

2.1.5 バイオマス発電・利用

(1) 研究開発領域の定義

本領域はバイオマスのエネルギー利用に関わる領域である。バイオマスを燃料や電力等の二次エネルギーに利用する技術とシステム、バイオマスから複数形態のエネルギーや副産物として多様な製品を生産する技術、バイオリファイナリーとしてバイオガス・液体燃料のコプロダクション、熱電併給コジェネレーション、ならびにカーボンリサイクルやバイオマスによるカーボン除去や貯蔵を対象とする。バイオマスには廃棄物系バイオマスも含める。なお、本領域は、バイオマスから化学品などの物質生産に特化した研究開発は対象としていない。

(2) キーワード

非可食バイオマス、第二世代バイオ燃料、第三世代バイオ燃料、バイオマス発電、バイオガス製造、バイオマスコジェネ、トレファクション（半炭化）、BECCS（Biomass Energy with CO₂ Capture and Storage）、カーボンリサイクル技術、BiCRS（Biomass Carbon Removal and Storage）、微細藻類

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

バイオマスは、持続可能な生産が前提となるため量的な制約はあるものの、再生可能エネルギーの中で唯一の炭素を含む資源であり、かつ石炭、石油、天然ガスの代替品や水素及び化学品原料等への転換もできることから、貴重かつ再生可能な有機資源として有効利用が図られている。また、バイオマスは天候等によって変動する太陽光や風力発電の平準化のための補助的ベース電源の役割も期待されている¹⁾。2050年のカーボンニュートラル実現に向けては、石炭混焼だけでなく、バイオマス専焼やガス化燃料として石炭ガス化複合発電(Integrated coal Gasification Combined Cycle:IGCC)、石炭ガス化燃料電池複合発電(Integrated coal Gasification Fuel cell Combined cycle:IGFC)等へバイオマス資源を利用することも検討の余地がある。さらに、BECCSやBiCRS等のネガティブエミッション技術の開発も推進されている²⁾。大規模な早生樹等の植林と共に農業残渣等の未利用バイオマス資源を有効利用し、持続可能なバイオマス資源の生産サイクルを構築する取り組みも開始されている。

2019年6月に公表されたカーボンリサイクル技術ロードマップは2021年7月に改訂された³⁾。改訂されたロードマップでは、微細藻類由来のバイオジェット燃料を含むSAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）や廃棄物系バイオマスなどの発酵技術によるバイオメタン、バイオ由来のDMEや水素製造技術、ブルーカーボン（海洋バイオマスを含む）構想によるCO₂回収技術が注目されている。また、BECCSに加えてバイオ炭製造技術の導入・普及とその炭素貯留やICEF2020（Innovation for Cool Earth Forum 2020）で提案されたBiCRSの実証に向けた取り組みも推進されている²⁾。この中で、バイオ炭製造による炭素の地下貯留や土壌改良剤・有機肥料としての利用を含めJ-クレジット等による認証事業⁴⁾、ならびに森林・木材による炭素ストックの定量化の取り組みも国内外で実施されている⁵⁾。

また、セルロース系バイオマスからの第二世代バイオエタノールの製造や引き続くATJ（Alcohol to Jet Fuel）と共に、メタン発酵やエタノール発酵等のバイオプロセスで副生するCO₂を回収・リサイクル利用する資源循環システムの構築に向けた実証事業も推進されている⁶⁾。

[研究開発の動向]

食料と競合しないリグノセルロース系バイオマスから自動車用燃料用の第2世代バイオ燃料（エタノール、BTLクリーンディーゼル燃料等）製造技術に加えて、次世代バイオジェット燃料製造を目指した微細藻類由来等の第3世代バイオ燃料製造技術の研究開発が進められている。また、2012年7月の再生可能エネルギー

固定価格買い取り制度 (FIT) 導入により、種々のバイオマスを燃焼による発電だけでなく、熱分解ガス化や嫌気性メタン発酵による熱電併給型の利用技術の実証・実用化が進められている。同時に、石炭火力発電混焼用のバイオマスのトレフアクション技術やペレット製造プロセス (バイオマス専焼用も含む) の実証・実用化も国内外で進んでいる⁷⁾。

