



製鉄用バイオマス炭材の可能性（後編）

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、前回の前編では概論、高炉法における活用

製鉄用バイオマス炭材の可能性

法に関して紹介したが、本後編では電炉法、溶融還元法等における活用やその他周辺情報に関して取り纏め、報告する。

3.6 電炉法

世界鉄鋼協会によると電炉法による製鋼は全世界で約 28% (EU では約 42%) を占めている。電炉法は少量の炭材と大量の電気を用いる製鋼法である。電炉法で使用される炭材の機能は下記の通りである。

- (a) 製鋼中の昇熱、還元雰囲気を与えし金属の酸化を抑制する**加炭機能**。
- (b) 電炉でのエネルギー効率と生産性を向上させる**スラグフォーミング機能**。
- (c) 取鍋精錬炉での浸炭プロセスを促進する**浸炭機能**。

電炉法での 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。

◇熱分解後の木炭で既存の炭材を 50%~100%置換え可能であることが判明し、ユーカリ由来の木炭に対する LCA (Life Cycle Assessment : ライフサイクル環境負荷評価) を実施した。

◇コークスの一部を椰子殻炭に置換えラボスケールの反応器を用いアルゴン雰囲気下で 1,550°C まで加熱した所、電炉スラグとの反応性が従来のコークス対比が改善した。

◇一方で真逆の結果として 5 つの炭材サンプル (①木質バイオマスを 900°C で緩やかに熱分解した炭化バイオマス、②木質バイオマスを 400°C で急速に熱分解した炭化バイオマス、③人工黒鉛、④冶金用コークス、⑤セミコークス) を用いて従来の炭材を置換えた所、炭化バイオマスの場合はスラグとの反応性が低下した。

◇**RFCS (Research Fund for Coal and Steel** : 欧州委員会が創設した石炭や製鉄に関する脱炭素化の為の研究基金) の支援による **GreenEAF プロジェクト** の一環で実施した研究では電炉で使用される石炭 (無煙炭) を熱量等価で 1:1 の比率で木炭に置換えた所、**木炭は加炭材としてもスラグフォーミング材としても機能することが確認された。**

◇2 つの農業残渣 (ブドウの種とかぼちゃの種) から製造した炭化バイオマスを電炉法による製鋼プロセスで試験を行った。(比較の為に瀝青炭と 3 種類の無煙炭の試験も行った。) この炭化バイオマスは **GreenEAF プロジェクト** の一環で 500°C と 600°C の異なる温度で熱分解を行い製造された。500°C の低温熱分解は高揮発分の為、スラグフォーミング機能用として、一方 600°C の熱分解は低揮発分の為、加炭機能用として製造され、反応性の観点で**炭化バイオマスは石炭を代替でき、更に高揮発分の炭化バイオマスはス**

製鉄用バイオマス炭材の可能性

ラグフォーミング機能を促進させることが確認できた。

◇GreenEAF プロジェクトのフォローアップ事業である GreenEAF2 プロジェクトの一環で電炉プロセスでの利用を目指して異なる複数のバイオマス炭材に “Dynamic Process Simulation Model” を用いて試験を実施した。本試験では熱分解による木炭、半炭化バイオマス、生木質バイオマス（PKS:パーム椰子殻）が用いられた。PKS の場合その高揮発分、高反応性により鉄スクラップの初期溶解時に廃ガスの質量分率が増えることが確認された。従い PKS を使用する際にはプロセスの初期に燃焼後の酸素投入を増やすことでより高いエネルギー放出と溶解レートが上昇することが期待された。

上記以外にも電炉における既存燃料を木炭やバイオガスを中心としたバイオ燃料で0%～100%の範囲での置換試験が実施されている。又、別の研究では電炉プロセスで代替炭材の検討が行われ、この 代替炭材への置換えにより環境に優しく、カーボンニュートラル鉄鋼が生産できることが示された。

図-6 と図-7 に電炉プロセスにおける SCBC の活用法を示す。図-6 は 鉄スクラップを主原料とする電炉プロセスでの SCBC 活用法で、図-7 は 直接還元鉄/電炉法での SCBC 活用法である。

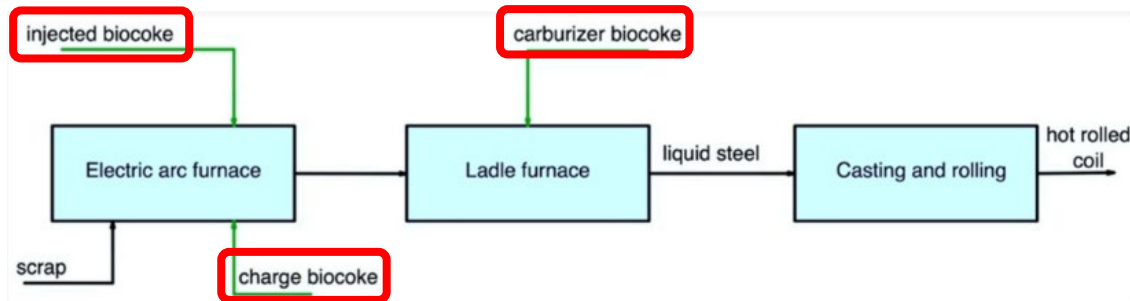


図-6：鉄スクラップ/電炉法での SCBC 活用法 (Lina Kieush et al., 2022)

製鉄用バイオマス炭材の可能性

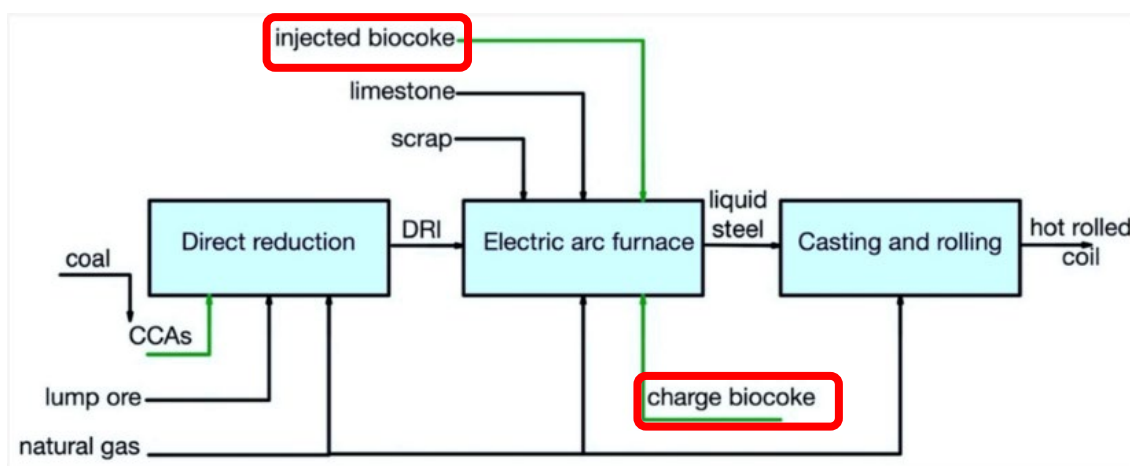


図-7：直接還元鉄/電炉法での SCBC 活用法 (Lina Kieush et al., 2022)

