

40

2023

創

Creative People

造

人

早稲田大学

創造理工学部・研究科

広報誌

Interview

CO<sub>2</sub>の直接的削減へ向けた技術開発へ  
機械工学を基軸に学際的に取り組む

総合機械工学科

中垣隆雄

教授

フィールド

エクセルギー、二酸化炭素分離回収

# Interview

創造人 ④〇 ————— Takao Nakagaki

## CO<sub>2</sub>の直接的削減へ向けた技術開発へ 機械工学を基軸に学際的に取り組む

日本を含む125か国が2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すと言っているが、「言うは易く行うは難し」である。さまざまな手段が提案され、総力戦の様相を呈しているなか、中垣隆雄教授が開発するのは、CO<sub>2</sub>を分離回収する機械だ。機械工学を基軸に化学、地学、エネルギーなどさまざまな分野に視野を広げ、本質的な解決策を求めて技術開発に取り組んでいる。

### 機械工学の視点から CO<sub>2</sub>削減にアプローチする

気候変動に対する危機感の高まりから、カーボンニュートラルの達成に向けた動きが世界的に加速している。カーボンニュートラルとは、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量を実質的にゼロにすることを目指すもので、日本も2050年までに達成することを世界へ向けて宣言している。温室効果ガス削減に向け、さまざまなアプローチがあるなかで、CO<sub>2</sub>の直接的な削減に取り組んでいるのが、総合機械工学科の中垣隆雄教授だ。

CO<sub>2</sub>削減と聞くと環境問題の課題で機械とは無縁だと思われる方も多いだろう。しかしながらCO<sub>2</sub>の液化、輸送、貯留、固定といった多くの過程では、さまざまな機械が用いられている。なかでも技

術開発が難しいのは、エネルギーや費用をできるだけかけずに排出ガスや大気中に薄く含まれるCO<sub>2</sub>を集めてくる「分離回収」の領域。気体中のCO<sub>2</sub>を効率よく集めるためには、相界面の熱物質輸送という、化学反応を利用したCO<sub>2</sub>の物理的な移動を用いる必要がある。相界面とは、ある均一な液体や固体の相が他の均一な相と接している境界。気体であるCO<sub>2</sub>の分離回収では、気液か気固の相界面になる。相界面は、内部の均質な状態と異なる特殊な場所なので、分子間の引力や電気的な力などが働いてさまざまな現象を引き起こす。ある特定の液体や固体を用いることで、CO<sub>2</sub>を含む気体との相界面でCO<sub>2</sub>を効率的に集めることが可能となる。

この現象を計測し、数学的なモデルに落とし込み、小型の機械を設計。そこから「相似則」に基づいて巨大な実物にまでスケールアップする。CO<sub>2</sub>分離回収の機械設計に欠かせないのが、この相界面の現象を活用した熱物質輸送である。中垣教授が基盤とするのは、「エクセルギー」の概念。これは「有効エネルギー」とも呼ばれ、簡単に言えば「使える」エネルギーを最大化するために、高効率なエネルギーの変換・利用を目指すもの。「CO<sub>2</sub>排出を減らしながらCO<sub>2</sub>分離回収をいかに効率よく行うかという難題に立ち向かう際の羅針盤となる」と中垣教授。研究室は「エクセルギー工学研究室」と名付けた。





## 地下貯留と固定化で直接的にCO<sub>2</sub>を削減

CO<sub>2</sub>の削減には、排出されるCO<sub>2</sub>を大気中に二度と放散させないことが求められる。大量に閉じ込めるには、地下への貯留が有効だ。地下貯留は、化石燃料からの急速な脱却が困難な工場や火力発電所などの排気ガスからCO<sub>2</sub>を回収・液化し、適した貯留層のある場所まで輸送して、地下に圧入・貯留する方法。日本政府は、2030年までに毎年600～1200万トンのCO<sub>2</sub>の地下貯留を開始するロードマップを策定している。CO<sub>2</sub>の分離回収にはアミンという吸収液を用いるが、それを繰り返し用いるための加熱機器や排気ガスを送り込む設備などで追加のエネルギーが必要となる。そこで、それらを極限まで削って実質的なCO<sub>2</sub>削減量を減らさない技術開発に取り組んでいる。

