

研究者・技術者の立場から見た 海洋資源・エネルギーの研究・開発・産業化における課題

Challenges in research, development, and commercialization of offshore resources and energy

しらさき ゆういち
白崎 勇一

有限会社マリン・エコ・テック代表取締役

要 旨

我が国のEEZ内の海底には、海底金属資源（熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊）やメタンハイドレートのような産業に欠かせない海洋資源が豊富に存在しており、これまでほとんどを依存していた海外の陸上資源の枯渇に対応できる可能性が見えている。国外では、既に資源メジャーや国家の支援を得て海底資源開発に取り組み始めているが、海外資源関連企業に比較して、企業規模が小さく人材も限られている我が国の民間企業が主体的に技術開発に先行投資するのは難しい状況にある。我が国の海洋基本計画で取り上げられている海洋資源・エネルギー資源開発を含む海洋産業創出・振興のためには、国家の明確な政策による誘導・支援の下、誰（産官学）がどのような役割を担いどのように進めていくか具体的なロードマップを示す必要がある。本稿では、海洋鉱物資源の開発・産業化に限定して、国家に期待したい役割、実施体制、実施する人材における諸課題について述べている。

I はじめに

海洋資源・エネルギー開発は、世界的な既存の資源・エネルギー問題の解決の観点だけでなく、金属資源については資源保有国の資源ナショナリズムの動きが強くなる傾向にあり、我が国の産業に欠かせない非鉄金属資源の確保の観点からも不可欠である。我が国の排他的経済水域（Exclusive Economic Zone：EEZ）内の海底には、これまでの調査により、海底金属資源（熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊）やメタンハイドレートのようなエネルギー資源が豊富に存在することが判明しており、海洋資源大国として、海外の陸上資源の枯渇に対応できる新しい産業政策が必要である。

海外の陸上金属資源については、今後、新たな大規模な鉱床の発見や新しい技術による増産も期待できないと予想されており⁽¹⁾、新技術開発でシェールガスやオイルサンドが商用ベースとなった石油・天然ガスの世界とは全く異なる。従来の陸上金属資源の枯渇は時間の問題であるが（現時点での年間消費量で銅や亜鉛は、あと35年程度との推測）、現時点では、陸上資源量の変動、需要量の変動、リサイクル技術開発による消費量の変動等を考慮した場合、海洋資源・エネルギー資源開発が事業として採算が取れるようになる時期が予測できない。

市場の見通しが立たない段階で、産業界に将来採算の見込める新規事業として積極的に取り組むことを期待するのは無理がある。海外資源関連企業に比較して、企業規模が小さく人材も限られている我が国の民間企業が主体的に技術開発に先行投資するのは難しい状況にある。つまり、この種の技術開発（キーとなる要素技術の開発から実証システムの開発まで）は、多額の費

(1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）『非鉄金属資源開発技術のしおり』, 2012, pp.1-2

用と時間を要すること、また難易度の高くリスクのある開発に対応可能な優秀な人材を長期間投入する必要があることから、企業の経営資源の最適配分になじまない。

このため、諸外国に伍して我が国の海洋資源・エネルギー資源の開発を事業化するとともに、事業化に関連する幅広い関連分野への波及を含む海洋新産業へ発展させるためには、産官学による研究開発からスタートさせ、その成果を効果的に産業界に引き継ぐ過程での、国家の明確な政策による誘導・支援が欠かせない。

産業化は、新しい鉱業・製造業の創出の他に、関連分野の新しい市場の創出が含まれるので、海洋資源・エネルギー資源分野でも、研究開発フェーズと産業化フェーズは異なるアプローチが必要である。つまり研究成果・開発成果が必ずしもすべて製品化（事業化）に結びつくことはなく、製品化と普及には技術以外の要素も重要となる。

本稿では、これまでに民間企業で研究者・技術者として従事した研究開発や事業化、国家プロジェクト（科学技術庁・文部科学省関係、大学、国立研究所）での研究開発の経験を踏まえ、特に現在関与している海洋鉱物資源の開発・産業化に限定して、国家に期待したい役割、実施体制、実施する人材における諸課題について私見を述べるが、再生可能海洋エネルギーやメタンハイドレート開発・産業化でも共通の課題である。

