

## 廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

- ・研究課題名=廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションシステムに関する研究
- ・研究番号 =K1712, K1848, K1939

・国庫補助金精算所要額 (円) =84,731,000 (複数年の総計)

・研究期間 (西暦) =2005-2007

・代表研究者名=清水正賢 (九州大学)

共同研究者名=岩瀬正則 (京都大学)、葛西栄輝 (東北大学)、内藤誠章 (新日本製鉄株)  
武田幹治 (JFE スチール株)

### 研究目的

有機系一般廃棄物はその主体が炭素と水素から成り立っていることから、その適正な処理により水素、炭化水素、CO ガスとしてエネルギー回収が可能である。本研究では、水素成分に富む廃プラスチック、RDF、廃木材、古紙等の有機系廃棄物を対象に、製鉄の高温熱処理技術によって「製鉄用燃料への転換」、「廃棄物を還元材とする鉄鉱石の還元」および「製錬反応を利用した廃棄物からの水素ガスの製造」の可能性について検討し、「環境保護」、「廃棄物利用新エネルギーの創生」、「廃棄物処理の負荷低減」、さらに「製鉄分野でのCO<sub>2</sub>排出量の削減」を目指した廃棄物の有効利用技術を開発する。

### 研究項目

1. 廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションシステムに関する基礎研究
  - 1.1 廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションの熱力学的検討
  - 1.2 有機系廃棄物の熱分解、酸化鉄の還元、水素転換の速度論検討
  - 1.3 廃棄物中重金属類の高効率分離に関する検討
2. 実用化研究
  - 2.1 廃棄物内装鉄鉱石の高強度塊成化
  - 2.2 回転炉床炉法による鉄-水素コプロダクションシステムの実証試験
3. システム評価
  - 3.1 廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションシステムのエネルギー評価

### 研究方法と結果の概要

#### 1. 基礎研究

##### 1.1 廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションの熱力学的検討

酸化鉄と廃プラスチック (PE、PP)、RDF、廃木材、古紙等との混合物中の炭素と酸素の原子比 (C/O 比) および温度を初期条件として、下記[1]~[6]式の熱力学平衡式ならびに物質収支式を同時に解析し、鉄-水素コプロダクションシステムの可能性を熱力学的に検討した。その結果、1400°C以上の温度条件では廃棄物は総てH<sub>2</sub>ガスとCOガスに変換され、鉄鉱石中の酸化鉄はほぼ100%金属鉄に還元されることが理論的に明らかにされた。Fig. 1に(紙+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)混合物から得られたガス成分の濃度と温度の関係、Fig. 2に(木材+鉄鉱石)混合物及び(木材+鉄鉱石+CaO)混合物から得られたガス成分の濃度と温度の関係

を示す。いずれにおいても計算値と実験値はほぼ一致した。廃プラスチックの場合も同様であった。さらに、PVCを350°C以上の酸素を遮断した条件下で加熱すると、PVC中の塩素はほぼ完全に除去できることが分かった。これらの結果から、鉄鉱石を前記廃棄物によって還元した場合の生成ガスの組成および鉄の酸化度（還元率）は熱力学的に推定可能であり、本システムが理論的に成立することを確認した。

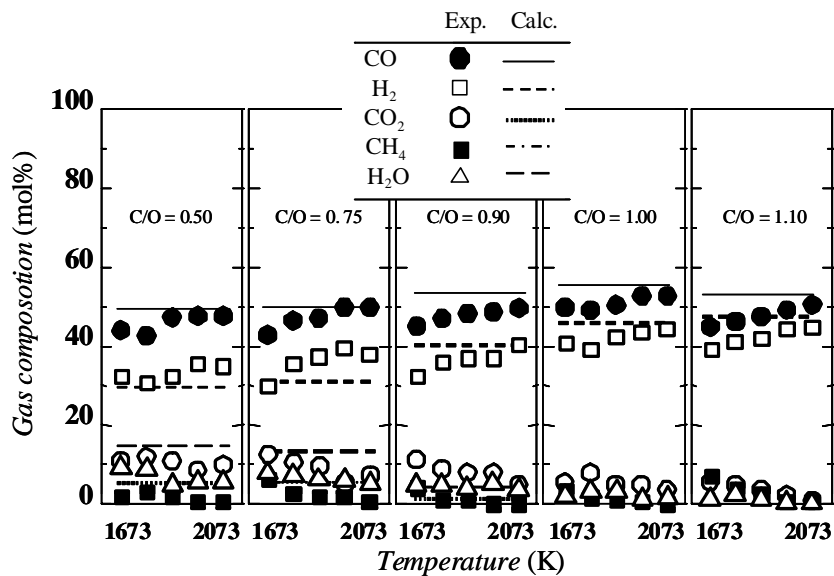
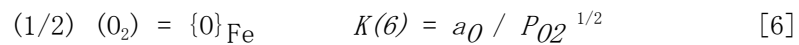
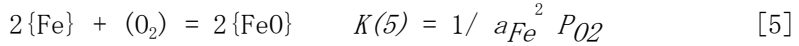
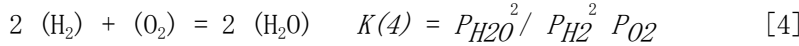
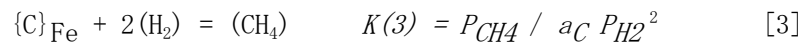
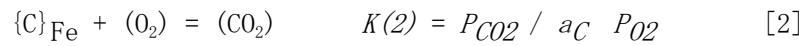
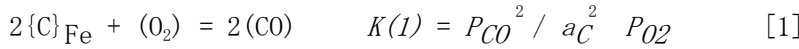


Fig. 1 (紙+Fe203) 混合物から得られたガス成分の濃度と温度の関係

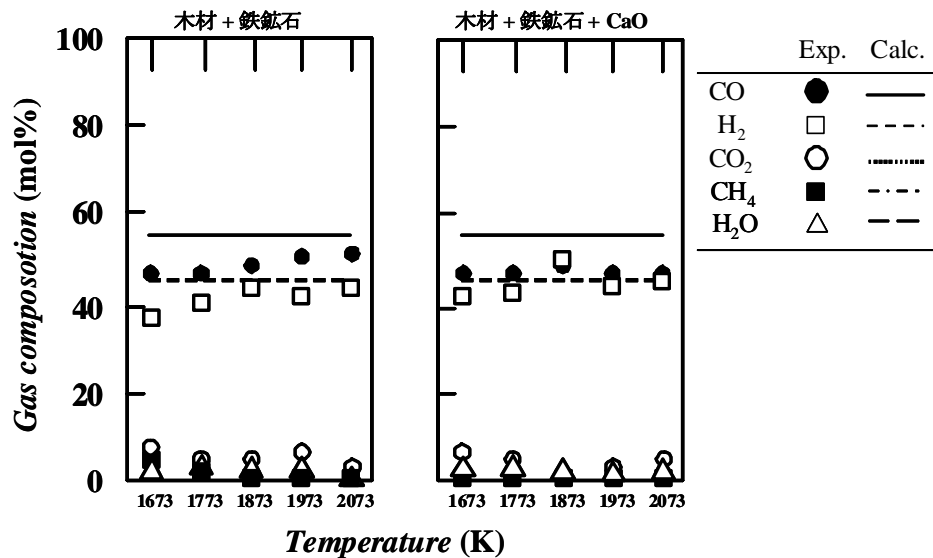


Fig. 2 (木材+鉄鉱石) 混合物及び (木材+鉄鉱石+CaO) 混合物から得られたガス成分の濃度と温度の関係

## 1.2 有機系廃棄物の熱分解、酸化鉄の還元、水素転換の速度論検討

廃プラスチック、RDF、木材、古紙を対象に、還元材内装法（廃棄物/鉄鉱石混合成形体の加熱還元法）により鉄-水素コプロダクションの可能性について検討した。具体的には、廃プラスチックの主体をなすポリエチレン（PE）とポリプロピレン（PP）の粉末、1mm以下に微粉碎した木材、古紙を平均粒度 $75\mu\text{m}$ の鉄鉱石粉に単独もしくは種々の割合で混合してプレス成形し、不活性ガス雰囲気中での廃棄物の熱分解挙動、また $1000\sim 1400^\circ\text{C}$ に加熱した際の生成ガス量、ガス組成、還元率を測定し、 $\text{H}_2$ および $\text{CO}$ ガスへの転換率、鉄石の還元挙動を速度論的に検討した。

