

コークス炉化学原料化法による一般廃プラスチックの再資源化技術

Municipal Waste Plastics Recycling Technology for Producing Chemical Raw Materials
Using Coke Ovens

新日本製鐵株式会社

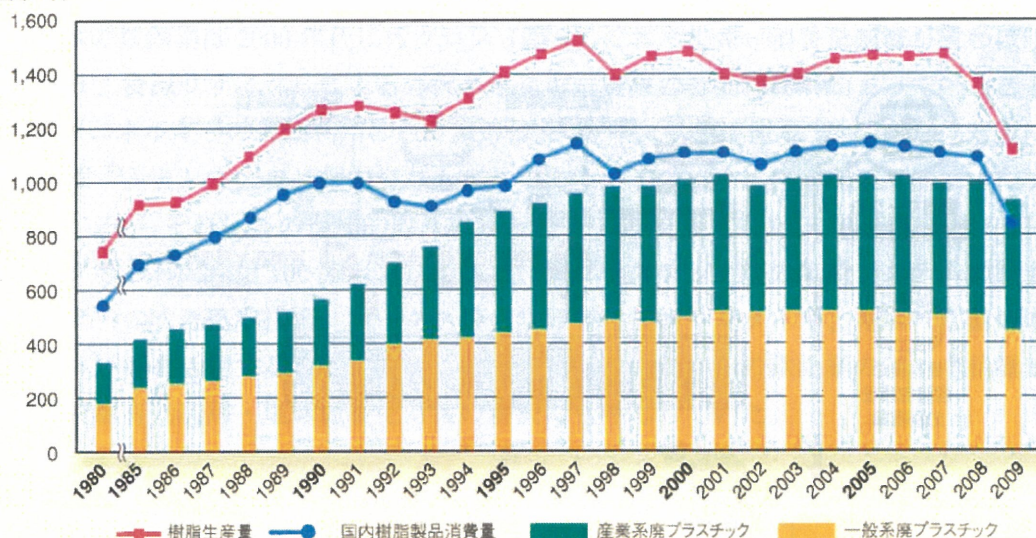
1. 研究開発の背景と目標

(1) 社会的背景と容器包装リサイクル法の制定

今日、資源循環型社会の構築が盛んに議論されてきているが、その中でも特に、廃プラスチックの排出量とその処分方法が大きな問題となっていた。図1¹⁾に示すように、1990年代の後半以降、我が国のプラスチックの排出量は約1000万トンで推移しており、産業系廃プラスチック（プラスチックの製造や加工、流通段階などで排出される廃プラスチック）、一般系廃プラスチック（家庭から排出される廃プラスチック）ともに約500万トンずつを占めている。

■プラスチックの生産量・排出量

(万t/年)



出典：(社)プラスチック処理促進協会

図1 プラスチックの排出量¹⁾

その処理方法は、図2に示すように、1999年時点で、焼却と埋め立てがあわせて50%以上を占め、有効利用されているのは半分にも満たない状況であった。さらに、一般系廃プラスチックの約7割を容器包装系プラスチックが占めており（図3）、当時は大部分が焼却や埋め立て処分されており、その有効活用が自治体の焼却能力の問題や逼迫する埋め立て処分場の確保等の面からも大きな問題となっていた。

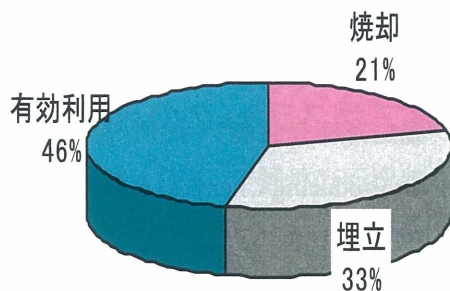


図2 廃プラスチックの処分方法 (1999年)¹⁾

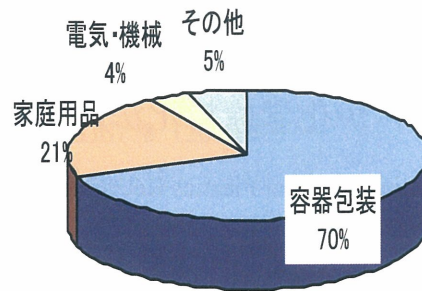


図3 一般系廃プラスチックの内訳 (1999年)¹⁾

このような廃プラスチックの処分問題を解決するために、容器包装リサイクル法の制定が議論されて、平成12年(2000年)4月に完全施行された。この制度は、逼迫するごみ処分場の容量や自治体の焼却設備の能力や更新時期などの問題解決するために施行された。市民、自治体、事業者(費用負担者である特定事業者)及び再商品化事業者(リサイクラー)の役割がそれぞれ定められている。この法律の制定で一般系廃プラスチックを社会システムとして有効利用するための集荷問題が解決に向けて大きく前進した。

プラスチック製容器包装は同法が完全施行された平成12年度から収集が開始され、平成23年度では自治体参加率約60%近くにまで進展している。

図4に容器包装リサイクル法の概念図を示す。「指定法人:(財)日本容器包装リサイクル協会」が設置されて、自治体毎に収集される分別収集物とリサイクル費用の流れを管理している。

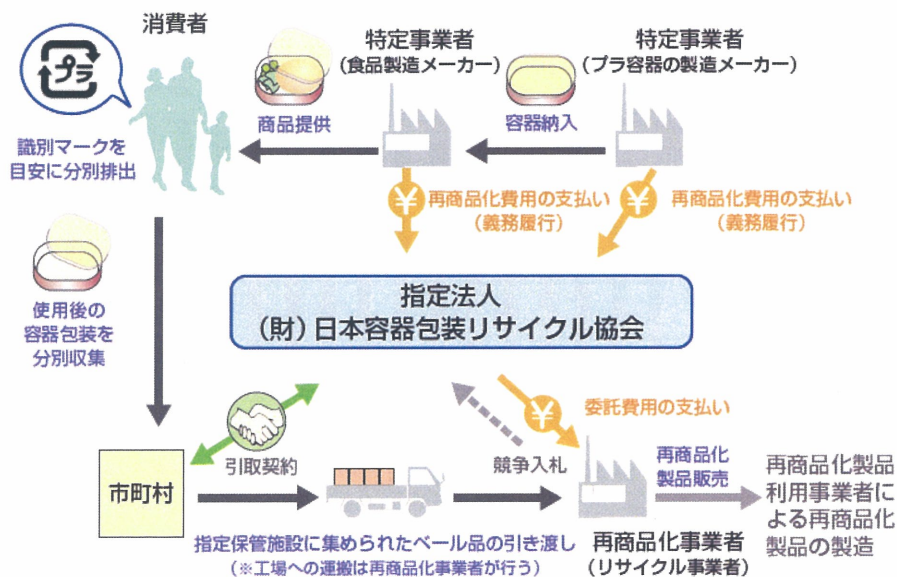


図4 容器包装リサイクル法のスキーム²⁾

まず、消費者は自治体が決める分別区分(ビン、缶、PET、紙容器、プラスチック容器等)毎に分別排出する。次に自治体は分別品目毎に収集し、定められた形態(プラスチックの場合はボール状:一辺1m程度の立方体)に圧縮・梱包、容器包装リサイクル協会が毎年入札方式で再商品化事業者(リサイクラー)を決定し、指定された再商品化事業者に引き渡す。再商品化に必要な

な料金は、容器包装リサイクル協会が毎年特定事業者から集金し、再商品化処理実績にあわせて再商品化事業者に支払うスキームである。このように容器包装リサイクル法は、前述したように消費者（市民）、行政、企業などに役割分担を定義した全員参加型の社会システムである。

（２）鉄鋼業界における地球温暖化対策への取り組み

鉄鋼業は、わが国の最終エネルギー消費の約 11%を占める産業で、そのエネルギー源である石炭と石油を全量輸入しているため、必然的に国際競争力を確保するのに世界最高のエネルギー効率を維持する必要がある。図 5 に各国の鉄鋼業のエネルギー原単位を示す³⁾。日本のエネルギー原単位を 100 とすると、EU 120、中国 129、米国 125、露 136 と日本のエネルギー利用効率が格段に高いことが分かる。

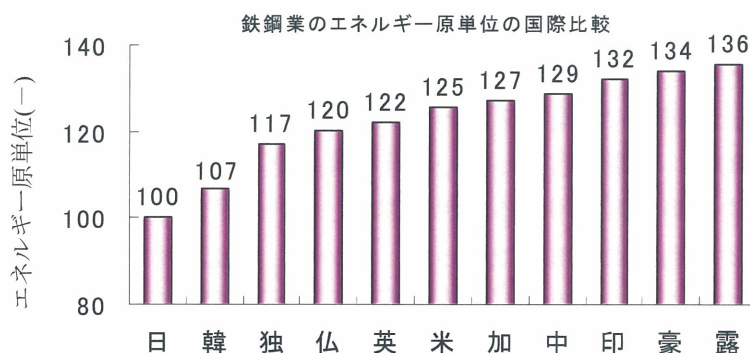


図 5 鉄鋼業のエネルギー原単位の国際比較³⁾

反面、日本の鉄鋼業は 2000 年代にはグロス（図 6）のエネルギー消費量削減が言わば限界近くに達しており、資源リサイクルによる外部エネルギー資源の有効利用が始まっていることが分かる。外部資源エネルギーの有効利用の取り組みは 1998 年に鉄鋼連盟が「地球温暖化対策に関する自主行動計画⁴⁾」として公表した内容にも表れている。そのエネルギー削減目標は 11.5%の数値目標としているが、それ以外の追加的取り組みとして 1.5%を設定した。この追加的取り組みが「廃プラスチック等の有効利用 100 万トン」である。廃プラスチック等の集荷システムの社会的整備を前提に高炉への吹き込み技術、コークス炉化学原料化技術や廃タイヤ、ASR（自動車のシュレッダーダスト）等を活用することを検討したものである。これらの鉄鋼業の省エネ目標は社会のごみ問題・資源有効利用・地球温暖化対策の解決にも呼応していた。

