

JST news

未来をひらく科学技術

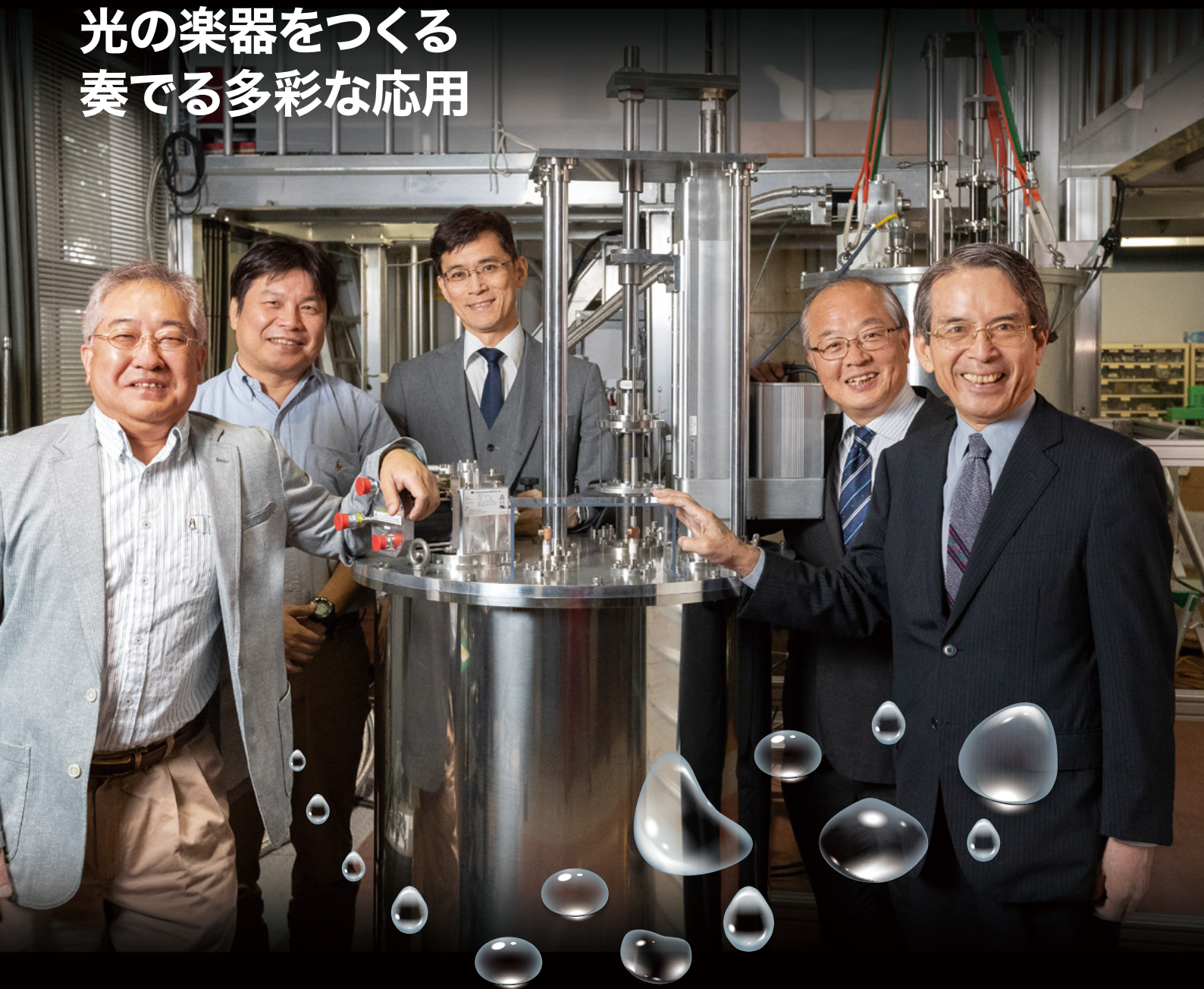
特集

磁気を使った冷凍技術で
水素社会へ一歩前進

光の楽器をつくる
奏でる多彩な応用

12

December
2019



03 特集1

磁気を使った冷凍技術で
水素社会へ一歩前進



08 特集2

光の楽器をつくる
奏でる多彩な応用



12 世界を変える STORY

阻害から分解へ
発想の転換で
革新的創業に挑む



14 NEWS & TOPICS

走りながら充電する電気自動車を開発
受電回路と駆動装置の全てをタイヤの中に



16 さきがける科学人

限りなく小さなものを見ることで
科学の可能性を広げていく

東京大学 大学院工学系研究科 総合研究機構
助教 関 岳人



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標 (SDGs) の達成に積極的に貢献していきます。



P3



P14, 16



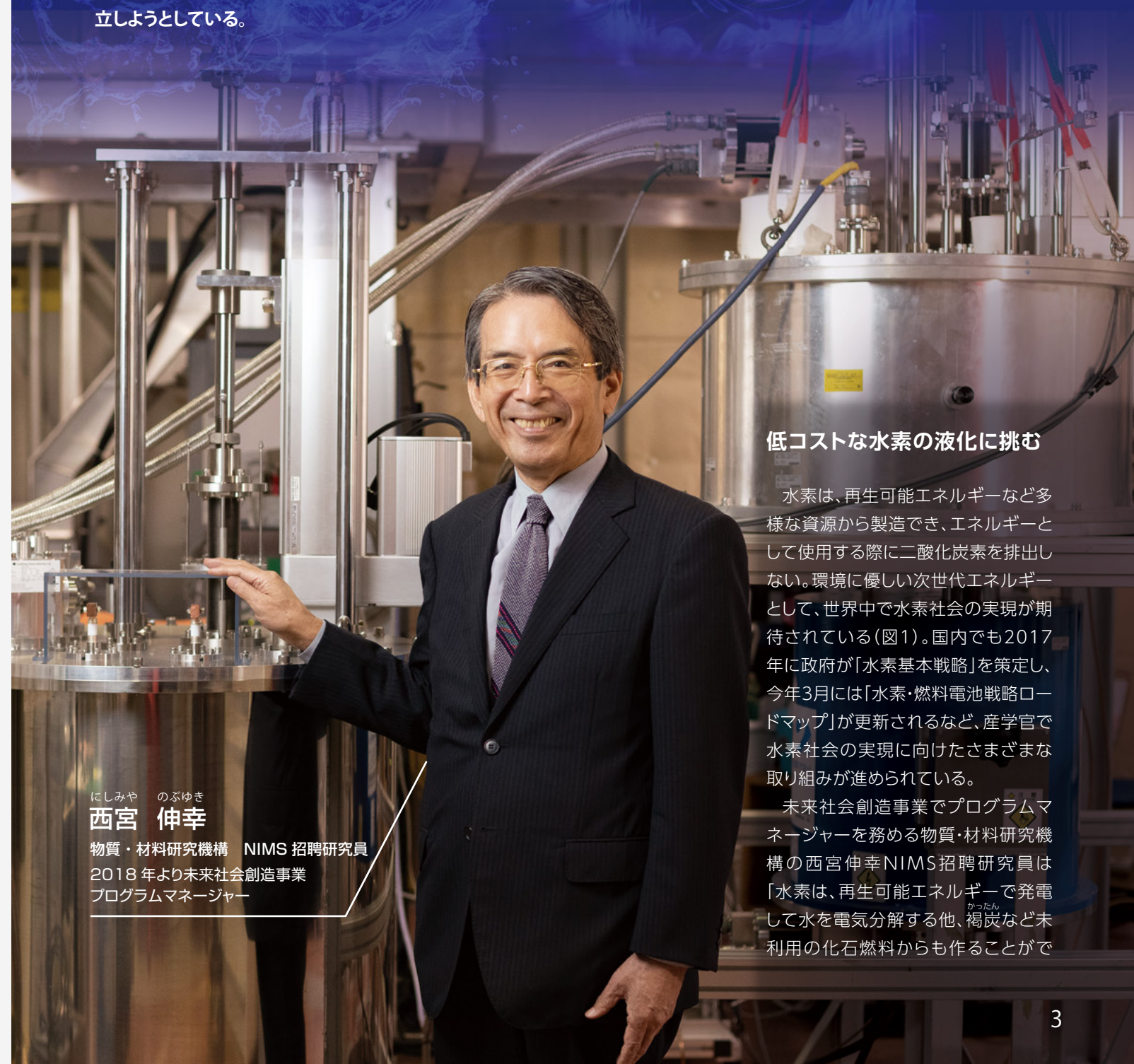
P14(上)

編集 長：安孫子満広
科学技術振興機構 (JST) 広報課
制 作：株式会社伝創社
印刷・製本：株式会社丸井工文社

特集 1

磁気を使った冷凍技術で 水素社会へ一歩前進

次世代のエネルギーとして水素を利用する「水素社会」を目指して、世界各国で技術開発が進められている。実現には、大量の水素を安全・安価に製造、輸送、貯蔵する仕組みが必要だ。このために求められるのが水素の液化で、効率的な冷凍技術の開発が待たれている。水素社会を実現するキーテクノロジーの1つと期待される「磁気冷凍」の研究に挑むのが、物質・材料研究機構 (NIMS) の西宮伸幸 NIMS 招聘研究員が率いる研究チームだ。産業界も巻き込み、10年計画で液体水素の供給の基盤技術を確立しようとしている。

