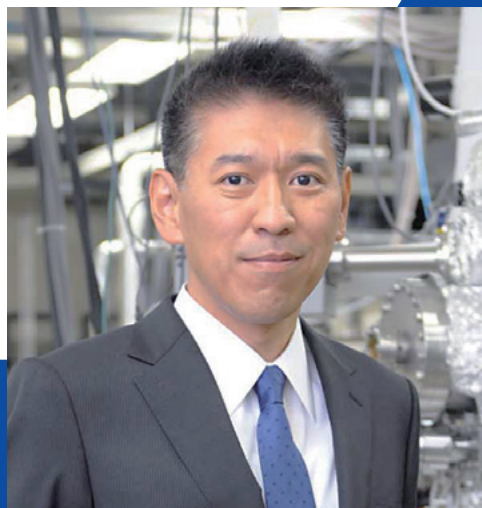


挑戦する 研究者たち CHALLENGERS



山本秀樹

NTT 物性科学基礎研究所
上席特別研究員

予想や通説と異なる実験結果が出たときこそがチャンス ——ワクワク感で世界をけん引

世界に類をみないNTTの先進的な技術を用いて、物質を構成する元素を原子・分子レベルで制御性良く積層・反応させることで自然界にない新しい物質を創り出し、その物質創製を通じて新たな現象の発現や物性の解明に取り組む、山本秀樹NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員に研究内容・進捗と研究者としての姿勢を伺いました。



オリジナルかつユニークな物質創製法で、 新物質の合成や新物性の発現に挑む

現在手掛けている研究について教えてください。

まず大きな目標から入りますと、世界的に電力消費量が增大している中で、将来的な①グリーン発電・蓄電へのシフト、②送給電・配線のロスレス化、③デバイス等のさらなる低消費電力化等への貢献をめざして、『薄膜合成法による新奇「超伝導」および「磁性」物質の創製と物性解明』というテーマに取り組んでいます⁽¹⁾(図1)。具体的には、基板と呼ばれる単結晶(原子が規則正しく並んで結晶化しているもの)の土台の上に薄膜と呼ばれる0.1 nm(原子

1層分)~10 μmの膜を成長させることで、自然界にない新しい物質の創製や、その物質の物性解明を行っています。この薄膜の成長手法として、極めて真空度が高い(常圧の10兆分の1程度)真空装置の中で、ねらった化合物の薄膜を構成する元素を、原子または分子の形で供給し、加熱した基板の上で反応させて薄膜を形成する、MBE(Molecular Beam Epitaxy: 分子線エピタキシー)法という手法を用いています⁽²⁾。

私たちはMBE法を用いて全く新しい化合物の創製に取り組んでいる、世界でも極めて先進的な研究チームであると考えています。具体的には、NTTオリジナルな装置を用いて、金属元素を2種類以上含む酸化物(複合酸化物)



- (1) 低反応温度・非平衡条件下での化学反応
原子・分子・イオンなどの究極に小さい粒子どうしの反応
- (2) エピタキシー（下地の基板結晶との相互作用）による準安定相の安定化
- (3) 酸化物の場合、一様な酸化が可能（ O_3 や O^* の利用により強酸化も可能）
試料の「薄さ」、大きな表面積・体積比
- (4) 不純物フリーの合成環境（超高真空下）
- (5) 高いスループットでの合成実験
- (6) 省資源（使用する原料が少量）
- (7) 試料が単結晶薄膜の形で得られるため、将来の素子化との相性が良い

図1 MBE法（薄膜成長法）による新物質探索・合成のアドバンテージ
（MBE法は、本来はすでに知られている物質の高品質な薄膜をつくる手法）

の薄膜を成膜する研究を展開しています（酸化物MBE法）（図2）。この装置の特長は、金属元素の供給量をリアルタイムでモニタし、供給源にフィードバックをかけることで、それぞれの金属元素を長時間安定に供給できること、また、通常は O_2 分子の形で存在する酸素ガスを、反応性の高い O （酸素）原子や O_3 （オゾン）ガスの形で供給することで、真空中で強酸化が行えることです。これらの特長を活かすことにより、自然界には存在しない結晶をつくることできるようになりました。

