

研究トピックス



我が国におけるマイクロ波加熱 研究の歴史と JEMEA の歩み

History of Microwave Heating Research in Japan and Progress of JEMEA

東北大学大学院工学研究科 吉川 昇

Graduate School of Engineering, Tohoku University

Noboru Yoshikawa

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02

e-mail: yoshin@material.tohoku.ac.jp

1. 緒言

筆者は、2000 年頃からマイクロ波加熱の研究を始めたのであるが、既にその頃には JEMEA の前身である日本電磁波応用研究会（1993 年設立）とマイクロ波応用技術研究会（1999 年設立）という組織があり、マイクロ波技術や加熱応用に関しても大いに研究発表が行われていた。そこでは当分野の先輩方が活躍されており、先輩方から多くのことを学ばせて頂いた。そういう立場であるにも拘らず、大変僭越ではあるが今回編集委員会からの依頼により JEMEA 設立前後から現在に至るまでの我が国における研究活動について、執筆させて頂くことになった。筆者の専門の都合で、材料系の内容が多くなった点、引用文献が必ずしも最適ではなかった可能性についてはご容赦願いたい。また本書では、登場する方々の呼称を**氏と記し、また当時の所属名で掲載させて頂いた。

2. マイクロ波加熱発見と初期の研究

マイクロ波は第 2 次世界大戦以前からレーダーや、磁気共鳴研究の目的で使用されていたが、マイクロ波を加熱に用いることができる事が分かったのが、1946 年ということである。Raytheon 社の Percy Spencer がマグネトロン発振管の実験中にキャンディーバーが溶けていることに気付いて加熱への応用が可能であるこ

とを発見したという Readers Digest の story があるが、この正否は別としても同人がマイクロ波加熱に関する特許を取り、同技術に貢献したことは確かなようである[1]。

日本においても、発振管の研究、レーダーなどの通信分野、磁気共鳴への応用研究の他に、初期の加熱研究が成されたはずで、1950~60 年頃に日本でも電子レンジが発売されている[2]。当初は電子レンジの価格は高く、食品の加熱のために広く家庭で使用されてはいなかったし、マイクロ波加熱された食品というものには不安を持つ人も多くいたらしい。1970 年代になると、マグネトロンの大量生産により価格が低下し、普及し始めた。またマイクロ波加熱研究に転機を与えたのが、オイルショックであったと言われている。オイルショック後、電熱への依存拡大と省エネルギーという観点から、マイクロ波加熱を用いるプロセスが検討されている。当時東西冷戦下において、石油産出国からの供給に対する不安から電熱への依存が望まれた。原子力発電の勃興とそれによる電力供給とタイアップした方向性があったと思われる。

また 80 年代には、高温超伝導酸化物の発見があり、それと並行して 90 年代にはセラミックス研究が盛んになった。当初セラミックス粉末の乾燥に使用されて

いたマイクロ波加熱により、セラミックス自体も加熱されることがわかり、セラミックのマイクロ波加熱という研究が盛んに行われ始めた[3]。米国 MRS(材料科学会)では 2000 年までにセラミックスのマイクロ波加熱に関するセッションが 4 回も開催された。この辺りからマイクロ波加熱効果ということに特化した研究が行われるようになった。

3. JEMEA 発足以前における日本のマイクロ波加熱研究

マイクロ波応用技術研究会では産業創造研究所という機関と共に「マイクロ波効果・応用シンポジウム」を定期的に開催していた。マイクロ波応用技術研究会の阪大柳田祥三会長や日本電磁波応用研究会の柴田長吉郎会長を筆頭に、以降 JEMEA において重要な活動を担う多くの人々が参加していた。また当時から現在の JEMEA の協力企業の方々も数多く出席されていた。同研究会は奈良教育大の松村竹子氏が中心となり、2002 年奈良においてマイクロ波国際会議を開催し、更に 2004 年には、かがわ産業技術支援財団高温高压流体研究所の加藤俊作氏らが中心となって国際会議が、高松で開催された。このプロシーディングも当時大きな研究・技術集ではあった。一方既にマイクロ波加熱研究の最先端の情報を集めたハンドブック「マイクロ波加熱技術集成」も NTS 出版から 1994 に出版されていた[4]。