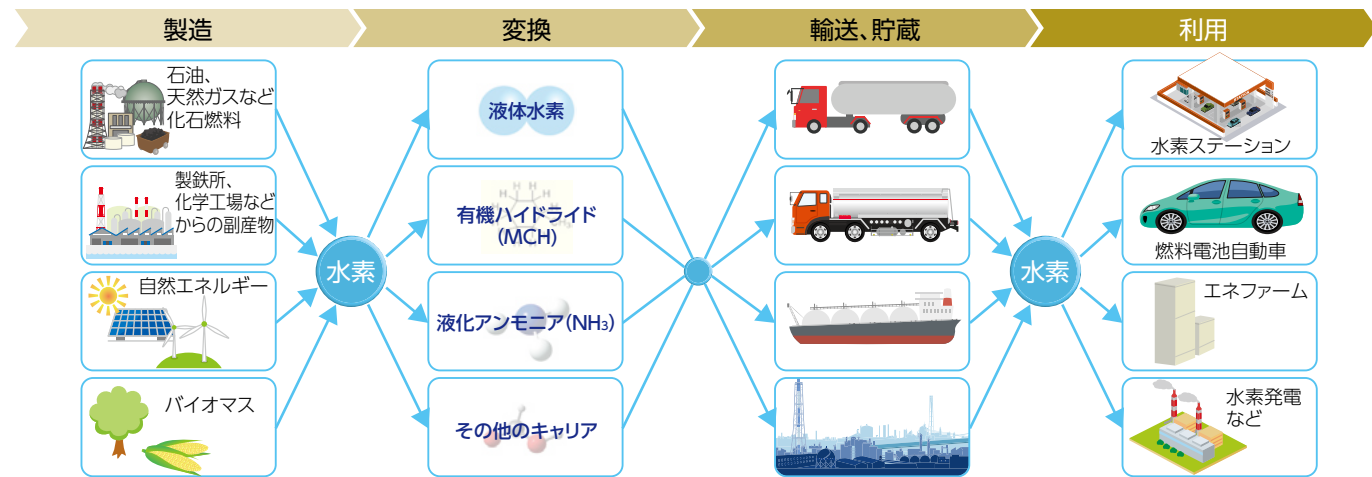


低コストな水素の液化に挑む

水素は、再生可能エネルギーなど多様な資源から製造でき、エネルギーとして使用する際に二酸化炭素を排出しない。環境に優しい次世代エネルギーとして、世界中で水素社会の実現が期待されている (図1)。国内でも2017年に政府が「水素基本戦略」を策定し、今年3月には「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が更新されるなど、産学官で水素社会の実現に向けたさまざまな取り組みが進められている。

未来社会創造事業でプログラムマネージャーを務める物質・材料研究機構の西宮伸幸 NIMS 招聘研究員は「水素は、再生可能エネルギーで発電して水を電気分解する他、褐炭など未利用の化石燃料からも作ることがで

にしみや のぶゆき
西宮 伸幸
物質・材料研究機構 NIMS 招聘研究員
2018 年より未来社会創造事業
プログラムマネージャー



■図1 水素社会では、風力や太陽光などの再生可能エネルギーの他、利用されていなかった化石燃料(低品質の褐炭)なども使って水素を製造する。製造された水素はエネルギーキャリアに変換され輸送、貯蔵され、燃料電池自動車やエネファームなどで利用される。

きます。しかし、日本で消費するエネルギーを賄うためには海外からの輸入も想定され、輸送や貯蔵まで含めたコストを低下させることが求められます」と指摘する。

大量の水素を輸送、貯蔵する際に、気体状態の水素ではかさばってしまう。そこで開発が進められているのが、水素を液化アンモニアや有機ハイドライド、液体水素といったエネルギーキャリアに変換する方法である。西宮さんは「例えば、発電所のガスタービンなどには、水素をアンモニアに変えて運んだ方がよいかもしれません。一方、燃料電池自動車の燃料や、家庭用燃料電池コージェネレーションシステム(エネファーム)などで使用する場合には、そのまま使える液体水素の方が効率的です。用途に応じて最適な方法が利用できるよう、複数の選択肢を用意することが重要です」と強調する。

3つの主要なエネルギーキャリアの中で、やや遅れを取っているのが液体水素だ。気体の水素を800分の1の体積まで圧縮でき、精製せずに使用できるといった利点があるが、他のエネルギーキャリアと比較してコストが高くなるのが弱点だった(図2)。西宮さんらはシステム化学、材料化学の力を結集し、低コストで水素を液化し、利用するための基盤技術の開発に挑んでいる。

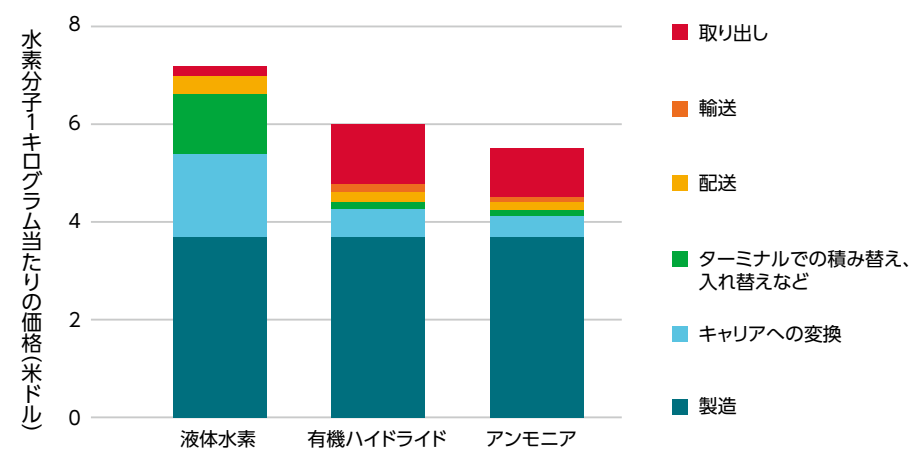
圧縮不要で液化効率を向上

液体水素のコストを押し上げている要因は2つある。1つは液化のコスト、もう1つは輸送中の蒸発(ボイルオフ)による損失だ。この2つのコストを大幅に削減できれば、液体水素は競争力のあるエネルギーキャリアになる。西宮さんは「開発中の磁気冷凍方式を用いれば、液化のコストを大幅に削減できます」と話し、こう続ける。「現行の真空断熱容器に水素を保存する場合、水素社会が到来した際のボイルオフによる損失は年間数百億円にも上るとの試算もあります。磁気冷凍方式を使えば、ボイルオフした水素を低コストで液化しながら輸送で

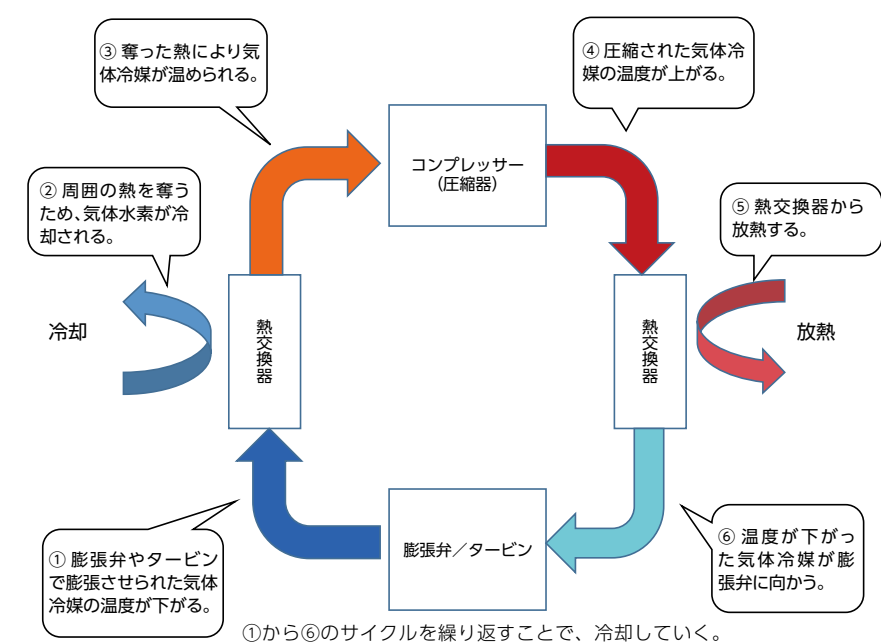
きると考えています」。

水素を液化するには極低温の20ケルビン(−253度)まで冷却する必要がある。現在は気体冷凍方式が使われている。その原理は家庭用のクーラーと同じで、冷媒と呼ばれる気体を繰り返し圧縮、膨張させた際の発熱と吸熱を利用して温度変化を生み出していく(図3)。液化効率が低く、冷媒の圧縮に大量のエネルギーを要することに加え、海外メーカー2社が特許を独占していることも、液化のコスト増大につながっている。

そこで考案されたのが、磁気を用いて発熱と吸熱を起こす磁気冷凍技術で、水素液化システム開発グループのグループリーダーである沼澤健則NIMS



■図2 オーストラリアから日本に液体水素、有機ハイドライド、液化アンモニアとして水素を輸送する場合のコストの比較。国際エネルギー機関(IEA)が試算した。現状の評価では、液体水素を用いる場合、液化コスト(水色)と輸送中の損失(緑、黄色)が大きいことがわかる。(IEA Special Reports "The Future of Hydrogen" (2019年6月)より、IEAの分析およびReuß(2017), "Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model"を基にIEAが作成した図を改変)



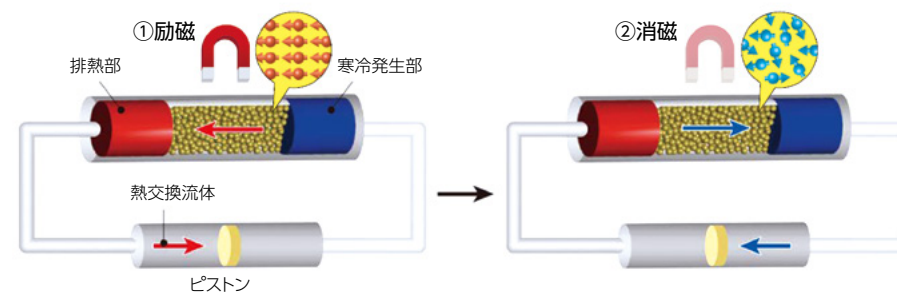
■図3 気体冷凍方式では、断熱された状態で気体冷媒の膨張と圧縮を繰り返して温度差を作る。

