

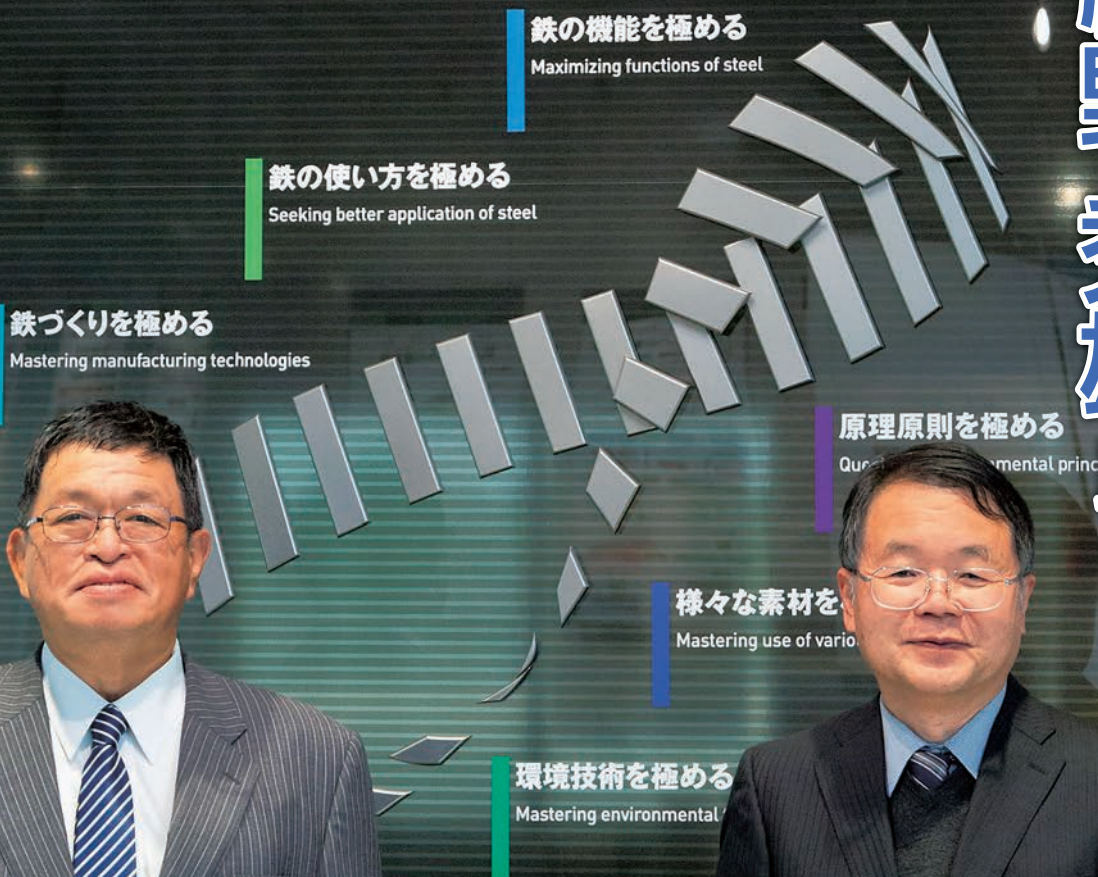


小野山 修平

日本製鉄(株) 代表取締役副社長

細野 秀雄氏

東京工業大学 元素戦略研究センター長
名誉教授・特命教授



NIPPON STEEL
日本製鉄株式会社

オリジナリティーを追求する信念を貫き、
材料科学のフロンティアを切り拓く

従来の性能を飛躍的に高める次世代の半導体や、社会にエネルギー革命を起こすと期待される超伝導物質の発見など、材料科学の新たな可能性を拓き続ける東京工業大学教授の細野秀雄氏。ありふれた物質と物質を混ぜ合わせて反応させ、まったく新しい機能を生み出す現代の「錬金術師」と呼ばれています。本年の技術対談は、細野氏の革新的な発見事例を紹介いただくとともに、研究者としてのこだわりや、成功するチーム研究のあり方、鉄鋼業への期待などを伺いました。

