



日本製鉄(株) 副社長執行役員

# 福田 和久

## 特別企画 技術対談

植物の光合成の仕組みに学び、地球に降り注ぐ太陽光と水を原料にエネルギーや有用物質を生み出す「人工光合成」。脱炭素社会の実現に向けた有望技術として期待が高まるこの研究領域において、日本は多くの成果を生み出し、世界をリードし続けています。今年の技術対談は、人工光合成研究の第一人者・東京都立大学名誉教授の井上晴夫氏をお迎えし、研究の進捗と、2050年に向けて人工光合成を社会実装するための課題を伺うとともに、多角的な取り組みを通じてカーボンニュートラルを目指す日本製鉄へのエールをいただきました。

# 井上 晴夫 氏

東京都立大学 名誉教授



# 太陽の恵みを活かして 地球と共存する夢の技術 「人工光合成」の社会実装を目指す

### ●プロフィール いのうえ・はるお

1947年滋賀県生まれ。69年東京大学工学部工業化学科卒業、72年同大学大学院工学系研究科修了(82年、博士号取得)。91年、東京都立大学教授。研究テーマは光化学、化学反応エネルギー共役、光機能材料、人工光合成。05年から首都大学東京教授、都市環境科学研究科長、国際センター長、人工光合成研究センター長、米国フロリダ大学客員教授、東北大学客員教授などを歴任。CREST「水を電子源とする人工光合成システムの構築」研究代表者や、JST さきがけ「光エネルギーと物質変換」領域研究総括、科研費新学術領域「人工光合成」領域代表など、オールジャパンで進める大規模研究を主導する。12年首都大学東京特任教授、18年首都大学東京特別先導教授を経て、現在東京都立大学名誉教授。受賞歴は、光化学協会賞、向井賞、日本化学フェロー、ポーターメダル(日本人で5人目)など。著書(監修)に『夢の新エネルギー「人工光合成」とは何か』(講談社)など。

