

解説

研究会成果報告－26

持続可能な製鉄プロセスを目指す

—スマート製鉄システム研究会の研究活動報告—

Establishment of Sustainable Ironmaking Processes

- Research Report of the Research Committee for SMART Ironmaking System -

加藤之貴
Yukitaka Kato

スマート製鉄システム研究会 主査
東京工業大学
科学技術創成研究院
先端原子力研究所 教授

1 はじめに

日本鉄鋼協会I型研究会スマート製鉄システム研究会（スマート研）（2015-2017、環境・エネルギー・社会工学部会および高温プロセス部会）は鉄鋼プロセスの炭素循環による低炭素化を目標に研究活動を行った。

CO₂環境排出の抑制は環境面と経済面で重要である。すなわち地球温暖化の防止、化石燃料資源への依存からの脱却による経済安定化に有用である。一方で炭素は古来より現在まで人類の貴重なエネルギー源であり、環境親和性が高く、第二次産業において重要なエネルギー源である。そこで炭素を産業利用し、かつCO₂の環境排出を抑制する手段として炭素循環（カーボンリサイクル）がここ数年各界で急速に検討されている¹⁾。

鉄鋼業は低炭素化に関して先導的な取り組みを進め、日本鉄鋼協会でも多くの研究会において時代に応じた検討が進められてきた。とくにCO₂を資源として活用する炭素循環製鉄のシステム検討についてはI型研究会「炭素循環製鉄研究会」（2011-2013）（環境・エネルギー・社会工学部会）が設置され、活動の進展に伴いスマート研にて研究が進められた。これらの成果はISIJ International誌における2回の特集号（Vol. 59（4）、2019；Vol. 55（2）、2015）で公開され、成果報告書2件が同協会に提出されている。ISIJは他組織に先駆け炭素循環の検討を開始しており、この分野を先導しているといえる。本稿ではスマート研の背景と、活動概要、研究成果を示す。

2 炭素循環の認識の広がり

2.1 世界の動き

二酸化炭素排出（CO₂）削減に対して世界的な関心が加速している。国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は

CO₂排出を地球温暖化の要因と捉えその削減を勧告し、これに国連気候変動枠組条約締約国会議（通称COP）においてパリ協定が2016年に発効し、日本はじめ各国が参画賛している。さらに国連がSDGs（Sustainable Development Goals）を提唱し、日本も外務省を中心に達成に向けての活動を推進している。日本は2019年でSDG達成度（SDG Index）が世界第15位とされ、全エネルギー消費のうち再生可能エネルギーが占める割合が低く、エネルギー関連のCO₂排出量削減が一層必要であると指摘されている¹⁾。一方、事業で使用する電力の再生可能エネルギー100%化に関する協働イニシアチブ、RE100^{2,3)}がThe Climate Group（英国など）⁴⁾とCDP（旧称Carbon Disclosure Project、英国）⁵⁾によって提唱され、世界的な企業200社以上（2019現在、売上合計4兆5000億ドル）が参画している。RE100などが中心となってESG投資（財務情報に加え、E（環境）、S（社会）、G（企業統治）要因を加味して投資判断する）が発展している。ESG基準に基づくDivestment（投資撤退）が顕在化しつつある。企業の低炭素化への取り組みが投資判断の重要な要件になりつつある。化石燃料を原料に用いる産業は何らかの説明責任を果たす必要が顕在化しており、鉄鋼業も対象になる可能性がある。このため鉄鋼業の低炭素化への備えが重要になると予想される。

2.2 国内の動き

国内においても炭素を利用しCO₂を排出するプロセスを有する産業は低炭素化に向けた社会の動きを注視する必要がある。日本においてCO₂の排出源の主は発電部門、産業部門であり、前者ではLNG火力、石炭火力発電、後者では鉄鋼業、化学工業の割合が大きい。2019年に経済産業省が中心となり、内閣府、文部科学省、環境省が協力してカーボンリサイクル技術ロードマップを提示し⁶⁾、産業の低炭素化のための

