

再生型の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

Model analysis on strengthening the society by a large amount
of renewable deep ocean water resources with multi-step utilization

黄 秉益¹・辰巳 勲¹・高橋 正征¹

Ping-Yi HUANG, Isao TATSUMI and Masayuki TAKAHASHI

Abstract

In order to strengthen present society, renewable resources of deep ocean water (DOW) have been model-analyzed in a case of resort being planed in Taiwan. After using the low temperature energy of 580,000 m³/day of DOW for air-conditioning of buildings with energy saving of 87%, a further energy saving of 63% is expected for cooling an electric generator by the heated DOW. Electricity of 613 MWh/year is expected to be generated by the thermal conversion of temperature difference between the waste heat derived from combusting garbage and DOW, and a possibility of temperate vegetable and fruit production was also checked under tropical climate by cooling soil with DOW. By supplying tap water of 42,000 m³/day for 160,000 people in the resort as well as the neighbors produced by desalination of DOW, a significant saving of resources could be expected compared using surface seawater. DOW will finally be discharged to the sea after removing the nutrient by cultivating seaweeds. The present study is a model analysis of saving energy and resources due to multi-step utilization of DOW resources.

Key Words: deep ocean water, air-conditioning, cooling water, tap water, soil cooling

要 旨

社会の持続性強化を目的として再生型の海洋深層水資源に着目し、台湾に建設が予定されているリゾートでモデル検証した。海洋深層水 58 万 m³/日の冷熱エネルギーを建物冷房に使用し 87% の省エネ後、一部を発電機冷却水に利用し 63% 以上の省エネ効果の可能性を得た。昇温海洋深層水とゴミ焼却熱の温度差利用で年間 613 MWh の排熱発電と、海洋深層水の冷熱を利用した土壌冷却により熱帯環境下での温帯の野菜・果物栽培の可能性も検討した。昇温海洋深層水を逆浸透 (RO) 膜濾過で淡水化し、リゾート利用者と周辺住民 (16 万人/日) が必要とする上水 4.2 万 m³/日を製造・供給することで、表層海水利用に比した省資源の可能性が示された。海洋深層水中の栄養塩類は海藻培養で回収し、最終的には表層水と同様水質にして周辺海域に放流する。海洋深層水資源の多段利用効果を、省エネと省資源からモデル検証した。

キーワード: 海洋深層水, 空調, 冷却水, 上水, 土壌冷却

1. 緒 言

産業革命以降の人類は大量の地下資源の利用により生産と消費を拡大し、食糧をはじめ物質的な豊かさを飛躍的に高めた。その結果、世界の人口は幾何級数的に増加し、PRB (2009) によると 2009 年には 68 億人を超え、2011 年後半には 70 億人に達すると予測されている。先進諸国が先鞭をつけた 20 世紀型の物質的な豊かさの追求は、今や BRICs を始め発展途上国に共通した目標になっている。

一方で、有限な地球上での人類による物質的な豊かさの追求の問題が懸念され、1972 年にローマ・クラブが“成長の限界”を発表し、物質的な豊かさの追求がもつ根本問題を世界に示した (メドウズら、1972)。しかしながら、その後も物質的な豊かさの追求は止まらなかった。1992 年にメドウズらが先の研究で用いたモデルを使ってその後の展開を検証し、先の予測と同じ方向に世界が動いており、しかも問題の深刻さが増大していることを見出した (メドウズら、1992)。引き続き 2002 年の検証で状況のさらなる加速が明らかとなった。メドウズら (2005) は現在の世界が抱える主な問題として地下資源の枯渇と、地下資源の利用による環境の汚染・変化を示し、問題解決の方向として社会が地下資源で維持されている間に、環境の汚染・変化の少ない再生型資源への速やかな切り換えの喫緊性を指摘した。

近年、先進国を中心としてメドウズら (2005) が示した 20 世紀型社会システムがもっている問題解決の喫緊性が認識され、太陽光、風力、波力などの再生型で環境問題の少ないエネルギー資源への切り替えが始まっている (Asif and Muneer, 2007; IEA, 2004; Suda, 2008)。エネルギーだけでなく、鉱物などの物質資源についても、枯渇と環境問題をもたらす非再生型地下資源から、再生型資源への切り替えが課題である。

本研究では、再生型で環境問題を起こしにくい海水資源を対象として、現行の地下資源への依存部分をできるだけ少なくし、合わせて省エネ・省資源を進めることを検討する。中でも、水深 200 m 以深

の海洋深層水 (高橋、2007) に着目する。海洋深層水は冷熱エネルギー (Van Ryzin and Leraand, 1991) を始めとして、水、肥料、塩、金属 (各種ミネラルを含む) などの有用物質を含んでいて、エネルギーのみの太陽光や風力などとは異なって多様な資源を含んだ再生型資源で (高橋、1991; 高橋、2005a)、しかも存在量が 13 億 km^3 と巨大で (高橋、2007)、その上に清浄性が高く利用しやすい (高橋・池谷、2002)。ただし、いずれの資源も低密度のために (高橋、1994)、大量の海洋深層水が必要となり設備コストが高いという課題があるが、多段利用によって、揚水費用を分担することにより事業利用の可能性が高まることが可能である (Daniel, 1991; Davidson and Craven, 1997; 高橋、1991)。本研究ではリゾートを対象に、主として地下資源で維持されている現状の社会の基盤機能を海洋深層水に切り替える可能性をモデル検証した。