酸化物にこだわり 材料科学の新大陸を開拓

小野山 本年は、ありふれた材料から数々の新発見をもたらし、世界的に注目を集める材料科学者、細野秀雄先生をお招きしました。先生は、スマートフォンなどに搭載される透明の高性能薄膜トランジスタ(TFT※1)液晶の材料となるアモルファス酸化物半導体(IGZO※2)や、半導体・金属・超伝導に変身可能な電気が流れるセメント酸化物、そして、これまで不可能とされていた鉄系超伝導体など、常識を覆す発見を次々に発表されています。まず初めに、さなる可能性を秘めたこれら発見の経緯についてお聞かせください。

細野 どの事例も、初めから実用化を考えていたわけではなく、透明な酸化物を中心に人がやっていない研究をやり続けてきた結果です。IGZOは、シリコンでなければアモルファスの半導体は動かない、ましてや酸化物のアモルファス半導体などあり得ないとされていたなかでの成果でした。酸化物の研究を続ける過程で、消費電力を抑えながら高速処理を実現するトランジスタが求められるようになり、時代ニーズ

とマッチしました。今や液晶だけでなく大型有機ELテレビにも採用され世界制覇の勢いです。研究を始めた当時は、まったくそんなことを想定していませんでした。

小野山 長年、酸化物に電気を通すことを研究テーマに掲げ、信念を貫いてやり続けた結果が時代ニーズと合致したということですね。具体的にトランジスタ材料をターゲットにされたきっかけはあったのですか。

細野 曲がるエレクトロニクスに関するIBMの論文が出た2000年ごろは、発光素子もトランジスタも有機半導体という気運でしたが、実際に薄膜トランジスタをつくってみると性能が低い。そのとき研究室にいた3人で議論して、これならうちのオリジナルの酸化物のアモルファス半導体でやってみようということになりました。

小野山 ほかにない新しい研究を進める上でご苦労もあったのではないのでしょうか。

細野 企業の研究者と比べれば、大学の研究者はある意味気楽なものです。実用性を考えずとも、新しい発想で成果がまともな論文になればいいわけです。あとは単純に、アモルファスシリコンなど皆がやっていることをやりたくなかった。世界的にオリジナルティーがあり、勝てる研究をやったかったです。

◎ プロフィール ほその・ひでお

1953年埼玉県生まれ。82年東京都立大学大学院工学研究科博士課程修了(工学博士)。米国ヴァンダービルト大学客員准教授、名古屋工業大学工学部助教授、東京工業大学助教授、岡崎国立共同研究機構分子科学研究所助教授、東京工業大学フロンティア研究機構&応用セラミックス研究所教授を経て、2012年同大学元素戦略研究センター長、19年より同大学名誉教授・特命教授。Otto-Schott研究賞(ドイツ・アップベ財団/1991年)、W. H. Zachariasen 賞(94年)、紫綬褒章(2009年)、恩賜賞・日本学士院賞(15年)、米国物理学会賞(15年)、日本国際賞(16年)、MRS Von Hippel賞(18年)などを受賞。著書は、『透明金属が拓く驚異の世界』(ソフトバンククリエイティブ/06年)、『好きなことに、バカになる』(サンマーク出版/10年)、『酸化物半導体と鉄系超伝導-新物質・新機能・応用展開-』(シーエムシー出版/10年)ほか多数。

* 研究分野：無機材料科学、特に酸化物半導体、新超伝導物質、電子化物、磁気共鳴など



IGZO-TFTの採用で初めて実現した大型有機ELテレビ

※1 TFT: Thin Film Transistor. 半導体に絶縁体を介して電場をかけることで、半導体上の電極の間には電流を制御する素子。電子回路ではスイッチとして使われる。液晶や有機ELディスプレイには、大型のガラス板の上に大面積に均質な半導体を形成することが必要なので、ガラスのようなアモルファスが圧倒的に有利。使われる半導体中で電子が動きやすいほど速い応答速度とクリアな画面表示ができる。

※2 IGZO: インジウム、ガリウム、亜鉛、酸素で構成された酸化物半導体の略称。

小野山 一方、発見を報告した2008年の論文が引用件数で世界一を記録し、2013年のノーベル賞の有力候補にもなった鉄系超伝導体はどのようにして生まれたのですか。

細野 磁気モーメントの強い鉄は超伝導にならないという常識が私にはなく、できたときになぜ周りは大騒ぎするんだろうと思いました。確かに鉄はそのままでは超伝導になりませんが、例えば、消火に使う水は、燃える水素、燃やす酸素からできている。化合物と単体では性質が異なるのが当たり前です。超伝導になった鉄は鉄の化合物(オキシニクタイト化合物)なので、そんなに驚くことではないと思っています。

