

生物生産のための陸上型深層水供給システム に関する調査研究

清水建設株式会社	正会員	萩原 運弘
同 上		森野 仁夫
同 上	正会員	奥津 宜孝
海洋科学技術センター		中島 敏光
同 上		豊田 孝義
同 上		石井 進一

1. はじめに

深層水の定義は一般的には確立されていないが、本研究では生物生産を取り扱う意味から、植物プランクトンなどの光合成藻類が成長できない有光層以深の水を深層水と呼ぶことにする。一般に、海洋の水深数百メートル以深の深層水は低温、かつ硝酸塩、磷酸塩などの無機栄養塩類が豊富に含まれており、また溶存有機物や汚染物が少ないなどの特性を有している。図-1は我が国周辺海域における硝酸塩の鉛直分布の例¹⁾である。Ryther²⁾は深層の水が有光層に運ばれる自然の湧昇海域の平均基礎生産力は外洋海域の約6倍、沿岸海域の約3倍であり、しかも全海洋面積の0.1%に過ぎない湧昇海域での魚類生産は全海洋での魚類生産の1/2を占めると見積もった。また中島・豊田³⁾は、伊豆諸島の三宅島の東側海域に形成される湧昇域では周辺域に比べ植物プランクトン現存量が数倍高く、海藻類、貝類、えび類などの漁獲生産量も大きいという結果を報告している。このように、深層水は植物プランクトンや食物連鎖系の高次の諸生産に対して直接または間接的に生産を高める効果を有しており、技術的に深層水の諸特性の有効利用を図ることにより、有用な海洋生物の生産やその資源の増大を可能にすることが期待される。

深層水を利用する技術形態としては、海域の有光層まで深層水を揚水し、海域での生物生産を図る「海域生産型」と深層水を陸上部に揚水し、ここで生物生産を図る「陸上生産型」に大別される。本研究では、技術的実現の可能性が極めて高い「陸上生産型」を取り上げ、その技術開発動向、我が国における立地可能地点および栽培漁業分野に対する深層水利用のニーズを調査し、最後に、土木工学的な見地から深層水取水施設の合理的な計画手順について明らかにする。陸上生産を可能にする深層水供給システムの概念を図-2に、また各構成部の機能を表-1に示す。

