

スケールアップが進む「マイクロ波反応装置」 —化学品合成から金属製錬まで広くGHG排出削減に貢献—

技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室 小川 玲奈

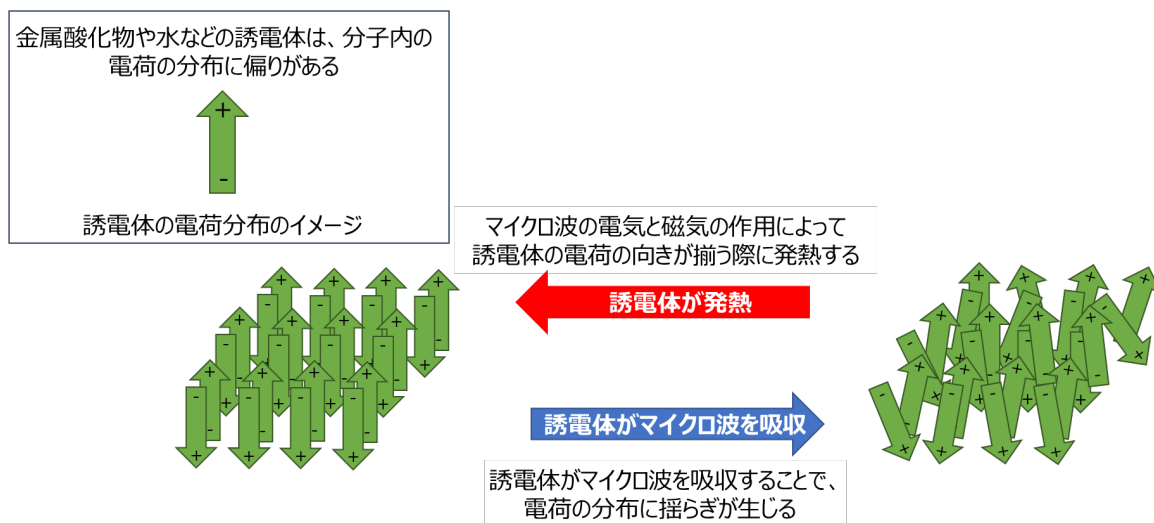
マイクロ波反応装置とは

マイクロ波反応装置とは、電気をマイクロ波に変換・照射して対象物を加熱したり、化学反応を起こしたりする装置である。ここではまず、マイクロ波について説明した上で、なぜ、マイクロ波反応装置が脱炭素に貢献し得るのか、その利点を述べる。

(1) マイクロ波とは

波長が1mmから1m、周波数が0.3GHzから300GHzの電磁波をマイクロ波という。身近な例として、電子レンジがある。電子レンジでは、2.45GHzのマイクロ波が液体の水分子を直接振動させる性質を利用して、水を含む物体を加熱する。一般的なヒーターが空気や液体を介して間接的に加熱するのに対し、マイクロ波は分子内に電荷の偏りを持つ物質（誘電体）を直接振動させる（図表1）ため、原理的に加熱効率が低い。そのため、環境にやさしい加熱法あるいは化学反応プロセスとして、応用開発が進められてきた。

図表1 マイクロ波照射による誘電体の構造変化と発熱の様子



出所：「化学を変えるマイクロ波 熱触媒」（柳田祥三・松村竹子著）を参考に三井物産戦略研究所作成

がんなどの悪性腫瘍にマイクロ波を照射して死滅させる温熱療法「ハイパーサーミア」の効果が認められている¹とおり、マイクロ波は細胞との相互作用を起こすと考えられる。ただし本稿では、照射対象を工業製品の原料に絞り、周辺環境へのマイクロ波漏洩や人体への照射リスクのない条件下での使用を前提とするため、人体への影響については議論しない。

¹ 柳田 祥三、松村 竹子著「化学を変える マイクロ波 熱触媒」（化学同人、2004年）

(2) GHG排出削減効果の高いマイクロ波反応装置

マイクロ波反応装置を産業に応用しようとする研究は2000年頃から行われてきたが、装置コストが高い、大型化が難しいといった課題があり、長きにわたり、化粧品成分などごく僅かな例にとどまっていた。しかし、20年を超える研究開発の成果が蓄積され、加えて近年、地球温暖化防止のための2030年1.5℃目標を達成するためにはエネルギー効率を2倍にする必要があると言われるようになり、原理的にエネルギー効率が高いマイクロ波反応装置の価値が再評価されつつある。