技術指針を示している。

カーボンリサイクルの技術オプションを Fig. 1 に示す。当初、大気中の CO_2 が太陽エネルギーにて数億年かけて炭素 (C) として固定された低炭素環境があった。この C を 18 世紀以後、数百年の短時間で消費し CO_2 が大気環境に戻り、近年地球温暖化の重要原因と認識されるに至り、C が自由に使える時代が過ぎ、 CO_2 の排出抑制を考える時代になった。 CO_2 の大気環境への排出抑制のため CCS (CO_2 capture and storage) が検討されている⁷⁾。火力発電所 1 GWe 出力の年間 CO_2 発生量は 600 万 ton y^{-1} 、液化 CO_2 基準で $12 \text{ km}^3 \text{ y}^{-1}$ と膨大であり、かつ時間的に隔離することが主目的である。また CCS の操作には CO_2 源である化石燃料の有するエネルギーの数割を消費する。続いて CCU (CO_2 capture and Utilization) が提案されている。 CO_2 の化成品への資源化が検討されており技術的には可能であるが、時間が経過し廃棄された際に CO_2 生成を伴う。また、CCU にもエネルギー、時として炭素燃料が必要である。さらに例えば日本の化石エネルギー消費のうち化成品原料としての利用は 1 割であり、例えば化石燃料発電の CO_2 の全量を化成品に転化する技術が成立したとしても、化成品が余剰になるため、CCU の導入にも限界がある。そこで CO_2 を炭素資源に変換し、炭素源として循環利用することが新たな、そして究極の CO_2 利用技術と考えられる。エクセルギー率の観点からは電力基準の CO_2 資源化は CO または C に変換し再利用することが最も変換効率が高く、技術的、社会実装性も高い。この循環にはカーボンフリーの一次エネルギーが必要であり、再生可能エネルギー、原子力が選択肢になる。今後、炭素循環、CCS、CCU とをエネルギーシステムとして比較して優劣をより精度良く検証する必要がある。なお、炭素循環は CCS、CCU に向ける CO_2 の一部を資源化でき、CCS、CCU の負荷を軽減することに貢献するので CCS、CCU と連携することも一手段と考えられる。

3 スマート製鉄システム研究会

炭素循環システムでは CO_2 を非化石一次エネルギーにて還元し、生成した一酸化炭素 (CO) などの炭素資源が循環再利用される。このシステムにおいて合理的な CO_2 利用システムの構築と、 CO_2 の資源化技術の確立により CO_2 の究極利用が可能になる。スマート研では CO_2 究極利用としての炭素循環システムの意義、 CO_2 電気分解セルによる CO_2 資源化技術とその製鉄プロセスへの適用事例を示し、炭素循環の可能性を述べた。

3.1 研究会の目的

本研究会は製鉄の低炭素化と、増大が予測されるスクラップの導入に対応できるスマート製鉄プロセスとして「物

質リサイクル型の持続可能な製鉄システム」(Sustainable Iron and Steel Making System based on Material Recycling Technologies, SMART[®]) (Fig. 2) の構築を目指した。低炭素化製鉄の実現のためにこれまで検討が進められてきた炭素循環製鉄技術の高度化を進めた。非化石エネルギーを用いた CO_2 電気分解技術を発展させることとした。とくに製鉄プロセスから発生する大量の CO_2 の電気分解へ対応するために電解セルの大面積化、集積化を検討した。 CO_2 電解セルの大表面積化を固体酸化物系高温電気分解、固体高分子系常温電気分解で検討した。SMART 向けの製鉄炉として充填層型部分熔融還元プロセス (Packed bed type Partial Smelting Reduction process, PSR) を基本モデルとして物質リサイクルに対応した炉設計、炉解析を進めた。物質リサイクルによる炉内現象を実験、数値計算から解明し SMART の価値を検討した。スクラップ導入で変化する製鋼プロセスを考慮し炉内浸炭、製鋼プロセスにおけるトランプ成分除去、高純度製鋼の検討を行った。原料柔軟性、極低流入炭素、操業柔軟性を基準に SMART 炉の検討を行った。得られた成果をもとに SMART の低炭素化・物質循環性・CCS 代替性を評価し、COURSE50、ULCOS 等に続く次世代プロセスとしての可能性を検討した。

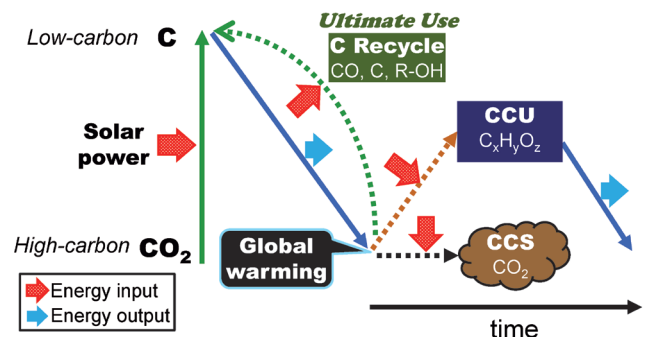


Fig. 1 Passes of CO_2 in low-carbon society.

