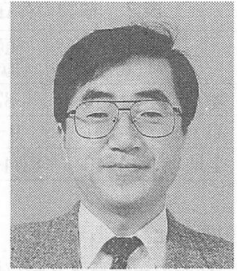


■ 展望・解説 ■

海洋深層水の多面的利用 —地球温暖化防止への活用—



渡 辺 裕*

Yutaka Watanabe

Multi-Phase Use of Deep Seawater – Application to Arrest Global Warming –

1. はじめに

地球温暖化の兆候が実感を伴いつつある。政府は1997年12月の「気候変動枠組条約第3回締約国会議＝京都会議」においてわが国の温室効果ガス削減レベルを1990年を基準年度として2010年（2008～2012年）までに6%とする議定書採択に同意している。

この目標へ向けた対策内訳を表1に示すが、温室効果ガス排出の抑制（省エネの努力）と森林による二酸化炭素の吸収（光合成による固定）ならびに国際連携による省エネや植林活動を3本柱とする事がわかる。

表1 わが国の温室効果ガス6%削減対策一覧
(1998年6月19日地球温暖化対策推進本部決定)

▲2.5% (▲2.0%) (▲0.5%)	CO ₂ , メタン, 亜酸化窒素の排出抑制 (技術革新, 国民的努力によるもの) (エネルギー起源以外の温暖化効果ガス抑制)
▲3.7%	土地利用の変化と森林活動による吸収
▲1.8%	共同実施, クリーン開発メカニズムなどの国際的活動
+2.0%	代替フロン等の排出抑制

温室効果ガスの大部分は化石燃料に起因する二酸化炭素だから、対策は二酸化炭素の排出抑制と除去に尽きる。しかしながらその実施は容易でなく、あの手この手の努力が必要である。本報告は海洋深層水に関する最近の研究動向と、これを多面的に活用し、地球温暖化を防止する構想について紹介するものである。

2. 海洋が示す二酸化炭素吸収のメカニズム

図1は地球規模の炭素循環図である¹⁾。このデータによれば、二酸化炭素の大気中への放出量は化石燃料の燃焼やセメント生産で年間炭素換算5.5GtC（55億tC）、土地利用形態の変化で1.1GtC（11億tC）であ

る。内1.4GtC（14億tC）が地上の植生により固定され、2GtC（20億tC）が海洋に固定されている。差分となる3.2GtC（32億tC）が大気中に残留し二酸化炭素濃度を年々増加させている勘定となる。

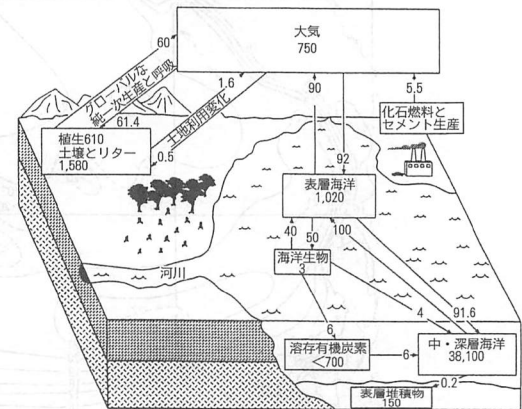
海洋は地球表面積の70%を占め、海水中には大気中の50倍以上の炭素（形態は炭酸イオン、重炭酸イオン、分子状二酸化炭素などの無機炭酸系物質）が存在している。

海洋が大気中の二酸化炭素を吸収するメカニズムには、海洋の表層から深層への物理的流れによる「溶解度ポンプ」や表層域の植物プランクトンや海草・藻類による光合成を起点とする「生物ポンプ」がある。

一方「人間ポンプ」と称して強制的に二酸化炭素を温度躍層より深い領域へ配管にて圧送する提案も見られる^{2), 3), 4)}。但しこの手法では放出部での水質変化（特にpH値低下）の問題が指摘されている。

最近河川の護岸工事や平地の舗装率が上昇した為、従来は河川を経由して海に流入していた無機塩類が減少した結果、沿岸域の生物ポンプ作用が低下し藻場が消滅するいわゆる磯焼け現象が見られる。