### ①熱分解特性

熱分解実験で得られた各廃棄物の重量減少率および発生ガス量を Fig. 3 に示す。これより、ダンボールと木材粉については $250^\circ\text{C}\sim 350^\circ\text{C}$ 付近で最も重量減少が著しい。これは、ダンボールと木材粉の主成分であるセルロースの熱分解が $250\sim 350^\circ\text{C}$ で生じることに起因している。また RDF については重量減少が $200\sim 300^\circ\text{C}$ と $400\sim 500^\circ\text{C}$ に急激に減少し他の廃棄物と異なる挙動を示した。これは RDF 中のポリ塩化ビニルが他のプラスチックより低い約 $300^\circ\text{C}$ で熱分解することから、 $200\sim 300^\circ\text{C}$ の温度範囲での重量変化は主にポリ塩化ビニルの熱分解によるもので、 $400\sim 500^\circ\text{C}$ ではポリエチレンやポリプロピレンなどの熱分解によるものであると考えられる。全ての廃棄物において $200\sim 300^\circ\text{C}$ 付近から $\text{CO}$ および $\text{CO}_2$ の発生が始まり、 $\text{CO}_2$ は高温になるにしたがって発生量が減少していくのに対し、 $\text{CO}$ は高温になるにしたがって発生量が増加した。 $\text{CH}_4$ は $300\sim 400^\circ\text{C}$ で発生し始め、高温でもほぼ一定の発生量を保っていた。 $\text{H}_2$ については $400^\circ\text{C}$ を過ぎてから発生し始め、 $\text{CO}$ ガスと同様に高温になるにつれて発生量が増加した。ところで、すべての廃棄物で $400^\circ\text{C}$ 以下の低温域では、重量変化が顕著であるにもかかわらずガス発生量が非常に少ない。これは低温域では本研究で使用したガスクロマトグラフィーでは検出できない高分子ガスが発生したためであると考えられる。

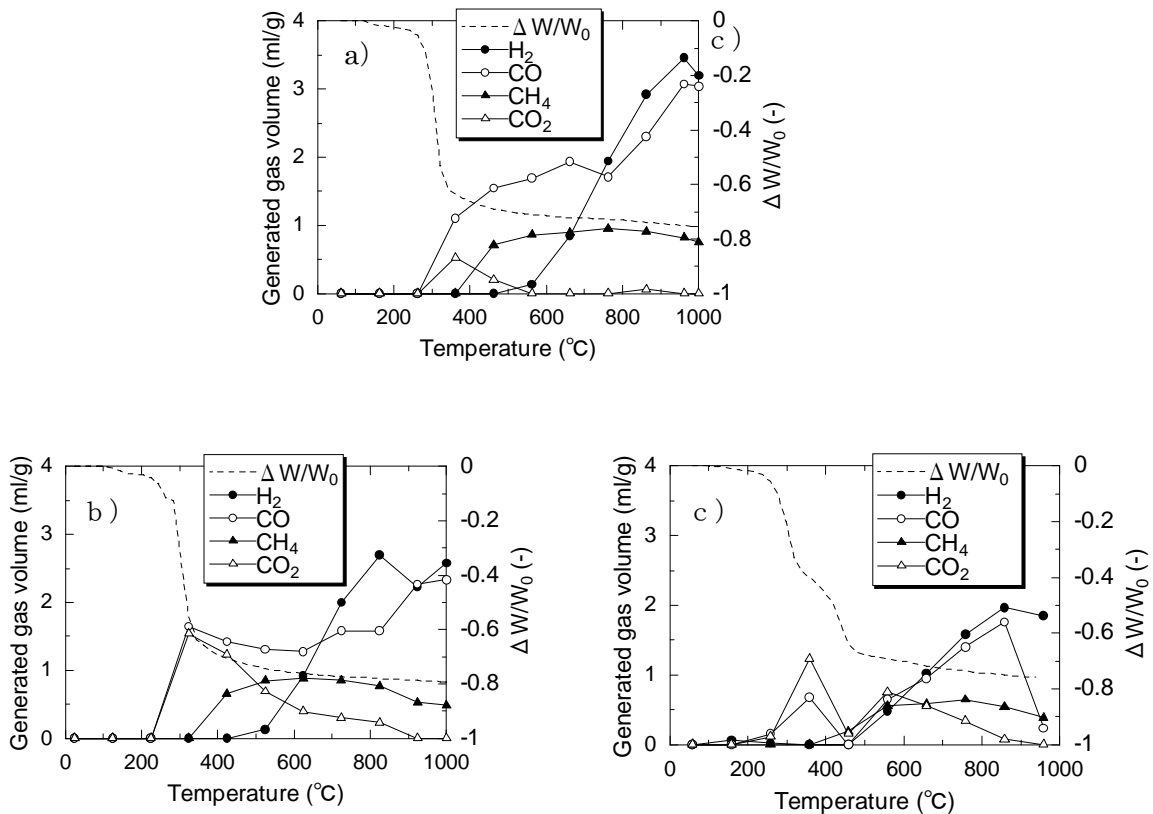


Fig. 3 熱分解時の生成ガスと重量減少量 (a: ダンボール、b: 木材、c: RDF)

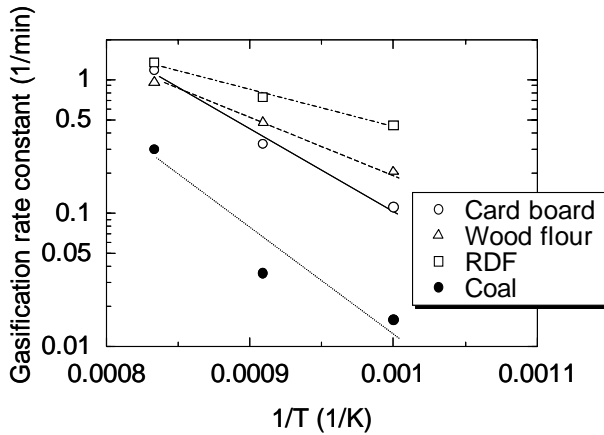


Fig. 4 CO<sub>2</sub> 雰囲気中でのガス化反応の温度依存性

Table 1 活性化エネルギーと比表面積

	Activation Energy(kJ/mol)	Specific surface area(m <sup>2</sup> /g)
Card bord	183	15.9
Wood flour	120	5.8
RDF	84	21.3
Coal	227	2.7

### ② 熱分解後残留物のガス化特性

熱分解後の残留物(主に炭素)を CO<sub>2</sub> ガス雰囲気下でガス化実験を行ない、時間と重量変化の関係を求め、炭素のガス化速度を決定した。Fig. 4 に得られたガス化速度をアレニウスプロットしたグラフを示す。RDF のガス化速度が最も大きく、石炭が一番小さくなった。ガス化反応の活性化エネルギーを求めた結果を Table 1 に示す。RDF の活性化エネルギーが一番小さいく、木材粉の活性化エネルギーは RDF の約 1.4 倍、ダンボールでは約 2.2 倍、石炭は約 2.7 倍であることが分かった。