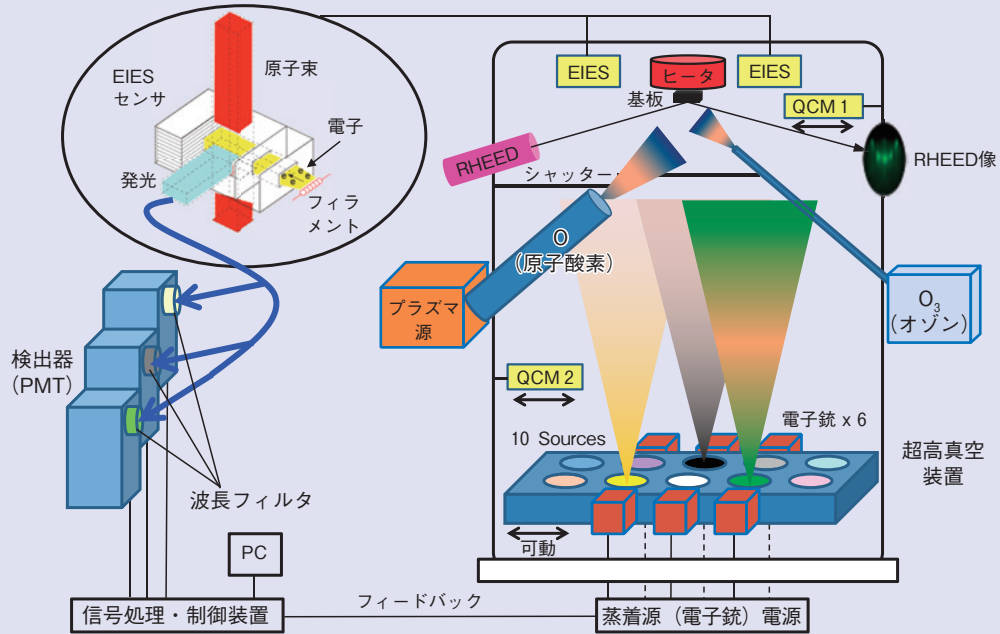
この技術を用いて、長年、新たな超伝導物質の創製と物性解明に取り組んできました。超伝導物質とは、ある一定の条件のもとに物質の電気抵抗が0（ゼロ）になる性質を持つ物質のことで、特にある一定温度（超伝導転移温度： T_c ）以下の低温で超伝導性が発現することが知られています。この電気抵抗が0の状態では、その超伝導物質内に電力ロスなしに電気を流せることになります。超伝導転移温度 T_c の常圧（1気圧）下での最高値は、現在のところ -140°C ほどで、ドライアイスが固体から気化する温度（約 -79°C ）よりさらに 60°C ほど低い温度になります。しかし、近年、超高圧（約200万気圧）下でのみ安定に存在できる別の物質で、 T_c が -70°C や -25°C と室温に近い物質が発見

されるとの報告が相次いだため、室温超伝導体は、まだ発見・合成されていないだけで確実に存在すると考える研究者が多くなりました。単なる見果てぬ夢ではなくなったといってもよいでしょう。私たちも勿論そのような物質の合成・発見をねらっているわけですが、その前段として、上記の薄膜をつくる手法を用いて、さまざまな特性を持つ新たな超伝導物質を創製し、絶縁体だと考えられてきた物質の超伝導化や、歪の導入による T_c の上昇といった現象の発見等の成果を挙げています。最近では常圧下で最高の T_c を示す銅酸化物超伝導体の基本骨格のみを抜き出した構造と、銅を含まない別の酸化物を交互に積層してつくった人工構造（人工超格子）における超伝導発現にチャレンジしており、あと一步のところまで来ています。

さらに、こちらは新物質でも超伝導体でもなく強磁性金属として知られる物質ですが、ごく最近、 SrRuO_3 [Sr（ストロンチウム）、Ru（ルテニウム）、O（酸素）からなる物質]の世界最高品質の薄膜を作製し、高品質ゆえに、これまで隠れていた、磁性ワイル半金属*というエキゾチック

* ごく最近、磁性を持つ物質の一部で実現することが判明した特殊な状態で、そこで発現するワイル準粒子は、あたかも質量を持たないかのような振る舞いをみせます。

(a) 模式図



EIES: Electron Impact Emission Spectroscopy
PMT: Photomultiplier Tube

RHEED: Reflection High-Energy Electron Diffraction
QCM: Quartz Crystal Microbalance

