

特別講演

□学術功績賞受賞記念

資源・環境調和型製鉄の基礎研究

Fundamental Studies on Ironmaking and Steelmaking
in Consideration of Resources and Environment

碓井建夫

Usui Tateo

大阪大学 大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻
材料エネルギー理工学講座 教授



*脚注に略歴

1 はじめに

我が国の鉄鋼業においては、巨大設備を保有する高炉一転炉法が製鉄法の主流となっており、普通鋼から超清浄鋼まで、大量かつ安価に安定供給している。高級鋼については欧米すらも追随を許さない鋼種もあるなど、我が国鉄鋼業は品質面で世界の製鉄をリードする立場にある。なおかつ、我が国の高級鋼を含む鉄鋼生産高当たりのエネルギー消費量（炭酸ガス排出量）は、欧米よりも1～2割低く、大半が普通鋼生産の中国と比べて3割以上も低い¹⁾ことなど、環境面の技術レベルでも世界を大きくリードしている。また、良質資源（鉄鉱石^{2,3)}、石炭⁴⁾）の枯渇化に伴う劣質資源の活用面でも、日本鉄鋼協会場で産学協同の研究会が推進されている。

昨年2月、ロシアの批准により京都議定書が発効し、温暖化対策を最優先事項にしつつも、BRICsをはじめ世界規模での経済発展により鉄鋼の増産が求められているこの時期に、製鉄技術およびそれに付帯する環境技術全般に関する最近の学術的、技術的進歩を紹介し、相矛盾する要請に対する答を探究するための討論の絶好の機会となる第4回世界製鉄会議⁴¹⁾（2006年11月26日～30日、大阪大学コンベンションセンターにて開催予定；日本鉄鋼協会主催、大阪大学大学院工学研究科共催）の準備に、ここ2～3年、実行委員会一丸となって当たっている。

このような最近の動静の中で、筆者らは、過去30年以上に渡り一貫して、資源・環境に調和した製鉄に関する基礎研究を、次のように情熱的に進めてきた。酸化鉄ガス還元の数値論的研究では、現象をより忠実に表現する新しい反応モデルを提案するとともに⁵⁾、焼結鉱ガス還元に対して、多元系カルシウムフェライトの還元挙動を考慮した解析を展開し^{6,7)}、

速度パラメータ値を整備して、高炉内反応の解析精度向上と、還元材比低減のための基礎データを提供している^{8,9)}。高炉炉下部液流れの研究では、コールドモデルにより、諸因子の影響を実験的に解析し、高炉の安定操業、高出鉄比操業のための基礎データを提供している¹⁰⁻¹³⁾。鉄浴式溶融還元の研究では、基礎実験に基づき、石炭乾留ガスを予備還元の有効利用するプロセスについて、新たな提案をしている¹⁴⁻¹⁷⁾。ダイオキシン類発生と抑制の基礎研究については、廃トランスの再資源化という目標に端を発して開始したが、産業廃棄物処理、ごみ焼却炉、焼結機等に関して、モデル実験による解析を行い¹⁸⁻²¹⁾、排ガス中浮遊カーボン系物質の水中インジェクション除去による大幅削減法を提案するなど実用化にも取り組んでいる^{22,23)}。さらに、溶銑予備処理におけるCO₂ガスによる脱珪・脱炭同時反応²⁴⁾、溶鋼からの脱N²⁵⁾、脱硫・脱酸同時反応²⁶⁾、スクラップリサイクルにおける脱Cu^{27,28)}などの気/液反応の熱力学と速度論による解析を精力的に進めている。シュレッターダストなどの溶融処理後のメタルからの2液相分離による鉄、銅などの再資源化の基礎研究²⁹⁻³¹⁾にも取り組んでいる。また、難焼結性の褐鉄鉱を焼結に多量使用することを目的とする研究会を組織し、協同研究を推進している^{2,3)}。このように、劣質資源活用、資源循環、環境調和に力点を置いた鉄鋼製錬の基礎研究と同分野の発展に微力を捧げている。これまでに世話になってきた、主な各種協同研究会をTable 1にまとめた。

2 講演項目と概要

講演時には、以下の最近約10年の研究成果をメドレーで報告した〔括弧書きで、対応する工程を付記してある〕。

*昭和44年3月に阪大工学部冶金学科を卒業、49年3月に阪大大学院工学研究科博士課程を修了（工学博士号取得）、同年4月に阪大工学部助手に採用され、58年1月講師、62年4月助教授を経て、平成7年11月より現職、9年4月より大学院重点化により工学研究科所属。この間、輸送現象論、鉄鋼反応プロセス工学、関連する資源・環境分野の研究、教育に従事。

(1) 焼結プロセス^{32, 33)}—褐鉄鉱の使用—

〔鉄鉱石予備処理：塊成化〕

融液をシリケート系スラグにより確保し、それをCaOと反応させCaO-SiO₂系鉱物相を析出させることによって2FeO・SiO₂、CaO・FeO・SiO₂等の難還元性鉱物の生成を回避し、被還元性を改善する方法について検討するため、Fe₂O₃-SiO₂系融液にCaOを添加した際に生じるスラグ、析出相のH₂還元反応速度を測定し、その被還元性に及ぼすCaO添加の影響を調べた。CaO-SiO₂-Fe₂O₃系スラグの被還元性のスラグ組成依存性をFig.1に示す。これより、2FeO・SiO₂融液にCaOを添加することにより被還元性が良

