

日本鋼廠應用廢塑膠減碳模式調查

一、前言

為達 2050 年淨零碳排之目標，鋼鐵業無不致力於製程減碳技術的開發，經調查發現，日本鐵鋼聯盟(JISF)自 1990 年起，便提出減少二氧化碳排放的自願性節能行動計畫(Voluntary energy-saving action plan)，鼓勵鋼廠每年使用 100 萬噸廢塑膠於焦爐和高爐，減少煤炭的使用，藉此減少 CO₂ 排放。日本製鐵及 JFE 鋼鐵於 2000 年前後開始進行廢塑膠回收利用之研究，陸續開發將廢塑膠加入焦爐或高爐的技術，已知 JFE 在京濱和福山兩個地區，20 年來已累計回收處理 105.8 萬噸廢塑膠量；日本製鐵於 2000-2022 年間處理量也達 391 萬噸。JFE 近年更計畫於京濱地區投資 67.5 億日元（約合 14.8 億台幣）建造日本最大的廢塑膠回收設施，每年可處理 6 萬噸廢塑膠，預計於 2024 年 10 月啟用，該案預估於 2030 年起每年可減少約 16 萬噸 CO₂ 排放。為了解其實施方式，遂蒐集探討日本鋼廠使用廢塑膠減碳之作業與成效，供相關單位參考。

二、廢塑膠回收技術

廢塑膠回收可以分為物理性回收與化學性回收，而化學性回收主要可分為四類，分別是「焦爐原料轉化技術」、「高爐原料回收技術」、「煤氣轉化技術」、及「油轉化技術」四類(如表 1)，

表 1 主要廢塑膠化學回收技術

技術名稱	技術特點
焦爐原料轉化技術	廢塑膠在焦爐中熱分解成 20%焦炭、40%煙油與 40%焦爐氣。
高爐原料回收技術	廢塑膠與粉煤一樣被粉碎並放入高爐。
氣化技術	廢塑膠與有限量的氧氣一起加熱，產生含有碳氫化合物、一氧化碳和氫氣的合成氣。合成氣用於合成氨、甲醇、醋酸等化學原料。
油轉化技術	將廢塑膠熔化並除去氯後，使用催化劑在 400°C 左右熱分解，得到分解油。

由表 1 可知應用於高爐煉鐵製程的方法有二，一種是「焦爐原料轉化技術」，將廢塑膠作為粉煤的替代品裝入焦爐，並轉化為焦炭(Coke)、煙油(Hydrocarbon oil)(包含焦油和輕油)以及焦爐氣(COG);另一種是「高爐原料回收技術」，將廢塑膠注入高爐，作為粉煤的替代品，以下分別介紹此兩種之流

程與特點。

1. 焦爐原料轉化技術

(1) 流程

本技術大致可分為預處理和熱分解兩項流程(圖 1)，預處理流程(圖 2)先將廢塑膠粉碎，去除異物後聚結成顆粒。而熱分解流程則將預處理過程中結塊的廢塑膠與煤一起放入焦爐，在無氧還原氣氛下，以約 1,100~1,200°C 的高溫下進行熱分解炭化。

在實際使用焦爐的試驗中，廢塑膠團塊以 1%-2% 的質量比添加到煤中，然後送入焦爐中並炭化，熱分解成焦炭 20%、煙油 40%、焦爐氣 40%(圖 3)，焦炭可在高爐中作為鐵礦石還原料；煙油含焦油(Tar)和輕油(Light oil)則用作容器及包裝樹脂的化學原料、電子材料和油漆；焦爐氣則為清潔能源用於發電廠等。

