



製鉄用バイオマス炭材の可能性（前編）

石炭開発部 森永潤二

鉄鋼業は日本の総 CO₂ 排出量の約 14%を占め、我が国が 2050 年にカーボンニュートラルを目指す野心的な方針を達成する為には鉄鋼業における CO₂ 排出量削減、低炭素化の技術開発、社会実装は極めて重要な挑戦である。一方で鉄鋼業は我が国の産業の骨格を支える基幹産業であり、又、関連裾野産業や従事する関係者に与える影響も甚大である。粗鋼生産の約 75%を占める高炉法は海外資源を原料に大量・高効率・高品質製品を高い競争力で製造でき、日本鉄鋼業を支える基幹製鉄法であるが、一方で電炉法対比粗鋼生産 1 トン当たりの CO₂ 排出量が約 4 倍となる課題も抱えている。現在業界では 2050 年の「ゼロカーボンスチール」の実現に向けて「COURSE50 プロジェクト」や「Super COURSE50 プロジェクト」等の超革新的製鉄プロセスの技術開発が進められているが、新プロセスの技術開発、実装化には長期の時間軸や実装化に伴う膨大な開発・設備投資コストと言った課題も指摘されている。上記業界目標達成の為には、超革新的プロセスの技術開発と並行して、既存の高炉設備が活用可能で、且つコスト競争力を有し短期的に実用化できる所謂ニッチな技術開発・導入の可能性も排除すべきではない。本レポートでは、ニッチ技術の一つとして、特に欧州で技術開発が進展している「バイオマス炭材」の活用に関して Lina Kieush 他 (2022) により編纂され、昨年末に公表された「A Comprehensive Review of Secondary Carbon Bio-Carriers for Application in Metallurgical Processes : Utilization of Torrefied Biomass in Steel Production」 (以下「SCBC 活用に関する考察」) の概要を紹介する。

今回焦点を当てるバイオマス炭材は低炭素化に寄与する素材である一方で集荷・輸送コストの問題や他産業を含む原料確保の競合等の課題を内包しているものの、日本の略全ての産業を支えている鉄鋼業の既存インフラを最大限活用できること、原料炭等海外の鉄鋼原料資源の持続的な活用・共生が可能となること、技術開発・導入に要する期間が比較的短期であること、電炉比率上昇に伴う冷鉄源確保競合に伴うコスト上昇懸念を緩和できること、更に技術導入に関わる追加費用負担が限定的であること等のメリットが期待され、本レポートがバイオマス炭材関連の技術開発、事業組成の一助になれば幸いである。

尚、本レポートは前編、後編の二部構成とし、本前編では概論、高炉法における活用法に

製鉄用バイオマス炭材の可能性

関して取り纏め、後編では電炉法、溶融還元法等における活用やその他周辺情報に関して報告する予定である。

1. 緒言

“SCBC 活用に関する考察”は「Secondary Carbon Bio-Carriers (SCBC)」を活用した製鉄法の可能性に関する報告である。SCBC とは、バイオマス、半炭化バイオマス、炭化バイオマス、木炭、バイオコークスを指すが、ここでは多くの製鉄プロセスで既存の化石燃料を代替可能な半炭化バイオマスに焦点を当てて議論を行う。異なる製鉄プロセスの中で SCBC の使用方法はシステム化され、4 つの主要な製鉄方法に分類できる。即ち、①高炉/転炉法、②鉄スクラップ/電炉法、③直接還元鉄/電炉法、④溶融還元/転炉法である。上記 4 製鉄法の中で SCBC の活用が最も有望視されているのが②鉄スクラップ/電炉法、③直接還元鉄/電炉法、④溶融還元/転炉法である。今後の研究開発の優先順位は上記 3 製鉄法での SCBC 活用に関わる最適条件、必要量、要求品位の見極めである。

2. 概論

製鉄業はエネルギー集約型且つ CO₂ 排出規模が大きい産業の一つで高炉/転炉法では粗鋼 1 トン当たり約 1.83 トンの CO₂ を排出しており、その多くは高炉、コークス炉、焼結プラント等で発生している。製鉄業における CO₂ 排出量を 2030 年までに 50%削減し、2050 年までにゼロとする為に石炭やその他化石燃料の代替品活用に関する多くの研究開発が取組まれてきた。一例としてバイオマスの活用は化石燃料や還元材の有望な代替品としてコークス炉、焼結プラント、高炉への（羽口）吹込み（PCI）、電炉、還元鉄他のプロセスでの研究開発がなされてきた。