電炉法における SCBC の活用法は下記の通りである。

- ①電炉における加炭効果
- ②電炉におけるスラグフォーミング効果^{注-1}
- ③取鍋精錬炉での浸炭効果^{注-2}

直接還元鉄/電炉法では半炭化バイオマスを使用した炭材塊成原料 (CCAs) の活用の可能性がある。

電炉法では半炭化バイオマスの使用には一部制約があるが、半炭化バイオマスを最大50%石炭とブレンドして製造したバイオコークス100%の使用は電炉法での揮発分の要求品位を充足し、更に固定炭素が85%以上による浸炭効果や溶解プロセス時の熱効率を改善するスラグフォーミング効果の観点で可能である。加えて電炉の特性として電炉法では炭材に対する厳格な強度が求められていない点に留意すべきである。従い、半炭化バイオマスの配合比率を更に高めたバイオコークスの活用が今後の研究課題として有望である。

3.7 溶融還元法

溶融還元法には COREX 法 と FINEX 法 の2つの商業化されたプロセスがある。鉄鉱石は加熱された後溶融ガス化炉で発生したガスにより予備還元され直接還元鉄 (DRI: Direct Reduced Iron) となる。この予備還元は COREX 法 では還元縦型炉で、FINEX 法 では流動床反応器で行われる。予備還元された鉄鉱石はその後溶融ガス化炉で溶融される。溶融ガス化炉では酸素と石炭が還元材として使用される。その後溶融した鉄は転炉に投入され製鋼工程に移行する。このプロセスでは燃料として通常固定炭素が40%以上、揮発分が34%以下の非粘結炭が使用されている。この要求品位を考慮すると、なるべく高温で半炭化された SCBC (高固定炭素、低揮発分の炭化バイオマス) の使用が可能となる。別

注-1:電気炉プロセスにおけるスラグ泡立ち効果。これにより熱効率の向上と耐火物の保護が図れる。

注-2:炭素を侵入拡散させ、表面を硬化、耐摩性を高める効果。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

のオプションとして最大 50%の半炭化バイオマスをブレンドしたバイオコークスの使用が検討可能である。バイオコークスのメリットは硫黄分と灰分を最小化出来る点にある。

図-8 に COREX 法と FINEX 法のプロセス概要を示す。

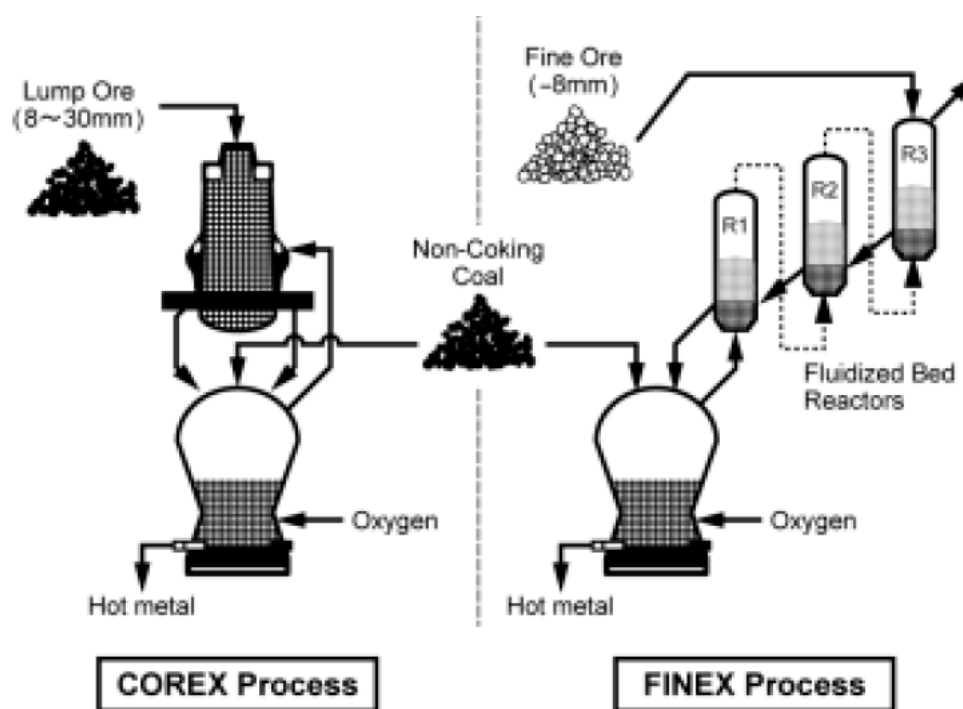


図-8: COREX 法と FINEX 法のプロセス概要 (松井, 2003 年 11 月 11 日)

3.7.1 COREX 法

COREX 法は塊状鉄鉱石 (主にペレット、但し塊鉱、焼結鉱でも OK) を原料に還元材として主に石炭ブリケットを使用し、銑鉄を製造する。プロセスは還元縦型炉と溶融ガス化炉の 2 つの反応器で構成されている。COREX 法で使用される炭材は通常、固定炭素が 55~70%の非粘結炭である。更に灰分が高いとスラグ量が増え、燃料消費量が増加し、生産性が低下するので、灰分は 12%以下が要求される。又、水分は極力低いことが求められる。表-2 に COREX 法で使用される非粘結炭の要求品位を示す。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

表-2 : COREX 法での非粘結炭の要求品位 (Lina Kieush et al., 2022)

Parameters	Values
Moisture, wt. %	<4
Ash, wt. %	<12
Volatile matters, wt. %	25-27
Sulfur, wt. %	<0.6
Fixed carbon, wt. %	55-70
Calorific value, kJ kg ⁻¹	>27,000

COREX 法では大量の石炭が使用されるが、**熱源**、**還元性ガス**の製造、**通気性確保**の目的で **10~20%の冶金用コークス**が使用されている。COREX 法で使用されるコークスの要求品位を表-3 に示す。

表-3 : COREX 法でのコークスの要求品位 (Lina Kieush et al., 2022)

Parameters	Values
Coke reactivity index, wt. %	<35
Coke strength after reaction, wt. %	>55
Volatile matters, wt. %	app. 25
Ash, wt. %	<15
Sulfur, wt. %	<1
Grain size, mm	10-15

COREX 法での 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。

◇石炭ブリケットと事前処理後のバイオマスを使用する。2 mm以下に粉碎後に 260℃、滞留時間 60 分で半炭化されたバイオマス 5%と粉炭 95%にバインダーと水を加えて均等に混合し成型した粉炭/半炭化バイオマスブリケットは COREX 法で要求される物性要求品位を満たす。

