



前人未到の地球内部を探る

深海地球ドリリング計画

1960年代に始まった地球最深部への掘削計画が、日本を中心とした国際プロジェクトとして、飛躍的な進化を遂げようとしている。プロジェクト名は「深海地球ドリリング計画」。世界最高レベルの掘削能力を持つ「地球深部探査船」を建造・運用することにより、地殻変動や気候変動のメカニズムなどを調査・研究、最終的には地殻内部への到達も目指すという、壮大なプロジェクトである。

その「深海地球ドリリング計画」の全容を見ていくことにする。

深海掘削プロジェクトが歩んできた経緯

地球の中心にはコアと呼ばれる核があり、そのまわりをマントルが対流していると考えられている。マントルの上にはプレート状の地殻が存在しており、この地殻が地球表面上を移動する。この動きがプレートテクトニクスと呼ばれる。そして、このマントルと地殻の境界をモホロビッチ不連続面（通称モホ面）と呼ぶ。このモホ面に到達するために、深海を掘削しようという計画が発表されたのは、今から40年以上前の1959年のことであった。提唱したのはアメリカのレベル博士で、プロジェクト名は掘削孔（ホール）を開けて、モホ面への到達を目指すことから「モホール計画」と呼称された。

最初の深海掘削船は、石油掘削用の船を改造したカス1号で、1961年に海底下171メートルのサンプル（柱状試料）の採取に成功。その後も深海掘削プロジェクトは、DSDP（Deep Sea Drilling Project＝深海掘削計画・1968年）、IPOD（International Phase of Ocean Drilling＝国際深海掘

削計画・1975年）、ODP（Ocean Drilling Program＝国際深海掘削計画・1985年）と形を変えながら引き継がれてきた。そしてその間に「プレートテクトニクス説」の実証や、巨大隕石による恐竜絶滅説の証明などの成果を収めてきたのである。

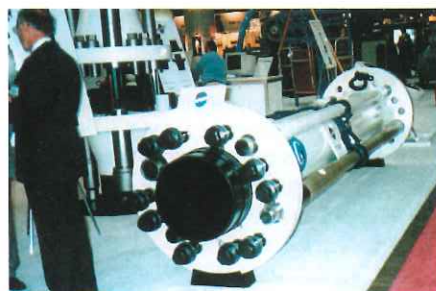
現在のODPは、アメリカが中心となり、日本、ドイツなど世界22カ国が参加する国際プロジェクトだが、これも2003年には第二期を終え、全プログラムを終了予定。そして、2003年からは、日本がアメリカと共に中心的役割を担う新プロジェクト、IODP（Integrated Ocean Drilling Program＝統合国際深海掘削計画）に移行することになっている。そして、このIODPにおいて非常に重要な役割を果たすのが、海洋科学技術センターが開発を進める「地球深部探査船」なのである。

新たな掘削技術の開発と、地殻到達への可能性

従来、科学目的で行われる海底掘削は、ドリルパイプのみを海底に降ろして掘り進み、海水を注入することで削り屑を押し出すという方式を採っていた。この方式は、短期間に多くの



安全弁の集合体である噴出防止装置は、上側部分で切り離し可能な構造となっているが、将来的にはライザー管の途中で切り離すことも検討されている。



ライザーパイプは石油産業で使われている21インチサイズのものを使用することになっているが、2,500メートルを超える深度で問題が発生すれば、材質・構造等を検討する必要があることも考えられる。



ライザー管内を循環する泥水は、掘削している地層や深度に応じて比重や粘性、化学組成などを微調整して用いる。写真上部に見える羽根は攪拌機のもの。

ドリルパイプの強度も計画実現の鍵を握る重要なファクターである。なお、ドリルパイプ先端にあるドリルビット（PDC コアビット）はチタン合金と工業用ダイヤモンドなどで構成され、ドリルパイプの回転とは別に水圧で駆動・回転する構造となっている。

掘削を行えるという利点がある一方、「大深度まで掘削していくと孔壁が崩落したり、掘削孔が地層の圧力によって閉じてしまう」「削り屑を海底に押し出すため、環境面から見て改善が必要」といった問題があった。とくに前者は、掘削深度の限界（これまでの科学掘削記録は海底下約2,100メートル）という、計画そのものに関わる問題だけに、抜本的な解決策が待たれていた。また孔壁の崩落は、コンディションの良いサンプルの回収を困難にするなど、研究的な見地から見てもデメリットがある。