炭素のガス化速度に影響を与える因子として比表面積と結晶化度が考えられる。熱分解後残留物の比表面積を測定したところ Table 1 に示すような結果が得られた。これより比表面積は RDF、ダンボール、木材粉、石炭の順に大きく、ガス化速度の順番とほぼ一致する。一方、X 線回折分析から各残渣中炭素の結晶化を求めガス化速度との対応を調べたが明確な相関は見られなかった。1000℃以下の熱分解で得られた炭素のガス化速度は結晶化度よりも比表面積の影響が大きい。

### ③ 廃棄物による酸化鉄混合体の還元

Fig. 5 に各廃棄物を還元材として内装した酸化鉄ブリケットの 1000℃、1100℃、1200℃での還元率曲線を示す。還元速度は還元温度が高いほど速く、1000℃という低温でも 5 分間で 80%以上の還元率が得られた。特に木材粉は約 3 分間で還元率 100%に達しており非常に速い還元速度を有していることが分かる。いずれの温度においても還元速度は木材粉>RDF>ダンボールの順となった。この結果は上述したガス化速度の結果とは一致していない。したがって混合体中の廃棄物が熱分解し生じた残留物は還元反応速度にはあまり影響を及ぼさないと判断される。

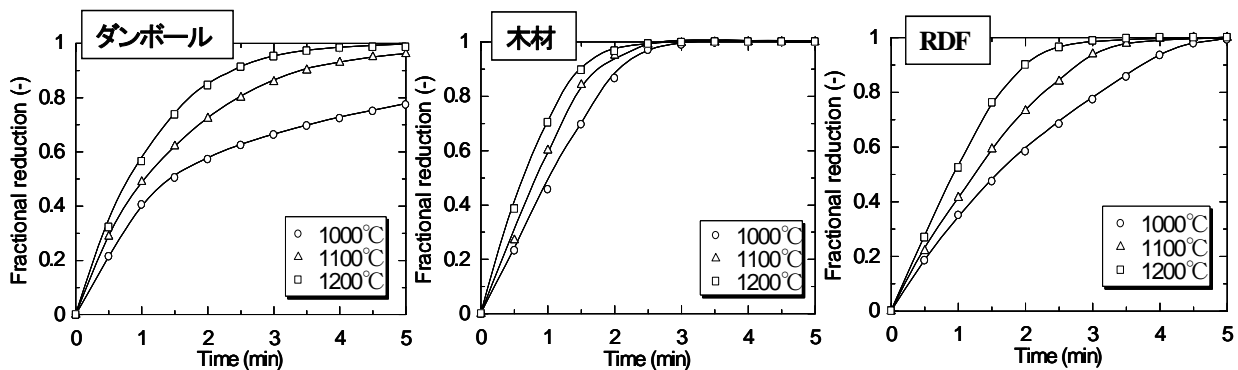


Fig. 5 ダンボール、木材、RDF を還元材として使用した場合の還元反応速度

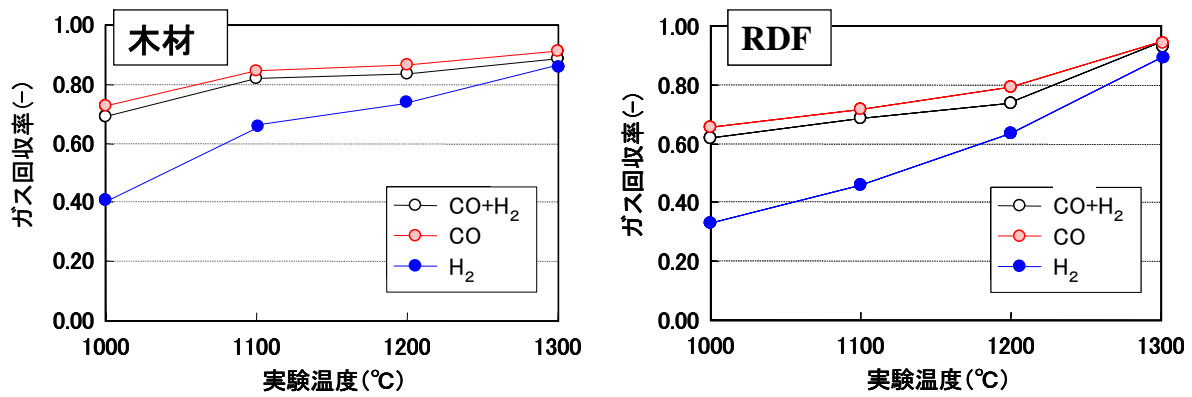


Fig. 6 還元反応過程における木材、RDFの水素およびCOガスとしての回収率（転換率）

#### ④ 廃棄物の水素、COガスへの転換率

還元反応過程における木材、RDFの水素およびCOガスとしての回収率（転換率）をFig. 6に示す。ここで定義した回収率は、原料中の炭素および水素量に対する生成ガス中の炭素および水素量の比（モル比）として求めた。水素およびCOガスへの転換率は還元温度とともに上昇し、1300°Cの条件で役90%に達する。熱力学解析の結果、ほぼ100%の転換率を得るには1400°C以上の条件での還元が必要であることが推算された。ガス転換率を原料種で比較すると、RDFより木材の方が高い転換率が得られる。また、水素成分に比べ炭素の転換率が高い。これは、廃棄物中の水素成分が還元反応が開始される前の低温域で炭化水素系ガスとして放出されること、また固定炭素の多い木材の方が還元反応で生成したH<sub>2</sub>Oの水素およびCOガスへの分解反応が効率的に進行するためと考えられる。廃棄物中の水素および炭素成分を100%H<sub>2</sub>、COガスに転換するためには、酸化鉄中の酸素量に対する廃棄物中の炭素量とのモル比(C/O)を1.0以上に設定する必要がある。

### 1.3 廃棄物中重金属類の高効率分離に関する検討

有機系廃棄物を利用して鉄鉱石を還元する過程、および還元後に想定される残渣（スラグ）から亜鉛、鉛などの重金属類を効率的に回収・無害化する方法の探索を目的に、共存塩化物種や処理温度などを種々変化させた条件におけるスラグの見掛け飽和蒸気圧の測定、酸化鉄と金属塩化物の混合試料あるいはスラグ試料からの亜鉛、鉛、鉄の各成分の揮発速度の測定を実施、廃棄物中重金属類の高効率分離について検討した。

#### ① 残渣（スラグ）中重金属類の揮発分離特性

亜鉛成分を含有するスラグ試料について得られた見かけ飽和蒸気圧の温度依存性をFig. 7にまとめて示す。塩素成分が存在することによりスラグの見かけ飽和蒸気圧は著しく増加し、ZnCl<sub>2</sub>としての揮発駆動力が増加する。鉛成分を含有するスラグ試料の見かけ飽和蒸気圧に関しては、FeOが高い（50%以上）場合は塩基度の増加によって飽和蒸気圧が低下するが、FeOが低い場合は塩基度0.3と0.7の間でピークを示す。一般的に塩基