実際この頃から、正式に学会を立ち上げようという機運が高まってきたと言えるのではないかと。2006 年 8 月には JEMEA が発足し、2007 年 5 月に特定非営利活動法人として東京都に認証され、2007 年 6 月 1 日に法人登記された。そして国士舘大の二川佳央氏が初代会長に就任し、2007 年 9 月に第 1 回目の JEMEA シンポジウムが東北大の滝沢博胤氏を実行委員長として仙台で開催された。第 1 回 JEMEA シンポジウムの講演者名や題目を調べてみると当時の研究動向がわかる[5]。2008 年には、世界におけるマイクロ波加熱/応用関係に関する学会が共同して GCMEA(Global Congress on Microwave Energy Application)を開催することになり、第 1 回目を JEMEA 主導により日本の琵琶湖畔で開催した。4 年前の高松以来の大規模な国際会議であるが、その後 4 年ごとに諸国で開催され、2024 年に

は再び日本において 5GCMEA の開催が予定されている。図 1 には、1GCMEA におけるバンケットの写真であるが、当時の主要メンバーの姿が伺える。



図 1: 1GCMEA のバンケットステージの様子

この時期において既に、マイクロ波加熱における装置、物性測定に関する電気系、マイクロ波加熱を利用した化学反応に関する化学系、セラミックスや金属精錬に関する材料系、その他(医療、薬学、農学)などの生体系に大きく分類され、全国のいろいろな所で研究が行われていた。この中でマイクロ波加熱した物質そのものを研究するグループでは、自分たちの研究分野の範囲内でマイクロ波加熱において生じる諸現象やその物質の変化について調べることが目的であった。これは当然の傾向であり、そのまま現在に至っているが、「マイクロ波加熱学」という学問が初めから存在していた訳ではない。マイクロ波加熱の研究は Multi-disciplinary な側面があり、JEMEA という交流の場においてそれぞれのフィールドの専門家たちが、マイクロ波加熱という手段に対し相互理解を確実に進めて行ったと考えられる。たとえばマイクロ波装置とその仕組みを理解するために、化学や材料分野の研究者たちが、電気系の発表に耳を傾けるようになっていった。筆者もそうである。

ここで、筆者がマイクロ波研究を始めた 2000 年頃において行われていた研究を幾つか紹介する。東大の森田一樹氏が鉄鋼分野において、マグネシウムレンガの炭素還元や、鉄鋼スラグの加熱[6]やリンのマイクロ波還元、東北大の滝沢博胤氏らによる機能性セラミックスのマイクロ波合成や、ミリ波を用いた Ti の大気マイクロ波加熱による TiN の生成[7]など、日本鉄鋼協会の研究会で盛んに議論した記憶がある。また九大の辻正治氏らは、マイクロ波を印加した溶液反応により結晶

形態がよく現れた貴金属ナノ粒子の作製を行っていた[8]。

またマイクロ波加熱を用いた大規模装置の工業応用では、当時の新日本製鐵の平初雄氏らによる鉄鋼製錬用炉の不定形耐火物を乾燥するために使用されたマイクロ波技術などの研究がある[9]。鉄鋼の製錬炉の内張レンガは絶えず消耗損傷が激しい。このため定期的にレンガを交換するが、交換後に湿ったレンガを熱風バーナーで急速に乾燥すると爆裂が生じる。熱風マイクロ波炉による効率良い乾燥プロセスに成功している。また核融合研の佐藤元泰氏は、大型マイクロ波炉を用いてアスベストの無害化を試みている[10]。日本スピンドル製造(株)の木嶋敬昌氏は都市から出る民生ゴミの飛灰無害化のマイクロ波処理を試みている[11]。