また、CCS 技術 (CO₂ Capture and Storage) を併用して、温室効果ガスの削減を促進する BECCS や CCU (CO₂ Capture and Utilization) によるバイオケミカル併産型のバイオリファイナリーへの展開も図られている。その中で、大崎クールジェンの酸素吹き IGCC プロセスに CCS を併設し、回収した CO₂ を農業利用や微細藻類培養、また CCU プロセスとの組合せによるメタノール等の併産プロセスへの展開も検討されている。

国際エネルギー機関 (IEA) が 2021 年 5 月に公表した Net Zero シナリオでは、2050 年には再生可能エネルギーが全エネルギー供給の 67% を占めるとされ、バイオエネルギーは 20% 弱を供給すると推定されている⁸⁾。IEA シナリオでは、太陽光と風力で電力供給の約半分を占める見込みである一方で、バイオエネルギーによる発電量は全世界の 5% を占めるとされている。

バイオマスの熱利用や輸送用燃料や他の化学原料等としての用途開発が進んでいる。特に、製油所を活用したバイオリファイナリーへの転換技術が世界的に拡大している⁹⁾。廃食油やセルロース系バイオマス原料油を水素化精製装置や FCC (流動接触分解) 装置等で処理し、ドロップインの再生可能ディーゼル燃料や SAF として流通させる事業が始まっている。現行の石油留分とバイオマス由来原料油を混合処理する Co-processing 技術の実用化への取り組みも加速されている。また、バイオマス由来のエタノール経由のエチレン等のバイオケミカル、バイオプラスチック製造技術等への展開も進んでいる¹⁰⁾。ガソリン代替用のバイオエタノール生産は微増 (約 1.2 億 kL) で、軽油代替用の FAME バイオディーゼルと水素化植物油の合計が約 5000 万 kL で漸増している程度であるため、2050 年カーボンニュートラルに向けた液体燃料としては更に ATJ や e-fuel のような新たな合成燃料の製造技術開発を加速する必要がある。日本でも、FIT 導入後バイオマス利用が発電にシフトし、運輸用のバイオ燃料や熱利用が停滞気味であったが、近年は合成燃料や SAF 製造技術、バイオ水素やケミカル併産型のバイオリファイナリープロセスの研究開発へシフトしつつある^{7), 8)}。

特に SAF については、廃食油や植物油から製造されるバイोजェット燃料が商用段階にあり、日本での実用化に向けての整備及び原材料資源の更なる掘り起こしや増量拡大が喫緊の課題となっている。

SAF 製造ならびに運輸用燃料の 2030 年以降に向けた研究開発対象の一つとして、微細藻類培養技術開発の確立がある。米国エネルギー省 (DOE) による微細藻類による炭化水素燃料製造販売価格は 2030 年に 2.5 \$/GGE (ガロンガソリン等量) を目標としているが、2019 年時点では楽観的な試算でも 4.7-5.7\$/GGE 程度と、その達成は困難であるとされている¹¹⁾。しかしながら、あくまで試算レベルではあるが、副産物を有効活用できるような工程への変更等により、目標達成までの道筋を立てつつある¹²⁾。その道筋通りにコスト目標を達成するには「平均生産性の向上」と「高付加価値製品の共生産によるクレジットの獲得」という課題を解決することが大前提である¹³⁾。また、SAF 製造については、コスト面の解析も重要であるが、LCA (ライフサイクルアセスメント) の観点から温室効果ガス (GHGs) 排出基準をクリアできるバイオマスが安定的に供給されるかという点も重要である。微細藻類由来 SAF の CO₂ 排出量は報告されているもので、14.1-476 g-CO₂/MJ と非常に幅広く、CORISIA (国際民間航空のためのカーボン・オフセットおよび削減スキーム) における持続可能性基準の要件の一つである 89 g-CO₂/MJ を達成するかどうかを判断することも非常に困難である¹⁴⁾。持続可能性基準を満たした SAF 生産が可能かどうかを正確に検証するためにも、工業生産予定地での大規模実証が必要となる。

森林草本、廃棄物などのバイオマスのエネルギーとしての用途拡大のためには、熱利用分野における化石資源代替が重要である。ロシアのウクライナ侵攻により天然ガス、石油、石炭等の化石資源の価格が高騰していることから、化石資源代替に効果的なバイオマス導入拡大に向けた支援策やインセンティブ政策を打ち出すことが喫緊の課題となっている。

