



地球を温暖化から救おう～CO₂の回収と利用～ —小出・太田口研究室～化学工学コース—



(右) 小出 耕造 教授

(左) 太田口 和久 助教授

産業革命以降、大気中の二酸化炭素の濃度が高くなり続けていることはみなさんも知っているだろう。今この瞬間にも莫大な量のCO₂が放出されている。CO₂による気温の上昇は、将来私たちの生活環境を大きく変えてしまうかもしれない。私たちの地球環境を守るためにも、CO₂を取り除く技術が必要となるのである。今回、大気中に排出されるCO₂を工場排気から取り除く方法、そしてCO₂の資源化についての研究を進めておられる、小出・太田口研究室を訪ねてみた。



工場排気からCO₂を回収しよう

CO₂の排出源をあげればきりが無い。発電所や工場、自動車などはもちろん、人間も呼吸することでCO₂を排出している。排出されたCO₂を取り除く方法は多様である。ここでモノ-エタノールアミン(以下MEA)を利用してCO₂を回収する方法である“MEAプロセス”を紹介しよう。これは化学工場で実際に使われている。

MEAプロセスは主に吸収塔、再生塔、熱交換器からなっている。これは、装置内にMEAを循環させ、連続的にCO₂を濃縮して回収しようとする方法である。その流れを並べてみると、以下のようになる(図1)。

- ①MEA溶液を常温で操作されている吸収塔の上部から流し込む。下部から工場排気を送り込む。
- ②MEAは常温では酸性気体を吸収する性質があるので、CO₂を吸収塔内で吸収する。CO₂が除去された工場排気は、吸収塔の上部から装置の外へ出ていく。
- ③CO₂を吸収したMEAは熱交換器(高温の物質から、低温の物質へと熱を移すための装置)

を通過して加熱された後、再生塔に入る。

- ④再生塔は110℃～120℃で操作される。MEAは高温でCO₂を脱離する(離す)性質があるため、再生塔でCO₂を脱離する。CO₂はそのまま上部から出ていく。
- ⑤CO₂を脱離したMEAは、再生塔の下部から