表2は地球上の植物の存在形態別分布と生産速度で



数字単位：GtC、矢印の数字はGtC/年を表わす

図1 地球規模の炭素循環図

* ㈱東芝 電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 主幹

〒210-0862 川崎市川崎区浮島町4-1

表2 植物の存在形態別分布と生産量

	面積 (10 ⁹ km ²)	植物量 (億tC)	生産量 (億tC/y)	平均寿命 (年)
陸域	149	8265	528	15.7
海域	361	9~17	250~500	0.07
全地球	510	8274~8282	778~1028	10.7

の概数比較である。

海域の植物量(9~17億tC)は陸域の植物量(8265億tC)に比べ僅かだが、海域の回転率が高い為、生産量(250~500億tC/y)は陸域(528億tC/y)に比べ無視出来ない大きさとなる。

海域の植物が生産する有機物は動物プランクトンや魚類の餌となり最終的に約80%は表層域で分解され二酸化炭素に戻る。残り20%が中・深層域へ移動する。海の表層(有光層)での植物生産量を決定するのは溶解二酸化炭素濃度ではなく栄養塩濃度である。この考えから海苔の養殖場では海水に施肥を行う場合がある。

3. 海洋深層水とは

「海洋の辞典(1972)」によれば、海洋深層水とは「海面から数百ないし千数百mの上・中層水と海底近くの底層水を除いた深海の大部分を占める最も巨大な水塊」と記されている。また深層水の温度や塩分濃度、含まれる二酸化炭素の分析から深層には大雑把に2千年を周期とする海流が存在すると指摘されている⁶⁾。これはグリーンランド沖で低温化した表層水が沈降して深層海流となり大西洋を南下し南極大陸周辺のウェッデル海で同様の沈降流と合流した後、インド洋、太平洋などで表層域へ湧昇する流れである。このような大規模な深層海流の他にも類似のメカニズムで循環する小規模な中層海流がある事が確認されている⁶⁾。

本報告でいう深層水は概ね下部表層(~200m:有光層)以深から採取される海水で「低温」、「清浄」、「栄養塩を多く含む」などの特徴を有する海水を指す。

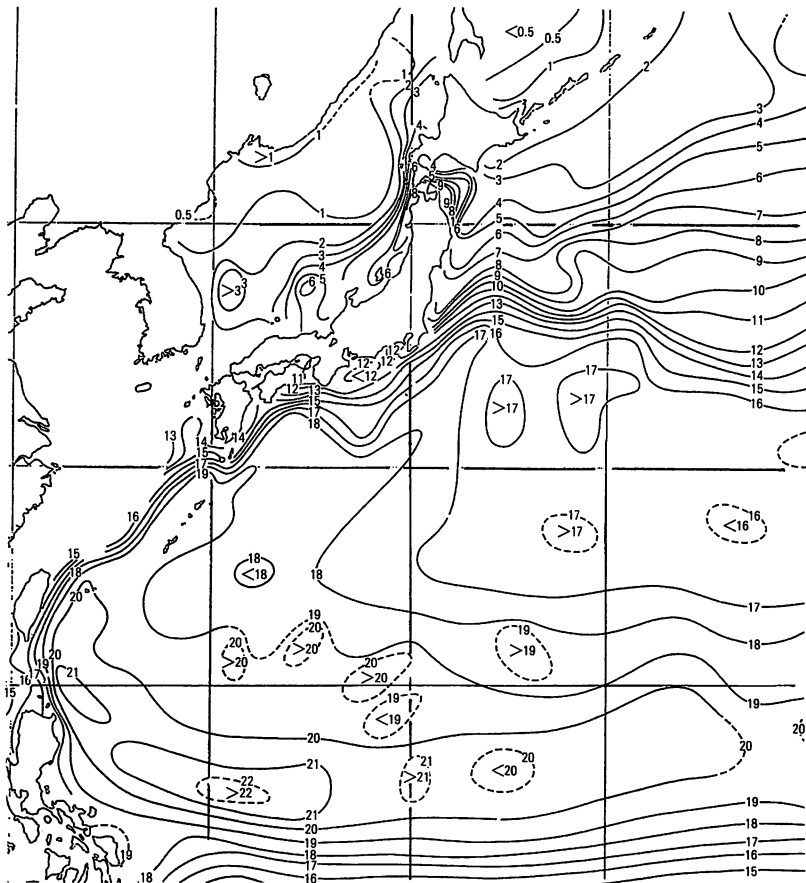


図2 日本近海の水温分布(夏季:水深200m域)

