

プラスチックリサイクル促進に向けたマイクロ波加熱技術

Microwave-based Heating for Promoting Plastic Recycling

廣田明道*
Akimichi Hirota
神岡 純†
Jun Kamioka
榊 裕翔†
Hiroyuki Sakaki

北畑 繁‡
Shigeru Kitahata
西嶋 潤†
Jun Nishijima

*情報技術総合研究所(博士(工学))

†同研究所

‡先端技術総合研究所

要 旨

気候変動問題、天然資源の枯渇等の環境問題解決に向けて、二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガス排出ゼロ(カーボンニュートラル:CN)や、循環経済(サーキュラーエコノミー:CE)の実現が望まれている。

三菱電機ではCN/CE実現に向けた取組みの一つとして、プラスチックのケミカルリサイクルに着目している。高速・高効率な加熱方法として、当社で開発してきた複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御することで加熱箇所を均一化/局在化する、マイクロ波加熱技術を応用して、高効率で低コストなプラスチックのケミカルリサイクル技術を確認し、CN/CE実現に貢献していく。

1. ま え が き

気候変動問題、天然資源の枯渇、大規模な資源採取による生物多様性の破壊など様々な環境問題解決に向けて、CNやCEの実現が望まれている。

当社ではCN/CE実現に向けた取組みの一つとして、プラスチックリサイクルに着目している。プラスチックは軽くて丈夫であり、生活・産業のあらゆる場面で利用されているが、近年、プラスチックを適切に処理しないことによる海洋プラスチック問題や、処理の際に発生したCO₂による環境への影響が社会課題になっている。さらに、世界的には2060年に廃プラスチック量が現在の3倍に増加するとの予測もあることから⁽¹⁾、廃プラスチックリサイクルの重要性はより高まると予想される。

本稿では、プラスチックリサイクルへの応用が期待される、マイクロ波加熱技術について述べる。

2. プラスチックリサイクルの現状

国内でのプラスチックリサイクルの現状は、図1に示すように廃プラスチックをプラスチックのまま材料にして新しい製品を作るマテリアルリサイクルが21%、廃プラスチックを従来の材料(還元剤等)の代替品として利用又はモノマー等に分解後再度プラスチックに合成するケミカルリサイクルが3%、熱・エネルギーとして回収するサーマルリサイクルが62%、特に再利用せず焼却・埋立てによって処分する未利用分が14%になっている⁽²⁾。サーマルリサイクルでは熱・エネルギー源として再利用しているものの廃プラスチックを焼却していることから、未利用での焼却分も含めると年間

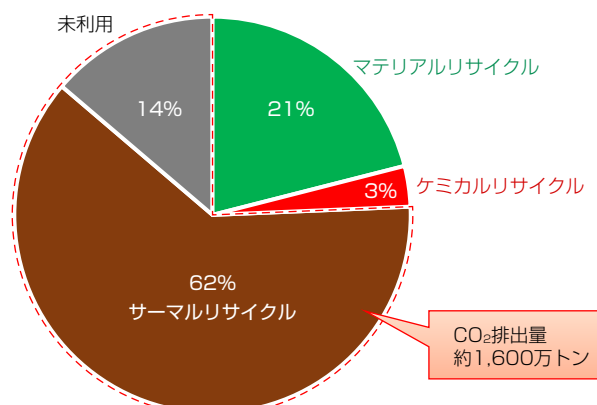


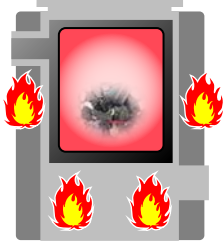
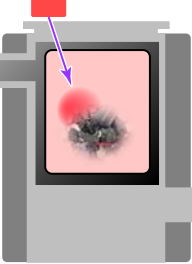
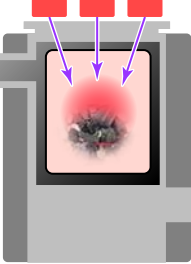
図1. 国内での廃プラスチックのリサイクル状況