有望な活用分野

マイクロ波反応装置の応用検討について図表2にまとめ、以下でプラスチックリサイクル、金属製錬、金属リサイクルの3分野に分けて説明する。

図表2 マイクロ波発振装置の応用検討状況

企業・大学名	国	マテリアル	開発フェーズ（装置性能）	概要
マイクロ波化学	日本	アクリル樹脂	実証設備（処理能力 50-250L）	三菱ケミカルと共同でモノマー化の実証設備を建設中
		シュレッターダスト（PP） 熱硬化性シートモールド イグコンパウンド 軟質ポリウレタンフォーム	ベンチスケール（処理能力 5-50L）	三井化学と共同でモノマー化を検討中
		リチウム	プレベンチスケール（処理能力 約100g）	三井物産と共同で低炭素リチウム鉱石精錬技術を開発中 量子科学技術研究開発機構とスボジミン精鉱の溶解技術を開発中
		ニッケル	実証（処理能力 約50kg/時）	大太平洋金属と鍛冶プロセスで小型実証設備を制作
		Gr3n	4万t/年のバージンPETチップ製造を目指す	モノマー化でプラント建設を計画、2027年操業予定
Pyrowave	カナダ	廃ポリスチレン	パイロット（1基あたりの処理能力 1,000t/年、 4.8t/日）	パイロット規模のモジュールを組み合わせることで、商用製造に必要なスケールを担保する。機器販売のほか、ライセンス供与にも対応している
Teledyne e2v	英国	銅	商用スケール（処理能力 3,000t/時）	(英)Rio Tinto社の抽出プロセス用システム
C-Tech Innovation	英国	鉄鋼	パイロット（処理能力 1t/日、 周波数2.45GHz、出力2kW）	水素直接還元技術開発プロジェクトにて、マイクロ波を用いたハイブリッドキルンによる還元試験を実施
Metso	フィンランド	鉄鋼	スケールアップ検討中（処理能力 1t/時）	コークスの代替に農業残渣を還元剤として使用し、マイクロ波で加熱して酸化鉄を金属鉄とするBioIronプロセスを開発 スケールアップを検討中
Sepro Mineral Systems	カナダ	銅、ニッケル、金鉱石	商用スケール（処理能力 1,000t/時）	Alberta大学と共同で、マイクロ波照射により、結晶粒界に沿って粉碎する装置を開発。省エネに加えて摩砕後の鉱物の分離効率を高める効果も確認
University of Oulu	フィンランド	亜鉛	ラボ（周波数 2.45GHz、出力1.1kW）	高炉スラグからの亜鉛回収技術
立命館大学	日本	亜鉛	ラボ（周波数 2.45GHz、出力 7.5kW）	アーク電炉からの亜鉛回収技術
		リチウムイオン電池 鉛蓄電池		リチウムイオン電池の正極材からのコバルト回収および鉛蓄電池からの鉛回収を、いずれも数秒から数十秒で処理可能 大気中で処理可能な点も設備の低コスト・小規模化に有利

（ プラスチックリサイクル、 金属製錬、 金属リサイクル）

出所：各種資料より三井物産戦略研究所作成（2023年11月時点）

(1) プラスチックリサイクル

プラスチックのリサイクル手法ではメカニカルリサイクル²が先行しているが、繰り返し処理することによる性能劣化が避けられないという問題がある。これを解決する技術として、プラスチックを熱でモノマー³に分解する「モノマー化」や、原料であるナフサに近い油状の物質にまで分解する「油化」、溶媒を加

² 廃プラスチックを機械的に細断・溶融し、プラスチック製品として再利用する手法

³ プラスチックの主原料であるポリマーを合成するための原料となる低分子量の分子

え加熱して分解する「加溶媒分解」などがある。しかし、これらの技術は分解に要するエネルギーが大きく、トレードオフになっていた。そこで、処理効率を上げるために、マイクロ波反応装置の利用に期待が集まっている。