2. モデル検証実験場所

モデル検証の実験場所として、近い将来に台湾に建設が予定されている JTL Destination Resort (以下、JDR) を選んだ。JDR の予定地は北緯 22 度 41 分で北回帰線以南に位置する太平洋に面した台東県中部で、総面積は 319 ha である (図 1)。建設予定地周辺の日最高気温は 6 月が最高で 36°C、1 月が最低で 27°C、日平均湿度は 66~76% で、周年にわたって冷房が必要な環境である。リゾートにはゴルフ場、競馬場、ショッピングモール、コンベンションセンター、マリーナ、ホテルなどの諸施設の建設が予定されていて、完成後は 1 日に約 40,000 人の来場者 (内訳は宿泊客 10,000 人とショッピングモール等の来客 30,000 人) と、従業員 10,000 人を含む 1 日に約 50,000 人の利用が見込まれている。

そこで、1 日約 50,000 人の生活を支えるための社会の基盤機能整備を対象として、現状の技術あるいはごく近い将来の技術開発の可能性を考えて、海洋深層水資源の大量多段利用を検討した。

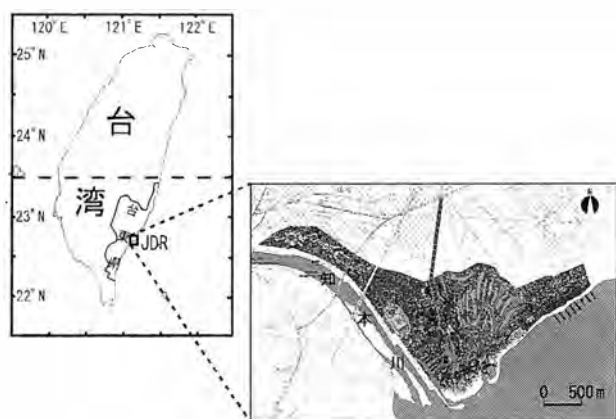


図1 JDR の建設予定位置（左）と全体の概念図（右）

3. 非再生資源から再生型の海洋深層水資源への切り替えの概要

人間活動では設備をつくり活動を支えるために、エネルギーと様々な物質を利用しているが、多様な資源をもち再生型の海洋深層水資源の多段利用への切り替えの可能性を考える。予定地の隣接海域の600 m 深から揚水した8℃の海洋深層水の冷熱エネルギーを直接利用し、得られた昇温海洋深層水を様々な含有物質の利用に回して含有物質の効率的利用を図る。

JDR における海洋深層水資源の多段利用の概念を図2に示した。最初に、水温8℃の海洋深層水でリゾート内のホテル、ショッピングモール、コンベンションセンターなどの施設を冷房し、省エネと省資源を図る（一次利用）（Leraand and Ryzin, 1996；高橋, 2005b）。一次利用で約13℃に昇温した海洋深層水は農場の土壌冷却（CHC）やガス

発電機の冷却と排熱発電に利用し、省エネ・省資源を図る（二次利用）。海洋深層水は発電機冷却によって約35℃に昇温し、さらにリゾート内で発生したゴミ焼却で45℃以上に加熱され、適温に調整して魚介類養殖、タラソテラピー、スパーに供給し省エネ・省資源を図る（三次利用）。一連の冷熱利用過程で様々な昇温海洋深層水が得られるので物質利用がより効果的に進められる。

現在、安全性の高い上水（淡水）の必要量を経済的に確保することが世界的な課題で、懸濁物質の少ない海洋深層水を原水とした膜濾過海水淡水化によって表層海水の利用に比べて上水がより容易に得られ（谷口・関野, 2000）、さらに海洋深層水には人工毒物や易・弱分解性溶存有機物をほとんど含まない（Ogawa and Tanoue, 2003）ので上水製造過程の薬注が不要となり、清浄でミネラル調整をした上水が低価格で得られる（省エネ・省資源）（谷口・関野, 2000）。昇温海洋深層水をタラソテラピーやスパーに利用すると表層海水に必要な濾過や薬品処理が不要で、清浄性の高い海水が容易に使える（省エネ, 省資源）。さらに海洋深層水は易・弱分解性溶存有機物が少なく、表層海水に見られるべとつき感をほとんどもたらさないことも入浴などのメリットになる（高橋・池谷, 2002）。

三次利用で昇温した富栄養な海洋深層水はリゾート内のラグーンに排水し、含まれている栄養塩類を利用して海藻類を養殖する（四次利用）（省資源）。養殖海藻は直接食用に、あるいはアワビやウニなどの藻食動物の餌として食用水産物を生産する。含まれる資源をほとんど使い尽くし、表層水の性質に近付いた海洋深層水は周辺海域に放流する。

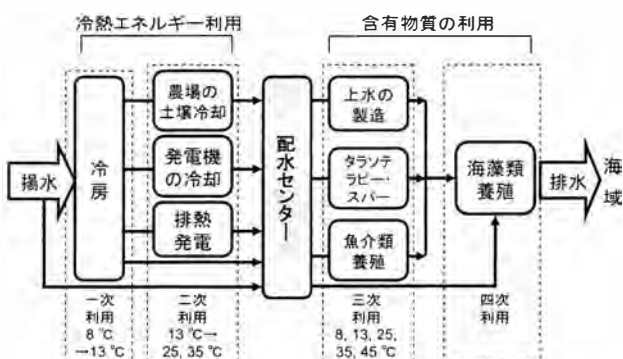


図2 JDR における海洋深層水資源の多段利用の概要

4. JDR における海洋深層水の資源利用で期待される効果

4.1 建物の冷房

海洋深層水冷房は海洋深層水の冷熱エネルギーを冷媒として循環液を8～13℃（森野, 2000）に冷却するために、通常の冷房システムで必要な冷却装置が不要になり、したがって、冷却装置への投資と