Ⅱ 海洋産業創出に向けた国家の役割

1 長期的な海洋産業政策立案・実施

日本の将来の社会・経済の持続的な発展のために、海洋資源・エネルギー開発と海洋産業創出が必要であることを国民に訴え、その国家戦略の具体的な取組を示す長期的なロードマップと実現する将来像（新産業）と国家の支援内容（予算計画を含む）を示すことが肝要である。海洋資源・エネルギー開発の波及分野は極めて広く、ほとんどすべての省庁（文部科学省、経済産業省、国土交通省、農林水産省、環境省、厚生労働省、防衛省）に関与するため、産業政策立案・実施に当たっては、省庁横断の専門組織でマネジメントするのが望ましい。

2 研究開発に適した組織と支援体制

前述のように、将来的に大きな産業に発展することが予測されるとはいえ、現状では、資金的にも、技術的にも、人材的にも、我が国の企業が単独で研究開発・技術開発することは困難であるから、国家の資金的支援により、必要なリソースを集合させた産官学による研究開発・技術開発が現実的である。

海洋資源・エネルギー開発は、研究開発からシステム実証試験段階に到達するまでは、急いでも10年以上の長期間に及ぶと予想される。ここでいう実証試験段階のシステムとは、民間企業による事業化時に、国内で採用できる実用システムや国際マーケットでも競争力のある実用システムの設計製作を保証するレベルのものである。

新しい研究開発・技術開発から事業化への過程では、研究開発・技術開発（キー技術研究、応用開発、実用開発）→プロトタイプでの実証試験→製品開発へと、計画通り順番に進むことは少なく、その間の外部環境（科学技術動向、市場環境）の変化に即応して、より適切な方向へ

の転換（開発目標修正、開発体制修正等）も含めて、柔軟に進めていく必要がある。特に、他に例の無い研究開発・製品開発・事業開発では、計画段階で予測できないことも多いため、多少の失敗（良い失敗で、貴重な財産となる）は避けられないが、現状の国の支援プロジェクトでは、予算執行がほぼ固定されて計画変更が難しく、当初計画がその通りに実現できなければ失敗という評価になるため、柔軟な開発（結果的には効率的な開発になる）を進めることが難しく、完全な失敗を避けるため、無難で中途半端な開発に終わってしまう恐れがある。また、追加投資（研究開発の延長）により実用レベルに到達することが分かっているにもかかわらず、プロジェクトは終了してしまう。

したがって、このような難易度が高いにもかかわらず実用化を目指すような開発では、既存のルールで運用される開発組織ではなく、専担のプロジェクトリーダーの裁量で大胆な運用できる新しい研究開発組織が適している（研究段階から必ずしも専有の建物が必要という意味ではない。適切な研究マネジメントができる有能なリーダーが必要）。

3 人材育成の支援

海洋資源・エネルギー開発に必要な科学・技術分野は非常に幅広く、科学分野（海洋学、地球物理学、地質学、海洋化学、海洋生物学、海洋環境学）や工学分野（海洋工学、船舶工学、資源工学、エネルギー工学、機械工学、材料工学、エレクトロニクス、情報工学、計測工学、土木工学他）が関係する。また産業化の段階では、実際に機器設計やシステム設計できる人材、海洋工事する人材、機器・システムを運用する人材が必要となる。

現時点では、海洋資源・エネルギー開発産業が存在しないため必要な人材を確保することができないが、人材育成には時間を要するため、早急に着手する必要がある。

かつて国策として原子力発電を導入するにに合わせて、主要な大学に原子力工学科を新設したように、海洋資源・エネルギー工学を専門に教育する学科の新設（資源工学や鉱山工学などの学科がある大学では、学科の拡充）を含む、教育環境の整備が必要である。

大学入試の際に高校生がどの分野（学部学科）を志望するかは、その時期に、マスコミで取り上げられる大手企業の業績やその業界の将来性に関する情報が、色濃く反映しているようである。当然、就職する際に希望する企業にも反映する。その点から考えると、まだ産業として実体のなく将来性がはっきりしない海洋資源・エネルギー関連産業を希望する若者は稀と言える。