液体水素材料研究センター名誉・特別研究員が30年近い年月をかけて開発を続けている。沼澤さんは、開発した能動的蓄冷型磁気冷凍(AMR)サイクルの原理を「磁性体の中には、小さな磁石である電子スピンの存在します。外部から磁場をかけると電子スピンの向きがそろい、磁性体は発熱しますが、かけていた磁場をなくすと電子スピンの向きは不ぞろいになり、磁性体は吸熱します。磁気熱量効果と呼ばれるこの現象を利用し、水素を冷却していくのです」と説明する(図4)。秩序だった状態である氷が、熱を吸収してランダムな状態である水になると

イメージすれば、わかりやすいだろう。

気体冷凍方式では、冷媒の圧縮にコンプレッサーを用いるが、冷却システムの90パーセントの電力を消費するといわれる。このため、気体冷凍方式の液化効率は約25パーセント程度で、改良しても45パーセントが上限とされる。これに対し「磁気冷凍は圧縮が不要で、液化効率50パーセントがスタートラインです」と西宮さんは胸を張る。

現在、取り組んでいるのは液体窒素の沸点である77ケルビン(−196度)から20ケルビンまで冷却できる水素液化システムの開発だ。その理由を沼澤さんは「室温から20ケルビンまで冷却する技術は他の研究者も



■図4 AMRサイクルでは、シリンダーに磁性体と熱交換流体と呼ばれる気体が封入され、断熱されている。①磁性体に磁場を加える(励磁)と、磁性体中の電子スピンの向きが並び、磁性体が発熱する。温められた熱交換流体をピストンで押し出すことで発生した熱が排熱部から逃がされる。②磁場を除去する(消磁)と電子スピンの向きは不ぞろいになり、磁性体が周囲の熱を奪う。ピストンを先ほどと逆の方向に動かすと、冷却された熱交換流体が寒冷発生部を冷やす。この励磁と消磁による発熱と吸熱を繰り返し、寒冷発生部を冷却する。(NIMS NOW Vol.19, No.4より転載)

取り組んでいます。そこで、安価に予冷できる77ケルビンまでは液体窒素で対応し、その先を効率良く冷やすという独自の開発目標を設定しました」と語る。

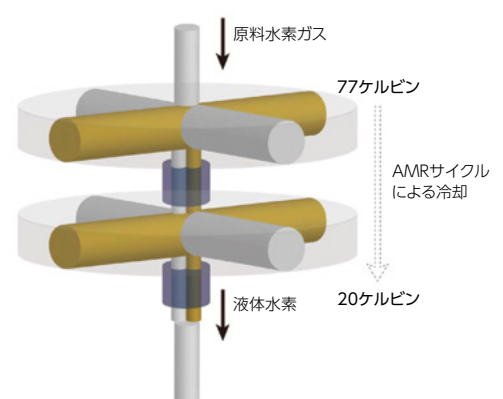
AMRサイクルを利用した水素液化の研究は多彩なノウハウが必要で、研究を実施する機関は世界でもごく少数だ。成功すれば、日本発の革新的な技術になる。しかも、この技術の利点は液化効率だけではない。

「気体冷凍方式では大規模な設備が必要で、騒音や振動も発生します。磁気冷凍技術では騒音や振動が少なく、装置も小型化できるので、市街地の水素ステーションなどにも設置できるでしょう。100ボルト程度の電力で動く永久磁石を使用すれば、液体水素を運ぶタンカーやタンクローリーにも搭載でき、ボイルオフを大幅に削減できます」と沼澤さん。

これまでのAMRサイクルでは、熱交換流体を外部のピストン部に送り出していたが、開発した新システムでは熱交換流体の移動なしで連続的に動かせる。これによりエネルギー損失を減らし、液化効率の向上に成功した。現在は複数のAMRサイクルを組み合わせたシステムを試作中で、さらなる効率化に挑んでいる(図5)。

宝の山から最適な材料を探せ

システムの開発に加え不可欠なのが、使用する磁性材料の性能向上だ。



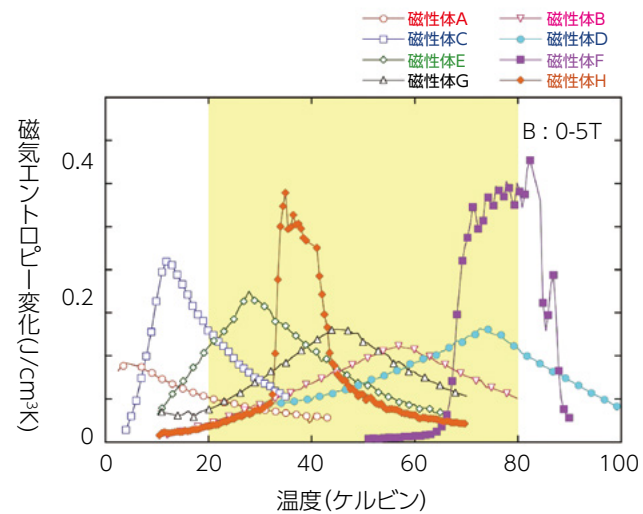
■図5 4本のAMRサイクルの寒冷発生部を使って、気体水素を冷却する。これを2段に組み合わせることで、77ケルビンの気体水素を液化温度の20ケルビンまで冷却する。熱交換流体の外のピストン部への移動をなくすといった工夫を凝らすことで、これまでない冷却効率と冷却能力を実現する。(NIMS NOW Vol.19, No.4より転載)

より磁気熱量効果の大きな磁性材料を開発すれば、大幅な性能向上が期待できる。この材料開発を担うのが、磁気冷凍材料開発グループで、20ケルビンから77ケルビンの温度範囲で磁気熱量効果を発揮する磁性体材料を探索している。NIMSの磁性材料研究には歴史があり、さまざまな材料についての知見が蓄積されている。グループリーダーの北澤英明NIMS特別研究員は「磁性体の研究は、まさに宝の山です」と目を輝かせる一方、「水素を対象とした先行研究は少ないため、物性データなどから有望と思われるため、水素の液化には適さないこともある。地道な探索が必要なのです」とも話す。

さらに北澤さんは「磁気冷凍に利用するためには、直径0.3～0.5ミリメートルの均一な球状に精密加工する必要があります。また、温度変化に耐える強度も必要ですし、水素を吸収してもろくなってしまうよう表面をコーティングするといった工夫も求められます。また、どんなに性能を高めても低コストで大量生産できなければ意味がありません」と社会への応用を目指した研究の難しさを打ち明ける。

現在、磁気冷凍に利用できるいくつかの磁性体が見つっているが、プロジェクトが必要とする20ケルビンから77ケルビンまでの全ての温度範囲をカバーする磁性体は見つからない。冷却の効果が高い材料は適応できる温度領域が狭く、反対に幅広い温度領域をカバーしようとすると冷却効果は低くなってしまう(図6)。しかし、北澤さんは「複数の磁性体を組み合わせることで目標を達成することが可能です」と自信を見せる。AMRサイクルを行うシリンダーの内部では、排熱部と寒冷発生部の間で温度勾配が発生する。そこでそれぞれの温度範囲で最大の磁気熱量効果を発揮する磁性体を並べて配置することで、効率的な磁気冷凍を実現しようとしているという(図7)。

「プロジェクトでは、既存の磁性材料を使用しても目標を達成できるよ



■図6 発熱や吸熱の能力を示す磁気エントロピー変化量が大きくなる温度は、磁性体によって異なる。磁気エントロピー変化量のピークが大きい磁性体は動作温度の範囲が狭く、ピークが小さい磁性体は広い温度範囲で吸熱・発熱ができることを示している。

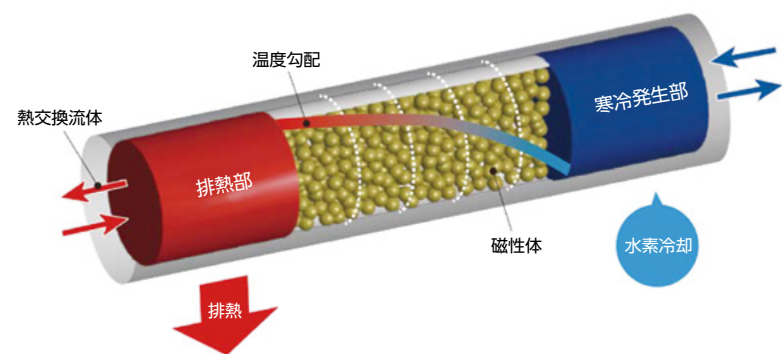
うにシステム設計を進めています。しかし、さらに優れた磁性体を開発できれば、水素液化システムの一層の効率向上が望めます。システム開発と材料開発のどちらか一方ではなく、全体を見て進めることに意味があります」と西宮さんは強調する。さまざまな候補物質から「使える」磁性材料を見つけ出す道のりは決して平坦ではないが、成果は上がりつつある。「磁気冷凍システムに適した磁性材料の候補には、すでに目星が付いています。近日中に論文を発表する予定です」と北澤さんは笑顔を見せる。

国産技術で持続可能な世界を

「水素液化への気運が高まり、機械学習やスーパーコンピューターなど研

究を推進する道具もそろい始めています。ついに本格的にオールジャパンで取り組む時期が来たと感じています」と意気込むのは、NIMS液体水素材料研究センターの清水禎センター長だ。西宮さんを支えるプロジェクトマネージャー補佐の役割を担っている。液体水素研究は40年前から始まっていたが、さまざまな理由から、なかなか大規模な研究が行われなかった。そんな中、10年間の大規模プロジェクトで取り組む意義は大きい。

特に、機械学習など情報科学の著しい進歩が研究に勢いを与えている。例えば、冷凍システムの設計には複雑な偏微分連立方程式を解く必要がある。これには計算機の能力が大きく関係していて、スーパーコンピューターを利用すれば、計算時間を大幅に短



■図7 磁性体を充填したシリンダーの排熱部と寒冷発生部には、20～30ケルビンの温度勾配ができる。例えば、77～60ケルビンの温度帯には磁性体Dを、60～50ケルビンは磁性体Bを、50～40ケルビンは磁性体Gを充填するといった具合に温度領域ごとに複数の磁性体を並べることで、77ケルビンから40ケルビンまでをカバーできると考えられる。(NIMS NOW Vol.19, No.4より転載)

