

科学の 峰々

98

取材日：2018年10月18日
東京科学機器協会会議室

東北大学教授 公益社団法人 化学工学会 会長
あじり ただふみ

阿尻 雅文 先生に聞く 「超臨界工学」と 「化学工学のプロセスの視点」が モノづくり革新の実用化を進める（上）

聞き手：南 明則 日本科学機器協会 広報副委員長
西岡 光利 ク 幹 廣報委員
外嶋 友哉 ク 幹 廣報委員
梅垣 喜通 ク 幹 編集長
岡田 康弘 ク 幹 事務局長
(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)



阿尻 雅文 先生のプロフィール

昭和61年 東京大学大学院工学系研究科
化学エネルギー工学専門課程 博士過程修了(工学博士)
昭和61～62年 日本学術振興会 特別研究員(東京大学工学部)
昭和62年 東京大学工学部 化学工学科 助手
平成元年 東北大学工学部 生物化学工学科 助手
(平成3年 共同学術研究 研究員 カナダWaterloo大学)
平成3年 同大学 助教授
(平成8年 米国ハワイ大学およびDelaware大学へ留学)
平成14年 同大学 多元物質科学研究所 教授
平成19年 同大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授
平成29年 同大学 材料科学高等研究所(改組)教授

〈他加入団体〉

化学工学会(会長)、AIChE、日本化学会、
粉体工学会、ISHA(会長)、ISASF(副会長)、
IChemE fellow、日本学術会議会員、
日本工学アカデミー会員、
ヨーロッパ工学アカデミー会員



产学官との連携

**化学工学は、様々な学問や産業分野を束ねる
“オーケストラの指揮者”**

—東北大学教授の阿尻先生は、世界をリードする「超臨界の研究者」と「公益社団法人 化学工学会会長」と、2つの立場でご活躍されておられます。

まず先に「化学工学」のことから伺います。化学工学とはどんな学問なのでしょうか？

阿尻 “化学工学とは”を説明する時、私は恩師に教えられた例えをよく使います。化学プラントを作り上げるには、化学、電気、機械、土木などさまざまなものが必要ですが、そうした「さまざまな分野をまとめ上げるオーケストラの指揮者のような役割をするのが化学工学だ」と教えられました。

実際に化学工学が大きく寄与してきた事柄の代表的事例は、化学実験室での成果をスケールアップして大量生産につなげるプラント設計のための課題解決です。それが、近年では、もっと大きな社会システムの課題解決にも化学工学の方法が応用されるなど、その範囲を広げています。

—どんな工業製品も化学製品も、ひとつの学問分野の理論だけでは完成するものではないんですね。化学工業が色々な産業分野を束ねて、導いているんですね。

阿尻 そもそも化学工学の起こりは産業界や社会のニーズからです。例えば「原油からガソリンという石油製品が欲しい」といったように「ある材料から、ある製品が欲しい」というニーズに対して技術として作り上げていくのですが、理論が確立していない、という事が多々ありました。従来のサイエンスの視点から見ると理論が分かってから技術を作りたいのですが、どんどん産業・市場が発展していく中で産業や社会はそれを待っていられないのです。

そこで化学工学の創始者たちは、分かっていることは理論で記述し、不明な点については、パラメーター相関をとりながらとにかく技術を作り上げるというスタンスをとったわけです。

このように化学工学は「社会の役に立つ（社会実装）」ことを前提に発展しました。これはそれ以前のスタンスとは大いに違いました。もともと西欧で発展して来た近代の科学は“科学が上である、それを利用する技術は下である”という考えが支配的でした。でも実社会を見ると、技術と科学の間に上下や優劣はありません。化学工学は、その現実に立脚した実学的なアプローチをとる学問なのです。