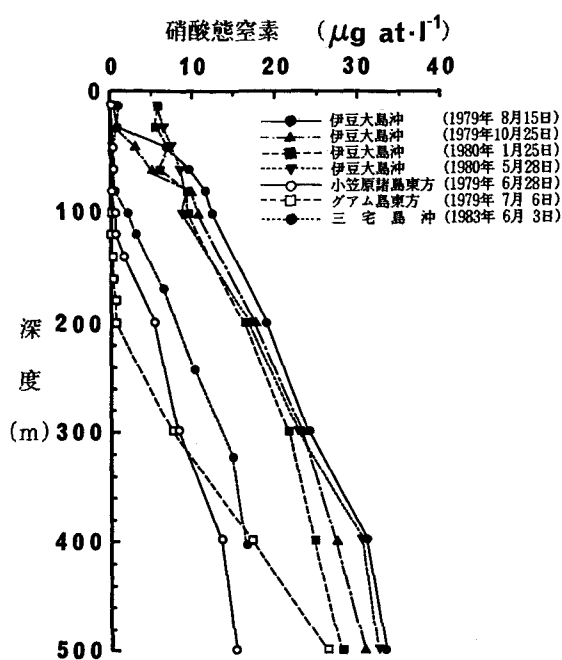


図-1 硝酸塩の鉛直分布

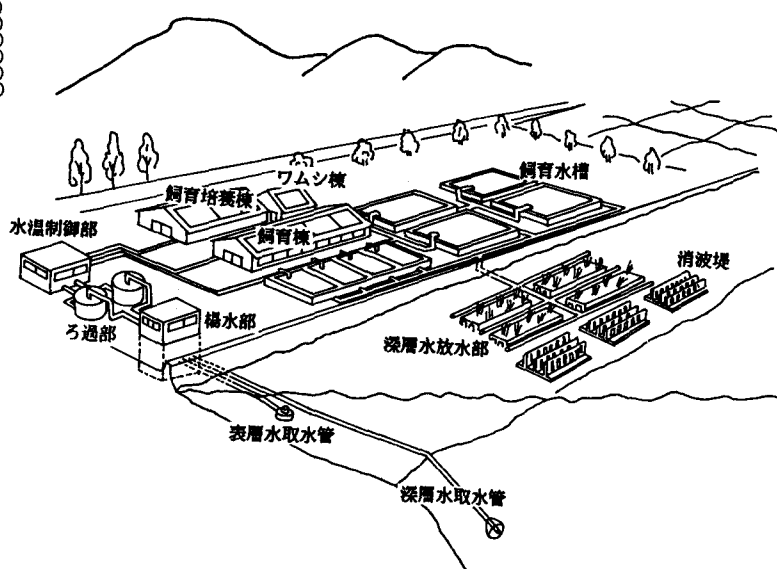


図-2 深層水供給システムの概念

表-1 深層水供給システムの各構成部の機能

構成部	機 能
深層水取水管	可撓性等の物性および施工性や経済性に優れた管材料から成り、水深数百mの地点から、深層水が本来有している低水温性、富栄養性、清浄性を損なわないで取水する。
表層水取水管	植物プランクトンの生産効果を高めたり魚介類の飼育水温を制御するために、深層水と混合する表層水を安定的に取水する。
揚水部	ポンプ揚水方式とし、計画取水量を確保するためポンプをピット内に設けることで外水面近くまで下げ、吸い込み揚程を軽減調整する。
ろ過部	深層水と表面水の一次ろ過を行い、深層水はその清浄性から砂ろ過のみを行う。さらに、より清浄な水質を必要とする餌料生産用あるいは魚介類生産用の海水は各段階において二次ろ過を行う。
水温制御部	餌料生産部および魚介類生産部に供給される海水を所定の水温に制御する。水温制御は深層水と表層水の混合を主たる方法とし、この方法による水温制御が不可能になった時にヒートポンプによる加熱・冷却を行う。
餌料生産部 (餌料培養棟) (ワムシ棟)	魚介類の餌料となる植物プランクトンと動物プランクトンの生産を行い、魚介類生産部へ餌料を連続的に供給する。特に、餌料植物プランクトンのサイズのコントロールを行うための栄養塩濃度の制御機能や生産する餌料の種類に応じての水温制御、光量制御機能を有し、必要に応じて二次ろ過、滅菌処理等を行う。
魚介類生産部 (飼育棟) (飼育水槽)	有用生物の飼育生産を可能とする水質、水温等の飼育環境を制御する。これらの諸元は飼育生産水槽の交換水量によって調整する。また、飼育生産水槽は残餌、残渣等を水槽上部および下部から排水する機能を有する。
深層水放水部	陸上生産プラントからの未利用の栄養塩を含む海水を浅海域に連続放水することにより、海藻類、貝類、えび類等の自然生産力を強化する。

2. 深層水利用技術の現状

湧昇海域の自然現象は「深層水人工湧昇」という技術により、深層水の潜在的生物生産力を引き出そうとする考え方を刺激し、1970年代に入り、海洋生物生産への深層水利用技術の研究開発が着手されだした^{4)・5)}。

現在までに実施された実験と実験施設の概要について述べる。

(1) カリブ海セントクロイ島⁶⁾

1972年にコロンビア大学の Roelsらがカリブ海のセント・クロイ島において、植物プランクトン、海藻、貝類、甲殻類を対象に実験を行った。結果として他の海域での生産と比べて成長が速いことを報告している。

取水は水深870mの地点から行い、管長は 1830m、水温は 7℃、取水量 250ℓ/分であった。取水管はポリエチレン管で管径75mmφのものを3本束ねている。一回目の取水管は台風で破断したことからこのような措置がとられた。生産設備は実験によって換えている。

(2) アラスカ州シュワード⁷⁾

1974年から1977年にかけてアラスカ大学のPaulらがアラスカ・シュワードの野外実験施設において、植物プランクトン、動物プランクトン、魚類、貝類を対象に実験を行った。この結果では動物性プランクトンを除いていずれの種とも当該地域における表層水による飼育に比べて成長の速いことを報告している。

