

# マイクロ波と外部熱源によるハイブリッド式加熱炉

鈴木 基晴 高砂工業株式会社 開発部 2G 課長代理

**要約** マイクロ波による加熱は内部加熱、迅速加熱、選択加熱などの特徴を持つ。マイクロ波の特徴を生かすことで工業化を実施し、マイクロ波の工業炉が開発された。マイクロ波を用いた工業用加熱炉によりセラミックスや二次電池材料が迅速で均一に加熱ができる。特にマイクロ波と外部熱源（電気ヒータ、ガスバーナ等）を併用したマイクロ波ハイブリッド炉は雰囲気温度を外部熱源でコントロールし、製品内部温度をマイクロ波でコントロールすることで従来の加熱炉よりも高効率で加熱ができる。本稿ではマイクロ波の特徴や開発の経緯を含めて紹介をする。

## 1. はじめに

マイクロ波は周波数が 300 MHz～3 THz（波長は 1 mm～1 m）ほどの電磁波であり、工業用に使用されるマイクロ波の周波数は電波法の関係により 2.45 GHz が主流となっている。この周波数の加熱は分子の双極子による加熱であり、水を含む物質の加熱に適している。そのため、マイクロ波による加熱は食品加熱や各種の乾燥を目的として利用が始まった。誘電材料であれば固体物質も加熱できるため、最近ではセラミックスや電池材料などの無機材料にもマイクロ波加熱が利用されている<sup>1)</sup>。

マイクロ波による加熱装置の代表的な機器は電子レンジであり、マイクロ波の加熱試験には電子レンジがよく利用される。工業用のマイクロ波炉も電子レンジを大型化したものから始まり、連続式の加熱炉などが製品化された。工業用でマイクロ波を使用する目的は従来のガスや電気を使用した加熱炉にくらべて短時間で処理をし、生産コストを低減させることである。そのため、ランニングコストやイニシャルコストを安価にする必要があるが、マイクロ波を使用する加熱炉はマイクロ波発振器、反射装置、漏洩防止機構等が必要になるため、装置が高価になる。また、電気からマイクロ波へ変換する過程で電力の 50% を損失する。そのため、工業用で利用するためにはマイクロ波の使用量を少なくして設備コストを低減させることや大幅に加熱時間を短縮する必要がある。

マイクロ波の使用量が少なく、短時間で加熱する方

法としてハイブリッド方式がある。従来の電気ヒータやバーナ等を主に使用するためイニシャル・ランニングのコストが低減できる。また、マイクロ波を併用して使用するため短時間で加熱処理ができる。本稿ではハイブリッド式加熱炉への経緯とその特徴について述べる。

## 2. マイクロ波加熱の特徴

マイクロ波加熱には、内部加熱、迅速加熱、選択加熱の特徴があるといわれている。マイクロ波の加熱炉においてその特徴がどのようなものであるかを示す。

### 2.1 内部加熱について

従来の電気ヒータやバーナによる加熱（外部加熱）は表面からの加熱であり、熱の伝導や輻射により加熱する。そのため、熱伝導の低い材料は内部まで均一に加熱をしようとする時間が時間が必要になる。一方、マイクロ波による加熱は物質が電磁波を吸収して加熱するため、短時間で加熱ができる。短時間で加熱するためにはマイクロ波が内部まで浸透する必要がある。マイクロ波の浸透する距離は電力半減深度  $D$  で表わされ、次式で与えられる。

$$D = 3.22 \times 10^9 / f \sqrt{\epsilon_r \tan \delta} \quad [\text{cm}]$$

（ここで  $f$  は周波数であり、 $\epsilon_r$  は誘電率、 $\tan \delta$  は誘電損角である。）

マイクロ波の浸透する距離は周波数が遅いほど長くなる。波長は周波数の逆数であるため、波長が長いほ