器本身排出，不會流入其它加熱區影響其加熱狀態；因此每一加熱區均可視加熱流程的溫度要求，進行最佳化獨立控制，從而縮短爐體長度，減少爐體建造成本。



(A)傳統鋼板加熱爐

(B)HRS加熱爐的區域性熱通量分布

3、蓄熱燃燒可改善加熱系統的熱效率

傳統的加熱系統常應用換熱型熱交換器來回收高溫爐氣中的熱能。此類型的熱交換器其溫度效率約在70%左右，若欲提昇熱效率，則必須增加熱傳面積並使用熱傳導率高的金屬材料方有可能，然此種材料往往價格昂貴且有耐熱性的問題，所以極少被採用。

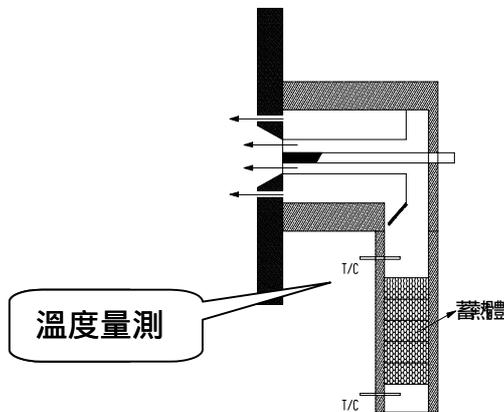
蓄熱燃燒之蓄熱體則應用非衡定熱傳模式，隨著燃燒器的切換動作，蓄熱體周期性地扮演自燃氣吸收熱能及將熱能傳遞給空氣的角色；由於此種熱傳方式的最大熱通量發生於蓄熱體受熱或放熱的初期，故降低切換周期將有助於系統持續在高熱通量的環境下運轉。研究中顯示蓄熱燃燒熱回收之溫度效率隨著切換時間的降低而提昇，當切換時間小於30秒時，其溫度效率可達90%以上，且爐氣最終排放溫度維持在200 以下。

4、蓄熱燃燒加熱系統小型化

由於蓄熱燃燒具有熱通量分佈均勻，各加熱區熱通量可獨立控制及高溫燃燒的特性，可以提昇單位爐體體積的熱負荷；因此，和傳統的加熱系統相較，所需的爐體較小，可以達到小型化的要求，降低起始建造成本。同時在加熱爐小型化之後，可以縮短啟動時間，降低爐體表面熱損失，促進溫度控制反應靈敏度，提昇熱處理製品的產品品質。

貳、節能診斷方法

對於蓄熱燃燒的應用，燃燒節能診斷的方法，基本上可以從蓄熱燃燒機中的陶瓷蓄熱體上、下端溫度量測中得知，簡單的蓄熱體溫度效率（Temperature Efficiency）值計算乃以下述公式來計算初估：



$$\text{溫度效率} = (T_{\text{APH}} - T_a) \div (T_{\text{FG}} - T_a)$$

其中： T_{FG} 為進入蓄熱體前之煙氣溫度。

T_{APH} 為通過蓄熱體後之燃燒空氣預熱溫度。

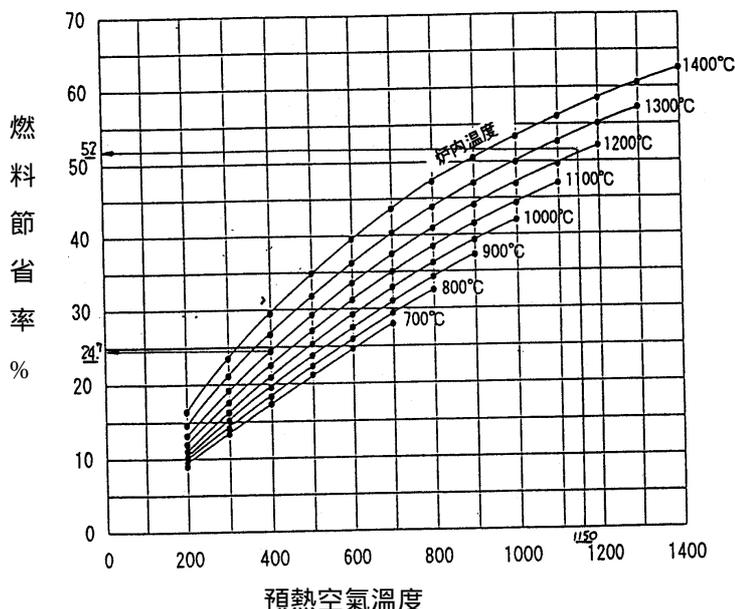
T_a 為進入蓄熱體前之新鮮冷空氣溫度。

研究中得知，爐溫分別為 800、1000、1100、及 1200 時，測得進入蓄熱體前之煙氣溫度分別為 702、900、978、及 1095，而通過蓄熱體後之燃燒空氣預熱溫度值則分別為 625、828、910、及 1039，由以上數據計算陶瓷蓄熱體的溫度效率值分別為 0.89、0.92、0.93、及 0.95。