くなり、またスラグ組成が固液共存領域に入ることにより、被還元性がさらに非常に良くなることがわかる。

(2) 塊成鉱の被還元性に及ぼす気孔径の影響³⁴⁾

〔高炉シャフト部での気固反応〕

塊成鉱中のマイクロ気孔が増加すると比表面積が増加し反応速度も大きくなる。一方、マクロ気孔は、粒内での還元ガスおよび生成ガス(CO₂, H₂O)の拡散を促進させると考えられることから、被還元性に及ぼす気孔径分布の影響を明らかにするため、Fe₂O₃粉末試薬とポリエチレン粉末試薬を用いて気孔径を制御したペレットを焼成した。その結果、Fig.2に示したように単位体積当たりの表面積は勿論のこと、マクロ気孔による粒内ガス拡散が被還元性に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。

(3) 酸化鉄の被還元性に及ぼすスラグ浸透の影響^{35, 36)}

〔高炉軟化・融着帯での気固液反応〕

FeOと共存するFeO-SiO₂, FeO-SiO₂-CaO, FeO-SiO₂-Al₂O₃スラグを含有するFeO圧粉体を用いて、1500KでH₂ガスによる還元実験、および室温での顕微鏡観察と見かけの気孔率の測定を行い、熔融スラグ生成下において熔融スラグによる気孔閉塞の還元性への影響を調査した。

(4) 初期乾燥充填層の液流れ挙動とホールドアップ推算式^{12, 13)}

〔高炉滴下帯〕

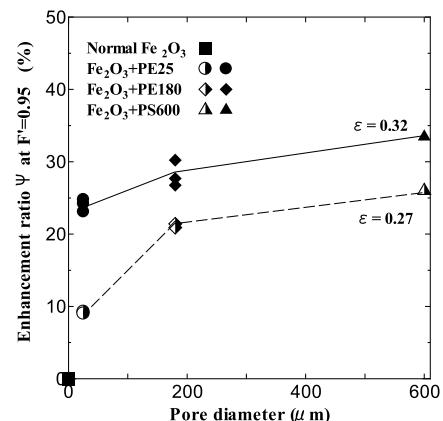
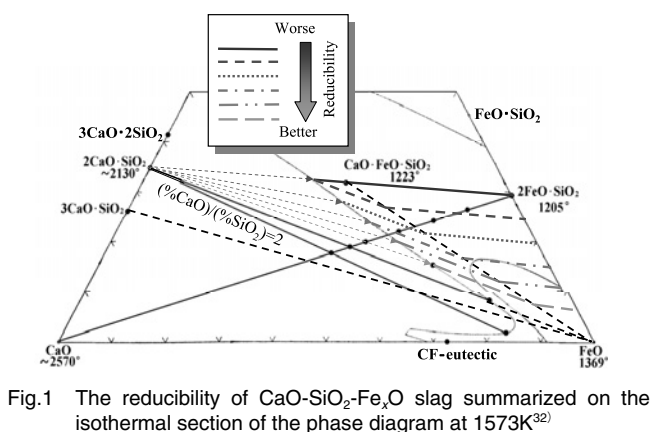
初期乾燥充填層における液ホールドアップを推算するために、新たにチャネリングファクターF_Cを提案し、CCDビデオカメラを用いた2Dモデルの可視化実験によりF_Cを求めた。このF_Cと筆者らの多くの液ホールドアップデータの回帰解析から液ホールドアップの推算式を導出した。

本推算式から計算した液ホールドアップは、粒子径あるいは接触角に関わらず、初期乾燥充填層における実測値と良く一致する。特に、濡れにくい系の初期乾燥充填層においては、Fig.3に示すように、全ホールドアップH_tと静的ホールドアップH_sは充填粒子径D_pの減少とともに増加し、D_p ≒