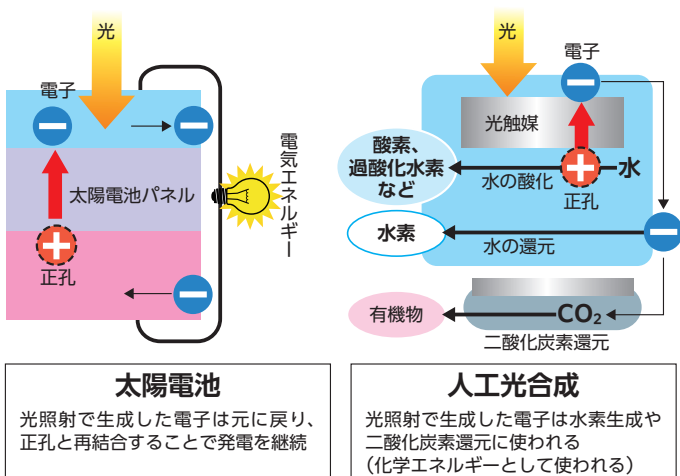


図2 太陽電池と人工光合成の違い

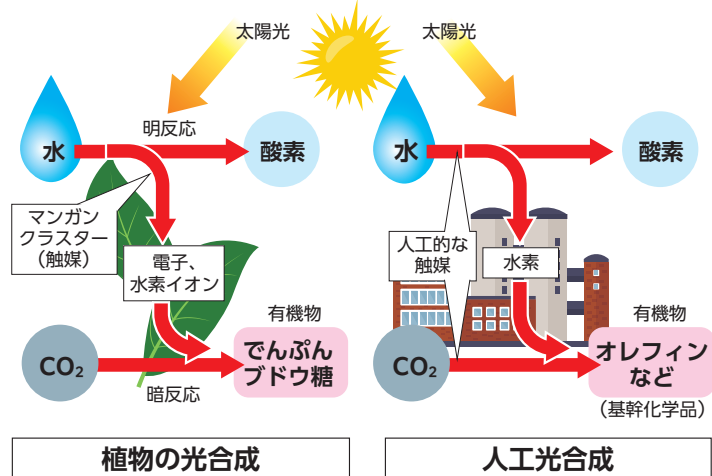


図1 自然の光合成と人工光合成の違い 資源エネルギー庁ホームページ掲載図をもとに作成

一方、人工光合成は、プラスとマイナスに分かれたあと、電子が元の軌道に戻れば太陽電池と同じなのですが元に戻さず、それを使って水素など高エネルギーの物質をつくり出します。そしてプラスは水から電子を奪い、酸素や過酸化水素をつくり出します(図2)。

福田 プラスとマイナスに分けると普通はすぐに元に戻ってしましますが、それを戻さないように電荷分離でうまく分けるのが人工光合成のポイントと言えますね。

井上 そうです。もう一つの違いは、太陽電池は空間的に離れた電子が1個あればいい。そこからエネルギーを取り出して元に戻します。人工光合成は電子を1個取り出しただけでは水素分子(H<sub>2</sub>)ができないので電子が2個必要です。そして取り出したその電子を使って水素を出すのであれば白金触媒、メタンであれば銅触媒などと、電子を戻さず物質に変換するのが触媒化学です。残ったプラスは水から電子をとらなければなりません。そこで酸素や過酸化水素を生成させるにも触媒が必要で、化学の腕の見せどころです。

自然の恵みと知恵で  
有用物質をつくる人工光合成

福田 今年は、「2050年カーボンニュートラル」に向けた有望技術の一つとして目される「人工光合成」の研究に長年携われてこられた、東京都立大学名誉教授の井上晴夫先生をお招きしました。本日は、人工光合成とは何か?という基本的な問いから、研究の進捗やカーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギーの可能性について伺いたいと思います。また、本対談前に日本製鉄の製鉄・研究開発の現場をご見学いただきました。ご感想やアドバイスなどお聞かせいただきましたかと思っています。

まず初めに、人工光合成とはどのような技術なのか、植物の光合成との違いからご説明いただけますか。

井上 自然の光合成は、植物が太陽エネルギーを使ってCO<sub>2</sub>と水から有機物(でんぷん)と酸素を生み出す反応です。人工光合成では、太陽光の多くを占める可視光で、水を原料に、光エネルギーを化学エネルギーに変換して役立つ物質(水素、過酸化水素、オレフィンなど)をつくることを狙っています。その変換には物質反応を促す触媒が活用されます(図1)。

福田 近年、再生可能エネルギーの有力技術として太陽電池が注目されていますが、同じ太陽光を使う人工光合成との違いはどこにあるのでしょうか。

井上 光を当てると物質から電子(マイナス)が放出されプラスとマイナスに分かれるところは同じです。太陽電池は光を当てることによって光を吸収し、放出された電子が元に戻る際の落差を電気エネルギーとして外に取り出します。外にエネルギーを出したあと電子は元に戻るため、物質自体は何も変わりません。



## 教科書にはない世界への興味から 光化学研究の道を選ぶ

**福田** 先生が研究者を目指され、光化学、なかでも人工光合成の研究に取り組まれるようになったターニングポイントを教えてくださいませんか。

**井上** 研究への興味という点では、中学1年生の理科の真空状態を見る「トリチェリーの実験」※1で、当時の先生に真空部分のガラスがどうして割れないのか質問したところ、先生が回答に困って怒り出した。そのときに教科書的な説明よりも実際の自然現象はもっと深いものではないかという印象を受けたのが最初です。もう一つよく覚えているのは、高校2年生の物理の授業で振り子の実験をしたときです。教科書どおり直線の単振動での長さ・周期を測ったものの、手を離すと必ず楕円運動になる。そこで楕円運動について長文レポートを書いて提出したところ、百点満点で120点をもたらした。考察して答えを求める楽しさを味わいました。

