

1. 研究目的

(1) 何をどこまで明らかにしようとするのか(目的と到達目標)

海底・海底下資源開発の実用化においては、資源工学と海洋工学の融合が肝心であるが、これまでわが国ではこの分野はあまり進展してこなかった。そこで、本研究委員会は、将来のわが国での海底・海底下資源開発の商業化実現に向け、造船、海運、エンジニアリング、海底掘削などの、海洋開発に関する産業界と共に、海洋工学と資源工学の融合を起点に、情報収集および調査研究を実施し、産業化にあたっての技術的、政策的、社会的課題を抽出する。また、その解決時期を5年、10年、30年に区分して実現化のロードマップを作成し、これを社会に喧伝しながら、国や関連法人機関への海洋工学からの提案内容、提案時期などについて検討することを目的とする。

(2) 研究の特色、独創的な点及び意義

日本の排他的経済水域（EEZ）に貯存する海底熱水鉱床をはじめとする鉱物資源量の調査や、その産業化を目指した技術開発、また、次世代の非在来型国産エネルギー資源として期待されるメタンハイドレート（MH）開発の早期実用化は、日本のエネルギー安全保障の強化、および、海洋新産業の振興を実現するうえで急務である。さらに、在来型エネルギー資源についても、これまで実施された日本周辺の調査は200m以浅が中心であるため、今後、大水深海域における資源賦存状況を明らかにする必要がある。

そこで、EEZ および大陸棚における鉱物資源、エネルギー資源の探査・開発を促進する技術を開発するとともに、海底における環境影響評価に関する科学技術を研究するため、造船やエンジニアリング関連産業界、大学や国立研究開発法人などを中心に、海洋工学と資源工学を融合した海底地下資源開発に関する研究委員会を設立し、検討を続けてきた。

(3) 国内外の関連する研究の中での当該研究の位置付け

海底油ガス田に関しては、ノルウェー、英国、ブラジルなどが一日の長を有し、特に近年、ブラジルでは、プレサル層からの油ガス開発技術を開発し、既に操業に入っている。また、パプアニューギニアにおいては、海底熱水鉱床の商業生産を2019年から開始するべく、民間企業が活動を継続している。

一方、MHについては、平成13年、経産省とJOGMEC、産総研が中心となって、官民学共同のMH資源開発研究コンソーシアム（MH21）を組織し、海底面下のMH開発技術の開発を目標に、三次元地震探査、JAMSTECの「ちきゅう」を用いた海洋産出試験（平成25年及び平成29年）などを行っている。また、砂層型MH海洋産出試験操業への参画を目指して、平成26年、石油開発・エンジ会社11社が「メタンハイドレート調査株式会社」を設立したが、海洋工学に関連する造船・重工等の産業界は参画していない。海外においては、中国・インド・アメリカなどがMH開発技術の開発を目標に海洋試掘を実施しており、2017年には中国が南シナ海で海洋産出試験を実施している。さらに、海底熱水鉱床開発に向けた経産省のプロジェクトが平成21年に開始され、平成29年に実海域における採鉱・揚鉱パイロット試験を行っている。

以上のように、海底・海底下資源開発に向けた研究開発は国内外で活発化しているが、商業化されているものはごく一部である。本研究の掲げる海洋工学と資源工学の融合は、日本がこの分野において世界をリードしていく起点となるものである。

2. 研究計画・方法

(1) 平成29年度

平成30年度に策定される第3期海洋基本計画を念頭に、海底・海底下資源開発の5～10年先のあるべ

き姿を見据えながら、海洋産業に関わる産業界・大学・国立研究開発法人などから広く会員を募った。海洋工学分野と資源工学分野の相互理解と融合に向けた課題抽出のため、海底・海底下の鉱物資源およびエネルギー資源を専門とする委員・会員および外部から招いた専門家による講演会を2回開催した。

(2) 平成30年度

上記講演会を受けて、現状分析と課題抽出を目的とするオーガナイズドセッション(OS)を、学会講演会開催時等に2回企画し、参加者からのフィードバックを踏まえ、産業化にあたっての技術的、政策的、社会的課題を明確化した。一方、平成30年5月15日には、第3期海洋基本計画が閣議決定された。また、この基本計画に基づいて、令和元年度(平成31年度)以降の海底・海底下資源開発に大きな影響を与える「第3期海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」を経産省が平成30年12月あるいは平成31年1月を目途に策定中であった。そこで、この策定スケジュールにあわせて、本委員会の中間報告書を作成した。特に、令和元年度(平成31年度)以降に始動することが見込まれた、海底・海底下資源開発に関する国主導の研究開発に対して、5年、10年、30年に区分してロードマップを提示した。また、海洋工学関連企業の参画の在り方についても議論し、これも提案に含めた。そして、この中間報告書を経産省の関連部署に、平成30年11月に送付した。

(3) 令和元年度(平成31年度)

国が主導する新たな研究開発への海洋工学関連企業の参画を後押しするため、シンポジウムを主催し、海洋工学と資源工学の融合の重要性を広く社会に宣伝した。また、産業化にあたっての技術的、政策的、社会的課題を説明し、国や関連法人機関へ向けて、海洋工学からの解決策として、シンポジウムにおいて提言を行った。さらに、シンポジウムで得られた成果や若手人材育成の必要性をまとめた最終報告書を作成し、学会誌、学会ホームページなどを通じて公表した。

3. 研究結果

日本の排他的経済水域(EEZ)と大陸棚およびその周辺海域に保有する海底・海底下資源の開発・利用を促進し、新たな海洋産業を育成するとともに、世界の海洋資源開発市場への参入を図るために、「海底石油・天然ガス」、「海底鉱物資源」、「メタンハイドレート」、「二酸化炭素の回収・貯留(CCS)」の4つの区分に分けて、推進すべき取り組みを提案する。

(1) 海底石油・天然ガス

2011年の物理探査船「資源」の3次元弾性波探査において、弾性波の伝播異常から液層あるいはガス層の存在可能性を検出し、2016年6~10月に、国内石油天然ガス基礎調査の一環として、経済産業省がFig.1に示した島根県及び山口県沖合約130km、水深約200mの場所において掘削調査を実施した¹⁾。その結果、浅部に薄いガス層を確認するとともに、以深部においてもガスの徴候が認められた。さらに最深部においては高圧のガス層の可能性を示す、想定外の強力なガス徴が見つかった²⁾。

この結果は、天然ガス生産の可能性を示唆するものであるが、

- ①ガス層の広がり(可採埋蔵量)を把握するための追加掘削
- ②生産したガスの陸揚げ方法の検討
- ③離岸距離約130km、水深約200mにおける生産設備建造費用試算などの課題をクリアしなければ、開発への展望は開けない。



Fig. 1 島根県及び山口県沖合における基礎試錐地点³⁾

今後の原油・ガス価格動向が、この海域の開発の鍵を握ることは確かであるが、ここでは、第3期海洋基本計画には、海洋の産業利用の促進と並ぶ主要政策のひとつとして、海洋人材の育成が挙げられていることに着目したい。追加掘削調査を実施し、商業生産の可能を追求することが、人材育成の場となる国内の海洋天然ガス開発へと繋がることを考慮すべきである。

具体的には、5年のロードマップとして、物理探査船「資源」の3次元弾性波探査を引き続き行うことと、島根県及び山口県沖合の追加基礎試錐によるガス層の広がり把握を提案する。さらに、10年のロードマップとして、「資源」後継の物理探査船の建造と、島根県及び山口県沖合に近接する韓国の商業生産を参考とした生産計画の立案、30年のロードマップとして、島根県及び山口県沖合における天然ガスの商業生産の実現と人材育成の場としての活用を提案する。