4. JEMEA 発足後における日本のマイクロ波加熱研究

JEMEA が創設され現在に至るまで、既に 17 年経過しているが、JEMEA とともにマイクロ波加熱の基礎/応用研究・および工業的な応用技術は、明らかに発展している。また JEMEA の発足と並行して、本分野では大型予算の獲得があり、それも発展に貢献した。たとえば文科省特定領域研究(2006~2012)、環境省環境推進研究(2012-2013)、経産省 NEDO(2015~2016)、日本学術振興会基盤 S(2017~2021)などのプロジェクトによるグループ研究により研究が促進された。そして研究者同士の交流も進んだ。図 2 には 2009 年に行われた特定領域研究における研究会(夜の部)のスナップ写真を示すが、当時からこのように熱心な議論が繰り返されてきた。このような雰囲気は現在の JEMEA 若手部会 WG などにも受け継がれている。更に JEMEA という学会だけでなく、日本学術振興会においては先導的研究開発委員会、電磁波非平衡加熱に関する第 188 委員会を経て、現在の R024 委員会[12]に至る活動なども、我が国における本分野の研究発展に寄与したと言えるだろう。先導的研究開発委員会では JEMEA との協力において、2014 年に我が国で 2 つ目のハンドブック「最新マイクロ波加熱エネルギーと応用技術」(産業技術サービスセンター)[13,14]が出版された。本文献により当時活躍されている研究者・技術者たちの動向を知ることができる。本報においては、近年の研

究紹介としてマイクロ波加熱研究におけるいくつかのトレンドに絞って述べたいと考える。



図 2: 特定領域研究における研究会(夜の部, 2009 年夏)

4.1 マイクロ波非熱的効果に関する議論

マイクロ波加熱の特徴として急速加熱、内部加熱、選択加熱という点が挙げられるが、それ以外の特徴として、頻繁に議論されるのがマイクロ波の非熱的効果である。現実には多くの研究者たちがこれを解明することに興味を抱いているのかもしれない。しかし有機化学の分野では大きな論議が展開された。オーストリア、グラーツ大学 Oliver Kappe らによる”Microwave Effects in Organic Synthesis: Myth or Reality?”と題する論文[15]が 2012 年に発表されたが、要するに非熱的効果と題される結果は、実は熱的な原因で説明できると主張するものである。これに対し JEMEA においては慶應義塾大の山田徹氏[16]などをはじめとして、化学の分野で多くの方々がそれに反対する研究を報告している。マイクロ波加熱により高温を発生し固体材料のプロセッシングを行う場合には、特に温度測定の難しさがあり、これが非熱的効果と誤解されることも多い。また温度分布の不均一が起こりやすく、ホットスポットや熱暴走の発生などに悩まされる[17]。この分野においても、非熱的効果に関しては多くの議論が成されている。その正否は別としても、むしろホットスポットや熱暴走を積極的に利用した省エネルギープロセスが開発されることも期待される。

4.2 シングルモードを用いた電場/磁場分離加熱と金属粒子の誘電加熱

マイクロ波キャビティ内においては、電場と磁場が定在波として振動している。このためキャビティのモードに従った電場と磁場の定常分布が形成される。この中でそれぞれ電場、磁場の最大位置に試料を設置すれば、電場加熱と磁場加熱を分離してその効果を調べることができる。マイクロ波の加熱利用以前にも、磁気共鳴の研究においては磁場最大位置に試料をセットされ実験がなされていた。磁気共鳴研究においては、加熱による温度上昇が生じて材料内に変化が生じるのは好ましくない。このためマイクロ波出力は数 mW 程度と低い。これに対し、高出力のマイクロ波を積極的に用いて電場/磁場分離加熱を行う試みが 2000 年頃に米国ペンシルバニア州立大学の Agrawal らによって報告された[18]。筆者はシングルモードマイクロ波アプリケーションを用いたこの手法に興味を持ち、一早く装置を準備し、つくばで開催された 2005 年の「マイクロ波効果・応用シンポジウム」で研究報告を行なった。この方法は、波長(キャビティ寸法)に対して十分小さな試料しか適用できず、大量処理を必要とする生産プロセスへの応用は難しいかもしれないが、マイクロ波加熱機構解明など基礎的な研究に適している。またマイクロ波エネルギーを局所に集中できるため、低いパワーでも大きな加熱効果が得られ、研究者として大変魅力があった。JEMEA においても多くの研究者がこれを利用した研究を行なっている。産総研の杉山順一氏らはキャビティモードとその電磁場分布を基に化学プロセスに対する基礎/応用研究を行なっている[19]。