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

発電市場の世界的な傾向では、これまでの石炭火力へのバイオマス混焼に加えて、大規模な石炭火力発電所でバイオマスへの燃料転換事例が増えてきているが、昨今のウッドショックやウクライナ危機の影響から持続可能な木質バイオマス燃料の調達が大きな課題となっている。ガス化発電分野で石炭や天然ガスを木質バイオマスに転換する事例も見られているが、ここでも原料調達コストが課題となっている。発電所が熱電併給プラントであるため、デンマークのように、バイオマス利活用による地域の熱需要に合わせて発電所の出力を調整し、より効率の良いエネルギー需給システムが構築することも期待されている。日本でも、石炭火力を削減する方針が出され、より一層のCO₂排出低減に向けて国内外のバイオマスの石炭火力での混焼率向上のためのトレファクション技術の開発が進められている。

〔論文・特許動向〕

本研究開発領域の論文および特許動向として、以下の特徴が見られた。なお、調査内容、分析結果の詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向 (2024年)」の「3.1.E1.5 バイオマス発電・利用」にて報告している。

- ・領域全体の論文数推移は2012年以降増加傾向にあった。国別に見ると、米国、欧州各国、日本といった先進国の伸び率は低く、他方、中国やインドなどの新興国の増加傾向は顕著であった。
- ・Top1%、Top10%の論文数の国別推移では、中国の伸び率が他国に比べて圧倒的に高かった。
- ・特許ファミリー件数は、2013年以降、全体で増加傾向にあった。各国シェアは、中国のみ顕著な増加傾向にある一方、米国は緩やかに減少傾向にあり、日本、イギリスも僅かに減少傾向を示した。

(4) 注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

2050年に向けた脱炭素化のより一層の促進に向けて、世界的に石油を主体とする化石資源由来のプラスチックや化学原料等をバイオマス由来に転換する動きも加速されつつある。その中で、Bioeconomyという新しいビジョンに基づいて、バイオマスをエネルギーだけでなくマテリアルとして積極的に利用することによって農地・森林等の適切な管理を前提として生態系の炭素固定を定量化する取組みが進められている⁴⁾。BECCSによるネガティブエミッションを実現するコンセプトも示されている。2020年12月に公表された「グリーン成長戦略」においても、“スマートな生態系利用を通じた農林水産業のゼロエミッションの実現及び革新的技術を活用したCO₂吸収源の拡大”の中で、最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO₂吸収・固定の重要性が指摘されている。

木質バイオマスを始めとしたバイオマス発電・熱利用は、災害時のレジリエンスの向上、地域産業の活性化を通じた経済・雇用への波及効果が大きく、地域分散型、地産地消型のエネルギー源として多様な価値を有するエネルギー源として期待されている¹⁾。一方、エネルギー利用可能な木質や廃棄物などバイオマス資源が限定的であることや発電コストの高止まり等の課題を抱えることから、バイオマス燃料の安定的な供給拡大、発電事業のコスト低減等を図っていくことが必要である¹⁵⁾。

国産の木質バイオマス資源の供給拡大に向けては、成長が早いエリートツリーや広葉樹系の早生樹を計画的に植林して10年前後の短伐期での木質チップ原料の生産を加速する取組みが開始されている。今後、都道府県や市町村単位で森林環境補助税を活用して植林事業を拡大し、カーボンクレジット・オフセットやJ-クレジット等の導入が進むことが期待される。さらに、輸入が中心となっているバイオ燃料については、国際的な動向や次世代バイオ燃料の技術開発の動向を踏まえつつ、導入を継続することが必要であると考えられる。

廃棄物発電については、今後のごみ質の大きな変化（プラ割合の減少に伴う生ごみ割合の増加等）が懸念されるため、低質ごみ下での高効率エネルギー回収を確保するための技術開発を進める必要がある。また、気候変動緩和策として、継続的に実施する河川等の維持管理で発生する伐採木・流木等をバイオマス発電等

の再生可能エネルギー資源として利用を促進し、一般廃棄物処理施設等の有効活用を図ることが期待される。

焼却施設排ガス等については、ごみ焼却炉の排ガス等から分離・回収したCO₂を回収・利用する技術開発の実証を目指した動きがある。また、森林吸収源対策や大気中からCO₂を固定化するBECCS、BiCRSといったネガティブエミッション技術の活用が必要となる。こうしたネガティブエミッション技術について、2050年までの実用化を目指し、技術開発・社会実装を進めていく必要がある。