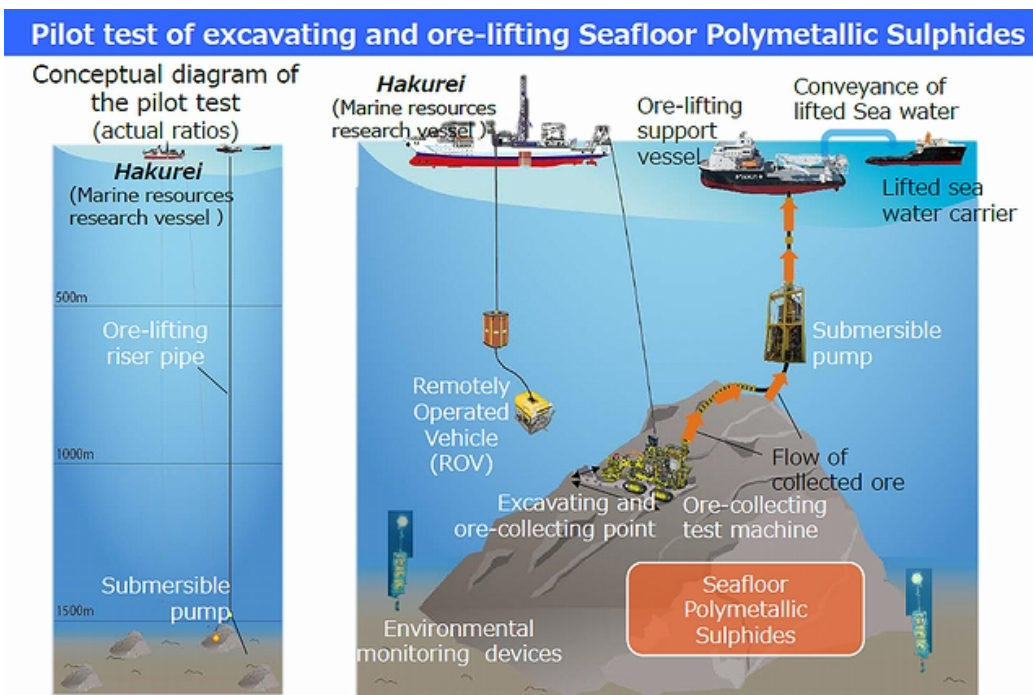


Fig. 2 海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱パイロット試験概要⁵⁾

(2) 海底鉱物資源

(2-1) 海底熱水鉱床

平成20年から実施してきた海底熱水鉱床開発プログラムの集大成として、経済産業省及び石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）は、Fig. 2に示したような採掘・集鉱試験機を用いて、水深約1,600mの海底熱水鉱床を掘削・集鉱し、水中ポンプで海水とともに連続的に洋上に揚げる、世界初の採鉱・揚鉱パイロット試験を、2017年8月から9月にかけて沖縄近海で実施し成功した⁴⁾。

この結果は、海底熱水鉱床開発の可能性を示唆するものであるが、

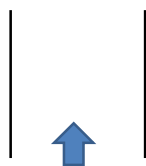
- ①十分な海底熱水鉱床の存在量（可採埋蔵量）を把握するための調査の進展
- ②揚鉱した鉱石に付随する岩石・堆積物と海水の処理方法の検討
- ③採鉱から揚鉱を経て輸送船に鉱石を渡すまでの一連のシステム統合オペレーションとその半自動化の確立
- ④採鉱・揚鉱システムの設備建造費用と運転費用等が、回収した金属の売却によって賄える水準にあるかどうかの経済性の試算

などの課題をクリアしなければ、開発への展望は開けない。

金属自給率が0%の日本にとって、EEZを含む国内において、海底鉱物資源の開発を実現することは、日本の資源安全保障の強化のために必要である。しかし、経済性のないものを開発することはできず、開発に伴う環境負荷が大きいものの開発については、国民のコンセンサスが得られるとは考えられない。特に、経済性の確立が重要であり、これを根幹に据えて、開発システムを構成する技術や機器類を考える必要がある。

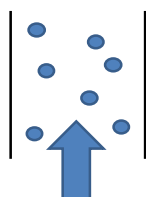
経済性については、海洋における類似開発である石油・天然ガスと鉱物資源の違いを、まず認識する必要がある。どちらも、海上のプラットフォームからライザーを懸架する生産システムであるが、このライザー中を通るものの価格を比較してみるとFig. 3のようになる。たとえば、原油の場合は、通過物質のすべてが有価物であるのに対して、海底熱水鉱床の揚鉱の場合は、鉱石中の金属含有率を7%と仮定すると、有価物は0.7%しかなく、加えて90%の海水と9.3%の不要岩石類は、廃棄処理費用が発生するマイナス生産物となる。図中に示したように、通過流速の差を考慮しても、同じような生産システム構成では、海底熱水鉱床の経済性が厳しくなることは明らかである。原油と同等の経済性を得るためには、例えば、鉱石中の金属含有率を2倍程度にする必要がある。

原油採掘



原油 = 100%
原油価格 = \$50/bbl
1bbl = 約0.16m³
回収物1トンあたり価格 = $50/0.16/0.83 = \$375/t$
管内流速(1~2m/s。原油は低速)を考慮すると、
単位時間あたり価格は\$375~750/t

鉱石揚鉱



海底熱水鉱床鉱石 = 10%, 海水 = 90%
鉱石の銅換算品位 = 7%
揚鉱物中の銅換算品位 = 0.7%
銅価格 = \$7,000/t
揚鉱物1トンあたり価格 = $7000 \times 0.07 = \$50/t$
管内流速(5m/s。揚鉱は高速)を考慮すると、
単位時間あたり価格は\$250/t

Fig. 3 海底熱水鉱床揚鉱と原油採掘のライザー輸送による経済性比較

詳細な経済性の試算例⁶⁾を資料1として添付するが、海底における一次選別により、揚鉦する鉦石中の有用金属含有率を、製錬所が海外から輸入してくる精鉦類似の水準まで高めることが必要であるという試算結果は、納得のいく結論とみることができる。

国土が狭小で、降水量が多く、国民の環境意識の高い日本においては、海水と不要岩石類の廃棄処理は、厳格に行う必要があり、費用は嵩む。海底熱水鉦床開発のための採鉦・揚鉦システムについては、2017年12月に開催されたWorld NAOE Forum 2017（日本船舶海洋工学会主催）において、大阪府立大学から上記課題②の解決方法⁷⁾、フランス企業から上記課題②の一部の解決方法⁸⁾の技術的提案がされており、これらも考慮に入れて、採鉦・揚鉦パイロット試験結果を、総合的に分析、評価することがまず必要である。特に、揚鉦用に使った海水をタンカーに入れて持ち帰らなければならなかったのは、海底熱水鉦床鉦石に含まれる重金属元素が揚鉦水中に溶け出し、排水できないレベルの濃度になる恐れがあったためであり、これを解決できなければ開発は実現できないと言っても過言ではない。大阪府立大学からの提案は、海底における一次選別により、揚鉦する鉦石中の有用金属含有率を高めることと、海水を伴わない機械式揚鉦の採用である。フランス企業からの提案は、デュアルライザー方式による排水を出さないクローズド揚鉦方法である。いずれも、今後の技術開発課題として重要なものといえる。また、採鉦・揚鉦パイロット試験が、採鉦と揚鉦に連続性がなかったこと、揚鉦後の輸送船への鉦石移送と海域における揚鉦排水の処理・排出がなかったことから、これらの全体プロセスを一体的かつ連続的に運転する統合オペレーションが、生産システム確立のためには必要となる。さらに、これらのオペレーションを人間によるマニュアル操作で行うのではなく、人間の介入を最小化するような半自動化も必要となる。さらに、これらの構築と実海域試験・試験操業の経験を通じて、オペレーター企業を育成することも必要となる。

