

海洋深層水の効率的温度管理システムの開発

Development of efficient temperature management system
for deep seawater

森野 仁夫¹・滑川 隆志²

Kimio MORINO, Takashi NAMERIKAWA

Abstract

In the deep seawater utilization in a recent aquaculture field, only the deep seawater is often used as breeding water without mixing it with the surface seawater to maintain the cleanness of the deep seawater. For these cases, because the water temperature of the deep seawater is low, the technology that heats the deep seawater up to a suitable temperature to breed the living thing of the fishery is demanded.

In this development, the deep seawater temperature management system that efficiently adjusted the temperature by heat recovery from the heat source water such as the breeding drain or the surface seawater was developed. The measurement of the operating situation of this system was executed, and the performance of the equipment and the effect of energy conservation were clarified.

As a result, it was clarified to achieve a big effect of energy conservation compared with the system that did not recover heat, though it differed depending on conditions of the temperature and the flow rate of the heat source water. Moreover, based on the experiment results, an annual heat recovery rate of the development system was presumed, with a parameter of the flow rate ratio of the heat source water and deep seawater.

Key Words: *Water temperature management, Heat recovery, Breeding water, Surface seawater, Energy conservation*

要 旨

最近の海洋深層水利用では、深層水の清浄性を維持するため、表層水との混合によらず、深層水のみを飼育用水として利用する機会が多い。このような場合には深層水の水温が低いため、水産生物の飼育に好適な水温まで深層水を加熱する技術が要求される。

本開発では、飼育排水や表層海水などの熱源水から熱回収を行うことにより、効率的に温度調節を行う深層水温度管理システムを開発し、運転状況の実測調査を行い、システムの運転性能と省エネルギー効果を明らかにした。

その結果、熱源水の水温や流量などの条件によって異なるものの、熱回収を行わないシステムに比べて大きな省エネルギー効果が得られることを明らかにした。また、実験結果を基に、飼育排水や表層海水から熱回収を行う場合の年間の熱回収率を、熱源水と深層水の流量比をパラメーターとして推定した。

キーワード：水温管理、熱回収、飼育排水、表層水、省エネルギー

¹清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

²ダイヤモンドエンジニアリング(株)エンジニアリング事業本部 (〒937-0067 富山県魚津市釈迦堂 1-7-22)

1. 緒 言

従来、水産養殖分野では夏期の表層海水温度の上昇による高水温対策が課題となっており、大量の海水を経済的に冷却する方法が求められていたが、この問題は海洋深層水の導入により、表層水と深層水の混合や熱交換による方法で解決された。しかし、最近の深層水を利用した水産養殖では、深層水の清浄性を維持するため、表層水との混合によらず、深層水のみを飼育用水として利用するケースが増えて来ており、このような場合には深層水の水温が低いいため、水産生物の飼育に好適な水温まで深層水を加熱することが必要とされる。当然のことながら、深層水の加熱には経済的で運転の安定性と信頼性の高い方法が要求される（森野，2000）。

本開発は、飼育排水や表層海水から熱回収を行うことにより、効率的に温度調節を行う深層水温度管理システムを開発し、その運転状況の実測調査を行い、システムの運転性能と省エネルギー効果を明らかにすることを目的として実施したものである（社団法人マリノフォーラム 21，2001，2002，2003，2004，2005）。

2. 効率的温度管理システムの開発

海洋深層水の加熱源

ボイラなどによる機械的な加熱手段を用いずに、海洋深層水を所定の目標水温まで加熱するための熱

源としては、図 1 に示すように、温泉水、表層海水、地下水、飼育排水などの利用が考えられる。

温泉水は温泉排水も含めて一般に魚介類の飼育水温より温度レベルが高いことから、非常に有効な加熱源として利用できるが、立地条件に左右される。表層海水は水温が季節的に変化することから、夏の高温時には加熱源として有効であるが、冬期などには補助熱源が必要となる。地下水や飼育排水の水温は、一般に年間を通して飼育水温より低いため補助熱源との併用が前提となるが、深層水との温度差分の熱回収が可能となり、この分が省エネルギーに貢献する。

なお、飼育排水からの熱回収とは、飼育水として目標温度まで加熱された深層水を飼育水槽へ供給後、そのまま排水するのではなく、飼育水として新規に供給される深層水との熱交換に利用しようとするものである。熱回収の結果、飼育排水は深層水原水温度より数℃ほど高い温度まで冷却されて排水される。立地条件として、温泉水や表層海水、地下水などが利用できない場合でも、飼育排水は必ず利用できる利点がある。

効率的温度管理システムの構成

「深層水多段利用型水産増養殖技術の開発」（2001 年度～2005 年度、(社)マリノフォーラム 21）において、富山県水産試験場内に設置された効率的温度管理システムの設計仕様を表 1 に示す。