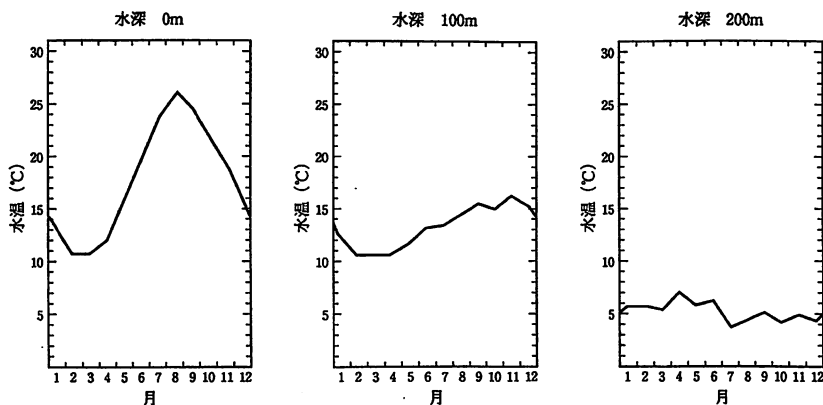


図3 若狭湾沖海水温の季節変動

表3 高知県海洋深層水分析結果
(高知県工業センター報告1995)

比較項目	海洋深層水	表層海水
温度(°C)	~10	~29
pH	7.87	8.19
TOC (mg/l)	0.93	1.60
総生菌数 (CFU/ml)	10 ²	10 ³ ~10 ⁴
NO ₃ ⁻ -N (μgat/l)	25.9	1.49
PO ₄ ³⁻ -P (μgat/l)	1.65	0.34
SiO ₂ -Si (μgat/l)	64.2	13.6
Na (%)	1.00	0.97
Mg (%)	0.13	0.13
Ca (mg/l)	426	421

深層水の低温性は前述の様に極地低温や冬季低温を起源とする事から基本的には無限の冷熱源といえる。

また、有光層以深の領域である為、海生生物や細菌類も極めて少ない環境である。これが清浄性の理由である。但し表層域で形成された有機物が沈降落下する経路でもある事から、落下する有機物が無機化される領域でもある。

表3は高知県室戸岬東岸の水深320m地点から採取された深層水と同地点の表層水の分析結果である。特徴に窒素、リンなどの無機塩濃度が高く、TOC、総生菌数が低く、NaやMgなどの濃度はほぼ等しい事が挙げられる。

図2に夏場の日本近海の水温分布(水深200m)を示す。太平洋側で4~15°C、日本海側で4~5°Cである。図3は若狭湾沖での水温の季節変化であるが深くなるに連れて年間変動幅が小さくなる事が判る。

これらの特徴は深層水を冷熱源や淡水製造の源水と見た場合に優れたものである。また、深層水の持つ栄養塩による生物ポンプ活性化の可能性は沿岸域の藻場形成(海洋植林)による二酸化炭素の固定に結びつく

と考えられる。この様に、比較的表層に近い海洋深層水をエネルギー・産業分野(省エネ効果の発揮)から二酸化炭素固定という地球環境分野(藻場造成効果と地球温暖化防止効果の発揮)まで広い範囲で多面的に活用する事で経済的に優れた実用技術を形成する事が可能となる。

4. 海洋深層水の多面的活用

4.1 海洋深層水活用の経緯と現状

1881年に仏のArsene D'Arsonvalが提唱した熱帯海域での表層と深層の海水温度差を利用した海洋温度差発電(OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion)は1926年にGeorges Claudeにより小型実験装置で実証され、1930年にはキューバでの短時間であるが22kWの発電に成功している。

