

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（しよまのしんけい）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。

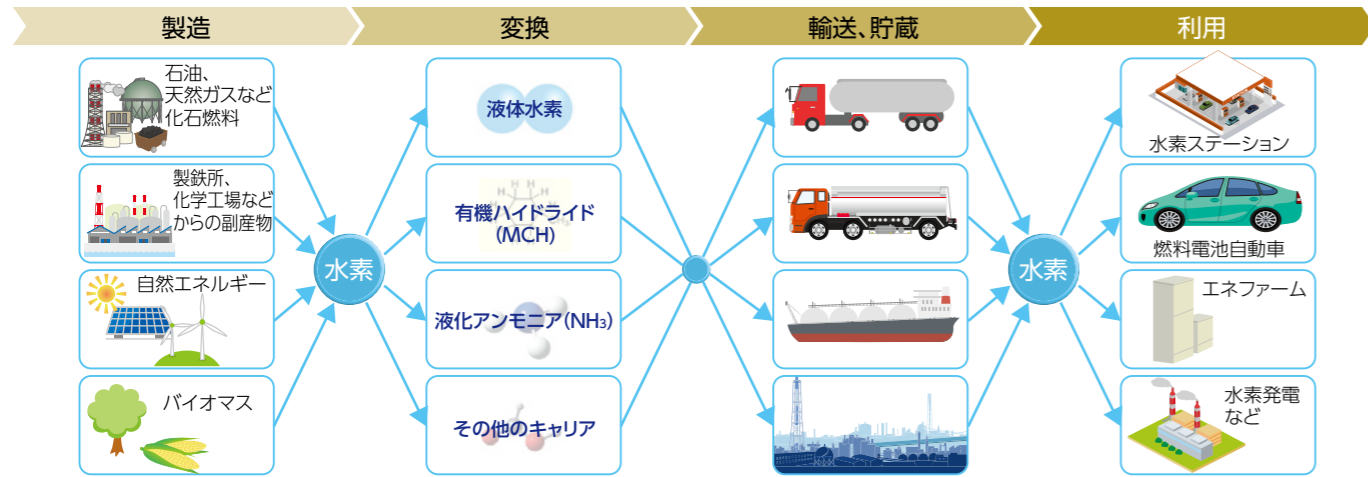
低コストな水素の液化に挑む

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、かつたん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。

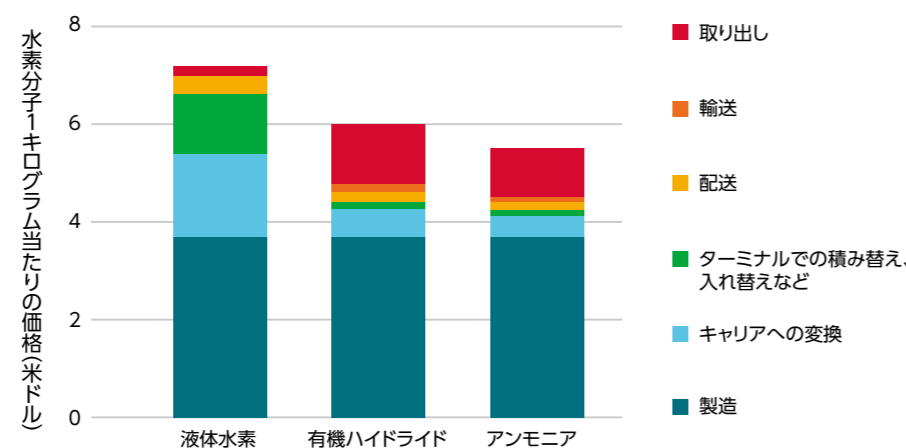
きます。しかし、日本で消費するエネルギーを賄うためには海外からの輸入も想定され、輸送や貯蔵まで含めたコストを低下させることが求められます」と指摘する。

