

海洋深層水の有効利用技術に関する研究（その2）

—海洋深層水を用いた水温制御技術の研究—

森野 仁夫
(技術研究所)

萩原 運弘
(技術研究所)

§ 1. はじめに

海洋深層水の定義は分野によって異なるが、本報告では1988年に中島¹⁾によって水塊区分された、「光合成藻類が成長できない有光層以深の海水」を深層水として扱う。深層水は表層水と比較して、清浄性、低水温性、富栄養性の3点に優れた特性をもち、その利用が水産分野や海洋温度差発電(OTEC)を中心に多方面で注目されている。

海洋深層水を利用しようとする試みは、アメリカでは1970年代初頭から海洋温度差発電の分野を中心に進められてきた。現在は、ハワイ島のハワイ州立自然エネルギー研究所(NELH)において海洋温度差発電を中心に淡水化、冷房、水産養殖、農業などへの適用を目指した深層水の多角的利用技術の研究開発が行なわれている²⁾。

また、ノルウェーではフィヨルド深層水の恒水温性と清浄性に注目した水産養殖への適用に関する研究開発が行なわれている²⁾。日本における海洋深層水の利用研究は1970年代後半から、水産資源としての利用という観点で

海洋科学技術センターを中心に進められてきた。海洋科学技術センターは、1980年代に海洋深層水の利用技術として陸上生産型、浅海底生産型、海域基礎生産力強化型の3タイプの概念を提唱し³⁾、1985年から陸上生産型深層水利用技術の実用化のために清水建設と共同研究「深層水供給システムに関する調査研究」を実施した⁴⁾。この成果は科学技術庁の科学技術振興調整費による研究に結びつき、1989年に我が国初、世界でも3番目の海洋深層水研究施設として、高知県海洋深層水研究所の建設が実現された。

本報告では、1989年度～1990年度に高知県海洋深層水研究所において海洋科学技術センターとの共同研究「海洋深層水有効利用技術の実用化に関する研究」⁵⁾⁶⁾で実施した、深層水を利用した水温制御技術の研究開発の結果について報告する。

高知県海洋深層水研究所は、海洋科学技術センターによって開発建造された深層水取水施設を核として、1989年4月に公的試験研究施設として高知県室戸岬の東岸に設立された。その施設概要を図-1に示す。

深層水の取水深度は320m、表層水の取水深度は0.5mであり、設計取水量はそれぞれ460m³/日である。取水管は深層水、表層水とも鋼線鍍装硬質ポリエチレン製で、直径はともに125mm、延長は深層水取水管2,650m、表層水取水管60mである。

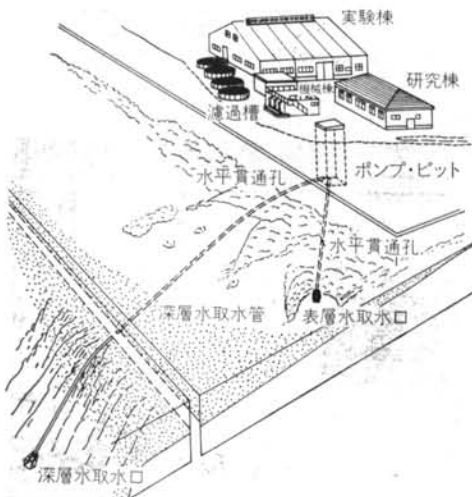


図-1 高知県海洋深層水研究所の概観

§ 2. 水温制御技術の研究開発の目的

高知県海洋深層水研究所の取水施設で計測した、深層水と表層水の給水温度の日平均値を図-2に示す。この図からも推測されるように、従来の水産養殖施設では表層水のみを利用しているため、夏季の水温上昇が生物の成長に及ぼす影響(成長率の低下、弊死)が重大な問題となっている。しかし、使用する水量が多量なため、エネルギー費用が膨大になることから水温制御、特に冷却