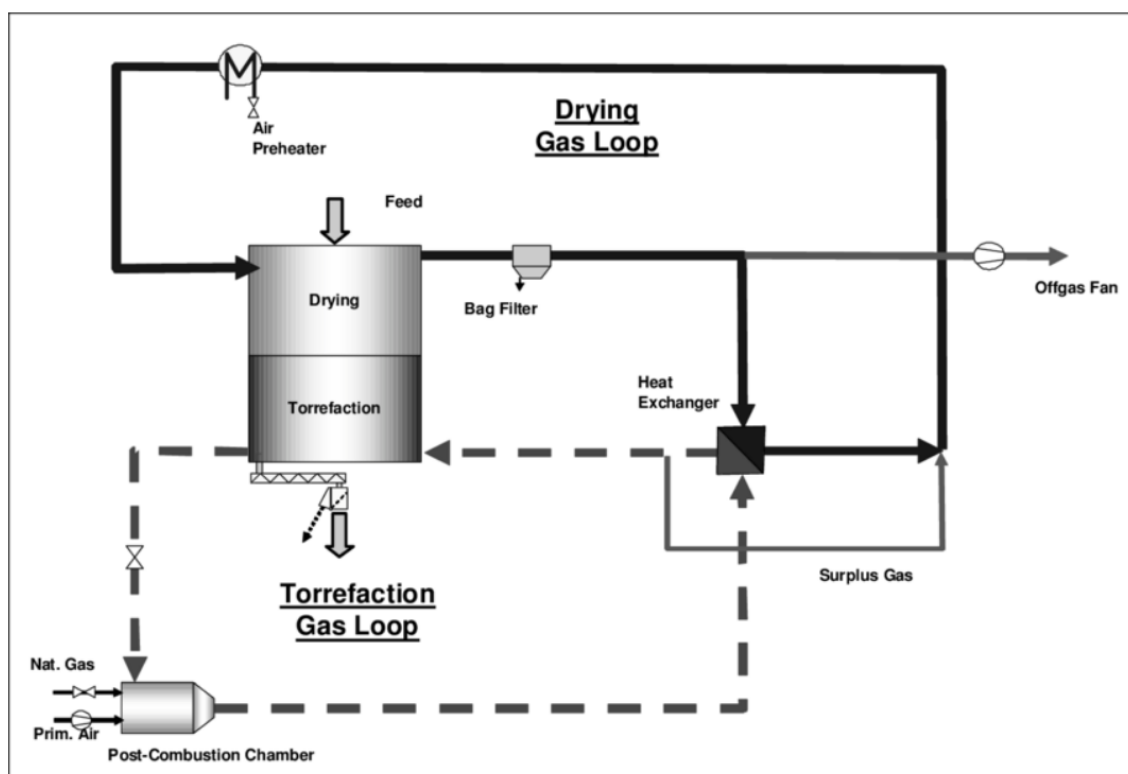
但し、バイオマス原料そのままでは高水分、低発熱量、低比重等の欠点があり、製鉄プロセスで既存の化石燃料を代替する為には事前処理が必要となる。バイオマス原料の物性を改善するには半炭化、熱水処理、ガス化、燃焼、熱分解等の熱処理が必要となる。熱処理により水分や酸素の低減の一方、炭素や発熱量の増加が図られ多くの製鉄プロセスでの活用が可能となる。但し、熱処理後には灰分の増加や炭化バイオマスの強度劣化が発生する。製鉄用途の炭化バイオマス利用に関して 350~1,100°Cでの熱分解に関する多くの研究がなされているが、高温での熱分解の欠点は製品重量の減少を招く点であり、200~300°Cでの半炭化、即ちマイルドな熱分解が有用であることが判明している。半炭化バイオマスの長所として、下記点が挙げられる。

- ア) 熱分解による炭化バイオマス対比灰分が低い。
- イ) 重量減少が 30~70%に留まる。
- ウ) 半炭化後に 90%のエネルギーが蓄積される。
- エ) CO₂ 排出量を粗鋼生産当たり 50kg/トン削減できる。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

半炭化プロセスではバイオマス成分の構成変化に注目すべきである。即ちセルロースやヘミセルロースの分解が 200~400°Cで発生する一方、リグニンはやや高めの 200~900°Cで緩やかに分解されている。半炭化プロセスでは、300°Cでヘミセルロースの比率が 22%から 4.6%に減少し、一方でリグニンの比率が緩やかに増加している。この過程でバイオマスは乾燥され、緩やかに分解され、同時に約 20%の CO と約 80%の CO₂、H₂O、揮発有機成分が放出される。その結果炭素は増加する一方、水素や特に酸素は減少する。

半炭化の効果はバイオマス原料により変動し、製品歩留まりは加熱レート 1~10°C/分、滞留時間 10~60 分の条件で 75~90%となる。半炭化バイオマスは石炭を部分的に、乃至は完全に代替できるがコークスを浸炭材や還元材として利用する製鉄プロセスに限定され、その効能は圧密や石炭とのブレンドにより改善する。半炭化バイオマスの工業的な活用は Arcelor Mittal ベルギー社が取り纏め役となっている TORERO プロジェクトで既に導入されている。本プロジェクトでは半炭化バイオマスを PCI 炭の代替として高炉に投入するものである。又 ThyssenKrupp が開発した POLTORR システム（図-1 参照）は化石燃料の代替として乾燥、半炭化したバイオマスを利用している。



Multiple Hearth Furnace Torrefaction System of Polysius AG (POLTORR)

図-1 : POLTORR システムの概要 (出典:ThyssenKrupp)

製鉄用バイオマス炭材の可能性

欧州における ESTEP と CSP

欧州において CSP (Clean Steel Partnership→欧州鉄鋼業の脱炭素化を促進する官民のパートナーシップ) は EUROFER (European Steel Association/欧州鉄鋼連盟) が主導する団体で ESTEP (European Steel Technology Platform) は①CDA (Carbon Direct Avoidance) 技術、②SCU (Smart Carbon Usage) 技術、③CE (Circular Economy/循環経済) 技術より構成される CO₂ 排出削減技術の研究開発に特化した団体である。CSP の目標は欧州における鉄鋼生産で発生する CO₂ 排出量の 1990 年代対比 80~95%の削減、更にはカーボンニュートラルが可能な技術到達度 8 (システムやプロセスが完成し実証されたレベル) に向けて統合された KPI の構築にある。

ESTEP はベルギー法に基づき設立された CSP における主要な役割を果たす NPO で、ESTEP のミッションは持続可能な EU 鉄鋼業を創出する為に EU が直面する多くの課題 (再エネ、気候変動、脱炭素化、循環経済) を克服する技術プロジェクトや協業活動に従事することにある。図-2 に ESTEP の組織図を示す。