(b) 装置の外観

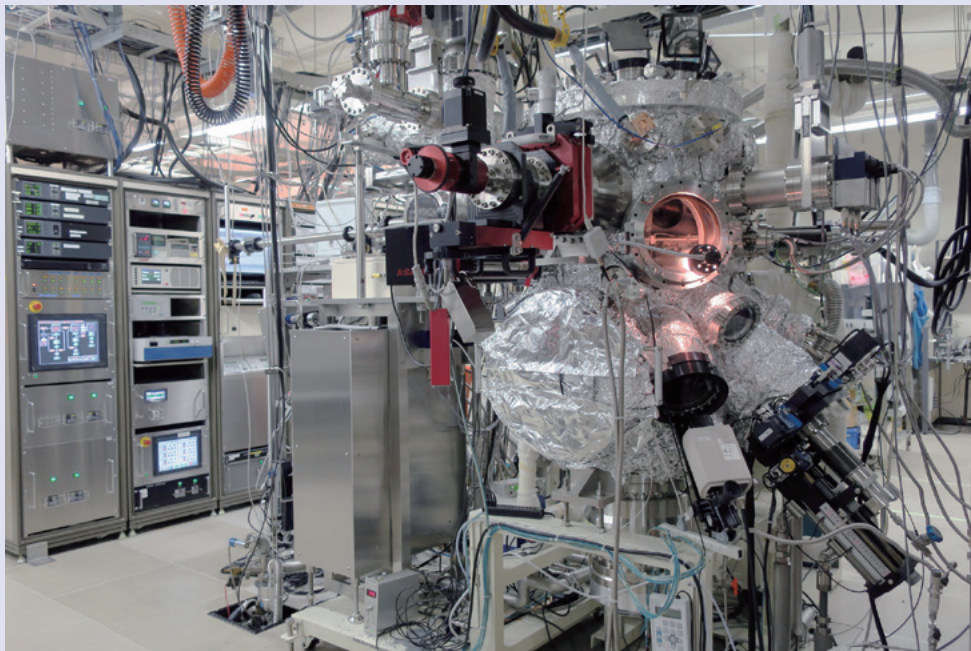


図2 複合酸化物薄膜作製用MBE装置



クな状態が発現することを見出しました⁽³⁾。私たちの薄膜作製技術と、磁場下での電気伝導特性測定技術の高さを世界に示した一例といえます。今後、電子状態を可視化するような測定等を行って、この状態の存在を一瞥のうちに認識できるようにしていければと考えています。

独自の戦略で臨まれ、世界的な成果を上げていらっしゃるそうですね。

酸化物超伝導物質の創製（1987年ノーベル物理学賞）、フラーレン（炭素原子が60個集まったサッカーボール様の分子）の発見（1996年ノーベル化学賞）、グラフェン（原子1層分の厚さの究極に薄い黒鉛）の作製（2010年ノーベル物理学賞）、窒化物半導体を用いた青色発光ダイオードの実現（2014年ノーベル物理学賞）等に端的に示されるように、新しい物質や材料の創製は、自然科学の発展に貢献すると同時に、素子の高性能化や新機能素子の実現、素子の設計思想へのブレークスルー等をもたらしてきました。

また、現代のエレクトロニクスを根底から支えるSi（シリコン）の集積回路に対し、微細化の限界（ムーアの法則の限界）の問題を克服するため、これまで使われてこなかった元素や新材料を用いるさまざまな提案や取り組みがなされています。

こうした背景の中で、私たちは酸化物MBE法を用いた新物質の創製に挑戦し、前述の超伝導物質のみならず新磁性材料の創製にも成功しました。磁石は高温になるほど磁石としての性質（強磁性）が弱まり、ある温度（キュリー温度）を超えると強磁性が消失します。したがって、キュリー温度が高い物質を創製すれば、それだけ高温で磁石として機能させることができますこととなります。このような思想の下、物質探索を行い、 Sr_3OsO_6 [Sr（ストロンチウム）、Os（オスミウム）、O（酸素）からなる物質] という新強磁性物質を世界で初めて合成・発見しました⁽⁴⁾。この新物質は、電気を通さない物質（絶縁体）のキュリー温度の記録を88年ぶりに更新し、絶縁体中で最高のキュリー温度（780°C以上）を示しました。また、 Sr_3OsO_6 は現存する磁性材料のほとんどに含まれている鉄やコバルトを含まない物質であり、磁性物質の探索に新機軸をもたら