◇既存炭材の代替として炭化バイオマスの配合比率を低位発熱量ベースで 45%まで高めることが可能となった。

図-9 に COREX/転炉法での SCBC の活用法を示す。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

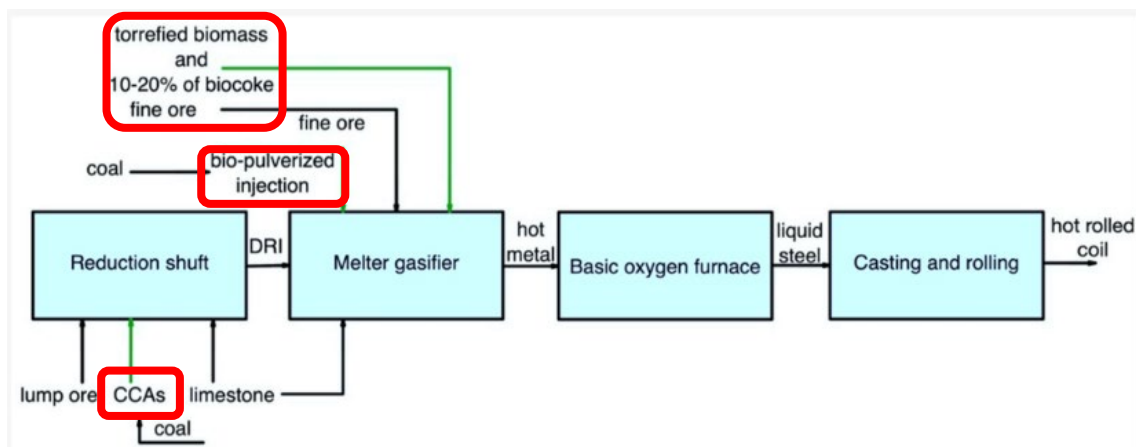


図-9 : COREX/転炉法での SCBC の活用法 (Lina Kieush et al., 2022)

COREX 法でのポイントは下記の通りである。

- i) なるべく高温で半炭化されたバイオマスは石炭の部分代替が可能。
- ii) バイオコークスは通常のコークスの完全代替が可能。更に半炭化バイオマスの配合比率を高めたバイオコークスも検討可能。
- iii) バイオマス炭材の吹込みや炭材塊成原料 (CCAs) の活用も応用技術として検討可能。

3.7.2 FINEX 法

FINEX 法は非粘結炭と粉鉱鉄鉱石を直接使用できる製鉄法である。COREX 法との違いは、FINEX 法では粉鉱を焼結・成型せずにそのまま使用できる点にある。典型的な FINEX 法プロセスでは溶融ガス化炉と粉鉱を対流システムで DRI に還元する 3~4 段の流動床反応器より構成されている。粉状の DRI はその後圧密され、HCI (Hot Compacted Iron) として溶融ガス化炉に投入され、還元溶融される。この溶融ガス化炉の熱源はガス化された石炭が担っている。この石炭ガス化で発生した還元ガスは流動床反応器でも使用される。本プロセスの燃料として非粘結炭と石炭ブリケットが直接溶融ガス化炉に投入される。FINEX 法における燃料の要求品位を表-4 に示す。

表-4 : FINEX 法での炭材要求品位 (Lina Kieush et al., 2022)

Fixed Carbon, wt.%	Ash, wt.%	Volatile Matters, wt.%	Sulfur, wt.%
min. 55	up to 25	<35	<1

図-10 に FINEX/転炉法での SCBC 活用法を示す。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

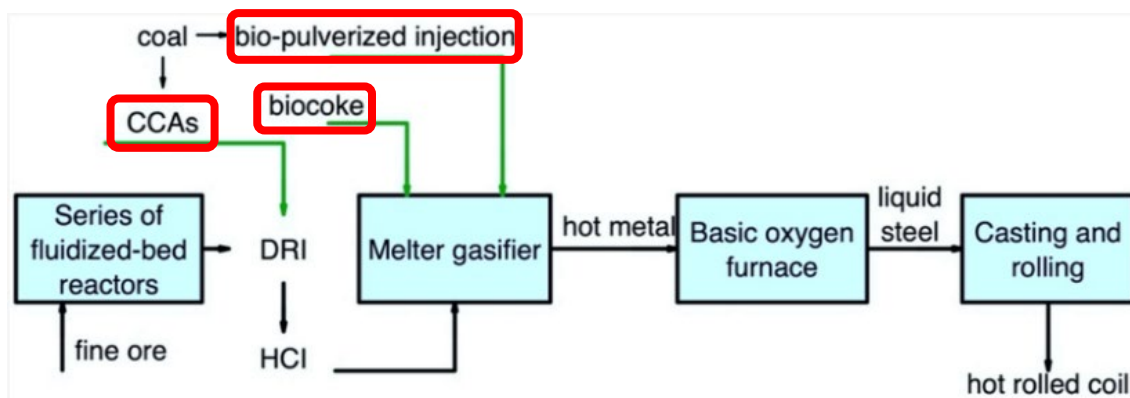


図-10 : FINEX/転炉法での SCBC 活用法 (Lina Kieush et al., 2022)

FINEX/転炉法での SCBC 活用法は基本的に COREX/転炉法と大きく変わらない。なるべく高温で半炭化したバイオマスを圧密成型することにより石炭ブリケットの部分代替が可能となる。又、塊状バイオコークスの活用は石炭の完全代替も可能となろう。更に、半炭化バイオマスを高比率で配合したバイオコークスの使用も可能であり、SCBC の微粉吹込みや CCAs への活用も検討可能である。

3.7.3 HISarna/HISmelt 法

HISarna は石炭の予備加熱と反応器での部分熱分解を組合せた溶解浴技術である。本技術では鉄鉱石の溶解プロセスに溶解サイクロンを又鉄鉱石の最終還元プロセスに溶解反応器を使用する。本プロセスでは焼結鉱製造とコークス製造の両プロセスが不要な為、CO₂ 排出量の削減が可能となる。HISarna プロセスでは石炭の代わりにバイオマスや天然ガスを使用し、発生ガスや熱エネルギーの再利用、CO₂ の貯留により CO₂ の排出量を約 70%削減可能である。

HISarna/HISmelt 法のプロセス概要を図-11 に示す。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