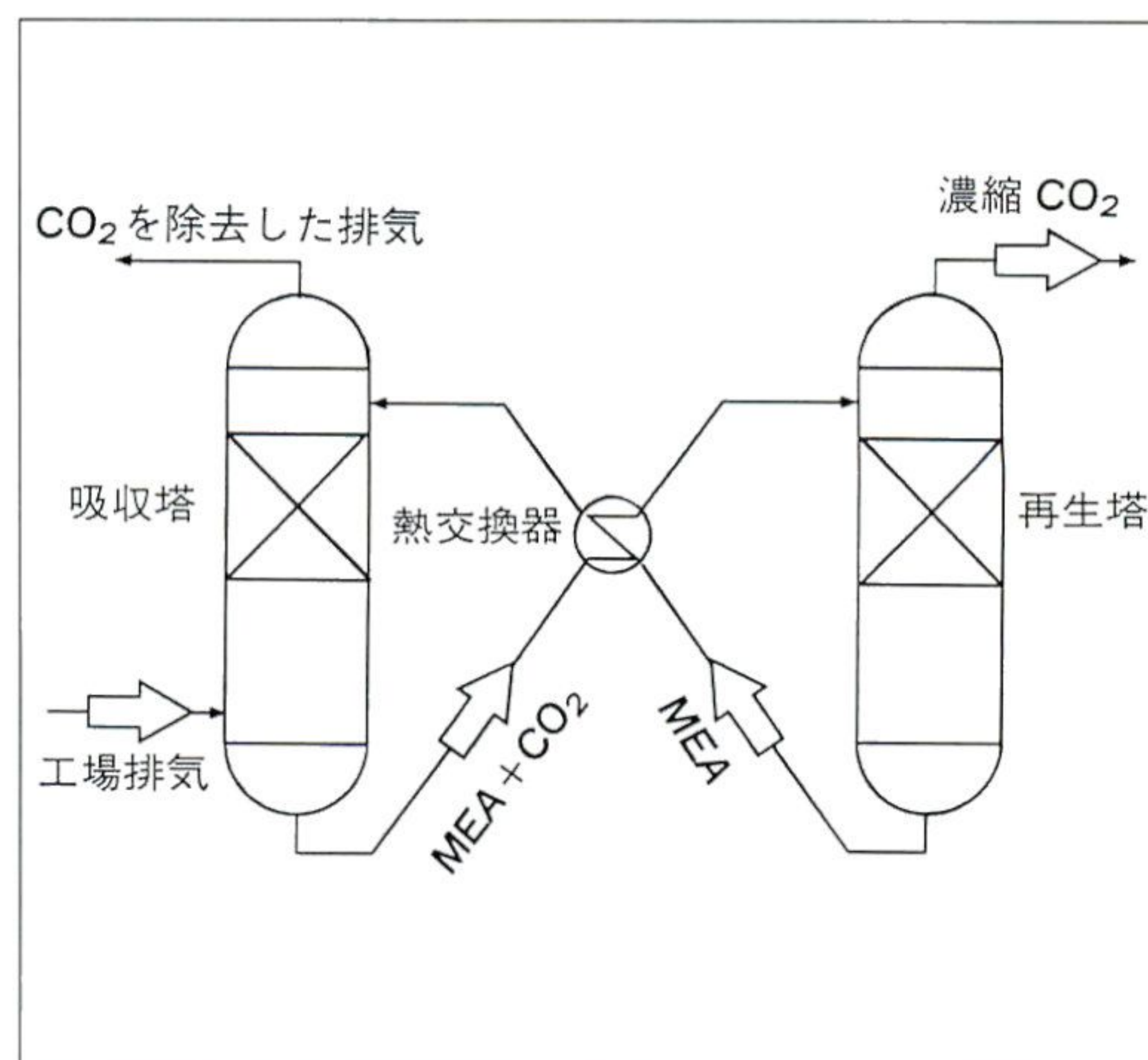


図1 MEA プロセス

出る。再び熱交換器を通してその温度を下げた後、吸収塔の上部に入る。→①へ
このように、吸収・脱離の過程が繰り返される。MEAプロセスにおいて、CO₂の濃度は④で取り出されたとき95～99%にまで濃縮されている。

MEAプロセスは次の2つの点で効率がよいと言える。1つはMEAを繰り返し何度も使うという点である。もう1つは、熱交換器を用いて常温のMEAと高温のMEAとの間で熱のやり取りを行い、熱のリサイクルもしているという点である。



大規模な排出源からのCO₂の回収

現在、CO₂を最も多く排出している所はどこだろうか。それは火力発電所だ。そこでは、CO₂を炭素の質量に換算して、1つの発電所につき1時間あたり900トンも排出している。日本中の発電所が排出するCO₂の総量は、日本における排出量全体の3分の1に相当するのだ。このCO₂を放出せずに回収することが、大気中のCO₂濃度をこれ以上高くしないために必要なのである。

火力発電所から排出されるCO₂を、工場排気から取り除くことを考えよう。量が量だけに生物を利用する方法など、既存の多くのCO₂を取り除く方法では歯が立たない。コスト面や敷地の問題など現実的に無理があるからだ。しかし、先ほど述べたMEAプロセスなら従来からのものを大型化することでCO₂を回収することが可能である。なぜなら、装置や運転にかかるコストが低く、組みやすい上に、大量処理にも向いているからだ。

MEAプロセスでは、MEAを何度も繰り返し利用すると述べた。ところが、長時間使用するとMEAのCO₂を吸収する能力が、劣化してきてしまう。装置を大型化すると、循環させるMEAの量も多くなる。劣化したMEAを取り出した後、足りなくなった分は補給すればよい。しかし、劣化したMEAは量が多いので、処理の方法が必要となるのである。

MEAは、構造式(図2)からも分かるように、C、O、H、N、といった生物の体を構成している主要な元素でできている。つまり、生物が自らの体をつくるためにMEAを消費する可能性があるのだ。そこで、先生方は生物を用いてMEAを分解するバイオリアクターを組もうと考えられた。バイ

オリアクターとは、生物を利用したシステムの総称である。生物の機能を利用しているため、環境汚染物質の排出量や消費するエネルギーの量を抑えながら、目的の物質を取り出せる。

文献を調べ、実験を行ったところ、MEAを分解する速度が他のどんな生物よりも速いのは大腸菌であることがわかった。MEAは、大腸菌がもつ酵素によってアンモニアとアセトアルデヒドに分解される。さらに、大腸菌がアンモニアを消費する。アセトアルデヒドは、そのまま取り出されて利用されたり、酸化されて酢酸として取り出されたりする。こうしてMEAを、有用物に変えることができた。