Table 1 List of Main Collaborative Research Projects Joined

	〔主査 (敬称略)〕	筆者の役割
1978～1982	日本鉄鋼協会・日本金属学会・日本学術振興会 鉄鋼基礎共同研究会 高炉内反応部会〔東北大・大森〕	委員
1988～1992	日本学術振興会 製鉄第54委員会 還元反応検討WG〔九大・小野〕	委員
1989～1993	特定基礎研究会 赤地層中の気・固・液移動現象部会〔東北大・八木〕	委員
1991～1994	基礎研究会 鉄鋼業における炭酸ガス抑制対策研究部会〔東大・小宮山〕 C グループリーダー・委員	
1991～1994	共同研究会 製鉄部会 製鉄技術検討会〔東北大・徳田〕	委員
1993～1996	特定基礎研究会 4 流体の移動現象研究会〔東北大・八木〕	委員
1995～2000	高温プロセス部会 還元反応研究グループ〔九大・小野・村山〕	委員
1995～2000	高温プロセス部会 炭酸ガス抑制製鉄プロセス研究グループ〔阪大・碓井〕	
1996～1999	新塊成鉱の基礎研究会〔北大・石井〕 幹事・WG世話人・委員	
1997～2000	高炉下部機能強化研究会〔東北大・八木〕 幹事・委員	
1997～2002	鉄鋼業環境保全技術開発基金 焼結排ガス中ダイオキシン抑制対策技術 (SDD) 研究会〔東北大・葛西〕 委員	
1999～2004	科学技術庁・文部科学省 科学技術振興調整費 総合研究 エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製鉄反応に関する研究〔北大・石井〕 委員	
2000～2003	高温プロセス部会 鉄鉱石-ガス-炭素間反応研究グループ〔名工大・井口〕 委員	
2000～2003	高温プロセス部会 炭酸ガスミニマム製鉄研究グループ〔阪大・碓井〕	
2000～2002	日本学術振興会 製鉄第54委員会 21世紀製鉄研究会〔九大・清水〕 委員	
2000～2001	難熔結性鉄鉱石の塊成化プロセス工学調査研究会〔阪大・碓井〕	
2001～2004	多孔質メソメゾイク組織焼結研究会〔阪大・碓井〕	
2002～2005	CO ₂ 発生ミニマム化を目指した高炉限界現象の制御研究会〔九大・清水〕 委員	
2003～2006	日本学術振興会 製鉄第54委員会 バイオマスウェイト高度利用研究会〔京大・岩瀬〕 委員	
2003～2006	高温プロセス部会 製鉄プロセスにおけるスクラップの有効活用方法研究グループ〔阪大・中里〕 委員	
2005～2008	複合造粒・層設計焼結研究会〔東北大・葛西〕 副主査	

注：記載のないものは、母体は「日本鉄鋼協会」



10 mm 付近で最大値を取り、 D_p がさらに減少すると比表面積がさらに増加するにも関わらず H_t と H_s が急激に減少する特異な現象を示す。本推算式で計算した H_t 、 H_s および動的ホールドアップ H_d は、実測値と良く一致し、特に H_t と H_s が $D_p \approx 10$ mm 付近で急激に変化する特異な現象をも良く再現している。

(5) 酸化性ガスを利用した Fe-C-Si 合金の C, Si の酸化挙動²⁴⁾ 〔溶鉄予備処理〕

溶融 Fe-C-Si 合金中へ CO_2 、 O_2 を吹き込むことによる脱 C・脱 Si 挙動を 1573K において調べ、ガスを酸化剤として用いた場合の溶鉄脱 Si について検討した。脱 Si 優先領域では Si のみが酸化される。脱 Si の進行に伴って C の溶解度が上昇し、 CO_2 を用いると溶解度線に沿って C 濃度は増加する。脱 C、脱 Si 競合領域における CO_2 、 O_2 による酸化挙動を Fig.4 に示す。脱 C、脱 Si 競合領域においても Si 濃度 0.1 ~

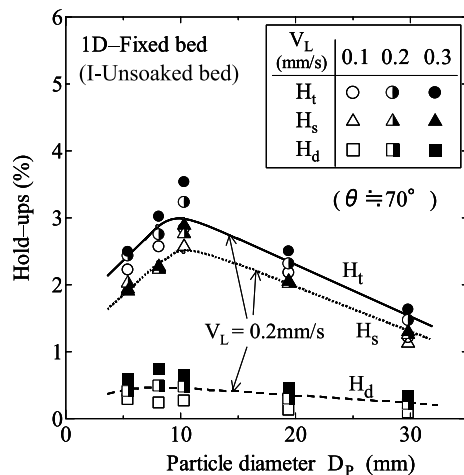


Fig.3 Comparison between experimental and estimated hold-ups in initially unsoaked bed (influence of particle diameter on hold-ups)¹³⁾

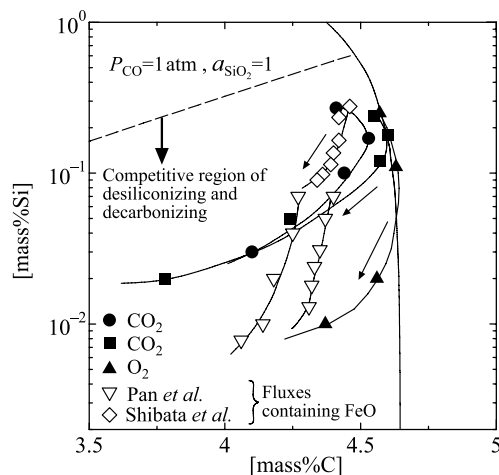


Fig.4 The oxidation behavior of silicon and carbon in Fe-C-Si alloy in the competitive region of desiliconizing and decarbonizing

0.2 mass % までは Si が優先的に酸化され、その後急激に脱 C が進むことがわかる。

(6) 溶鉄の Ca 脱硫・脱酸平衡²⁶⁾〔製鋼〕

Ca による溶鉄の脱 O・脱 S 同時平衡 ($\text{CaO (s)} + \text{S} = \text{CaS (s)} + \text{O}$) を調査した。Fe-Ca-O-S 系、1873K、 $a_{\text{CaO}} = a_{\text{CaS}} = 1$ における平衡 O-S 濃度の関係を Fig.5 に示す。溶鉄中 O、S 濃度は、当初 Ca 濃度の増加とともに減少するが、10 ~ 20 mass ppm Ca で O 濃度は最小値、また 20 ~ 50 mass ppm Ca で S 濃度は最小値をとり、その後は増大することがわかる。

