

マイクロ波有機ハイドライド法による 省エネ型水素輸送および貯蔵技術の開発

上智大学 堀越 智

はじめに：水素エネルギー

読者の中には水素エネルギーと聞くと石油などの化石燃料と同じ分類の一次エネルギーと思われる方もいるかもしれない。水素は地球上どこにでもある物質であるが、それ自身を自然から取り出すことは難しいため、電気エネルギーと同じ二次エネルギー（一次エネルギーを変換・加工したもの）に分類される。近年では、我が国のエネルギー事情から、この水素エネルギーを使う社会構築が循環型社会を達成するための重要因子とされている⁽¹⁾。しかし、現代社会では電気エネルギーが私たちの生活の基本エネルギーとされており、同じ二次エネルギーで

ある水素エネルギーをあえて利用する利点は何であるか？と思うかもしれない。実は、電気エネルギーの消費が多くなるほど水素の必要性も向上することが予想されている。電気は輸送や貯蔵に問題を抱えたエネルギーであり、例えば電気を送電するには送電線を、蓄電するには電池を一般的に利用するが、この時に長距離送電や長期蓄電を行うと、熱損失や自己放電により、少しずつ電気は熱に変換され損失してしまう。したがって、電気を別の安定的なエネルギーに一時的変換して輸送や貯蔵する必要がある。ほとんどのエネルギーは別のエネルギーへ変換することができるが（図1）、特に化学エネルギー（物質）は移動や貯蔵に対してエネルギー損

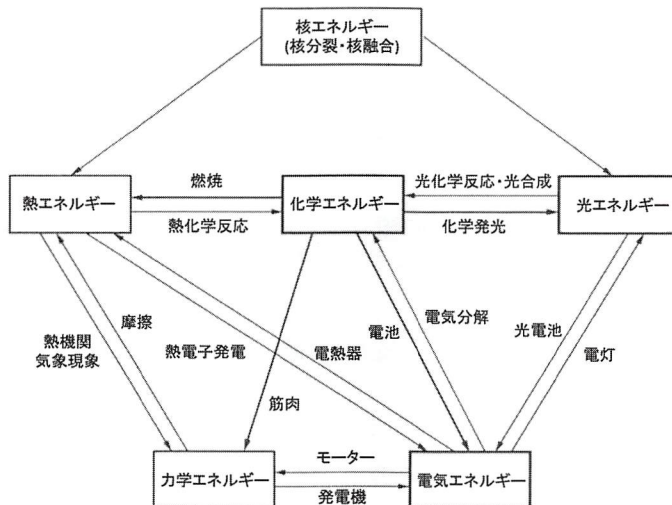


図1 エネルギーの変換とその媒介

失が生じない。したがって、電気エネルギーの一時的変換エネルギー先として物質への変換が適している。このような考えから、地球上に豊富に存在している水が選定され、物質への変換と電気への取り出しプロセスが検討されてきた。水は電気エネルギーを用いてエネルギー変換（電気分解）をすると水素と酸素に分解される。酸素は空気中から容易に回収できるため、主に水素を輸送や貯蔵のための物質として考案されている。この水素から電気に戻すには、空気中の酸素と混合し、燃料電池で化学触媒反応を行うことで電気エネルギーと水になる。したがって、現在では水素が電気エネルギー貯蔵や移動のカギとなる物質とされている。

この循環型社会を達成するためのカギとなる水素は、物質的視点から見ると単位体積当たりのエネルギー密度が低く（天然ガスの1/3）、常温常圧では気体であるため、効率よく貯蔵や輸送するには水素の液体化（高密度化）を行わなければならない。このため、水素を液化させる様々な手法が提案されてきた¹⁾。例えば、水素を輸送・貯蔵する手法として高圧ガス水素法、液体水素法、有機ハイドライド法、パイプライン法が提案されている（図2）。高圧ガス水素

法は水素ガスを高圧にして液化水素に変換する方法で燃料電池車などの水素タンクに採用されている。簡便に使用できるが重量、容積、安全性などの課題もある。液体水素法は水素ガスを-252℃以下に保つことで液化水素にする方法で水素ステーションまで液化水素での輸送などに実用化されている。しかし、その温度調整にはエネルギーが必要であることから長期保存には不向きとされる。有機ハイドライド法は石油と類似の有機ハイドライド溶媒に水素添加反応で水素を添加し、必要な時には脱水素反応で水素取り出すことができる。すなわち、「化学物質と化学反応」を利用した方法である（次節でより詳細に解説）。しかし、脱水素を行う際に触媒加熱が必要であり、エネルギー収支の関係から小規模施設での使用には不向きとされている。パイプライン法は国内に水素パイプ網を張り巡らせ水素を供給する。しかし、膨大なインフラ工事費用と安全面に問題がある。さらに、産業各所で使用されているアンモニア（NH₃）から、水素を取り出す研究も積極的に行われている。アンモニアは水素含有率が大きく貯蔵や輸送が容易であるが、アンモニアは劇物であることから安全性に課題がある。また、都市ガス