具体的には、5年のロードマップとして、採掘鉦石の海底一次選別工程の導入と揚鉦方式の見直しによる採鉦システムの再構成を提案する。概念検討、基本的設計、小規模実験などが必要となる。さらに、10年のロードマップとして、海底一次選別と見直した揚鉦方式による採鉦・揚鉦統合パイロット試験の実施と試験操業、30年のロードマップとして、総合的な環境保全策も含めた民間企業も参画する商業生産の実現、さらに、培った技術（環境保全策を含む）を適用して、世界の海洋資源開発市場へ参入することを提案する。第3期海洋基本計画には、プロジェクトをステップごとに管理し、適切なタイミングでPDCAサイクルを回していくことが効率的・効果的なプロジェクトの実施に必要であると明記されており、上記の5年及び10年のロードマップはこれに該当するものとなる。

（2-2）コバルトリッチクラスト

コバルトは、2017年に入ってから価格が上昇し、2017年末からは、2016年までの約3倍に相当する価格高騰が続いている⁹⁾。これは、電気自動車等（PHV、HVを含む）の普及をめざすヨーロッパ、中国等の政策的な動向が明らかにされた後に起きたことであり、車載用電池の電極に使われるコバルトの需要が急激に増加したことに伴ったものであった。今後の電気自動車等の普及拡大を考えると、この市場動向は継続すると予想される。コバルトはニッケルや銅生産の副産物として回収される場合がほとんどであるため、この形での生産量には制限がある。これに対して、コバルト供給が主対象となるコバルトリッチクラスト開発について、経済性の再評価が必要な状況となってきた。

JOGMECは1987年から、南鳥島南東の公海域のコバルトリッチクラストの調査を継続してきた¹⁰⁾。また、1998年から10年間かけて、大陸棚延伸のための調査の一環として、EEZと大陸棚のクラストや基盤岩の調査を実施した。これらの結果を基に、JOGMECは2014年に、国際海底機構（ISA）に対して、南鳥島の南東沖約600kmに位置する公海域の6つの海山に3,000km²の探査鉦区を申請し、Fig.4に示すような海域が認められた¹¹⁾。

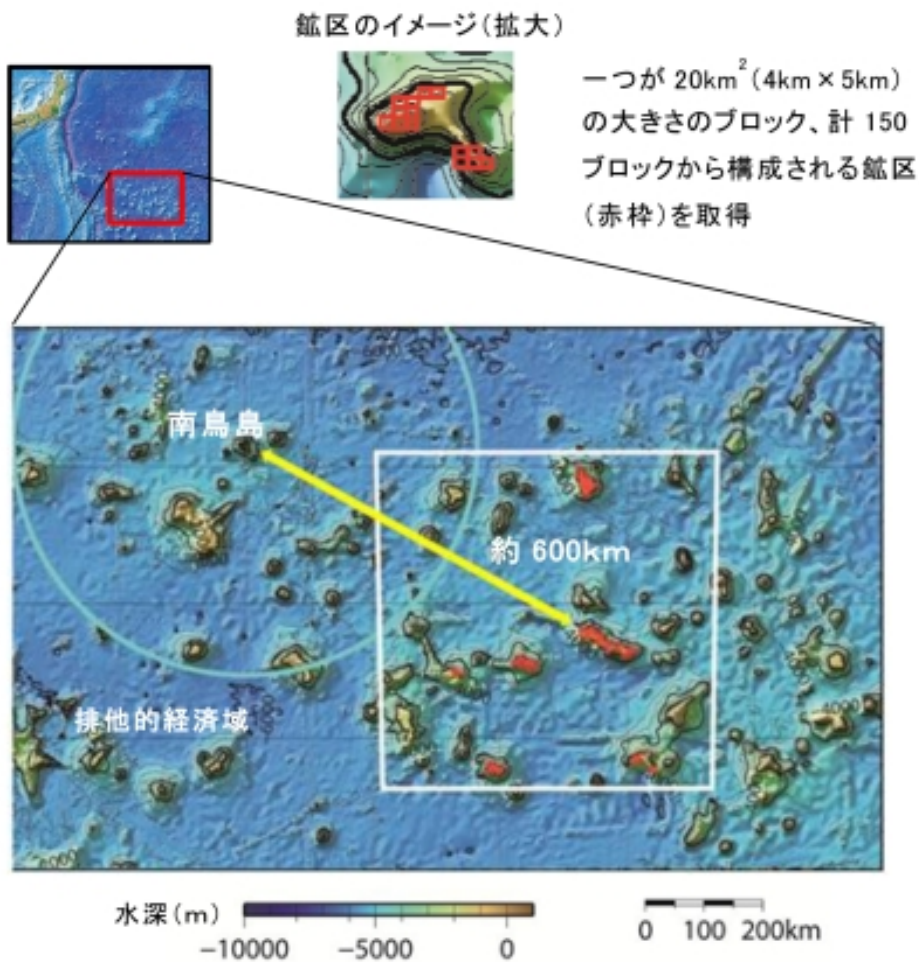


Fig. 4 ISA に認められた公海上の日本のコバルトリッチクラスト鉱区¹¹⁾

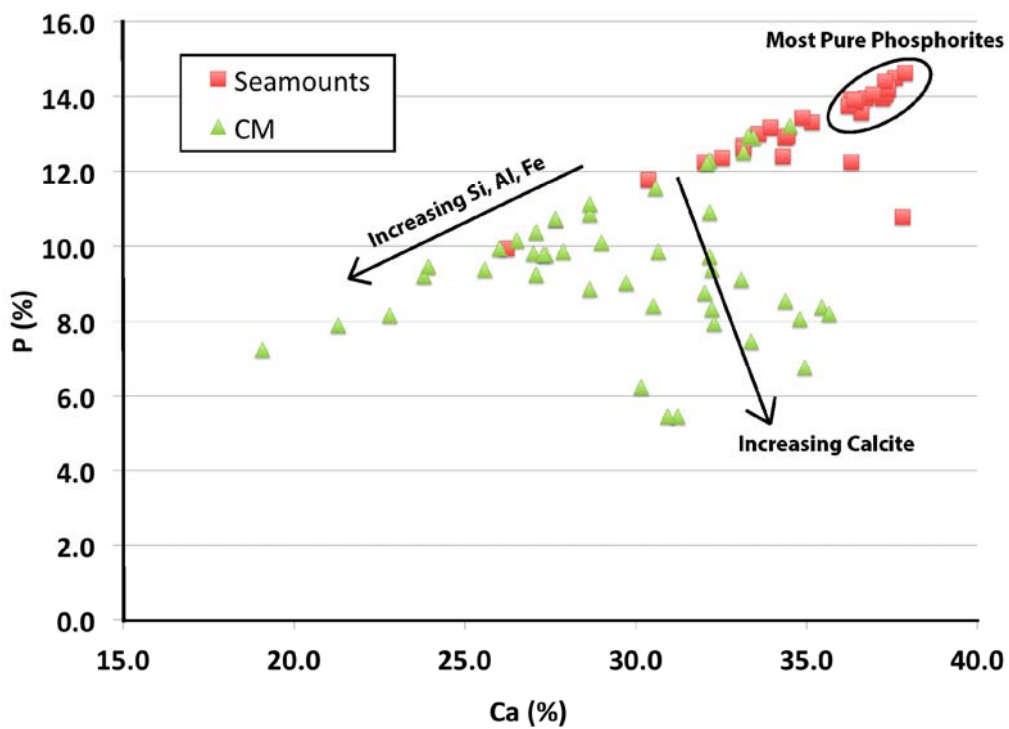


Fig. 5 海山基盤岩石中のリンおよびカルシウム含有率¹³⁾

従来の研究¹²⁾により、コバルトリッチクラスト掘削時には30~40%の基盤岩の同時掘削（混入）は避けられず、不要脈石として廃棄することになり、これが経済性を悪化させる要因とされていた。しかし、基盤岩である石灰岩、ハイアロクラストなど、リン酸塩化してリン灰石化したものが多く、Fig. 5に示すHeinらによる研究¹³⁾によって、コバルトリッチクラストの基盤岩には陸上リン鉱石と同等の約12~15%のリンが含まれているものが多いことが明らかにされた。これは、日本が中国やモロッコから輸入しているリン鉱石に相当するリン含有率であるため、これを、そのまま海洋リン資源として活用することも可能であると考えられる。