取水深度は高緯度地方に位置するため 75mと浅いが、取水温度は 8～10℃、取水量は 600ℓ/分であった。取水管は塩化ビニール管である。生産設備は 1,000m²の池を2つ使用している。

(3) ハワイ島⁸⁾

1981年からハワイ州立自然エネルギー研究所 (NELH) がハワイ島のKe-ahole pointにおいて海藻、貝類、甲殻類、魚類を対象に実験を行っており、農業への利用についても研究をしている。生産実験の結果、アワビについては商用化の見込みが得られ、サーモン、ロブスター、海苔などの生産も有望視されている。

取水深度は610mで水温は 6～8℃、取水量は最大 350m³/h (約 5,800ℓ/分) で、3段階に分けて取水できる。取水管は塩化ビニール管で、管径は 300mmφである。NELHでは深層水を売る形で施設を民間に解放しており、事業規模の生産も試行されている。

(1) 深層水の取水立地条件と適合海域

(北海道) 渡島半島西部
 奥尻島 等
 (青森県) 深浦町
 (山形県) 酒田市飛島
 (新潟県) 佐渡島
 糸魚川市
 (富山県) 富山港沿岸
 (石川県) 能登半島東岸
 (福井県) 越前岬
 (千葉県) 房総半島南部
 (東京都) 伊豆諸島
 (神奈川県) 相模湾沿岸
 (静岡県) 相模湾沿岸
 駿河湾沿岸
 福田町
 (三重県) 尾鷲市
 (和歌山県) 那智勝浦町
 潮岬 他
 (高知県) 室戸岬東部
 沖ノ島 他
 (鹿児島県) 薩南半島南部
 鹿島列島
 大隅諸島
 宇治群島
 (沖縄県) 尖閣諸島
 (沖縄県) 沖縄諸島
 先島諸島

圖一3 適合海域

地域性を踏まえた栽培漁業分野の現状と深層水に対するニーズを明らかにするために、前述した代表的な海域特性を有する地域の中から富山県、高知県および沖縄県を取り上げ現地調査を行った。主要な結果を表-2に示す。現状技術における栽培漁業分野の主な問題点としては、貧栄養海域における餌料生産（例えば、付着珪藻の連続生産等）等があげられ、これらの対策として深層水の利用技術、特有効利用に対する期待が大きかった。さらに深層水利用技術期待とともに、亜熱帯海域では、温帯海域の増・養殖技術水利用技術を位置づけるニーズも高かった。

表-2 深層水に対するニーズ

深層水の特性	深層水に対するニーズ	栽培漁業の現状と問題点
富栄養特性	付着餌料珪藻類の安定生産	・ 付着餌料珪藻類が貧栄養海域では、安定生産できないので、付着期の貝類、ウニ類等の種苗生産が困難である。 ・ 付着稚貝飼育時の飼料不足によるへい死を改善したい。
	浮遊餌料藻類の生産制御	・ 餌料珪藻類の成長速度を制御したい。 ・ 連続培養法による餌料の連続生産（大量生産）をしたい。
	海域生産力強化および造成	・ 増・養殖技術を導入するために、自然海域の基礎生産力強化と生産場の造成を図りたい。 ・ 藻場（ホンダワラ等）の造成、流砂の防止、食害の防止等により沿岸水産資源増強のための環境を造成したい。
低水温特性	稚仔魚介類の生産率の向上	・ 高水温による早期採卵幼生のへい死を防止したい。 ・ 水温上昇期の稚貝のへい死を防止したい。
	疾病死亡の防止	・ 夏季の高水温（23℃以上）が魚介類疾病の誘発原因になるので水温管理を図りたい。
	新魚介類種の飼育生産	・ 同一海域で冷水性と暖水性の両方の生物種を飼育生産したい。 ・ 温帯域型の増・養殖技術を熱帯・亜熱帯域に技術移転するための技術開発場を強化したい。
清浄特性	良質飼育水の確保	・ 疾病による稚仔魚介類の死亡率を低下させるために病原菌等の少ない飼育水が欲しい。 ・ 水質悪化の原因となる可分解性物質（有機物）の少ない飼育水が欲しい。