ただ、幸いにまだ大量に人材を集める必要はなく、長期計画で、将来、海洋産業をけん引する人材を育成していくことになる。その場合、当面、国家が支援して進める海洋資源・エネルギー開発に従事している産官学の諸機関が、教育・実習・訓練の場となる。海洋資源・エネルギー工学の学生は、いずれ国際的な場での活躍が必要となるので、国外の大学や研究機関への国費留学を義務付ける仕組みを設けるのが望ましい。

Ⅲ 海洋資源・エネルギーの研究・開発における課題

1 国家に期待する支援

海洋資源・エネルギーの研究・開発を効率的に進めるためには、資金の支援と合わせて、研究者・技術者では対応が難しい（あるいは、苦手な）問題についても支援するのが望ましい。その具体的な支援としては、

- (1) 海域利用や海底利用時に必要となる許認可申請の手続きの簡素化を図る（漁業組合を含め事前交渉、申請手続きを研究者が行うことが多いが、これに意外と多くの時間が取られる）。
- (2) 実際の研究開発の進捗に合わせた研究開発費の運用が可能なように予算執行のルールを変更する。
- (3) 研究開発で生まれる成果や工業所有権の出願管理や利用について支援する。研究開発の成果の利用については、研究開発に参加していない企業や組織も、独自に研究開発を始める場合、また産業化の時点で、有効利用できるような仕組みを提供する必要がある。
- (4) 研究開発成果の一つとして、システムや機器の設計基準を確立する。これにより、産業化の段階で、研究開発に参加できなかった組織や企業も、新規参入しやすくする。

2 探査技術の研究開発と課題

海洋資源・エネルギーの産業化のために、採算性を議論する上で、資源量の把握が重要であり、そのための資源探査技術の開発が欠かせない。海底表面に露出している鉱床域とその海域でのボーリング調査により、資源量の推定を実施しているが、この方法では、我が国周辺に大量に点在する海底金属資源量を把握するには、あまりにも時間がかかりすぎる。ボーリング無しで資源量を推測する新しい探査技術は、世界的にも例が無く、開発が急がれる。海底ガス油田探査サービス最大手のフランスのシュランベルジュ社のように、この探査技術を完成できれば、国内外での探査サービス事業が有望となる。

探査技術の開発は、文部科学省の基盤ツールの開発プロジェクトの中で大学と公的研究機関が中心となり、複数の探査システム（重力、音響、電磁気）の開発を実施中であり、研究開発成果が出始めているものもある。しかし、資源探査システムを商用レベル（資源探査サービスが可能な）に持っていくには、探査システムを搭載する水中ロボットと探査システムの中核をなすセンサやデータ処理システムの開発と、複合的な探査データによる実証が必要である。

実は、探査システムに限らず、現在ほとんどの調査機器や水中ロボットに搭載されているセンサ・機器やソフトは外国製品である。外国製センサはブラックボックス化された汎用製品で適用範囲は制約がある。使用環境に最適な性能のセンサが欲しい場合、多額の開発費を出せば、特注の性能のセンサへの改造に応じることもある。汎用品で十分な用途では問題ないが、研究開発の進んだ段階では、実証環境に最適な性能のセンサが必要となるし、さらに産業化の段階では国外市場で外国企業と競合することになり、コストや納期の点からも問題になる可能性がある。20年ほど前までは、多くのセンサや調査機器は国内企業が製品化していたが、海洋関連産業の停滞に伴い多くの国内企業も撤退した。しかし、国内企業にも外国製品と同等レベルのセンサ・機器やソフトを製造できる技術力はあるので（ただし、最初は開発費がかかるので、

コスト的には高いものとなる)、海洋資源・エネルギーの産業化の段階でキーとなる機器・センサやソフトについては、国内企業による開発を支援し、国家プロジェクトで実施するシステムには優先的に採用し支援する必要がある。

3 産官学の役割と課題

研究開発においては、持続的な競争力が維持できる機器・システムの開発を目標として、大学や研究機関の研究者はシステム基本設計、システムのキーとなる要素技術（ハード、ソフト）開発を担当し、企業側は大学・研究機関の協力を得て事業化時に問題となる課題技術（システム詳細設計、設計基準、製造技術等）に取り組むことになる。