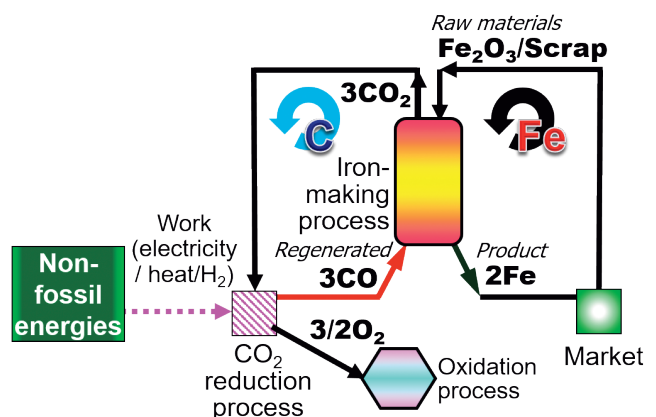


Fig. 2 Structure of SMART, Sustainable Iron and Steel Making System based on Material Recycling Technologies[®].

3.2 研究項目と研究成果

スマート研の研究項目をTable 1に示す。各研究に関する研究目標と研究成果の概要は以下である。番号と研究グループの対応は次の通りである。

(1) 中垣隆雄(早大)⁹⁾、(2) 埜上洋・丸岡伸洋(東北大)¹⁰⁾、(3) 山本高郁(京大)⁹⁾、(4) 加藤之貴(東工大)¹¹⁾、(5) 石原達己(九州大)^{12,13)}、(6) 山中一郎(東工大)¹⁴⁾、(7) 松浦宏行(東京大)、(8) 柏谷悦章(京都大)¹⁵⁾、(9) 大野光一郎(九州大)¹⁶⁻¹⁸⁾、(10) 小野英樹(大阪大)¹⁹⁾。

3.2.1 研究項目

- (1) PSR炉を用いたSMARTシステム全体の熱物質収支を明らかにすること。スクラップ冷鉄源を含む鉍石還元の一酸化炭素、水素、合成メタンなど様々な再生可能エネルギー由来の還元剤・熱源を確保するとともに、二次羽口からの酸素吹きを含む酸素富化で効率と柔軟性を高めたスケールアップ炉も考慮する。
- (2) 炭素および物質循環に適した製鉄炉の設計に資するため、小型の多機能溶解炉であるPSR炉の熱流体工学的手法に基づくプロセスシミュレータを開発し、炭素循環条件および様々な原料条件における炉内状況および操業状態の定量的推定および評価を行う。また製鉄に必要なエネルギー・炭素量について熱的・熱力学的に検討する。
- (3) SMART製鉄実現の第1段階として、充填層型溶解技術及び充填層型溶解技術をベースとした小規模で実現可能な『鉄鋼スラグからのリン濃縮プロセス』をSMART炉への応用可能性を検討する。
- (4) 製鉄向けの電気分解セルの大面積化を実現するため、セラミックセルに替わる金属基盤固体電気分解セル(MS-SOEC)を製作しCO₂電位分解を実証する。
- (5) 高温でのCO₂電解では、吸熱での電解であり、COとして熱エネルギーを回収できる魅力的な電解技術である。CO₂電解では炭素を析出しやすく、失活しやすい。そこ

で、本研究では800℃程度で、優れた電解特性を有し、炭素を生じにくい電極触媒の開発と長期安定性の評価を目的とした。

- (6) CO₂排出量の削減を目的に、自然エネルギー由来の電力あるいは余剰電力を用いてCO₂の電解還元を行い、鉄鉍石の還元の有効なCOおよびCH₄が合成可能な新電極触媒の開発を行う。
- (7) 製鉄プロセスで発生する様々な副産物に付随するサーマルエネルギーは必ずしも有効利用されていない。製鉄プロセスのエネルギー効率向上のため、製鋼スラグサーマルエネルギーと還元プロセスから発生するCO₂ガスを活用した化学的回収プロセスの構築を検討する。
- (8) 鉄鉍石とコークスを近接配置すると還元反応とガス化反応が相互に促進される、いわゆるカップリング反応が顕著になることが、過去の研究で明らかにされた。本研究の当初目標は、還元とガス化の同時反応に対して水素共存の影響を解析し、水性ガスシフト反応の挙動を明らかにすることである。
- (9) SMART製鉄システムの中核を担うプロセスのひとつである、スクラップ溶解技術Packed bed type scrap melting process (PSMプロセス)の低炭素・高効率化を目的として、スクラップ-炭材間の浸炭溶融反応高速化に最適な炭材の表面性状を明らかにする。
- (10) 鉄スクラップのリサイクル利用において問題となる不純物元素の製精錬に関する諸問題を明示。鉄中不純物元素の除去に関する熱力学的検討。鉄スクラップのリサイクル利用に適した製鉄システムの条件検討。スマート製鉄法における元素の挙動考察