4. 深層水取水施設に関する検討

深層水取水管路、表層水取水管路および取水ピット（ポンプ施設を含む）から成る深層水取水施設の計画においては、生物生産面および事業面から①栄養塩、低水温、清浄等の特性保持と取水量の確保、②ランニングコストを考慮した取水施設コストの低減化、の二つの事項を満たすように具体化することが重要である。しかし、現在までのところ生物生産のための陸上深層水供給システムが実用化されていないため、前記の事項を配慮した取水施設の設計計画を具体化する手法は確立されていない。そこで、本研究では取水施設の計画を具体化する場合に対して、どのような手順、方法で検討すれば合理的な計画ができるかについて明らかにする。そして提案した手順に従って具体的なケーススタディを行う。

(1) 深層水取水施設計画における留意事項

深層水取水施設計画においては、富栄養性、低水温性および清浄性という深層水の特徴を損なわずに所定の取水量を維持しなければならないこと以外にランニングコストも含めた施設使用年数間のトータルコストの低減化が重要な課題となる。また、取水管路は漁業関連を主とした海域利用区域に設置されるため、これらに悪影響を及ぼさないように配慮することが必要である。このようなことを念頭において、深層水取水施設を具体的に計画する場合の留意事項をまとめて図-4に示す。

(2) 深層水取水施設の計画手順

前述した留意事項を考慮した深層水取水施設の計画手順を図-5に示す。深層水取水管路は厳しい海象条件下の、しかも大水深地点に設置されるため管路の敷設および埋設は現状の施工技術レベルの制約をうける。また取水管は敷設上から十分な可撓性と強度が要求される。すなわち管設置形式、管材料の選定では施工方法との関連をあらかじめ十分考慮することが必要である。この点は、施工方法がさほど計画上の支配的要素とならない一般の陸上配管とは大きく異なるところである。