常識という意味では、例えば超伝導現象を初めて微視的に解明した「BCS理論」を根拠に、約30 K(−243.15℃)が超伝導の臨界温度の限界とする「BCSの壁」があり、研究者の間で暗黙の了解となっていました。ところが、あとなって論文や引用文献を見直すとそんなことはどこにも書いていない。こういうことが意外と多いのではないかと思います。

小野山 世のなかで言われ続けてきた常識を根拠の元までさかのぼると、事実とは異なる場合もあるわけですね。疑問を持ったときに、常識とされていたことでも再検証する姿勢が大切ですね。

基礎と周辺の知識を持ち 物質を眺める「大局観」が大切

小野山 先生は著書で、進学した高等専門学校で担任が実弟(宇井倬二博士)だった関係で出会った公害問題の研究者・宇井純先生の「信念を貫く姿勢」に憧れたと書かれています。「学問を究め、自分

の分野を見つけないさい」という宇井先生の言葉に背中を押されて東京都立大学工学部に進まれ、そこから研究人生をスタートされています。現在までトランジスタ、超伝導、アンモニア合成の触媒などまったく異なる分野の研究に挑戦されているようにも見えますが、関連性はあるのでしょうか。

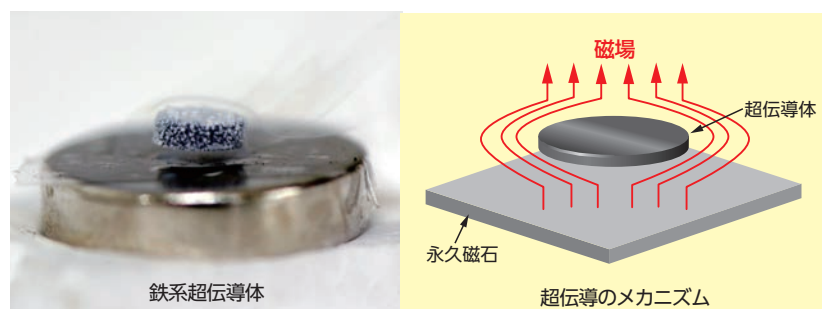
細野 見かけが違うだけで、実はすべて同じなんです。電場をかければトランジスタ、電子と化学反応させて触媒、電子同士がくっつけば超伝導になるように、基本は「固体のなかの電子をどのように使うか」だけです。

小野山 いずれも物質の性質を的確に捉え、手を加え、新たな機能を引き出した結果だと思いが、世間をあつと言わせる発見を次々と実現されています。継続して成果を生み出す秘訣のようなものはありますか。

細野 自転車に1回乗れるようになると絶対に忘れない感覚と似ています。継続して何回か経験すると、感覚的に「次はこの辺をやってみよう」といういきそうだとわかります。また、独自の発想やそのときの共同研究者、研究室の雰囲気など、研究がうまくいく要素があります。雰囲気とは仲がいいという意味ではなく、議論のなかで多面的な意見が出て、そのなかからこれをやってみようという次のアプローチが見える。そういう意味で、研究室の雰囲気は極めて大切だと思っています。

小野山 また、先生は「基本が大切」とも言われています。基本となる専門分野の知識をしっかり持っていないと横に枝を伸ばすことはできませんし、一方で有機化学、無機化学、材料など特定の分野だけできても新しい研究を続けるのは難しい気がします。軸となる研究のほかに、その周辺をカバーするような知識を持つことも重要ですね。

鉄系超伝導体と超伝導のメカニズム



永久磁石の上で浮く超伝導体(左写真)。超伝導体に磁場を加えたとき、磁場がある一定の強さを超えない限り、超伝導体内部に磁束が侵入しないという超伝導体特有の現象(マイスナー効果)によるものだ(右図)。そのため、磁性を帯びやすい鉄を含む物質は、超伝導体にならないと考えられてきた

東京都立大学4年時に恩師 川副博司先生(右)と一緒に。川副先生には卒研から博士課程修了までお世話になり、1993年に東京工業大学に移籍してペアを組んで99年まで研究室を運営した