ところで、物質内における単位体積あたりのマイクロ波エネルギー損失(P)は Eq. 1 で表されるが、この手法によりいくつかの材料を加熱してみると、誘電体である水などは電場最大位置でよく加熱され、Eq.1 の第 1 項の誘電損失機構が、そして強磁性体物質は磁場最大位置でよく加熱され、第 2 項による磁気損失機構が働く。しかしながら非磁性の金属粉末や金属薄膜では磁場最大位置の方が効率的に加熱されることが分かっている。Eq.1 によると、金属に生じる誘導電流加熱による損失が金属の導電率(σ)と電場の強さ(E)で記述されることと矛盾しているように見える。

$$P = (\omega\epsilon''|E|^2 + \omega\mu''|H|^2 + \sigma|E|^2)/2 \quad (1)$$

(ω : 角振動数、 ϵ'' : 誘電率虚部、 μ'' : 透磁率虚部)

これは、誘導電流(J)が磁場(H)の時間変化で誘起され、それに対応する電場($E = J/\sigma$)が第 3 項の誘導電流損失機構と解釈される。しかしながら金属粒子がナノサイズになり誘導電流の表皮厚さより小さくなると、誘導電流損失機構による磁場加熱よりも、電場での加熱が優勢になることが分かってきた。これは東工大の椿俊太郎氏、和田雄二氏らの一連の研究の中で EXAFS という X 線手法を用いて触媒金属粒子のマイクロ波電場/磁場分離加熱における温度測定の結果[20]や、著者らがナノ/マイクロ金属粒子とシリカ粒子の複合体の実験で行なった結果[21]でも示されている。プラズモニクス分野においては、光学領域における金属の誘電的性質(すなわち金属の誘電率)という解釈が一般的であり Drude-Lorentz モデルで解析されるが、マイクロ波周波数領域における金属の誘電性については、光学域における上記モデルとは異なった解釈が必要といえるようだ[21]。

4.3 半導体発振器の発展と今後の展開

半導体発振器により発振したマイクロ波利用の研究が、2010 年以降になると特に顕著になってきている。これまで高価であった同発振器が、半導体の開発と共に価格が低下し、既に国内でも生産が行われ[22]しており、2.45GHz の 1kW 程度の出力を有する加熱装置がある程度の価格で市販されるようになってきている。しかしながらそれ以上の周波数、特にミリ波などになると高出力装置の低価格化には、未だ時間がかかりそうである。京大の篠原真毅氏や三谷友彦氏らはマイクロ波を用いた電力伝送の研究を行なっている[23]が、半導体発振器の利用拡大に関しても、前述した学振の委員会などで産業応用に関し検討を行なっている。

半導体発振器を用いると、マイクロ波の位相をコントロールでき、マイクロ波の局所照射を可能とするため、弁当の加熱などにおいてもこれまでと違った応用が期待される。上智大の堀越智氏は、2015 年の JEMEA シンポジウム[24]において、同分野の国内外の現状を持ち寄ったパネルディスカッションを開催し、そこでは多くの情報が発信された。ところで、4.1 で論じたよう

に「半導体発振したマイクロ波加熱による特殊効果」があれば大変興味深い。この観点から例えば1つの応用として、マイクロ波に変調をかけ異なった周波数成分を重畳することによる効果など、今後研究方向のバリエーションを拡大できるかもしれない。

