

日本における海洋深層水の利活用の過去・現在・未来

The past, the present and the future of resource utilization of deep ocean water (DOW) in Japan

高橋正征¹

Masayuki MAC TAKAHASHI¹

Abstract

Utilization of deep ocean water (DOW, hereafter) in Japan was summarized in three time steps, the past, the present and the future. During the past from 1957, firstly introduced DOW to Japan, to 1985, ocean thermal energy conversion (OTEC) was conducted for developing technology as the national project in Japan after the first oil crisis in 1973. The technology development, however, diminished after around 1980 because of finding that it takes more time than expected for reducing the price of power generation. In the present (1986 to 2018), social recognition of DOW resources has been greatly advanced by the Aquamarine Program of the Science and Technology Agency of Japan focusing on the utilization of diverse DOW resources. The first DOW research Institute, established in Kochi in 1989, started pumping up DOW, supported the research for DOW resource utilization, and then supplied the first merchandise made from DOW on the market in 1996. The DOW products greatly attracted the people's attention, and resulted in requesting DOW pumping facilities throughout the country. By 2008, 17 DOW pumping stations were constructed within Japan. Applications of DOW resources developed have covered in a wide range including foods and beverages, aquaculture, cosmetics, bath agents, agriculture, air-conditioning, and generating power, etc. The DOW industry has now been established in Japan estimating about 300 billion Japanese yen per year for business in 2016. In the future after 2018, it will be a point to develop a multi-step utilization of various DOW resources.

Key Words: Deep ocean water (DOW), Resource, Multi-step utilization

要 旨

日本での海洋深層水（以下、深層水）の利活用の過去、現在、未来で整理した。深層水が日本に紹介された1957年から1985年まで（過去）は、1973年の第一次石油危機を受けて国家プロジェクトで海洋温度差発電（OTEC）の技術開発が進められたが、発電単価低減に予想以上の時間がかかることが判明し、1980年以降は低調になった。1986年から2018年（現在）には、（旧）科学技術庁のアクアマリン計画が深層水の多様な資源の利活用のきっかけをつくり、1989年に高知に新設された深層水陸上揚水施設で研究と技術開発が行われ、1996年に最初の深層水商品が市場に出た。深層水商品は社会的に注目され、2008年までに国内各地に17ヶ所のDOW取水施設が新設された。工夫された深層水の利活用は、飲食物、養殖、化粧品、入浴剤、農業、発電など多岐にわたり、深層水の資源利用は定着した。2016年の日本の深層水産業規模は年間約3,000億円と試算された。2018年以降（未来）では、深層水の複数資源を多段的に利用することがポイントだ。

キーワード：海洋深層水、資源、多段利用

¹ 海洋深層水利用学会会長、東京大学・高知大学名誉教授（〒305-0844 茨城県つくば市小白碓672-162）

1. 緒 言

2015年9月、国連で「持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals, SDGs)」が全会一致で採択され、環境や開発に関係した17の目標を取り上げ、2030年までの15年間に世界各国で目標を達成することが目指されている(国連開発計画 (UNDP))。

20世紀を振り返ると、化石燃料や鉱物といった地下資源によって人類の物質的な豊かさは飛躍的に増した。しかし、同時に地球の環境汚染や変化といった負をもたらした。地下資源は、億年の長時間をかけて形成されているので、短時間に使用し続けると枯渇し、さらに大量の廃棄物が排出されて環境変化が避けられない。化石燃料の消費による大気中の二酸化炭素の濃度上昇が好例だ。宇宙船「地球号」という限られた空間内で、私たち人類がこれからも物質的豊かさを求めて意欲的に社会活動を進めていくには、20世紀に多用した地下資源に代わる資源を開発して利用するのが喫緊の課題である。

そのため、最近、太陽光・風力・地熱といった自然エネルギーの利用が進んでいる。これらは地下資源のように長時間かけてつくられたものではないが、問題がないわけではない。例えば、ある地域を温める太陽光エネルギーを電気に変えて別の場所に送ると電気を使った場所を温めることになり、環境変化につながる。風力も同じだ。利用が大きくなれば、大きな気候変動の危険がある。その他の新たな自然エネルギーでも事情は変わらない。エネルギー以外の物質資源でも、生物を利用した生分解性プラスチックをはじめ、様々なチャレンジが行われているが、物質資源でも事情は変わらない。ヒトが物質的な豊かさを求め続ける限り状況は変わらない。選択肢は、よりマイナスの少ない資源を探して利用していくことである。

海洋深層水(以下、深層水)は「太陽光が十分に射しこまない水深200 m以深の海水」(日本水産深層水協議会, 2001)と水産利用目的で定義されていて、低温(冷熱エネルギー)・栄養塩類(肥料)・各種金属類・水などといった、エネルギーと様々な物質資源を含んでいる(高橋, 2005; Takahashi and Huang,