(7) 溶融鉄合金中窒素の解離反応速度²⁵⁾〔2次精錬〕

溶鉄表面相における合金元素濃度の評価を行い、溶融鉄合金中への窒素の溶解反応速度を 1973K において同位体交換反応法により測定し、反応機構について考察した。鉄よりも窒素との熱力学親和力が強い元素は、速度を増大させ、その程度は溶鉄表面相における合金元素濃度により整理される。

(8) 鉄スクラップ中トランプ元素の蒸発除去^{27, 28)} 〔鉄スクラップ処理〕

1923 K、チャンパー圧 133Pa において、溶鉄中 Cu、Sn の蒸発除去速度に及ぼす合金元素 (Al, B, C, Si) の影響について調べた。その効果は、脱 Cu 速度: $\text{B} > \text{C} > \text{Si}$ 、脱 Sn 速度: $\text{Si} > \text{C} > \text{B} > \text{Al}$ であった。また、Fe-Si-C、Fe-Al-C、Fe-B-C 各 3 元系における溶鉄中 Cu、Sn の蒸発速度を促進する組成域を明らかにした。

(9) Fe-Cu 系混合スクラップからの Fe, Cu の分離・回収²⁹⁻³¹⁾ 〔廃棄物の再資源化〕

1523K、Fe-Cu-B 系および Fe-Cu-B-ca.3 mass % C 系における Fe-rich 相中 Cu 濃度および Cu-rich 相中 Fe 濃度に及ぼす Fe-rich 相中 B 濃度の影響を調べた。同一の B 濃度で

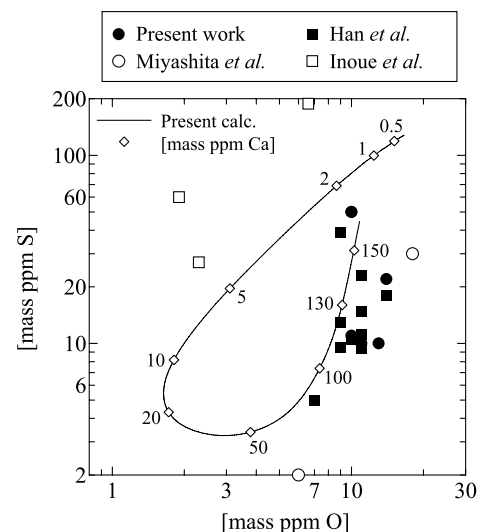


Fig.5 Deoxidation and desulfurization equilibria of molten iron by calcium under $a_{\text{CaO}} = a_{\text{CaS}} = 1$ at 1873K²⁶⁾

比較すると、C添加によりCu-rich相中Fe濃度は2～3 mass %低くなった。一方、Fe-rich相中Cu濃度も、わずかに小さくなり、炭素はFe-Cu-B 3元系におけるFe-rich相とCu-rich相の2液相分離域を広げるのに効果的な元素であることがわかった。本研究で得られたFe-Cu-B (-3 mass % C) 系の1523Kにおける2液相分離域を表した等温断面図をFig.6に示す。

(10) 石炭乾留ガスによる酸化鉄の予備還元¹⁴⁻¹⁷⁾

〔溶融還元プロセスの予備還元〕

石炭の揮発分を酸化鉄の予備還元にも有効利用するプロセスを想定し、溶融還元プロセスにおける石炭使用量とCO₂排出量を同時に低減することを目指した酸化鉄の予備還元に関する基礎的研究に取り組んできた¹⁴⁻¹⁷⁾。とりわけ、石炭中の水素を効率的に利用した乾留ガスによる酸化鉄の還元に着目し、石炭中化合水分の影響や、タールの2次加熱によって生じたガスの有効利用について検討している。得られた知見の一例として、到達還元率Fおよび水素による到達還元率F_Hに及ぼす化合水分の影響をFig.7に示す³⁷⁾。化合水分が還元炉へ導入されると還元率が低くなることがわかる。また、炭化水素中を含めた水素Hによる還元(Hによる酸化鉄中の被還元酸素Oの除去) F_Hの到達還元率Fに占める割合は約

