

研究トピックス



脱炭素社会におけるマイクロ波加熱

Microwave Heating in Low-Carbon Society

中部大学 工学部 榎村 京一郎

Chubu University, Keiichiro Kashimura

〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200

e-mail: kashimura@isc.chubu.ac.jp

1. 脱炭素社会におけるマイクロ波加熱

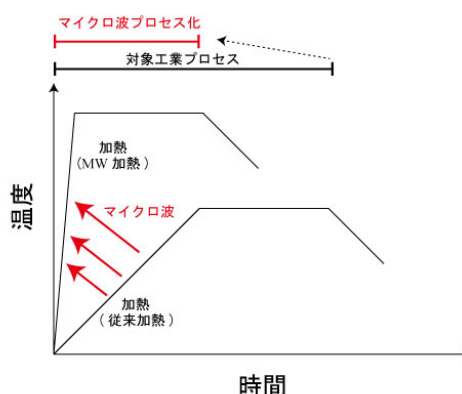
持続可能な社会を目指すために、脱炭素への機運が高まっている。2021 年 11 月、国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議が英国で開催され、我が国の気候変動分野での野心的な取組の発信がなされた。これにより加速される 2050 年へ向けたカーボンニュートラルな社会への速やかな移行は、我が国のみならず世界のあらゆる分野に要求される課題である。

我が国において、これまでの化石燃料から電力を基盤とした加熱法へ転換（電化）する分野の余地は、非常に大きく見込まれている。文献[1-4]において、我が国の電化可能な産業分野が詳細に調べられていて、例えば、中野らの試算によれば、産業分野だけでおよそ 8500 億 kWh となる[1]。この報告では、特に、パルプ業のボイラー用途、有機化学の間接電化、鉄鋼産業の電化が非常に大きな電化ポテンシャルを持つとされる。マイクロ波加熱は誘電加熱技術として認識されているが、これらの報告される誘電加熱以外の分野にも参入がなされている現状がある。

これらのマイクロ波加熱技術の適用開拓領域に対して、どの程度社会実装されているかも重要な課題である。マイクロ波加熱の応用先としては、食品加熱・乾燥分野は枚挙に暇がなく、古くより多くの報告が確認できる[5-6]。これらの 100℃ 近傍の温度域においては、マイクロ波加熱技術は多くの実績がある。近年この温度帯や加熱対象が拡大しており、ゴム加硫反応と耐火物乾燥プロセスに注目している[7]。ゴム加硫反応は、ゴムを軟化するときに加える熱源にマイクロ波を用いる。ゴム原料は、高い断熱性を有している。そのため、

従来の火力では、内部までエネルギーを供給できず、「エネルギー供給律速」となるプロセスである。そのため、マイクロ波で内部まで速やかにエネルギーを供給し、理想的な反応時間を達成する。耐火物乾燥におけるマイクロ波加熱も同様の役割がマイクロ波に期待されている。マイクロ波加熱プロセスで工学的な旨味を得るためには、「エネルギー供給律速」となる工業プロセスであることが重要で、この特徴は社会実装がなされている多くのマイクロ波プロセスの多くに観測される特徴である（図 1）。

脱炭素社会の機運をうけ、マイクロ波加熱にはこれまで以上に高い温度への適用が検討されており、今後、こうした適用先のプロセスにおいては化石燃料由来の火力よりも効率的なエネルギー運用が厳しく要求されるであろう。

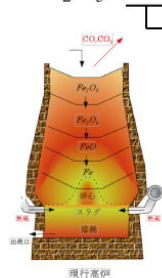
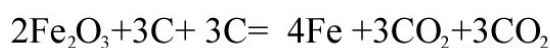


1 昇温工程におけるエネルギー供給律速打開のイメージ図。MW は様々な工程のエネルギー供給律速を解決し、プロセスに経済性を獲得させるための道具。

2. 鉄還元反応におけるエネルギー供給律速の事例

マイクロ波加熱を利用した工業プロセスの脱炭素化事例として、マイクロ波製鉄が挙げられる [8-12]。鋼業は近代社会を支える基盤産業だが、そのエネルギー源は石炭を出発原料とする化石燃料の燃焼である。銑鋼一貫工程により、鉄 1 トンを製造するのにコークス換算で 530 kg を消費し、炭酸ガスを 2 トン排出している。鉄 1 トンあたりを製造するために必要なコークスの理論値は 380 kg なので、熱エネルギーの有効利用率は 72% に高められており最早効率の向上は限界にきている。この消費炭素の内訳を見てみると、530 kg の内、45% は鉄鉱石中の酸素を CO と CO₂ で還元除去するのに必要な炭素で、残り 55% は原料の加熱と反応熱に必要なエネルギーを得るための炭素燃焼である。