は現実には積極的に実施されることが少なく、生産性向上のために経済的な水温制御方法の開発が強く求められていた。

一方、深層水を取水することにより、深層水と表層水の温度レベルの差を利用した水温制御が可能になり、従来から行なわれているボイラーと冷凍機を使用した加熱・冷却の他に、①深層水と表層水の混合、②深層水と表層水の熱交換、③深層水と表層水を利用したヒートポンプによる加熱・冷却などの方法によって水温制御を行なうことができるようになった。これらの方法のうち、深層水と表層水の混合による水温制御が、エネルギー費用の面からは最も経済な方法であると考えられる。しかし、この方法では深層水の特性のひとつである清浄性を保つことができず、清浄性を必要とする用途には用いることができない。

本研究では、深層水の清浄性を損なわずに水温制御を行なうための方法として、熱交換器とヒートポンプを組み合わせた水温制御実験システムを作製し、各種運転モードでの水温制御精度の確認と運転性能の評価を行ない、生物生産のための経済的な水温制御システムを開発することを目的として研究開発を行なった。

§ 3. 研究の方法

3.1 実験システム

深層水の清浄性を損なうことなく水温を制御する前提条件から、熱交換器とヒートポンプを組み合わせて図-3に示す水温制御実験システムを作製した。実験システムの仕様を表-1に、実験システムの外観を写真-1に示す。

実験システムの運転モードとしては、①熱交換器の単独運転、②ヒートポンプの単独運転、③熱交換器とヒートポンプの直列運転が可能である。実験システムにおい

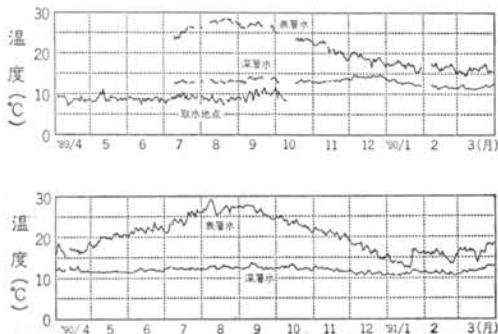


図-2 実験棟給水温度

て、熱交換器の出口水温制御は、熱交換器出口温度を测温抵抗体によって検知し、配管管路の水圧変動を避けるために三方弁によって熱源水の流量をPID制御で調整する方式とした。ヒートポンプの運転制御は、機器容量の制限で圧縮機の可変速運転による加熱および冷却能力の制御ができないため、バッファータンクの水温を管理するON/OFF制御とした。

実験は、以下に示すような運転モードで行なった。

- (a)熱交換器による表層水の冷却実験
- (b)ヒートポンプによる深層水の加熱実験
- (c)熱交換器による深層水の加熱実験
- (d)熱交換器とヒートポンプの直列運転による深層水の加熱実験

実験(a), (b), (c)の目的は、それぞれの運転モードの温度制御範囲と制御精度を明らかにすること、実験(d)はエネルギー消費量の削減効果を定量化することである。

3.2 計測方法

熱交換器とヒートポンプの出入口水温の計測は、シー型のT熱電対によって行なった。水槽の水温計測は、

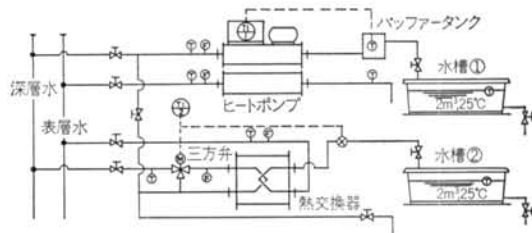


図-3 水温制御実験システム

熱 交 換 器		ヒートポンプ	
型式	プレート式	加熱能力	27,000 kcal/h
熱交換量	21,000 kcal/h	冷却能力	21,800 kcal/h
伝熱面積	1.32㎡	定格電力	6.0 kW