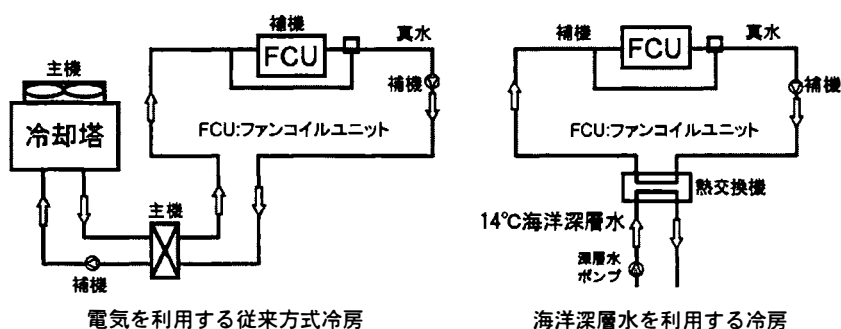


図3 電気を利用する従来方式冷房と海洋深層水を利用する冷房の概要（高橋，2005b）

運転エネルギーとしての電気的大幅節約が可能となる（図3）。ただし，海洋深層水冷房では冷媒を冷やす熱交換機，海洋深層水の汲み上げと冷媒を送り出すポンプと運転エネルギーが必要である。

本研究ではホテルをモデルにして，周年にわたっての海洋深層水冷房と従来式電気冷房のそれぞれの消費エネルギーを比較した。その際，使用電力が同じファンコイル・ユニット部分は省略して，それ以外のシステムを比較した。冷房システムの冷房効率（System Coefficient of Performance, SCOP）を適用し，従来式冷房は台湾の気候，ホテル用途などを勘案し $SCOP = 3$ ，単位面積の冷房負荷は 100 W/m^2 と設定した。また，ホテルの全延床面積は $570,000 \text{ m}^2$ とし，気象条件は公表されている台東県のものを利用した（CWB）。さらに，海洋深層水冷房の利用温度差（ ΔT ）は 5°C とし，冷房の運転時間は4～10月の高温期は24時間，その他の低温期は18時間，年間合計は7,740時間とした。試算した結果，全ホテルで必要な冷房能力は $57,000 \text{ kW}$ となり，従来式の冷房での必要な電力は $19,000 \text{ kW}$ （ $57,000 \text{ kW}$ を $SCOP$ で除す）が得られ，これを総使用時間に乗じると年間の総電気使用量は 147.1 GWh と推定された。一方，海洋深層水冷房の使用電気量は海洋深層水の汲み上げと冷媒を送り出すポンプの使用電力の和とし，使用水量は海洋深層水の比重と比熱をともに1とし， $57,000 \text{ kW}$ の冷房能力を $49,020 \text{ Mcal/時の熱量}$ に換算してから，熱量を $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ で除し $9,804 \text{ m}^3/\text{時}$ と推定した。

ポンプの使用電力の仕事率とエネルギーの関係は $1 \text{ kW} = 1 \text{ kJ/秒} = 1 \text{ kN} \cdot \text{m/秒}$ （原田，1964）で， $1 \text{ N} = 0.102 \text{ kg-f}$ （ f は力の係数）なので， $1 \text{ kW} = 0.102 \text{ m}^3 \cdot \text{f} \cdot \text{m/秒}$ と書き換えられ，海洋深層水の揚水および冷媒送水に必要な電力は式（1）で計算できる。

$$\begin{aligned} & \text{深層水揚水および冷媒送水の必要電気量 (kW)} \\ &= (QH/0.102)/p \quad (1) \\ & Q: \text{単位時間あたりの揚水量 (力) (m}^3\text{-f/秒)} \\ & H: \text{揚程 (m)} \\ & p: \text{ポンプ効率} \end{aligned}$$

海洋深層水の揚水速度を $2.72 \text{ m}^3/\text{秒}$ ，揚程 30 m ，ポンプ効率 60% とし，計算した結果，必要電気量として $1,333 \text{ kW}$ が得られた。一方，熱交換機内で海洋深層水と冷媒（真水）は1対1の流量で熱交換しているとする，冷媒の流量は海洋深層水と同じなので，同式を用いて冷媒を送り出すポンプの消費電力を推定でき，揚程 25 m で $1,111 \text{ kW}$ となった。海洋深層水冷房の消費電気量は年間の総運転時間に両者の和を乗じて， 18.9 GWh/年 と推定され，先述した従来方式に比べて 87% の省エネの可能性が明らかとなった。この条件下で夏のピーク時は 8°C の海洋深層水が $23.5 \text{ 万 m}^3/\text{日}$ 程度必要となる。節約分の約 128.2 GWh/年 の電力は，火力発電の効率を 40% とすると 1 kWh の電力が 0.232 L の原油に換算できるので，上記の条件の海洋深層水冷房は年間 $29,742 \text{ m}^3$ の原油の節約につながる。