熱利用では、遠方の利用施設に熱供給を行うための蓄熱や輸送技術の向上・コスト低減を促進する必要がある。今後のごみ質変化に伴うメタン化施設の大規模化を見据えた技術実証事業を進め、下水道バイオマスの活用のため、地方公共団体での利用促進を2025年度まで集中的に取り組むこととしている。

燃料や多目的の高付加価値品に応用が期待される微細藻類については、大量培養技術の確立、微細藻類種のゲノム編集技術による目的に応じた改編、培養後の目的生産の効率化のためのHTL（水熱液化）技術の工業利用の確立などが期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

バイオマスは、地熱発電や水力等のベースロード電源を担える再生可能エネルギーと同様に補助的なベースロード電源やエネルギーとして石油や石炭、天然ガス等の化石資源を直接的に代替し、温暖化防止に貢献できる役割を果たすことができるので、グリーンイノベーション基金等を活用した脱炭素社会を見据えたバイオマスエネルギー利活用プロジェクトが推進されている。

また、バイオマスは発電だけでなく、運輸用燃料や熱利用、バイオガス（メタン、水素）製造への展開が期待されている。

さらに、バイオマスエネルギーの地域自立システム化実証事業やバイオジェット燃料生産技術開発実証を通じたサプライチェーンモデルの構築、微細藻類基盤技術開発に関する事業も実施されている。NEDOでは、微細藻類研究開発に、単年で50億円以上の投資を実施しており、微細藻類の大規模実証試験や産業構築のための基盤技術研究所の設立等、多くのプロジェクトが並行して動いている¹⁶⁾。産学連携のプロジェクトとしては、バイオDX産学共創拠点というバイオエコノミー社会実現のため、微細藻類の屋外培養におけるビッグデータの取得や有用物質生産の研究が開始している¹⁷⁾。また、国内の新動向としては、微細藻類の産業利用促進ならびに新産業の構築を目標とした取り組みMATSURI（MicroAlgae Towards Sustainable & Resilient Industry）プロジェクトの発足が挙げられる¹⁸⁾。本プロジェクトでは、エネルギー、化成品、食品、化粧品、機械、物流など、様々な産業分野のパートナーと共に、藻類SAFをはじめとした藻類が生産する有用成分を利用した製品の開発やその事業性、環境持続性の検討、サプライチェーンの構築等が進められている。バイオマス資源は、元来木材や食料としての利用が本筋であり、その高付加価値利用を図ることによって、生ごみや畜産・農業系の廃棄物系バイオマスを含めて総合的に熱電供給やマテリアル利用を進めることが環境保全的にも経済的にも優位であると考えられる。

欧米でも、同様にバイオエネルギー変換、ドロップインバイオ燃料、特にATJやe-fuelを含めたSAFの製造技術開発が推進されている。また、バイオマス由来の水素製造や関連エネルギー作物の低コスト生産研究等が支援されており、さらにCCUを含む藻類等のバイオマス利活用研究、特にメタン発酵やエタノール発酵プロセスで副生するCO₂を回収して再利用するBECCU（Bio-energy with CCU）の研究開発が推進されてきている。

(5) 科学技術的課題

バイオマス利活用における科学技術的な主な課題として、次の6つが挙げられる。

① バイオリファイナリー

バイオリファイナリーについては、いくつかの分類がなされているが、基本的にはバイオマス原料を主成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニン等に成分分離し、各々の性質に応じた利活用を図るものである。

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

バイオマス原料は木質バイオマスのみならず、稲わらやもみ殻、バガス等の農業残渣が含まれるが、それぞれの原料によって分離される成分の特徴が異なるため、石油リファイナリーのような大量生産プロセスの構築が難しいことが課題の一つである。その課題解決のためには、製材所や製紙・パルプ産業において比較的原料調達が容易な木質バイオマス等のカスケード利用を図るうえで、その未利用残材の利活用を図ることが挙げられる。これまで石油や石炭等の化石資源にエネルギーの一部を依存していた製材・製紙産業において自前で熱電供給をしながら、バイオケミカルやバイオプラスチック原料を併産することは、脱化石資源を図る上で中長期的に取り組むべき課題の一つである。