**福田** そうした高校生はなかなかいません。チャレンジしたい、わからないことを知りたいという知的好奇心が原動力ですね。光化学を専攻されたのは何かきっかけがあったのですか。

**井上** 工業物理化学の大家である牧島象二先生が、「熱力学は出来上がった学問で、発展はない」と言われ、衝撃でした。そのこともあって1960年代に始まったばかりで、これから世界的に発展する段階にあった「光化学」に興味を持ちました。大学の卒業論文は銅触媒がテーマでしたが、修士課程に入ったら光化学を専攻しようと思いました。

**井上** 私は「3つのマイルストーン」と呼んでいます。1つ目が「本多・藤嶋効果」です。2つ目は、金属錯体(ルテニウム)で電子を4つ取って水にさらすと酸素が出るという、アメリカでの82年の発見です。

当時は電気分解以外で水を化学的に酸化できることは誰も思っていなかった。そして、翌年の83年、ノーベル賞を受賞したフランスのジャン・マーリー・レーン氏が金属錯体(ルテニウム)に光を当てるとCO<sub>2</sub>がCOに変換されることを見つけました。これが3つ目です。約10年間で3つの画期的な研究成果が出たんです。これで解決できると思いきや、その後は小康状態が続き、近年になって再びいろいろな成果が生まれている感じがします。

**福田** 現在、生物化学や金属錯体の分子触媒、半導体光触媒などいくつかのアプローチで研究が進められていますが、先生が取り組まれている分子触媒の難しさはどこにありますか。

**井上** 光を当てて電子とプラスに分けてもナノ秒(1秒の10億分の1)程度で元に戻ってしましますが、触媒で電子をうまく貯めて反応させるにはミリ秒(1秒の1000分の1)程度かかります。

また光を水滴に例えると、ナイアガラ滝なら水滴が豊富に当たりますが、太陽光は雪がちらちら降るようなものです。一つの光子が当たってプラスとマイナスに分かれたのち、次の光子が当たるのは約0.2秒後です。水から酸素を取り出すには4つ電子を取らなければならない(4電子酸化生成物)ので、一つずつ取り出すと0.2秒×3と分子の時間スケールに比べて極めて長い時間がかかります。

**福田** 自然現象における化学プロセスを考えながら触媒反応や反応時間をうまくチューニングしていくことが重要なんですね。それにしても光がそんなに密度が低いとは驚きです。

**福田** 学内に教える先生も研究室もないときですね。そのころは高分子の研究が盛んで、窒素錯体など華々しい最先端領域の研究が多く、世界的に見ても、光化学を専門とする研究者は少なかったと思います。当時は教科書もほとんどなかったでしょうし、化学実験の機器もなかったのではないのでしょうか。

**井上** 当時は可視光ではなく紫外線の光化学が中心でしたが、実験に使う水銀ランプがないのでガラス製作会社の方に相談してつくっていただきました。今考えると、よくあんな実験をしたなと思うこともありますね。

**福田** 企業の研究員になるという選択肢はなかったのですか。

**井上** 修士課程のときに大手化学会社の奨学金をいただき、すでに学生結婚していて収入も必要だったのでそのままの会社に就職する流れでしたが、博士課程に進みたい気持ちも強かった。そんなときに東京都立大学に移られた恩師から誘われ、企業の方には申し訳なかったのですが恩師の助手として採用していただきました。

## ちらちらと降り注ぐ太陽光に 反応をチューニング

**福田** 人工光合成研究の先鞭をつけたのは、1967年に発見され72年に公表された、水中の半導体(二酸化チタン)に紫外光を当てて水素と酸素を出す「本多・藤嶋効果」です。国際的な総合学術雑誌『ネイチャー』に掲載され世界的に注目されました。その後、研究はどのように進展してきたのですか。