表-1 実験システムの仕様

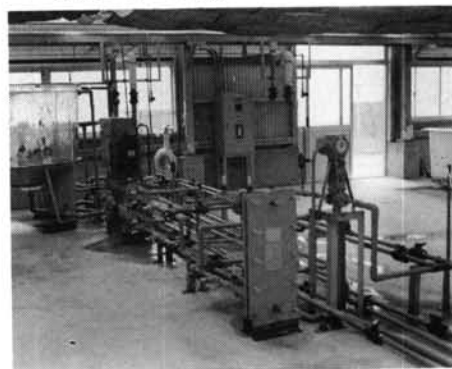


写真-1 実験システムの外観

T熱電対の先端をエポキシ系接着剤でコーティングして投げ込み式として計測した。各海水の流量計測には、熱線補償型の流量計を用いた。また、流量の計測では流量計の検定のため定期的に容積流量によるチェックを行なった。ヒートポンプと循環ポンプの電力量は、パルス発信式の電力量計を用いて計測した。各計測値は、デジタル・データロガーによって5分間隔で収集し、パーソナルコンピュータでデータの処理と記録を行なった。

§ 4. 実験結果

4.1 熱交換器による表層水の冷却実験

熱交換器による表層水の冷却実験では、深層水を冷熱源として、表層水の水温を制御対象とした実験を行なった。図-4に運転モードを示す。表層水出口温度の制御は、冷熱源側に設けた三方弁で、熱交換器を通過する深層水の流量を変化させる方法で行なった。三方弁の制御はPID制御によって行なった。制御目標温度は、実験開始から10月26日までは25℃、10月27日以降は20℃である。熱交換器の設定流量は、深層水側が10 l/分、表層水側が20 l/分であった。

水温制御の実施対象とした、水槽②の水温の計測結果を日平均値で図-5に示す。図-5より、システムの調整不備や給水の停止を除くと、水槽②の平均水温はほぼ目標温度に一致している。

目標温度が25℃の実験では、10月初めに表層水の水温が25.0℃以下に低下し、また目標温度が20℃の実験では12月初めから表層水が20.0℃以下になった。このため、深層水を熱源とした熱交換器による制御では目標温度の維持が不可能となった。実験結果と表層水供給温度の観

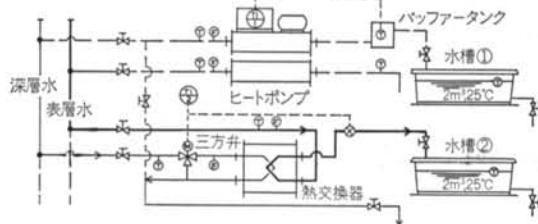


図-4 熱交換器による表層水の冷却実験

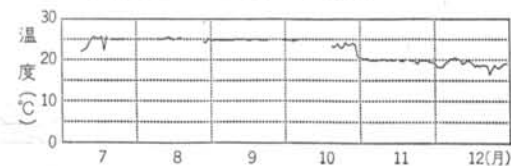


図-5 水槽②の水温変動

測結果から判断すると、深層水を冷却熱源とする熱交換により、25℃の表層水は7月中旬から9月末まで2カ月半、20℃の表層水は6月初旬から11月末までの6カ月間得られることが分かった。なお、熱交換器の熱貫流率は、全実験期間を通して約900 kcal/(m²・h・℃) {1050 W/(m²・K)}であり、一般に使用されるプレート式熱交換器の標準性能に匹敵するものであった。

4.2 ヒートポンプによる深層水の加熱実験

ヒートポンプによる深層水の加熱実験では、表層水を温熱源として深層水の水温を制御対象とした実験を行なった。図-6に運転モードを示す。ヒートポンプの運転は、制御対象水槽①との間に設けたバッファータンク水温を制御量としてON/OFF制御で行なった。制御目標温度は熱交換器による実験と同様、実験開始から10月26日までは25℃、10月27日以降は20℃である。設定流量は、深層水側が前期30 l/分、後期25 l/分、表水側が30 l/分である。