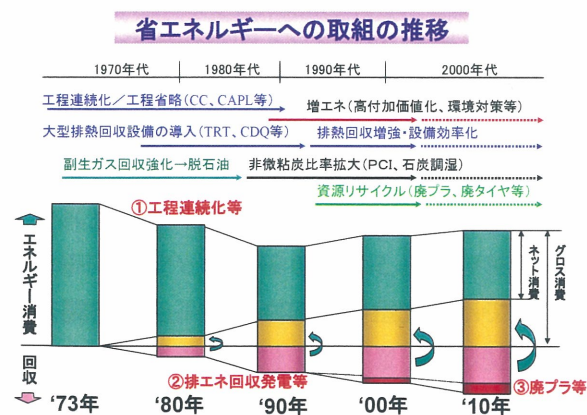


図 6 省エネルギーの取り組み推移⁴⁾

国内で未利用だった廃棄物起因のプラスチックやタイヤのような外部リサイクル資源をエネルギー効率の高い鉄鋼プロセスの原料代替として利用すると輸入資源が節約されるため、日本全体としてのCO₂発生が節約される。産業インフラのこのような活用は、社会システムとしての地球温暖化対策（CO₂削減）、ごみ減量化による焼却炉や最終処分場の削減、焼却や埋立てによる化学物質の拡散抑制に直接的に寄与するものとして、社会的にも期待されている。

2. 研究開発の経過

当社は、平成2年（1990年）に廃プラスチックの油化法での利用を検討してラボ試験を開始した。しかし、油化設備はその熱分解、油回収工程が石油蒸留設備と同様のプラントで立地が制約されること、回収される熱分解油はラジカルな高分子構造を持つため発火性が高く、防災設備が必要であること、乾留残渣であるカーボン系の残留物の定期的な除去作業等を考慮するとコストパフォーマンスが極めて悪いことが明らかになり、断念することとなった。

同時期に、当社は、有機物である廃プラスチックを熱分解させ、油分、ガス等を取り出してエネルギー利用する目的で、塩素を含有しない産業系廃プラスチック（例えば、ポリエチレンの電線被覆材等）をコークス炉で再利用する検討を実施していたが、容器包装プラスチックのような塩素含有プラスチックの利用には慎重であった。しかし、非塩素系の産業系廃プラスチックでは収集ルートが確立しておらず、収集量が極めて少なかった。容器包装リサイクル法の制定で自治体の収集ルートが確立する見込みがたったことにより、塩素を数%含むものの容器包装プラスチックの集荷が効率的で大量の入荷が可能になることから、塩素含有プラスチックの利用技術にターゲットを切り替えた。事業性を考慮する場合、油化研究の失敗から、製鉄業の既存プロセスの活用の視点で検討を重ねていったところ、石炭を乾留する「コークス炉」に着目した。既存設備である「コークス炉」を熱分解工程と位置づけ、塩素を含む廃プラスチックを石炭とともに添加して、コークス炉に付帯するコークス炉ガス精製設備で、タール、軽油等の炭化水素油成分やコークス炉ガスを回収する「コークス炉化学原料化法」の開発に移行した。非塩素系のプラスチックのコークス炉での利用の検討は実施していたことから、最も大きな課題の一つは塩素の挙動とその無害化にあった。平成10年5月から検討を開始し、平成12年の容器包装リサイクル法「その他プラスチック」の施行タイミングを見据えて、研究開発段階から実機検証へと急ピッチで展開し、翌年の平成11年5月に実機化の目途を得るとともに容器包装リサイクル法の技術認定を受けた。

3. 研究開発の内容と特徴

（1）コークス炉の概要と特徴（石炭の熱分解）⁵⁾

コークス炉とは、高炉で使用される鉄鉱石の還元材となる圧潰強度の高い高品質のコークスを製造するための設備である。日本国内のコークス炉はそのほとんどが鉄鋼業向けで、年間に乾留される石炭の総量は約5000万トン／年である。ちなみに、廃プラスチックを日本国内のコークス炉に1～2%添加すると、廃プラスチック50～100万トン／年を利用することができる。

室炉式のコークス炉（図7）では炭化室に装入された石炭は密閉され、無酸素状態で乾留される。熱源は隣接する燃焼室で炉壁煉瓦を通して炭化室の両側から加熱される。加熱初期では炉壁面に近い部分の石炭は急速に乾留されてコークスとなり、その中心寄りには半熔融状態の軟化熔融層が存在し、その内部には粉炭のままの石炭がある（図8）。

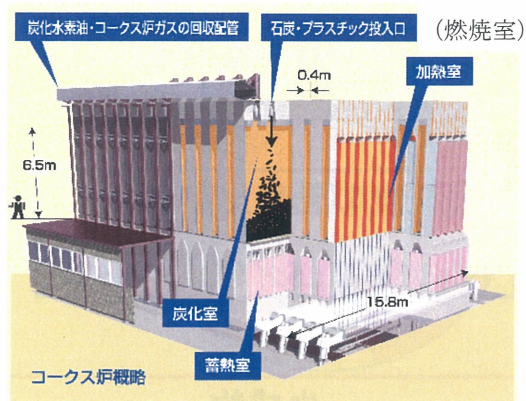


図7 コークス炉概略図

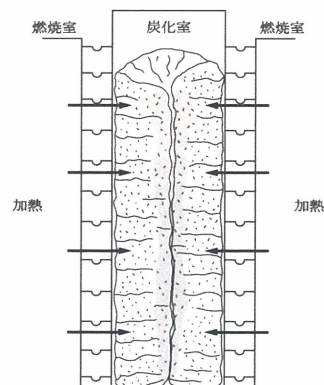
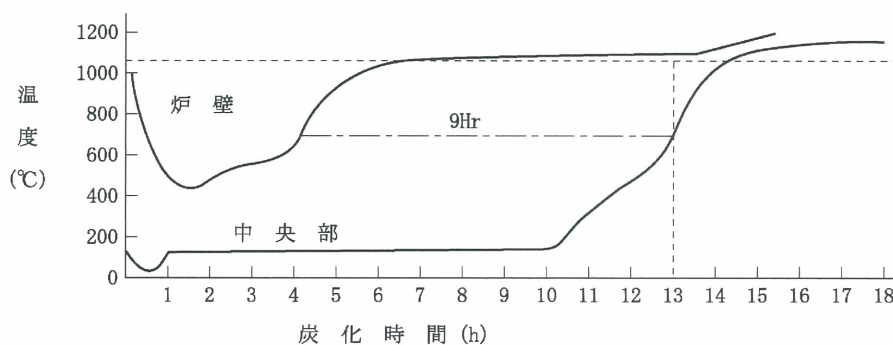


図8 乾留後の炭化質の状態



炭化室内炉壁及び中央部の温度を示す

----- は石炭を装入しない時の炉壁温度

図9 コークス炉の炉壁側と中央部の温度推移

発生ガスやタール（油分）は主としてコークス層と炉壁空間を通過して熱分解を受けながら炉頂空間に達し、ドライメン（ガス集合ヘッダー）を経て、ガス精製設備に導かれる。図9に炭化室中央部及び炉壁の温度経過を示す。

石炭装入直後の炉壁の表面温度は、冷たい石炭によって冷却されるため一時的に数百℃付近まで低下するが、炉壁に接する部分の石炭から水分が蒸発すると急速に炉壁温度は上昇する。水分の蒸発が終わった部分は、石炭の温度上昇に伴って軟化し、石炭の熱分解が始まりガス及びタール（油分）が盛んに発生する。この温度帯はおよそ 400℃～480℃で加熱石炭は軟化熔融状態を形成する。石炭の軟化熔融層は通気抵抗が高く、ガスが透過しにくいのでコークス炉の中央部側で発生したガスやタールを包んだような形となるため、乾留末期の両壁から進行してきた軟化熔融層が中央部分で合体する時にガス圧力が高くなり炉壁に押し付ける力を及ぼす。コークス炉中央部の温度が 1000℃に近づくとコークス中央部に亀裂（焼き上がり時に炭化室中央部に出来る炉長方向の割れ目）が形成され、1000℃以上のコークス化終了温度に達するとガス、タール分の発生は終了し、収縮により両側の炉壁から剥離し、押し出し可能な状態となる。数時間の置き時間を経て装入から約 20～24 時間でコークスが製造される。コークスは、高炉で鉄鉱石の還元材として使用される。熱風により高炉内での反応を効率的に進行させるため、コークスは通気性を確保するよう圧潰強度が高いことが要求される。

図10に示すように、一般的に、石炭中には炭素（C；87%）だけではなく、水素（H；5%）、

酸素（O；6%）、窒素（N；2%）の成分が含有されている。これらは、コークス炉内にて高温乾留されて、コークス（固体）、コークス炉ガス；COG（気体）、軽質油等（液体）の三相に物質転換される。さらに、窒素（N）を含有しているために、アンモニア（NH₃）が気相中に含まれる。

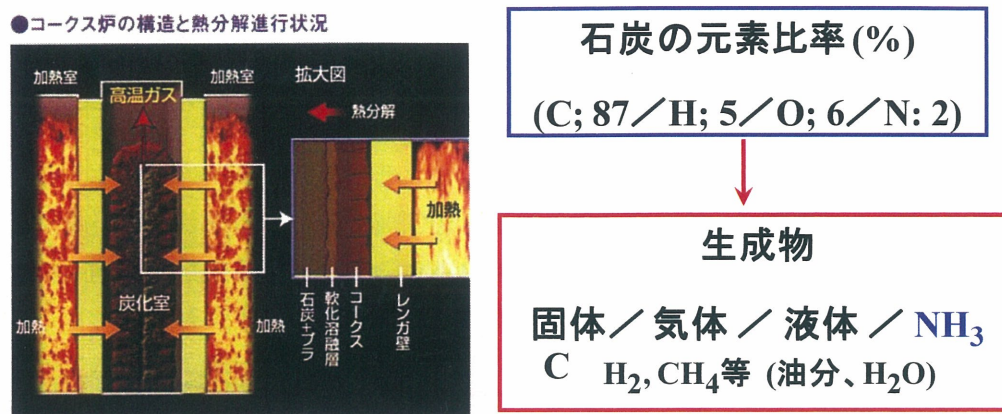


図 10 石炭のコークス炉内での熱分解挙動

図 11 にコークス炉の製鉄所での役割を示すが、高炉の還元材としてのコークスを製造するだけでなく、高効率発電用のガス供給や、タール・軽油等のプラスチック化学原料などを製造する総合的な天然資源の高効率活用設備である。

