

電波で環境保全やモノづくり



物質生命理工学科
准教授 堀越 智

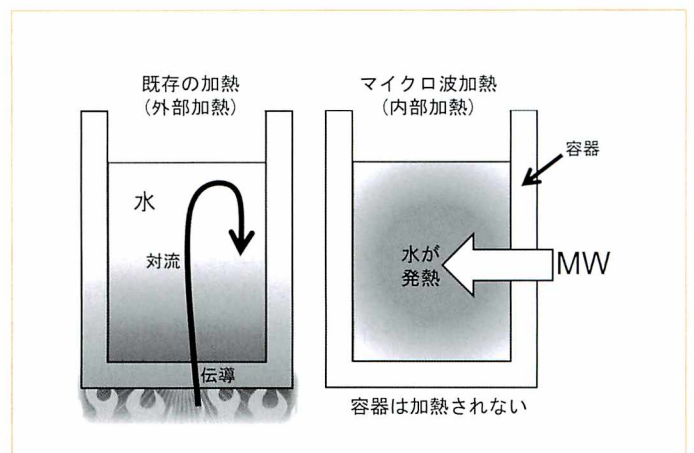
はじめに

ちょうど一年前にも、同誌で原稿依頼を受けたが、その時は「チンしてかんたん化学」という題目で、本研究室で行っているマイクロ波を用いた有機合成の研究とその特殊効果について紹介した。本稿では、より実用的な内容についての研究紹介の依頼であったため、マイクロ波や高周波を用いたアスベストの低温処理やメガネレンズの迅速生産技術について解説する。

マイクロ波・高周波加熱

有機合成やモノづくりにおける多くの工程では、加熱や乾燥などの熱処理が必須とされ、効率的な加熱法の開発が繰り返し検討されてきた。現在では、燃焼による熱風や炎、スチーム、電熱線などが一般的な加熱法として使われている。一方、環境汚染物質の燃焼処理の多くは、重油などの化石燃料を利用した加熱が行われている。これらの特徴は、試料に対して外から内へと徐々に温めていく伝熱を利用しており、いわゆる外部加熱と呼ばれる方法である（図1）。一方、マイクロ波や高周波などに代表される電波を利用した加熱は、容器や試料雰囲気を含めて温めることなく、試料が自己発熱することから内部加熱と言われている。私たちの身の回りの家電にも、これらの電波は熱源として積極的に使われている。例えば、マイクロ波加熱の代表的な応用例として電子レンジが挙げられる。電子レンジでお弁当を温めると、驚くくらい早く食品だけが選択的に温まるが、お弁当の容器やレンジの庫内が全く温まらない。当たり前のように日常的に使っているが、この温めたいものだけを迅速に加熱する技術は、既存の熱源では達成することはできない。一方、高周波を利用した加熱としてIHクッキングヒーターがある。調理に使うフライパンや土鍋（中に金属が埋められている）などを加熱するための器具であるが、このヒーターに手を置いても全く熱くない（ガスコンロではこうはいかない）。これは、フライパンや土鍋が高周波の電磁誘導によって選択的に加熱（誘導加熱）されるため、ヒーター（熱源）は発熱しないからである。

私たちは電波を日常的に加熱用途で利用しているが、その周波数は電波法によって厳密に使用が定められている。マイクロ波とは周波数が300MHz～3THzの電磁波を指すが、電子レンジに利用されている周波数は2.45GHzで、これ以外の周波数を利用した電子レンジは日本で販売されていない。一方、高周波はおおよそ3kHz～300MHzの電磁波を指すが、家庭用IHクッキングヒーターは20kHz

