

三菱電機技報

8

2023

Vol.97 No.8

持続可能な社会を実現する環境・デバイス・材料技術

No.8

特 集	持続可能な社会を実現する環境・デバイス・材料技術	Device and Material Technologies that Contribute to Circular Economy and Carbon Neutrality
巻 頭 言		
サーキュラーエコノミー実現のための 技術開発についての期待…………… 1-01 梅田 靖 Expectation on Technological Development for Realizing a Circular Economy Yasushi Umeda		
巻頭論文		
持続可能な社会を実現する 環境・デバイス・材料技術…………… 2-01 佐竹徹也 Device and Material Technologies that Contribute to Circular Economy and Carbon Neutrality Tetsuya Satake		
サーキュラーエコノミーに資する プラスチック高度選別技術のDX化 …… 3-01 中村保博・黒田真司・井関康人・藤本夏郎・筒井一就 DX Conversion of Advanced Plastic Sorting Technology for Circular Economy Yasuhiro Nakamura, Shinji Kuroda, Yasuto Iseki, Natsuro Fujimoto, Kazunari Tsutsui		
プラスチックリサイクル促進に向けた マイクロ波加熱技術…………… 4-01 廣田明道・神岡 純・榊 裕翔・北畑 繁・西嶋 潤 Microwave-based Heating for Promoting Plastic Recycling Akimichi Hirota, Jun Kamioka, Hiroto Sakaki, Shigeru Kitahata, Jun Nishijima		
持続可能な社会実現に向けた 下水処理場でのバイオガス増産技術…………… 5-01 黒木洋志・勝又典亮・小川和彦・有馬芳明・和田 昇・大泉雅伸 Realization of Sustainable Society Through Technology for Increasing Biogas Production in Sewage Treatment Plants Hiroshi Kuroki, Noriaki Katsumata, Kazuhiko Ogawa, Yoshiaki Arima, Noboru Wada, Masanobu Oozumi		
受配電機器劣化診断システム…………… 6-01 藤原宗一郎・三木伸介・西川哲司 Degradation Diagnostic System for Power Distribution Equipment Soichiro Fujihara, Shinsuke Miki, Tetsuji Nishikawa		
電力用大型発電機の高効率化を実現する ナノコンポジット絶縁材料技術…………… 7-01 馬淵貴裕・梅本貴弘・武藤浩隆・森 翼 Nanocomposite Insulation Material Technology for Improving the Efficiency of Large Power Generators Takahiro Mabuchi, Takahiro Umemoto, Hirotaka Muto, Tsubasa Mori		

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネス・プラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集では全エリアを支える基盤となる“持続可能な社会を実現する環境・デバイス・材料技術”をご紹介します。

巻頭言

サーキュラーエコノミー実現のための 技術開発についての期待

Expectation on Technological Development for Realizing a Circular Economy

梅田 靖 Yasushi Umeda

東京大学 大学院 工学系研究科 人工物工学研究センター 教授

Professor, Research into Artifacts, Center for Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo



企業にとって、サステナビリティを中心に据えた企業活動が必須となってきた。特に、対策が急務となっているカーボンニュートラルに加えて、サーキュラーエコノミー(CE)はものづくり、価値提供の方法の変革を迫っており、今後の製造業の在り方に大きな影響を与える可能性がある。CEの目標は資源面での持続可能性を達成することであり、言い換えると、Well-beingや企業の競争力を追求する人間活動をプラネタリーバウンダリーに代表される地球の有限性の範囲内に収めること、いわば絶対的デカップリングを実現することである。この意味で、カーボンニュートラルと表裏一体の関係にある。CEの基本的な考え方には2つの柱がある。1つはもちろん資源循環を社会に定着させることであるが、もう1つは、いわば脱大量生産・廃棄ビジネス社会の構築である。これは、従来の資本主義経済下で資源循環を実現させようとしても限界があるのだから、ものづくり、価値提供のやり方を変え、デカップリングを促進させようという考え方である。従って、CEは単に廃棄物のリサイクルを対象としているのではなく、PaaS(Product-as-a-Service)、シェアリング、長寿命化、メンテナンス、リマニュファクチャリング、再生可能材料による代替などを通じて社会を動かそうとするものである。今後のものづくりにおいては、物質よりも価値の提供に焦点を当て、ライフサイクル全体を見据えた総合的な設計と運用が必須となる。この辺りのこと、2023年春に経済産業省が出した“成長志向型の資源自律経済戦略”⁽¹⁾はよくまとまっている。

筆者らは、このCEを理解するためにVision-Meso-Seeds(VMS)モデルを提案している(図1)。CEを実現するといった社会ビジョンを実現するためには、シーズレベルの様々な要素技術開発が必要となると同時に、それらを組み合わせて、前の段落で述べた社会システムを構築するというメゾレベルが重要である。このメゾレベルにおいてどのようなCE型の事業を行うかが、今後、製造業がライフサイクル産業に転換して生き残り、成長するための重要な課題である。このためには、(1)デカップリングに資するビジネスモデルを構築し、(2)製品の一生を見渡したライフサイクル設計を行い、(3)バリューチェーンに関わる様々なステークホルダーと連携し、エコシステムを構築する。(4)これら全体をデジタル技術でサポートする。この4つの要素の有機的な結合が必要不可欠である。このメゾレベルで事業展開をする視点と、これを可能にするシーズ技術開発の両者が必要であるということをVMSモデルを通して訴えたい。

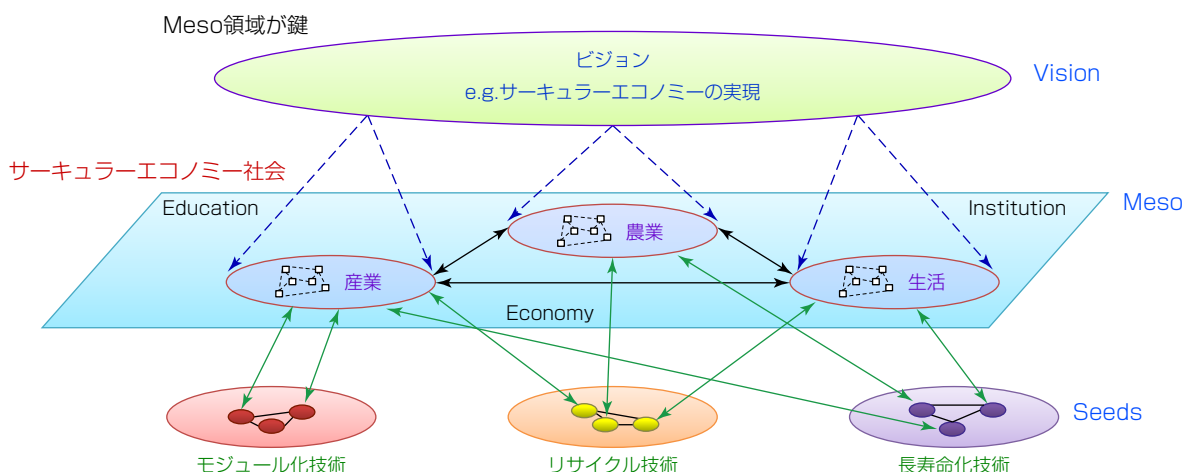


図1. Vision-Meso-Seeds (VMS) モデル

本特集では、的確なメゾレベルでの展開を見据えたシーズレベルの技術開発論文が並んでいる。この3つのレイヤーで技術を見つめること、各シーズがどのようにメゾレベルの事業の実現に貢献するかを意識しながら技術開発を行い、実装することが重要である。

参考文献

- (1) 経済産業省：成長志向型の資源自律経済戦略（2023）
<https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230331010/20230331010.html>



持続可能な社会を実現する 環境・デバイス・材料技術

Device and Material Technologies that Contribute to Circular Economy and Carbon Neutrality



佐竹徹也*
Tetsuya Satake

*先端技術総合研究所 主管技師長

要 旨

サステナビリティ、特に環境に関わるサーキュラーエコノミー(CE)、カーボンニュートラル(CN)を実現するための取組みが世界的に加速している。

三菱電機でもこれらの社会課題の解決に貢献するため、近年、CE/CNに関わる研究開発に注力している。CE/CNの実現にはそれらマネジメントのためのデータ基盤構築が重要である一方、資源循環・炭素循環を実現するための革新的な要素技術も重要である。

1. ま え が き

持続可能(サステナブル)な社会の実現のため、2015年の国連サミットで持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)として17の目標を定めて、世界的に取り組んでいる。環境に関わる開発目標を実現する取組みのうち、当社では、環境汚染の防止やプラスチックなどのリサイクルから更に進んで循環型社会の経済的な成立を目指すCEと、二酸化炭素など温室効果ガス(GHG: GreenHouse Gas)による地球温暖化を防止し、化石資源・エネルギーからの脱却を目指すCNの実現に貢献する技術の研究開発に注力している。

当社は、エアコン、冷蔵庫など家電リサイクル法で定められた家電製品に加えて、産業機器、自動車機器など様々な製品にプラスチック材料、金属材料などを多く使用している。また、発電設備・変電設備から、家電・自動車などに用いられるパワー半導体まで様々な電力関連製品を生産している。当社では、これら自社製品に関わるCE、社内活動に関わるCNを目指すだけでなく、社会への貢献のために研究開発を行っている。

本稿では、主としてCE実現のために当社が取り組むべき技術開発方針と、CNも含めてその実現に貢献する研究開発の事例を示す。各事例は、環境システム、デバイス、材料といった要素技術に関するものを挙げる。CE/CNの実現には、現状・効果の見える化、効率的な運用、全体最適のためのデータ基盤やその活用、AI適用なども重要であるが、これらについては本稿では触れない。三菱電機技報の既刊“持続可能な社会を実現する情報技術”特集号⁽¹⁾等を参照されたい。

2. CE実現のための取組み

当社では、2001年に本格施行された家電リサイクル法に従って、家電製品のリサイクルを行っている。具体的には、当社グループの(株)ハイパーサイクルシステムズで、家電製品、OA製品の解体・破碎、金属(鉄・非鉄)選別、フロン回収などを行っている。(株)ハイパーサイクルシステムズ等で回収した破碎混合プラスチックは同じく当社グループの(株)グリーンサイクルシステムズでポリプロピレン、ポリスチレン、ABS(アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン)樹脂等材料ごとに分別し、高純度の樹脂材料(フレーク・ペレット)として再利用されている。両社は当社製品に限らず、他のリサイクル企業とともに地域のリサイクルネットワークを形成している。

近年、従来のリサイクル、又は3R(リデュース、リユース、リサイクル)を超えた取組みとして、EU(European Union)から2015年12月にCircular Economy Package、2020年3月にCircular Economy Action Plan⁽²⁾が提示された。CEの実現では、資源の有効利用、環境汚染の防止といった社会貢献だけではなく、経済的に成立していることが重要である。それと同時に、特定の国・地域でしか産出しない希土類元素など希少資源に対して持続性を確保することも重要である。

2.1 取組み方針

これまでの、主に製品のリサイクル率を向上するリサイクル技術の開発や、製品の小型・軽量・長寿命化、再生材料・自然由来材料の適用などの取組みに注力してきた。今後、さらに、製品を通じて提供するサービスに視点を置いて、製品ごとに循環性と経済性の両立の実現を検討することが重要である。当社には使用期間が長く、サイズが大きい個別受注生産製品(個産品：例えば電力設備)から、大量生産製品(量産品：例えば家電製品)まで様々な製品を対象とした事業を持っている。製品の使用期間、使用材料の特性・耐久性・使用量などに応じて、図1に示すように製品ごとに最適な循環を検討する必要がある。

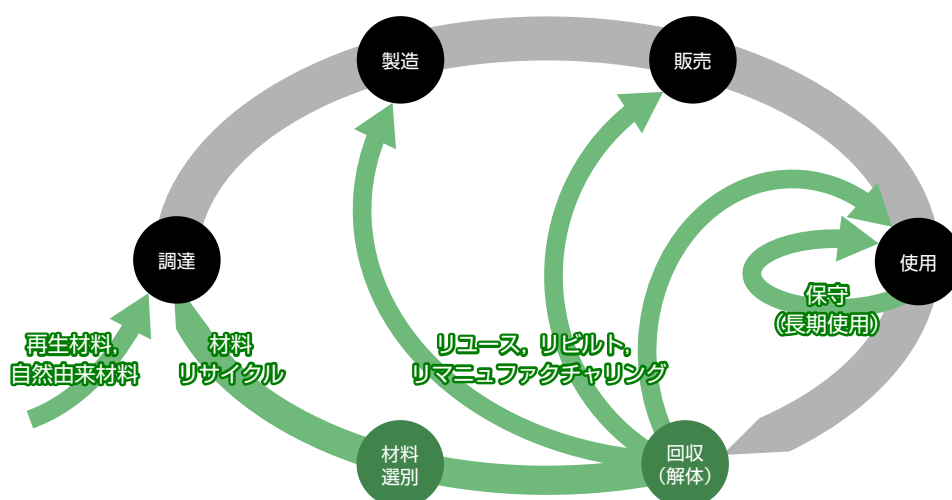


図1. 製品の特徴に依存した様々な循環

個産品に対しては、長期使用のための保守サービスで設備全体又は設備を構成する部品の診断技術や余寿命予測技術が重要と考えている。そのためにはセンシング・モニタリング技術や、運転状況を示す時系列データの解析技術などが必要である。またもちろん小型・軽量・長寿命化や、保守のしやすい設計も重要である。一方、量産品に対しては、従来の小型・軽量・長寿命化とともに、製品丸ごと、又は部品のリユース、リファービッシュ、リビルト、リマニュファクチャリングなどを考慮した製品設計(易分解性、共通化、モジュラー設計など)や、使用した製品／部品を再利用するための性能評価技術、余寿命予測技術が重要である。また両者に共通して、これまで以上に再生材料・自然由来材料の適用を前提にした設計技術も重要である。当社では、個産品、量産品の特徴に合わせて最適な循環を実現するため、劣化診断技術や高度プラスチック選別技術など重要技術(この特集号の特集論文を参照)の研究開発に注力している。

先に述べたようなそれぞれの製品のライフサイクルでのエコデザインに加えて、さらに製品が提供するサービスそのものを事業にするPaaS(Product as a Service)を含めて、事業そのものを設計することが重要である。またリユース、リビルト等を支えるためには使用材料や使用環境・条件などのデータを共有・トラッキングする仕組みも必要で、これは場合によっては同じ事業を営む企業との連携も必要である。一方で、CEの実現が、普段の生活で我々に我慢を強いたり、不便をもたらしたりするものであってはならないと考える。

2.2 CNとの関係

CEを実現するに当たって、材料まで戻して循環するのは(マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル)、製品製造の視点では現行の製造工程と整合しやすく、親和性があるが、リサイクルの過程でエネルギーや他の化学薬品を必要とし、化石資源の消費や二酸化炭素の排出につながる。国内では再生可能エネルギーが不足する状況が続くと予想され、再生可

能エネルギーやそれに基づく有機化合物の適用を前提にした循環では経済性を確保することは困難である。循環の輪は可能な限り小さく閉じる、すなわち製品や部品として長く使う、繰り返し使うことを意識する必要がある。材料としてのリサイクルが難しい樹脂材料についてもエネルギーとして使うサーマルリサイクルは資源活用の視点では有効だが、CNの視点では二酸化炭素の排出増加に当たる。現在、CE/CNの両視点でライフサイクルでのエコデザインを行うことは容易ではなく、まずはそれらを統合して見える化することが重要と考えている。