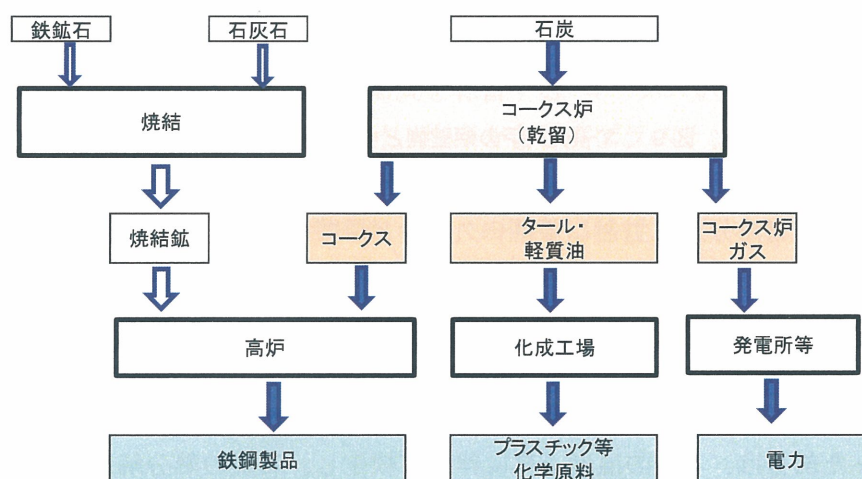


図 11 コークス炉の製鉄所での役割

(2) プラスチックの熱分解挙動⁶⁻¹²⁾

1) 各種プラスチックの熱分解挙動

家庭から排出される一般系廃プラスチックのうち、容器包装プラスチックの組成の一例を図 12 に示す。容器包装プラスチックでは、ポリプロピレン（PP）、ポリエチレン（PE）、ポリスチレン（PS）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリ塩化ビニル（PVC）などの様々な組成が混在する。PVC は 56.8%の塩素を含んでいるため、容器包装プラスチックには数%の塩素分が含まれる。

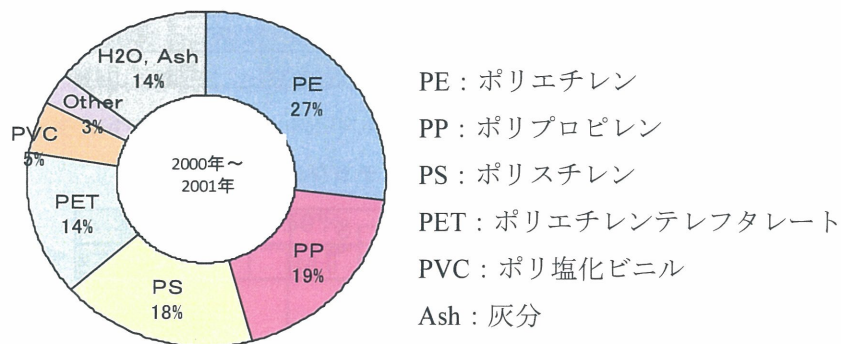


図 12 容器包装プラスチックの組成の一例（プラスチック処理促進協会）

各種のプラスチックを熱天秤により、窒素中で加熱した場合の重量減少曲線を図 13 に示す。一般的な廃プラスチックは約 200℃～450℃でガス化し、約 500℃以上では残渣として炭化物（固体）が生成する。プラスチックの原料は石油で、主として炭素と水素から成る高分子化合物であるが、様々な材料機能要求から多様な化学成分が含まれている。それぞれの元素間の結合乖離エネルギーにより、特徴的な熱分解パターンを持っている。粒状化処理した廃プラスチックを石炭とともにコークス炉の炭化室に投入すると図 9 に示される様に炭化室中央部は 12～13 時間後の石炭乾留中期には全域が 550℃以上となるためプラスチックのガス化成分はすべて熱分解される。さらに石炭乾留終了温度の 1000℃では有機化学系物質は存在し得ないので有機系有害物質の残留は見られない。

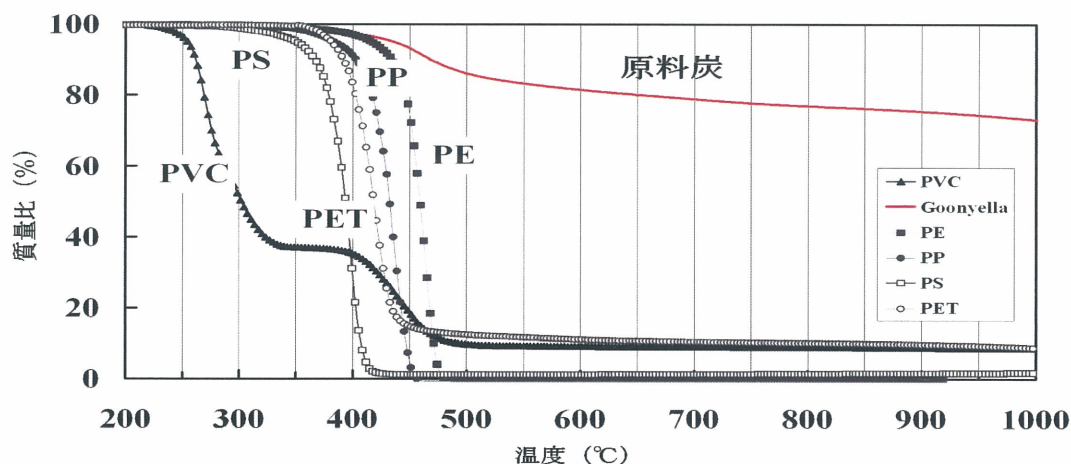


図 13 各種プラスチックの熱分解挙動⁹⁾

2) 容器包装プラスチックの乾留歩留（実炉試験）

次に、実際の容器包装プラスチックを使用して実炉試験により、乾留歩留を評価した。実炉試験で使用した容器包装プラスチックの組成および元素分析値を表 1、2 に各々示す。容器包装プラスチックの添加率は石炭に対して 1～2%とした。

表 1 容器包装プラスチックの組成分析

PE	PS	PP	PVC	PVDC	PET	その他
21.4	24.8	13.7	5.2	0.4	15.5	19

表 2 容器包装プラスチックの元素分析

C	H	N	S	Ash	Cl
72.6	9.2	0.3	0.04	5	2.8

容器包装プラスチックをコークス炉で乾留した場合の乾留歩留を図 14 に示す。コークス約 20%、タール・軽油約 40%、ガス約 40%であり、これら容器包装プラスチック由来のコークスは高炉における鉄鉱石の還元材として、タール、軽油などの油分はプラスチックなどの原料として、ガス（水素リッチガス）はクリーンエネルギーとして発電所などで、全量有効利用可能であることがわかった。一方、容器包装プラスチックには、表 2 に示すように、PVC, PVDC（ポリ塩化ビニリデン）由来の塩素が数%含まれており、設備等への影響を確認することが必要である。

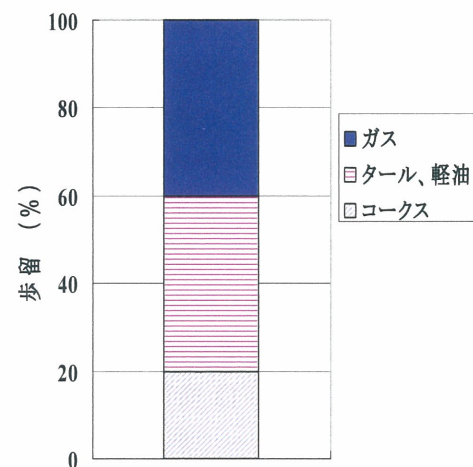


図 14 容器包装プラスチックの乾留歩留（実炉試験）

（3）廃プラスチック処理の課題と対応

容器包装プラスチックをコークス炉で継続的に処理するためには、コークス炉における廃プラスチック中の塩素成分の挙動を把握し、その設備系への影響（耐火物や配管、構造物への影響）、タール等の化学製品やガスへの影響、コークス品質への影響などを確認して対応を講じることが重要となる。

1）廃プラスチック中の塩素成分の挙動

①プラスチック中の塩素の挙動

プラスチック中の塩素の挙動に関しては、まず、プラスチック単体での熱分解時の挙動を調査した。まず、純物質の PVC に関する熱分解挙動は、99.4%と極めて高い比率で気相に塩素が移行することがわかった。さらに、いろいろなプラスチックの混合物である容器包装プラスチックを用いて同様な実験を行った結果、98%とこちらも高い比率で気相に移行することがわかった。塩素の気相への高い比率での移行は、一方、塩化水素（HCl）の発生が想定され、設備腐食等への問題が懸念された。

②廃プラスチックと石炭の共存下での塩素の挙動

廃プラスチック単独での熱分解挙動は先に示した通りほぼ 100%気相に塩素が移行する事が

わかった。これに対して、石炭の乾留過程（熱分解）においては、石炭中に窒素が含まれており、窒素の挙動も重要である。石炭中の窒素の 50%はコークス中に残存するが、50%は気相に移行する（図 15）。気相に移行した窒素の一部は N_2 の形態をとり、一部は、アンモニアに転換されおよそ 200 モルの窒素がアンモニアの形態で気相に存在している。

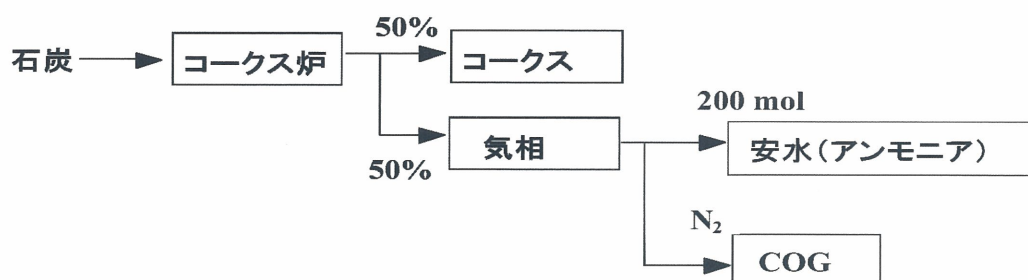


図 15 石炭乾留時の窒素のバランス

以上の検討から、石炭とプラスチックをそれぞれ単独で乾留した時には、塩素は塩化水素、窒素はアンモニアの形態として存在するが、両者を混合して（含塩素廃プラスチックを石炭共存下で）乾留した場合、化学反応により塩化アンモニウムとして固定化され、塩素が無害化される可能性があると考えるに到った。この考えを検証するために、石炭共存下で含塩素プラを乾留し、塩素の形態をイオンクロマト法で分析した結果、容器包装プラスチック中の塩素は 93%が塩化アンモニウムとして安水中に存在していることが分かった。

コークス炉法では先に述べたように石炭起因の窒素と水素から生成されるアンモニア（ NH_3 ）が多量に存在する。プラスチック起因の塩素成分はこのコークス炉ガス中のアンモニア成分（石炭起因）と反応し、塩化アンモニウムとして安水中に移行し、無害化できると考えられる（図 16）。