その後、1973年の第1次オイルショックにより再び脚光を浴びたが、原油価格の低下と共に実用化が遠のいている。その原因は設備コストが既存の火力発電等に比して高い為である。最近ではA. A. KalinaやUeharaなどによる高効率な低温度差発電サイクルが提唱されており^{7), 8)}地球環境問題の深刻化を受けて再びOTECへの注目が集まりつつある。

一方本年、海洋深層水の持つ低温性や清浄性に着目し、既存の発電所や地域熱供給事業、水道事業などで展開すると共に環境影響評価や地球温暖化への貢献まで視野に入れた研究が開始されている⁹⁾。

表4は近年の海洋深層水活用事例を纏めたものである。

近年は海洋深層水による海域肥沃化や漁業での種苗栽培に加え、食品・健康飲料水や化粧品等の製造、ハウス栽培、レジャー施設など地場産業活性化へ応用する

表4 代表的な深層水多目的利用研究例（OTEC単独，計画中のPJは除外）

実施場所 (取水量)	事業主体，参加研究 機関・企業など	研究・事業内容	主な成果	状況 取水量，特徴など
高知県 室戸市	高知県海洋深層水研究所， 日本海洋科学技術センター， 高知県主体による産学共同 研究形態による企業連携	清浄性，低温性等の水産利 用，省エネ研究，新規産業 創出のパイロット研究。化 粧品，健康飲料・食品等	種苗生産，新規産業や特産 品創出（特に食品・医薬・ 化粧品等の新展開），沿岸 域の藻場造成・肥沃化実証	1989 取水開始 テーマ拡大し研究継 続中（1,000t/d， 320m，10℃）
富山県 滑川市	富山県水産試験場，日本海 洋科学技術センター，富山 医科大学ほか地元企業 と連携	種苗量産技術，有用生物生 態研究，海水水，入浴材， MF21受託研究など	トヤマエビ，サクラマスな どの種苗量産技術開発 MF21研究にて多段階利用 の基礎研究	1995 取水開始 （3,000t/d，300m， 4℃）
沖縄県 糸満沖	沖縄県海洋深層水開発協同 組合，東京大学，電力中央 研究所，国立医薬品食品衛 生研究所	海洋環境保全研究，洋上浮 上型取水装置開発，健康飲 料等即効的新規産業創出の 研究	海域肥沃化の確認，魚類鮮 度保持技術，取水ならびに 装置運用技術など	1997 取水開始 2t/航海（バჯ） 1,400m：12℃ 600m：15℃
ハワイ ハワイ島	ハワイ州立自然エネルギー 研究所&海洋科学技術パー ク ハワイ州を主体とする民間 企業による事業化研究	低温性，清浄性，富栄養性 等のOTEC発電，省エネ空 調，水産養殖，スピルリナ 栽培など新エネルギー研究 と水産分野を中心とするパ イロット事業研究	クローズドサイクルOTEC， 低温海水魚種の養殖，建屋 冷房への活用，商業化品目： オゴノリ，アワビ，ケルブ， サケ，ロブスター，スピル リナ，ドナリエラ	1982 取水開始 取水管10本 計94,000t/d ～600m， 7℃～10℃
ノルウェー	ベルゲン大学海洋生物学部 民間研究機関	清浄性，富栄養性によるフィ ヨルド海域肥沃化と安定水 産養殖技術の開発	たら，鮭，鱒などの水産特 産品の安定養殖，飼育技術 を構築中	1989 取水開始 （1,800t/d，65m）

など一種のブームと言える状況にある。表の事例に続き、沖縄県・久米島、北海道・泊、静岡県・焼津、三重県・尾鷲など建設中や計画段階のPJが散見される。

歴史的には海洋深層水利用はOTECから出発したが、その特性が把握されるに連れ、水産や農業面での利用、産業からエネルギー分野での実用へと多面的な活用の段階となっている。