JDR には他にショッピングプラザ，コンベンショ

ンセンターなど冷房利用形態の異なる環境があり、それぞれの延床面積は70万 m^2 と41.5万 m^2 となるが、単位面積あたりの利用人数が多いので、ホテル冷房に比べて必要な冷房エネルギーは大きい、利用時間帯が日中および夜間の一時期や年間でも特定時期に集中する。これら施設の単位面積の冷房負荷を150 W/m^2 、夏の最大ピーク時に毎日12時間運転して冷房すると仮定すると、8℃の海洋深層水をショッピングセンターは21.7万 m^3 /日、コンベンションセンターは12.8万 m^3 /日必要となると推定され、上述したホテル冷房と合計するとリゾート全体の海洋深層水の必要量は最大で58.0万 m^3 /日となり、電気節約量は212.8 $\text{GWh}/\text{年}$ （原油換算で49,370 m^3 /年）と推定される。したがって、JDRでは海洋深層水の冷房利用によって341.0 $\text{GWh}/\text{年}$ の電気使用量が節約可能で、原油換算で79,112 m^3 /年である。熱帯気候下でのオフィスビルでは年間消費電力の約半分が冷房に使われているので（経済部水利署、2005）、JDRでも同じと仮定すると、リゾート全体として44%の使用電力が節約できると考えられる。

4.2 発電機の冷却

JDRでは、リゾート内で必要とする電気（20MW）をガスタービン発電機で自家発電することを想定して以下を検討する。ガスタービン発電では、発電機の熱の除去は水冷で行われるケースが多く、その場合、大量の冷却水が必要なために、一般には水利権がなく取水の容易な表層海水が使われ、 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$ で昇温海水が表層放流されている。しかし、台東県沿岸の冬季平均表層水温の25℃を7℃昇温して32℃で海域に放流した場合を想定すると、本研究で考えている13℃の二次利用水を使用すると $\Delta T = 19^\circ\text{C}$ となり、通常の表層水の利用に比べて ΔT は2.7倍となり、使用水量と冷却装置の大きさが共に37%程度に縮小する。角湯（2000）によれば1,000MWのガス発電機では、 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$ で、冷却に約30 m^3 /秒（約260万 m^3 /日）の表層水が必要となるので、20MWの発電機の場合、表層水の必要量は約5.2万 m^3 /日と推定される。しかし、

13℃の海洋深層水を利用すると、必要水量は1.9万 m^3 /日で済み、3.3万 m^3 /日の冷却水揚水ポンプの使用電力が節約できる。揚程30m、効率60%のポンプを使用した場合、式(1)を用いて計算すると年間で1,623 MWh の電力が節約でき、原油に換算すれば377 m^3 /年となる。さらに角湯（2000）によれば、発電機の発電効率は冷却水温によって変化し、冷却水温20℃ではロスがほとんどなく、それより高いと下がり、低いほど発電効率が高くなるので、13℃の海洋深層水を利用するJDRでは表層水利用に比べて発電効率の若干の向上が期待できる。

また、表層海水を冷却に用いると吸・排水管が生物や混濁物で目詰まりを起こし、或いは生物が管表面に付着・繁殖し管の定期的な掃除が必要であるが、海洋深層水ではそうした問題は皆無である（森野、2006b）。JDRでは発電機の冷却に冷房用熱交換後の清浄性の高い海洋深層水を使用するので、吸・排水管の定期メンテナンスは不要となり大幅なコスト削減となる。さらに、発電機を冷却した後の海洋深層水の水温は最大で35℃に昇温できるために、海洋深層水の温度利用範囲が拡大する。

4.3 排熱発電

JDRではリゾート内と周辺市町村で発生する廃棄物を収集し焼却処分が予定されているので、発生排熱を利用した排熱温度差発電（森野、2006a）を検討する。高温側熱源はゴミ焼却炉の排熱で真水を90℃程度に加熱することが可能で、低温側は冷房用熱交換後の13℃二次利用海洋深層水を利用すると80℃程度の温度差が得られる。リゾート利用者と周辺住民約150,000人のゴミ発生量を日本の1.1 $\text{kg}/\text{日} \cdot \text{人}$ を用いて計算すると（環境省、2009）、全ゴミ量は約220 $\text{ton}/\text{日}$ となる。この内の約50%を焼却処理すると、可燃ゴミの発熱量は約2,400 kcal/kg （財団法人日本環境衛生センター）程度なので、熱回収率を65%とした場合、得られる熱エネルギーは約264 $\text{Tcal}/\text{日}$ となり、2,400 m^3 の真水を90℃に昇温できる計算となる。90℃の熱水と相当量の冷水を使用することによって、発電効率を上田・池上（2010）が報告した同原理システ

ムの 6.6%~8.1%を参考に 7%と仮定すると、1,000 kW 規模の発電機で 70 kW の発電が可能である。したがって、JDR では排熱利用で一日約 1,680 kWh、年間 613 MWh の電気が得られる。また、低温側冷却水に海洋深層水を利用するので、通常の表層水に比べて、排水管の生物付着問題がなく、メンテナンスの手間が省ける。

4.4 農場の土壌冷却

台湾では温帯の野菜・果物が好まれて毎年相当量が消費されていて、一部は国内の山間地で生産され、その他は国外からの輸入でまかなっている。そこで、土壌温度をコントロールして根域を冷やすことにより、熱帯気候下の平地での温帯の野菜・果物の一部の生産の可能性を検討する (CHC)。熱帯環境下では地上部と地下部を異なった温度環境にすることによって、根からの栄養分の吸収が盛んになって果実の甘みが増すなど、温帯環境下では得られない付加価値を得ることもできる (兼島, 2006)。また、根域冷却を止めることによって、温帯の野菜・果物などの休眠を誘導し、再び根域冷却の開始で休眠を覚醒させることができるので、1年に3~4回の収穫実現が可能となる (CHC)。さらに、土壌は断熱性が高く、地温は一旦下げると容易には昇温しない (CHC)。