マイクロ波加熱技術はこの加熱・反応の熱源をコークス燃焼から電力エネルギーに転換するために用いられる (図 2)。このような物質の反応と加熱・反応エネルギー供給に必要な炭素源を分離する考えは古くからある。例えば、コークス炉はその一例で高温燃焼熱を壁を通して伝達する。マイクロ波製鉄法は、炭素の燃焼により得られる高温ガス中で、高速で飛翔している分子の物材への衝突によるエネルギー供給という在来の方法に代わって、電磁波によって物質中の電子またはイオンに電磁力を与え運動エネルギーに変換する点が異なる。製鉄プロセスでは、物質の反応と加熱・反応エネルギー供給に必要な炭素源が存在し、エネルギー供給に必要な炭素源が電化できる。



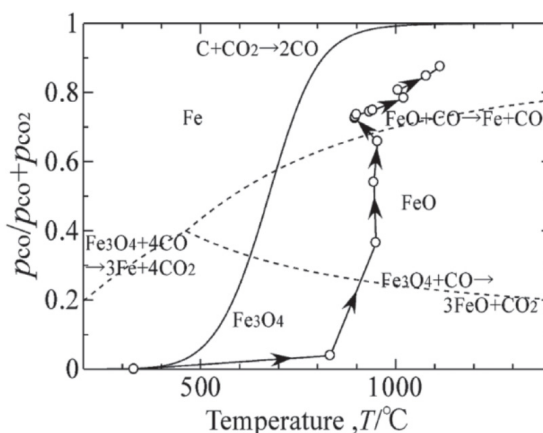
A: 還元反応に必須な炭素排出

B: 反応へエネルギー供給に必要な炭素排出

2 鉄還元反応における電化模式図。このケースではマイクロ波は還元反応のエネルギー供給律速を解決、プロセスを安定させるための道具。

図 3 に CO₂ 分圧—温度の Fe-C-O 系状態図とマイクロ波加熱による鉄還元反応のガスクロマトグラフィーによる排ガス分析結果を示す [11]。CO 分圧は、炭素の燃焼に伴い図中曲線のように変化する。一方、鉄鉱石はこの曲線が通過する CO 分圧を感じるので、この曲線に従い順次経過して鉄になる (この場合、Fe₃O₄ ⇒ FeO ⇒ Fe)。ここで、この曲線はブードア平衡と呼ばれ、例えば、ブードア曲線と Fe-FeO 境界線の交点は、FeO が Fe に還元される理想的な温度ということになる。すなわち、平衡熱力学的にはこの温度が理想的な反応温度となる (この場合、およそ 700°C)。排ガス分析によれば、マイクロ波加熱下における鉄還元反応の CO 分圧は熱力学的に理想的な温度よりも 900°C 高い温度で FeO-Fe 境界線を通過している。すなわち、平衡熱力学によれば、900°C 程度で銑鉄を得ることができるとが、この状態図比較からわかる。

なぜ、実際は理想よりも 900°C 高い 1600°C で製鉄プロセスを操業しているのだろうか。これは、熱力学的に理想的な還元温度である 700°C 温度域では十分な反応速度を得ることが難しいことが原因である。この反応速度が不足する理由のひとつとして、エネルギー供給が挙げられる。マイクロ波製鉄は 900°C で鉄の生成領域に移行しているが、これは吸熱反応に速やかにエネルギーを供給することで反応速度を向上させたことが推察される。マイクロ波製鉄は、マイクロ波により鉄還元反応のエネルギー供給律速を打開し、平衡熱力学的な理想に近い反応経路をとることがわかる。