4.2 エネルギー・産業分野での利用

海洋深層水の多面的活用でエネルギー分野が注目するのはOTECと同様にその無尽蔵といえる低温性である。

産業革命以来、我々は燃料を熱に変え動力を取り出すサイクル技術を駆使して来た。燃料が吐き出す熱エネルギーのうち動力に変換可能な有効エネルギーは基準となる低温（通常は大気温度：25℃程度）が低い程増加する。従って通常の基準低温と比較して10℃以上低温でかつ通年して安定な海洋深層水はサイクル効率改善や発電プラントの小型化、余剰設備の削除などの効果を有すると言える。

また、ハワイや室戸の深層水取水設備では10年以上の運転にも拘わらず配管の通水抵抗に増加が認められない事から配管内面での海生生物の着着が無いと推定される。この特性は発電プラントにおける配管や伝熱

面の清掃作業を軽減し廃棄物削減にも貢献する。

同様に深層水取水が可能と見られる東南アジアの島嶼国でも低温性は貴重なエネルギー資源となる。これらの国々にはガスタービンによる小型発電所が多数あるが、ガスタービンは気温が高いと出力が低下する為、深層水冷熱による吸気冷却は出力増大効果を発揮する。図4は深層水冷熱によるガスタービンの吸気冷却を検討した際の構成概略である。

発電に限らず深層水冷熱をプラント冷却や周辺地域の冷房空調やハウス栽培に用いる事が出来れば省エネとなる。この時、現実的に問題となるのは冷熱の輸送手段である。配管搬送は一般的だが長距離かつ広域の場合はインフラ整備が経済的に困難となる。体積当たりの蓄熱密度が肝心であるが、図5に示す様なコンテナによる熱輸送技術は検討する価値があらう。

既に高知県では海洋深層水を脱塩処理した「水」やミネラル成分を残した健康飲料なども市販される状況である。表3に示す様に深層水に含まれるTOC量や生菌数は表層水に比べ少ない。この為、逆浸透膜への給水条件となるFI値（ファウリングインデックス）条件（ $FI \leq 4$ ）が無処理で満足される。その結果、沈殿槽や濾過装置などが不要で薬注などの前処理が省略でき、逆浸透膜の寿命を大幅に改善できる。因みに

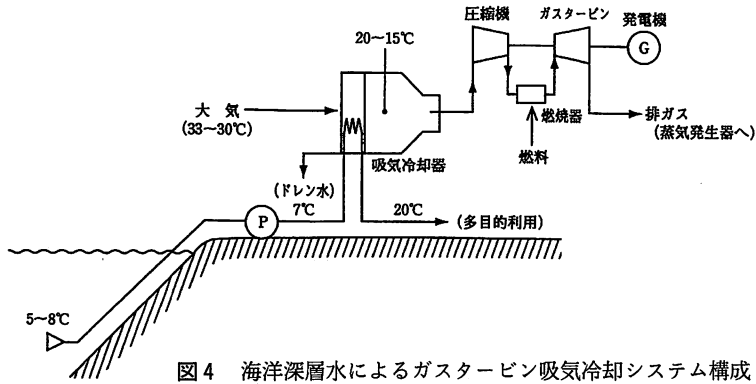


図4 海洋深層水によるガスタービン吸気冷却システム構成

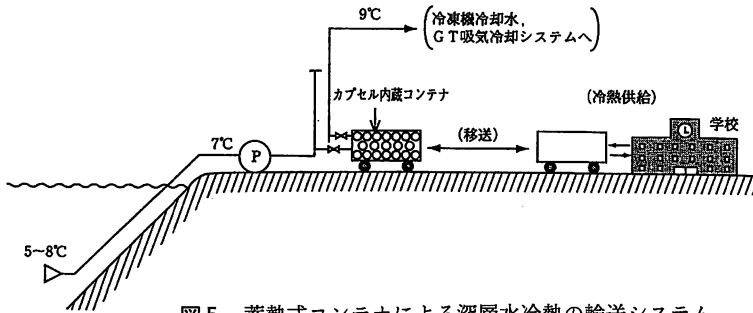


図5 蓄熱式コンテナによる深層水冷熱の輸送システム

高知県室戸ではFI=1.6~3.1が得られており1996年以降海水淡水化の連続運転が実証されている¹⁰⁾。

同様に、海水から有用金属や資源を吸着回収する場合、吸着膜は一種のフィルターであるから不純物が少ない事は回収率改善に結びつく。

また、深層水を源水とした水道事業は未だ知見はないが、発電所冷却水や冷熱源として使用した後の深層水を飲料水や農業用水等へ大量に利用する事は多面的活用の1つとして注目される。

