

## TODAY



## レア金属の リサイクル技術の開発

東京大学 副学長・教授  
岡部 徹

学部学生のときから、チタンをはじめとするレア金属の製錬やリサイクル技術の開発に関する研究を続けてきた。レア金属の研究歴はすでに30年を超えた。海外を含めても、これほど長く、同じテーマに取り組んできた研究者はきわめて珍しい存在であろう。

15年前までは、チタンの製錬やレア金属のリサイクルの研究に没頭していると周囲に語っても、ほとんどの人が興味を示さず、またその将来性や重要性を理解して貰えなかった。しかし、最近では、「レア金属のリサイクルの研究に取り組んでいる」と話すと、研究の中身を語らなくても、「良い研究をしていますね」と、反応される時代となった。まさに、隔世の感がある。

レア金属のリサイクルの研究については、実に様々な課題に取り組んできた。高性能磁石に不可欠なネオジムなどの希土類金属（レアアース）のリサイクルの研究は、誰もが注目していなかった東北大の助手の時代から取り組んでいた。それが幸いして、尖閣諸島問題に端を発した2010年の中国によるレアアース禁輸騒動の後には、その重要性や意義が一般社会からも認められるようになり、後にたくさんの学術賞をいただくことができた。

タンタルコンデンサからのタンタルのリサイクルに関する一連の研究も、先駆的な取り組みであると自負していたが、取り組んだ時期が早すぎ、当時は誰からも評価されなかった。

最近では、工業製品のスクラップに含まれる金や白金族金属などのリサイクルを中心とする環境調和型技術の開発に取り組んでいる。この研究も筆者が東大に赴任したころは、「なんでそんなマイナーな金属のリサイクルの研究をしているの?」と多くの人から怪訝にみられていた。ところが、近年は、米国の材料系の雑誌の最優秀論文賞を授与されたり、Plenary Lecture(基調講演)に招待されるなど、海外からも高く評価されている。

チタンの“アップグレードリサイクル”という新たな試みも行っている。私の夢は、現在、商業利用され

ている製錬法(クロール法)で作られるバージンのチタンよりも、スクラップを処理して製造したチタンの方が、純度が高くなるという革新的なアップグレードリサイクル技術を開発することである。

日本はチタンスクラップの多くを海外に輸出しているが、将来は、この技術開発が成功して、逆に、海外からスクラップを輸入し、スクラップから直接、高品質なチタンを製造して輸出する時代が到来するものと期待している。

貴金属やレア金属の精錬に関しては、日本が世界のトップランナーであることを、ほとんどの一般人は知らない。また、貴金属を含むスクラップを日本が海外から多量に輸入し、高い精錬技術によって富を生み出していることも、一般には知られていない。日本の産業界が誇る非鉄精錬技術と環境技術の極めて高いレベルについては、学会や業界内に留めず、広く一般社会、さらには海外に向けて、さらに強くアピールすべきであろう。

誰もが注目していない頃から様々なレア金属の製錬やリサイクルの研究を延々と続けてきた結果、最近では、海外から貴金属やレア金属のリサイクルに関する特別講演や寄稿の依頼が多く寄せられるようになった。レア金属の研究成果が時代の脚光を浴びるのは、研究者としては光栄なことである。しかし、最近、私は大学の幹部として管理職の仕事もしているので、研究時間を確保できないのが、悩みの種である。

かつて、もっとも出来が悪い学生の一人であった私が、レア金属の研究に取り組むようになったのは偶然であり、学生時代の恩師の影響でもある。レア金属に巡り合い、それがライフワークとなったのは、素晴らしい人々との出会いのお蔭であり、今では「レア金属人脈」の大切さを痛感している。

これからも、新たな研究展開を目指し、日本が世界をリードしている非鉄冶金・特殊金属製錬の学問を一層発展させて、レア金属製錬やリサイクルの研究成果を少しでも社会に役立てるべく、夢とロマンをもって努力していきたい。この場をお借りして、今後とも皆様方のご支援とご指導をお願いする次第である。

## 参考文献:

岡部 徹: "未来材料: チタン・レア金属の研究の夢とロマン", JRCM News(財団法人 金属系材料研究開発センター), 平成23年(2011)2月, No. 292(2011) p.1.