縮することが可能になる。また、磁性材料の探索には機械学習によるサポートが期待できる。清水さんは「これまでの研究の歩みが徒歩だったとすると、自動車を手に入れたくらいの研究の加速効果があると期待しています。まだ自動運転とはいかず、研究者が自ら目的地を探しつつ運転する必要がありますが、大きな進歩です」と最新技術の利用に期待を寄せる。

プロジェクトには40人以上の研究者が参加し、毎週、全体ミーティングを行っているという。「コロキウムと呼んでいて、自由に意見を交換します。特許につながる指摘があったり、新しいアイデアが出たりする刺激的な時間です。また、それとは別に、2つのグループに属する6チームからリーダーが集まり、進捗を確認しています。構成の異なる2つのミーティングを行うことで活性化と計画達成を両立しています」と清水さんはプロジェクト運営の特徴を説明する。自由闊達な雰囲気ながらも磁気冷凍技術による水素液化システムの社会実装というゴールに向かって、参加する研究者の意識をそろえることが、プロジェクトの成果につながっている。

2018年度からスタートしたこのプロジェクトは、早くもさまざまな成果を上げつつあるが、水素社会の実現には高い生産能力と低コスト化を両立する必要がある。2030年までに掲げた目標は、1日当たり100キログラムの生産能力、液化効率50パーセントの水素液化システムを完成させることだ(図8)。簡単に達成できるものではないが、意気軒高な研究者たちの技術力とチームワークをもってすれば、不可能な目標ではない。

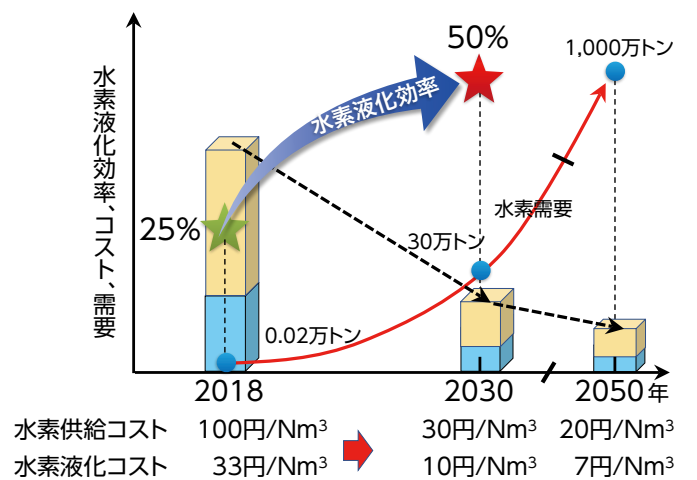
「再生可能エネルギーを液体水素として貯蔵できれば、エネルギーの安定供給にもつながります。日本だけでなく、世界の再生可能エネルギーの利用を促進できるでしょう。革新的な国産技術で、持続可能な世界の実現に大きく貢献できると確信しています」と西宮さんの言葉は力強い。



きたざわ ひであき
北澤 英明
NIMS 特別研究員

ぬまざわ たけのり
沼澤 健則
NIMS 液体水素材料研究センター
名誉・特別研究員

しみず ただし
清水 禎
NIMS 液体水素材料研究センター長



■図8 2018年時点での水素の供給コストは1ノルマル立方メートル(Nm³:0度、1気圧換算で1立方メートルのガス量)当たり100円で、そのうち33円が水素液化のコストである。水素社会の実現には、水素液化効率を50パーセントに引き上げ、水素液化コストを1ノルマル立方メートル10円まで下げる必要があるとされる。

COLUMN

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型とは

未来社会創造事業では、社会・産業ニーズを踏まえ、経済・社会的にインパクトのあるターゲット(出口)を明確に見据え、技術的にチャレンジングな目標を掲げた研究開発を進めている。大規模プロジェクト型では、現在の技術体系に変革をもたらし、将来の基盤技術となり得る「技術テーマ」の実現に向けた研究を集中して支援する。「技術テーマ」は、研究動向分析や有識者へのヒアリングなどを通じて収集した科学技術イノベーションに関する情報を分析し、文部科学省が決定する。研究期間は最大10年程度で、実用化が可能かどうか見極められる段階(概念実証:POC)への到達を目指して研究開発が実施される。現在、西宮プログラムマネージャーらが行き組む「未来社会に必要な革新的水素液化技術」の他、「粒子加速器の革新的な小型化及び高エネルギー化につながるレーザープラズマ加速技術」など、6テーマが採択されている。

大規模プロジェクト型

文部科学省/JST

研究動向分析・有識者ヒアリング
技術テーマを設定
研究開発課題を公募

(技術実証研究)

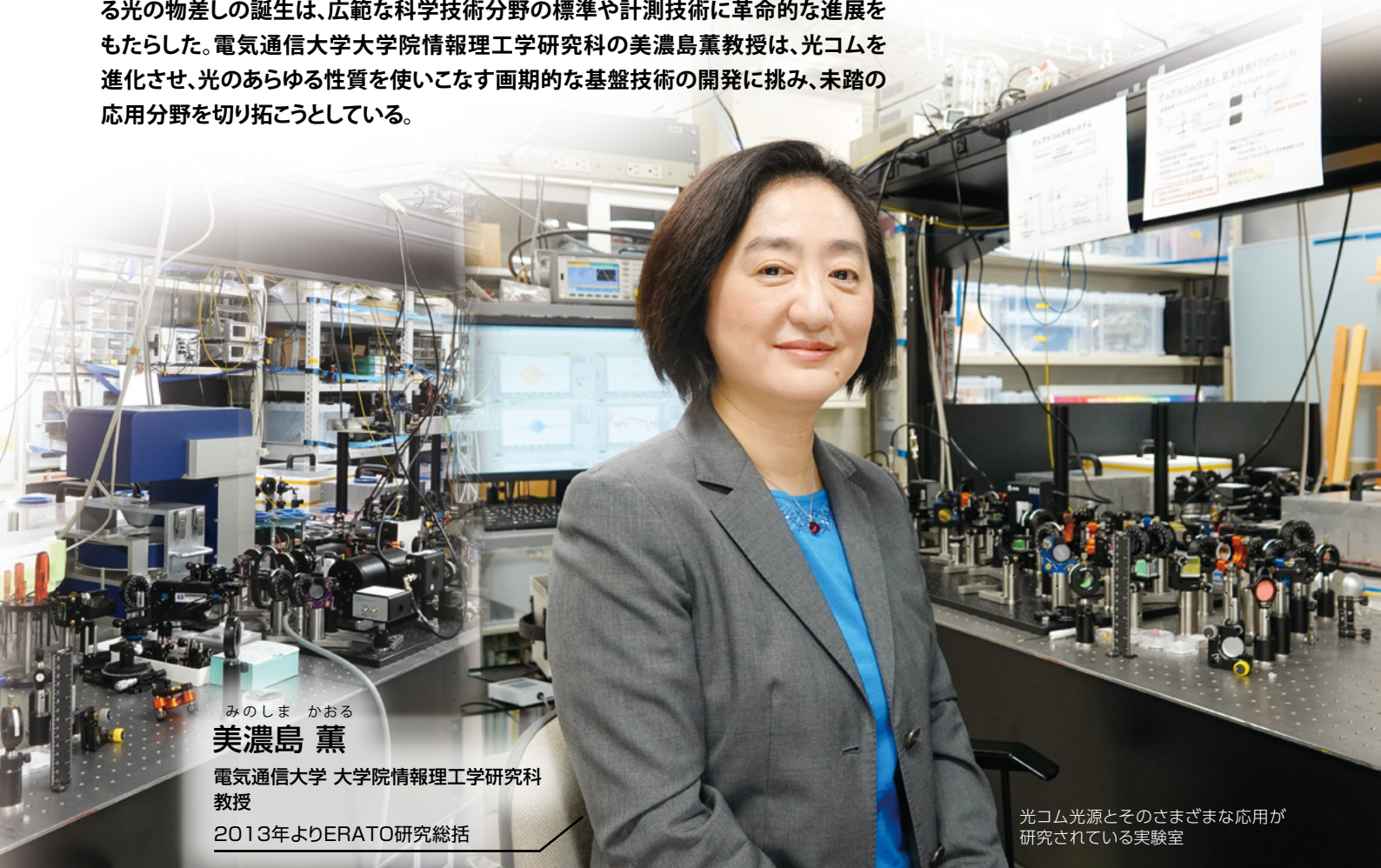
大学・国研・企業などが実施

■大規模プロジェクト型(技術実証研究)
研究開発期間:最大10年程度
研究開発費:総額30～45億円程度/課題

特集2

光の楽器をつくる 奏でる多彩な応用

「人類が手にした最も正確な物差し」と呼ばれる「光コム」。周波数を超精密に測定する光の物差しの誕生は、広範な科学技術分野の標準や計測技術に革命的な進展をもたらした。電気通信大学大学院情報理工学研究科の美濃島薫教授は、光コムを進化させ、光のあらゆる性質を使いこなす画期的な基盤技術の開発に挑み、未踏の応用分野を切り拓こうとしている。



みのしま かおる
美濃島 薫
電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授
2013年よりERATO研究総括