細野 おっしゃるとおりです。化学や材料、セラ

ミックスも結局は固体を扱うので「固体物理^{※3}」は不可欠です。固体のサイエンスには化学も物理も必須で、学問領域別に分ける必要がないと思います。研究を進めるには化学、物理などの学問別に学ぶのではなく、物質に合わせて学ぶべきことを学んだほうが、より本質的なことができると思います。私はもともと化学の人間ですが、光ファイバーの関係でフォトニクスとかかわり、酸化物質半導体では応用物理、超伝導では物性物理との接点が多かった。材料屋でありながら半導体や物理に近い領域のファンダメンタルを持っていたこともよかったと思います。世の中で革新的なことをやっている人は、例えば化学の研究者でも、物理のファンダメンタルをきちんと理解しています。1つだけをやっていると面白い現象も見逃してしまいますね。物質を眺めるときの大局観が大切だと思います。

オール・オア・サムシングが次への新たな発想を生む

小野山 企業は一般的に、成功や失敗に対してオール・オア・サムシングの評価、価値意識が強いのですが、先生はオール・オア・サムシングの考え方を大切にしていますね。その思いをお聞かせください。

細野 それは材料や物質の分野の特徴だと思っています。最初にどんな立派なことを考えてもあまり意味がなく、取り組んで出てきたものが何かということ。例えば、月に行こうと思っただけで一生懸命全速力で向かっていたら方向がズレていたが、後ろを振り返ると地球からは見えない月の裏側が見

えた。そういうことがあるんです。動いて、一生懸命、失敗を重ねながらやっていると見えなかったものが見えてくる。当初の目的としては失敗でも、見えてきた違うところを目指せばいいと思っています。むしろ最初に描いたストーリーどおりに

なかったことから出発したほうが、はるかに面白く、大きな成果につながりやすいと思います。

小野山 失敗の経験を活かすのは本人次第ですね。また、発明や発見で先生は偶然という言葉も使われていますが、偶然は皆が均等に経験している、要はその偶然をつかみ取れるかどうかの違いのようないかながらあります。

細野 そうですね。電気を通すセメントやアンモニアの合成触媒になった物質に興味を持ったのは、学生実験の監督をしていたときです。温度による色の変化の過程で黄色くなったのが不思議で、そのメカニズムを説明しようとした。それが発見の「尻尾」をつかまえた瞬間です。セラミックスの関係者なら、電子的な性質などがあるはずがないと思われていた物質で、偶然もからんでいて、だから突飛に見えるのかもしれませんが。研究・計測し尽くされたセメント物質に対して、偶然出合った事象に疑問を持ち、動いて、やめずにしつこくやった結果です。

初めての鉄鋼メーカー見学製造も研究も現場が大切

小野山 本日は対談の前に、日本製鉄の製鉄現場や研究施設（REセンター）の一部をご見学いただきました。ご感想はいかがですか。

細野 化学、材料やディスプレイなどの製造現場は数多く見てきましたが、製鉄の現場や研究セン



名古屋工業大学工学部 無機材料工学科助手時代の細野先生

ターを見るのは初めてでした。まず、大量につくる規模の大きさが他とまったく違うと感じました。液体である溶鋼から固めるプロセスで圧延・熱処理などいろいろな工夫をして、自在に形状や特性をつくり込んでいく姿を、鋼の熱を体感しながら見学できて大変面白かったです。

小野山 用途や求められる特性に応じて、同じプロセスで成分調整や熱処理、さらには表面処理などのプロセスにより材質を大量につくり分けるのが、鉄鋼材料の特徴です。研究センターはいかがでしたか。

細野 構造材料の実験が、大学ではできない大きなスケールで行われているのを見て、やはり規模を想定した実験をしないとわからないことが多い、大学での構造材料の研究の限界を感じました。

小野山 船舶用材料では使用時における安全性の確認のために8000トンの引張試験など大がかりな実験が不可欠です。ただ大量生産する鉄鋼材料の場合は、相当大きな規模で実験しても300トンクラスの実機での再現性となると難しい場合もありますね。今は実験とシミュレーション（計算科学）の両輪で、そこをいかに効率良く、正確に進めていくかを追求しています。

※3 固体物理：金属、半導体、誘電体、磁性体など固体物質の性質を扱う物理で、その原子的構造や電子・原子核の運動から量子力学に基づいて説明する物性物理学の一つ。

細野 研究センターの見学を通じて、大学と企業では目指すものが違うと実感しました。企業は当然ながら最終的に収益をあげる必要があります、そこでは高品質なものを大量かつ安定的につくることが前提となります。大学と企業それぞれミッションが違うからこそ存在価値があり、共同研究などの意義もあると思いましたね。



