

第9章 新しい機能材料を合成・作製する技術シーズからの 研究開発テーマの発掘

第2節 マイクロ波化学を活用した研究開発テーマの発掘

堀越 智

上智大学 理工学部 物質生命理工学科 准教授 博士(理学)

(株)技術情報協会

2013年7月発刊 「技術シーズを活用した研究開発テーマの発掘」抜刷

第2節 マイクロ波化学を活用した研究開発テーマの発掘

<p>●このシーズが狙い目の企業</p> <ul style="list-style-type: none"> ・化学産業，抽出，エネルギー環境分野， ナノ材料のコア技術を保有している 	<p>●想定される応用先</p> <ul style="list-style-type: none"> ・化学産業，抽出，エネルギー環境分野， ナノ材料
--	--

はじめに

読者の方々が日ごろ使っている電子レンジは、携帯電話などで使われている電波と同じ種類の電磁波であることを知っている人は少ない。電子レンジの開発は軍用レーダーを設計販売していた米国レイセオン社のパーシー L. スペンサーがレーダー用の電波として使ってきたマイクロ波が、物質の加熱も行うことができることを偶然発見し、1947年には初期型電子レンジが市販された。現在では、マイクロ波を使った代表製品の1つとして知られている。軍用通信技術として利用されてきたマイクロ波は、偶然の発見のもとに民生応用の電子レンジとして生まれ変わり、様々な分野における熱源として発展を遂げている。

表1にマイクロ波加熱を利用した産業分野（環境，食品，農業，インク・塗料，木材，フィルム・紙，医療）と、化学分野（基礎研究も含む）を分けて整理した。これ以外にも、半導体の表面加工や人工ダイヤモンドの合成などに使うプラズマ発生源や化学分析装置である電子スピン共鳴（ESR）なども全てマイクロ波がエネルギー源として使用されている。

表1 マイクロ波加熱を用いた産業応用例（上段）およびマイクロ波化学の事例（下段）

環境	食品	木材
ダイオキシンやPCBの分解 アスベストの無害化 プラスチックの油化・固化 放射性汚染物質の処理 廃油処理 医療性廃棄物の固化 フロンやVOCの分解 排ガス処理 ごみの焼却 バイオマス 廃タイヤのリサイクル 光触媒の促進 マイクロ波励起無電極ランプ	殺菌，加工，解凍 濃縮 高速炊飯 乾燥・減圧乾燥 酵素・酵母の活性化	接着加工 曲げ加工 薬剤の加熱 木材の乾燥
	農業	フィルム・紙
	土壌の殺菌 木材の乾燥 木草の害虫駆除 有害物の抽出・分解	薄膜形成 電子配線の焼成 糊の選択乾燥
	インク・塗料	医療
	印刷インクの乾燥 塗料乾燥	ハイパーサミア 殺菌 筋肉などの加温治療 血管治療・切断
無機・金属化学	有機化学	分析化学
機能性複合材料合成 ナノ材料の合成 微粒子コーティング 結晶構造の制御 窒化物の合成 耐火物の乾燥 接合・焼成・水熱合成 マイクロ波製鉄 金属粉末冶金 炭素化 軽量耐火建材の高速養生 特殊ガラスの加熱・溶融 人工ゼオライト合成 砂型の乾燥硬化および接着 ロストワックスの溶出 人工骨	迅速合成 固相選択合成 無溶媒反応 無触媒反応 有機金属錯体の迅速合成 青酸の合成 塩素化メタンの合成 コンビナトリアルケミストリー	有用成分の抽出・濃縮 炭化処理 酸・アルカリ処理 高速濃縮・高速分解
	触媒化学	生化学
	不均一触媒 (Pt還元触媒など) 均一触媒 (鈴木-宮浦カップリングなど) 高品質迅速触媒合成 (ゼオライト合成など)	酵素反応 PCR 実験用ラットの脳の加熱 DNA染色
		高分子化学
		ゴム製品の加硫・発泡 高分子合成 加熱加工 分子量コントロール