約1,600万トンと多くのCO₂が排出されているのが現状である⁽³⁾。このことから、サーマルリサイクル／未利用の割合を削減し、マテリアル／ケミカルリサイクルへ転換していく必要がある。しかしながら、現状のケミカルリサイクルでは、廃プラスチックをモノマー等に分解する際の加熱にかかるコストが高いという課題もあり、普及には至っていない。つまり、短時間で高効率に廃プラスチックを加熱してモノマー等まで分解することで低コスト化を実現することが、普及に向けては重要になる。

3. マイクロ波加熱方式の特徴

プラスチックのケミカルリサイクルに関して、加熱方式の比較を表1に示す。従来の外部加熱方式では、炉全体を加熱した後に廃プラスチックを加熱する。このため、廃プラスチックを加熱するには多くの時間とエネルギーが必要で、加熱効率が低くコストが高くなる。従来のマイクロ波加熱方式では、マイクロ波で直接廃プラスチック(又は触媒)を加熱するため、炉全体を加熱する必要がなく、外部加熱方式よりも短時間・省エネルギーで加熱することが可能になる。ただし、位相制御せず単純にマイクロ波を照射して加熱するため、炉内部で加熱むらが生じて一部分解が進まない箇所も存在してしまい、加熱効率に限界がある。一方、複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御するマイクロ波制御方式では、マイクロ波で直接廃プラスチックを加熱するため炉全体を加熱する必要がない。また炉内の温度分布に合わせて位相制御による均一／局所加熱を組み合わせることで、加熱効率を最大化できる。このことから、位相制御を行うマイクロ波加熱技術をプラスチックリサイクルへ応用することで低コスト化を実現し、CN／CE実現に貢献できる。

表 1. 加熱方式の比較

	従来の外部加熱	従来のマイクロ波加熱 (位相制御なし)	マイクロ波制御 (位相制御あり)
加熱方法			
加熱制御	不可 (内部が温まりにくい)	不可 (加熱むらが発生する)	均一／局所加熱可能
加熱効率	悪い (容器ばかり温まる)	良い	非常に良い

4. マイクロ波加熱技術の実証例⁽⁴⁾

当社では、複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御するマイクロ波加熱技術を開発し、加熱箇所を均一化／局在化できることを実証している。ここでは、この技術について述べる。

4.1 マイクロ波半導体加熱装置

開発したマイクロ波半導体加熱装置の構成を図2に示す。信号源(SG)から基準になるマイクロ波が励振され、ドライバーステージ(DA)で信号が増幅される。分配器(DIV)によって信号は5分配され、移相器(PS1～PS5)によって位相が制御される。その後パワーステージ(PA1～PA5)によってマイクロ波は増幅され加熱炉内へ照射される。加熱炉とPAの間にあるカップラー(CPL)で信号を一部取り出して、加熱炉へ照射される入力波と加熱炉から戻ってくる反射波をパワーメーター(PM)によって観測する。系の合間にあるアイソレーター(ISO)は、マイクロ波の逆流防止用の安全装置である。SGによる信号発生タイミング制御、及びPS1～PS5による位相制御、PMによる電力の読み取りの制御はパソコン(PC)から制御する構成にした。