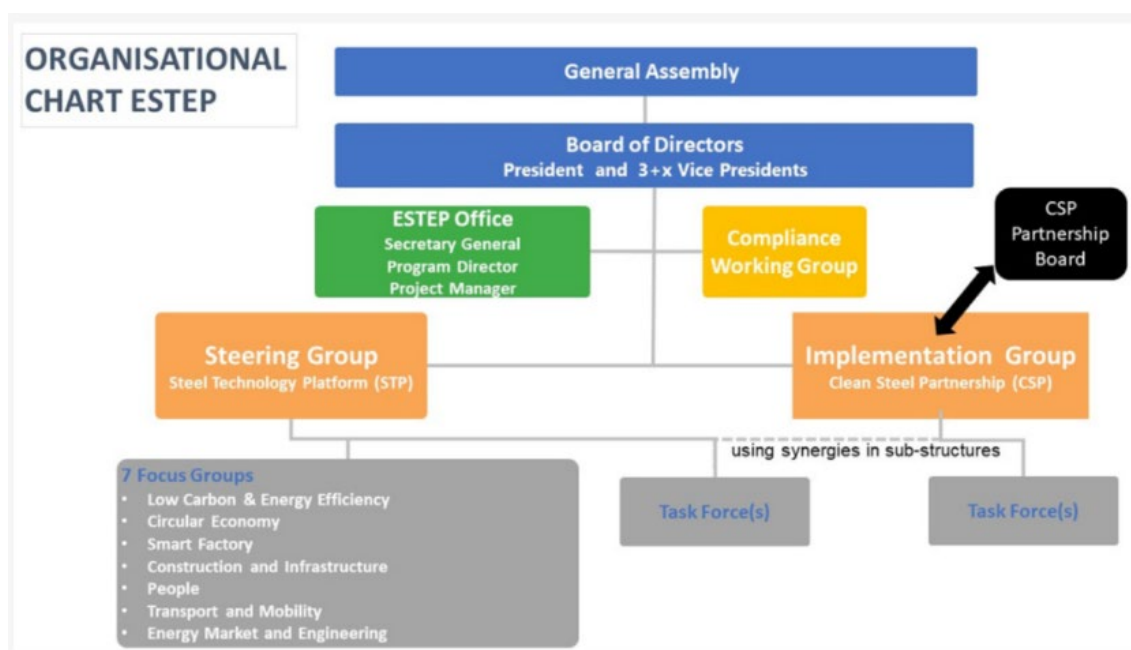


図-2 : ESTEP の組織図 (Lina Kieush 他 (2022)、 “SCBC 活用に関する考察”)

理事会 (Board of Directors) は ESTEP の統括・管理を行い、運営管理 (Steering) グループは ESTEP の研究開発プログラムを指導し、実施 (Implementation) グループは CSP の課題に対応している。ESTEP では 7 つの主要案件に対応している。即ち、その内 2 つは鉄鋼生産に関わる①低炭素化・エネルギー効率と②循環経済である。前者は安全でクリーン且つエネルギー効率の高い革新的な技術開発に、一方、後者は鉄鋼製品の循

製鉄用バイオマス炭材の可能性

環境促進に関わる革新的な解決法に対応している。この2案件の最大の課題はCO₂排出量の削減、資源の節約、そして廃棄物回収の促進である。

次の3つは鉄鋼製品の活用に関する案件である、即ち③輸送・移動手段分野での解決策、④建設・インフラストラクチャー分野での解決策、⑤エネルギー・エンジニアリング分野での解決策である。残りの2つの案件は⑥鉄鋼産業に従事する人への課題と⑦スマートファクトリーである。前者は鉄鋼産業への関心の促進、技能開発、教育訓練プログラム、労災抑止に関する対応であり、後者は情報通信（IT）・人口知能（AI）技術を駆使した高効率・統合生産技術に関する対応である。

CSP の目標を達成する為の全ての研究開発活動は図-3 に示す SRIA（Strategic Research and Innovation Agenda）で 6つの事業領域に基づき分類されている。

