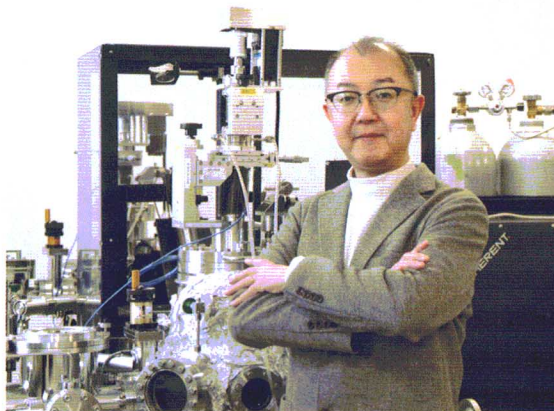


全固体熱スイッチが低温廃熱を操る

北海道大学 電子科学研究所

太田 裕道 氏

電気の流れを精緻かつ高度に制御することで生み出された電界効果トランジスタをはじめとする電子デバイスは、人類の社会を大きく変えてきた。同様に、あらゆる方向に拡散する熱の流れを電気のように制御することで、これまで利用が難しかった低温の未利用熱の新たな活用方法が見出されるかもしれない。20年以上にわたり熱電材料の研究に取り組んできた太田氏は、2022年に世界で初めて全固体熱スイッチを開発し、低温の未利用熱を再利用する新たな可能性を切り開いた。



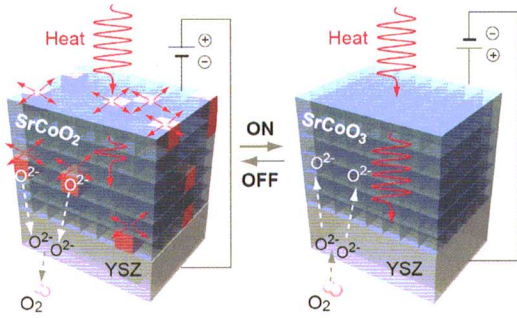
安心・安全な熱電変換材料を探し出せ

産業や日常生活で発生する熱の多くは、有効活用されないまま環境中に放出されている。実際、一次エネルギーの約3分の2が未利用の廃熱として失われているのが現状だ。特に100～300℃の比較的低温の熱は、再利用が難しいとされている。この課題を解決するために、太田氏は熱電変換技術を用いたアプローチを試みた。熱電変換技術とは、物質の物理的性質を利用し、熱を電気に変換するゼーベック効果や、電気を熱に変換するペルチェ効果を活用する技術の総称である。これまで、ビスマス(Bi)、アンチモン(Sb)、鉛(Pb)などの重金属と、第16族元素(硫黄(S)、セレン(Se)、テルル(Te))を組み合わせた Bi_2Te_3 、 Sb_2Te_3 、 PbTe などが、高効率な熱電材料として知られている。例えば PbTe は、400℃において熱電変換効率の指標であるZT値が0.7に達し、特殊用途では実用化されている。しかし、大規模な普及には至っていない。主な理由は、TeやSeといった熱的・化学的に不安定で、希少性が高く、毒性のある原料が使用されているためである。そこで、太田氏は熱的・化学的

に安定で、毒性のない金属酸化物に着目して研究を進めた。2020年には、 $\text{Ba}_{1/3}\text{CoO}_2$ が酸化物の中で世界最高のZT値を示すことを発見し、その再現性も確認した。ZT値は600℃の空気中で0.55を記録したが、実用しようという動きはなかった。すでに米国や中国の研究グループがZT値2を超える熱電材料を発表している中で、0.55では到底競争できないと悟ったからだ。

