

【3RF-1801】マイクロ波加熱を利用した未利用バイオマス的高速炭化システムの開発（2018～2020）
研究代表者 橋 俊太郎（東京工業大学）

1. 研究開発目的

本研究では、新たに半導体マイクロ波発振器と強電界集中型のシングルモード空洞共振器を用い、省電力で小型マイクロ波炭化炉を開発する。半導体発振器は先鋭なスペクトルのマイクロ波を発振するため、小さい電力でも被照射物に高い電界強度のマイクロ波を印加できる。さらに、装置の小型・軽量・長寿命化も図ることができる。本装置を用いることにより、バイオマスから高機能な炭素材料をオンデマンドで生産が可能システムを開発する。具体的に取り組む項目を以下に示す。

1) 半導体マイクロ波炭化炉の設計・開発：信号発生器と半導体マイクロ波増幅器を接続し、半導体マイクロ波発振器を作製する。コヒーレンシーの高い半導体発振器によるマイクロ波照射と、高 Q 値のキャビティを組み合わせることで、低誘電損失なバイオマスの急速加熱を実現する。また、バイオマスの炭化の際には複素誘電率が大きく変化するため、急速加熱にマイクロ波の誘電加熱を用い、その後、炭素化の進行に合わせてマイクロ波磁場での導電加熱により炭素純度を高めるプロセスを開発する。

2) 半導体マイクロ波炭化炉を用いた各種バイオマスの炭化反応および炭化物の評価：1) で作製した装置内に石英反応管を設置し、不活性ガス流通下で種々のバイオマス基質の熱分解反応を行う。生成したバイオマスチャーは、CHNS 測定および SEM 観察などにより炭化の進行を評価する。得られた結果について、通常の外部加熱などの従来法との差について、*in situ* 分析装置（ラマン分光・質量分析）により解析し、マイクロ波照射下でのバイオマスの炭化促進機構を解明する。得た知見は随時、1) の装置設計へとフィードバックする。

3) 半導体マイクロ波炭化炉のフローシステム化：半導体マイクロ波熱分解炉の更なる改良として、フローシステム化し、処理能力の向上を図る。さらに、マイクロ波出力や流速などのバイオマスの炭化条件を最適化する。100W 以下の省電力のマイクロ波で、バイオマスを 1,000°C/min で急速昇温し、高速で炭化する条件を明らかにする。

2. 研究の進捗状況

(1-1) 半導体マイクロ波炭化炉の開発

- 915 MHz 半導体式マイクロ波発振器と TM_{010} モード型空洞共振器を用いることで、誘電特性の悪いバイオマス試料（イナワラ）を最大 330°C/sec（19,800°C/min）で急速昇温可能であることを実証した。当初の開発目標である 1,000°C/min を大きく上回る値を得た。
- 半導体マイクロ波炭化炉の共振周波数の自動追従機能を使うことにより、反応中にバイオマスの $\tan \delta$ が 0.02 から 0.2 へと 10 倍に変化しても共振状態を維持し、強電界のマイクロ波を印加し続けることが可能となった。
- 915 MHz のマイクロ波を用いることにより、試料を大容量化することが可能となり、さらに波長が長い被照射物の誘電特性の変化に対して共振状態の維持が容易となった。
- マイクロ波電場では、試料の炭化にともない導電性が生じプラズマが形成されるため、導電性が上昇する段階でマイクロ波磁場を用いた誘導加熱の併用が望ましいことを見出した。

(1-2) 半導体マイクロ波炭化炉によるバイオマスの炭化反応の検証

- 上記のマイクロ波装置および既存の 2.45 GHz 装置を用いて、モデルバイオマス試料（結晶性セルロース、アルカリリグニン）や実バイオマス試料（イナワラ）の炭化反応を検証した。
- マイクロ波照射下での結晶性セルロースの反応を詳細に追跡し、マイクロ波による反応促進機構として、マイクロ波による急速昇温と局所的電場集中による高温場形成が寄与していると推測された。

3. 環境政策への貢献(研究代表者による記述)

- パリ協定の締結以降、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの重要度が高まっており、SDGs の 7 番目においてもエネルギー効率の高い産業プロセスへの重要性が指摘されている。一方、発電量が天候の変動に大きく影響を受けるため、電力を化学物質として貯蔵する新化学プロセスが必要となる。
- 既往の化学プロセスは重厚長大でスケールメリットを意図するものであったが、再生可能エネルギーを用いて駆動する化学プロセスでは、①電力の変動に合わせて高速起動・停止が可能、②小規模分散型、③低消費エネルギーであることが求められる。
- マイクロ波加熱を用いた化学プロセスは、電力をバイオマス由来の化成品として変換して貯蔵できる点において、再生可能エネルギー時代の化学プロセスのキーテクノロジーとして貢献し得る。
- マイクロ波により被加熱物質を急速加熱することで、加熱を要するバイオマス変換プロセスの短時間化・低消費エネルギー化・小型化を実現できる結果を得つつある。
- 未利用なバイオマス資源の有効化を実現することにより、SDGs の 12 番目の持続可能な生産や廃棄物の低減や、CO₂ の排出削減によって 13 番目の気候変動への対策にも貢献し得る。

4. 委員の指摘及び提言概要

マイクロ波の特定の波長の発生で熱分解させるアイデアでバイオマスを扱った際、チャーガス、タールの収支を制御温度の指標として、早期に明らかにしてほしい。材料・炭化物の用途や装置サイズなどの面から、実用化の視点も取り入れてもらいたい。マイクロ波加熱炭化装置の真のメリットや炭化した後のシステム概要を示してほしい。バイオマスの種類を増やして、条件を検討する必要がある。システム開発を行うなら、実装化に向けてのビジョンを持ってほしい。

5. 評点

総合評点：A