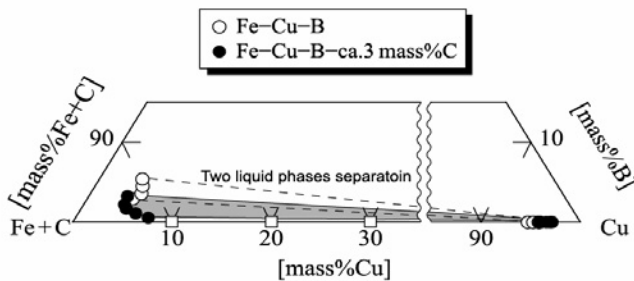


Fig.6 Region of two liquid phases for Fe-Cu-B-C system at 1523K³¹⁾

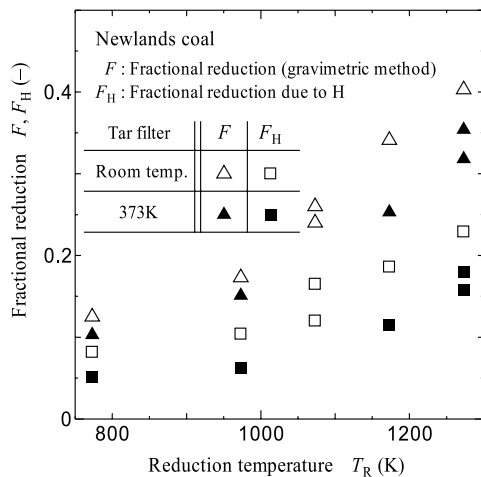


Fig.7 Variations of final fractional reductions F and F_H with reduction temperature T_R in Newlands coal³⁷⁾

50 %である。これらの結果から、石炭乾留ガスを用いた予備還元炉と乾留後の石炭チャーを用いた鉄浴式溶融還元炉からなるトータルプロセスにおいて、CO₂排出量の削減が期待できる¹⁵⁾。

(11) 新規炭材内装塊成鉱の開発³⁸⁾

〔石炭乾留から着想した(10)の関連発展研究〕

現行高炉の還元材比低減のため、新たな炭材内装塊成鉱を開発することを目指し、低温においてカーボンと酸化鉄の固体-固体間反応を促進させる物質を炭材内装塊成鉱中に含有させた試料の作製に取り組んでいる。とりわけ、昇温乾留の最高温度T_{C,max}を中低温に留めることによって石炭中の揮発分を一部残留させた炭材を内装し、昇温還元過程(高炉シャフト部を想定)で、中低温からの酸化鉄の還元開始のイニシエーターとするとともに、それに伴う炭材のガス化へと導くことに着目し、その還元促進効果を検討している。

得られた知見から、石炭をT_{C,max} = 823Kで昇温乾留した場合、石炭チャーに揮発分、とりわけ水素成分が、多量に残存することがわかった。次に、T_{C,max} = 823, 873, 973, 1073, 1273Kにおける中低温乾留チャーを含有する炭材内装酸化鉄ペレットを室温から還元最高温度T_{R,max} = 1273Kまで3K/minで昇温還元実験を行い、還元後に得られた試料のX線回折パターンをFig.8に示す³⁸⁾。すべての試料においてFeのピークが存在し、T_{C,max}が低いほどそのピーク強度は強くなった。また、還元前に存在したFe₂O₃のピークは存在しなかった。これらの結果から、T_{C,max}が低いほど、すなわち揮発分を多く含む試料ほど、その還元促進効果が大きいことがわかったが、本塊成物の強度については試験中である。

(12) 木質系バイオマスを用いた酸化鉄の還元³⁹⁾

〔(11)の展開研究〕

バイオマスはカーボンニュートラルであるため、エネルギー

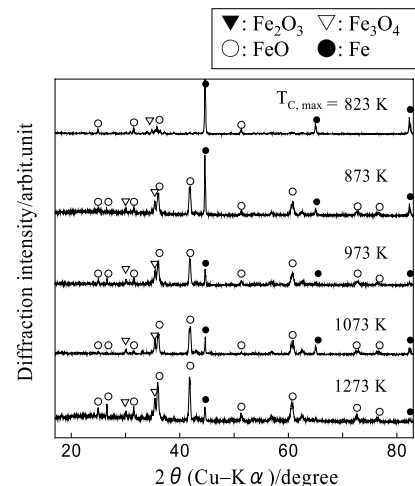


Fig.8 XRD patterns of the carbon composite pellets after reduction from room temperature to T_{R,max} = 1273K at 3K/min³⁸⁾

ー変換の際、大気中の CO_2 濃度を増加させないという利点がある。そこで、製鉄プロセスにおける CO_2 排出量の削減を目指し、バイオマス乾留ガスおよび木炭内装ペレットによる酸化鉄の還元について検討している³⁹⁾。これまでに得られた知見から、木質系バイオマス（檜、杉、松）を1273K程度で乾留した際、比較的低温から還元性ガス（ CO 、 CH_4 ）が発生することがわかった。また、バイオマスには石炭に含まれるような硫黄などの不純物が存在せず、有害なガスがほとんど発生しないため、環境的な側面からも利用価値が高い。一方、ある乾留処理で得た木炭を炭材内装ペレットの炭材として酸化鉄の還元を利用したところ、同じ条件で得たチャーを用いた炭材内装ペレットよりも還元速度が速いということがわかった（Fig.9参照）。このことから、木炭の方が石炭チャーよりも反応性が高いことが示唆された。

(13) 高温水素含有混合ガスからの水素分離材料の開発⁴⁰⁾

〔排ガス等の再資源化〕

製鉄所をはじめとする各種産業から排出されるガス中には、多量の水素が残存している。例えば、製鉄所のコークス炉から排出される高温混合ガスの55%は水素であり、主に熱源として有効利用されているが、選択的に水素のみを分離した場合、我が国では年間約40～50億 m^3 の水素を供給することが可能である。さらに、こういった水素含有混合ガス中から水素を分離・精製することにより、水素を製造する上で大幅なエネルギー削減となり、供給コストおよび環境負荷の低減にも貢献することが期待される。

