

特集2

バイオガスによる燃料電池発電でベトナムのエビ養殖を持続可能に

しらとり ゆうすけ
白鳥 祐介

九州大学 水素エネルギー国際研究センター
大学院工学研究院 准教授
2014年よりSATREPS研究代表者

やまかわ たけお
山川 武夫

九州大学 大学院農学研究院 准教授

著しい経済成長を続けるベトナムの主要産業の1つが養殖水産業で、特にエビの養殖が盛んだ。その一方で、有機性廃棄物による環境汚染が問題となっている。この廃棄物から発生するバイオガスにより燃料電池で発電し、養殖池の環境管理に利用するシステムの開発に挑むのが、九州大学水素エネルギー国際研究センターの白鳥祐介准教授の研究チームだ。ベトナムでの実証試験も開始し、エネルギーの地産地消による持続可能な養殖技術の実現を目指す。

養殖の廃棄物を利用して発電 一石二鳥で地域の問題を解決

ベトナム沿岸部ではエビの養殖が盛んで、世界各国に輸出されている。ベトナムの経済を支える輸出品目の1つで、養殖に適したメコンデルタを中心に養殖業への投資も増えている。その一方で指摘されるのが、養殖方法の問題だ。

ベトナムでは、マングローブ林を切り開いてエビの養殖池が造られることが多い。ここで行われているのは集約型と呼ばれる養殖で、狭い養殖池に数多くの稚エビを放し、大量の餌を投入して育てる(図1)。このため、エビの排泄物や脱皮した抜け殻、餌の食べ残しといった有機性廃棄物がヘドロとなって養殖池に堆積して水質が悪化する。

水質悪化によりエビを育てられなくなると、養殖池を放棄し、マングローブを



■図1 ベトナムではエビの養殖が盛んだが、集約型と呼ばれる方法は、環境汚染やマングローブ伐採といった環境問題を引き起こしている。



伐採して新たな池を造るので、沿岸の生態系がどんどん破壊されていく。さらに養殖池のヘドロは適切に処理されることがなく、そのまま自然環境に排出されることが多く、周辺の河川の富栄養化も問題になっていた。

環境汚染を引き起こす有機性廃棄物を有効活用する。この課題に挑んだのが、九州大学水素エネルギー国際研究センターの白鳥祐介准教授が率いる研

究チームだ。現地の大学研究機関と連携し、有機性廃棄物から得られた電力を利用する地産地消のエネルギーシステムを開発し、ベトナム南部のベンチェ省の養殖場で実証試験を進めている(図2)。

燃料電池を研究している白鳥さんは、2008年頃からメタンと二酸化炭素から成るバイオガスを燃料電池発電に利用する技術の開発を始めた。この研究について講演するためにベトナムに赴いた



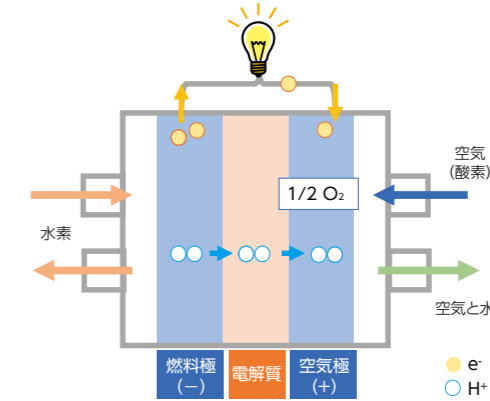
■図2 ベトナム南部、メコン川下流のメコンデルタに位置するベンチェ省。淡水と海水が混じり合う汽水域で、エビの養殖に適している。

際、現地のエビ養殖池で有機性廃棄物が蓄積して問題になっていることを知った。白鳥さんは当時をこう振り返る。「ベトナム国家大学ホーチミン市校ナノテク研究所のダン・マウ・チェン教授からエビ養殖の課題を聞き、養殖ヘドロをメタン発酵させ、得られたバイオガスを燃料電池に供給し発電すれば、有機性廃棄物の処理に加え、エネルギーの安定供給という一石二鳥を狙えると思いつきました。これをきっかけに話が進み、チェン先生がベトナム側の代表、私が日本側の代表としてSATREPSに採択されました」。

