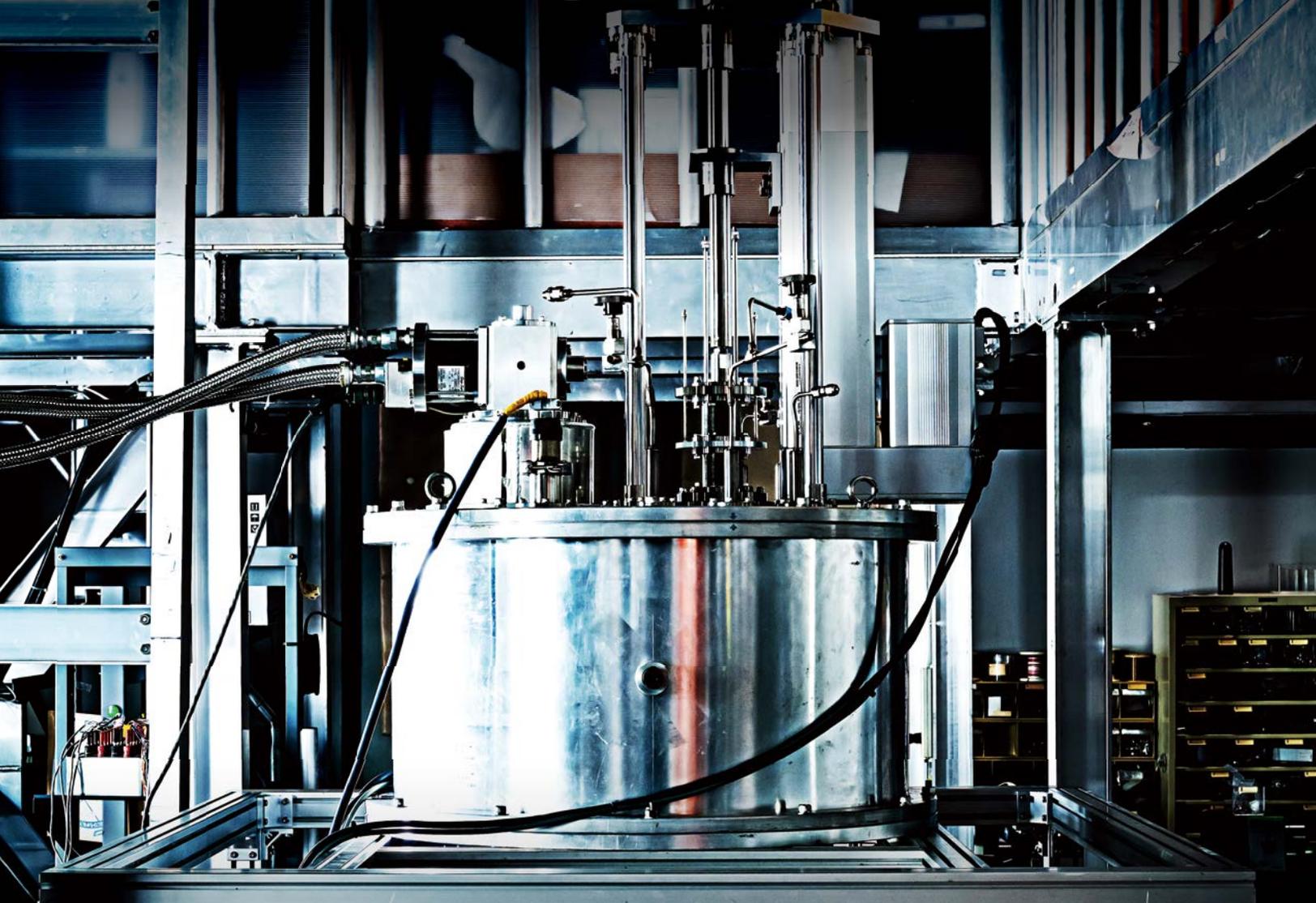


# NIMS NOW No. 4

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE



# 水素、 液化革命。

来たる水素社会！  
“磁石”で挑む省エネ冷却

次世代エネルギーの大本命「水素」。

温室効果ガスの大幅削減に向け、クリーンな水素エネルギーへの転換は待ったなしの状況にある。

しかし、その普及は途上にある。妨げとなっているのが価格の高さ。特に“液化”にかかるコストだ。

水素の大量輸送には、体積を大幅に圧縮し運びやすくする“水素の液化”が最善策ではあるものの、既存技術では-253℃という液化温度までの冷却に費やすエネルギーが大きく、コストダウンは手詰まりだ。

だが、秘策がある。

磁石の力を使い少ないエネルギーで効率的に冷却、液化する新システム構想だ。

システム実用化に向け満を持して始動したプロジェクト、その全貌に迫る。

# 水素、 液化革命。

来たる水素社会！  
“磁石”で挑む省エネ冷却

# 水素社会 実現の力ぎは “磁石”にあり

究極のクリーンエネルギーとも呼ばれる水素を広く利用する社会、それが「水素社会」である。

日本政府は、世界に先駆けて水素社会の実現を目指すと言っている。

水素社会の実現に必要なものは？ オールジャパンのプロジェクトである

JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」を率いる西宮伸幸プログラムマネージャーと、  
2019年4月にNIMSで発足した液体水素材料研究センターを率いる清水禎センター長が語り合う。



西宮伸幸

Nobuyuki Nishimiya

日本大学 理工学部 特任教授 /  
一般社団法人 水素エネルギー協会 会長 /  
物質・材料研究機構(NIMS) NIMS招聘研究員 /  
JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」  
プログラムマネージャー



清水 禎

Tadashi Shimizu

物質・材料研究機構(NIMS)  
エネルギー・環境材料研究拠点  
液体水素材料研究センター センター長 /  
JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」  
プログラムマネージャー補佐

## なぜ水素エネルギーなのか

**清水** 地球温暖化という大問題に直面し、二酸化炭素など温室効果ガスの排出量を削減することが求められています。その手段として注目されているのが、水素エネルギーです。水素は、水や天然ガス、廃プラスチックなどさまざまな資源からつくることができて、燃料として使うときに二酸化炭素を出しません。日本では、2017年に「水素基本戦略」が決定され、世界に先駆けて水素社会を実現するための取り組みが進められています。西宮さんご自身は、ずいぶん前から水素エネルギーに注目されてきたと思いますが、会長を務めている「水素エネルギー協会」はいつ設立されたのですか。