持続的な競争力を維持するためには、継続的な研究開発が必要であるが、最初の実証試験の頃から、企業側は事業化を前提に、想定顧客向けのシステム・製品（システム要素）・サービスを検討するが、それらの企画・マーケティングが自由にできるようにする必要がある。

なお、実証試験の段階で、プロトタイプシステムを1システム開発するのは、問題があると思う。虎の子の1システムとなるため、失敗の少ない、挑戦を避けた安全サイドのシステムとなる。逆に同時に複数のシステムを開発し、開発・実証試験に参加する人を増やし、挑戦的なシステムの場合に避けられない失敗を多くの参加者に経験させ、それを糧に、より実用的なシステム（製品になる）を設計できるようにすべきである。例え失敗しても、それが次につながる失敗であれば積極的に評価して、参加者の意欲をさらに高めるようにしたい。

また国の支援により研究開発で試作した要素機器・ソフトや実証試験用プロトタイプシステムは、期間に制約を設けず、期間限定のプロジェクトが終了した後でも、別プロジェクトでの研究開発に有効利用できるようにしたい。

4 採鉱システムの技術開発の課題

これまでの熱水鉱床域の調査からは、場所によって熱水鉱床域のマウンド地形や堆積物の形状や堆積状況が異なるため、それに適した採鉱システムを設計しないと、採鉱自体がうまくいかない可能性が指摘されているようである。従って熱水鉱床域の中から、採算が見込める資源量が見込まれる海域で、それに最適化した設計の採鉱システムを開発し、実証試験を行う必要がある。我が国には、採鉱対象が特定されれば、最適設計できる技術力は既にあるが、採鉱システムで特に高い信頼性を要する機構部については、産官学の企業側で先行して技術開発を進める必要がある。この開発成果は利用範囲が広く、産業化の段階で大きな資産になるとと思われる。

5 研究開発に必要なインフラが不十分

我が国は、公的機関が所有する研究開発インフラ（研究作業船、水中ロボット、自由に使用可能な実験海域）が少ないうえに、シブタイムの制約から、開発機器やシステムの実験や実証試験に利用できる期間は非常に少ない。

海底資源・エネルギーの探査に利用できるのは、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）や独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）が所有する作業船や調査機器・

水中ロボット（遠隔操作無人探査機（remotely operated vehicle：ROV）、自律型海中ロボット（autonomous underwater vehicle：AUV））と、東京大学生産技術研究所が所有する小型AUVであり、日本周辺の広域を探査するには、数量、性能ともに十分とは言えない。また今後、ROVによる探査の一環としての採泥やボーリングや、採鉱試験段階で採鉱システムの支援が必要になるが、このような深海底での重作業に対応できる大型ROVは所有していない。

熱水鉱床の場合は、幸いにもほとんどの作業水深が2,500mより浅いので、複数の民間企業が所有する作業船と深海作業用ROVでも対応可能である。このため、民間所有のインフラ設備での探査や採鉱が可能となるような支援策を行うのが有効であろう。長期間の契約が約束される場合には、民間企業側で必要な機器を購入し、研究開発の支援を行う可能性が出てくる。これにより、探査事業や海洋工事業がスタートし、技術蓄積や人材育成が進むことになる。

6 環境影響評価の研究との連携

陸上金属資源採鉱では、環境規制の強化に伴う環境対策コストが増加しているが、海洋資源・エネルギー資源の採鉱に関しても、環境影響評価が問題になる可能性があるため、評価ガイドライン作りには、国として積極的に参画し、それに対応する国内の法整備も適切に実施するのが望ましい。

環境変動評価には長期的な観測が必要なことから、欧米では海洋地球環境観測用の海底観測網を構築するプロジェクト（NEPTUNE、ESONET）の中で、熱水鉱床やメタンハイドレート地盤の長期的な変動をモニターするためのセンサを設置している。EU加盟の14か国の50以上の大学・研究機関・民間企業が参加しているESONET計画では、各国の海底観測網に多数配置する環境変動観測用センサを統一することで、環境観測センサのデファクトスタンダード化を意図し、様々なセンサ企業の参画を促している。