4.3 環境影響の是非

エネルギーや産業分野で冷熱を活用し温度上昇した深層水を沿岸域へ還流させることの影響評価は二酸化炭素を収支を含め未だ十分では無い。

OTECでの大量深層水の取放水や国内外の深層水活

用研究の報告では環境上問題となる事例は見当たらないが、あらゆる角度から安全性を確認していると言いはし難い。従って、更に研究を重ね深層水の取水、放水に伴う影響評価と安全性の確立は有用性検証と同様に極めて重要な課題である。

5. 地球温暖化防止効果について

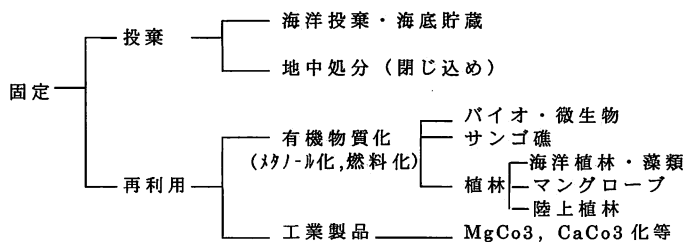
5.1 二酸化炭素固定技術の現状

はじめに触れた様に、温室効果ガスの大部分は化石燃料に起因する二酸化炭素である。従って大気中の二酸化炭素濃度を削減する必要がある。

表5は大気中の二酸化炭素を固定(大気中から除去するという意味)する技術分野を纏めたものである。

二酸化炭素固定の研究は開始されたばかりであり、

表5 大気中の二酸化炭素の固定手法分類



現状では小規模な物が多い。決定打となる革新技術は模索中であり、それ以前に省エネなど解決すべき問題が山積する状況である。

二酸化炭素固定で研究例の多いものはバイオ・微生物および植林で次に海洋投棄が挙げられる^{11), 12)}。研究ではないが最近では企業によるオーストラリアなどでの植林事業や、東南アジアでのマングローブ林保護、世界銀行「炭素基金」への出資など、将来の二酸化炭素排出権取引を想定した実務的対応も見られる。

5.2 海洋植林の効果について

海草・海藻による二酸化炭素の固定（海洋植林）技術は沿岸域の多くが磯焼け状態にある事を考えれば早期に確立すべきである。

この分野の研究は漁業分野が主である¹³⁾が最近では地球温暖化問題の見地からの研究例も散見され、海草からの飼料製造など注目すべき物¹⁴⁾がある。

海洋が炭素の巨大なリザーバとして機能している事、ならびに海洋が二酸化炭素を吸収するメカニズムについては既に述べた。その中で生物ポンプを律速するのは海水中の二酸化炭素濃度ではなく植物プランクトンの成長に必要な無機栄養塩等である事も判明している。

海水と大気間の二酸化炭素のやり取りは次の様な物である。海水は電解質溶液であるから温度が低いほど気体の溶解度は高い。従って地球規模で見れば大雑把

表 6 日本近海での植物プランクトン・海草類による二酸化炭素固定量

海 域	面 積 (km ²)	総生産量 (gC/m ² /day)	年間純生産量 (WtC/y)
植物プランクトン			
内湾・内海域	53936	0.74~1.98	1205~ 3387
沿岸域	377253	0.3~1.30	4130~20650
沖合い域	105763	0.14~0.32	429~ 1024
海草類 (沿岸域)	****	5.2~15.4	173~ 303
合 計	536932	****	5937~25364

に言って、赤道域の海水は二酸化炭素を排出し極地では二酸化炭素を吸収すると言える。

界面での二酸化炭素の収支は夫々の分圧で決まる。通常、海水 1 リットルには 2.3~2.4mmol の全炭酸が溶存する。pH7.5 の状態で炭酸水素イオン (HCO₃²⁻) が 93%、炭酸イオン (HCO₃²⁻) 5%、炭酸 (CO₂・H₂O) 2% 程度である。