水槽①の水温変化を図-7に、日平均値で示す。図-7より、システムの調整不備や給水の停止を除くと、水槽①の平均温度はほぼ目標温度に一致している。熱交換器による制御結果(図-5)と比較すると、深層水、表層水の季節的な温度変化にかかわらず安定した制御精度を維持していることが分かる。

圧縮機電力の平均値は、前期7.9kW、後期4.3kWであった。このときのヒートポンプの成績係数(COP)は、表-2に示すとおり2.7~3.2であり、後半の成績係数が低いのは表層水温度の低下のためと考えられる。

ヒートポンプの成績係数を、従来の水産養殖施設で加熱装置として一般的に使われるボイラーの性能と比較すると(ボイラー効率を80%とする)、1次エネルギー換

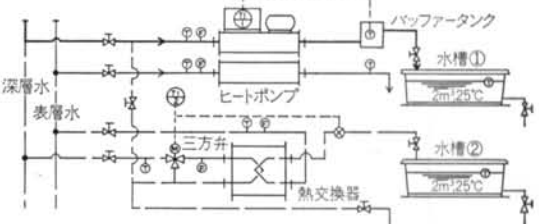


図-6 ヒートポンプによる深層水の加熱実験

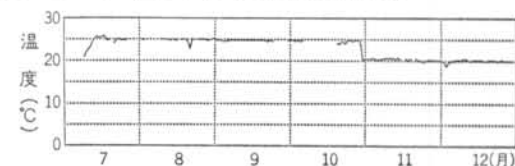


図-7 水槽①の水温変動

算で20~40%程度の効率改善となった。

4.3 熱交換器による深層水の加熱実験

1990年7月26日より、表層水を温熱源として熱交換器による深層水の加熱実験を行なった。図-8に運転モードを示す。実験条件は、深層水制御水温20℃、深層水流量20.0 l/分、表層水流量40.0 l/分である。深層水の水温制御は、深層水の熱交換器出口温度を検出し、表層水の熱交換器通過流量を三方弁のPID制御によって調整する方法で行なった。

実験結果を図-9に示す。図において、破線が制御温度を示している。7月26日より9月12日まで深層水は12℃ないし13℃から目標水温の20℃まで加熱され、制御は良好に行なわれた。この間の制御水温の平均値は19.6℃であった。

9月13日以降は、表層水側の流量の減少と水温の低下のため制御温度が維持できなくなった。実験の結果と表層水の供給水温から判断すると、表層水を熱源とした熱交換器による深層水の温度制御は、目標温度を20℃とした場合、7月中旬から9月中旬の2カ月程度の期間可能

月	7	8	9	10	11	12
COP	3.02	3.17	2.97	2.95	2.7	2.65

表-2 ヒートポンプの COP

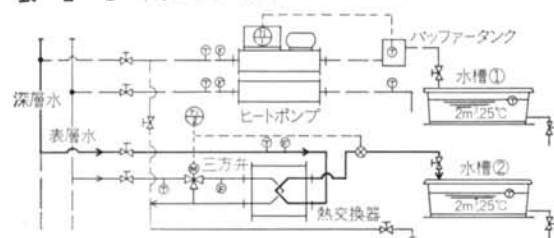


図-8 熱交換器による深層水の加熱実験

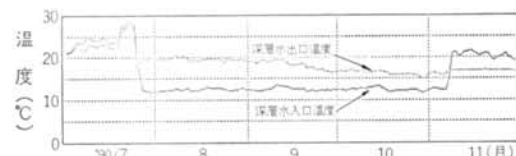


図-9 深層水の熱交換器入出口水温の変化

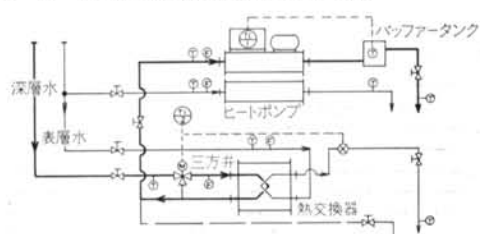


図-10 ヒートポンプと熱交換器による深層水の直列加熱実験

となることが分かった。

なお、この間の熱交換能力は熱貫流率で $900 \sim 1,000 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ $\{1050 \sim 1163 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})\}$ であり、プレート式熱交換器として標準的な性能を示している。