2012)。深層水の量は単純計算で海水の約95%をしめて莫大なので、それぞれの資源の総量も巨大である。例えば、深層水に含まれる肥料としての窒素とリンの総量は、世界中で毎年農地に撒かれる約3000年分もある。また、話題のレアアースの含有量も桁違いに多い。このように深層水は人類が必要とする資源のおそらく90%以上を、しかも長期間にわたって支えてくれる可能性がある。

しかし、深層水の資源利用の課題は、何といても水以外の資源濃度が極めて低いことだ。そのため、つい最近まで効果的な利用ができなかった。これはエネルギー密度の薄い太陽光も同じで、フランスのベクレルが1839年に発電原理「光起発電効果」を発見したが、現在の太陽電池のもとになったシリコン太陽電池の発明された1954年までに115年を要した。深層水の冷熱エネルギーも同じだ。1881年にフランスのダルソンバールが海の表層と深層の温度差を利用した海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)を提案したが(上原, 1982)、130年以上を経た2013年に沖縄久米島(50 kW)と2014年に米国ハワイ島(105 kW)でやっと小規模OTECの連続運転が始まり、事業利用が見えてきた。

深層水中の栄養塩類を利用した水産増殖は、米国コロンビア大学のローウエル教授がアサリの養殖事業モデルで肥料資源の有用性を示した(Roels *et al.*, 1979)。

ここでは、日本での深層水の資源利用に着目して過去・現在を整理し、さらに将来を考えてみる。

2. 過去 (1957-1985)

ここでの“過去”とは、便宜的に海外から日本に深層水の資源価値が紹介された時から1985年頃までとする。

最初に日本に深層水の資源とその利用を紹介したのは佐々木忠義氏(北海道大学水産学部教授, 当時)で、1957年7月3日の朝日新聞夕刊の科学欄に、フランス人クロードが西アフリカのアビジャンでOTECと淡水製造装置の建造に関する政府事業を進めているという記事を記名で掲載した。そこでは“下層水”

という言葉が使われた。宇田(1969)も、岩波新書の「海」に、佐々木氏の記事をもとにしたと思われるアビジャンのチャレンジを紹介している。しかし、アフリカ諸国の独立運動が盛んになって、アビジャン計画は途中で断念された。日本でのOTECの詳しい一般的な解説は上原(1982)と高野(1984)までなかった。

1973年に、第一次石油ショックが起こると、石油に依存していた欧米諸国や日本などは危機感を感じ、石油に代わるエネルギー資源探索のための国家プロジェクトを立ち上げた。日本では1974年に通産省がサンシャイン計画の中にOTECの技術開発を組み込み、1986年までに10メガワット級の実験発電所建設を目指した。室内での様々な検討を踏まえ、佐賀大学が中心になり民間数社が支援して、1979年に島根県大社沖で日本初の洋上実験が行われたが、台風の影響で途中で断念された。その後、1981年に東京電力が赤道に近いナウル共和国で100 kW OTECの実験施設を造り、1年間実証発電実験を行った。1982年には九州電力が徳之島で50 kWのOTEC実験をし、発電した電気は島内の配電網を通じて利用された。

しかし、OTECは装置が高額なため発電コストが高く、技術開発に時間がかかるという判断になり、また石油危機で高騰した油値が一段落したこともあって、1980年代半ばから国や企業の研究支援が急速に少なくなっていった。一方で、島国日本でのOTEC開発は意義あるという考えもあり、大来佐武郎氏等の呼びかけで1988年2月に日本の大手の電機、ゼネコン、商事、総合研究所、銀行など26機関を会員とした「海洋温度差発電研究会」がつくられ、1994年まで積極的な調査と研究活動が続けられた(海洋温度差発電研究会, 1994)。日本の“OTECの父”ともいわれる、佐賀大学の故上原春男教授は、温度差発電研究会の技術顧問として終始努力された。さらに、上原教授は1982年に佐賀大学理工学部付属施設として「海洋熱エネルギー変換実験施設」を新設した。これは10年後の1992年に「海洋温度差エネルギー実験施設」と名称変更、2002年には全学共同利用の「海洋エネルギー研究センター」、さらに

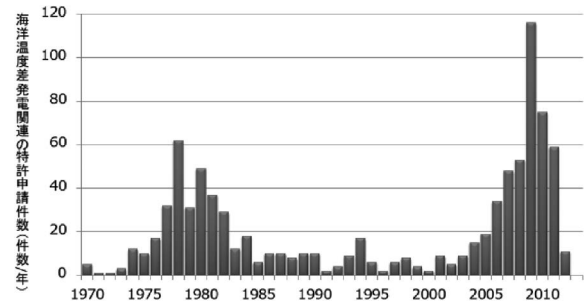


図1 OTECに関する主要国のOTEC関係の特許出願件数の推移(岡村(2018)を一部改変)