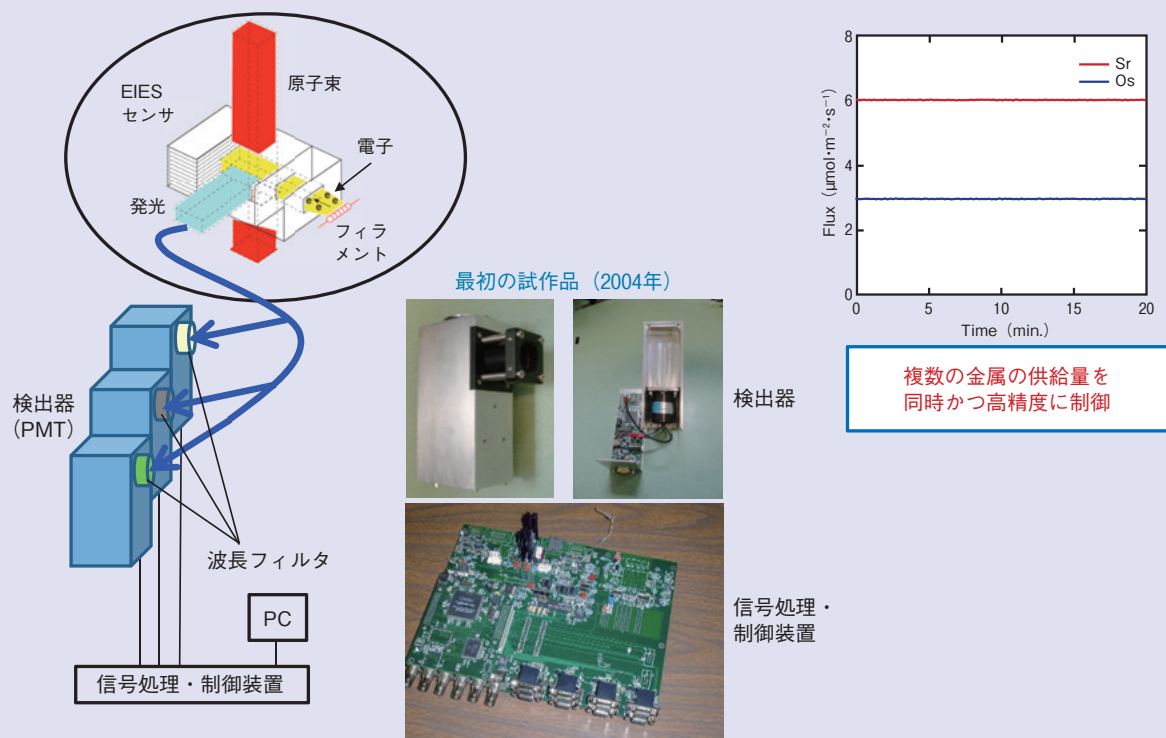
すものです。この物質の発見により得られた指針に沿って新たに創製されると期待される物質とも合わせ、室温以上の高温で安定に動作する磁気素子への応用が期待されています。

世界的な研究を手掛けられたきっかけを教えてくださいませんか。

1987年にスタンフォード大学からNTTの研究所へ移られた先輩が、基礎と応用、両方の研究に貢献しようという志を持たれてこの研究の原型をかたちづくられ、その約6年後に私が入社して先輩、兄弟子とともに3人でこの研究に携わることになりました。金属元素の供給源にフィードバックをかけて真空中で金属元素を長時間安定に供給するという技術を、NTTの研究所の外では見たことがありませんでしたのでとても衝撃的だったと同時に、この技術は、生涯にわたり大切にすべきものであると直感しました。また、この技術があれば、世の中に存在しない物質をつくるという夢のような取り組みも現実にはできると非常に引き付けられました。

2004年に先輩方からこの研究を引き継ぎ、研究職以外の期間も含め、約15年、この研究に携わっていますが、現在に至るまでにはさまざまなドラマがありました。

NTTでは他の研究機関ではできない、薄膜作製手法を用いた新物質探索や新物質合成を、上記の、長年にわたって培い、蓄積してきた独自技術によって実現しています。ところが、そのキーテクノロジーの1つ「EIES（電子衝撃発光分光）法による（薄膜を構成する）各元素の供給レートを超精密制御技術」を支える制御装置の製造を、2000年代前半に装置製造元が中止してしまったのです。私は、この技術が潰（つい）えたらまずいと思い、当時の上司と相談して仕様を固め、シリコンバレーのベンチャー企業へ特注品を発注しました。その発注から約3カ月後より1年ほどの間、スタンフォード大学に共同研究のため滞在するという幸運に恵まれ、研究の合間を縫ってはそのベンチャー企業に足を運びました。おかげで、この特注品の完成には最初の試作品（**図3**）の動作確認の段階から1人称で参画することができました。特注品の開発から15年、さらに進