**化学工学のキーワード
「問題解決」と
「プロセスの視点」**

阿尻 化学工学を表すキーワードには「新しい問題を解決するアプローチ」という事と「プロセスの視点」という2つがあります。いろいろな分野の要素理論をつないで問題を解決すること、その問題解決をプロセス改良を通して行っていくということです。化学工学は、どのような対象も1つのシステムとしてとらえ、そのシステムを幾つかの要素の結合として表現する手法を持っています。そのため化学工学は「方法論」の学問と言えます。

ですから工業製品の製造プラントにとどまらず、その化学工学の方法論が“地域社会づくり”などにも応用出来るわけです。社会を1つのプラントのように考えるのです。

例えば、生活で出たゴミ（廃棄物）を燃やすことで発電をします。その熱を温水にしたり、農業用に使ったりなど“ゴミをエネルギーとしてリサイクルする”こうした熱の使われ方はケミカルプラントと同じなのです。

このような形で、エネルギー問題、地球環境、バイオ、材料科学など色々な面で、化学工学出身の方が活躍し「化学工学の方法論」を活用しています。

—なるほど、モノづくりのニーズから生まれた化学工学が、社会づくりにまで役立っているわけですね。実学的な学問という特徴がそうした面からも伺えます。

産学官との連携

阿尻 最近何かと話題の A I ですが、最終的に社会実装させるという考え方について化学工学と同じです。A Iは何万件という膨大なデータをインプットしてアウトプットを取り出しますが、なぜそのアウトプットが生まれるかという相関については、はつきりと分かっていないことばかりです。ですが社会のニーズがあるので、まずは稼働させようということです。化学工学は、基本的に理論が確立すれば全て使いますが、そうでない領域については、こうしたことを見よりずっと以前からやっていたのです。

今あげた A I や I o T が盛んになっていく時代の移り変わりの中で、化学工学の役割はさまざまにあり、また発展する必要があると考えています。

もちろん従来からのモノづくりに、より寄与していくかなくてはいけません。現在でも化学産業の中でモノづくりはフロントの中のフロントであり、日本で化学産業は自動車産業に次いで 2 番目の産業なのです。

私自身、学ぶたびにこうして化学工学の意義を強く認識してきました。今に至るまでに化学工学について深める、あるいは更に広げるという意味で、他の分野にもどっぷりつかって、誰もやっていない融合分野づくりをしようと回り道したことがあります。何をやっていたかというと、超臨界反応の研究を対象に「化学工学」をしていました。

超臨界とは、液体と蒸気が区別なく存在する状態

—化学工学のこれからについて伺う前に、先生が世界的に研究をリードする「超臨界」について教えていただけますか。

阿尻 結論から言うと「液体と気体の区別がつかなくなる」その状態が超臨界という状態です。と言ってもピンときませんよね。どういうことか、なぜそうなるか、お話ししましょう。

水は通常 100℃ で蒸気になります。しかし圧力が高いと沸点はもっと高くなり、例えば圧力釜の中では 110 ~ 120℃ のお湯になるのです。反対に圧力が下がると沸点は下がります。高い山の頂上でお湯を沸かすと 100℃ 以下で沸騰するのは、圧力が低いからです。

このように「圧力が下がると沸点が低くなり、圧力が高くなるとより高温で沸騰する」わけですが、では「ぐんと圧力が高くなると、どれくらい高温で沸騰するのか?」最終的に 218 気圧 (22.1 MPa) まで圧力を高めると沸騰温度は 374℃ まで上がります。これを超えた途端、実は液体と水蒸気の区別がつかずに同じようになってしまいます。そして蒸発はしなくなります。この状態が「超臨界」なのです。

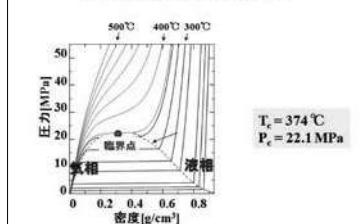
こういったことが分かる前は、気体には圧縮して液体になるものとならないものの 2 種類があるとされていました。

