

SDGs達成に向けた海洋深層水利用研究の役割と課題

Roles and tasks on the application of deep seawater to achieve the SDGs objects

山田勝久^{1,2}・高橋正征³

Katsuhisa YAMADA^{1,2} and Masayuki TAKAHASHI³

Abstract

In order to maintain the living environment of humankind, the United Nations decided to make Sustainable Development Goals (hereinafter referred to as SDGs) the most important issue and to make a global effort to switch the resources used from non-renewable type to renewable type in 2015. In this review, we will focus on the deep seawater (DSW), which is a large renewable resource around us and contains multiple resources such as energy, water, various metals, and fertilizers that human beings need. We considered the relationship between the application study for DSW and the 17 goals of SDGs. Next, we considered the reality of Okinawa's "Kumejima model," which has a track record of more than 20 years in the use of DSW and aims to improve the self-sufficiency rate through the full-scale use of DSW, aiming for social independence and industrial creation. The issues of resource utilization of DSW are (1) development of utilization technology including basic principles due to low resource density, and (2) since DSW itself contains many resources, its effective utilization by multi-steps. The necessity of handling with an eye on comprehensive resource utilization was taken up.

Key Words: Energy, Low Density, Multi-stage use, Resources, Sustainability

要旨

人類の生存環境を維持するために、国連は2015年にSustainable Development Goals (以降、SDGs)を最重要課題とし、利用資源の非再生型から再生型への切り替えに世界を挙げて取り組むことを決め実行を始めた。本総説では、存在量が膨大で、人類が必要とするエネルギー・水・各種金属類・肥料などの物質のほとんど含んでいる身の回りにある再生資源の海洋深層水 (Deep Seawater, DSW) を取り上げ、DSWに対する利用研究とSDGsの17目標との関係を考察した。ついで、DSW利用で20数年の実績を持ち、DSWの本格利用による自給率の向上で、社会の自立と産業創成を目指している沖縄の「久米島モデル」をとりあげて現実性を考察した。DSWの資源利用の課題として、(1) 資源密度の低さゆえの基礎的原理を含めた利用技術の開発、および(2) DSW自身が数多くの資源を含んでいるので、その有効利用には網羅的な資源利用を見据えた取り扱いの必要性を取り上げた。

キーワード: エネルギー、持続性、資源、多段利用、低密度

1. はじめに

世界人口が増え、人間活動の活発化によって、温暖化をはじめ地球環境の変化が大きくなるとなっ

て顕在化した結果、地球上の生物種の絶滅が加速し、多様性の低下が著しい。こうした状況は人類の生存に大きな影響を及ぼすことが1992年のリオ地球サミットで世界的に認識され、2015年9月の国連

¹ 海洋深層水利用学会 利用促進委員会 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地 佐賀大学海洋エネルギー研究センター内)

² 株式会社 ディーエイチシー (〒108-0023 東京都港区芝浦2-7-1 DHC芝浦2丁目ビル7F)

³ (公財)日本科学協会 (〒107-0052 東京都港区赤坂1-2-2 日本財団ビル5階)

サミットでSDGs (Sustainable Development Goals) が加盟国の全会一致で採択された。そこでは「持続可能な開発のための2030アジェンダ (2030年までに貧困に終止符を打ち、地球を保護し、すべての人が平和と豊かさを享受できるように持続可能でよりよい世界を目指す)」が国際目標として取り上げられている。SDGの究極の目標は、廃棄物を撒き散らして地球環境を変える石油や天然ガスのような非再生地下資源の大量使用を止め、太陽光や風力のような身の回りの再生資源に切り替えて本来の自然な地球環境を維持して人間活動の持続性を高めようというものである(林, 2020)。別な表現を使えば、進んだ科学技術を駆使し、生活様式を江戸時代のような循環再生を基盤にするともいえる。内容的には、再生資源から非再生資源依存へと大きなパラダイムシフトを起こした産業革命と同じくらい大きな影響を社会にもたらす可能性がある。その実現のために、17の目標(図1)と169のターゲットがと取り上げられ、それぞれの目標には社会の在り方が掲げられていて、その達成のための社会の持続性強化が求められている(岡野, 2020)。さらに、SDGsは地球上で「誰一人取り残さない (leave no one behind)」ことを目指している点も画期的である。言い換えれば、もし取り残すと、その部分で世界の持続性が弱くなってしまおうということである。

したがって、SDGsは発展途上国のみならず、先進国も含んだ世界が一つになって取り組むユニバーサル(普遍的)なもので、国連に加盟する193の国

が2016年から2030年の15年間でチャレンジする。日本はSDGsに積極的に取り組む姿勢を国内外に明らかにしている(外務省, 2016)。具体的には、SDGs関連に9億ドルの支援と30億ドルの取り組み、日本円にして総額約4,000億円を投資するという(イマココラボ, 2022)。もちろん、多くがこれまで取り組んできた対象を改めてSDGsの枠組みで表現しなおしている感はあるが、当時の内閣総理大臣(安部晋三氏)自らがこのような宣言をすることは大変意味があり、日本のSDGsに対する真剣な取り組み姿勢を表している。SDGsが合意されて以来、日本の各地域ではSDGsを活用した地方創生の実現の動きが見られる。特に2018年からの内閣府地方創成推進室によるSDGs未来都市の選定は、その象徴的な動きの一つで、毎年SDGs未来都市の選定数が増加し、2021年には全国で124都市を数えるに至った。ただ、ややもすると、SDGは中身のない「枕詞」になりがちなところがあるので注意が必要だ。

身の回りの再生資源として太陽光、風力、地熱、水力などの利用が進んでいるが、これらはいずれもエネルギーだけの利用である。エネルギー以外に、人類が必要とする水や多種多様な金属類や肥料などの物質資源は得られない。それに対して、海洋深層水(Deep seawater, DSW)は、単一物でありながら、エネルギーはもとより、水、金属類など、人類が必要とするほとんどの資源を含んでいて、その量は莫大である(高橋, 2000a)。DSWの利用はSDGsの目標



図1 Sustainable development goals (SDGs) ポスター 2019

達成に直接的に大きく関係する。そこで、SDGs達成に対するDSWの役割と課題について具体的に中身を掘り下げて検討する。特に、日本では世界に先駆けてDSWの取水事業とその利活用研究が進んでいるので、SDGsの問題意識を念頭に今後の研究・技術開発を進めて行くことは意味があると考えられる。

2. 調査方法

本調査では、PubMedおよびGoogle Scholarの2種類の文献データベースを用い、“sustainable development goals,” “deep seawater,” “deep ocean water,” “海洋深層水,” “深層海水” およびそれらを組み合わせたキーワードで、2007年から2021年の15年間に発行された文献を検索し、ヒットした文献の要旨をもとにSDGsの目標達成に関連したDSWの利活用に該当する文献を抽出した。同時に、“海洋深層水,” “深層海水” および“利活用”の組み合わせのキーワードでGoogle Scholarにより2007-2021で文献検索し、

ヒットした文献からSDGsの概念を含んだものを抽出した。

なおデータベースでの文献検索は2007年度からだが、DSWの利活用研究はそれ以前からも行われているので、2007年以前に発刊されたDSW関連の文献についてもSDGsが掲げる17目標の視点で検討した。

3. 結果および考察

3.1 SDGs概念に関係したDSWの利活用研究報告

検索で抽出された文献を表1に示す。SDGsは、2015年国連サミットで採択された概念のため、関係する研究報告は2017年以降で抽出されたのは10報で、主に海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) が中心である (表1)。

3.2 産業分野別のSDGs概念に関係したDSWの利活用研究報告

“海洋深層水,” “深層海水” および“利活用”を組

表1 Google ScholarとPub Medから、“Deep ocean water”(深層海水)または“Deep seawater”(海洋深層水)および“Sustainable Development Goals”(SDGs)のキーワード検索で抽出された文献一覧