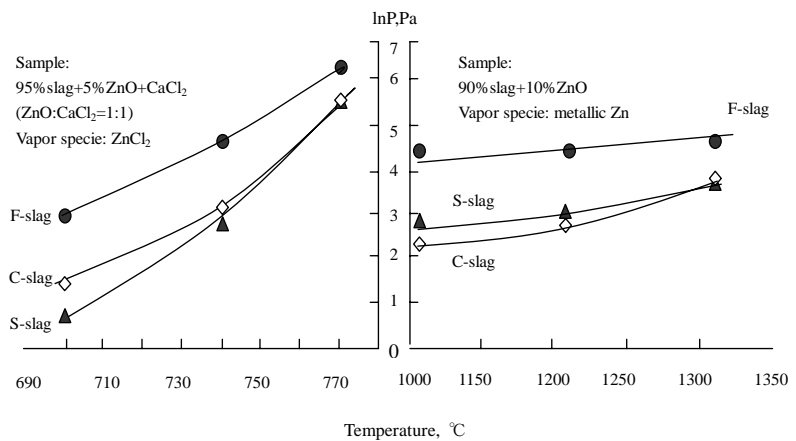


Fig. 7 各スラグ試料の見かけ飽和蒸気圧の温度依存性

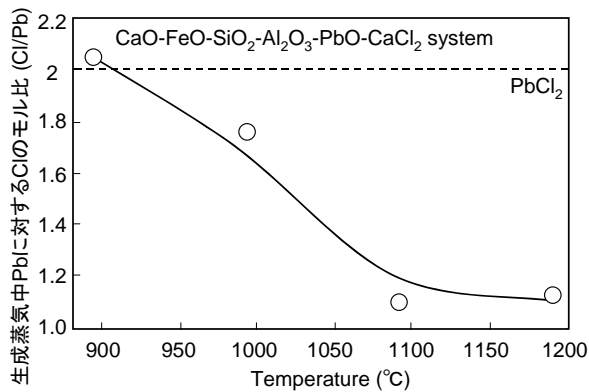


Fig. 8 F-slag 試料からの Pb 成分の揮発形態の温度依存性

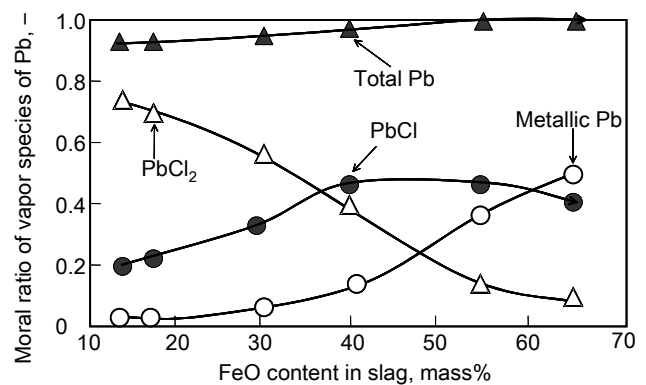


Fig. 9 各蒸気種への鉛の分配に対するスラグ中 FeO 濃度の影響 (CaO/SiO<sub>2</sub> = 0.29)

度の増加はスラグの塩素 capacity を増加させ、塩化鉛としての揮発を抑制するように働くものと考えられるが、FeO が塩基性成分として働く以外に鉛の賦存形態にも影響することを示唆する結果である。

重金属の揮発形態に関しては、塩素が共存しないスラグ系では、亜鉛は強還元雰囲気下で主に金属 Zn の形態で揮発し、スラグの塩基度 (CaO/SiO<sub>2</sub>) および FeO 濃度が増加すると共に揮発除去率が向上する。塩素成分が共存すると、スラグの見かけ飽和蒸気圧は著しく増加し、ZnCl<sub>2</sub> としての揮発駆動力が増加する。また、塩素成分が存在するスラグ系では、揮発速度の温度依存性がより顕著となる。Fig. 8 に FeO 成分を 50%以上含み、低塩基度のスラグ (F-slag) から揮発した Pb 成分中の Cl と Pb の mol 比 (Cl/Pb) の温度依存性を示す。Cl/Pb = 1 は PbCl, = 2 は PbCl<sub>2</sub> に対応するものであり、保持温度が上昇するにつれて低塩素化合物として揮発する傾向が認められる。

低温において塩素と共に Pb 成分が迅速に除去できる可能性を示す結果である。本研究では、実験と平行して熱力学計算コードとデータベースを利用した平衡計算による検討を行った。Fig. 9 は、CaO/SiO<sub>2</sub> = 0.29、温度 1473 K の条件における、各蒸気種への鉛の分配について、スラグ中 FeO 濃度で整理した結果である。スラグ中 FeO 濃度も Pb 成分の揮発形態に大きな影響を与え、鉛化合物蒸気中の平均 Cl/Pb 比は FeO 濃度の増加と共に低下する傾向にあることを示す。すなわち、還元性の強い条件では鉛が金属の形態で除去される可能性を示している。ただしこの場合は、塩化鉄の生成による鉄ロスの増加が懸念される。このため、亜鉛、鉛、鉄、塩素成分を含むスラグの揮発挙動について実験的にさらに検討した。

F スラグに CaCl<sub>2</sub> を添加した系では、保持温度の上昇および CaCl<sub>2</sub> 添加率の増加により、Fe および Zn の揮発量が増加する。ただし、Pb は全般に揮発率が高く、CaCl<sub>2</sub> の添加率や保持温度の影響があまり明確でない。Fe 成分の揮発は 1573 K 以上の高温条件では顕著に増加する。FeO 濃度が 15%以下と低く塩基度が 0.67 と比較的高い C スラグに CaCl<sub>2</sub> を添加率した場合、F スラグと異なり、Fe 揮発量に対する保持温度の影響は小さく、Zn 揮発量に対する CaCl<sub>2</sub> の添加率の影響が顕著になる。Fig. 10 に、得られた結果を各成分の揮発率に変換して示す。Pb の揮発率はいずれの条件でも 100 mass%に近い値を示しているのに対し、Fe の揮発率は CaCl<sub>2</sub> 添加率が高く、保持温度が高い条件でも比較的低い値を保っている。CaCl<sub>2</sub> を添加すると Pb の揮発が低温から促進され、特にスラグ中の FeO 濃度が低い C スラグでは本実験条件では極めて高い揮発率を示す。Pb 成分の揮発除去促進と Fe 成分の揮発抑制の両者を満足するためには、

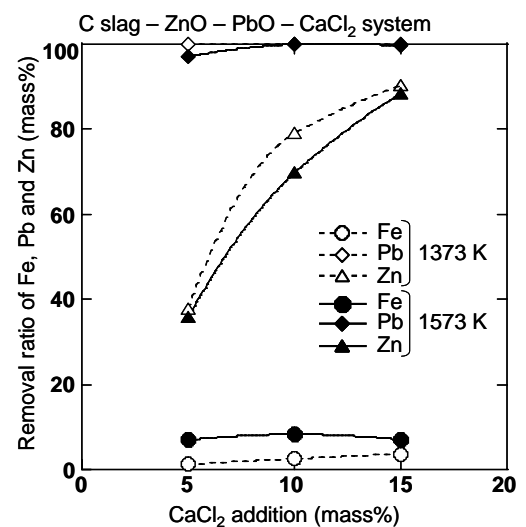


Fig. 10 C スラグ系試料からの各成分の揮発率に対する CaCl<sub>2</sub> 添加率の影響

適量の塩素が共存する条件で低温かつ酸化性雰囲気中で保持することが望ましい。ただし、酸化鉄の還元条件とは相反する条件であることから、プロセスの工夫が必要となる。

一方、FスラグにKClを添加した系では、保持温度1573 KにおいてKCl添加量増加と共にPb、Zn成分の揮発率が増加する傾向が認められるが、1373 KではKCl添加量との関係が明確でない。保持温度の影響も顕著ではない。揮発率は、Pb、Zn、Feの順に低くなり、Fe成分は基本的に揮発していない。また、Pbの揮発率は最大でも80 mass%程度とCaCl<sub>2</sub>添加のケースに比較して小さい。CスラグにKClを添加した場合は、Pbの揮発率が1373 Kでの80 mass%程度から1573 Kでの50 mass%程度へと保持温度上昇により極端に低下、Znの揮発率がかなり小さくなる。