高温水素含有混合ガスからの水素分離法として、高温還元雰囲気下で使用可能なプロトン導電性固体電解質を用いた電気化学的手法に注目し、SPS (Spark Plasma Sintering) 法を用いたプロトン導電性固体電解質であるペロブスカイト型酸化物の作製を検討している。これまでに得られた知見から、

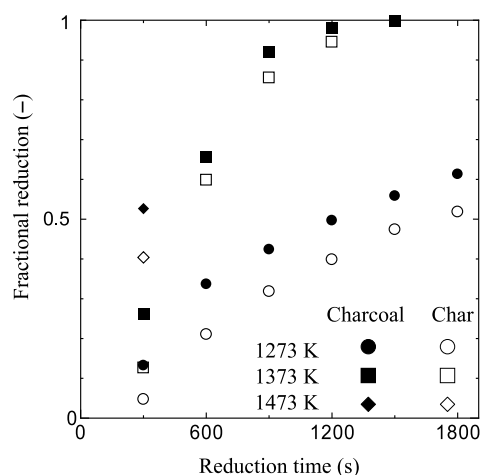


Fig.9 Relation between fractional reduction and reduction time of charcoal (Hinoki cypress) composite pellet and char (Newcastle blend coal) composite pellet at 1273, 1373 and 1473K

作製した $\text{SrZr}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\alpha}$ は高温水素および炭酸ガス雰囲気（1273K）で化学的に安定であることがわかった。また、SPS法（1773K, 4 min）で作製した $\text{SrZr}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\alpha}$ は、通常の固相焼結（1853K, 10h）の試料よりも緻密であり、湿潤および乾燥水素雰囲気において高い導電性を示すことがわかった⁴⁰⁾（Fig.10参照）。

(14) 燃焼過程におけるダイオキシン類の生成と抑制¹⁸⁻²¹⁾

〔鉄鉱石焼結プロセス、廃トランス再資源化、ゴミ処理等〕

a) 高温燃焼過程におけるダイオキシン類生成¹⁹⁾

973K以上ではダイオキシン類が分解され生成されないとされてきたが、筆者らの実験結果および熱力学的計算結果から、1073K以上の燃焼条件においても排ガス中に浮遊カーボン系物質（ C^* ）が存在する場合、ダイオキシン類が生成されることが明らかになった。また、1073Kの高温燃焼下でもダイオキシン類が生成するモデルを次のように提唱した（Fig.11参照）。『バルクフローが O_2 過多状態すなわち排ガス中の O_2 濃度が高い場合でも、高温燃焼過程で生成する微細な浮遊 C^* のごく表面では CO/CO_2 比の高い非平衡な場が存在し、主として浮遊 C^* 表面の濃度境界層内においてダイオキシン類が生成している。』

b) ダイオキシン類生成濃度に及ぼす塩素源および塩素形態の影響¹⁸⁾

Fig.12に示したように、有機物（ポリエチレン：PE）と熱力学的に安定な塩素源 NaCl との混合粉末燃焼では、ダイオキシン類生成濃度は低い。しかしながら、熱力学的に安定な NaCl でも小麦粉との水和物にすると、ダイオキシン類生成濃度は急激に増加する。また有機塩素化合物（PVC）の場合、やはり高いダイオキシン類濃度であるが、小麦粉と NaCl の水和物の場合よりは1桁低い値である。

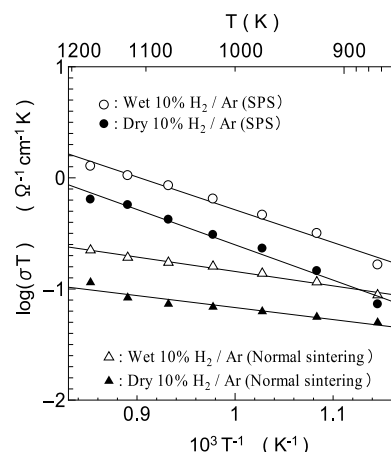


Fig.10 Conductivity σ of $\text{SrZr}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\alpha}$ obtained by normal sintering at 1853K for 10h and SPS at 1773K for 4min⁴⁰⁾

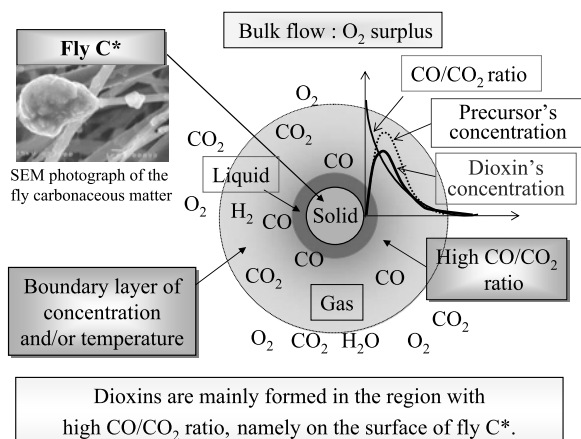


Fig.11 Mechanism of Dioxins formation at high temperatures in combustion processes