**井上** 私はこれを「光子束密度問題」と呼んでいます。

1光子だけで次の光子を待たずに反応させる機構を検討し、過酸化水素(2電子酸化生成物)を生む構想を立て、10年間続けた一連の研究でアルミニウムやシリコンを中心元素とする金属錯体をつくり、1光子で水から過酸化水素を生成させることに成功しました。現在そのメカニズムも明らかにしつつありますが、あと15年もあれば人工光合成は分子触媒でいけると思っています。

**福田** 光子1個だけであれば光子束密度問題は回避できますね。多種多様な触媒があると思われるので、これからの進展が楽しみです。

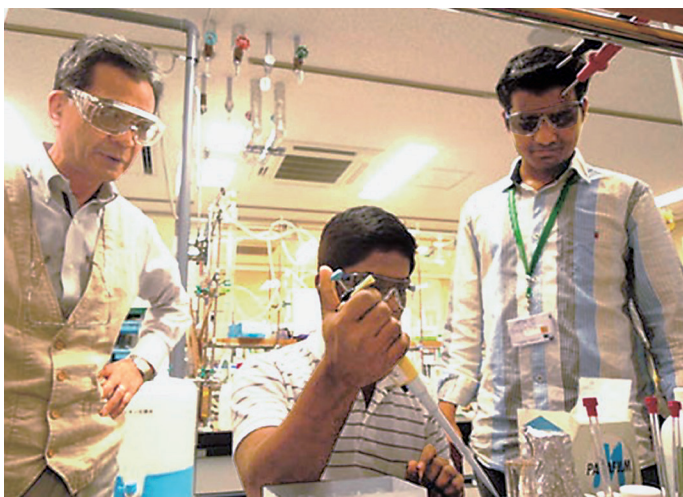
**井上** 何年後にどの国の研究者がどのような発表をするのか。面白い報告が出たらその周辺領域で場当たり的に実験する傾向はあるものの、そこから新たな発見がある可能性もあります。

**福田** 1985年に構想を立てて光子束密度問題に取り組み、過酸化水素の生成に成功されましたが、大変長い道のりに思えます。先生はどのようにモチベーションを維持されたのですか。

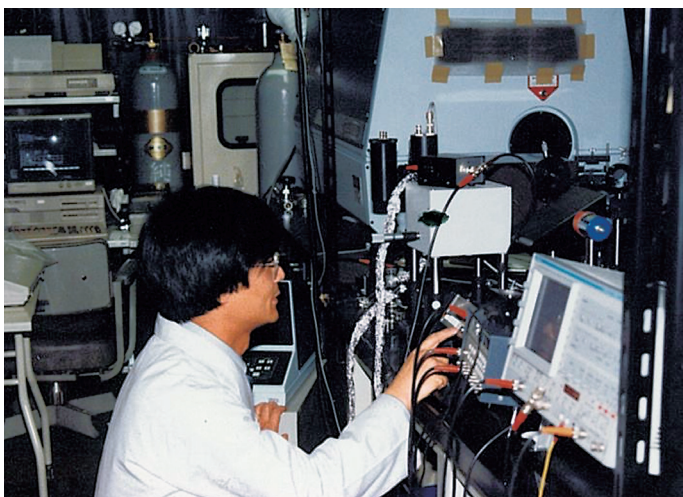
**井上** 化学産業技術の3分の1は酸化反応です。当時、エポキシ化学反応(酸化反応)を見つけてその反応機構も明らかにし、いろいろなエビデンスもあったので、光子束密度問題も必ず水の酸化生成物で解けると確信していました。