さらに、海底油田や、天然ガスが埋蔵されている地域での掘削ができないのも、研究上の大きな障壁となっていた。天然資源が埋蔵されている場所は、他の地域に比べて地層の堆積速度が速いため、同じ1万年分の地層でも、より地層の厚みが増し、研究用のサンプルとしてより多くのデータが記録されている。しかし、科学掘削のドリルパイプは、サンプルを採取する必要上、中空構造のものを使用しており、これが掘削中に海底油田や天然ガスに到達すると、ドリルパイプ内を通して天然資源が掘削船上に噴出する恐れがあった（もちろん海中にもである）。深海掘削に関わる研究者たちは「研究に最適なサンプルがあることがわかっているのに、掘ることができない」というジレンマに悩まされてきたのだ。

当然、新たに建造される「地球深部探査船」は、このような問題点を解決するべく、設計が進められた。もっとも重要な変更点は、従来のドリルパイプのみの掘削方式を、ライザー掘削方式に改めたことである。ライザー掘削とは、ライザー管と呼ばれるパイプ内にドリルパイプを配置する、二重管構造の掘削方式で、ライザー管の内部には「泥水」と呼ばれる特殊な流体を循環させる。泥水は、地層の状況に応じて比重や粘性、化学組

成を調整して用いられ、孔壁をコーティング・強化するほか、地層内部の圧力とのバランス保持、あるいはドリルパイプ先端にあるドリルビットの潤滑・冷却などの多様な役割を果たすのである。また、削り屑は泥水によりライザーパイプ内を通して掘削船上まで運ばれ、環境汚染を防止するだけでなく、現在掘削している地層の状況をリアルタイムで知るための材料ともなる。

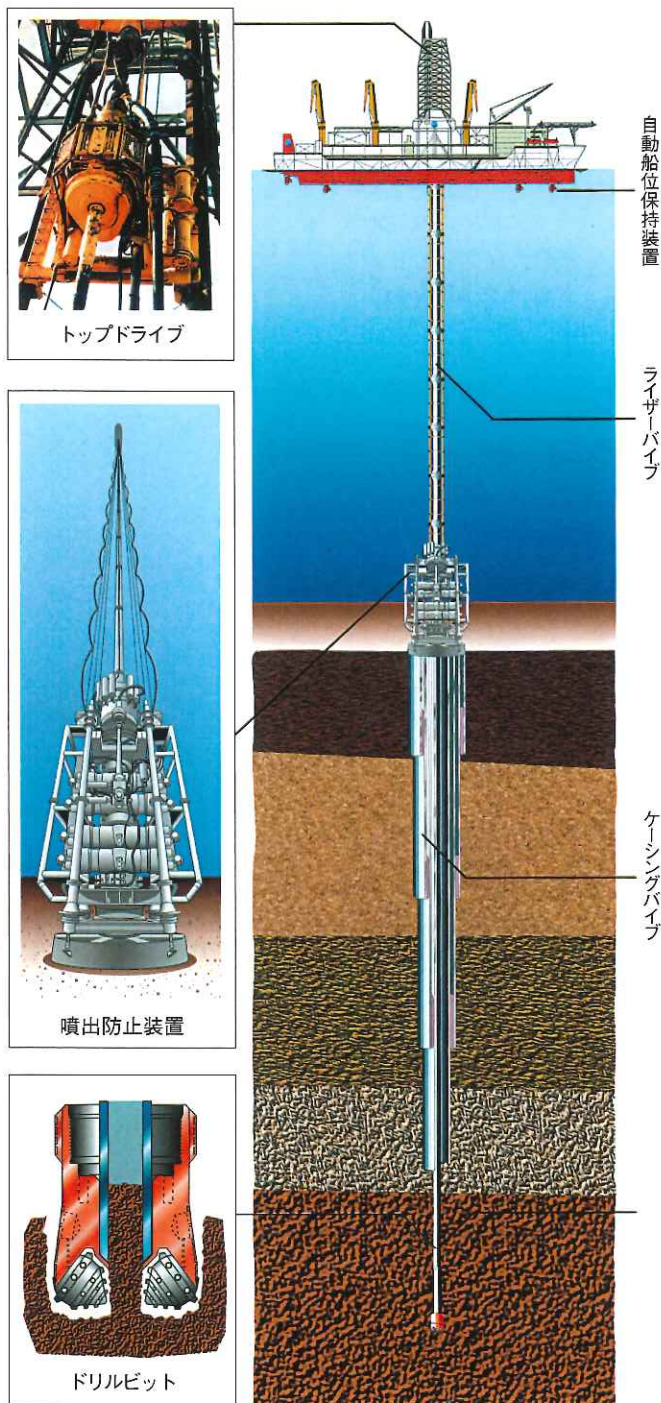
また、海底油田や天然ガス対策としては、海底に安全弁の集合体である噴出防止装置を設置することにより、海中および船上への噴出を回避できる仕組みとなっている。現在、ライザー掘削船は、深海石油掘削のため実用化されているが、研究用としては、今回の「地球深部探査船」が世界初の建造となる。船の規模も従来のジョイデス・レプリューション号（全長143メートル、幅21.34メートル）に対して、全長210メートル、幅38メートル、総排水量60,000トンと格段に大型化され、研究用区画の延べ床面積も約2,300平方メートルが確保された（このためこの船は、関係者の間で「浮かぶ研究所」と呼ばれている）。基本設計は2000年2月までに終了し、現在は各部の詳細設計が進行中。順調にいけば2004年に完成、その後、約2年間の慣熟訓練を経て、2006年から国際的に運用される見込みである。