第4高炉前

東日本製鉄所君津地区・REセンター
見学風景より

小野山 私たちの製造や研究では、現場に行かずにITを使ってカメラでものを見て判断できることもありますが、製造上のポイントとなるプロセス

小野山 大学の研究においても「現場」は重要で、先生ご自身はそこでの「五感」を大切にされていますね。
細野 大事なのは、製造も研究・実験も現場に行つてその場で感じ、議論して考えることです。現場から離れると、考えたことが本当なのか不安になることもあります。私の場合、何かを考えたとき「五感」が最も優れたセンサーだと思っています。もちろん五感だけでは決められませんが、感じたことと自分の頭のなかにあったアイデアが結び付くのが「現場」だと思います。現場に行つて普段使わない神経を使うと、結果的に新しいアイデアが生まれやすいですね。音や匂い、あとはいろいろな元素を添加すると同じ金属光沢でも色が変わる。それは現場に行かないとわからない、最も興味深い点です。

スに関してはその場で見て、音を聴いて、匂いで確かめる現場での体感が大切だと思います。その上でITツールをいかにうまく使いこなしていくかが課題です。
細野 また「現場」や「経験」を大切にする一方で、自分の人生や活動期間が限られるなかで、経験することだけだと残念ながら情報量が少ない。それを補完する意味でも普遍的な真実がある歴史に学ぶ視点が大切です。「愚者は経験に学び、賢者は歴史に学ぶ」というドイツ初代宰相・ビスマルクの言葉を、昔はなんとなく嘘くさくて信用していませんでしたが、数年前から少し実感できるようになりました。自分が新しいことをやっていると思っても、よく見るとその源流は古く、今を生きる私たちが現代流のやり方をしているに過ぎない。50年くらいの周期でいろいろなものがある一度帰している。そこをもう少し真面目に現代流にやれば、研究テーマはいくらでも出てくると感じています。



製鋼工場



線材熱延工程



REセンター

多様な知を結集して 上下なく議論する

小野山 次に研究を進める上でのチーム、組織のあり方をお聞きしたいと思います。先生が考える理想の研究チームの姿はどのようなものですか。

細野 私自身の経験でいうと、学生のころ1970年代にできた光ファイバーは、電気・電子分野の人が熱分析で製造プロセスの妥当性を検証するなど、化学屋と同じことをやって実用化された。ただ電気屋は最初の入り口は開けますが、最後の出口となる肝心な部分は材料屋がいなければできません。つまり、多様な専門性を持つ分野横断的なチームが一番良いと思います。

小野山 先生の著書にありましたが、研究開発のプロセスを1〜10段階で考えたとき、0から1を生み出す人がまず必要で、そこから先は1を7に高める人、7から10をやり社会にアウトプットする人がいる。私たちはどちらかというと後半をやる仕事が多いかもしれません。

細野 富士山の登山も8合目から頂上は大変です。私はやりませんが(笑)。未踏の山を探して、麓から6、7合目まで駆け足で行ってやめることにしています。そのあとはいろいろな人とかわることが多くて大変ですから、山の全貌イメージがつかめたら、やめるようにしているんです。

小野山 また、リーダーとしてチームを率いていくなかでは、議論に上下なしの考えを大切にされていますね。

細野 10年前から6年ほど「戦略的創造研究推進事業(さきがけ※4)」の研究プロジェクトの責任

者をやっていました。メンバーの選考基準に「45歳未満。生意気なこと」と明記したら、若くて優秀だけど、本当に生意気な人が集まりました。彼らは、前の世代はたいしたことがなく、自分がやればもつとできると心のなかで思っている。生意気で頑張り人を入れて議論を活性化させることで、例えばそのなかで1人がいい結果を出すと周りが敏感に反応して、いい意味での競争も生まれるのです。良い人材を育てるためには、同世代の生意気な人をそろえて本音をぶつけ合い、真剣に議論させる、そういう環境づくりも大切だと実感しました。

例えば学会などの日本のコミュニティの多くは、他人の発表への気遣いや表敬の言葉から始まりますが、肝心の本質的な議論までたどり着かないケースが多い。それが故に、いい意味での競争も生まれず、欧米と比べて新しいものが生まれにくい土壌があるように思います。その点、超伝導のように競争が熾烈な会議では、発表に対して研究者の間で、一見喧嘩とも思えるような真剣勝負の議論が生まれます。ただし会場から一歩外に出ると喧嘩していた当人同士、仲がよいんですよ。議論はあくまでも議論として閉じられている。内心はともかく、議論を議論として閉じるというカルチャーは大事です。これがないとまともな議論が成立しません。