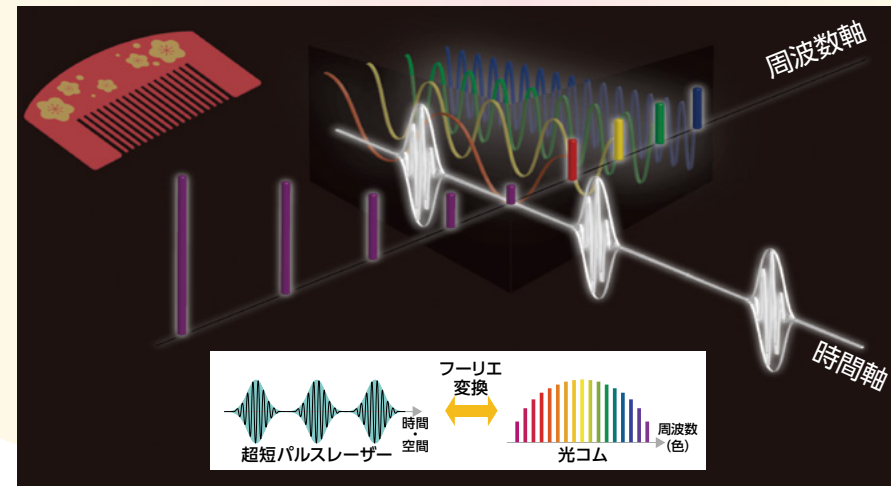
光コム光源とそのさまざまな応用が研究されている実験室

ノーベル賞を超える 光のくしを求めて

自然界に満ちあふれる光は、古代より科学者の探究心をかきたててきた。光研究は「初めて」や「最高」と形容される発見や開発の宝庫である。波長、周波数、時間、空間、強度、偏光など、電磁波である光は多彩な側面を持ち、その利用法也多岐にわたるが、意外にも光を自在に操る技術は存在しない。「光を単なる情報伝達媒体ではなく、その本質

を生かし科学技術や産業で主役として活躍させるツールをつくるのが究極の夢です」と電気通信大学大学院情報理工学研究科の美濃島薫教授は語る。その夢を実現する技術が光コムだ。周波数軸上で、多数の非連続的な周波数ごとの強度分布（スペクトル）が精密かつ等間隔に並んだレーザー光源である（図1）。その形が「くし（コム）」に似ていることから、光コムと呼ばれている。規則正しく並ぶくしの歯を数えれば、極めて精密な物差しになる。

20世紀末に光コムが発明されるまで、光の周波数の絶対計測は至難の業だった。周波数が非常に高く、光の振動が検出できないことが直接測定を阻んでいた。周波数基準はマイクロ波で、光の周波数に比べて何桁も小さい。1ミリメートルの目盛りの物差しを使って、1キロメートルの長さを測定するようなものだ。世界中で光周波数絶対計測のための国家プロジェクトが競って行われていたが、その手法は非常に大がかりで、何台もの発振周波数の異なる装置



■図1 光コムは短い時間のみ繰り返し光る超短パルスレーザーの側面を持つ。極めて高精度に制御された超短パルス列が時間軸上で等間隔に並び、周波数の異なる多数の光で構成されるため、周波数軸上では、1つ1つの光のスペクトルがくし状に精密かつ等間隔に並んでいる。

を少しずつつないで測定していき、光の周波数に到達させるというものだった。「短い物差しをつないでも、やがてずれてしまい、不確かな測定結果しか得られません。世界中の科学者が長くて正確な光の物差しを待ち望んでいました」。1999年、人類は念願の物差しを手に入れた（図2・3）。米独の物理学者らのチームが、超短パルスを発生するモード同期レーザーを光コムとして用いることに成功したのだ。それは思いもかけない革命的な異分野融合だった。光コムは、周波数で見ると、くしの歯1本1本が極限的に一定の周期で振動する超精密な連続波レーザーで、時間軸で見ると一瞬だけ超高速に光る超短パルスレーザーである。また、くしの歯の間隔やオフセット（くしの歯全体が間隔を保ったまま横にずれている量）はエレク

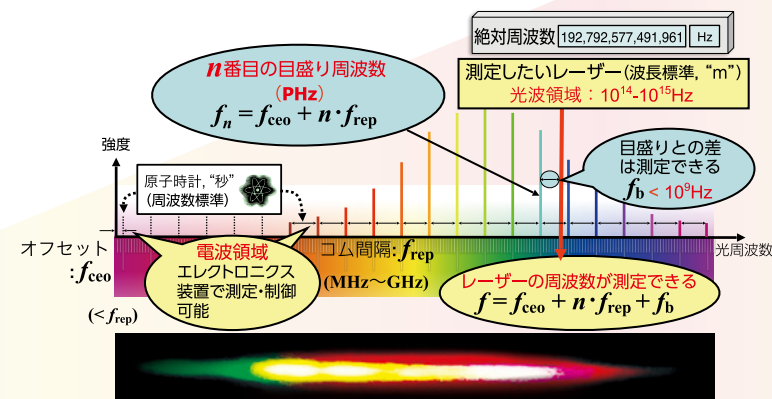
トロニクスで扱うことのできる電波やマイクロ波周波数で、くしの歯自体は光周波数であり、これらが一体としてつながっている。このように、超精密と超高速、エレクトロニクスと光技術という、従来異なるものとして、歴史的にも独立に発展してきた科学技術分野が融合した。「周波数は時間や空間など多次元の物理量に高精度に相互変換することができず。光コムは秒とメートル、光波と電波をつなぎました。一見無関係に見える値や量を、たった1本の物差しで測れるようになったのです」。光周波数の測定精度は飛躍的に向上し、2005年に光コムは異例の速さでノーベル物理学賞を受賞した。光コムの異分野融合の力と多次元の可能性に、美濃島さんは魅せられた。光コムは単なる「周波数の物差し」にとど

まらないと確信し、「ノーベル賞を超える」光コムを追求することを決意した。

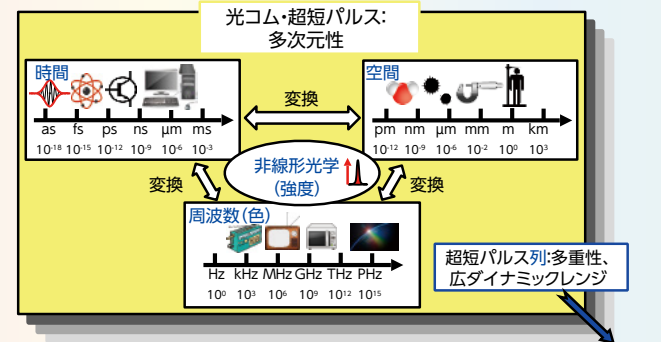
物差しから楽器へ 練習曲を弾きこなす

光コムを物差しから楽器に進化させることが美濃島さんの目標だ。「電子楽器のシンセサイザが音の強さや音程、リズムをさまざまに組み合わせ、たった1台で多様なジャンルの音楽を奏でられるのは、音が規則的に並び鍵盤があるからです。光コムを鍵盤として、シンセサイザのように光の優れた性質を自由自在に操り、その潜在能力を極限まで引き出せるツールに高めたい」と、「知的光シンセサイザ」をERATOプロジェクト名に掲げた。

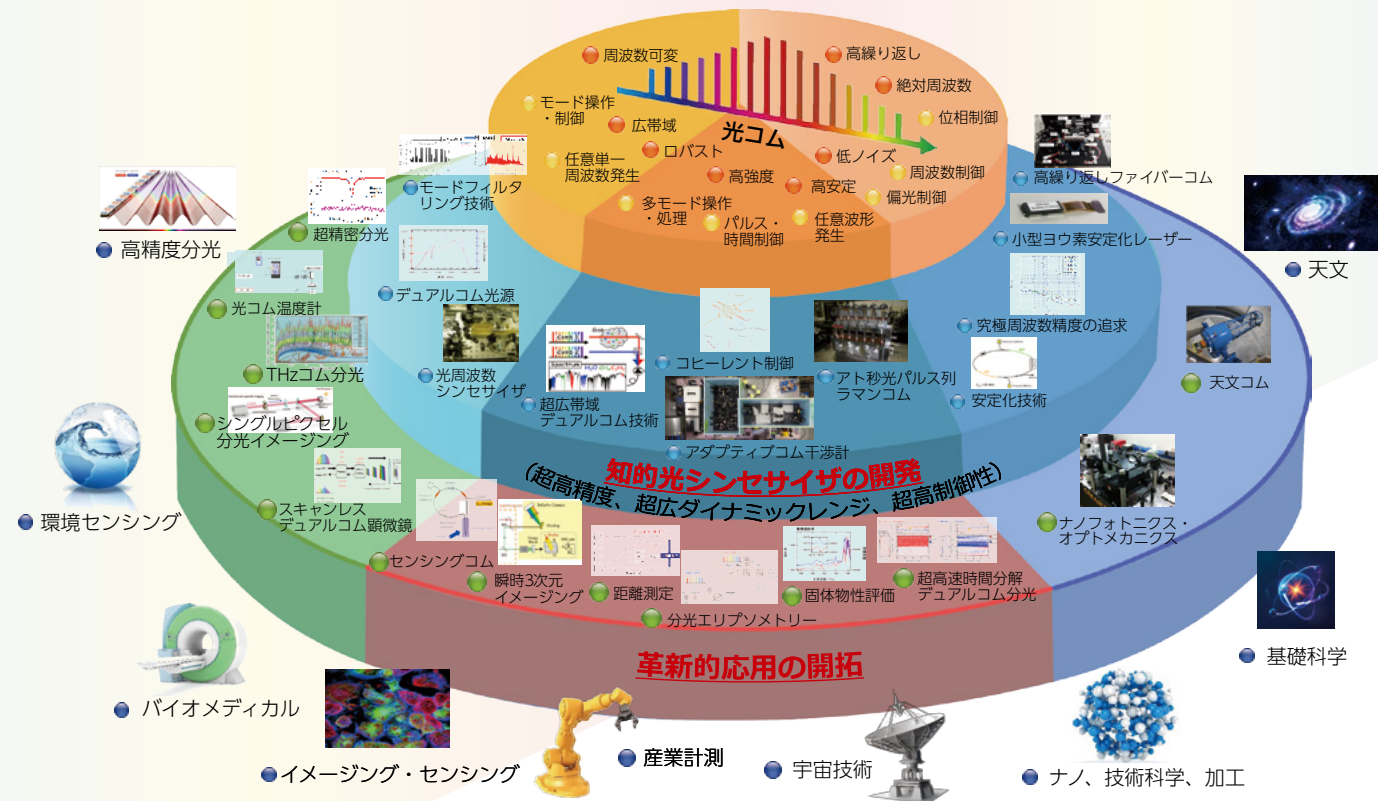
目指すコンセプトとして、美濃島さんは光コムを基盤とする科学技術プラットフォームを描いた（図4）。「あらゆる既存の科学技術分野で、光コムを使ったらどうなるかを考えてみました」と美濃島さん。応用基礎技術まで一歩踏み込み、「光コムでできることを具体的に示すことで、これまで光コムに縁のなかった分野を呼び込みたい」という狙いだ。周波数の精密性のみに注目する欧米中心の研究潮流とは一線を画し、光のあらゆる性質を使い尽くす観点から広範な分野への応用可能性を世界に先駆けて示したことは、「何もないところに山をつくったようなもの」と美濃島さんは例える。国際会議で講演すると「光



