

K y u r i z u k a i

新版

窮理図解

2024 October
no.

41

慶應義塾大学理工学部広報誌

<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>

English versions are also available:

<https://www.st.keio.ac.jp/en/kyurizukai/>

慶應理工の 電極のかがく

電気化学でサステナブル社会を紡ぐ

化学科

やまもと たかし

山本崇史

(准教授)



電気力でモノづくり

特別な試薬を使わない安全で地球にやさしい有機合成

電気力で有機化合物を合成する「有機電解合成」は、特別な試薬を使わないため廃棄物排出量の削減も期待されることから、エコなモノづくりとして世界中で注目されている。競争が激化するこの分野で、山本さんは独自のアプローチで、既存のモノづくりを新しい方法に置き換えていきたいと考えている。

暮らしに欠かせない有機化合物

私たちの身の回りには、人工的につくられた物質があふれている。中でも、「炭素(C)を含む物質(有機化合物)」は、プラスチックやゴム、合成繊維、医薬品などとして、私たちの暮らしを支えている。

人工的に有機化合物をつくるには、通常、原料のほかに、例えば触媒など、反応を促進させるための特別な試薬を用いる。また、高温にするために大量のエネ

ルギーを消費する場合もある。もちろん、使用後の試薬や反応後の廃棄物は適切に回収・処理されているものの、もし特別な試薬や廃棄物のないモノづくりができれば環境負荷を大幅に減らすことができる。

このような背景から、電気力を使った有機合成「有機電解合成」が注目されているのだ。化学科の山本さんは、そんな「有機電解合成」の研究を牽引する研究者の一人である。

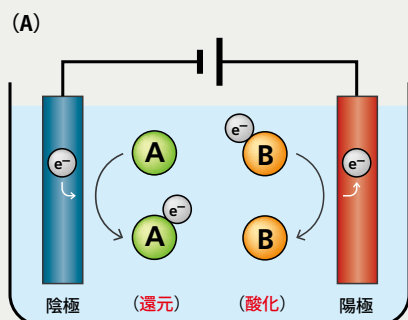
電気力を使う

「有機電解合成」とは？

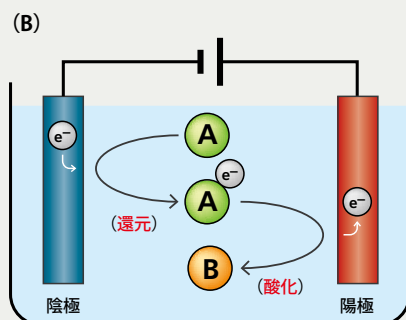
電気力を使う「有機電解合成」とは、どのような方法なのだろうか。中学校で学んだ「水の電気分解(電解)」を覚えていだろうか。図1(A)のように水(H₂O)に陽極と陰極を浸して電気を流すと、陰極では水素(H₂)が発生し、陽極では酸素(O₂)が発生する。このような電子の授受を有機化合物に当てはめて、新たな有機化合物をつくり出そうというモノづくりが、「有機電解合成」である(図1)。特別な試薬の代わりに電気力で行われる電子の授受が化学反応を促進させる。

留学先のマインツ大学での大きな成果

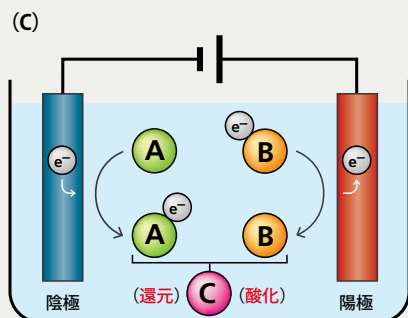
山本さんが有機電解合成の研究を行うようになったのは、2016年にドイツのヨハネス・ゲーテンベルク大学マインツ(通称マインツ大学)に留学したことがきっかけだった。「その頃、私は、それまで取り組んでいた研究分野のスピード感についていけず、自分の将来に不安を感じていました。そんな時、慶應義塾大学の石井・石橋基金『若手研究者育成ものづくり特別事業』で留学の機会を得