## 2. 実用化研究

### 2.1 廃棄物内装鉄鉱石の高強度塊成化

廃棄物を直接利用する鉄-水素コプロダクションシステムを実現するための重要な技術課題は、鉱石原料中に廃棄物を均一に内装させた高強度の塊成体の製造である。その可能性および工業化への技術課題を明確にするため、工業的に想定される原料構成で実機サイズの廃棄物内装ブリケットを試作し、冷間強度、熱間強度および還元反応特性を調べた。原料構成として、RDFとヘマタイト系鉱石（銘柄：ハマスレー鉱石）、ポリエチレン粉と転炉ダスト、ポリエチレンフィルムとスペキュラータイプのヘマタイト鉱石（銘柄：MBR鉱石）の3種の組み合わせを選定した。Fig. 11に塊成化のプロセスフローと設備を示す。この塊成化プロセスの特徴は、プロセスフローに示すように鉄鉱石粉をあらかじめ100~200℃に余熱しておき、これに廃棄物を添加混合し、鉄鉱石の顕熱によって廃棄物中のプラスチック類を軟化溶解させ、この熱可塑性を利用して高強度、高密度の塊成体にブリケットングする点にある。このプロセスで試作した3種類の廃棄物内装鉄鉱石ブリケットをFig. 12に示す。ブリケットの大きさは約25ccである。ポリエチレンフィルム（PEフィルム）を用いた試料はフィルム形状が残り、バリの多い形状となっている。RDF+HAM 鉱石、PEpowder+転炉ダストの組み合わせは形状も良好で強度の高い塊成体に成

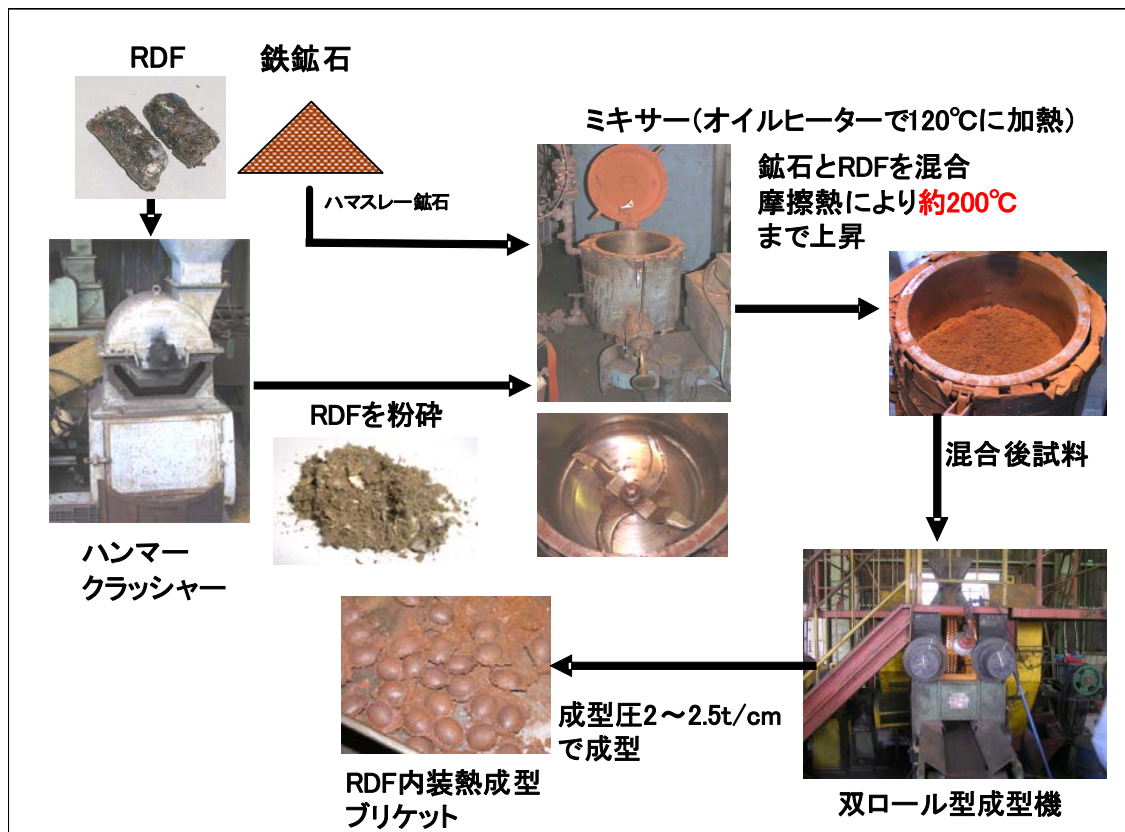


Fig. 11 廃棄物内装鉄鉱石ブリケットの製造プロセス



Fig. 12 熱間成型法で試作された廃棄物内装鉄鉱石ブリケットの外観と強度


実験温度	—	900°C	1100°C	1300°C
実験時間	—	30min	15min	8min
試料外観				
収縮率	—	▲4~9%	22~30%	60~64%
還元率	—	50%	73%	76%
圧かけ強度*1	122kgf/個 (147kgf/個)	0.8kgf/個	9.6kgf/個	20kgf/個<

Fig. 13 試作された RDF+HAM 鉄鉱石ブリケット（球状に整形）の還元特性

型された。冷間強度に差はあるものの、工業的に使用可能な強度を有している。一般市中ごみに性状が類似し、最も現実的な試料である RDF+HAM 鉄鉱石ブリケットについて球状に整形し、還元特性および反応後強度を調べた。Fig. 13 に異なる還元温度での特性を示す。いずれの温度でも形状は維持されており、高温還元ほど収縮が大きくなっている。還元率も高温ほど高く、金属鉄の生成と焼結によって収縮したことが伺える。反応後強度は金属鉄の生成量に依存し、高温処理ほど高い値を示す。工業規模での使用では 10kgf/個以上の強度が望ましいことから、1200°C以上での還元処理が必要と判断される。以上の試作実験から、工業規模での使用に耐える廃棄物内装ブリケットの製造技術を確認した。

## 2.2 回転炉床法による鉄-水素コプロダクションシステムの実証試験

### ①RPF を内装した鉄鉄石の塊成化条件

代表的な有機系一般廃棄物である古紙および廃プラスチックで構成される RPF (Refuse Paper & Plastic Fuel) を対象として、Fig. 12 に示した鉄鉄石・廃棄物混合物の塊成化技術により、RPF+鉄鉄石混合ブリケットを作製した。使用した RPF、石炭の化学分析結果を Table 2 に、鉄鉄石の化学組成を Table 3 に、またそれらの配合率、試料中の C/O、H/O、(C+H)/O を Table 4 に示す。作製したブリケット試料（重量約 12.0 g、体積約 6cc）は、ベンチ炉試験に先立ち、まず小型実験炉で還元特性を調べ、ベンチ炉の運転条件を決定した。



Table 2 RPF、石炭の化学組成

	Ultimate analysis				Proximate analysis		
	C	H	N	O	FC	VM	Ash
RPF	55.71	7.88	0.27	34.85	7.33	91.39	1.29
Coal	88.44	4.28	0.56	4.81	66.50	24.30	9.20