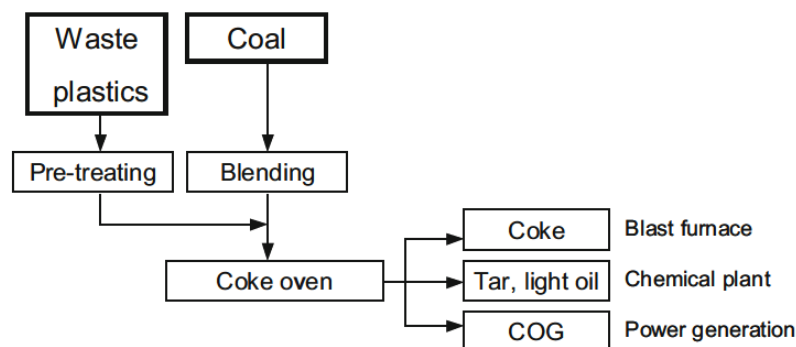


圖 1 焦爐原料轉化技術概述

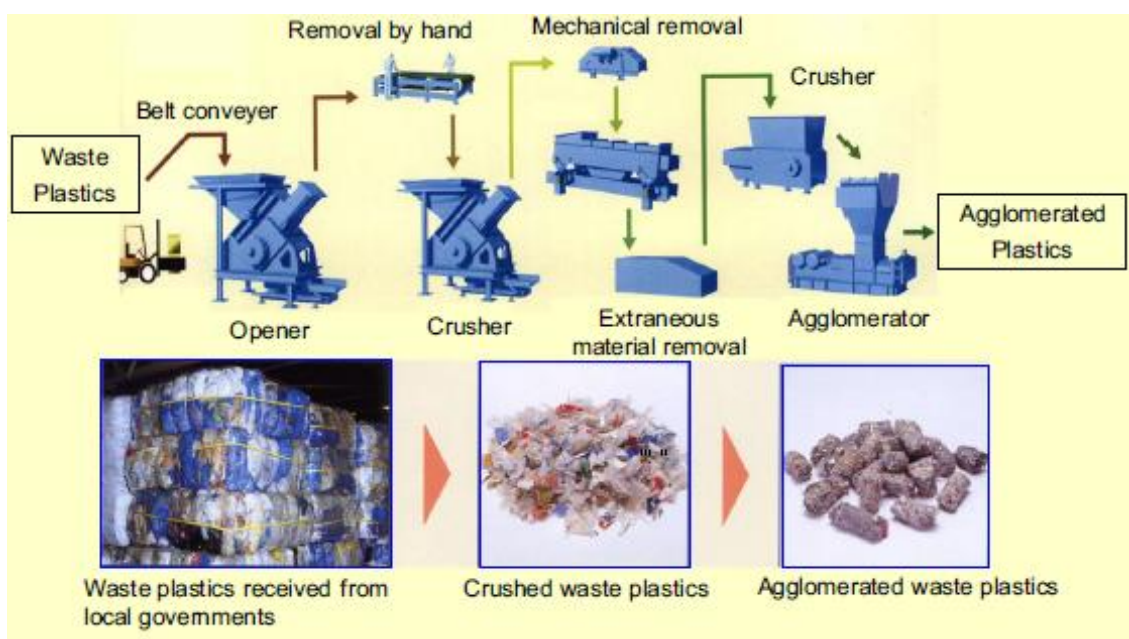


圖 2 廢塑膠預處理流程

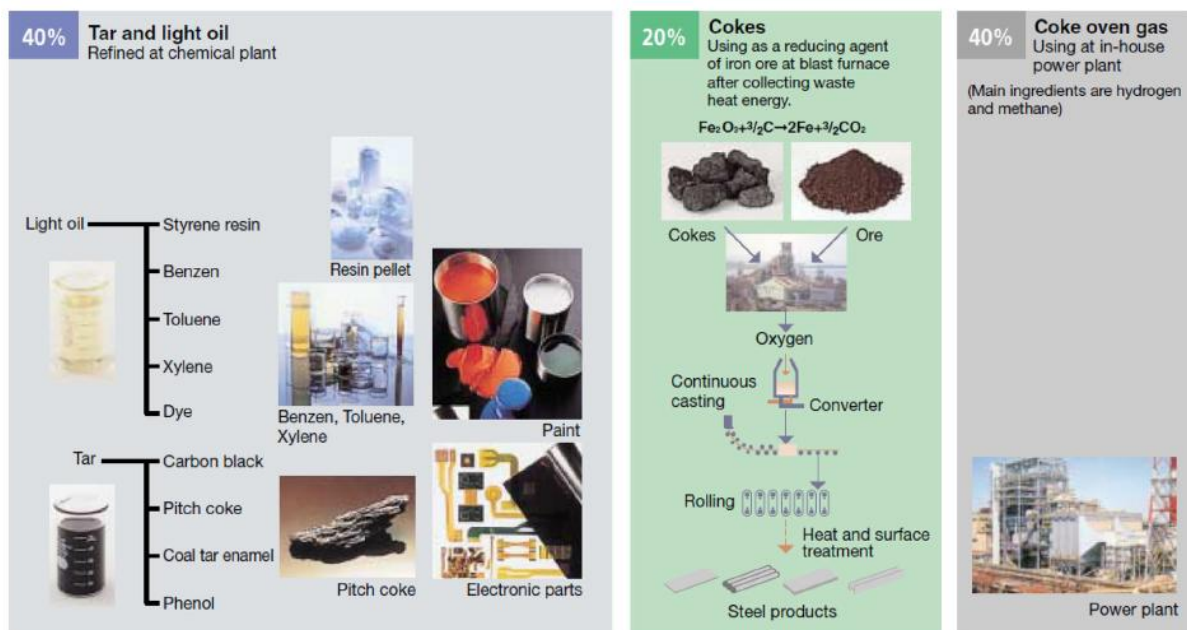


圖 3 商業化利用範例

(2) 廢塑膠用量配比

熱分解在煤軟化和熔化的溫度範圍內（約 400 至 500℃）會產生氣體，根據塑膠類型的不同，對煤的結塊性能影響不一。因此，如果在煤中添加大量廢塑料，則焦炭強度¹可能會降低。

為增加廢塑膠與煤的混合量而不降低焦炭的強度，在廢塑膠預處理過程中，透過調整顆粒尺寸和堆積比重，可有效減少煤與廢塑膠的接觸面積。

(3) 使用效益

日本製鐵發現焦爐法具有降低氯化成本的優點，因焦炭生產過程中，煤產生的氮與氯乙烯中的氯結合成無害的氯化銨(NH₄Cl)。若能控制廢塑膠中聚氯乙烯(PVC)的含量，則可免大規模的聚氯乙烯去除作業。圖 4 可看到廢塑膠中的氯最終以 7:92:1 的比例分配到焦炭、氨水和 COG 中，煤中的氯以 43:56:1 的比例分配。

且送入焦爐的廢塑膠所產生的焦炭、焦爐瓦斯、煙油等都可以在鋼廠內使用，較高爐原料回收技術更具經濟效益。

¹ 焦炭強度(Coke Strength) 當焦炭強度差時，爐內粒度變小，粉料增加，造成爐內透氣性變差、熔渣滴下不易、爐床出渣出鐵不順等異常爐況，進而造成鐵水產量損失與高爐壽命減少。

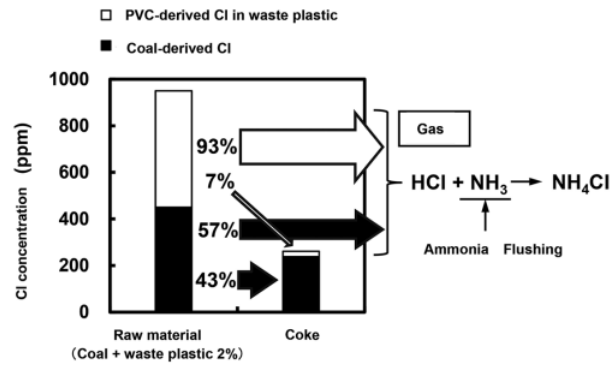


圖 4 煤和廢塑膠在焦爐中炭化時氯的行為

(4) 廢塑膠實際用量

日本製鐵已在日本建立廢塑膠接收網路，每年處理約 20 萬噸廢塑膠，約占日本廢塑膠收集量的 30%。未來將進一步增加利用焦爐化學回收塑膠的量（回收量增加 20%，可減少 12 萬噸/年 CO₂ 排放量），2020~2022 財年透過評估與驗證增加塑膠團聚體的密度來增加塑膠團聚體的重量，以將更大量的廢塑膠添加到煤中，而不會影響焦炭強度。