3 CO₂ 分圧—温度の Fe-C-O 系状態図とマイクロ波加熱による鉄還元反応の排ガス分析結果。マイクロ波製鉄では 900°C で鉄還元反応が生じる。

マイクロ波製鉄は従来よりも 200℃程度低い温度で鉄鉱石を還元するので、不純物が少ない銑鉄を得ることができる。この方法では、P・Si の酸化物は高炉法の 1600℃下に比べ還元速度が低く、P・Si は生成されず、得られる銑鉄は P・Si などの不純物が少ない。石崎らは、蛍光 X 線分析による検量線法を用い、銑鉄中に含まれる P・S 含有量を報告した。マイクロ波法により得られた P・S は、0.9～0.15mass% の S と 0.0039～0.0064mass%の P を含むが、これは高炉法により得られた銑鉄よりも一桁程度少ない[13]。

3. 脱炭素へ向けたスケールアップと高温誘電率計測

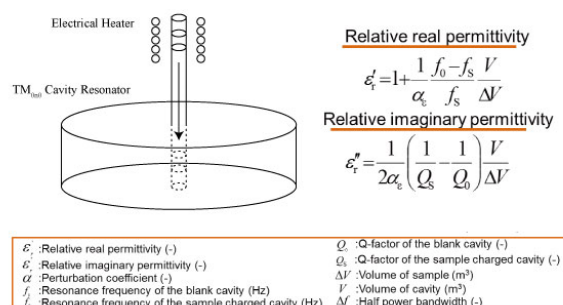
脱炭素におけるマイクロ波加熱は、「電化」を入り口としている。また、これまでもマイクロ波プロセスは効率向上や高品質を目的として推進されてきた。しかし、マイクロ波加熱で目的とする物質を合成できたとき、私たちはさらに大きな物質を合成するための実験装置を建造しなければならない。100 kg 以上の物質を加熱する場合、私たちは加熱装置に大きな費用が必要である。そのため、私たちは、可能な限り余計な出費を削減するための手続きに従って、大きな加熱炉の建造を推進すべきである。

大量の物質を加熱できるマイクロ波炉を設計するためには、まず、目的とする化学プロセスにマイクロ波を適用することで得られる優位性を確認すべきである。例えば、マイクロ波加熱の持つ高速性であったり、内部加熱できる能力であったり、マイクロ波加熱に特有な反応であったりが、この優位性として挙げられる。これらの特徴を再確認し、私たちはスケールアップするかどうかの決断をすべきである。次に、マイクロ波加熱炉の熱バランスを考慮すべきである。加熱対象を処理するために必要な熱量は、比熱や潜熱などから計算できる。目標とする加熱対象の重量と各種熱力学物性値からこの熱量を計算し、想定されるプロセス時間と投入出力を見積もる。この簡単な計算では、現実的な発振器の出力で目標とするプロセスを達成できるか、どの程度の効率があれば産業的に成立するかを見積もることが目的である。最後に、伝熱と電磁界分布を考慮して、マイクロ波加熱炉の設計を吟味する。数値計算や技術ノウハウによって建造予定の加熱炉の安全性・効率を

被加熱物質ごとに最適化する。これら様々な検証を経て、10 kg スケール以上のマイクロ波加熱炉は建造される。

従来の加熱炉建造とは異なり、マイクロ波加熱炉建造には被加熱物質の誘電率と透磁率を計測する必要がある。特に、高温領域における誘電率は重要で、様々な研究者による計測が報告されている [14-15]。Huang らはマグネタイトを電気炉で加熱し、共振摂動法容器へ投入した(図 4)。2.45GHz の共振周波数を持つ容器に物質を投入すると、物質の誘電率に応じて容器共振周波数と Q 値が変化する。共振摂動法は共振周波数や Q 値の変化から誘電率や透磁率を見積もる方法である。ここに高温度の物質を投入することで、高い温度での誘電率測定を実現している。高温度における同軸透過法による誘電率測定も実現している[16-17]。同軸透過法は物質に様々な周波数の電磁波を通過させ、電磁波の減衰と反射を計測する。磁性がない物質は NIST 法で誘電率を、磁性がある物質は Nicolson-Loss 法で誘電率と透磁率を算出する[18-19]。また、試料が装填された筒をヒーターで加熱しながら、誘電率を計測する。この手法の優れた点は様々な周波数の誘電率と透磁率を計測できることである。しかし、高温で加熱された筒が熱膨張を起こし、これによる実験誤差を生じることである [16]。これらのことを考慮すると、高温誘電率の取得には、同軸透過法が適していると考えている。