4.4 熱交換器とヒートポンプによる深層水の直列加熱実験

1990年11月から12月にかけて、熱交換器とヒートポンプを直列につないだ運転モードで深層水の加熱実験を行なった。運転モードは、図-10に示すように第一段階で深層水を冷熱源とする熱交換器によって表層水の水温を制御し、第二段階で表層水を温熱源とするヒートポンプによって深層水の水温を制御する方法で行なった。このモードにおいて深層水は、熱交換器で表層水を所定の温度にコントロールする際に表層水から熱を奪い相当分の加熱を受ける。これにより、熱交換器通過後の深層水のヒートポンプ入口温度はこの加熱量分だけ高くなり、深層水加熱に要するヒートポンプの電力量が軽減される。

実験結果として、熱交換器側の表層水の水温制御の状況を図-11に示す。表層水の目標水温は17.0℃であるが、11月7日~12月11日の平均値は16.7℃と良好に制御されている。12月中旬以降は、表層水の水温が17.0℃より低下したため目標温度の維持が不能となっている。こ

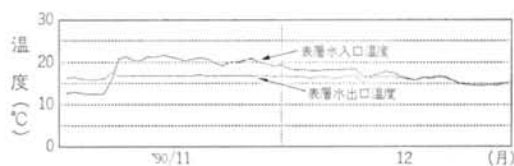


図-11 表層水の熱交換器入出口水温

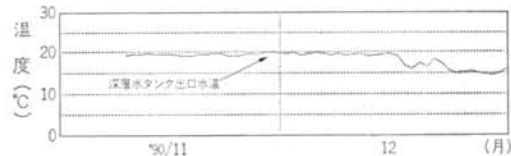


図-12 深層水のバッファータンク出口水温

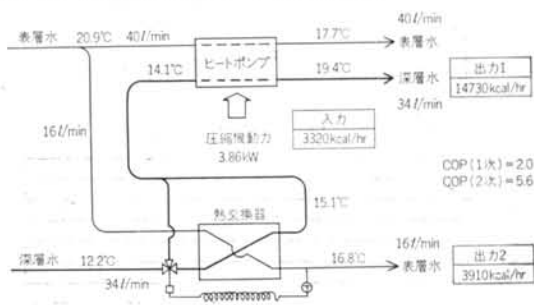


図-13 直列運転モードの熱収支

のときの設定流量は深層水が 34.0 l/分、表層水が 16.0 l/分で、ヒートポンプの温熱源である表層水の流量は 40.0 l/分であった。

一方、ヒートポンプ側の水温制御の状況は、図-12に示すように11月7日～12月16日まで良好に行なわれた。実験期間の制御水温の平均値は、目標温度20.0℃に対して19.4℃であった。目標水温と制御水温の差は、実験棟内の気温が低いため配管からの熱損失が影響したものと考えられる。12月中旬以降は、表層水の水温低下に伴い熱交換器による補助加熱が得られず、また熱源水の水温が低下したため、ヒートポンプの運転が不安定となり制御水温を維持できなかった。しかし、この状況におけるヒートポンプの安定運転は熱源水量を増加することで対応でき、この結果はヒートポンプの制御限界を示すものではないと判断される。

実験期間の平均的な稼働状況から、直列加熱モードの熱収支を図-13に示す。直列モードの第一段階である熱交換器において、深層水の熱交換器入口温度は12.2℃であるが、表層水の温度を制御する冷熱源として用いられるため、熱交換器出口では15.1℃となっている。この深層水は三方弁からのバイパス分と合流し、ヒートポンプの入口では水温が14.1℃となり、結果的に熱交換器によって約2℃の水温上昇を受けている。