従来の研究をベースに、30~40%の基盤岩の同時掘削（混入）と、それをリン鉱石として利用することを前提としたFig. 6のようなコバルトリッチクラスト開発モデルを想定し、コバルトのみは2017年末の価格、それ以外の銅、ニッケル、マンガンについては2008年~2017年の10年平均価格を用いた経済性評価結果¹⁴⁾を資料2として添付するが、それによれば、混入する基盤岩をリン鉱石として利用することによって、年間100億円規模の収支改善が見込まれ、コバルト価格水準が維持されれば、コバルトリッチクラスト開発が事業として成立する見通しがあることになる。

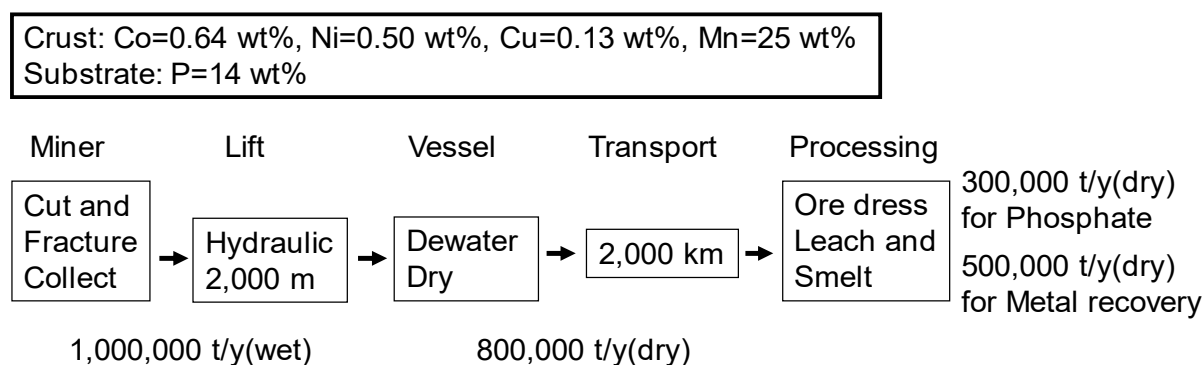


Fig. 6 想定したコバルトリッチクラスト開発モデル

コバルトリッチクラストの採鉱・揚鉱技術については、海底熱水鉱床に類似したものとされている¹⁵⁾ため、技術開発課題としては、30~40%という基盤岩の混入率を確かめることが挙げられる。一方、製錬技術については、マンガン団塊と同じものが使える見通しであるという検討が行われた¹⁶⁾のみのため、廃棄物処理も含めた十分な検討を行う必要がある。また、コバルトリッチクラスト基盤岩のリン含有率については、従来の日本の調査ではデータを全く取得していないため、鋭意取り組む必要がある。

具体的な取り組みとしては、5年のロードマップとして、実海域採鉱実験による基盤岩の混入率の確認と、製錬技術の検討による経済性の詳細な評価を提案する。さらに、10年のロードマップとして、基盤岩情報に基づく鉱区絞り込みを強調する。南鳥島の南東沖約600kmに位置する公海域の探査鉱区の絞り込みの際に、リン灰石化した基盤岩の上にコバルトリッチクラストが賦存する海域を選択するということがある。ISAの規程では、現状の3,000km²の探査鉱区の調査を進め、10年以内に1,000km²に絞り込み、そこが将来の日本の開発鉱区として認められることになっているためである。この絞り込みの際に、基盤岩を重要な判断材料とすべきであることは、前述の経済性評価結果が示している。30年のロードマップとして、総合的な環境保全策も含めた民間企業も参画する商業生産の実現、さらに、培った技術（環境保全策を含む）を適用して、世界の海洋資源開発市場へ参入することを提案する。コバルト供給が主対象となるコバルトリッチクラスト開発は、コバルト需要が増大する市場が望む海洋新産業の第一候補とみることができる。

(2-3) レアアース泥

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) は、南鳥島南東部水深 5,500~5,800m の EEZ に、マンガン団塊の密集域を発見したこと、またそこが、レアアース含有率の高い堆積物 (レアアース泥) の分布域と重複することを発表した¹⁷⁾。Fig. 7 に、この共存海域の位置と観測状況を示す。この海域のマンガン団塊は、Fig. 8 に示したように、コバルト含有率が高く、銅、ニッケル含有率が低いというコバルトリッチクラスト類似の特徴があることも明らかにされた¹⁷⁾。