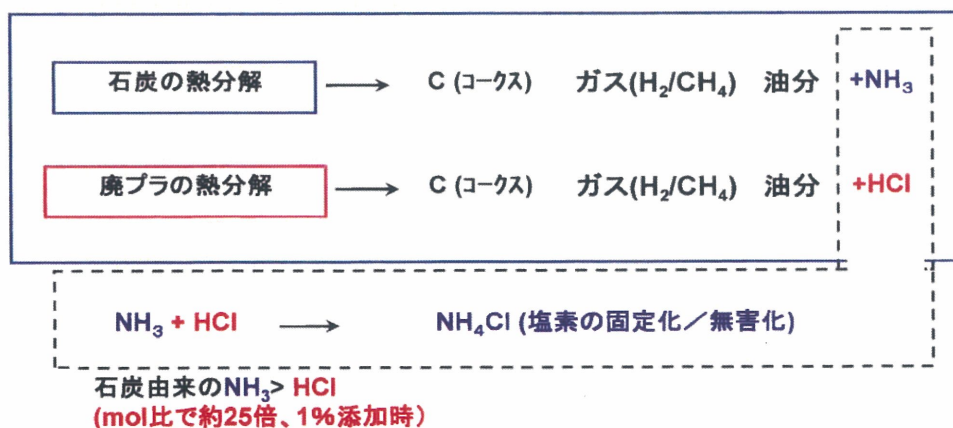


図 16 コークス炉内での塩素の無害化反応

③実機コークス炉でのプラスチックの塩素の挙動

上記の考え方を実機で評価するために、塩素を含む容器包装プラスチックをコークス炉内に石炭に対して 1～2 %添加して塩素の挙動を調査した。君津製鉄所の第 4，第 5 コークス炉を用いて 46 日間の長期大量試験を実施した。この間の石炭装入量は 25 万 3000 トン、廃プラスチ

ック使用量は 3310 トンであった。実炉試験により、各工程で塩素が及ぼす影響を評価した。

プラスチック中の塩素が、コークス炉に投入された後の分配を調査したところ、廃プラスチック由来の塩素の内、約 93% が気相に移行して安水中のアンモニア成分と反応して塩化アンモニウムとして無害化される。なお、残りの 7% はコークス中に移行する¹³⁾。

図 17 にこの挙動を模式的に示す。廃プラスチック単体を乾留した場合に比べてコークス中への塩素の残留率が若干高いが、これは廃プラスチック中の塩素が石炭中のアルカリ土類金属と塩化物を合成しているものと推察している。

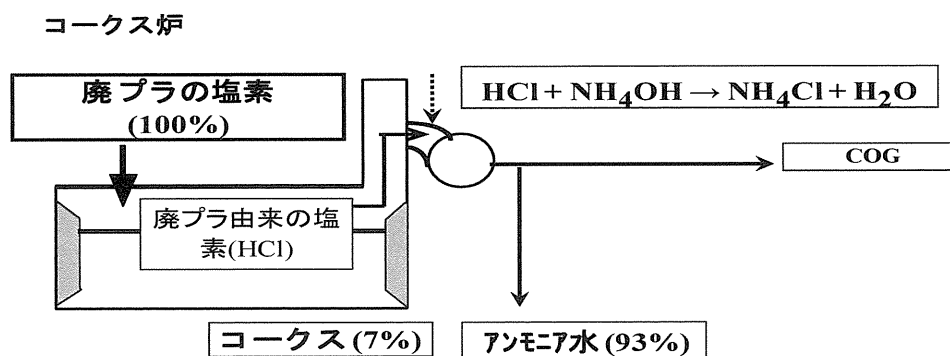


図 17 実機コークス炉でのプラスチック中の塩素の挙動

2) 設備系への影響（耐火物や配管、構造物への影響）

容器包装プラスチック内の塩素が、耐火物や配管、構造物などのコークス炉周りの設備系へ与える影響を調査した。耐火物については、短期の実炉試験では影響評価が困難なため、塩素高濃度条件で暴露試験を実施して評価した。実験方法は珪石レンガ製の試験ルツボに石炭由来の灰分と塩化ビニルの試薬を入れ、1200℃の温度条件で 4 時間加熱した後、EPMA で分析して、珪石レンガへの浸食状況を評価し、EPMA 分析した結果、Na、K、Fe などの元素と塩素の反応による塩化物の生成は認められず、珪石レンガの浸食に対する塩素の影響はないと評価できる。

配管については、実炉試験期間中（約 2 ヶ月間）、上昇管の下流のドライメイン内に SS および SUS のテストピースを設置し、腐食性の評価試験を実施した。外観検査の結果、テスト前後での変化は認められず、又、テストピースの重量変化も認められなかった。さらに、EPMA による分析も行ったが、塩化物は検出されなかった。

以上の結果より、コークス炉付帯の金物設備、煉瓦設備への影響は無いと判断された。その後も継続して含塩素プラスチック使用後の実炉評価を継続し、含塩素廃プラスチック使用開始から既に 10 年以上を経過しているが、設備的な問題は全く発生していない。

3) タール等の化学製品やガスへの影響

コークス炉ガスに関しては、含塩素プラスチックを使用しても含有塩素の増加は全く認められていない。タールの組成に関しても、ガスクロマトグラフィーによる分析では変化が認められず、タールを用いた製品であるニードルコークスの性状にも全く変化が認められていない。

4) コークス品質への影響

石炭に対して容器包装プラスチックを添加した場合のコークス強度について、実炉試験により評価した。試験では密度が異なるプラスチック試料を2種類準備して、添加率を0.9～2%に変更して評価した（図18の凡例参照）。コークス強度は、JIS K 2151に準拠して、常温での強度を示すドラム強度（ DI^{150}_{15} ）を測定した。ドラム強度の測定方法は、コークス試料10kgを内径1500mm、長さ1500mmのドラム試験装置に入れて、150回転させた後に15mmのふるいでふるい分け、ふるいの上に残存した15mm以上のコークスの百分率で表す。試験結果を図18に示す。

凡例		添加比率%	密度 ρ (g/cm ³)	体積 (mm ³ /個)	表面積 (mm ² /個)	重さ (g/個)	比表面積 (mm ² /g)
▲	通常密度	2.0	0.52	18168	4031	9.4	427
▲		0.9	0.56	24091	4935	13.4	368
▲		1.5	0.56	25701	5192	14.3	363
●	高密度	2.0	0.86	37522	6212	32.1	193
●		1.5	0.86	37522	6212	32.1	193

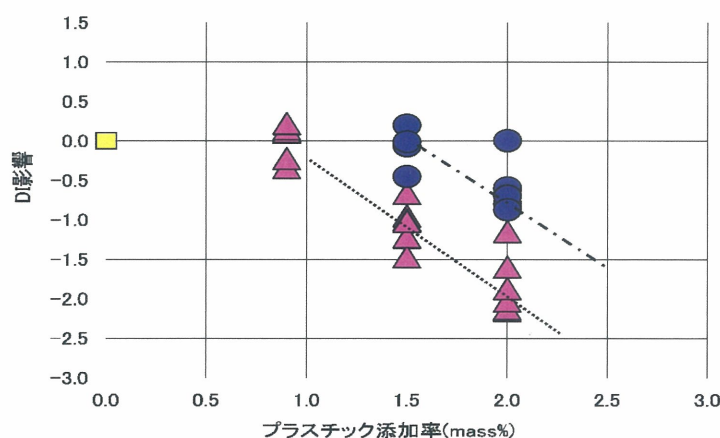


図18 廃プラスチック添加がコークス強度（DI）に及ぼす影響

廃プラスチックをコークス製造用の石炭に添加すると、添加率1%超ではコークス強度が若干低下する。密度が0.52～0.56 g/cm³のプラスチックの場合、添加量が1.5%となるとDIが低下する。一方、密度が0.86 g/cm³の試料では1.5%添加まではDIに大きな変化は認められず、2%近くの添加量でDIが低下する。

石炭に廃プラスチックを添加して乾留するとコークス強度が低下する原因は、石炭とプラスチックの熱分解温度の差に起因していると考えられる。図18に示すように、プラスチックは石炭の軟化開始温度（約400℃）より低温で熱分解するので、石炭に廃プラスチックを添加してコークス炉で乾留する場合には、石炭が軟化熔融する前に廃プラスチックの熱分解によって空隙が形成され、プラスチック周囲の石炭はこの空間に向かって自由膨張する。このためプラスチックが熱分解した後に生じる空隙の表面には自由膨張して発泡した石炭とプラスチックの熱分解残渣によって構成される脆弱なコークス組織が形成される（写真1）¹³⁾。また、プラスチックは石炭に比べて低温で熱分解し、石炭が軟化熔融する温度範囲（約400～500℃）で熱分解ガスを発生するので、プラスチックの種類によっては石炭の粘結性に影響を及ぼすことが考えられる¹⁴⁾。そこで、石炭に対して廃プラスチックをさらに多量に

(2%以上) 添加すると、コークス強度が低下することが懸念される⁷⁾。

この考え方に基づくと、コークス強度の低下は、プラスチック重量あたり石炭とプラスチックの接触面積で表現することができると考えられる。図 19 に単位重量当たりの廃プラスチックの表面積とコークス強度の関係を示す。プラスチックの添加率とプラスチックの造粒物の接触面積をあわせた指標でコークス強度への影響を表現することができる。すなわち、プラスチック添加率が同一でも石炭との接触

表面積を小さくすることがコークス強度を確保する上で重要である。すなわち、廃プラスチック造粒物の密度を上昇させることにより、単位重量当たりの接触面積を小さくして空隙起因の脆弱部の生成を減少させれば、コークス強度を低下させずに廃プラスチックの添加率を上昇できることがわかった。

これらの知見は、廃プラスチック造粒物の作り込技術において成形機の重要な管理指標となる。また、石炭の銘柄選択でもコークス強度の低下を低減できることを確認した。現在、これらの技術を適用することにより、さらなる添加率向上を指向している。