高温の誘電率・透磁率を精度よく計測し、これを考慮した上で加熱炉を最適化する手法の開発が、今後のスケールアップ研究における喫緊の課題であると感じている。



4 高温領域における同軸透過法模式図。

4. 今後のマイクロ波プロセス実用化への予測

マイクロ波の高温プロセスに 20 年携わってきたが、最初は手探りであった加熱炉建造の方法論も、ずいぶん進歩したように感じている。20 年前、著者が最初に手ほどきを受けたのは幾何光学に基づいた加熱炉設計であった。当時の指導教官・佐藤元泰教授から、幾何光学によるミラー設計やファブリペローによる共振構造のいろはを指導されたのが思い出される。これらの構造を追い込む際、当時から数値計算を利用していたが、建造予定の加熱炉の指向性評価や熱損失を計算し、微調整していったことを記憶している。いまでは、GUI ソフトウェアは、計算科学の発展に伴い、回転するスターラーの電磁界散乱や流体温度分布計算など、複雑な計算条件にも対応できるようになってきた。

モーター開発に比べて、我々の分野のマイクロ波加熱炉に対する最適化手法の提案は不充分であるように感じている。今後、パラメトリック解析にとどまらず、遺伝的アルゴリズムなどの最適化手法の開発が、この分野の新しいプロセスの構築をさらに加速し、脱炭素化におけるマイクロ波加熱技術の有用性を高めると予測している。

REFERECNCES

- [1] 中野一慶; 産業部門の脱炭素化に向けて新たな電化分野はあるのか?, 電気新聞 (2019) 12/18
- [2] 浜屋敷毅; 産業電化への期待と普及に向けた取り組み, *Journal of Japan Solar Energy Society*, 46, 3 (2020) 37-41
- [3] 中野一慶・浜潟純大・永井雄宇・西尾健一郎・田頭直人; 将来の社会像検討のための産業部門のエネルギー利用と電化ポテンシャル調査, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 41, 3 (2020) 108-114
- [4] 山本博巳; わが国のエネルギーチェーンを考慮したモデルによる電化ならびに電気機器の需要能動化の効果の試算, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 40, 6 (2019) 221- 231
- [5] 露木英男; 食品工業とマイクロ波加熱, 食衛誌, 20, 5 (1979) 291-297
- [6] 露木英男; マイクロ波加熱による食品の殺菌と保存, 日本食品工業学, 30, 1 (1983) 55-62
- [7] マイクロ波加熱編集委員: マイクロ波加熱の基礎と産業応用事例, CMC 出版, 2017. 4. 24
- [8] K. Nagata *et al.*: *Journal of the Technical Association of Refractories Japan*, 34 [2] (2014) 66-73
- [9] M. Yanagawa *et al.*: *International Journal of Materials Engineering and Technology*, Vol. 9, 2 (2013) 119 - 134
- [10] K. Kashimura *et al.*: *Chemical Engineering & Processing*, 76 (2014) 1- 5
- [11] M. Hayashi *et al.*: *ISIJ International*, Vol. 53, 7 (2013) 1125-1130
- [12] K. Kashimura *et al.*: *Material Science & Engineering A*, 556 (2012) 977-979
- [13] Kotaro Ishizaki *et al.*: *ISIJ International*, Vol. 46 (2006) , No. 10, pp. 1403-1409
- [14] Zhiwei PENG, Jiann-Yang HWANG, Joe MOURIS, Ron HUTCHEON and Xiaodi HUANG; *ISIJ International*, Vol. 50 (2010), No. 11, pp. 1590–1596
- [15] N. Yoshikawa, K. Kashimura, M. Hashiguchi, M. Sato, S. Horikoshi, T. Mitani and N. Shinohara: Detoxification Mechanism of Asbestos Materials by Microwave Treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 284 (2015) 201–206
- [16] K. Kashimura, H. Sugawara, M. Hayashi, T. Mitani, and N. Shinohara: Microwave heating behavior and microwave absorption properties of barium titanate at high temperatures, *AIP ADVANCES*, 6, (2016) 065001
- [17] Masahiro HOTTA, Miyuki HAYASHI and Kazuhiro NAGATA; *ISIJ International*, Vol. 51 (2011), No. 3, pp. 491–497
- [18] J.B. Jarvis, Transmission/Reflection and Short-circuit Line Permittivity Measurements, *NIST*, 1990 <http://www.nist.gov/pml/> (accessed 21.10.12)
- [19] A. M. Nicolson and G. F. Ross: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-19 (1970), 377.