Authors	Title	Journal
1 Devault, D. A. and Péné-Annette, A.	Analysis of the environmental issues concerning the deployment of an OTEC power plant in Martinique	<i>Environ Sci Pollut Res Int</i> , 24, 25582-25601, 2017.
2 Nordman, E. <i>et al.</i>	Options for achieving Cape Verde's 100% renewable electricity goal: a review	<i>Island Studies Journal</i> , 14, 41-58, 2019.
3 Giraud, M. <i>et al.</i>	Potential effects of deep seawater discharge by an Ocean Thermal Energy Conversion plant on the marine microorganisms in oligotrophic waters	<i>Sci Total Environ</i> , 693, 1334891, 2019.
4 Capron, M. E. <i>et al.</i>	Restoring Pre-Industrial CO ₂ Levels While Achieving Sustainable Development Goals	<i>Energies</i> , 13, 4972, 2020.
5 Ham, J. Y. and Shon, YH.	Natural Magnesium-Enriched Deep-Sea Water Improves Insulin Resistance and the Lipid Profile of Prediabetic Adults: A Randomized, Double-Blinded Crossover Trial	<i>Nutrients</i> , 12, 515, 2020.
6 Yasunaga, T. and Ikegami, Y.	Finite-Time Thermodynamic Model for Evaluating Heat Engines in Ocean Thermal Energy Conversion	<i>Entropy (Basel)</i> , 22, 211, 2020.
7 Sathiabama, T. <i>et al.</i>	Estimation of Ocean Thermal Energy Conversion Resources in the East of Malaysia	<i>J. Mar. Sci. Eng.</i> , 9, 22, 2021.
8 Kim, H. J. <i>et al.</i>	The Suitability of the Pacific Islands for Harnessing Ocean Thermal Energy and the Feasibility of OTEC Plants for Onshore or Offshore Processing	<i>Geosciences</i> , 11, 407, 2021.
9 Garduño-Ruiz E. P. <i>et al.</i>	Criteria for Optimal Site Selection for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Plants in Mexico	<i>Energies</i> , 14, 2121, 2021.
10 Yasunaga, T. <i>et al.</i>	Performance Evaluation Concept for Ocean Thermal Energy Conversion toward Standardization and Intelligent Design	<i>Energies</i> , 14, 2336, 2021.

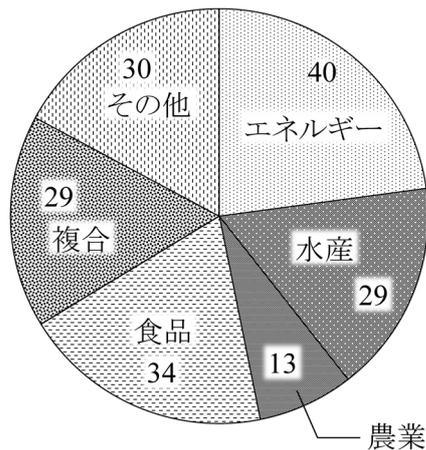


図2 Google Scholarで“海洋深層水”または“深層海水”および“利活用”を組み合わせたキーワード検索により抽出された文献の分野別比率

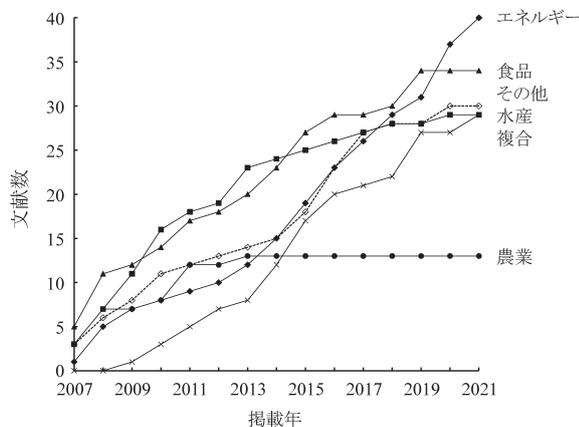


図3 Google Scholarで“海洋深層水”または“深層海水”および“利活用”を組み合わせたキーワード検索により抽出された分野別文献数の推移

み合わせたキーワードを用いた2007-2021年のGoogle Scholar検索では175報が抽出された。これらについて利用用途をエネルギー、水産、農業、食品、複合、およびその他の6分野に分けたところ、エネルギーが40報と最も多く、次いで食品(34報)、その他(30報)、水産と複合(ともに29報)と続き、農業が13報となった(図2)。各利用分野における報告の累計数の2007年以降の経年変動結果が図3である。図から明らかなのは、エネルギー分野の報文数の伸びが著しく、特に2013年以降加速し、2020年以降はトップである。食料と水産の両分野は、当初は報文数が多かったが、2013年頃から報文数の総加速度が低下している。複合とその他の両分野は、当初は食料と水産より少なかったが、2013年以降増加し

ている。農業分野は、当初は年々増えていたが、2013年以降は増加が見られない。ここで述べた結果は、2007年以降のDSWの社会的な関心の大きさの変動を反映していると考えられる。

日本では1989年に高知県室戸市に最初のDSW取水施設が完成し、その後、各地に取水施設が新設されて活発な研究・技術開発が行われた(海洋深層水利用学会, 2021)。当初は食品、農業、水産などが多く、エネルギーや複合利用は少なかった。しかし、先述のように、2017年以降はSDGs概念を明確に意識したエネルギー利用の研究報告が数多くみられるようになっている。

3.3 SDGsの目標別のDSWの利活用研究

以下では、主に文献検索で得られた2007年以降のDSWの研究・技術開発並びに2007年以前の関連文献を対象とし、その内容とSDGsの17目標との関係を整理してみる。

目標1：貧困をなくそう(No Poverty)

本目標には、利益の分配など社会システムが大きく関係し、また貧富の大きな原因の一つに、従来利用してきた資源の偏在性があげられる。DSWは中・低緯度の深海に面した地域ではどこでも利用でき、海水は地球規模で移動しているため、従来の地下資源のような著しい分布の偏りに起因する貧富の原因にはなりにくい。加えて、DSWは単一資源だが、社会維持に必要なほとんどの資源がそれ自身に含まれている。

DSWの産業利用が進んでいる沖縄県久米島では、2000年に公共のDSW取水施設が完成し、低価格で公共資源のDSWが利用できることから、20年間で水産物や化粧品を中心とした民間ベースの新規産業が新生、成長し、今日では年間25億年規模の市場を形成して島の経済が拡大した(高橋, 2019)。現行の久米島のDSW利用は、単一資源としての個別利用だが、今後はDSWが持っている数多くの資源性の多段利用によって、経済効果が飛躍的に高まる(高橋, 2000b)。DSW資源の多段利用を組み込んだ提案は台湾で出されており(黄ら, 2010; Takahashi and Huang, 2012)、久米島でも現行の利用経験をも

とに多段利用を組み込んだ具体的な事業プランが創られている(久米島町, 2017; 内閣府沖縄総合事務局経済産業部, 2017)。初期的な多段利用は、エネルギーと清浄性を対象に富山県入善町で実施されていて、そこでは5℃のDSWの冷熱を無菌米飯製造工場の冷房に使用した後、16℃ほどに昇温した清浄なDSWでカキ(Oyster)の清浄化が行われている(高橋, 2019)。これによって無菌米飯製造工場の空調用エネルギーの効率的な省エネ(90%以上)が達成し、カキの清浄化に必要な海水の清浄化と昇温処理費用がほとんど不要になり、両者で大幅な経費削減効果が得られている。このようにDSWの資源利用により地域社会を維持する経費を大幅に削減し、それを地域の特徴を生かした生産活動に投入することで、より高い経済的並びに精神的な豊かさが得られる。DSWを公共資源として取り扱うことで独占を極力避ければ、経済格差が是正されて貧困の原因の一つを軽減できる。

目標2：飢餓をゼロに (Zero Hunger)