# NEDO 委託事業 IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト／ 超効率データ抽出機能を有する学習型スマートセンシングシステムの 研究開発」(2016～2020年度実施)の成果概要

技術研究組合 NMEMS 技術研究機構  
研究企画部 部長 逆水 登志夫

## はじめに

一般財団法人マイクロマシンセンター及び技術研究組合 NMEMS 技術研究機構は、1991 年に開始された国家プロジェクトを皮切りに、90 年代のマイクロマシン、2000 年代の MEMS、そして 2010 年代の IoT センシングシステムとこれまで大小 20 ほどの研究開発プロジェクトの推進に携わってきた。現時点では IoT 横断技術として今回取り上げる「学習型スマートセンシングシステム」、及び超微量センシングとして 2 プロジェクトを推進しており、引き続き IoT/CPS 社会の構築、ひいてはソサエティ 5.0 の実現に向けて尽力をしていくこととしている。

## 1. 目的と概要

さて、我が国の社会課題の一つである少子高齢化に伴う労働力不足は喫緊の課題であり、我が国産業の競争力強化のためには、IoT や人工知能などを活用した「生産性革命」が必要である<sup>[1]</sup>。IoT を活用した生産効率向上では、各種機器の稼働状態や、工場内の製品の流動状態や品質、作業者の作業状況などの現場情報をセンサにより数値化し、クラウドで収集・分析を行い、経営のための有価情報としてフィードバックが可能となる。しかしながら、現在、工場内で数値化されている現場情報は、一部の機器の稼働状況などに留まっていることから、工場全体の情報収集が求められている。

工場全体をセンシングできるシステムの普及には、下記の課題を解決する必要がある。

- 種類 / 型式の異なる設備状態を把握するにはシステムの個別開発、センサ毎の個別調整と実験の繰り返しによるアルゴリズム検証が必須となる。
- 有線センサの設置 / 配線工事やセンサ維持管理コストが高く、広域への多数設置は困難である。
- 無線センサ（電池内蔵）の場合、現状のセンサや送信技術では電力消費が大きく、電池交換のメンテナンスが半年・1 年単位で必要となる。
- 現場の状況変化・異常を検知するには、温湿度・振動以外に人間の五感に相応するセンサが必要となる。

そこで、本研究開発では、工場等の設備の稼働状況や生産品質を把握するセンシングシ

ステムの普及を目指して、「超低消費電力（200μW 以下）のスマートセンサ（ガス、赤外線アレー）の開発」、「設備の微小振動で連続的な高出力（500μW）可能な自立電源の開発」、及び「スマートセンシングフロントエンド (SFE) 回路\*の開発」により、コンセントレータから動的センシング制御可能な無給電センサ端末（スマートセンサ端末）を実現し、それらのスマートセンサ端末から超効率に有用データ抽出を行える「学習型スマートコンセントレータの開発」との連携により、環境発電で収集可能な有価情報量を従来の 100 倍以上に向上するシステムの開発を目指し、2016 年度から 2020 年度までの計画で、試作と実証実験を進めている（図 1）。本稿では、これまでの成果の一部について紹介する。

\* SFE 回路：コンセントレータからの無線指示でセンサ測定パラメータを変更可能にする回路

## 2. 研究開発内容及び成果

### ① 学習型スマートセンシングシステムの開発

従来のセンシングシステムでは、複数のセンサ情報をコンセントレータへ一旦集約し、クラウドで分析・管理を行うものが多く、この場合、センサは設定された間隔で情報を送信するため、例えば設備の停止時など、必要でないデータも送信してしまう。

500μW の環境発電（振動、光、熱ハイブリッド発電）+無線センサで取得する有価情報を、従来比で 100 倍以上とする、学習型スマートセンシングシステム実現には、複数のスマートセンサを、コンセントレータを