1986年に出版された、工業用マイクロ波応用技術¹⁾のまえがきには、「マイクロ波の応用分野は極めて多岐にわたり広い用途が展望されているにも拘わらず、その実用化のテンポが遅い」と示されている。マイクロ波の知識がなくても安価な電子レンジで調査研究を行うことができるため基礎研究に着手しやすいが、やはり新しく技術を導入するには、その特徴を深く理解し用途に合わせた工夫を怠ってはいけぬ。本項では、マイクロ波加熱の特徴を解説し、さらにマイクロ波を用いた化学反応の例を紹介する。しかし、紙面の都合から説明や図表を大きく簡略化したため、詳細な内容は文献を参照していただきたい²⁾。

1. マイクロ波加熱と既存の加熱

電波は「見たり、聞いたり、触れたり」できないため、マイクロ波を加熱プロセスに導入するには既存の熱源と比べてイメージしにくいかもしれない。しかし、マイクロ波の特徴を理解して、それを使いこなすことができればこんな便利な熱源はない。また、一見すると、マイクロ波は電力を用いるのでランニングコストが高いと思われがちであるが、熱への変換効率が著しく高いので、逆に省エネ技術につなげることもできる。ここでは、マイクロ波加熱と既存の加熱の違いを示し、マイクロ波による特殊加熱の中から、スーパーヒーティング・特殊温度分布・選択加熱について紹介する。

一般的に、様々な産業で使われている加熱では、熱源（ヒータ、炎、熱風、温水など）に近い部分から「対流・伝導・放射」によってサンプルを加熱する（図1）。一方、電磁波の一種であるマイクロ波は光速で移動し、複雑な形状の容器に入れたサンプルでも瞬間的に加熱することができるため熱伝導に要する時間が必要なくなる。さらに、マイクロ波の吸収があるものだけが加熱されることからサンプルを選択的に加熱することが可能となる。例えば、電子レンジでお弁当を温める理由として、お弁当の容器（マイクロ波の吸収が低いプラスチックが使われている）を温めることなく、中の食品だけを選択的に温めることができるためである。一方、あまり知られていない特徴であるが、マイクロ波照射（加熱）を止めると、サンプルの熱が大気に奪われるため急速に冷える特徴も持っている。このような特徴は、マイクロ波照射のONとOFFを繰り返すことでサンプルの温度を厳密に制御することができ、既存の加熱にみられる熱のオーバーシュートを防ぐことができる。