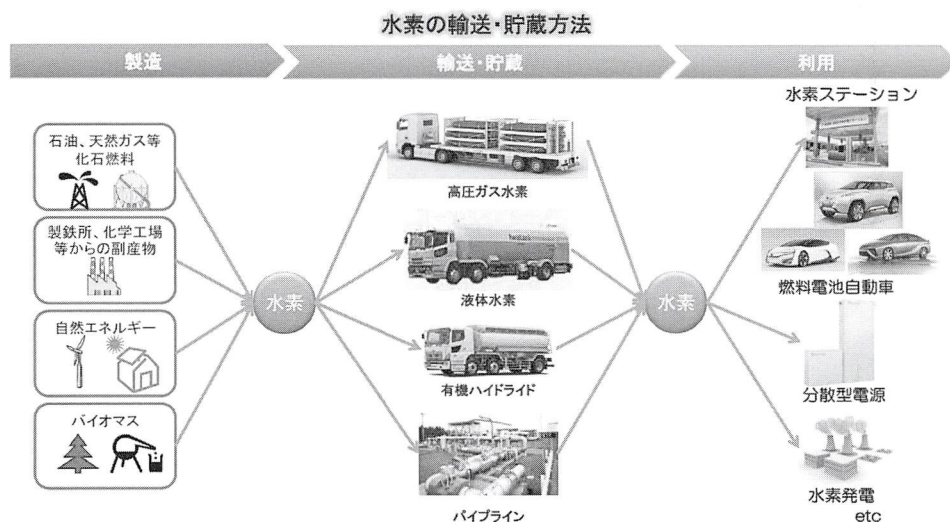


図2 水素の輸送および貯蔵の方法¹⁾

から水素を取り出す方法としてエネファームがある。さらに、定置型ポンプなどに水素貯蔵金属を用いた水素貯蔵法なども実用化されている。

有機ハイドライド法

有機ハイドライド法とは、芳香族化合物（液体）に水素を化学付加させ輸送や貯蔵を行う手法の総称である。水素化芳香族（有機ハイドライド）から水素を取り出すには、脱水素反応により有機ハイドライドを水素と芳香族化合物に分解する。水素添加と脱水素は可逆的に進行するため、分解された芳香族化合物は再度水素を付加させることができる。すなわち、芳香族化合物⇌有機ハイドライドを何度でもリサイクルすることができる利点がある。次に、有機ハイドライドが他の方法に勝る点をまとめた⁽²⁾。

- ① 重量や体積に対する水素貯蔵密度が高い（図3）。

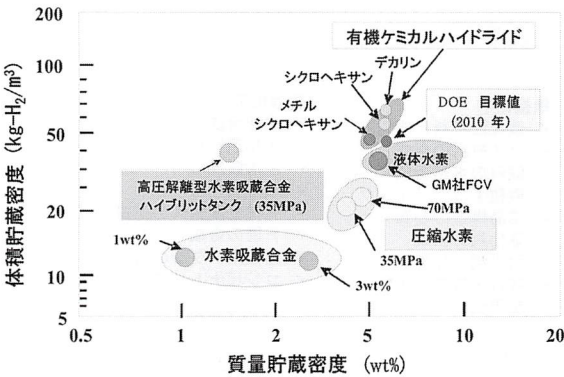


図3 各種水素貯蔵方法の貯蔵効率比較⁽²⁾

- ② 常温常圧において液体で存在することから取り扱いが安全で簡便である。
- ③ 有機ハイドライドはガソリンや灯油と類似物質で石油タンクやローリーなどの既存インフラがそのまま利用できる。
- ④ 災害時にディーゼル機関やその他の機器の燃料としても利用できる。

有機ハイドライド法の歴史は古く、カナダからドイツにエネルギーを輸出するための手法として、1986～1998年の間に実証試験が初めて行われた⁽³⁾。カナダのナイヤガラで発電した電気をドイツへ輸出するため、発電した電気で水の電気分解を行い、それによって発生した水素を有機ハイドライド化して既存の石油タンカーで輸出した。有機ハイドライドを利用した水素の輸送には成功したが、当時の燃料電池の性能が低かったため、水素→電気の変換に問題があり実現には至らなかった。この壮大なアイデアは水素の貯蔵や移動に有機ハイドライド法が使えることを実証し、その後の多くの研究者の興味を引いたことから先導的研究の役割を担った。