IODPが目指す科学目標

では、IODP（統合国際深海掘削計画）が「地球深部探査船」で実現しようとしている科学目標とは、具体的にどのようなものなのだろうか。項目別に以下に紹介する。

■古環境と環境変動

まず第一にあげられるのは、地球における古環境の研究である。深海の地層は、地上の地層に見られるような風化、浸食などがほとんどみられず、太古から現代に至るまでの地層のサンプルを、ほぼ完璧な状態で入手することができる。大深度掘削で約2億年前のジュラ紀の地層にまで到達できれば、2億年



ライザー掘削を採用したことで、大深度の掘削が可能となった。地下には掘削深度に合わせてケーシングパイプと呼ばれる鋼管が段階的に挿入され、そのまわりをセメントで固定。海底面上に設置されているのが、噴出防止装置（BOP=Blow Out Preventer）である。ドリルパイプは檣の最上部にある大型モーター（トップドライブ）により駆動されるが、檣の高さは海面から100メートル以上あり、これは40階建てのビルに相当する高さだ。

前から現在に至るまでの環境変動が、サンプルを通して研究可能となる。地球誕生初期には、活発な火山活動があり、その後も何百メートルにもおよぶ海面変動、小天体の衝突による環境の激変や、それらにともなう生物の大絶滅・進化が繰り返されたと考えられている。その歴史を解明するとともに、地球が「水と緑の惑星」と呼ばれる姿を、どのようにして保ってきたかも明らかにすることが期待されているのである。

また、これまでの研究では、この1万年あまりの気候が、それ以前と比較して「異常に安定」していることもわかってきている。

こうした気候変動のメカニズムが、約2億年にわたる環境変動の研究によって詳細に解明されれば、今後予想される地球温暖化への対応策を発見することも、可能となるかもしれない。

■地下生命圏の探査

また別の研究では、高温・高圧・無酸素という大深度の地下に、数多くの生命体が存在することも明らかになりつつある。そして、この「地下生命圏の存在」も、大深度から採取したサンプルを研究することによって、検証することができるのだ。一般に生物圏（生物が生息する層の厚み）は、陸上で平均100メートル程度、海中でも平均3,800メートル程度と言われている。ところが、一般の生物圏に棲息するバイオマスと同程度の微生物バイオマスがさらに深い（深海から5,000メートル程度）ところに存在するという試算もある。深海掘削によって、こうした大深度の探査が可能になれば、人類は広大な未知の生物圏探査の機会を得ることが出来る。

さらに注目すべきは、この高温・高圧・無酸素という環境が、地球の初期段階にきわめて近いということである。すなわち、地下生命圏を研究することは、地球における生命誕生のプロセスを研究することにもつながっているのだ。

