

## マイクロ波加熱の化学産業への展開

### ◆製造業の熱利用によるエネルギー消費に電化の余地がある

2024年6月、エネルギーに関する年次報告であるエネルギー白書2024が公表された。エネルギーバランス・フロー概要の最終エネルギー消費をもとに、エネルギー消費に占める電力の割合である電化率を部門別に見ると、家庭部門は52%である一方、産業部門（企業+運輸貨物）の電化率は27%である。つまり、産業部門では、残りのエネルギー消費にあたる約7割を化石燃料の直接消費が占める。

さらに、経産省の令和4年度石油等消費動態統計調査をもとに、製造業の化石燃料消費を業種別に整理した（図1）。製造業全体で見ると、熱利用（ボイラ+直接加熱）が50%、原料用が45%でほぼ半々であり、熱利用では電気を利用した加熱技術による脱化石燃料のポテンシャルが大きい。

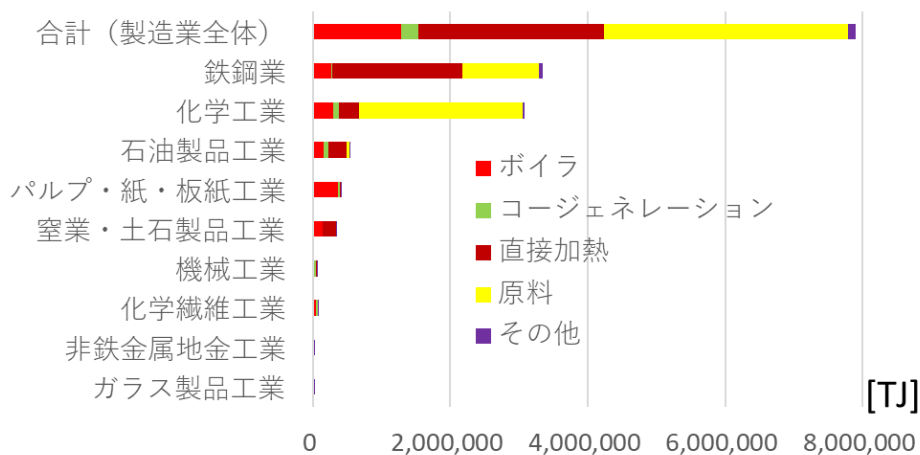


図1 製造業の化石燃料消費（令和4年度石油等消費動態統計調査を基にARC作成）

### ◆エネルギー効率の高いマイクロ波加熱

電気を利用する加熱技術は家庭用から工業用まで広く利用されており（表1）、エネルギー伝達の違いから間接・直接加熱に分けられる。間接加熱は、電気で加熱した高温の熱源から熱伝導（高温側から低温側に熱エネルギーが伝わる現象）による外部からの加熱操作になる。間接加熱の事例は、家庭用のIHクッキングヒーターやヘアードライヤーがある。一方、直接加熱は、マイクロ波で電場を与えて加熱対象の分子やイオンを動かし摩擦を起こすことにより熱を発生させ、直接・内部から加熱する。特に、熱伝導率が低い物質を加熱したい場合に、エネル

ギー効率が高いマイクロ波は威力を発揮する。直接・内部加熱の特徴を生かした工業上の事例として、木材の乾燥やゴムの加硫がある。

表1 電気を利用する加熱技術（各種資料を基にARC作成）

	マイクロ波加熱（誘電加熱*）	誘導加熱	抵抗加熱
エネルギー伝達	直接加熱	間接加熱	間接加熱
加熱対象	誘電体（樹脂、木材など）	導電体（鉄・ステンレスなど）	抵抗発熱体（鉄、炭化ケイ素など）
適用事例	木材の乾燥、ゴムの加硫、電子レンジ	IHクッキングヒーター	ヘアードライヤー