牛肉や豚肉などの畜肉の生産には多量の飼料と膨大な時間を必要とするうえに、人の健康維持への寄与率が低いという昨今の認識の高まりを受けて、欧米では食料として畜肉類を敬遠する動きが広がってきた。代って大豆タンパク質や魚介類の需要が増えてきている。魚介類の需要増に対応して養殖生産が増えるが、これにはDSWの大幅な利用の可能性はある。

広大な海は、全体的に光合成の行われる表層付近が貧栄養なために、生産性が極めて低い。一方で、光が十分に届かない中・深層水には栄養塩類が蓄積されていて、海全体としてその量は莫大である。ゆえに人の知恵を使って、中・深層水が表層に湧出する自然の仕組みを利用して海の生産性を高めることが検討されている(Takahashi and Ikeya, 2003; 井関・大内, 2017)。日本では海の野菜として海藻類がよく利用されているが、諸外国では食材としての認知度は低い。また、陸上の野菜に比べて海藻にはヒ素が多く含まれることも、海藻が食材として敬遠される理由の1つになっている。この問題をDSWの利活用で解決した報告(原ら, 2009)や、DSWの利活用

により食用海藻の生産効率を向上させる報告(小林ら, 2013; 小杉ら, 2016)があり、海藻の食用利用が広がれば、食材の多様化が進んで、飢餓の抑制への貢献が期待される。加えて未利用の海藻(黒原, 2013)や微細藻類(島村ら, 2008)の食材化の工夫が進めば、DSWを利用してそれらの養殖や培養の道が開け、幅広い食料の選択肢と供給量を提供するものと考えられ、将来の食糧危機への対応策の一つになる。

これまで、食料生産は陸上を中心だったが、世界の人口増加が止まらないので陸上の農地面積拡大のために森林伐採が避けられない。加えて、農業生産に必要な降水量が十分でなく、今後は海での食料生産増大が必須で、それにはDSWの利用が鍵を握っている。先に述べたように、既に動物性タンパク質源としての魚介類の需要は世界的に年々高まっているが、今後は、海藻サラダの需要の高まりも期待される。今のところ陸上の穀物に代わるデンプンなどの炭水化物を多く含む海産生物はないが、海藻類の中には様々な多糖類を多量に含む種が多いので、それらから穀物に代わる食糧化の可能性はある。海藻類の生産を高めるには栄養塩類を多く含むDSWの役割が大きい。

目標3：すべての人に健康と福祉を (Good Health and Well-Being)

DSWやその含有物質の摂取は、人の健康への寄与を目的としたものであることは改めて言うまでもない。この分野の研究報告は、2007年以降のDSWの利活用においてエネルギー分野に次いで報告数が多く、さらに多様性に富んでいる。DSW中に含まれる微量栄養素の分析化学的研究(新垣ら, 2009)や培養細胞を用いたDSWの機能性に関する基礎的な研究(山田ら, 2014)から、DSWを実験動物に塗布あるいは飲用させた効果(水木ら, 2007)、切り花の鮮度保持に関する研究まで多岐にわたる。水産分野におけるアワビ、シジミ(野田ら, 2007; 松村・藤田, 2007; 原田ら, 2010; 佐藤ら, 2007)やニジマス(野田ら, 2010)などの魚介類をはじめ、スジアオノリ(池部, 2011)や地域特産海藻の培養(阿部, 2009)におけるDSWの利活用研究は、食生活を豊か

にする。なお、魚介類の養殖時にDSWを多段的に組み入れて水温調節したり、さらに太陽光の利用を組み込んだりすることも可能である。

またDSWが人の健康と福祉に寄与する可能性は、自然科学に留まらず、社会科学のアプローチとしても重要である。健康の維持・増進を目的としたヘルスツーリズムへのDSWに関する報告(森, 2010)やDSWの利活用により誕生した沖縄コスメブランドに関する報告(董, 2020)は、DSWの利活用に対する社会科学のアプローチで、その実践はDSW取水地域における地域住民の健康と福祉を増進し、経済の活性化をもたらす。なお、DSWの利活用による医療・健康分野に関しては、山本ら(2018)が総説として纏めている。

目標4：質の高い教育をみんなに (Quality Education)

人類は誕生以来「自然循環の中での社会維持」を進めてきたが、18世紀に始まった産業革命以来「地下資源を利用する“使い捨て社会維持”」に大きく方向転換した。しかしその結果、20世紀に「地球環境の変化」が顕在化し、産業革命以前の社会維持方法への転換の必要性に改めて気づき、世界的にそれを実践しようというのがSDGsである。単に江戸時代に戻るのではなく、これまでに蓄積してきた知識・技術を駆使し、さらに磨いて、新しい形の持続性ある社会の在り方を追求する必要がある。それには高い教育が必須で、DSW利活用は高い教育の理念を考える格好の材料である。

DSWの利活用推進は、開発途上国に対してもエネルギーや水の確保にとどまらず、新産業の創出など多大な恩恵をもたらす可能性がある(大塚, 2011)。その実現に向けてDSWの効率的な利活用である多段・多量利用をはじめとした幅広い産業分野を発展させるには、知識と高度な技術を有する人材の育成が必須となる。特に、DSWに含まれる資源密度が低い各種資源の有効利用には、これまでにない知識・技術の進歩が必要だ。従ってDSWの利活用には、人材育成のための教育が極めて重要で(大塚, 2021b)、その充実に期待が寄せられている。さらに、DSWとその利活用の推進では、大学の役割が大きく、若い学生や研究者に向け、DSWの利活

用の意義や価値などの教育を行う研究室が各大学にもっと多く誕生することが期待される。

目標5：ジェンダー平等を実現しよう (Gender Equality)

ジェンダーとは、生物学的な性差に付加された社会的・文化的性差と説明されている(内閣府国際平和協力本部事務局, 2022)。例えば一般に、男性に比べると女性は力が弱いことが特徴として社会的に一般化し、気づいたら女性の社会進出に大きな影響を与えてしまっている。わが国の漁業従事者をみると、自家漁業者と雇用漁業者を合わせた84-95%が男性で、これまでの日本の漁師の家庭では男性が漁に出て、女性は畑作を行い漁獲物の仕分けや加工等の作業を支援して家庭の生活を支えるという男女の役割が明確に分けられて来た。長らく「海は男の世界」と考えられたが、今日では漁業分野にも男女共同参画が加速してきている(窪川, 2020)。確かに天候に大きく影響される洋上での漁労は、相当な身体的負担が要求されるので、この分野に女性が進出する際の障害になっていることも事実だ。また漁協組織の後進性が漁村ジェンダー問題の解決を遅らせているとの指摘もあるが、近年漁協や地域のしがらみを捨てて新しいグループやネットワークを活用して地域の水産資源や労働環境を生かした起業化に励む女性が増えている。DSWの資源性の理解は男女の別なく容易で、その利用への関心も多くは性差に影響されるケースは少ない可能性が高く、ジェンダー意識を改革する良いケースとなる可能性がある。

目標6：安全な水とトイレを世界中に (Clean Water and Sanitation)

私たちは食料生産に莫大な量の淡水を使っていて、それに加えて飲料水などの生活水、工業用淡水など、淡水の需要は極めて大きい。人口が増え、人間活動が活発化し、地球上の淡水は人間の需要を満たすのに十分な量ではなくなりつつある。しかも淡水は地球上に偏在しているため、新たな水源と安定利用のための水管理システムの整備が喫緊の課題だ(沖, 2018)。通常、人類が利用する淡水は雨が源であるが、上述のとおり世界の降雨量は人間活動にとって十分ではなくなりつつあり、一部で過去の降

水に由来する地下水や湖水・河川水が使われるが、過去の遺産を食うことになる。巨大な淡水需要への対応は、多量の海水淡水化でしかSDGsに見合った解決策は見当たらない。逆浸透膜などを利用する海水淡水化では、表面海水よりも浮遊懸濁物が少なく清浄性の高いDSW(菅野ら, 2008)の利用が適している。

