

8. 水熱反応を用いる自転車タイヤチューブのケミカルリサイクル

地球環境を重視する自転車社会の構築が促進されるにつれ、社会基盤の整備が必要となると同時に、自転車の使用台数が増加する。そのため、自転車廃棄物の再利用および再資源化方法を検討していく必要がある。当該プロジェクトでは、自転車タイヤの総合的な再利用方法を評価する。その中でも、特に、高い加水分解能力を有する水熱反応を用いて、自転車タイヤチューブのケミカルリサイクルの可能性について検討する。今回はその序論として、自転車を取り巻く現状を調査した。さらに、当該分野において、水熱反応を用いたケミカルリサイクルに関する既往の研究を紹介する。

8-1 自転車社会の現状と課題

(1) 国内

自転車は誰でも手軽に乗れ、短距離移動に適した交通手段であり、また、「地球温暖化防止のための今後の道路対策について」などの施策が相次いで提唱され、地球環境にやさしい交通手段として注目されている。平成 11 年に国土交通省が自転車利用環境整備モデル都市を公募し、現在 30 都市が選定されている。また、自転車の年間の供給台数は約 1000 万台である。しかし、その一方で、放置された自転車が通行の障害や景観の阻害をもたらすマイナスイメージもある。自治体への調査によると、撤去された放置自転車の 53%は持ち主に返還され、22%が民間へ売却および払い下げられている。また、廃棄の対象として清掃部署に持ち込まれているのは全体の 6%である。小売店および自治体等、全ルートにより推計した自転車の資源リサイクル率は 78%であり、その内訳は再資源化が 68%、再利用が 10%、埋め立て処分が 22%である¹⁾。再資源化に向けた課題として自転車業界が独自に処理施設を整備すること、製造者の不要自転車回収ルートの確立などが挙げられる。

道路整備に関しては、国土交通省が自転車用の道路を 2010 年頃から、集中的に整備する方針を明らかにした。国内においては課題が残るが、今後徐々に解消される期待できる。

(2) 海外

自転車通勤促進政策を進めている都市の中で、最も成功している都市の 1 つが、イギリスのノッティンガムである。1990 年から 2001 年にかけて自転車の利用者数は、イギリス全体で 22.6%減少したのに対して、ノッティンガムにおいては、17.2%増加した。施策は、ノッティンガム市内の自治体、大学および民間の大規模な 8 団体の協力を得て、自転車通勤および業務利用促進を中心として取り組んだ。具体的な内容は、職場で安全な駐輪施設の整備に加え、シャワーおよび更衣室の整備を行った。さらに、業務上の移動に対する自転車マイレージ手当の導入、自転車購入手当を 2 年間で 800 ユーロ支給した。また、会社共有の自転車も購入した。このプロジェクトは官民を巻き込んだ協力体制の下、自転車通勤を促進したという点が成功へと繋がったと考

えられる。この事例は、自転車利用促進のためには、ハードの整備によって利用環境を整えることが前提であるとした上で、実際に自転車へ的手段転換を図るには、利用者に対して細かなソフト面の配慮が必要であることを示した²⁾。

また、2010年7月、ロンドンでは「パークレイズサイクルハイヤー」事業が開始された。これは、共用の自転車を通常のレンタルのように借りた場所に返すだけでなく、他の駐輪場でも借りたり返したりすることができるシステムである。

中国では2008年の電動自転車の販売台数は2100万台に上り、同年の世界の販売台数である2300万台の90%以上を占める。その要因は、中国政府の電動自転車推進政策によるところが大きい。中国政府は1991年に電動自転車の研究・開発を正式に決定するとともに、各地で電動自転車やバイクのための専用道路を設け、道幅拡大などの政策を推進してきた。また、上海市では石油燃料を使用したバイクなどの免許認可費用を高く設定するなど、環境問題に配慮した政策が電動自転車の普及を一層促進してきた。その結果2006年時点で、電動自転車メーカーは中国国内に2700社も存在した。

8-2 電動自転車の現状

電動アシスト自転車は、自転車にモーターバッテリーを搭載し、人の動く力に応じてモーターで駆動力をアシストするもので、アシスト比率を人の力「1」に対して、モーターの力が「2」を超えない範囲に制御することで、原付免許およびヘルメット不要で普通自転車として公道を走行することができる。人がペダルをこぐことによる駆動力に加えて、ペダルの踏力をトルクセンサで検出し、それに応じた力をコントローラで制御する。そして、前輪のモーターに力を与えると同時に、自転車の制御時にはモーターを発電機として使用し、制御力に応じた電力でバッテリーを充電する。これにより、一充電での走行距離の延長を可能とする。