(日) マイクロ波化学は、世界的に見ても数少ない、マイクロ波反応装置のスケールアップ実績を持つ企業である。同社は、三井化学と共同で自動車シュレッターダストや熱硬化性シートモールディングコンパウンドのモノマー化を、三菱ケミカル社と共同でアクリル樹脂のモノマー化を、それぞれ検討している。アクリル樹脂のモノマー化の実証設備の写真を図表3に示す。

図表3 アクリル樹脂のモノマー化の実証設備



出所：マイクロ波化学株式会社ウェブサイト 設備紹介
パイロットスケール「PMMA分解マイクロ波パイロット設備」
<https://mwcc.jp/plawave/facility/> (最終アクセス2023年12月27日)

国外では樹脂のケミカルリサイクル技術を開発するスタートアップ、(スイス) Gr3nが、スペインでポリエチレンテレフタレート (PET) のモノマー化プラントの建設を計画している。使用済みPETの調達先は、PETを加工する工場、消費者の両方を想定しており、飲料ボトルのほか、ポリエステル繊維も受け入れるという。マイクロ波によってPETを選択的にモノマーへと分解できることから、ポリウレタンやコットンが30%まで混紡されたポリエステル繊維にも対応可能だという。また、(カナダ) Pyrowaveは、廃ポリスチレンのモノマー化が可能なモジュール式の技術プラットフォームを保有している。これは、1基あたり年間1,000トンのスチレンモノマー製造能力を有するマイクロ波反応装置からなり、バージンスチレンモノマーの生産と比較して温室効果ガスの排出を5~7分の1に削減することを可能にする。生産性についても、バー

ジン材と同等のスチレンモノマー純度（最大99.8%）で、廃ポリスチレン1トンを投入した際のスチレンモノマーの回収量に当たる収率は約98%という高い性能を実現している。（仏）ミシュランは、同社のリサイクルスチレンモノマーを100%使用したスチレンブタジエンゴム4トンを試作し、化石燃料由来のスチレンモノマーから製造したタイヤに使われるゴムと比較して、性能に差がないことを確認した。今後、タイヤの試作やトラック向けの性能評価が行われる予定である。

（2）金属製錬

金属と一言と言っても、その採掘、製錬から製品として実装に至るプロセスはさまざまである。本節では特に、鉄鋼とリチウムについて記述する。

鉄鋼産業は、2050年カーボンニュートラルを目指す中で、GHG排出量の多い産業であることが早くから指摘されてきた。そのため、排出削減に対する意識が高く、特に欧州における技術開発が活発である。（英）C-Tech Innovationは、鉄の水素直接還元技術開発プロジェクト「H2DRI」にて、マイクロ波還元試験を担当している。試験には、同社開発の周波数2.45GHz、出力2kWのマイクロ波発振装置を搭載した、処理能力1トン/日のハイブリッドキルンというマイクロ波反応装置を使用している。また、（フィンランド）Metsoはフランクフルトの研究所にて（英）Rio Tintoと共同で、コークスの代替として農業残渣バイオマスを使用し、マイクロ波で加熱を行うBioIronプロセスを開発しており、オーストラリアのピルバラ地域産鉱石で小規模スケールの実証を行った。現在は処理能力1トン/時へのスケールアップをノッティンガム大学と共同で検討している。

リチウムについては、エネルギーや輸送の電化に伴う需要増大と、サプライチェーン全体でのサステナビリティに対する意識の向上により、採掘や鉱石処理工程における環境への影響に注目が高まっている。マイクロ波化学は、三井物産と共同で、低炭素リチウム鉱石製錬技術の開発を行っている。本開発では、リチウム製錬で最も二酸化炭素排出の多い煅焼プロセス⁴の低炭素化を目指している。また、量子科学技術研究開発機構ではスポジウム精鉱⁵の溶解技術の開発を進めており、既存技術と比較して、設備投資（CAPEX）と運用コスト（OPEX）はそれぞれ70%、二酸化炭素排出量は90%削減可能と試算している。

（3）金属リサイクル

金属リサイクルにおいては、高炉スラグやアーク電炉ばい塵など、既存の金属の製造設備から出る残渣から有用金属を効率よく抽出する技術のほか、消費者が使用を終えた各種製品の分離、回収プロセスでもマイクロ波反応装置の利用が検討されている。