2005年には全国共同利用施設へと大きく発展した。海洋エネルギー研究センターは現在もOTECの研究・技術開発で世界をリードしている。

こうしたOTECの技術開発の推移は、特許申請数に如実に反映されている(日本技術貿易株式会社, 2013)(図1)。1973年以降、世界の特許出願数が年を追うごとに増え、1978年には60件の最大件数を記録した。しかし、1980年頃をピークに、特許申請件数は年々減り、1985年以降は年間10件程度で推移した。OTEC関連の特許出願数では日本と米国が群を抜いて多く、次いで欧州の国々が続く。

一方、海洋科学技術センターの中島敏光氏と豊田孝義氏の二人は、先のRoelsの一連の論文に刺激され、1970年の終わりに、当時、栄養性の高い亜表層水の湧昇現象による海域の肥沃化を研究していた筆者の研究室に来られ、深層の海水が含む栄養塩類資源とその利用についての勉強を共に始めた。

以上のように、1985年以前の日本では深層水のもっている資源のうち、特に冷熱エネルギーを利用したOTECが注目された。しかし、いずれも1985年以前は技術開発段階で実用化には至っていない。

3. 現在(1986-2018)

ここでは1985年から2018年までを便宜的に“現在”と呼ぶことにする。

(旧)科学技術庁は、1986年に「海洋深層資源の有効活用技術に関する研究」(科学技術振興調整費1986-90)をテーマとするアクアマリン計画を実施した。その中で深層水は中心課題として取り上げられた。

しかし、OTECはすでに通産省が取り扱ったため、OTEC以外の深層水の資源利用が対象とされた。科学技術庁傘下の海洋科学技術センターがアクアマリン計画を主導したことは言うまでもない。

アクアマリン計画では、1989年に陸上と洋上にそれぞれ深層水の利活用のための実験施設を新設した。陸上施設は室戸市三津で、国が深層水（水深320 mから日量460トン揚水）と表層水（水深320 mから日量460トン揚水）の取水管を設置し、高知県が実験施設を新設した（深層水有効利用実験陸上施設、後に高知県海洋深層水研究所）。洋上施設は、国が深層水と表層水を揚水する浮体「豊洋」を新造し、富山湾の氷見沖に鎖と錨で係留した（深層水有効利用実験洋上施設）。

高知県海洋深層水研究所では、1989年から深層水を利用した水産養殖、脱塩水、ミネラル、農業などが検討された。アクアマリン計画に参加した多くの研究者が努力した結果、深層水の利活用への社会的関心が高まり、その後の発展につながった。1994年には、科学技術庁が深層水研究所に水深344 mから日量460トン汲み上げる新たな取水管を敷設し、深層水の取水量は合計で日量920トンとなった。同時に表層水の取水量も倍加した。民間からの深層水の強い分水希望を受け、1995年に研究・開発のために日量100トンまでの民間への深層水の分水が始まった。その結果、飲料水をはじめとして様々な飲食品、入浴剤、化粧品などが開発され、一部は商品化されて市場に出た。1996年の高知県の深層水商品の売り上げは1億円を記録し、以後、売り上げは急速に伸び、1999年には40億円に達した（図2）。

こうした結果を受け、高知県は事業利用のための新たな深層水取水管の敷設を計画し、水産庁の1/2補助事業を利用して、2000年に三津と室戸岬の中間の高岡に、水深374 mから、日量4,000トンを取水する「アクアフーム」を新設した。アクアフームは室戸市の所管となり、深層水の取水・供給を管理している。深層水は、大小の個別の分水をはじめ、飲料水や製塩、ホテル、温泉、養殖、漁協などの各施設へ配管給水されている。その結果、深層水商品の売上総額は順調に伸び、2003年には年間120億円

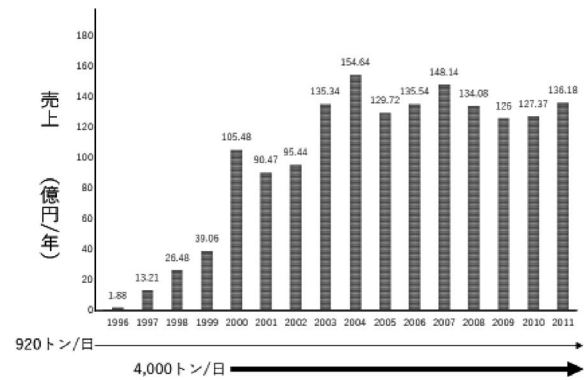


図2 高知県の海洋深層水商品の年間売上高（億円）。海洋深層水取水量は高知県海洋深層水研究所の日量920トン、ただし2000年以降はアクアフームの日量4,000トンが追加されて日量4,920トンに増加。（高知県の資料をもとに作図）