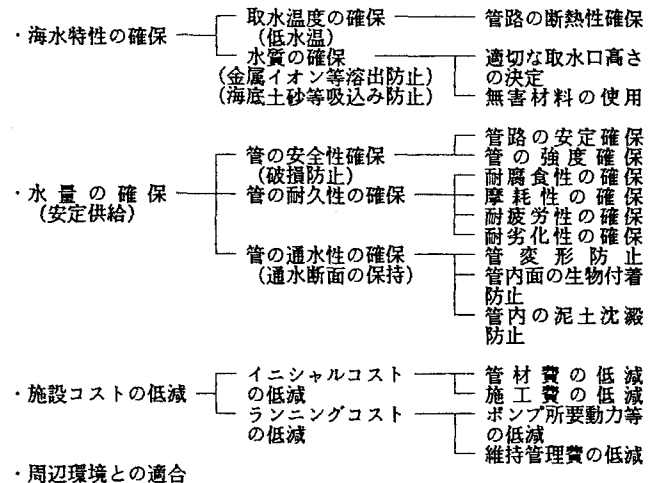


図-4 深層水取水施設計画における留意事項

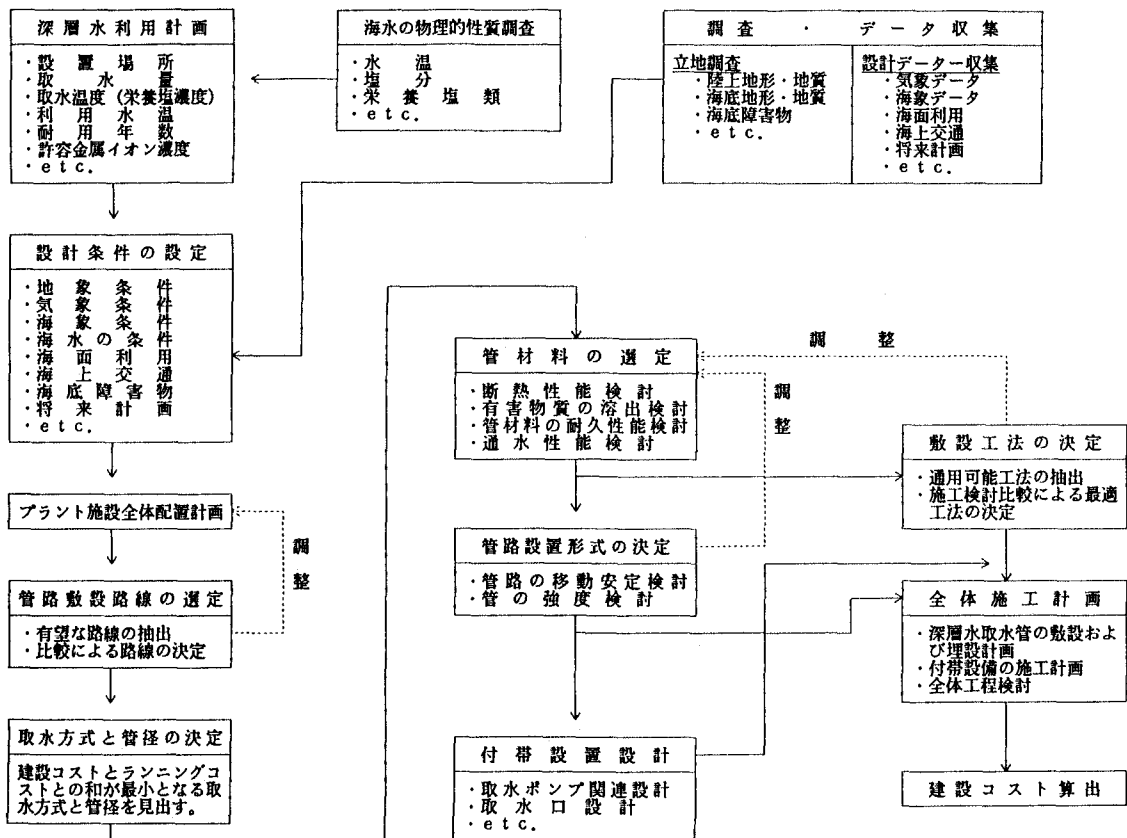


図-5 深層水取水施設の計画手順

(3) ケーススタディ

計画手順に従って、深層水取水施設の具体的なケーススタディを行う。

a) 条件

計画条件および海象条件をそれぞれ表-3、表-4に示す。また、海底地形・地質条件を図-6に示す。

表-3 計画条件

項目	計画条件
施設設置場所	高知県室戸岬東岸海域
計画取水量	深層水 1500 m ³ /日
	表層水 1500 m ³ /日
取水地点	深層水 DL - 250 m
	表層水
施設の耐用年数	20年
施設の計画地盤高	DL + 2.0 m
取水揚程レベル	DL - 10.0 m
取水海水の温度	20℃以下(深層水)
性状	水質 有害金属イオンが混入しない

表-4 海象条件

項目	条件
潮位	H.H.W.L. = DL + 3.40m
	H.W.L. = DL + 1.80m
	L.W.L. = DL ± 0.00m
波浪	H ₃ = 10.9m (有義波高)
	T = 16sec (周期)
海流	最大流速 V _{max} = 1.0m/sec
	流向 : 管路軸直角方向