\*厳密にはマイクロ波加熱できるものは誘電体だけではないが、ここでは狭い意味のマイクロ波加熱について述べる

◆海外はマイクロ波加熱を活用した廃プラのケミカルリサイクルの事例が増える

海外の企業事例では、マイクロ波加熱により廃棄プラスチックをケミカルリサイクルする事例が増えている（表2）。原料となる廃プラは、強固な化学結合をもつポリマーで熱伝導率が低いため、熱が十分に伝わらないと分解が不完全になる課題がある。そこで、エネルギー効率の高いマイクロ波によるリサイクル効率や製品品質の向上が期待できる。また、マイクロ波加熱では小型モジュール化が可能なので、地域・自治体のリサイクル工場に分散展開することも可能だ。

23年7月、スイスを拠点とするgr3nは、スペインに拠点を置くエンジニアリング会社であるIntecsa IndustrialとPETケミカルリサイクル工場を建設すると発表した。27年までにリサイクルされたモノマーから年間約4万トンのバージンPETフレークを生産することを目指す。gr3nの「マイクロ波加熱による解重合（MADE：Microwave Assisted Depolymerization）」プロセスではマイクロ波技術とアルカリ加水分解を活用し、リサイクルが難しい廃プラをモノマーに分解する。PETリサイクルプラントは、約4万トンの再生PETチップを生産し、約2万トンのCO<sub>2</sub>を削減できる。

24年1月、プロセス技術とエネルギーソリューションの世界的なプロバイダーであるLummus Technologyは、アメリカに本社を置く先進的なリサイクル技術を有する企業であるResynergiへの大規模な投資を発表した。Resynergiは、モジュール式の「マイクロ波を利用した熱分解（CMAP：Continuous Microwave Assisted Pyrolysis）」による廃プラのリサイクル技術に強みがある。CMAPでは、マイクロ波エネルギーを利用して、従来の熱分解法の20倍の速さで廃プラを再利用可能な材料に変換する。モジュラー設計のため、従来に比べて設置面積は

10分の1に縮小されている。また、水平方向に拡張できるので、数週間で導入が完了する特徴があり、地域や自治体のリサイクル工場に設置が容易である。

23年9月、カナダに拠点を置くPyrowaveは、同社のマイクロ波解重合技術で廃棄プラスチックを解重合して得られたリサイクルスチレンモノマーでMichelinがタイヤを製造したと発表した。Michelinの工場でリサイクルスチレンモノマーのみを使用して製造されたスチレンブタジエンゴムの試作品4トンはすべての品質テストに合格した。なお、Michelinは20年4月からPyrowaveと提携している。

23年9月、イギリスのGreenback Recycling Technologiesは、イギリスのEnvalを買収したと発表した。この買収は、メキシコのクアウトラで Enval の熱分解プロセス技術を採用した初のリサイクル工場が開設された後に行われた。Envalが開発したマイクロ波による熱分解プロセスは、アルミニウムラミネートされた複層軟包装プラスチックを熱分解油とアルミニウムに分離できる。

表2 最近の海外のマイクロ波加熱を活用した企業事例（各種資料を基にARC作成）

技術領域	企業	協力企業	原料	開発フェーズ	概要
ケミカルリサイクル	gr3n	Intecsa Industrial	廃棄PET	商用プラント（建設中）	27年までに年間4万トンのリサイクルPETフレークを生産予定
ケミカルリサイクル	Resynergi	Lummus Technology	廃棄プラスチック	Lummusによる大規模投資発表（24年1月）	Resynergiのマイクロ波加熱プロセスは高速リサイクルが可能で、設置面積は小さく、数週間で導入可能である
ケミカルリサイクル	Pyrowave	Michelin	廃棄プラスチック	パイロット（23年9月）	リサイクルスチレンモノマーのみで製造したタイヤが品質テストに合格
ケミカルリサイクル	Enval	Greenback Recycling Technologies	廃棄された複層軟包装プラスチック	商用リサイクル工場	廃棄された複層プラスチックを熱分解するリサイクル工場がメキシコで稼働中

### ◆国内の化学メーカーはマイクロ波化学と共同開発を進める

国内の動向をみると、化学メーカーと共同開発を進める阪大発スタートアップのマイクロ波化学の活躍が目立つ。国内ではマイクロ波加熱の特徴を生かした製造技術革新、水素製造の事例もある（表3）。マイクロ波化学は、マイクロ波技術プラットフォームをソリューションとして顧客企業に提供する。