②廃棄物系バイオマスゼロエミッション

日常的に排出される生ごみ、下水汚泥等の廃棄物系バイオマスは水分が多いため、化石資源を投入して焼却処分されているので、余剰の自前エネルギーでゼロエミッション型の有効利用を図ることは、非常に重要である。FITの導入によりこれらの廃棄物系バイオマスからのバイオガス製造による発電事業も推進されているが、その過程で副生する固体残渣や廃液を有機肥料や液肥として有効利用するゼロエミッションシステムも農工連携のアグリビジネスとして注目されている。このような廃棄物系バイオマスのゼロエミッションプロセスは、大都市で大量に排出される生ごみ、下水汚泥だけでなく、農村部での農産物残渣や家畜糞尿の有効利用によるエネルギー・食料併産システムの構築にもつながり、地産地消型の地方創生プロジェクトの一つとして中長期的に取り組むべき課題である。

③CCUを含む人工光合成

バイオマスのカーボンニュートラル性を最大限に活用して、BECCSに加えて、CCUを含む人工光合成プロセスの研究開発が注目されている。火力発電所や高炉等から排出される化石資源由来の炭酸ガスは比較的大規模なCCSプラントが必要であるが、ビール・酒造やバイオメタン発酵、微細藻類培養等のバイオマス利用において排出または副生するCO₂を回収・再利用すれば、比較的小規模であってもネガティブエミッションとしてのCO₂削減効果が見込まれる。人工光合成を含むCCUとしては、再生可能エネルギー由来の水素を活用してギ酸やメタノール、メタン、DME等をエネルギーキャリアとして炭化水素資源として再利用し、化石資源代替を図ることも重要である。

④カーボンリサイクル技術と高濃度CO₂利用によるバイオマス増産技術の確立

カーボンリサイクル技術ロードマップでも微細藻類由来のバイオジェット燃料やバイオマス由来のガス・液体燃料の製造技術の重要性が示されており、さらに再生可能エネルギー由来の電気エネルギーとの組合せにより水の電気分解等で生成した水素とCO₂から製造されるe-Fuelも注目されている。この技術は、P2X (Power to X) と呼ばれ、再生可能エネルギー由来水素の価格を2050年までに20円/m³程度に低減することが大きな課題となっている。また、海洋バイオマスの増殖を含むブルーカーボン構想によって海洋でのCO₂回収・固定化を促進する技術も注目されている。さらに、CO₂吸収によるセメントやコンクリート製造技術との組合せも期待される。

⑤微細藻類経由の燃料製造や高付加価値製品製造の課題

○平均生産性の向上

SAFの供給には微細藻類による生産に大きな期待がかけられているが、生産コストの問題から未だ大規模な産業化が実現出来ていない。直近の報告でも、微細藻類由来バイオ燃料の生産は、第一世代(可食部バイオマス由来)や第二世代(非可食部バイオマス由来)の燃料と比べて非常に高価であることが示されている¹⁹⁾。技術経済分析による実現可能性を検証した最新の文献では、第一世代原料からのバイオディーゼル生産コストは、2.57-4.27\$/GGE、第二世代は4.3~6.25\$/GGEであると報告されている²⁰⁾。一方、第三世

代（微細藻類由来）原料からのコストは、4.48-8.05 \$/GGEの範囲であると報告されている。米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）デザインケースのTEA（技術経済分析）によると、バイオマスの販売価格に最も効果的である要因は培養工程における平均生産性の向上であることが結論付けられており、生産量向上にフォーカスを絞った開発を行うことが販売コスト低減の近道である²¹⁾。平均生産性の向上に貢献できる技術領域として、コンタミネーションリスクの少ない培養方法の開発、環境馴化能力の向上、遺伝子編集等による株そのものの改変、ガス・熱交換や光利用効率の向上等があげられている。

○副産物を考慮した製造フロー設計

上述のように、微細藻類由来 SAF の販売価格および GHGs 排出量の低減には、平均生産性の向上が最も重要であり、それが微細藻類由来 SAF の産業化を大きく前進させると想定されているが、それだけでは既存のバイオマス由来燃料以下での生産を達成することは困難である。微細藻類産業の実現には、バイオマスの価値そのものを向上させるための高付加価値な副産物を同時に生産する必要がある。副産物として活用出来る物質候補としては、ポリウレタンフォームや有機酸等、いくつか挙げられてはいるが、その多くは試算レベルのものとなっており、実証スケールで確かめられているものではない^{13), 22)}。商業規模でのバイオマス生産を実施し、SAF 以外の産物の生産量検証や工程フローを一貫したアセスメントが急務となる。