3.3.2 研究成果

成果を総括すると、SOECを利用したスマート製鉄システムのプロセス計算を行いスクラップ比20%、PSRG循環率40%におけるCO₂削減率はトータルで27%程度、循環率を100%近くまで高めれば-30%程度が削減上限と考えられ

Table 1 研究項目

研究項目	研究内容	研究担当者
1. CO ₂ 電気分解	固体酸化物CO ₂ 電気分解	石原・加藤
	固体高分子CO ₂ 電気分解	山中・中垣
2. SMART炉検討	SMART炉解析	埜上・山本・宇治澤・田川・内藤・村田
	SMARTシステム解析	中垣・加藤・石井・伊藤・國富
3. 製錬プロセス	還元・浸炭溶融反応	柏谷・大野
	Tramp成分除去、高純度製鋼	松浦・小野・松井
4. 協会内組織連携	熱経済部会との連携	伊藤

た。多流体理論および反応動力学に基づく製鉄炉のプロセスシミュレータを開発した。金属支持電気分解セルを開発し電気分解作動を実証した。高炉規模製鉄プロセスの排出CO₂の30%を循環・還元するとして、所用面積は0.037 km²、所用電力191 MWeが推算された。一方、ポーラス金属基板上にLaGaO₃系酸化物を電解質として担持したセルを開発し700℃、1.6V印加時に1.65A/cm²のCO₂の電解を実証した。またCO₂電解還元向け電極触媒を開発し常温常圧で高いCO₂還元活性が発現しCOが選択的に生成し、少量であるがCH₄生成を実証した。表面性状の異なる炭材における純鉄炭材間の浸炭溶融挙動の比較検討を実験的に行った。還元反応-ガス化反応の同時反応における水性ガスシフト反応の挙動を定量的に明らかにした。さらにスラグの熱エネルギーおよび含有FeOを活用しCO₂、H₂OガスからCO、H₂転換率90%以上の可能性を示した。また鉄スクラップの利用にむけ鉄中循環性元素の除去の可能性を示した。

各研究目標の成果は次の通りである。なお、代表的な図をISIJ Int'lから引用した。詳細は各報を参照願いたい。

- (1) 計算対象となる製鉄製鋼プロセスをFig. 3⁹⁾に示す。SOECのケースで、スクラップ比20%、PSRG循環率40%におけるCO₂削減率の結果を、いずれも0%とした基準ケースに対する相対値で示すと、スクラップ比に対して-15%、PSRG循環率-12%の削減であり、トータルで27%程度のCO₂削減率ゲインが見込まれる。スクラップを既に排出されたCO₂として除く場合、循環率を100%近くまで高めれば-30%程度が削減上限と考えられる。
- (2) 多流体理論および反応動力学に基づく製鉄炉のプロセ

スシミュレータを開発した。このシミュレータを用いて様々な吹き込み条件におけるPSR炉の特性を推定することが可能となり、炭素循環条件におけるプロセス特性を明らかにした。また炭素・水素併用時の製鉄の所要炭素量について、炭素・一酸化炭素および水素の還元への寄与による所要炭素量を明らかにした。また水性ガスシフト反応の寄与についても明らかにすることが出来た。

- (3) 事前に実施した2トン/日シャフト炉を用いた『鉄鋼スラグからのリン濃縮プロセス』。試験は順調に完了。試験では、目標の鉄中[P]濃度8%を上回る概10%を達成するとともに、有用な鉄中[Mn]濃度は概20%を得ていた。プロセスとしてのリン、マンガ、鉄回収率は、概97~98%程度と考えられる。脱リンスラグは~300t/d高炉1炉程度であり、小規模SMART炉実現可能性ありと判断した。
- (4) 大面積化が可能な金属支持固体酸化物電気分解セル(MS-SOEC)によるCO₂電気分解実証試験を行った。MS-SOECの電力・熱源としては高温ガス炉、再生可能エネルギーが候補であった。900℃における作動実験を行い、目的生成物の一酸化炭素：酸素生成比=2：1を確認し、電気分解作動を実証した(Fig. 4)¹¹⁾。高炉規模製鉄プロセスの排出CO₂の30%を循環・還元するとして、所用面積は0.037 km²、所用電力191 MWeが推算された。
- (5) 高温CO₂電解セルの開発としてLaGaO₃系酸化物を電解質としたセルについて、主に燃料極の検討を行った。NiFe (9：1)を用いる比較的優れた電解特性を示すこと