水素、ヘリウムや窒素は圧縮しても液体にならないと思われており、永久ガスと呼ばれていた時代もありました。それらの臨界点はとても低く、そこまで冷やす技術のない時代には液体にできなかったからです。今では液体窒素、ヘリウムはもちろん、水素ですら液化できることは、ご存じのとおりです。

では、なぜ気体と液体の区別がつかなくなるのか? 密度の面から少し補足しましょう。

温度が上がると液体は膨張します。374℃ まで上げるとかなり膨張するので、密度は低くなります。一方、蒸発した後の水蒸気の密度はどうでしょうか。だんだん圧力が上がっているので、水蒸気の密度は高くなっています。つまり「液体のお湯の密度はだんだん低く、水蒸気の密度はだんだん高く」なり両者の密度が近くなっています。そして 374℃ で蒸発する時の液体の密度はとても低く、ほとんど変わらなくなっています。そしてここを越えた時に、液体と水蒸気が同じようになるわけです。

超臨界水の物性



臨界点は 374°C、22.1 MPa であり、臨界点近傍では密度が大きく変化する。

产学官との連携

—液体と水蒸気が同じように…とは、どのような状態をイメージすればよいのでしょうか。

阿尻 高密度のガス状態と考えれば良いかと思います。これを超臨界流体と言い、この状態になった水を超臨界水と呼んでいます。

超臨界水を作ること自体は、そんなに難しいことではないです。ペットボトルに入っている水も、高温高圧に耐えられる容器に入れて温度を高めれば超臨界になります。

超臨界水のもつ特徴の1つに、油のような有機分子と混ざりやすいことが挙げられます。この性質は化学反応や材料合成において大きなメリットがあります。通常、水中にしか溶けない物質と有機溶媒中にしか溶けない物質岩を反応させようとしても両者が混合しないため、反応させることは出来ませんでした。しかし、超臨界状態では両者が混じるため、反応を進行させることができます。

—自然界に超臨界の状態がある?圧力も温度も非常に高い場所とは、どこでしょうか。

阿尻 そこは火山のそばや地底奥深く、マグマがどろどろと流れているようなところです。

私は学生時代まで、マグマとは岩自体が溶けたものかと思っていたのですが、実はそうではなくて超臨界水に岩が溶けた超

臨界水溶液であると、地球物理の先生に教えていただきました。岩とはシリカだったり、鉄鉱石だったり、アルミ鉱石だったりということですが、それらが溶けるには最低でも千数百度、時には何千度という高温でないと溶けません。

しかし最近では、マグマの運動が外からでも調べられ、融点よりもずっと低い温度でマグマが動いていることが分かるそうです。これはどういうことかというと、火山活動の近くに地下水があると、そこは高温・高圧であり、218気圧(21.1MPa)で374℃が水の超臨界点であるとお話ししましたが、それをさらに上回った状態があるわけです。つまり超臨界水が出来ているのです。その超臨界水は周りの物質、岩を溶かし込んでいるわけで、これがマグマということです。

先程お話したように、高密度の水蒸気ではあるけど液体にならない水蒸気、ガス状態。それが、マグマが金属酸化物の融点より低い温度で流動しているということになるわけです。

どうしてこの話を例に出したかというと、私たちが発明した「超臨界水熱合成」の反応ですが、この地底奥深く、鉱脈が出来てきた反応と同じなのです。それを考えると、周期律表のほとんどの物質、さらには地球で見つかる全ての物質、酸化物、硫黄化物などを合成出来るということになります。

そもそも違う言い方をすると、

地球が出来たときは高温高圧の超臨界の状態の中なのです。鉱石や鉱脈も超臨界の水の中で形成されたと考えられ、また、海底火山の近くで生命が生まれてきたわけです。その超臨界の場を使った研究を世界に先駆けて私がやっていたのも、新しい産業、これまでにない産業というのが出来るのではないかという思いがあったからです。

—先生の「超臨界水」の研究が、世界で大変な注目を集めている理由が少しずつ分かってきました。既に実用化されていると伺っています。その実用化例を教えていただけますか。