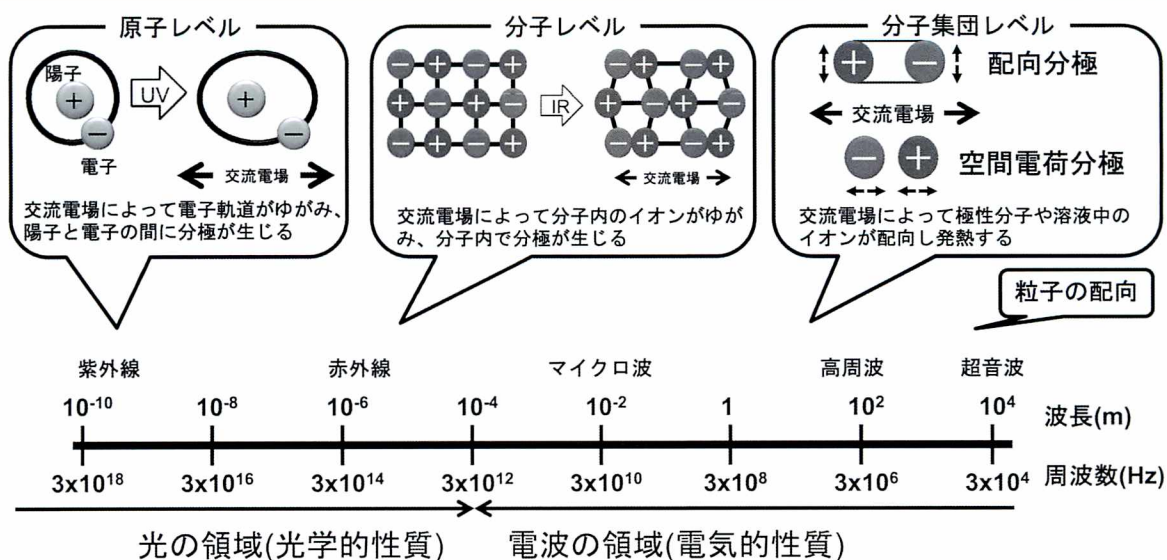


■ 図1 既存加熱とマイクロ波加熱の熱移動イメージ

～100kHzの周波数帯の高周波が使われている。また、高周波の中でも13.56MHz位の領域になると、高周波とマイクロ波の中間の性質（誘電加熱と誘導加熱）が現れる。

各電磁波が与える物質の振る舞い

電磁波は空間の電場と磁場の変化により伝搬していく波の総称であり、光も電磁波の仲間であることを定義したのは、スコットランドの天才ジェームズ・クラーク・マクスウェルである。電磁波である光や電波は、(i) 質量を持たない、(ii) 空間を光速で自由に伝搬して良質なエネルギーと情報を運ぶ、(iii) 互いには衝突することがない、などの共通性を持っており、マクスウェル方程式だけで表すことができる。また、特例を除いて光や電波は金属にあたりと反射する性質を持っている。しかし、電磁波が誘電体に与える振る舞いは、周波数（波長）によって大きく変わる。図2には電磁波が物質に与える分極現象をまとめた。例えば、化学反応でよく使用される紫外線領域の電磁波では、電場の影響で原子核と電子雲の位置が偏る（電子分極）。赤外線領域の電磁波では、電場によりイオン配列の偏り（イオン分極）や有機分子内の結合変化（振動、伸縮、変角）などを引き起こす。マイクロ波領域では、誘電体の中で永久双極子モーメントを持った分子に対して配向分極を誘発する。たまに、マイクロ波と超音波を混乱した解説があるが、超音波は粒子や流体の振動を発生させるため、分子やクラスターよりも少し大きなサイズの物質に影響を与える。