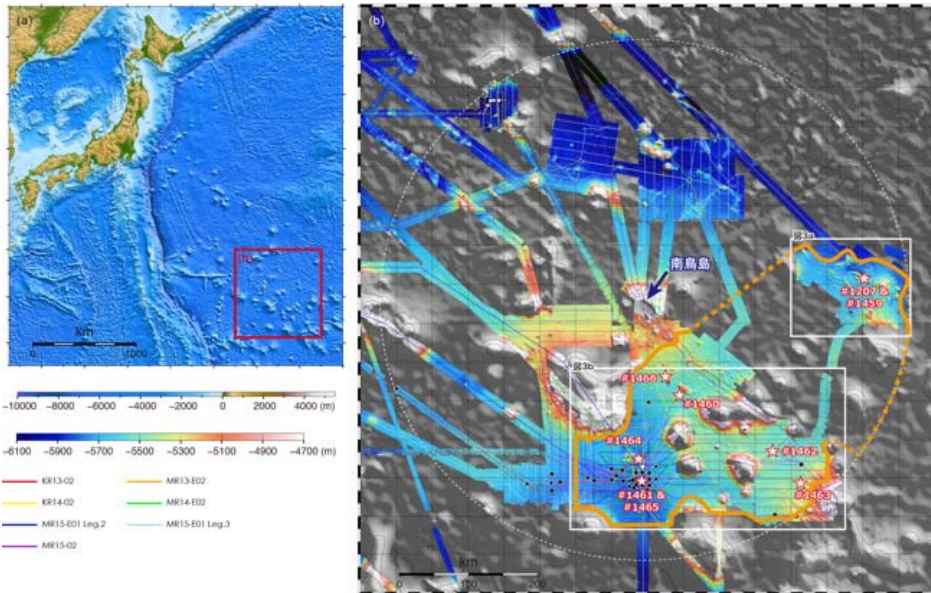


Fig. 7 南鳥島 EEZ のマンガン団塊とレアアース泥の共存海域¹⁷⁾

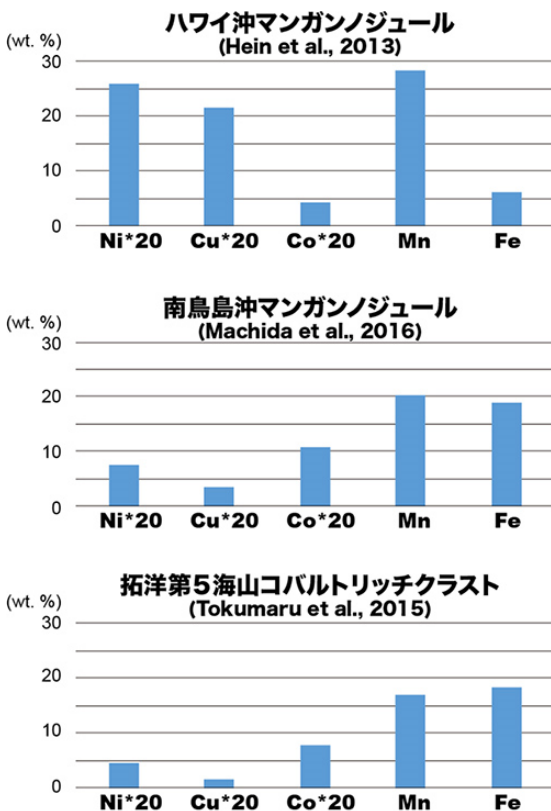


Fig. 8 異なる 3 海域のマンガン団塊とコバルトリッチクラスト金属含有率の比較¹⁷⁾

マンガン団塊とレアアース泥の共存海域については、これを生かした開発の可能性が示唆される。それはパルプリフトと呼ばれる揚鉱方法である。パルプリフトはフランスにおいて、エネルギー効率のよいマンガン団塊の揚鉱方法として開発、研究されたものである¹⁸⁾。粉碎したマンガン団塊と深海底堆積物を混合し、高濃度パルプ状にしたものを揚鉱することによって、流体抵抗の劇的削減を図るというものである。通常の管内スラリー輸送では、海底熱水鉱床のところで記述したように、体積濃度が10%程度であるのに対して、破碎団塊と堆積物の混合によって、非ニュートン流体である体積濃度55-60%での揚鉱を可能とするというものである。この体積濃度を実現することによって、ライザー径の半減とポンプの小型化（ピストンポンプで十分）が可能となる。高濃度パルプ状輸送は、石炭火力発電所におけるCOM (Coal Oil Mixture) やCWM (Coal Water Mixture) の輸送で実現しており¹⁹⁾、実証済みの既存技術の応用といえる。マンガン団塊と深海底堆積物の混合の場合は、深海底堆積物がパルプ状にするために用いられる不要物で、揚鉱後は廃棄物とする必要があるのに対して、レアアース泥は有用物であるため、経済性の改善が見込める。経済性評価結果²⁰⁾を資料3として添付するが、エアリフトを含む通常の管内スラリー輸送と比較すると、経済性が大きく向上することも明らかである。

レアアース泥については、生産技術等については、SIP「革新的深海資源調査技術」の下で取り組みを進めると第3期海洋基本計画に記されている。このため、この枠組みの下での5年のロードマップとして、マンガン団塊との複合開発をパルプリフトで行う場合の技術・経済性評価を提案する。この中には、高濃度パルプ作成およびパルプリフト実験が含まれる。また、レアアース滲出後の廃棄物処理方法についても、検討を深める必要がある。この技術・経済性評価結果が肯定的であれば、10年のロードマップとしては、海底での高濃度パルプ作成実験、ピストンポンプの耐久性実験、揚鉱管の耐久性シミュレーションなどの要素技術開発と環境保全策の立案、30年のロードマップとして、総合的な環境保全策も含めた商業生産の実現の提案へと進むことになる。

海底鉱物資源考文献

- 1) www.meti.go.jp/press/2016/06/20160607001/20160607001.html
- 2) www.meti.go.jp/press/2016/10/20161028002/20161028002.html.
- 3) <http://www.sankeibiz.jp/macro/photos/160607/mca1606070500002-p1.htm>
- 4) https://www.excite.co.jp/News/release/20170926/Prtimes_2017-09-26-12624-309.html
- 5) http://www.meti.go.jp/english/press/2017/0926_004.html
- 6) 奥原孝平他：海底熱水鉱床開発における機械式揚鉱システム適用の検討，第27回海洋工学シンポジウム論文集，OES27-037，2018.
- 7) Yamazaki, T.: Technical Solutions to Realize Deep-sea Mining around Japan, Proc. World NAOE Forum 2017, pp. 67-75, 2017.
- 8) Rongau, J.: Overview of Latest Enabling Technologies for Deep Sea Mining, Proc. World NAOE Forum 2017, pp. 27-41, 2017.
- 9) cobalt.sekai-market.com
- 10) www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_000011.html ほか
- 11) http://www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_000006.html?recommend=1
- 12) Goto, K. et al.: Effects of Microtopography on Mining Possibility of Cobalt-rich Manganese Crusts, Proc. 8th ISOPE Ocean Mining Symp., Chennai, pp. 239-245, 2009.
- 13) Hein, J. R. et al.: Marine Phosphorites as Potential Resources for Heavy Rare Earth Elements and Yttrium, Minerals, Vol. 6(3), 88, 2016.

- 14) 山崎哲生他：基盤岩のリン資源化を含むコバルトリッチクラスト開発の最新経済性評価，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 26 号，pp. 147-150，2018.
- 15) 山崎哲生他：コバルト・リッチ・マンガン鉱床の賦存特性と採鉱技術の基礎的検討，資源と素材，112 巻 14 号，pp. 1005-1014，1996.
- 16) http://mric.jogmec.go.jp/kouenkai_index/2009/briefing_090204_3.pdf
- 17) http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20160826
- 18) Bernard, J. et al.: Analysis and comparison of nodule hydraulic transport systems, Proc. 9th Offshore Tech. Conf., Paper No. 5476, 1987.
- 19) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1922/69/9/69_9_828/_pdf/-char/ja
- 20) 山崎哲生他：パルプリフトによるレアアース泥とマンガン団塊の複合開発の経済性評価，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 28 号，pp. 361-365，2019.

(3) メタンハイドレート

(3-1) 資源としてのポテンシャル

自然界に存在するメタンハイドレートに内包されるメタン量については様々な試算がなされているが、Boswell and Collett (2011) によると、最低でも 3,000 兆 m^3 (炭素換算で 1.5×10^3 Gt) の規模で存在すると考えられている¹⁾。2014 年の世界の天然ガス需要が約 3.5 兆 m^3 であることを鑑みると²⁾、メタンハイドレートは次世代の天然ガス資源として大きなポテンシャルを有しているといえる。日本周辺では、東部南海トラフにおいて詳細な資源量評価が実施されており、Fujii et al. (2008) によると、メタンハイドレートが一定基準以上に濃集している地層において、5,739 億 m^3 のメタンが存在すると試算されている³⁾。

(3-2) ガス生産手法

海底に存在するメタンハイドレートは、表層に露出して存在するもの(表層型)、泥層中に脈状・塊上などで存在するもの、砂層孔隙中に細かく分散して存在するもの(砂層孔隙充填型)に大別される。このうち、砂層孔隙充填型に対しては、在来型油ガス田の開発技術を応用したガス生産手法が提案されている。このうち、最も有望なガス生産手法と考えられている減圧法は、メタンハイドレートが胚胎する砂層(メタンハイドレート層)まで坑井を掘削し、坑井内の水をポンプなどで汲みだすことで、坑井内および導通するメタンハイドレート層を減圧する手法である。減圧されたメタンハイドレートはガスと水に分解し、これらの流体は坑井を通じて連続的に生産される。メタンハイドレートの分解は吸熱反応であり、分解の継続には熱の供給が不可欠であるが、減圧法ではメタンハイドレート層自身が持つ顕熱と周囲地層からの伝熱によって熱が供給される。このほかに、熱を人為的に加える手法、メタンハイドレートの安定条件を変化させる化学物質を圧入する手法などが提案されているが、室内実験や数値シミュレーションによる解析などから、熱収支やコストの面で減圧法に優位性があることが明らかになっており、近年のフィールド産出試験では減圧法が適用されている。