有機ハイドライドとして検討されてきた物質の特徴を水素貯蔵量、毒性、利便性（融点）、入手性、総合評価から表1にまとめた。様々な物質の中で水素貯蔵量の最も高い物質はデカリン⇌ナフタレン系である。しかし、ナフタレンの融点が80℃と高く、常温では固化してしまうため装置配管に詰まってしまう問題がある。次に、水素貯蔵量が高い物質はシクロヘキサン⇌

表1 有機ハイドライドの物理・化学的特性の比較⁽⁴⁾

水素化芳香族	芳香族化合物	重量水素貯蔵量 / wt. % #	体積水素貯蔵量 / Nm³·L ⁻¹ #	毒性	利便性	原料の入手性	総合評価
デカリン	ナフタレン	◎ (7.29)	◎ (0.71)	○	×	◎	×
シクロヘキサン	ベンゼン	◎ (7.19)	◎ (0.62)	×	△	◎	×
メチルシクロヘキサン	トルエン	○ (6.16)	○ (0.53)	○	◎	◎	◎
1-メチルデカリン	1-メチルナフタレン	○ (6.62)	○ (0.65)	○	○	×	×
2-メチルデカリン	2-メチルナフタレン	○ (6.62)	○ (0.65)	○	△	×	×
ジメチルシクロヘキサン	キシレン	△ (5.39)	△ (0.46)	○	○	◎	△

◎：優れている、○：適している、△：問題点あり、×：致命的な問題点あり #水素化芳香族に対する値

ベンゼン系であるが、ベンゼンは発がん性物質であるため使用が難しい。メチルシクロヘキサン⇔トルエン系は大きな問題がない有機ハイドライドである。1-メチルデカリン⇔1-メチルナフタレン系や、2-メチルデカリン⇔2-メチルナフタレン系は原料の入手性に問題があり、ジメチルシクロヘキサン⇔キシレン系は貯蔵密度が低いため不適と考えられる。従って、総合評価からメチルシクロヘキサン⇔トルエン系が最適であると考えられる。

有機ハイドライド法の問題点は脱水素反応が吸熱反応であるため、PtやNiなどの金属触媒と共に加熱する必要があり、水素を得るために加熱エネルギーが必要となることから、この加熱エネルギー量が発生水素エネルギー量に勝るとエネルギーの収支が合わなくなる。現在、有機ハイドライドを用いた水素発生装置は、再生可能エネルギーやごみ処理場の排熱などが脱水素反応の触媒加熱に使用されており、これによってエネルギー的採算を確保している。このため、有機ハイドライド法を小型または中型水素発生装置に採用することは困難であると考えられている。私たちは電子レンジや無線LANなどで用いられているマイクロ波を、有機ハイドライド法の触媒加熱の熱源として利用することで(マイクロ波有機ハイドライド法)、この問題を解決した。

マイクロ波化学

2000年以前の化学関連の学会では、化学合成の熱源としてマイクロ波を使用した研究発表数は少なく、マイクロ波化学の研究発表を行うと珍しがられた。現在では「マイクロ波化学」は化学分野で定着し、すでに化学反応のための道具として広く利用されている。マイクロ波加熱はマイクロ波エネルギーが伝熱(伝導・対流・放射)に依存することなく、分子やナノクラスターに直接作用し、自己発熱を引き起こすため、物質の加熱機構が既存の加熱法とは大きく異なる。

また、熱源であるマイクロ波自身に温度はないため、試料を入れた反応容器やそれを設置した雰囲気は直接的に加熱されることはない。さらに、電場と磁場で構成されているマイクロ波を使うことは、既存の熱反応では達成できない、電磁波由来の物質反応や特異的効果(位置選択性、規則的ラジカル反応、分子配向、高結晶化、異方性結晶、特殊固相拡散、強還元反応など)等を引き出すことが可能となる。現在では、化学にかかわらず、材料や生物分野においてもマイクロ波は積極的に利用されており(図4)、まだまだこれから発展する分野である。より詳細なマイクロ波化学については文献(5)を参照していただきたい。マイクロ波化学の中でも触媒を用いた反応には、特に既存の熱反応では得ることのできない触媒現象や省エネ効果が観測されている。例えば、代表的な環境触媒である光触媒反応において、マイクロ波が非熱的に光触媒の活性を向上させることを私たちは発見した⁽⁶⁾。この促進効果のメカニズムはマイク