Table 3 鉄鉱石の化学組成

	T.Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	CW
Ore	66.77	1.40	0.35	0.17	0.03	1.10	2.70

Table 4 試料の配合率と試料中の C/O、H/O、(C+H)/O

Sample	RPF (mass%)	Coal (mass%)	Ore (mass%)	C/O (mol/mol)	H/O (mol/mol)	(C+H)/O (mol/mol)	FC (mass%)
A-1	33.3	0.0	66.7	0.81	1.36	2.17	2.44
A-2	23.5	5.9	70.6	0.83	1.16	1.99	5.65
A-3	13.9	13.9	72.3	0.97	0.99	1.96	10.25
A-4	6.2	18.8	75.0	1.02	0.80	1.82	12.96

## ②回転炉床法を想定したベンチ炉還元試験

回転炉床法を想定した大型のベンチ炉を用い、RPF+鉄鉱石混合ブリケットの還元試験を実施した。Fig. 14 に示すような、プロパンガスバーナーを備えたベンチ炉を、事前に 1150、1250、1500°C で予熱しておき、試料 A-1、A-2、A-3、A-4 をそれぞれ 36 個ずつ耐火物板上に Fig. 15 のように配置し、炉下部よりベンチ炉内へ一気に装入して、加熱した。試料は所定時間の加熱を行った後に取り出して、窒素中で急冷した。試験後、試料の重量測定、化学分析、圧壊強度測定、組織観察を行った。Fig. 16 に最終還元率に及ぼす石炭配合割合の影響を示す。石炭の配合割合を増やすと、石炭中固定炭素の還元反応への利用率が向上するため還元率が増加した。しかし、A-4 では還元率が逆に低下傾向を示した。これは、RPF 配合量の減少により還元反応への水素の寄与が少なくなったためと推察され、RPF と石炭の配合には最適値が存在することが判明した。また最終還元率が 100% に到達しなかったのは、Fig. 17 の組織観察から分かるように鉄鉱石中の脈石成分が還元鉄の凝集を促進させ、鉄鉱石内部への還元ガスの進入を阻害したためと推察される。Fig. 18 に廃棄物中水素成分の H<sub>2</sub> ガスへの転換率と石炭配合率の関係を示す。石炭の増加にともない転換率が向上する傾向を示した。これは石炭中の固定炭素が水性ガス化反応によって還元生成した H<sub>2</sub>O の H<sub>2</sub> ガスへの改質に効果的に寄与したためと推察される。Fig. 19 に還元実験前後の試料の外観写真を示す。1250°C の加熱条件ではスポンジ状の還元鉄が、1500°C の加熱条件では還元中に試料は熔融し、スラグを分離した炭素濃度 3% のメタル粒子が得られた。Fig. 20 に 1250°C における還元率の時間変化を示す。加熱時間が延びると還元率は上昇し、1200 秒後には 80% に到達した。Fig. 21 に 1250°C における圧壊強度の時間変化を示す。加熱時間が長く、石炭配合率が高いブリケット試料ほど強度が上昇した。最も石炭配合率の高いブリケット試料の圧壊強度は 1200s 後に 50kgf に達した。Fig. 22 には 1250°C 加熱における組織変化を示す。時間とともに生成した金属鉄の凝集が進行しており、これが圧壊強度上昇の大きな要因となっている。