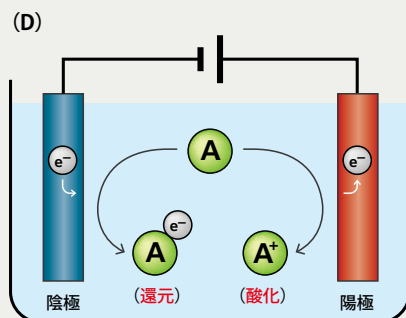
陰極で物質Aが還元され、陽極で物質Bが酸化されそれぞれが目的物質となる。



物質Aがまず陰極で還元され、次に陽極で酸化されて、目的物質Bができる。



陰極で還元された物質Aと、陽極で酸化された物質Bとが反応して目的物質Cが生成する。



物質Aが陰極では還元され、陽極では酸化され、どちらも目的物質となる。

図1 電気力を用いてより効率的に使用する両極電解合成
陰極で還元反応、陽極で酸化反応がそれぞれ起こる。こうして活性化された物質が反応して、目的物質が生成する。「有機電解合成」が特別な試薬を使わないといっても、電気力を用いて効率的に使用できれば、エネルギーの無駄が生じる。そうならないように、「有機電解合成」では、陰極でも陽極でも目的物質の合成に結びつく「両極電解合成」の開発が盛んに行われている。

たのです。当時、私は栄長泰明教授えいながやすあきの研究室内で専任講師として研究していましたが、新境地を拓きたいと思い、帰国してからも続けられるように、栄長教授の研究テーマであるダイヤモンド電極に関わる研究テーマを探しました」。こうしてマインツ大学のジークフリート・ヴァルトフォーゲル教授の下で、ダイヤモンド電極を使った有機電解合成の研究を始めることになった。

2017年には、イソオイゲノールを原料に α -ジイソオイゲノールの合成に成功(図2)。「原料が同じでも、それを溶かす溶媒を変えて電流を流すと、予想と違った物質ができました。ずっと化学を研究してきた私でも、こんなことが起こるのかと衝撃を受けました」と山本さん。

驚かされたのはそれだけではない。化学合成では、特別な工夫をしないと立体異性体が混ざって合成される。立体異性体は性質が異なるため、一度混じってしまうと分離しなくてはならない。そのため、立体異性体を簡単に作り分けることが化学合成における大きな命題である。ところが、この合成では α -ジイソオイゲノールのみができており、そのほかの立体異性体は混ざっていなかったのだ。

こうしてドイツで学び、成果を上げた山本さんは、現在、栄長研究室のダイヤモンド電極を使って「有機電解合成」の研究を進めている。

エコなモノづくりに 押し寄せる競争の波

山本さんが有機電解合成と出会った頃と今とでは、状況が変わってきている。「電気を使って物質を合成しようという試みは歴史が長く、その始まりは1800年代と言われています。1900年代後半に有機電解合成の分野は大きく発展しましたが、誰でも簡単に扱える研究用キットが存在しなかったため、その後あまり研究者人口は増えませんでした。ところが今は違います。いろいろな企業から直感的に使える研究用キットが販売され、有機電解合成の研究を始めるハードルが下がっています。特別な試薬を使う必要がないというだけでなく、電力を太陽光や風力といった再生可能エネルギー由来