■図2 周波数絶対値を付与された光コムは、長くて正確な光の物差しである。1つの物差しの中に異なるサイズの目盛りがあるように、光コムも異なる基準を持っている。周波数軸上では、光周波数（サブPHz:ペタヘルツ）、スペクトル幅がTHz（THz:テラヘルツ）、コム間隔（GHz:ギガヘルツ）、オフセット周波数（MHz:メガヘルツ以下）などがある。くしの歯を数えることで、幅広い帯域の光の周波数や広範囲の時間、距離を精密に測定できる。



■図3 光コムは時間、空間、周波数の多次元性を持っている。マイクロ波から可視光、X線などを切れ目なくつなぐだけでなく、秒の定義とメートルの定義や、エレクトロニクスと光技術など、一見異なる量や分野を高精度かつ広範囲に切れ目なくつないでいく。



■図4 科学技術プラットフォームとして「知的光シンセサイザ」の構築を目指す。光コム(1段目)技術の高度化とともに、知的光シンセサイザの開発(2段目)と革新的応用の開拓(3段目)の研究開発を進めてきた。光コムの応用は、当初は周波数計測・標準など限定的だったが、美濃島さんは新たな研究潮流を生み出そうと、これまで光コムに無縁だった科学技術分野を含め、応用可能性をゼロから描き、実在することを示してきた。

コムがこれほど応用範囲の広い万能なツールであるとは知らなかった」と反響が大きく、世界的にも高い評価を受けているという。

「いわば楽器そのものを良くする研究として、光コム光源の高度化はもちろん必要ですが、それだけではなく、光コムの能力を引き出し、さまざまな応用に使えるところまで引き上げるような観点から、光コムに特化した基礎研究や技術開発を一体として包括的に進めていくことが必要です」と、「知的光シンセサイザの開発」と「革新的応用の開拓」の2本柱を立てた。光コムの多彩な性質を余すことなく生かす「知的光シンセサイザの開発」は、楽器を弾きこなす技術の開発である。「革新的応用の開拓」は、光を使いこなすことで可能となる応用の道筋を示す基礎研究で、練習曲を弾くようなイメージだ。

2つの光源で固体物性を評価 立体計測や天体観測の道具に

ERATOプロジェクトの代表的な成果の1つは、デュアルコム分光による固体

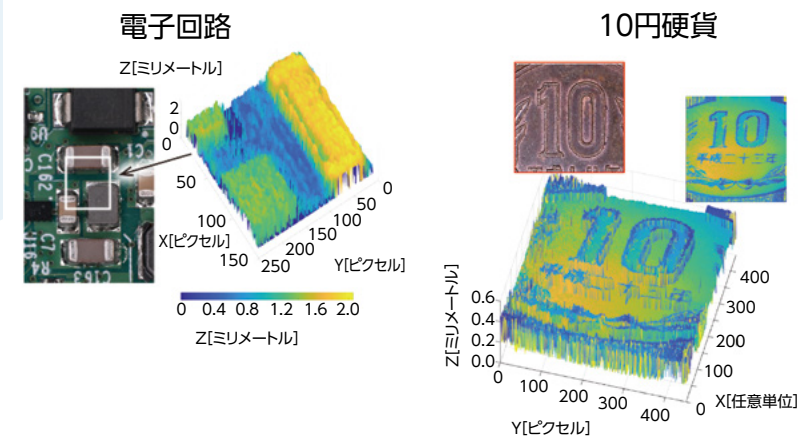
材料の物性評価システムだ。周波数がわずかに異なる2つの光コムを用いて、広帯域の光周波数信号を取得する次世代の分光手法で、高分解能、高精度、高速、広帯域測定を実現する。気体の分光分析に注目されてきたデュアルコム分光の多様な可能性を示すため、美濃島さんは固体材料の詳細な物性評価に使うことに挑戦し、世界で初めて成功した。たった一度の測定で、材料を透過した光の全ての波長情報を取得できる。材料の屈折率や吸収、複屈折、光や電磁場の印加によって動的に変化する特性の他、材料の厚さや複雑な形状や構造を、精密かつ高速に複雑なモデルの仮定なく測定する。この成果を実用化するため、従来は2台の光コムを制御する難しさから広範な普及が妨げられていたのに対し、1台のレーザー共振器から2つの光コムを発生するデュアルコムファイバーレーザーの開発に取り組んで、簡便でありながら高性能で安定したデュアルコム光源の技術を確立した。

距離の測定の精度向上でも成果を上げた。光の飛ぶ時間を基に距離を測定する場合、気圧や気温による光の屈折

率の変化や揺らぎが誤差の原因となり、補正操作が必要となる。気温が1度変化すると1メートル当たり約1マイクロメートルの誤差が生じてしまう。光コムの超短パルス列が常に等間隔を高精度に保つ性質を利用して、美濃島さんは「環境変動に追従する物差し」を開発し、飛んでいる光自身に屈折率を測定して「自己申告」させ、リアルタイムに揺らぎを高精度に補正することを実現した。

天体の動きを知るには、地球に到達した光波長の微小な変化を高精度で観測する必要がある。プロジェクトチームの力を結集して天体観測用に最適な光コム(天文コム)を開発し、国立天文台ハワイ観測所岡山分室の望遠鏡に装備された高分散分光器に組み込んだ。日本で初めて光コムを基準とした天体の分光観測に向けて大きな一歩を踏み出した。太陽系外惑星や第二の地球の発見につながると期待される。

瞬時3次元イメージングは、光コムならではの他に類を見ない技術だ(図5)。微小なものから巨大なものまで、さまざまなサイズの物体の3次元画像を、1マイクロメートル以下の高精度で、超高速

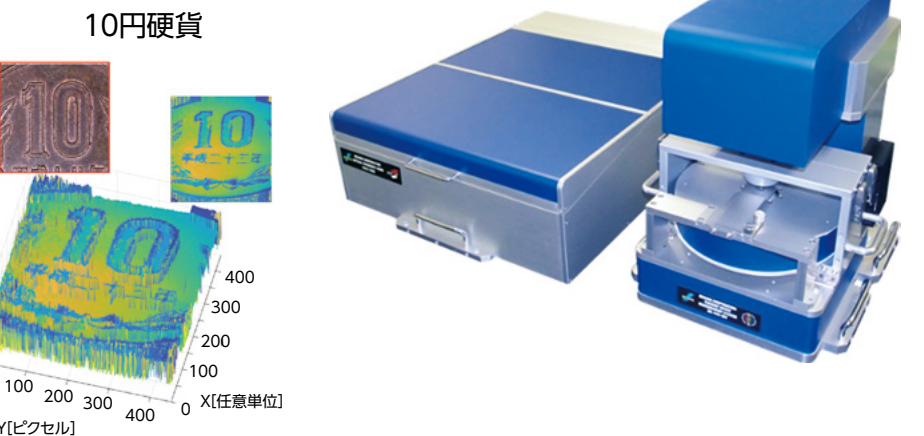


■図5 周波数(色)が時間と共に規則的に変化する光コムを測定対象に照射する。反射により戻ってくる光は距離によって色が異なることを利用して、光自身が同時に多点の距離情報を抽出し、形状情報を瞬時に得る新しいイメージング手法を開発した。非常に小さな物体でも、大きな段差がある物体でも、精度を落とすことなく測定でき、超高速現象も捉えられ、カメラ解像度の3次元像を瞬時に得られる。

カメラのように一瞬で撮影できる。周波数が時間と共に規則的に変化する光コムを測定対象に当てると、物体の凸凹に応じて反射光で時間のずれが生じることを利用し、色の変化として検出する仕組みだ。撮影時間はわずか数10フェムト(1フェムトは1000兆分の1)秒のため、超高速現象も捉えられる。「光が持つ空間、時間、色の性質同士を、瞬時に光自身が情報変換する技術をかつて考案したのですが、当時は大きく高強度なレーザーを使う必要がありました。光コムを使うことで小型化が可能となり、従来技術では避けられない精度と範囲と速度の3つのトレードオフも解消され、実用化に大きく近付いています」。

応用の種が芽吹く 誰もが楽器の弾き手に

ERATOプロジェクトから生まれた数多くの応用の種は、今まさに芽吹いたところだ。「計測から伝送、処理、表示、加工や治療まで、光の性質をそのまま使い尽くす一気通貫の技術確立したい」と美濃島さんは熱く語る。「光コムを使った環境センシングなら、極微量の有害物質を検出し、さらに光の力で浄化まですることが考えられます。医療分野では、呼吸に含まれる極微量の物質をセンシングして病気を初期段階で発見して、さらには光の治療と組み合



■図6 ネオアークと共同開発したデュアルコム分光法による測定装置のプロトタイプ。周波数がわずかに異なる2台の光コム光源(左)をファイバー接続により測定装置本体(右)に入力する。幅260ミリメートル、奥行き360ミリメートル、高さ400ミリメートル。

わせるなど、さまざまな処理を光だけで完結できる可能性を持っています」。

描いた科学技術プラットフォームに点在する研究テーマを、1つ1つ埋めるように研究開発し、それが実在することを証明してきた。「一般的な研究資金では確実な個別の研究テーマに切り崩さざるを得なかったでしょう。光の利用を根源から変革するこの研究は、ERATOでなければできませんでした」と振り返る。異分野から集結した若手研究者の貢献も大きいという。「光コム自体が異分野融合で、柔軟な発想が生きる分野です。世界をリードする技術に発展させてくれると、若手研究者には大いに期待しています」。