**西宮** 水素エネルギー協会の前身である水素エネルギー研究会は、1973年7月に設立されました。第一次エネルギーショックが1973年秋ですから、その直前です。化石資源に依存していたのでは将来、エネルギーの安定供給や地球環境の問題が発生すると予測し、それを解決できるものとして水素に注目したのです。当時の人の先見の明には驚かされます。

**清水** 化石資源の代替としては再生可能エネルギーという選択肢もありますが、なぜ水素エネルギーなのでしょう。

**西宮** 再生可能エネルギーを用いた発電では、気象条件などによって発電量が変化

します。送電線や蓄電池の容量不足を理由に、余剰電力は捨てられてしまいます。一方、余剰電力で水を電気分解すれば、水素が発生します。水素ならば貯めておくことができます。水素には、再生可能エネルギーを無駄なく利用できるという利点もあるのです。また、国内のエネルギー需要が高まれば、海外の再生可能エネルギーを使うことも考えなければいけないでしょう。しかし、再生可能エネルギーで発電した電気を海外から日本まで送電線で送るのは現実的ではありません。では、どのように運ぶか。間違いなく、水素です。

## 水素を効率的に 輸送・貯蔵する

**清水** 水素社会を実現するには、「水素サプライチェーン」と呼ばれる製造、輸送・貯蔵、利用の流れ(図1)を確立する必要があります。その中でも、輸送・貯蔵の技術の確立が重要ということですね。長距離にパイプラインを渡して水素を送ることは不可能ですから、水素をどの状態で輸送・貯蔵するか、エネルギーキャリアを選択しなければなりません。水素を液化した「液体水素」、水素を化学反応させて液体の化合物にした「アンモニア」や「有機ヒドライド」が代表的なエネルギーキャリアです。最も良いのはどれだとお考えですか。

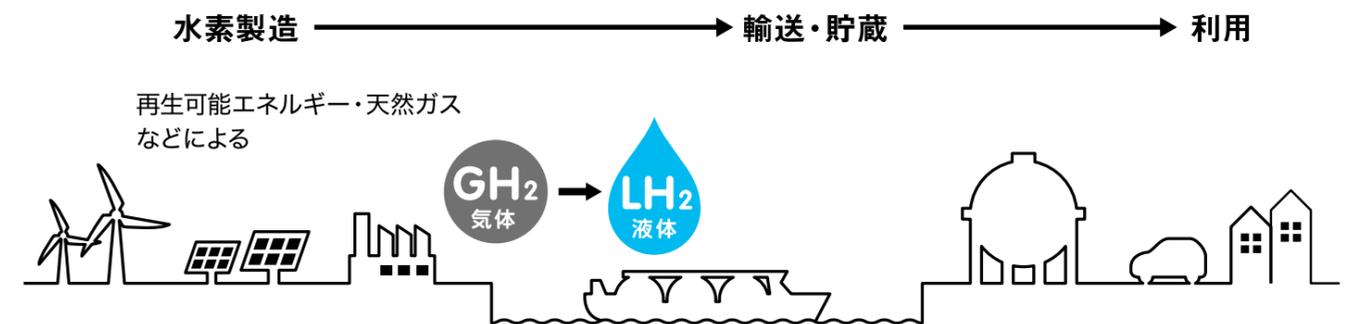
**西宮** 液体水素が優れていると考えてい

ます。液体水素の体積は気体水素の80分の1なので、効率よく輸送・貯蔵ができます。また、液体水素は純粋な水素ですから、利用する際に精製が不要という利点もあります。

ただし、どのエネルギーキャリアも一長一短があり、液体水素は供給コストが高いというのがデメリットです。水素を液化するには20 K (-253℃)まで冷やす必要があります。また、液体水素は「ボイルオフ」といって輸送・貯蔵中に外部から入りこむ熱によって蒸発してしまい、その分は損失になります。液体水素の供給コストが高いのは、主にその二つが原因です。こうした液体水素が抱える課題を解決することでこそ、水素社会の実現を加速できると考えています。そのために、NIMSの沼澤健則氏が開発している「磁気冷凍技術」による極低温化(p8参照)がカギになると、以前から注目していました。

**清水** 2018年11月にスタートした、JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」の主軸となる技術ですね。「NIMSの強みを活かして水素社会実現に貢献したい」という私たちの強い思いに賛同し、西宮さんにプログラムマネージャーを務めていただくことになり大変喜ばしく思っています。NIMSをはじめ複数の大学や企業が参加するオールジャパンのプロジェクトで、10年計画で磁気冷凍による水素液化技術の確立を目指します。

図1 水素サプライチェーン



## 水素液化に革新をもたらす「磁気冷凍技術」

**西宮** 水素の液化には現在、「気体冷凍技術」という方法が使われています。冷媒ガスを圧縮すると温度が上昇して放熱し、膨張すると温度が下がって吸熱します。冷媒ガスの膨張時に気体水素から熱を奪い、圧縮時に熱を捨てるということを繰り返し、気体水素を冷却して液化します。かたや磁気冷凍技術は、磁性体に磁場をかけると電子のスピンがそろって放熱し、磁場を取り去ると電子のスピンがばらばらになり吸熱する性質を利用して気体水素を冷却していきます(p8参照)。

磁気冷凍技術が優れている点は、気体冷凍技術では圧縮機を動かすために大き

なエネルギーが必要ですが、それが不要であることです。投入したエネルギーを無駄なく使えるので、より高い液化効率が実現できます。気体冷凍の液化効率は25%程度であるのに対して、磁気冷凍技術では50%以上の達成が可能です。また、気体冷凍では予冷の冷媒に温室効果のあるガスを使用していますが、磁気冷凍技術では環境に負荷のある冷媒を使用しません。私がNIMSの磁気冷凍技術に大きな期待を寄せる理由はそこにあります。