システムの設計仕様として、水温制御範囲は水産養殖において多くの魚種に好適な飼育水温とされる

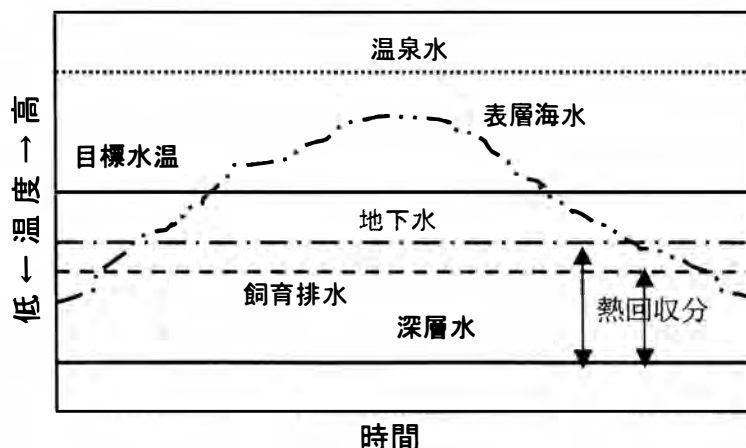


図 1. 深層水の加熱源.

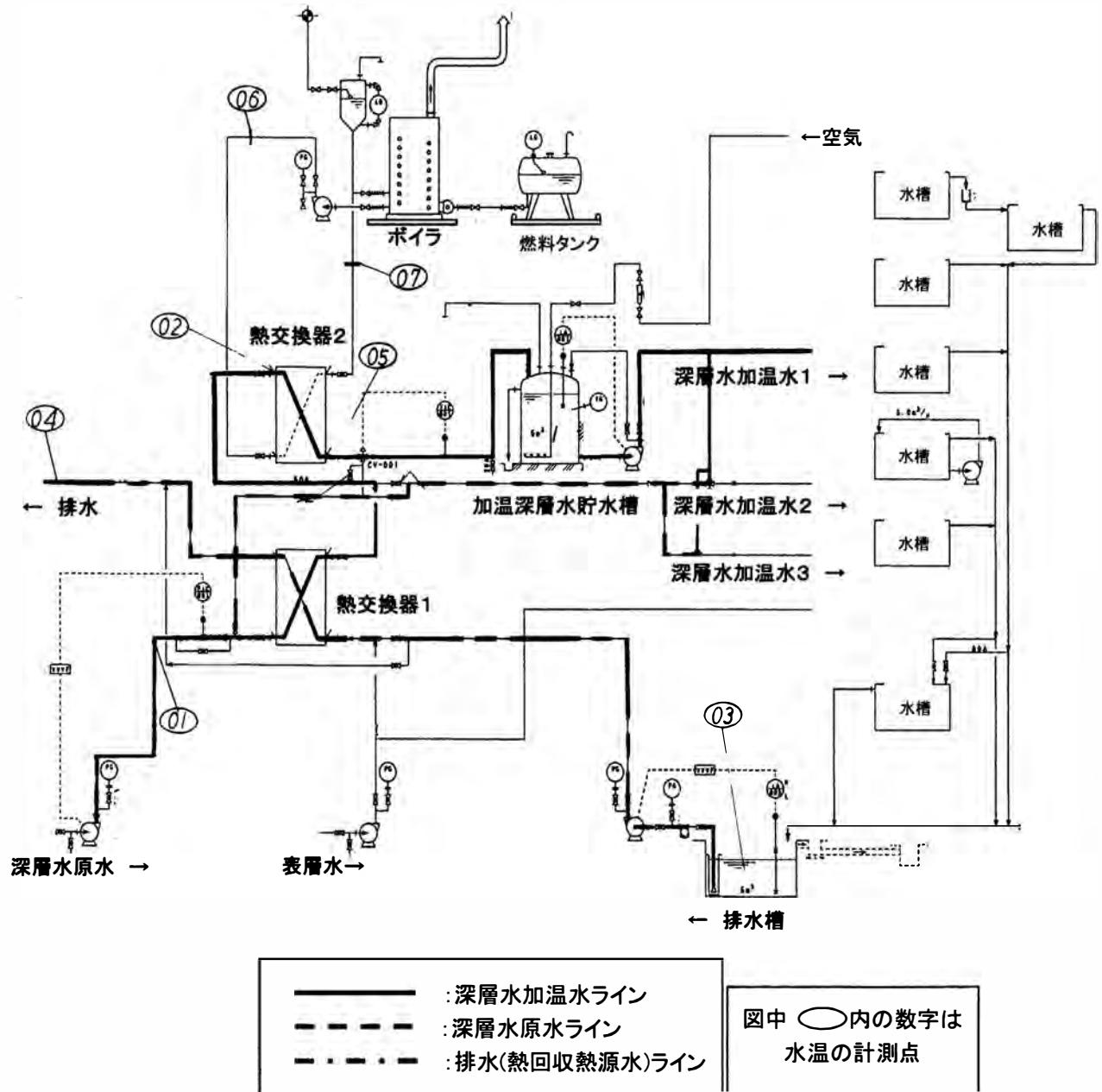


図2. 効率的温度管理システムのフロー.