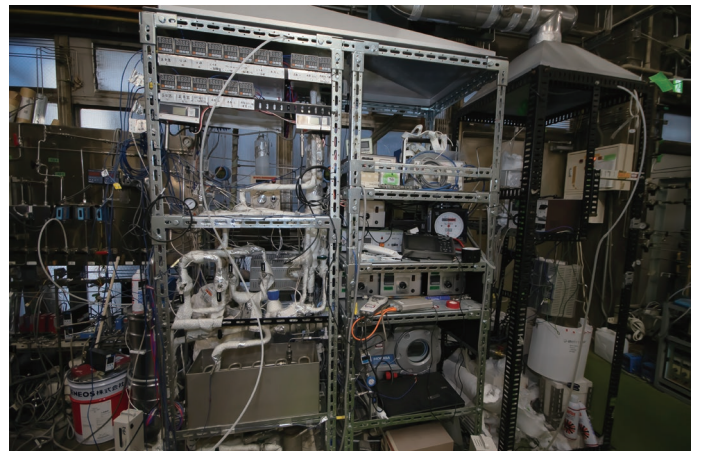
しかし年間1000万トン地下貯蔵したとしても、2020年度の総排出量11.5億トンの1%にも満たない。

そこで中垣教授は、「ネガティブエミッション技術」と呼ばれるCO<sub>2</sub>の固定化技術の開発にも取り組んでいる。この技術には大きく分けて2種類の方法があるが、その1つが海水を利用する方法だ。海水中には、多くのマグネシウムが含まれており、特殊な方法で酸化マグネシウムとして抽出してCO<sub>2</sub>と結びつけることで炭酸マグネシウムを生成して固定化する。こうしてできた物質は、壁面材や天井材として建築材料への活用のほか、ブロックや道路の側溝などのコンクリート材としても利用可能だ。この技術はすでに要素技術は開発済みで、国家プロジェクトとして広島県大崎上島にある石炭ガス化発電所のCO<sub>2</sub>と現地の海水を用いた大型の実証設備を建設中である。

もう1つの方法が岩石の風化を人為的に加速する「風化促進」。天然の岩石には、マグネシウムやカルシウムなど、CO<sub>2</sub>を吸収できる鉱物を豊富に含む苦鉄質岩がある。日本は地震や火山が多いが、そのおかげでこれらの岩石が地表に露出しているところが多く点在している。これらを活用すれば、岩石中に炭酸塩としてCO<sub>2</sub>を閉じ込めることができる。この方法は、元々自然の作用としてCO<sub>2</sub>を吸収する機能が備わっているため、吸収のための追加のエネルギーを必要としない。岩石のまま吸収させるには千年・万年単位の長い歳月が必要だが、これを粉砕して細かくしたものを、加湿した空気と気固接触させることで、1年ほどに劇的に短縮することを狙っている。このような工業的な方法だと正味のCO<sub>2</sub>削減量を正確に直接計量できるので、減らした量を認証して取引する「CO<sub>2</sub>削減クレジット」として早期にビジネスにつなげやすい利点がある。

### 本質的な課題解決の手段を求めて

中垣教授が、CO<sub>2</sub>分離回収技術開発に取り組む背景には、本質的



中垣研究室で開発した機械の数々

な課題解決手段を提供したいという強い思いがある。カーボンニュートラル実現の努力が気候変動に対して意味のあるものにするには、この10～20年が勝負であり、この短い間にCO<sub>2</sub>の実質的な削減量を加速的に増やして行かねばならない。しかしながら、現実には厳しい。