以上の結果から、RPF+鉄鉱石混合ブリケットは 1250°C、20 分以上の加熱条件で還元処理することが製品のハンドリングの観点から望ましいと判断される。

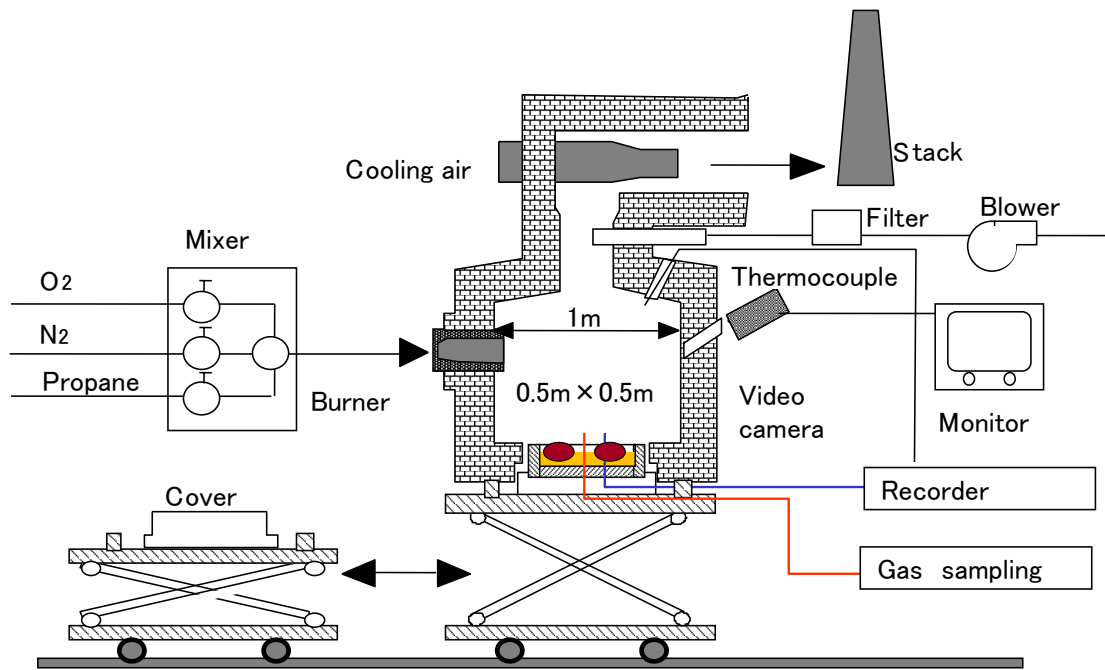


Fig. 14 ベンチ炉概略図

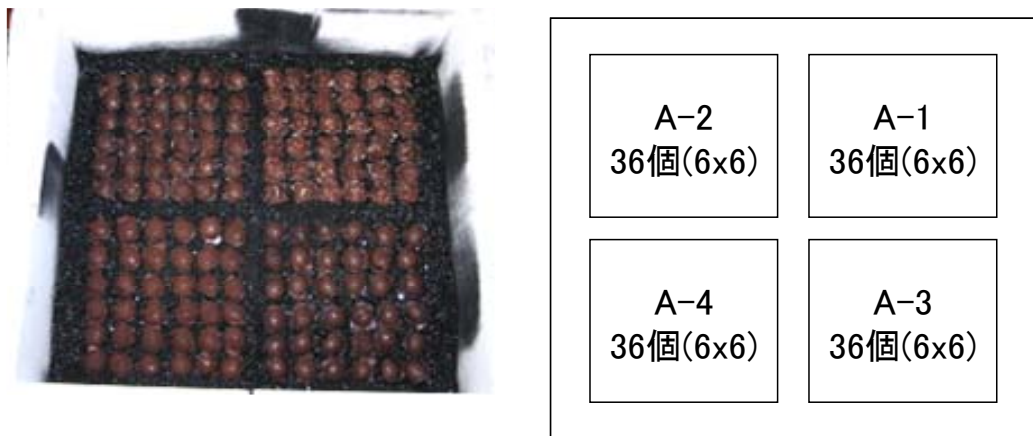


Fig. 15 試料の設置状況

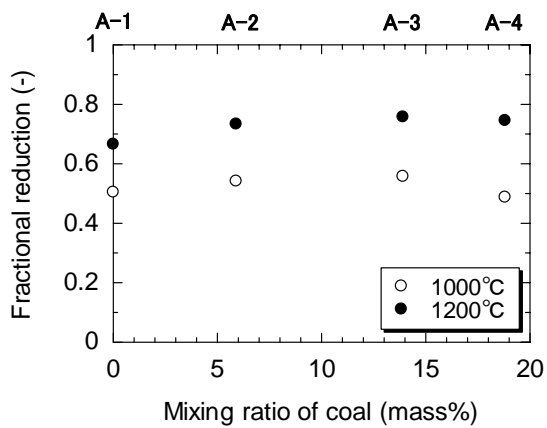


Fig. 16 最終還元率に及ぼす石炭配合率の影響

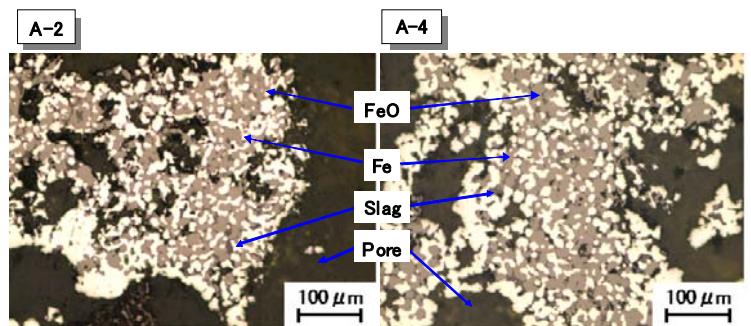


Fig. 17 1200°Cで還元後のA-2, A-4の断面組織

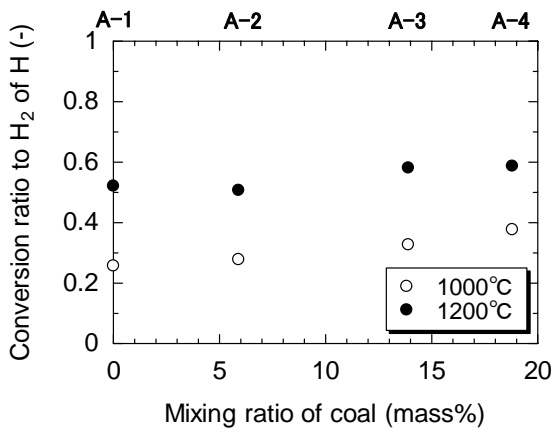


Fig. 18 H<sub>2</sub> への転換率に及ぼす石炭配合率の影響



Fig. 19 還元実験前後の試料の外観写真

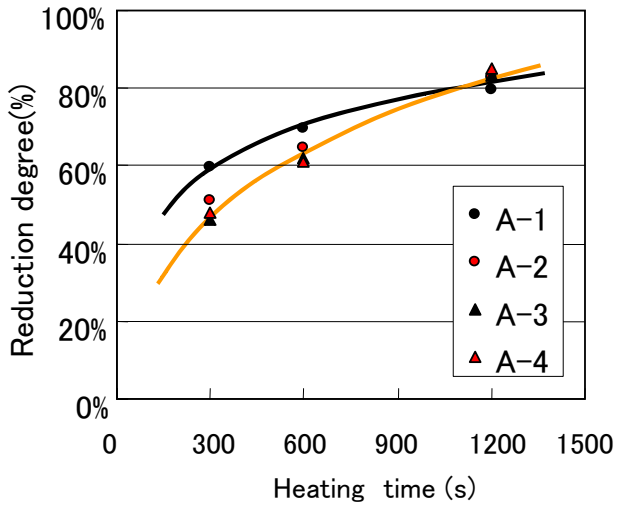


Fig. 21 圧壊強度の時間変化

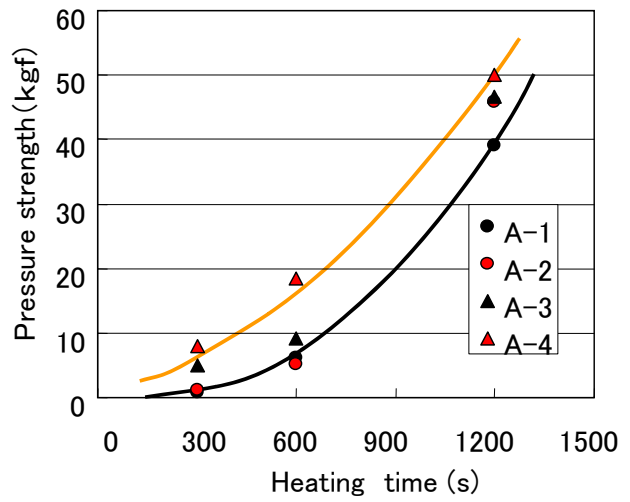


Fig. 20 1250°Cにおける還元率の時間変化

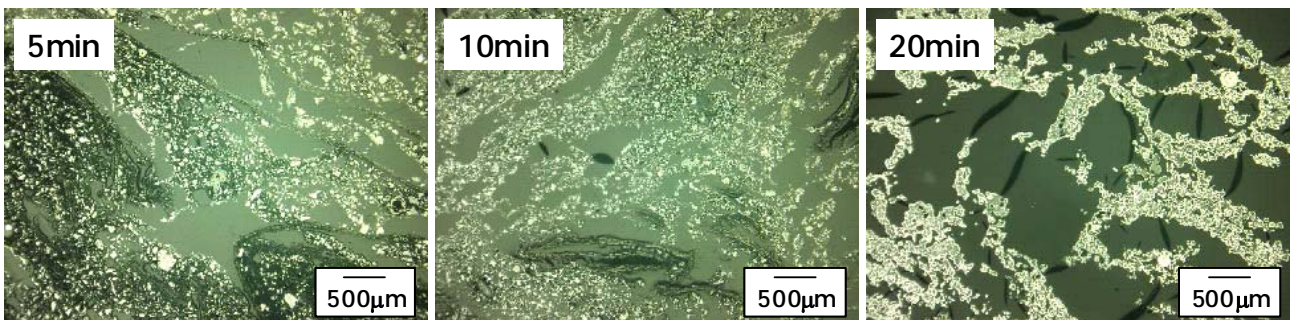
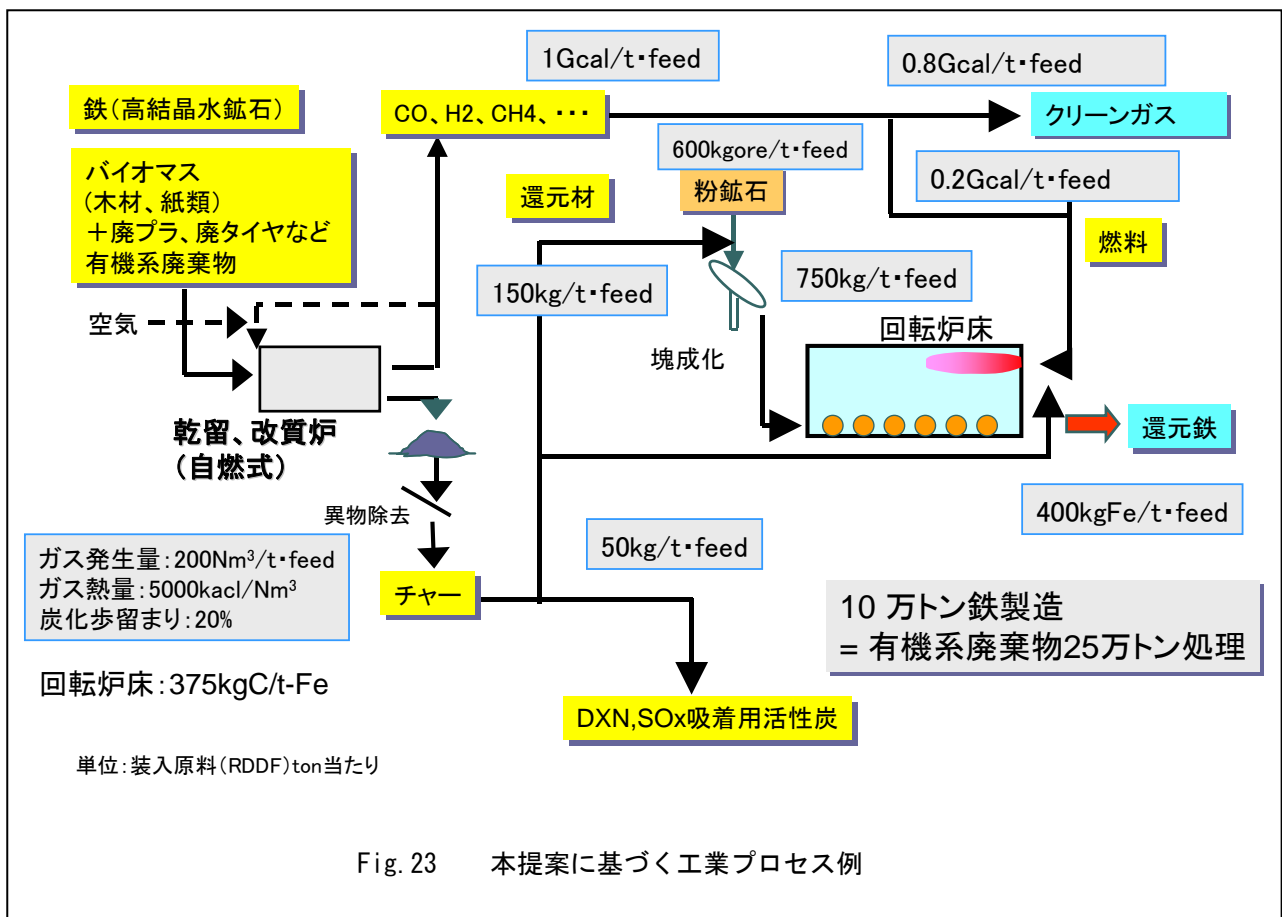