2. 高爐原料回收技術

(1) 起源及流程

高爐煉鐵一般多以焦炭作為還原劑，然焦炭來源有限，在 1980 年代，為減少焦炭用量，開發高爐進料口微粉碳進料技術 (APR)。JFE 鋼鐵自 1996 年起以產業廢棄塑膠作為高爐還原劑，因塑膠是由碳 (C) 與氫 (H) 所組成的化合物，於高爐中燃燒而熱分解氣化為碳與氫，與焦炭一樣皆可用來還原鐵礦石，氫與鐵礦石中的氧結合成水 (H₂O)，取代部分的碳作為還原劑，減少煉鐵製程中二氧化碳的生成量。然廢塑膠聚氯乙烯 (PVC) 所含的氯可能損壞高爐，因此預處理時需使用氯乙烯篩分和脫氯設備。

(2) 影響範圍

高爐製程中，廢塑膠僅為還原劑，非生鐵原料，不會直接影響生鐵品質；就焦爐而言，廢塑膠是焦炭的原料，因此廢塑膠將會影響焦炭的生產率與品質。

(3) 廢塑膠實際用量與效益

日本 NKK 公司在京濱廠 1 號高爐上成功噴吹廢塑膠代替焦炭，噴吹廢塑膠從 1997 年的 3 萬噸上升到 1999 年的 4 萬噸，其廢塑膠的熱利用率達 80% 以上。

三、影響焦炭強度的因子

焦炭係高爐內重要的爐料支撐原料，當焦炭強度差時，使得爐內粒度變小，粉料增加，造成爐內透氣性變差、熔渣滴下不易、爐床出渣出鐵不順等異常爐況，進而造成鐵水產量損失與高爐壽命減少，因此焦炭強度係為重要。判斷焦炭強度的指標通常用焦炭的反應性(Coke Reactivity Index, CRI)、反應後強度(Coke Strength after Reaction, CSR)、Drum Index(DI)等指標，協助操作人員提早因應爐況變化。

在焦爐原料轉化技術中，廢塑膠的添加量、尺寸/密度、類型都會影響焦炭強度，以下說明研究現況，並摘錄如表 2 所示。

1. 廢塑膠的添加量

研究顯示，塑膠添加量為 2% 時，焦炭強度(DI150-15)會在聚乙烯(Polyethylene, PE) 10mm 及聚苯乙烯(Polystyrene, PS) 3mm 時為最小。因此當塑膠添加量當大於 2% 時，將會破壞焦炭強度。

2. 廢塑膠的尺寸/密度

(1) 尺寸越大，總表面積越小，焦炭強度越大

不同密度的廢塑膠對焦炭強度的影響如廢塑膠添加比例乘以比表面積與焦炭強度(DI150-15)變化所示，如圖 5。

塑膠顆粒的總表面積與其半徑和密度成反比，因此當添加塑膠質量相同時，塑膠尺寸和密度的增加將導致總表面積縮小，使得弱焦結構減少，焦炭強度提高。

(2) 使用越緻密的塑膠團塊，可以在煤中添加更多的廢塑膠而不影響焦炭的強度。(圖 6)

當添加物為表觀密度 $0.52\text{--}0.56\text{ g/cm}^3$ 的「輕」廢塑膠時，添加量在 1.5% 時會劣化焦炭強度。當添加物為表觀密度 0.86 g/cm^3 的「重」廢塑膠時，則會在添加量達到 2.0% 時才開始劣化。

3. 廢塑膠的類型

(1) 在某些情況下，添加 PE 會增加焦炭強度；

PE 會增加煤塑層中的氣體壓力，並於再凝固層內受該氣體壓力壓

縮，增加焦炭強度。

添加 PE 粉的焦炭的孔隙率(Porosity)比未添加塑膠的焦炭在各部分高 2-3%(圖 7)，PE 分解氣體增強孔隙生長和聚結，改善焦炭孔隙結構。

一般而言，孔隙率會導致焦炭強度降低，然而添加 PE 粉末孔對結構改善的積極作用（更圓形的孔形狀、更大的孔徑、和更厚的焦炭壁）超過孔隙率增加對焦炭強度的負面影響。

(2) PS 比 PE 更會造成焦炭強度(DI150/6)降低

在研究塑膠添加對表面破碎和體積破碎的影響中發現，6~15mm 焦炭被視為體積破碎焦炭，~6mm 視為表面破碎焦炭，在一定尺寸下，焦炭強度(DI150/6)達到最小值，且 PS 比 PE 更會造成焦炭強度(DI150/6)降低(圖 8)；另，PE 及 PS 在焦炭強度(DI150/6-15) 10mm 時達到最大值(圖 9)，結論是 PE 透過影響焦炭的體積破碎(volume-breakage)影響焦炭強度(DI150/15)，PS 則透過影響焦炭的表面破碎(surface-breakage)影響焦炭強度(DI150/15)。

在 PS 熱分解後，形成的自由基從煤中提取氫，抑制煤的膨脹和熔化，降低煤的黏結性，使煤顆粒不會互相黏附，另一方面，PE 熱分解後，使空隙表面上的煤顆粒熔合良好，並且很少觀察到非黏附晶界。(圖 10)

在空隙區周圍，則皆可觀察到一個自由腫脹區(Free swelling zone)，煤顆粒不會彼此黏住，PS 或 PE 在空隙表面產生弱焦炭結構。(圖 11)

表 2 廢塑膠影響焦炭強度的因子

廢塑膠影響焦炭強度的因子	說明
添加量	添加量為 2%的情況下，焦炭強度(DI150-15)在聚乙烯(PE)10mm 及聚苯乙烯(PS) 3mm 時達到最小。 添加量當大於 2%時，會破壞焦炭強度。
尺寸/密度	(1) 尺寸越大，總表面積越小，焦炭強度越大 (2) 使用越緻密的塑膠團塊，可以在煤中添加更多的廢塑膠而不影響焦炭的強度。
類型	(1) 在某些情況下，添加 PE 會增加焦炭強度； (2) PS 比 PE 更會造成焦炭強度(DI150/6)降低