ここで問題となるのが3つ出てくる。第一に、大腸菌が育っていくにつれて、リアクター内のpHが下がって酸性になってくることがあげられる。大腸菌の増殖速度が最も速いのは、pH6.8程度である。酸性になって増殖速度が遅くなるということは、必然的にMEAの分解速度も落ちてくるということだ。そこで、アルカリ性であるMEAを送り込む量の調節を行い、MEAを中和剤としても利用することが提案されている。第二に、

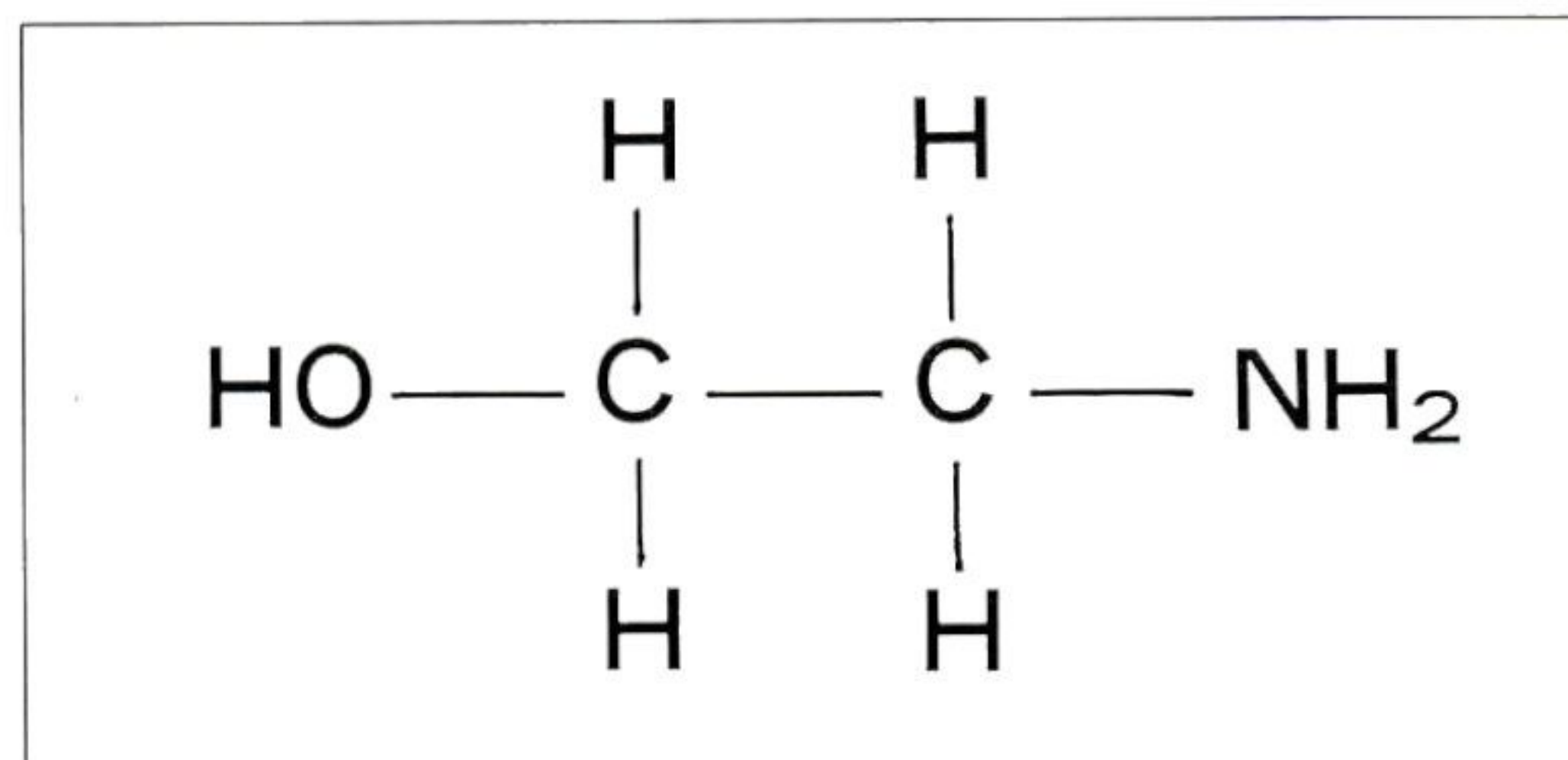


図2 モノ-エタノールアミン(MEA)

大腸菌を育てるための酸素を送り込む方法はどのようにするのか。これは現在研究中である。第三に、リアクター内で増えた大腸菌をどのように処理するのか。これについては、太陽光で乾燥させて飼料として利用することが考えられている。