Fig. 22 1250°Cで A-1 を加熱した際の断面組織の時間変化

### 3. システム評価

#### 3.1 廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションシステムのエネルギー評価

以上の結果をベースに、表記鉄-水素コプロダクションシステムのエネルギー評価を行った。システムについては種々のプロセスを検討しているが、ここでは鉄-水素の併産が最も効率的かつ容易な回転炉床法について述べる。システムフローを Fig. 23 に示す。システムの基本構成は、廃棄物の乾留・改質炉と回転炉床の組み合わせである。プロセスフローは、まず廃棄物を乾留炉で乾留してC-H系の燃料ガスとチャーに変換する。生成したチャーを還元材として鉄鉱石粉を混合し、ペレットもしくはブリケット状に塊成化して回転炉床炉に装入し、加熱処理して還元鉄を製造する。乾留炉および回転炉床炉の加熱用燃料には乾留過程で生成する燃料ガスを使用する。乾留温度約 800°C、回転炉床炉の加熱温度を 1300°C とし、乾留炉でのガス発生量：200Nm<sup>3</sup>/t・feed、ガス熱量：5000kcal/Nm<sup>3</sup>、炭化歩留まり：20%、回転炉床炉での炭素消費量：375kgC/t-Fe を仮定すると、有機系廃棄物 25 万トンの処理で銑鉄約 10 万トン、約 0.8Gcal/t-feed のC-H系クリーンガスが回収可能である。銑鉄製造の原単位で見ると、銑鉄1トン当たり 2.5 トンの廃棄物が必要であるが、逆に 0.8 トンの製鉄用石炭が不要となり、CO<sub>2</sub>削減の有効な手段になり得ると評価される。



## 結論

廃プラスチック、木材、古紙等の有機系廃棄物を鉄鉱石の還元材として使用した場合の還元挙動および廃棄物のガス化挙動を熱力学計算および小型電気炉実験によって基礎的に検討するとともに、回転炉床法を想定した大型ベンチ炉により、RPF を用いた鉄-水素コプロダクションシステムの実用化試験を実施した。また、廃棄物中に含まれる、Zn や Pb など重金属類の塩化揮発分離の可能性についても検討した。さらに、本システムを回転炉床炉に適用した場合のエネルギー原単位を解析し、廃棄物のエネルギー代替効果を評価した。これら一連の研究成果を以下に示す。

- RDF、廃プラスチック、廃木材を鉄鉱石粉と混合圧密成型し、1250°C 以上に加熱処理することにより、鉄鉱石を 100%還元できることを明らかにした。
- 鉱石中に内装した廃棄物中の水素および炭素成分は 1400°C 以上の加熱条件でほぼ 100% H<sub>2</sub> および CO ガスに転換されることを明らかにした。
- 強度、還元特性の両者において工業化に適した高強度廃棄物内装ブリケットの製造技術を確立した。
- 回転炉床法を想定した大型ベンチ炉試験を実施し、廃棄物を利用した鉄-水素コプロダクションシステムを実証した。
- 表記システムのエネルギー解析より、廃棄物の事前乾留+回転炉床還元の 2 段システムを用いた場合、有機系廃棄物 25 万トンの処理で銑鉄約 10 万トンの製造と約 0.8Gcal/t-feed の C-H 系クリーンガスが回収できることを明らかにした。
- 廃棄物中に含まれる Zn および Pb 成分は、廃棄物中に共存する塩素によって効果的に塩化揮発されることを示した。また、塩素の存在は同時に Fe の揮発を助長することから、鉄歩留まりの確保には塩素量、温度、ガス雰囲気調整が重要であることを示した。

## 英語概要

- ・ 研究課題名 = "Research for Co-Production System of Metallic Iron and Hydrogen Gas by Using Organic Waste Materials"
- ・ 研究代表者名及び所属 = Masakata SHIMIZU · Kyushu University  
共同研究者 = Masanori IWASE · Kyoto University, Eiki KASAI · Tohoku University, Masaaki NAITO · Nippon Steel Co., Kanji TAKEDA · JFE Steel Co.
- ・ 要旨 = Reduction behavior of iron ore briquettes composing the used paper, wood flour or waste plastics were studied aiming at development of co-production system of metallic iron and hydrogen gas by using the organic waste materials. As the results, it was clarified that the iron ore briquette composing organic waste materials was perfectly reduced to metallic iron, and carbon and hydrogen in waste materials were almost reformed to H<sub>2</sub> and CO gas under the condition of reduction temperature over 1400°C. The large-scale bench furnace test that assumed the rotary hearth method was executed, and iron-hydrogen co-production system using waste was proven. In the energy evaluation of the two step system consisting of carbonization and rotary hearth reduction, it was clarified to be able to collect a C-H system clean gas about 0.8Gcal/t-feed and pig iron production about 100,000 tons by processing an organic system waste 250,000 tons. In addition, it was found that the heavy metals contained in waste materials such as Zinc and Lead were effectively vaporized by Chlorides in waste materials. These results sufficiently show the possibility of co-production system of pig iron and hydrogen gas by using the organic waste materials.
- ・ キーワード = organic waste materials, iron ore, reduction, rotary hearth furnace, hydrogen, Zinc, Lead, chlorides evaporation