阿尻 1つは「世界初のケミカルリサイクルプラント」が実用化されました。これによりポリウレタンの原料を、それまでは捨てていたものをリサイクルして製造出来るようになりました。

ポリウレタンの原料はTDIというもので、TDAというものから作ります。TDAからTDIを作る際はどうしても残渣が出来るのですが、残渣の中にはTDIになるものがまだ含まれています。しかし従来は燃焼廃棄するしかなく、もったいないことをしていました。

ですが、残渣に超臨界水を接触して反応させると、触媒なしでTDAを合成することが出来るのです。これで廃棄残渣から原料のTDAが取り出せるという、超臨界水ケミカルリサイク

産学官との連携

ルプラントとして実用化したのです。

—超臨界水が、まさに“ゴミを宝に”したのですね。触媒も使うことなく、そのようなリサイクルが可能になるとは、すごいですね。

阿尻 簡単に言うと、超臨界水では水分子そのものが触媒になり、加水分解というのですが、物質をバラバラに分解することが出来るのです。

同じようなことで、超臨界水を使って、プラスチックスやバイオマスの廃棄物から化学原料を回収するケミカルリサイクルプロセスの開発が進んでいます。従来はリユース、あるいは燃焼、サーマルリサイクルが主流でした。超臨界水ですと、水のみが溶媒なので環境に最も適合するプロセスとなり、この点が大きなメリットです。



世界初の超臨界水ケミカルリサイクルプロセス（左）と超臨界水熱合成プロセス（右）

—リサイクルの例を伺いましたが、超臨界水や超臨界の技術が、モノづくりの革新を進めている実用例は数々あるのでしょうか。

阿尻 超臨界水で無機ナノ材料も非常に効率よく作れることが

分かりました。超臨界水熱合成法というのですが、韓国のプラントではリチウムイオン電池の正極材料合成が年間1000トンペースで生産されています。その他イギリスにも同じ規模のナノ粒子合成プラントがあり、フランスでもパイロットプラントの建設が進んでいます。

実はこのように超臨界を使った新しいプロセスを提案し、実用化されるためには、根本として超臨界反応を制御するシステムを作り上げることが重要でした。

この時、化学工学の「プロセスの視点」というのがとても役に立ったのです。

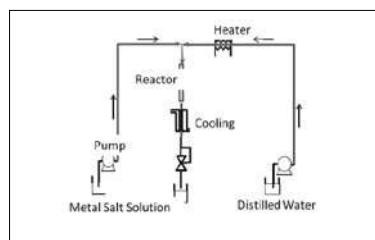
世界にインパクトを与えた 「超臨界水熱合成」プロセス

—「超臨界」の実用は「化学工学」の「プロセスの視点」があったから…とは、どのようなことでしょうか。

阿尻 超臨界は「とても高い圧力で、とても高い温度にする」ことで作れますぐ、超臨界に近く程、わずかな温度変化や圧力変化で反応は大きく変化します。なので、温度・圧力・反応時間を精密に制御出来なければ、超臨界水中での反応の詳細は解明出来ませんでした。

しかし従来から使っていたオートクレーブ（高温高圧反応器）という装置を用いていては、とうてい不可能だったのです。そこで、制御出来るプロセスを

持つ装置そのものが必要であると思い、新しいプロセスを考えました。



流通式超臨界水熱合成装置

大まかにその仕組みを説明すると、従来の装置は言わば“圧力釜”だったのに対し、新しいプロセスでは、流通式の装置で入口と出口の2つの口を設けました。そして、入口では2つの流路を混合させる方式をとりました。

その入口の一方から原料を入れ、もう一方から超臨界を作るための高温高圧水を入れます。その2つを混合させて反応させ、その後に反応管の出口で急速冷却し、生成物を回収します。

これにより、反応部の滞在時間をミリ秒オーダーで制御、温度分布を1K以下の精度で制御、圧力も正確に制御することが可能になった為、超臨界の詳細な解明が飛躍的に前進し、次々に実用化の道も開けるようになりました。これを「連続流通式超臨界水熱合成」と言います。