地球上に存在する水の97%以上は海水である(日本ユニセフ協会, 2010)。そこから計算すると、DSWは海水の94%を占めていることになる。DSWは地球の高緯度海域で冷却された海水が沈み込み、低緯度海域で温められて浮上するという持続的な運動で形成され(安田, 2012)、この再生性からDSWの利活用はSDGsの達成に大きく貢献することが期待される(大塚, 2021a)。淡水に限らず、清浄な海水が求められる場合にもDSWはその要求に応えられる(菅野ら, 2008)。実際にDSWの清浄性を生かした漁港の衛生管理(上川ら, 2007; 横山ら, 2010; 山内ら, 2014)が、SDGsの目標達成に向けたDSWの直接的な利活用方法として注目される。

目標7: エネルギーをみんなにそしてクリーンに
(Affordable and Clean Energy)

DSWの利活用では、19世紀にDSWの冷熱エネルギーが着目されたこともあって、エネルギーを利用するOTECに関する研究(上原, 2008; 李ら, 2010; 池上, 2012)が長期的に最も盛んである(Hernández-Romero *et al.*, 2018)。DSWのエネルギーは、再生自然資源であり、賦存エネルギー量の膨大さもあり、SDGsの目標達成に大きく寄与することが期待される(大塚, 2021a)。

DSWのエネルギー利用研究で他の産業分野のDSW利用研究と異なるのは、発電の際の「経済性」評価である。特に、DSWの取水施設整備と取水コストの負担が大きく、今日までの主たるエネルギー資源である化石燃料や、近年その技術開発の進歩が著しい各種自然エネルギーとの経済性比較で不利になっていた(永田・池上, 2008; 中岡, 2009; 濱田, 2012; 岡村, 2016; 遼目ら, 2018)。しかし、OTECは大規模化で発電単価は下がり、数MW級の小規模発電では揚水費を水産生物養殖や空調などと組み合わせ

せて分担し、発電単価の低減が工夫されている。また、OTECではDSWの低温エネルギーと表層水の温熱エネルギーの差で発電するが、温かい表層水が得られない中緯度では太陽光の熱や、あるいは温泉水の利用も検討されている(井上ら, 2015)。OTECの研究・技術開発では日本が世界をリードしており(李ら, 2010; 黄ら, 2010; 劉・黄, 2019; hirugnana *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021; Garduno-Ruiz *et al.*, 2021)、今後の展開が期待される。

加えて、DSWの冷熱エネルギーは建物の空調(Seawater Air-conditioning, SWAC)利用が可能で、沖縄県久米島を含めて日本の取水施設で利用されている。SWACでは室内に冷熱を送る循環溶媒の冷却が不要なため、通常の空調に比べて90-95%の省エネになる。先述した富山県入善町では、実際に無菌米飯工場の空調に使われている(高橋, 2013)。タヒチの大型リゾートホテル2カ所で、それぞれ独自にDSWを取水して全館内を空調し、その一部をスパ施設にも使っている(インターコンチネンタルボラボラリゾート&スパホーム, 2022)。オンタリオ湖などの深い淡水湖の冷たい深層水はトロント市内に給水され、大型の建物空調に利用されている(Corbey, 2021)。横須賀もしくは館山沖から大量のDSWを揚水し、都内中心部の空調に利用する計画も検討された(館山市, 2006)。空調では、冷却に多くのエネルギーを必要とし、東京では夏の電気使用量の半分以上が空調だから、DSWの冷熱を直接空調に使用すれば、電気使用量の大幅な削減が可能だ。

ハワイではDSWと表層水を混合して温度を調節し、寒冷種のエゾアワビ(*Haliotis discus hannai* Ino)の大量養殖を実現している。また人気が高い寒冷種のアメリカーン・ロブスター(*Homarus americanus*, メインロブスター)を北米海岸から空輸して蓄養し、日本やアジアに輸出している(Hawaiing, 2012)。同様に、韓国ではロシアや北朝鮮から生きたカニを、また日本からは生きたホタテ貝を輸入して低水温のDSW中で畜養している(魚, 2019)。

熱帯や亜熱帯で冷温のDSWを通じたパイプを土中に埋設して耕作地を冷却した根域冷却栽培が工夫され、温帯や亜寒帯の野菜・果物・花卉の多くが順

調に生育し、それぞれの生育適地とは異なった付加価値を生み出している(恩田ら, 2006; 鈴木, 2008). これには土の断熱効果も大きく寄与し、土が冷えると土中の水分が露点結露して大気中への蒸散・喪失が抑えられるので、作物への灌水量を減じることができる(窪田ら, 2011).

上述のように、DSWが持つ冷熱エネルギーの利活用は、幅広い産業分野に実践されている。

目標8：働きがいも経済の成長も (Decent Work and Economic Growth)

人類は有史以来人口増加と経済成長を求め続け、産業革命以後はそれが急拡大した。しかし、有限の地球上では際限ない拡大は不可能で、SDGsの必要性が世界的に認識されたということは、人口と人間活動が限界に近づいている、あるいは達していることに他ならない。そこで社会をDSWなどの再生資源依存に切り替えることは、表現を変えると、単純に経済を成長させることではなく、人口を適正規模にして、人間活動の拡大ではなくその活動をより効率化させることである。SDGsの達成には、経済の目標を“成長”ではなく“効率化”にシフトする必要があり、DSWを含めた再生自然資源利用はそうした社会のパラダイムシフトに大きく貢献する。DSWの利活用では、多段・多量利用が可能で、そのためDSWの利活用では従来産業の中でも多岐に渡った連携が必要だが、目標1で実践例を紹介したとおり、効率化された連携によるメリットは極めて大きい。DSWの利活用による“経済の効率化という”新しい価値観は、また人の興味と好奇心をかき立てて新しい時代への挑戦を推進し、それまで想像できなかった経済効率化システムつながり、それに伴う新しい社会における利益と充実感を創出することが期待される。

目標9：産業と技術革新の基盤をつくろう (Industry, Innovation and Infrastructure)

DSWの再生自然資源としての特徴は、資源密度(濃度)の低さである。20世紀までの人類の知識・技術では太陽エネルギー利用と同様に、資源密度が低いDSWを効率よく利用することができなかった。しかしその後、人類の知識・技術が進んで、DSW

の薄い資源の一部の利用が可能になってきた。これからは、知識・技術を工夫してさらに効率よい利用を実現していく必要がある。

先述したように新産業の創生と技術革新は“経済の成長”ではなく“経済の効率化”が目標となり、DSWの利活用は、言うなればその道標である。資源密度の低いDSWの利活用には、利用効率向上に向けた各種産業間の連携と画期的な技術革新が要求される。それには植物や微生物が長年の進化の過程で実現した超微量濃度の物質の効率よい吸収・利用の原理と方法の獲得である。太陽光エネルギーの利用では、すでに事業利用が可能レベルに達している。こうした叡智の研磨と連携がDSW利活用の産業利用には不可欠である。連携の具体例としては、DSWの取水施設建設にかかる各種調査に始まり(渡辺・鍋谷, 2007; 山田ら, 2012; 跡目ら, 2016; 堀ら, 2017)、DSWを加工した水の用途開発に関する研究(竹屋, 2015)、DSW中からの未利用資源の探索(柴田ら, 2016)、DSWを利活用した食品の研究開発等(横井・加藤, 2010; 中川, 2010)、DSWの利活用に向けた分野毎の初期段階の検討があり、包括的利用研究の好例として久米島モデルが目される(久米島, 2017)。さらにこうした研究が、日本から世界に広がろうとしている(福沢, 2015)。日本はDSWの利活用研究におけるリーダー的存在として、常に新しい研究開発の展開が期待されている。

目標10：人や国の不平等をなくそう (Reduced Inequalities)

歴史を振り返ると、古くは大河とその河口に広がった沃野で文明が栄え、産業革命後は地下資源のある所が富を得てきた。DSWの資源利用が進むと、世界の勢力図は大きく変わることが予想される。これまであまり利益を得てこなかった熱帯・亜熱帯の太平洋、インド洋、南大西洋に面したところが潤う。北大西洋に面したヨーロッパではDSWは得られないので、一部の宗主国がDSWの得られるかつての植民地で利活用を始めている(新エネルギー・産業技術総合機構, 2014)。DSWの利用にあたっては、DSWの得やすい国々と、利用の知識・技術を持つ国々が地理的に離れているので、両者がDSW