一方では、原動付自転車のようにペダルをこぐことなくハンドルをひねることで走行が可能なフル電動自転車も出てきた。道路交通法では原動機付自転車に分類され、歩道の走行は禁じられている。折りたたみが可能でコンパクトなものが多いが、サドル下に大きなバッテリーを搭載しており、重量も重たい。しかし、一見折りたたみ自転車に見えるため、それがフル電動自転車であると判断することは困難である。運転手が、ペダルをこがず、長距離を走っていると気づくが、うまくペダルをこぎ進むと区別が難しい。この自転車は、スピードが速く、ブレーキをかけても完全に停止するまでに距離が必要である。そのため、事故が多発した事から取り締まりが行われるようになった。

最新の技術では、SiGNa Chemistry社が開発した電動自転車は燃料電池を動力とし、1回の充電で約97Km走行が可能である。燃料電池は粉末状のナトリウムシリサイド (NaSi) を使用したもので、この粉末に水を加えると水素ガスが発生し、電気を生成するために使用される。水素は貯蔵されないため、安全性が確保される。また、燃料のカートリッジは機器の電源を入れたまま交換することが可能で、リサイクルもできる。普及させるためには、燃料電池をいつでも交換

できるようにインフラの整備が必要である。

また、Neodymics 社の Cyclemotor は普通の自転車と前輪を交換するだけで即座に電動自転車に変えることができる。電動工具用バッテリーを 4 個使用して、1 馬力のモータを動かす。最高時速は 45Km、1 回の充電で 16-32Km 走行することが可能である。留め金で固定して、手軽に取り付けられるため、電池の充電が切れてもタイヤを付け替えることにより、普通の自転車として利用できる。

8-3 自転車のリサイクル活動

放置自転車対策の一環として、レンタサイクルなどを導入する市町村が増えている。回収した放置自転車を共同で利用することにより、自転車総量および放置自転車の削減を図ろうとするものである。さらに、近距離交通手段として位置付けることも目的としている。

他に、中古自転車を輸出販売している業者もある。そのフローチャートを図 8-3-1 に示す。不要となった自転車を買い取り輸出する。輸出先は、東南アジア、中東およびアフリカ地域が中心である。

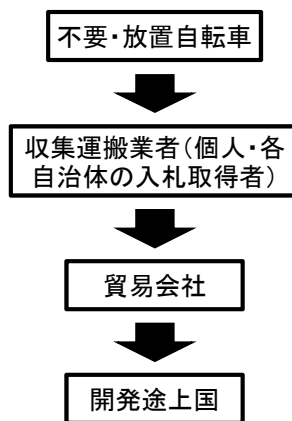


図 8-3-1 自転車輸出版売のフローチャート

一方で、有償ではなく無償で自転車をケニア中心に送る支援活動を行っている NGO 団体もある。現地では、自転車は重い荷物を運ぶための貴重な手段となっている。自転車はかさばるため、ペダル等を外して分解してからコンテナに積み、現地で組み立てられる。本体だけでなく、スペアのチューブおよび部品も一緒に梱包しなければならず、コスト面での課題が残っている。

電動自転車においては、「資源有効利用促進法」の施行に伴って、2001 年 4 月から、電池メーカーとそれを内蔵する機器のメーカー各社に小形充電式電池のリサイクルが義務づけられた。これを受けて、電動アシスト自転車に使用されている二次電池のリサイクルも広まった³⁾。

自転車タイヤのリサイクルでは、2010 年 6 月に自転車の使用済みタイヤチューブを採用したシヨルダーバックが発売された。バックの全面にタイヤチューブが利用されており、素材の粉碎および特殊な加工は施さず、素材そのままの状態で行われている。そのため、タイヤチューブの特性を生かした耐衝撃および防水効果が期待できる。

8-4 水熱反応を用いたケミカルリサイクル

水熱反応

図8-4-1に水の状態図を示す。この状態図にある、三重点は気体、液体、固体の三相が共存する状態である。三重点より高い温度では、液体とその蒸気が平衡になり、この時の圧力が飽和蒸気圧で、蒸気圧曲線で表される。この蒸気圧曲線には高温、高圧側に終点があり、これを臨界点(critical point)という。臨界点以上では、液体と気体との区別がつかなくなる状態となり、気液の境界面も消失する。それゆえ、この臨界点より高温の状態では、気液共存状態を生じることなく液体と気体の間を連続的に移り変わることができる。この領域ではいくら密度を増大させても凝縮が起こらなくなる。この臨界温度以上で、かつ臨界圧力以上の状態にある流体を超臨界流体と呼ぶ。水熱反応は、これらの超臨界流体と亜臨界流体等の高温高圧の水が共存する条件下で進行する化学反応である。