光コムの登場によって、国家プロジェ

クトレベルだった光周波数の測定装置も、今や大学院生が作製できるまでに。光コムの応用は当初の予想を超えて拡大しているが、光コム光源自体を使いこなすのに高度な知識と技術が必要で、まだ十分には普及していない。楽器の弾き手が増えてほしいと、ネオアーク(東京都八王子市)と共同で、デュアルコム分光法による汎用的な測定装置のプロトタイプを作製した(図6)。「光技術をエレクトロニクスのように日常生活に欠かせない身近な存在にして、人類が光の優れた性質の恩恵を受けられるようにしたい」と美濃島さんは願っている。「知的光シンセサイザ」が誰もが使える楽器になるのは、そう遠くない未来だ。



美濃島研究室では学生や若手研究者たちが日々切磋琢磨している。研究室の立ち上げと同時にERATOプロジェクトが発足し、美濃島さんは学生や若手研究者と共に光コム研究の最先端を走り続けてきた。

世界を変える STORY vol.3 FuturedMe フューチャードミー

阻害から分解へ 発想の転換で 革新的創薬に挑む

世界を変える新技術を生み出そうと挑戦を続けるベンチャー企業を紹介する連載「世界を変えるSTORY」。第3回目は、既存の「阻害剤」では治療薬がなかった人たちに、「分解」に着目した創薬技術で薬を届けようとするFuturedMe(東京都中央区)の挑戦を紹介する。

生体内の分解現象に着目 どんな標的も創薬の対象に

想像してみしてほしい。遺伝子を検査したところ、遺伝子にがんの原因となるいくつかの変異が見つかった。不安に襲われるあなた。しかし、「この変異が原因のがんは、キャンディーの1212番で治療できますよ」とすぐさま治療薬が提示され、あなたは胸をなで下ろした――。

従来の創薬技術では実現不可能だったこんな未来に、一歩近付く新技術が誕生した。東京理科大学研究推進機構総合研究院の宮本悦子教授が開発したたんぱく質分解誘導技術「CANDDY (キャンディー: Chemical Knockdown with Affinities and Degradation Dynamics)」である。2018年6月、この技術を用いて新薬を開発するベンチャー企業、FuturedMe(フューチャードミー)が設立された。

従来の創薬は、がんの原因となるた

んぱく質を特定し、その働きを封じる「阻害剤」が主役だ。しかし、阻害剤が結合しにくい形状であるなど、そもそも阻害剤を作れない「アンドラッグブル標的」がたんぱく質のおよそ75パーセントを占めており、大きな問題となっていた。それに対し、生体に備わっているたんぱく質分解装置「プロテアソーム」に着目したのが、CANDDYである。

標的たんぱく質とプロテアソームの両方に結合する化合物「CANDDY分子」を使い、標的たんぱく質をプロテアソームに誘導し、たんぱく質を分解する仕組みだ(図)。既存の分解誘導剤では、標的となるたんぱく質にプロテアソームを呼び寄せるユビキチンという目印を付ける方法をとっている。CANDDYではこの目印を必要としないため、ユビキチン化が難しいたんぱく質にも適用できる。「生体内で作られるたんぱく質は全てプロテアソームで分解できるため、どんな標的たんぱく質に対しても創薬が可能になります」と宮本さんは自信をのぞかせる。

治療を諦めている患者に薬を 独自の技術で事業化を目指す

技術開発の背景には、「研究で社会の課題を解決したい」という強い思いがあった。過去に病気の原因たんぱく質を特定する研究をしていた宮本さんは、いくら標的を特定しても「阻害」による創薬では限界があると知り、がくぜんとしたという。「臨床に役立てるにはどうすればいいか」を模索した結果、「分解」のアイデアにたどり着いた。化学を専門とする宮本さんならではの発想の転換だった。

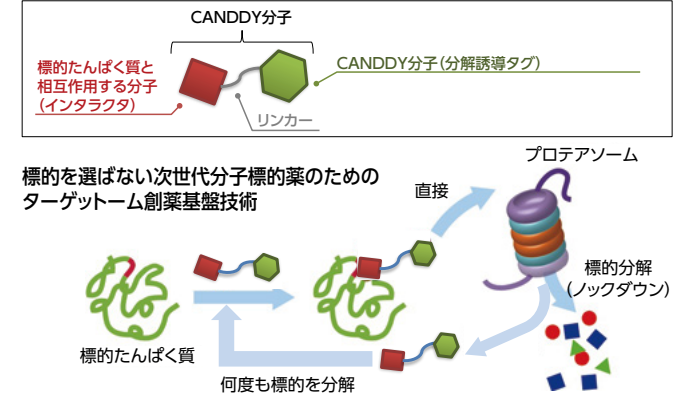
これまでの研究の蓄積により、プロテアソームに選択的に結合し、阻害する化合物は数多く知られている。技術の鍵は、それらの化合物から阻害の機能を取り除き、プロテアソームへの親和性だけを残した化合物を作れるかどうかにあった。早速複数の阻害剤で実験したところ、「思ったよりうまくいった」ため、「この技術で、治療薬がないと諦めている人にも薬を届けよう」と事業化を決意。事業プロモーターと二人三脚でベンチャー

東京理科大学 研究推進機構 総合研究院
大学院生命科学部 教授
FuturedMe 取締役
宮本 悦子

ジャフコ 投資部産学連携投資グループ
リーダー
FuturedMe 代表取締役
橋爪 克弥

ロゴは宮本さんのネイルにも

学問が成熟した今、基礎研究と応用研究を分けて考える必要はありません。社会が抱える課題を自分のサイエンスでどう解決できるか、若い人にはそんなロマンを持ってほしいです。



■図 CANDDY分子の一端は標的たんぱく質に、他方はプロテアソームにそれぞれ結合する。この分子の働きにより、標的たんぱく質はプロテアソームに誘導され分解される。残ったCANDDY分子は新たな標的たんぱく質に結合し、分解を繰り返す。

技術の持つ可能性もさることながら、宮本先生から薬を創りたいという強い意欲を感じました。事業化に必要なのは、「諦めない心」だと思います。

企業の立ち上げを目指す「START」に応募した。数ある事業化手法の中でベンチャーを選んだのは、「全くの新技術を育てていくには、柔軟な発想で挑戦できるベンチャーが合っていると思ったから」と宮本さんは話す。

新しい創薬につながる技術の基盤は確立したものの、事業化までの道のりは平坦ではなかった。最大の難関は、これまでにない技術で、本当に標的を分解できるのか、薬効があるのかを証明することだった。実は、STARTの審査では一度不採択になっている。宮本さんは「コンセプトは評価されたものの、標的が分解できたことを示す細胞実験結果だけでは信頼性が不十分と判断されたのです」と説明する。翌年、動物実験の結果を携えて再び挑戦し、採択された。

目標は5年後の治験実施 誰もが手軽に使える治療薬を

事業プロモーターとしてこのプロジェクトを支援してきたジャフコの橋爪

克弥グループリーダーは、この技術をこう評価する。「分解剤が実現すれば、これまで標的にできなかった8割近くが創薬の対象になります。世の中に与えるインパクトは限りなく大きい。一度は不採択になりましたが、事業プロモーターとしても、諦めるという発想はありませんでした」。

STARTの支援の下、薬効を検証するため、ヒトのがん細胞を移植したマウスでの実験を進めていった。膀胱がんや大腸がんに対して抗腫瘍効果が認められたことから、予定を10カ月前倒して会社を設立した。

研究の的を絞ったことがスピード起業につながったと宮本さんは振り返る。「複数の標的に対して薬効を調べる予定でしたが、予算と時間を考え、膀胱がんの患者で多く見られるRasたんぱく質に絞ることにしました。遺伝子のアンドラッグブル標的の王様とも呼ばれ、30年以上も薬が創られていません。これに集中したら、意外に早く結果が出ました」。

橋爪さんは、事業化におけるスピード

の重要性を次のように話す。「分解剤に着目する企業は他にも登場しています。業界がホットになれば競争も激しくなるので、早めに起業できたのはよかったと思います」。

FuturedMeは現在、研究者を含めて10人体制で、Rasたんぱく質を標的とした医薬品開発に向けた準備を進めている。5年後の治験実施が目標だ。また、製薬会社とも協同で、標的を広げて創薬研究を進めていく考えだ。一方、宮本さんは、大学の研究を通じてプロジェクトに関わっていきたく話す。「他のアンドラッグブル標的にも適用できるかどうか、研究を深堀りしていくのは大学の役目です。研究で芽が出たら、FuturedMeとも連携して事業化を図っていきます」。

お菓子のキャンディーのように誰もが手軽に、安心して使える薬を創りたい。その思いを込め、宮本さんはこの技術をCANDDYと名付けた。1人1人に最適な医療を提供するテラーメイド医療の実現に、CANDDYが貢献する日は近付いている。

HISTORY

2013年

宮本さんが「分解剤」のアイデアを思い付き、研究を開始。研究所の同僚だった医師からの「臨床にどう役に立つのか」という問いも、刺激になった。

2015年

CANDDY技術を確立し、特許出願。事業化を目指し、自ら事業プロモーターのジャフコに支援を依頼。STARTに申請するも、惜しくも不採択。

ジャフコさんをお願いしようと思ったのは、ピピッときたから。ジャフコさんの当時の担当が薬学部出身だったので、CANDDYに魅力を感じてくれそうだったのです。



2016年

2度目の申請で、STARTに採択される。標的をRasたんぱく質に絞り、動物実験で薬効を検証。

2018年

一定の抗腫瘍効果が確認され、6月にFuturedMeを設立。ロゴは標的とプロテアソームに結合したCANDDY分子を図案化。



2019年

ジャフコから約7億円の資金調達を受ける。膀胱がんの治療薬開発を目指し、5年後の治験実施に向けた準備を進めている。

未来社会創造事業
探索加速型「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域
研究課題「電気自動車への走行中直接給電が拓く未来社会」