の利益を享受できない仕組みづくりが求められる。

20世紀は化石エネルギーの争奪から世界規模の戦争に発展し、その後の経済成長の結果「持てる国、持たざる国」として大きな差異が生まれた。この格差をなくすためには、今後、世界が脱化石エネルギー社会の実現に進むにあたり、現在は「持たざる国」であってもSDGsの目標達成に向けて積極的に参画していくことが期待される(松下, 2018)。DSWは従来の化石燃料とは全く異なる地球の再生可能な資源(大塚, 2021a)なので、この資源の積極的活用により、20世紀型の古い経済的価値観は消失する可能性が高い。

目標11: 住み続けられる“まち”づくりを (Sustainable Cities and Communities)

“まち”を維持していくうえで人類が必要とするエネルギーと物質の90%以上をDSWから得るという命題を掲げてみる。再生可能なDSWを資源として地域社会を支える“久米島モデル”が沖縄県久米島で提案されている(久米島町, 2017)。島外の資源に依存している現状をDSW資源依存へと切り替えて、まず人が生きる生活基盤であるエネルギーと水を生み出す。DSWの利活用では、飲料水だけでも技術革新やその環境インフラの整備、さらにこれらと効率的に連携した農業や食品産業など多種多様の産業創出が考えられる。そこにはDSWの資源利用を通して身の回りの資源に依存した社会からの自立と効率化という新しい経済価値が生まれ、同一資源を共有して利用する人々が同じ地域に住み、継続して生活できる自立した“まち”が生まれる。DSWは“まち”を維持するために必要なエネルギーと物質資源のほとんどを供給する。

目標12: つくる責任、つかう責任 (Responsible Consumption and Production)

非再生の資源の利用では、利用に伴う資源の枯渇と、環境変化という二つの大きな課題を抱えた。特に後者は、地球温暖化に代表されるような、地球上での人類の生存そのものに影響を与える可能性が出てきた。身の回りにある再生資源であるDSWは、差し当たって枯渇と環境変化の問題は起こらない

が、使用量が膨大に膨らみ、それが特定地域に集中すると環境変化の問題が生じるので注意が必要だ。そのため、DSWの利用にあたっては、自然の仕組みに後遺症が生じないように、利用量を含めて慎重な検討が必要である(大塚ら, 2000)。さらに、利用と利用後の処置についても十分な検討が必須で、これについては至急に研究・技術開発する必要がある。

目標13: 気象変動に具体的な対策を (Climate Action)

DSWの利活用により生み出される電力は、化石燃料の利活用で得られる電力とは異なり、地球温暖化の原因とされる炭酸ガス(山下, 2014)を生じない。しかし、DSWの冷熱エネルギーを大量に利用すると、海水の持つ冷熱エネルギーが減る。表層水温の上昇を意味するのではなく、比較的温度の高い表層水の厚みを増す可能性がある。これは太陽光や風力の利用でも同じことがいえる。例えば、DSW、太陽光、風力を使いすぎると地表面のエネルギー分布が変わって、気候変動の可能性はあるが、具体的な検討は未だ行われていない。海流や風力などの海洋エネルギーでも同様の問題は十分に考える必要がある。目標13の達成には、地球規模での考察が必須である。

目標14: 海の豊かさを守ろう (Life Bellow Water)

DSWの資源としての利活用価値が大きいことが一度認められると、人々は我勝ちに利用しようとする。DSWの利活用は海水を資源として利用するものなので、海の環境に変化を及ぼさない注意が必要となる。その典型例が我勝ちに利用を推進した水産物だ。世界食糧機構(FAO)は、現在利用されている種の1/3が絶滅の危機にあり、その割合が年々高まっていて、ゆとりをもって利用できるのは1/5以下しかないと警鐘を鳴らしている(SEA FOOD LEGACY TIMES, 2021)。世界の水産物の需要は激増し、1995年以降、世界の養殖生産は漁獲を凌駕している。将来的には、養殖生産量のさらなる増加が予想され、それはDSW利用の拡大につながる。DSWの含む肥料を利用した一次生産の増大も含まれる。しかし、養殖では供給種が著しく限られるので、多様

な水産生物の供給は漁獲に依存するしかない。天然の水産資源の情報を十分に検討して健全な漁獲生産を進めていく必要がある。DSWの含む肥料を有光層に供給する仕組みを利用して海の生産性を上げることも視野に入れる。野生動物を激減させ、牧畜一辺倒にした陸上の轍を踏んではならない。

上述のとおり、DSW資源の有用性が高くなると、DSWの乱利用の危険が大きくなる。それを防ぐためにもDSWに対する各分野の基盤研究と、問題ないレベルの使用量や使用方法の情報が必要だが、知見が少なく、喫緊の研究が望まれる(林ら, 2007; 関口ら, 2009)。DSWの本格的利用の前に、DSWが海の豊かさに寄与しているより詳細な実態把握が必要なことは言うまでもない。

目標15：陸の豊かさを守ろう (Life on Land)

食料生産がDSWを利用して盛んになれば、その分、陸上への負担が軽くなるので、陸の豊かさを守ることにつながる。DSWを利用した海水の淡水化が行きわたり、農業・工業・飲料水のかなりを占めるようになって、地下水や湖水・河川水への依存が低下すれば、陸の豊かさの維持・向上効果が期待できる。DSWの利用によって、サケやアユなどの魚類が河川へ回帰する種が増えると、これに伴って海からのミネラル類が陸上に回帰して陸の豊かさが向上する。

DSWは塩分を多含する海水なので、農業利用には適さないと考えられるかも知れない。しかし、トマト栽培では、塩ストレスによる果実の糖度向上が知られていて、DSWを塩ストレス源として利活用(島崎・岡村, 2011)したり、キノコ類の付加価値向上を目指したDSWの利活用(高島, 2008, 2010)がある。海水は、ミネラルの肥料補給を目的として、かなり古くから水田や農地に散布されてきた(徳岡ら, 1941)。キャベツ、ハクサイ、ダイコン、ナスなどにDSWを葉面散布して野菜の付加価値を高めている(高橋, 2005)。DSWには、陸から海に流れ込んだ肥料が莫大な量溶けているので、それらの陸上農業での利用の方法の工夫もそろそろ検討の時期である。特に、陸上のリン鉱石は枯渇に近く、また窒素肥料は工業的に空中窒素固定した肥料が地球環

境汚染を著しくしていて、それぞれに深刻な問題を生んでいて解決しなければならない。また、目標7で紹介した、DSWによる根域冷却農業による農作物の生産増加も陸域の豊かさの維持・向上につながる。

目標16：平和と公正をすべての人に (Peace Justice and Strong Institutions)

20世紀末イスマイル・セラゲルディン世界銀行副総裁の言葉として、「20世紀が石油をめぐる戦争ならば、21世紀は水をめぐる戦争の時代になるだろう」という一節がある(日本ユニセフ, 2010)。これは人の生活の基盤である水の確保が、国家を挙げての最優先課題となり得ることに警鐘を鳴らすものだ。上述のとおり、DSWは持続可能な水資源であり、枯渇する心配もなく、所有権の主張も難しいので、その争奪を巡る問題の生じる可能性は低く、安心して利用できる稀有の地球資源である。DSWの利活用研究では、河川水の利用で見られる上下流の問題の起こる可能性に留意しつつ、世界の平和への貢献が期待される。

目標17：パートナーシップで目標を達成しよう (Partnerships for the Goals)