を超え、以来、ほぼ安定した売り上げが維持されている。2004年には154億円を記録した（図2）。

高知県での深層水資源を利用した様々な商品開発と販売実績は、各地の深層水取水適地の関心を呼んだ。富山県は1995年に水産庁予算で滑川市内の水産試験場に深層水供給施設（321 mから日量3,000トン）を造った。2000年に入ると、沖縄県久米島（612 m, 13,000トン）、2001年には、三浦DSW（330 m, 1,000トン）、静岡県焼津（397 m, 2,000トン；687 m, 2,000トン）、富山県入善（384 m, 2,400トン）の3か所、2002年には鹿児島県甕島（375 m, 400トン）と伊豆大島（500 m, 100トン）の2ヶ所、2003年は、北海道熊石（343 m, 3,500トン）、北海道岩内（300 m, 3,000トン）、新潟県佐渡島（332 m, 1,200トン）の3ヶ所、2004年は富山県滑川（333 m, 2,000トン）と石川県内浦（320 m, 100トン）の2か所、2006年に北海道羅臼（360 m, 4,560トン）と三重県尾鷲（415 m, 2,885トン）の2か所、そして2008年に静岡県伊東DHC（800 m, 1,000トン）と、全国17カ所に深層水の取水施設が造られた。地域の漁業者が活用する施設は水産庁が取水施設建設費の1/2を補助した。現在までに、三浦DSWと伊豆大島の施設は撤去されたが、その他の15ヶ所は稼働している（海洋深層水利用学会、2019）。取水量は沖縄県久米島の日量13,000トンを筆頭に、合計で日量45,965トンである。

30年近い深層水の利活用で、低温、栄養塩類（富

| 利活用の対象 | 資源・特性の利活用 | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------|---------|------|------------|--------|-------------|--------|--------|--------|---------|----------|
| | 1. 低水温 | 2. 栄養塩類 | 3. 水 | 4. 塩・ミネラル類 | 5. 金属類 | 6. 難分解溶存有機物 | 7. 微生物 | 8. 清浄性 | 9. 安定性 | 10. 親水性 | 11. 再生速度 |
| 1. 発酵食品 | | | ○ | | | | ○ | ○ | | | |
| 2. 飲食物 | | | ○ | | | | ○ | ○ | | | |
| 3. 飲料水 | | ○ | | | ○ | | ○ | ○ | | | |
| 4. 塩・苦汁 | | | ○ | | | | ○ | ○ | | | |
| 5. 入浴剤 | | | ○ | | | | ○ | ○ | | | |
| 6. 化粧品・品 | | ○ | ○ | | | | ○ | ○ | | | |
| 7. 医療 | | ○ | | | | ○ | | | | | |
| 8. 農業 | | | ○ | | | | | | | | △○ |
| 9. 海藻養殖 | △ | ○ | | | | | △ | | ○ | ○ | |
| 10. 魚介類養殖 | ○ | | | | | | ○ | | ○ | ○ | |
| 11. 畜養・衛生管理型漁港 | ○ | | | | | | ○ | | ○ | | |
| 12. 金属類 | | | | ○ | | | ○ | | | | ○ |
| 13. 空調・温度差発電 | ○ | | | | | | ○ | ○ | | ○ | |
| 14. 冷却・根域冷却農業 | ○ | | | | | | ○ | ○ | | ○ | |

図3 これまでに開発され事業化している海洋深層水の利活用（利活用の対象）とそれぞれの利活用で利用されている海洋深層水の資源（1～7）と特性（8～11）の関係

栄養性）、水、ミネラル類、金属類、有機物質、微生物といった資源、並びに安定性、清浄性、比較的速やかな再生速度といった特性のすべてが利用されている。高知県の2004年と2011年の深層水商品の売上高を比べると、売り上げの半分を占めていた飲料水が7年間に2/3に減り、代わって化粧品と菓子類が倍以上に増えた。当初多かった飲料水がその他のものに代わったのは、全国的な現象である。一方、久米島町の売り上げの半分以上はクルマエビと海藻のウミブドウ養殖で、養殖の占める割合が高い。北海道羅臼町の深層水は定置網で獲れた魚介類を低温清浄状態に維持して漁港まで運び、さらに漁港での荷捌きの低温清浄環境維持に使われている（高橋ら、2014）。このように、深層水の利用には取水地域の特徴が反映している。

これまでに開発された利用用途を整理すると、発酵食品、飲食物、飲料水、苦汁・塩、入浴剤、化粧品・品、医療、農業、海藻養殖、魚介類の蓄養・衛生環境管理、金属抽出、空調・冷却、発電と実に様々で、それぞれが主に利用している深層水の資源と特性の関係を図3に整理した。具体的な利活用については海洋出版株式会社（2000）と藤田・高橋（2006）を参照されたい。深層水は、エネルギーと多様な物質資源を含んでいてこれまで人類が利用してきた限られた資源しか含まない資源とは全く異なる。今