超臨界反応の研究は、他の学問分野の方々にも非常に高い評価を受けました。何が評価されたのかを聞いてみると、私にとっては非常に驚くべきものでした。今話したような「プロセス

産学官との連携

で考える」という発想が、化学工学ではごく当たり前なことでも、その他の分野の先生のお話では「我々にはない発想だ」ということだったのです。

例えば、森や山の全体の姿はその中に入っていては見えないわけで、それと同じで化学工学を外の世界から見たことで、また新しい意味での化学工学の意義や重要性を深めることができた気がします。

—化学工学に出会い、超臨界に出会い、そして両者が一段高い段階で結実して新しい革新を生んでいることを感じました。超臨界の研究は、阿尻先生が着手する以前はどうだったのでしょうか。

阿尻 私が超臨界の反応の研究を始めたのは1989年になりますが、世界的にみても本当にごくわずかといった感じで、1990

年までは超臨界流体反応の研究論文数は年間数本程度でした。

しかし申し上げてきたように、超臨界水の反応溶媒としての可能性に着目してからは、広い分野へ応用展開がありうると考え、ありとあらゆる反応へと研究を進めてきました。

その一例が、お話ししたことと重複しますが、重質油の改質、廃棄物ポリマーの分解・化学原料回収、セルロースの加水分解・糖回収、リグニンの分解・化学原料回収、またこれらの反応に関連する有機反応、さらにナノ粒子合成などになります。

こうした研究発表を行っていく中で、世界中で研究者も論文数もどんどん右肩上がりに増え、今や年間700を超える論文数になっています。

—先生の研究が世界にインパクトを与え、従来にはなかったモノづくり、それだけにとどま

らない新しい産業分野を生んでいるように感じます。

阿尻 とても嬉しいことです。産業分野もそうですし、新しい学術分野が出来たのではないかと思います。

モノづくりにおいて何が新しいかを少し補足すると、これまで各産業は“気体・液体・固体の状態”これを“気相、液相、固相”と言いますが、3つの相のいずれかの反応を利用して行わっていました。

例えば半導体製造プロセスは気相での反応を利用し、鉄鋼やガラス産業では液相が使われます。多くの化学産業も液相の反応を利用します。セメントやセラミクスは固相での反応、物を焼くということで製造します。

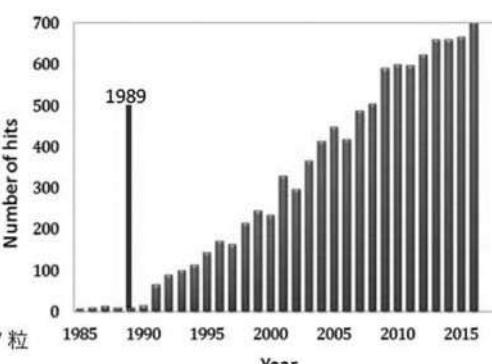
そこに「超臨界相」という気体と液体の特徴を併せ持つ相での反応が生まれ、今までの気・液・固の3つの相で出来なかつたモノづくりが生まれたことになります。

有機合成も、無機合成も可能です。であれば同時に反応させれば有機無機複合化、さらには有機無機ハイブリッドナノ粒子合成も可能であると着想し、実際にそれが結果として得られました。

その例として、皆さんのが身近に感じるもので3Dインクジェットプリンタがあります。特に、そのプリンタインクの開発に携わりました。平面のインクジェットプリンタは黒、赤、青、黄色といった色の再現のみでした

超臨界反応のインパクト

超臨界反応
石炭変換
重質油改質
セルロース分解
廃棄物分解
有機合成
ナノ粒子合成
(超臨界水熱合成)
有機無機ハイブリッドナノ粒子



グラフは世界の超臨界流体反応の研究論文数。阿尻先生の「超臨界」研究以前は年間数報程度であったのに対して、1990年以降は急速に増加。今では世界中の研究者が基礎から応用、実用化研究にまで広く研究を進めており、新たな学術分野が創出された。