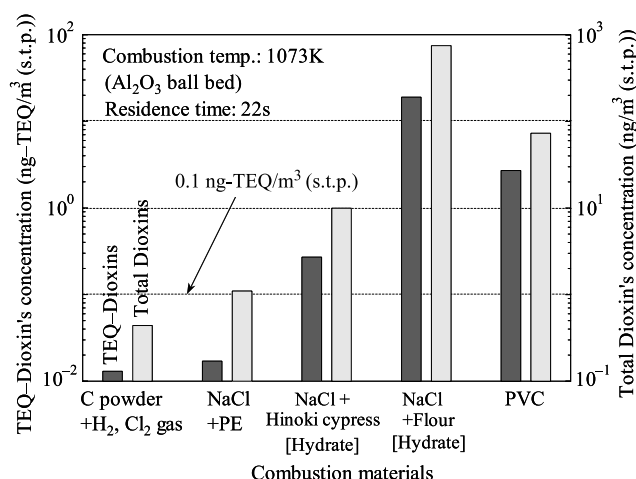


Fig.12 Effect of chlorine sources and forms on Dioxin's concentration at 1073K under constant Cl mole rate supplied

NaClを含む日常の食材調理物も都市ゴミ燃焼過程におけるダイオキシン類の生成源になっている。ダイオキシン類の生成濃度は、燃焼物の塩素濃度、塩素源あるいは安定な塩素源であってもその塩素の存在形態（活性な状態のClが存在するか否か）によって大きく変化する。

c) 燃焼排ガス水中インジェクションによるダイオキシン類簡易除去²¹⁻²³⁾

燃焼排ガスからダイオキシン類生成源である浮遊C*を取り除けばダイオキシン類濃度が減少すると考えられる。インジェクション冶金の原理を応用して、燃焼排ガスを水中に吹き込むことにより、気液界面に介在物が凝集する物理的性質を利用して、排ガス中に存在する浮遊C*を水中に移行する簡易ダイオキシン類除去法を開発した^{21, 22)}。燃焼排ガスを水中に吹き込むと、排ガス中のダイオキシン類濃度は吹き込む前の値の1/20程度まで簡単に低くすることが可能である。また、水中に混入しているダイオキシン類もポリオレフ

インに吸着させ除去する簡易浄化法も開発した²³⁾。

3 おわりに

略歴等に記しましたように、入学以来、一貫して大阪大学の材料系教室でお世話になり、同一研究室[講座(領域)名：冶金設備工学→反応制御工学→反応プロセス工学]にて40年近くを経ました。学位論文は「円管内脈動流れとそれによる酸化鉄ペレット還元反応促進効果に関する基礎的研究」であり、流体工学の実験と解析だけでなく、還元反応の解析にも着手しました。奉職してからは、鉄鋼反応プロセス工学と関連する資源・環境分野の研究に従事してきました。その間、ご指導を受けた近江宗一名誉教授、森田善一郎名誉教授、お世話になった多くの教職員、研究の遂行に当たり、共同研究をしていただいた先生方、当時の学生・院生、ならびに、学協会、学振等を通じて、ご助言をいただいた各位に、厚く感謝いたします。また、本研究の遂行、協力を得た、当研究室 中里英樹助教授、小西宏和助手、川端弘俊技術専門職員に、心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟ホームページ, http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kakudai/zu14_1.html (2005)
- 2) T. Kawaguchi and T. Usui: ISIJ Int., 45 (2005) 4, 414.
- 3) 澤田靖士：ふえらむ, 10 (2005) 5, 383.
- 4) 影近 博：ふえらむ, 11 (2006) 5, 267.
- 5) 碓井建夫, 内藤誠章, 村山武昭, 森田善一郎：鉄と鋼, 80 (1994) 6, 431.
- 6) T. Usui, M. Ohmi, S. Kaneda, M. Ohmasa and Z. Morita: ISIJ Int., 31 (1991) 5, 425.
- 7) 碓井建夫, 川端弘俊, 藤森敏夫, 福田 功, 森田善一郎：鉄と鋼, 78 (1992) 7, 982.
- 8) 村山武昭, 碓井建夫, 内藤誠章, 小野陽一：鉄と鋼, 80 (1994) 7, 493.
- 9) 内藤誠章, 村山武昭, 碓井建夫：鉄と鋼, 80 (1994) 8, 581.
- 10) T. Usui, K. Masamori, H. Kawabata and Z. Morita: ISIJ Int., 33 (1993) 6, 687.
- 11) 碓井建夫, 川端弘俊, 十河利樹, 森井祥恵, 一田守政, 森田善一郎：鉄と鋼, 82 (1996) 11, 899.
- 12) H. Kawabata, Z. Liu, F. Fujita and T. Usui: ISIJ Int., 45 (2005) 10, 1466.
- 13) H. Kawabata, K. Shinmyou, T. Harada and T. Usui: ISIJ Int., 45 (2005) 10, 1474.