3. 開発技術

当社では、保有するコア技術・基盤技術を展開し、CEとCNの実現に貢献する研究開発を進めている。ここでは研究開発事例として、環境システム、デバイス、材料といった要素技術に分けて述べる。

3.1 環境システム技術

経済発展や人口増加に伴う水需要量の増大や水質の悪化、気候変動による水資源の枯渇などの拡大に起因する水リスクに対して、水処理技術の重要拠点である下水処理場で、水質向上や再生水需要拡大に資する浸漬(しんせき)型膜分離バイオリアクター“EcoMBR”を起点とした水循環系の構築を推進している。また、下水汚泥からバイオマスエネルギー増産に貢献する下水汚泥可溶化反応装置によって下水処理場を起点としたエネルギー循環系の構築を進めて、さらには、静電選別技術によるプラスチックリサイクル技術がもたらす資源循環系を組み込んだ水・エネルギー・資源の高度循環社会の実現を推進している。

図2に示す浸漬型膜分離バイオリアクター(EcoMBR)は、微生物を用いた生物化学的な浄化作用とろ過膜による物理的な浄化作用を併用した下水処理技術であり、流入水中の有機物を微生物(活性汚泥)で除去し、活性汚泥中に浸漬されたろ過膜によって処理水と活性汚泥に分離する水再利用システムである。膜の利用によって、処理水中に浮遊物が含まれず、再利用に適した処理水が得られることに加えて、従来の活性汚泥法で必要とされていた最終沈殿池が不要になり、コンパクトな再利用設備が提供できる。一方、活性汚泥によるろ過膜表面及び膜内の目詰まりが懸念されるが、送風機を用いた曝気(ばっき)による膜表面の洗浄と、オゾン水と次亜塩素酸ナトリウム水を併用した洗浄水をろ過時と逆方向に通水する独自の洗浄方法によって、従来の膜分離バイオリアクターよりも2倍以上の膜ろ過速度が維持できる。これによって、ろ過膜数の大幅な低減が可能になり、それに伴う膜表面の洗浄に要する曝気エネルギーが削減される。さらに、目詰まりに伴う膜交換頻度が大幅に低減されるため、新規交換膜の投入量減少や膜の再利用促進に伴う膜材料の調達量や膜製造エネルギーの削減も期待できる。すなわち、水再生の観点からの水循環系の構築だけでなく、膜材料の投入量削減や資源循環によって、高い持続性と循環性を持つ。また、曝気エネルギーや膜製造エネルギーの低減など膜分離バイオリアクターシステムのサプライチェーン全体での省エネルギー化によるCNへの貢献も期待できる。なお、プラスチックリサイクルに関わる高度プラスチック選別技術や、下水汚泥可溶化反応装置を用いたバイオマスエネルギー増産技術についてはこの特集号の特集論文を参照されたい。

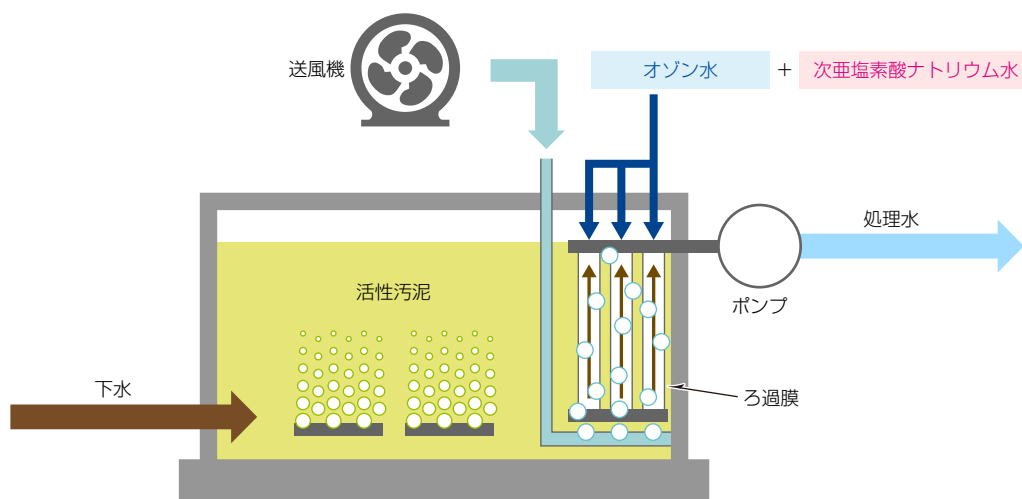


図2. 浸漬型膜分離バイオリアクター (EcoMBR) ⁽³⁾

3.2 デバイス技術

CEの実現に向けたデバイスによる貢献の一例としては、半導体増幅器を用いたマイクロ波加熱によるプラスチックのリサイクルが挙げられる。マイクロ波を用いた加熱は、対象物を直接加熱することで従来の外部加熱方式よりも高効率化が可能である。さらに半導体であるGaN(窒化ガリウム)増幅器を用いたマイクロ波加熱では、周波数や位相が安定していることから位相制御が容易であり、マグネトロンに代表される電子管によるマイクロ波加熱よりも更に高効率な加熱を実現できる。高効率で低コスト化な加熱によって、経済合理性に優れた廃プラスチックのリサイクルを可能にする。

CNに資するデバイスの筆頭としては、パワーエレクトロニクス(パワエレ)技術のキーデバイスである、パワーデバイスが挙げられる。パワエレ技術は電力を効率良く変換する技術であり、エアコン、電気自動車、電車等の私たちの身近な製品に使われている。これらパワエレ機器の高性能化、小型・軽量化の要求に対応するため、パワーデバイスには高速かつ低損失でスイッチングすることが求められている。当社は現世代のSi(シリコン)デバイスに加えて、次世代のSiC(シリコンカーバイド)デバイスの開発・製品化を進めて、市場へ展開することで低炭素社会の実現に貢献している。

機器の効率運転に対しては、センサーも重要な役割を果たす。当社が提供するサーマルダイオード赤外線センサー“MeIDIR(メルダー)”を図3に示す。被写体の赤外線放射による熱画像を取得することで、室内の温度分布や機器の発熱等についての情報を得ることが可能である。この特長を活用することで、プライバシーを考慮しつつ人やその他の熱源の状態を高精度に検知することが可能である。例えば、空調や照明機器等での人の数や状態を考慮した運転制御など、センサーデータによって各種機器の効率的運転を支えていく。

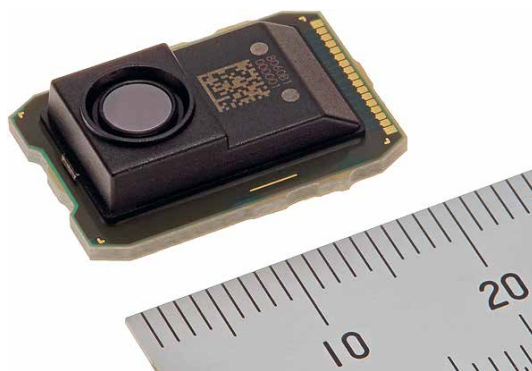


図3. 80×60画素サーマルダイオード赤外線センサーMeIDIR

情報通信インフラやデータセンターでのCNへのデバイスによる貢献として、半導体増幅器やレーザー等の通信用デバイスによる低消費電力化がある。Beyond 5Gでは更なる通信速度と低消費電力化の両立が求められるが、当社はGaN増幅器で情報通信インフラでの省エネルギー化に貢献する。データセンターでの省エネルギー化に対しては、高密度実装と低消費電力動作が可能な高速EML(Electro-absorption Modulated Laser)等の光通信デバイスで大きく貢献している。

3.3 材料技術

CEの実現には、資源の有効活用、廃棄物の最小化、及び製品使用の最大化が課題になり、材料技術が重要な鍵を握る。再生プラスチック、バイオプラスチック、耐久性・信頼性の高い素材、循環型資源利用のための技術、省エネルギー・省資源技術など、多岐にわたる材料技術の革新が求められる。当社では、1999年から家電リサイクル事業を開始し、現在はルームエアコンや冷蔵庫などの家電製品への再生プラスチックの適用を実現している。プラスチックを更に高度に選別して再利用を可能にする技術の開発を進めている。また、石油化学由来プラスチックの使用量削減に向けて、植物由来原料から作られるバイオマスプラスチックの適用も重要な開発アイテムである。

一方、製品寿命を延ばす観点、また製品を繰り返し循環する観点から耐久性・信頼性の高い素材の開発が求められる。絶縁寿命を圧倒的に向上させるナノコンポジット絶縁材料の開発や金属、セラミック、機能性材料など各種材料のコーティングによる製品の耐久性向上がその例である。当社独自のハイブリッドナノコーティング技術(図4)は、物品表面に防汚性を付与することで、ルームエアコンや冷蔵庫、照明器具の信頼性向上、省メンテナンスを実現している。また、MSCoating技術は、放電エネルギーで金属などの被膜を形成する技術で、タービンブレードを始めとした高温摺動(しゅう

どう)部材への活用が広がる。今後、材料の高耐久・高信頼化技術は、リマニュファクチャリングやリファービッシュによる製品再利用に不可欠な技術としてますます必要になる。

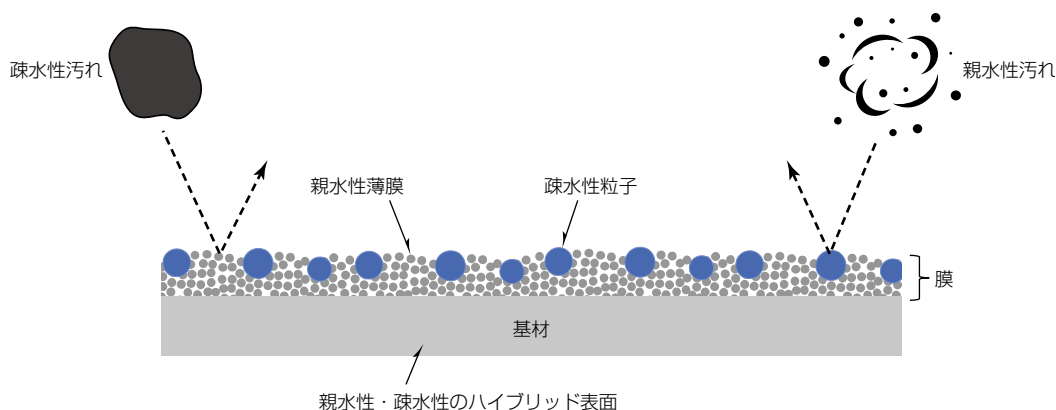


図4. ハイブリッドナノコーティング技術

廃棄物を無くす観点では、これまで焼却せざるを得なかった材料を再生する技術に着目し、廃棄物の全廃を目指している。例として、回収の難しい種類の樹脂材料を容易に分解する技術や電磁銅板・磁石・接着剤などが一体となったモーター廃部材から樹脂や有価物を回収するプロセス技術の開発が挙げられる。最近の地政学リスクや電動化進展などの社会情勢と相まって、入手困難になるレアメタル資源の回収や省資源化技術にも取り組まなくてはならない。今後も、循環型社会で経済的付加価値を生み出す革新材料の開発を続けていく。

4. む す び

CE実現のための当社の技術開発方針と、CE及びCNの実現に貢献する、環境システム、デバイス、材料の各要素技術の研究開発事例をまとめて示した。CE／CNとも実現の難易度は高いが、有効技術の早期の確立と適用が望まれている。今後、有効性、実現時期などを明らかにしながら、関連技術の研究開発に注力していく。

参 考 文 献

- (1) 特集“持続可能な社会を実現する情報技術(前編)／(後編)”, 三菱電機技報, 96, No.8／No.9 (2022)
- (2) European Commission : Circular economy action plan
https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- (3) 三菱電機：オゾン水を利用した膜分離バイオリアクターによる水処理技術
https://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/list/heavy_electric/b206/index.html

サーキュラーエコノミーに資する プラスチック高度選別技術のDX化

DX Conversion of Advanced Plastic Sorting Technology for Circular Economy

中村保博*
Yasuhiro Nakamura
黒田真司*
Shinji Kuroda
井関康人†
Yasuto Iseki

藤本夏郎‡
Natsuro Fujimoto
筒井一就§
Kazunari Tsutsui

*先端技術総合研究所
†事業推進部
‡知的財産渉外部
§渉外部

要 旨

世界中でプラスチックリサイクルに係る政策や法整備が活発化する中、長年家電リサイクル事業で培ってきた三菱電機のプラスチック高度選別技術へのニーズが高まっている。これを受けて当社は、高度選別技術を活用した新規事業開発を開始し、ブランドオーナーやリサイクラーを始めとする74社(2023年6月27日時点)に及ぶ企業との議論やサンプル試験を重ねてきた。2022年には花王(株)との業務委託契約に基づく広報発表を行い、当社が高度選別技術の社外展開に向けて始動したことを宣言した。また並行して高度選別のDX(Digital Transformation)化技術開発を開始した。今後、誰もが容易に扱えるようにDX化を施した高度選別装置(スマート静電選別)を世の中に普及させると同時に、この装置をベースにした事業を新たに創出し、サーキュラーエコノミー社会の実現に貢献する。