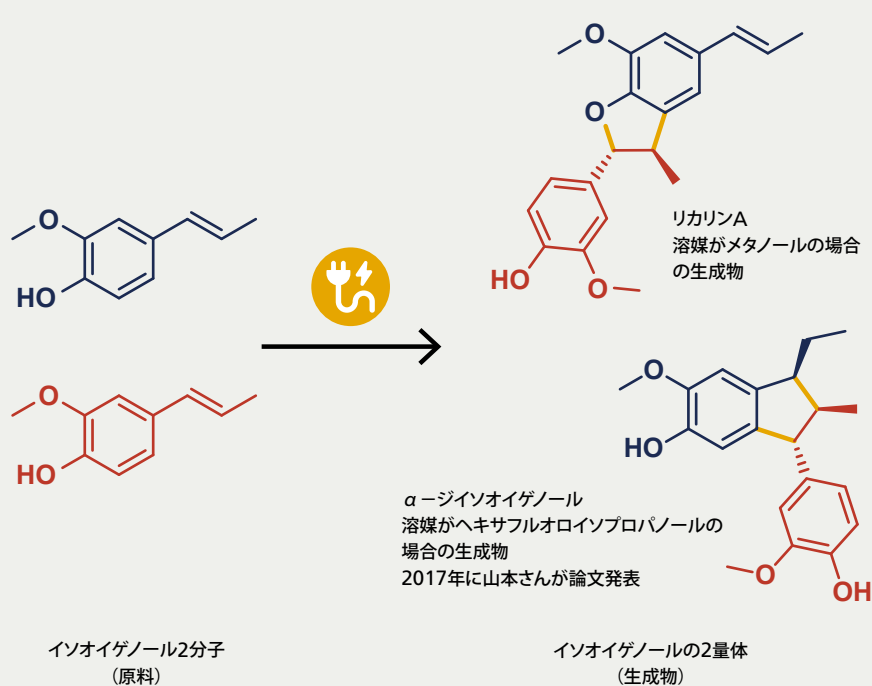


図2 イソオイゲノールを基質にした有機電解合成

これは、山本さんが論文を発表した有機電解合成の成果である。溶媒をヘキサフルオロイソプロパノールにしたところ、原料のイソオイゲノール2分子から α -ジイソオイゲノールが生成した(下)。これまで、溶媒をメタノールにするとリカリンAが生成することが知られていた(上)。溶媒を変えると生成物が変わることは大きな驚きだった。黄色太線は新しく形成する結合を示している。

のものにすれば、二酸化炭素(CO₂)排出量を削減できるモノづくりも可能になることから、世界中で有機電解合成の開発競争が起こっています」。

自分にしかできない研究で 世界と肩を並べる

しかし、以前のように、自分の研究の将来に不安を感じたりすることはない。なぜなら、有機電解合成における重要なファクターである電極に絶対の自信があるからだ。

「栄長研究室で使っているダイヤモンド電極には、有機電解合成をする上で、ほかの電極にはない優れた性質がいくつもあるからです。代表的なものを2つ紹介します。1つ目は、電流を流して生成する反応性が高いラジカル種がダイヤモンド電極の表面では安定に存在できることです。2つ目は、広い電圧範囲で使うことができます。これら2つの特徴をまとめると、一般的に用いられている電極では起こすことができない反応を実現することができるのです」。

さらに、このダイヤモンド電極の独

自の改良も試みている。「かつて私は、次世代デバイスの開発を目指して無機ナノシートの光学的・磁気的な性質について研究をしていました。この時に習得した経験・技術で、電極表面にさまざまな加工を施します。こうして電極表面の性質を変えると、生成物の収率や選択性がどう変わるか。その基礎的な理論の確立を通じて、新しい『電極のかがかく』の開拓を目指しています」。

やりたいことがいろいろある山本さんだが、最終的な目標は「高校生でもすごさが分かる成果を、有機電解合成で達成すること」だと話す。「例えば、教科書に載っているような、すでに産業利用されている反応(ただし、高温・高圧を必要とするもの)を、有機電解合成で置き換えるのです。こうして初めて、地球にやさしいモノづくりを達成したと言えますから…」。

「有機電解合成」には今、激しい競争の波が押し寄せている。その中を山本さんは、研究者としてのこれまでの経験を礎に、自ら定めた大きな目標に向かって、力強く進んでいるのである。

(取材・構成 池田亜希子)



自主性を重んじる校風の中を 徹底的に追究する精神で歩んできた

「徹底的に追究して納得しないと前に進まない」と自分のことを話す山本さん。その時々、取り組むべきことに真剣に向き合ってきた。こうして蓄積された知識や経験は、これからの大学での研究や教育で大きな力を発揮することだろう。