DSWの効率的な利活用には、複合的な連携システムを構築した利活用が必須である。これには各産業分野が経済効率化を目指して、一丸となって利活用に努める、即ちパートナーシップが欠かせない。目標1で述べたように、既にDSW利用では、冷熱を無菌米飯製造工場の空調に使用した後に、適度に昇温されたDSWでカキを清浄化する効率的かつ複合的な利活用が実用化されている。これは工場内を冷却する必要のある事業体と適度な温度で正常な海水を必要とする事業体のパートナーシップによるものであるが、これに発電や農業利用を組み合わせた多段多量利用の実現が望まれる(高橋, 2019)。この多段利用の実現を目指す実証試験として“久米島モデル”に期待が寄せられている。そこでは地域で営まれている活動が互いに連携していて一つの生命体のようになっている。

3.4 SDGs達成に向けたDSW利活用の“久米島モデル”

DSWを複合的かつ効率的な利活用によって、社会の自立性と持続性の向上を目指し、現在実証段階に達している“久米島モデル”を取り上げて、SDGsの目標達成に対するDSWの利活用の役割を考察する。

“久米島モデル”は、久米島の地域資源である再生可能なDSWを利用して、エネルギーと水を自給しながら産業振興と雇用創出を図る自立型コミュニティのモデルで、単に地域経済の活性化にとどまらず、DSWを地域資源としてもつ日本および世界の南洋沿岸・島嶼地域に対して、先導的な実証モデルであり、先行研究の役割も併せもっている。取水したDSWは、冷熱エネルギーをOTEC、農業、水産養殖業をはじめ、空調利用に供するほか、リチウムなどのレアメタルの回収も検討されている。また海水淡水化処理水の水道水としての利用も計画されている。現在、久米島では、エネルギーや食料などのほとんどを島外から持ち込んでいるが、将来はDSW資源の利用によって島内での生産を進め、自給率を高めることが意欲的に計画されている。DSWを用いたこのような取り組みは世界で例を見ない(久米島町, 2017)。“久米島モデル”は、人が生活する上で基本となるエネルギー、食料、飲料水が連携した経済効率化システムにより、DSWから無理なく安定して得られる。また、DSW利用で生産した電力、農産物、水産物をはじめ飲料水の一部は、地域特産品として出荷することも可能である。つまり、“久米島モデル”では、目標17の“パートナーシップで目標を達成しよう”を基本概念として推進され、さらに目標11の“住み続けられるまちづくりを”を達成することにもつながる。加えて、DSW利用による目標11の達成では、目標3の“すべての人に健康と福祉を”ならびに目標6の“安全な水とトイレを世界中に”、目標7の“エネルギーをみんなにそしてクリーンに”、目標14の“海の豊かさを守ろう”および目標15の“陸の豊かさを守ろう”を礎にしていることは言うまでもない。また、久米島モデルの推進には目標9の“産業と技術革新の基盤をつくろう”

が必須である。こうしてDSW資源を駆使して久米島の持続性が高まれば、それはすなわち、目標8の“働きがいも経済の成長も”につながっていく。

上述の通り、DSWの利活用の“久米島モデル”の推進により、17目標の内、少なくとも9項目の目標達成に貢献できる可能性がある。さらに“久米島モデル”の発展には、目標4の“質の高い教育をみんなに”の実践によって、目標12の“つくる責任、使う責任”と目標13の“気象変動に具体的な対策を”について慎重な取り組み姿勢を生むことは間違いない。また、“久米島モデル”の目標4への取り組みは、目標5の“ジェンダー平等を実現しよう”の達成にも大きくプラスの影響をもたらすことが期待される。このように、“久米島モデル”の事業推進に伴って、互いに強く関係しながら達成する可能性があるSDGsの目標は、13項目に上る。このことはDSWの利活用研究がSDGsの目標達成に貢献できる高い可能性を示唆している。残る4項目の目標は、全地球的視野を伴う設定目標で、久米島を一つの生命体と考えるとひいては地球全体を視野に入れた考えへと発展できる。

4. おわりに

人類の生存を可能とする地球環境を維持していくには、利用する資源を「非再生」から「再生」へと切り替えることが喫緊の課題で、世界を上げてそれを進めようというのがSDGsである。太陽光、風力、地熱、水力からはエネルギーは得られるが、水や各種有用金属類といった物質は得られない。私たちが必要とするエネルギーと物質の両資源のおそらく90%以上を提供するのがDSWであり、地球上で得られる最大の再生可能資源である。しかし、DSWの利用に際しては二つの大きな課題がある。

一つ目は、水を除くほとんどすべての資源の密度の低さだ。その利用にあたっては人々の英知を結集しなければならない。身の回りの薄い資源の利用は、自らが移動のできない植物や微生物が長い時間をかけて工夫して実現した。人類は、今こそ植物や微生物に学んで知恵を絞って工夫しなければならない

い課題であるが、一部は既に事業化できる段階に達している(高橋, 2021)。太陽光がその一つで、原理の提案から実用化までに実に100年以上かかった。理論だけでなく、利用のための新規材料の開発まで必要だった。太陽光エネルギーは事業利用されているが、利用効率は植物の光合成に比べると未だ半分以下で、向上のための研究と技術開発は現在も続いている。OTECの原理が発表されたのは1881年で、取水のためのプラスチックが発明され、腐食に強いチタン合金も使えるようになり、事業化が視野に入ってきた。一方、海水中に溶けている金属類の抽出は、未だ実験段階で、事業化までにはまだしばらく時間がかかる。その中でも電池に使われるリチウムの抽出はかなり具体的になってきたので、海水鉱山が実現するのも時間の問題だ。また、人類の淡水使用量が降水量を上回るようになってきたので、海水淡水化による飲料水・工業用水・農業用水の供給がいよいよ現実化してきた。淡水は海水の塩分除去で得られ、膜による淡水化では清浄なDSWが原水として最適だ。

二つ目は、資源としてのDSWは単体なので、それから必要な資源を取り出して出来るだけ無駄なく利用するには多段利用する必要がある。低温だけ利用して海に戻すと富栄養化などをおこしてしまう。多段利用では、利用のきめ細かい注意が必要で、それは1個の生命体の命の維持にも似ている。DSWの資源で維持されている社会全体を視野に入れた制御で、その先には地球全体を視野に入れた取り組みになる。

日本では1989年に高知県室戸市でDSWの取水事業が開始されて以来、2015年の国連サミットでの2030年までに持続可能でよりよい世界を目指す国際目標としてのSDGsが提唱されるまでに、四半世紀にわたる歳月が流れた。その間に当初は意気盛んだったDSWの利活用は、各取水地のもつ“地域課題”の解決への関心が矮小化し、地域間競争の中でDSW利活用に関する情報交換も緩慢化した。今日、残念ながら取水当初の情熱が幾分低下した感が否めない。しかし、最近のSDGsに対する世界的、全人類的な関心の高まりとその取り組みに対する各国の

情熱は、DSWの利活用を“地域課題”から“全地球課題”に引き揚げる可能性を生み出し、その方向性を“久米島モデル”が示した。これにより、各DSW取水地でもSDGs概念をもったよりグローバルな利活用の研究開発への着手が期待される。本報では、DSWの利活用に対する研究開発が、SDGsが生まれる前から、その概念を根本的に内包していることを示した。それは、DSWの本質が持続可能な地球資源であること、そしてその利活用の成果が、これまでのように単なる経済成長ではなく、複合的な連携システムの構築による経済効率化を方向軸としてもっていることにあることを示した。

最後に、本報ではSDGsが目指す未来の社会に対し、主力資源をDSWにシフトさせることで、SDGs達成に大きく貢献できる可能性を述べたが、そのためには、SDGsの本質を正しく理解しして、的確にとらえたDSWの利活用研究が実践されなければ意味がない。将来、DSWが社会に広く実装できたならば、SDGsを達成した社会を現実としてみる事ができるだろう。その実現に向けて、SDGsアクションプラン2022(SDGs推進本部, 2021)より、各府省庁取組み一覧を紹介する(表2)。

参考文献

- 阿部祐子(2009) 地域特産海藻の培養とその利活用に関する研究(1)-(2). 高知県海洋深層水研究所報, 8, 19-24.
- 新垣輝生・石垣輝幸・山口真実・伊藤彰英(2009) 沖縄県久米島海洋深層水の多元素プロファイリングアナリシスと微量元素濃度及び存在状態の特徴. 分析化学, 58, 707-714.
- Corbley A. (2021) Toronto is Replacing Air Conditioners With Deep Lake Water to Cool Hundreds of Buildings. Good News Network, Nov. 26, <https://www.goodnews-network.org/toronto-is-replacing-air-conditioners-with-deep-lake-water-to-cool-hundreds-of-buildings/> (2022年3月24日閲覧).
- 福沢康弘(2015) 韓国における地域縁故産業育成事業の展開と変容. 季刊北海学園大学経済論集, 62, 50-80.
- 外務省(2016) ホームページ. <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (2022年3月29日閲覧).