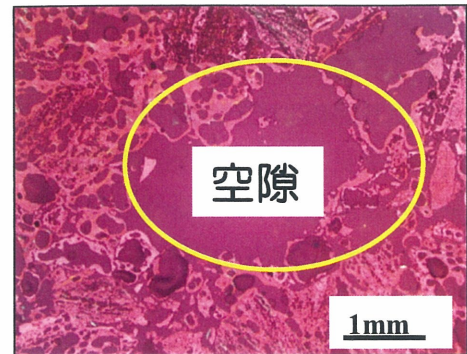


写真 1 廃プラスチック添加時のコークス組織の顕微鏡写真

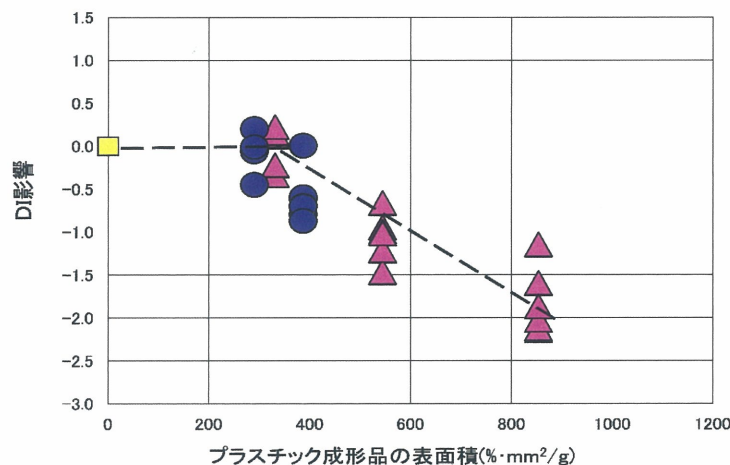


図 19 コークス強度と廃プラスチックの表面積の関係

4) コークス炉向け粒状化処理（事前処理）¹⁵⁻¹⁷⁾

以上に説明したコークス炉での廃プラスチックの熱分解処理を適正に行うためには、廃プラスチックを事前処理して、コークス炉での処理が行える状態にする必要がある。事前処理設備のプロセスフローを図 20 に示す。

市町村で分別回収された容器包装プラスチック廃棄物は、一辺が約 1 メートルのベール状（立方体）に圧縮梱包され保管されて、これを製鉄所内の廃プラスチック事前処理設備まで運搬する。事前処理の目的は、廃プラスチックの異物を除去してコークス炉原料に要求される純度とすることと、石炭との混合状態の適正化のための粒状化物を製造することにある。

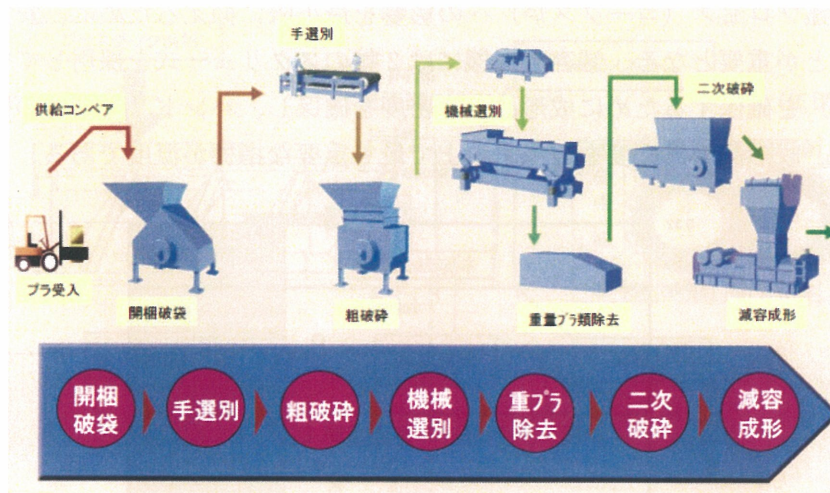


図 20 事前処理設備の廃プラスチック処理工程のフロー

廃プラスチックのベールは、まず、開梱装置に送られて、ここでバラバラにされる。手選別工程にて、大型の異物を排除する。その後に、粗破砕機で 100～150 ミリメートル以下のサイズとして、これを機械選別工程に通す。機械選別工程では、金属片、ガラス等の無機物片およびポリ塩化ビニルの一部を除去する。機械選別工程を通過して、所定の純度となった廃プラスチックを二次破砕機で 10～40 mm 程度に裁断する。この二次破砕物を、スクリーン押し式圧縮成形装置で粒状化物を形成する。粒状化物は直径 20～30 mm のものであり、異物混入率は 1%以下である。

容器包装プラスチックの事前処理工程における物質バランスの一例を図 31 に示す。除去物の内訳は、プラスチック以外の異物 2%、付着水分の蒸発分 4%、異物選別時に同伴排出されるプラスチックロス (3%) や工程ロス (1%) が合計 4%で、90%の歩留を達成している。プラスチックだけを 100 とした場合の歩留は 96%である。コークス炉の塩素に対する許容力が高炉等の他のプロセスに対して大きいため、事前処理でのポリ塩化ビニル (PVC) 除去が必要なく、ポリ塩化ビニル除去に伴うプラスチックロスが少ない効率的なリサイクル手法である。

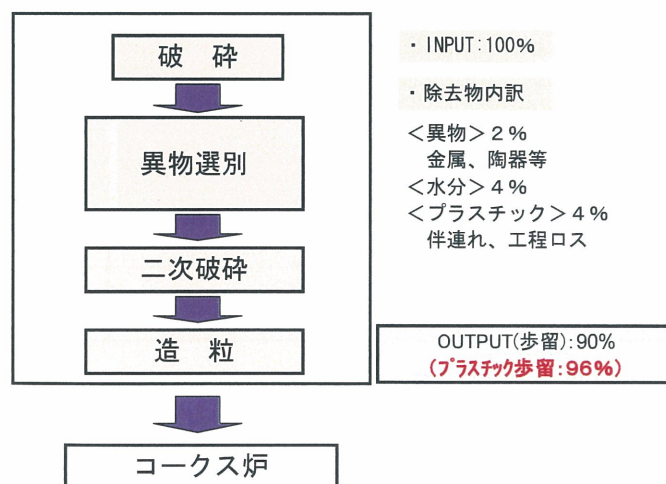


図 21 事前処理工程で受け入れ物のリサイクル率と系外排出物の比率例

既存の製鉄プロセス（コークス炉）への影響を最小限に抑えるために、安定した成形品を製造することが重要となる。減容成形機には2軸のスクリー式を採用している。コークス品質（強度）を確保するために成形品の嵩密度を確保し、ハンドリング性の観点で長さを管理している。成形品の嵩密度を確保する上で最も重要な指標が温度である。

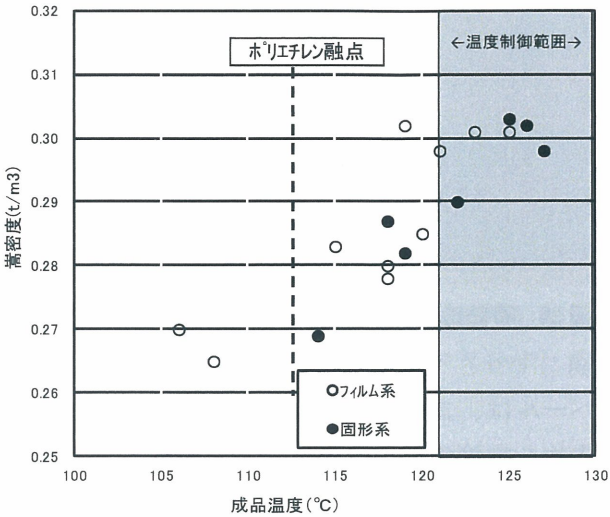


図 22 成形温度と成形品の密度の関係

図 22 に示すように、成形温度と嵩密度の間には良好な相関関係がある。但し、温度を上げ過ぎると、造粒プラスチックが溶けだして成形できなくなると同時に発火の危険性も出てくる。成形温度を 120℃～130℃に維持するように調整することで、高い密度の造粒物を得つつ安定操業を実現している。また、自治体毎のプラスチック組成や異物および水分の含有状況に応じて、投入する自治体のプラスチック配合割合を調整するような工夫も実施している。

写真 3 に成形温度と得られた成形品の外観の状況を示す。温度制御範囲内の温度（125℃）で成形したものは、良好な成形状況を示していることがわかる。

	ランクA : 溶込み良好	ランクC : 溶込み不足	溶込み過剰: 成形不良
外観			
成形温度	125℃	90℃	140℃
サイズ	直径38mm、長さ80mm	直径42mm、長さ80mm	成形不良(形状不安定)

写真 3 成形温度と成形品の状況例（外観写真）

成形品の作り込のためには温度の制御が重要となることを示したが、図 33 に成形品の温度制御のフローを示す。成形品の温度を直接測定してそれを水分添加制御系にフィードバックして安定的に密度の高い成形品を安定的に製造できるように制御している。

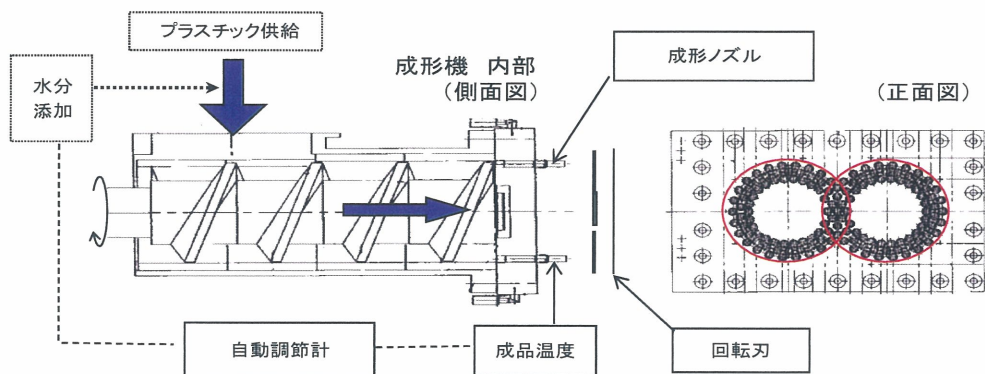


図 23 成形温度の制御の考え方

(5) 他の手法との比較

容器包装リサイクル法のスキームで認定されている他のケミカルリサイクル手法を図 34 に示すが、他の 3 手法（油化、ガス化、高炉法）は、いずれも、ポリ塩化ビニルの除去あるいは脱塩素の工程を設けており、歩留が低く処理コストが高くなる傾向にある。例えば油化法では、油だけを抽出して活用する技術であるため、ガス成分（気体）や炭化物（固体）は活用できない。現在、容器包装リサイクル法の仕組みに参画している再商品化事業者の中で油化法の受注量は 0 という状況である。