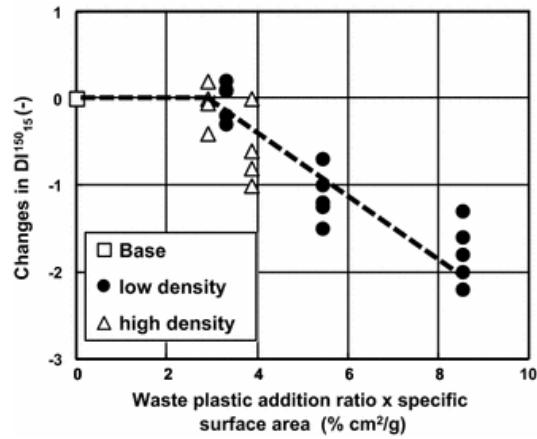


圖 5 廢塑膠添加比例乘以比表面積與焦炭強度(DI150/15)變化的關係

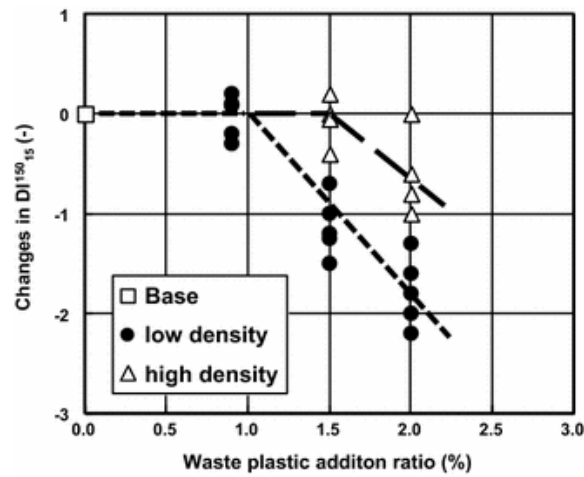


圖 6 廢塑膠添加比例與焦炭強度(DI150/15)變化的關係

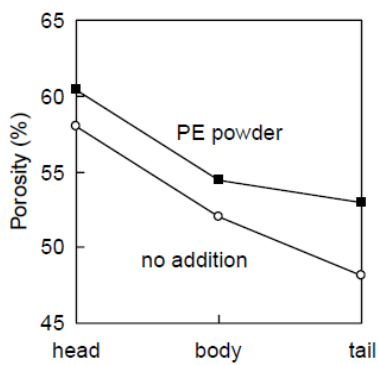


圖 7 PE 粉末添加對孔隙率的影響

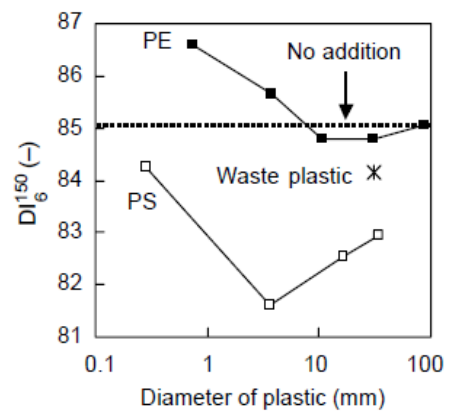


圖 8 添加塑膠尺寸對焦炭表面破碎的影響

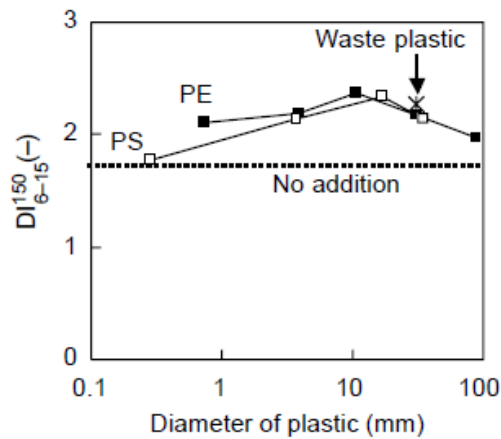


圖 9 添加塑膠尺寸對焦炭體積破碎的影響

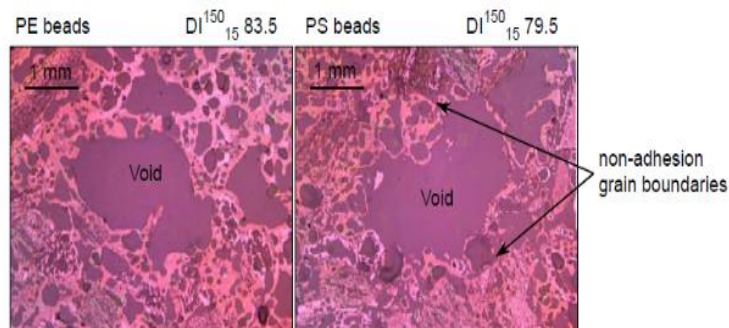


圖 10 添加 PE 和 PS 時焦炭的光學顯微影像

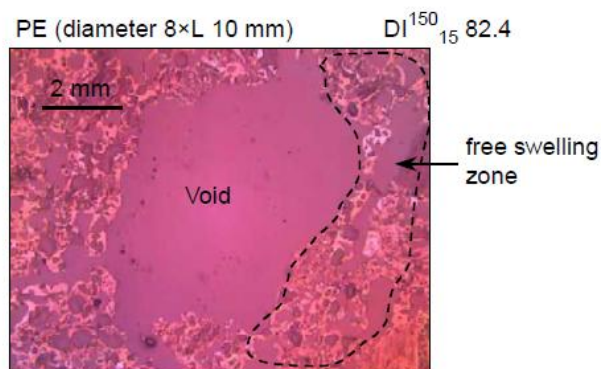


圖 11 PE(diameter 8xL 10 mm)時焦炭的光學顯微影像

四、 影響廢塑膠燃燒與氣化效率的因子

在高爐注入廢塑膠與粉煤時，可透過一些方式提升燃燒與氣化效率，例如 JFE 開發出將塑膠與粉煤和/或天然氣混合注射的技術、添加 CaCO_3 以聯合團聚提高廢塑膠強度、及廢塑膠精細破碎技術，已在工廠高爐中實際成功應用，有助於降低還原劑用量，以下進行簡單介紹。