高温作動の燃料電池で 効率はガスエンジンの約3倍

ベトナムの農村部では、家畜の糞尿から作られたバイオガスが調理用コンロの熱源やガスエンジン発電機の燃料として利用されている。しかし、バイオガスを燃やして利用するガスエンジンの場合は、燃料の化学エネルギーを、熱エネルギー、運動エネルギーと変換してから発電するので、各段階で損失が生じる。数キロワットの小型発電機の場合、発電効率は20パーセント程度と低くなってしまふ。

一方、「燃料電池では燃料を燃やすことなく、直接発電するので50~60パーセントという高い発電効率が期待できま



■図3 水素イオン伝導体を電解質として用いた燃料電池の発電原理。水素を酸素と電気化学的に反応させて、水と電気エネルギーを発生させる。乾電池や二次電池と異なり、燃料を供給する限り発電し続け、蓄電はしない。SOFCでは、電解質として酸素イオン伝導体を用いる。

すし、二酸化炭素の排出を抑えられます」と白鳥さんは話す。

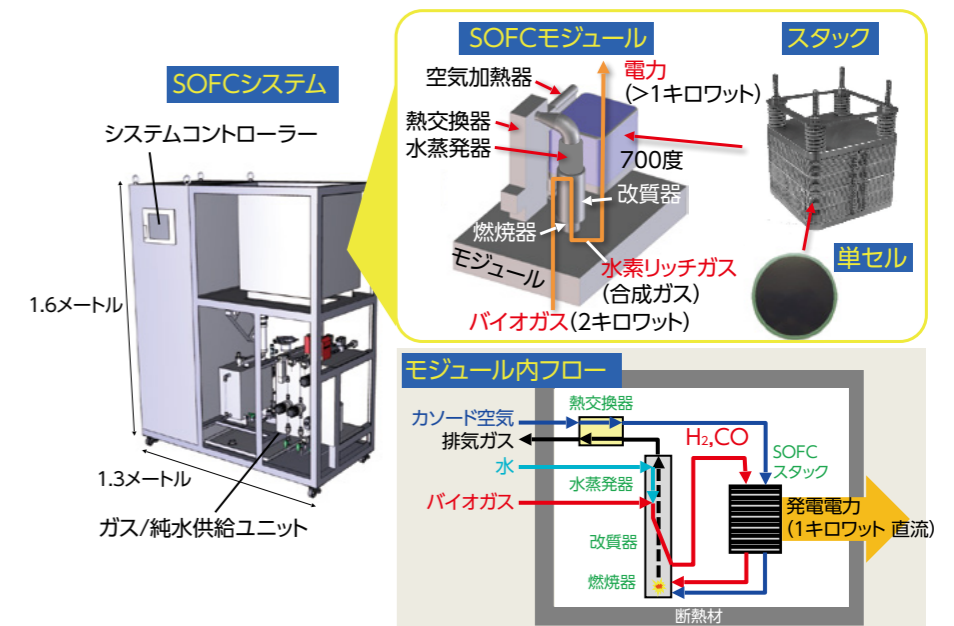
燃料電池は一般に、燃料として水素を供給して酸素と電気化学的に反応させることで電気を生み出している(図3)。白鳥さんが研究する固体酸化物形燃料電池(SOFC)も基本原理は同じだが、作動温度が700度付近と高く、メタンなどの炭化水素燃料から水素を作り出す改質反応を電池のそばで起こすことができる。このため、燃料は純粋な水素である必要がなく、炭化水素をモジュール(セルスタック部と燃料を改質する水素製造部の複合体)に直接供給して電力に

変換できる。しかし、SOFCをバイオガスの直接供給で動作させる場合には課題があった。

有機性廃棄物から発生したバイオガスには、都市ガスとは異なり、バイオマス由来の多量の二酸化炭素と数百~数千ppm(百万分率)の硫化水素など不純物が含まれている。しかし、二酸化炭素自体は燃料にはならないし、硫化水素は改質反応や発電反応を阻害する。さらに、モジュール内で発生するすすも抑えなければならない。