——お父様も大学の教員をされていたそうですね。

父は島根大学の教員で、専門は土壤微生物学でした。子供の頃、よく父の研究室に遊びに行っていたので、父と同じ農学部に行きたいと思うようになりました。ところが、農学部を目指して受験した国立大学の入試に失敗してしまい、慶應義塾大学に進学することに。こうして化学の道に進みました。

このことにまつわるエピソードを1つ。慶應義塾大学の入学手続きに向かう新幹線で、付き添いの兄が窓の外を見て「慶應のペンマークだ!」と叫んだのです。私は矢上キャンパスのある校舎につけられているペンマークを落ち込んだ気分で見上げたことを今でも覚えています。

——慶應義塾大学での学生生活はいかがでしたか？

高校までの化学とのギャップに驚きましたね。特に、有機化学は、電子の動きを考えなくては反応が分からないので、勉強しなくては単位を落としてしまうと思いました。それで、金曜日の有機化学の授業(5限の化学D)の後にひょうら(日吉駅を挟んで慶應義塾大学と反対側の商店街のこと)で夕飯を食べて、午後7時頃から約2時間、メディアセンター(日吉キャンパスの図書館)が閉館するまで勉強しました。特にサークルには入りませんでした。慣れない土地での初めての一人暮らしは決して楽ではありませんでした。



——えいながやすあき 栄長泰明教授とは、大学4年生で研究室に所属して以来のご関係だそうですね。

私は栄長研の1期生です。先生がまだ若かったこともあって、研究室ではのびのび過ごさせてもらいましたし、今でもこうして一緒に研究を続けています。でも、栄長先生と私の研究に対する考え方はずいぶん違います。栄長先生はゴールに向かって直線的に進む「エレベータータイプ」。私は、「ここまでは達成できるかな」と一つ一つ確かめながら進む「階段タイプ」です。違いがあるので上手くやってこられたのだと思います。徹底的に追究して、納得しないと前に進まないタイプなので、今、学生たちからは「細かい人だな」と思われていると思います(笑)。

——留学や他大学での研究を経験されていますね。

2007年に憧れのダニエル・タルハム教授がおられたフロリダ大学に留学しました。教授の論文はとにかく緻密で、「こういう研究をしたい」とずっと思っていました。実際、たいへん言葉を大切にされる方で、「きちんと説明するとはどういうことか」を教えられました。

帰国して2008年5月からは、東京工業大学(当時、現：東京科学大学)の彌田智一教授のところへ高分子材料を研究しました。今にして思うと、彌田教授が考える「研究員だったらこのくらい研究しなさい」というレベルに私が達していなかったのかもしれませんが、「研究者として後輩たちの手本になってほしい」と思っていたのかもしれませんが、非常に厳しい方で夢にまで出てきました(笑)。しかし、この時の経験が私という研究者を形作っていることはまちがいません。華々しい研究成果の裏側では、ものすごい数の非常に地味で泥臭い実験が行われていることも知りました。

——2009年4月に母校である慶應義塾大学に戻ることになりました。

「4月から教員になるわ」と家族に報告したら、父から「研究者である前に教育者だからそれは忘れるなよ」と言われ、ハッとしましたね。これまで朝から夜まで実験・研究することしか考えていなかった自分が、教員になるんだと強く意識しました。





教員として、 学生の質問に有意義な答えを 提供できる存在でありたい

山本崇史 Takashi Yamamoto

専門は有機電気化学、機能物性化学。2002年慶應義塾大学理工学部化学学科卒業。2007年同大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。博士（理学）。日本学術振興会特別研究員（PD）、フロリダ大学訪問研究員、東京工業大学資源化学研究所産学官連携研究員を経て、2009年より慶應義塾大学理工学部化学学科助教（有期）、2011年より助教、2014年より専任講師、2023年より現職。2016年と2017年はドイツ・マインツ大学訪問研究員を兼任。