無機化学 ✓ 機能性材料合成 ✓ ナノ材料の合成 ✓ 顔料の水熱合成 ✓ 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 ✓ 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 ✓ 押し出し成型ハニカムの乾燥 ✓ 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	有機化学 ✓ 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
金属化学 ✓ 機能性材料合成 ✓ ナノ材料の合成 ✓ マイクロ波製鉄 ✓ 金属粉末冶金	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
生化学 ✓ 酵素反応 ✓ PCR ✓ 実験用ラットの脳の加熱 ✓ DNA染色	触媒化学 ✓ 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)
	分析化学 ✓ 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

図4 マイクロ波化学の応用分野(基礎研究段階も含む)⁽⁵⁾

ロ波が半導体である光触媒内部の電子の再結合を抑制するため、発生することを報告している⁽⁷⁾。このような研究を続ける中で、私たちはマイクロ波の特徴を生かした、一種の「マイクロ波触媒」の創製とその応用を研究してきた。

有機ハイドライド法への マイクロ波選択加熱の導入

マイクロ波加熱の特徴の一つとして選択加熱がある。たとえば、無極性の溶液中に活性炭粒子を分散させると、活性炭粒子だけがマイクロ波によって選択加熱される。有機ハイドライド法で有望なメチルシクロヘキサン (MCH) ⇄ トルエン系では、有機ハイドライドであるメチルシクロヘキサンおよび生成物であるトルエンが共に無極性溶液でありマイクロ波を照射しても加熱は進行しない。しかし、MCH中に脱水素反応に必要なPt触媒を担持した活性炭粒子を分散させると、マイクロ波によって触媒だけが選択的に加熱される (図5(a))。脱水素反応はPt触媒表面で進行することから、メチルシクロヘキサンを加熱する必要はない。一方、既存の加熱では、伝熱を利用することから系全体を加熱しなければならない (図5(b))。したがって、Pt触媒近傍以外の加熱に使われたエネルギーは無駄になる。反応場であるPt触媒だけを加熱できるマイクロ波選択加熱は省エネ的に水素発生

を行うことができ、有機ハイドライドの課題である脱水素に必要な加熱エネルギーの低減に貢献できると考えた。

マイクロ波有機ハイドライドの 実践と障害

前項で、マイクロ波触媒選択加熱を利用すると、有機ハイドライド法が抱える問題点を解決できることを示した。また、私たちの別の研究からマイクロ波による触媒の選択加熱を用いると、触媒表面における反応基質の吸脱着効率 (衝突頻度) を向上させることができるため、反応効率も促進することが予想された。しかし、実際にマイクロ波による触媒選択加熱条件でメチルシクロヘキサンから脱水素反応を行うと、反応時間初期では急速に水素が発生するが、その後の水素の発生効率は飽和することが分かった。この速度低下をさまざまな角度から検討した。その中でハイスピードカメラを用いて反応中に触媒懸濁溶液内の撮影を行うと、触媒近傍で微視的なプラズマ (マイクロプラズマ) が瞬間的に発生している様子を捕えることに成功した (図6(a))⁽⁷⁾⁽⁸⁾。このマイクロプラズマの発光色から600 ~ 1,200°C 程度の微視的な高温場 (ホットスポット) 触媒表面で発生していることが分かった。初期のPt粒子は2 ~ 4nmの粒径で活性炭表面に担持しているが、マイクロプラズマが発生するとPt粒子同士がプラズマの熱によって数百nm ~ 数十 μ mに凝集していることが分かった (図6(b))。したがって、マイクロ波による触媒選択加熱を利用した有機ハイドライド法では、既存の加熱では決して発生しないマイクロ波加熱特有のホットスポット現象によって触媒失活を招いてしまうことが分かった。このため、ホットスポットの抑制制御を行わなければ、本方式を実用化することはできないことが示唆され、その発生メカニズムを電磁界シミュレーターで理論的に考察した。その計算結果より、ホットスポットが発生する要因として、2