この大腸菌を用いた MEA処理のためのバイオリアクターは現在、小出・太田口研究室で実用化に向けて実験室レベルでの研究が行われている。

ところで、回収された CO₂をその後有効利用

できないのかと疑問に思うかもしれない。だが火力発電所から排出される CO₂は、利用するにはあまりに膨大な量である。次に紹介するようなバイオリアクターによる CO₂の資源化も、行えないのが現状である。多量の CO₂を消費する市場があれば良いが、今のところは炭酸飲料市場くらいしかない。火力発電所から回収した CO₂をその後どう処理するのかについては、まだ模索している段階である。



光合成を利用してCO₂を資源化する

「CO₂を資源化することはできないだろうか」ということで、小出・太田口研究室ではバイオリアクターによる CO₂の資源化の研究が進められている。

光合成を行なう生物の機能を利用して、CO₂を別のものに変えようというわけである。光合成を行なう生物は様々だが、その中でも文献上 CO₂の消費量が最も大きいラン藻というバクテリアがある。ラン藻は、成長するための炭素をすべて CO₂に依存している生物であり、増殖速度が非常に速い。小出・太田口研究室では、このラン藻を利用した CO₂処理の方法を研究している。余談ではあるが、かつて地球の大気中に酸素がなかったころ現在のよう酸素を含む大気を作り出したのもラン藻であるといわれている。

そのラン藻を用いてバイオリアクターを組むためには、CO₂処理能力が最も高くなる操作条件を見つけなくてはならない。操作条件としては、光

の強度、反応装置内の温度、供給する工場排気中における CO₂の濃度があげられる。これらの操作条件の最適値は、小出・太田口研究室の研究により求められた。

次に問題になったのはラン藻の濃度である。装置内のラン藻の濃度を適度に高くしておいたほうが、CO₂を消費する効率が良くなる。ラン藻の濃度が低すぎると消費される CO₂の量も少ない。逆に、濃度が高すぎてもラン藻にとっての環境が悪くなってしまう。そこで、現在はラン藻濃度の最適値を出すことに重点をおいて研究が進められている。

光、温度、CO₂濃度についての効果的な操作条件が求められたので、次に CO₂を最終的に何に変換するかが問題となる。小出・太田口研究室では CO₂をエタノールに変える研究が行われている。その方法(図3)は、