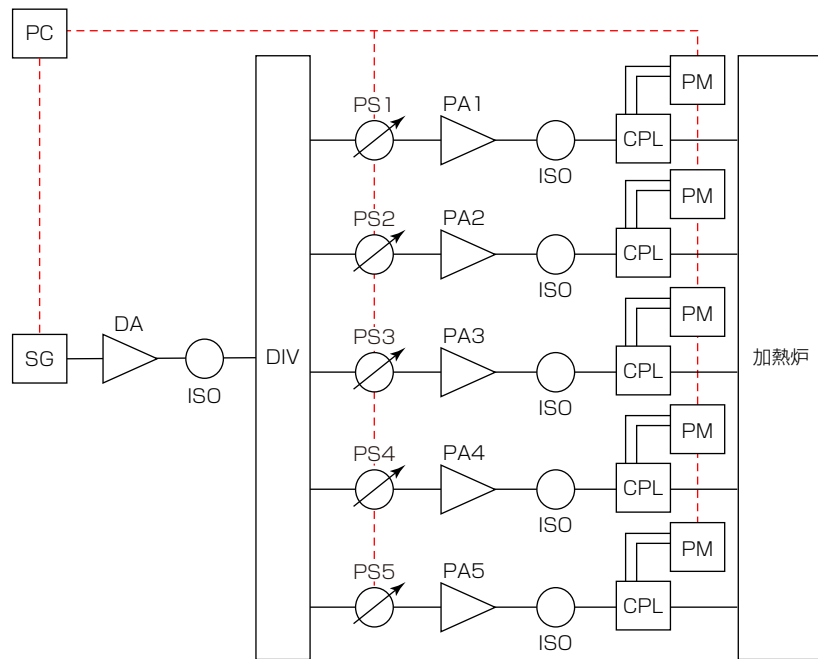


図2. マイクロ波半導体加熱装置の構成

4.2 シミュレーションによる評価結果

4.1節で示したマイクロ波半導体加熱装置を用いて、各移相器を制御することで加熱炉内の均一加熱を目指して検討を実施した。図3に検討に用いた加熱炉の電磁界シミュレーションモデルを示す。加熱炉は導波管が直線状に並んでいるため、定性的に温度の均一性を確保できるのは導波管入り口直下の直線状の領域（以下“評価線”という。）になると考えられることから、一次元の熱分布を均一にする検討を行った。なお、被加熱物にはマイクロ波の照射によって温度が容易に上昇する素材（以下“素材A”という。）を採用した。加熱炉の寸法、導波管入り口から加熱物までの距離、及び導波管から入力される各マイクロ波信号の位相差等をパラメータとして最適化を実施した。最適化前後の評価線での発熱量分布を図4に示す。

位相制御を実施しない最適化前の発熱量分布（図4の赤点線）では、最小値に対する最大値は約5.2倍になり、大きな発熱量分布差になっている。一方、均一加熱になるように位相制御を実施した場合の発熱量分布（図4の青線）では、最小値に対する最大値は約1.4倍と、大幅な均一化ができています。このシミュレーション結果を踏まえて、4.3節に述べる実験を実施した。