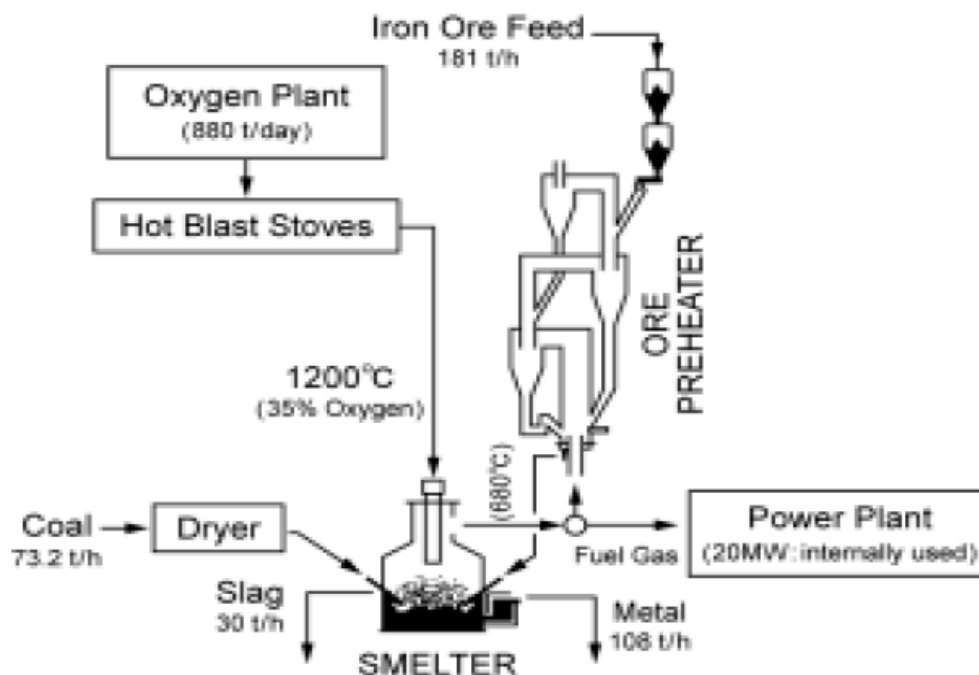


図-11: HISarna/HISmelt 法のプロセス概要 (松井, 2003)

HISarna 法での 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。

◇ (樺と草由来の) 2 種類の木炭の物性を一般炭と比較した所、2 種類の木炭は一般炭より高い反応性を示す結果となった。

◇ 半炭化した草は低温で解放される大量の水分と CO₂ を含んでいることが確認され、その結果 HISarna プロセスで使用される石炭と同等の物性を炭化バイオマスで確保する為には約 400°C での熱処理が必要となることが判明した。

◇ HISarna プロセスで用いる還元材候補として木炭、一般炭、カーボンブラックの特性と各還元材候補が HISarna プロセスに与える影響に関して調査した所、代替品を使用する際にはアルカリ度、揮発分とその成分、更に灰分が重要なパラメーターであることが確認された。

図-12 に HISarna/転炉法での SCBC の活用法を示す。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

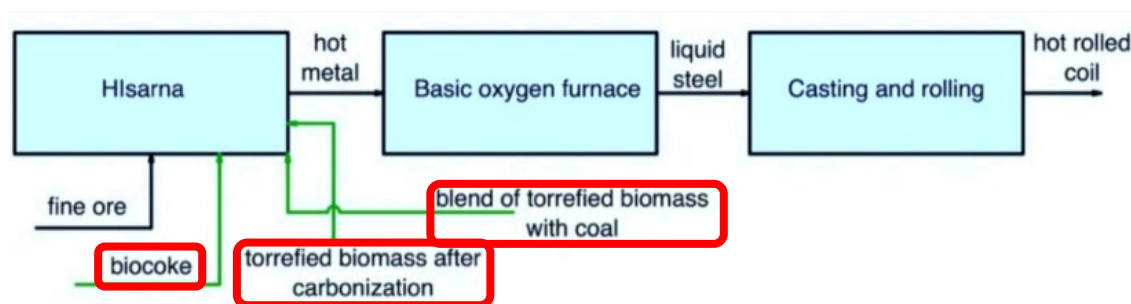


図-12 : HISarna/転炉法での SCBC の活用法 (Lina Kieush et al., 2022)

半炭化バイオマスはその物性の制約の為、仮に高温で半炭化しても HISarna/転炉法での使用は多くの課題を残している。但し、下記対応は検討の余地がある。

- i) 物性の改善の為に**半炭化バイオマスを更に炭化**する。
- ii) なるべく**高温で半炭化した半炭化バイオマスと石炭のブレンド**。(今後の研究課題として半炭化バイオマスの配合比率を 50%まで高めることは検討の余地がある。)
- iii) **半炭化バイオマスをを用いたバイオークスの使用**。(揮発分、固定炭素の要求品位的に半炭化バイオマスの配合比率を 50%まで引き上げることは可能である。)

同様に微粉炭の代替として粒径 3mm 以下のバイオマス炭材を、粒径 6mm 以下の鉄鉱石原料を 750℃で予備加熱、予備還元する二段ロータリーキルンプロセスから構成される HISmelt 法において、使用することは可能である。

4. SCBC 物性の改質方法

4.1 半炭化後の炭化

炭化は温度 400℃以上、加熱速度 80℃/分以下、滞留時間数時間～数日の不活性環境下で行われる緩やかな熱分解プロセスである。バイオマスの主要な熱化学反応が半炭化プロセス中に発生することを踏まえて、半炭化後の炭化はより緩やかに柔軟に実施される必要がある。バイオマスの半炭化温度が高ければ高い程、その後の炭化プロセスでのバイオ油やタールの収率が低下するが、半炭化中のガス発生量には著しく影響しない。**半炭化バイオマスをより高温で炭化することは最も効果的な選択肢**である。これにより反応プロセスや反応効率、更には**最終製品の品位を最良化**できる。但し、最終製品の品位の改善が図れる一方で、**高温で炭化すれば、収率が減少**し、非半炭化・半炭化バイオマスから発生するバイオ油の収率が上昇する。

半炭化後の炭化に関して過去の研究結果として以下の事例がある。

◇N₂、CO₂、14%の O₂、NH₃等の異なる雰囲気での半炭化プロセス中の元素の再配分や熱分

製鉄用バイオマス炭材の可能性

解プロセスに与える影響を調べた所、CO₂を使用することにより炭素量の増加やCO₂発生量の抑制等複数のメリットがあることが確認出来た。

◇バイオマス原料（生バイオマス）と半炭化バイオマスを急速に熱分解した際の違いを調べた所、急速に熱分解する前の半炭化プロセスの方がエネルギー効率の観点、更には最終（固体）製品の高収率、バイオ油収率の抑制の観点でメリットがあることが判明した。最終製品が固体の場合は二段階での熱処理が推奨されることも判明した。

4.2 圧密成型

バイオマスの圧密成型（造粒）はバイオマス残渣・廃棄物（おが屑、削り滓）を機械的に圧密成型し、ペレットやブリケットの様な均一な粒径物を製造することである。バイオマスを圧密成型する目的は以下の通りである。