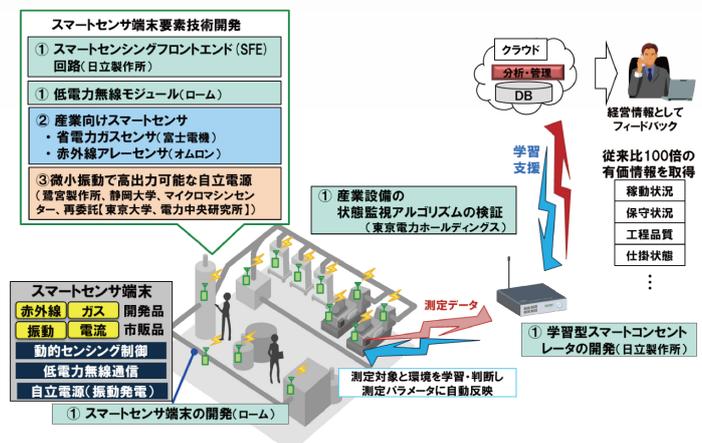


図 1 本研究開発の概要と役割分担

介して連携させることで、設備の稼働状況を把握し、必要なタイミングで必要なデータのみを厳選して取り出せるシステムを構築することが重要となる。そのため、学習型スマートコンセントレータには、多様な機器・設備等のセンシング方法・センサパラメータを自動で調整し、有価情報だけを自動で抽出可能にするアルゴリズムの開発と実装を行った（図2）。

開発したアルゴリズムを実装したコンセントレータを用いて、産業設備を模擬した実験用のロボットアームの音と電流の計測から、稼働状態を可視化できる有価情報の自動抽出を行った。その結果、コンセントレータは、電流と音を比較して関連性の高い周波数成分を探索し、その周波数成分のみを測定するようにスマートセンサ端末の測定パラメータの自動調整を行い、ロボットアームの動作モードを分離可能なことを確認した。この際、学習前後における単位時間当たりのデータ量を比較した結果、有価情報は約200倍に増加することが分かった（図3）。

### ②産業分野を対象としたスマートセンサの開発

工場内の情報を得るためのセンサとしては、人間の五感に相当するセンサ及び各設備のエネルギー消費状況を収集する電流センサが不可欠となる。人間の五感に相当するセンサとしては、画像センサ、マイクروفオン、温度センサ、赤外線アレー（温度分布）、ガスセンサ（臭い）、振動センサが必要となる。このうち、携帯情報機器に搭載されている画像、マイク、温度、振動センサは低消費電力化・小型化・高性能化が進んでおり市販品を活用することが可能である。さらに、電流センサについても「社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト」で開発した自己給電型無線クランプセンサを活用することができる<sup>[2]</sup>。

そこで、産業用スマートセンサとして、小型・低消費電力のガス及び赤外線アレーセンサの開発を行った。本稿では、赤外線アレーセンサを使った温度監視システムについて紹介する。赤外線アレーセンサについては、上記プロジェクト<sup>[3]</sup>でオフィス空間の温度範囲で温度分布を取得できるセンサを開発した。本研究開発では、工場の低温・高温設備を監視するため測定温度範囲を広げ（0~100℃）、環境発電でも現場の遠隔監視に対応できるように、温度計測の画素選択機能（1~256画素）、温度分解能・測定頻度変更機能の開発を行った。

開発した温度監視システムを用いて、産業設備を模擬したモータの自動計測と学習効果の確認を行った。①と同様に学習型コンセ

ントレータは、赤外線アレーセンサの画素データから3個のモータの高温領域を探索し、高音部だけの画素データだけを計測・無線送信するように、赤外線アレーセンサ端末を自動調整することを確認した（図4）。