**清水** その上、気体冷凍技術の特許はヨーロッパの企業が独占しています。液化に気体冷凍技術を使いつづける限り特許料が上乗せされ、日本での水素の供給コストは下がりにくいです。日本が磁気冷凍技術を実現すれば、その状況を変えられます。



水素エネルギーの普及には、磁気冷凍技術による水素液化が必須です——西宮伸幸

**西宮** 液体水素の供給コストは現在、1Nm<sup>3</sup> (0℃、1気圧換算で1m<sup>3</sup>のガス量) 当たり100円です。磁気冷凍技術の実現によって、2030年までに1Nm<sup>3</sup>当たり30円、2050年までに1Nm<sup>3</sup>当たり20円まで下げるのが目標です。そこまで下れば、現在、液化天然ガス(LNG)の価格が熱量等価換算で16円ほどなので、その代替燃料となる可能性が見えてきます。また、磁気冷凍技術では圧縮機が不要なため装置を小型化できるという利点があります。燃料電池自動車や水素ステーションに搭載し、蒸発した水素を液体に戻すことでボイルオフをゼロにできます。

このように水素エネルギーの普及には、大量輸送・貯蔵による低コスト化が可能な、磁気冷凍技術による水素液化が必須なのです。そして磁気冷凍技術の実用化には、水素の液化温度まで効率よく冷却できるシステムの設計(p8参照)と、磁性体の探索、そして磁性体を微小な球状の粒に加工する技術の開発が不可欠です(p11参照)。どれもNIMSが得意とするところですよ。

**清水** はい、自信を持っています。NIMSには、磁気冷凍をはじめとした低温技術の専門家だけでなく、磁性体の専門家や、磁性体に磁場をかけるために必要な超伝導の専門家もいます。気体冷凍技術は古典的な熱力学で到達できる技術で、計算機がなかった19世紀の産物です。私たちは、磁性体の探索や形状の決定に人工知能(AI)やデータ科学を活用しています。そのような新しい方法で開発する磁気冷凍技術は、水素液化の世界に革新をもたらすでしょう。

## 安価な供給と安全な利用にNIMSが貢献

**清水** NIMSは2019年4月に「液体水素材料研究センター」を設立しました。水素社会の実現には、安価な供給と安全な利用が不可欠です。水素社会が求める二つの「安」を、液体水素材料研究センターが実現します。安価な供給を実現するのが、

磁気冷凍技術です。一方、「水素脆化」や「低温脆化」といって水素と低温は金属を脆くすることが知られていますが、輸送や貯蔵に使うタンクが液体水素にどのくらい耐えられるかはまだ確かめられていません。私たちは、材料の液体水素に対する耐久性を評価する試験を計画しています。得られたデータを元に最適な材料を開発し、水素エネルギーの安全な利用を実現します。

**西宮** 材料の信頼性評価はNIMSでなければできないことです。また、沼澤氏の磁気冷凍技術のようにひとつのテーマを長年にわたって深掘りできるNIMSの研究環境も素晴らしいですね。

**清水** 沼澤氏は、電気抵抗がゼロになる超伝導現象を実現させるために低温技術の開発を行っていました。ところが、1986年に高い温度で超伝導を示す高温超伝導体が発見されると、低温技術は不要になるだろうという風潮が高まりました。しかし沼澤氏は、超伝導以外にも低温技術が必要とする分野があると考え、研究を続けたのです。そして今、水素社会実現のカギとなる技術として磁気冷凍技術が注目を集めている。ドラマチックなストーリーですよ。

実は、高温超伝導体は30年たった今も民生用に広く普及するには至っていません。磁気冷凍技術こそ絶好のチャンスだと考えています。高温超伝導体も、磁性体に磁場をかける磁石として使うのです。30年前に仲たがいがいた高温超伝導体と磁気

水素社会が求める二つの「安」を実現します——清水 禎



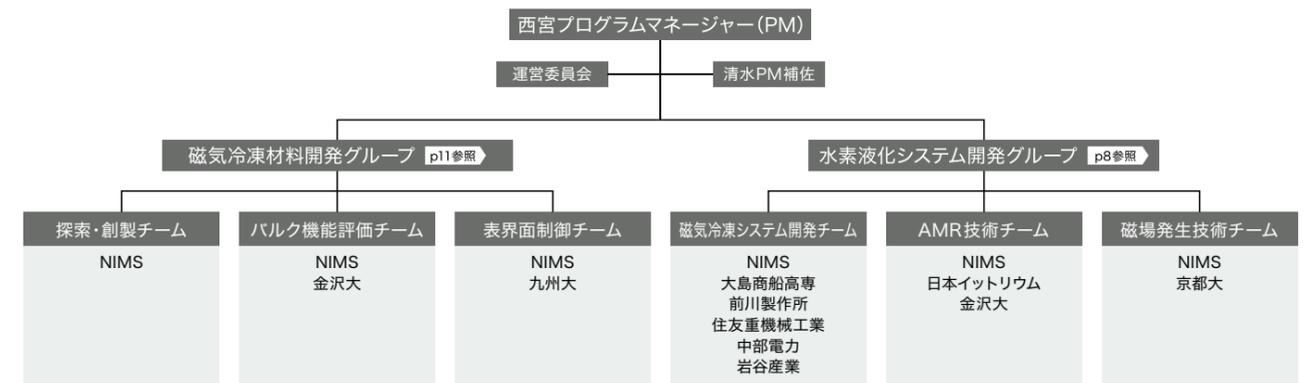
冷凍技術が結びついて水素社会の実現に導く。液体水素材料研究センターの長期構想には、そこまで入っています。

**西宮** NIMSにはさまざまな技術開発の

タネがあります。これらを存分に生かし、ぜひ一緒に磁気冷凍技術で、水素社会の実現を大きく加速させましょう。

(文・鈴木志乃/フロンクリエイト)

図2 JST 未来社会創造事業「未来社会に必要な革新的水素液化技術」の体制図



# 液化効率アップの切り札 独自の“磁気冷凍サイクル”

「水素社会」を迎えるにあたり、気体ではかさばる水素をどうしたら大量に輸送・貯蔵できるかが問題になっている。

そこで注目されているのが、体積を800分の1に圧縮できる「液体水素」だ。

水素を液化させる技術はすでに実用化されているものの、現状では満足のいく液化効率が得られていない。

ところがNIMSには、それを飛躍的に向上させ得る技術のタネがある。

タネとそこから芽吹いた独自の液化戦略とはどのようなものか。沼澤健則に聞いた。

## 従来技術の限界

水素を運び、貯めるときの担体「エネルギーキャリア」として、液体水素への期待は大きい。液化により体積が気体の800分の1にまで圧縮されるので、輸送・貯蔵の効率が高い。また、いったん化合物化して輸送する他の方法と違い、燃料として使用する際に水素に戻す手間がかからない、高純度の水素を要求する燃料電池自動車などの機器類にもそのまま使用可能など、メリットが多いからだ。