1. 使用廢塑膠與粉煤和/或天然氣混合注射技術提高燃燒效率

(1) 將廢塑膠與粉煤混合的燃燒效率會提高，但廢塑膠類型、尺寸，對混煤的燃燒效率影響不明顯。

I. 類型：高密度聚乙烯（HDPE）與線性低密度聚乙烯（LLDPE）對燃燒效率沒有特別顯著之影響(如圖 12)；

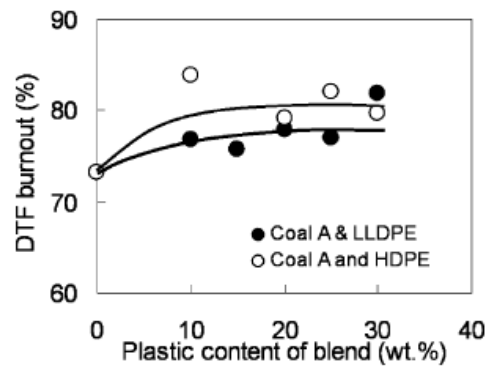


圖 12 HDPE 和 LLDPE 與煤 A 混合對其燃盡的影響

II. 高揮發性的混煤 A($L_{002}=1.34\text{nm}$)其碳結構較混煤 B($L_{002}=2.10\text{nm}$)無秩序(圖 13)，會使得燃燒效率、燃盡率較高(圖 14)，從圖 14 發現尺寸從 $100\mu\text{m}$ 增加到 $600\mu\text{m}$ 並沒有顯著影響混合物燃燒效率。

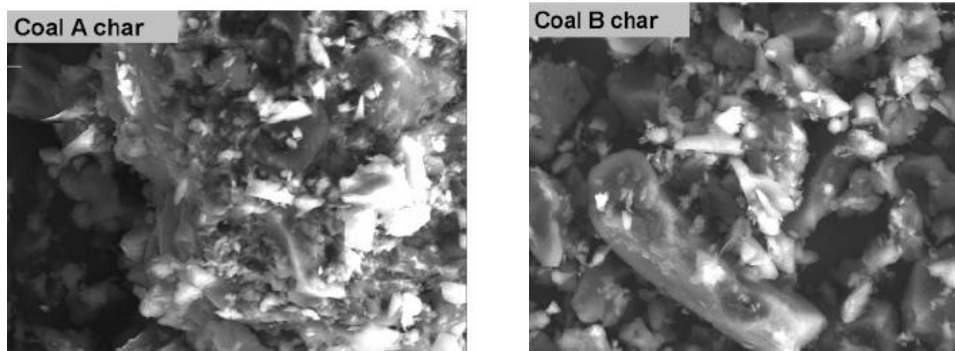


圖 13 燃燒後混煤 A (左)和混煤 B(右)的炭顆粒 SEM 影像，
白色為燃燒後的灰燼

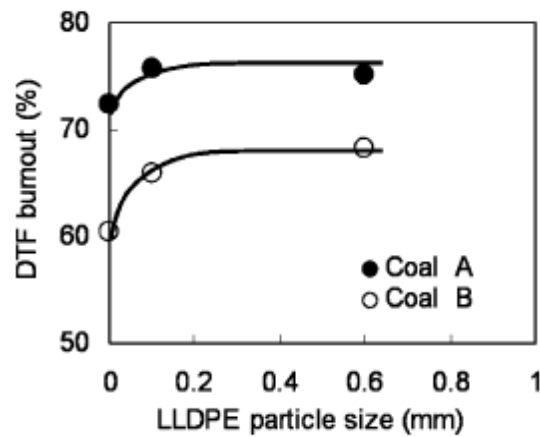


圖 14 10%的線性低密度 PE(LLDPE)混合煤燃燒的效率

(2) 粉煤、天然氣(甲烷模擬天然氣)具有促進燃燒的作用，最高溫度位置接近注入點，可得到燃燒速度由大至小為: 甲烷(模擬天然氣)、粉煤、廢塑膠(如圖 15)