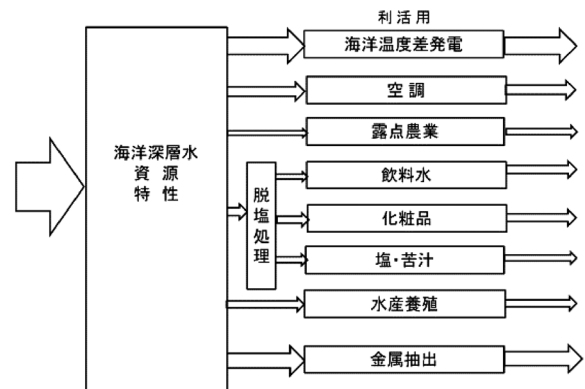


図4 海洋深層水の単一の資源と特性の一段利用の概念。特定の資源を1回だけ利用し、未利用資源は残したまま廃棄

後、利用技術が工夫されれば、人類が必要とする資源のほとんどを単一資源の深層水が供給する可能性がある。これは、人類史上初めてのことだ。ただ、従来の利用は、深層水の特定の資源を単一の目的に利用し、そのあとは廃棄する、つまり一段利用である（図4）。

海洋深層水利用学会・利用促進委員会（2017）の調査によると、日本国内の深層水の事業規模は少なくとも年間約650～1,000億円程度と推定された。ただしこれには発酵処理に深層水を利用している発泡酒の売り上げ約500億円などは含まれない。韓国海洋水産部（2016）は、2015年に日本の深層水の市場規模を約3,100億円、台湾を約720億円、韓国を約12

億円と推定し、アジアの市場規模を約3,832億円と試算している。

日本で進められた深層水が含む様々な資源と特性の商業利用は日本だけでなく深層水に関心をもった国々に希望を与えた。OTEC技術開発に大きなエネルギーを割いていたハワイでは、日本の多目的な利用を取り入れた結果、中心になって進めていた州立ハワイ自然エネルギー研究機構の運営資金が事業収入で賄えるようになった。こうして、長年希望していた内径140 cmの大量取水管設置も実現した。今や、ハワイ州の産業収入は深層水事業が観光事業に次いで第2位になっている。

OTECも、“現在”に華々しい技術発展を遂げた。その様子は図1に示した2000年以降の特許出願数にはっきりとみられる。2008年に米ロッキード・マーチン社は30年ぶりに開発を再開し、翌2009年にはフランスのDCNS社も開発に参入した。日本でも2011年から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による海洋エネルギー開発がスタートし、その中にOTECも入った。2013年4月には、沖縄県久米島で50 kWのOTEC実証設備が連続運転を始め、発電した電気は沖縄電力の商用電力系統に供給され、現在も無人連続運転が続いている。翌2014年には、ハワイで105 kWの商用実証設備が稼働した。今や、OTECは事業用のスケールアップの段階に入った(岡村, 2016)。最近の特徴の一つは、これまでの日米欧に加えて中国と韓国が加わってきたことだ。

一方、アクアマリン計画では、洋上実験施設の「豊洋」を使って深層水の含む栄養塩類で海を肥沃にする、つまり湧昇効果の可能性が検討された。生産の活発な表層の真光層は、夏に栄養塩類が乏しくなるので、その時期を狙って1989年と1990年の夏に、「豊洋」で揚水した深層水(水深220 mから日量2.6万トン)と表層水(水深2.5 mから日量5.2万トン)を混合して海面に散布した。混合水の散布量は日量7.8万トンに上るが、海面に達すると間もなく拡散し、栄養塩類の増加の確認はできなかった。その様子はウランを添加して着色した混合水の追跡からも明らかになった。一方、深層水と表層水の混合水をポリ

エチレン容器に入れて太陽光の下に置くと、栄養塩類はほぼ1日で消失し、一次生産が高まって植物プランクトンが増えていく様子がクロロフィル*a*と粒状有機炭素の急激な増加から確認された。したがって、富山湾の深層水は肥沃化ポテンシャルをもっているが、散布水量が少ないこと、自重沈降や速やかな拡散で、肥沃化効果の確認ができなかったと判断された(井関・大内, 2017)。

「豊洋」による海域肥沃化実験は世界初のチャレンジで、実験期間中、国内外から多くの関係者が見学に訪れた。しかし、浮体の維持管理の費用負担が大きく、1990年度の実験終了とともに「豊洋」はスクラップ処理された。