4.4 マイクロ波装置の大型化と生産プロセスへ応用

大型のマイクロ波加熱装置は、既に多くの実用化が成されている。2 で述べたような製鋼炉レンガの乾燥の他にも、茶葉の乾燥など国内でも実用化がなされている。ここではまず考慮すべき点として、大量に工業生産を行うためにはバッチ式か、連続式かという観点である。連続式の方が生産性に優れる訳であるが、この場合に直面する問題としてはマイクロ波の漏洩ということになる。この影響を最低限に考慮した上で行われている。産総研の西岡将輝氏は半導体発振による循環流通型の化学反応器のスケールアップを試みている[25]。また実証炉規模で行なった例としては、京大の渡辺隆司氏らもリグノセルロースからのバイオマス生産のための装置の開発[26]を行なっている。中部大の佐藤元泰氏、檜村京一郎氏らによる非飛散性アスベスト処理に応用したロータリーキルン炉の試み[27]も行われた。これは固体系への適用であり、今後その装置の耐久性と共に注目したい例といえる。

次にバッチ式の例であるが、佐藤元泰氏は東工大の永田和宏氏とともに、マイクロ波製鉄の実証炉を作製し、銑鉄を得ている[28]。これらの研究においては、マイクロ波援用において生じる種々の技術的課題を明らかにしている。例えば、鉄鉱石、炭材などの粉末(ダスト)がマイクロ波発振器の汚染を防ぐ目的から、マイクロ波に対して透明なガラスやセラミックスでできた「窓」が必要である。これが汚れてしまうと、そこでエネルギーを吸収し、炉内に導入されるマイクロ波強度が低下する。同様のことが耐火物の問題としても存在し、液体金属の染み込み等と共に、高温では耐火物もマイクロ波吸収が生じ、発熱に不具合が生じる。

化学液体の反応装置においても、マイクロ波を導入し加熱を行うためには同様に「窓」が必要であるが、これをマイクロ波に対して透明な非金属材料で作成する必要がある。特に密閉系で高温を扱う反応器では、耐圧

の問題と向き合う必要がある。このように大型化には難しい課題が多く存在しているが、大阪大学・マイクロ波化学(株)の塚原保徳氏らは、積極的に化学プロセスへの大規模装置導入に取り組み事業化を行なっている[29]。

プラズマ発光分光分析などにおいて液体試料を作成する際に Microwave digestion 法 [30]として、試料の溶解促進に用いる応用は実用化され一般的に使用されているが、このように今後大規模な工業生産において既存技術を replace して行く事が期待される。

4.5 シミュレーション手法と基礎物性値

マイクロ波加熱の大型装置の操業などにおいては、温度計測技術も重要であるが、マイクロ波加熱の操業中に被加熱物の内部温度を測定するのは容易ではない。しかし近年コンピュータの性能向上と共に、積極的にマイクロ波加熱における温度予測のシミュレーション手法が広く検討されている。マイクロ波加熱の数値解析ということは、少なくとも電磁場と伝熱の解析を連成させることが必要であり、マルチフィジックスシミュレーションとなる。以前は伝熱/流体と電磁場の解析ソフトウェアの結合などは容易でなかったのであるが、それを容易にできるソフトウェアが出現した。しかしながら、問題となるのは計算にインプットする物性値、特に誘電率の温度依存性を考慮した解析を行う必要がある。例えば化学反応器において攪拌を行う場合、気(バブル)-液混合状態が生じる。このような物質の複合物性をどう扱うか、固相複合体(複合材料)の平均物性をどう評価するか、更に 4.2 で述べたように、特に金属を含む複合体をどう扱うかなど、正確な結果を出すためには、複雑な問題が存在している。また、一般に対流伝熱の境界条件として用いられる伝熱係数(熱伝達係数)の与え方が、正確ではない場合が多い。被加熱物の境界における熱流束(伝熱係数)の決め方により温度の絶対値や温度分布は結構違ってくる場合がある。

マイクロ波加熱においては、誘電率、透磁率、導電率などの物性値およびその温度依存性が重要であることは上述の通りである。JEMEA では早くから二川佳央氏が誘電率/透磁率測定法[31]について、産総研佐野三郎氏らセラミックスの誘電率測定[32]について報告し