小野山 今年3月まで在籍した製鉄所では、製造プロセスの最適化のために管理者が必要であり、ピラミッド型の組織運営がフィットしています。最近では、システム関連のテーマでベンチャー企業の方とも接しますが、IT分野は比較的率直に議論できる文化があります。横一線で研究者が議論



戦略的創造研究推進事業(さきがけ)の研究プロジェクトより(会議終了後の記念写真)

しやすいフラットな組織運営が行われており、いいことだと思っています。製造・研究ではミッションの違いから、同じような組織運営は難しいです。製造現場をフラットな組織にすると何が起るかわかりませんし、リスクがありますね。日本が強いのはピラミッド型組織で高品質な製品をつくり出す製造業であり、フラットな組織でアイデアを出し合い国際競争力を磨く分野は比較的に弱い気がします。

※4 さきがけ：(国研) 科学技術振興機構が実施する競争的資金の一つ。社会・産業ニーズに対応した新技術の創出を目的として、戦略重点科学技術分野における課題解決型基礎研究を推進。

学び合いのなかで 人材はおのずと育つ

小野山 先生は、約20人の研究員や博士課程の学生を率いて多様な研究に取り組まれています。学生の人材育成について考えていらつしやることはありますか。

細野 私は学生から学ぶことも多いので、「指導」という言葉を一度も使ったことはありません。特にドクターを目指す大学院生レベルであればなおさらです。共同研究者の感覚で、真剣な議論などの刺激を通じて先生も学ぶ。学生や特に現場にいる研究者は強く、実験室で真正面から議論すると負けることもしばしば。極端な言い方をすれば、先生はある面では学生の生き血を吸っている笑)。お互い指導したりされたり、それでも結果的に教育として成立していると思いますし、大学院の



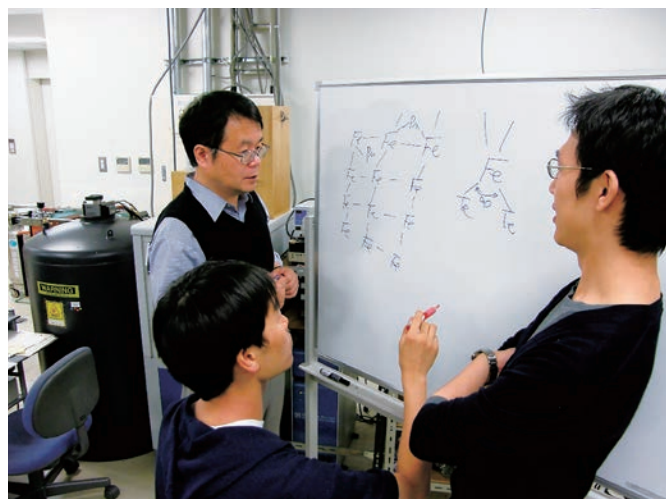
教育はそうあるべきです。「あと30年経ったら俺のほうが上だ」と学生は思っていますよ(笑)。

小野山 そうすることでご自身の研究スタンスを客観視できますし、学生にも研究者としての姿勢を伝えることができますね。

細野 自分が言っていることがいつも正しいとは思いません。一方、基本的な問題意識としては、日本はドクターに進む学生が減っているなかで、産業の将来を考えて人材が枯渇しないように、今頑張っている学生をドクターに伸ばす必要があると強く感じています。

小野山 日本製鉄では2006年から特別研究員制度を設けて、ドクター人材の採用を強化してきており、ここ数年、ドクターの採用数は増加しています。おそらく日本の鉄鋼メーカーでは一番多いのではないかと思います。最長3年、インターンシップのような形で「任期付き研究員」として本人の専門性にマッチした特定テーマの研究に専念してもらい、任期満了後は本人希望と会社希望がマッチすればそのまま採用となります。欲をいえば鉄を含めた日本製鉄の事業に魅力を感じてもらいたいと思いますし、我々もドクターが入社したいと思ってくれる鉄鋼メーカーにならなければいけません。

細野 世界的に見て化学や物理でもマテリアル関連の論文誌の最新が最近相次いでいます。材料は一番伸びている分野で、日本はその分野に強みを持っているにもかかわらず、それを担うべき材料系の不人気は目を覆わんばかりです。金属には