○生産の標準化や持続可能評価の国際登録

微細藻類による SAF 生産の領域では、バイオマスの量や成分比率などの性質を安定的に測定し比較する産業標準が確立されていない。米国 ABO（Algae Biomass Organization：藻類バイオマス協会）ではその解決のために“Industrial Algae Measurement”というレポートを発行し標準化に向けて活動を続けているが、現状は既存の規格（ASTM、AOAC 等）の中から参照できるものを提示しているのみに留まっており、微細藻類種や培養フェーズ等による変動等を考慮出来ておらず実状に即していない部分が散見される²³⁾。産業の確立には産業界での「ものさし」が必要となるため、その推進が急務である。

課題であり機会と解釈できる動向として、現時点で CORSIA でのデフォルト値に微細藻類由来 SAF の値が登録されていない点が挙げられる。取得されたデフォルト値を基準として持続可能性が評価されていくことになるため、日本国内で先駆けて取得することは国際的に主導権を取る上で効果的であると考えられる。その際には、大学・事業者のみでは訴求が困難な部分があるため、経済産業省・国土交通省等、国との連携は必須である。

また、現在のトレンドとしてはコストよりもプロセスフローを総合的に見た際の CO₂ 排出量が CORSIA のデフォルト値よりも 10% 以上低い「持続可能性基準を満たした」燃料であることが望まれる傾向にある。そのため、直近 10 年間は販売価格よりも CO₂ 排出を抑制出来るバイオマス生産工程の開発が重要になって来ると想定される。また、持続可能性基準を満たしているかを評価するために、アロケーション、間接的土地利用変化（ILUC）等の国ごとの考え方を整理し、実生産場所での持続可能性基準の評価方法についても検討し、認証の早期取得を目指す必要がある。

（6）その他の課題

バイオマスのエネルギー利用については単に発電や熱利用だけでなく、バイオマスニッポン総合戦略でも謳われているように、そもそもバイオマスによる化石資源代替を促進し、正味の炭酸ガス削減を実現して地球温暖化防止に貢献することが第一優先課題である。2012 年から実施された再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）は、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響が大きかったことは事実であるが、太陽光や風力、地熱、水力等の他の再生可能エネルギーと共に、我が国のエネルギー自給率の向上に寄与することが本題であり、単に FIT による利益追求によって国民負担が拡大し、しかも低価格な海外の太陽光発電パネルや輸入バイオマスの利用を促進する結果になっていることは FIT のマイナスの部分といえよう。

これに加えて、バイオマス利用については、エネルギー自給率のみならず、木材や食料自給率の向上の面からもコストベネフィットを考慮すべきである。また、石炭火力へのバイオマス混焼についても、炭酸ガス削減だけでなく、PM、SO_x、NO_x等の大気汚染物質の削減効果も加味して、環境影響を含めた費用対効果を検討すべきである。量的な制約を伴うバイオマスの持続可能性の確保は重要な課題であるが、本来は日本に未利用で存在するバイオマス資源を極限まで有効利用することが追求されるべきであろう。

石炭等の化石資源の利用撤廃と再生可能エネルギー最大化を目指すだけでなく、環境影響ミニマムとエネルギー自給率の向上と共に、持続可能な省エネ・省資源のライフスタイル（LOHAS）による脱炭素社会を実現することが期待される。