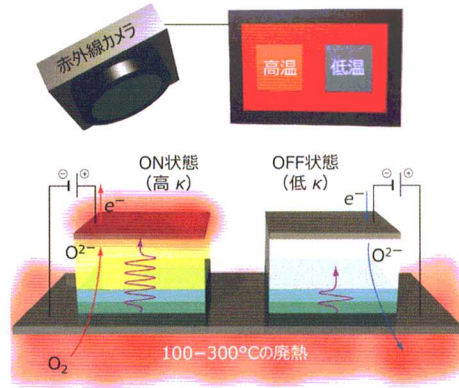
身近なガラス磨き粉材料で作られた、電気で熱を操る「熱スイッチ」

これまでの研究では、廃熱を電気に変換することを目的としていた。しかし、500℃を超える高温廃熱は比較的効率よく変換できる一方、100～300℃の低温廃熱の変換効率は極めて低い。そこで、廃熱を電気に変換するのではなく、そのまま「熱」として利用しやすい形で熱の流れを電気的なスイッチON/OFFで制御できないか考えた。こうして生まれたのが「熱スイッチ」である。太田氏が開発した熱スイッチは、電気を流すことで熱スイッチ材料の熱伝導率を変化させ、熱流をON/OFFできる仕組みになっている。従来、電界・



(図1) 全固体電気化学熱スイッチの動作図

作動温度で電流を流すことにより、酸化/還元反応が起こり、熱伝導率が切り替わる。



(図2) 熱ディスプレイイメージ

廃熱によって加熱された基板の上に熱スイッチをドット状に多数配置して、熱スイッチのON/OFFを制御することで、通常のディスプレイのように温度の濃淡情報で画像情報を作成できる。

磁力・引張り・光による相変化を利用した熱流の制御技術が提案されていたが、太田氏は金属酸化物の酸化・還元状態を電氣的に切り替える電気化学的手法に着目した。2014年に初めて報告された電気化学的熱スイッチは電解液を使用しており、液漏れが実用化の障害となっていた。そこで、2022年に太田氏は、固体電解質を用いた全固体熱スイッチを開発した。具体的には、活性層にコバルト酸ストロンチウム (SrCoO_x , $2 \leq x \leq 3$)、固体電解質にはイットリア安定化ジルコニア (YSZ) を使用し、半導体製造技術であるパルスレーザー堆積法とスパッタリング法を駆使して積層させた。さらに、2025年には、希少なコバルト (Co) を使用せず、ガラスの研磨材 (うろこ取り) としても使われる安価な酸化セリウム (CeO_2) を用いた熱スイッチを開発。このスイッチは100回以上の繰り返し動作が可能で、再現性も確認されている。空気中で280°Cに加熱して通電することで酸化/還元反応が起こり、切り替えが起こる (図1)。熱伝導率は、ON状態で12.5 (W/mK)、OFF状態で2.2 (W/mK) を達成した。約6倍も熱の通りやすさが変わるのである。例えるならば熱の伝わりにくい石英ガラス (1.9 W/mK) から、熱の伝わりやすい水晶 (9.3 W/mK) に、電気を流すだけで、電気化学的に切り替えられる技術といえる。現在の主な課題は、変化に30秒程度時間かかるのでその応答性の向上と、作動温度を現在の280°Cから物質中の酸素が電気化学的に移動できる限界と予想されている200°Cでの低温動作を実現することだ。

熱をピクセルレベルで操り、新たな通信技術へ

半導体製造技術で作製が可能な熱スイッチは、どのような場面で活用できるのだろうか。比較的低い温度で熱の移動をON/OFFできる特性を活かし、熱を曲げて移動させることを目指している。また、ピクセル単位での配置が可能なることから、「熱ディスプレイ」 (図2) という新しい概念を提案し、装置間の情報伝達分野での実用化を目指している。廃熱によって加熱された基板の上に熱スイッチをドット状に多数配置して、熱スイッチのON/OFFを制御することで、温度の濃淡情報を作る。それを赤外線カメラを通じて、人には感知されない状態で、機械どうしが視覚的に情報通信を行うといった使い方を想定している。「温度が高すぎて人間が作業できない工場内では高温用のロボットが作業を行う。温度が高すぎるため液晶ディスプレイや有機ELディスプレイは設置できないが、熱ディスプレイならば設置できる。ロボットに赤外線カメラ機能が備わっていれば、情報の伝達ができる。」と太田氏は期待している。また、マイクロ流路の温度制御や、パンの焼き目のデコレーションなど、応用範囲は多岐にわたる。熱をピクセル単位で制御できる技術はこれまでになく、多様な分野での応用が期待されている。将来的には、低温 (100~300°C) の廃熱も当たり前のように制御・利用できるようになり、「廃熱」という概念そのものがなくなる時代が来るかもしれない。今後の太田氏の研究から目が離せない。

(文・橋本 光平)