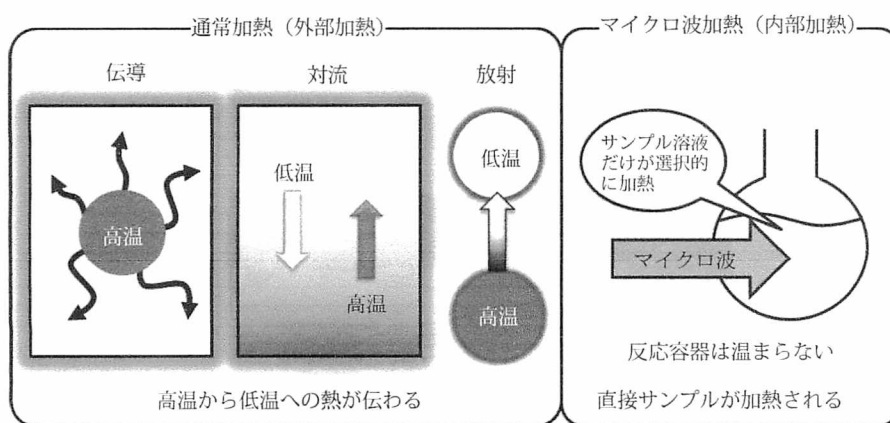


図1 通常加熱（外部加熱）による熱伝導とマイクロ波加熱（内部加熱）による直接加熱のイメージ図

1.1 スーパーヒーティング

電子レンジで味噌汁を温めたら突然爆発（突沸）したというニュースがホームページに掲載されている。これはマイクロ波特有の加熱現象であるスーパーヒーティング（過熱）が偶然起こったためである。マイクロ波加熱では溶液が直接加熱されるため、沸騰核が形成できず沸点に達しても沸騰できない状態（準安定状態）に留まることがある。しかし、この状態の溶液に振動や衝撃が加えられると、液体から気体への相転移が急激に進むことから突沸を起こす。これと類似の現象として過冷却がある。実際に、マイクロ波で水の加熱を大気圧中で行うと、100℃以上になっても沸騰しないことがよくある。また、有機溶媒によっては沸点を20℃以上超えても沸騰しないこともある。マイクロ波を用いた溶液の加熱では沸騰していないからといって、沸点に達していないとは限らない。必ず、温度測定を行い、目的の温度になっていることを確認しなければならない。

1.2 逆の温度分布

試験管に入れた水にマイクロ波を照射すると水は均一に加熱される。実際には、加熱された水は容器や外気によって冷えるため、容器中心の水温に比べ容器内壁付近の水温は低くなる。一方、既存の加熱法では熱源に近い位置が高温となる。このことから、マイクロ波加熱はサンプルの温度分布が既存の加熱と逆になり、マイクロ波加熱を「内部加熱」と表現し、通常加熱を「外部加熱」と表現する。逆の温度分布を利用した実例として、木材の乾燥が挙げられる。国産木材は含水率が高いため、十分な乾燥を行わなければ使用できない。このため、既存法では130～150℃の熱風を吹きあて、木材の中心まで乾燥させる。しかし、木材の中心に比べ表皮のほうが乾きやすいことから、長期間ゆっくりと乾燥させなければ割れや反りの原因となり商品には適合しない。一方、内部加熱による木材乾燥は、木材の中心が表皮に比べ高温になるため、潜熱により効果的に木材の乾燥が進む。この方法の特徴は、高品質を保ったまま短時間で乾燥ができる点であり、さらに既存法に比べ48%の省エネが実現できる。

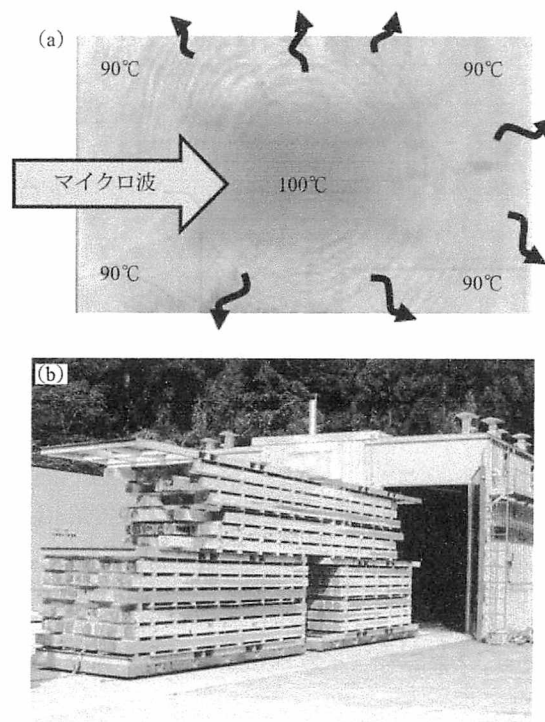


図2 (a) 内部加熱を用いた木材の乾燥イメージ図および (b) 木材乾燥機 (山本ビニター(株) 提供: 写真は高周波を使用)

※カラーの図は巻頭ページを参照

1.3 選択加熱

前述で示したように、読者の方もお弁当を温めた経験から選択加熱は他の特殊加熱に比べイメージし易いと思われる。選択加熱を利用した実例として、宅配便の配送伝票やダイレクトメール等の圧着ハガキの糊の乾燥が挙げられる。既存の熱風加熱では、伝票やハガキが加熱されてしまうため紙のよれやインクの劣化が進む。一方、選択加熱では糊だけが選択的に乾燥するため、紙やインクの劣化を伴うことなく高速連続処理を行うことができる。また、ナノインクを用いた電子配線技術にも選択加熱が利用されようとしている。プラスチック基板へ、銅などの安価な金属ナノ粒子で回路基板を作成し焼結する際に、マイクロ波選択加熱が有効であるとされる。融点の低いプラスチック基板を用いてもマイクロ波の吸収が低いため加熱が進行しないが、その基盤に塗布したナノインクだけが焼結される(図3)。また、既存の加熱では銅ナノ粒子が加熱されると、酸化銅に変化し伝導率が大きく低下するが、マイクロ波法では大気中で加熱しても酸化銅にはならない不思議な特徴を持っている。