**福田** 場当たり的ではなく、経験値からきちんと道筋が見え、信念を持って取り組まれた結果と言えますね。

**井上** 数学に卓越してフィールズ賞をもらうぐらいの高校の同級生は、「答えがパッと見えて、答えが見えると証明できる」と。私はそんな感じではありませんが、この道をずっと行けば奈落の底にはならないと思っています(笑)。



分子触媒による人工光合成の実験風景



化学反応の瞬間を見るレーザーフラッシュフォトリスス実験



修士論文の発表会 光化学研究の開始



高校時代

※1 トリチェリーの実験：1643年にイタリアのエバンジェリスタ・トリチェリーが行った、ガラス管と水銀を使って真空と大気圧を示す実験。



## 鉄づくりを基軸とする 日本製鉄の幅広い研究領域を紹介

**福田** 本日はこの対談の前に、製鉄所と研究所をご見学いただき、あわせて研究開発の成功事例もご紹介しました。ご感想をお聞かせください。

**井上** これまで化学製品の製造現場を見る機会が多かったのですが、製鉄現場を見るのは初めてで、熱延工場はそのスケールの大きさに感動しました。また研究部門では、約800人の研究者が冶金、化学、電気など幅広い技術領域で挑戦し続けている姿がよくわかりました。鉄だけではなく、総合科学技術集団という印象を持ちました。しかも鋼材の加工方法まで踏み込んで開発製品の高付加価値化を図っている。本当にすごいと思いました。

**福田** 光合成に近い研究開発では、製鉄副産物の有効活用法の一つとして、鉄鋼スラグを利用した



第四高炉



熱延工場

東日本製鉄所 君津地区見学風景



富津REセンター見学風景（さきめルーム）

の流れに関する研究」も、そうしたなかで生まれた成果ですね。

**井上** そうですね。私は30代から、水素結合でエネルギーを選択的に伝えて反応を起こせないかという荒唐無稽な研究をやり始め、それなりに論文も出しており、そうしたことも評価されたのかも知れません。自由に研究のできる大学にいて恵まれていると感じます。

**福田** 我々も、大学よりは制約があるかもしれませんが、自分たちがやるべきと思った研究に信念を持って日々取り組んでいます。将来の儲けるネタを発掘するというのも企業研究の責務ですので、業績をあげることを前提に、2〜3割は自由な発想で自分たちがやるべきと思った研究をやってもよいと考えています。人材育成では、先生はどのようなことを心がけていらっしゃいますか。

**井上** どうしたらオリジナリティが生まれるか答えがないなかで、大切なのは勇気づけることです。今年ドクターを取得して京都大学に行った大学院生が二酸化チタン微粒子の透明分散液をつくったとき、研究室ではその人の名前を付けて「佐野粒子」と呼びました。他にも〇〇法など、発案した学生の名前で呼ぶようにしています。

**福田** 大学生や若い研究者を見ていて、もちろんある程度の学力は必要ですが、発想はその人の性格、資質によって異なります。そこをいかに伸ばすかが大切ですね。

**井上** 大学4年生のときにはそこまで活躍すると思わなかった人もいれば、学生時代からすごい人もいます。この対談に以前登場した細野秀雄君とは研究についてよく議論をしましたが、在学時代からずば抜けていましたね。

藻場造成によるブルーカーボンの取り組みを展開しています。研究所でラボ実験設備「シーラボ」をご見学いただきましたが、ご感想はいかがですか。

**井上** なかなかユニークですね。磯焼け修復の経時変化が写真で紹介されていましたが、わずか半年、1年の変化に大変驚きました。ただし光合成で見ると、海は水深20メートルを超えると光が当たらない。海と陸の光合成量を面積あたりで比較すると海は陸の約5分の1ぐらいだと言われています。CO<sub>2</sub>の吸収量を高めるには相当な面積が必要です。

**福田** 日本製鉄では現在、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業として、臨海製鉄所の地の利を活かし、海藻を生産して製鉄プロセスで炭素源として利用するマリンバイオマスの地産地消を目指しています。そこではライフサイクル制御やゲノム編集の導入などにより、マリンバイオマスの大量・安定生産技術の開発に取り組んでいます。