一度離れたせいか、慶應義塾大学は“我が家”のように感じられ、居心地がいいですね。ただ、教員として授業を受け持つなど、これまでとは違ったたいへんさがありました。

常に心がけているのは、「学生の質問にはスパッと答える」ことです。慶應義塾大学の学生は優秀で、私に聞くまでには自分でいろいろ調べています。そして万策尽きて質問してくるので、私は学生が恐れずに前に進めるようなアドバイスやヒントを提供できる存在でありたいと思うのです。そのため日頃から勉強は欠かしていません。慶應義塾の「半学半教」の精神とは、こういうことかなと私なりに解釈しています。

——2016年に研究内容を大きく変えられたそうですが、ずいぶん思い切りましたね。

研究に閉塞感を感じていたので、自分に残された研究者としての時間を考えて、今なら方向転換できるとして研究分野を変えました（研究紹介）。留学先（ヨハネス・ゲーテンベルク大学マインツ）のヴァルトフォーゲル研究室は、当時、優秀な学生がたくさんいましたし、留学生の受け入れ体制も整っていました。私は彼らと切磋琢磨しながら、研究に集中して大きな成果を上げることができました（研究紹介）。

研究には集中力が大事で、長時間研究室にすることが正義ではないと身をもって気づかされました。

——これから慶應義塾大学に進学する高校生や、すでに慶應義塾大学で学んでいる学生さんに、一言お願いします。

研究では、タルハム教授やヴァルトフォーゲル教授の研究室に留学し、分野のトップランナーの研究を経験しましたが、どんな世界でも一流の人間になりたかったら、一流を知らなくて

はなりません。一流のものを食べて、一流のものを見て、一流のものに触れることです。

慶應義塾大学は「独立自尊」など福澤先生の精神を大切にしていることもあり、他の大学に比べても自由な校風だと思います。学生も教員も互いの自主性を重んじています。その分、自分で自分を律しなくてはなりませんが、それでもチャレンジできる雰囲気やそのチャレンジが失敗してもとがめない雰囲気、プロセスを評価してもらえる雰囲気は非常に貴重です。この環境があるから、慶應義塾大学では学生も教員も大きく成長し、花開いているのだと思います。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

● 山本先生はユーモアあふれる方で、学生との会話をいつも楽しんでおられます。私は、ダイヤモンド電極の表面の官能基を変え、電極の性質がどう変わるかといった基礎研究をしています。山本先生は圧倒的な知識量で的確なアドバイスをしてくださいます。先生の口癖は「漫然と実験をするな」。研究は同じ作業の繰り返しが多いですが、「なぜこれをやるのか」を意識しながら取り組むようにしています。また、毎週提出するレポートでは、論理的でない点や、文章としておかしい点などを丁寧に指摘してくださいます。研究者として、先生からたくさんの学びを得ていると感じています（修士1年生）。