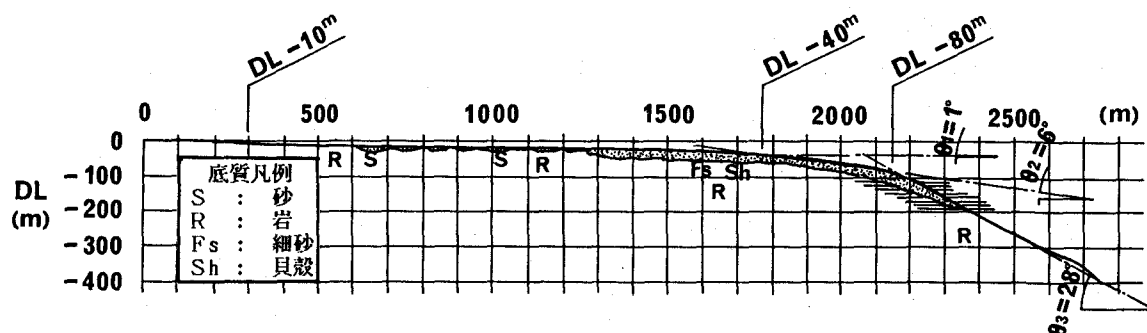


図-6 海底地形・地質条件

b) 取水方式と管径

取水方式としては、自然流下方式とポンプ揚水方式が考えられる。自然流下方式ではポンプ吸い込み揚程(5~7m)を期待しないためポンプ揚水方式に比べて地下ビットは深くなり、建設コストが高くなることから取水方式はポンプ揚水方式とする。深層水取水管路の水理計算から、150mm以下の管径においては摩擦損失水頭が大きいため動水勾配を確保するのに深さ30m以上の大深度の地下ビットが必要となる。また、管径300mm以上では0.3m/s以下の小さい流速となり、土砂の管内堆積の問題が生じる。以上のことから管径は200~250mmの範囲で検討することとした。そしてコスト(材料費+工事費)の比較から、深層水取水管の管径として200mmを選定した。

c) 管材料の選定

海象条件が厳しく、海底地形の凹凸が激しい海域における管材料としては経済性はもちろんのこと可撓性、耐久性、耐衝撃性、断熱性に優れたものでなくてはならない。硬質塩化ビニル管および強化プラスチック管(FRP管)は敷設時の耐衝撃性、摩耗、きずの発生などの問題があり、また海底配管としての実績がほとんどないことから適用は難しい。一方、鋼管は防食被覆を施さないものでは耐久性、水質保持性(金属イオンを溶出しない)および断熱性の欠点を有するが、管内防食ライニングおよび断熱性能向上のための処理を施すことにより適用が可能になる。また、硬質ポリエチレン管は硬質塩化ビニル管および強化プラスチック管と同様な欠点を有しているが、これらの欠点を補うものとして鋼線入りのものがある。以上のことから、要求を満足する管材料は断熱処理を施したポリエチレン被覆鋼管と鋼線入りポリエチレン管である。図-7に両者のコスト比較を示す。ただし、比率(%)は径50mmの鍍装ポリエチレン管の材料費を100%として表している。また工事費は管を海底面上に沈設するまでの敷設費を含み、管材ごとに経済性の高い敷設工法で算出している。この結果から断熱処理を施したポリエチレン被覆鋼管を採用した。

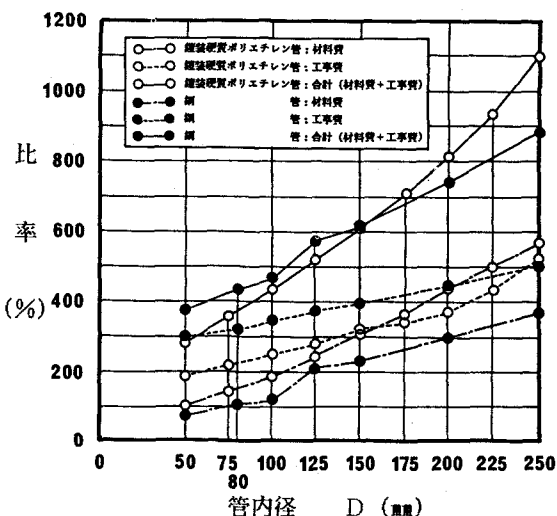


図-7 鍍装硬質ポリエチレン管と鋼管とのコスト比較

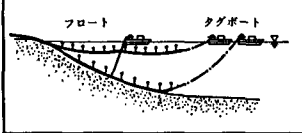
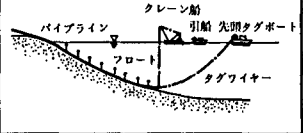
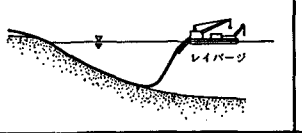
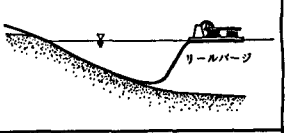
d) 管路設置形式