- Garduño-Ruiz, E. P., R. Silva, Y. Rodoriguez-Cueto, A. García-Huante, J. Olmedo-González, M. L. Martínez, A. Wojtarowski, R. Martell-Dubois and S. Cerdeira Estrada (2021) Criteria for Optimal Site Selection for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Plants in Mexico. *Energies*, 14, 2121.
- 原 雄一郎・長谷川和清・澤本彰三・岡本一利・二村和視・吉川 尚・佐藤義夫・加藤 登 (2009) 駿河湾海洋深層水で培養したヒジキの生長とヒ素含有量の変化. *海洋深層水研究*, 10, 19-26.
- 原田恭行・熊谷敬之・小善圭一・横井健二 (2010) 通年定水温で養殖したアワビF1交雑種の品質. *日本食品科学工学会誌*, 57, 395-399.
- 林 篤志・嶋田貴志・尾仲宏康・古米 保 (2007) 富山湾深層水からの *Enterococcus* 属乳酸菌の分離と諸性状の検討. *日本乳酸菌学会誌*, 18, 58-64.
- 林 勇二郎 (2020) SDGsと地方創生 (1) 地球環境問題と持続. *産官学連携ジャーナル*, 16, 24-27.
- Hawaiing (2012) ホームページ. <http://hawaiing.com/knowning01/2/> (2022年3月29日閲覧).
- Hernández-Romero, I. M., F. Nápoles-Rivera, R. Mukherjee, M. Serna-González and M. M. El-Halwagi (2018). Optimal design of air-conditioning systems using deep seawater. *Clean Technol. Environ. Policy*, 20, 639-654.
- 堀 哲郎・白枝哲次・清水勝公 (2017) 陸上設置型海洋深層水取水施設について. *海洋深層水研究*, 18, 153-156.
- 黄 秉益・辰巳 勲・高橋正征 (2010) 再生型海洋深層水資源の大量多段利用による社会の持続性強化のモデル検証. *海洋深層水研究*, 11, 43-52.
- 池部慶太 (2011) 養殖状況に適合したスジアオノリ養殖株の探索. *高知県海洋深層水研究所報*, 9, 29-34.
- 池上康之 (2012) 海洋温度差発電の実証研究に関する国内外の動向—安定的な再生可能エネルギーを求めて. *マリンエンジニアリング*, 47, 579-584.
- イマココラボ (2022) ホームページ. <https://imaco.collabo.or.jp/about-sdgs/> (2022年3月24日閲覧).
- 井上興治・大内一之・實原定幸 (2015) 離島における海洋深層水を利用した温泉水バイナリー発電の研究. *海洋深層水研究*, 16, 1-8.
- インターコンチネンタルボラボラリゾート&スパホーム (2022) ホームページ. <https://stworld.jp/feature/PF/BOB/hotel/32735/> (2022年3月24日 閲覧).
- 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. *海洋深層水研究*, 18, 166-167.
- 上川功一・矢本欽也・山石秀樹・中泉昌光・鎌田昌弘・林 浩志 (2007) 漁港の品質衛生管理における深層水の利用の現状とその効果について. *海洋開発論文集*, 23, 961-966.
- 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. *海洋深層水研究*, 9, 3-13.
- 海洋深層水利用学会 (2021) ホームページ. <http://www.dowas.net/facilities/index.html> (2022年3月29日閲覧).
- Kim, H. J., H. S. Lee, S. T. Lim and M. Petterson (2021) The suitability of the pacific islands for harnessing ocean thermal energy and the feasibility of OTEC plants for onshore or offshore processing. *Geosciences*, 11, 407.
- 小林美樹・小川晃弘・熊谷敬之・藤田大介 (2013) 富山湾深層水を用いた紅藻ミリン *Solieria pacifica* の成長と体色改善. *海洋深層水研究*, 14, 27-33.
- 小杉知佳・熊谷敬之・小林美樹・藤田大介 (2016) 富山湾深層水のかげ流し条件におけるスラグ系施肥材のマコンブに対する効果実証実験. *海洋深層水研究*, 16, 69-81.
- 窪川かおる (2020) 海で働く女性を取り巻く環境の今. *情報の科学と技術*, 70, 116-121.
- 窪田 聡・遠藤路子・堀本大雅・村松嘉幸・腰岡政二 (2011) 根域環境制御システムにおける多孔質鉢の利用と機能. *園芸学研究*, 10, 461-466.
- 久米島町 (2017) 緑の分権改革推進事業 久米島海洋深層水複合利用基本調査調査報告書. 1-190, https://www.town.kumejima.okinawa.jp/docs/eep_ocean_water_inspection_slip/file_contents/deep_ocean_water_all.pdf (2022年3月24日閲覧).
- 黒原健朗 (2013) 海洋深層水を用いた天然緑藻ミルの培養試験. *高知県海洋深層水研究所報*, 10, 20-23.
- 李 士晔・古 明弘・黄 秉益 (2010) 台湾における海洋深層水の産業技術の研究および冷熱エネルギーの利活用. *海洋深層水研究*, 11, 31-37.
- 劉 金源・黄 秉益 (2019) 台湾における海洋深層水利用の現状, 課題と戦略について. *海洋深層水研究*, 19, 169-173.
- 松村 航・藤田大介 (2007) 海洋深層水で培養したマコンブと付着珪藻を餌料として活用したエゾアワビ養殖に関する研究. *富山県水産試験場研究報告*, 18, 19-23.
- 松下和夫 (2018) パリ協定が開くゼロ炭素社会への道. *共生科学*, 8, 17-23.