ていた。

強磁性体の透磁率は、温度とともに減少するのに対し、マイクロ波加熱では、例えば酸化物では高温において誘電率が急激に増加するため、加熱を制御するためにはこれを把握することが特に重要である。また物質によるが、誘電率と導電率とは密接に関係している。誘電率およびその温度依存性の測定はすでに von Hippel らが 1950 年代に行なっており、データ集[33]が存在する。また V.V.Komarov 氏は 2013 年 JEMEA シンポジウムで誘電率に関する招聘講演を行なったが、誘電率の温度依存性を数式化して、データを出版している[34]。JEMEA では豊田中研の福島英沖氏や(株)科学技術研究所の藤田明希氏らが中心となり、データベース化を行い web サイト[35]を立ち上げている。

マイクロ波加熱過程においては、その進行とともに、物質内において、どのような規模で何が起こり、これが全体の物質物性や電磁波の浸透、そして加熱速度にどのように影響していくかを詳細に調べることが望まれる。このためには、原子レベル、ミクロ組織レベル、そしてマクロレベルにおける変化を予測しそれをダイナミックにフィードバックするようなマルチスケールシミュレーションが望まれる。これができるようになるのは、まだずっと先と思っているが、すぐに AI がやってしまうかもしれない。多分結果は出るだろうが、物性測定の難しさを考えると、その結果の正確性には注意すべきかもしれない。

5. 今後の展望

我が国では、東日本大震災以降原子力発電がほぼ停止している。更に 2022 年以降燃料の価格が高騰し、電力事情が以前と全く異なってきた。そのような背景を考えるとマイクロ波加熱は貴重な電気を利用したプロセスであり、エネルギー効率が必ずしも良いとは言えず不利にも感じられる。

ところが、これと併行して全世界が直面している深刻な問題がある。我々は、CO₂ の排出削減に取り組まねばならない。脱炭素社会を構築し、SDGs に向かって将来は再生可能エネルギーに頼ることになる。この時、工業生産などをはじめとして我々の日常生活においても再生可能エネルギーで発電した電力を用いた電熱に

大きく依存することになる。すなわち冒頭で述べたように、現在再びオイルショック時と同じようにマイクロ波加熱の重要性が再認識されるものと考えられる。これに向けてマイクロ波加熱による研究を進めておく必要があり、技術的な競争力をつけて、我が国の優位性を高めたいところである。

参考文献

1. J.M.Osepchuk, "A History of Microwave Heating Applications", IEEE, Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No.9 (1984), 1200-1224.
2. Wikipedia、電子レンジ:
<https://ja.wikipedia.org/wiki/電子レンジ>, R05, 5 月閲覧
3. J.D.Katz, "Microwave Sintering of Ceramics", Ann. Rev. Mater. Sci., 22 (1992) 153.
4. 越島哲夫編「マイクロ波加熱技術集成」(1994) NTS 出版
5. 第 1 回 JEMEA シンポジウム講演要旨集(2007)、
於仙台戦災復興記念館
6. K.Morita, M.Guo, Y.Miyazaki and N.Sano, "The Heating Characterization of CaO-SiO₂-FeO System Slags under Microwave Irradiation", ISIJ Int., 41 (2001) 716-721.
7. 木村禎一、滝沢博胤、上田恭太、遠藤忠、「マイクロ波照射による金属窒化物の合成」、粉体および粉末冶金、第 46 巻、第 4 号、(1999) 378-382.
8. 植山大輔、宮前治広、辻正治、「マイクロ波照射下滴下法による金ナノ微粒子の合成」、JEMEA シンポジウム講演要旨集(2007)、講演番号 PC20
9. 平初雄、中村壽志、「不定形耐火物のマイクロ波乾燥技術」新日鉄技報、第 388 号 (2008) 69-75.
10. アスベストの無害化を我が国では初めて試みている
<https://www.nedo.go.jp/content/100116803.pdf>
HP, R05.5.
11. 辻井澄生、飯尾良夫、小島剛、木嶋敬昌、「マイクロ波による飛灰無害化装置の開発」、日本スピンドル製造技報、48 (2003) 1-5.