このときのヒートポンプの実際の製造熱量は、平均で11,000 kcal/h {46,024 kJ/h} であり、COPは3.27であったが、深層水供給温度（実験棟入口温度）は12.2℃であることから、直列システムの見かけの製造熱量はおおよそ15,000 kcal/h {62,760 kJ/h} となり、COPは4.49となる。すなわち、直列加熱システムとすることにより、ヒートポンプの運転電力はヒートポンプ単独で運転する場合と比べて30%以上軽減される結果となった。

また、温度調整を行なった深層水と表層水がともに有効に利用されるとすれば、システム全体の成績係数は単位時間当たりの入力がヒートポンプの圧縮電力量 3.86 kWh {13,896 kJ} に対し、出力はヒートポンプの深層水加熱量 (14,730 kcal {61,630 kJ}) と、熱交換器の表層水冷却量 (3,910 kcal {16,360 kJ}) を合計した 18,640 kcal {77,990 kJ} となることから、COPは5.62となる。これは、1次エネルギー換算で2程度となり、ボイラーと冷凍機からなる従来システムと比較して、運転エネルギーを50%以上削減できることを示している。

従来システムのボイラー効率を0.8、エネルギー消費量を1.0とした場合を基準として、実験システムの各運転モードによる効率とエネルギー消費量比率の比較を図-3に示す。

§ 5. 実験結果のまとめ

水温制御システムの運転実験の結果、各運転モードにおける水温の制御精度は±1℃程度であり、実用化のために十分な精度をもつことが確認された。また、本研究において開発した熱交換器とヒートポンプを直列に組み合わせた水温制御システムは、従来システムと比べて30～50%の運転エネルギー削減効果を示し、経済性の面でも実用化が可能な水準に達していると判断された。

熱交換器による深層水の加熱モード、あるいは表層水の冷却モードの水温制御範囲と制御可能期間は、それぞれの水温の季節的な変動と目標水温によって変化するが、実際の生産工程に利用される温度レベルを表-4に示すように仮定すると、供給水温の長期観測結果（図-2）と水温制御実験の結果から、深層水と表層水の熱交換によって所定の水温を得ることができる期間は表-4のように想定される。すなわち、13℃の深層水と15℃の表層水は通年熱交換だけで得ることができ、18℃の深層水は5カ月間、18℃の表層水は7カ月間、23℃では深層水で1カ月半、表層水で4カ月間、それぞれ熱交換だけで所定の水温を得ることができる。

このように、熱交換器による水温制御は、深層水と表層水の水温の季節変化による制御範囲と制御可能期間の制約はあるものの、深層水の清浄性を損なわず、エネルギーを要する加熱装置や冷却装置を用いずに水温を制御できる経済的な方法であり、今後の深層水利用施設の設計における深層水と表層水の主給水系統の水温制御方法として有効な技術となる。

機器システム	効 率	エネルギー消費量比率
従来システム		
ボイラー	0.80	1.0
開発システム		
ヒートポンプ単独	1.15	0.7
熱交換器+ヒートポンプ	1.57	0.5
システム全体	1.95	0.4

(注) 効率は1次エネルギー換算で比較

表-3 従来システムと開発システムの運転性能の比較

種類	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
深層水	13℃												
	18℃												
	23℃												
表層水	15℃												
	18℃												
	23℃												

表-4 熱交換器による水温制御が可能な期間

一方、ヒートポンプによる水温制御は、熱交換器のような制御温度範囲と制御可能期間の制約がなく、またエネルギー消費量の点で従来のボイラーと冷凍機による加熱・冷却方法より優れているものの、初期コストと、大量の海水を要する水産養殖分野ではなおエネルギー費用の点で問題が残るため、当面は厳密な水温制御の信頼性を要するふ化などの特定の工程において利用されることが予想される。