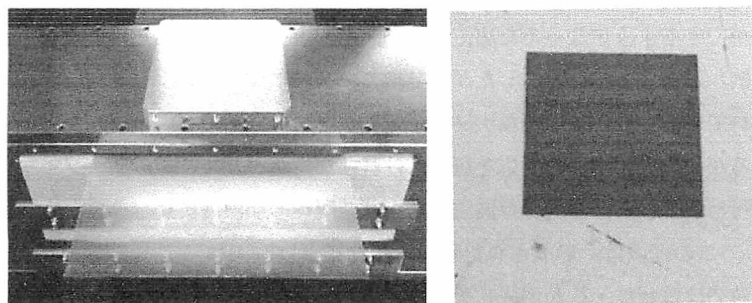


図3 (左)マイクロ波ナノインク乾燥焼結装置および(右)PETフィルム上へ銅ナノ粒子インクを塗布し乾燥させたサンプル(富士電波工機(株)提供)

※カラーの図は巻頭ページを参照

2. マイクロ波化学

2.1 マイクロ波を用いた有機合成および高分子合成

有機化学反応へのマイクロ波の適用は古く、初期の実用化事例としてビニルモノマーの重合をDow Chemical社(1969年)が、グアニジン合成をAmerican Cyanamid社(1980年)が成功している。一方、学術研究では1986年に発表されたマイクロ波による有機合成の2つの論文(Gedyeら、Giguereら)が世界中で注目され、現在まで数千を超す論文が報告されている。初期の研究から、マイクロ波有機合成の重要因子として、反応容器、溶媒、温度管理、安全性などが指摘されてきたが、2000年頃を境に有機合成専用のマイクロ波装置が欧米や日本のメーカーから発売され、種々の問題点が改善された。現在では、安全性・再現性・マイクロ波出力制御性・温度や圧力の制御性が著しく向上したため、洗練された研究が世界中で報告されている。また、様々な産業用大型化学反応装置も市販されており、新しい化学合成装置として、その地位を確立しようとしている。

マイクロ波有機合成の魅力は劇的な反応時間の短縮であり、数時間掛かっていた有機合成を数分または数秒に短縮できれば、化学合成の生産性を著しく向上することができる。例えば、既存法では数時間要する鈴木-宮浦クロスカップリング反応を、マイクロ波加熱に変えると2分間で同等以上の収率を得ることができる。このような、促進効果は様々な有機合成反応において報告されており化学者を魅了してきた。また、化学プラントの熱源をマイクロ波に変えることで、反応時間の短縮に伴いプラントサイズを著しく小型化することができ、使用エネルギーを数十分の一まで省エネできる。さらに、マイクロ波合成法では物質自身が加熱されるため、無溶媒や無触媒反応なども多数報告されており、グリーンケミストリーに適合化した化学プロセスを確立することができる。また、ファインケミカル分野では、迅速合成や厳密な温度制御性などの特徴を生かし、副生成物の発生が低く一定の品質が供給できることから、その実用化が進んでいる。さらに、製薬分野ではマイクロ波化学合成装置とロボット技術と組み合わせた全自動化のマイクロ波スクリー

ニング試験装置が24時間連続運転している。

マイクロ波を用いた高分子重合例として、エポキシ樹脂の重合や乾燥などが60年代後半には報告されており、マイクロ波重合型義歯床用レジンなどが販売されてきた。また、マイクロ波を用いたゴムの加硫は工業装置として数十年の歴史を持っており、マイクロ波を用いた代表的な高分子分野での産業例といえる。ここ数年の間、マイクロ波による生活関連プラスチックの合成研究が盛んに行われている。例えば、マイクロ波でポリスチレン粒子を合成すると、既存法の1/20の時間で、非常に均一なサイズの粒子が得られることや、ポリ乳酸の合成においても、マイクロ波大型装置を用いることで既存法の約1/30の省エネが達成できることが報告されている。