（フィンランド）オウル大学は、高炉スラグにマイクロ波を照射し、800℃で10分加熱すると、その中に約1%程度含まれる亜鉛の86%を回収可能であり、高炉スラグの再利用が検討可能であることを報告している。

⁴ 鉱石から電池材料に使われる炭酸リチウムや水酸化リチウムなどを熱処理により得るプロセスの一つ。例えば、スポジウム鉱石を硫酸に溶けやすい結晶構造に変えるために、1,050～1,150℃で熱分解させる。

⁵ 主に豪州の鉱山で産出し、選別された、リチウムとアルミニウムの珪酸塩鉱物（リシア輝石）を含む鉱石

また、立命館大学は、従来のアーク電炉による処理では鉱石に含有される亜鉛全量の40%しか回収できないが、アーク電炉ばい塵にマイクロ波を照射することでさらに40%回収でき、合計80%にまで回収率を高められることを報告している。同大学では電池リサイクルに関する検討も行っており、リチウムイオン電池の正極材に数秒から数十秒マイクロ波を照射することで、金属コバルトと鉛が得られることを確認している。

今後の展望

(1) システムの大型化

一般的な素材開発と同様、商用化に向けたスケールアップは大きな課題である。特に金属製錬においては、化学品の合成やリサイクルプロセスと比較して、処理量、処理速度とも1〜2桁大きな規模が必要とされる。そのため、スケールアップの難易度も高くなる。従来は、マイクロ波反応装置の大型化が商用化のボトルネックになると考えられていた。しかし、同装置の改良に加え、モジュール化した装置を多数並べて行う並列処理のノウハウが各社に蓄積されてきている。これらの技術の延長線上には、従来の巨大な製錬設備とは異なる大型システムが立ち上がる未来も見える。

(2) システムの分散化

サーキュラーエコノミーの進展と経済安全保障の重要性の高まりにより、消費者が廃棄する製品は新たな製品の資源として重要なものになる。廃棄物を消費者から回収するための輸送コストや環境負荷の観点から、巨大な製造設備を設置して広域をカバーするよりも、モジュール化した小型装置を回収拠点の近くに設置する方が適切な地域もある。そこでは分散型のシステムが普及していくだろう。大型化と分散化のどちらが適しているかを判断するために、装置の規模と廃棄物の回収に関する経済性および環境負荷のデータの収集と分析が必要不可欠になる。

(3) 新材料開発の可能性

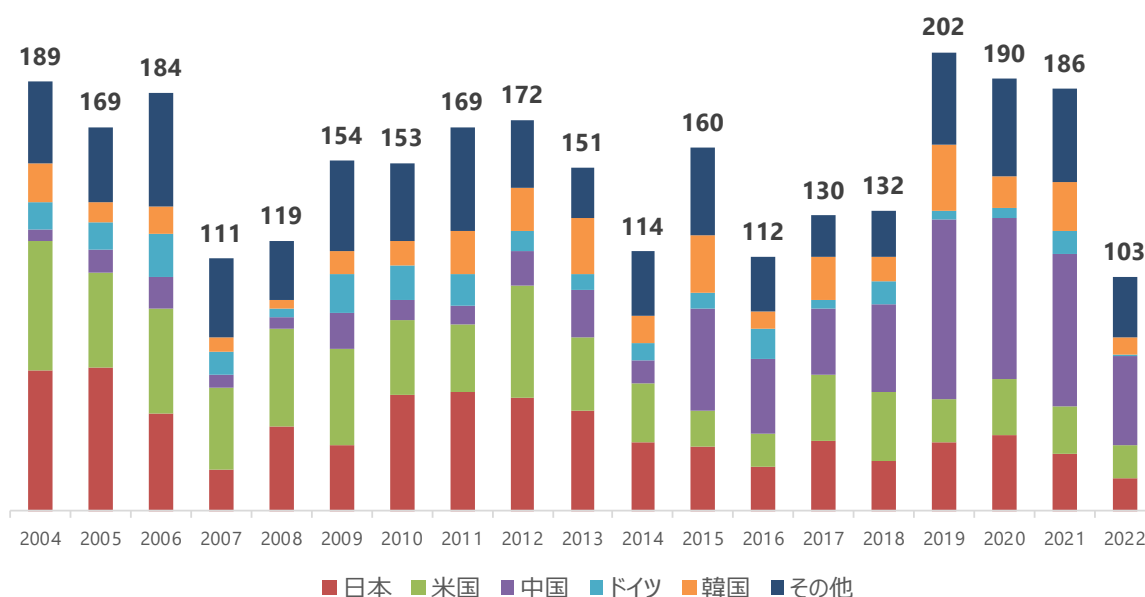
マイクロ波発振装置が普及し、低価格化することで、黎明期に多く検討されていたマイクロ波を用いた有機合成など、特定の波長のマイクロ波とこれによって相互作用を起こす分子の挙動を利用した新規素材開発・製造のコストも下がるだろう。今後、新規素材開発が活発化し、製造コストが合わなかった素材にも商業化の機会が訪れる可能性がある。