これに対して問題となっているのが、水

素を液化するコストが高いことである。常温で気体の水素を液化させるには、20K (-253℃) まで冷やさなくてはならない。極低温ともいえるこの温度は、すでに「気体冷凍技術」と呼ばれる方法によって作り出されており、その冷凍システムも実用化している。しかし、この方法では気体を圧縮・膨張させて温度を下げるため、圧縮機の効率が低くどうしても大きなエネルギーを消費してしまう。結果として、投入したエネルギーのうち液化に使われるエネルギーの割合「液化効率」は限界に達しつつある。

そんな中、液化効率を飛躍的にアップさ

せると期待されているのが、「磁気冷凍技術」だ。30年にわたり低温技術を研究してきた沼澤が「液化効率を倍増させることができる」と話す技術のタネ、磁気冷凍技術とはどのようなものなのだろうか。

## 磁石の力で冷やす！ 「磁気冷凍技術」とは

磁性体中の電子スピン（電子がもつ磁気）は通常、不ぞろいだが、磁場をかけるとそろそろ。この時、断熱状態にして磁場を除去すると（断熱消磁）、磁性体中の電子スピ



沼澤健則

Takenori Numazawa

エネルギー・環境材料研究拠点 液体水素材料研究センター NIMS特別研究員/  
JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」プロジェクト  
水素液化システム開発グループ グループリーダー

ンは磁場の拘束から解かれ不ぞろいになると周りから熱を奪い冷却する（図1）。この現象を「磁気熱量効果」といい、これを利用した冷却手法が「磁気冷凍技術」である。つまり、磁場をかけたり除去したりすることで生じる「発熱・吸熱」のサイクルを繰り返しながら温度を下げていく技術というわけだ。「この冷却原理では、すべての磁性体が温度変化を瞬間的に生じるので、エネルギーのロスを抑えて高い液化効率を実現させることが可能となります」と沼澤は言う。

## 液化実現の両輪、 “材料の進化”と“システムの進化”

シンプルで画期的な磁気冷凍技術だが、実は、これを水素の液化に応用するのは簡単ではない。問題は、冷やすべき温度領域

にある。「水素の液化には、まず常温の気体水素を液体窒素で77 K (-196℃) まで冷やし、77 Kから20 Kまでを磁気冷凍技術を使って冷やします。この77 Kから20 Kという温度領域が難関なのです」と沼澤は説明する。

磁気冷凍技術はこれまで主に、0.1 K (-273℃) 以下の超低温の発生に利用されてきた。液体ヘリウムなどで4K (-269℃) 付近まで冷やした後に、磁気冷凍技術でさらに温度を下げるのだ。沼澤自身、NASAから依頼を受けて宇宙空間で使う装置に超低温をつくり出し、宇宙の謎を紐解くX線天文学に貢献してきた実績がある。ところがこれを77 Kから20 Kの温度領域に適用しようとすると、優れた冷却能力を発揮する磁性体やシステムがない、エネルギー効率の高い磁石がないといった数々の

課題が行く手を阻み、世界でいまだ実用化に至った例はない。

「しかし、勝算はある」と沼澤は言う。「私たちは、磁気冷凍技術で苦手とされてきた34 K (-239℃) から22 K (-251℃) までを冷却する装置開発に成功しています。極低温において12 Kという幅広い温度差を単独の装置で冷却できたのは世界初で、理論的には30 Kの温度差まで上げられることが分かっています。30 Kずつ温度を下げる装置を複数組み合わせさせたシステムをつくることで、77 Kから20 Kまでの冷却が可能になるとみえています」

沼澤らの開発のベースとなっているのが、これまで主に室温領域での技術開発に用いられてきた「能動的蓄冷型（AMR）サイクル」だ。磁性体と「熱交換流体」と呼ばれるガスを封入したシリンダー型の装

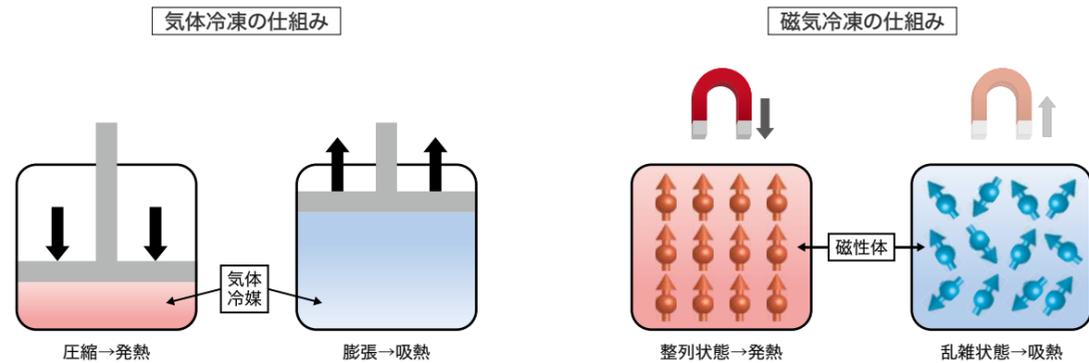


図1 気体冷凍技術と磁気冷凍技術の比較

「気体冷凍技術」は気体を圧縮すると発熱、膨張させると吸熱する作用を利用したもの。圧縮・膨張を起こすには大きなエネルギーが必要だ。一方「磁気冷凍技術」は磁性体中の電子スピンの操作は外部から磁石を近づけたり離したりするだけでよく、エネルギー消費は少なく済む。