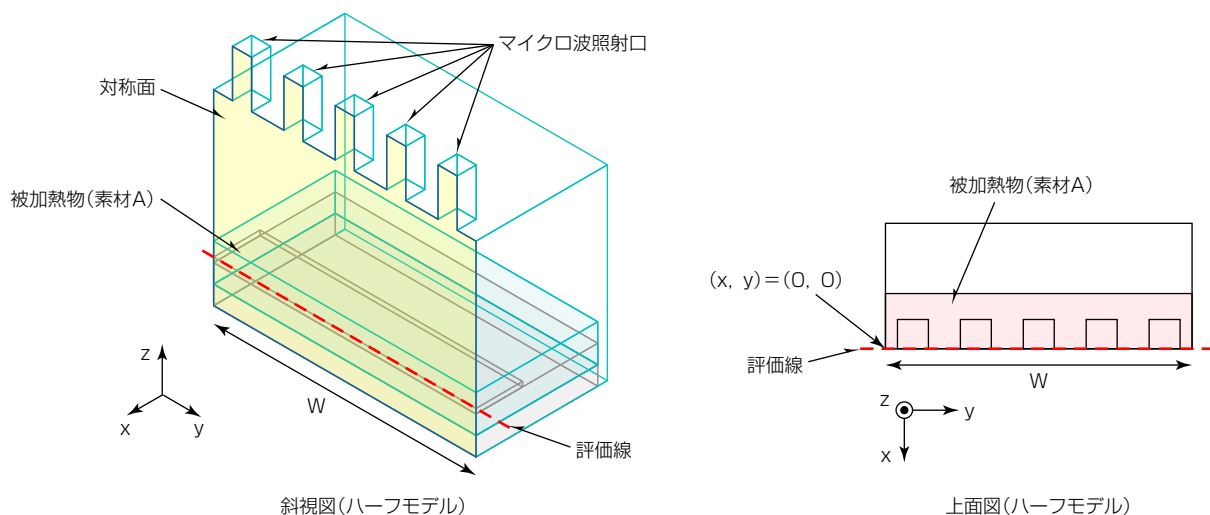


図3. 電磁界シミュレーションモデル例

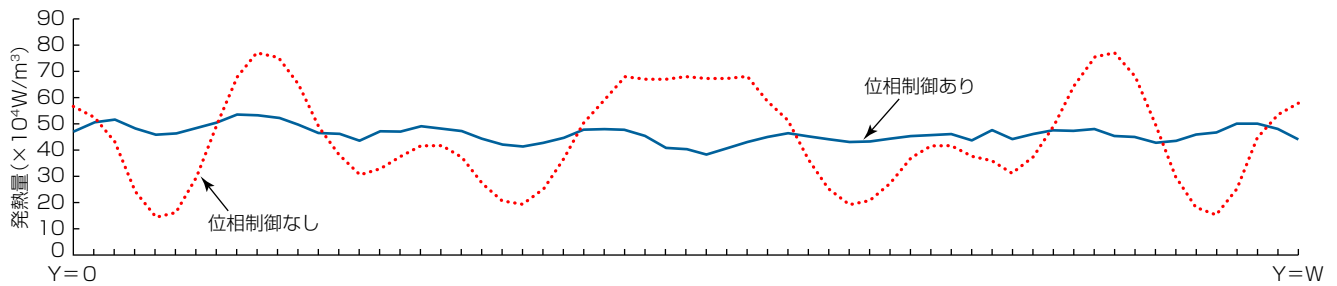


図4. 発熱量分布のシミュレーション結果

4.3 実験による評価結果

4.2節までの検討結果を踏まえて、マイクロ波半導体加熱装置を製作し実験を実施した。測定時の実験系を図5に、実験系の外観を図6に示す。五つの導波管から、位相を制御したマイクロ波を一樣に加熱炉内へ照射し、加熱炉内に配置した素材Aを加熱する。なお、導波管からマイクロ波を照射すると、視(のぞ)き窓からマイクロ波の漏洩(ろうえい)を生じるため、素材Aを加熱する際には金属蓋で視き窓は塞いでマイクロ波を照射する。照射を終えてすぐに蓋を取り外して、視き窓からサーモビューアで加熱炉内に配置した素材Aの表面温度を測定する。なお、図5にも示したように加熱炉の壁面及び蓋部によってサーモビューアからの視野角は制限を受けるため素材Aの評価線を含む半分程度の範囲の表面温度を測定した。