**福田** 私は人の能力を評価するのは20代ではなく、学び考え、ある程度のことを経験した30代後半から40歳ぐらいだと思っています。学力も大切ですが、採用のときはその人が伸びそうかどうか見て、可能性を感じた人にきてもらっています。

日本製鉄の研究部門には、鉄鋼研究、先端技術研究、プロセス研究の3つの研究所があります。鉄鋼研究は蓄積された延長線上の研究が中心なので宮々とやる一方で、先端技術研究はオリジナリティを持つてはじけたほうがいい。カーボンニュートラルを志向する変革期では、プロセス研究も含め、ベンチャー企業をつくるぐらいのチャレンジ精神を持つてほしいと常々言っています。自らの考えと執念を持つて研究開発に取り組む人材が大切です。

先生は、JSTさがけ※3「光エネルギーと物質変換」領域研究総括として、オールジャパン体制で研究を進めながら若手研究者の育成にも取り組まれました。人材育成の点ではいかがでしたか。

**井上** さきがけは、ナンバーワンと自負している研究者たちの素晴らしい集団ですから、研究は思いっきり自由にやってほしいと言いました。学会などでは、自分がやっているテーマと競争しているからとか、違うから駄目だという発言も見られることもありますが、そんなことはありません。科学はピラミッドの石を一個ずつ積み上げていく、先人の実績の上に立って研究を進めていくべきものです。実験が正しければそれは事実です。さがけでは、研究テーマの応募条件も年齢不問、自分が若手だと思えば何歳でもいいと。残念ながら採択できませんでした。実際に60歳以上の人も応募してきました。一人ひとりの思いを大切にしたいですね。

その一環として、研究所に大型水槽をつくり、そこに入れた藻類でCO<sub>2</sub>を吸収させる技術開発を行っており、2030年には実用化を視野に入れたパイロット規模の試験設備をつくる予定です。ただしCO<sub>2</sub>の吸収については、ご指摘のとおり、相当の面積が必要となりますので、実用化に向けては、その点も考慮して検討していきたいと思っています。

## 純粋な気持ちで研究に取り組む 若い世代には勇気を与える

**福田** 先生が研究で心がけていること、大切にしていることは何でしょうか。

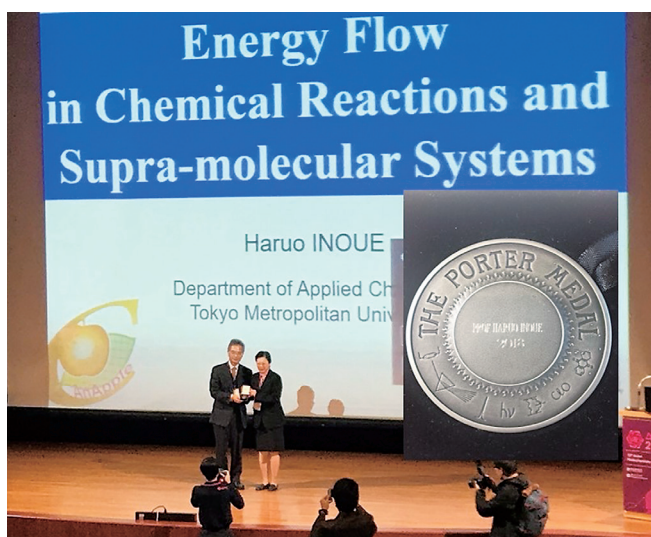
**井上** まず、専門分野だけでなくあらゆることに興味を持つ好奇心が大切です。私は散歩しているときや大学院生とディスカッションしているときに、アイデアが浮かぶことが多いのですが、共通しているのは集中しているときです。また、学会の聴講時は、100%その話を聴いているのではなく、聴きながら私だったらこうするなど、自分の研究のことを考えるのが癖になっていますね。

**福田** 自分だったらと考えるのは、前提として話を真剣に聴いているということでしょうね。企業も基本的に同じで、研究者は自分の研究が好きで、オフのときも、常に自分の研究のことを考えています。いつも考えている。そういう人であればアイデアは生まれません。

先生は2018年に光化学分野における最も権威ある賞である「ポーターメダル」※2を授与されました。受賞テーマの「化学反応におけるエネルギー



さがけ領域会議（領域アドバイザー、さがけ研究員と共に）



Porter Medal の受賞(2018)