産学官との連携

が、3Dプリンターで再現出来るのは金属でも、半導体でも、絶縁体でも出来るという3Dインクジェットプリンタが可能になるわけです。

また医療現場ではドラッグデリバリー、つまり体内での薬の運搬や、MRIやX線検査の面にも活用範囲が広がっています。

このように、今まで作ることが出来なかつたものや、今まで誰もが見たことがないものも製造出来ます。

例えば、透明なフレキシブルな磁性体、さらにフィルムで屈折率を制御して「反射しないフィルム」が出来るようになり、「熱伝導材料」として金属などよりもずっと熱伝導が速いフレキシブルな材料を作ることも出来ます。この熱伝導材料は、色々な企業から今後実用したいという声をいただいて開発が進んでいます。

熱のコントロールはさまざまな産業で課題となっていることで、例えば電気自動車でも重要視されています。熱を上手に放出しないと作動を妨げることになりかねないといったことがあります。その熱の制御も、超臨界の研究の応用で見えて来たということです。

—さまざまな産業分野の中でも、超臨界を用いた化学工学の活用先として、先生が特に大きな可能性を感じている分野はございますか？

阿尻 どの分野もそれに重要なことは間違ひありませんが、私が取り組みを強くしていきたいと思っているのは、エネルギーの分野と社会貢献です。

エネルギーは、まず「水素」を作り出すのに超臨界が非常に

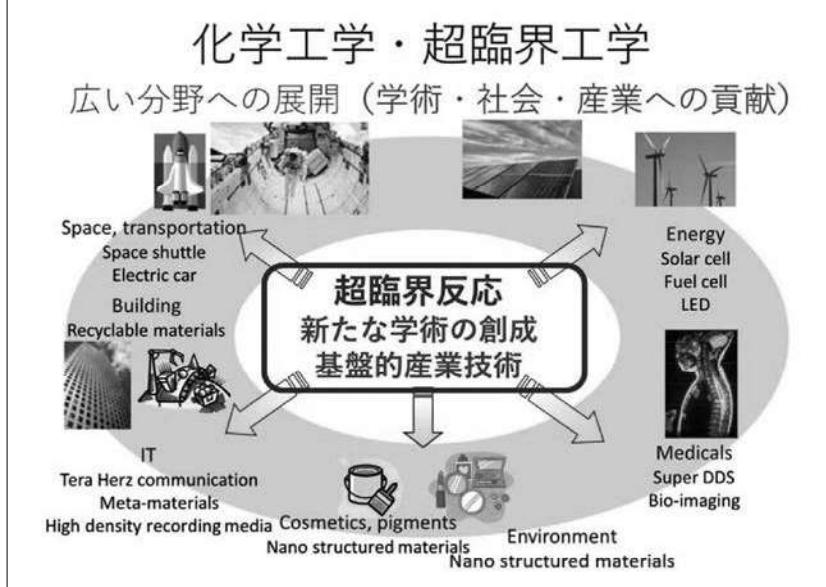
役立ちます。

自然エネルギーとしての水素製造は光をつかって水を分解して水素をつくる方法と、太陽光で電気を使って作る方法が現在では代表的なものですが、これは大変な面積が必要です。

ところが低温の「熱から水素を作る」ことが出来るようになれば話は違ってきます。大きな面積は必要なくなり、熱を貯めておくタンクのスペースがあればよいのです。我が国の貴重なエネルギー資源、地熱も使えます。ですから、これを実現するため、超臨界法でしか出来ない新しい触媒の開発と新プロセス開発研究を進めています。

これについても、私達は化学工学の「プロセスの視点」で考えています。どういうことかというと、そもそも水素は温度を上げれば水から作ることが出来ます。しかし何千度という高温が必要です。その温度をずっと下げて300℃以下に出来れば、実現の可能性が見えてくるのですが、熱力学で何千度という高温でしか出来ないものは、本来は触媒があっても低い温度では出来ないはずなのです。