化したこの技術が私たちの研究を支えているのを見ると感慨深いものがあります。

研究の現場にいと、苦しい年もあるし、小さくとも発見等が相次いで心躍る年もあります。最初の心躍る体験は入社3年目のことでした。入社直後から取り組んだテーマで得られた結果の解釈ができ、最初の論文を出版することができました。それから運もあって、薄膜成長法による最初の新超伝導体を発見できたことなどが続きました。また、応用物理学会の講演奨励賞という若手の登竜門のような賞を1996年に兄弟子、翌年に私と相次いでいただいたことで研究チームは湧きました。一方で、良いことが続き興奮気味だった私たち若手研究者に上司がかけられた「実験は純朴にやろう」という戒めの言葉もよく覚えています。実験科学は、「さまざまに実験条件を変えて、自然を相手にその摂理を尋ね、自然が返してくれる答えを基に、人間が自然を理解していく営み」ですので、上司の「純朴に」とい

う言葉の深みをことあるごとに思い出します。時を経て、ひそかに憧れていた超伝導科学技術賞 (2016年) を受賞できたことや、数々の論文を一流の学術誌へ掲載できたことも研究の大きな励みとなっています。ただし、最近は研究責任者として論文を発表することが多いので、掲載されてうれしいというよりホッとするという感情のほうが強くなりました。所内で、若手の研究者が論文掲載を勝ち取って涙しているといった話を見聞きすると、うらやましいと感じるのは年を取った証拠かもしれませんね。

めざすところは大きく (頂は高く)、アプローチは安全・確実から

上席特別研究員となられて、視野や役割はどのように変化されましたか。

研究に集中できる安定したポジションに就かせていただ



き大変ありがたいと思っています。この立場を活かして、ブレークスルーやハイリターンのために、正当・正統なリスクを取ろうと考えています。基礎研究、特に物質・材料の基礎研究でブレークスルーを生むためには、リスクをとることが重要ですが、世の中一般的には、チームメンバーの次のポジション確保や、競争的研究資金の獲得のために成果や論文の出やすいテーマを選択せざるを得ないケースが多々あり、なかなかリスクを取ることができないというのが現実です。NTTの上席特別研究員という極めて恵まれた立場や環境を活かすべく、正当・正統なリスクを取った研究の推進に努めていきたいと思っています。

IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を実現するための11のコアテクノロジーのうち、6個が何らかのかたちで、物質・材料研究に関連していますので、その意味で、責任の重さも感じています。私のテーマ「薄膜合成法による新奇超伝導および磁性物質の創製と物性解明」は、必ずしもIOWN構想の「主流」に位置付けられているわけではありませんが、歴史的には、「非主流」の研究テーマから大きなブレークスルーが生まれた例が多々ありますから、実は、私自身もそこに期待しているところもあります。

さらに、性別や国籍、使用言語に加え、専門性のダイバーシティを持った研究チームづくりもブレークスルーには重要だと感じています。同じような専門性を持ったチームはある意味ではやりやすいけれど、大きなブレークスルーは生まれにくいと考えます。新たにチームに加わった専門性の異なる若い方が、先輩はこんなことも知らないのか、と思うことがあるくらいがちょうど良いのではないのでしょうか。短期的にみると相違点が多い分だけ大変なこともあるかもしれませんが、長期的にみればその重要性を実感できると思います。

これまで課題やテーマを探る際に心掛けてきたことはありますか。

私は博士号をいただいて基礎研究所に入るところから「めざすところは大きく（頂は高く）、アプローチは安全・確実なところから」を心掛けてきました。例えば、私の研究テーマに含まれる室温超伝導体の探索などは高い頂（いた

だき）で、今の私の立場の研究者が挑戦するのに適したテーマだと考えています。ほかには、植物と比肩し得る人工光合成材料の探索なども高い頂といえるでしょう。ただし、私もそうでしたが、若いときは夢があるといきなり大きなことにチャレンジしがちです。大きな石をただ唸って押し続け、結果的に1 mmも動かないというような、all or nothingのアプローチにはならないように、小さなマイルストーンを立て、その都度、成果を論文化していくことも大事だと思います。こうした考え方は、研究所の先輩に学んできました。