（7）国際比較

（バイオマス全般）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	リグノセルロース系バイオマスの成分分離プロセスによるセルロースナノファイバーやリグニン等の用途開発研究が推進されている。
	応用研究・開発	△	→	バイオマス発電はFITからの自立した運営に課題があり、バイオ燃料はSAFとして研究開発実証が推進されている。
米国	基礎研究	○	→	エネルギー利用の副産物生産や共生産としてのバイオマス由来のケミカルや医薬品・健康食品、バイオプラスチック等の研究が継続して行われている。
	応用研究・開発	○	→	非食用バイオマスからのバイオ燃料製造やCO ₂ 回収型バイオエタノールプロセスの開発と実証が推進されている。
欧州	基礎研究	○	↗	国際的に持続可能なバイオマス利活用システムの提案と課題解決のためのスキームが議論されている。地産地消型バイオマス利活用スキームの提案と再生可能エネルギーの最大利用システムの導入・実証が進んでいる。 【英国】CO ₂ 削減と化石資源代替を実現するためのバイオマス利活用スキームが導入され、特にバイオガスコジェネシステムが普及している。 【ドイツ】地産地消型バイオマス利活用スキームの提案と他の再生可能エネルギーとの組合せ最適化が議論されている。 【フランス】未利用バイオマスの高付加価値利用に向けた触媒反応プロセスならびに農業残渣からのバイオ燃料やバイオケミカル製造技術の実証が推進されている。
	応用研究・開発	◎	↗	エネルギー政策として、バイオマス発電だけでなく、熱電併給システムにおける熱利用による化石資源代替が推進されている。脱化石資源に向けた再生可能エネルギーの利用拡大が進み、小型バイオマス発電が拡大している。 【英国】脱石炭火力に向けて、バイオマスの混焼や専焼プラントへの転換が加速されている。 【ドイツ】脱原発と脱化石資源に向けた再生可能エネルギーの利用拡大が進み、小型バイオマス発電が拡大している。 【フランス】バイオマス発電と非食用バイオ燃料製造に関する研究開発が継続されている。
中国	基礎研究	△	→	第2、第3世代バイオ燃料の製造研究と実証・実用化が継続して行われている。
	応用研究・開発	△	→	食料と競合しない第2世代バイオ燃料やバイオケミカル等の製造技術の開発が継続して行われている。
韓国	基礎研究	△	→	未利用バイオマスからの高付加価値物質の製造研究が継続して行われている。
	応用研究・開発	○	↗	木質ペレットやバイオ燃料の導入拡大と共に、再生可能エネルギー由来の水素利用システムの開発が進められている。

2.1

電力のゼロエミ化・安定化

(微細藻類)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	応用開発フェーズに移りつつあるが、ゲノム編集株の構築等将来の事業化を見据えた研究が継続して行われている。
	応用開発	○	↗	大規模実証のためのプロジェクト等、微細藻類の産業化のために着実に開発が進んでいる。
米国	基礎研究	○	↗	HTLや副産物の検証、コンタミネーションの早期確認などの基礎研究報告が継続して多くみられる。
	応用開発	○	→	大規模な試験は比較的少なく、実用化はまだ先と想定される。
欧州	基礎研究	○	→	【スペイン】欧州の中では2020年時点において、微細藻類燃料分野において文献数が首位となっている。 【オランダ】文献数では目立っていないが、ワグeningen大学をはじめ堅実な研究活動が進められている。
	応用開発	○	→	【ドイツ】微細藻類の生産者として欧州でトップである。スピルリナの食品用途としての生産等が活発である。
中国	基礎研究	◎	↗	世界の微細藻類由来バイオマス・SAF生産分野における論文数で米国を抜き首位に浮上している。
	応用開発	△	→	企業主体のパイロットスケールでの報告はあるが、国の支援に乏しく顕著な成果は出ていない。
韓国	基礎研究	○	→	文献数は多いが、国際的に評価されている報告は多く無い。
	応用開発	△	→	企業毎での事業参入報告は散見されるが、実態を伴った成果があまり見られない。

(註1)「フェーズ」
「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。
「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。
◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている
△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」
↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

1) 経済産業省 資源エネルギー庁「第6次エネルギー基本計画（令和3年10月）」35, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf, (2023年2月8日アクセス) .

2) David Sandalow, et al., “Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) Roadmap, January 2021,” Innovation for Cool Earth Forum (ICEF), <https://www.icef.go.jp/roadmap/>, (2024年10月31日アクセス) .

3) 経済産業省「カーボンリサイクル技術ロードマップ（令和3年7月改訂）」<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>, (2023年2月8日アクセス) .

4) 岸本（莫）文紅「バイオ炭の農業利用と脱炭素：国内外の動向と今後の展望」『日本LCA学会誌』18巻1号（2022）：36-42., <https://doi.org/10.3370/lca.18.36>.