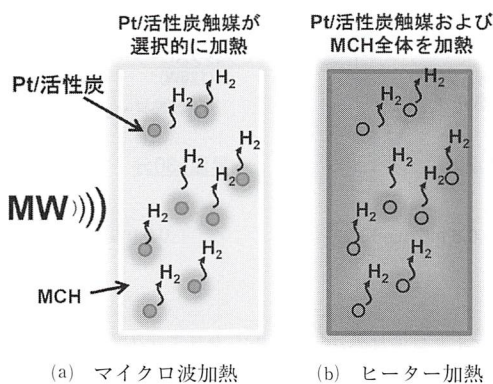
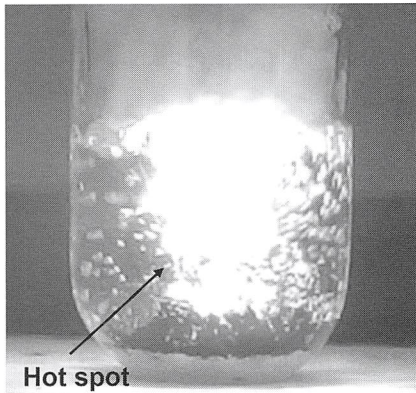
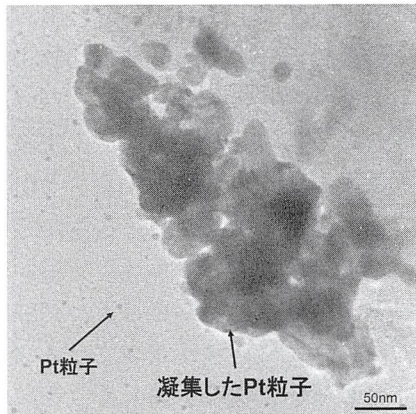


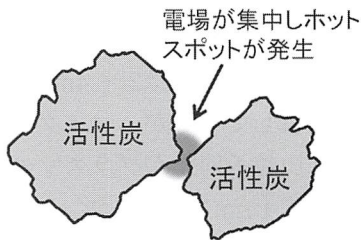
図5 Pt/活性炭触媒を用いたメチルシクロヘキサン (MCH) から水素発生イメージ図



(a) マイクロ波照射下においてけるメチルシクロヘキサン中の分散Pt/活性炭触媒から発生するホットスポットのハイスピードカメラ写真



(b) ホットスポットの発生によって凝集したPt触媒のTEM像



(c) 活性炭同士の間隔が狭まることホットスポットが発生するイメージ図

図 6⁽¹⁰⁾

つ以上の活性炭粒子間の距離が $9\mu\text{m}$ になると、その空間にマイクロ波電場が集中し、その強度が数百倍に高くなることになり(図 6(c))⁽⁹⁾、これによってホットスポットが発生することを突き止めた。実際に、活性炭粒子を $9\mu\text{m}$ の距離で固定し、マイクロ波を照射すると、その間の

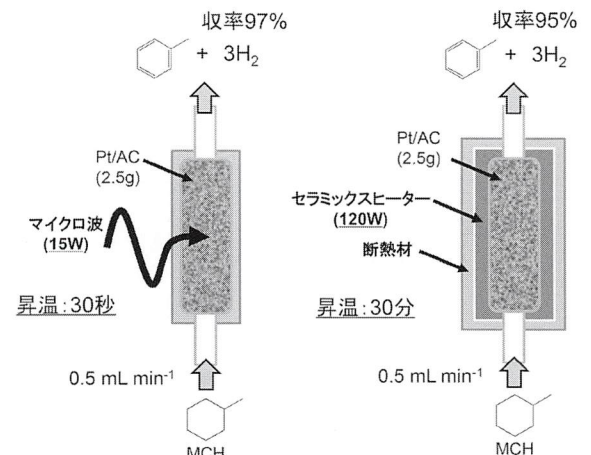
空間でホットスポットが発生することも確認した。この結果を受け、ホットスポットを抑制するための条件は、

- ① 触媒/活性炭粒子を固定化する。
- ② 溶媒の極性を上げる。
- ③ マイクロ波周波数を変化させる。
- ④ 活性炭からカーボンマイクロコイルやグラフェンのような別の炭素材料に変える。
- ⑤ マイクロ波の磁場を選択的に照射する。

などが有効であることが分かった。

マイクロ波有機ヒドライド法の効率と特徴

メチルシクロヘキサン (MCH) ⇔トルエン系による水素発生実験をマイクロ波加熱 (MWH) 装置で実践した。メチルシクロヘキサンはポンプによりPt/活性炭 (Pt/AC) 触媒を詰めた反応容器下部入り口から連続的に導入し、上部から生成物であるトルエンと水素が排出する (図 7(a))。MCHおよびこれらの生成物は反応容器出口に接続したガスクロマトグラフィーで連続分析し、水素の濃度に加え、トルエン濃度や副生成物で発生するベンゼンの濃度を連続モニターした。セラミックヒーターと (CH) と断熱材



(a) マイクロ波加熱法 (MWH) (b) セラミックヒーター加熱法 (CH)