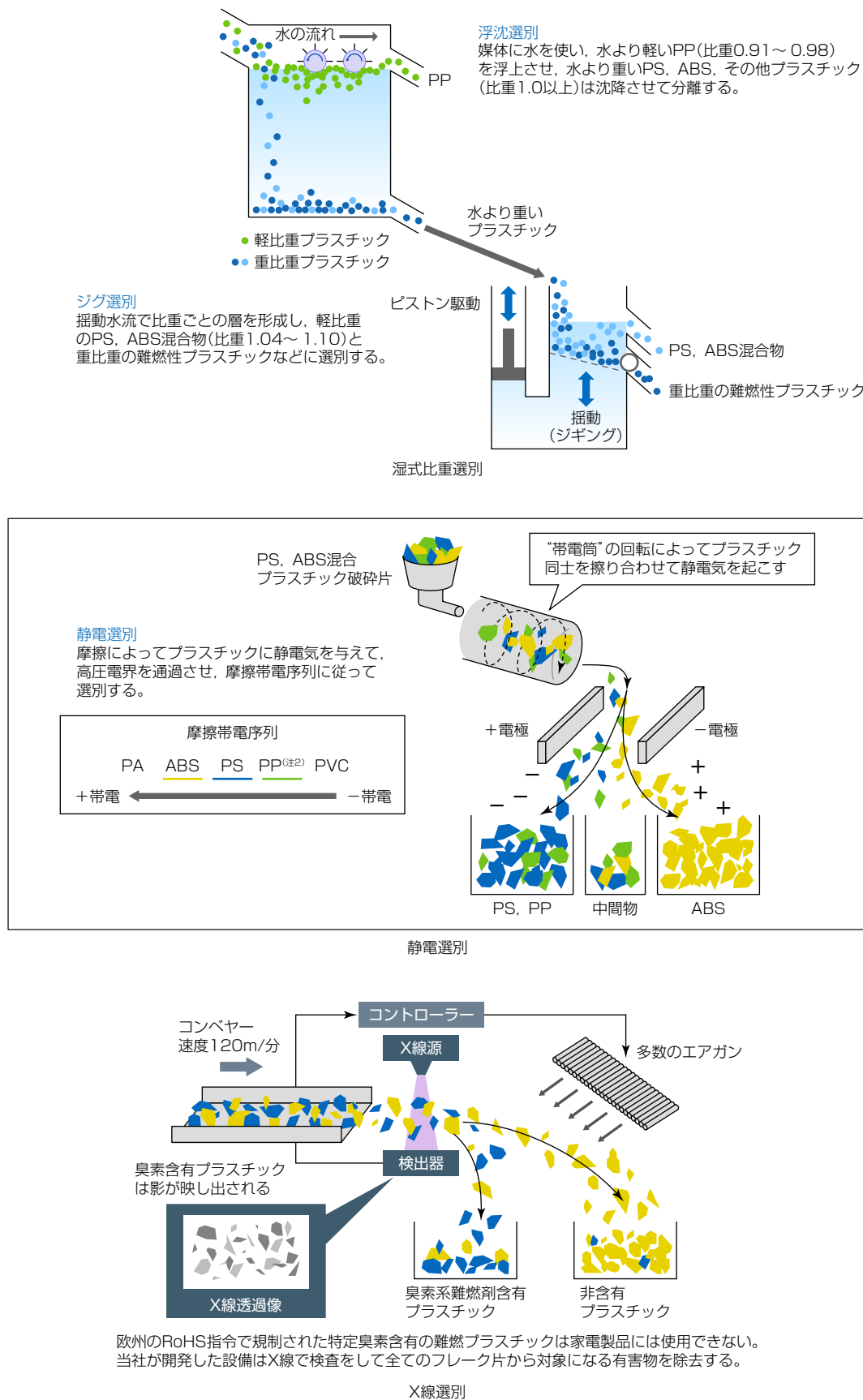
1. ま え が き

コンビニエンスストアのレジ袋有料化やカフェの紙製ストローへの移行等、身近でも脱プラスチックが急速に進んでいるが、プラスチックの使用削減だけでは不十分である。成形が容易で、軽く、低コストなプラスチックはモノづくりに必要不可欠なため、今後脱プラスチックが推進される中でも世界的にプラスチックの消費は増えると予想されている⁽¹⁾。一方、使用済みのプラスチックが適切に処理されないことによる地球温暖化、生態系破壊、資源枯渇といった社会課題の深刻化がある。今後プラスチックの消費が増えるからこそ、皆で手を取り合いこれまで以上に真剣にこれら社会課題に対応していかなければならない。解決策の一部にリサイクルがある。現状の国内でのプラスチックリサイクル率は20%程度であり、リサイクル率の向上が社会課題の解決及びサーキュラーエコノミーの実現に向けて重要になる。

こういった背景から近年、先進国を中心に世界中でプラスチックリサイクルに係る政策や法整備が活発化しており、日本でもプラスチックリサイクルを促進する「プラスチック資源循環促進法」が2022年4月に施行された。法改正を受けて、日用品、自動車、建材、飲料、食品、衣類といった多種多様な業界のブランドオーナーやリサイクラー、又は自治体等がプラスチックリサイクルへの取組みを強めている。当社は家電リサイクル法が施行された2001年度以降、使用済み家電製品のプラスチックリサイクルの技術開発を継続し、技術やノウハウの蓄積を培ってきた。多くの企業でもこのような技術やノウハウの蓄積が必要と考える。廃プラスチックをもう一度材料として使うためには、破碎した混合片から材料ごとに高い純度で選別する高度選別技術が重要になるが、多くの企業が高度選別の導入に当たってオペレーションに課題感を持っており、プラスチックリサイクル実現の上での大きな障害になっていることが分かった。したがって当社はこれまで家電で培ってきた技術をベースに、プラスチック種の適用範囲の検証を行うとともに誰もが容易に扱える高度選別に改善するため、更なる技術開発及び新規事業開発をスタートした。

2. 当社のプラスチック高度選別技術

千葉市にある当社のグループ会社GCS(株)グリーンサイクルシステムズ)では、家電リサイクル法の下回収された廃家電由来の破碎混合プラスチックからABS(アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン)、PS(ポリスチレン)、PP(ポリプロピレン)を種類ごとに選別回収し、得られた再生材の他社販売や当社家電製品への再適用(自己循環)を行っている。GCSでは年間1万トン以上に及ぶ再生材を出荷し、そのうち約4,000トンについて自己循環を実現している。純度の高いプラスチックしか自己循環できないため、いかにプラスチックを素材ごとに高純度に選別回収できるかが重要になる。GCSの数ある選別工程で、高純度な再生材を得るために重要な役割を担っているのが図1に示す“湿式比重選別装置”“静電選別装置”“X線選別装置”である。これらの高度選別装置は当社が独自開発し、2010年のGCS創業以来改善を加え続け



(注2) ガラス強化PPは比重が1.0以上

PA：ポリアミド、PVC：ポリ塩化ビニル、RoHS：the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment

出典：(株)グリーンサイクルシステムズ プラスチックリサイクルのフロー
<http://www.gc-s.co.jp/>

図1. 当社の代表的な高度選別技術⁽²⁾

て選別性能を高めてきた。また現場で起こる様々な課題に対応することで、装置のオペレーションノウハウを磨いてきた。中でもプラスチックの帯電特性の違いを利用して選別する静電選別装置は特に汎用性が高く多種多様なプラスチックを高純度に選別できる。静電選別は当社グループが家電業界で初めて^(注1)プラスチックリサイクルラインへの適用を実現し、20件以上の特許を持っている。その名の通り静電気の力を利用して対象を選別する技術であり、GCSではABSとPSの選別工程で用いられている。

静電選別の原理について述べる。回転する帯電筒に混合プラスチックを投入しプラスチック片同士を擦り合わせて摩擦帯電させる。その際、摩擦帯電序列に従いABSはプラス、PSはマイナスに帯電する。帯電した混合プラスチックを高電圧を印加した電極間に投入すると、静電気力によってプラスに帯電したABSはマイナス電極側に、マイナスに帯電したPSはプラス電極側に引き寄せられながら落下する。それらを装置の下側に備えた回収容器で別々に受けて選別が完了する。

一般にABSとPSは近赤外線選別も可能だが、過去に実施したGCSの家電プラスチックサンプルを用いた試験で、近赤外線選別に対して当社の静電選別の選別結果が優れることを確認している。また家電とは異なる様々な業界の混合プラスチックサンプルについても、静電選別のスケールダウン機で試験の結果、近赤外線選別が苦手とする黒色プラスチックや、PE(ポリエチレン)とPPのような比較的分子構造の近いプラスチック等についても選別可能な事例が多数確認され、当社の静電選別技術が家電以外の多くのプラスチックに対しても有効であることの確信を得た。ただし、静電選別にはオペレーションの課題がある。リサイクルでは業界によらず常に同じ状態の廃棄製品が回収されてくることはあり得ないため、それらを破碎して得られる混合プラスチック片(原料)の混合比は様々に変動する。例えば原料の混合比が変わるとプラスチックの摩擦帯電量が影響を受け電極間での各種プラスチックの落下位置が変わる。したがって各種プラスチックの純度、回収量を高い状態で維持するには電極電圧や回収容器の仕切り位置の調整が必要になる。この原料変動に対応するオペレーションノウハウがないと、静電選別の性能を最大限に引き出せず再生材の品質を安定化できない。当社はこれまで現場やラボでの実験に加えて、**図2**に一例を示すように様々なシミュレーション技術を駆使しオペレーションノウハウを蓄積してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、オペレーションノウハウ不要で誰もが最大限の性能で安定して高度選別を行えるよう、静電選別をDX化し当社が蓄積してきたオペレーションノウハウを詰め込むことを考えた。

(注1) 2010年6月2日、当社調べ

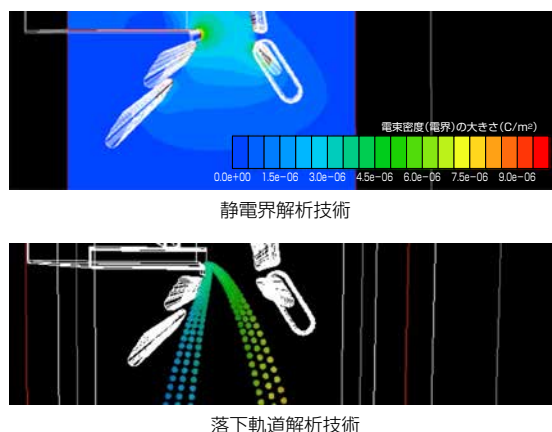
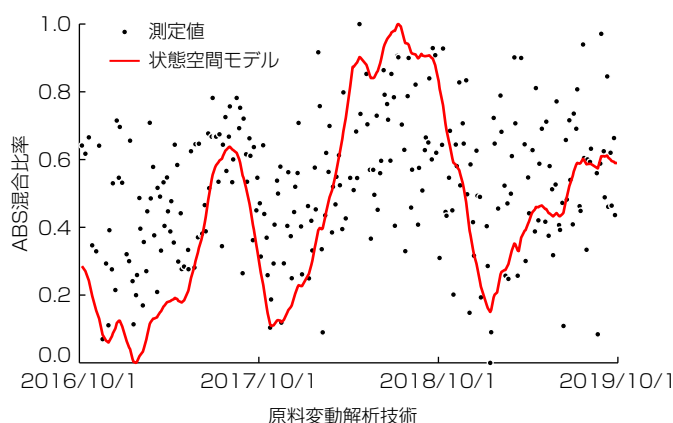


図2. シミュレーション技術の一例

3. 高度選別のDX化(スマート静電選別)技術

現行の静電選別装置は原料変動を検知するリアルタイムなセンシング手段や選別条件の自動制御手段を持たないため、GCSでも選別の全自動化は実現できておらず、定期的な手動による解析と制御にとどまっている。そこで**図3**に示すように静電選別装置にIoT(Internet of Things)センサーを搭載して選別に影響する因子及び選別結果を常時センシングし解析サーバーでデータを基に最適な選別条件をAIで導出することで、原料変動に対応する最適な選別条件を自動で遠隔制御するシステム“スマート静電選別”を提案した。スマート静電選別では原料混合比、選別結果、電極電圧に加えて、比電荷分布をセンシングすることで高度な自動選別を行う。比電荷とは摩擦帯電後のプラスチック片の帯電量を質量で除し

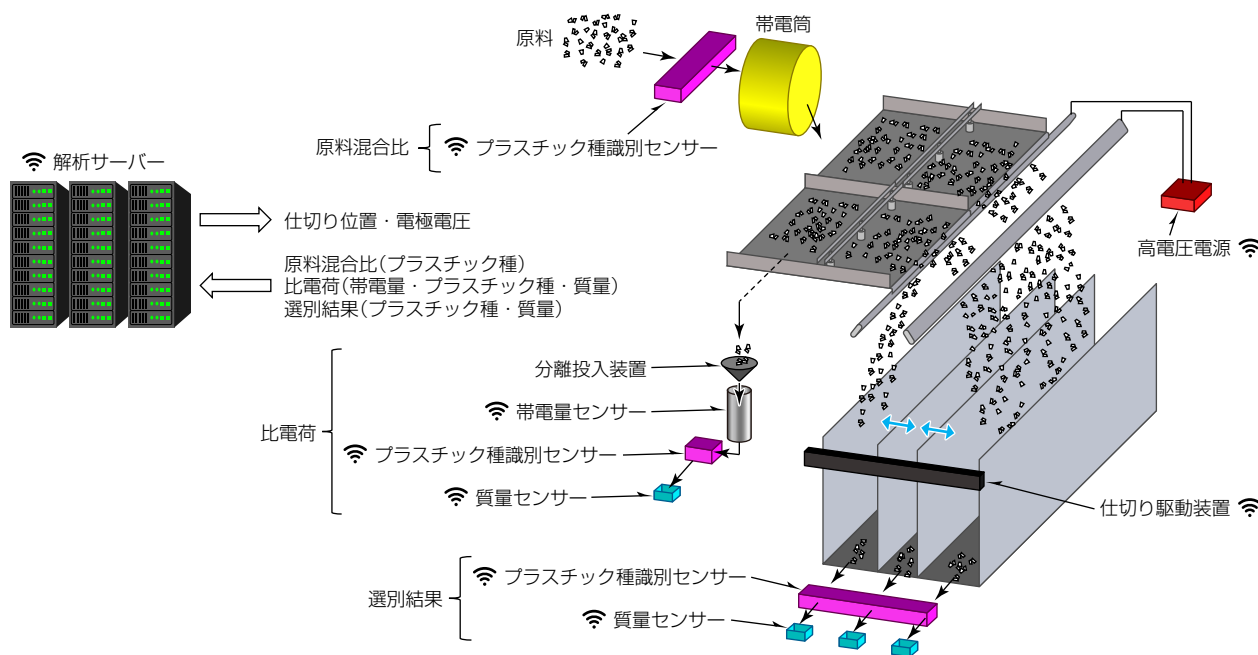


図3. 高度選別のDX化(スマート静電選別)の概念

た物性値である。プラスチック片ごとの形状ばらつきや摩擦帯電時の擦れ方の違いなどによって、同種のプラスチック片であっても比電荷は一定の値にはならず分布を取る。比電荷分布と選別電極間を通過した後のプラスチックの落下位置の分布には相関性があるため、比電荷分布を得ることが最適な仕切り位置を予測する上で重要な手がかりになる。スマート静電選別では帯電筒で摩擦帯電した直後の混合プラスチックの一部を採取し、分離投入装置によって1片ずつ帯電量センサーに投入する。その後、プラスチック種識別センサー、質量センサーで得られた計測データを解析サーバーに送信し比電荷分布を得る。解析サーバー上で、比電荷分布を基に落下位置の分布の予測を行うことで最適な仕切り位置を決定し遠隔で自動制御する。さらに選別後の各容器に回収されたプラスチックについてもプラスチック種識別及び質量計測を行うことで、各回収容器のプラスチックの選別結果(純度及び回収量)を算出する。このようにして得られた予測値と実測値との照合も随時行い解析することで、原料変動による仕切り位置の決定精度を高めていく。

もともとスマート静電選別はGCSの現場負担軽減や家電プラスチック選別性能の更なる改善を目的に考案したため、ターゲットを家電プラスチックに限定し開発を進めてきた。しかし、原料変動に対するオペレーションノウハウを必要とせず自動選別可能な特長を持つことから他社へ高度選別を普及させる上でも有用と考えて、ターゲットを家電プラスチック以外にも拡大し開発を行う方針転換を行った。将来的に多種多様な業界に装置を展開し、あらゆる原料に対するデータを収集するほどスマート静電選別装置の汎用性や選別性能は高まっていく。