研究
成果

走りながら充電する電気自動車を開発 受電回路と駆動装置の全てをタイヤの中に

日本における二酸化炭素排出量の約18パーセントは自動車によるものです。その削減を目指し急速に進展しているのが、走行中の電気自動車にワイヤレスでエネルギーを送る技術です。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の藤本博志准教授らは、「全てをタイヤの中に」を目標に、企業と連携して、電気自動車へのワイヤレス給電の研究開発に取り組んできました。2017年に開発した第2世代では、走行中のホイール内モーターへのワイヤレス給電を実現しましたが、タイヤの外にも給電システムの一部を配置していたため、設計上、乗り心地や操縦の安定性などを向上させるサスペンションシステムとの最適化が困難でした。また、モーター性能も従来の軽自動車クラスで、乗用車への適用には改良が必要でした。

駆動装置であるモーター、インバーターと受電回路の全てをタイヤの中に収納し、走行中に道路からワイヤレスで給電できる第3世代のシステムを完成させ、実車での走行実験に成功しました。走行中の給電性能や

モーター性能、車両への搭載しやすさを大幅に改善し、第2世代に比べ、受電コイルの容積を53パーセント減らし、給電能力を12キロワットから20キロワットへと向上させました。

第3世代の導入の実現に向け、さらに実験と検証を進め、2025年には実証実験への移行を目指します。



第3世代の走行中ワイヤレス給電インホイールモーターを搭載した実験車両(左)と構成図(右)

研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 企業主導フェーズ NexTEP-Bタイプ
開発課題「超低損失ナノ結晶薄帯製造装置」

研究
成果

エネルギー損失の少ない磁性材料を量産化 モーターやトランスの省エネ効果に期待

電気を動力へ変換するモーターや、電圧を変換するトランスといった磁気デバイスでは、部品の材料である鉄や銅に起因して電気エネルギーを損失しています。機器の省エネには、こうした鉄損、銅損の少ない材料が求められています。

従来は、鉄にケイ素を加えたケイ素鋼板などが磁性材料として使われてきました。東北大学未来科学技術共同研究センターの牧野彰宏教授らは、このケイ素鋼板に匹敵する磁気特性を持ちながら鉄損を抑えた磁性材料として、鉄と少量の安価な元素からなるナノ結晶材料を発明しました。その実用化を目指して2015年に設立されたのが東北大発ベンチャーの東北マグネットインスティテュートです。同社は薄い帯状のナノ結晶を量産できる装置の開発に成功し、今年10月より製造を始めました。

製造工程では、まず溶解した素材を幅広に薄く連続射出、急冷し、長いアモルファス薄帯としてロール状に巻き取ります。これを加熱、冷却と連続処理するとナノ結晶薄帯となります。

製造した薄帯は、一般的なケイ素鋼板に比べ鉄損が約6分の1に低減されました。冷蔵庫、エアコン、洗濯機などの家庭用電化製品だけでなく、電気自動車、産業機器などのモーターに使われるケイ素鋼板を代替できれば省エネ効果が高く、需要が大きくなると期待されます。



開発した装置で製造した幅127ミリメートルと245ミリメートルのナノ結晶薄帯。ロール状で量産される。

戦略的創造研究推進事業ACT-I
研究領域「情報と未来」
研究課題「時系列データの自動解析技術の実現」

研究
成果

ニューロンの信号から神経回路を推定 半世紀来アイデアが実現

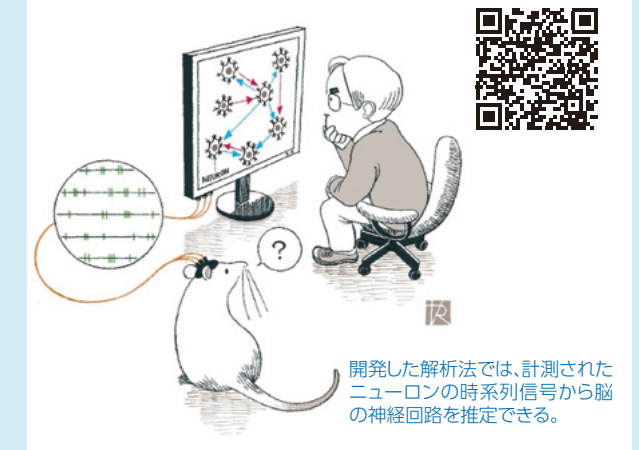
脳の神経細胞であるニューロンは、細胞間をつなぐシナプスを通じて電気信号を他のニューロンに伝えることにより、情報を伝達しています。時系列の信号の細胞同士での相関関係を調べれば、細胞同士のつながり、つまり神経回路を推定できると考えられています。このアイデアは50年以上前からありました。近年、技術革新で信号を長時間記録できるようになったため推定の実現が期待されていましたが、周囲のニューロンや外部信号の影響で、信頼性の高い推定はできていませんでした。

国立情報学研究所の小林亮太助教は京都大学の篠本滋准教授らと共同で、機械学習の技術として確立してきた一般化線形モデル(GLM)を使って外部信号の影響を消し、並列する時系列の信号同士の相互相関(CC)からニューロン間の結合を高精度で推定する解析法「GLMCC」を開発しました。モデルニューロンからなる神経回路をシミュレーションしたところ、従来手法よりはるかに高い精度でニューロン間の結合を推定できました。

計測技術の発展で今後は神経についてのビッグデータ

が得られるといわれています。この解析法を使えば、脳領域ごとの情報処理の仕組みを解明できると期待されます。

解析プログラムやアプリケーションはウェブで公開されています。
GLMCC(Generalized Linear Model for Cross Correlation)
<http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/~shino/GLMCC/>



日本科学未来館

イ
ベ
ン
ト

若者たちの理想の未来像を新たな常設展示に 「ビジョナリーキャンプ」公開

私たちは、2030年に一体どのようにコミュニケーションをとっているでしょうか。

日本科学未来館(東京・お台場)では、「2030年のコミュニケーション」をテーマに、理想の未来像(ビジョン)を思い描き、その実現に向けて取り組むことの大切さを伝える、新しい形の常設展示「ビジョナリーキャンプ」を10月4日から公開しています。

今年3月に開催したアイデアワークショップ「未来館ビジョナリーキャンプ」で優秀賞に選ばれた15~25歳の3チーム計9人が、半年かけて研究者やクリエイターと共にビジョンを深め、それらを実現するための考え方や方法を作品にしました。

展示は4つのエリアからなります。ステップ1では、SNS依存、少子高齢化、LGBTなど、現在身の回りで起きている出来事をパネルで紹介し、2030年の未来を想像してもらいます。ステップ2で「人と人との間で起こるコミュニケーション」を考えます。新たなコミュニケーションメディアは、私たちに何をもたらしたのか、パネルで紹介しします。ステップ3

で優秀賞に選ばれたアイデアを基に制作した展示作品を紹介します。最後に自分自身がさまざまなビジョンにどのように関わりたいか意思表示する「宣言テープ」を身につけます。

科学技術が急速に発展する社会でより良く生きていくためには、科学技術を賢く利用していく必要があります。それには、自らが考え抜いた理想のビジョンを描き、周りを巻き込んで実現していく人材「ビジョナリー」が不可欠です。日本科学未来館は、こうした人材を発掘し、一人前のビジョナリーとしてスタートラインに立てるよう支援しています。



常設展示「ビジョナリーキャンプ」。約1年間展示する予定。

Q1 印象に残っている言葉は？

A1

でも、やるんだよ！

あるエッセイ集に出てきた言葉です。続けたところで成果が出るとは限らないし、やらない理由はいくらでも作れます。現代はいろいろな情報が簡単に手に入るので、マイナスの情報も多く、研究者の道へ進むことへの不安や悩みは尽きないでしょう。でも、本当にやりたいことなら覚悟を決めて突き進むことも大事です。自分に対する叱咤激励の意味合いも含めて、研究者とはそういうものだと考えています。

Q2 現在の研究テーマは？

A2 原子内部の電子の分布を見る

電子顕微鏡との出会いは研究室に配属された時です。大きさが100億分の1メートルと、ちょっと想像もつかない小さな原子を見られることに興奮しました。それと同時に、「どうして原子は規則性を持って、こんなにもきれいに並ぶのだろうか」と興味が湧きました。その問題をひもとくため、今の研究では新しく開発した電子顕微鏡を使って、限りなく小さい原子の内部を見ることに挑戦しています。

原子の内部では、真ん中に100兆分の1メートルの原子核があり、その周りをたくさんの電子が取り巻いています。原子同士は電子を介して結合していますが、その時どのように電子が分布しているかは、まだ誰もわかりません。そこで、電子が原子とぶつかった時の散乱を調べています。



さがける 科学人

vol.92

限りなく小さなものを見ることで科学の可能性を広げていく

東京大学 大学院工学系研究科 総合研究機構
助教

関 岳人
Takehito Seki

Profile

千葉県出身。2014年 東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員、東京大学大学院工学系研究科特任研究員を経て、19年より現職。

それをコンピューターに入力して電子の経路などをシミュレーションし、その結果と実験の結果を比較して、電子の分布を推定しようとしています。この電子顕微鏡を使った研究は自分にしかできないものだと思っているため、誇りと覚悟を持って取り組んでいます。

日常の研究はパズルを解くようなもので、自分にとっては楽しいのですが、一方で研究を通じて世の中に貢献したいという思いもあります。原子核の周りにある電子の分布がわかれば、界面の構造が細かく把握できるようになり、材料やデバイスの開発を始め、科学の可能性が広がるはずです。自分の研究成果が他の研究者に生かされ、社会に役立てられればと思っています。

Q3 休日の過ごし方は？

A3 夫婦で協力して子育てに励む

1歳半の子供がいます。妻も同じ大学で

働いているので、保育園の送り迎えなど協力しています。小学生の頃、父がなぜか相対性理論を教えてくださいました。内容は理解できませんでしたが、その話がとても面白く、自然に物理が好きになりました。小学校の卒業式に埋めたタイムカプセルには、「研究者になりたい」と書いてあり、父の話が影響していたのかもしれません。私の子供にもどんなことでもよいので夢中になれる好きなことを見つけてほしいと願っています。