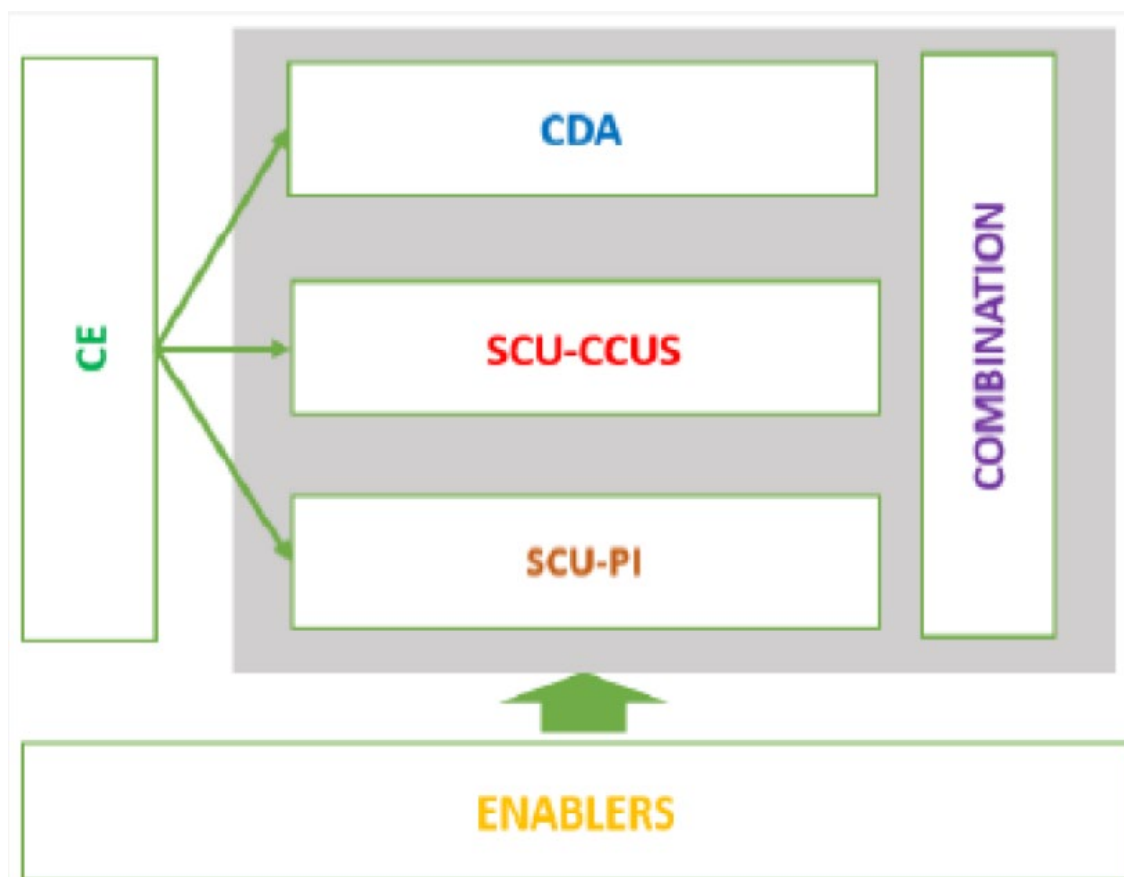


図-3：CSPにおけるSRIAの6つの事業領域
(Lina Kieush 他 (2022)、“SCBC 活用に関する考察”)

上記 6つの事業領域の内4つは、CDA (Carbon Direct Avoidance)、SCU (Smart Carbon Usage)、CE (循環経済) から構成される技術開発である。①CDAは水素や再生可能“グ

製鉄用バイオマス炭材の可能性

リーン”電源を用いた製鉄法を意味する。SCUは②CCUSと③PI (Process Integration/プロセス統合)の2つの分野から構成される。CCUは製鉄プラントで発生するCOやCO₂ガスを高付加価値製品の製造に活用する技術も包括する。PIは製鉄産業で発生するCO₂排出量を削減する為に高炉/転炉法や電炉法で使用される化石燃料の削減を促進する技術である。④CE (循環経済)に加えて⑤Enabler (補助技術)はAI (人工知能)やデジタル技術等の統合生産技術を指す事業領域である。新製鉄プロセスや新予測・動的モデル、更には戦略的スケジュール管理手法をモニター・管理する新計測技術やデジタル機器の開発はゼロカーボン鉄鋼生産に向けた産業移行プロセスの計画や評価、更には最適化の確度を高める事例である。6つ目の事業領域は⑥“Combination”(統合技術)と称される異なる技術開発を相互に統合した戦略を指す。

製鉄プロセスにおけるSCBCの活用は以下に示す実績で実証されたCSPの工程表で指針が示されている。

SCU-PIによる脱炭素化技術開発は

- (i) 既存の製鉄プロセスチェーンにおける炭化、熱分解、ガス化プロセスを統合したSCBCの活用による化石燃料の代替、
- (ii) 粉碎・乾燥・高炉吹込み技術の電炉や高炉で使用するバイオマス原料の半炭化・炭化製品への応用、
- (iii) 石炭の代替物となる新たな固体投入物の設計、
- (iv) 補助的な還元材やスラグフォーミング材(一例として廃プラスチックから回収したポリマーや廃タイヤのゴムや農業・食料残渣)の活用

から構成される。

一方、CDAによる脱炭素化技術開発は

- (i) 既存の溶融プロセスで既存の炭素や炭化水素のSCBCへの置換え、
- (ii) SCBCを用いた一次・二次精錬でのマルチ燃料バーナーによる予備加熱処理プロセス

から構成される。

3. SCBCを用いた製鉄法

製鉄法は主に4つのルートに分類される。即ち、①高炉/転炉法、②鉄スクラップ/電炉法、③直接還元鉄/電炉法、④溶融還元/転炉法である。

高炉/転炉法はコークス炉でのコークス製造、焼結プラントでの焼結鉱製造、ペレットプラントでのペレット製造、高炉での銑鉄生産、キャスティング、圧延工程、発電設備より構成される。現在の高炉では70~80%の焼結鉱、20~30%のペレット、10~20%

製鉄用バイオマス炭材の可能性

の塊鉱が投入されている。図-4に4つの製鉄法と石炭やコークスからSCBCへの代替活用可能性を示す。

バイオマス原料の物性を改善するために半炭化プロセスが活用されるが、この半炭化バイオマスは直接コークス製造、焼結鉱製造、更には炭材内装塊成鉱 (CCAs/Carbon Composite Agglomerates) で使用可能であり、高炉への吹込み (PCI) にも使用される。又、灰分の低減やミネラルの添加による更なる炭化や造粒効果により物性の改善も期待される。この物性改質により SCBC はバイオコークス製造にも活用できる。バイオコークス製造では特定の製鉄プロセスでの炭材要件に応じて半炭化バイオマスの配合比率は3~50%と広範囲に設定されている。バイオコークスの用途・機能は下記の通りである。

- ◇ 焼結プラントでの燃料
- ◇ 高炉での燃料、還元材、浸炭材
- ◇ 電炉での浸炭材とスラグフォーミング材
- ◇ 昇熱効果、還元効果、還元性ガスへの変化、通気性の確保、銑鉄への浸炭効果