(3-3) フィールド産出試験

減圧法を適用したフィールド産出試験は、陸域および海域で数例実施されており、メタンハイドレートから分解ガスを連続的に生産できることがすでに確認されている。表 1 に、これまで実施された海域の産出試験のガス生産期間・ガス生産量をまとめて示す。日本周辺では、JOGMEC が 2013 年に海域では世界初となる第 1 回海洋産出試験を東部南海トラフで実施し⁴⁾⁵⁾、2017 年には同海域で第 2 回海洋産出試験(2本の生産坑井を使用)を実施した⁶⁾。一方、中国では、2017 年に南シナ海で海洋産出試験が実施されてい

る⁷⁾。東部南海トラフの第1回海洋産出試験（2013年）および第2回海洋産出試験（2017年）の1本目の生産坑井では、生産坑井内に地層の砂が侵入する出砂現象が生じ試験が中断されたが、第2回海洋産出試験の2本目の生産坑井では出砂は回避され、予定された期間、生産が継続された。南シナ海の産出試験（2017年）においても、生産は予定された期間継続されたことが報道されている。以上のように、海域の産出試験は、1カ月前後の連続生産を通じて、坑井あたり日産で数千～数万 m³ のガス生産レートに達しているのが現状である。

Table 1 Summary of offshore methane hydrate production tests

Year	Area	Duration (day)	Cumulative Gas Produced (m ³ or Sm ³)
2013	Nankai Trough ⁴⁾⁵⁾	6	119,000
2017	Nankai Trough ⁶⁾	12	40,850
2017	Nankai Trough ⁶⁾	24	222,587
2017	South China Sea ⁷⁾	60	309,000

（3－4）商業化に向けた課題と可能性

商業化に向けて克服しなければならない最も大きな課題の一つは出砂である。東部南海トラフをはじめ、多くの砂層孔隙充填型のメタンハイドレート層は未固結の砂層からなる。メタンハイドレートが胚胎している状態では、メタンハイドレートが”接着剤”の役割を果たすため、砂層はあたかも砂岩のように固結しているが、ひとたびメタンハイドレートが分解すると、砂層は未固結となり、砂粒子は流動性を持つ。そのため、ガス生産を開始してまもなく出砂の危険性が高まる。出砂を回避する最も確実な方法は、生産坑井周りに金属製メッシュなどのフィルターを設置することであるが、過剰なフィルターは目詰まりの原因ともなるため、ガスの流動性を妨げない出砂対策の開発・選定が肝要である。

次に重要な課題はハイドレートの再生成である。在来型油ガス田のパイプライン中で問題となっているように、ハイドレートの生成は流路の閉塞をもたらす。減圧法では、生産坑井内およびメタンハイドレート層内を減圧し、強制的にメタンハイドレートの分解条件を作り出しているが、原位置の温度圧力はメタンハイドレートの安定条件にあるため、ハイドレートが再生成する危険を常に有している。メタンハイドレートの分解が盛んで温度が低下しやすい生産坑井周辺、環境温度が最も低い海底面付近、圧力が高くなるポンプ下流の流路などは、潜在的にハイドレートが再生成しやすい領域である。中長期の安定的なガス生産を実現するためには、ハイドレートの再生成対策が必要である。

さらに、商業化を実現するためには、坑井あたりのガス生産レートの増進が必須である。第1回海洋産出試験までの知見をもとにメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムが実施した経済性評価では、坑井あたりのガス生産レートが最低でも5万 m³/日以上、理想的には15万 m³/日以上（8年平均値）において、商業化を実現できる可能性があると試算されている⁸⁾。数値シミュレーションによる予測では、メタンハイドレートの分解に伴う砂層の浸透率の上昇によって、ガス生産レートは時間経過とともに増加すると考えられているが、この現象はこれまでのフィールド産出試験では確認されていない。今後、中長期（数カ月～1年）のフィールド産出試験を通じて、ガス生産レートの時間変化を把握するとともに、減圧法を補助しガス生産レートを増進させる生産増進法の開発が重要である。

上記のほかに、中長期にわたり生産を継続した場合に予測される地層の圧密やそれに伴う坑井・海底機器への負荷、メタンハイドレート分解中・分解後の地層の浸透率の変化、最終的なガス回収率など、不明な点は多い。将来、商業生産を実現する上では、顕在化している課題やまだ明らかになっていない現象を

考慮に入れながら、坑井より下流のガス処理や輸送に関わるシステムも含めた、生産システム全体の検討を進めていかなければならない。

このようにメタンハイドレートの生産システムは、様々な現象に対応できるように構築された、複数の技術や機器の集合体からなる複雑なシステムであり、商業化がなされていない現状において実在しない未知のシステムである。このような複雑かつ未知のシステムを構築し、どのような生産システムのコンセプトが有望であるか、その見通しを得るための評価を行うことは、どの技術要素が重要であるかを判断し、生産システムに関わる技術開発を進める上で、極めて重要である。こうした問題は、**Architectural Uncertainty** 下における **Technology Decision** 問題と捉えることができ、宇宙開発におけるシステムの選択において同様の取組みが存在する。宇宙開発におけるシステムの選択において取り入れられている“システムズアプローチ”と呼ばれる手法をメタンハイドレート生産システムの検討へ適用するなど⁹⁾、オープンイノベーションに向けた取組みが期待される。

(3-5) まとめ

在来型油ガス田の開発で培われてきた経験を応用することで、海洋産出試験は一定の成果をあげており、これまで明らかになっている課題も解決される可能性がある。一方、中長期産出試験を成功させ、その先の商業化を実現するためには、メタンハイドレート層の特性に応じて新たな技術を開発することも今後必要であろう。例えば、海域のメタンハイドレート層は大水深ではあるものの、在来型油ガス田に比べ浅層に存在するという特性を有している。この特性を生かし、より簡易的な掘削・生産方法を検討する余地があると考えられる。

このような技術開発を進める上で、自国の排他的経済水域（EEZ）内に大規模なフィールドを有していることが、大きなアドバンテージになる。産官学が連携し、EEZ内のメタンハイドレート探査と産出試験に国内企業が継続的に関与できる仕組みを構築することが重要であり、こうした施策により、メタンハイドレート開発における科学技術・産業技術の育成と日本のプレゼンス向上が期待できる。実績を蓄積した国内企業が、日本周辺のみならず海外のフィールドに進出する機会を得ることができれば、国産エネルギー資源の確保以上の波及効果が得られる。これこそが、メタンハイドレートの開発を他国に先んじて進める最大の利点であり、メタンハイドレートの資源化における研究開発が目指すべき方向性と考えられる。

メタンハイドレート参考文献

- 1) Boswell, R.; Collett, T. S.: Current perspectives on gas hydrate resources, *Energy Environ. Sci.*, 4 (4), 1206–1215, 2011.
- 2) IEA: Medium-Term Gas Market Report 2015; International Energy Agency: Paris, France, 2015.
- 3) Fujii, T. *et al.*: Resource Assessment of Methane Hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan, *Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, OTC19310*, 2008.
- 4) Yamamoto, K. *et al.*: Thermal responses of a gas hydrate-bearing sediment to a depressurization operation. *RSC Advances*, 7(10), 5554-5577, 2017.
- 5) Konno, Y. *et al.*: Key findings of the world’s first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: toward future commercial production, *Energy & Fuels*, 31(3), 2607-2616, 2017.
- 6) 山本晃司:「第2回海洋産出試験について」, メタンハイドレートフォーラム 2017, 平成29年11月29日
- 7) Ministry of Land and Resources People’s Republic of China: *China Mineral Resources*, 2017.