※3 さきがけ：戦略的創造研究推進事業。(国研)科学技術振興機構(JST)が実施する競争的資金の一つ。

※2 ポーターメダル：1967年にノーベル化学賞を受賞した光化学者、ジョージ・ポーター卿にちなんで設けられた光化学分野で最も権威のある国際賞。



## つなぎの技術を利用しながら 再生可能エネルギーの社会実装を目指す

**福田** 現在、日本製鉄ではカーボンニュートラルに向けた取り組みを多角的に進めています。NEDOの「グリーンイノベーション基金事業／製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト」のなかで進めているSuper COURSE50もその一つです(図3)。私たちのチャレンジについてご意見があればお聞かせください。

**井上** 日々大規模な鉄鋼生産を継続しながら、2050年にはカーボンニュートラルを実現する目標を掲げられ、積極的に研究開発に取り組まれている企業姿勢に感銘を受けました。人工光合成もそうですが、明日すぐに水素というわけにはいかないの、社会として段階的に発展させるつなぎを考えてそれを実行しながら進むことになると思います。例えば、発生したCO<sub>2</sub>をCCSで地中に貯留するなど、つなぎの技術が必要ですね。CCSで100%いける確固たる見通しは立ちませんが、1番目のつなぎの技術として有望です。2番目は、まだ長期的な見通しは難しいものの、電気エネルギー源としての太陽電池だと思います。そして、3番目は直接水分解である「人工光合成」です。人工光合成で開発した触媒は太陽電池の電気分解の触媒にも活かされますが、人工光合成は直接分解するのでエネルギー効率上有利です。

**福田** 現在、再生可能エネルギーではエネルギー変換効率の競争が激化しています。社会実装の指標を先生はどのように考えていらっしゃいますか。

### 時代の変革期において

#### 新たな挑戦に踏み出す鉄鋼業

**福田** 鉄鋼業は現時点でCO<sub>2</sub>を大量に排出する産業と言われていますが、実は、鉄は金属のなかでは還元しやすく、同じ重さでみると製造時のCO<sub>2</sub>排出量が他素材に比べて少ない素材です。例えばアルミをつくるには大量のエネルギーが必要で、その結果相当量のCO<sub>2</sub>が発生します。また、鉄はリサイクル性に優れた素材でもあります。鉄は、酸素との結びつきが弱く、スクラップ中の不純物を

**井上** インプットとアウトプットのエネルギー比を、再生可能エネルギー因子(REF<sup>※4</sup>)と呼んでいます。分母を「システムをつくり運転するために必要な投入エネルギー量」、分子を「システムが出力するエネルギー量」とすると、本来はその数値(REF)が1を超えなければ実用価値はありません。1以下であれば投入エネルギーをそのまま利用したほうがいい。高価で貴重な材料が必要だと投入エネルギーが大きくなりREFは低くなります。

**福田** ハードルはかなり高いですね。  
**井上** ただしREFの評価は難しく、例えば石油エネルギーは、約30%が石油を使いやすく改質するためのエネルギーとして使われるため、REFは0.67です。石油は地球資源の食いつぶし型なのでいまあるものを使えばいい。それで成り立っています。再生可能エネルギーを考えると、現在はそこを指標に石油の0.67を超えるもの、同等以上であればすぐにでも導入するべきだと思います。**福田** 太陽電池はまだそこまでいいっていないんでしょうか。

**井上** 天候変化に加えて、寿命や税金、安全性の担保まで含めたインプットエネルギーの評価は難しいのですが、0.67は超えると思います。そういう意味では積極的に導入すべきだと考えています。まず、太陽電池で水を電気分解して、その1周遅れとして例えばNEDOの「人工光合成化学プロセス技術研究組合(略称：ARPCHEM)」のような半導体で水から水素をつくる取り組み、そしてさらに1周遅れて私たちがやっている分子触媒という位置づけだと思っています。いずれの技術も日本がかなりリードしています。