基礎研究は、研究者自身が本当に好きなこと・テーマでないとうまくいきません。頂に向かって常に最短距離を走れるわけではありませんし、回り道や後退も余儀なくされることが常です。それでも頂を見ることをやめない姿勢が大事だと思うのです。また、良い基礎研究はある概念をつくる、ある概念を変える等大きなインパクトを与えます。私たちが2013年からの約10年間で合成・発見してきた、それまでの銅酸化物超伝導体での超伝導発現条件に反例を示すような新超伝導体の研究は、良い基礎研究の一例であるという自負があります。なかなか論文が学術誌に受理されなくて苦しい思いもしましたが、少なくとも研究現場にわくわく感がありました。これらの物質が新超伝導体であることは確立しているものの、一方で超伝導発現メカニズムの解釈をめぐるっては、本当に定説に反例を示しているかどうか現在でも論争が続いています。これも基礎研究では良くあることと、前向きにとらえることにしています。



潤沢な資金があるならば、どんな研究者人生を歩みたいかを想像せよ

後輩の研究者に一言お願いいたします。

近年では、「実験」「理論」「計算科学」に続き、第4の科学と呼ばれるマテリアルズインフォマティクスが台頭したことで、また、理論計算による物質中の電子状態などの予言精度が格段に向上したことなどから、以前に比べて、相当に効率良く物質探索を行ったり、薄膜の成膜条件を最適化したりできるようになりました。このように効率化でき

るところはそうしていただきたいし、私自身が浅学非才によって遠回りしてしまったようなことは、できれば後輩の皆さんには回避してほしいです。しかし、物質・材料科学は、やってみないと分からないことが多々あることもまた事実ですから、次のことに心掛けていただきたいと考えます。一つは、実験結果を再現できる信頼性の高い実験系を構築することです。これが、ある程度できたら、まず実験してみましよう。効率良く実験を進めることは重要ですが、最短距離を走ることを重要視せずに、回り道をすることも重要です。さらに、結果が再現することが前提ではありますが、予想や通説と異なる実験結果が出たときこそチャンスです。何か未知の現象や、意外な現象の表象に遭遇している可能性が大きいです。そして、あるねらいを達成するという意味では失敗のように思われる実験結果も、それだけで失敗と決めつけないことです。例えば、ねらいどおりの品質の薄膜がつかれないときは確かにがっかりします。しかし、実験結果に何らかのヒントが隠れていることも多いです。

私は若い方々に「一生生活に困らない給料をもらえて、年間1千万の研究費がもらえたら、研究者人生を何の研究に使いたいか？」と尋ねることがあります。実は、その答えが本当にやりたい研究であることが多いのです。長い目で見たとき、基礎研究ではそんな研究ができるように、またそんな研究テーマで頑張るとうまくいくことが多いでしょう。

ご存じのとおり、基礎研究ではオリジナリティが何よりも重要とされます。しかし、私はかつての上司から真に重要な技術であれば、キャッチアップも厭うべきではないと教えられました。二番煎じではダメだからと、二番煎じすらできない技術レベルに陥るのは最悪です。良い基礎研究成果は、トップグループにいる複数の研究チーム・研究機関で再現されるのが科学の健全な状態であると考えます。

研究における今後の課題を教えてくださいませんか。

数年前までは複合酸化物を構成する元素として、銅のような周期表で比較的上のほうの行にある遷移金属を含むものを対象として成膜を進めていましたが、最近ではRu, Pd (パラジウム)、Osなど周期表で銅よりも下の行に属する遷

移金属を対象を広げ、世界最高温度まで磁石としての性質を保てる物質の発見などにつながってきました。この遷移金属元素の対象をいかに系統的・戦略的に(絨毯爆撃的ではなく)広げられるかが今後の課題です。また、200万気圧といった超高压下でしか安定に存在できないけれど、室温に近い温度で超伝導転移する物質の発見は、いずれも水素化物で報告されています。現在は、ほぼ複合酸化物に限られている成膜対象をいかに、酸化物以外に広げていくかも課題だと考えています。

こうした課題に取り組むには非常に時間がかかりますし、自分の世代だけで完成するものではありません。成果を出しながら、次世代の核となる研究者を育てていくことは一番大切なことであり、技術やノウハウを継承していく必要性を感じています。これは、内部の研究者間のみではなく、私たちの研究を支える装置や部品のメーカーさんにも必要なことですので、是非技術継承していただけるようなやり方で進めていければと考えています。

参考文献

- (1) <https://www.ntt.co.jp/journal/1908/files/pdf/JN20190806.pdf>
- (2) <https://www.ntt.co.jp/journal/1908/files/pdf/JN20190820.pdf>
- (3) Nature Communications, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18646-8>
- (4) <https://www.ntt.co.jp/journal/1908/files/pdf/JN20190812.pdf>