8) 佐伯龍男, 亀田治邦:「経済性等に関する課題について」, メタンハイドレートフォーラム 2017, 平成29年11月29日

9) Matsudaira, Y. *et al.*: Exploring promising concepts and critical technologies for offshore methane hydrate development system, Proceedings of Transdisciplinary Engineering 2019

(以上、日本船舶海洋工学会平成30年春季講演会「日本周辺におけるメタンハイドレート開発の課題と可能性」、および、日本船舶海洋工学会海底・海底下資源開発ストラテジー研究委員会シンポジウム 海底・海底下の資源開発と利用は実現できるのか?～あるべき未来と工学の役割～「商業化を見据えたメタンハイドレート生産システムの検討」より編集。)

(4) 二酸化炭素の回収・貯留 (CCS)

(4-1) CCS の必要性

2016年の初夏に、2030年度電源構成に関する政府案が発表され話題となった。経済産業省を中心とした政府の電源構成案は、2030年時点の日本の望ましい電源構成として、再生可能エネルギー22～24パーセント、原子力20～22パーセント、石炭火力26パーセント、天然ガス火力27パーセント、石油火力3パーセントというものであった。再生可能エネルギーはほぼ倍増、原子力発電所を各地で再開させることとなるばかりでなく、電力需要の伸びによっては新規原発も必要となる数字である。この案に従い、政府は2030年までに温室効果ガス排出量を2013年度比で26パーセント削減するという目標を立てた。

注目すべきは、火力発電が依然50パーセント以上を占めている点である。将来的には蓄電技術、あるいは水素などの電力以外のエネルギー媒体の貯蔵技術の発展により、再生可能エネルギーに移行していくことになるかと推測されるが、それまでの過渡期のベース電源を化石燃料に頼らざるを得ない。一方で、温暖化対策技術としての温室効果ガスの抑制は逼迫している。ここに時代の橋渡しの温暖化対策技術として、CO₂の分離回収と貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage: CCS) が重要となる。なお、本稿ではこれ以降 CCS を、分離回収を除いた CO₂ 貯留の意味に用いる。

2017年のIPCC第4次評価報告書でCO₂の有効な削減策であることが明言されて以来、近年の削減目標の数値化によって、CCSはCO₂の「超大量削減技術」として、世界的にそのメリットが強く認識されるようになった。大陸棚が広く、地震が多い我が国においては、地中貯留を陸域ではなく、水深百～二百メートル程度の海底下数千メートルの深部塩水層 (帯水層) に超臨界状態のCO₂を注入する海底下深部塩水層貯留が経済産業省を中心に計画されており、2016年から苫小牧沖で実証実験が実施されている。これは長岡での陸域地中貯留に次ぐ、我が国における二度目の実証実験であり、海底下深部塩水層貯留としては、ノルウェーのスライブナーに次ぐ、世界で二度目の実証実験となった。

(4-2) CCS のリスクと社会的受容性

一方で、2016年9月に英国サウザンプトンで開催された国際エネルギー機関温室効果ガスR&Dプログラム (IEAGHG) のリスクマネジメントネットワークとモニタリング技術ネットワークの合同会議では、地震などの天災や事故などによって、ライザー管やパイプラインなどの設備の亀裂や貯留層から、貯留したCO₂が漏洩する環境リスクが議論されている。CO₂の貯留は念入りの地層調査に基づき、漏洩の確率がほとんどない地点で実施されることになるものの、リスク (発生確率×損失の大きさ) はゼロではない。地中貯留の環境リスクは、地震などの天災や事故による漏洩が主でありと考えられるため、発生確率はもちろん、損失の大きさも漏洩量によるところとなり、不確実性という意味において、リスクは極小であっても、リスクの定量化およびそれに基づくリスクの管理が困難化する。例えば、時期の不確実性は、CCS事業者は一体何年間モニタリングを継続すれば良いかという素朴な疑問にどの専門家も答えられていない。

また、水深数百メートル以下の海域を対象とする深部塩水層貯留は、海岸線に近い場合利害関係者が存在し、漁業補償という固有の問題を抱える日本においては、NIMBY (not in my backyard) に代表されるローカルな社会的受容性の問題になる可能性を秘めている。実際、世界的にも CCS の実証実験の候補地選定は一筋縄ではないようだ。2008 年オランダでは、地域住民の反対により、陸域地中貯留の実験が中止に追い込まれている。

法的には、EU や英国連邦に所属するいくつかの国の主導の下に、2006 年にロンドン条約（廃棄物投棄による海洋汚染の防止に関する条約）締約国会議にて、海域地中に注入する CO₂ を海洋に廃棄してよい物質リストに加えた付属書が発効され、CCS は国際的に合法化された。我が国でも、2007 年 5 月に海洋汚染防止法改正案が国会を通過し、同年秋の締約国会議で上記議定書を批准した。海洋汚染防止法では、CCS 実施事業者に対して CO₂ の海底下廃棄に係る許認可の取得、漏洩を想定した監視体制の整備、環境影響評価の実施を求めている。ただし同法は、通常操業時の CO₂ 漏洩のみを対象とし、事故や天災による漏洩は扱っていない。

法が事故や天災を対象外としている以上、それ以上に重要になるのが社会的受容性であろう。ゼロでないリスクを、温暖化対策という便益とあわせて社会に受入れてもらう必要がある。一般国民の CCS に関する認知と理解を得るために必要不可欠な CCS 技術に対する人々の信頼性を醸成するためには、信頼性の高い安全・安心な貯留に関する技術開発を実証すること、すなわち海底下の深部塩水層や石炭層などの地質構造での CO₂ 貯留の実証実験の成功が不可欠である。前述した 2016 年から苫小牧沖で実施された経済産業省による CCS の海域実証実験がこれに当たり、その成功とは、無事に予定量の CO₂ を海域の地下深部塩水層に注入できること、注入した長臨界状態の CO₂ をモニタリングすることができ、少なくとも注入期間中は漏洩しないことが確認されることに集約される。

(4-3) 英国で実施された世界初の CO₂ 海底漏出実験

苫小牧における実海域実証実験は CO₂ の貯留を目的としたもので、言わば漏洩しないことを確認するものである。その一方で、環境影響評価法を確立するためには、国際的な研究機関が参加した、実海域で実際に CO₂ を意図的に放出する実証実験も重要となる。このような中、2012 年 5 月、海水中に漏出した CO₂ の物理的、化学的、生態学的などの環境影響を評価するため、スコットランドにおいて日英共同で海底堆積物中から CO₂ を放出する世界初の実証実験が行われた。これは QICS (Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage) プロジェクトと呼ばれる。

スコットランド西部オーバン市近郊のアドマクニッシュ湾内の水深 12 メートル、海底下 10 メートルの浅海堆積層中に、日量 80~120 キログラムの CO₂ を 37 日間放出し、CO₂ の堆積層中および海水中での物理化学的挙動と生物相への影響を観測するもので、日本からは、CCSEA-JPN (CCS Environmental Assessment Joint Partnership Network) の加盟機関 (東京大学、九州大学 I2CNER、産業技術総合研究所、地球環境産業技術研究機構、電力中央研究所、KANSO テクノス) が、英国側と共同研究の覚書を交わし、世界初となるこの CO₂ 海中漏洩実験に参画した。

観測では、日英の研究者がそれぞれの分担を持って、約一ヶ月の海底下での CO₂ の放出期間中、CO₂ の海底堆積層中の移動、海底からの漏出、海中での拡散を pH や PCO₂ 計測、音響調査、海水サンプリングなどを実施することで、豆腐外海域の物理的、化学的、生物学的影響を評価した。pH や PCO₂ などの化学センサーと音響で海中での気泡を調査する技術の組合せは、漏出の検出に大変有効であることがわかった。