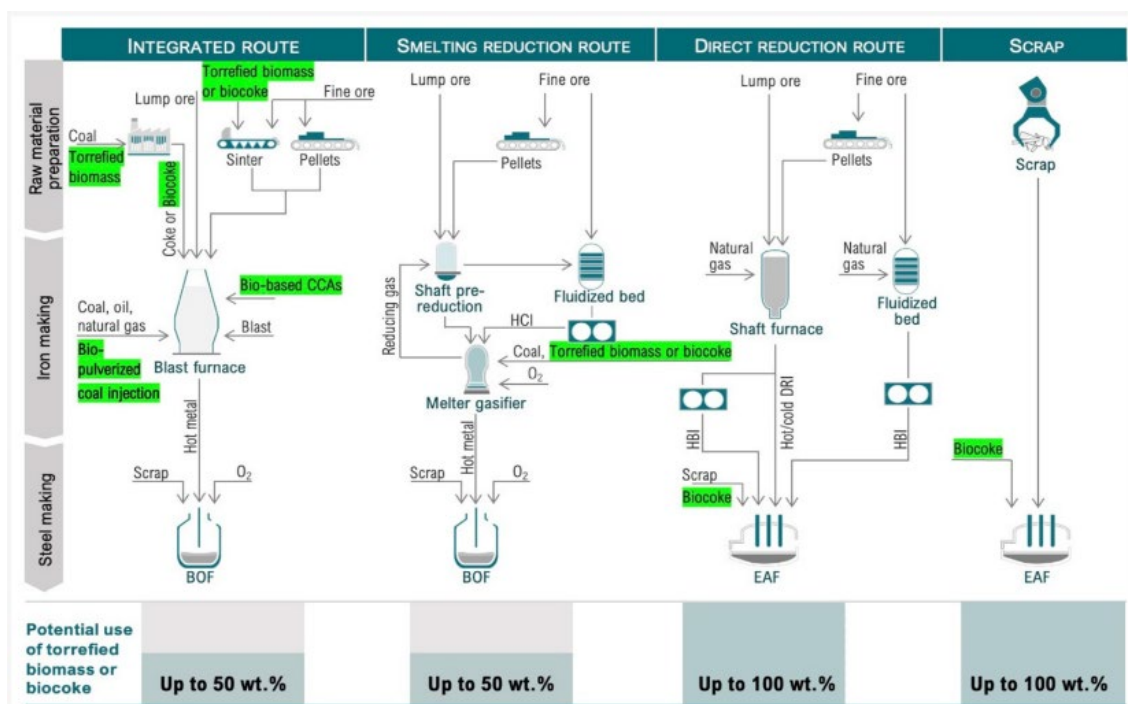


図-4：4つの製鉄法とSCBCの代替可能性
(Lina Kieush 他 (2022)、“SCBC活用に関する考察”)

3.1 コークス製造

コークス製造プロセスでは原料炭は高コークス強度を形成する為に軟化・膨張・収縮・

製鉄用バイオマス炭材の可能性

再固化等の複数の化学・物理反応が発生している。コークス品位は高炉での要求品位に厳格に合致することが求められる。一部の原料炭が SCBC に置換えられたバイオコークスでも同様の品位が求められるが、多くの解決すべき課題がある。バイオコークスは配合炭の一部の原料炭をバイオマスで置換え、通常のコークス同様 1,110°C で焼成されたものであるが、表-1 に示す様にバイオマス原料の違いや配合比率の違い、製造条件の違い等によりバイオコークスの品位は大きく異なる。半炭化バイオマスをコークス炉で使用する際にはその配合がコークス品位に悪影響を与えるので制約がある。バイオコークスは空隙率と CRI を上昇させ、CSR を低下させる。CRI や空隙率の上昇は電炉での投入等一部の製鉄プロセスでは有用だが、低摩耗性や灰分の化学組成が高炉内で CO₂ との反応性を加速させ半炭化バイオマス使用の制約要因となっている。

表-1：バイオマス炭材品位の一例
(Lina Kieush 他 (2022)、"SCBC 活用に関する考察")

Parameters	Torrefied Biomass	Biocoke
Moisture, wt. %	4.8	0.65 or 1.35
Volatile matters, wt. %	34–85	1.4–2.7
Ash, wt. %	0.4	5.8–10.8
Fixed carbon, wt. %	13–45	87.8–92.4
C, wt. %	45–68	86.38–91.65
S, wt. %	traces	0.22–0.23
Coke reactivity index, wt. %	n/a	app. 25–50
Strength after reaction with CO ₂ , wt. %	n/a	app. 65–20
Calorific value, (MJ/kg)	16–29	app. 18–32

炭化バイオマスはバイオコークス対比低灰分、低硫黄の特徴を有し、製鉄プロセスで使用する際にメリットがある一方、バイオコークスは高固定炭素、低揮発分のメリットを有する。SCBC は原料炭との配合前に事前（熱）処理を行うことによりコークスの増量材となる。バイオマス原料は配合比率 3% までだが、**事前熱処理を実施したバイオマスは 10% まで配合してもコークス品位に影響を与えない。**10% を超えて半炭化バイオマスを配合すると高炉使用の要件を満たさなくなる。配合中の半炭化バイオマスはイナータ成分として機能し、配合炭のコークス化性を低下させる。更に半炭化バイオマスの粒形はコークス化性に影響を与える重要なファクターとなる。即ち、小さい粒形程流動性の劣化を招きやすく、**半炭化バイオマスの圧密・造粒プロセスは物性を改善し、最終製品に対する品位への影響を最小化できる。**多くの CRI、CSR の評価結果より、木炭を配合したバイオコークスはバイオブリケットを配合したバイオコークス対比反応性が高いことが判明した。これは木炭を配合した場合、バイオマス構造がより活性化している為である。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

コークス製造における SCBC の活用に関わる過去の研究成果として以下の事例が確認されている。

◇固形バイオマス（竹、カラ松、碎木）を温度 130~200°C、圧力 114MPa でブリケット成型し、900°Cで炭化した結果、引っ張り強度 5~19MPa のコークス製造に成功。