24年2月、三井化学とマイクロ波化学は、マイクロ波を活用した環境負荷の低い革新的な炭素繊維製造に関する実証設備を三井化学名古屋工場内に完工したと発表した。既に24年1月より試運転を開始しており、24年度内を目標に炭素繊維サンプルの供給開始を目指す。炭素繊維製造における耐炭化プロセスと炭化プロセスの両工程を一貫してマイクロ波で焼成する技術により、従来法と比較して加熱処理時間が大幅に短縮され、エネルギー消費量が約50%削減される。

23年10月、三菱ケミカルはホンダと連携し、自動車ボディ部品向けの再生アク

リル樹脂（PMMA）を開発中と発表した。三菱ケミカルは、廃棄されたPMMAをケミカルリサイクルで熱分解してモノマー化し、着色剤や耐衝撃剤を加えた耐衝撃タイプのPMMAコンパウンドを開発している。三菱ケミカルは、21年からマイクロ波化学と研究開発を進め、マイクロ波を使って熱分解する方式を確立した。25年度の商用プラント稼働開始を視野に、PMMAケミカルリサイクルの事業化を目指す。

22年6月、レゾナックとマイクロ波化学は、マイクロ波を用いて廃プラから基礎化学原料を直接製造するケミカルリサイクル技術の共同開発を発表した。具体的には、分解対象である廃プラにマイクロ波吸収体（フィラー）を混ぜることで、マイクロ波のエネルギーを効率的・集中的に与える仕組みを採用した。共同開発では基本技術の確立を目指し、マイクロ波加熱分解物の生成条件検討、分解条件や分解プロセスの最適化に取り組む。

表3 最近の国内のマイクロ波加熱を活用した企業事例（各種資料を基にARC作成）

技術領域	企業	協力企業	原料	開発フェーズ	概要
製造技術革新	マイクロ波化学	三井化学	PAN繊維	パイロットプラント完工 試運転開始（24年1月-）	マイクロ波を利用した、革新的な炭素繊維製造技術で24年度内に炭素繊維サンプル供給予定
ケミカルリサイクル	マイクロ波化学	三菱ケミカル	廃棄されたアクリル樹脂	商用プラント （25年度稼働目標）	廃棄されたアクリル樹脂をマイクロ波加熱で熱分解し、自動車部品向けに再利用
ケミカルリサイクル	マイクロ波化学	レゾナック	廃棄プラスチック	開発中（22年6月-）	廃プラをエチレン、プロピレンなど基礎化学原料に変換する、マイクロ波を利用した技術を開発中
ケミカルリサイクル	マイクロ波化学	旭化成	ポリアミド66の端材、使用済み廃材など	ベンチ設備で小型 実証試験（24年度-）	ポリアミド66の端材などをマイクロ波を用いて解重合し、直接モノマーに戻すケミカルリサイクル技術の共同実証実験を開始
水素製造	マイクロ波化学	住友化学	メタン	開発中（22年2月-） 商業生産（30年代前半目標）	マイクロ波による熱分解で、メタンからターコイズ水素と固体炭素（カーボンブラックやカーボンナノチューブなど）を得る

#### ◆設備の大型化でマイクロ波加熱の化学産業への展開が期待される

マイクロ波加熱は、1945年に商品化された電子レンジに始まって、食品分野、乾燥分野などで工業化され広く利用されてきた。1986年にマイクロ波による有機化学合成の論文報告がされ、ラボスケールでマイクロ波加熱の有用性は認識されていたが、化学プロセスとして産業展開された例は無かった。マイクロ波加熱は物理と化学の学際的分野のためシミュレーションによる現象の解明が難しかったことや、マイクロ波化学プロセスの反応系・反応装置設計には物理・化学・エンジニアリングの分野横断的な協力が必要だったことが理由と考えられる。

最近になって、マイクロ波加熱を利用した、パイロット・商業規模のプラントの事例が増えている。マイクロ波反応装置は、コンピューティング能力・シミュレーション技術の進化や物理・化学・エンジニアリングの分野横断的取り組みによって改良が進み、小型モジュール化した装置を多数並べてスケールアップする例も出ている。マイクロ波加熱の化学産業への展開が期待される。【永田紘基】