図 7 (a)(b)によるメチルシクロヘキサンの脱水素反応の実験イメージ図

を併用した既存の加熱による水素発生実験も反応容器や触媒が同じ条件で比較した (図7(b))。

MWH法では、断熱材を使用していなかったにもかかわらず、加熱30秒以内に97%の水素発生量が観測され (図8)、その後の連続反応を続けても約95%以上の水素発生量を維持した。また、数時間の連続運転を行ってもホットスポットの発生は観測されなかった。一方、CH法では断熱材を巻いていたにもかかわらず、ヒーターの昇温に時間が掛かることから、96%以上の水素発生率を維持するには約30分以上の予熱が必要であった。さらに、MWH法ではマイクロ波照射を止めるとすぐに冷却されることから、自然災害や装置不良などのトラブルが

生じて、即時水素発生が停止ができる。一方、CH法ではヒーターの電源を止めても26分間はヒーター予熱により水素が生成し続いた。MWH法における総消費電力はおおよそ15Wであったが、CH法では120Wであり、水素エネルギーを取り出すために必要な電力を1/8に低下させることに成功した。この時、生成した水素エネルギーを燃料電池で電気に変換すると19W程度になり、マイクロ波を用いることでエネルギー収支の採算が合うことが分かった。本実験で実証した結果をもとに、40倍にスケールアップすることで家庭用エネファーム (700W) の最大発電量を十分にまかなえることも理論上分かった。

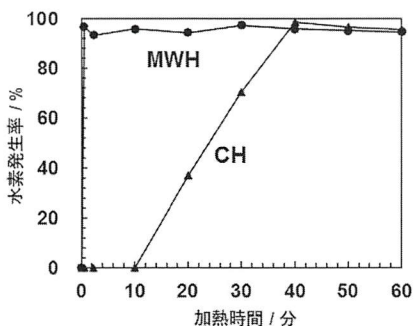


図8 マイクロ波有機ハイドライド法と既存法による連続水素発生比較

次にMWH法とCH法における触媒層の温度について検討した。触媒層の温度測定をサーモグラフィーおよび光ファイバー温度計を用いて測定した。サーモグラフィーを用いた温度測定からMWH法では触媒層中心が最も温度が高く、上下部は著しく温度が低下することが分かった (図9(a))。また、光ファイバーによる温度測定から、反応容器近傍より中心の触媒の方が高温になっていた。一方、CH法ではMCHが室温で導入される下部の温度だけが低温であった (図9(b))。MWH法は水素発生に対してCH

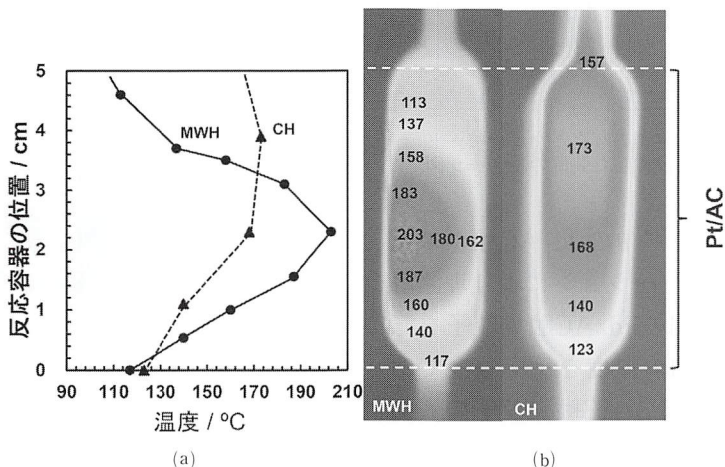


図9 サーモグラフィーによるマイクロ波加熱と通常加熱のPt/AC触媒を含んだ反応容器の位置的温度分布図およびイメージ

法より著しく高効率を示されたが、触媒加熱の状況は非常に悪いことが分かった。この理由としてマイクロ波によって触媒が選択加熱されるが、反応容器や雰囲気温度は上昇しないため、触媒の熱が伝熱によって逃げてしまうことが原因であると予想した。そこで、断熱材を用いることで外部への放熱を防ぐための検討を行った。既存の断熱材の多くはマイクロ波の吸収があるため、マイクロ波照射によって断熱材が加熱されてしまう。そこで、様々な断熱材に対するマイクロ波の吸収特性をスクリーニング的に分析し、伝熱効率が低い材料を選定した。数十種類の断熱材の中でアルミナ系の一部の断熱材がマイクロ波の吸収がほとんど進行しないことが分かった。そこで、実際にこの断熱材を用いてMCHの脱水素反応を進めた(図10)。断熱材を領したMWH法による触媒選択加熱では、最大で60°C以上の温度の損失を防げることが分かった。さらに、その断熱効果によってマイクロ波照射出力も著しく低下させることに成功した。