地球規模の低炭素化に貢献できるよう、バイオガスSOFCを途上国農村部や僻地に広めていくことが白鳥さんの目標で、このために遠隔操作が可能でシンプルなシステム構成でありながら、上記の課題を解決するバイオガスSOFCシステムを企業と連携して開発した(図4)。

燃料にならない二酸化炭素はメタンと反応させて水素を作り出すのに積極的に利用し、硫化水素は化学反応と物理吸着による2段階の脱硫を採用して除去する。さらに、バイオガスに水蒸気を加えて加湿し、すすの発生を抑える。水蒸気が多すぎると発電効率の低下につながるため、熱力学平衡計算により、すすが発生しない最小限の加湿量を求め、これをシステムの自動制御プログラムに組み込んだ。また、インターネット上に仮想的な専用線(VPN)を構築しセキュリ



■図4 SATREPSにおいて企業と共同で開発したバイオガスSOFCシステム。1キロワットの発電が可能。

ティーを確保した上で、自動制御プログラムの遠隔操作を可能にした。こうして、必要な機能を実装したシステムを実現したのだ。

**気候に合った土着の菌を活用
現地の気温でバイオガス製造**

バイオガスSOFCシステムの開発に加えて取り組んだのが、メコンデルタ現地の有機性廃棄物から、より効率良く安定してバイオガスを作り出す技術で、九州大学大学院農学研究院の山川武夫准教授が担当している。「バイオガス発電の高効率化だけではなく、メタン発酵技術を改良し、より効率良くバイオガスを作り出すことで、システム全体の効率を向上できます」と山川さん。

メタン発酵の効率を高めるには、優れた性質を持つメタン生成菌を使うことが早道だ。菌を単離し、優れた性質を持つ菌を選び出すこともできるが、山川さんは「土着の菌」を使うことにこだわった。その理由を「エビ養殖場の設備を考えると厳密な培養環境の制御は難しく、現地の気候に適応している菌の方が使いやすいでしょう。また、微生物の生育には複数の種の相互作用が重要ですから、単離した菌よりも、現地に分布している細菌集団を利用するのが良いと考えたのです」と説明する。

メタン発酵の最適温度は中温発酵が37度、高温発酵が55度とされる。日本

と比べて温暖なベトナムであっても加温が必要でエネルギーを消費することになるが、山川さんは養殖池を訪れた際に見た養殖ヘドロの貯留池に着目した。現地の気温で自然にガスが発生していたことから、そこにメタン生成菌が生育しているはずだと考え、その菌を利用することにしたのだ。加温せずに活発に働くため、効率的にバイオガスを生産できる。

効率良く発酵させるには、発酵槽内の水素イオン濃度(pH)を中性付近に安定させることも求められる。この調整についても、ベトナムで入手できる生石灰や炭酸カルシウムをpH値に応じて投入するだけにした。現在は、メタン生成菌の供給源である養殖池ヘドロに加え、周辺の農地から出る稲わら、ココナッツやサトウキビの搾りかすもメタン発酵槽に投入し、簡単な操作でバイオガスを安定して生産している。

養殖池は素掘り、当初は養殖池の水を抜いて底にたまったヘドロをバケツリレーでくみ出していたという。しかし、現在は養殖池全体を止水シートで覆って、池の中央に掘った穴からポンプを使って簡便にヘドロを回収できるようになっている(図5)。「現地の皆さんが私たちの取り組みを理解してくれたおかげです」と白鳥さんは笑顔を見せる。メタン発酵の原料が得られるだけでなく、池の環境改善によりエビ養殖の持続性が格段に向上すると期待される。

**東南アジア初のSOFC実証試験
環境に優しく生産性も向上**

2018年1月には、ベンチエ省ビンダイ地区のエビ養殖場を実証サイトとして、開発したバイオガスSOFCシステムの実証機を設置した(図6、7)。東南アジアでは初の試みだという。生産したバイオガスを燃料電池による発電に利用し、得られた電力を使って養殖池への酸素供給(曝気)装置を動かす。

