

(解説)



CN社会実現に貢献するカーボンリソース転換・利用技術

木下 繁^{*1}・糸戸貴洋^{*2}・堺 康爾^{*1}

Carbon Resource Conversion and Application Technology Contributing to Realization of Carbon-neutral Society

Shigeru KINOSHITA・Takahiro SHISHIDO・Koji SAKAI

要旨

カーボンニュートラル実現には、CO₂排出量削減やCO₂固定化はもとより、石炭やバイオマスなどのカーボンリソースを循環利用することも重要である。当社グループは、これらのカーボンリソースを燃料製品や機能性炭素材へと循環利用しやすい形態へ転換する技術や、サステナブルな社会に必要な環境配慮型製品として安全に利用するための技術の開発に取り組んでいる。本稿では、このカーボンリソース転換・利用技術の概要およびアプリケーション事例について紹介するとともに、カーボンニュートラル社会実現に向けた技術開発の将来展望について解説する。

Abstract

To achieve carbon neutrality, it is essential not only to reduce CO₂ emissions and sequester CO₂, but also to recycle carbon resources such as coal and biomass. The Kobelco Group is actively developing technologies to convert these carbon resources into easily recyclable forms, such as fuel products and functional carbon materials, as well as technologies to safely use them as environmentally friendly products required for a sustainable society. This paper introduces an overview of the technologies for the conversion and utilization of these carbon resources and provides application examples. It also discusses the future prospects of technology development aimed at achieving a carbon-neutral society.

検索用キーワード

カーボンニュートラル, サステナブル, 石炭, バイオマス, 燃料, 機能性炭素材, 溶剤加熱抽出, プロセス設計

まえがき = 当社グループは2030年目標として生産プロセスにおけるCO₂排出量30~40%削減、2050年ビジョンとしてカーボンニュートラル（以下、CN）への挑戦と達成を掲げ、低炭素社会や循環型社会への取組みを総合的に進めることにより、“SDGs達成・サステナブル実現”を目指している。

その達成に向けては、『再生可能エネルギー（太陽光・風力・地熱・バイオマスなど）利用』や『非化石燃料（水素・アンモニアなど）利用』のようにCO₂排出量を削減すること、『二酸化炭素回収・貯留：CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）』のように排出されたCO₂を分離回収し、特定の空間内に閉じ込めることなどのアプローチに加え、人々の生活に必要な炭素資源をリサイクルによって賄い、化石資源の新規採掘量を抑制する『炭素資源循環利用』も重要なアプローチの一つである。

この炭素資源利用の転換期において、当社はコア技術の一つである『カーボンリソース転換・利用技術』を活用して、石炭やバイオマス資源（木質系、下水汚泥、食品廃棄物、農業残渣系など）、産業廃棄物（プラスチック、タイヤなど）などの炭素資源（カーボンリソース）を機能性炭素材（炭素繊維、電極材など）に転換して利用する取組みを推進している。

本稿では、カーボンリソース転換・利用技術の開発経

緯および概要を述べ、そのアプリケーション事例について紹介するとともに、サステナブル社会実現に向けた技術開発の将来展望について解説する。

1. 当社における石炭技術開発の経緯

当社は、日本におけるエネルギーセキュリティ確保の観点から、未利用の低品位資源を改質して原料炭代替や燃料として利用するプロセスの開発に80年代から取り組んできた（図1）。ここで培われた技術が現在の「カーボンリソース転換・利用技術」の根幹となっている。そこで、本章では、当社における石炭技術開発の経緯に触れつつ、おのおのの技術の特徴について述べる。

褐炭液化（Brown Coal Liquefaction；BCL）

第二次石油危機（1979年）を契機に石油代替燃料の開発機運が高まる中、当社は、コークス製造用原料炭の不足・価格高騰への対応策として取り組んでいた豪州ビクトリア褐炭からの溶剤精製炭（Solvent Refined Coal；SRC）製造技術を褐炭液化技術へと発展させた。

BCLは、褐炭を有機溶剤中で加熱脱水し、鉄系触媒と水素を用いて液化粗油に転換し、さらなる軽質化と精製処理を行い、ガソリンや灯油を得るプロセスである。豪州褐炭液化プロジェクトでの実証を通じて、高温・高圧スラリーハンドリング技術や油中脱水技術、水