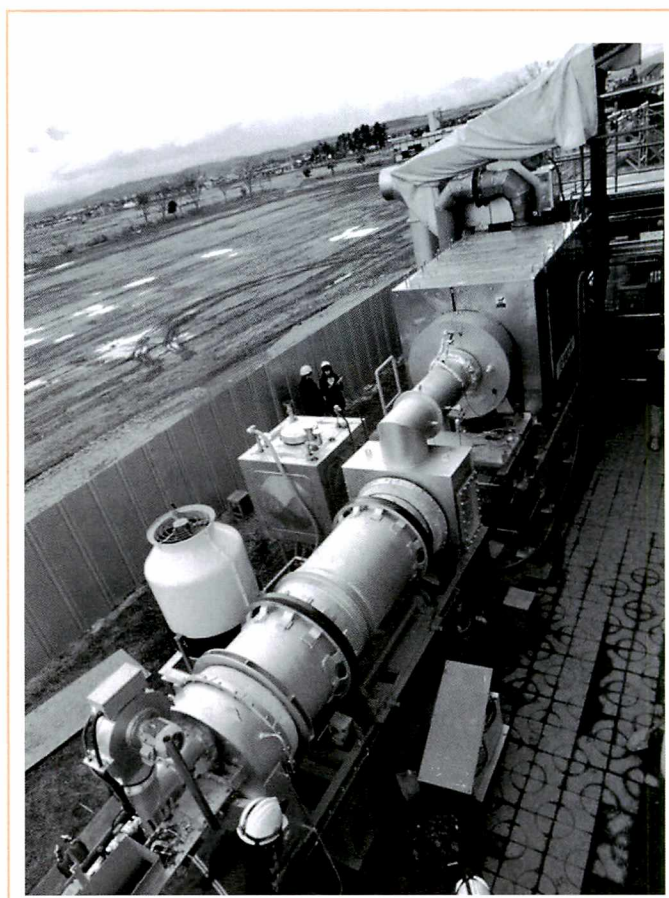
■ 図2 電磁波が物質（誘電体）に与える影響

アスベストの処理

本研究室の研究は2012年度より環境省環境研究総合推進費（復興費）に2件採択されており、1件目は、マイクロ波による瓦礫中のアスベストの迅速処理（京都大学代表・東北大学との共同研究）、2件目は、光触媒コーティング無電極ランプによる被災地の汚染水浄化装置の開発（上智大学）を実践している。本誌では、紙面の都合もあるためアスベストの処理について解説する。

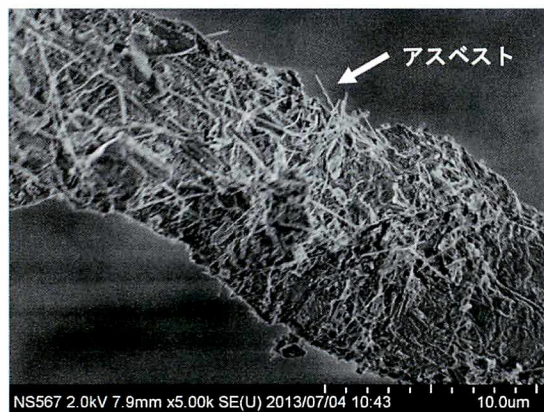
東日本大震災では地震による被害に加え、津波によっても多くの家屋が倒壊し流された。この瓦礫には、法令で規定された有害物質が多数混入しており、復興作業に伴う瓦礫処理の妨げになっている。特に、スレート瓦や配管などの断熱材に含まれるアスベスト繊維（石綿）が含まれた瓦礫が大量にあり、これは法令に従って複雑な工程の処理を行わなければならないため、震災瓦礫全体の処理スピードや経費を著しく悪化させている。これらに含まれるアスベストの主成分はクリソタイル（ $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ）で、化学物質としては無害である。この物質は耐久性、耐熱性、耐薬品性、電気絶縁性などに優れ、安価であることから、「奇跡の鉱物」として様々な用途に使用されてきた。アスベストは繊維状の鉱物の一種で、その1本の直径は0.02～0.35 μm （髪の毛の1/5000）程度である。したがって、これを大量に吸入すると肺癌や中皮腫の誘因となり、健康に大きな被害を与える。通常、アスベストの処理には加熱溶解処理による形状変化に伴う無毒化が行われているが、もともと断熱材や耐熱材として使われてきたアスベストを加熱処理することは、熱伝導性や加熱温度の観点から非常に効率が悪い。したがって、従来法では長時間の処理時間が必要であることが認知されている。また、本プロジェクトでターゲットとしているアスベスト含有廃棄物は、震災から発生したため、その瓦礫にはレンガやコンクリートなども大量に混入している。したがって、既存法のように、選別されたアスベスト廃棄物を処理するのではなく、他の廃棄物とともに混合加熱処理を行わないといけないため、より効率の悪い作業となることが予想される。そこで、本プロジェクトではマイクロ波を用いて迅速にアスベストだけを溶解処理できる装置の開発と実地試験を目標とした。