（取材・構成 池田亜希子）

さらに詳しい内容は
<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>

山本崇史の ON と OFF

自由な時間をのぞき見

マインツ

研究者として大きな転機となったマインツ（ドイツ）への短期留学。せっかくの機会なので、マインツでの思い出を振り返ろうと思います。



1. FSV Mainz 05 マインツに本拠を置くサッカーチーム。滞在中、ホームゲームは全試合を観戦しました！

マインツ大聖堂 ドイツ三大聖堂の1つ。広場で開催される朝市はいつも大賑わいです。



聖シュテファン教会 マルク・シャガールによる青いステンドグラス。幻想的なシャガールブルーに引き込まれ、時間が経つのを忘れてしまいます。



メット 生の豚ミンチ。滞在先の研究室の学生がわざわざ用意してくれました。学生いわく「メットには厳しい基準があって、手に入れられないときもざらにあるよ」とのこと。



Nicolai Bergmann

10年以上師事しているフラワーアーティストNicolai Bergmannさんと。アレンジメントを制作中は心が洗われます。



Florilège

およそ10年、定期的に通っているフレンチレストラン。川手寛康シェフによる、野菜が主役のコースは圧巻。



OVERCOAT

構造的なデザイン（特に肩周りの作り）が秀逸で、ここ数年気に入っているブランド。デザイナーの大丸隆平さんと。

その他のおいしいもの

とにかくおいしいものを食べるのが大好きなので、その他のおいしいものをダイジェストで紹介します。



私の 本棚

My favorite books



●『有機電気化学 —基礎から応用まで—』

(淵上 寿雄 編著 跡部 真人・稲木 信介 共著 コロナ社)

いま力を入れて取り組んでいる研究テーマ「有機電気化学・有機電解合成」の教科書。もちろん、マインツへの短期留学の際には持って行きました。これまでに何度も読み返していることに加えて、一緒に研究に取り組んだ学生にも貸し出してきたため、写真の本は3代目です。また、同じ内容の洋書Fundamentals and Applications of Organic Electrochemistry. Synthesis, Materials, Devicesも発売されているため、それぞれを見比べることで英語表現を学ぶこともできます。

●『B'z LIVE-GYM Pleasure 2008 GLORY DAYS』

(DVD VERMILLION RECORDS)

中学生の頃から30年以上B'zが好きで、ここ25年は毎年欠かさずことなくライブに参戦しています(稲葉浩志さん・松本孝弘さんのソロ活動イヤーは、ソロライブ)。忘れられないライブはたくさんありますが、1つ選ぶとしたら迷わずこのライブ。肉体的にも精神的にも疲れていると感じたときは、アンコール2曲目「RUN」の前のMCを聴いて(思い出して)、背中を押してもらっています。ちなみに、2008年9月21日の日産スタジアムでのライブでは、このMCを聴いて号泣しました。

●『思考の方法学』

(栗田 治 著 講談社)

どのようにして「論理的な思考に基づいて物事を理解」し、「適切な計画を立てて課題に対処」するかが非常に分かりやすく解説されています。この本で紹介されているモデル分析は、研究テーマの立案・実施・検証についてはもちろんのこと、日々の暮らしの中での目標にも当てはめることができると思います。高校生のみなさんも目標(テストの点数や部活動のスキルアップ)を設定するときに思考の方法学を活用してみてもいいでしょうか? ちなみに、著者の栗田治先生(慶應義塾大学 理工学部 管理工学科 教授)とは学部内の委員会でご一緒する機会が多く、以前からいつも見識の深さに感銘を受けていましたが、この本を読むことでその謎(?)が解けたように思います。

●『働く君に贈る25の言葉』

(佐々木 常夫 著 WAVE出版)

助教(有期)として教育・研究に向き合っているときに、父親から紹介された本。著者によれば「20〜30代の若いビジネスマンに、私がこれまでの人生のなかでつかみ取ってきた、幸せに働き、幸せに生きるための『エッセンス』をまとめました」とのことですので、学生のみなさんには在学中に一度は読んでほしい本です。自分自身の立場(役職)が変わるたびに読み返していますが、そのときどきで新たな発見があることが印象的です。著者による「そうか、君は課長になったのか。」もすばらしい本ですので、興味がある方はこちらもどうぞ。

It is difficult to say what is impossible,
for the dream of yesterday is the hope of today and
the reality of tomorrow.

山本崇史

「『新版 窮理図解』にご登場いただけませんか?」と全く予期していなかったメールが届いたのは2024年3月末のことでした。はじめはどうしたものかと考えたものの、せっかくの機会なので引き受けることにしました。さて、内容を眺めてみると、「研究紹介」・「インタビュー」は全く問題なさそう、「ON時間OFF時間」・「私の本棚」は少し時間がかかるかも、「コラム(800～1000字程度)」は困ったものだ(←イママサニココ)という印象でした。コラムのテーマは自由とのことなので、本編の内容と照らし合わせながら「これまでを振り返ることの意義」・「これからの研究」について簡単に記そうと思います。