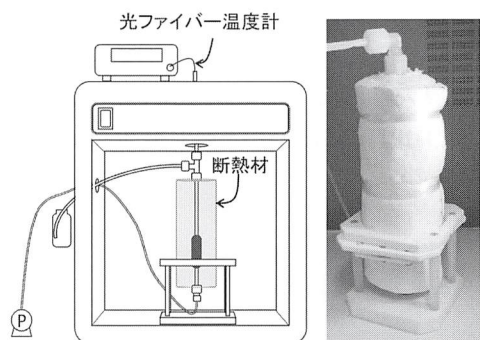
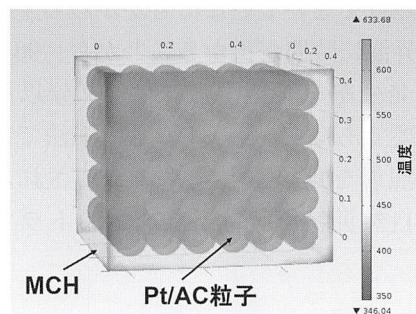


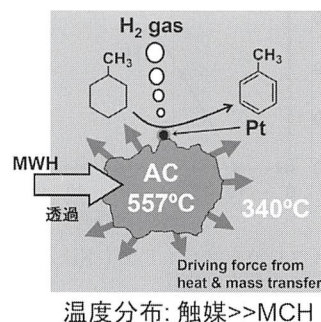
図10 断熱材を用いた反応容器の写真とマルチモードマイクロ波装置内に設置した装置のイメージ図

MCH有機ハイドライド中のPd/AC触媒の選択加熱度を伝熱シミュレーションにより理論解析した。空間内に180個のPd/AC触媒粒子を三次元的に整列させMCHの温度を反応温度である330°Cに設定すると、Pd/AC触媒粒子の表面温度は557°Cになることが分かった(図11(a))。すなわち、反応系の見かけの温度が340°Cであ

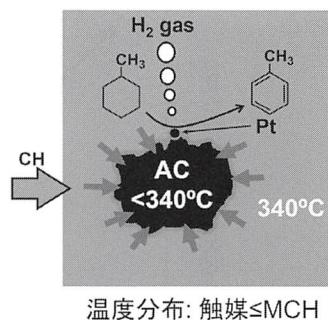
っても、反応場である触媒表面はマイクロ波選択加熱によって+217°C高温になっていることが分かった。一方、通常加熱では反応系が340°Cであっても、触媒表面の温度は同等以下である(図11(b))。このようなマイクロ波加熱の特徴が高効率的水素発生につながったと考えられる。



(a) 反応系内のPt/AC触媒およびメチルシクロヘキサン(MCH)の伝熱シミュレーションのイメージ図



(b) マイクロ波加熱におけるPt/活性炭触媒を用いたメチルシクロヘキサン(MCH)から水素発生における温度分布図のイメージ図



(c) ヒーター加熱におけるPt/活性炭触媒を用いたメチルシクロヘキサン(MCH)から水素発生における温度分布のイメージ図

図11⁰⁰

おわりに

すでに半世紀以上熱源として利用されてきたマイクロ波は成熟した技術に位置付けられているが、迅速加熱を利用した代替熱源としての利用報告が多く、電磁波としての特徴を生かし、マイクロ波本来の実力を引き出した事例は少ない。本稿では、水素エネルギー分野が抱えている課題をマイクロ波の特徴を生かした利用により解決できることを紹介した。現在、この研究はスケールアップと装置の最適化による高効率化を検討しており、実用可能なスケールでの実験をスタートしている。また、本稿で紹介した有機ハイドライド法にかかわらず、固体触媒を用いた化学合成や環境浄化は様々な分野で利用されており、これらにも本技術は応用することができる。本稿がそれらに繋がる「ヒント」になれば幸いである。

【謝辞】

この一連の研究を行うにあたり、多くの大学や企業の研究者の協力のもとで続けることができました。また、多くの実験結果は学生諸君の努力の賜物です。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- (1) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構／編、NEDO 再生可能エネルギー技術白書第2版、森北出版(株) (2014)
- (2) よくわかる水素技術、日本工業出版編 (2008)
- (3) J.Gretz, J.P.Baselt, O.Ullmann, H.Wendt, The 100 MW Euro-Quebec hydro-hydrogen pilot project, *Int. J. Hydrogen Energy*, 15, 419-424 (1990)
- (4) 水素利用技術集成－高効率貯蔵技術、水素社会構築を目指して－、Vol.4、NTS出版、第3章より改変 (2014)
- (5) 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)
- (6) 堀越智：“マイクロ波照射光触媒による迅速水処理技”、静電気学会誌、38、95-100 (2014)
- (7) S.Horikoshi, H.Tsutsumi, H.Matsuzaki, A.Furube, N. Serpone, *In-situ* nanosecond transient absorption spectroscopy of TiO₂ systems under microwave irradiation and influence of oxygen vacancies on UV-driven/microwave-assisted TiO₂ photocatalysis, *J. Mater. Chem.*, 3,