その中心とも言える再生可能エネルギーは、設備投資のための資本不足や環境アセスメントの観点から、短期間で大量の導入は難しい。また、再生可能エネルギーは、天候や自然環境の影響に左右されるため、調整力となる電源が必要となる。しかし、調整力電源の主力である火力発電に用いる化石燃料は、海外からの輸入が必須で、世界情勢の影響を受けやすいだけでなく、CO<sub>2</sub>排出量自体が多い。

# Interview

創造人 ④〇 Takao Nakagaki

また、化石燃料に代わる水素やアンモニアなど新たな燃料にも期待が集まっているが、それら自体も再生可能エネルギーで作る必要があり、主役として流通するのはいつになるか不透明という状況だ。「CO<sub>2</sub>の削減方法はさまざまな手段がありますが、それら全てを活用する、いわば総力戦です。しかし、私たちが今の便利な暮らしを続ける限り、鉄鋼や化学産業、航空機の燃料、ゴミ焼却、食糧生産といった脱炭素困難なCO<sub>2</sub>の排出からは逃れられないのです」

そこで最後の手段として求められるのが、大気に放散されるCO<sub>2</sub>の直接的な削減だ。「2050年にカーボンニュートラルを達成するというスピード感に対して、エネルギーシステムの変革が追いつかないことが最大のリスクといえます。将来的には必要なくなるかもしれませんが、社会が変わろうとする過渡期においては、地下貯留や固定化といった実質的に減らす技術が欠かせないのです。CO<sub>2</sub>を質量のあるものとして物理的に扱うには機械工学が必要不可欠。機械

工学はいわば、システムというオーケストラの指揮者のようなものなのです」

従来の学問体系だけで解決策が見いだせない現代において、創造理工学部で注力するのが、学際的な教育だ。「機械工学は、乗り物や発電機などのように少しずつ改良を重ね、より速く、より大きく、より効率的にといった具合に、これまではその時代の技術の延長線上で発展してきた学問分野といえるでしょう。しかし社会が成熟し、価値観が多様化するなかで、これまでの学問体系だけでは解決策を導き出せる課題はそれほど残っていないのです」そうしたなか新しい解決策を生み出すためにも、別の学問領域との掛け合わせが重要だと中垣教授は指摘する。「なにかに軸足を置きながらも新たな領域に踏み出すことが求められます。私の場合は、機械工学を軸足に、化学や地学、エネルギーなどの分野と掛け合わせています。そうしないと新たな解決策は生み出せないのです」

## 技術開発の意義は社会実装することにある

機械工学研究の意義は、研究の種となるシーズをアウトプットして社会実装するところにあるという。しかし社会実装といっても簡単なことではない。機械を実装するためには、コストの制約のなかでどのように設計するか、どういった材料を使うかという一連の流れを、シームレスに設計する必要があると中垣教授は指摘する。

「例えば機械を構成する素材が入手困難であったり、使ったあとの処理に苦勞するようなものでは、実装は難しくなります。システムからコンポーネント、マテリアルを一気通貫で考えなければならない。マテリアルレベルで性能が倍になっても、システムの性能にはほとんど寄与せず、コストだけ高くなるだけなら意味がありません。システムからコンポーネント、さらにはマテリアル、またその逆の流れという2つの視点を行き来することが重要なのです」

学生たちへの指導では「木を見て森を見ず、になるような研究をしないように」と繰り返し口にする。それはシーズを基に社会実装まで俯瞰的に設計できる人材が足りない、という危機感によるものだ。技術開発したものの、本格普及でのコストで世界に追い抜かれるという事例も多く見受けられる。しかし同じ轍を踏むようではいけないというのが中垣教授のスタンスだ。「技術を開発する以上は、実装可能なシステムまで落とし込み、待ち受けるいくつもの死の谷を越えて世界に勝てるようにしなければいけません。そのためには、したたかにものごとを見ることのできる人材が求められます。それこそが日本の次の稼ぎ頭になっていくと思うのです」直接的なCO<sub>2</sub>削減は、カーボンニュートラルの実現を大きく左右する重要な取り組みだ。中垣教授の視線は、エネルギーシステムの過渡期を乗り切った先にある、日本の機械工学の未来までも見据えている。