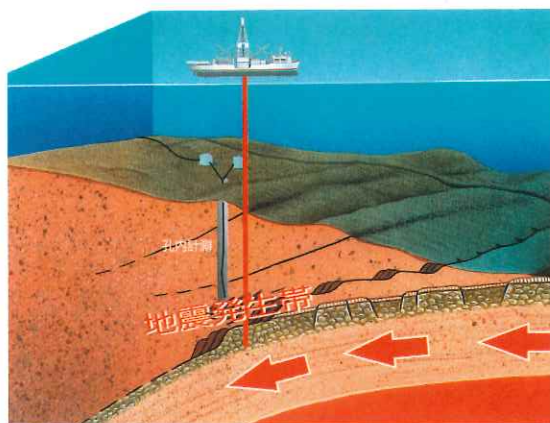
■地震発生ゾーンの直接観測

現在、海底での地震観測は、掘削孔に地震計、ひずみ計、傾斜計などを設置して行われているが、ライザーパイプを持たない科学掘削船での掘削では、地震の原因となる大陸岩盤と大洋プレートの境目（海底下4,000～5,000メートル）に到達することは不可能であった。だが、ライザー掘削を行う「地球深部探査船」であれば、この岩盤とプレートの境界上を掘削し、サンプルを採取したり、計測機器を設置することも可能となる。こうした地震発生ゾーンの直接観測は「地球深部探査船」が行う第一回目のプロジェクトとして、国際会議ですでに承認されており、もし実現すれば、地震発生のメカニズム解明に大きく貢献することは間違いないだろう。なお、具体的な掘削地点はまだ未定とのことだが、四国沖の「南海トラフ」などが有力視されている。

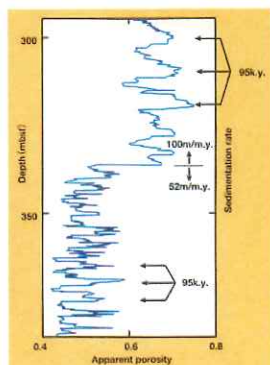
■メタンハイドレートの研究

メタンハイドレートとは、簡単に言えば、メタンを含んだ氷塊のことである。海底堆積物中の有機物を微生物が分解することでメタンが発生、このときメタン分子が、凍った水分子の作る「かご」状の結晶に捕らえられてできる。存在するのは、温度が氷点以下、もしくは51気圧以上（水深500メートル以上）の環境下。ちなみに、水結晶が形作る「かご」の大きさは一定ではなく、メタン、CO₂、硫化水素など、比較的小さいガス分子なら、複数個が入るようなサイズのものができる場合もある。

全世界のメタンハイドレート埋蔵量は、炭素換算で全世界に埋蔵されている原油、天然ガス、石炭すべてを合わせた量の2倍になると言われ、そこから効率よくメタンを取り出すことができれば、将来的にクリーンエネルギーとして有効活用でき



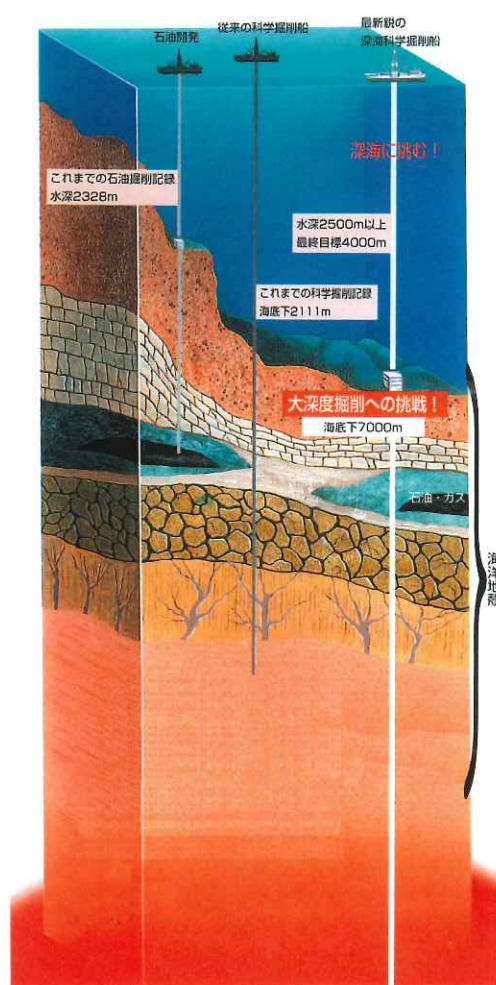
大深度掘削が実用化されれば、大陸岩盤と海洋プレートの境目にある「地震発生帯」で直接観測を行うことも可能となる。