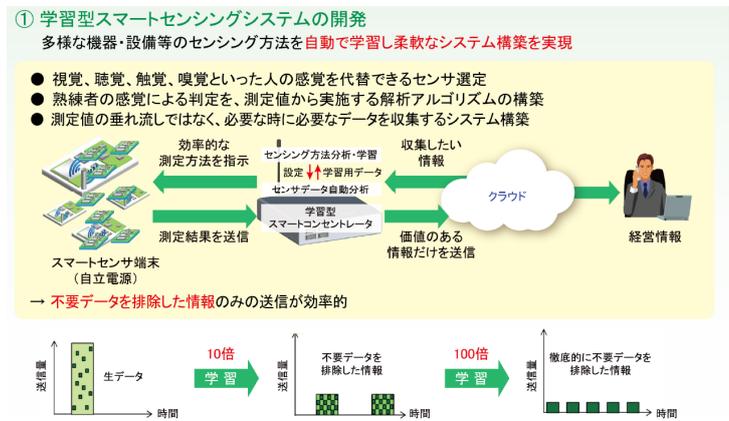


図2 学習型スマートセンシングシステムの開発概要

- 環境発電を使った電池不要の無線センサ端末でロボットアームの稼働状態を見る化しています。
- 音センサと電流センサのデータを収集し、関連性の高い成分を自動で探索し、測定に反映します。これにより、設備の稼働状態に関係する成分のみを測定し、効率的に情報を取得します。

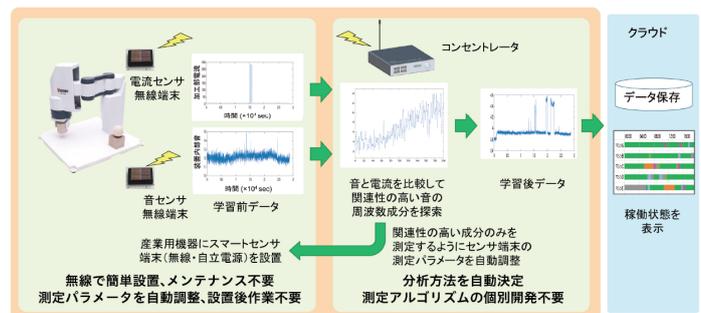


図3 学習型スマートセンシングシステムの実証実験  
（産業設備を模擬した実験用のロボットアームの稼働状態の見える化）

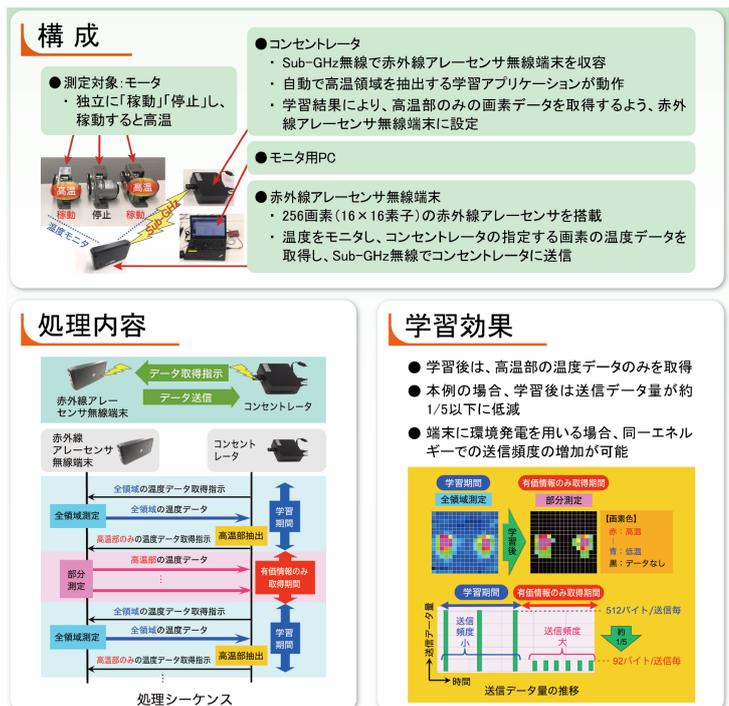


図4 赤外線アレーセンサを使った温度監視システムの実証実験

本システムの計測では、学習後に送信データ量を1/5に低減でき、送信頻度は、全領域計測だと120秒間隔となるところを、部分測定であれば10秒間隔に増加させることができることから12倍に増加する結果が得られた。送信データの削減と送信頻度の増加で有価情報量としては60倍となり、さらに、発電エネルギーの余力に応じて温度分解能の増加(同一画素の温度平均回数の増加)させることにより、微小温度差の検出も可能となることから、有価情報量を100倍以上にできると考えている。