◇松由来のクラフトリグニン、半炭化リグニン、更にこの 2 原料を 50:50 で配合したものを 6 時間 350°Cで水和熱分解し、炭化試験を行い、良質の原料炭を用いて製造したコークスと比較した結果、上記 3 種のバイオコークスの灰分は良質の原料炭を用いて製造したコークス対比低くなったものの、反応性が高く、圧壊強度が著しく低い結果となった。

◇バインダーとして無灰石炭を用いて製造したコークスと、同じく無灰石炭に半炭化バイオマスを配合して製造したコークスを比較した所、半炭化バイオマスを配合したコークスは硫黄分が低下したものの、反応性が高くなったことが確認された。

◇低ランク炭 70%、半炭化リグニン 24%、フェノール樹脂 6%を配合して製造したバイオコークスは通常のコークスと同等の強度を確保できた一方で通常のコークス対比反応性が高くなったことが確認された。

◇フランスの Lorraine, Saint-Gobain PAM 製鉄所の高炉で通常のコークスの置換えが可能なバイオマス原料と半炭化バイオマスの検討を行い、半炭化プロセスによりバイオマスの物性を改善し、通常のコークス量を減らすことが可能であることが確認された。

◇半炭化バイオマスを配合したバイオコークスの高炉使用が CO₂ 削減率 14.7%に寄与し最も環境に優しい選択となった。続いて炭化バイオマスの高炉への吹込みで CO₂ 削減率 14.5%となり、木炭塊の高炉炉頂投入で CO₂ 削減率 14.4%となった。

SCBC は最適条件を見極めれば、既存コークスの代替となり得ることが判明している。半炭化バイオマスの配合による悪影響を最小化する為には**最大 300°Cで半炭化**した後に**圧密成型**を行い、状況に応じて**配合比率を調整**する必要がある。バイオコークスのメリットは低灰分、低硫黄分であり、**圧密成型した半炭化バイオマスは大幅にバイオコークスの品位を低下させずに高比率での配合で既存の原料炭の置換えが可能**となる。今後の使用目的次第だが**半炭化バイオマスのバイオコークスへの配合率は 50%まで達成することは可能である。**

製鉄用バイオマス炭材の可能性

3.2 焼結鉱

焼結鉱は粉鉱鉄鉱石を高炉で使用する際に最も経済的で広く利用されているプロセスである。ペレット鉱対比、焼結鉱の生産コストは低廉で、更に塊鉱対比自溶性焼結鉱は軟化性が良好で還元性も高い。一方で焼結プロセスは製鉄産業の中で約10%のCO₂排出量を占めている。焼結プロセスは粉鉱鉄鉱石とその他原料（焼結返鉱や石灰石等）を混合した原料を1,200~1,400°Cで反応させる。同プロセスの熱源として粉コークスや低揮発分石炭を3-5%配合している。焼結用の燃料の要求品位は低揮発分（3%以下）、高密度（700kg/m³以上）、小粒径（0.3~3.0mm）、高固定炭素（76%以上）となっている。

焼結鉱製造におけるSCBCの活用に関わる過去の研究成果として以下の事例が確認されている。

◇焼結プロセスで粉コークスの10~25%をバイオマス原料に置換えた所、成品歩留りの低下、燃料消費量の上昇等経済性・環境面で、更に焼結鉱強度の劣化等の悪影響が発生した。

◇反応性(CRI)の高い木炭を使用した場合には焼結速度が上昇することが確認された。

◇400~1,000°Cで熱分解した後の炭化バイオマスを用いた結果、比較的高固定炭素の炭化バイオマスを使用した場合、通常のコークスを使用した場合と同等の成品歩留りや生産性が確保され、更に無煙炭の使用対比、CO₂排出量を6.7%削減できた。

再エネ（バイオマス）燃料を焼結プロセスで使用する際には、代替使用に伴う焼結鉱強度やCRIの劣化を誘発するので**最適配合率の見極めが重要**である。更に**バイオマス原料の事前熱処理が品位改善の為に重要**であり、同処理により焼結プロセスでの使用要件を満たすことが可能となる。

強度の半炭化プロセスを経たバイオマスは粉コークスを完全に置換できるだけの品位を確保できておらず、焼結鉱の品位を劣化させない為には粉コークス、無煙炭を20~25%程度置換える部分代替に留まっている。加えて**半炭化バイオマス**を使用する場合は**圧密成型（ブリケット化）**されたものが望ましい。**半炭化バイオマスを用いたバイオコークスは通常のコークスの50%を代替することが可能であり**、粉コークス対比灰分が極めて低く、排ガス中のPM（粒子状物質）値を低減できるメリットがある。

3.3 炭材内装塊成鉱 (CCAs/Carbon Composite Agglomerates)

CCAsは主に高炉や直接還元プロセスで使用される。従来のCCAsは冷間ペレットや熱

製鉄用バイオマス炭材の可能性

間・冷間ブリケットとして製造されてきた。ペレットの場合は高炉使用要件として高強度が要求される為に製造プロセスに注意を要する。CCAs は粉状バイオマス由来の炭材、粉鉱、少量のバインダーから構成される銑鉄製造の新たな原料となる。バイオマス由来の炭材はペレット状でバイオマス原料乃至は熱処理されたバイオマス炭材が利用される。このタイプの CCAs は高炉内の物理的、熱的伝導メカニズムや温度分布、更にはガス分布に直接影響し、高炉操業に悪影響を与える可能性があるため、高炉投入時に最小要求強度を満たす必要がある。