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

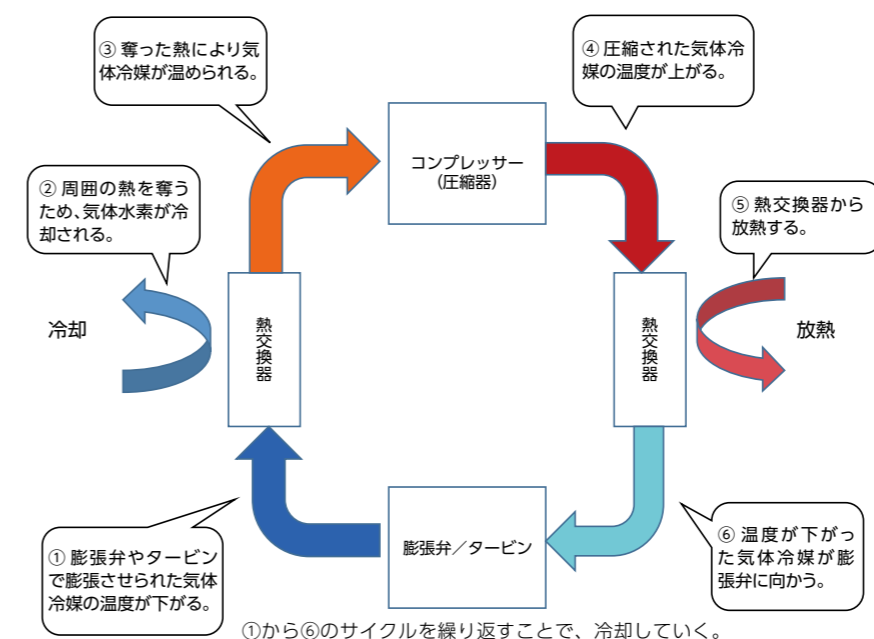


■図2 オーストラリアから日本に液体水素、有機ハイドライド、液化アンモニアとして水素を輸送する場合のコストの比較。国際エネルギー機関(IEA)が試算した。現状の評価では、液体水素を用いる場合、液化コスト(水色)と輸送中の損失(緑、黄色)が大きいことがわかる。(IEA Special Reports "The Future of Hydrogen" (2019年6月)より。IEAの分析およびReuß(2017), "Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model"を基にIEAが作成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

きると考えています」。

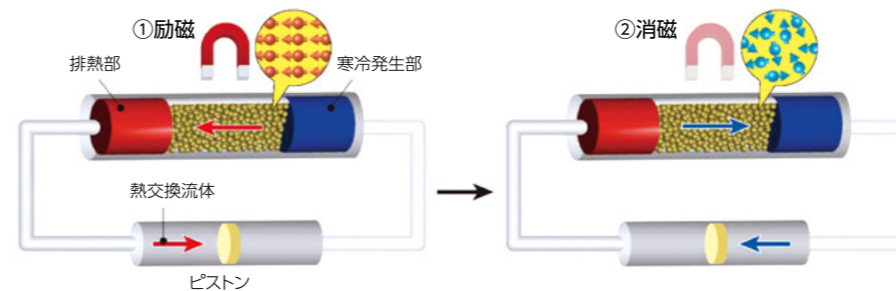
水素を液化するには極低温の20ケルビン(-253度)まで冷却する必要があり、現在は気体冷凍方式が使われている。その原理は家庭用のクーラーと同じで、冷媒と呼ばれる気体を繰り返し圧縮、膨張させた際の発熱と吸熱を利用して温度変化を生み出していく(図3)。液化効率が低く、冷媒の圧縮に大量のエネルギーを要することに加え、海外メーカー2社が特許を独占していることも、液化のコスト増大につながっている。

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



■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ナーが一方に並び、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)

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

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。

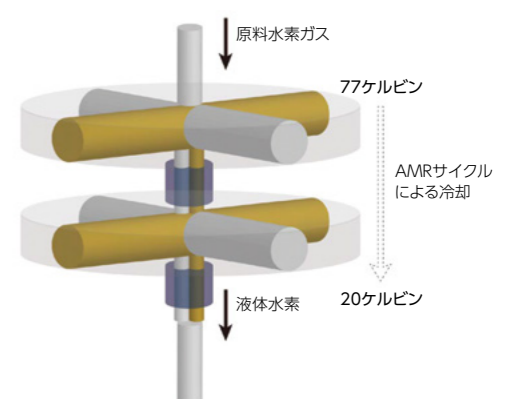
AMRサイクルを利用した水素液化の研究は多彩なノウハウが必要で、研究を実施する機関は世界でもごく少数だ。成功すれば、日本発の革新的な技術になる。しかも、この技術の利点は液化効率だけではない。

「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)。

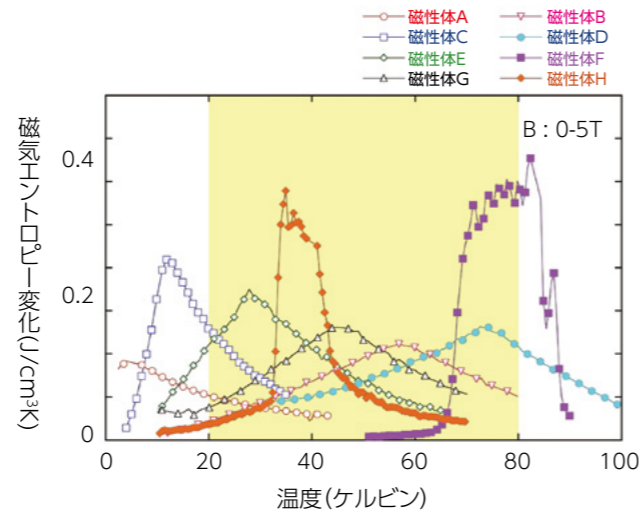
宝の山から最適な材料を探せ

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材料でも、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。