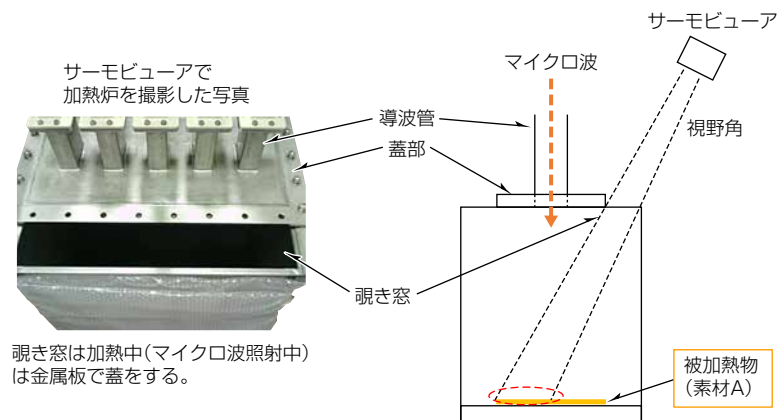


図5. 実験系の構成

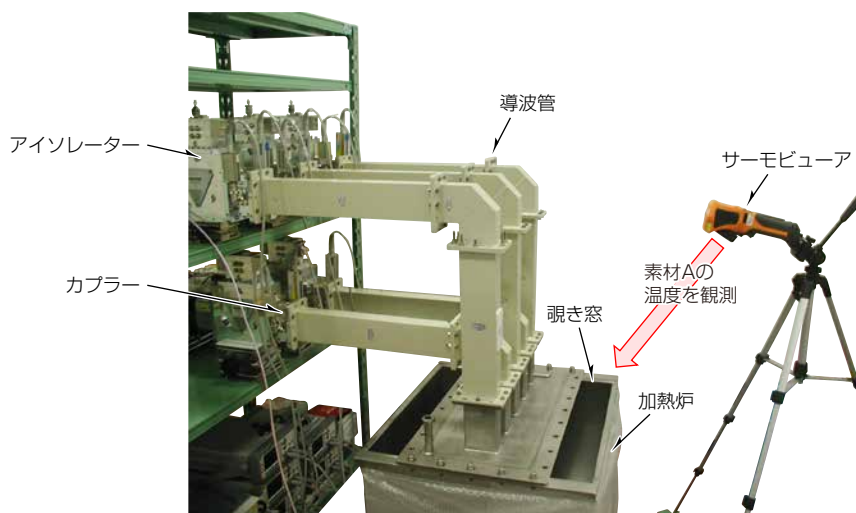


図6. 実験系

測定した温度分布を図7に示す。図7(a)に示すように位相制御なしの場合、加熱がされていない部分(青い部分)と加熱されている部分(赤い部分)が存在し、温度分布にむらが生じていることが分かる。サーモビューアの評価線での最高/最低温度は42℃/27℃と温度差は15℃になった。一方、位相制御を適用した場合、図7(b)に示すように全体が赤く加熱され加熱むらが全体的に小さくなっていることが分かる。また、サーモビューアの評価線上での最高/最低温度は48℃/41℃と温度差は7℃になり、位相制御を用いない場合に対して温度差は約半分と均一加熱が可能であることが分かった。また、誌面の都合上ここでは示さないが、位相制御によって局所的に加熱できることも実験的に実現できている。このことから、位相制御によって加熱箇所を均一化/局在化できることを確認した。なお、この章で示した内容は、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)の“グリーンデバイス社会実装推進事業/省エネルギー社会を実現する高効率高出力マイクロ波GaN(窒化ガリウム)増幅器”の成果である。

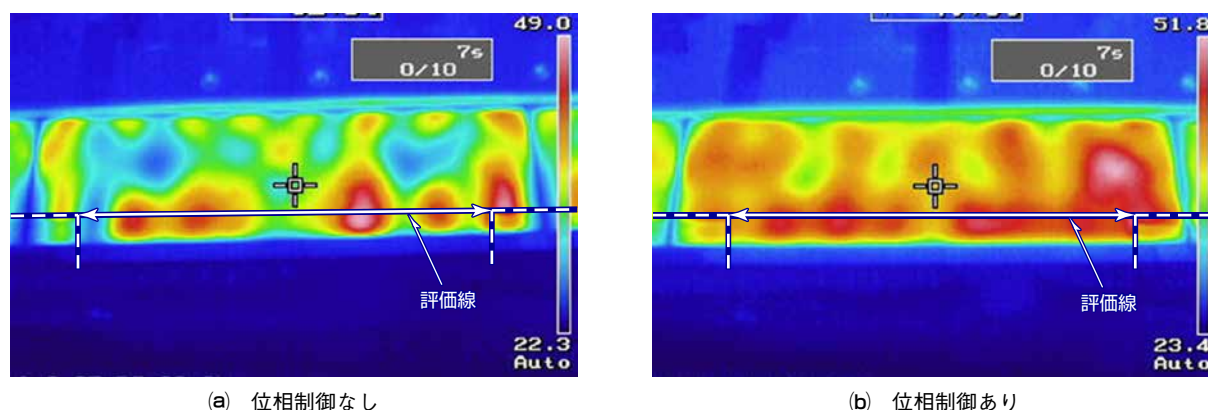


図7. 実験結果

5. む す び

複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御することで加熱箇所を均一化/局在化する、マイクロ波加熱技術について述べた。この技術を応用することで、高効率で低コストなプラスチックリサイクル技術確立し、CN/CE実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 経済協力開発機構(OECD) : Global Plastics Outlook
https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_aaledf33-en
- (2) 一般社団法人 プラスチック循環利用協会 : プラスチックリサイクルの基礎知識2022 (2022)
<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panfl.pdf>
- (3) 経済産業省 資源エネルギー庁 : カーボンニュートラルで環境にやさしいプラスチックを目指して(前編)
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/plastics_01.html
- (4) Iyomasa, K., et al. : High Efficiency Chemical Reactions Induced by Concentrated Microwave Heating Using GaN Amplifier Modules, Journal of the Japan Petroleum Institute, **61**, No.2, 163~170 (2018)