バイオマス炭材を使用しても灰分は増加しないので、半炭化バイオマスの使用は有望である。更に炭材内装塊成鉱は浸炭プロセスを促進するレベルの固定炭素分を有し、反応性に対する固定炭素分の要件はそれ程厳しくはない。CCAs の炭素は熱滞留ゾーンで設定された温度以下ではプロセスの効率を低下させる様な化学反応を発生させない点は留意すべきである。CCAs の最も重要な要求品位はペレット強度である。化学反応はペレット内に気泡を発生させ空隙率を上昇させる。その意味でバイオマス炭材を配合した CCAs の最大の弱点は低圧壊強度となる。

直接還元プロセスで重量比 46%までの炭化バイオマスを配合した炭材内装塊成鉱が使用可能である。従来の石炭やコークスペースの炭材内装塊成鉱対比、炭化バイオマスペースの炭材内装塊成鉱の方が高い反応性を有する為、酸化鉄の還元速度が高いことが指摘されている。

炭材内装塊成鉱 (CCAs) 製造における SCBC の活用に関わる過去の研究成果として以下の事例が確認されている。

◇炭化バイオマスと鉄鉱石のみの炭材内装塊成鉱に注目し、重量比 60%の鉄鉱石からなる塊成鉱を 800°C以上で昇温させた所、鉄鉱石の還元反応が促進されたことが確認された。

◇鉄鉱石ペレットを天然ガス、石炭 (粉無煙炭)、揮発分レベルが異なる 2 つのユーカリ由来の木炭 (一つ目は揮発分:20.3~25.98%、二つ目は揮発分:9.4~11.1%) を用いて焼成した所、二種類のユーカリ由来の木炭で 7.5%の粉無煙炭を代替できること、更に低揮発分木炭の場合は 10%の粉無煙炭を代替できることが確認された。

◇PKS (パーム椰子殻) を還元材として使用し、重量比 30%を配合した所、酸化鉄は完全にマグネタイトに還元されるか、部分的にウスタイトに還元されることが確認されていた。更に焼成温度を 900°C迄昇温すると還元性が更に促進されたことが確認された。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

◇還元されたペレットの金属（還元）化レベルも重要なファクターであり、重量比 20% の木粉を配合したペレットを異なる温度で焼成した所、ペレットからスラグに溶出した鉄分は 1%以下で、ペレットの鉄分品位は平均 97%、最高温度で焼成した場合のペレット Fe 分は 98.1%であった。

◇竹由来の木炭、木炭、麦わら繊維（固定炭素分は竹由来の木炭:87.5%、木炭:68.5%、麦わら:20.89%）を用いて直接還元鉄を生産する研究が実施された。本研究では還元温度の上昇に伴い金属（還元）化レベルが上がり、91%まで達成した。興味深い点は麦わらは固定炭素分が低いにも拘らず炭水化物量が増えた為に、麦わらを配合したペレットの金属（還元）化レベルは木炭や竹由来の木炭対比高い結果となった。更に焼成温度を高めることによりペレットの圧壊強度 1,800N 以上が達成可能であることも判明した。

上記の様に、半炭化バイオマスの物性にに基づき、半炭化バイオマスはなるべく高温での半炭化プロセスを経て使用されるべきである。このプロセスにより固定炭素分の価値を最大化させ、炭化プロセスの確度を高めることが可能となる。一方燃料の揮発分が高まると、熱分解の可能性が高まる。これは比較的低揮発分の SCBC 程低温での熱分解は発生しないことを意味する。その結果、最適パラメーターを追求することにより半炭化バイオマスは炭材内装塊成鉱 (CCAs) の製造で石炭を完全に置換えることが可能となる。

3.4. PCI (高炉への吹込み)

通常の PCI 技術はコークスの一部を代替する目的で高炉のレースウェイに非粘結炭乃至は微粘結炭を吹込んでいる。本技術は高炉に投入する非再エネ燃料を多様な SCBC で置換えることが可能な最も効率的な方法である。例えば約 20kg/銑鉄 t の廃プラスチックを高炉に吹込んだ事例もある。半炭化後や熱分解後のバイオマスを用いる多くの研究がなされ、既に SCBC の PCI 用途は実証済である。過去の研究では 20~40%をバイオマスに代替、乃至は 100%をバイオマスに代替可能との結果も出ている。但し、SCBC を PCI 用途で使用する場合に燃料比、着火温度、燃焼性等の物性を評価する必要がある。

半炭化バイオマスの品位は 225~300°Cの範囲で半炭化することで石炭と同等のレベルまで改善され、高炉吹込み用途の半炭化バイオマスは圧密成型を行うことにより発熱量他の物理・化学性状が改善することも判明している。

PCI における SCBC の活用に関わる過去の研究成果として以下の事例が確認されている。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

◇竹、パーム椰子、もみ殻、サトウキビの搾りかす、アーモンドを半炭化し、その燃焼性を高揮発分瀝青炭と比較した所、半炭化温度が 300℃であれば上記バイオマス種を高炉吹込みに適用可能な炭化バイオマスを製造できることが確認出来た。

上記結果は他の研究でバイオマスを 300℃で半炭化するか 500℃以下で炭化すれば PCI 用途で使用できるとの報告と符合している。但し、レースウェイで良好な燃焼性を維持する為には、半炭化バイオマスは石炭の一部しか代替できないことに留意すべきである。

半炭化バイオマスを PCI 用途で使用する際の主な制約要因はその高揮発性にある。従い、石炭の 20~50%を比較的強めの条件で半炭化したバイオマスで置換えることは検討可能である。一方、石炭を 100%代替する為には、300℃で半炭化したバイオマスと半炭化バイオマスを更に炭化した炭化バイオマスを 50:50 の比率で配合したブレンド品の使用は検討の余地がある。

3.5 高炉プロセス

高炉法は現在最も主流の製鉄・製鋼法である。この原理は酸化鉄を炭素ベースの還元材を用いて鉄に転換するものである。高炉は酸化鉄とコークスを炉頂から下部に向けて投入し、一方還元ガスが上方に移動する大型の対流型製鉄立型炉である。炉内の還元条件は炉頂から投入したコークスと羽口より吹込む還元材(PCI 炭)によって決定される。炭材が高炉操業で重要な原料であり、その要求品位は厳格である。