「豊洋」実験の弱点の克服を目指した海域肥沃化実験(「拓海」プロジェクト)が、水産庁の研究開発事業として2000-04年に相模湾で実施された(井関・大内, 2017)。プロジェクトでは、深層水の取水量を「豊洋」の4倍近い日量10万トンに増やし、表層散布ではなく、表層水20万トンと希釈して水深20 mから密度流放流した。密度流は水中を水平方向に移動し、少なくとも60時間はしっかりと密度流を保っていることが確認された。しかし、レッドフィールド比、生態効率、栄養段階数などを用いた計算から期待される動物プランクトンやプランクトン食魚の生産量は年間を通して深層水放流を行ったとしても最大で数百トンにすぎなく、その効果を自然界で検出することは容易でない。仮に長江の流量並みの深層水を放流すれば、計算上は日本の漁業生産量に匹敵する肥沃化効果が期待できる。

将来、OTECが実用化され、大量の深層水が使われるようになれば、実用的な海域肥沃化が可能だ(高橋, 1991; Takahashi and Ikeya, 2003)。Takahashi and Matuura (1991)は、熱帯海域で大規模にOTEC発電を行えば、汲み上げた深層水の冷たさで表層水温がコントロールできるので、温暖化による表層海水温の上昇を低下させ、巨大台風の発生を抑えることの可能性を指摘した。

以上のように、“現在”の様々な努力の結果、深層水のもつ多様な資源と特性の利活用が明らかとなり、その一部は事業化段階に入った(吉田, 2000)。

これは、日本の研究者・技術者、そして産業界の努力の結果である。もし、OTECだけに固執していたら、深層水の利活用の道はまだ開かれなかった可能性が高い。

4. 未来 (2018-)

ここでは、2018年以降を“未来”と呼ぶ。

深層水は多様な資源を含むので、一部の資源だけ使って廃棄すると、未利用資源による環境影響が起こる。例えば、栄養塩類を利用しないで沿岸に流すと富栄養化が避けられない。また、低温のまま流せば冷水塊が問題だ。未利用資源の問題の解決には、深層水に含まれる資源をすべて使いこんで、最後に表層水と同じ性質にして海に戻すことである。多様な資源を順番に使っていくので多段利用だ。

多段利用の概念を最初に提案したのはDaniel (1991) だと思う。彼は、まず深層水の冷熱をOTEC発電に使い、少し昇温した深層水を空調に、次いで低水温を利用して空気中の水分を凝集して集めた後、土壤冷却に利用して熱帯環境下で温帯野菜を栽培する。ここまで深層水を使いこむと水温は気温に近づく。最後に含まれる栄養塩類で植物プランクトンや海藻を培養して一部は魚や貝の養殖の餌に利用し、表層水に近い性質にして海に戻す。多段利用の原理は中島・豊田 (1994) が分かりやすい図で説明しているし、また、解説は高橋 (2000) に詳しい。実際には、1970年代にRoelsが深層水でアサリ養殖の事業モデルを作った際に多段利用が行われた (Business Week, 1974)。深層水の取水設備の建造費と取水には電気代がかかるので、深層水の資源利用は一段ではなく多段にすると取水にかかる費用を利用者で分担できるので経費負担が軽くなる。

高橋 (2006) は、2004年に亜熱帯の台湾での深層水の多段利用を提案した。そこでは、水深600 mから7℃の深層水を日量100万トン揚水し、2,000 kW OTECで発電に利用した後、9℃に昇温した深層水5万トンを、低温を必要とする養殖や根域冷却農業などの冷たさを必要とするところに回し、残りの95万トンは地域の空調でそれぞれ二次利用。空調で14℃

に昇温した深層水は、続いて60万kWのガス火力発電機の冷却に回して三次利用。出てきた26℃の昇温深層水は、海水淡水化、養殖、食品・飲料原料、健康・美容・医療利用、農業利用、海域肥沃化などで四次利用する。

富山県入善町では初歩的な多段利用が行われていて、数℃の深層水をレトルトご飯工場の空調に一次利用し、20℃ほどに昇温した深層水でカキを数日間蓄養し胃内容物を空にする清浄化処理に二次利用されている。

深層水の多段利用の本格的計画は沖縄県久米島で進んでいる。久米島では2015年の深層水関連の総売り上げが年間24.5億円に達した。その64%は水産養殖、26%は化粧品と健康増進、10%は飲食品で、夏には汲み上げた深層水が100%使われる。現行の事業者、特に水産養殖関係者は事業拡大のために深層水供給の増量を強く望んでいて、また、島内外の新規の利用者の要求も大きい。例えば、根域冷却による農業の技術開発ができ、ハウレンソウ・ミズナ・トルコギキョウなどの温帯の野菜や花きの栽培が夏の沖縄で可能になったが、深層水が不足していて新規に農業に回せない状態を生んでいる。

そこで、沖縄県久米島町 (2011) は深層水と表層水の取水量を増やして産業の活性化を図る“久米島モデル”をまとめた。計画では水深700 mから深層水 (6.7℃) を日量23万トンと表層水30万トンを汲み上げ、年間平均で1,250 kWのOTEC発電をし、11.7℃の昇温深層水を植物工場、施設園芸、空調、フラッシュ蒸発淡水化で二次利用する。さらに15-20℃の昇温深層水を水産養殖、逆浸透膜淡水化、金属抽出などの三次利用に回す (図5)。