12. <https://microwave-r024.org/R024>、R05, 5 月閲覧
13. 吉川昇編、「最新マイクロ波加熱エネルギーと応用技術」、日本工業出版 (初刊:産業技術サービスセンター(2014))
14. 吉川昇、「機関誌・論文誌ワーキンググループの活動」、JEMEA Bulletin, vol. 2, No. 2, (2016.12)
15. “Microwave Effects in Organic Synthesis: Myth or Reality?”, C. O. Kappe, B.Pieber and D.Dallinger, *Angew. Chem. Int., Ed*, 52 (2013) 1088-1094.
16. 山田徹、「マイクロ波特異効果と有機合成反応への新展開」、触媒、第 62 巻、第 5 号、(2020) 309-314.
17. “Microwave Processing of Materials”, Ed. by Nat. Res. Council, national Acadmy Press, Washinton D.C. USA,(1994), p.30
18. J.Cheng, R.Roy and D.Agrawal, “Radically different effects on materials by separated microwave electric and magnetic fields”, *Mater. Res. Innov.*, 5 (2002) 170-177.
19. たとえば、杉山順一、「フロー有機合成反応に用いる共振器型マイクロ波照射装置の開発」、信学技報、第 113 巻、第 9 号、(2013)9-14.
20. T.Ano, M.Masato, T.Mitani, Y.Sato, S.Tsubaki and Y.Wada, “Drastic Microwave Heating of Percolated Pt metal nanoparticles supported on Al₂O₃ substrates”, *Processes* 8 (72), (2020) 1-13.
21. N.Yoshikawa and T.Kurokawa, ”Difference in microwave loss mechanism between nano- and micron-sized Ag particles”, *J. Appl. Phys.*, 133 (2023) 145102.
22. 吉田睦、仙田和章、「半導体式マイクロ波電源」、JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2010)講演番号 2C04
23. 例えば、K.Miwatashi, T.Hirakawa, N.Shinohara, T.Mitani, “Development of High-Power Pump Rectifier for Microwave Wireless Power Transmission”, *IEEE J. Microwaves*, 2 [4] (2022), 711-719.
24. 堀越智、第 9 回 JEMEA シンポジウム講演会概要集(2015)、パネルディスカッション、「半導体はマイクロ波加熱/化学のブレークスルーとなるのか？」
25. 西岡将輝、八木下将史、木村雅敏、宮川正人、宮沢哲、「半導体マイクロ波源を利用した化学反応装置のスケールアップ」、JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2017)講演番号 2A03
26. 渡辺隆司、JEMEA シンポジウム特別講演「マイクロ波反応を利用したリグノセルロース系バイオマスのバイオ燃料・化学品への変換」JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2017)
27. 樫村京一郎、米田沙織、木嶋敬昌、堀越智、吉川昇、佐藤元泰、篠原真毅、「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理—大型試験機運用試験—」、JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2013)、講演番号 2B08
28. 林幸、永田和宏、佐藤元泰、「マイクロ波加熱連続製鉄炉の開発(1)」、JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2007)講演番号 2A09
29. 塚原保徳、「マイクロ波化学プロセスのグローバルスタンダード化」、JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2016)、特別講演 3
30. Microwave digestion、例えば Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_digestion on R05.5.閲覧
31. 道山哲幸、二川佳央、「終端形状が針型の開放終端同軸を用いた食品の複素比誘電率測定」JEMEA シンポジウム講演要旨集、(2007)講演番号 1C02
32. 佐野三郎、川上省二、高山定次、佐藤元泰、「ジルコニア泥しょうのマイクロ波誘電率測定」JEMEA シンポジウム講演要旨集、(20011)講演番号 1A02
33. Arthur von Hippel Ed. “Dielectric Materials and Applications”, (1954), originally published: Cambridge: Technology Press of MIT ♡
34. V.V. Komarov: Handbook on Dielectric and Thermal Properties of Materials, Artech House, (2012)
35. 藤田明希、新井翔太、日本電磁波エネルギー応用学会機関誌、第 2 巻 1 号(2016)、on-line

データベース <https://permittivity.jp> : JEMEA の
ホームページ(<https://www.jemea.org/>)からもリン
クあり。