地層内のサンプルを採取するツール。地層にかかる応力方向を調べるほか、活断層の性質把握などにも活用できる。比抵抗を用いて掘削孔内の高解像度カラーイメージを作成するツール（FMI）なども使用される予定である。



掘削後の孔内に観測装置を設置することで、地殻内の変動を長期間にわたってモニターする。複数の観測孔をリンクすることによる地球観測ネットワークの実現も期待されている。



石油開発における掘削記録は、水深2,300メートル、海底下3,000メートルあり。科学掘削では海底下約2,100メートルが限界であった。「地球深部探査船」の水深4,000メートル、海底下7,000メートルという数字が、いかに大きなものであるかがわかるだろう。この大深度掘削を可能にするのが、新たに導入されるライザー掘削方式である。

る可能性があるとも言われている（日本近海で開発可能なメタンハイドレート量は、日本の天然ガス消費量換算で140年分だとする説もある）。

一方で、大陸棚から深海へ至る途中の「大陸斜面」に形成されるメタンハイドレートが、大陸斜面の海底地滑りにどのような役割を果たしているのか、大気中に放出されるとCO₂の10～20倍の温室効果を持つメタンが、過去の地球温暖化にどのような役割を果たしたのか、などについては、いまだ多くの謎が残されている。「地球深部探査船」の行うサンプル採取は、その謎を解明するための第一歩となるはずである。

■ マントルへの到達

深海地球ドリリング計画の最大のチャレンジとも言えるのが、このマントルへの到達、およびそのサンプル採取である。陸上の地表から地殻より内部に到達するためには、20,000～30,000メートルの距離を掘らなければならないと言われているが、水深4,000メートル級の深海からであれば、海底面を7,000メートル掘れば到達できると考えられている（海面からの距離約11,000メートル）。「地球深部探査船」では、当初水深2,500メートルでの海底掘削を目標に開発をスタート、技術的なノウハウを蓄積しながら海面からの掘削距離を伸ばし、最終的にマントル到達を目指す予定だ。実現すれば、人類初の地殻の内側到達であり、そこから得られるサンプルは、アポロ

計画でもたらされた月の石にも匹敵する価値があると考えられる。何より1959年にスタートした「モホール計画」が、半世紀近くを経て実現されるという科学的意義は大きい。

また、マントル到達以前の地殻深部からサンプルを採取するためのシステムも、現在開発が進められている。これらは「コアサンプリングシステム」と呼ばれ、ドリルパイプ先端内部にチューブをセットしてサンプルを採取するシステムである。中空構造のドリルパイプと先端につけられたドリルビットが地層を掘り進んでいくと、下端の空いたこのチューブのなかに円柱状の地層が残るという仕組みで、地層の組成や採取するサンプルに応じてタイプの異なるドリルビットをセットすることができる。このチューブは小型であるため、ワイヤーで簡単に引き上げることができ、作業効率の向上も考慮している。さらに、掘削孔内への計測機器設置についても、海洋科学技術センターが開発を行ってきた海中ロボットの技術を応用し、掘削孔の直上に精密機械の塊であるセンサーを正確にソフトランディングさせるなどの研究が、平行して進められているのである。

最初にクリアされるべき開発上の課題

以上が「深海地球ドリリング計画」の概要である。だが、多くの科学プロジェクト同様、計画実現にあたり、解決しなければならない問題も数多く存在している。

たとえば、大水深（最大水深2,500メートル）でのライザー掘削は、石油掘削で実用化されているとはいえ、まだ実績が少なく、パイプが海中でどのような動きをするのか、そのときにどのような力がパイプにかかるのか、といった実海域でのデータが極端に不足している状態だ。また、ライザー掘削では、船体がライザーパイプを介して海底に固定されるわけだが、このとき波による上下動（ヒープ）は、船に備えられたヒープ・コンペンセーターと呼ばれる装置で吸収される。この装置の可動域は約7～8メートルだが、この装置で吸収できる範囲を超えるような波が急に起こった場合（考えられるケースとしては、海洋上で突然発生・発達するストームなどがある）、ライザーパイプを噴出防止装置上部で切り離し、全長2,500メートルに及ぶパイプを装着したまま、海上で待機しなければならない。このとき、波の上下動によって、パイプには引っ張り、圧縮方向の応力がかかる。この力がパイプや各部ジョイント部分の強度を上回ってしまうと、破断や座屈が起こる可能性が出てくるわけだ。