7 人材育成の課題

海洋資源・エネルギー資源の研究開発に従事できる人材の教育・育成は、大学（国立研究所も）が中心となる。しかし学生は大学院に進まない限り、専門的な知識や技術を習得することが困難であるだけでなく、修士や博士課程での研究テーマも、時間のかかるシステム・機器製作・フィールド試験を伴う先端技術開発的なものは、大多数の学生にはリスクが大きい（簡単に研究成果をあげられない）、シミュレーションやデータ解析的なものになりがちである。

海洋資源・エネルギー資源の研究開発を行うためには、机上設計理論だけではなく、具体的なシステムや機器の設計・製作・フィールド試験を担う人材も必要である。そのような人材育成は、先端的な研究を推進できる研究者と、最先端の設計・製作・試験設備を有する限られた大学や研究機関にしかできないのではと考える。

従って、将来の世界の長期的な海洋産業の規模を想定し、それに見合う数の人材（国際的にも活躍できる）を育成するため、重点的な研究教育拠点を全国の主要大学院に設置するとともに、国内の研究機関および国外の大学・研究機関と連携して教育・育成する体制を構築する必要がある。

IV 海洋資源・エネルギーの産業化における課題

1 最初の顧客は国

研究開発の段階で、種々の課題を明確にし、新しい製品・システム・サービスを実現するための課題を検討し、最もキーとなる技術（ハード、ソフト）については、国の全面的な支援を得て、産官学が協力してプロトタイプによる実証試験を産官学が協力して十二分に行う必要がある。

産業化の段階では、実証試験に裏付けられた研究開発成果を利用して、産業界は、リスクを冒して、新しい製品・システム・サービスの企画・事業化を進める必要がある。ただし市場が立ち上がっていない状況の場合、国が最初の顧客となり、事業化に積極的な民間企業やジョイント・ベンチャーに発注することで、十分な実績を作り、諸外国と対等以上に競合可能な高レベルの製品・システム・サービスを開発し、主力産業として育てていくステップとすることができる。

海洋機器・システムでは、特に実績が重要視されるので、国に納入した機器やシステムで十分な運用実績をあげることが重要である。一方、国は、運用実績（不具合、トラブルもそれらに対して講じた解決策も含む）をオープンにすることに協力する。

2 産業化は既存企業かベンチャー企業か（スタート時、市場拡大時）

海洋資源開発関連事業に参入が期待される企業（金属、鉱山、造船・機械工業、エレクトロニクス、商社、海洋工事の大手）は、中小零細企業（ベンチャー含む）に比べ、豊富な経営資源（人材、設備、資金、情報）を抱えているとは言え、現在は、先の見えない新規事業に経営資源を配分できるほど余裕のある会社は少ないと考えられる。大企業は、豊富な経営資源を抱え、関連業界の技術・サービス動向を把握し、将来の事業企画を策定しており、また研究開発部門には新しい事業に関心を持ち研究を行っている技術者が必ず存在する。しかし、その研究成果が将来、自社の有力事業と競合する恐れがある場合、活かされる可能性は少ない。

このような状況では、産業化は小規模会社からスタートすると考えられる。

- (1) 探査事業や環境調査は、国内では公的研究機関が実施するが、その際に実作業を担当した企業が、技術・ノウハウを習得し、自前の探査・調査設備を所有し、いずれ国内・国外での探査・調査サービスに参入することが予想される。
- (2) 大型の機器・システムの開発を行う会社は、市場の変化や拡大に即応できるように、既存会社の事業分野から独立した組織（完全分社、ジョイント・ベンチャーなどで、転籍者を含む新規採用者で運営。出身会社の仕事文化を引きずらないように）でスタートすると考えられる。資本金は、研究開発に参加した会社からの出資による。市場が拡大し産業として持続可能な状況が見えるようになれば、新規参入者として大企業も参入するようになる。
- (3) 一方、要素機器やセンサ開発は、大学の支援があれば、既存の中小企業（海洋機器製造）でも対応できる規模である。しかし、最新の設計技術・ものづくり技術を取り入れた機器・センサの開発は、ベンチャーによって行われる可能性がある。いずれにしろ、産官学は、率先してその開発機器を採用評価して、実績づくりを支援する必要がある。ただ、この市場規模は、大企業が参入するほど大きくない。