### ③工場内の振動で高出力可能なMEMS振動発電デバイスの開発

産業用の自立電源としては、長期間メンテナンスフリー(設備の精密点検サイクルである5年程度)とするため、現場で得られる環境エネルギー源に合わせ、例えば野外の太陽光や工場内の照明光、ポンプ・モータ等の振動、蒸気・温水配管から出る廃熱を用い、場合によってはそれらを組み合わせて安定的に発電・蓄電するハイブリッドの自立電源が必要となる。このハイブリッド自立電源の出力としては、スマートセンサの駆動、センサ端末でのデータ処理・無線通信、さらにコンセントレータから動的センシングを可能にするSFE回路を起動させるために、500 $\mu$ Wを目標値とした。

上記の環境エネルギーを変換する素子として、光・熱発電素子は、電子機器・再生可能エネルギーとして開発・製品化が進んでおり市販品を活用することが可能である。本研究開発では、産業分野において想定される微小外部振動の周波数(50Hz~100Hz)、加速度(0.15G)(G=重力加速度)から500 $\mu$ W出力を得るため、MEMSエレクトレット発電素子、真空パッケージ、発電した電流を整流・蓄電する回路、広帯域化機構等の開発を行った。試作した振動発電デバイス(MEMSデバイスサイズ:2.1cm x 2.1cm、真空パッケージ:3.1cm x 3.1cm)は、100 Hz、0.15 Gにおいて、500 $\mu$ W以上の出力が得られることを確認した。

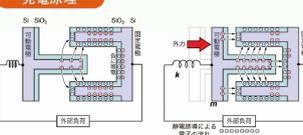
### 3. まとめ

本研究開発は、残る2019年度と20年度の1年数か月間となり、これまで行ってきたユーザヒアリング(加工組立、プラント、食品製造等)やアドバイザー委員(IoTシステムベンダー、ビル管理システム、交通インフラ、小売電力事業者、石油コンビナート)の

**開発のポイント**

- MEMS+エレクトレットで、高効率にエネルギー変換
- 真空パッケージ、専用処理回路

**発電原理**



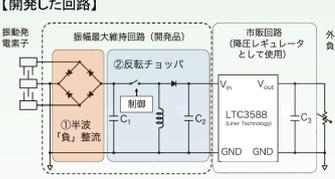
SiO<sub>2</sub>膜中に固定された $\ominus$ (エレクトレット)により静電誘導電流が得られる。

**本プロジェクトのデバイス構成**

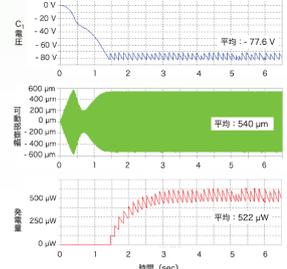
- MEMSエレクトレット発電素子 + おもり
- 真空パッケージ
- 専用処理回路
- 広帯域機構、極低周波発電機構

**これまでの成果**

100Hz、0.15G(実効値)の振動から500 $\mu$ Wの発電をして、無線センサ端末を駆動します。そのためにパッケージ、回路も含めて開発しました。



**【開発した回路】**



**【発電の様子】**

図5 MEMS振動発電デバイスの開発

意見を踏まえ、実証現場とセンシング対象設備を選定し、学習型スマートセンシングシステムで稼働状態の把握や日常保守点検作業のセンシング化を行えるかの検証を進めるとともに、プロジェクト参画企業、アドバイザー委員企業と連携して事業化を推進していくこととしている。

開発概要や研究開発成果は下記ホームページで紹介しているので、是非ご参照願いたい。

<http://lbss.la.coocan.jp/index.html>

### 【参考文献】

- (1) 内閣府 日本経済再生本部:「日本再興戦略」改訂2015 - 未来への投資・生産性革命 -
- (2) 「社会課題対応センサーシステム開発プロジェクト」事後評価分科会(2015年9月)、資料7事業原簿(公開)、[http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu\\_bunkakai\\_27h\\_jigo\\_5\\_1.html](http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_27h_jigo_5_1.html)

### 【謝辞】

本研究は、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)の委託業務の結果得られたものです。

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第399号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM総務企画部までお寄せください。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2020年1月1日  
 発行人 小紫正樹  
 発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター  
 〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階  
 TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285  
 ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>  
 E-mail [jrcm@oak.ocn.ne.jp](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)