バイオガスSOFC発電の寄与率を上げるために、曝気装置の省電力化にも取り組んだ。水面から空気を送り込む従来のジェット式曝気装置は電力消費が大きいため、半数を微細な気泡で池の底層から酸素を供給するマイクロバブルディフューザーに置き換えたのだ。これにより、電力消費を25パーセント低減できた。

また、生産性向上に向けた工夫として、ヘドロを含む養殖池の水をろ過し、透過水で稚エビを飼育することも試みた。ふ化後数週間のエビは弱い、きれいな透過水で育てることによって生存率が大幅に向上したという。

さらに、メタン発酵後に排出される消化液をもみ殻と混合して炭化し、肥料として農業に活用する研究を、ベトナムのカントー大学の研究者と連携して進めている。こうして、エネルギー循環だけでなく地域の物質循環モデルも確立しつつある(図7)。

「バイオガス発電においては、62.5

パーセントという世界最高レベルの発電効率を実現しました。地域内エネルギー循環システムのモデルを開発・実証するという1つの目標は達成できたと自負しています」と白鳥さんが語るように、実証試験は順調に進んでいる。

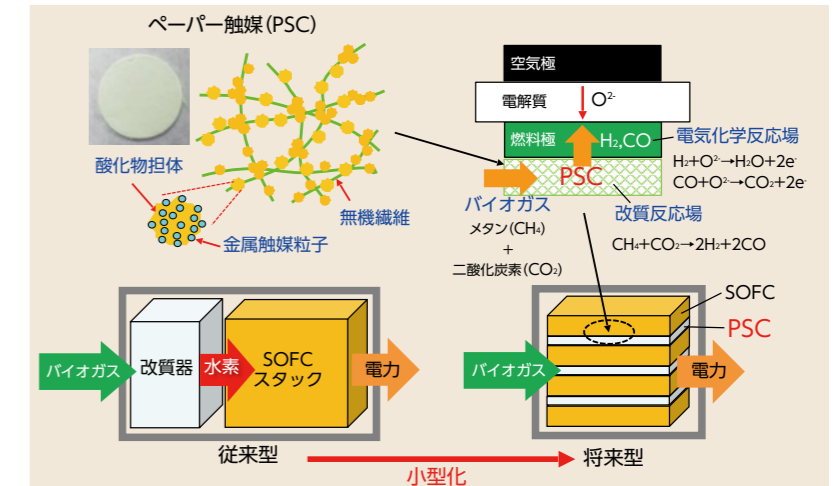
**新触媒でさらなる性能向上
地球規模の普及を目指す**

バイオガスSOFCシステムの開発は着実に進んでいるが、SOFCのさらなる性能向上と小型化が見込めると、白鳥さんは考えている。

現在、開発に取り組んでいる「ペーパー触媒」は、セラミックスでできた無機繊維を紙状に成形して、そこにバイオガスから水素を製造する触媒粒子を分散させたもの(図8)。この技術を使えば、改質機能を燃料極反応場と一体化させ、改質器をSOFCスタック内部に押し込めることができる。モジュールの大幅な簡素化につながるのだ。

これまで、ハイドロタルサイトを分散させた硫黄被毒に強いペーパー触媒、セリアとジルコニアの固溶体を分散させたすずを生じさせないペーパー触媒を開発している(図9)。さらに、ベトナム国家大学ホーチミン市校ナノテク研究所と共同で表面積の大きい花びら状のセリア微粒子を合成し、これを分散させたペーパー触媒によりさらなる性能向上にも取り組んでいる(図10)。

「まだ単セルの段階ですが、ペーパー触媒をSOFCに積層させることで、改質器なしでも発電できるようになりました



■ 図8 (左上)ペーパー触媒(PSC)の外観と模式図。(右上)PSCを適用した燃料極反応場。明確に分離された電気化学反応場と改質反応場が一体化されている。(左下)従来型のSOFCモジュール。(右下)将来型のモジュール。PSCの適用により改質機能をスタック内部に押し込めることができ、小型化が可能。