2.2 マイクロ波を用いた金属ナノ粒子合成

ナノ粒子とは1～100nm（ナノ=10⁻⁹）サイズの微粒子の総称で、光の波長よりも小さいことから、金や銀のナノ粒子は可視光を照射すると、粒子径によって赤、黄、緑、青などの色で見える（金色や銀色には見えない）。すでに、四世紀には金属ナノ粒子をガラスに混ぜステンドグラスなどに使われてきた。近年では、化学的・物理的にナノ粒子を安定的に大量合成することができるようになったため、高比表面積、機械的強度、磁気特性などのナノサイズ特有な物性を新素材へ適用した応用例が報告されている。したがって、ニーズの増加に伴いより簡便な手法で均一なナノ粒子を大量合成する手法が求められている。安価で簡便なナノ粒子合成法として、溶液中の金属塩あるいは金属錯体から化学合成する方法が知られているが、均一に溶液の反応を行わなければならない。ここ数年、ナノ粒子合成にマイクロ波加熱を利用する研究が盛んに行われている。マイクロ波法の利点は、既存の加熱法に比べ非常に粒子径の整ったナノ粒子の迅速合成ができる（図4）。この理由は、形成された種粒子がマイクロ波加熱によって均一にナノ粒子へ成長するためである。また、既存の加熱では球状粒子しか生成しない場合でも、マイクロ波加熱では三角状のナノ粒子を生成させることが可能であることが報告されている。ナノ粒子の形状コントロールにもマイクロ波が利用できると考えられ、様々な基礎研究が進められている。

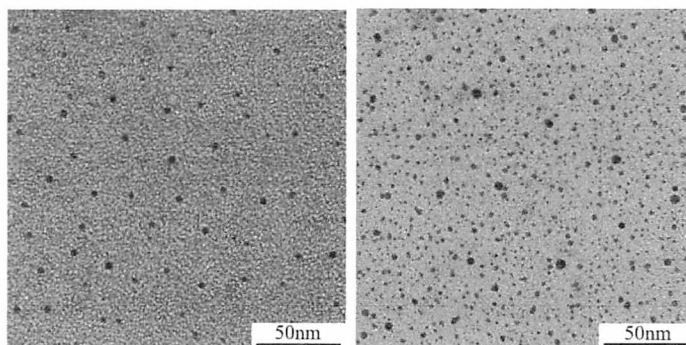


図4 マイクロ波加熱（左）およびオイルバス加熱（右）による銀ナノ粒子のTEM像（黒い点が銀ナノ粒子）

2.3 マイクロ波を用いた無機材料合成

1970年初頭からマイクロ波による様々な種類のセラミックスの焼成や接合の研究が行われてきた。無機材料の合成プロセスの多くは、高温で長時間の加熱を要するが、内部発熱や体積発熱の特徴を有するマイクロ波加熱では、低温でしかも短時間に緻密で結晶粒の微細な焼結体得られる。現在では、装置の大型化が著しく進み、航空機の大規模部品などの焼成装置（図5a）や固体触媒の合成装置（図5b）なども市販されている。

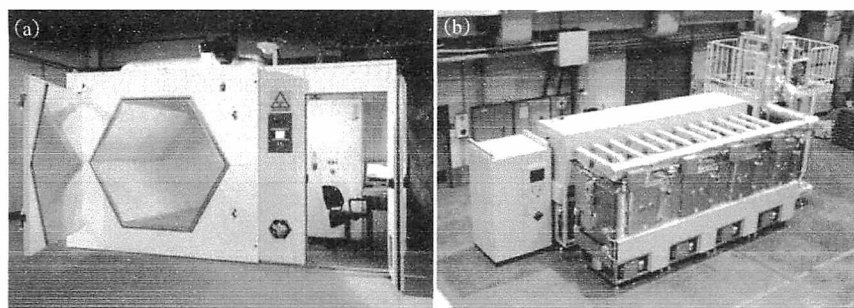


図5 (a) マイクロ波無機材料大型焼成装置 ((株) コーレンス提供) および (b) 360 k W固体触媒焼成装置 (富士電波工機 (株) 提供)