スマート静電選別の構成要素である各種センサーについてはラボでの検証を開始している。比電荷分布を得るための肝になるのが帯電量センサーだが、プラスチック片の帯電量を自動かつ連続的にファラデーカップ並みの高精度で計測できる帯電量センサーが市販されていないため、図4に示すスマート静電選別向けの帯電量センサーを開発した。開発した通過型ファラデーケージ式の帯電量センサーは二重円筒構造になっており上方から帯電プラスチック片を落下させ、内側管を通過する際に生じる $\pm 1 \sim 4$ V程度の静電誘導電圧波形をマルチメーターで計測し、得られた波形をパソコンで解析することで帯電量に換算する。外側管は電磁シールドの役割を果たしている。家電プラスチックを用いた試験の結果、従来ラボで用いてきたファラデーカップによる手作業での帯電量計測と遜色ない精度(相関係数 $R=0.9996$)で自動計測可能なことを確認できた。別途開発した分離投入装置のラボ検証も完了した。その他のプラスチック種識別センサーや質量センサーについては市販のセンサーを選定し検証を進めている。質量については直接計測だけでなく画像解析による予測の両面で行っている。今後ラボでの検証が完了後、これらをGCSのラインに組み込んで家電プラスチックでのセンシングの実証を行う計画である。

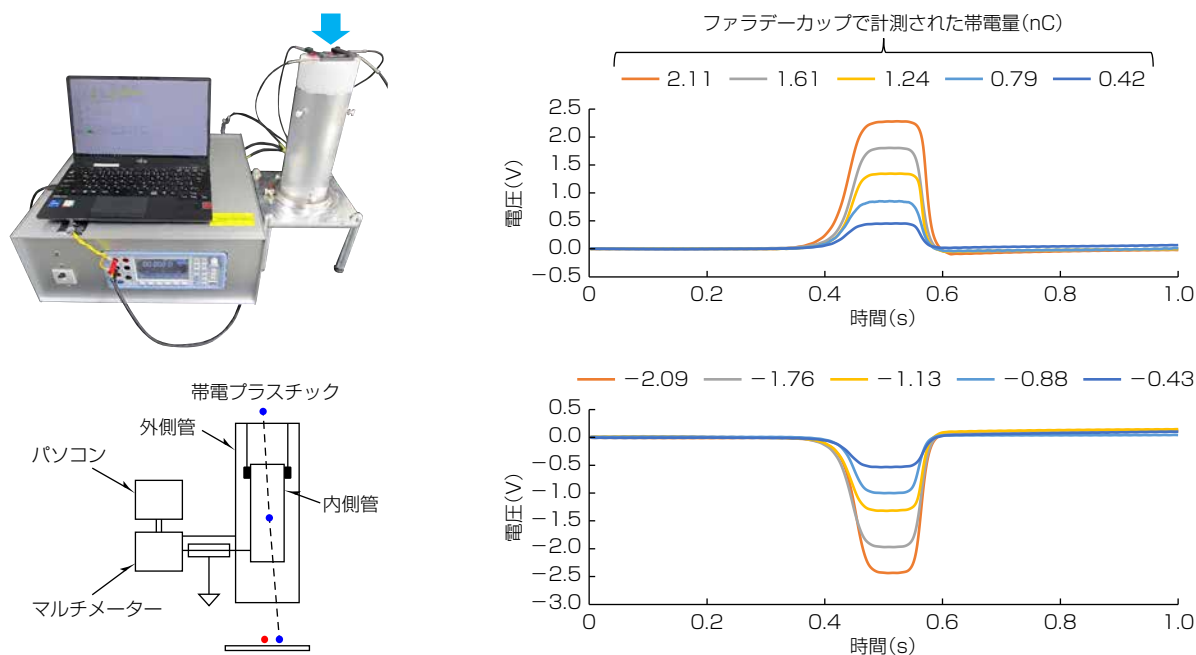


図4. 帯電量センサー及び家電プラスチックを投入した際の静電誘導電圧波形

4. 社外展開へ向けた取組み

2022年に花王(株)と業務委託契約を結んで、シャンプー容器等から出た混合プラスチックに当社の静電選別を試行し、高純度を選別できることを実証した。これを基に“三菱電機の高度選別技術による花王提供の日用品プラスチックの選別試験を開始”というタイトルでプレスリリースを発表した。これによって当社が家電で培った高度選別技術の社外展開に向けて始動したことを世の中に初めて伝えた。さらに2023年1月には社外展開へ向けた推進母体として、本社の営業本部内に新組織“リサイクル共創センター”を設立した。今後も社内外の関係者との議論や試験を重ねて、装置形態や事業モデルを改善していき、静電選別を核とした当社高度選別技術の社外展開による新規事業化を進めていく。

5. む す び

多種多様な業界のプラスチックサンプルで評価を行い、当社の高度選別技術が家電以外の多くのプラスチック材料に対しても有効であることの確信を得た。また当社高度選別技術の社外展開のキープデバイスとして、高度選別をDX化したスマート静電選別を考案し、構成要素である各種センサーについてラボでの検証を開始した。

当社のリサイクル技術とデジタル技術を融合させることで誰もが高度選別を容易に扱える形に変えて世界に普及させ、サーキュラーエコノミー社会の実現に貢献できることを願っている。高度選別技術及びその周辺の総合的な知見をいくら持っていても当社だけではサーキュラーエコノミー社会を実現できない。循環の中に存在する多くの企業・機関・消費者の人々と協力し課題解決へ向かっていきたい。

参 考 文 献

- (1) 一般社団法人 プラスチック循環利用協会：2021年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分状況 マテリアルフロー図 (2022)
<https://pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf>
- (2) ㈱グリーンサイクルシステムズ ホームページ
<http://www.gc-s.co.jp/>
- (3) 稲永康隆：プラスチックリサイクルにおける静電選別技術，粉体技術，7，No.8，738～742 (2015)
- (4) 黒田真司，ほか：静電選別のプラスチック回収率向上に向けたデータ駆動型の選別条件決定技術の開発，第33回廃棄物資源循環学会研究発表会，181～182 (2022)

プラスチックリサイクル促進 に向けたマイクロ波加熱技術

Microwave-based Heating for Promoting Plastic Recycling

廣田明道*
Akimichi Hirota
神岡 純†
Jun Kamioka
榊 裕翔†
Hiroyuki Sakaki

北畑 繁‡
Shigeru Kitahata
西嶋 潤†
Jun Nishijima

*情報技術総合研究所(博士(工学))

†同研究所

‡先端技術総合研究所

要 旨

気候変動問題、天然資源の枯渇等の環境問題解決に向けて、二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガス排出ゼロ(カーボンニュートラル:CN)や、循環経済(サーキュラーエコノミー:CE)の実現が望まれている。

三菱電機ではCN/CE実現に向けた取組みの一つとして、プラスチックのケミカルリサイクルに着目している。高速・高効率な加熱方法として、当社で開発してきた複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御することで加熱箇所を均一化/局在化する、マイクロ波加熱技術を応用して、高効率で低コストなプラスチックのケミカルリサイクル技術を確認し、CN/CE実現に貢献していく。

1. ま え が き

気候変動問題、天然資源の枯渇、大規模な資源採取による生物多様性の破壊など様々な環境問題解決に向けて、CNやCEの実現が望まれている。

当社ではCN/CE実現に向けた取組みの一つとして、プラスチックリサイクルに着目している。プラスチックは軽くて丈夫であり、生活・産業のあらゆる場面で利用されているが、近年、プラスチックを適切に処理しないことによる海洋プラスチック問題や、処理の際に発生したCO₂による環境への影響が社会課題になっている。さらに、世界的には2060年に廃プラスチック量が現在の3倍に増加するとの予測もあることから⁽¹⁾、廃プラスチックリサイクルの重要性はより高まると予想される。

本稿では、プラスチックリサイクルへの応用が期待される、マイクロ波加熱技術について述べる。

2. プラスチックリサイクルの現状

国内でのプラスチックリサイクルの現状は、図1に示すように廃プラスチックをプラスチックのまま材料にして新しい製品を作るマテリアルリサイクルが21%、廃プラスチックを従来の材料(還元剤等)の代替品として利用又はモノマー等に分解後再度プラスチックに合成するケミカルリサイクルが3%、熱・エネルギーとして回収するサーマルリサイクルが62%、特に再利用せず焼却・埋立てによって処分する未利用分が14%になっている⁽²⁾。サーマルリサイクルでは熱・エネルギー源として再利用しているものの廃プラスチックを焼却していることから、未利用での焼却分も含めると年間

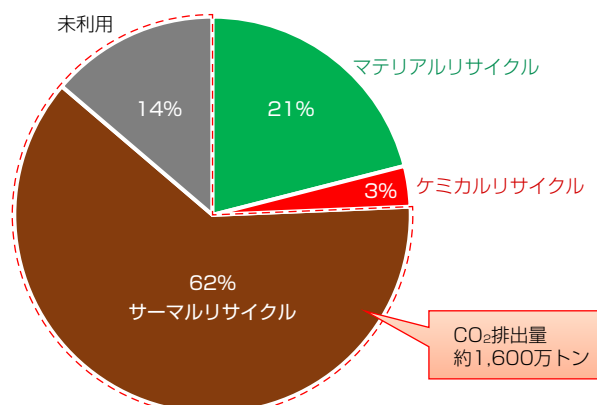


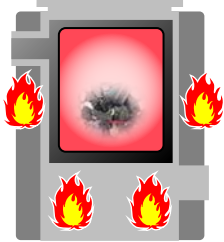
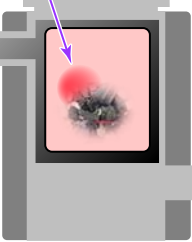
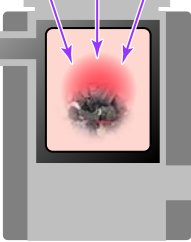
図1. 国内での廃プラスチックのリサイクル状況

約1,600万トンと多くのCO₂が排出されているのが現状である⁽³⁾。このことから、サーマルリサイクル／未利用の割合を削減し、マテリアル／ケミカルリサイクルへ転換していく必要がある。しかしながら、現状のケミカルリサイクルでは、廃プラスチックをモノマー等に分解する際の加熱にかかるコストが高いという課題もあり、普及には至っていない。つまり、短時間で高効率に廃プラスチックを加熱してモノマー等まで分解することで低コスト化を実現することが、普及に向けては重要になる。

3. マイクロ波加熱方式の特徴

プラスチックのケミカルリサイクルに関して、加熱方式の比較を表1に示す。従来の外部加熱方式では、炉全体を加熱した後に廃プラスチックを加熱する。このため、廃プラスチックを加熱するには多くの時間とエネルギーが必要で、加熱効率が低くコストが高くなる。従来のマイクロ波加熱方式では、マイクロ波で直接廃プラスチック(又は触媒)を加熱するため、炉全体を加熱する必要がなく、外部加熱方式よりも短時間・省エネルギーで加熱することが可能になる。ただし、位相制御せず単純にマイクロ波を照射して加熱するため、炉内部で加熱むらが生じて一部分解が進まない箇所も存在してしまい、加熱効率に限界がある。一方、複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御するマイクロ波制御方式では、マイクロ波で直接廃プラスチックを加熱するため炉全体を加熱する必要がない。また炉内の温度分布に合わせて位相制御による均一／局所加熱を組み合わせることで、加熱効率を最大化できる。このことから、位相制御を行うマイクロ波加熱技術をプラスチックリサイクルへ応用することで低コスト化を実現し、CN／CE実現に貢献できる。

表 1. 加熱方式の比較

	従来の外部加熱	従来のマイクロ波加熱 (位相制御なし)	マイクロ波制御 (位相制御あり)
加熱方法			
加熱制御	不可 (内部が温まりにくい)	不可 (加熱むらが発生する)	均一／局所加熱可能
加熱効率	悪い (容器ばかり温まる)	良い	非常に良い

4. マイクロ波加熱技術の実証例⁽⁴⁾

当社では、複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御するマイクロ波加熱技術を開発し、加熱箇所を均一化／局在化できることを実証している。ここでは、この技術について述べる。

4.1 マイクロ波半導体加熱装置

開発したマイクロ波半導体加熱装置の構成を図2に示す。信号源(SG)から基準になるマイクロ波が励振され、ドライバーステージ(DA)で信号が増幅される。分配器(DIV)によって信号は5分配され、移相器(PS1～PS5)によって位相が制御される。その後パワーステージ(PA1～PA5)によってマイクロ波は増幅され加熱炉内へ照射される。加熱炉とPAの間にあるカップラー(CPL)で信号を一部取り出して、加熱炉へ照射される入力波と加熱炉から戻ってくる反射波をパワーメーター(PM)によって観測する。系の合間にあるアイソレーター(ISO)は、マイクロ波の逆流防止用の安全装置である。SGによる信号発生タイミング制御、及びPS1～PS5による位相制御、PMによる電力の読み取りの制御はパソコン(PC)から制御する構成にした。

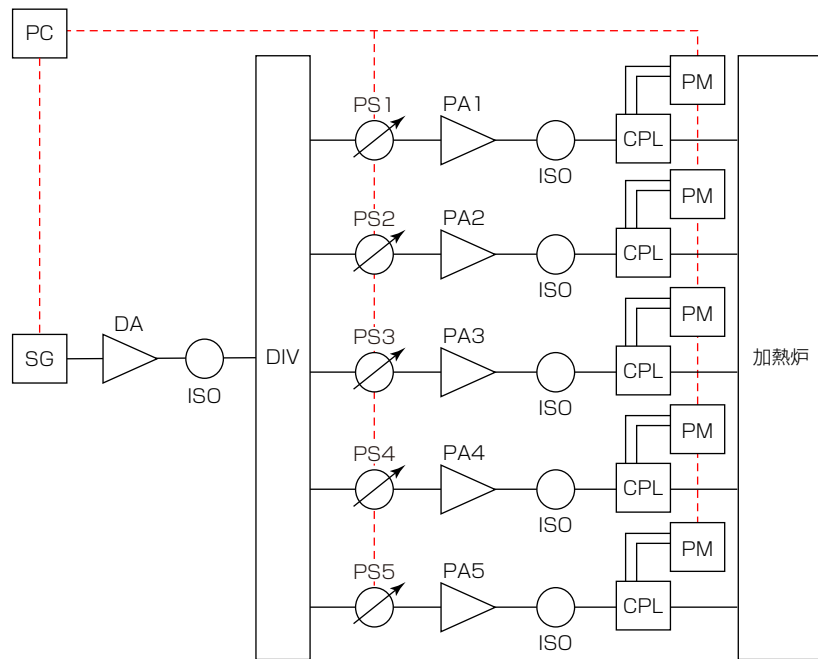


図2. マイクロ波半導体加熱装置の構成

4.2 シミュレーションによる評価結果

4.1節で示したマイクロ波半導体加熱装置を用いて、各移相器を制御することで加熱炉内の均一加熱を目指して検討を実施した。図3に検討に用いた加熱炉の電磁界シミュレーションモデルを示す。加熱炉は導波管が直線状に並んでいるため、定性的に温度の均一性を確保できるのは導波管入り口直下の直線状の領域（以下“評価線”という。）になると考えられることから、一次元の熱分布を均一にする検討を行った。なお、被加熱物にはマイクロ波の照射によって温度が容易に上昇する素材（以下“素材A”という。）を採用した。加熱炉の寸法、導波管入り口から加熱物までの距離、及び導波管から入力される各マイクロ波信号の位相差等をパラメータとして最適化を実施した。最適化前後の評価線での発熱量分布を図4に示す。