2017年には、内閣府沖縄総合事務局経済産業部 (2017) が“久米島モデル”の具体化を目指して「離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」を実施し、調査報告書をまとめた。調査では深層水の実際の需要見積もりにかなりの力がそそがれ、現在の事業者に加えて、新規参入希望者からも直接聞き取りをして、確実な需要として深層水と表層水はともに最低で日量18万トン必要と導いた。取水設備建設後10年目以降の安定した際の全

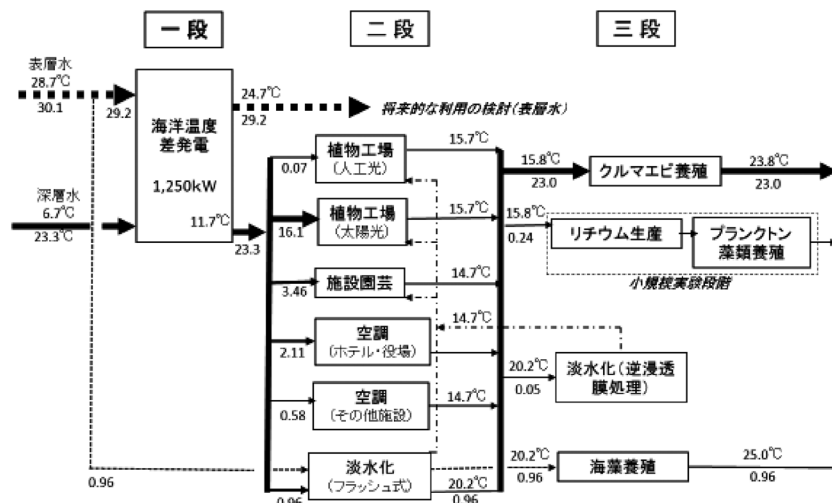


図5 沖縄県久米島町の「久米島モデル」で検討されている多段利用の概略. 図中の数字は万トン/日. (沖縄県久米島町 (2011) の資料をもとに作図)

事業の総売上高として年間80億円以上を予想していて、その内訳は多い方から水産養殖41.2%, 食品・飲料38.2%, 化粧品・医療15.8%, 冷熱利用農業3.6%, 健康増進・医療施設1.2%となっている。取水管とその付帯設備並びに各利用者への陸上配水管設備などの建設費総額として84.9億円を見積もった。

深層水の大規模利用は冷熱エネルギーと栄養塩類で、次いで淡水化による水利用である。冷熱エネルギーはOTEC・空調・冷却が主になるので、通常の利用を考えると亜熱帯・熱帯が適している。温帯では冬の利用が大幅に少なくなるため稼働率が下がる。深層水の冷熱エネルギーを東京都内の建物空調に利用することが検討されている(デザインウォーター, 2018)。深層水は懸濁物質が少ないので(菅野ら, 2008), 逆浸透膜などの濾過膜を利用した海水淡水化の原水に適している。

5. 結 語

動物と植物を比べると、動物は必要なエネルギーと物質が濃縮している餌を求めて動き回る。一方、動くことのできない植物は身の回りから必要量のエネルギーと物質を得なければならない。その結果、植物はエネルギーとして太陽光を、物質源として20数種類の生元素を肥料として土壌から吸収している。太陽光も肥料も濃度が著しく低い。そのため

植物は高い効率で吸収する仕組みを生み出した。人類はまだその仕組みを十分には理解できていない。

人類の資源利用を振り返ると、これまでの化石燃料や鉱物資源を探して利用してきたのは動物が餌を求めているのと似ている。化石燃料や鉱物資源は資源の濃度が高いために利用しやすかった。しかし、先にも述べたように、長い時間をかけて作られたこれらの地下資源を短時間で大量に利用することは有限の地球上ではできない。今こそ、人類は植物にならって身の回りの薄い資源の利用に切り替える時だ。その中で、深層水は最も有望な資源といえる。21世紀の早いうちに、深層水資源が社会維持の中心になることを期待する。

文 献

- Business Week (1974) An ocean broth that fattens seafood. September 21.
- Daniel, T. H. (1991) Deep ocean water utilization at Keahole Point, Hawaii, U.S.A. 未発表原稿, 10 pp.
- デザインウォーター (2018) Cool Tokyo (東京湾沿岸発電所への冷却水供給とヒートアイランドの解消) <http://designwater.jp/2016/08/15/cool-tokyo/>
- 藤田大介・高橋正征(監)(2006) 海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで. 成山堂書店, 東京, 209 pp.
- 井関和夫・大内一之(2017) 海洋深層水の富栄養性を利用した海域肥沃化. 海深研, 18, 166-167.
- 海洋温度差発電研究会(1994) 活動経過報告書. 40 pp.