■ 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。

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わない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かったが、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ふ(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(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

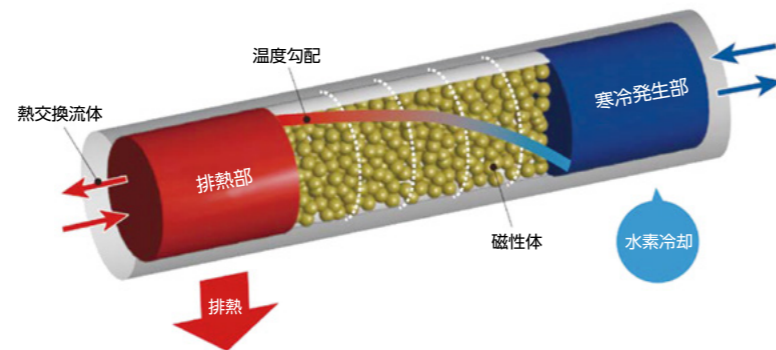
うにシステム設計を進めています。しかし、さらに優れた磁性体を開発できれば、水素液化システムの一層の効率向上が望めます。システム開発と材料開発のどちらか一方ではなく、全体を見て進めることに意味があります」と西宮さんは強調する。さまざまな候補物質から「使える」磁性材料を見つけ出す道のりは決して平坦ではないが、成果は上がりつつある。「磁気冷凍システムに適した磁性材料の候補には、すでに目星が付いています。近日中に論文を発表する予定です」と北澤さんは笑顔を見せる。

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)

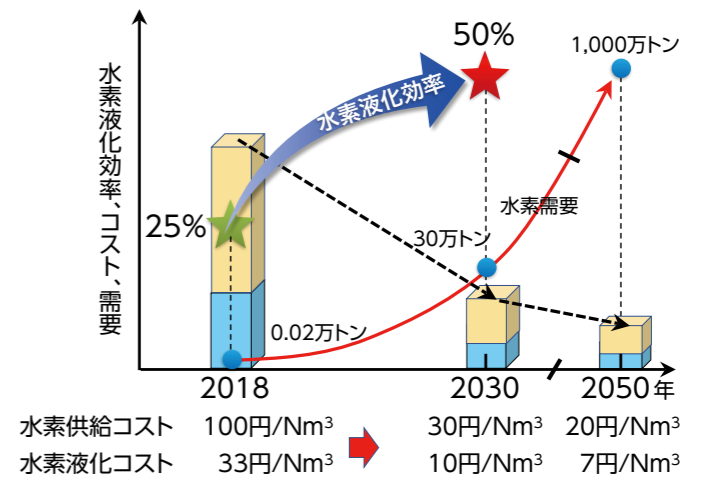
縮することが可能になる。また、磁性材料の探索には機械学習によるサポートが期待できる。清水さんは「これまでの研究の歩みが徒歩だったとすると、自動車を手に入れたくらいの研究の加速効果があると期待しています。まだ自動運転とはいかず、研究者が自ら目的地を探しつつ運転する必要がありますが、大きな進歩です」と最新技術の利用に期待を寄せる。

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ります。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。



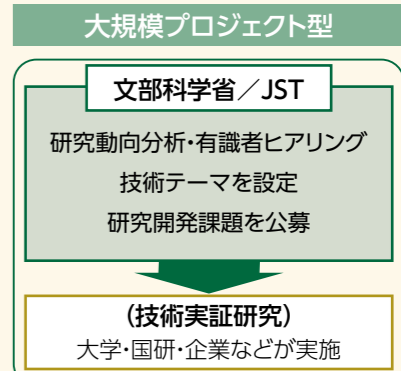
きたざわ ひであき 北澤 英明 NIMS 特別研究員
 ぬまざわ たけのり 沼澤 健則 NIMS 液体水素材料研究センター 名誉・特別研究員
 しみず ただし 清水 禎 NIMS 液体水素材料研究センター長



■ 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す、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う「未来社会に必要な革新的水素液化技術」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(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