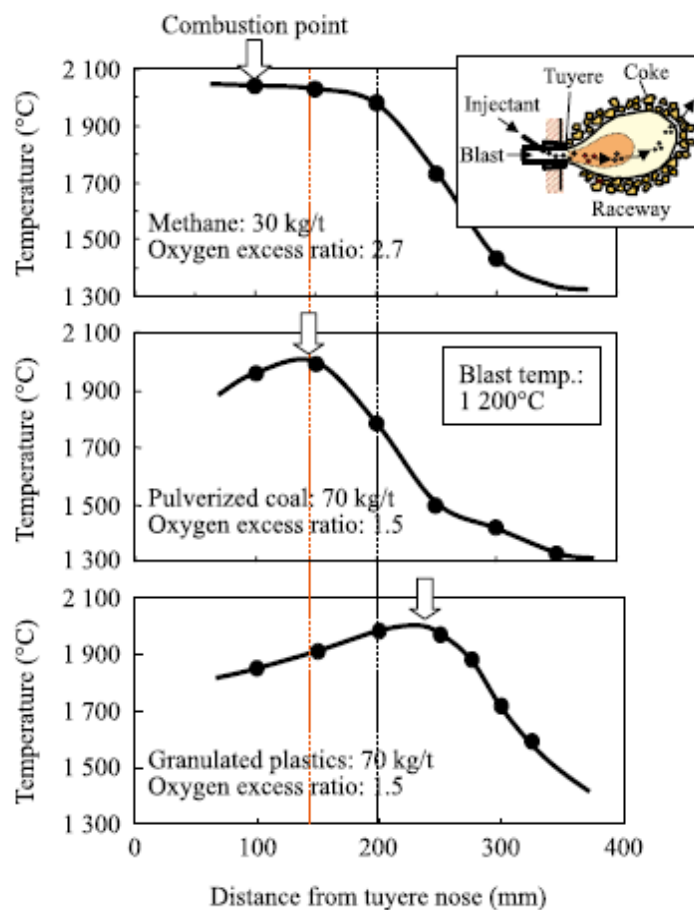


圖 15 風口分別注入甲烷、粉煤和廢塑膠的溫度變化

(3) 粉煤附著在廢塑膠顆粒的表面，在風徑區中混合，由於塑膠顆粒尺寸較粉煤大，在風徑區中停留時間比粉煤長，粉煤的燃燒熱可直接傳遞給塑膠，加速其燃燒和氣化。由於這種附著力也增加粉煤在高溫場中的停留時間，因此廢塑膠也被認為可提高粉煤燃燒性(圖 16)。

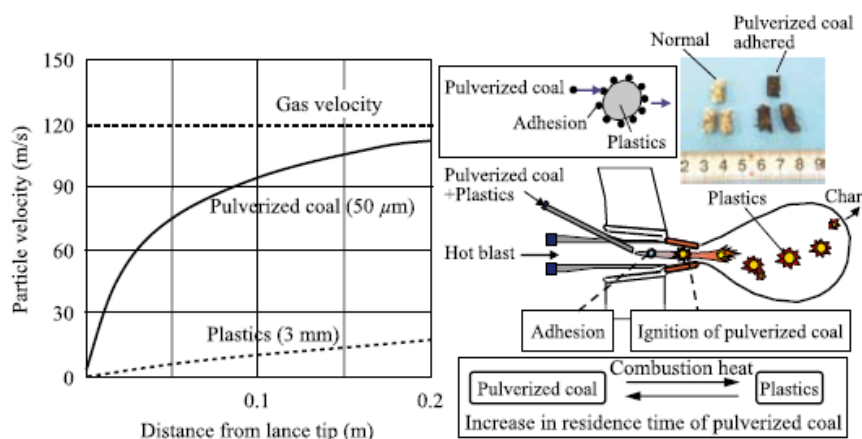


圖 16 顯示了注入 120 m/s 氣流中的塑膠和粉煤顆粒的速度變化

(4) 甲烷的燃燒速度極快，形成高溫場，加速粉煤和廢塑膠的燃燒和氣化(圖 17)。

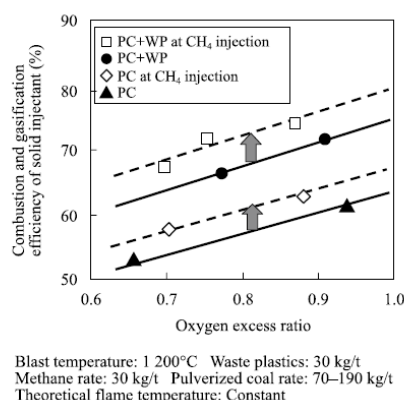


圖 17 甲烷注入對固體(粉煤、廢塑膠)燃燒效率的影響

2. 添加 CaCO₃ 以聯合團聚提高廢塑膠強度

目前廢塑膠微粉化技術使用尺寸為 10 mm 或更小的粉碎塑膠或聚結塑膠。低強度團聚塑膠在運輸和燃燒過程中容易粉化（還原為細顆粒），會降低燃燒和氣化效率，塑膠中添加的 CaCO₃ 促進熔

渣形成/熔點降低，大幅減輕爐內的壓力(圖 18)。JFE 福山地區三號高爐已採用此技術，已顯著降低焦炭比和提高爐底透氣性。

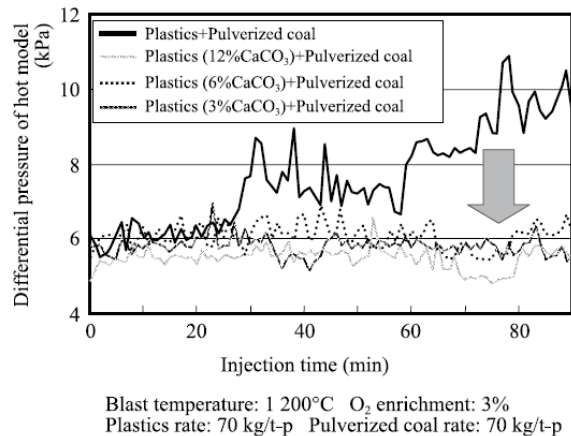


圖 18 在高爐風徑區添加 CaCO_3 的塑膠和粉煤的熱模實驗

3. 廢塑膠精細破碎技術

(1) 廢塑膠粉碎概念及產品燃燒性

由於團聚塑膠顆粒較粗，比表面積較小，因此與粉煤相比，其燃燒速度較小。

假設粉碎後的粒徑，採用與粉煤相同的燃燒性（燃燒速度、燃燒速度）作為指標。圖 19 顯示調和平均直徑與燃燒和氣化效率之間的關係。在相同粒徑下，塑膠的燃燒和氣化效率比粉煤高約 10%。為獲得與使用的粉煤相同的可燃性，從圖 18 可以估計廢塑膠的調和平均直徑約為 0.2~0.4 mm。