ナノスケールの構造体は様々な薄膜デバイスやスピントロニクスなどの新機能発現における重要な要素技術である。一般的には、これらの形成法にはパルスレーザーデポジション法(物理的手法)などによる積層法や、自己組織化法(化学的手法)が知られてきた。近年、ナノスケール構造体をマイクロ波選択加熱を利用して形成させる試みが行われている。例えば、 SnO_2 と TiO_2 粉末を混合した試料にマイクロ波を照射すると SnO_2 - TiO_2 系固溶体の形成事例がある。既存法では 1430°C の温度条件で数時間の加熱が必要であるが、マイクロ波法では 860°C で 2 分間加熱するだけで、固溶体を得ることができる。これは混合サンプルへマイクロ波が照射されると SnO_2 が選択的に加熱され、 TiO_2 相に向かって一方向拡散することから、自発的にナノ積層組織を形成するためと考えられる。

窒化チタン (TiN) は高硬度、耐熱、耐腐食性に優れた無機材料であるためドリルの刃先などへコーティングされている。従来法ではスパッタ法やプラズマ CVD 法によりコーティングを行うが生産性が低いことが知られている。一方、空気中の金属チタンをマイクロ波加熱するだけで TiN を形成できることが報告されている。一般的には大気中でチタン金属を加熱すると TiO_2 が形成されるが、マイクロ波加熱では TiN が形成する。このような不思議な現象はマイクロ波特有の効果として知られており、義歯インプラント材料等へのコーティングへの応用が期待されている。

2.4 環境エネルギー分野へのマイクロ波利用

震災後の復興作業の中で、福島県の原子力発電所の問題は最優先課題の一つである。マイクロ波加熱は古くから放射線廃棄物の処理や使用済核燃料の再利用などに適用されてきた。さらに、原子力施設から発生したごみ(紙、布、木材、プラスチックなど)の処理にも利用されている。通常、これらのごみは燃焼法により焼却されるが、残留の灰が依然として放射線に汚染されているため自然界に散布することはできない。このために、マイクロ波による処理灰の熔融固化が行われている。電波であるマイクロ波は灰に対して直接汚染物質に触れる部分が少ないため、装置の放射能二次汚染が著しく低いことが実証されている。また、放射能汚染に汚染された原子炉のコンクリートの粉碎破壊にもマイクロ波が検討されてきた。コンクリートはマイクロ波の吸収率が低いためほとんどが透過するが、コンクリート内部に含まれている水分がマイクロ波を吸収し選択的に発熱する。この発熱による水の気化は、周囲との圧力差を生じさせるために熱応力による歪みが生じ、結果としてコンクリートが粉碎される。掘削機などによる粉碎法とは異なり、コンクリートに触れる部分が少ないことから、重機の放射能二次汚染が最少で済む。このような粉碎技術の歴史は古く、スエズ運河の開拓工事に伴う川底の岩盤粉碎も同様な技術が検討された。

廃プラスチックのリサイクルにマイクロ波の利用が検討されている。多くの汎用性プラスチックはマイクロ波の吸収が低いことが知られているが、ポリ塩化ビニルはマイクロ波の吸収率が高いため、混合廃プラスチック中でのポリ塩化ビニルだけを選択的に加熱し、脱塩素化分解することに成功している。金属スラッジに含まれる、貴金属等のリサイクル回収にもマイクロ波加熱の利用が検討されてきた。粉末にした金属ごみへマイクロ波発熱効率が高い活性炭を混ぜ、融点の違いから貴金属を選択的に回収する実用化実験が行われている。現在では、この手法を応用してレアメタルの回収にも適用されており、非常に高い回収効率が実現できることが報告されている。