- 水木亮史・新山栄一・水上暁美 (2007) 豚に対する海洋深層水の塗布並びに飲水投与の効果. 富山県農業技術センター研究報告, 24, 21-27.
- 中川秀幸 (2010) 富山県の自然界からの酒造用酵母分離とそれを利用した清酒の開発. 富山県農林水産総合技術センター食品研究所研究報告, 1, 23-30.
- 中岡 勉 (2009) 海洋エネルギーの多目的利用について—対馬海域の場合—. 日本海水学会誌, 63, 288-296.
- 迹目英正・小島紀徳・伊藤拓哉・鈴木誠一 (2018) 非集光型太陽熱温度差発電の開発. 日本エネルギー学会誌, 97, 53-63.
- 迹目英正・小島紀徳・伊藤拓哉・鈴木誠一 (2016) 取水等設備を含む個別最適化による海洋温度差発電コストの低減と評価. 日本エネルギー学会誌, 95, 653-662.
- 二村和視・花井孝之・岡本一利・高瀬 進 (2007) 高水温期に駿河湾深層水添による冷却養殖したアワビの成長・生残. 海洋深層水研究, 8, 23-26.
- 日本ユニセフ協会 (公益財団法人) 学校事業部 (2010) 水をめぐる争い 水危機が世界に及ぼす影響. ユニセフT・NET通信, 46, 1-2. https://www.unicef.or.jp/kodomo/teacher/pdf/sp/sp_46.pdf (2022年3月29日閲覧).
- 野田浩之・岡本一利・岡田裕史・高木 毅 (2010) 海洋深層水と表層海水で飼育されたニジマス *Oncorhynchus mykiss* の生残と成長および成熟. 海洋深層水研究, 11, 1-11.
- 野口勝明 (2017) 温泉水を用いた閉鎖循環型トラフグ養殖システムの開発. 日本水産学会誌, 83, 750-753.
- 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. マリンエンジニアリング, 51, 85-90.
- 岡野隆宏 (2020) 地域循環共生圏の創造 (日本発の脱炭素化・SDGs構想). 共生科学, 11, 12-21.
- 沖 大幹 (2018) グローバル水リスクマネジメントとプラネタリーバウンダリーの限界. 学術の動向, 23, 70-73.
- 恩田 聡・真境名光・島袋理恵・小貫奈緒 (2006) 海洋深層水利用による養液栽培の高温障害回避技術の確立—根域冷却によるハウレンソウの周年栽培技術 (湛液水耕栽培). 沖縄県海洋深層水研究所研究業務報告, 5, 90-94.
- 大塚耕司・坂東晃功・松本吉倫 (2000) 海洋深層水の使用可能量および価格に関する一考察. 海洋深層水研究, 1, 47-53.
- 大塚耕司 (2011) 水資源の現状と海水淡水化の動向. 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 13, 137-140.
- 大塚耕司 (2021a) 再生可能資源としての海洋深層水の重要性. 海洋深層水研究, 22, 15-21.
- 大塚耕司 (2021b) 海洋深層水に関する学びの推進に向けて. 海洋深層水研究, 22, 65-66.
- 佐藤暁之・清水茂雅・成田正直・辻 浩司・宮崎亜希子・蛭谷幸司・渡辺智治・畑山 誠・麻生真悟 (2017) 蓄養水の塩分がヤマトシジミ *Corbicula japonica* の呈味性に及ぼす影響. 北海道水産試験場研究報告, 92, 21-27.
- SDGs推進本部 (2021) SDGsアクションプラン2022. <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/sdgs/dai11/actionplan2022.pdf> (2022年3月29日閲覧).
- SEAFOOD LEGACY TIMES (2021) FAO「世界漁業・養殖2020」にみる世界の水産動向. <https://times.seafoodlegacy.com/archives/6975> (2022年3月24日閲覧).
- 関口峻允・戎井 章・野村幸司・渡部俊広・榎 牧子・兼廣春之 (2009) 深層水中における各種生分解性繊維の分解と分解微生物の単離. 日本水産学会誌, 75, 1011-1018.
- 柴田雄次・齋藤美恵・山田勝久・寺原 猛・小林武志・今田千秋 (2016) 伊豆赤沢海洋深層水から分離した微生物が生産する細胞賦活物質の研究. 海洋深層水研究, 17, 9-16.
- 島村智子・黒田さやか・竹中裕行・柳下 宏・池上徹・榎 啓二・受田浩之 (2008) 濃縮海洋深層水の膜蒸留法による高塩分化和微細藻 *Dunaliella salina* の培養への応用. 日本食品科学工学会誌, 55, 619-624.
- 島崎純一・岡村裕一 (2011) 高糖度トマト養液栽培における海洋深層水による培地冷却とミネラル調整液の利用技術. 高知県海洋深層水研究所報, 9, 7-9.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構編 (2014) NEDO再生可能エネルギー技術白書. 森北出版, 東京, pp. 59-64.
- 鈴木健索 (2008) 新規プロジェクト紹介 冷水資源を利用した根域冷却による野菜の高品質化技術の開発—平成19年度農林水産研究高度化事業. 東北農業研究センターたより, 24, 7. https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/tohoku_news24p8.pdf (2022年3月24日閲覧).
- 高橋正征 (2000a) 海にねむる資源 海洋深層水. あすなろ書房, 東京, pp. 26-31.
- 高橋正征 (2000b) 海洋深層水資源の多段利用. 号外海洋, 22, 152-158.
- Takahashi, M. M. and T. Ikeya (2003) Ocean fertilization using deep ocean water (DOW). Deep Ocean Water Research, 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.
- Takahashi, M. M. and P. Y. Huang (2012) Novel renewable natural resource of deep ocean water (DOW) and their current and future practical applications. *Kuroshio Science*, 6, 101-113.
- 高橋正征 (2013) 海洋深層水の利活用の現状と今後の展開について. 海と港, 31, 2-23.
- 高橋正征 (2019) 日本における海洋深層水の利活用の過去・現在・未来. 海洋深層水研究, 19, 149-157.
- 高橋正征 (2021) 海洋深層水の資源利用によるこれからの社会の方向～動物的社会から植物的社会へ～. 海洋深層水研究, 21, 61-67.
- 高島幸司 (2008) エノキタケ, シイタケ菌床栽培における深層水の注水液, 浸水液としての利用. 富山県林業技術センター研究報告, 21, 17-21.
- 高島幸司 (2010) ナメコ, シイタケ菌床栽培の子実体形成に及ぼす海洋深層水添加の影響. 富山県農林水産総合技術研究センター森林研究所研究報告, 2, 26-32.
- 竹屋 均 (2015) 海洋深層水ミネラル調整液研究 (4). 高知県海洋深層水研究所報, 11, 19-21.
- 田中祐之・伊藤世人・花田茂久・北出 有 (2015) 逆浸透膜を用いた低環境負荷海水淡水化プロセス. 膜, 40, 86-90.
- 館山市 (2006) 館山市平成18年6月定例会 (第2回). https://ssp.kaigiroku.net/tenant/tateyama/SpMinuteView.html?power_user=false&tenant_id=548&council_id=47&schedule_id=3&view_years=2006 (2022年3月25日閲覧).
- 徳岡松雄・徐 水泉・國武芳郎 (1941) 海水の肥効に関する研究 (第一報): 水稻に対する植木鉢と圃場試験. 日本土壤肥料学雑誌, 15, 413-418.
- 董 宜嫻 (2020) グローバル化の中で成長する沖縄コスメブランド. 沖縄キリスト教短期大学紀要, 49, 75-93.
- Thirugnana, S. T., A. B. Jaafar, T. Yasunaga, T. Nakaoka, Y. Ikegami and S. Su (2021) Estimation of ocean thermal energy conversion resources in the east of Malaysia. *J. Mar. Soc. Eng.*, 9, 22.
- 上原春男 (2008) 海洋温度差発電の新しい展望. 海洋深層水研究, 9, 21-30.
- 魚 再善 (2019) 韓国の海洋深層水利活用. 海洋深層水研究, 19, 163-165.
- 渡辺敦夫・鍋谷浩志 (2007) 食品産業における膜技術の発展—基礎研究から実用化・普及まで—. 膜, 32, 190-196.
- 山田勝久・鈴木正宏・野村道康・柴田雄次・今田千秋 (2014) 種々のカルシウム/マグネシウム比で培養したヒト線維芽細胞の活性と海洋深層水添加効果. 海洋深層水研究, 15, 99-106.
- 山田吉彦・川上哲太郎・川崎一平 (2012) 地方公共団体による地域海洋基本計画策定に関する調査研究. 土木学会論文集B3 (海洋開発), 68, 402-407.
- 山本 樹・山田勝久・鈴木信孝・許 鳳浩・高橋正征 (2018) 海洋深層水の未病・予防医学分野における展望. 日本補完代替医療学会誌, 15, 67-77.
- 山下 宏 (2014) バルメットのバイオリファインリーテクノロジー. 紙パ技協誌, 68, 906-910.
- 山内繁樹・長野 章・山下和則・筒井浩之・高橋正征 (2014) 海産水産物の洗浄処理水としての海洋深層水の優位性. 海洋深層水研究, 15, 19-26.
- 安田一郎 (2012) 北太平洋中層水の形成・輸送・変質過程に関する研究. 海の研究, 21, 83-99.
- 横井健二・加藤肇一 (2010) 海洋深層水を利用した乳酸菌飲料の開発. 富山県農林水産総合技術センター食品研究所研究報告, 1, 35-39.
- 横山 純・笠井久会・森 里美・林 浩志・吉水守 (2010) 漁港で利用される海水の細菌学的調査. 日本水産学会誌, 76, 62-67.