5958-5969 (2015)

- (8) S.Horikoshi, A.Osawa, M.Abe, N.Serpone, On the generation of hot-spots by microwave electric and magnetic fields and their impact on a microwave-assisted heterogeneous reaction in the presence of metallic Pd nanoparticles on an activated carbon support, *J. Phys. Chem. C*, 115, 23030-23035 (2011)
- (9) S.Horikoshi, A.Osawa, S.Sakamoto, N.Serpone, Control of Microwave-generated Hot Spots. Part V. Mechanisms of Hot-spot Generation and Aggregation of Catalyst in a Microwave-assisted Reaction in Toluene Catalyzed by Pd-loaded AC Particulates, *Appl. Catal. A: General.*, 460-461, 52-60 (2013)
- (10) S.Horikoshi, M.Kamata, S.Sakamoto, T.Mitani, N.Serpone, Control of microwave-generated hot spots. Part VI. Generation of hot spots in dispersed catalyst particulates and factors that affect catalyzed organic syntheses in heterogeneous media, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 14941-14947 (2014)
- (11) S.Horikoshi, M.Kamata, T.Sumii, N.Serpone, Selective heating of Pd/AC catalyst in heterogeneous systems for the microwave assisted continuous hydrogen evolution from organic hydrides : Temperature distribution in the fixed-bed reactor, *Inter. J. Hydrogen Energy*, submitted 41, 12029-12037 (2016)

【筆者紹介】

堀越 智

上智大学 理工学部 物質生命理工学科 准教授
上智大学 マイクロ波サイエンス研究センター
センター長

既製杭を用いた「地熱トルネード工法®」

新日本空調(株) 永坂 茂之・田村 稔・佐藤 秀幸・木村 崇
 ジャパンパイル(株) 菅 一雅・小松 吾郎・今 広人

はじめに

近年、再生可能エネルギーの利用が促進されており、東日本大震災を機に一層、技術の普及および研究開発が加速している。2014年度には「再生可能エネルギー熱利用技術開発」プロジェクト（NEDO、期間：2014～2019年）が開始され、この主な対象は地中熱である。また、「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」が2017年4月に施行され、さらには2020年までに新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の実現を目指す政策を背景に、地中熱利用はこれらに対応する要素技術として益々注目され、導入検討が盛んに行われている。

地中熱利用には、土壌と熱交換をするための地中熱交換器が必要となる。熱交換器は掘削孔等に採熱チューブを挿入したものである。筆者らは、過去の施工経験を踏まえ、地中熱利用の普及課題である高額な施工費を削減するために、建物基礎杭の内部にチューブを挿入する方式に着目し、チューブ挿入作業の省力化について検討を行い、杭とチューブを一体で施工する画期的な新工法「地熱トルネード工法®」を開発した（特許第5780663号）。基礎的な検証実験を行いながら、二重らせん状チューブ「ダブルスパイラルチューブ™」とその固定金具を開発し、実際の杭を用いた実証実験を2回行って施工性

とチューブ品質や設置精度を確認し、実用的な工法を確立している。また、これら実証に用いた杭を利用して2014年9月から採放熱実験を行い、長期計測に基づく設計情報を提供している⁽¹⁾⁽²⁾。2017年1月より市場導入を開始した⁽³⁾⁽⁴⁾。

新工法「地熱トルネード工法」の紹介

(1) 従来工法の課題

地中熱利用は古くからある技術であり、図1に示すような方式の分類がある。ボアホール型は100～200mmΦ程度の小さな孔径で深さ100m程度まで掘削する。掘削費が施工費の大半を占めるが、地表面の温度振幅の影響が少ない安定した土壌温度を使える方式である。一方、基礎杭型は300～1,000mmΦを超える杭内を利用する。掘削費は建築工事に含まれるためゼロとなる。浅層部に設置され地表面の温度影響を受けるため、単位深さあたりの採熱能力がボアホール型より劣るが、単純回収年数は5～10年を目指せる技術である。そこで、コンクリート製の既製杭の利用を、開発のターゲットとした。

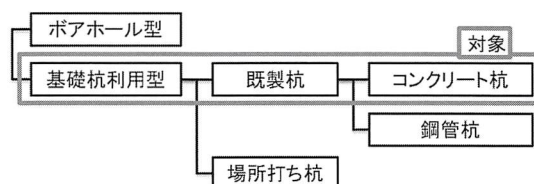


図1 地中熱利用の分類