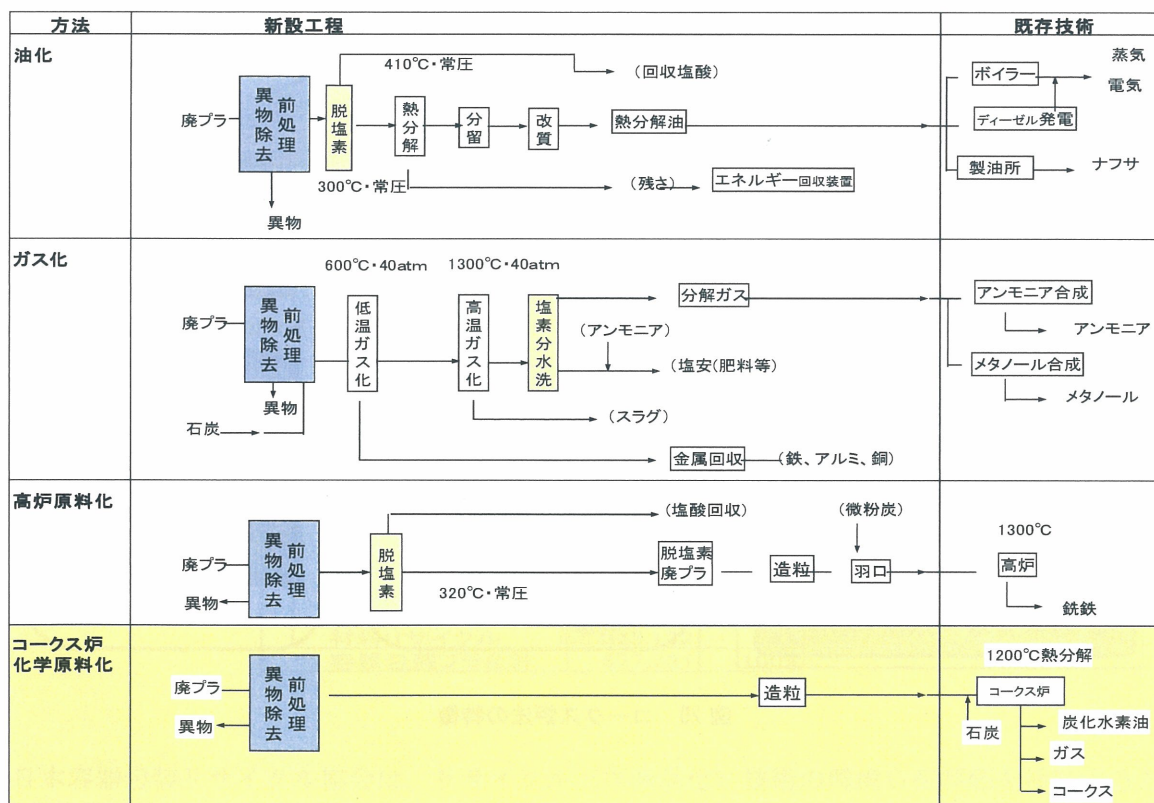


図 24 ケミカルリサイクル認定技術の特徴

高炉法¹⁸⁾では、高炉設備の腐食等を回避するため塩素の許容量が低く、数%の塩素濃度を 0.1% 程度までに事前に除去する必要がある。

コークス炉法では、様々な組成のプラスチックから生成される液体・ガス・固体（三相）をすべて有効活用できるため、歩留が極めて高い。さらに、塩素に対する許容力が高く、新設のリサイクルの工程が極めてシンプルで、効率が高いプロセスである。さらに、1100℃の高温で分子レベルにまで分解するのでバージン材料と同等の品質の化学原料を得ることできるため、得られた化学製品が廃棄された後もさらに、有効利用することができる。このように他の手法が保有する課題を一挙に解決するリサイクル技術である。

4. 研究開発の成果

（1）実績と成果

図 25 にコークス炉化学原料化法の概要を示す。事前処理で粒状化されたプラスチックはコークス炉で熱分解されて 40%炭化水素油、40%がコークス炉ガス、20%がコークスとなり、全量を有効利用できる。新日本製鐵でのコークス炉を活用した廃プラスチックのリサイクル拠点を図 26 に、容器包装プラスチックの受注実績を図 27 に示す。当社では、平成 22 年度および 23 年度、約 20 万トンを受注している。これは、全国の容器包装プラスチックの排出量の約 30%で 2 位以下に大きく差をつけている（表 3 参照）。このことはリサイクル市場における評価や信頼が高いことを示している。2002 年にはグッドデザイン賞において社会システム部門で金賞を受賞し、本法を用いたプラスチックリサイクルが社会システム上極めて重要であることが広く認められた。

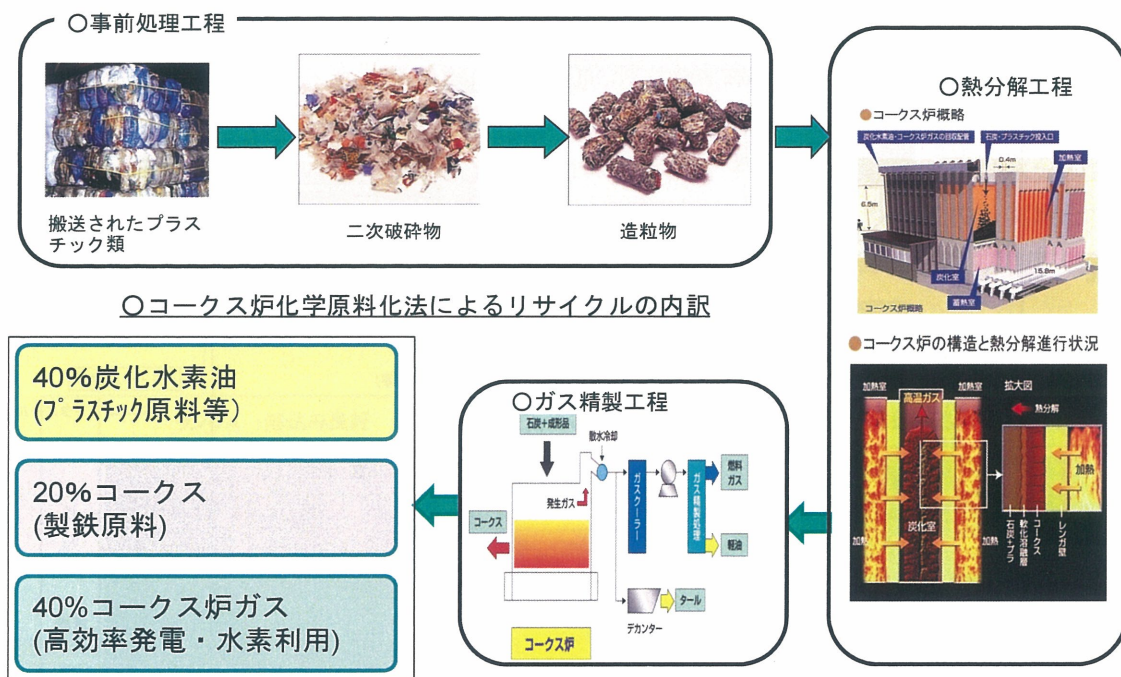


図 25 コークス炉法の特徴

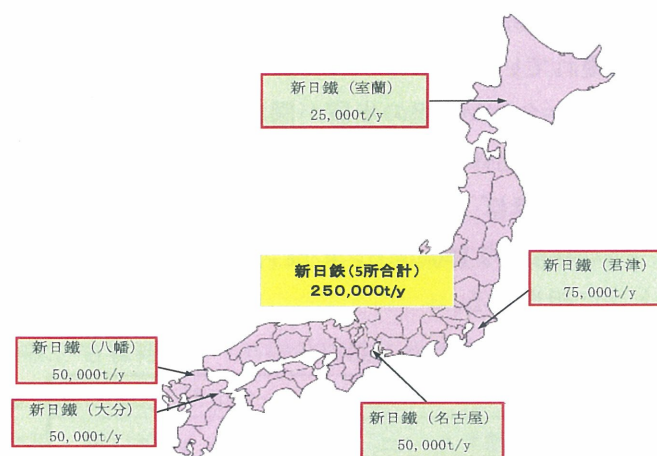


図 26 当社のリサイクル拠点

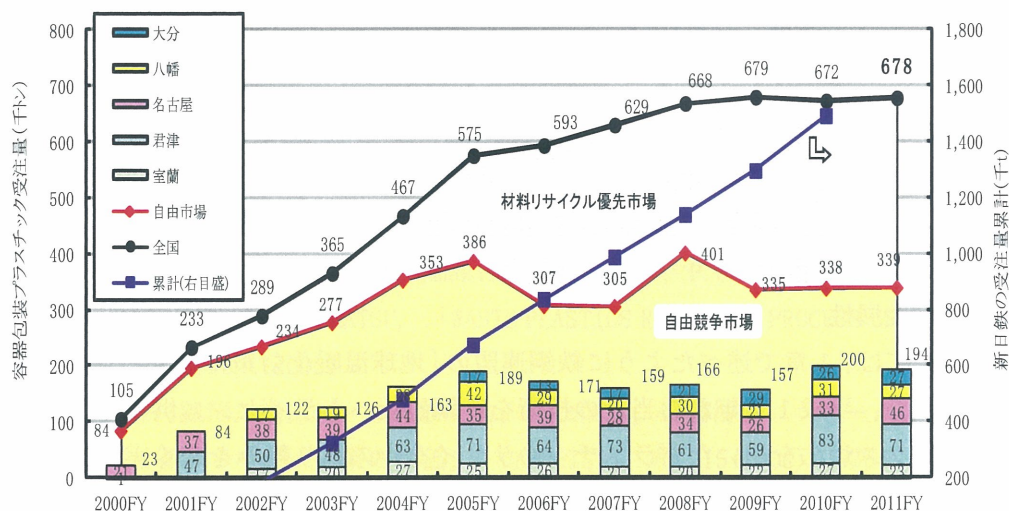


図 27 容器包装プラスチックの受注実績

表 3 平成 23 年度の容器包装プラスチックの手法別の落札量
(日本容器包装リサイクル協会HPの掲載データを基に作成)

手法	落札量	シェア 対全体	シェア 対ケミカル
コークス炉法 (内新日鉄)	202,243 194,323	30% 29%	64% 62%
高炉法	32,560	5%	10%
ガス化法	79,796	12%	25%
油化法	0	0%	0%
ケミカルリサイクル	314,599	46%	100%
材料リサイクル	363,132	54%	
容器包装プラ合計	677,731	100%	

日本容器包装リサイクル協会は、リサイクル（再商品化）技術の環境負荷評価を検証するために、有識者による WG を設置し、その成果として「プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討」（平成 19 年 6 月）¹⁹⁾が公表されている。