① CO₂を6%程含む工場排気を、ラン藻の入っ

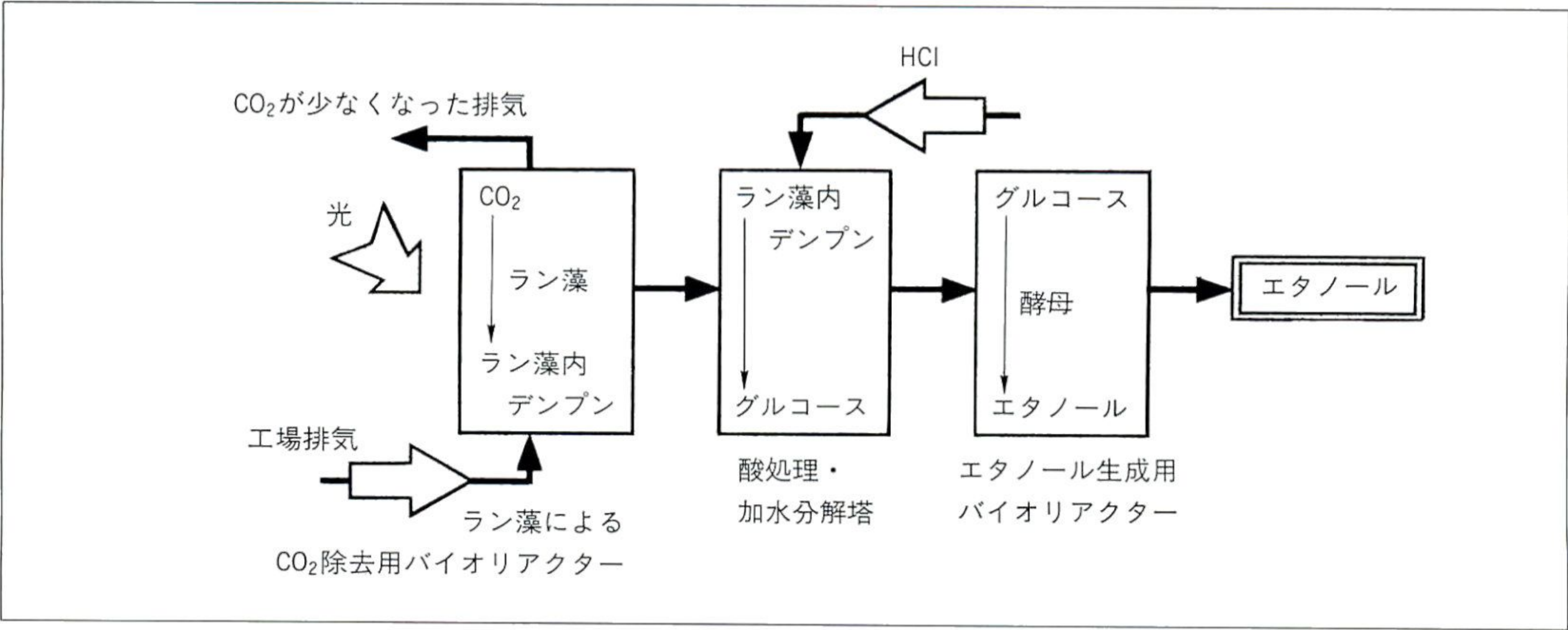


図3 CO₂をエタノールに変えるバイオリアクター

ている装置に供給する。光をあててラン藻に光合成を行わせ、その体内にデンプンを蓄積させる。

②ラン藻中のデンプンを酸処理によって細胞膜をこわして取り出す。

③デンプンを加水分解してグルコースに変換する。

④取り出したグルコースをサッカロマイセスサケという酒性酵母を用いてエタノールに変える。

という4段階の反応が軸になっている。

ところがサッカロマイセスサケは酸性溶液中やイオンが多く存在している溶液中では育たない。そのため酸処理後の酸性溶液を中和して、生成した塩類を取り除く過程を加えなくてはならない。この問題点は、はじめこの方法を考えた時点では思いもつかなかったことなのだそうである。

このバイオリアクターを用いてエタノールを生成することのメリットは、CO₂を資源化することだけではない。例えば従来から行われている農作物からエタノールを作る方法を考えてみよう。この場合、原料となる農作物（さとうきび、キャッサバ etc.）を育てたり収穫したりしなければなら



ないので、時間がかかるしエネルギーも消費する。そして何よりも問題となるのは、農業が関わるので天候にも左右されやすいことである。一方、このバイオリアクターならば、CO₂を送り込めば自動的にエタノールを作ってくれるうえ、時間もかからない。さらに、反応器であるので光さえあれば、どこでも作ることができる。工場内でラン藻を育てる方法さえ確立すれば、CO₂を除去できて、エタノールという有用物も得られる、一石二鳥のプロジェクトなのだ。

このCO₂をエタノールに変えるプロジェクトは、化学工場や清掃工場といった小～中規模な排出源からのCO₂処理は可能だそうだが、先ほども述べたように、火力発電所のような大規模な排出源からのCO₂の処理は無理なのである。



より効率よく、良い状態のものを

ここまで読んできた皆さんの中に、「化学工学なのにバイオリアクター？」と思った人はいないだろうか。化学工学は、様々な要因が複雑にからんだ現象のメカニズムをいかに単純化するかを研究することを得意とする分野である。小出・太田口研究室では、複雑な現象のメカニズムを解明する道具として生物の機能を用いている。複雑な現象に対して、生物の機能がどのような影響を与え、またどのような影響を受けるのかを調べる。そして、それを複雑な事柄を分かりやすくする手がかりにするのである。

また化学工学では、実験室での実験から実用化に向けて、より効率良く、良い状態のものを作り出すことを目的にしている。物を作り出す反応を考えることと、実際に作ることは違う。実際に作り出すにはどうしたらいいのかを検討していくことを、専門用語でフローシーティングという。フローシーティングを行うことで、それまで考えて

いなかった問題点というものが見えてくる。そうした過程を経て、私達の身の回りの物は製品となり出回っているのである。物を作る新しい方法を見つけ出し、実際に作り出す、そこに化学工学の面白さがあるのだ。



今回は、こちらの都合で太田口助教授にお話を伺いました。先生には、様々なお心づかいを頂き大変感謝しております。また、取材では環境保全の必要性を再認識することができました。最後に、お忙しい中快く取材に御協力いただいた小出・太田口研究室の皆様を重ねてお礼を申し上げます。

（福所　しのぶ）