*1 技術開発本部 機械研究所 *2 技術開発本部 機械研究所（現 技術開発本部 開発業務部）

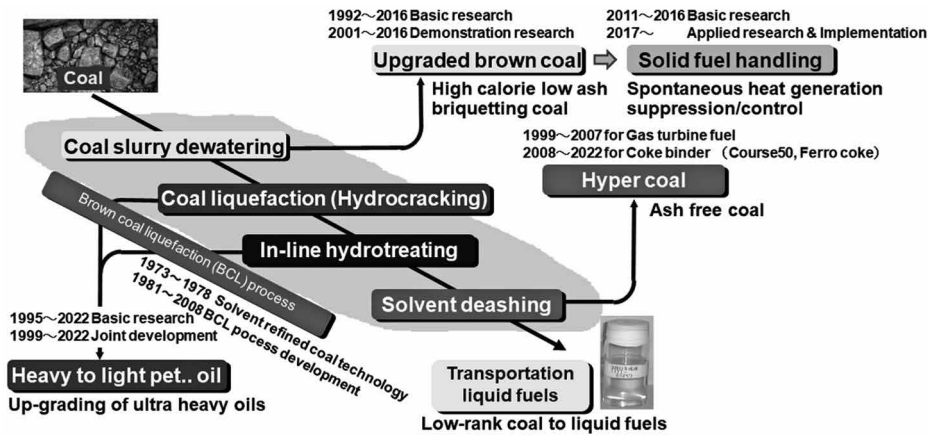


図1 石炭技術開発の経緯
Fig.1 Background of coal technology development

素分解技術，水素化処理技術，溶剤脱灰技術などを構築し，1990年代以降，これらの要素技術を応用展開した新しいプロセス開発も積極的に進めてきた¹⁾。

改質褐炭 (Upgraded Brown Coal ; UBC)

2000年代に入ると，新興国の台頭とともにエネルギー需給量が大幅な増加傾向となり，石炭火力発電所で利用されるボイラ炭（瀝青炭（れきせいたん））の価格高騰に見舞われた。

当社は，褐炭や亜瀝青炭などの低品位炭を油中で脱水改質することによって発熱量および安定性を瀝青炭と同等レベルにまで高めるプロセスを開発した²⁾。さらには，安価かつ安定供給の実現に向けて取り組んだインドネシアでの600 ton-製品/dayの大型実証試験を通じて自己熱再生型油中脱水技術，粉体ハンドリング技術（粉砕，搬送，成型など），固体燃料評価技術，および石炭改質プロセス設計・制御技術などを獲得し，実用性を備えた技術へと高度化に取り組んだ³⁾。

ハイパーコール (Hyper Coal ; HPC)

2000年代半ばには，世界的粗鋼生産量の増加に伴うコークス用原料炭価格の高騰に加え，中長期的には良質な粘結材資源の枯渇も懸念され，粘結炭使用量の削減や，従来はコークス材としての適用が困難とされてきた劣質炭の有効活用が課題と認識された。当社は，無灰かつ優れた軟化溶解性を有するHPCに着目し，ガスタービン用発電燃料の開発からコークス用粘結材の開発に転換した。

HPCは，石炭を溶剤中で加熱抽出（石炭の一部が溶解）して溶剤に可溶する有機成分と不溶な無機成分とを固液分離し，溶剤可溶有機成分から溶剤を除去して得られる無灰炭であり⁴⁾，小規模ラボ試験からベンチプラントでの連続プロセス実証を通じ，高温・高圧スラリーハンドリング技術や溶剤加熱抽出技術，沈降分離技術を強化した。

固体燃料ハンドリング技術

低品位炭のように高O/C比（石炭中に含まれる酸素と炭素の割合）や高比表面積を有する酸化特性の高い石炭は，瀝青炭と比較して自然発火しやすい傾向にある。当社は，低品位炭の自然発熱抑制という高難易度課題に対し，その発熱メカニズムを把握し，石炭の活性度を低