- ① 体積当たりのエネルギー密度と炭素量の増進
- ② 貯蔵性、ハンドリング性の改善
- ③ 輸送コストの低減
- ④ 特定の形状や空隙率の確保

半炭化バイオマスを圧密成型し、エネルギー密度を増進させることはバイオマス原料を半炭化することにより質量が減り、空隙が発生するので重要な改質プロセスとなる。工業的な圧密成型の方法としては2種類あり、TOP (Torrefaction before Compaction →半炭化後圧密成型)とTAC (Torrefaction after Compaction →半炭化前圧密成型)である。

バイオマス原料（生バイオマス）の場合と比較して、半炭化バイオマスの圧密成型はより複雑なプロセスである為、圧密成型時の温度と圧力は重要となる。又使用するバインダーの選択も重要である。半炭化ペレットの品質に与えるバインダー効果に関する多くの研究が行われてきた。無機バインダーに比べ有機バインダーに関する研究の方が注目を浴びている。

圧密成型に関して過去の研究結果として以下の事例がある。

◇未処理の木材対比、10mm以上の粒形で加圧成型された木材バイオマスは1.5%の増量に加え、コークス強度の減少を抑制する効果が確認された。200～350℃の温度で圧密成型した場合には木材バイオマスの熱分解が発生し、コークス強度の劣化を抑制できた。更に200℃の温度で圧密成型したペレットは室温で圧密成型したペレット対比、比重が60%以上増える結果となった。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

◇金型の温度を 260℃に設定し 187MPa で半炭化バイオマスを圧密成型して製造したペレットは標準ペレット対比圧壊強度が 1.24 倍になった。

◇高強度のペレットを製造する為に、金型温度を 170℃まで昇温させ、更に滞留時間を 30 秒に設定した試験を実施した結果、高強度、高密度のペレットを製造する為には高压で圧密成型するか金型温度を昇温させる必要があるとの結論を得た。

◇半炭化プロセスと圧密成型プロセスを包括的に再検証した結果、半炭化ペレットはエネルギー用途、製鉄用途で石炭を代替可能であることが確認された。

◇通常の木質ペレットとの比較で TOP と TAP の両プロセスを用い半炭化と圧密成型の一貫プロセスで製造した半炭化ペレットの技術的、経済的評価を行った結果、半炭化ペレットは石炭を代替可能にする要求品位を部分的に充足することが確認できた。

4.3 脱灰による改質

炭化や圧密成型に加えて脱灰は有効な改質手法である。木炭は製鉄用途で最も豊富な原料ながら、高空隙率とアルカリやアルカリ土類金属の影響で反応性が高く使用に際しては多くの課題がある。

脱灰方法には幾つかの手法があり、例えば物理的選別法は有効であるが限界もある。別の方法として酸、アルカリ、リーチング、オキシダント、アルカリ・酸性化合物があり、80~90%の脱灰、脱硫が可能との研究結果もある。

脱灰に関して過去の研究結果として以下の事例がある。

◇アーモンドの殻を室温で H_2SO_4 、NaOH、 H_2SO_4 等の酸性・塩基性溶液で数回処理した所、重量減少を抑えた上で灰分の低減化が達成できた。

◇サトウキビの絞りカスを脱灰水リーチング、塩酸を用いたマイルドな酸処理、フッ化水素水溶液を用いた酸処理の異なる 3 つの事前処理を行うことにより、有機成分の変質と無機成分の選択的除去により熱分解後の製品成分の変化が確認された。フッ化水素水溶液によるマイルドな事前処理によりバイオマス中の灰分が効果的に減少できたことによる。

◇木炭の反応性に関して熱処理と酸洗浄効果を多様な塩酸濃度で調査し最適リーチング条件を調査した所、無機鉱物（灰分）の減少と焼成後の炭素構造改質の影響で大幅

製鉄用バイオマス炭材の可能性

な反応性の抑制が確認された。

◇熱分解プロセスの技術的・経済的な指標を改善させるリーチング条件を評価する目的で松、サトウキビの搾りかす、麦わら等のバイオマス中のアルカリやアルカリ土類金属を熱分解処理で除去する試みを実施され、脱灰プロセスが最終製品歩留まり改善に効果があることが確認された。

◇水洗処理が3種類のエネルギー作物の熱分解特性、反応性、反応速度に与える影響を調査した所、灰分中のカリウム、燐分、硫黄分、塩素の低減効果が確認された。

◇6種類のバイオマス（麦わら、稲わら、トウモロコシの茎、綿花の茎、くいのみ、もみ殻）を異なる温度での脱イオン化水で水洗した所、カリウム、硫黄分、塩素が効果的に除去できることが確認された。又、水温が高い程、カリウム、非晶質シリカ、灰分の除去効果が高まることが全てのバイオマスで確認された。

4.4 鉍物添加物の利用

脱灰と真逆の手法が半炭化バイオマスの圧密成型の工程で鉍物添加物を配合する手法である。鉍物は化学反応の活性化エネルギーに重要な影響を与えるので、SCBCの反応性や製鉄プロセスの動力学的、熱力学的パラメーターに変化を与えることが可能である。

鉍物添加物の利用に関して過去の研究結果として以下の事例がある。

◇プラスに帯電した触媒酸化物や塩基物（Fe、Ca、Mg、Cu、Ba、Mn）が増えることにより初期の反応温度と活性化エネルギーが低下する一方、マイナスに帯電した触媒酸化物や塩基物（Si、Al、Ti）が増えることで初期の反応温度と活性化エネルギーが上昇する。

◇塩化亜鉛は炭化バイオマスの空隙率、比表面積、吸着能力を増やす目的で使用されるが、亜鉛がコークスの反応性や強度に与える影響を調べた所、亜鉛がコークスのCRI（Coke Reducibility index）を上昇させ、CSR（Coke Strength after Reaction）を低下させることが判明した。この結果は別の研究で判明した亜鉛の添加物の多くが製鉄炉操業に有害な影響を与え、使用が推奨されない結果と一致する。

◇触媒ガス化反応はガス化初期温度を低下させ、CRIが上昇し、CSRは低下する。アルカリ蒸気を用いた触媒反応でCRIが上昇し、活性化エネルギーが低下し、ガス化速度が上昇する。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

◇Fe と Ca は高炉の熱保存帯での CRI を上昇させる有望な触媒となる。コークス製造プロセスで適切な選択をとることにより、より低い反応温度で CSR が上昇し、より均質な反応条件に改善させる効果がある。

◇金属塩基物や酸化物を用いた炭化バイオマスの改質効果に関する研究がある。この改質法により、炭化バイオマスの吸着能力、触媒強度、磁性等の物性が改善する。この結果、鉱物添加物を用いることにより製鉄プロセス中の諸反応の動力学的、熱力学的パラメーターに直接影響を与えることが可能となる。この手法では、鉱物触媒インデックスが電炉、焼結プラント、熔融還元炉で炭化バイオマスブリケットの反応性に対する鉱物添加物の効果や製鉄プロセスでの動力学的、熱力学的パラメーターに与える影響を判断する指標として用いられている。