台湾で温帯の野菜・果物を生産している山間地は土砂崩れなどの災害の危険性、あるいは高齢化による山岳地域での耕作・栽培の難しさなどの社会問題が顕在化してきており、平地での生産が望まれるようになってきた。また、アメリカ・韓国・日本などから輸入されている野菜・果物については、自国内で生産することにより、フード・マイレージが削減できる。JDR では農場の土壌に直接海洋深層水を通水したパイプを通すことによって、土壌冷却する。必要な冷却能力を 200 W/m^2 、 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ として、5 ha の農場で試算した結果、約 $41,280 \text{ m}^3/\text{日}$ の海洋深層水が必要である。

表 1 に 2008 年に台湾に輸入された主な温帯の野菜・果物の輸入量、主要輸入国とそれぞれのフード・マイレージ、総 CO_2 排出量および総燃料消費量を

示した。ここではフード・マイレージを計算する際の輸送距離は国内輸送を省略して首都間の直線距離とし、総 CO_2 排出量は国土交通省 (2004) が公表している輸送手段別の輸送量あたりの CO_2 排出係数 (船舶の $38 \text{ g CO}_2/\text{ton} \cdot \text{km}$) をフード・マイレージに乗じて算出した。また、総燃料消費量は総 CO_2 排出量に環境省 (<http://energyandsustainability.fs.cornell.edu/>) が公表している燃料別炭素排出係数の船舶用燃料 (A 重油) の $2,710 \text{ g CO}_2/\text{L}$ で除して計算した。人口約 2,300 万人の台湾では 2008 年に主要な温帯の野菜・果物を輸入するのにそれぞれ 1,454 万 L と 650 万 L の燃料油を消費した計算となり、これは CO_2 排出量換算でそれぞれ $39,406 \text{ ton} \cdot \text{CO}_2$ と $17,612 \text{ ton} \cdot \text{CO}_2$ となる (表 1)。JDR 利用者は一日約 5 万人なので、海洋深層水を利用して表 1 に示した野菜・果物全てを生産してリゾート内に供給すると、年間で表 1 に示した燃料油の $5/2300$ が削減でき、温帯野菜で 31,610 L、温帯果物で 14,128 L となる。

4.5 上水の製造・供給

通常の上水製造に用いられる地表水は難分解性有機汚染物質 (POPs) や硝酸塩などで汚染されている可能性が高いのに比べて、海洋深層水は不純物・POPs などが少なく物理・化学的な清浄性が高く安全・安心な上水の原水として適している (谷口・関野, 2000)。海洋深層水中の硝酸塩濃度は、高いといっても最大で $40 \mu\text{M} = 0.56 \text{ mgN/L}$ 程度で、水道基準の 10 mgN/L をはるかに下回っていて汚染状態とはいえない。逆浸透膜 (RO 膜) を利用して海水淡水化する場合、海洋深層水は生物やゴミが少ないために表層海水で必要な事前処理 (表層海水によっては事後の海水淡水化と同等かそれ以上の費用負担) が不要で海洋深層水をほぼ直接に RO 膜に導入可能である。さらに海洋深層水は懸濁粒子が少ないために (菅野ら, 2008)、RO 膜濾過が容易で、加えて RO 膜も 1 年以上使用可能ということで、数週間で RO 膜を交換あるいは洗浄する必要のある表層海水に比べて経済性が高い。また、海洋深層水中の易分解性溶存有機物含有量が著しく低いために、

表 1 2008 年に台湾に輸入された主な温帯の野菜・果物の輸入量 (ton), 主要輸入国 (行政院農業委員会), フード・マイレージ (ton・km), 総 CO₂ 排出量 (ton・CO₂) と総燃料消費量 (1,000L, 本文中に詳述)

	項目	主要輸入国	総輸入量 (ton)	フード・マイレージ (ton・km)	総 CO ₂ 排出量 (ton・CO ₂)	総燃料消費量 (1,000 L)
野菜	タマネギ	アメリカ, 韓国	45,728	578,903,820	21,998	8,117
	ハクサイ	韓国, ベトナム	12,255	18,210,930	692	255
	レタス	アメリカ, 韓国	11,383	177,379,260	6,740	2,487
	ブロッコリー	アメリカ	10,653	134,854,320	5,124	1,891
	ジャガイモ	アメリカ	10,083	127,650,780	4,851	1,790
	合計		90,102	909,348,330	39,406	14,541
果物	リンゴ	アメリカ, チリ, 日本	122,991	25,370,640	964	356
	チェリー	アメリカ, チリ	12,229	154,819,140	5,883	2,171
	モモ	アメリカ, 日本	9,593	121,447,380	4,615	1,703
	洋ナシ	アメリカ, ニュージーランド	2,004	155,705,340	5,917	2,183
	イチゴ	アメリカ, ニュージーランド, 日本	484	6,127,440	233	85.9
	合計		147,301	463,469,940	17,612	6,499