「マイクロ波反応装置」に関する知財レポート

技術・イノベーション情報部 知的財産室 松浦 由依

本稿では、『2024年に注目すべき技術』で取り上げた「マイクロ波反応装置」に関する特許出願の国際動向を調査・分析し、レポートする。すべての調査・分析はPatSnap社が提供するグローバル特許検索・分析ツールであるPatSnap Analyticsおよび各種技術情報検索ツールであるPatSnap Discoveryを利用して実施した。各種データの取得日は2023年12月1日である。

図表：マイクロ波反応装置に関する特許出願の件数推移



出所：PatSnap Analyticsのデータから三井物産戦略研究所作成

特許出願の年次トレンド

マイクロ波反応装置に関する特許出願件数は年ごとに変動しており、2019年以降の増加が特に目立つ。国別に見ると、日本からの特許出願件数は2004年から2005年にかけてピークを記録し、その後は減少傾向にある。米国からの特許出願件数も全体的に減少傾向にあり、特に2015年以降の減少が顕著である。対照的に、中国からの特許出願件数は2015年以降大きく増加し、2019年には最高値を記録している。

このことから、出願件数全体における2019年のピークは中国からの特許出願件数の急増に起因するといえる。2000年代は日本と米国がこの分野の特許出願を牽引していたが、2019年以降は中国が主導的な役割を果たしている。なお、グラフ上、2022年の特許出願件数は大幅に減少しているが、特許出願が公開されるまでのタイムラグを考慮する必要がある。データより、2022年の最終的な特許出願件数は約159件と予測される。

技術的焦点

2019年以降の特許出願データから技術的焦点について分析する。

技術や分野としては、マイクロ波反応装置、方法、システムに関するものが多く、その他産業用途（例：金属処理、セラミックス製造）、化学研究（例：化学反応の加速）および環境技術（例：廃棄物処理）などさまざまな分野に応用がみられる。

装置や方法においては、マイクロ波加熱の効率と均一性を向上させるための技術が注目されている。これには、マイクロ波の周波数調整、エネルギー分布の最適化、加熱対象物へのエネルギー伝達の改善などが含まれる。さらに、省エネルギー設計のマイクロ波反応装置や、再生可能エネルギー源を利用したマイクロ波加熱システムなど、エネルギー効率の高い方法や環境を意識したアプローチも注目されている。マイクロ波加熱プロセスの安全性と制御を強化する技術も重要視されており、マイクロ波漏れを防止するための安全装置や、プロセスの精度と再現性を高めるための高度な制御システムなどが開発されている。

これらの分析から、マイクロ波反応装置に関する特許出願は、加熱効率、エネルギー消費、安全性および特定の応用領域における技術的進展に焦点を当てていることが明らかである。特に、エネルギー効率と持続可能性への関心は、環境に配慮した技術開発のトレンドを示している。

代表的な特許出願人

1. 四川大学（中国）：特定の材料へのマイクロ波加熱の最適化、低コストで効率的な加熱ソリューション。
2. マイクロ波化学（日本）：導波管技術、マイクロ波照射の制御、化学反応の高速化、エネルギー効率向上。
3. Applied Materials（米国）：半導体製造における精密なマイクロ波技術。



「2024年に注目すべき技術」（フルレポート）は[こちら](#)

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