位相制御を実施しない最適化前の発熱量分布（図4の赤点線）では、最小値に対する最大値は約5.2倍になり、大きな発熱量分布差になっている。一方、均一加熱になるように位相制御を実施した場合の発熱量分布（図4の青線）では、最小値に対する最大値は約1.4倍と、大幅な均一化ができています。このシミュレーション結果を踏まえて、4.3節に述べる実験を実施した。

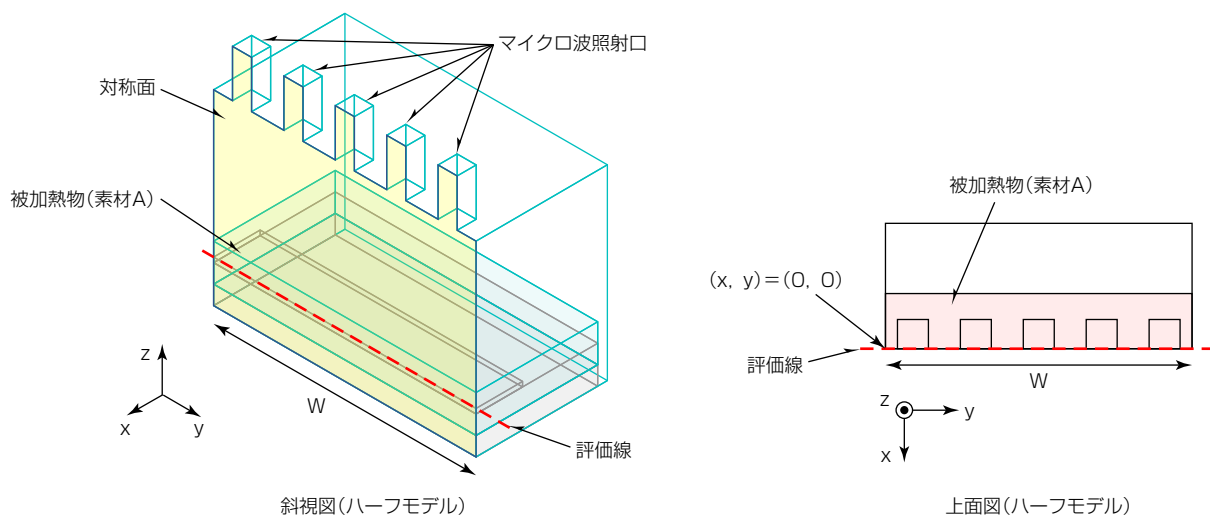


図3. 電磁界シミュレーションモデル例

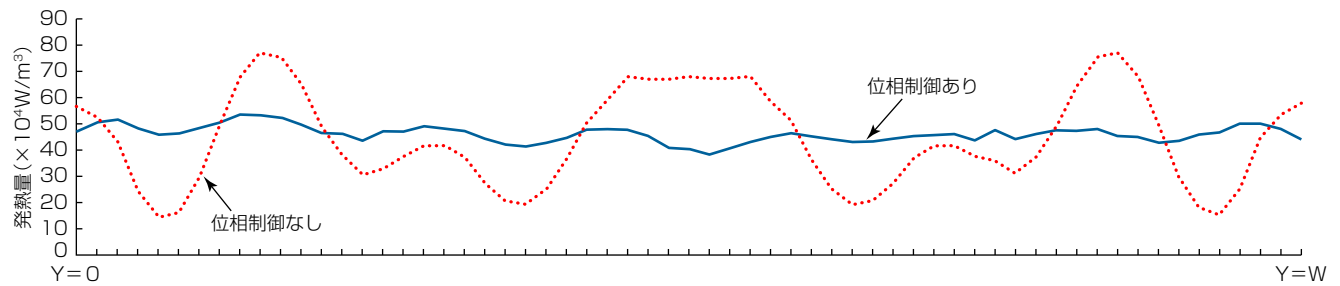


図4. 発熱量分布のシミュレーション結果

4.3 実験による評価結果

4.2節までの検討結果を踏まえて、マイクロ波半導体加熱装置を製作し実験を実施した。測定時の実験系を図5に、実験系の外観を図6に示す。五つの導波管から、位相を制御したマイクロ波を一樣に加熱炉内へ照射し、加熱炉内に配置した素材Aを加熱する。なお、導波管からマイクロ波を照射すると、視(のぞ)き窓からマイクロ波の漏洩(ろうえい)を生じるため、素材Aを加熱する際には金属蓋で視き窓は塞いでマイクロ波を照射する。照射を終えてすぐに蓋を取り外して、視き窓からサーモビューアで加熱炉内に配置した素材Aの表面温度を測定する。なお、図5にも示したように加熱炉の壁面及び蓋部によってサーモビューアからの視野角は制限を受けるため素材Aの評価線を含む半分程度の範囲の表面温度を測定した。

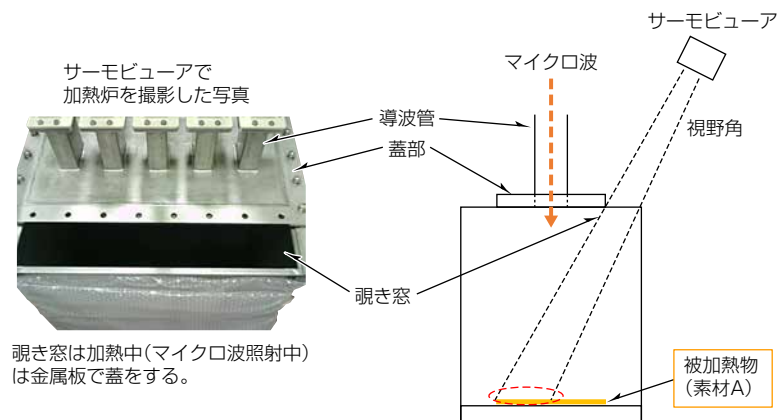


図5. 実験系の構成

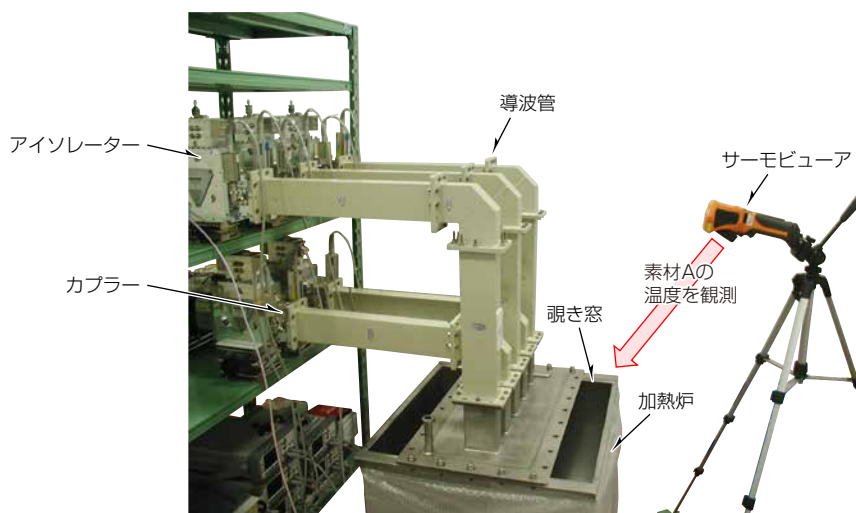


図6. 実験系

測定した温度分布を図7に示す。図7(a)に示すように位相制御なしの場合、加熱がされていない部分(青い部分)と加熱されている部分(赤い部分)が存在し、温度分布にむらが生じていることが分かる。サーモビューアの評価線での最高/最低温度は42℃/27℃と温度差は15℃になった。一方、位相制御を適用した場合、図7(b)に示すように全体が赤く加熱され加熱むらが全体的に小さくなっていることが分かる。また、サーモビューアの評価線上での最高/最低温度は48℃/41℃と温度差は7℃になり、位相制御を用いない場合に対して温度差は約半分と均一加熱が可能であることが分かった。また、誌面の都合上ここでは示さないが、位相制御によって局所的に加熱できることも実験的に実現できている。このことから、位相制御によって加熱箇所を均一化/局在化できることを確認した。なお、この章で示した内容は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の“グリーンデバイス社会実装推進事業/省エネルギー社会を実現する高効率高出力マイクロ波GaN(窒化ガリウム)増幅器”の成果である。

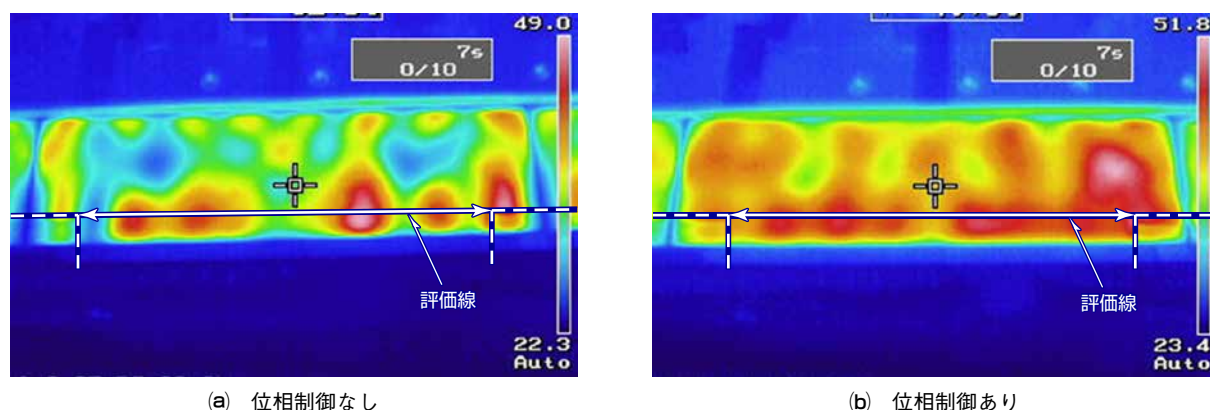


図7. 実験結果

5. む す び

複数箇所から照射されるマイクロ波の位相を制御することで加熱箇所を均一化/局在化する、マイクロ波加熱技術について述べた。この技術を応用することで、高効率で低コストなプラスチックリサイクル技術を確立し、CN/CE実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 経済協力開発機構(OECD) : Global Plastics Outlook
https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_aaledf33-en
- (2) 一般社団法人 プラスチック循環利用協会 : プラスチックリサイクルの基礎知識2022 (2022)
<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panfl.pdf>
- (3) 経済産業省 資源エネルギー庁 : カーボンニュートラルで環境にやさしいプラスチックを目指して(前編)
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/plastics_01.html
- (4) Iyomasa, K., et al. : High Efficiency Chemical Reactions Induced by Concentrated Microwave Heating Using GaN Amplifier Modules, Journal of the Japan Petroleum Institute, **61**, No.2, 163~170 (2018)

持続可能な社会実現に向けた 下水処理場でのバイオガス増産技術

Realization of Sustainable Society Through Technology for Increasing
Biogas Production in Sewage Treatment Plants

黒木洋志*
Hiroshi Kuroki
勝又典亮†
Noriaki Katsumata
小川和彦‡
Kazuhiko Ogawa

有馬芳明§
Yoshiaki Arima
和田 昇*
Noboru Wada
大泉雅伸||
Masanobu Oozumi

*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所
†同社 同研究所(博士(農学))
‡同社 社会環境事業部
§同社 神戸製作所
||日鉄エンジニアリング㈱

要 旨

下水道分野のカーボンニュートラル実現に向けて省エネルギー・創エネルギー技術が検討される中、下水処理場で発生する下水汚泥を活用した創エネルギー技術としてバイオガスの増産技術が期待されている。バイオガス増産にはオゾンを利用した汚泥可溶化が効果的であるが、これまでのオゾン処理法では反応効率が低いことが課題であった。そこで、特殊攪拌(かくはん)翼によって高濃度オゾンガス気泡を微細化することで効率良く汚泥を可溶化するオゾン可溶化反応装置を開発した。国内の下水処理場で一年間を通じた実証試験の結果、バイオガスが約22%増産することを確認した。

1. ま え が き

経済産業省が2020年に取りまとめた“カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”で、資源循環関連産業の成長戦略としてエネルギー回収の高度化・効率化やエネルギー利用の促進が掲げられ、バイオマス資源の利用拡大に向けた技術が注目されている。国土交通省は下水道分野で脱炭素社会を牽引(けんいん)するグリーンイノベーション下水道を目指す方針を示している⁽¹⁾。

下水処理場での脱炭素の取組みとして、三菱電機㈱と日鉄エンジニアリング㈱はバイオマス資源として活用が期待されている下水汚泥に着目した。下水処理場では、下水中に含まれる浮遊物質が沈殿した初沈汚泥と、溶解性有機物の分解によって増殖した微生物から成る余剰汚泥がある。これら汚泥は廃棄物として処理されるが、消化槽を導入することで、嫌気性微生物を作用させ汚泥を分解し汚泥量を減らす取組みもなされている。このとき、消化槽では汚泥の分解に伴いメタンを主に含むバイオガスが発生する。バイオガス中のメタンをボイラーや発電機の燃料として利用することで、下水処理場の脱炭素化に貢献している。

余剰汚泥は微生物を主体とし難分解性であるが、オゾンで酸化処理をすれば分解性が向上しバイオガスが増産することが知られている⁽²⁾。余剰汚泥のオゾン処理は消化槽投入前に行うが、従来の散気によるオゾン処理ではオゾン消費率が30%以下と低いことが課題であった。開発したオゾン可溶化反応装置のオゾン消費率は、実証試験の結果80%以上であることが確認できた。国内の下水処理場で一年間行った実証試験で得られたバイオガス増産効果について述べる。

2. 下水処理場での脱炭素の取組み

下水道技術開発会議エネルギー分科会で下水道分野で導入すべき脱炭素技術が検討されており、“カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発等に関するエネルギー分科会報告書⁽³⁾(以下“エネルギー分科会報告書”という。)”にその結果がまとめられている。この中で、地球温暖化対策計画(2021年10月22日閣議決定)では下水道分野の削減目標として、2030年度での温室効果ガス排出量を2013年度の約50%(二酸化炭素換算)に相当する208万tのCO₂を削減するとの目標が示されている。削減目標達成のための導入すべき技術及び技術開発項目として“省エネルギーの促進”“焼却の高度化”“下水汚泥のエネルギー化”“再生可能エネルギー利用の拡大”があり、下水汚泥のエネルギー化を現在の24%から37%まで向上させることで約70万tのCO₂が削減できると試算されている。

エネルギー分科会報告書には2050年カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発ロードマップが示されており、創エネルギー・再生可能エネルギーに関する事項として“高濃度濃縮技術、汚泥可溶化、マイクロ波の活用によって消化性能を向上させる等による既存消化槽の高効率エネルギー生産・回収型への転換技術”は2030年までにパイロットスケールと実規模実証を行い、順次導入拡大・コスト低減・改善を行うことが示されている。今回開発したオゾン可溶化反応装置は先に述べた汚泥可溶化に該当するものであり、下水処理場の脱炭素化に貢献する技術である。

3. オゾン可溶化反応装置

図1に下水処理場の処理工程とオゾン可溶化反応装置の配置を示す。集めた下水は、下水処理場の最初沈殿池で、固形物を沈殿させ初沈汚泥と上澄みに分離する。初沈汚泥は消化槽に投入し処理する。一方、最初沈殿池の上澄みは曝気(ばっき)槽で微生物の作用で浄化されるが、この工程で微生物は水中の有機物を消費し増殖する。増殖した微生物は凝集し、最終沈殿池で余剰汚泥として分離される。