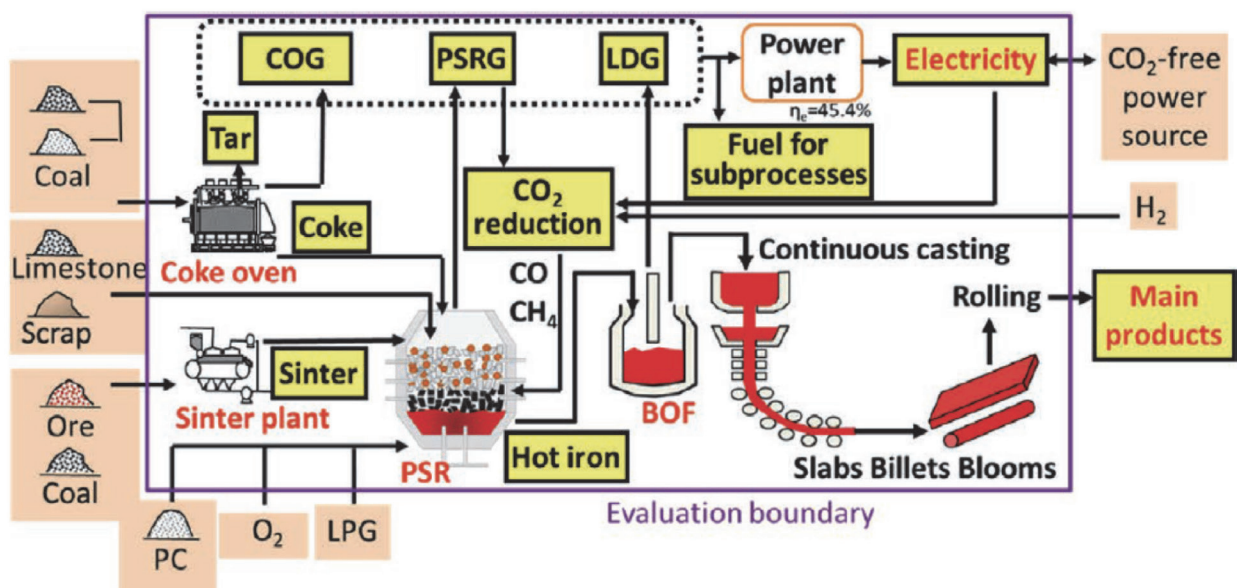


Fig. 3 Components of iron and steel works⁹⁾.

を見出した。しかし、炭素を析出して失活しやすい。一方、多孔質金属基板の作成を検討し、NiO-Fe₂O₃の緻密な成形体を、H₂還元するとナノサイズの機構を有する多孔率30%程度の多孔質金属基板の作成を行うことができた (Fig. 5) ¹²⁾。この上にLaGaO₃系電解質膜を析出させたところ、700℃、1.6V印加時に1.65A/cm²のCO₂の電解を行うことができた。

(6) 固体高分子膜型電解セルを用いたCO₂電解還元活性を示す電極触媒の開発を行った (Fig. 6) ¹⁴⁾。硝酸コバルトに各種窒素二座配位子を配位させた錯塩を炭素担体 (ケッチェンブラック、KB) に担持し触媒前駆体を調製した。この前駆体を不活性ガス気流下、473～973

Kで熱処理して電極触媒を合成した。この電極触媒を用いてカソードを作製し、膜型電解反応器にセットし、CO₂還元活性を調べた。上記取り組みにより様々な電極触媒を検討した結果、Co (dmbpy)₃/KB (dmbpy = 4,4'-dimethyl-2, 2'-bipyridyl) を573～673 Kで熱活性化すると、Co-N-C新規化合物が生成し、常温常圧で高いCO₂還元活性が発現し、COが選択的に生成することを見出した。ごく少量であるがCH₄も生成した。