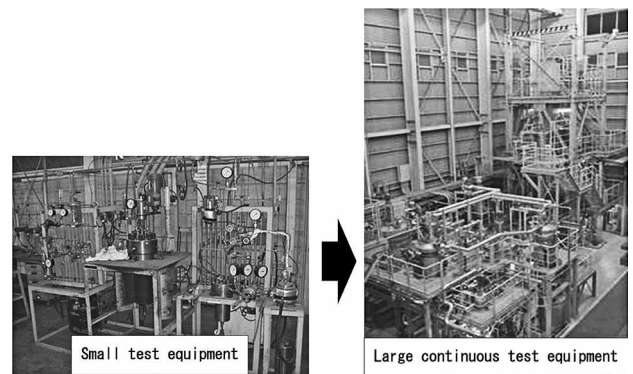


図2 高温高圧試験設備（試験インフラ一例）
Fig.2 High temperature and high pressure test facility (example of test infrastructure)

減させるエージング（低温酸化）技術やパイル貯炭時の石炭温度を予測するパイルシミュレーション技術⁵⁾，自然発熱特性評価技術を開発した⁶⁾。

本技術は，当社石炭だき火力発電所が保有する石炭サイロでの発熱挙動を予測できるシミュレーションモデルへと改良され，実現場への適用を進め，新規銘柄の導入可否や運用方法提案への活用が可能となった。

プロセス開発を支える試験インフラ

当社は，高温高圧試験も対応可能な複数種の試験設備（図2）とオペレーション人材を強みとし，プロセス開発のアイデアを机上検討／ピーカ試験から小型試験を経て実証レベル（ベンチ／パイロット）にスケールアップするまでの諸検討を行い，プロセス全体最適化やプラント概念設計検討を進めてきた。このほかにも，粉碎性評価装置や熱分析機器，物理分析機器などを備え，プロセス開発（製造技術）から製品の物性評価までを一貫して行える試験インフラを構築し，現在はカーボンリソース転換・利用技術の基盤として活用している。

2. カーボンリソース転換・利用技術

石炭や石油などの化石資源は，エネルギー用途に利用されるほかに，吸着材，プラスチック，合成繊維，合成ゴム，塗料など様々な製品や産業分野の原料としても利用されている。しかしながら，これらの物質は，循環して再利用されるものもあるが，最終的には焼却処理され，その場合はCO₂が排出される。サステナブル社会実

現に向けては、エネルギー・燃料資源の脱炭素化のほかに、こうした製品や産業分野の原料の脱炭素化も求められる。

当社ではこれまで培った『カーボンリソース転換・利用技術』を活用して、バイオマスなどの化石由来ではない炭素資源を、発電燃料やコークス、機能性炭素材に転換する取組みを進めており（図3）、本章では、具体的な開発事例の一部を紹介する。

2.1 炭素繊維（カーボンファイバー）

炭素繊維とは炭素原子を集めた繊維であり、PAN系（アクリル繊維由来）とピッチ系（石炭、石油由来）の二種類が存在する。一般的に、炭素繊維は「鉄と比較して比重で1/4、比強度で10倍、比弾性率が7倍」という特徴を有し、航空機や自動車の軽量化によるCO₂排出量削減や電気自動車の走行距離延長などに貢献可能な素材として位置づけられている。

石炭ピッチ系炭素繊維は、コークス製造（石炭乾留）時に得られる石炭ピッチを精製し、液体と固体の中間的物質に改質したものを原料とし、溶融紡糸法により得られた繊維を炭素化したものであり、リサイクル面とコスト面でそれぞれ課題を有している。

当社は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）において、京都大学が提案した『低品位炭とバイオマスのタイ国におけるクリーンで効率的な利用法を目指した溶剤改質法の開発』に参画し、HPCプロセスを用いたバイオマス原料への適用検討に取り組んだ。その結果、タイ産の低品位炭およびバイオマス廃棄物（稲わら）の原料特性に応じた加熱処理を行うことにより、所定の溶剤抽出物を得るとともに、自生留分（熱分解過程で生成する液体）を抽出溶剤として利用することで抽出率が向上する結果を得ており、本技術のバイオマスへの適用可能性を確認した。

また、京都大学では、得られた溶剤抽出物を原料に、既存の炭素繊維製造方法にて市販の炭素繊維と同等の強度や表面積などを有する炭素繊維を製造できることを確認した⁷⁾。本技術により得られたバイオマス由来の溶剤抽出物は、炭素繊維原料としての適用可能性が認められ、次節で述べる電極材用途などに展開している。