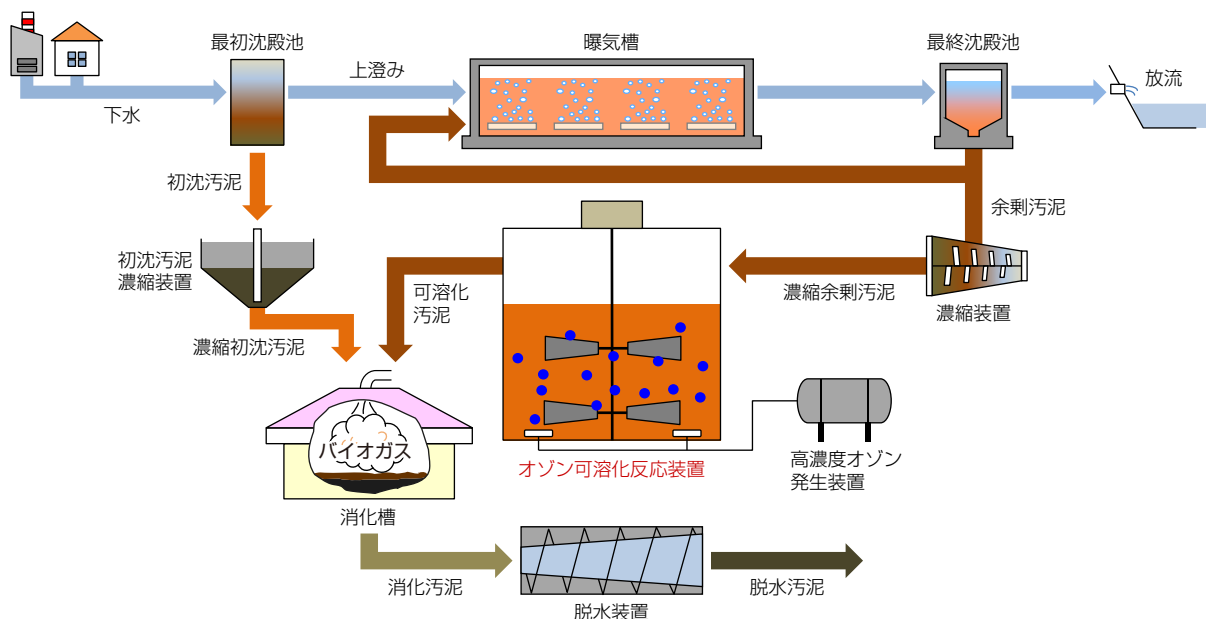


図1. 下水処理場の処理工程とオゾン可溶化反応装置の配置

このように下水処理場では多量の初沈汚泥や余剰汚泥が発生する。処分する汚泥量を削減するために、初沈汚泥や余剰汚泥を分解する消化槽が設置されている。これらの下水処理場では、消化槽を小さくし、また効率的に消化するために、初沈汚泥と余剰汚泥は脱水によって濃縮して消化槽に投入する。一例として、初沈汚泥を濃縮した濃縮初沈汚泥と余剰汚泥を濃縮した濃縮余剰汚泥を混合して消化を行っている。

今回開発したオゾン可溶化反応装置は余剰汚泥の濃縮装置と消化槽の間に設置する。オゾン可溶化反応装置で濃縮余剰汚泥を可溶化することで、消化槽での濃縮余剰汚泥の分解効率とバイオガス発生量を高められる。

消化槽で分解されなかった消化汚泥は脱水装置で脱水し、焼却するか固形燃料として利用する。

図2にオゾン可溶化反応装置を示す。装置は円筒形のタンクに濃縮余剰汚泥を貯留し、装置下部に設けられた散気部からオゾンを注入する。タンク容積は1 m³であり、せん断性を高めた特殊攪拌翼が回転して汚泥を攪拌し気泡を微細化する。図3に可溶化反応装置の概要を示す。特殊攪拌翼は散気部から浮上するオゾン気泡を微細化するとともに、汚泥中に微細気泡を均一に分散する。注入するオゾンの濃度は200~230 g-O₃/Nm³であり、一般的な水処理で用いられるオゾン濃度の約2倍である。このように高濃度オゾンガスを利用することによってオゾンと汚泥の反応効率が向上し、より少ないオゾン濃度での処理と比較して短時間での可溶化を実現した。

次にオゾンによる濃縮余剰汚泥の酸化処理がバイオガス増産に果たす役割を述べる。濃縮余剰汚泥中の微生物にオゾン及びオゾンと水が反応して生成したヒドロキシラジカルが接触し、細胞壁を構成するペプチドグリカンの結合を酸化分解することで汚泥が可溶化する。有機物の発酵経路は加水分解工程(第一段階)、酸生成工程(第二段階)、メタン生成(第三段階)から成り、最終生成物としてバイオガス(メタン及び二酸化炭素)になる。オゾンは余剰汚泥中の微生物を酸化分解することによって、先に述べた第一段階及び第二段階の反応を一部代替し、発酵を促進されて、その結果バイオガス化率(メタンの増産)が向上する⁽⁴⁾。

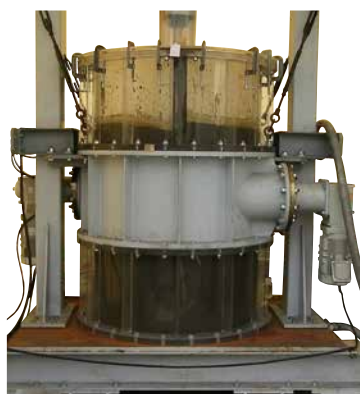


図2. オゾン可溶化反応装置

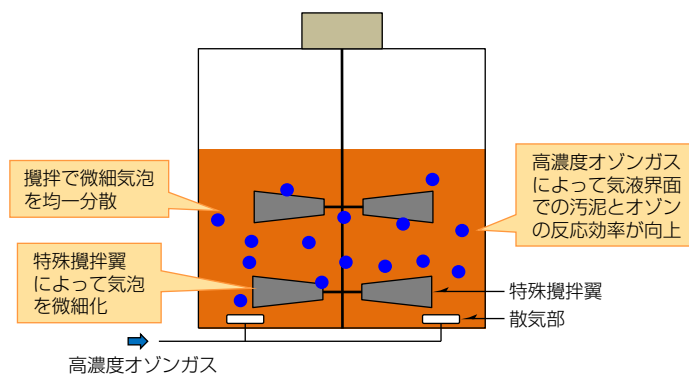


図3. オゾン可溶化反応装置の概要

4. 実証試験

4.1 実証試験方法

開発したオゾン可溶化反応装置(図2)を国内のA下水処理場に設置し、濃縮余剰汚泥可溶化の実証試験を行った。流入する下水の水質や気温などの影響によって下水処理場で発生する汚泥の量・濃度が変化する。そこで春夏秋冬の各季節を含む2020～2021年の一年間にわたって実証試験を行った。

下水処理場で採取した濃縮余剰汚泥(SS(Suspended Solids, 浮遊物質)濃度2.5～4.0%)を可溶化反応装置に1回当たり約790L入れて、汚泥を攪拌しながらオゾンガス(濃度200～230g-O₃/Nm³)を注入した。濃縮余剰汚泥のオゾン吸収量が60～80mg-O₃/g-SSになるまでオゾンを注入した。処理時間は約80分であった。

実証試験でオゾン消費率と可溶化率を評価した。オゾン消費率は濃縮余剰汚泥によって吸収されたオゾンガスの割合を示しており、可溶化反応装置注入前と装置から排出されるオゾンガス中のオゾン濃度を測定することで算出した。可溶化率はバイオガス増産の指標であり、可溶化前後でのVSS(Volatile Suspended Solids, SSの強熱減量)濃度を測定することで算出した。

可溶化した汚泥を用いた消化試験は実験室で行いバイオガス増産の効果を評価した。消化試験のフローを図4に示す。可溶化処理系は実証試験でオゾンで可溶化した濃縮余剰汚泥、対照系はオゾンで可溶化していない濃縮余剰汚泥を用いた試験系である。消化試験は濃縮初沈汚泥75mLと濃縮余剰汚泥75mLを67日間にわたって毎日投入した。消化槽内の汚泥量を一定(4.5L)に保つため、投入した汚泥分(150mL)を毎日引き抜いた。温度36～38℃、滞留日数30日の条件(A下水処理場の消化条件に準じた)で消化試験を実施した。消化槽から発生したバイオガスをアルミガスバックで採取し、毎日ガス発生量を測定した。投入した汚泥のVTS(Volatile Total Solids, 強熱減量)当たりのバイオガス発生量を比較して、オゾンによる可溶化のバイオガス増産効果を評価した。

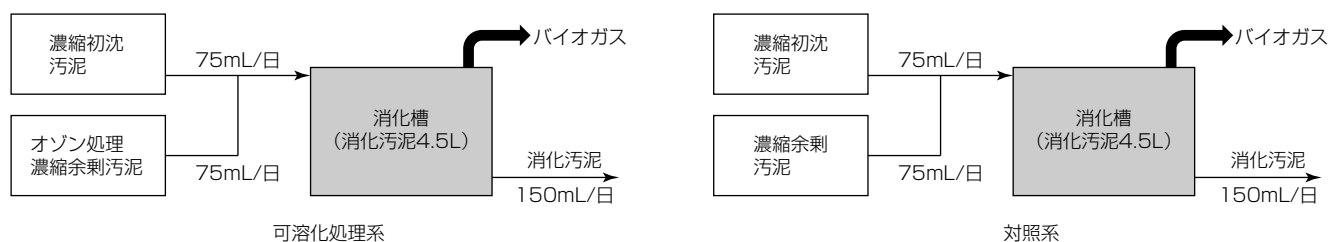


図4. 消化試験のフロー

4.2 実証試験結果

各季節でのオゾン消費率の結果を示す(図5)。汚泥に従来の散気方式でオゾンを注入した場合オゾン消費率は約30%であるが、今回開発したオゾン可溶化反応装置では全ての季節でオゾン消費率が80%であった。せん断性を高めた特殊攪拌翼がオゾンガス気泡の微細化して均一にオゾンガス気泡を分散できたためである。これらの結果によって開発したこの装置は気温や汚泥濃度によるオゾン消費率の変動が小さく、年間を通じて安定的にオゾンによる可溶化処理を行えることが確認できた。図6に各季節でのVSS可溶化率(有機物の分解程度を表す)の結果を示す。VSS可溶化率は最も低い1月が25.2%、最も高い3月が35.6%であり季節による差が見られた。これは、汚泥性状の季節変動や、外気温の影響によって粘度が変化したためと考えられる。一年を通じて20%以上の高いVSS可溶化率であり、可溶化処理が安定して行えることが確認できた。消化試験の結果、発生したバイオガス量は可溶化処理系で0.45L/g-VTS、対照系で0.37L/g-VTSであり、汚泥オゾン可溶化によってバイオガスが22%増産された。

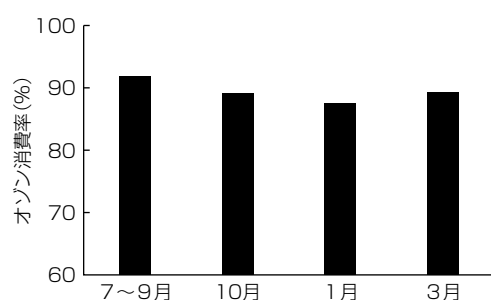


図5. オゾン消費率

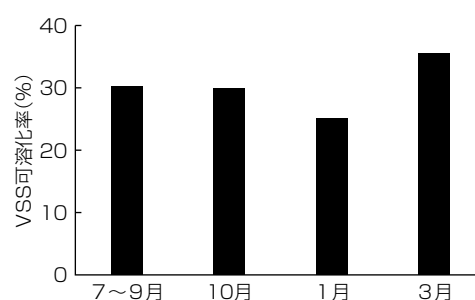


図6. 揮発性浮遊物(VSS)可溶化率

5. む す び

特殊攪拌翼によって微細化された高濃度オゾンガス気泡で濃縮余剰汚泥を可溶化するオゾン可溶化反応装置を開発し、国内の下水処理場で実証試験を一年間行った。年間を通じてオゾン消費率平均80%以上、VSS可溶化率平均20%以上を達成し、安定した可溶化処理が行えることを確認した。可溶化した汚泥を用いた消化試験で、バイオガス量は22%増えることを確認した。

今後は下水道分野で脱炭素社会実現に資する重要な技術として、国内下水処理場への展開を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：下水道政策研究委員会 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書 脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道 (2022)
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001474979.pdf>
- (2) 小松俊哉, ほか：オゾン前処理が濃縮余剰汚泥のバイオガス化および消化汚泥の脱水性に及ぼす影響, 用水と廃水, **63**, No.8, 49~56 (2021)
- (3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道技術開発会議エネルギー分科会：カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発等に関するエネルギー分科会報告書 (2022)
https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/202203_energybunkakaihokokusyo.pdf
- (4) 大泉雅伸, ほか：オゾンによる余剰汚泥の高効率可溶化技術とその応用, 第27回廃棄物資源循環学会研究発表会要旨集, 223~224 (2021)

受配電機器劣化診断システム

Degradation Diagnostic System for Power Distribution Equipment

*先端技術総合研究所
†同研究所(博士(工学))
‡受配電システム製作所

要 旨

サーキュラーエコノミー実現のためには、機器の状態を把握し適切なメンテナンスによる製品寿命の長期化が重要である。三菱電機では、これまで受配電機器の劣化診断を数多く実施してきたが、機器の停電や現地への作業員派遣が必要であった。そのため、稼働を止めることができない重要な設備での劣化診断は困難であり、また専門技術者を派遣する費用も見過ごすことのできない課題になっていた。

今回、従来の診断実績で顧客から得られたデータを活用し、受配電機器を低コスト(機器停電及び現地作業が不要)で劣化診断可能なシステムを開発した。このシステムは機器内に劣化判定センサを設置し、取得した環境データ(温湿度等)及びこれまで蓄積してきた診断データをベースに、当社独自に開発した診断モデルによって受配電機器内の絶縁物の余寿命を予測するシステムである。

1. ま え が き

受配電機器は電気エネルギーを工場や建物へ供給する役割を担っている重要な設備であり、長期間にわたって信頼性を確保して稼働する必要がある。特に、高圧電気設備で電氣的トラブルが発生すると、生産損失や設備補修など工場や建物に与える影響が非常に大きくなる。受配電機器のトラブル(電力の供給障害等)を未然に防いで、適切な設備更新をするためには、受配電機器の寿命を決定する絶縁物の劣化診断が重要である。

当社が2003年から実施している従来の劣化診断⁽¹⁾では、絶縁物表面のイオン量や色彩値から、劣化度と相関の高い絶縁物の表面抵抗率を算出し、診断する(図1)。イオン採取や色彩測定等の作業は診断対象の受配電機器がある現地に作業員が赴いて実施するため、機器の稼働停止や専門技術者の派遣が必要であった。そのため、止められない重要な設備での劣化診断は実施できておらず、また、専門技術者を派遣する費用も課題になっていた。