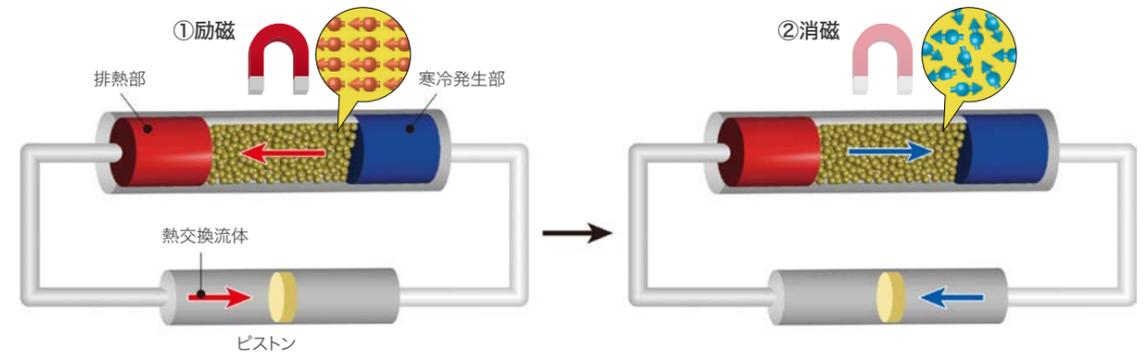


図2 能動的蓄冷型（AMR）サイクルの仕組み

①シリンダーに詰められた磁性体に磁場をかけ、電子スピンをそろえる。すると磁性体は発熱し、熱交換流体が温められる。この熱交換流体をピストンで押し出すことで、シリンダーの一端（排熱部）から熱を逃がす。②次に、断熱状態にして磁場を除去すると、磁性体の電子スピンは不ぞろいになる。すると磁性体は周囲の熱を奪い、熱交換流体は冷やされる。このとき、再びピストンを使い先とは逆方向に熱交換流体を移動させると、シリンダーの反対側の一端（寒冷発生部）が冷やされる。このサイクルを繰り返し、寒冷発生部を連続的に冷やし続ける。

置である。磁場を受けて磁性体が発熱・吸熱したとき、熱交換流体がその熱を運ぶことでシリンダー内の熱分布をコントロールし、一端を集中的に冷やしていく(図2)。

「AMRサイクルの性能向上には、磁性体や熱交換流体、磁場を生じる磁石といった“材料の進化”、それらの配置や動作を決める“システムの進化”が同時に求められ、非常に難しい挑戦をしていることは確かです。しかしNIMSにはさまざまな分野の専門家がいて、その実現に最適な場所であることは間違いありません。昨年からはNIMSを中心とした一大プロジェクトが動きだしています」

2018年11月にスタートしたJST「未来社会に必要な革新的水素液化システム」では、材料開発とシステム開発の二つを柱に課題を設定。沼澤はシステム開発チームを率いている。

システム開発において、沼澤はすでに大きな成果を上げている。独自に考案した“磁気冷凍サイクル”だ。

従来のAMRサイクルでは、熱交換流

体を移動させるのに外付けされたピストンを使う。ピストン部に熱交換流体がいったん押し込まれる分エネルギーロスが生まれるが、これを解消した画期的な仕組みだという。「特許の事情で詳しくお話しできないのですが」と前置きして沼澤は続ける。「AMRサイクルを複数つなぎ合わせた、エネルギーロスの少ないシステムを新たに考案しました(図3)。熱交換流体をピストン部へ出すことなく、磁化と消磁を連続的に繰り返すことで冷却できます。試作機をつくり検証し、従来のAMRサイクルに比べて飛躍的にエネルギーロスを減らせることが分かりました」

今後は、極低温でも高いエネルギー効率で運転できるかを検証していく。プロジェクトは10年計画で、液化効率を50%以上、1日に液化できる水素を100kg超にした大規模な「水素液化システム」をつくり上げる計画だ。また液化後の輸送・貯蔵中に、一部の水素が蒸発してしまうのを再び液体に戻す、軽量・小型な「再凝縮システム」も併せて開発する。

### 「開発の機は熟した」

10年間という開発プログラムの長さは、今回の技術開発が容易でないことを物語っている。しかし近年、室温領域において新しい磁性体が次々に開発され、磁気熱量効果という現象自体の知見も蓄積してきている。冷蔵庫の冷媒に使われている温室効果ガスを使わずに物を冷やせる技術として磁気冷凍技術が脚光を浴び、目覚ましい発展を遂げているのだ。そうした新たな知見は、水素の液化に必要な極低温という条件下での技術開発にも拍車をかけるだろう。

他にも、超伝導技術により強い磁場をつくり出せるようになるなど、磁気熱量効果を極低温条件で実用化するのに必要な材料はNIMSに揃ってきている。プログラムの採択により企業との連携体制も整えられた。「開発の機は熟したのです」と沼澤。長年の磁気冷凍技術の研究成果が、水素社会を支える技術として実を結ぼうとしている。(文:池田亜希子/サイテック・コミュニケーションズ)

## Challenge 2 | 材料開発

# システム実現の明暗を分ける 磁性体とその加工技術

NIMSが産学官連携で推し進める「水素液化システム」の開発。

これを実現できるかどうか、その命運は冷却原理の根幹を担う「磁性体」の性能が左右する。

磁性体に求められる条件とは何か。それを叶える材料開発のシナリオとは。

高性能な磁性体開発に取り組む北澤英明と、その加工技術の開発に取り組む竹屋浩幸に話を聞いた。

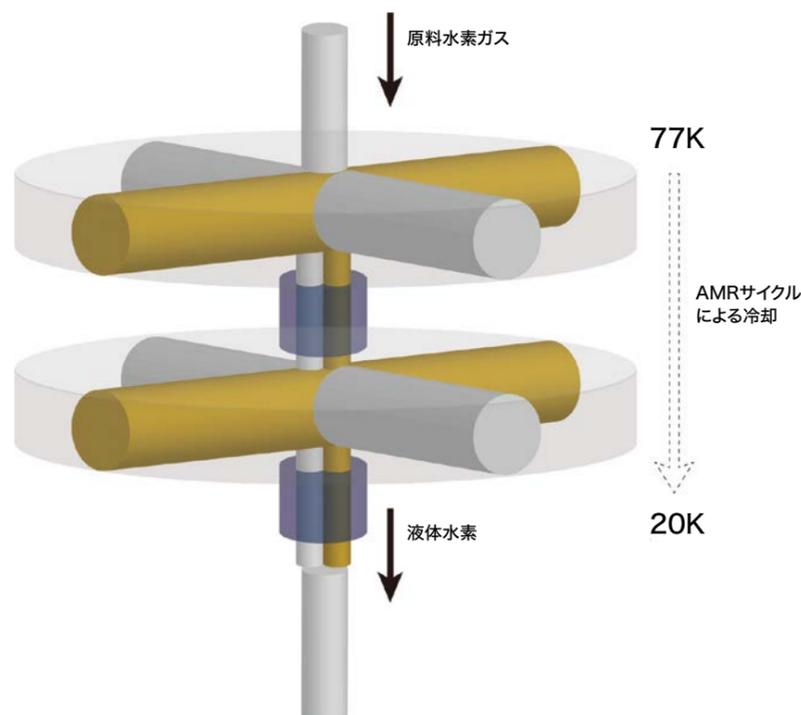


図3 沼澤が考案した「水素液化システム」概略図  
AMRサイクルを複数つなぎ合わせた、エネルギーロスの少ないシステム。熱交換流体をピストン部へ出すことなく、断熱消磁を連続的に繰り返すことが可能に。この構造をベースに、封入する磁性体が最も冷却能力を発揮できるシステムにするべく、改良を重ねていく計画だ。