高炉内の製鉄用コークスを使用する際に最も重要なパラメーターは CRI と CSR であり、或る研究者によるとコークスの要求品位は CRI:30%以下、CSR:55%以上、又別の研究者によると欧州における CRI と CSR の要求品位は夫々23%、65%としている。この2つのパラメーターに加えて、コークスには一定の強度が要求される。即ち、ドラム法による M40 (100 回転後の粒形 40mm 以上) が 88%以上、M25 (100 回転後の粒形 25mm 以上) が 90%以上、M10 (100 回転後の 10mm 以下) が 6%以下である必要がある。これらのコークスに求められる要求品位が SCBC を高炉用コークス原料として使用する制限要因となっている。

現在、生産能力 40~350 千トン/年規模の小型高炉で単味、乃至は PCI との組合せで木炭が(コークス代替で)使用されている。小型高炉のメリットは低 CO₂ 排出量、鉄中の低硫黄分、低スラグ発生量と言える。木炭の炭化温度は要求品位に応じて 300~700℃のレンジとなっている。小型高炉に関する別の研究では木炭と水素リッチガスの使用に関

製鉄用バイオマス炭材の可能性

する様々なシナリオが検証され、或るシナリオでは生産性（出銹率）の改善と共に炭材の消費量削減が可能であることが確認されている。木炭の活用は製鉄プロセスでの CO₂ 排出量削減の可能性が実証されている。但し、木炭の有効な活用はバイオマス資源の栽培や持続性のある木炭製造と言った各立地に応じた条件や制約要因次第である。

高炉/転炉法における SCBC の活用法を図-5 に示す。

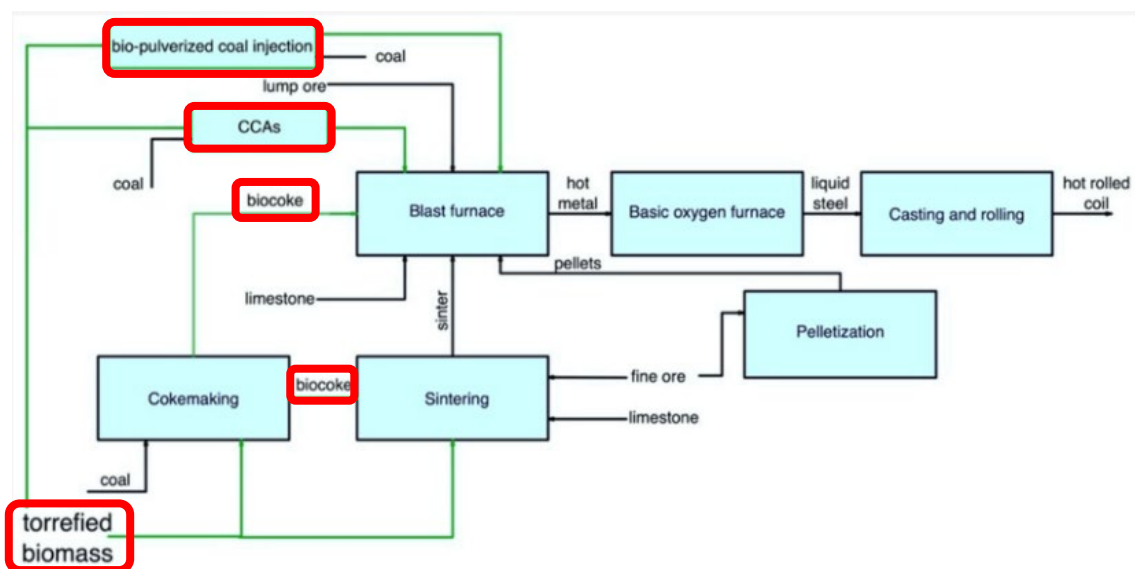


図-5: 高炉/転炉法における SCBC の活用法
(Lina Kieush 他 (2022)、“SCBC 活用に関する考察”)

現在高炉法では下記の SCBC の活用法が検討されている。

- ① 3.1 項で説明した半炭化バイオマスを配合したバイオークスの使用。
- ② 半炭化バイオマス、乃至はバイオークスを用いて製造した焼結鉱の高炉投入。
- ③ 通常の石炭を半炭化バイオマスで 50%迄部分代替したもの、乃至は半炭化バイオマスと半炭化バイオマスを更に炭化した炭化バイオマスのブレンド品 100%を PCI 技術による高炉への吹込み。
- ④ 半炭化バイオマスを使用した炭材内装塊成鉱 (CCAAs) の高炉投入。

以下、後編に続く

以上

製鉄用バイオマス炭材の可能性

参考文献

Lina Kieush, Johannes Rieger, Johannes Schenk, Carlo Brondi, Davide Rovelli, Thomas Echterhof, Filippo Cirilli, Christoph Thaler, Nils Jaeger, Delphine Snaet, Klaus Peters, and Valentina Colla (2022), A Comprehensive Review of Secondary Carbon Bio-Carriers for Application in Metallurgical Processes : Utilization of Torrefied Biomass in Steel Production, Metals 2022, 12.

おことわり： 本レポートの内容は、必ずしも独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構としての見解を示すものではありません。正確な情報をお届けするよう最大限の努力を行ってはおりますが、本レポートの内容に誤りのある可能性もあります。本レポートに基づきとられた行動の帰結につき、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構及びレポート執筆者は何らの責めを負いかねます。なお、本資料の図表類等を引用等する場合には、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構資料からの引用である旨を明示していただきますようお願い申し上げます。