しかし、今後水産養殖の分野において近代化された生物生産システムを実現するためには、年間にわたる水温制御が不可欠になるものと考えられ、深層水と表層水の熱交換では所定の水温が得られない期間には、なんらかの方法での加熱や冷却が必要となる。このような場合、本研究で開発した熱交換器とヒートポンプを直列に組み合わせ合わせた水温制御システムは、運転コストの経済性に優れ、深層水の清浄性を損なわずに任意の水温を得ることができるという点で、水温制御の重要な要素技術として位置づけられる。

§ 6. おわりに

我が国初の海洋深層水研究施設において、深層水を利用した生物生産のための水温制御技術の研究開発を行った。深層水の清浄性を損なわずに水温を調整する方法として、熱交換器とヒートポンプによる水温制御システムを開発し、各種運転モードの制御範囲と制御精度を確認した。本研究において開発した水温制御システムは経済性に優れ、技術的には実用化への展開が可能な水準に達していると判断される。今後は、実際の養殖システムへ適用してノウハウを蓄積し、実用化への展開を図って行きたい。

我が国における海洋深層水利用技術の研究開発は、海洋科学技術センターを中心に産学官参加の研究体制のもとで、1989年度から本格的に開始されたばかりであるが、水産分野を始めとして食品産業、化学、医薬品、海洋療法、農業、空調など多くの分野で検討されており⁷⁾、その研究開発動向が産学官各方面から注目されている。現在、高知県海洋深層水研究所においては、海洋科学技術センター、高知大学や国の研究機関のほかに、海洋科学技術センターとの共同研究で当社以外に民間4社が参加して、水産養殖技術、微細藻類の大量培養技術、淡水化技術、冷房技術などの研究開発を行なっている。これらの研究は、技術的な可能性の高いことがこれまでの研究によって評価されつつあるが、深層水取水管の建設費までを含めた経済性を考えると、現状では事業的に成立する段階までには至っていない。今後の陸上生産型深層水利用技術の実用化のためには、より一層の取水施設建設コスト低減化の努力とともに、深層水の多段式利用技術、集約的な生産技術など生産工程における経済性向上のための技術開発が必要となる。また、今後の海洋深層水利用の規模の拡大を考えると、陸上施設からの深層水排水の沿岸域に与える影響評価や、沿岸浅海域での深層水排水の利用技術の研究開発が重要な課題となる。

今後は、水温制御技術の実用化とともに、これらの課題について研究開発を進めていく予定である。

謝辞 本研究は、海洋科学技術センターとの共同研究として実施したものである。海洋科学技術センター海城開発研究部中島研究副主幹ならびに豊田研究副主幹には共同研究の推進に当たって激励をいただくとともに、本論文の執筆に際しても多くのご助言をいただいた。また、研究の実施に当たっては高知県海洋深層水研究所の皆様にも多大なご協力をいただいた。ここに、記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 中島敏光：“海産珪藻 *Skeletonema costatum* の増殖に及ぼす海洋深層水の影響” 日本プランクトン学会報 Vol. 35, No. 1 (1988年)
- 2) 海洋科学技術センター、清水建設、日本水産、日本郵船：“深層水有効利用技術の実用化に関する研究—海外の研究開発動向調査” 海洋科学技術センター (1989年)
- 3) 中島敏光、豊田孝義：“深層水人工湧昇” 月刊海洋 Vol. 21, No. 10 (1989年)
- 4) 海洋科学技術センター、清水建設：“深層水供給システムに関する調査研究” 海洋科学技術センター (1986年)
- 5) 海洋科学技術センター、清水建設、日本水産、日本郵船：“深層水有効利用技術の実用化に関する研究—平成元年度研究成果報告書” 海洋科学技術センター (1990年)
- 6) 海洋科学技術センター、清水建設、日本水産、日本郵船：“深層水有効利用技術の実用化に関する研究—平成2年度研究成果報告書” 海洋科学技術センター (1991年)
- 7) 中島敏光：“深層水有効利用技術” JAMSTEC Vol. 3, No. 2 (1991年)