5. EU における SCBC を用いた製鉄法の研究開発

EU における TORERO、GreenEAF、GreenEAF2 等の研究開発活動に関して既に触れているが、これ以外にも EU の資金提供による製鉄プロセスで SCBC を活用する現在進行中の研究開発プロジェクトが存在する。これらのプロジェクトは環境への影響を軽減させる画期的な新技術の開発だけでなく、SCBC の新たな活用方法を示す意味でも重要な意味を有している。

その内の一つに ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking) プロジェクトがあり、下記に示す複数の技術開発より構成されている。

- (a) 高炉炉頂ガスリサイクリング
- (b) 新熔融還元法 (HIsarna)
- (c) 高度直接還元鉄法
- (d) 鉄鉱石電解法
- (e) CCS
- (f) 水素還元法

上記新技術の採用により粗鋼生産当たりの CO₂ の排出量は少なくとも 50%は削減可能となる。尚、上記新技術の内、炉頂ガスリサイクリングや高度直接還元鉄法は既に商用化されている。図-13 に ULCOS を構成する技術のレイアウトを示す。

製鉄用バイオマス炭材の可能性

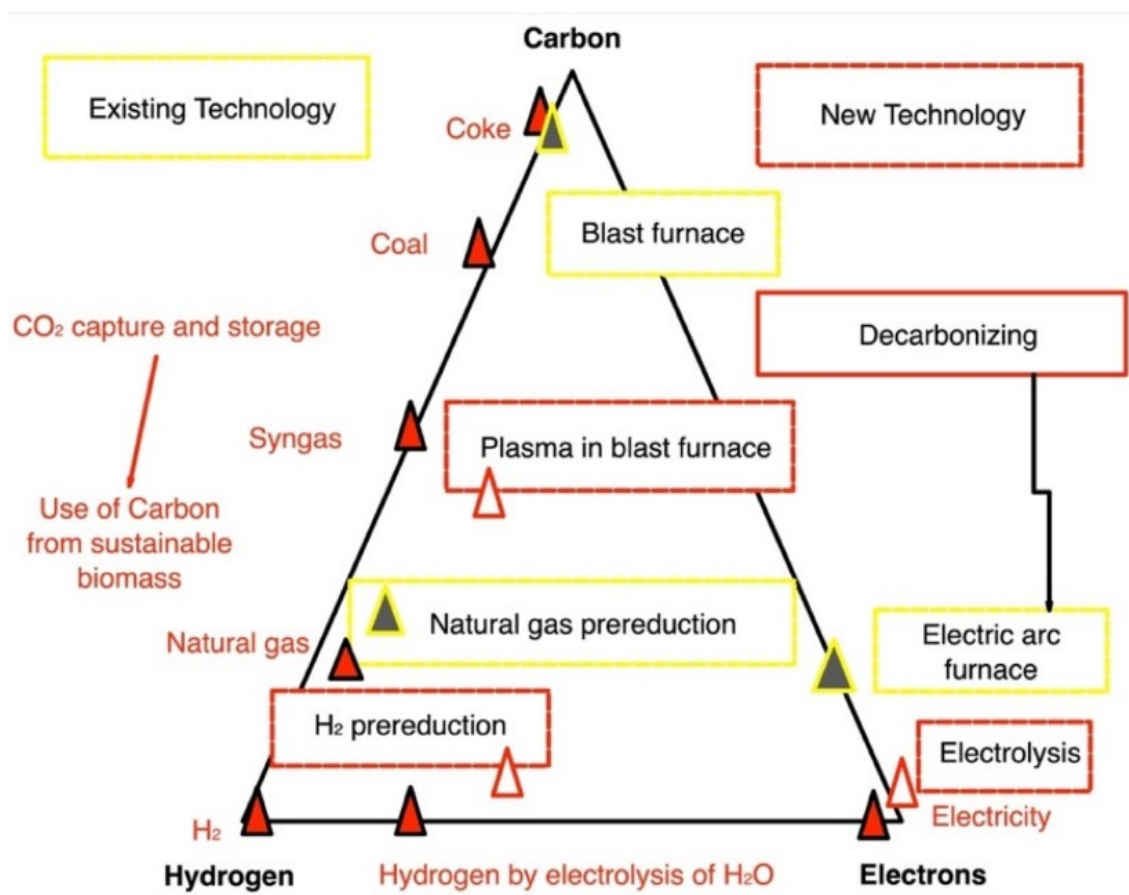


図-13 : ULCOS プロジェクトの技術構成レイアウト (Lina Kieush et al., 2022)

ULCOS プロジェクトではバイオマスの活用も検討されている。その中でも**木炭**は通常の還元材対比**低硫黄分、低灰分**の観点で**有望な還元材**である。ULCOS プロジェクト内で木炭を用いて新技術活用の最適化の探求が一つの課題となっている。本プロジェクトではバイオマス炭材の活用が現状では進行しておらず、製鉄プロセスでの SCBC の活用に関する更なる研究が期待されている。全欧州で 30 カ所の製鉄プラントのバイオマス炭材需要を満たすためには計算上 **15%のバイオマス炭材による置換え**が求められる点に留意すべきである。従い**欧州でのバイオマス炭材の戦略的活用**という課題を解決する為には更なる研究、検討が必要となる。

別の開発プロジェクトで Tata Steel Netherland が幹事として主導する **LoCO₂Fe (Development of a Low CO₂ Iron and Steelmaking Integrated Process Route for a Sustainable European Steel Industry)** プロジェクトがあり、CO₂ 排出量の少なくとも 35%削減を目指している。本プロジェクトでは **HiSarna 製鉄法を用い石炭の一部をバイオマスで代替**することにより CO₂ 排出量の削減が可能となる。加えて本製鉄法は還元炉内のエネルギーバランスを調整し、エネルギー効率の極大化を図ることにより石炭消費

製鉄用バイオマス炭材の可能性

量の削減が可能となっている。更に HISarna 法と CCS を併用することにより CO₂ 排出量が 80%削減可能となる。

別の EU 基金プロジェクトとして、ドイツの DBFZ 社が幹事として推進している SECTOR (Production of Solid Sustainable Energy Carriers) プロジェクトがある。本プロジェクトでは燃料として木質系や農作物、更にはエネルギー作物の半炭化バイオマスに焦点を当てた研究を行っている。本プロジェクトでは半炭化バイオマスの輸送、貯蔵、ハンドリング性を評価する分析方法や評価方法の開発やペレットやブリケット等の圧密成型・造粒技術も研究対象となっている。但し、本プロジェクトでは石炭火力、石炭ガス化、小規模燃焼プラント等での混焼材として半炭化バイオマスのみが検討対象となっている。本プロジェクトの一つの成果は半炭化技術が商業的に適用可能との結論であり、現行直面する半炭化バイオマスの使用制限の課題を克服することが期待されている。