本稿では、これらの課題に対応することを目的に、独自に開発した受配電機器劣化診断システムについて述べる。この劣化診断システムによって、設備を停止させることなく、専門技術者の派遣も不要になり、より効率的な劣化診断が可能になる。

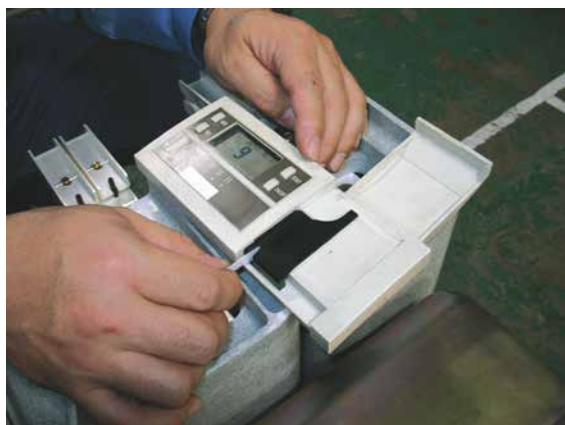


図1. 従来の劣化診断の様子

2. 受配電機器劣化診断システム

独自に開発した診断システムでは、診断対象機器の絶縁物の種類や使用年数等の“対象機器データ”，従来診断の3,000件以上の診断結果をまとめた“蓄積診断データ⁽²⁾”，受配電機器内に設置された劣化判定センサから得られる“環境データ”の3種類のデータから、絶縁物の劣化度の指標である表面抵抗率算出モデルを構築した(図2)。これによって、絶縁物の劣化度を簡易に推定可能になり、新品データと診断時での表面抵抗率推定値から得られる経年劣化直線から、余寿命を算出する。この章では、診断に用いるデータの詳細や、具体的な絶縁物の表面抵抗率算出手順、また診断の流れやその効果について述べる。

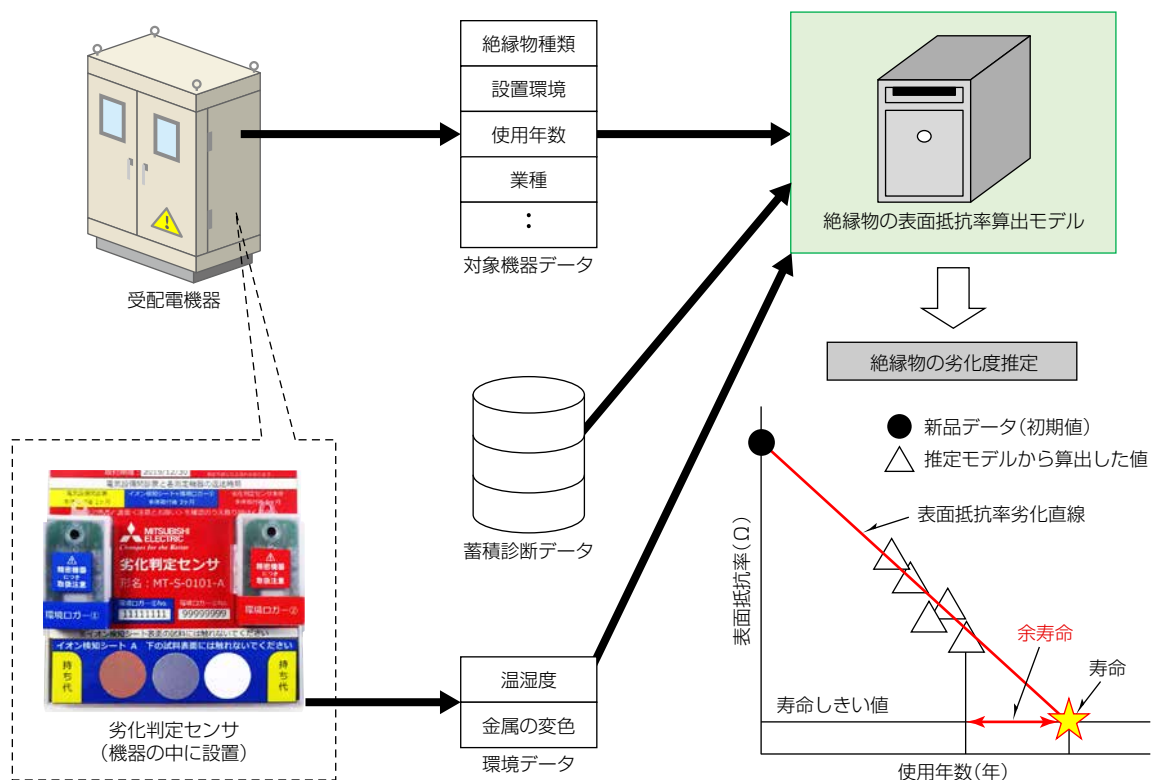


図2. 独自開発の診断システム概要

2.1 診断に用いるデータ

2.1.1 対象機器データ

絶縁物種類(ポリエステル絶縁物、エポキシ絶縁物、フェノール絶縁物等)、設置環境、使用年数、業種等のユーザーの機器使用状況に関するデータであり、診断開始時に顧客に回答してもらう“電気設備問診票”から取得する。

2.1.2 蓄積診断データ

2003年から蓄積してきた従来診断の3,000件以上の診断結果をまとめたデータである。例えば、機器使用年数と表面抵抗率(平均値)の関係や、各業種でのイオン付着速度等がある(図3、図4)。図3から、どの絶縁物も使用年数と表面抵抗率には相関があり、ポリエステル絶縁物の表面抵抗率の低下が最も大きいことが分かる。また、図4から、絶縁物の劣化に影響を与えるイオン付着速度(量)は鉄道会社が最も多く、次いで火力発電所、金属会社と業種によって速度が異なることが分かる。

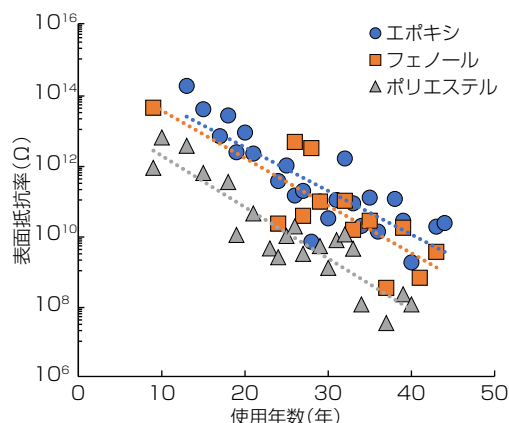


図3. 各絶縁物での使用年数と表面抵抗率(平均値)の関係

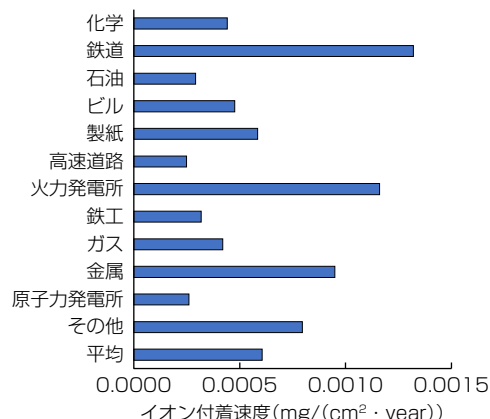


図4. 各業種でのイオン付着速度

2.1.3 環境データ

温度や湿度、大気中の酸性ガスは絶縁物の劣化に影響する。特に、湿度は絶縁物の表面抵抗率に及ぼす影響が大きく、低湿領域と高湿領域で表面抵抗率の値が4桁以上異なる場合がある(図5)。開発した劣化判定センサでは、環境ロガーから温湿度を、イオン検知シートから大気環境に存在するイオン量を測定できる(図6)。環境データは、劣化判定センサをユーザーの診断対象設備に一定期間取り付けることによって取得する。

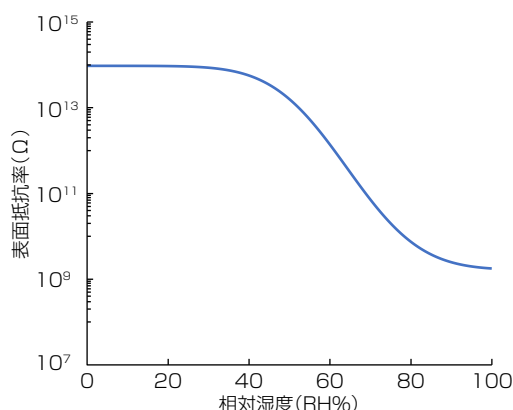


図5. 相対湿度と表面抵抗率の関係



図6. 受配電機器の診断に使用する劣化判定センサ

2.2 絶縁物の表面抵抗率算出モデル

絶縁物の表面抵抗率算出モデルは“データベース”と“表面抵抗率推定エンジン”から構成される(図7)。“データベース”には2.1節で述べたデータが保存されている。“表面抵抗率推定エンジン”には、従来診断で蓄積してきたデータ(絶縁物の種類、イオン付着速度、使用年数、温湿度等)と絶縁物の表面抵抗率の関係を解析することで作成した回帰式が格納されている。顧客の業種や対象機器の絶縁物の種類から、回帰式のパラメーターをデータベースから選定し、温湿度等の環境データを回帰式に入力することで診断対象絶縁物の表面抵抗率を算出する。

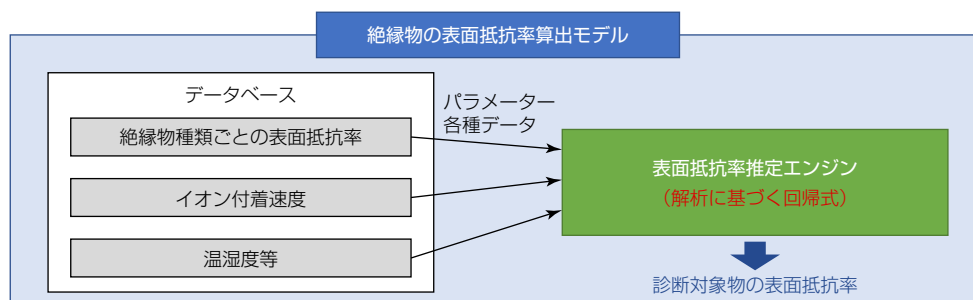


図7. 絶縁物の表面抵抗率算出モデルの構成

2.3 劣化判定センサを用いた診断の流れ

- 診断は劣化判定センサを用いて、次の手順で行う(図8)。
- (1) センサーキット(劣化判定センサ)を顧客に届ける。
 - (2) 顧客自身で診断対象機器内に劣化判定センサを設置する(例えば制御室などの非充電部)。
 - (3) 6か月間、診断対象機器内の環境データを測定し、測定完了後に劣化判定センサを当社に返送する。
 - (4) 独自開発の診断システムによって、劣化判定センサのデータとユーザーの機器使用データ(絶縁物の種類、使用年数等)を解析して診断を実施し、絶縁物の寿命・余寿命を算出する。

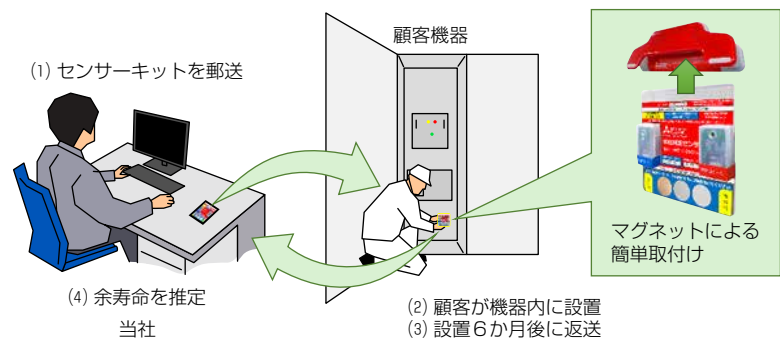


図8. 劣化判定センサを用いた診断方法

2.4 開発による効果

従来診断と劣化診断システムの診断精度をフィールドテストによって評価した結果、劣化診断システムの診断精度は従来診断±数年程度であり、同等の精度で診断できることを確認した(図9)。また、劣化診断システムでは、劣化判定センサの設置だけで診断が可能になるため、従来診断では必要であった、設備の電力停止が不要になった。これに加えて、専門技術者の派遣が不要になるため、低コスト(従来診断と比較すると約50%の診断コスト)での診断が可能になった(表1)。

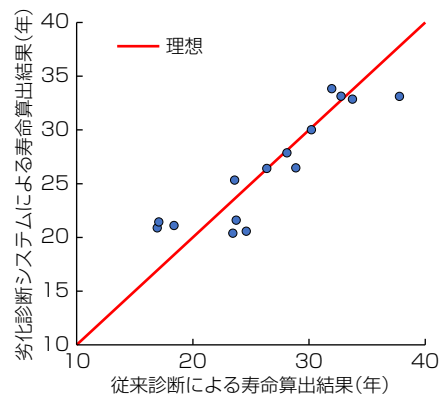


図9. 従来診断と劣化診断システムの診断精度評価結果

表1. 従来診断と劣化診断システムの対比表

	従来診断	劣化診断システム
設備電力停止	× (必要)	○ (不要)
技術者派遣	× (必要)	○ (不要)
診断コスト	△ (高)	○ (低：従来比約50%)

3. む す び

サーキュラーエコノミー実現のための技術開発事例として、受配電機器劣化診断システムについて述べた。この開発によって、受配電設備を持つ数多くの事業者にとって重要な課題である効率的な設備の運用に一層貢献できると考えている。今後は、更なる顧客の安心・安全な設備運用に向けた技術開発に取り組んでいく。

参 考 文 献

(1) 三木伸介, ほか: 受配電設備絶縁物の余寿命診断技術, 電気学会論文誌B, **127**, No.7, 863~869 (2007)
(2) 三木伸介, ほか: 受配電設備絶縁物の経年劣化に影響する要因, 電気学会論文誌A, **135**, No.1, 34~40 (2015)

電力用大型発電機の高効率化を実現する ナノコンポジット絶縁材料技術

馬淵貴裕*
Takahiro Mabuchi
梅本貴弘†
Takahiro Umemoto
武藤浩隆‡
Hirotaka Muto

森 翼‡
Tsubasa Mori

Nanocomposite Insulation Material Technology for Improving the Efficiency of Large Power Generators

*先端技術総合研究所
†同研究所(工博)
‡電力システム製作所

要 旨

脱炭素社会の実現に向けて、電力の安定供給とCO₂排出量削減の両立が求められている。この実現には、電力用大型発電機の高効率化が有効である。その達成手段の一つに、コイル絶縁材を高性能化することで薄肉化し、導体比率を高めて損失を低減する方法が挙げられる。

今回、NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)プロ“電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発”を活用し、耐電圧、絶縁寿命に優れるナノコンポジット絶縁材料を開発した。この開発で、耐電圧1.4倍、絶縁寿命30倍以上(従来比)の絶縁性能を達成した。

1. ま え が き

脱炭素社会の実現のため、風力や太陽光など再生可能エネルギーによる発電が拡大している。これらの発電方式は、気候や立地条件による出力変動が大きいことが課題である。そのため、電力需要に応じた出力調整が可能な火力発電やベースロード電源である原子力発電は、今後も一定のエネルギー需要があると予想される⁽¹⁾。これらの発電方式に用いるタービン発電機は、電力の安定供給とCO₂排出量削減の両立のため、更なる高効率化が求められている。それを実現するために、今回、耐電圧、絶縁材料に優れるナノコンポジット絶縁材料を開発した。