管路は海底面上に自然着底形式で設置されるのが施工性、経済性等の面で好ましいが、波浪および流れに対して管路が移動、破損しないこと、および投錨、走錨による管路の破損、漁業への影響等を考慮して設置形式を選定する必要がある。本ケーススタディでは、管路は汀線より沖合 2.5 km まで敷設され、管路全延長の大半は海面利用、海上交通の頻繁な大陸棚に設置されることになるが、利用面では不明確な点も多いので、ここでは波浪や流れに対して管径 200mm の管路が安定するかどうかを検討することにより設置形式の選定を行った。まず、波高：19.6m、周期：16s、波向き：管路軸方向に対して $\pm 15^\circ$ 、海流：2ノット、流向：管路軸直角方向、の条件を用いて管路が安定するのに必要な重量を計算したところ、水深60m以深では自然着底方式の採用が可能であるが、水深60m以浅では管重量が不足する結果を得た。水深60m以浅は海底地質上、水深12m以浅の岩盤露出部と水深12～60mの砂層部に分けられ、特に水深12m以浅は、砕波帯に位置し波浪の影響が非常に大きく、また転石があるので管路の防護対策を講じる必要がある。しかし海底地質が岩盤で起伏が著しく岩盤掘削したトレンチ内にコンクリート埋設することは施工的に困難であるので、管の安定重量の確保および転石の衝突に対して铸铁防護管を取り付け、かつアンカーボルトで岩盤に固定する方法を採用した。また水深12～60mでは、砂が2～3m堆積しており地質上および経済性からジェットによる機械埋設とした。

e) 敷設方法

現有の敷設方法を表-5に示す。管径 200mm の鋼管を管延長 2.5km、水深 250m にわたり敷設するためには浮遊曳航法では管延長が長いと、管の敷設線形を許容値内に保持するのに多大な作業船を必要とし敷設費が増大すること、および施工的に多大な作業船を一連の作業に従い制御することが困難なことからまたリールバージ法では使用管材料が鋼管でありリール状に巻けないことから除外した。したがって本ケーススタディでは海底曳航法とレイバージ法が考えられるが、レイバージ法では①現地海底地形は水深90m以深が約 37° の急峻な地形となっており、陸側から沖合に向かって敷設する場合、管の敷設線形保持が難しい、②水深 250m にわたり敷設可能な敷設船は世界に数隻しかない、等の問題点があるので、海底曳航法を採用することにした。

表-5 敷 設 方 法

浮遊曳航法	海底曳航法	レイバージ法	リールバージ法
			
陸上あるいは海上で長管を接続し、フートを取付けて所要延長分海上に引出した後敷設位置を調整してフートを切外し沈設する方法である。	陸上のパイプヤードで長管を製作しこれを沖合に配置したウインチ台船またはタグボート、あるいは対岸にウインチを設置して海底面上を引張り敷設する方法である。	船上で短管を一本づつ接続し、その都度敷設船の位置を移動することで管の送出しと沈設を同時に行い敷設して行く方法である。なお敷設船の移動は係留アンカーを用いる場合と曳船を用いる場合が一般的である。	工場より所要延長分の管をリール状に巻いて積装した敷設船を敷設場所まで曳航した後、レイバージ法と同要領で敷設船を移動、リール状の管を巻戻すことで敷設する方法である。

5. おわりに

本調査研究では、生物生産、特に栽培漁業分野における陸上生産型深層水利用技術を開発するための第一歩として実施したものである。今後、生物生産のための陸上生産型深層水利用技術の経済性を評価するためには、深層水取水施設だけでなく、対象生物種を設定し、その効率的生産を可能にする陸上生産プラントを含めた深層水供給システムの開発ならびに生物生産への深層水利用法に関する研究を重点的に推進する必要がある。なお、本研究の実施にあたり、御指導、御協力いただいた科学技術庁、沖縄県、高知県および富山県の関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 豊田孝義・中島敏光：海洋深層水の生物環境学的特性－生物生産のための新資源－，海洋科学技術センター試験研究報告，No.16, 1986.
- 2) Ryther, J.H. : Photosynthesis and fish production in the sea, Science, 1969.
- 3) 中島敏光・豊田孝義：深層水利用による海域の肥沃化、海洋技術センター試験研究報告資料，No.3, 1979.
- 4) Gerard, R.D., and Wozel, J.L.: Condensation of atmospheric moisture from tropical maritime air masses as a freshwater resource, Science, 1967.
- 5) 前出 3)
- 6) Roels, O.: Artificial upwelling, sea grant NOAA #1-35354, 1974.
- 7) Navé, R.A., Clasby, R.C., Goering, J.J. and Hood, D.W.: Enhancement of primary productivity by artificial upwelling, marine science communications, pp.109～124, 1976.
- 8) The national energy laboratory of Hawaii, annual report, 1983.