2.2 電気二重層キャパシタ

太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギー由来の電力平準化などの用途への利用が期待されている電気二重層キャパシタ（以下、EDLC）は、電解液と電極表面に電気二重層を形成し充放電を行う蓄電デバイスである。エネルギー密度はリチウムイオン電池より劣るものの、長寿命や高速充放電可能といった特徴を有している。その容量は電極表面特性に大きく依存するため、電極材料には高い比表面積を有し、電気伝導性を示す材料が好ましい。

当社は大分大学と共同で、HPCから数nm以下のウルトラミクロ孔に富んだ細孔構造を有する多孔質炭素（図4）を得る技術を開発した。本技術は、HPCを有機溶媒（ピリジンなど）に溶解させて得られたHPC溶液

をHPC溶解性の乏しい水など（貧溶媒）に加え、瞬時に炭素前駆体を沈殿析出させた（以下、沈殿法）後に不融化処理と炭素化処理を行うものであり（図5）、薬剤などによる賦活処理を必要としないことが特徴となっている。この多孔質炭素粉末を用いたEDLC電極材を試作し、その充放電特性を評価した結果、市販品（活性炭）よりも高容量を有し、多孔質炭素粉末のEDLC電極としての利用可能性を見出した⁸⁾。

この多孔質炭素粉末の「比表面積が大きく、ウルトラミクロ孔が豊富」という特長を活かし、例えば、処理条件により細孔径を制御し、そのサイズに応じたガス種を選択分離することが可能なガス分離材（分子ふるい炭素）などへの用途展開を検討している。また、炭化度が低く、酸素含有量の多いバイオマス資源を用いた場合、より比表面積の大きい多孔質炭素粉末を得られる可能性があり、吸着性能が高く、かつ、再生可能な材料としての開発も進めている。

2.3 高炉コークス用粘結材（バインダ）

先に述べたような機能性炭素材を用いた炭素循環利用によるサステナブル社会実現に向けた取組みに加え、CNの観点からも、既存製鉄プロセスからのCO₂排出量

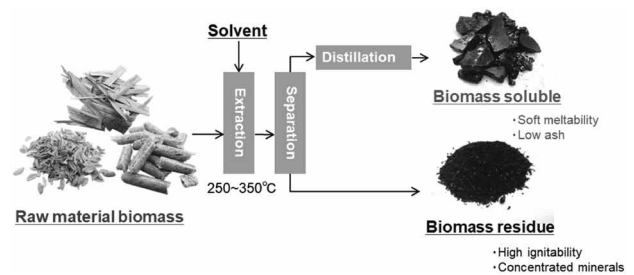


図3 カーボンリソース転換・利用技術の要素技術（一例）
Fig.3 Example of elemental technology for carbon resource conversion and application technology

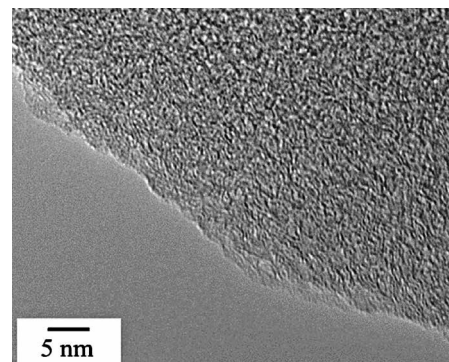


図4 沈殿法多孔質炭素のTEM画像
Fig.4 TEM image of precipitated porous carbon

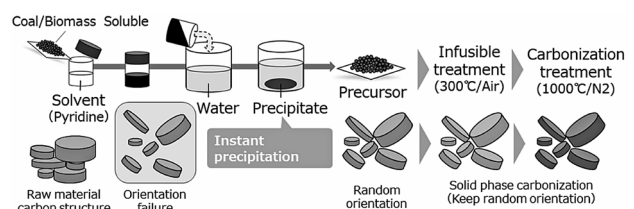


図5 沈殿法による多孔質炭素製造方法
Fig.5 Porous carbon production method by precipitation method

削減も重要である。ここでは、低還元材比操業に求められる高強度コークスの開発事例を紹介する。

鉄鉱石を還元して銑鉄を製造する高炉では、鉄鉱石とコークスが交互に層をなすように炉内へ供給される。コークスは、鉄鉱石の還元材と熱源としての機能のほかに、高炉内の通気性を確保するスペーサとしての役割を担っている。とくに、銑鉄の製造効率向上やCO₂削減の観点から低還元材比での操業が求められており、コークス投入量を低減しても炉内通気性を十分に確保できる高強度コークスの適用が重要である。