ただし、この反応を2つに分離したプロセスがとれると話は違いまして、熱力学の制約を外すことが出来ます。2つに分離した一方で水と酸素を吸収する物質と反応させてから水素を作る、もう一方では、その酸化された物質の酸素を反応を使って取り出すという形です。



超臨界場での反応の研究は、基礎学術の創成と応用とが連動している。産学連携を通して、広い産業分野に共有するニーズの抽出が可能となり、それはサイエンスシーズでもある。そのサイエンスを確立すれば、多くの産業分野への貢献が可能となる。

産学官との連携

いかに速く、いかに低い温度で水を反応させて水素を製造できるという問題はあるのですが、この方面的基礎研究がJST、NEDOでも進められつつあります。

—これが実現すると水素が安価に大量生産できるということですね。そして日本のエネルギー分野に多大な貢献をもたらすことになりますね。

阿尻 このポイントですが、今捨てている低温の廃熱を利用出来るようになるということです。水素を作る時にエネルギーを使いたくないわけですが、もしも余っている熱を水素に変えることが出来れば、一番ありがたいことになります。

私は、この「捨てている熱を使う」ことが、水素をどうやって作るのか、ひいては水素社会をどうやって作るのかなどを考える上で、一番大きなポイントのような気がします。

「固体・液体・気体」で区別されていたものに加わる新しいものが「超臨界」。モノづくりや社会を革新する実用例が既にあります!



というのも再利用されずに捨てられている熱、つまり「低温廃熱」はたくさんあるのです。例えば発電を見ると、150℃以下の熱はほとんど使われていません。それより上だと電気として回収出来ているのですが、150℃を下回るとそれがうまくいっていないのです。鉄鋼産業、化学産業となると、もっと高い温度の熱も使われていない割合が多くなります。

日本の資源、地熱も使えます。実はこうした十分に活用されていないエネルギーの量は、新エネルギーと言われている太陽光やバイオマスの量に匹敵するほど大きいのです。この廃熱を回

収し、水素を生み出すことが出来れば随分変わってきます。水素は貯蔵も出来るのでエネルギーを貯蔵することにもつながり、そして水素自動車を動かしたり、エネファームの広がりを生み出します。また、捨てている熱を使うのですから、地球温暖化の問題解決にも貢献します。

そしてもうひとつ、このプロセスで水素を製造するメリットは、低い温度の捨てられている熱から高い質のエネルギーを得られるということです。水素は燃やすと高温が出来ますし燃料電池で電気エネルギーもつくれます。

こうした実現に向けては、超臨界をどう使うかということもさることながら、社会の深い問題を解決する視点、それをプロセスの提案で解決をしていくということが重要です。

〈阿尻 雅文先生の受賞履歴〉

- 平成10年度 日本エネルギー学会進歩賞
- 平成10年度 素材物性学国際会議論文賞
- 平成13年度 財団法人ゼネラル石油研究奨励財団 第7回「鈴木賞」
- 平成13年度 日本化学会 学術賞
- 平成18年度 化学工学会研究賞・内藤雅喜記念賞
- 平成22年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)
- 平成22年度 第8回産学官連携労者表彰 文部科学大臣賞
- 平成22年度 全国発明表彰 21世紀発明奨励賞
- 平成24年度 第11回GSC賞 文部科学大臣賞
- 平成25年度 化学工学会 学会賞 池田亀三郎記念賞
- 平成28年度 KONA賞
- 平成31年度 ボルドー大学 名誉博士号(Docteur Honoris Causa)

次号「科学の峰々」は、引き続き
公益社団法人化学工学会 会長
東北大学 工学博士
阿尻 雅文先生に
「超臨界工学と
化学工学のプロセスの視点が
モノづくり革新の実用化を進める」
のお話を伺います。