表層海水で問題となる RO 膜への微生物増殖問題と、それを避けるための塩素などの薬注あるいは原水の紫外線処理などの必要もない。

具体的な上水製造では、RO 膜を使って海洋深層水から淡水と濃縮海水を得て、さらに濃縮海水から抽出したミネラルを淡水に加えてミネラル調整し、上水として供給する。JDR では周辺の台東市や知本郷の上水として供給することを予定しており、一日あたりのリゾート利用予定客の内、宿泊客 10,000 人は一日あたり 500 L/人、残りの利用者と従業員 40,000 人は 100 L/人、周辺住民約 110,000 人は 300 L/日の上水を利用するとして、一日合計で 42,000 m³ の上水供給が必要となる。浜田 (2006) によると、RO 膜で海水淡水化する場合、約 65%の海水が濃縮海水として残り、35%が淡水になるので、42,000 m³ の上水を生産するためには約 120,000 m³ の海洋深層水が必要である。RO 膜による海水淡水化では、使用海水が表層でも深層でもプラントの基本構造は変わらないが、海洋深層水では前処理フィルターは不要もしくは簡略化でき、加えて RO 膜交換頻度が大幅に少なくなり、薬注などの処理もほとんど不要になることが期待できる。

現在、台湾では水道水は 1 m³ あたり 32.3 円 (台湾自来水公司) (1 元を 3 円として換算) で供給されており、安全・安心で美味しい上水という付加価

値を計算外にした場合、通常の上水供給価格以下で供給できると事業性の魅力が高まる。

4.6 JDR で期待できる省エネ・省資源

図 4 に示したように、JDR では揚水後速やかに変化する冷熱エネルギー資源から順次利用していくと、ホテルなどの建物冷房のための最大ピーク時の海洋深層水の必要量は約 58.0 万 m³/日と試算され、これを基準として検討する。全量を建物冷房に利用後、13℃の昇温海洋深層水の 6.24 万 m³/日を農場の土壌冷却、発電機冷却、排熱発電などで二次利用 (冷熱エネルギー利用) し、残りは配水センターに直送し、二次利用後の 25℃および 35℃昇温海洋深層水と合わせて三次利用 (含有物質の利用) に回す。

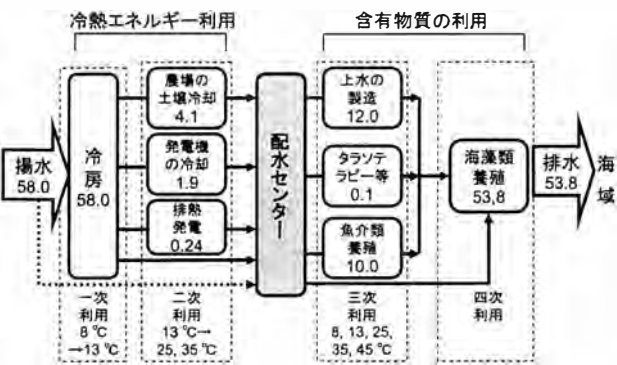


図 4 JDR における海洋深層水の多段利用とそれぞれの項目の利用水量 (万 m³/日)

三次利用では、上水製造とタラソセラピーが比較的に高温水を必要とし、魚介類養殖では様々異なった水温の海洋深層水を必要とするので、用途に応じて水温調整して供給する（22.1 万 m³/日）。三次利用後の排水と、二次利用の残り分の合計 53.8 万 m³/日はすべて JDR 内のラグーンに導いて海藻類を養殖し、含まれている栄養塩類を完全吸収して清浄な表層海水と同等の水質にし海域へ放流する（四次利用、含有物質の利用）。冷房の必要水量が少なくて済む場合は、揚水量を減らすか、余剰水を直接配水センターに送る。

今回検討した海洋深層水の資源利用によって、得られるそれぞれの利用項目ごとの省エネ・省資源の効果を表 2 に整理した。取り上げた全ての利用項目で効果が得られ、特に建物冷房と発電機冷却ではそれぞれ既存方式に比べて 87%と 63%といった電気使用量の大幅削減の可能性が明らかとなり、発電機冷却では ΔT が大きく取れるために冷却水量が削減でき、冷却水揚水電気使用量の削減につながる事が明らかとなった。排熱発電では年間で 613 MWh の新規電気が得られると推定された。これらの省エネ効果分を原油に換算すると合計で 79,631 m³/年に相当する。一方、台湾で関心の高い温帯の野菜・

果物を農場の土壌冷却によって国内の平地で生産することによりフード・マイルージが削減でき、それを燃料油に換算すると 45.7 m³/年となった。

さらに、発電機冷却水の大幅の削減は冷却装置の小型化を可能にし、発電機等の吸・排水管のメンテナンス・コストや上水の製造での膜交換コストの削減効果につながると考えられた。

5. 考 察

本モデル解析の結果、台湾南部のような熱帯環境では、海洋深層水の冷熱エネルギー資源の有効利用が極めて効果的であることが明らかになった。今回検討対象とした JDR の海洋深層水の冷熱エネルギー利用では、建物の冷房利用の割合が大きく、次いでガス発電機の冷却水、排熱発電機の冷却水、土壌冷却などである。海洋深層水の冷熱を利用した建物冷房は、ハワイ自然エネルギー研究機構（Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority, NELHA）で始まり（Daniel, 1994）、日本でも高知県室戸や沖縄県久米島で実験的に行われ、2006 年にはボラボラ島の Inter Continental Hotel（MOE；白枝, 2010）、2008 年には富山県入善町