最終的にマントルに到達しようとする、4,000メートル程度の深海の海底を掘り進むことになるが、この場合は海中のパイプ長も4,000メートルとなり、それに比例して全体の重量も大きくなる。つまりライザーパイプに使われる材質は、できる限り軽量・高強度であることが望ましいわけである。さらにライザー内部に泥水を循環させるため、硫化水素（ H_2S ）に対する耐腐食性も求められる。

海洋科学技術センターでも、当初ライザーパイプを軽量化するために、パイプ径を16インチとする計画を検討していたが、その後、大水深の石油掘削用のライザーパイプとして21インチ径のものが一般化してきたため、現在は21インチ径の使用を前提に研究を重ねている。16インチ径のパイプは、軽量化という意味では有利だが、石油産業界で使われていない特殊なサイズであるため、製造に非常に高いコストがかかってしまうという欠点がある。昨年、約1/100サイズのスケールモデル（全長約25メートル）を製作して実験を行い、現在は、得られた画像データを解析して数値データ化し、コンピュータ上でのシミュレーションモデルを構築している。人類未到達のマントル到達を実現するためのトライ＆メイクは、まだしばらく続きそうだ。

ライザー掘削の未来形とは？

このように当初目的である水深2,500メートルからの掘削を目指して、開発が急ピッチで進む「地球深部探査船」だが、

マントル到達を実現するためには、場合によっては現在のライザー掘削方式ではなく、さらに進化した方式を取り入れていく必要がある。その多くは、現在ライザー掘削を行う上でデメリットになると考えられる部分を改良するという発想から生まれたものだ。

現在考えられている方式としては、ライザーパイプの切り離しを、現在の噴出防止装置上部ではなく、ライザーパイプの中間部分で行えないかというものである。このことによって、緊急時に切り離したとき、掘削船が保持しなければならないパイプの重量を減らすことができる。海中の切り離し部分には、フロート（浮きのようなもの）などをセットすることでパイプを水中に浮遊させるという案が考えられている。

さらに計画当初に考えられていた、ライザーパイプの口径を小さくしていく方向も、今後再検討される可能性がある。なぜなら、現在使用が予定されている21インチ径のパイプは、あくまで石油掘削用に製造されたものであり、2,500メートルを超える長さで必要な強度を確保できるかどうかは、未知数であるからだ。一般的にパイプの重量を減らすためには、肉厚を減らすか、軽量・高強度材料を利用するかを選択となるが、肉厚を減らしてしまうと、ライザー管に必要とされる引っ張り強度が落ちるため、この手段を選択することはできない。軽量・高強度というと、すぐに思い浮かぶのがチタン合金だが、限られた予算内で研究を行わなければならない本プロジェクトでは、膨大な長さのチタン製のライザーパイプの使用は、残念ながら非現実的と言わざるを得ないだろう。

こうした問題をクリアするためのアイデアとして、将来的に二重管構造ではなく、フレキシブルホースに近い独立したパイプを使って泥水を循環させるという案も考えられている。しかし、二重管構造を捨てても掘削はドリルパイプで行うわけであり、軽量・高強度（ドリルパイプには、ねじり方向の応力に対する強度も必要）な材料を使わなければならないという課題は依然として残る。

現在研究を行っている21インチ径のライザーパイプは鉄製で、肉厚約30mm、単管長約27m。材質はAPI（アメリカ石油産業界で使用されているスタンダード規格）でX80：耐力80psi（56.2kgf/mm²）以上、引っ張り強さ：90～120psi（63.3～84.4kgf/mm²）、化学成分：C/0.18%以下、Mn/1.80%以下、P/0.030%以下、S/0.018%以下と定義される。ドリルパイプについては、開発中で詳細未定といった状態であり、軽量高強度と低コスト両方を満たす素材の選定は、今後も困難を極めることが予想される。このようなことを考え合わせると、マントル到達実現への鍵は、どうやらパイプに使われる金属素材の進化（低コスト化も含む）が握っていると言えそうである。

〔取材協力・写真提供：海洋科学技術センター〕