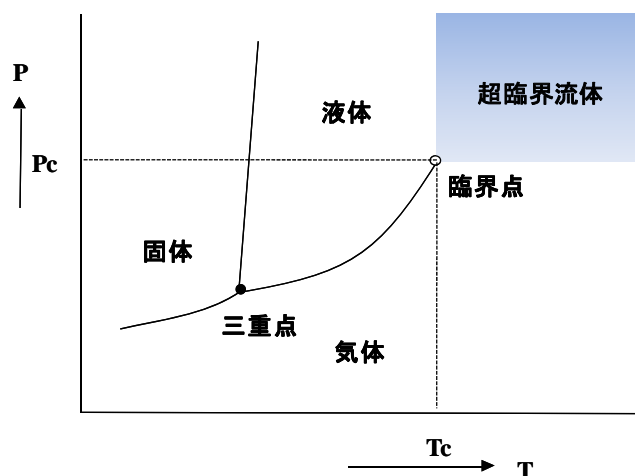


図8-4-1 水の状態図

高温高圧状態における水の特性

水の分子量は 18 であり、二酸化炭素に比べると分子量が小さく、凝集力はかなり小さいと思われるが、臨界温度 374°C、臨界圧力 22.1MPa であり、とても高い値を示す。これは、水分子同士が水素結合で結ばれたクラスターを形成しているためである。クラスター構造とは分子間力の強い溶質分子の周りに溶媒分子が引き付けられ、溶媒和が形成された構造である。つまり、安定な凝集相が水素結合の存在により、高温、高圧領域まで存在する。拡散力が大きな高温領域で安定な水素結合を形成するためには、分子の密度がある程度以上大きくなければならず、臨界圧力も他の多くの物質に比べ、非常に大きな値を示す。このように三次元の網目構造状に形成された水素結合が温度の上昇により壊れていく過程と密度変化による形態の変化が、水の特性を劇的に変化させる要因であると考えられるが、その定量的な考察はほとんどされていない。以下に、超臨界水の特徴をまとめる。

- ・ 反応溶媒としての効果が大きく、圧力・温度を変化させることで流体の諸物性を制御できる。
- ・ 誘電率は極性溶媒から無極性溶媒に匹敵する 20-30 程度の値を持つため、常温・常圧の水では溶解しないような有機物質を溶解することができる。

- ・水素イオン濃度は常温・常圧の水と比較すると 20-30 倍の増加が見られ酸触媒の効果がある。
- ・加水分解の反応時間も数分から 30 分と短く、添加物も不要。
- ・分子運動が激しく、水素結合などによる分子会合の程度も低いので、常温の水よりも拡散速度は速く、また、粘性は低い。このために浸透性に優れ、多孔性物質中での高い物質移動速度が期待できる。
- ・常温常圧の水は中性であるが、超臨界水はハステロイや白金-イリジウム合金、さらに金やタングstenのような金属ですら腐食するほどの超強酸性を示す。

水熱反応を用いたケミカルリサイクルに関する既存の研究

水熱反応を用いた応用例を 2 つ挙げる。1 つ目は、プラスチック類の中でも最も多くの生産量を有する付加重合系ポリマー (PE, PP, PS) を対象とした水熱反応である⁴⁾。結果より、PE, PP, PS の超臨界水による分解は、コークの生成もなく容易に油化できることがわかった。油化に必要な反応時間に関しては、PS の場合が 1 ~ 2 分で最も短く、PP で 50 分、PE で 100 分であった。また、各プラスチックの分解で生成した油の主要成分はポリマーの主鎖構造を反映して、それぞれのプラスチックでまったく異なる物質が生成した。

応用例の 2 つ目に加硫エチレン/プロピレン三元共重合体 (EPDM) ゴム廃棄物の再資源化を目的とした研究例がある⁵⁾。これは、自動車窓のシール用ゴム部品であるウェザーストリップを別途処理する方法であり、超臨界域のアルカリ水溶液を反応媒体として用いる。この研究により、アルカリ水熱処理によって生成した油状物をゴムに配合すると、市販のパラフィン系軟化剤を配合したものと同様の物性を示し、生成油状物をゴム用軟化剤として再利用できることが明らかになった。

8-5 今後の課題

水熱反応における、自転車用タイヤチューブの分解反応機構の解析を行うとともに、生成物の物性の確認および用途の開拓を行う。一方、自転車用タイヤチューブに限定し現在の処理方法からリサイクル方法の評価を行う。燃料化をも含めて総合的な再利用方法を検討し将来の方向性を示す。

参考文献

- 1) 平成 15 年度不要自転車の回収・処理及び再資源化に関する調査報告書概要版, 財団法人自転車産業振興協会, 2004.
- 2) 自転車通勤の推進に関する研究: 自動車から自転車への手段転換に着目して. 留守洋平, 大森宣暁, 原田昇, 土木計画学研究・論文集, 22(0), 551-557, 2005.
- 3) 平成 18 年度廃棄自転車の処理調査補助事業報告書, 社団法人自転車協会, 2007.
- 4) 木下陸, 菅井裕一, 竹森進也, 小泉信吾, 金放鳴, 榎本兵治, 守谷武彦, 環境資源工学, 52(1), 5-13, 2005.
- 5) 加硫 EPDM ゴムの油化における超臨界域のアルカリ水熱反応の特徴と生成油状物の工学的利用, 天王俊成, 藤田恵美, 榎本兵治, 資源と素材, 112 (13), 941-946, 1996.