土壌や環境中に飛散した化学汚染物質の分解についても、マイクロ波の利用が検討されてきた。土壌中に含まれてい

る、様々な有機汚染物質（PCB類、PAH類、ダイオキシン類、残留農薬、アスベストなど）のマイクロ波加熱分解が日本や欧米で積極的に行われている。マイクロ波法では土壌などに含まれる鉄成分を選択加熱し、これが一種の化学触媒となるため既存の加熱に比べ著しく分解が促進することが知られている。また、焼却炉などから出る灰の中に含まれるダイオキシン類の処理を行うマイクロ波処理炉も活躍している（図6）。この方法の特徴は、処理速度の昇上だけではない。既存法では炉体を加熱し、その伝熱で試料を加熱するが、マイクロ波法では汚染物質が自己発熱するため、試料に対して炉の温度が著しく低い条件で処理を進められる。このため炉体の熱による経年劣化が抑えられる利点もある。

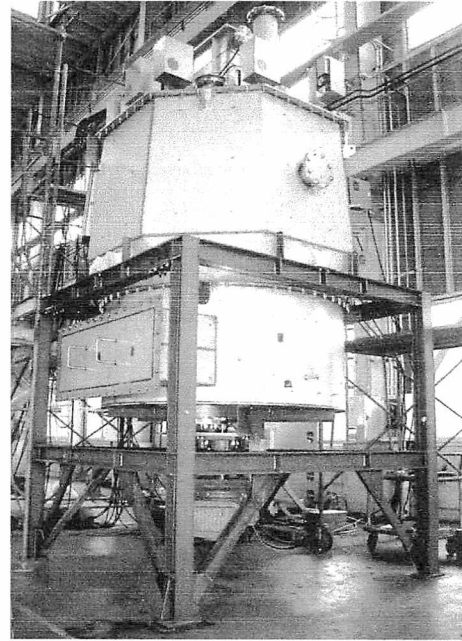
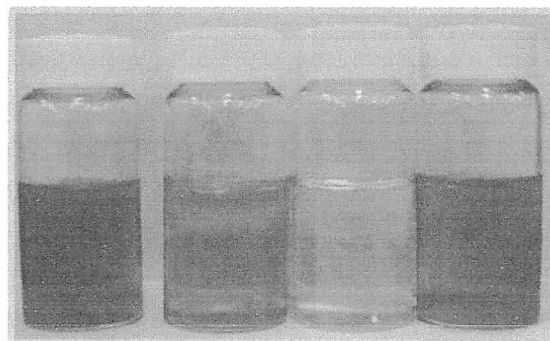


図6 都市灰や土壌に含まれるダイオキシンの分解するマイクロ波大型炉（日本スピンドル製造提供）

代表的な光触媒である二酸化チタン（ TiO_2 ）は「空気、水、紫外線」があれば汚染物質の分解処理ができることから、1980年初頭より水や空気の浄化のための環境触媒として世界中で実用化が進められている。この中で、空気清浄、防汚、殺菌などの分野では広く実用化されてきたが、水処理の分野では、既存法に比べ汚染物質の分解速度が遅いためあまり利用されてこなかった。この問題を解決するためマイクロ波の利用が検討されている。筆者らは、紫外線とマイクロ波を同時に光触媒（ TiO_2 ）へ照射すると水処理速度が数十倍に促進することを発見した。例えば、色素水溶液（モデル排水）に TiO_2 を入れマイクロ波と紫外線を同時に照射すると色素の脱色速度が著しく促進した（図7）。一方、同じ温度条件でヒーター加熱と紫外線照射を併用してもこのような効果は表れないことからマイクロ波特有の効果であることが分かる。また、冷却ジャケットを用いて反応溶液を冷却することでマイクロ波加熱を行っても、冷却と加熱のバランスから溶液が室温を保つように温度をコントロールした。この条件下で紫外線とマイクロ波を照射しながら TiO_2 による汚染物質の分解を行うとその効率がさらに向上した。すなわち、光触媒反応においてマイクロ波の熱は触媒活性の促進に不必要であることが分かった。さらに、マイクロ波の周波数に対する光触媒の応答性があることから、 TiO_2 の光触媒能を促進させる要因として熱以外の効果があることが分かり、マイクロ波の非熱的効果の存在を示唆した。