(7) 始めに熱力学計算ソフトウェアを用いて製鋼スラグ、炭材を所定温度で計算内に組み入れ、種々の条件でCO-CO₂-H₂Oガスと反応・平衡させ、スラグのサーマルエネルギーおよびスラグ中FeOを活用したCO₂、H₂Oガ

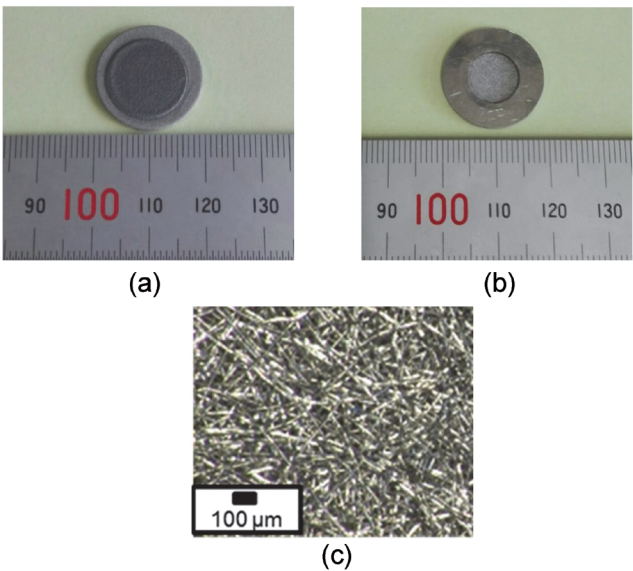


Fig. 4 Photographic images of the developed MS-SOEC : (a) anode side, (b) cathode side, and (c) enlarged view of the cell mesh¹¹⁾.

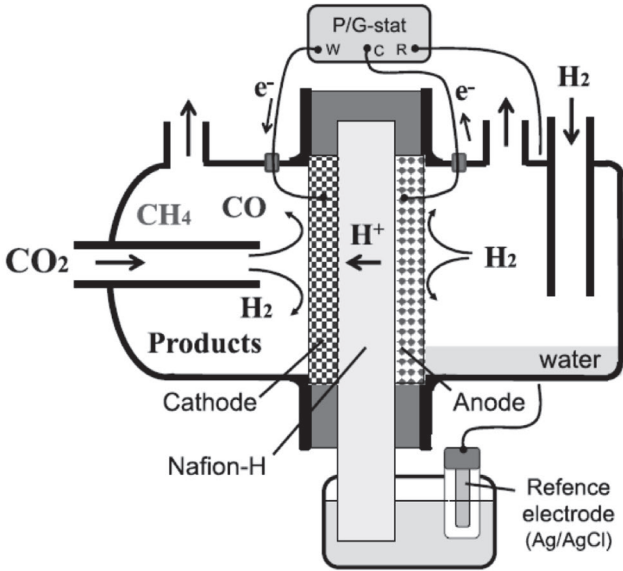


Fig. 6 Schematic diagram of the PEM electrolysis cell for CO₂ reduction ¹⁴⁾.

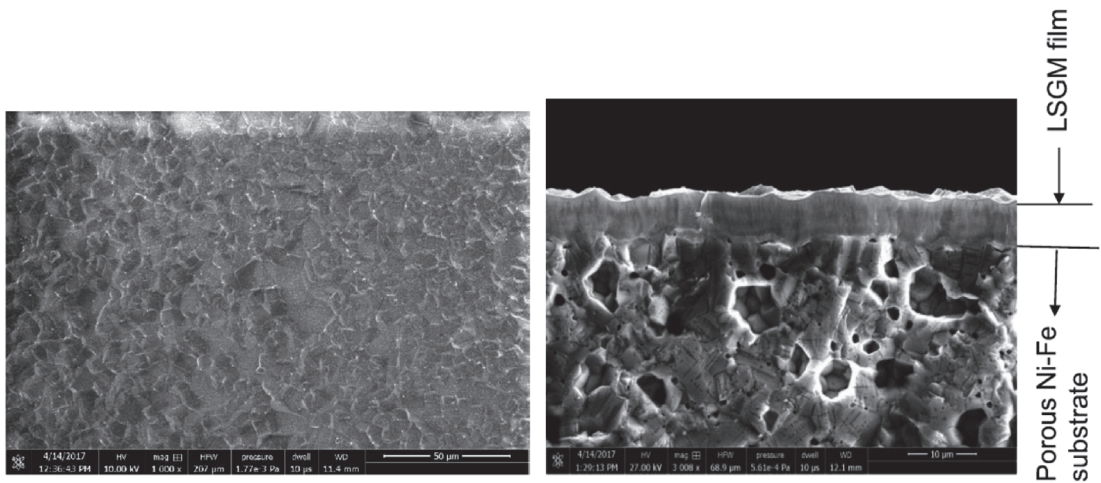


Fig. 5 Surface and cross section of the cell with LSGM layer after reduction at 973 K for 2 h¹²⁾.