この検討会で確認された資源削減効果として、図 28 に示すように、原油の削減原単位はコークス炉化学原料化法で 0.8 トン／t-プラで年間 20 万トンの処理を実施していることから、16 万 t／

年の原油を削減できる。CO₂削減原単位では、3.24 t-CO₂/t-プラの CO₂削減効果があり、地球温暖化対策手法としても最も優れている手法の一つである。このようにコークス炉法の環境負荷低減効果が極めて高いのは、リサイクル工程の歩留が図 21 に示したように 90%と極めて高いことが要因の一つであると考えられる。自治体から搬入したプラスチックを 100 とすると、成型品の歩留が 90%でコークスに投入するとほぼ 100%が有効に利用される。当社はコークス炉法で平成 12 年から平成 23 年 3 月までの累計で約 150 万トンの廃プラスチックをリサイクルしてきた。これは CO₂削減効果約 480 万トンに相当する。

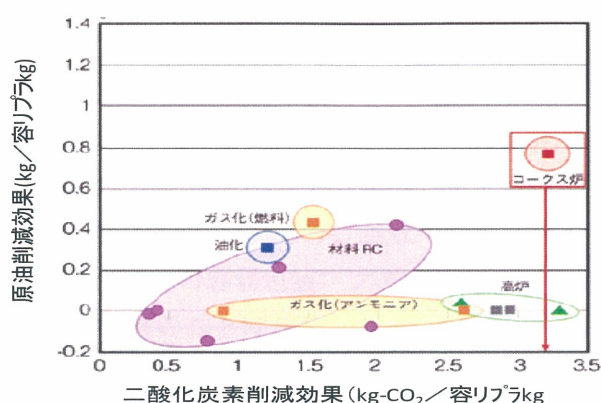


図 28 資源削減効果（原油）と二酸化炭素削減効果

（２）本技術の発展性

鉄鋼業界としては、1 章で述べたように鉄鋼連盟の「地球温暖化対策に関する自主行動計画⁴⁾」を推進する観点で、平成 17 年から当社の技術を鉄鋼他社へもライセンス供与している。鉄鋼業界としてもコークス炉法を用いたプラスチックリサイクルの取り組みを広く実施している。ちなみに、日本全国のコークス炉を活用した場合、3.2 章で触れたように、装入石炭量に対して廃プラスチックを 1%添加した場合、約 50 万トン／年、2%の添加で 100 万トン／年の廃プラスチックのリサイクルが可能となる。

また、海外では、中国がコークス炉でのプラスチックリサイクルに興味を示しており、一部の鉄鋼メーカーが資源有効利用・環境負荷低減の観点から実機ベースでさかんに検討²⁰⁾している。

5. 学会発表、特許など

下記に各学会発表と特許情報を記す。

（１）学会発表等 40 件（うち国際会議 16 件）

- 1) 加藤健次, 古牧育男, 野村誠治, 植松宏志, 「コークス炉による廃プラスチックリサイクル技術の検討」, CAMP-ISIJ, VOL. 13 (2000), P937
- 2) 野村誠治, 加藤健次, 古牧育男, 「石炭粘結性に及ぼすプラスチック添加の影響」, CAMP-ISIJ, VOL. 13 (2000), P936
- 3) K. KATO, S. NOMURA, H. UEMATSU, 「DEVELOPMENT OF WASTE PLASTICS RECYCLING PROCESS USING COKE OVENS」, CAMP-ISIJ, VOL. 14 (2001), P845

- 4) 野村誠治, 加藤健次, 「コークス品質に及ぼす添加プラスチック粒度の影響」, CAMP-ISIJ, VOL. 14(2001), P863
- 5) 東忠幸, 佐野明秀, 加藤健次, 野村誠治, 「コークス炉による廃プラスチックリサイクル操業実績」, CAMP-ISIJ, VOL. 14(2001), P864
- 6) 加藤健次, 古牧育男, 野村誠治, 植松宏志, 近藤博俊, 白石勝彦, 「コークス炉における廃プラスチックリサイクルプロセスの検討」, 第10回環境工学総合シンポジウム2000 講演論文集, P. 154-156(2000)
- 7) 野村誠治, 加藤健次, 古牧育男, 「石炭粘結性に及ぼすプラスチック添加の影響」, 第37回石炭科学会議発表論文集(2000), P. 109-112(2000)
- 8) 加藤健次, 古牧育男, 野村誠治, 白石勝彦, 「コークス製造プロセスにおける廃プラスチックリサイクル技術の検討」, 第37回石炭科学会議発表論文集(2000), P. 133-136(2000)
- 9) 加藤健次, 野村誠治, 植松宏志, 佐野明秀, 東忠幸, 「コークス炉化学原料化法による廃プラスチック処理技術」, 第38回石炭科学会議発表論文集(2001), P. 127-130(2001)
- 10) 野村誠治, 加藤健次, 「石炭乾留挙動に及ぼす添加プラスチック粒度の影響」, 第38回石炭科学会議発表論文集(2001), P. 131-134(2001)
- 11) 鈴木隆城, 田原年英, 加藤健次, 白石勝彦, 「コークス炉における廃プラスチック処理技術の開発」, 第9回日本エネルギー学会大会講演要旨集, P. 159-162(2000)
- 12) K. KATO, S. NOMURA, H. UEMATSU, 「DEVELOPMENT OF WASTE PLASTICS RECYCLING PROCESS USING COKE OVENS」, Proc. ISS 61st Ironmaking Conference, P. 633-642(2002)
- 13) K. KATO, S. NOMURA, H. UEMATSU, 「WASTE PLASTICS RECYCLING PROCESS USING COKE OVENS」, Proc. of ISFR 2002, (2002)
- 14) 加藤健次, 野村誠治, 福田耕一, 植松宏志, 高松信彦, 近藤博俊, 「コークス炉廃プラスチック使用技術の省エネルギー効果の評価」, CAMP-ISIJ, VOL. 15(2002), P765
- 15) K. Fukuda, S. Nomura, K. Kato, H. Uematsu, N. Takamatsu, H. Kondo, 「Waste Plastics Recycling Technology Using Coke Ovens」, Proceedings of The Fifth International Conference on Ecobalance (2002Nov. 6-8, Tsukuba), P. 811-814
- 16) S. Nomura, K. Kato and H. Uematsu, 「Development of waste plastics recycling process using Coke Ovens」, Proceedings of Metals and Energy Recovery (2003. June 25-26, Skellefteå)
- 17) S. Nomura, K. Kato, T. Nakagawa and I. Komaki, 「The Effect of Plastics Addition on Coal Caking Properties during Carbonization」, Proceedings of 19th Pittsburgh Coal Conference (2002. Sep. 23-27, Pittsburgh)
- 18) 加藤健次, 野村誠治, 植松宏志, 「コークス炉化学原料化法による廃プラスチック使用技術」, 日本学術振興会 石炭・炭素資源利用技術 第148委員会 第85回研究会資料(2002年7月, 東京), P. 23-30
- 19) 加藤健次, 野村誠治, 植松宏志, 「廃プラコークス炉化学原料化」, 日本エネルギー学会 ガス化部会・バイオマス部会 合同シンポジウム 予稿集 (2002年7月, 東京), P. 1-6
- 20) K. Fukuda, S. Nomura, K. Kato, H. Uematsu, N. Takamatsu, H. Kondo, 「Waste Plastics Recycling Technology Using Coke Ovens」, Proceedings of 12th ICCS (2003. Nov. 2-6, Cairns Queensland, Australia)
- 21) 加藤健次, 野村誠治, 植松宏志, 前野幸彦, 「コークス炉における廃プラスチック乾留時の塩

- 素の挙動評価」, CAMP-ISIJ, VOL. 17 (2004), P69
- 22) K. Fukuda, S. Nomura and K. kato, 「Waste plastics Recycling Technology using Coke Ovens」, 21st Pittsburgh Coal Conference, Osaka, (2004)
- 23) S. Nomura and K. kato, 「The effect of Added Plastic Size on Coal Carbonization Phenomena」, 21st Pittsburgh Coal Conference, Osaka, (2004)
- 24) 加藤健次, 「コークス炉を活用した廃プラスチック化学原料化技術の開発」, 第 148 回日本鉄鋼協会講演大会シンポジウム「製鉄プロセスから生まれた新たな環境技術と今後の可能性」
- 25) 加藤健次, 一田守政, 「鉄鋼業における廃プラスチックのリサイクル」, CAMP-ISIJ, VOL. 17, (2004), P915
- 26) K. Kato, M. Ichida and M. Naito, 「Waste Material Recycling Technologies in Iron-making Process」, 10th Japan-China Symposium on Science and Technologies of Iron and Steel (第 10 回日本-中国鉄鋼学術会議)
- 27) 加藤健次, 「コークス炉を利用した廃プラスチック化学原料化技術」, 日本学術振興会 第 54 委員会 バイオマス・ウェイト高度利用研究会 (2004 年 12 月, 東京)
- 28) K. Kato, S. Nomura, K. Fukuda, H. Uematsu, 「DEVELOPMENT OF WASTE PLASTICS RECYCLING PROCESS USING COKE OVENS」, 5th ECIC, We6-1
- 29) Kenji KATO and Seiji NOMURA, 「Chlorine behavior of waste plastics recycling process using coke ovens」, 2005 ICCS & T OKINAWA, 3B05
- 30) Y. Sekine, Y. Matsuno, Y. Adachi, K. Fukuda and K. Kato, 「Application of LCA for Assessing CO₂ Reduction Potential by Utilizing Plastic Waste in Steel Works」, 2005 ICCS & T OKINAWA, 4A03
- 31) Koichi, Fukuda, Kenji Kato, Hiroshi Uematsu and Hirotohi Kondo, 「Waste Plastics Recycling Technology Using Coke Ovens」, ASIA STEEL 2006, Proc. ASIA STEEL 2006, p. 428-431.
- 32) 加藤健次, 野村誠治, 植松宏志, 「コークス炉を利用した廃プラスチック化学原料化技術」, 日本学術振興会 第 54 委員会 バイオマス・ウェイト高度利用研究会 最終報告書
- 33) Kenji KATO, Seiji NOMURA, Koichi FUKUDA and Hiroshi UEMATSU, 「Development of Waste Plastics Recycling Process Using Coke Ovens」, ICSTI06, Proc. ICSTI06, C143, p. 243-246.
- 34) 野村誠治, 加藤健次, 「コークス炉炭化室への石炭-廃プラスチック分離装入」, CAMP-ISIJ, VOL. 20 (2007), P. 113
- 35) K. Kato, S. Nomura, K. Fukuda, H. Uematsu, 「Chlorine Behaviour of Coal and Waste Plastics During Carbonization」, AISTech2007, 2008. May, Pittsburgh
- 36) 加藤健次, 福田耕一, 近藤博俊, 植松宏志, 「コークス炉化学原料化法による廃プラスチック処理技術の開発」, 第 45 回石炭学会議 発表論文集, p. 150-151, 2008. 10. 9-10, 京都大学
- 37) 加藤健次, 「廃プラスチックリサイクルの更なる展開の可能性 (コークス炉化学原料化法による廃プラスチックリサイクル技術の取り組み)」, (社) 日本鉄鋼協会 資源環境フォーラムシンポジウム「鉄鋼業における廃プラスチックリサイクルの到達点と今後の展望」, 2009. 1. 16, 東京
- 38) K. Kato, S. Nomura, 「Chlorine Behaviour of Coal and Waste Plastics During Carbonization」, ASIA STEEL 2009, 2009. 5. 24-27, 釜山
- 39) 祖山薫, 「コークス炉化学原料化法によるプラスチックリサイクルの実際」, 機械学会環境シ