海水中の二酸化炭素分圧を低下させるのは植物プランクトンによる固定であり、その結果、大気中の二酸化炭素が海水へ取り込まれる。(この取り込み作用を含めて生物ポンプと称する事もある)

表 6 は日本近海での植物プランクトン、海草類による炭素固定量で¹⁵⁾、総量は 0.59 億~2.53 億 tC/y である。沿岸域の単位面積当たり純生産量は植物プランクトンで 0.3~1.3gC/m²/day、海草類で 5.2~15.4

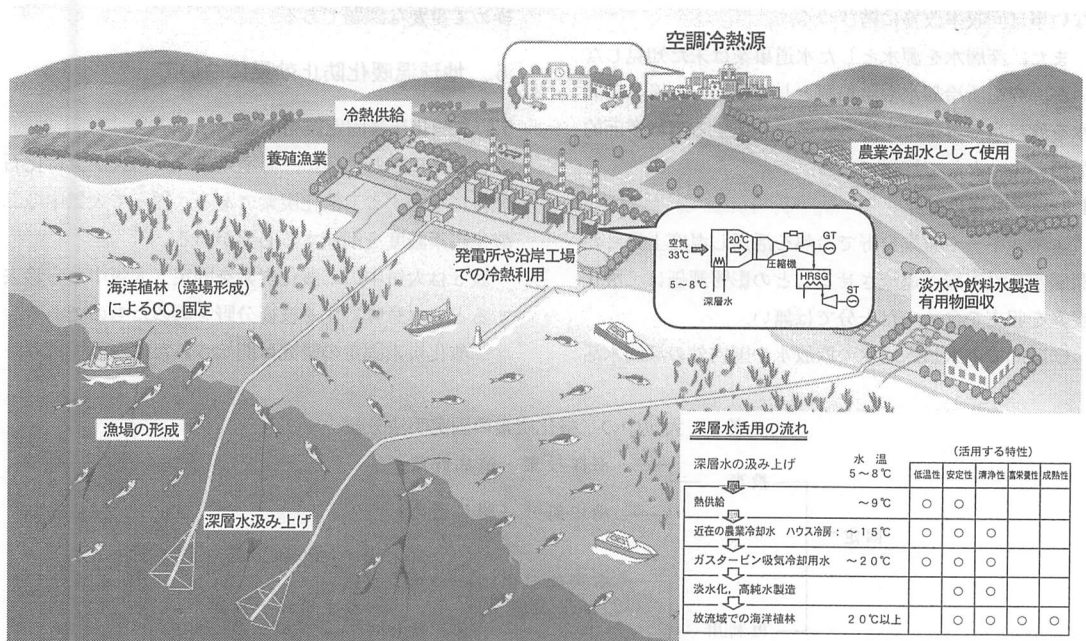


図 6 海洋深層水の多面的利用による省エネと地球温暖化防止構想

gC/m²/day程度が見込める。海草類の単位面積当たりの純生産量が大きい割に年間の純生産量が低いのは回転率の差である。因みにわが国の炭素総排出量は1994年度で3.43億tC/yであるから、海洋の示す炭素固定能力は無視出来ない。

問題は植物プランクトンや海草類により固定化された有機物をどの様に回収するかである。因みに、(財)地球環境産業技術研究機構では連続培養技術¹⁶⁾を長期にわたり研究中であり注目される。

この様に海洋が持つ二酸化炭素の固定能力を活用し、深層水にて生物ポンプ作用を活性化すると共に、バイオ技術を用い生産された有機物を有効に再利用する事が地球温暖化防止となるがシステムとしては未だ不完全であり、今後多くの努力と研究資金投入が不可欠である。

6. おわりに

海洋植林が環境的に安全である事、あるいは深層水取・放水の安全基準が確立される事が前提であるが、海洋深層水の低温性と清浄性をエネルギー分野や産業分野で活用した後に、その富栄養性を海洋植林(藻場造成)による二酸化炭素固定に利用する技術を構築し世界へ普及させる事は海洋国日本の課題である。

