

# 再生可能エネルギーの製鉄プロセスへの有効利用技術開発

村上 太一\*

東北大学大学院環境科学研究科

## Effective Utilization of Renewable Energy to Ironmaking Process

Taichi MURAKAMI\*

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

### 1. はじめに

2000年に8.5億トンであった世界の粗鋼生産量は2020年に18.8億トンにまで増加<sup>1</sup>し、今後も増え続けることが予想されている。現在の主要製鉄法である高炉一転炉法では1トンの鋼を製造すると約2トンの二酸化炭素を排出するため、その削減が求められてきた。しかし、高炉は非常にエネルギー効率の高い設備であり、またその排ガスは製鉄所内の他工程のエネルギー源として有効に使われている。高炉の炭素源には石炭を蒸し焼きにして製造されるコークスを用いるが、これはエネルギー源だけでなく炉内のガスの流通を確保する重要な役割を担っているため、必要不可欠である。一方で、部分的な削減技術は数多く検討され、現在でも COURSE50 やフェロコークスなどの開発<sup>2,3</sup>が続けられている。

鉄鋼業からの二酸化炭素排出を大幅に削減するためには、化石燃料以外のエネルギーを使う必要がある、その代表例がグリーンな水素とバイオマスなどの再生可能エネルギーである。水素については現在、政府のグリーンイノベーション基金による水素還元製鉄プロジェクトが開始したところであり、本稿ではバイオマスの利用の可能性に着目する。

バイオマスを製鉄に利用する際の主要な課題として、低エネルギー密度および難収集性がよく挙げられ、前者はチャー化によりエネルギー密度の向上を図り利用している。しかし、チャー化の収率は20%程度と非常に低いことがネックとなる。チャーを用いた製鉄プロセスの研究は多くあり、例えば高炉の主原料である焼結鉱を製造する熱源としての検討<sup>4</sup>があるが、資源量の問題が付

きまとう。より効率的な利用方法を検討するため、未炭化バイオマスの利用についていくつかの基礎的な検討例を紹介する。

### 2. 蓄熱体を用いたロータリーキルンによる鉄鉱石の還元

我々のグループでは、Fig. 1に示す工場の未利用排ガス顕熱を熱交換器内で蓄熱体を用いて回収し、木質バイオマスと共にロータリーキルンに投入するバイオマスの迅速炭化プロセスを提案<sup>5</sup>した。このプロセスでは、木質バイオマスは蓄熱体からの伝熱により急速に加熱され、炭化が進行する。炭化した部分は蓄熱体との衝突により粉碎され、新たに表れた未炭化部分が再度急速加熱され炭化が進行する。ここに鉄鉱石を同時に投入した場合、バイオマスの熱分解によって発生するガスおよび炭化した炭材による鉄鉱石の還元が進行する可能性がある。また、蓄熱球として高炉で製造される溶銑を铸造し、高温のまま利用すれば、排熱の十分得られない製鉄所でも適用できる可能性がある。そこで、実験室サイズの外熱式キルンによる還元試験を実施<sup>6</sup>した。豪州産鉄鉱石50gと10mm角のヒノキブロックを、不活性雰囲気で1000°Cまで昇温したキルン(加熱長155mm, 10rpm)に投入し、所定時間反応させ、冷却した。Fig. 2に還元率及びキルン内残留炭素量の時間変化を示す。還元開始30minで還元率は45%を示し、時間の経過とともに還元率は増加し、残留炭素量が低下している。ヒノキの炭化の際に発生するガスおよび炭化したチャーとの反応により還元反応が進行し、残留炭素量が減少していると考えられる。120min処理により還元率は64%まで到達している。このことは、木質バイオマスの直接利用により金属鉄までの還元が可能であることを示している。また、より高い還元率を得るためには、さらなる条件の最適化

2022年6月3日 第140回学術講演会において発表

\*e-mail: taichi@material.tohoku.ac.jp

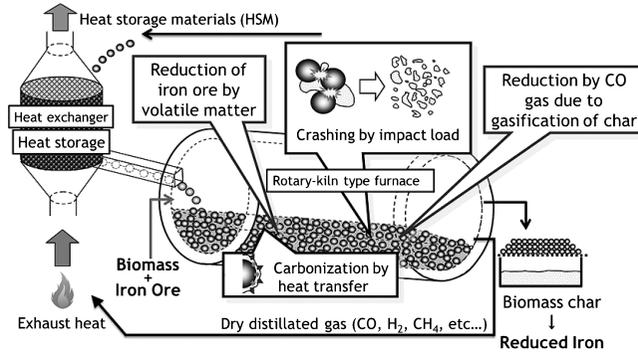


Fig. 1 Concept of waste heat recovery and rapid carbonization process of biomass applying heat storage media and new iron-making process.

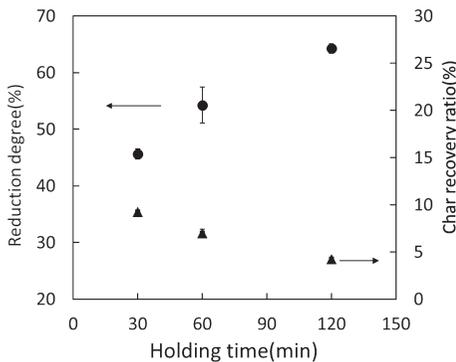


Fig. 2 Effect of holding time on reduction degree and char recovery ratio at 1000°C.