を酸化精錬で多く取り除けますので、スクラップから再び高品質な鉄鋼製品をつくることができます。LCAの観点からも、基礎素材として使われる金属は、今後も鉄であり続けると思っています。

鋼材強度についても、自動車で使用されている鋼材は、ここ10年で3倍の強度になりましたが、理論強度の5分の1程度で、鋼材全体でみても理論強度の半分以下しか使われていません。これからも我々は鉄鋼研究において無限の可能性を追求していきます。また、最近は炭素繊維など多素材との競合もあり、お客様での加工や、例えばクルマの車体構造の提案まで踏み込み、鉄鋼材料利用の最適化を志向しています。

**井上** すばらしいですね。鉄は一見研究し尽くされてきたように思われがちですが、微量元素の添加などで物性が変わりますよね。元素の種類、添加量、添加方法を組み合わせると無限に近いと思います。

**福田** 添加元素に加えて、熱処理の仕方や加工歪みの与え方でも材料特性は変わります。インフラから自動車、家電など用途が幅広いなかで、強度、靱性、耐水素脆性などの材料特性を緻密につくり分けることができます。

最後に先生ご自身の研究課題やビジョン、抱負をお聞かせください。

**井上** 先ほど、あと15年あればとお話ししましたが、1日も早く人工光合成の社会実装を実現していく。それが抱負でありミッションだと思っています。植物の光合成によるエネルギー変換効率は1%未満なので人工光合成で10%まで上げられれば、先ほどのREFの問題は別として、面積を10分の1にできる。できるだけ植物の面積の邪魔をしないようにできるのです。タイムラインでいうと、2030年に変換効率10%をラボ実験して有

### Super COURSE50高炉

#### 外部水素を用いた水素吹込み

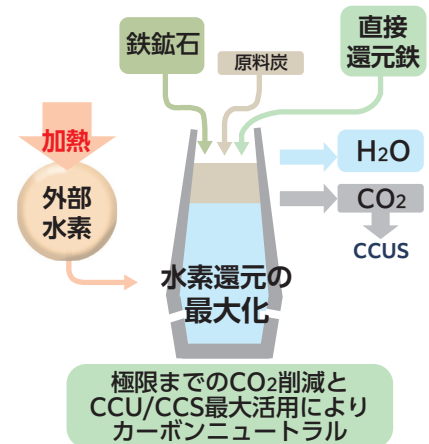


図3 Super COURSE50高炉における還元の仕組み  
日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050より



富津REセンター見学風景(きわめルーム) Super COURSE50の試験高炉で製造した鉄

力な技術を絞り込み、その後インフラ整備も含めて2050年の実用化を実現したいですね。

また、基礎化学的な視点に立ち、有力ないくつかのつなぎを確実に形にしながら、若い世代を中心に日本が世界をリードし続けてほしいと思います。人工光合成の実現はいわば駅伝で、各区间を全力で疾走し次世代にバトンをつなぐようなものです。光子束密度問題では、1光子でいける反応を見つけることができたので、これから世界のどこかの国で、その成果を発展させてくれることを願っています。

**福田** 大学と企業で社会における役割は違いますが、研究に対する思いは同じ側面があると感じながらお話を聞かせていただきました。基礎素材として歴史を持つ鉄も、カーボンニュートラルなど時代の変革期において、製品だけでなくプロセスも大きく変わろうとしています。新たな時代に向けて挑戦が続けていきます。本日は貴重なお話をいただきありがとうございました。

(この対談は、2022年10月5日に日本製鉄REセンターで開催されました)

### 井上先生の 監修本を プレゼント!



井上先生監修の「夢の新エネルギー「人工光合成」とは何か」(講談社)を、抽選で5人の方にプレゼントします。ご希望の方は、巻末の読者アンケートはがき、または読者アンケートWebサイト(P300)から応募ください。なお、当選者の発表は発送をもってかえさせていただきます。