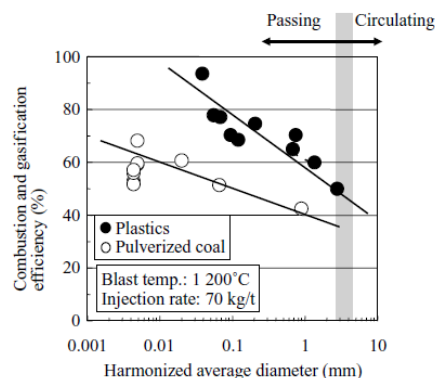


圖 19 粒徑對塑膠燃燒和氣化效率的影響

(2) 在安裝廢塑膠回收系統前，研究用風徑熱模型實驗和噴入商業高爐的廢塑膠行為發現，廢塑膠的粒徑及製備方法影響風徑區內的燃燒和氣化行為

I. 廢塑膠的粒徑的增加，其燃燒和氣化效率隨之升高，粗

塑膠較細塑膠和粉煤具有較高的燃燒和氣化效率，圖 20、21 顯示與粉煤相比，廢塑膠的面積比(A/B)波動幅度較小，表示廢塑膠表面的熱解和燃燒較粉煤不活躍；而粉碎塑膠(crushed plastics)較聚結塑膠(agglomerated plastics)具有較高的燃燒和氣化效率(圖 22)。

II. 廢塑膠之未燃炭(unburnt char)的 CO_2 氣化率遠高於粉煤(圖 23)，在模擬計算塑膠顆粒和未燃炭在高爐中的流動行為發現，未燃炭氣化速率取決於加熱速率。快速加熱條件下，炭表面形成孔隙，使受熱順利，比表面積及氣化速率皆增加的趨勢(圖 24、25)，因此廢塑膠之未燃炭可以很容易地高爐中消耗掉。

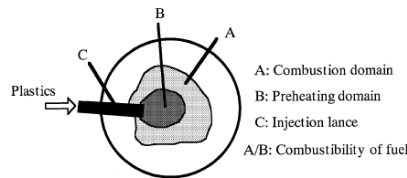


圖 20 燃燒域和預熱域之間的面積比(A/B)

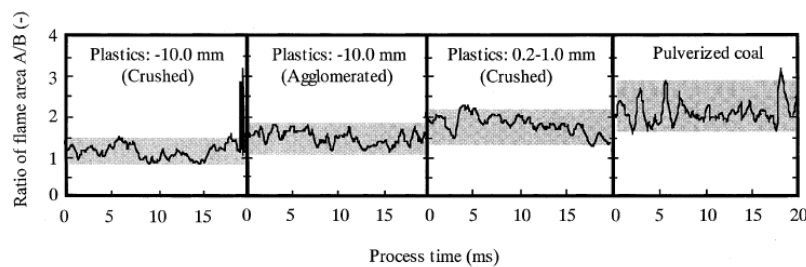
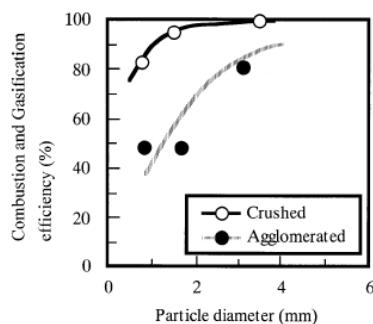


圖 21 高爐噴吹燃料對火焰面積波動的影響



Effect of plastics particle diameter on combustion and gasification efficiency.

圖 22 塑膠顆粒直徑對燃燒和氣化效率的影響

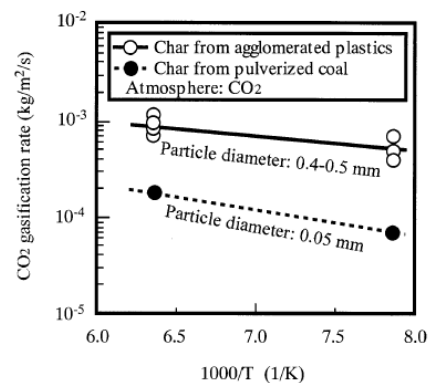


圖 23 塑膠中的炭的 CO_2 氣化率

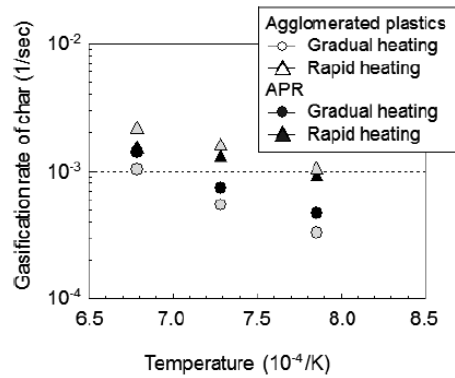


圖 24 塑膠中的炭與二氧化碳的氣化率

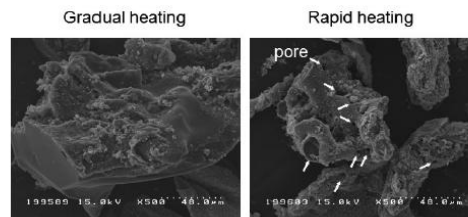


圖 25 塑膠中的炭 SEM 影像

- III. 數值模擬的結果是，塑膠的初始直徑和焦炭直徑決定了高爐中的流動行為。當注入較細的塑膠或未燃炭直徑較小時，未燃炭隨氣流上升，大部分可能在軟熔帶 (Cohesive zone) 被消耗。另一方面，當注射相對較粗的塑膠且未燃炭的直徑相對較粗時，表示未燃炭積聚在死鐵區(Deadman)周圍。
- IV. 死鐵區的積聚的未燃炭會與 FeO 反應或滲碳 (Carburization)，產生的灰渣 (Ash)其氧化鋁含量相對高，是高爐渣(BFS)的兩倍(高爐渣氧化鋁含量約 15%)，已知高濃度氧化鋁的爐渣黏度高。因此認為，未燃炭會導致氣體和液體滲透性降低(表 2)。

表 2 塑膠的化學組成

	Proximate analysis (dry base, wt %)			Ultimate analysis (dry base, wt %)		
	VM	FC	Ash	C	H	O
Agglomerated Plastics	93.8	3.4	2.8	76.7	11.0	5.6
APR	79.5	10.1	10.4	73.6	8.0	6.4

	Composition of ash (dry base, wt %)					
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂
Agglomerated Plastics	7.1	29.4	28.9	13.3	5.2	9.4
APR	9.6	29.3	25.3	9.7	8.9	7.0

綜上，為了避免未燃炭積聚，認為細塑膠注入(Fine plastics injection)有利於高爐的穩定運作。

(3) 廢塑膠微粉化技術(Advanced Plastics Recycling, APR)