TORERO プロジェクトに関しては前述しているが、本プロジェクトの最も重要なインパクトは 2022 年 7 月に半炭化プラントが稼働し、ArcelorMittal の Ghent 製鉄所（ベルギー）で バイオ燃料（生産能力:80 百万リッター/年→CO₂ 排出量の削減効果は 150 千ト/年）と高炉での PCI 用石炭を代替可能な炭化バイオマス（生産能力:50 千ト/年→CO₂ 排出量の削減効果は 100 千ト/年）の生産体制が整備されたことである。

高炉操業で PCI 用の石炭をより環境に優しい炭材に置換える課題に対して、EU 基金プロジェクトとして IMPCO (Improved Coal Combustion under Variable BF Conditions) プロジェクトがスウェーデンの研究機関である SWERIM が対応している。そもそも IMPCO プロジェクトの目的は 代替炭材を用いて PCI 比を高めることで高炉内のコークス量を削減することにある。代替炭材として褐炭コークス、褐炭、石油コークス、半炭化バイオマスが検討され 半炭化バイオマス:20%、石炭:80%をブレンドした炭材を吹き込むことで高炉操業の最適化が図れることが判明した。

ACASOS プロジェクトはドイツの研究機関 BFI (Betriebsforschungsinstitut) が主導して 焼結プロセスでの粉コークスの代替炭材の探索を実施した。オリーブの壁孔、木質ペレット、ひまわり殻、高炉ダスト・スラッジ、無煙炭、石油コークスが事前処理を経て焼結プラントで試験された。木質ペレット（10%配合）やオリーブ壁孔（5~15%）は焼結鉬の生産性を低下させ、更に焼結鉬の品質を劣化させたが、石油コークス（最大 30%）と無煙炭（最大 20%）の配合では焼結鉬の品質への影響が低かった。

焼結プロセスでの代替炭材の別の研究開発では TACOS (Towards a Zero CO₂ Sintering) プロジェクトがベルギーの研究機関である CRM (Center de Recherches Metallurgiques)

製鉄用バイオマス炭材の可能性

で実施されている。本研究開発の目的は焼結プロセス中の大幅な CO₂ や他の汚染物質の排出量の削減で、事前処理を含むバイオマスの代替使用が解決方法として採用され、その中でガス化、熱水変換、半炭化、熱分解が事前処理方法として用いられている。

RIMFOAM (Recycling of Industrial and Municipal Waste as Slag Foaming Agent in EAF) プロジェクトは SWEDIM が主導し、金属酸化物や炭化水素を含む産業廃棄物を電炉でのスラグフォーミング材として活用、評価するプロジェクトである。本プロジェクトではオリーブの種、おが屑ペレット、がバイオマス炭材として採用され、ArcelorMittal の Maizieres 研究所（フランス）で混焼され、従来の炭材を 20%の廃棄物で代替可能なことが判明した。スラグフォーミング機能が最も良かったのはゴム粉と石油コークスでおが屑ペレットの結果も良好であった。

現在進行中のプロジェクトとして RETROFEED (Implementation of a Smart Retrofitting Framework in the Process Industry towards its Operation with Variable Biobased and Circular Feedstock) プロジェクトがあり、装置産業におけるバイオマスベースの循環型原料の増進活用に焦点を当てている。特に電炉法による製鉄生産に特化した研究ではイタリアの Ferriere Nord 製鉄所で特注の炭化バイオマス吹込みシステムを開発、設置している。将来的には炭化バイオマスによるスラグフォーミング機能の促進能力や製鉄プロセス中の熱源効果の評価方法の確立が計画されている。

6. バイオマス炭材への代替による環境影響評価

バイオマス燃料は必ずしもカーボンニュートラルとは限らず、ライフサイクル評価では化石燃料対比、より高い温室効果ガスを発生させる場合もある。多くの研究結果でバイオマス燃料に伴うカーボンフットプリント（温室効果ガス排出量の CO₂ 換算指標）削減の可能性が示されているが、多様なリスク要因全てで環境影響の低減が確認出来るわけでは無く、幾つかのリスク要因に対する検討が必要となっている。第一にライフサイクルでの評価が確認される必要がある。この評価は LCA 手法によって遂行できる。バイオマス燃料のカーボンフットプリントは栽培、輸送、その後の処理工程（圧密成型、半炭化、鉍物添加等）等上流領域での影響が大きい。温室効果ガス排出量の大幅な軽減を図る為にこれらの上流工程の最適化が求められる。特に栽培過程ではエネルギーと物質の消費（例えば肥料の消費によりバイオマス燃料 1kg 当たり 0.14~0.55kg の CO₂ の追加排出量）と共に、著しい温室効果ガスの上昇（バイオマス燃料 1kg 当たり 0.6~4.0kg の CO₂ 排出量）を招く可能性のある土地使用と直接・間接の炭素貯蔵変化を伴っている。バイオマス原料の生産と加工ではカーボンフットプリントと共に他の評価要素での LCA 試算値の変動をもたらしている。製鉄プラントでのバイオマス燃料の使用に際しては多くの研究結果を踏まえた最適化が求められている。総合的な環境影響評価ではバイオマ

製鉄用バイオマス炭材の可能性

ス燃料導入に伴う生産性の低下や燃料消費量の増大等負の側面に関しても考慮しなければならない。即ち、1kgの化石燃料を置換える為により多くのバイオマス燃料を投入している現実を直視し、現場のプラント操業実績に基づいて（1:1では無い）置換比率を反映させる必要がある。

バイオマスの調達には農業残渣か栽培による。一般的に炭化バイオマスは化石燃料（約1億年）対比炭素サイクルが短い（5～10年）ので再生エネルギーに分類されるが、バイオマスの炭素サイクルはゼロではない。従い、製鉄プラントで使用されるバイオマスの調達の際には正確な評価が求められる。又、輸送距離をなるべく短縮する為にバイオマス調達の際には特定地域の選定が求められる。例えばマレーシアでは大半のバイオマス残渣が燃料、肥料、飼料等に活用されておらず、バイオマスコークスに加工できる可能性がある。又、スウェーデンやフィンランドではバイオマスを製鉄用の需要を満たすだけの十分なバイオマス資源が存在するとの分析結果もある。ブラジルは（製鉄用）木炭の世界的なサプライチェーンを構築できる重要なソースとなり得る。一方、（高炉法）一貫製鉄所で使用される化石燃料の47%を木炭に置換える為にはバイオマスプランテーション用に50～150百万haの用地が必要との試算結果もある。現在世界の植林用地の面積が264百万haである事実を考慮すると、かなりの用地がバイオマス栽培に必要となることが理解できる。現在持続的可能な手法で資源量と政策の2つの観点でバイオマス栽培の可能性がある地域を分析した所、カナダ、スウェーデン、中国、米国、フランスが最適国として選定された。一方で、（バイオマスの）収穫需要が高まれば、森林伐採、植林密度の高まり等、間接的な用地用途の変化が発生し、結果的に追加の温室効果ガスの排出を招く結果となる。