図6は本報告で説明した海洋深層水の多面的利用により地球温暖化を防止する構想を模式的に示した物である。

地球温暖化問題は短時間で解決できる問題ではないが対策の遅れはそのまま後世に悪影響拡大の形で反映される。

現在、進められている省エネ施策と併行して、何らかの二酸化炭素固定を推進する事が重要であり、海洋深層水の活用は一つの有効な手段と思われる。

謝辞

本報告は(財)新エネルギー財団にて平成10年4月に纏められた「深層水の冷熱ならびに二酸化炭素固定効果活用に関する調査研究」を骨子にした。

研究チームに参加頂いた千代田ディムスアンドムア(株)中尾徹殿、清水建設(株)辰巳敷殿、(株)大林組・林秀郎殿、(株)三菱化学・伊藤洋一殿、(株)荏原製作所・原田光夫殿、三菱化学エンジニアリング(株)陶昇殿、および調査研究開始から取り纏めまで全てにわたりご指導・

ご尽力頂いた(財)新エネルギー財団常務理事・岡澤公夫殿、計画本部主幹・加藤幹男殿、村瀬啓文殿、川口洋一郎殿に深く感謝致します。

文 献

- 1) IPCC1995年資料 (Schimel, 1995)
- 2) 原田平：(財)地球環境産業技術研究機構、佐野寛：地球エネルギーシステム研究所ほか、「CO₂海洋隔離法の展望(CO₂対策技術としての海洋隔離の位置付け)」、第15回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、1999-1
- 3) 原田平：他(財)地球環境産業技術研究機構、佐野寛：地球エネルギーシステム研究所ほか、「CO₂海洋隔離法の展望(2) その歴史、現状および問題点」、エネルギー・資源学会第18回講演論文集、1999-6
- 4) 坪田博行：広島大学、「海洋中の炭素循環メカニズムと二酸化炭素の海洋隔離」、NEDO第17回事業報告会(環境技術分科会)、1997-9
- 5) 高橋正征：東京大学、「海に眠る資源が地球を救う」、あすなろ書房、1991(参考：W. S. Broecker, 1989)
- 6) 深沢理郎：東海大学海洋学部、「北太平洋の中層循環」、第2回海洋深層水利用研究会全国集会講演要旨集、1998-10
- 7) A. A. Kalina：日本国内特許広報(特公昭62-39660)
- 8) 上原春男：佐賀大学理工学部、「吸収と抽気作用を伴うサイクルを用いた海洋温度差発電システムの性能解析」、第4回動力・エネルギー技術シンポジウム講演資料集、1997-6
- 9) (財)日本海洋開発産業協会：「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発の研究開発」、平成11年度NEDO公募研究開発事業(深層水の高効率エネルギー利用、省エネルギー型資源利用を主体とした多目的・多段階利用システムの研究開発と深層水の取放水に伴う環境影響評価技術の確立)
- 10) 谷口道子：高知県海洋深層水研究所、浜口太作：室戸市役所、勝部幹夫：東洋紡績ほか、「海洋深層水を使った海水淡水化長期実証運転について」、第2回海洋深層水利用研究会全国集会講演要旨集、1998-10
- 11) 宮下ほか：(株)マリンバイオテクノロジー、「Composition and nature of extracellular polysaccharide produce by newly coccoid prasinophyte, *Prasinococcus capsulatus*」, Journal of Marine Biotechnology 1995
- 12) 川口勝之：長崎総合科学大学、「地球環境システム設計論/第12章」、九州大学出版会、1996-4(改訂版)
- 13) 境一郎：エコシステム水産研究所、「磯焼けの海を救う」、(財)農山漁村文化協会、1997-6
- 14) 齊木博：電力中央研究所、「地球温暖化とバイオテクノロジー」、資源と素材Vol.110(総説)、1994-No.14
- 15) 新エネルギー財団、「深層水の冷熱ならびに二酸化炭素固定効果活用に関する調査研究」、1998-4
- 16) (財)地球環境産業技術研究機構：CO₂固定化等プロジェクト室、「生物的CO₂固定化プロジェクト報告」、1990-1999