北澤英明

Hideaki Kitazawa

エネルギー・環境材料研究拠点  
液体水素材料研究センター NIMS特別研究員/  
JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」プロジェクト  
磁気冷凍材料開発グループ グループリーダー



竹屋浩幸

Hiroyuki Takeya

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)  
ナノフロンティア超伝導材料グループ 主席研究員/  
JST「未来社会に必要な革新的水素液化技術」プロジェクト  
水素液化システム開発グループ AMR技術チーム チームリーダー

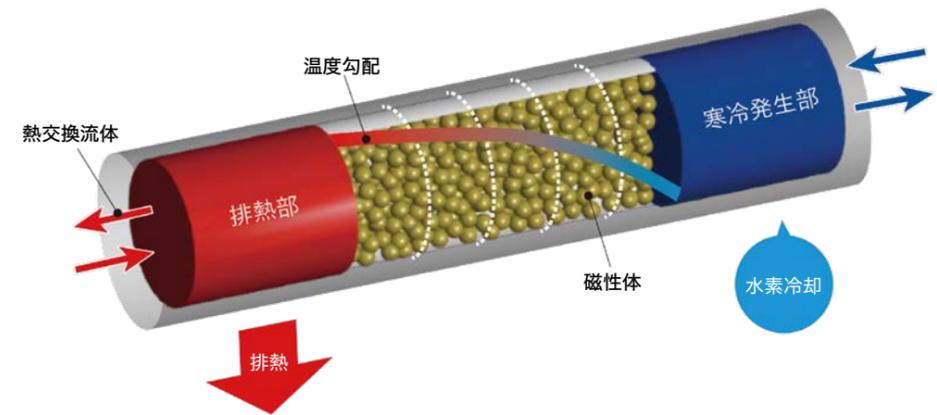


図2 AMRサイクルにおけるシリンダー設計

熱交換流体の移動により、シリンダー内には温度勾配が生じる。効率的に冷やしていくため、温度領域ごとに優れた冷却能力を発揮する磁性体を数種類並べる方法も考えられる(白点線)。磁場への応答性や冷却幅、流体への熱の伝えやすさなど、磁性体にはさまざまな特性が要求される。

### 優れた磁性体なくして 高効率なシステム実現はない

「水素液化の実現に向け最初に越えなければならぬ壁は、大きな『磁気熱量効果』を示す磁性体を開発すること」

そう話すのは、JST「未来社会に必要な革新的水素液化システム」プログラムにおいて、材料開発を率いる北澤だ。磁気熱量効果とは、磁性体が磁場を受けたときに温度変化を生じる現象のこと。この効果を利用して温度を下げる「磁気冷凍技術」によって水素の液化を目指す、前出の「水素液化システム(p8参照)」では、磁性体による冷却幅が大きければ大きいほど、高効率な冷却が可能となる。裏を返せば、優れた磁性体なくして高効率なシステムの実現は成し得ない。

この「水素液化システム」において、磁性体による冷却を求められる温度領域は77 K (-196℃) から20 K (-253℃)。しかし、これだけの温度差を単独でカバーするような磁性体は、現状では存在しない。良くて20 Kの冷却幅が限界だ。そこで、何種類もの磁性体を使って段階的に温度を下げていくことになる。

「磁性体にはそれぞれ得意、不得意な温度領域があります(図1)。そこで、磁性体同士の「連携プレー」によって冷却を実現するのが現実的と言えるでしょう」と北澤は説明する。

システム開発のベースとなっている

AMRサイクルでは、シリンダー内に詰められた磁性体による発熱・吸熱を熱交換流体に伝え、その流体の移動によって熱分布をコントロールし、一端を集約的に冷やしていく。「たとえば、シリンダー内に数種類の磁性体を得意な温度領域ごとに並べ、熱を受け渡していくことで高い冷却効率を実現する方法が考えられます(図2)」と北澤。そこでいくつかの温度領域を設定し、それぞれにおいて大きな磁気熱量効果を示す磁性体の開発を目指していく。

「まずは、一般的に大きな磁気熱量効果を示すといわれる重希土類(Gd、Dy、Ho、Erなど)をベースに、さまざまな元素を添加して性質を変化させ、新しい磁性体をつくり出そうと試みています。このとき、研究者の経験や少ないデータに頼った非効率な材料開発に陥らないよう、最新の手法を駆使していく計画です」

たとえば、磁気エントロピー変化や転移温度など磁気熱量効果に関連するデータ

を大量に集めてデータベースをつくる。データベースに基づいて機械学習を行い、導かれた材料の物性予測に基づいて研究開発を牽引する。加えて、第一原理計算によるシミュレーションなども活用して、効率的な材料開発を目指す。

中でも、40 K (-233℃) から20 Kに至る温度領域において大きい磁気熱量効果を示す磁性体開発に成功すれば、液体水素を貯蔵するタンク内で蒸発してしまう水素を液体に戻し、余すことなく活用する「ゼロボイルオフ」の実現も夢ではない。

### 磁性体の特性を引きだす 加工法の探索

有望な磁性体が誕生したら、次に装置・システムに搭載できる形状に加工する。「磁性体は磁気熱量効果さえ大きければ良いわけではありません。例えば、磁性体の熱伝導性や機械的特性、耐水素性