- 海洋深層水利用学会・利用促進委員会 (2017) 我が国の海洋深層水の市場規模調査. 内部資料. 20 pp.
- 海洋深層水利用学会 (2019) <http://dowas.net/facilities/index.html>
- 海洋出版株式会社 (2000) 海洋深層水—取水とその資源利用. 月刊海洋, 東京, 号外20, 238 pp.
- 韓国海洋水産部 (2016) <http://www.recordchuina.co.jp/newsinfo.php?id=12522&ph=0&d>
- 国連開発計画 (UNDP) <http://www.jp.undp.org/content/tokyo/ja/home/sustainable-development-goals.html>
- 内閣府沖縄総合事務局経済産業部 (2017) 平成20年度離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査報告書. 64 pp. <http://www.ogb.go.jp/kaisan/oshirase/016535html/201710/171010/hokokusho.pdf/>
- 中島敏光・豊田孝義 (1994) 海洋深層水の資源的価値とその利用. 月間海洋, 26, 133-138.
- 日本技術貿易株式会社 (2013) 特許出願から見た海洋温度差発電. https://www.ngb.co.jp/ip_articles/detail/994.html
- 岡村 盡 (2016) 海洋温度差発電を中心とした温度差発電技術の動向. 日本マリンエンジニアリング学会誌, 51, 85-90.
- 沖縄県久米島町 (2011) 久米島海洋深層水複合利用基本調査報告書. 緑の分権改革推進事業. 190 pp. http://www.town.kumejima.okinawa.jp/docs/eeocean_water_inspection_slip/file_contents/deep-ocean_water_all.pdf
- Roles, O. A., S. Laurence and L. Van Hemelryck (1979) The utilization of cold, nutrient-rich deep ocean water for energy and mariculture. *Ocean Management*, 5, 199-210.
- 佐々木忠義 (1957) 無限の海水から電力生産. 仏領西アフリカに工場. 朝日新聞夕刊, 科学欄 (1957年7月3日).
- 菅野 敬・阿部祐子・奥田一雄・高橋正征 (2008) 高知県室戸沖の深度320 mから取水した海洋深層水の懸濁物質による清浄性評価. 海深研, 9, 3-13.
- 高野健三 (1984) 海のエネルギー. 共立出版, 東京, pp. 95-130.
- 高橋正征 (1991) 海にねむる資源が地球を救う—海洋深層水の利用. あすなろ書房, 東京, 189 pp. (高橋正征 (2000) 海にねむる資源・海洋深層水. あすなろ書房, 東京, 189 pp., Takahashi, M. Translated by Kitazawa, K. and P. Snowden (2000) DOW, Deep Ocean Water as Our Next Natural Resource. Terra Pub. Publish. Co., Tokyo, 99 pp.)
- 高橋正征 (2000) 海洋深層水資源の多段利用. 月刊海洋, 号外22, 152-158.
- Takahashi, M. and T. Ikeya (2003) Ocean fertilization using deep ocean water (DOW). *Deep Ocean Wat. Res.*, 4, 73-87.
- 高橋正征 (2005) 海洋深層水が含むミネラルとその利用の現状. 日本海水学会誌, 59, 195-200.
- 高橋正征 (2006) 海洋深層水の多段利用と経済性. 海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで (藤田大介・高橋正征監), 成山堂書店, 東京, pp. 156-160.
- Takahashi, M. M. and P-Yi. Huang (2012) Novel renewable natural resource of deep ocean water (DOW) and their current and future practical applications. *Kuroshio Sci.*, 6, 101-113.
- 高橋正征・川端達也・山石秀樹・千綾昭彦・山内繁樹・山下和則・長野 章 (2014) 定低温清浄な海洋深層水を利用した北海道知床羅臼における衛生管理型漁港. 海深研, 15, 1-10.
- Takahashi, P. K. and R. M. Matsuura (1991) Blue Revolution 2000. In *Proceedings of the National Science Foundation First International Workshop on Very Large Floating Structure*, pp. 1-6, Honolulu, Hawaii, April 24-26.
- 日本水産深層水協議会 (2001) In 鈴木孝治 (2005) 海洋深層水. 無機マテリアル学会誌, 2, 423-428. (社) 海洋産業研究会 (2003) 海洋深層水多核利用研究活動委報告書. 平成14年度自主調査研究事業. pp. 63-64. に全文掲載.
- 宇田道隆 (1969) 海. 岩波新書732, 東京, pp. 54-56.
- 上原春男 (1982) 海洋温度差発電読本. オーム社, 東京, 198 pp.
- 吉田秀樹 (2000) よくわかる海洋深層水. コスモトウワン, 東京, 23 pp.