この論文では、開発材料の特長やその適用効果について述べる。

三菱電機の発電機事業は、これまでに2,100台以上の販売実績があり、世界の電力安定供給に貢献してきた(国内台数比：約50%)。また2015年に発売した高効率(99%以上)のタービン発電機“VP-Xシリーズ”(図1)は、燃料費低減、省スペース化、納期短縮を実現し、新興国を中心に新設や老朽化更新の受注を獲得している。



図1. 当社タービン発電機“VP-Xシリーズ”(～900MVA級)

2. タービン発電機の概要

火力発電所では、天然ガスや石油などの燃料を燃やしてタービンを回して、発電機を動かすことで発電している。図2にタービン発電機の構造を示す。タービン発電機は、電磁石である回転子が回転して固定子コイルに電気が発生する。固定子コイルは、鉄心の内周に配置され、コイル導体とそれを覆うコイル絶縁材から構成される。コイル絶縁材はコイル導体に流れる電気を鉄心と絶縁する重要部材で、マイカとガラス繊維等の補強材を貼り合わせたマイカ絶縁テープを、導体周囲に積層し、その間隙にエポキシ樹脂を含浸・加熱硬化して形成される。

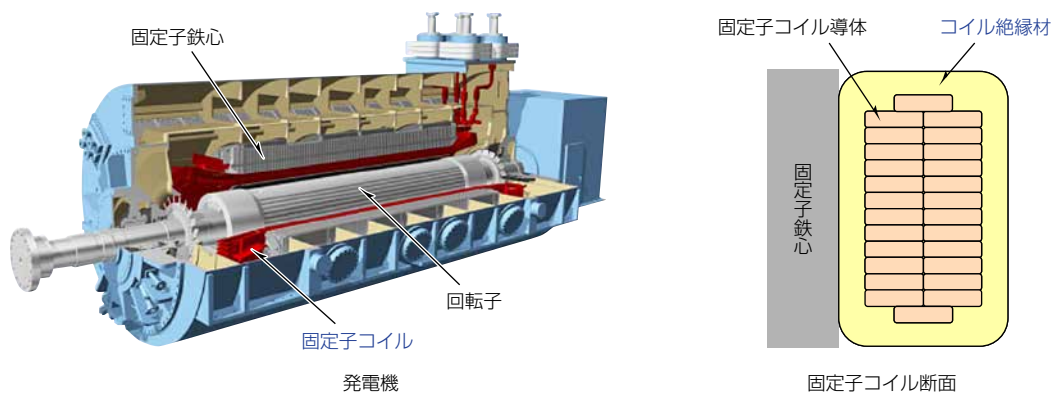


図2. タービン発電機の構造

3. タービン発電機の高効率化に向けた取組み

タービン発電機の更なる高効率化(目標値:全損失の5%低減)には、①コイル絶縁材を薄くしてコイルの導体比率を増やしてコイル導体に流れる電流によって発生するエネルギーロスを低減し、②コイル絶縁材の放熱性を高めて、コイルの温度上昇を抑えて、機器冷却に要するエネルギーを低減することが必要である。しかしコイル絶縁材を薄くした場合、絶縁性能が低下するため、発電機の寿命が短くなるという課題があった。

そこで今回の開発目標である全損失の5%低減を達成するためには、コイル絶縁材の耐電圧を1.3倍、絶縁寿命を20倍(従来比)向上させることが必要であった。

3.1 ナノコンポジット化コイル絶縁材の開発

絶縁性能向上の達成方法の一つにコイル絶縁材のナノコンポジット化がある⁽²⁾⁽³⁾。ナノコンポジットとは絶縁樹脂にナノフィラー(粒径100nm以下の無機粒子)を分散した樹脂材料である。これによって、ナノフィラーによる絶縁破壊の前駆現象(電気トリイ)の進展抑制が期待できる。これまでにナノコンポジット材料の開発事例としてナノフィラーの酸化マグネシウムを架橋ポリエチレンに複合化した電力ケーブルや、ナノクレイをエポキシ樹脂に複合化した開閉装置に関する報告がある。

今回、タービン発電機の固定子コイル絶縁材をナノコンポジット化して、絶縁性能の向上を目的に、産学連携して基礎評価から実機コイルによる適用検証に至る開発を行った。

3.1.1 樹脂へのナノフィラー分散手法の検討

ナノフィラーは、比表面積や表面エネルギーが大きいので、樹脂中で凝集しやすい性質がある。コイル絶縁材は、マイカ絶縁テープにエポキシ樹脂を含浸して形成するが、凝集した場合は樹脂の含浸性が低下し、絶縁欠陥になるボイドが生成される。そのためナノフィラーは、樹脂中で均一に分散している必要がある。そこでナノフィラーの表面改質と樹脂組成の改良による均一分散を検討した⁽⁴⁾。

ナノフィラーの表面改質では、各種シランカップリング剤やフィラー表面と結合する処理剤を検討して、それらを高速せん断処理装置で樹脂と混合し、加熱硬化処理後(120℃×2h+180℃×4h)の断面を電子顕微鏡で観察した。これに併せて、樹脂の組成検討としてフィラー表面改質に用いた成分との溶解性や反応性を持つ樹脂添加剤を調査し、その種類や添加量の検討を行った。

図3に開発前後でのナノフィラーを複合化したナノコンポジット樹脂の外観と断面を示す。開発前は樹脂が白濁しており、その断面ではナノフィラーの凝集体が確認される。このような凝集体は、絶縁テープを構成するマイカ粒子の空隙に含浸されにくいと考えられる。一方、開発後の表面改質フィラーと、その改質成分との反応性を持つ添加剤を配合した樹脂を組み合わせた場合は、樹脂は透明化し、またその断面ではナノフィラーが均一分散した状態を確認した。これはフィラーの表面処理と添加剤との化学的な親和性によって凝集が解消されたためと推定する。

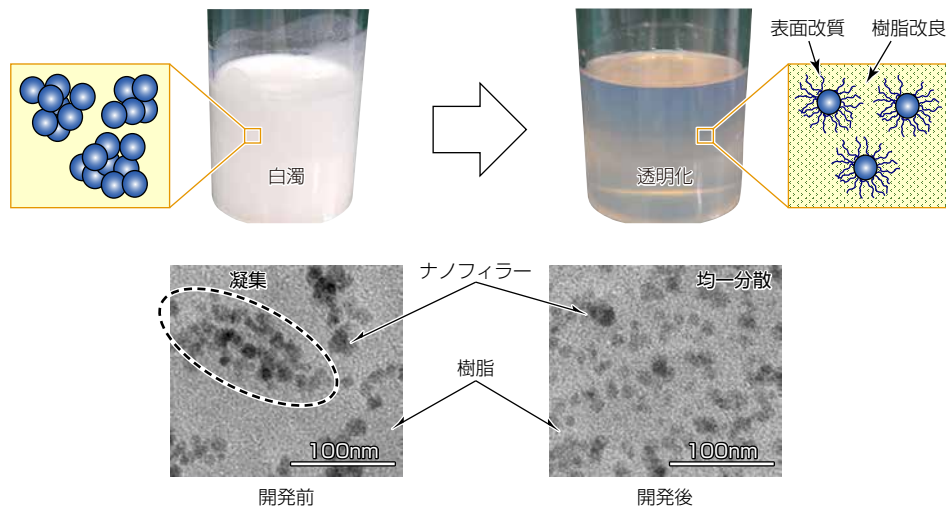


図3. 開発前後のナノコンポジット樹脂の外観と断面

また開発前後のナノコンポジット樹脂を長期間静置した場合、開発前は経時的にナノフィラーが容器底部に沈殿するのに対して、開発後は沈殿なく安定して1年以上分散状態を維持することを確認した。これらの性状から開発したナノコンポジット樹脂は、大型発電機の固定子コイルの製造プロセスに適した分散性、保管安定性を持つことを確認した。

3.1.2 実機固定子コイルを用いたナノコンポジット樹脂の含浸性検証

3.1.1項で開発したナノコンポジット樹脂のマイカ絶縁テープへの含浸性を検証するため、実機固定子コイルを用いて、実際の製造プロセスと同条件で真空加圧含浸処理を行った。コイルは、銅平角素線を束ねた導体周囲に、マイカ絶縁テープを厚さ約3mmになるまで繰り返し巻き付けたものを用いた。比較のためナノフィラーを含まない従来のエポキシ樹脂を用いてこれと同じプロセスでコイルを作製した。なおこの検証では、ナノコンポジットのフィラー性状を各種の電気基礎特性を反映し適宜調整した。図4に作製したコイル外観とコイル絶縁材の断面を示す。

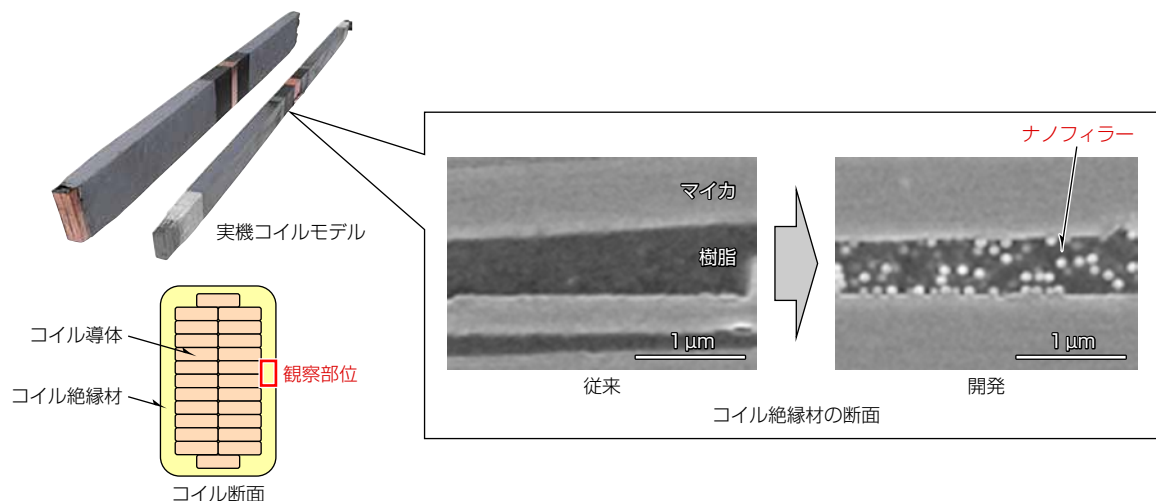


図4. 実機コイル絶縁材の外観と断面

コイル絶縁材のマイカ粒子間を拡大観察したとき、開発品ではナノフィラーがマイカ粒子の隙間に含浸され、凝集体を含まない均一分散状態であることを確認した。またコイル絶縁材中に、樹脂が含浸していないボイド欠陥がないことを断面観察や電気的特性評価(誘電正接、放電特性)から確認した。

これらの結果から、ナノフィラーが均一分散したナノコンポジット化コイル絶縁材を得た。

3.2 ナノコンポジット化コイル絶縁材の絶縁性能

開発したナノコンポジット化コイル絶縁材の絶縁性能を評価するため、実機固定子コイルモデルで長期課電寿命を検証した。検証では3水準の印加電圧を設定し、数十～1,000時間レベルで絶縁破壊が起こるまでの時間(寿命)をそれぞれ測定した。各電圧で得た寿命結果の整理から、ナノコンポジット化コイル絶縁材は、ナノフィラーを含まない従来のコイル絶縁材と比較し、特に低電圧水準で長寿命化する傾向があり、実機運転電圧付近では30倍以上の寿命向上が見込まれることを確認した。また実用想定使用年数で、ナノコンポジット化によって約1.4倍の高耐電圧効果を確認し、コイル絶縁材のナノコンポジット化によって今回の開発目標の絶縁性能向上を達成した(図5)。この要因は、絶縁破壊に至るまでの電気トリーの観察から、絶縁破壊のツリー状進展をナノフィラーの遮蔽効果等によって抑制したためと考えられる。

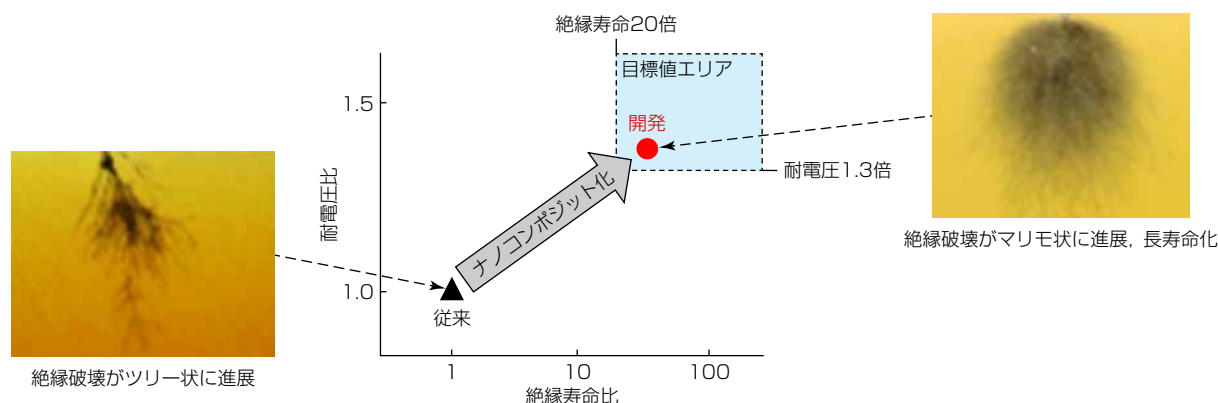


図5. ナノコンポジット化によるコイル絶縁材の性能向上

4. む す び

コイル絶縁材のナノコンポジット化によって、耐電圧1.4倍、絶縁寿命30倍以上(従来比)の絶縁性能を達成した。これによって現状の絶縁性能を維持しながらコイル絶縁材を薄肉化でき、全損失の5%低減を達成し、高効率化できるめどを得た。今回の開発成果を実機適用することで、発電時の燃料を削減し、電力1GW当たり1,000トン/年のCO₂排出量を削減できる見込みである。今後、ナノコンポジットを適用したタービン発電機の製品化開発を進めるとともに、高効率化による脱炭素化、燃料削減効果を顧客にアピールし、新設や既設機更新需要の獲得を目指す。

この研究の一部は、NEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラム(電力機器用革新的機能性絶縁材料の技術開発, JPNP12004)の一環として実施した。

参 考 文 献

- (1) 資源エネルギー庁：2030年に向けた今後の再エネ政策（2021）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/community/dl/05_01.pdf
- (2) Tanaka, T., et al.: Advances in nanodielectric materials over the past 50 years, IEEE EIM, **29**, No.1, 10～23 (2013)
- (3) Ohki, Y.: Development of XLPE-insulated cable for high-voltage dc submarine transmission line (1), IEEE EIM, **29**, No.4, 65～67 (2013)
- (4) Mabuchi, T., et al.: Electrical Insulation Properties of Nanocomposite Epoxy Resin and Application to Mica Insulation, Proc. IEEE ICD, 241～244 (2020)

三菱電機株式会社