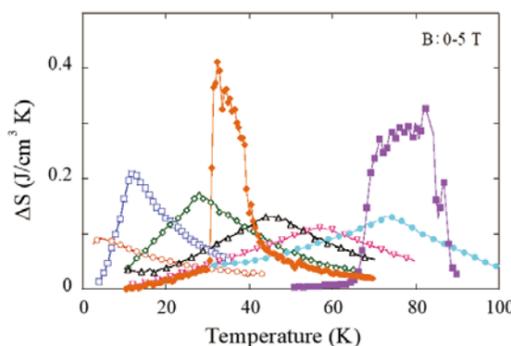


図1 磁気冷凍による水素液化に有望な磁性体の例  
縦軸は、磁場が0 Tから5 Tに変化したとき磁性体中で生じる電子スピンの乱雑さ(磁気エントロピー)の変化量、横軸は温度条件。グラフの頂点が高いほど一度に冷やす能力が高く、横に広がりを持つほど幅広い温度領域をカバーできる。これらの両立が理想的だが、磁性体ごとにそのバランスや、最高性能を発揮できる温度領域はさまざまだ。

- GGIG(Fe50%)
- ErAl<sub>2</sub>
- △ HoAl<sub>2</sub>
- ▲ Ho<sub>0.5</sub>Dy<sub>0.5</sub>Al<sub>2</sub>
- ▽ DyAl<sub>2</sub>
- GdNi<sub>2</sub>
- Gd<sub>5</sub>(Si<sub>0.825</sub>Ge<sub>0.175</sub>)<sub>4</sub>
- ◇ ErCo<sub>2</sub>

といった特性や形状などもシステムになったときの性能に複雑に関係してくるからです」と竹屋。熱の伝わりやすさに関わる磁性体の熱伝導性は、システムの冷却効率に大きく影響する。強度などの機械的特性は、繰り返し使用可能かといった装置の寿命を決めるファクターである。また、磁性体で水素を直接冷却する方法も考えられるため、分子径の小さい水素が磁性体内部に侵入して脆くなる性質が液化効率に与える影響についても検討し、対策を講じなくてはならない。さらに複雑なことには、こうした特性に形状が関わってくることだ。現在、竹屋は北澤からの新材料を待ちながら、従来材料を使ってそれらの特性を最大限に引きだす加工法を探っている。

その中で竹屋を悩ませているのは、大きな磁気熱量効果を示す磁性体の多くが、重希土類の金属間化合物だということだ。これらの化合物は共通に、熱伝導性が悪くて、脆くて加工しにくく、水素を吸収しやすい、という水素の液化に用いる磁性体としては欠点となる性質を持っている。こうした欠点を克服し同時に特性も発揮させるために、材料の形状やその成形過程、コーティングといった加工に関する検討を行っている。

たとえば、熱交換流体を効率的に冷やすために、シリンダー内の磁性体の表面積をできるだけ大きくしたいという要求がある。目的を満たす形状はいくつか考えられるが、今は直径0.3 mm ~ 0.5 mmの粒

状の加工に挑んでいる。このサイズの球体であれば、AMRのシリンダー内を流れる熱交換流体の通り道を確保しながらも、数多く詰めこめるので、冷却効率を上げることができるからだ。粒状に加工する方法には、加工精度や量産コストなどを考慮して「ガスアトマイズ法」を採用(図3)。原料となる材料を溶かして垂らしたところに高速のガスを吹きつけて成形、急冷して固体化する方法だ。吹きつけガスの圧力によってサイズや形状が変化するので、適切な条件を探っている。また、内部に微細な空孔ができるなど不良が生じることがあるので、ガス圧の調整をしている。他にも、プロジェクトでは水素が磁性体に与える影響を可視化する水素顕微鏡など、分析機器類の整備も進めている。



図3 材料の加工方法「ガスアトマイズ法」  
真球の磁性体をつくる方法として有力。溶けた金属が容器底面の穴から流れた瞬間に、高圧のガスを吹きつけて成形する方法。直径0.3 mm ~ 0.5 mmの真球に加工する。

### 実用化に向けた体制づくり

北澤は、「材料は、加工技術ができてシステムに搭載されて、初めて意味を持ちます。そのため今回のプログラムでは、物質開発から材料設計、システム設計、信頼性までを一気通貫で取り組みます。水素社会を支えるこの技術を、絶対に実用化したい」と意気込みを見せる。竹屋はこう続けた。「参加メンバーは、それぞれの専門分野で多くの研究成果を上げてきたベテランばかりです。低温技術、材料開発、材料加工技術の知見をここで活かそうと、互いに意見を活発に交わっています」。プログラムは、水素液化に欠かせない経験豊かな研究者たちが集まり、満を持してのスタートとなった。これから10年間、若い研究者も巻きこみながら、日本のエネルギーの将来を切り拓いていく。

(文・池田亜希子/サイテック・コミュニケーションズ)



AMR サイクルを搭載した、磁気冷凍試験機。北澤や竹屋らが開発を進める磁性体の性能評価や、エネルギー効率の評価など、基礎学理の確立に向けた検証を行っている。ここで得た知見を基に、沼澤や神谷宏治主席研究員（写真）らによる新システムの開発が別途進行中だ（p10 図3 参照）。

## INTERVIEW

# 水素社会を支える 企業とNIMSの力

日本の水素エネルギー関連技術をリードする企業として  
今後の期待を伺いました。

川崎重工業株式会社  
技術開発本部  
水素チェーン開発センター 上席研究員  
神谷祥二氏  
Shoji Kamiya



### 御社ではエネルギーとしての「水素」に どのように取り組んでこられましたか——

オイルショックが起こった1970年代前半、安定供給が見込まれるエネルギーのひとつとして水素が候補に上がりました。その後、石油価格が安定したので世間ではすっかり忘れられてしまいましたが、川崎重工業はエネルギーセキュリティの観点から「輸入に頼らないエネルギーが必要」と考え、水素に注目し続けてきました。2009年ごろからは、社をあげて水素エネルギー関連技術の開発に取り組んでいます。

### 2016年からは大型の水素関連の プロジェクトにも加わっていますね——

NEDOの助成を受け、5社協力の下「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」を推進しています。豪州に大量に眠る水分の多い石炭「褐炭」を分解して水素をつくり、それを9000 km離れた日本まで持ってこようというわけです。その際、運びやすさのために水素を気体冷凍技術で液化します。液体水素を選択した理由は、一度に大量に輸送できること。そして、当社の事業で培ってきた設備の製造・運用技術、たとえば液体天然ガスを輸送するタンカーやロケット燃料をためておく液体水素貯蔵タンクなどとの親和性が高かったからです。

問題は、水素の価格が高く他のエネルギー源との競争力が低いことです。原因は、液化する際に投入するエネルギーのコストです。その点NIMSで開発が進む磁気冷凍技術は、その原理上、気体冷凍技術に比べて少ないエネルギーで液化で