CO₂ 漏出孔付近において、堆積層や海水中の化学的な変化が少なからず観測されたものの、その変化は漏出停止後 17 日以内に回復した。また生物学的な影響は漏出初期には観測されず、漏出終了前後の時点で微生物や底生生物群集に変化が観察されたが、これらの影響も有害と言うには程遠く、注入終了後数週間

で完全に回復した。結果的に、一日百キログラム程度の注入規模では CO₂ 漏出の影響は限定的なものであることを明らかにした。

もちろん、この結果は漏出量と漏出範囲、それと漏出期間に大きく左右されることは間違いない。ただし QICS の単位面積当たり漏出量は鹿児島湾の櫻島の北側に存在する海底カルデラから漏出する火山性の CO₂ 漏出量と単位面積当たりでは同程度であることも判明した。これは漏出総量年数万トンと見積もられる鹿児島湾のカルデラからの CO₂ 漏出は、その面積が約五百メートル四方と広い一方で、年間にすると五十トン程度の注入量である QICS は、海底下十メートル程度での注入であることにより漏出範囲が二十メートル四方と狭かったためである。つまり QICS は範囲は狭いものの、局所的にはかなり高い濃度を実現したことになるわけで、結果として化学、生物的影響が少なかったと言う知見に意義は大きい。再度実験するのであれば、注入期間の延長が効果的であろう。

漏洩サイト近傍において得られた貴重な物理化学的、生化学的成果の概要は、2014 年 Nature Climate Change 誌に掲載され、世界に大きなインパクトを与えた。さらに参加機関の個別の研究成果は、2015 年 International Journal of Greenhouse Gas Control 誌の QICS 特集号に掲載され、これも大きな反響を呼んだ。

(4-4) 大水深海域地中貯留

国立研究開発法人球環境産業研究機構 (RITE) が発表した貯留可能ポテンシャルは、キャップロックによる背斜構造 (低浸透率の泥岩が凸型構造をしていて、軽い CO₂ が凸面にトラップされる) を持つところで、海岸からの距離 10km 未満のサイトで、総量 26 億トン、10km 以上で 26 億トン、背斜構造を持たないサイトで 275 億トンとなっている。現実的には、パイプラインの長さはコスト的に 10 キロメートルが限度であり、「背斜構造を持たないサイト」が社会に受容されなければ、「距離 10 キロメートル未満で背斜構造を持つ 26 億トン」のみとなり、CO₂ を年間 12~14 億トン排出する日本にとって、海域深部塩水層貯留は「超大量」削減技術とは呼べなくなる。

物理的のみならず、社会的な側面も含めた CO₂ 貯留キャパシティーを格段に増加させるには、単純なことではあるが、より沖合を考えればよい。プレートテクトロニクスの沈み込みがあるため地震国である日本は、同時に深い海を領海内に抱えている。世界的には海底油田掘削の水深は三千メートルに達しており、深海にライザー管を立てることは技術的に不可能なことではない。しかもここで深い海と言っているのは数百メートル程度の水深を意味している。

海岸線から 10 キロメートル以上離れることになれば、コストの面からもパイプラインを諦め、船輸送を考えることになる。大水深海底下貯留のメリットとしては、火力発電所や鉄鋼所などの CO₂ の大量排出源 (ソース) と貯留サイト (シンク) が一対一関係である必要はなく、一つの貯留サイト当たりの複数ソースに対し効率的に少ない隻数で対応できることが挙げられる。さらに社会的受容性の観点からも、「ここは俺の海」と言うには沖合い過ぎて、NYMBY 問題を緩和することができる可能性がある。さらに物理的には、貯留層から漏洩した CO₂ が地中を上昇してくる間に、ある深度において、ある圧力と温度になると、CO₂ ハイドレートが生成される。ハイドレートには、漏洩を停止する役目が期待でき、万が一貯留層からの漏洩が起きても、海底からの漏出は防止でき、ハイドレートができる温度、圧力条件の下方の層に溜まった漏洩 CO₂ ガスは回収することも可能となる。

そこでここに私は大水深海底堆積層中での CO₂ 漏出実験を提案したい。QICS は、海域 CCS の対象が浅い北海である英国ならではであり、日本は QICS よりも深い海での漏出実験を実施すべきである。実海域実験の目的は、大水深海底堆積相中でのハイドレート生成による漏洩トラップ現象を確認すること、大水深での物理化学的観測技術を確認すること、そして大水深海底において、おわんをひっくり返した形状の

大型容器（ベンチックチャンバー）を設置し、その中の CO₂ 濃度を变化させた生物相の変化を確認することである。

（4－5）まとめ

CCS の実施事業者は事前の入念な調査により CO₂ が漏出しなサイトを選定するが、2011 年の東日本大震災に伴う原発事故以来、専門家の「絶対」という言葉（私はそういうことを言う人に会ったことがあります）は社会をより懐疑的にさせるようになった感がある。CCS が社会に受容されるには、ベネフィットとリスクの両方を認知してもらった上で、安全・安心感を高めるために、リスクである CO₂ の漏出を検知できる観測技術、漏洩が起こった際の CO₂ の挙動の予測技術、漏洩した CO₂ の生態系への影響などの環境影響評価法の確立や、さらに漏洩が起きた際の対応プロトコルの策定が必須となると考えられる。CCS のみならず、全ての大規模開発授業において、このような環境影響評価法の確立は、日本の技術を国際展開する際の付加価値となることが期待される。

4. 若手人材育成

海底・海底下資源の開発・利用を促進するためには、世界規模の社会・経済変化や地球規模の環境変化の予測や展望と、それらへの対応策の立案および実行という、次の世代（20～30 年先）に止まらず、50～100 年先を見据えた研究や取り組みが必要となる。このため、多角的・多面的な感性や視点を有する若手人材の育成が急務となる。

本研究委員会の活動のまとめとしてのシンポジウム「海底・海底下の資源開発と利用は実現できるのか？～あるべき未来と工学の役割～」を令和元年 8 月 26 日に開催し、基調講演 2 件と講演 4 件を行ったところ、100 名を超える参加者を得た。このシンポジウムにおいては、EEZ 内海底・海底下資源の開発・利用の未来像の提示と、そのために必要となる取り組みの議論を、継続的に行うことの重要性の認識を共有することができた。しかし、一方で、参加者の平均年齢が 50 歳超と推定され、「継続的に行うこと」への危惧も鮮明となった。

近年、大学や研究機関における若手研究者の採用は、当初は任期付きがほとんどとなり、5 年程度の年限を区切って採用され、その期間中の研究業績を評価して、再任や任期のない雇用への転換を認めるという仕組みとなっている。また、再任や転換のない場合には、新たな雇用機会を捜さなければならないことになる。このため、当該研究者の最大の関心は、短期間に多数の研究業績を挙げることになる。このような状況下においては、専門性を生かした集中的な取り組みの方が、効率が良いことは明らかであり、多角的・多面的な感性や視点を持つことは困難となる。若手研究者を育成するプログラムは、日本学術振興会の特別研究員などが既にあるが、専門性を生かした集中的な取り組みの方が高い評価に繋がりやすい仕組みとなっていることは否めない。

しかし、資源に関わる研究には長期的な予測や展望が必要であるとともに、多角的・多面的な感性や視点が必要とされる。このため、このような特性を有する学生が、博士課程後期に進学し、その後も長期的な視野で研究を継続できるようなプログラムを、産官学で連携して創設し、若手研究者を養成・育成する必要がある。