全長は19メートル以上におよぶマイクロ波低温迅速アスベスト処理

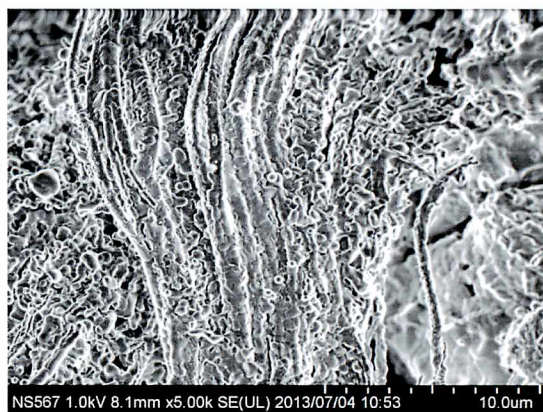


■ 図3 マイクロ波低温迅速アスベスト処理装置
（宮城県名取市閑上中学校廃校跡地で実験）

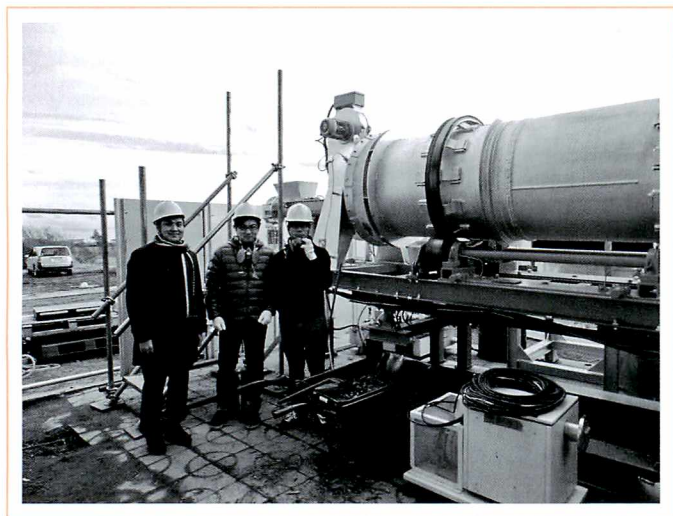
装置を図3に示す。投入口よりアスベスト含有瓦礫をロータリーケルン型炉内へ投入し、そこへマイクロ波を照射することで瓦礫の加熱を行う。例えば、既存の加熱法では160kgのアスベストを処理するために1500℃以上の温度で10時間加熱する必要がある。しかし、本装置を用いれば数十分のマイクロ波照射で、アスベストを連続的に処理することが可能であることが実地試験から分かった（図4）。また、瓦礫温度を950℃まで低下させても（既存法に比べ500℃以上低温）、アスベストを迅速に処理できることが分かった。これは、迅速加熱効



マイクロ波
➔



■ 図4 (左) 未処理アスベストと(右) マイクロ波処理により溶解したアスベストのSEM画像



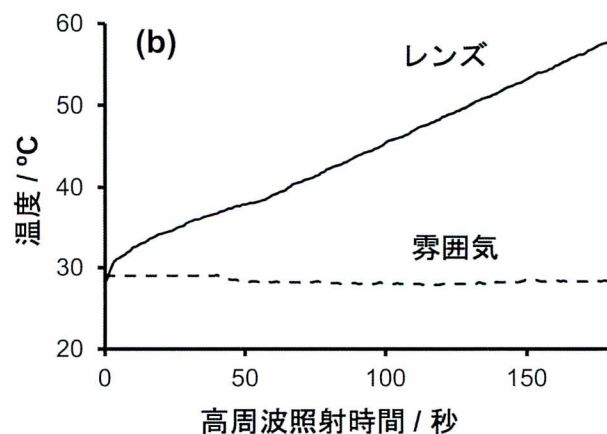
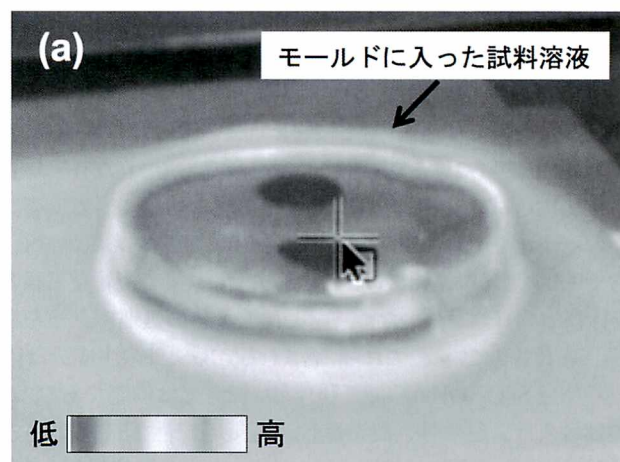
■ 図5 上智大学学生によるアスベスト処理における実験データの取得