另法，可以參酌右圖的方法，來診斷及評估加熱系統的蓄熱燃燒節能效率。如右圖所示，採用蓄熱燃燒技術時，當燃燒空氣預熱在 1150 的情況下，往上對應加熱爐內的溫度曲線--1200，再往右對應代表燃料節省率的 Y 軸，其值為 52%；此值意謂著蓄熱燃燒技術比未裝置任何熱



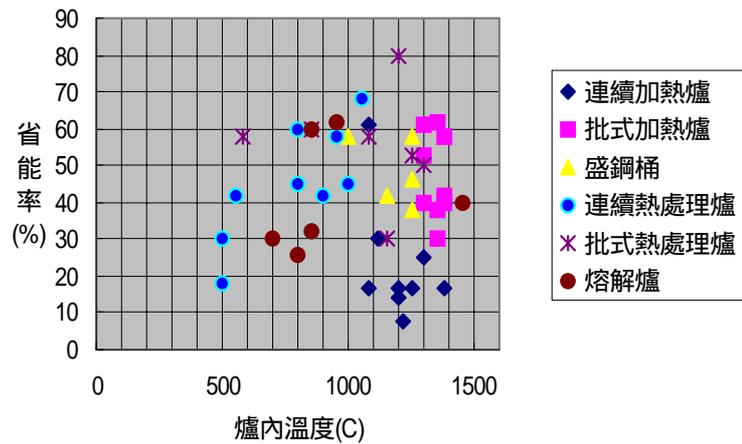
回收裝置的製程，節省燃料 52%。而傳統的熱交換技術，將燃燒空氣預熱到 400 時，其對應未裝置任何熱回收裝置的製程，其燃料節約率約為 25%。因此，採用蓄熱燃燒技術者比裝置有傳統熱回收裝置的製程，其燃料節約能力約為 $(52-25)/(100-25)=36\%$ 。

基於加熱情況與需求的不同個案，蓄熱燃燒的節能診斷方法，可依個案改善前後的系統總體節能率來評價製程的節能效果。而下表提示一般加熱別，所具有不同的效率提升潛能範圍。

燃燒爐	排氣溫度	傳統燃燒技術 ()	高效率燃燒技術 ()	效率提升 %
貫流鍋爐		450	200	14
鋼鐵加熱爐		650	200	25
金屬熱處理爐		950	200	46
熔鋁爐		750	200	34
熔鋅爐		600	200	23
熔銅爐		900	200	43
玻璃熔解爐		500	200	18

參、節能改善措施

針對不同的製程及需求，可採取既有的加熱燃控系統更新，或是加熱工件爐體的修改，或是規劃新設爐體等的轉換，成為蓄熱燃燒方式的加熱新程序。由於燃燒後的高溫煙氣經由蓄熱陶瓷的高效率熱回收之後，所排出煙氣的溫度一般可低至 200~250℃，所以節能效率彰顯。如再配合蓄熱燃燒系統的長時數操作運轉，則系統整體的總體節能改善便更具經濟效益。右圖^(註)是表示實際案例的節能改善成果。相信，在國內工業界中，蓄熱燃燒技術的應用，亦能有相當的節能改善成果。



(註):「工業加熱」期刊

肆、操作管理重點

基於蓄熱燃燒的加熱系統比起傳統式的燃燒加熱系統複雜，是故在採用蓄熱燃燒系統的節能改善措施工作中，整體的操作管理上可著重以下各點，以輔助硬體系統發揮最佳的使用彈性：

- 一、提昇系統自動化程度，精確掌握系統的運轉
- 二、建立系統最佳化的操作資料，標定最適應之程序控制模式及運轉參數
- 三、能源管理作業稽查，落實節能改善成果
- 四、加強人才培訓，落實蓄熱燃燒技術在實務上的靈活應用





伍、案例分析探討

案例一：燁聯鋼鐵股份有限公司 冷軋一廠 -- 蓄熱燃燒節能案例

廠區內一般爐區的加熱爐預熱方式，大多設計利用廢氣風扇(Exhauster fan)將廢氣回收至預熱區，須花費很大的電力，且功效不佳。廠區經由製程節能及抑低二氧化碳排放的目的，引用鋁球型蓄熱式燃燒機，增加蓄熱功能，以節省天然氣耗用。鋁球型蓄熱式燃燒機，將燃燒空氣機構吹入之冷空氣