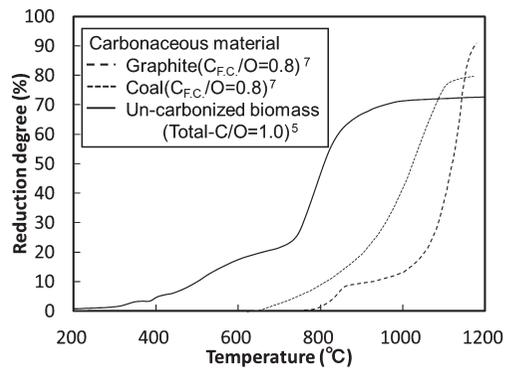


Fig. 3 Change in reduction degree of the composite using un-carbonized biomass, coal, and graphite with the heating rate of 10°C/min.<sup>5,7</sup>

が必要である。ただし、国内での操業を考えると数十万トン規模が木質バイオマス利用量の限界と考えられ、高炉の代替となる規模は難しい。

### 3. 炭材内装鉱による高速溶銹製造に向けた還元・浸炭挙動

年間数万トンから数十万トンの規模の木質バイオマスの利用を考えると、小規模な電気炉製鋼での鉄源としての利用が考えられる。国内の電気炉の鉄源はスクラップであり、鉄鋼材料の品質に悪影響を及ぼすトランプエレメント (Cu や Sn) を厳密に管理しながら製品を製造している。ここに木質バイオマスを還元材として製造する直接還元鉄を使うことができれば、高品質かつ二酸化炭素排出量の非常に少ない鉄鋼材料が製造可能である。一方で、電気炉での精錬には還元鉄の溶解が必須であり、そのためには還元鉄中の炭素濃度は高い方が望ましく、例えば溶けた鉄-炭素合金である溶銹がもっとも効率的である。そこで、木質バイオマスを利用した高速溶銹製

造の可能性を検討した。

バイオマスの利用方法として、粉末状の酸化鉄 (鉄鉱石など) と炭材を混合、成型した原料であり、反応性の高いことが知られている炭材内装鉱<sup>7</sup>に着目した。その還元挙動を他の炭材と比較した。Fig. 3 に黒鉛、石炭および木質バイオマス (ヒノキ) を用いた炭材内装鉱の等速昇温加熱時の還元率変化<sup>6,7</sup>を示す。固定炭素換算で炭素と酸化鉄由来酸素のモル比が 0.8 である黒鉛や石炭を使った場合と比較して、炭素添加量の少ない総炭素量と酸化鉄由来酸素のモル比が 1.0 であるヒノキを用いた方がより低温で還元が進行している。すなわち、ヒノキは少ない炭素で低温での還元を進めることができる炭材であると言える。なお、900°C で還元率の増加が停滞している。これは添加した炭素をすべて還元を利用したためである。そこで、炭素添加量と 1300°C まで加熱した際の還元率の関係<sup>6</sup>を Fig. 4 に示す。また、同時に還元された鉄中の炭素濃度との関係<sup>8</sup>も示す。総炭素量の増加に伴い 1300°C での到達還元率は増加し、2.0 になる

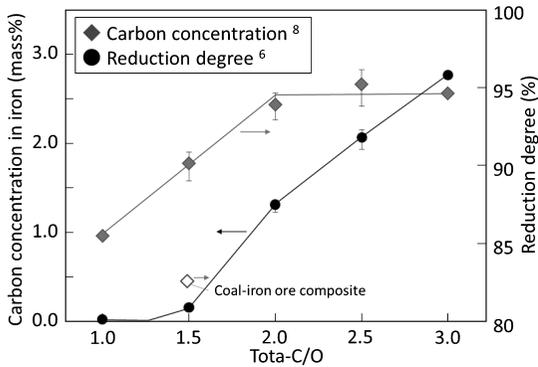


Fig. 4 Effect of total-C/O on the ratio of remained carbon in the composite, carbon concentration in Fe and reduction degree of the composite.<sup>6,8</sup>

と95%に到達する。一方、石炭を用いた場合、同一全炭素量での到達還元率はヒノキよりも低い。また、総炭素量が低い場合は、還元が完了せずに炭素がすべて消費されるため、還元された鉄への浸炭反応は起こらず、炭素濃度は低い。総炭素量が増加すると、還元に使われず残留した炭素による浸炭が進行し、還元鉄中の炭素濃度は増加している。しかし、全炭素量が3.0まで増加すると未反応の炭素が大量に残留しており、さらなる最適化の検討が必要であることを示している。

#### 4. おわりに

鉄鋼業からの二酸化炭素排出削減のためのツールとして、木質バイオマスを直接利用することを検討した。国内の収集可能量から考えると従来の高炉法の代替とすることは困難であるが、部分的に置き換えることや小規模の電気炉製鋼の代替鉄源として考えることは可能である。

#### References

1. [https://www.globalnote.jp/p-cotime/?dno=930&c\\_code=999&post\\_no=1402](https://www.globalnote.jp/p-cotime/?dno=930&c_code=999&post_no=1402) (2022.3.3 閲覧)
2. <https://www.course50.com/> (2022.3.3 閲覧)
3. <https://www.challenge-zero.jp/jp/casestudy/68> (2022.3.3 閲覧)
4. 松村勝, 山口泰英, 樋口謙一, 村上太一, 前田敬之: 鉄と鋼, **107**, 6, pp. 471–482 (2021)
5. 丸岡大佑, 中村拓正, 村上太一, 葛西栄輝: 鉄と鋼, **102**, 12, pp. 730–735 (2016)
6. T. Murakami, R. Higashi, D. Maruoka, E. Kasai: ISIJ Int., **61**, 12, pp. 2971–2978 (2021)
7. T. Murakami, T. Nishimura, N. Tsuda, E. Kasai: ISIJ Int., **53**, 10, pp. 1763–1769 (2013)
8. 東料太, 丸岡大佑, 村上太一, 葛西栄輝: CAMP-ISIJ, **34**, pp. 335 (2021)