果に加え照射されたマイクロ波が針状のアスベスト間へ選択集中的に照射され、微視的な高温場（ホットスポット）を引き起こしているためであると考えられる。また、マイクロ波の内部加熱により瓦礫の中心まで加熱することができるため、処理速度が促進したと考えられる。マイクロ波方式では、直接的に瓦礫の自己発熱を引き起こすことから、温度分布は廃棄物 >> 処理炉の関係になる。一方、既存のアスベスト焼却炉では廃棄物 << 処理炉であり、処理炉は絶えず高温条件下にさらされる。したがって、低温下で作業できるマイクロ波炉は、寿命が長くなる利点がある。本装置では、炉の後段に燃焼炉も接続し、木材瓦礫も同時に焼却できる装置構成となっている。この時、発生した熱は、アスベスト処理炉に熱風として送り込み庫内の保熱ができるように工夫している。現在、2トン/日の処理を達成しており、処理後の瓦礫の中にはアスベストが全く残っていない（処理率はほぼ100%）を達成している。このシステムはアスベストの処理以外にも、他の廃棄物処理にも応用することができる。現在までに、国内外の企業の視察や、様々なテレビ番組や新聞などで紹介され、この新しい処理装置の期待が高いことが示された。また、本研究室の学生も復興地でアスベストの処理実験に参加し、データ収集などを行った（図5）。

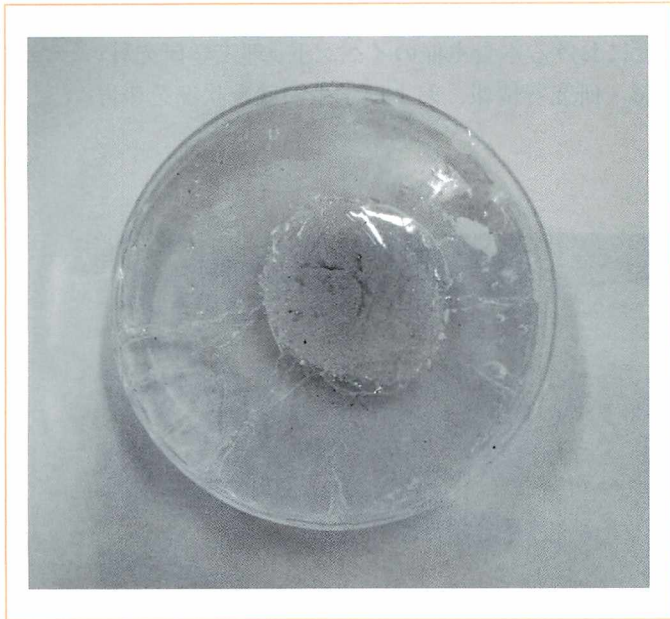
メガネレンズ

メガネレンズ素材の種類は大きく分けてプラスチックとガラスに分けることができる。昔はガラス製のメガネレンズが主であったが、耐衝撃性（難破損）、軽量、優成形性、容易な着色などの利点からプラスチ

ック製メガネレンズが世界的に販売され、現在ではほとんどのメガネレンズがプラスチックに代替えされた。一方、プラスチックの原材料は熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂があるが、メガネレンズ用途には、光学常数、耐熱性、耐薬品性、枠入れの加工性などの優位性から熱硬化性樹脂レンズが使われている。しかし、熱硬化性樹脂は液体試料に硬化剤を加えモールド（鋳型）の中で約20時間以上の加熱時間を必要とするため大量生産には適していない。海外製の安価なメガネレンズは熱可塑性樹脂を射出成型により、安価に大量に作っているものもあるが、国産品に比べ品質が著しく劣るものもあり、目が疲労するも



■ 図6 高周波照射下における試料溶液含有モールドの温度分布測定
(a)：サーモグラフィー像
(b)：高周波照射時間に伴う試料および雰囲気の温度変化



■ 図7 高周波を過剰に照射したメガネレンズ試料（内部加熱の様子）

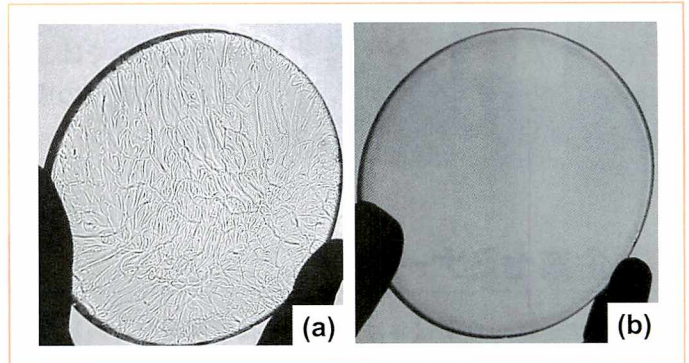
のもある。国産のメガネレンズの生産量が減少する中で、熱硬化性樹脂の問題点である加熱時間の短縮が求められてきた。