於燃燒機鋁球蓄熱區預熱至 800 度，再與天然氣一同吹入加熱爐內燃燒，可節省能源。估計每年節能效益約 295 萬元，相當於抑低二氧化碳排放量約 710 公噸/年。

案例二：長春人造樹脂股份有限公司 新竹廠

--廢氣燃燒設備 (RTO) 改造案例

廠區內生產線，A、B 兩含浸乾燥機，所產生之有機廢氣以蓄熱回收型(RTO)熱回收設備，來取代原有的直接燃燒型(TO)之廢氣處理設備，降低燃料油耗用量，達成製程節能及抑低二氧化碳排放的目的。

A、B 兩含浸乾燥機產生之廢氣，原本以直接燃燒型的廢氣處理設備(TO)處理，其能源使用經統計顯示單位產品之燃料油用量為 61.8 L/km^2 ，經以蓄熱型廢氣處理設備(RTO)改造原先的廢氣處理設備後，經統計其單位產品之燃料油用量降為 11.3 L/km^2 。節省燃料



用量比例為 81.7%。

蓄熱式廢氣燃燒設備 (RTO) 的改造案，改善前燃料的使用量為 98.2 kL/月，改善後燃料用量為 17.9 kL/月。每年減少燃料使用量為 962.8 kL，相當於燃料費用 578 萬元。亦相當抑低二氧化碳排放 2840 公噸/年。

案例三：中國鋼鐵股份有限公司 煉鋼廠—盛鋼桶預熱台案例

盛鋼桶保溫與預熱站，並無熱回收系統，能源利用率非常低，約落在 20% 左右，有極大的改善潛力，而蓄熱式燃燒系統是最佳的選擇，粗估應有降低 30-40% 能耗之能力，提昇內襯均溫性至 25℃ 以內。

蓄熱式燃燒系統應用考量：

- 預熱站屬 Batch 作業，低風險。
- 預熱站原無熱回收設備，增設蓄熱式燃燒系統效益大。
- 預熱站加熱能力不足，藉蓄熱式燃燒系統提昇，改善預熱品質。
- 原內襯預熱上部溫度高底部溫度低，均溫性差，可藉蓄熱式燃燒系統改善。
- 預期熱回收率 70%，排氣溫度降至 200℃，能源節約可達 35%。



蓄熱式燃燒系統：

- 蓄熱式燃燒器 ×1 對
- 四向閥 ×1 個
- 總加熱能力為 $120 \times 10^4 \text{kcal/hr}$ (NG)
- 自動化溫控燃燒系統 (溫度曲線設定)





實際測試結果：

蓄熱室燃燒系統可將廢氣溫度降至 200 以下，證實加裝蓄熱室燃燒器節約能源之實質效益大於 35 %，達到預期之目標。

經濟效益預估：

- 1.能源節約 (NG base) 206 萬元/年
- 2.二氧化碳減量 500 公噸/年
- 3.減少鋼液溫低回爐處理費用 33 萬元/年
- 4.降低轉爐吹止溫度，增加轉爐使用回數粗估 62 回/年
- 5.強化盛鋼桶預熱品質，提昇盛鋼桶使用回數，減少耐火材料消耗量

案例四：中國鋼鐵股份有限公司 線材工場—球化加熱罩之應用案例

於線材工場增設一座鐘罩式加熱罩，採用蓄熱式燃燒系統，取代舊有的傳統復熱器燃燒系統，作為線材盤元球化熱處理之用，以節省能源並降低污染。期望達到下列之效果：

- 廢氣排放溫度低於 250 。
- 廢氣中 NO_x 含量低於 150ppm (6% O₂)
- 熱回收效率由目前小於 35% 提升至 70% 以上。



蓄熱式燃燒器的應用考量：

- 熱處理是 Batch 製程 (降低風險)
- 原熱回收器效率偏低 (< 35%)，排氣溫度 300 450 。
- 蓄熱式燃燒器熱回收效率 > 70%，排氣溫度約 200，Energy Saving 可達 15 20%。

蓄熱式燃燒系統：

- 蓄熱式燃燒器 4 對
- 四向閥 4 個
- 總加熱能力為 80×10^4 kcal/hr (COG)
- 低氮氧燃燒機制 (一、二次燃料自動切換系統)

實際測試結果：

- 排氣溫度與排氣組成，應可再增加二次燃料量來降低 NO_x 排放，CO 排放量低於 150ppm 顯然 COG 可以完全燃燒。
- 溫度效率在正常操作溫度範圍(> 700)可以維持 70% 以上。

預估效益：

- 能節每年實質效益 10 萬元
- 二氧化碳減量每年 55.3 公噸/年