た。ペーパー触媒とSOFCの積層体をスタックにする必要がありますが、5年後を目処に実用化したいと考えています。改質器と電池を一体化できるので、装置全体をさらに小型にできるでしょう」と白鳥さんは意気込む。

SATREPSのプロジェクトは最終年度を迎えているが、ベトナムとの連携が終わるわけではない。「ベトナムでシステムを稼働し、発展させるためには、なんと言っても教育が大切です。自ら課題を解決できる人材を育てたいのです」と話す白鳥さんは、人材育成にも力を入れてきた。ベトナムの大学での講義や実習、留学生の受け入れなどにも積極的で、18年にはベトナム国家大学ホーチミン市校と大学間学術交流協定を締結した。

研究期間中には毎年、ベトナムでのワークショップも開催してきた。山川さんが「ベトナムの方は意義や価値が納得

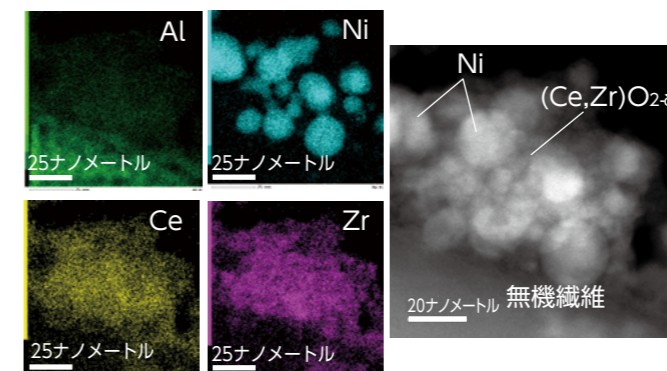
できると、動きが早い」と語るように、プロジェクトの遂行上、現地の行政や企業に活動の意義を知ってもらうことが重要だったからだ。このワークショップには地元のエビ養殖業者も参加し、意見交換の貴重な機会となった。

白鳥さんは今後の展望について「実証試験について多くの方が興味を持ってくださるのですが、ベトナム農村部の経済水準を考えると、すぐに導入するのは難しい。SATREPSで機能面は検証できましたから、実証試験を続け、より安価なシステムを目指します」と語る。

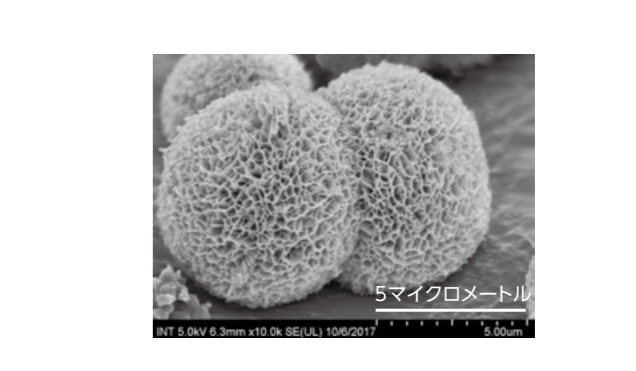
ベトナムで得られた知見は、他の地域や国にも適用可能で、有機性廃棄物を活用したエネルギー循環システムの構築に生かすことができる。地産地消のエネルギーシステムとして、地域が抱える環境問題やエネルギー問題の解決の糸口となるだろう。



■ 図5 ヘドロを回収する仕組み。池の中央に掘られた穴から、ポンプでヘドロをくみ出すことができる。
■ 図6 ベンチエ省ビンダイ地区に設置した実証用プラントでは、有機性廃棄物のメタン発酵、燃料電池による発電、養殖装置への電力供給、エビ養殖の環境管理までを実施している。
■ 図7 ベンチエ省ビンダイ地区のパイロットプラントでは、エネルギー循環と物質循環を実証レベルで研究している。



■ 図9 セリア(CeO₂)とジルコニア(ZrO₂)の固溶体を分散させたニッケル(Ni)担持ペーパー触媒内の触媒粒子



■ 図10 ペーパー触媒内部に分散させることを目的として合成した花びら状のセリア微粒子