きるの、実現すればコストが大幅に抑えられます。一方、商用化には1日に100tの液化能力をもつシステムが求められるので、大容量化が必須です。その実現は容易ではないと思いますが、「是が非でも成功してもらいたい」というのが私たちの願いです。

### 水素社会の実現に向け、材料とNIMSへの 期待をお聞かせください——

本格的に水素社会が訪れたら、今とは比べものにならないほど大容量の水素を扱う技術やノウハウが必要になります。中には材料がブレイクスルーを起こすものもあるでしょう。たとえば、極低温下で高強度な材料が開発されれば輸送タンカーのタンクの内壁を薄く軽量化でき、その分、多くの液体水素を積みこめます。また現在の課題が、点検の度に常温に戻ってしま

うタンクに再び液体水素を入れたとき、十分に冷えるまでに一定の量が蒸発してしまうこと。タンクの内壁が薄いほど、その量を抑えられます。

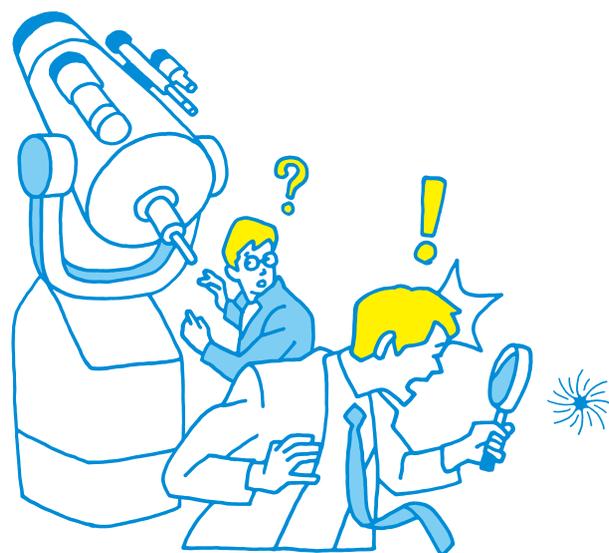
しかし、材料が極低温下に長時間おかれたとき性能がどのように変化するか定量的に示したデータは、世界的にもまだ十分に蓄積されていません。NIMSにはクリープ試験や疲労試験など、材料の性能評価において実績があり、その信頼性は極めて高いものです。だから、極低温下での評価もNIMSにけん引していただきたい。そうすれば、私たちは材料を安心して使うことができます。

当社は水素関連の技術を幅広く持っています。しかし、水素社会を一社で支えることはできません。NIMSと共に協力しながら、水素社会の構築に貢献していきたいと期待しています。



提供：川崎重工業株式会社

きみが思っているより  
科学はもっとおもしろい



## ブラックホールがみえた!?

文・えとりあきお

イラスト・岡田 文 (vision track)

光さえも吸いこんでしまう……そのため私  
たちには絶対に見ることができない、と思わ  
れていたブラックホールを、実際に観測する  
ことができた!というニュースは、全世界の  
人びとをびっくりさせました。

2019年4月10日の午後10時すぎ、東京  
のほかワシントン、ブリュッセルなど6つの  
地域で同時に会見が開かれ、ウェブ上で全  
世界に中継されました。公開されたのは1枚  
の画像。人類がはじめて目にするブラック  
ホールの姿です。

東京で発表したのは国立天文台の本間希  
樹教授。この成果は、世界13研究機関を中  
心に200人あまりの研究者が関わっている  
国際共同グループEHT(イベント・ホライズ  
ン・テレスコープ)プロジェクトによるもので、  
本間教授はその中心メンバーです。

実際に観測が行われたのは2017年4月  
5、6、10、11日の4日間。世界各地の8つの  
電波望遠鏡を同期させた仮想の巨大望遠鏡  
は、口径1万キロメートル(km)という地球と  
ほぼ同じ大きさにもなります。この望遠鏡で  
みれば、月の表面にあるゴルフボールを見分  
けることができるというのですから、その性  
能は画期的なものです。

撮影されたのは、約5500万光年かなた  
のM87銀河の中心にある巨大ブラックホ  
ールが周囲につくり出す影、“ブラックホール  
シャドウ”です。

画像をみると、まんやかに黒い影がうつ  
り、その周囲は明るく輝いています。観測に  
先立って、EHTグループはシミュレーション  
によって「ブラックホールのまわりはあらゆる  
方向から降るプラズマによって明るく輝い  
て見えるが、中央部だけはくりぬかれたよう  
に暗く見える」と予想していたのですが、そ  
の通りの画像が撮影されていたというわけ  
です。望遠鏡のデータを解析し、このみごと  
な画像をかたちづくるまでに2年がついやさ  
れました。

ちなみに、ブラックホールシャドウの直径  
は1000億km、この影の中に存在するブラッ  
クホール本体の直径は4割くらいの大きさ  
で、400億kmと見積もられています。太陽  
と比べてみると、直径が約2万9000倍と巨  
大であることは確かですが、驚くべきはその  
質量。なんと太陽の約65億倍というのです  
から、とてつもない重さです。

ブラックホールといえば、最初にその存在  
が認められたのは1970年代のこと。はくちよ

う座のとある星が、おかしな動きをしている  
のが見つかったことにはじまります。この星  
は周期的に動いていて、どうやら、姿の見え  
ないほかの星の重力に振りまわされている  
ようなのです。そこで、姿の見えない星を  
“X-1”と名づけて大きさや重さを計算したと  
ころ、ごく小さな星にも関わらず極めて重い  
ことが明らかになり、X-1はブラックホール  
に違いないと認定されました。

とはいえ、その存在はあくまでも、いくつ  
かの証拠から間接的に導かれたもの。実際  
にブラックホールの姿をとらえた今回の発  
見は、研究者にとって悲願でした。

ところで、巨大ブラックホールに対して、  
ミニブラックホールを考える人もいますよう  
です。そのサイズはなんと、素粒子レベル。宇  
宙のはじまりにつくられ、今なお宇宙のあち  
こちに散らばっているのだといいます。まだ  
理論上の存在にとどまっていますが、観測技  
術が発展すれば、この目で見るができる  
日がくるのかもしれない。

宇宙はまだまだ、私たちの夢をかきたてる  
ナゾにあふれています。

えとりあきお：1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。