「インタビュー」では、いろいろなことを根掘り葉掘り聞き出されました(そして話

してしまいました)。おかげさまで、学生～博士研究員～教員のそれぞれの時代に、何を考え、どのような気持ちで化学と向き合っていたかをいくらか思い出すことができました。特に、研究者としての方向性に大きな影響を与えてくれた、東京工業大学・彌田研究室での産学官連携研究員としての経験、マインツ大学・Waldvogelグループでの有機電気化学・有機電解合成との出会いを改めて振り返ることができたのは刺激的なひとときでした。あの頃の気持ちを忘れないためにも、定期的にこれまでの歩みを思い出すことも悪くないと感じました。

「研究紹介」の最後に簡単に触れた「これからの研究」について、もう少し詳しく書き起こそうと思います。

以前、私は「無機ナノ材料の磁気物性の光制御」に中心的に取り組んでいましたが、いろいろな縁があり、現在は「ダイヤモンド電極を活用した有機電解合成」をメインの研究テーマにしています。有機電解合成に関する知識・経験がある程度は蓄積されてきたと感じる最近では、以前の研究テーマと現在の研究テーマを融合させることができないかを思案中です。まだまだ構想の段階ですが、磁性材料がもつスピン、配位化合物がもつ空間を規則正しく精密に配列させることによって、スピン・空間に特異的な電気化学的物質変換(電解合成)が実現できるのではないかなというのがアイデアの根幹です。

残りの研究者人生、これまでの研究活動の経験を総動員して新しい「電極のかがか」を開拓していきたいと思います。

*タイトルは、アメリカのロケット工学者Robert H. Goddardの言葉です。アメリカ留学時代に知り合ったロケットエンジニアの方に教えてもらった、大好きな言葉です。

理 工 学 Information

KEIO TECHNO-MALL 2024 (第25回慶應科学技術展)

「実学」の原点—多彩な次代への架け橋

KEIO TECHNO-MALL (慶應科学技術展) は、慶應義塾大学理工学部・理工学研究科の研究成果を広く発信し、共同研究や技術移転など、産官学連携のきっかけとなる出会いの場を提供するイベントです。今年度も2024年12月13日(金)に、東京国際フォーラムから慶應義塾の研究成果を発信します。

昨年度と同様に、湘南藤沢キャンパス(SFC)やイノベーション推進本部などからも参加が予定されていますが、今年度はさらに大学病院も共催に加わり、多彩な分野が連携した慶應義塾ならではの成果を、全塾が一体となってより強力に、充実した内容でお届けいたします。

10月末頃に、下記のホームページ上に来場者募集のご案内を掲載いたします。みなさまのご参加を心よりお待ちしております。



<https://www.kll.keio.ac.jp/ktm/>

編集後記

“自由人”を自称されている山本准教授は、事務室にフラッとおいでになるたびに、事務職員の笑いをさらって颯爽^{さつそう}とお帰りになられます。常に闊達^{かつたつ}でユーモアにあふれている山本准教授を、このたび研究からプライベートまで掘り下げるにつれて、准教授が公私両面にわたり何事に対しても真剣に取り組まれている側面が浮かび上がってきました。これこそ研究者の人間味にフォーカスした『新版 窮理図解』の魅力であり、その魅力を改めて感じさせる『新版 窮理図解』41号に仕上がったと思います。(杉原史)

今号の表紙：有機電解合成の反応装置とともに。[ヘアデザイン] taro (RE: -ORGANIC & DETOX-)



新版 窮理図解

No.41 2024 October

編集 新版窮理図解編集委員会
写真 邑口京一郎
デザイン 八十島博明、石川幸彦 (GRID)
編集協力 サイテック・コミュニケーションズ
発行者 村上俊之
発行 慶應義塾大学理工学部
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
問い合わせ先 (新版窮理図解全般)
kyurizukai@info.keio.ac.jp
問い合わせ先 (産学連携)
kll-liaison@adst.keio.ac.jp

web 版

<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>