- 14) T. Usui, T. Yokoyama, T. Nakahashi and Z. Morita : Ironmaking Conference P roceedings (March 28-31, 1993, Dallas, U.S.A.) , The Iron and Steel Society of AIME, 52 (1993), 389.
- 15) T. Usui, T. Yokoyama, T. Ohyama, T. Nakahashi, M. Nonaka and Z. Morita : Metallurgical P rocesses for the Early Twenty-First Century, P roceedings of The Second International Symposium on Metallurgical P rocesses for the Year 2000 and Beyond and the 1994 TMS Extraction and P rocess Matallurgy Meeting, ed. by H. Y. Sohn, Vol. I (Basic P rinciples) , (September 20-23, 1994, San Diego, U.S.A.), TMS, (1994), 693.
- 16) N. Inoue and T. Usui : P roceedings of 2nd International Meeting on Ironmaking, 1st International Symposium on Iron Ore and 5th Japan-Brazil Symposium on Dust P rocessing-Energy-Environment in Metallurgical Industries, (September 12-15, 2004, Vitoria, Brazil), ABM, 1 (2004), 643.
- 17) T. Usui, N. Inoue, T. Watanabe, T. Yokoyama, T. Oyama and Z. Motita : Ironmaking and Steelmaking, 31 (2004) 6, 479.
- 18) 川端弘俊, 碓井建夫, 丸川雄浄, 原 茂太, 中里英樹, 田中敏宏 : 廃棄物学会論文誌, 13 (2002) 4, 184.
- 19) H. Kawabata, T. Usui, K. Marukawa, S. Hara, T. Tanaka and H. Ono-Nakazato : ISIJ Int., 43 (2003) 3, 461.
- 20) H. Kawabata, T. Usui, H. Ono-Nakazato, M. Tanabe, K. Marukawa, S. Hara and T. Tanaka : RESOURCES PROCESSING, 51 (2004) 1, 56.
- 21) 川端弘俊, 藪中歩荷, 田邊昌幸, 中里英樹, 碓井建夫 : 廃棄物学会研究発表会講演論文集, 14 (2003) C1-11, 629.
- 22) 碓井建夫, 原 茂太, 丸川雄浄, 川端弘俊, 谷 博喜, 齋藤祐亮, 出口博文 : ダイオキシン類の分離除去装置, 日本国特許 第3802308号, (平成18年5月12日)
- 23) 碓井建夫, 原 茂太, 川端弘俊 : 水中のダイオキシン類吸着除去方法, 日本国特許 第3658624号, (平成17年3月25日)
- 24) K. Taguchi, H. Ono-Nakazato, T. Usui and K. Marukawa : Metallurgical and Materials Transactions B, 34B (2003) 6, 861.
- 25) H. Ono-Nakazato, T. Koyama and T. Usui : ISIJ Int., 43 (2003) 3, 298.
- 26) K. Taguchi, H. Ono-Nakazato, D. Nakai, T. Usui and K. Marukawa : ISIJ Int., 43 (2003) 11, 1705.
- 27) H. Ono-Nakazato, K. Taguchi, Y. Seike and T. Usui : ISIJ Int., 43 (2003) 11, 1691.
- 28) K. Taguchi, H. Ono-Nakazato and T. Usui : RESOURCES PROCESSING, 51 (2004) 3, 158.
- 29) K. Taguchi, H. Ono-Nakazato and T. Usui : ISIJ Int., 46 (2006) 1, 29.
- 30) H. Ono-Nakazato, K. Taguchi, D. Kawauchi and T. Usui : MATERIALS TRANSACTIONS, 47 (2006) 3, 864.
- 31) K. Taguchi, H. Ono-Nakazato and T. Usui : ISIJ Int., 46 (2006) 5, 633.
- 32) 中里英樹, 米澤俊也, 碓井建夫 : 鉄と鋼, 89 (2003) 5, 559.
- 33) H. Ono-Nakazato, K. Okada and T. Usui : ISIJ Int., 45 (2005) 4, 569.
- 34) Ahmad Zulkhairi, 川端弘俊, 中里英樹, 碓井建夫 : 材料とプロセス, 15 (2002) 4, 730.
- 35) 中本将嗣, 中里英樹, 川端弘俊, 碓井建夫 : 鉄と鋼, 90 (2004) 1, 1.
- 36) M. Nakamoto, H. Ono-Nakazato, H. Kawabata, T. Usui and T. Tanaka : ISIJ Int., 44 (2004) 12, 2100.
- 37) 碓井建夫, 井上智喜 : 材料とプロセス, 17 (2004) 1, 145.
- 38) 小西宏和, 碓井建夫, 山下敦史, 東 和宏 : 材料とプロセス, 19 (2006) 1, 73, 鉄と鋼, 92 (2006) 12, (掲載決定)
- 39) 原田武士, 小西宏和, 碓井建夫 : 材料とプロセス, 19 (2006) 1, 244.
- 40) 西村 広, 小西宏和, 碓井建夫, 片山 巖 : 材料とプロセス, 19 (2006) 1, 247.
- 41) 第4回世界製鉄会議ホームページ, <http://www.isij.or.jp/ICSTI2006/>

(2006年6月2日受付)