表 2 JDR における海洋深層水の大量多段利用によって予想される省エネ・省資源効果

利用項目	効 果		備 考
	内 容	省エネ・省資源（年間）	
建物冷房	使用電力量	87%削減（原油 79,112 m ³ /年に相当）	ホテル 57.0 万 m ² 、コンベンションセンター 41.5 万 m ² 、ショッピングセンター 70.0 万 m ² 、従来の電気方式冷房と比較、使用原油量は火力発電を想定
発電機冷却	発電効率	若干（～1%）の効率向上（最大で 406 m ³ /年の原油削減）	20 MW ガス発電機を 25℃の表層水で冷却する場合と比較（角湯, 2000）
	冷却水揚水ポンプ電力量	63%削減（原油 377 m ³ /年に相当）	
	冷却装置 吸・排水管メンテナンス	63%の設備削減 ～100%のメンテナンス・コストの削減	
排熱発電	発電量	613 MWh/年の新規発電（原油 142 m ³ /年に相当）	リゾート内を含めて周辺市町村のゴミ焼却により生じる排熱を利用した 1,000 kW 規模の排熱発電
	吸・排水管メンテナンス	～100%のメンテナンス・コストの削減	
農場の土壌冷却	フード・マイルージ	燃料油 45.7 m ³ /年の削減	熱帯気候下で土壌冷却により温帯の野菜・果物を生産。5 ha の農場の土壌冷却（冷却能力 200 W/m ² 、ΔT=5℃）、輸入される主な野菜・果物の全国ベースから換算
上水製造	淡水化事前処理 膜交換 薬注処理	～100%削減 1/13 にコスト削減 ～100%削減	16 万人の上水供給（42,000 m ³ /日）、RO 膜の交換が 2 週間から 6 ヶ月に伸びると仮定

の食品工場の空調（村井，2009）で事業利用されている。海洋深層水の冷熱を利用した冷房は淡水湖の低温深層水の利用の扉を開き，2000年には米国コーネル大学が，その後オンタリオ湖の深層水を利用したカナダのトロント市ダウントウンの大規模な建物冷房で広く事業利用されている（ENWAVE）。淡水の場合は，4℃という低温水が得られるので省エネは90%に達している（Cornell University）。

本研究では，冷熱エネルギーを一次と二次で利用し，その際により低温の必要な冷房を一次にして，除湿を考慮し冷房の温度利用を13℃を上限としたが，冷熱エネルギーの効果的利用にあたっての利用温度範囲は具体的な事業での費用対効果を考慮して決定する必要がある。

三次利用は，昇温海洋深層水の主として含有物質の利用で，本研究では上水製造，タラソテラピー，魚介類の養殖を考えた。海洋深層水は低水温のために，使用目的によっては加温が必要で，それを冷熱エネルギー利用を事前に組み込むことによって，加温コスト削減を図った。富山県入善町の海洋深層水資源利用では，食品加工場の冷房で昇温した海洋深層水でアワビを養殖して，加温コストの大幅削減に成功している（村井，2009）。

加温した海洋深層水には今回検討した含有物質を利用した後でも，依然として栄養塩類をかなり多く含んでいるために，四次利用として海藻を培養して栄養塩類を吸収した上で，表層放流排水を考えた。

海洋深層水の資源利用の場合，現在のところ取水設備費用が高いために，単一資源の利用では費用対効果をプラスにすることは容易ではない。そこで，複数の資源利用を多段的に組み合わせることによって，取水設備費負担を軽減することが重要になってくる。と同時に，海洋深層水は多様な資源を含んでいるために，一部の資源だけ利用して排水すると，環境変化を起こす可能性があり，そうした問題を避ける上でも海洋深層水では多段利用が有効な方法である。また，多段利用では，冷熱利用後に昇温海洋深層水が得られるので，より高温での海洋深層水の効果的・経済的な資源利用が可能になる。

本モデル解析では，省エネ・省資源のみに着目し，

費用対効果の議論はしていない。また，ここで取り上げた利用はあくまでも一部の例であって，実際にはさらに多くの利用を多段的に組み込むことが可能である。先に挙げた富山県入善町の例では，冷熱エネルギーを利用した建物冷房と，昇温海洋深層水をアワビ養殖に利用して，両者で省エネ・省資源を達成している。したがって，利用をさらに多段化することによって，揚水費用を分担して事業性を高めることが可能である。実際の事業化にあたっては，多くの利用法の中から事業性を考慮して利用を厳選し，費用対効果を十二分に考慮して効率的な多段利用を組み立てる必要がある。また，表2で整理した海洋深層水の資源利用効果は，定量的には不十分で，実施にあたっては実験を含めたより詳しい検討の必要な項目を含んでいるが，多段利用の全体像の把握のためにあえて使用した。

文 献

- Asif, M. and T. Muneer (2007) Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 11, 1388-1413.
- CHC (The Common Heritage Corporation). <http://www.aloha.com/~craven/allabout.html>
- Cornell University. <http://energyandsustainability.fs.cornell.edu/util/cooling/production/lsc/default.cfm>
- CWB (Central Weather Bureau). <http://www.cwb.gov.tw/eng/index.htm>
- Daniel, T. H. (1991) Deep ocean water utilization at Keahole Point, U. S. A.. 未発表原稿, p. 10.
- Daniel, T. H. (1994) Deep ocean water utilization at the Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority. In "Proceeding of Oceanology International Conference", Brighton, pp. 8-11.
- Davidson, J. R. and J. P. Craven (1997) Sustainable coastal development and deep ocean water. PACON, Hong Kong. (<http://www.aloha.com/~craven/hkpaper.html>)
- ENWAVE. <http://www.enwave.com/dlwc.php>
- 行政院農業委員会. <http://agrapp.coa.gov.tw/TS2/TS2Jsp/Index.jsp>
- 浜田和秀 (2006) 海水淡水化. 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 (編・著)). 成山堂書店, 東京, pp. 112-114.
- 原田 鮮 (1964) 物理学. 学術図書出版社, 東京, p.