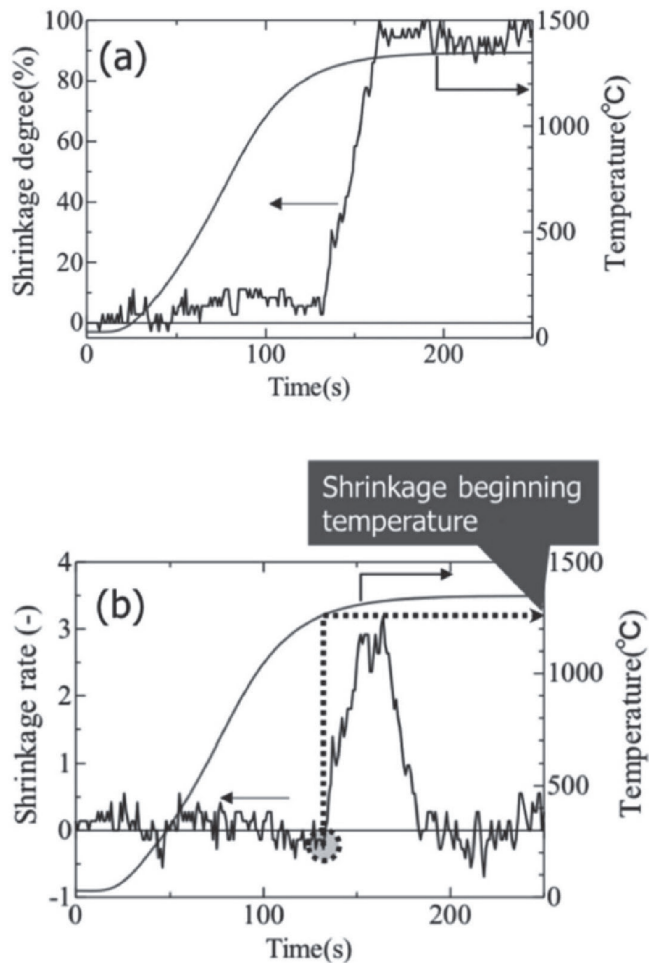


Fig. 7 Shrinkage beginning temperature evaluation method from (a) shrinkage degree variation with time through (b) conversion to shrinkage rate with time¹⁷⁾.

スからのCO、H₂ガスの生成挙動を検討し、90%以上のCO、H₂転換率が達成できることを明らかにした。さらに、実験室規模で熔融スラグ上での種々の炭材とAr-CO₂ガス反応挙動を調査し、炭材やスラグ組成により反応挙動が大幅に異なることが見いだされた。

- (8) 本研究では、まず水性ガスシフト反応の速度を明らかにした。従来の水性ガスシフト反応に関するデータを解析・整理し、新たな速度式を提出した。この水性ガスシフト反応の速度式を基に、ガス化反応と同時に二つの反応が生じた場合の挙動を明らかにした。さらに、還元反応-ガス化反応の同時反応における水性ガスシフト反応の挙動を明らかにした。ガス化反応単独の場合には、水性ガスシフト反応は、ガス化反応を抑制する方向に働くことが分かった。また、還元反応とガス化反応が同時に生じる条件下では、相互作用によってそれぞれが促進されるが、水性ガスシフト反応の速度は、ガス化反応単独の条件下に比較して、約1/3の量になることが分

かった。

- (9) 表面性状の異なる炭材として、黒鉛、木炭、コークスを用いて、荷重条件下における純鉄炭材間の浸炭溶融挙動の比較検討を行った。表面性状の評価では、炭材表面に占める気孔の割合、基質面の凹凸、炭材表面に占める灰分存在割合についての検討を行った。浸炭反応の評価では1400°Cにおける純鉄試料の収縮開始時間について検討を行った (Fig. 7)¹⁷⁾。その結果、平滑面を多く有するグラファイトが本系の反応には有利であり、灰分を多く含有するコークスは、最も不利な炭材であることが明らかとなった。ただし本系では表面粗度の影響よりも、灰分の影響が大きく現れたため十分に検証できたとはいえない。
- (10) ①溶鉄中不純物元素の除去可能性の定量、②鉄スクラップ利用製鉄システムの条件について考察した。低炭素・省資源製鉄のために有効な鉄スクラップの利用拡大について重要な課題である溶鉄中循環性元素の除去について検討し、①蒸発除去、硫化除去についてこれまでに知られている知見を要約した。新たに、②酸化・還元による除去について可能性と除去限界を示し、Caを利用した新たな鉄中循環性元素の除去の可能性を示した。