（左から順に、分解前のローダミンB色素水溶液、 TiO_2 /紫外線照射による脱色、 TiO_2 /マイクロ波/紫外線照射による脱色、 TiO_2 /ヒーター加熱紫外線照射による脱色）

図7 光触媒二酸化チタン（ TiO_2 ）によるローダミンB色素水溶液の脱色実験

※カラーの図は巻頭ページを参照

2.5 化学抽出法におけるマイクロ波の利用

マイクロ波を使った化学装置の中で、最も利用されている分野は、原子吸光分析法、誘導結合プラズマ発光分光法(ICP-AES)、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)などの試料の前処理(分解)である。既存法は煩雑な操作が必要で、元素によっては前処理中に揮散が起きやすいため、人為的ばらつきやコンタミネーションが生じることが知られていた。一方、マイクロ波法は簡便に試料の前処理を行うことができることから、これらの問題も発生しにくいため標準的に使用されている。アメリカ EPA 環境保護局では、すでにマイクロ波法が公定法として定められており、現在では世界基準になろうとしている。また、天然物からの有効成分の抽出にもマイクロ波加熱が注目されている。例えば、既存の抽出法を用いて柑橘類からの有用成分の抽出には 18 日かかる工程が、マイクロ波法では数十分に短縮することができる。一方、土壌をはじめとした自然界からの農薬、PCB 類、ダイオキシン類等の汚染物質のマイクロ波抽出についてもマイクロ波の利用が検討されている。

2.6 マイクロ波の非熱効果

化学反応において、マイクロ波加熱は革新的に反応速度を促進させることがいくつもの実験から実証されている。これは、マイクロ波が化学反応における誘電加熱やジュール加熱のための熱源として機能しているほかに、それとは別の役割があると思われる。このような、いわゆる熱では理解できない効果を「非熱効果」として、世界中で議論されてきた。初期のマイクロ波化学の研究では、前述で示したようにスーパーヒーティングや選択加熱に対する化学者の知識が少なかったことから、これらを見逃して非熱効果の存在を提唱してきた論文もあった。しかし、マイクロ波照射法や温度計測の精度向上により高精度な実験が可能となり、非熱効果についての再検証が行われている。今後は、化学反応に対するマイクロ波効果として、マイクロ波の特殊熱効果と非熱効果に分けて考える必要がある。また、化学反応に対するマイクロ波の周波数効果や磁場効果などの情報も整備されてきており、単なる代替熱源からマイクロ波独自の化学反応も明確になってきた。近年では、マイクロ波独自の効果を制御し、高効率省エネ的にマイクロ波化学反応を行う流れにある。

おわりに

電子レンジの発売からすでに半世紀以上が経ち、数々の高出力マイクロ波食品加熱乾燥装置が産業界で活躍してきた。一方、携帯電話や通信などで使われてきた高精度のマイクロ波電波技術についても既に高水準にあると考えられる。今後は、“ハイパワー”と“高精度”を融合したマイクロ波技術により異分野へ挑戦が求められている。マイクロ波化学はこれらの新天地として、最も大きく期待されており、技術立国を目指すわが国が世界に発信する技術として先導していかなければならない。それには、単にマイクロ波の迅速加熱を利用した代替熱源としての利用だけではなく、マイクロ波の特殊効果を使いこなした革新的な高効率・省エネ型の化学プロセスを構築しなければならない。さらに、この技術は化学分野に限らず、さまざまな分野においてゲームチェンジングテクノロジーにつながると考える。本節が、マイクロ波に対する読者の方々の興味を引くきっかけになれば幸いである。

文 献

- 1) 柴田長吉郎, 工業用マイクロ波応用技術, 電気書院, (1986)
- 2) 堀越 智, 谷 正彦, 佐々木政子, 図解で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)