143

- IEA (International Energy Agency) (2004) Renewable Energy. Market & Policy Trends in IEA Countries. IEA Publications, Paris, 379 pp.
- 角湯正剛 (2000) 火力・原子力発電所での海洋深層水の冷却水としての利用の可能性. 月刊海洋, 号外, 22, 56-61.
- 兼島盛吉 (2006) 農業分野での利用. 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 (編・著)). 成山堂書店, 東京, pp. 99-106.
- 環境省 (2009) 廃棄物の排出量. 平成 21 年版 図で見る環境・循環型社会・生物多様性白書 (PDF 版). pp. 62-63. (<http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h21/pdf/full.pdf>)
- 環境省. 温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン. http://www.env.go.jp/earth/ondanka/sakutei_manual/02guideline.pdf
- 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.
- 経済部水利署 (2005) 台湾の海洋深層水資源 空調での省エネルギー利用, 深層海水資源利用通説, Vol. 2, p. 1.
- 国土交通省 (2004) 中間とりまとめ. 国土交通省, 交通政策審議会, 交通体系分科会, 環境部会, pp. 41.
- Leraand, T. K. and J. C. Van Ryzin (1996) Air conditioning with deep seawater: A cost-effective alternative for West Beach, Oahu, Hawaii. IOA Newsletter, Spring, 2-9.
- MOE (Makai Ocean Engineering) <http://www.makai.com/e-swac.htm>
- メドウズ, D. H., D. L. メドウズ, J. ランダース, W. W. ベアランズ三世 (1972) 成長の限界—ローマ・クラブ「人類の危機」レポート—. ダイアモンド社, 東京, 203 pp.
- メドウズ, D. H., D. L. メドウズ, Y. ランダース (1992) 生きるための選択, 限界を超えて. ダイアモンド社, 東京, 376 pp.
- メドウズ, D. H., D. L. メドウズ, J. ランダース (2005) 成長の限界, 人類の選択. ダイアモンド社, 東京, 408 pp.
- 村井義孝 (2009) 海洋深層水を利用した空調システム. とやま深層水フォーラム, 2009 年 11 月 30 日, グランドプリンスホテル赤坂, 東京, 富山県主催. (<http://www.wooke.co.jp/factory/CO2.html>)
- 森野仁夫 (2000) 海洋深層水による冷房と水温制御. 月刊海洋, 号外, 22, 50-55.
- 森野仁夫 (2006a) 海洋温度差発電. 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 (編・著)). 成山堂書店, 東京, pp. 85-92.
- 森野仁夫 (2006b) 発電冷却水としての利用. 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 (編・著)). 成山堂書店, 東京, pp. 107-108.
- 村井義孝 (2009) 海洋深層水を利用した空調システム. とやま深層水フォーラム, 2009 年 11 月 30 日, グランドプリンスホテル赤坂, 東京, 富山県主催. (<http://www.wooke.co.jp/factory/CO2.html>)
- Ogawa, H. and E. Tanoue (2003) Dissolved organic matter in oceanic water. J. Ocean., 59, 129-147.
- PRB (Population References Bureau). <http://www.prb.org/Publications/Datasheets/2009/2009wpds.aspx>
- 白枝哲次 (2010) 海洋深層水取水技術とその利用状況. 伊豆大島海洋深層水シンポジウム '10 講演資料集, pp. 49-59.
- Suda, Fujio (2008) 環境エネルギーの現状と将来. J. Adv. Sci, 20: 64-67.
- 台湾自来水公司. http://www.water.gov.tw/pda/04faq/faq_a.asp?bull_id=242
- 高橋正征 (1991) 海にねむる資源が地球を救う. あすなろ書房, 東京, 189 pp.
- 高橋正征 (1994) 海洋と生物と人類 10—海洋の資源の利用, 海洋深層水—. 海洋と生物, 93, 252-258.
- 高橋正征・池谷 透 (2002) 海洋深層水の清浄性. 海洋深層水研究, 3, 91-100.
- 高橋正征 (2005a) 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 (2005b) 海洋深層水のエネルギー利用技術の最前線. ECO INDUSTRY, 10, 32-36.
- 高橋正征 (2007) 海水の資源で築く豊かな持続性社会. 黒潮圏科学の魅力 (高橋正征・久保田賢・飯國芳明 (編・著)), ビオシティ, 東京, pp. 116-123.
- 谷口道子・関野政昭 (2000) 逆浸透膜を用いた海洋深層水の淡水化. 月刊海洋, 号外, 22, 106-111.
- 上田祥璽・池上康之 (2010) アンモニア/水を作動流体に使用した寒冷地向け家庭用コージェネレーションシステムの可能性について. J. Jpn. Inst. Energy, 89, 157-166.
- Van Ryzin, J. C. and T. K. Leraand (1991) Air conditioning with deep seawater; a reliable cost effective technology. IEEE Oceans '91 Conference, Honolulu, Hawaii, (<http://www.aloha.com/~craven/coolair.html>)
- 財団法人日本環境衛生センター. http://www.jesc.or.jp/environmentS/study/fact/img/06_fact6p.pdf
- Zogg, R., K. Roth and J. Brodrick (2008) Lake-source district cooling system. ASHRAE Journal, Feb., 55-56.

(2010 年 4 月 12 日受付; 2010 年 8 月 13 日受理)