高炉用コークスは、粘結性の高い強粘結炭から低い非微粘結炭まで様々な原料炭を適宜配合して製造されるが、高強度コークスを製造するには、粘結性や炭化特性に優れた強粘結炭を多く配合する必要がある。しかしながら、強粘結炭は高価なうえに資源的制約もあり、非微粘結炭などの劣質炭の配合比率を上げ、かつ、要求強度を満足することが重要な課題であった。

当社が開発したHPCは図6のような炭素化合物の集合体(分子量:300~1,000程度)と推定され⁹⁾、溶剤抽出物であることから分子同士の結合力が弱く、優れた軟化溶解性を発現するという特徴を有する。HPCを添加すると配合炭の流動性が向上するため、一定量の一般炭を配合しつつ実用に十分な強度を有するコークスを製造することができる。また、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの委託を受け、国内鉄鋼関連会社4社が参画したCOURSE50¹⁰⁾では、高炉内における鉄鉱石水素還元を実現させるために必要な高強度コークス製造におけるコークス粘結材としてHPCを用いた低反応性高強度コークス製造技術を確認し、実コークス炉でのコークス製造試験および性能評価において、所定の目標強度を達成した¹¹⁾。

また、コークス製造工程におけるCO₂排出量を削減する方法としては、コークス炉の乾留温度低下、あるいは、原料炭にバイオマス配合したコークス利用が考えられるが、いずれの場合においても、コークス強度の低下抑制が重要な課題の一つである。このような課題を解決すべく、例えば、石炭とバイオマス種(バイオマス炭化物含む)との相性を考慮した配合設計や事前処理(粉碎、アルカリ除去など)の実施、バイオマスから得られる溶剤抽出物のコークス用粘結材利用などに取り組んでいる。

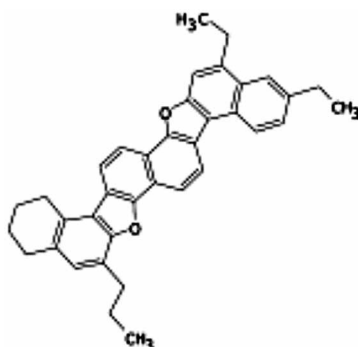


図6 HPCの推定分子構造

Fig.6 Estimated molecular structure of soluble fraction of HPC

3. サステナブル社会実現に向けた技術開発の将来展望

本章では、第1章や第2章で述べた技術開発を通じて獲得/強化してきた工業化プロセス設計基盤(インフラ設備、オペレーション人材、プロセス設計・評価手法など)を活用した新たな取り組み例を紹介する。

3.1 サステナブル社会実現に向けたCN化への対応

経済産業省のカーボンリサイクルロードマップ(2023年6月策定)では、2030年の早期普及実現を目指し、水素が不要な技術として鉱物利用(コンクリート、炭酸塩など)が位置付けられている¹²⁾。

製鉄プロセスからの副産物である製鋼スラグには鉄鋼材料の不純物(P, Sなど)を除去するために必要なCaなどのアルカリ成分が多く含まれている。これらのアルカリ成分はCO₂と反応しやすいことから、CO₂固定化に有用な材料であることに着目し、当社グループでは、CNに寄与する技術として、NEDO委託研究『カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発』において、製鋼スラグを活用したCO₂固定化技術(以降、スラグ炭酸化技術)の開発を進めている。スラグ炭酸化技術(図7)とは、製鋼スラグに含まれるCa成分を溶媒側へ抽出し、Ca成分を含む溶媒にCO₂ガスを吹き込み、炭酸カルシウム(CaCO₃)としてCO₂を固定化する技術であり¹³⁾、本プロセスで得られる製品として炭酸カルシウムとCa抽出後スラグがある。

現在、スラグ処理量100kg/バッチでの試験を積み重ね、スケールアップデータの取得と製品サンプルの用途探索を進めている。炭酸カルシウムは、国内既存市場が480万トン規模であり、製紙や樹脂、塗料、建材などが主な用途である。本プロセスにて得られる炭酸カルシウムはCO₂フリーとして位置づけられ、お客様製品の原料として利用いただくことによりCO₂排出量の少ない製品としての活用が可能である。いっぽう、Ca成分抽出後スラグは路盤材などの既存用途での活用を見込んでいる。