本研究室は、熱硬化性樹脂レンズの問題点を改善するために、高周波誘電加熱を利用した研究を（株）サンルックス（鯖江市）と共同で行った。当初、マイクロ波を用いた熱硬化性樹脂の加熱重合を想定したが、原料溶液のマイクロ波による加熱効率が著しく高いため、均一な重合を進めにくいことが理論計算から分かった。そこで、より均一に加熱が進行されやすい高周波による誘電加熱を行った。

試料溶液を詰めた鋳型（モールド）を装置にセットし高周波を照射すると、試料溶液の温度が急激に上昇することが確認された。高周波照射下における試料の温度分布を図6aに示す。モールドに含まれる試料溶液が高周波照射によって自己発熱し、温度上昇に伴うサーモグラフィの色変化が確認された。しかし、それ以外（装置など）の色変化は確認されず大気温度を維持していることが分かった。また、蛍光式光ファイバー温度計を用いた試料溶液および試料から数ミリ離れた位置（雰囲気）の温度を測定したところ（図6b）、試料溶液は高周波の照射に伴って温度が一定の割合で上昇したが、試料から数ミリ離れた位置では全く温度が変化しないことがモニターされた。すなわち、レンズ原料だけが選択的に加熱されていることが示された。さらに、高周波法では試料だけが加熱されるため、高周波の消費電力は平均で数ワットに抑えることができ、既存法に比べ著しい省エネを達成できることが示された。

より詳細な温度分布を検討するため同様の試料に数十ワットの高周波を連続照射した。数分の高周波照射によって試料液体が完全に硬化し、また過剰な加熱によってレンズの中心が黄色に変色した（図7）。これは、予想通り内部加熱（試料溶液の中心が最も高温）が進行していることを示唆する結果となった。

高周波誘電加熱法によりメガネレンズを生産するため、様々な角度から最適条件を検討した。特に、重合のための温度条件や高周波法に適した試料調整を行わなければ脈理が発生するためレンズとして利用することができない。図8aには試行途中のメガネレンズ（脈理あり）を示す。現在では、様々な工夫により脈理のないメガネレンズの試作に成功した（図8b）。既存の加熱法を用いて、同品質のメガネレンズ



■ 図8 高周波誘電加熱で作成したメガネレンズ
a: 脈理あり（失敗）、b: 脈理なし（成功）

を生産するには、20時間以上の加熱重合が必要であるが、高周波法を用いることで2.5時間程度まで加熱重合の時間を短縮させることに成功した。また、様々な厚みを持ったメガネレンズを同時に加熱重合させることにも成功している。

本装置で使用する消費電力は、既存の加熱装置に比べ著しく低く、また加熱重合時間も1/8に短縮されていることから、総消費電力の節約を大幅に進めることができる。また、加熱時間の短縮による効果は連続生産装置への応用が期待できるが、もしマイクロ波を利用した装置を設計すると電波漏えいの観点から複雑な構造の装置が必要となる。一方、高周波は電波漏えいの心配がほとんど必要ないため、ベルトコンベア方式などの連続加熱装置を容易に安価で設計できる。さらに、メガネレンズ以外でも数十センチ角の板レンズの製作も成功しており、様々な分野への応用ができることを実証している。現在、（株）サンルックスによって2年後をめどに本装置をプロセスに取り入れることが検討されている。本研究は、熱硬化性樹脂硬の問題点を、高周波技術が改善した、シーズとニーズが合致した実例であると考えられる。

おわりに

マイクロ波加熱や高周波加熱は、すでに半世紀以上経過した成熟した産業技術である。しかし、その特徴を生かすことで、様々な分野におけるゲームチェンジングテクノロジーにつながる技術と考えられる。本解説を読まれ、マイクロ波や高周波の環境・化学への適用に興味を持たれた方のために、より深く解説した本を文献として示させていただきます。

参考文献

- [1] 堀越 智、谷 正彦、佐々木 政子、図解よくわかる電磁波化学（マイクロ波化学・テラヘルツ波化学・光化学・メタマテリアル）、日刊工業新聞社、2012。
- [2] 堀越 智、篠原 真毅、滝澤 博胤、福島 潤、マイクロ波化学（反応、プロセスと工学応用）、三共出版、2013。