5) 加用千裕「森林・木材による炭素ストックの役割と課題」『日本LCA学会誌』18巻1号（2022）：28-35., <https://doi.org/10.3370/lca.18.28>.

- 6) CN2 燃料の普及を考える会 編著『図解でわかるカーボンニュートラル燃料：脱炭素を実現する新バイオ燃料技術』未来エコ実践テクノロジーシリーズ（東京：技術評論社，2022）。
- 7) 相川高信「エネルギーの脱炭素化に果たすバイオエネルギーの役割と課題」『日本LCA学会誌』18 巻 1 号（2022）：3-10., <https://doi.org/10.3370/lca.18.3>.
- 8) International Energy Agency (IEA), “Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector,” <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, (2023年2月8日アクセス)。
- 9) 一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）総務部調査情報グループ「2021年度JPECフォーラム：バイオリファイナリーの導入および事業戦略に関する調査（2021年5月12日）」JPEC, https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2021/04/JPECForum_2021_program_023.pdf, (2023年2月8日アクセス)。
- 10) 一般財団法人石油エネルギー技術センター（JPEC）調査国際部「JPEC 世界製油所関連最新情報 2022年6月号」JPEC, https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2022/06/overseas_refinery_202206.pdf, (2023年2月8日アクセス)。
- 11) Valerie Reed, “2021 PROJECT PEER REVIEW,” U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-04/beto-02-peer-review-2021-plenary-reed.pdf>, (2023年2月8日アクセス)。
- 12) Ryan Davis, “BETO 2021 Peer Review: Algal Biofuels Techno-Economic Analysis 1.3.5.200,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79248.pdf>, (2023年2月8日アクセス)。
- 13) Yunhua Zhu, et al., “Microalgae Conversion to Biofuels and Biochemical via Sequential Hydrothermal Liquefaction (SEQHTL) and Bioprocessing: 2020 State of Technology,” U.S. Department of Energy, https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-30124.pdf, (2024年10月31日アクセス)。
- 14) Rafael S. Capaz and Joaquim E. Abel Seabra, “Life Cycle Assessment of Biojet Fuels,” Chapter 12, in *Biofuels for Aviation: Feedstocks, Technology and Implementation*, ed. Christopher J. Chuck (Elsevier Inc., 2016), 279-294., <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804568-8.00012-3>.
- 15) 一般財団法人新エネルギー財団（NEF）新エネルギー産業会議「バイオマスエネルギーの利活用に関する提言（令和4年4月）」NEF, https://www.nef.or.jp/introduction/teigen/pdf/te_r03/biomass.pdf, (2023年2月8日アクセス)。
- 16) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「バイオジェット燃料生産技術開発事業」 https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100127.html, (2023年2月8日アクセス)。
- 17) 東京工業大学「バイオ DX 産学共創拠点で川崎市に微細藻屋外培養施設を設置」 <https://www.titech.ac.jp/news/2022/063285>, (2023年2月8日アクセス)。
- 18) 千年祭「MATSURI とは」 <https://matsuri.chitose-bio.com/>, (2024年10月31日アクセス)。
- 19) International Renewable Energy Agency (IRENA), “Advanced biofuels: What holds them back?” <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Advanced-biofuels-What-holds-them-back>, (2023年2月8日アクセス)。
- 20) Hannah Kargbo, Jonathan Stuart Harris and Anh N. Phan, ““Drop-in” fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021): 110168., <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110168>.
- 21) Davis Ryan, et al., “Conceptual Basis and Techno-Economic Modeling for Integrated Algal Biorefinery Conversion of Microalgae to Fuels and Products (2019 NREL TEA Update:

Highlighting Paths to Future Cost Goals via a New Pathway for Combined Algal Processing),” U.S. Department of Energy, <https://doi.org/10.2172/1665822>, (2023年2月8日アクセス) .

22) Matthew Wiatrowski, Ryan Davis and Jake Kruger, “Algal Biomass Conversion to Fuels via Combined Algae Processing (CAP): 2021 State of Technology and Future Research,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82502.pdf>, (2023年2月8日アクセス) .

23) Algae Biomass Organization, “Industrial Algae Measurements, October 2017, Version 8.0,” Algae Foundation, https://thealgaefoundation.org/downloads/2017_ABO_IAM.pdf, (2023年2月8日アクセス) .

2.1

電力のゼロエミ化・安定化