3.2 サステナブル社会実現に向けた資源循環への対応

プラスチック業界においては、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律(環境省、2022年4月施

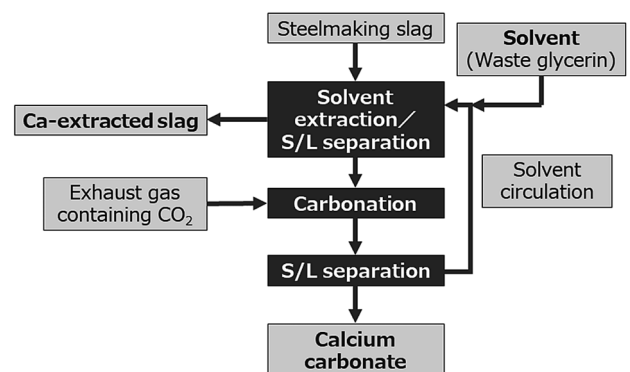


図7 鉄鋼スラグへのCO₂固定化技術のブロックフロー図¹³⁾

Fig.7 Block flow diagram of CO₂ fixation technology for steel slag

行)¹⁴⁾」が施行され、航空機業界においては、国土交通省が日本のエアラインによる燃料使用量の10%を持続可能な航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel ; SAF) に置き換えるという目標を設定するなど、各業界において炭素資源の循環利用が求められている。

このような動きに対し、当社が保有する加熱ろ過抽出技術や水素化分解/水素化処理技術などを活用し、廃プラや廃タイヤなどの精密熱分解制御によるポリマからのモノマ化、基幹物質への転換、バイオマス (木質、農業残渣など) のガス化、水素化処理&フィッシャー・トロプシュ (Fischer-Tropsch ; FT) 合成によるSAF製造技術の調査を進めている。

この他にも、パームヤシの空果房 (Empty Fruits Bunch ; EFB) の半炭化技術や水熱炭化技術による燃料化検討やコーヒーかすの油中脱水による燃料化などの知見をもとに、様々なバイオマス資源を溶剤抽出物や炭化物に転換し、製鉄プロセス用途 (還元鉄製造プロセス用浸炭材や電気炉加炭材など) への適用可能性を検討している。当社製鉄プロセスのCN化実現に向け、再生可能な固形炭素資源を活用し、CO₂排出量削減に貢献していきたい。

むすび= 当社は、コア技術の一つである『カーボンリソース転換・利用技術』を活用して、石炭やバイオマスなどのカーボンリソースから機能性炭素材料に転換して利用する取組みを推進し、サステナブル社会実現に貢献していく。

さらには、これまで当社が培ってきた工業化プロセス設計基盤を活用し、サステナブル社会実現に向けた炭素資源の循環利用における新たな取組みを創出していく。

参 考 文 献

- 1) 安室元晴ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol. 60, No.1, p.55-61.
- 2) 杉田 哲ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.2, p.23-26.
- 3) 木下 繁ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.71-75.
- 4) 奥山憲幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.2, p.15-22.
- 5) 朴 海洋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2014, Vol.64, No.1, p.22-27.
- 6) 池田志保ほか. 第59回石炭科学会議. 2022
- 7) 三浦孝一ほか. 国際科学技術共同研究推進事業終了報告書, 低品位炭とバイオマスのタイ国におけるクリーンで効率的な利用法を目指した溶剤改質法の開発, Copyright 2018 JST
- 8) 大隈翔太ほか. 第48回炭素材料学会年会. 2021
- 9) 濱口眞基ほか. 炭素TANSO No.257, 2013, p.149-156.
- 10) COURSE50ホームページ : <https://www.course50.com/>, 2023.8.7
- 11) 穴戸貴洋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.62-66.
- 12) 経済産業省) カーボンリサイクルロードマップ : https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_01.pdf, 2023.8.7
- 13) 神戸製鋼グループ プレスリリース : https://www.kobelco.co.jp/releases/1209639_15541.html, 2023.8.7
- 14) 環境省ホームページ) プラスチックに係る資源循環促進法 <https://plastic-circulation.env.go.jp/>, 2023.8.7