現在の細野研究室(東京工業大学)

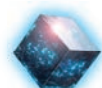
悠久の歴史があるので、材料分野は若い人から見ると蓄積が豊富な分、フロンティアがどこにあるのかわからないのではないのでしょうか。現在はAIを駆使した新しい方法論も使えるようになり、材料分野全体としては上向きですが、材料の魅力という意味で、ここに来ればこれができるといった、わかりやすい事例を提示できるといいですね。

小野山 約100年の歴史を持つ(一社)日本鉄鋼協会でも、産学連携での発表会などを積極的にに行っていますが、鉄鋼材料の面白さなど、わかりやすい情報発信ができていないのだと思います。成熟産業というイメージを変えていかなければなりません。

『エッセンシャル・フォー・ライフ』 の研究に力を注ぐ

小野山 先生は今、約100年間変わることがなかったアンモニアの合成法(ハーバー・ボッシュ法(HB法^{※5}))に代わる新しい合成触媒を研究されています。

※5 HB法：鉄を主体とした触媒上で、水素と窒素を高温・高圧状態で直接反応させ、アンモニアを生産する方法。1906年にフリッツ・ハーバーとカール・ボッシュが開発した。



すが、その狙いや今後の抱負をお聞かせください。

細野 アンモニアは農作物の肥料として知られていますが、2011年ごろIGZOが次世代の液晶ディスプレイ技術の主流になるのが見えたところで、「ベター・フォー・ライフ」ではない「エッセンシャル・フォー・ライフ」、つまり生活に直接かわるものを研究したいと思いました。衣食住、なかでも重要な食（農作物）や医療、エネルギー（水素）に関係する技術として、100年間変わらないうアンモニア合成法に着目し、新たなアンモニア合成触媒の研究に取り組んでいます。

小野山 先生が発明した新たなアンモニア合成触媒（エレクトロライド触媒）は、HB法と比較して、より低温・低圧でアンモニアを合成できる、新たな触媒として注目されていますね。

細野 その技術をベースに17年4月、世界初のオンライン型アンモニア合成システムの実用化を目指す「つばめBHB(株)」を産学共同で設立しま

した。私は直接経営にはかわっていませんが、究極の目標は水素と窒素から、「いつでもどこでも誰でもアンモニアがつくれる」ことです。新たな合成法へのハードルだった窒素分子の三重結合が低温でも切れるようになり、アンモニアの合成反応がスムーズに進むようになりました。これからは切れた窒素を使って有用な有機窒素化合物ができる可能性がある。私たちがつくった新物質群で、アンモニア合成に限らず、触媒の世界に新しいフロンティアを切り拓いていければと思っています。

また半導体関係では有機ELに代わり、無機材料で綺麗な色でもっとよく光り、かつ塗布で作製できれば面白いですね。いまそこもやっています。が、有機ELが30年かかって実用化されたことを考えると、20年はかかると思います。周りから「細野さん、いつまでやるの?」と言われますが、さすがに20年はきついので、今一緒にやっている若い生意気な世代が次をやってくれるといいですね。

小野山 最後に鉄鋼業への期待など、エールをいただければと思います。

細野 製鉄所と研究センターの見学を通して、膨大な知とノウハウの蓄積を実感しました。鉄抜きに世のなかでは考えられませんが、鉄のような構造材を中心とする領域で革新を起こすのは相当難しいと思いますが、蓄積のある分野は優秀な人材も多いのでぜひ次の展開を考え、ショーケースとなるベンチャー的な取り組みも含めて新しいことにチャレンジしていただきたいですね。そうすることで若者の目が向き、人材も集まります。志の高い生意



つばめBHB(株)の建設したパイロットプラント。すでに1年以上連続稼働している

気な学生が入ってくるいいですね。

小野山 鉄鋼材料への時代ニーズの変化を見ると、自動車の安全性・燃費向上要求が高まるなかでの鋼材の高強度・薄肉化（ハイテン化）や、建築分野では少子高齢化が進むなかで、溶接技能者の減少への対応や、個別設計となるビル建築を合理的に進めるための規格化など、仕組み自体を変える動きもあります。新しい取り組みとまではいきませんが、常に鉄の付加価値をどこに見出すかという視点に立ち、社会の発展に貢献していきたいと思っています。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、10月20日に日本製鉄REセンターで開催されました）