- I. 由高爐下方風徑區進料口吹入塑膠粒時，因原本的焦炭周圍溫度接近 2000℃，塑膠粒應可熱分解為碳和氫，而碳和氧結合成還原氣體 CO。

但進料口前端的流速大於 200m/s，塑膠粒於風徑區內之滯留時間只有 0.02 秒，在這麼短的時間內塑膠粒無法充分轉化為還原氣體，若要提高高爐產率，提高進料口吹入之熱空氣流量，導致流速隨之增加，塑膠粒在風徑區內之滯留時間更縮短，會使 6-8mm 的塑膠粒無法順利完成熱分解反應，產生塑膠粒殘留的問題。

因此縮小吹入之塑膠粒徑，或許可提高反應速率，但塑膠微粉化可能會導致塵暴，JFE 鋼鐵找出塑膠粒的最適粒徑 1mm，開發出廢塑膠微粉化技術。

- II. JFE 鋼鐵在 1996 年於京濱地區一號高爐安裝廢塑膠回收系統，2007 年於京濱地區建造產能 8000 噸/年的粉碎廢塑膠（平均直徑 0.2~0.4 mm）。

2015 年 JFE 鋼鐵京濱地區約每年使用 15,000 噸 APR 高爐還原劑，1 噸 APR 高爐還原劑用於煉鐵製程約可減少 2.8 噸的 CO₂ 排放，一年估計可減少 42,000 噸的 CO₂ 排放。

五、 結論

為配合淨零永續發展，鋼鐵產業面臨低碳冶煉轉型的發展階段，因此國際上各大鋼廠開始致力於製程減碳技術的開發，本次探討日本鋼廠將廢塑膠回收應用於焦爐及高爐減碳之研究發現，其用於製程減碳具有環保價值，但亦有影響設備或製程效益的風險，不過可藉由投入廢塑膠之質量降低風險。日本製鐵是以研究焦爐原料轉化技術為主，JFE 則是焦爐與高爐皆有進行廢塑膠回收應用研究。

在焦爐原料轉化技術中，JFE 鋼鐵研究出廢塑膠添加量不超過 2%、尺寸越大、密度越高及使用聚乙烯(PE)等條件，會使得熱分解成焦炭的品質較佳。日本製鐵則發現焦爐可以耐受氯，因生產焦炭過程由煤產生的氯可與氯乙烯中的氯結合，變成氯化銨，故以焦爐原料轉化技術，適當控制廢塑膠中聚氯乙烯(PVC)的含量，即不須進行大規模脫氯降低氯化成本，此外，送入焦爐的廢塑膠所產生的焦炭、煙油、焦爐氣等都可以在鋼廠內使用，較高爐原料回收技術更具經濟效益。

在高爐原料回收技術中，廢塑膠與粉煤、天然氣(或甲烷模擬天然氣)混合，燃燒效率會提高，粉煤、天然氣具有促進燃燒的作用；JFE 福山地區三號高爐現已採用添加 CaCO_3 的廢塑膠技術，顯著降低焦炭比和提高爐底透氣性；粗塑膠雖較細塑膠和粉煤具有較高的燃燒和氯化效率，但未燃炭較易導致積聚在死鐵區，細塑膠有利於高爐穩定運作，而 JFE 開發的廢塑膠微粉化技術，已找出廢塑膠粒徑 1mm 或更小粒徑，替代部分焦炭加入高爐當還原劑。

從日本鋼廠於廢塑膠回收於鋼廠製程減排的研究及成果來看，日本鋼鐵業十分重視推動循環經濟以實現永續發展目標，已知 1 噸 APR 高爐還原劑用於煉鐵製程約可減少 2.8 噸的 CO_2 排放。按 JFE 近年計畫，於京濱地區投資 67.5 億日元（約合 14.8 億台幣）建造日本最大的廢塑膠回收設施，每年可處理 6 萬噸廢塑膠，該案預估於 2030 年起每年可減少約 16 萬噸 CO_2 排放。日本製鐵雖沒有提出未來較具體的廢塑膠回收減排計畫，但也積極增加塑膠回收處理量，並修訂廢塑膠處理規則。「資源循環零廢棄」為台灣 2050 淨零轉型之十二項關鍵戰略之一，公司亦可在 CO_2 減排效益及加工成本上進行廢塑膠回收應用評估。

六、參考資源

1. Development of Waste Plastics Recycling Process Using Coke Ovens, 新日鐵技報, 384 期, 2006
2. 全球塑膠先進回收技術發展動態, IEK 產業情報網, 2022-11-25。
3. Kato, K., Nomura, S. & Uematsu, H., Waste plastics recycling process using coke ovens, J Mater Cycles Waste Manag., Vol.5, pp.98-101, 2003.
4. Nomura, S., et al., Use of Waste Plastics in Coke Oven: A Review. J. Sustain. Metall., Vol.1, pp.85-93, 2015.
5. 李守仁, 白立文, 回收廢塑膠應用於鋼鐵工業, 材料世界網, 2015-09-02。
6. ASANUMA Minoru, et al., Establishment of Advanced Recycling Technology for Waste Plastics in Blast Furnace, JFE TECHNICAL REPORT, No.13, 2009.
7. Sushil Gupta, Veena Sahajwalla, and Jacob Wood, Simultaneous Combustion of Waste Plastics with Coal for Pulverized Coal Injection Application, Energy & Fuels, Vol.20, Issue 6, 2006.
8. Minoru Asanuma, et al., Development of Waste Plastics Injection Process in Blast Furnace, ISIJ International, Vol.40, Issue 3, pp.244-251, 2000.
9. Ryota Murai, et al., Flow Behavior of Plastic Particles in the Lower Part of Blast Furnace, ISIJ International, Vol.55, Issue 3, pp.528-535, 2015.
10. Masahiro SEKIYA, et al., Aiming to Become a Steelworks That Plays a Role in Recycling-oriented Society, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT, No. 127, 2022.