ンボジウム(2001)

- 40) 楢取英宏, 近藤博俊, 祖山薫, 山口剛史, 「コークス炉化学原料化法によるプラスチックリサイクル」, 資源処理技術, 第 48 巻 第 4 号 (通巻第 161 号) 2001

(2) 特許

国内登録 28 件, 外国登録 5 件 (登録国数延べ 22 カ国, 審査中延べ 9 カ国)

国内登録特許

- 1) 特 3129711, 2000/11/17 登録, 「石炭のコークス化と, 塩素含有樹脂または塩素含有有機化合物, あるいはそれらを含む廃プラスチックの処理を並行して行う方法」
- 2) 特 4094212, 2008/3/14 登録, 「石炭のコークス化と廃プラスチックの処理を並行して行いつつタール及び/または軽油を製造する方法」
- 3) 特 3872615, 2006/10/27 登録, 「コークスの製造方法」
- 4) 特 4199637, 2008/10/10 登録, 「廃棄プラスチックの再利用方法及び成型方法」
- 5) 特 3802712, 2006/5/12 登録, 「廃棄プラスチックの再利用方法, および, 廃棄プラスチック加工方法」
- 6) 特 4469352, 2010/3/5 登録, 「廃プラスチック成形方法及び廃プラスチック熱分解方法」
- 7) 特 3704284, 2005/7/29 登録, 「プラスチック系一般廃棄物からコークス炉原料を製造する方法」
- 8) 特 3745618, 2005/12/2 登録, 「化学原料用廃棄プラスチック粒状物, および, その成形方法」
- 9) 特 3745619, 2005/12/2 登録, 「化学原料用廃棄プラスチック粒状化物の成形方法, および, 成形装置」
- 10) 特 3713188, 2005/8/26 登録, 「廃棄プラスチック粒状物の成形方法および製造装置」
- 11) 特 3677179, 2005/5/13 登録, 「廃棄プラスチックの異物除去方法」
- 12) 特 3733045, 2005/10/21 登録, 「廃棄プラスチック粒状化物の製造方法およびその熱分解方法」
- 13) 特 3564094, 2004/6/11 登録, 「廃棄プラスチック圧縮梱包物の分解方法, および, 廃棄プラスチック圧縮梱包物の分解装置」
- 14) 特 3771847, 2006/2/17 登録, 「廃棄プラスチックの成形方法, および, 廃棄プラスチックの成形装置」
- 15) 特 3897585, 2007/1/5 登録, 「押出し成形機における成形物の切断方法」
- 16) 特 3095739, 2000/8/4 登録, 「樹脂または有機化合物, あるいはそれらを含む廃プラスチックの処理方法」
- 17) 特 4279980, 2009/3/19 登録, 「コークス製造方法」
- 18) 特 4327999, 2009/6/19 登録, 「コークス製造方法」
- 19) 特 4460177, 2010/2/19 登録, 「廃プラスチックを用いたコークス製造方法」
- 20) 特 4231213, 2008/12/12 登録, 「コークスの製造方法」
- 21) 特 4088054, 2008/2/29 登録, 「コークスの製造方法」
- 22) 特 4153627, 2008/7/11 登録, 「成形コークスの製造方法」
- 23) 特 4327977, 2009/6/19 登録, 「高炉用コークスの製造方法」
- 24) 特 4733822, 2011/4/28 登録, 「廃棄プラスチック粒状化物の成形方法および成形装置」
- 25) 特 4326139, 2009/6/19 登録, 「押出し成形機及びこれを用いた成形方法」
- 26) 特 4256730, 2009/2/6 登録, 「廃プラスチックの破砕方法及び搬送方法」

- 27) 特 4656275, 2010/12/24 登録, 「繊維強化プラスチックを用いたコークス炉の操業方法」
28) 特 4031609, 2007/10/26 登録, 「廃棄プラスチックのリサイクル方法」

外国登録特許（登録日は出願国毎により異なるため出願日を掲載）

- 1) PCT/JP1999/004052, 1999. 07. 28 出願, 「石炭のコークス化と, 塩素含有樹脂, 塩素含有有機化合物, 又は塩素含有廃プラスチックの処理を行う連合方法」
- 2) PCT/JP1999/004654, 1999. 08. 27 出願, 「樹脂及び/又は有機化合物を含む廃プラスチックの処理方法」
- 3) PCT/JP02/02795, 2002. 3. 22 出願, 「廃棄プラスチック粒状化物の製造方法」
- 4) PCT/JP2004/015874, 2004. 10. 20 出願, 「廃棄プラスチックの再利用方法及び成型方法」
- 5) PCT/JP2006/323041, 2006. 11. 13 出願, 「廃プラスチック成形方法, 及び, 廃プラスチック熱分解方法」

6. 今後の展望

廃プラスチックの排出量は、図 1 に示したようにここ数年間 900 万 t ～1000 万 t で推移している。そのうち、一般系廃プラスチックは半分の 500 万 t を占めている。容器包装系は其中で 200 万 t を占めると言われ、家庭の分別効率や自治体の収集効率を考慮して現状の収集量約 70 万 t から 100 万 t 程度までは期待できると考えられている。今後は、さらに容器包装系以外の製品プラスチックも自治体の収集ルートを活用すれば、それぞれの分別効率も改善されてリサイクル対象のプラスチックが拡大すると考えられる。

他方、産業廃棄物系の廃プラスチックは年間約 500 万トン排出されているが、その処理方法は、民間の経済合理性による判断に任されていて、埋立・焼却から有効利用まで多岐にわたっている。今後、ごみ処理問題、資源有効利用や地球温暖化対策の観点から総合的な判断や政策誘導が望まれる。前述の繰り返しになるが、100 万トンの廃プラスチックを鉄鋼製造設備で利用すると 300 万トン以上の CO₂ 削減効果を発揮するので、地球温暖化対策の有効策として、利用拡大の努力を続け、日本型の社会システムとしてさらに発展することを期待していきたい。

コークス炉化学原料化法は、日本特有の大型都市型製鉄所の既設インフラを活用して循環型社会の構築に向けた鉄鋼業の取り組みのひとつとして開発され、実機化されたものである。コークス炉化学原料化法は、循環型社会の構築に取り組む日本のリサイクル制度の目的に合致した手法であり、資源の有効利用を通じて地球温暖化防止対策（CO₂ 削減）に直接的に貢献できる手法である、今後、国内外でさらなる発展が期待される。

《参考文献》

- 1) プラスチックリサイクルの基礎知識 2011（社団法人プラスチック処理促進協会）
- 2) 財団法人日本容器包装リサイクル協会ホームページより抜粋
- 3) RITE「エネルギー効率の国際比較（発電、鉄鋼、セメント部門）」2009
- 4) (社)日本鉄鋼連盟「鉄鋼業の地球温暖化対策への取組 自主行動計画進捗状況報告」平成 21 年 11 月
- 5) 日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧 II 製鉄・製鋼」
- 6) 加藤健次、古牧育男、植松宏志、使用済みプラスチックの有効利用 コークス炉の場合、

金属 Vol.71(2001), No.4, p.331

- 7) K. Kato, S. Nomura, H. Uematsu, Development of Waste Plastics Recycling Process Using Coke Ovens, ISIJ-Int., Vol.42(2002), Supplement, p.S10
- 8) 加藤健次、古牧育男、野村誠治、白石勝彦、コークス製造プロセスにおける廃プラスチックリサイクル技術の検討、第 37 回石炭科学会議発表論文集、p.154 (2000)
- 9) 加藤健次、野村誠治、植松宏志、佐野明秀、東忠幸、コークス炉化学原料化法による廃プラスチック処理技術、第 38 回石炭科学会議発表論文集、p.127 (2001)
- 10) 加藤健次、野村誠治、コークス炉における廃プラスチック乾留時の塩素の挙動、鉄と鋼、vol.90, No.10(2004), p.76
- 11) 野村誠治、加藤健次、石炭乾留挙動に及ぼす添加プラスチック粒度の影響、日本エネルギー学会誌、Vol.82(2003), No.3, p.143
- 12) 加藤健次、近藤博俊、コークス炉化学原料化法による廃プラスチックリサイクル技術の開発、ふえらむ、Vol.13(2008), No.10, p.657
- 13) 加藤健次、コークス炉を利用した廃プラスチック化学原料化技術、プラスチックの化学原料化技術 (2005)、シーエムシー出版、東京、p.287
- 14) 野村誠治、加藤健次、中川朝之、古牧育男、石炭粘結性に及ぼすプラスチック添加の影響、日本エネルギー学会誌、Vol.81, No.8(2002), p.728
- 15) 近藤博俊、鋤取英宏、祖山薫、コークス炉化学原料化法によるプラスチックリサイクル、日本エネルギー学会誌、Vol.81(2002), No.2, p.81
- 16) 鋤取英宏、コークス炉化学原料化法による廃プラスチックの利用技術、都市清掃 (2010 年 3 月) Vol.63 No.294, p.116、社団法人 全国都市清掃会議
- 17) 祖山薫、コークス炉化学原料化法によるプラスチックリサイクルの実際、機械学会環境シンポジウム (2001)
- 18) 例えば、JFE プラリソース株式会社ホームページ等
- 19) (財)日本容器包装リサイクル協会 プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷検討委員会「プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討」平成 19 年 6 月
- 20) 世界金属導法 (2011 年 4 月 19 日)