4 今後の展望

炭素循環の製鉄プロセスの適用によりCCSに依存せず30%削減は可能な技術であった。低炭素化についての世界の状況を上記で述べた。製鉄業の国内での持続可能性につて低炭素化の観点から引き続き検討が必要である。CO₂の再資源化は他分野でも重要な課題であり、開発され得る技術の波及効果は国内外を問わず大きいので発展的継承が望まれる。大量CO₂処理が可能なMS-SOEC高温は重要。鉄鋼技術はSOEC開発に必要な要素技術を保有し新たなプロジェクト化が期待できる。常温電解ではCOばかりでなくCH₄などの炭化水素も生成可能であり、有用。研究会全体の成果と課題を整理し、次期の研究の目標を明確化するための検討が必要である。一方、炭素循環において駆動源となるカーボンフリーの一次エネルギーが必要である。再生可能エネルギー、水素に可能性があるが供給リスク、経済性に課題がある。一方、高温ガス炉は受動安全を有し炉心溶融が極めて起こりにくい、国産原子炉技術として開発が継承されている²⁰⁾。今後、炭素循環システムの社会実装のためには日本の有する一次エネルギー技術を経済性、リスクなどの観点で総合的な検討が必要である。本研究は当面、環境・エネルギー・社会工学部会 鉄鋼CCU研究会、エコメタラジーフォーラム、日本学術振興会製鉄第54委員会などプラットフォームとして検討を行い、II型研究会や大型プロジェクトへと展開することが期待される。

謝辞

本研究成果は日本鉄鋼協会 炭素循環製鉄研究会 (H23-25)、スマート製鉄システム研究会 (H27-29) の研究活動に寄っている。本研究会の活動を支援頂いた皆様に謝意を表する。さらに成果の一部はJSPS科研費16H04644の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Sustainable Development Solutions Network (SDSN) and the Bertelsmann Stiftung, Sustainable Development Report 2019, (2019), <https://sdgindex.org/reports/sustainable-development-report-2019/>
- 2) RE100, <http://there100.org/>
- 3) JCLP, RE100・EP100・EV100 国際企業イニシアチブについて, <https://japan-clp.jp/climate/reoh>
- 4) The Climate Group, <https://www.theclimategroup.org/>
- 5) CDP, <https://www.cdp.net/en>
- 6) 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ, <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002-1.pdf>
- 7) CCS経済産業省産業技術環境局環境政策課地球環境連携室：CCS研究開発・実証関連事業/CO₂貯留適地の調査事業について, (2019), https://www.meti.go.jp/information_2/publicoffer/review2019/kokai/s4r.pdf
- 8) Y.Kato : ISIJ Int., 50 (2010) 1, 181.
- 9) S.Hisashige, T.Nakagaki and T.Yamamoto : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 598.
- 10) H.Nogami : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 607.
- 11) Y.Numata, K.Nakajima, H.Takasu and Y.Kato : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 628.
- 12) T.Ishihara, H.Kusaba, H.H.Kim and B.S.Kang : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 613.
- 13) T.Ishihara and Z.Tan : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 619.
- 14) M.Sato, H.Ogihara and I.Yamanaka : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 623.
- 15) Y.Kashiwaya and K.Ishii : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 643.
- 16) K.Nishihiro, T.Maeda, K.Ohno and K.Kunitomo : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 634.
- 17) K.Ohno, S.Miura, T.Maeda and K.Kunitomo : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 655.
- 18) A.Amini, T.Maeda, K.Ohno and K.Kunitomo : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 672.
- 19) H.Ono and J.Aboshi : ISIJ Int., 59 (2019) 4, 703.
- 20) 國富一彦, 片西昌司, 高田昌二, 滝塚貴和, 中田哲夫, Xing YAN, 武井正信, 小杉山真一, 塩沢周策 : 日本原子力学会和文論文誌, 1 (2002) 4, 352.

(2020年2月10日受付)