LCAでは負荷が（他のリスク要因に）移転するリスクを避けるために、カーボンフットプリントが減少する一方で他のリスク要因が拡大するので、異なる分野でのリスク要素の可能性も評価する必要がある。一般的にバイオマス炭材の製造工程、特に栽培過程で富栄養化や酸性化が増大するので、バイオマス栽培用の水使用には留意すべきである。

最後にバイオマスの調達性に関して、環境的、社会的観点からも検討すべきである。例えば、バイオマスが専用栽培（プランテーション）で調達される場合は他用途（食用や再生エネルギー生産）の用地との競合に留意すべきであり、バイオマスが農業残渣より調達される場合は、残渣を他の用途で活用した場合の総合的な環境影響評価（例えば残渣を焼却してエネルギーとして回収するケースや埋立てメタンを回収するケース等）も重要となる。結果としてのLCAは想定されたモデルとは異なる用途と対比できる。

バイオマス炭材の総合的なLCAは潜在的な環境リスクを他の新機軸技術（例えば水素

製鉄用バイオマス炭材の可能性

を用いた技術)との対比で示すことが可能である。

7. SCBC 使用拡大に向けたデジタル化の役割

多くの製鉄プロセスは原料処理量、エネルギー需要、環境条件や制約の観点で非常に複雑でチャレンジングである。従い、同プロセスは製品品質、エネルギー効率、排ガス規制、労働環境保安衛生面での目標に向かい絶え間ない技術進化に基づく最新の計測・制御システムが導入されている。これらのシステムは SCBC の使用を前提とせず、標準的な原料を前提に設定されているが、仮に SCBC が投入された場合でも安全基準と排出基準に対応可能である。但し、SCBC の最適使用を追求する為に使用強度を高める場合には更なる改善が必要となろう。例えば焼結プロセスに関する最新の研究ではバイオマス等の代替燃料を使用した際の焼結鉱生産性の極大化、エネルギー消費量や環境影響の極小化に対応できるプロセス制御システムの導入が課題となっている。AI により制御されたセンサー技術等の最新鋭のプロセス計測・監視技術が代替バイオマス炭材の使用拡大を可能とする支援プロセスと位置付けられている。

最新鋭のモデリングやシミュレーション技術・装備が初期段階の技術・事業性評価や最も有望な用途分野で使用され、代替バイオマス炭材の使用拡大が促進される。例えば電炉法において数量バランス・エネルギーバランス、平衡熱力学、関連反応に基づくプロセスモデルが異なる操業条件や修正プロセスにおけるプロセスや製品に与える効果や環境・エネルギー影響度の評価で既に使用されている。然しながら、これらの技術は電炉での非化石燃料や再エネルギーの使用時の評価には適用されていない。更に製鉄業で爆発的に普及するデジタルプロセスは大量のプロセスデータを提供し、上記目的でプロセスモデリング・シミュレーション用に開発されている。この点でプロセス知識とデータに基づく機械学習技術を組合せたハイブリッド型物理特性誘導機械学習技術が有望である。

8. 結語

本稿では製鉄プロセスでのバイオマス由来の持続可能な資源である SCBC の活用可能性の概観を示してきた。半炭化バイオマスに関する研究やバイオマス炭材の製鉄プロセスへの包括的な活用策には解決すべき問題が残っているものの、本稿では SCBC 製造の主要な炭素源として半炭化バイオマスの活用法に関して議論してきた。半炭化バイオマスの物性には制約があるものの、一つの**有望な活用法がバイオコークスの製造**である。コークス製造時の**半炭化バイオマスの配合比率はその用途に応じて調整**する。既存の化石燃料の一部ないしは全部を SCBC で置換えた製品の製造法や活用法は研究や実践で技術的に確立している。SCBC の活用は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熔融還元/転炉法の4つの製鉄法で既に検討されている。高炉法用炭材

製鉄用バイオマス炭材の可能性

の要求品位は最も厳格であるが、バイオコークスを鉄スクラップ/電炉法、直接還元鉄/電炉法、熔融還元/転炉法で活用することは極めて有望である。

SCBC の改質方法に関しては①（半炭化後の）炭化、②圧密成型、③（脱灰による）改質、④鉱物添加の手法があり、多くの研究実績がある。③と④は真逆の手法であるが、両者共に製鉄プロセスの動力学的、熱力学的パラメーターに影響を与えることが可能である。

EUにおける完了済、並びに現在進行中の研究結果によると SCBC は既存の燃料や還元材の有望な代替品であるだけでなく、一部の製鉄プロセスで既に実証された製品であることが判明している。但し、これらの研究を精査すると、半炭化バイオマスやバイオコークスの包括的な活用方法に関しては上記 4 つの製鉄法全てで検討されている訳では無いことが理解できる。製鉄プロセスの観点では、SCBC の包括的な活用は既存の製鉄技術に適合することにより革新的なアプローチとなり得る。EU の製鉄業界では SCBC の活用が製鉄プロセスでの脱炭素化を推進させ、同業界でのゼロエミッションを 2050 年までに目指す気候温暖化対策の目標を達成する為の一つの技術的突破口と位置付けられている。SCBC の社会実装化は GSP (Clean Steel Partnership→鉄鋼業界や同分野の専門研究者より構成される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) により強力に推進されている。GSP では EUROFER (European Steel Association) の協力を仰ぎ、ESTEP (European Steel Technology Platform) が主要な役割を果たしている。GSP により策定された工程表、SRIA (Strategic Research and Innovation Agenda) では SCBC が将来の鉄鋼産業が持続可能な脱炭素化を達成する為の重要なエネルギー資源の一つと位置付けられている。GSP が策定した SRIA に基づき、製鉄プロセスにおける今後の SCBC の量的、質的活用を高めるために同分野での戦略的研究開発が重要となる。

本稿では多様な製鉄プロセスにおけるバイオマス炭材の包括的な活用に関する学術的な開発実績と今後の研究開発の方向性に関する概要を説明してきた。製鉄用バイオマス炭材活用に関する研究開発は従来バイオコークス製造、焼結鉱、炭材内装塊成鉱、PCI (高炉吹込み)、高炉プロセスで活発に実施されてきたが、今後は熔融還元プロセス、電気炉の分野でも新たな最適解が導かれる様、更なる研究開発が期待される。最後に製鉄プロセスでのバイオマス炭材活用の発展と実装化の可否は持続的且つ十分な自国内バイオマス資源、サプライチェーン機能、更にそれを支える政策方針等の前提条件に強く委ねられていることを申し添える。

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.
- 松井良行 (2003), 新製鉄プロセスと新技術の萌芽, 日本鉄鋼協会 西山記念技術講座 (2003年 11 月).

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。