表1. 効率的温度管理システムの設計仕様

深層水最大供給量	15 m ³ /h
水温制御範囲	深層水原水温度 ~ 20 °C
水温制御精度	設定値 ± 1 °C
加熱能力	
熱交換器 1	630 MJ/h
熱交換器 2	440 MJ/h
ボイラ	440 MJ/h

15 ~ 20 °C (実際の水温制御可能範囲は深層水原水温度から 20 °Cまで) とし、制御精度は設定温度 ± 1 °C とした。深層水最大供給量は「深層水多段

利用型水産増養殖技術の開発」において想定される実験規模から 15 m³/h とした。

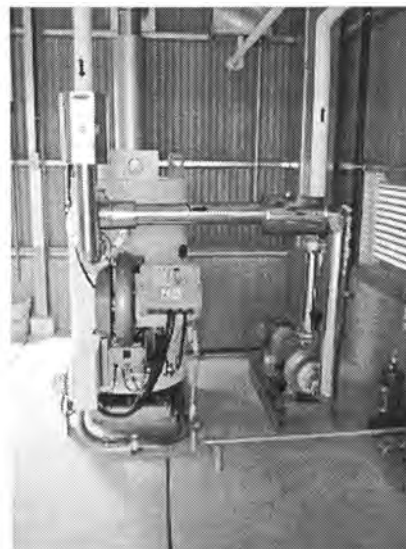
効率的温度管理システムは、図2に示すように深層水の原水を、排熱回収用熱交換器(熱交換器1)と温水加熱用熱交換器(熱交換器2)の2段階で加熱して、飼育用水として使用する加温深層水を経済的に作り出すように構成されている。深層水原水は熱交換器1で排水系統を流れる熱源水から熱回収を行い、成り行き温度に加熱された後、熱交換器2においてボイラーによる加熱で所定の温度に調整され、加温深層水貯水槽に貯留される。加温



排熱回収熱交換器（熱交換器 1）と排水ポンプ



排熱回収用熱交換器（熱交換器 1）：奥
温水加熱用熱交換器（熱交換器 2）：前



灯油ボイラと温水循環ポンプ

図 3. システム構成主要機器.

深層水貯水槽から飼育水槽へ供給される深層水は、バイパス経路から供給される深層水原水と混合されて所定の温度（最大 3 レベル）に調整された後、各々の飼育水槽へ供給される。排熱回収用熱交換器の排水系統を流れる熱源水としては、季節に応じて排水飼育排水または表層水を選択できるようにした。

効率的温度管理システムの設計においては、排熱回収用熱交換器と温水加熱用熱交換器の加熱能力の配分が、初期投資コストと運転コストを考慮したライフサイクルコスト（LCC）評価におけるシステム最適化の課題となるが、今回は、設計と条件から排熱回収用熱交換器の終端温度差（アプローチ）を 2°C として設計した。（最適設計についての詳細は「深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書（2002）」（参考文献）を参照されたい。）

効率的温度管理システムを構成する主要機器の写真を図 3 に示す。排熱回収用熱交換器では温水加熱用熱交換器と比べて、熱交換媒体となる 2 流体の温度差が小さいため、熱交換面積（プレート枚数）が大きくなっている。

3. システム運転状況の実測

システム運転状況の実測は、平成 15 年から平成 16 年にかけて、飼育排水からの熱回収モードと表

層水からの熱回収モード（冬、夏）において行なった。

温度管理システムの計測では、システム各部の水温を測温抵抗体 Pt-100（平成 15 年は T 熱電対）、電力は電力量計、燃料は燃料流量計、流量は単位時間の質量流量で計測した。

計測の記録は、平成 15 年は 1 時間ごとの読み取りで行い、平成 16 年からは水温のみ 10 秒ごとの計測値の 1 分間平均値を PC で自動記録した。

飼育排水からの熱回収モード

平成 15 年 1 月 20 日から 1 月 29 日にかけて、飼育排水からの熱回収モードにおけるシステム運転状況の計測を行った。生物飼育側へは、加温深層水が 3 つの飼育水槽へ並行して、それぞれ 18°C 、 14°C 、 10°C で供給されている状況で、排水槽貯留槽における排水温度は 15°C 弱であった。

システムの運転状況

計測期間において 1 時間ごとに計測したシステム各部の温度と流量の計測結果から、システムの運転は定常的に安定していることが確認された。図 4 には、システム各部の温度と流量の計測値を計測期間の平均値で示す。

図 4 において、深層水原水 $12.0\text{ m}^3/\text{h}$ は熱交換器 1 へ送られ、熱交換器 1 を通過する深層水 $7.5\text{ m}^3/\text{h}$ が排水貯留槽から送られてきた深層水飼育排

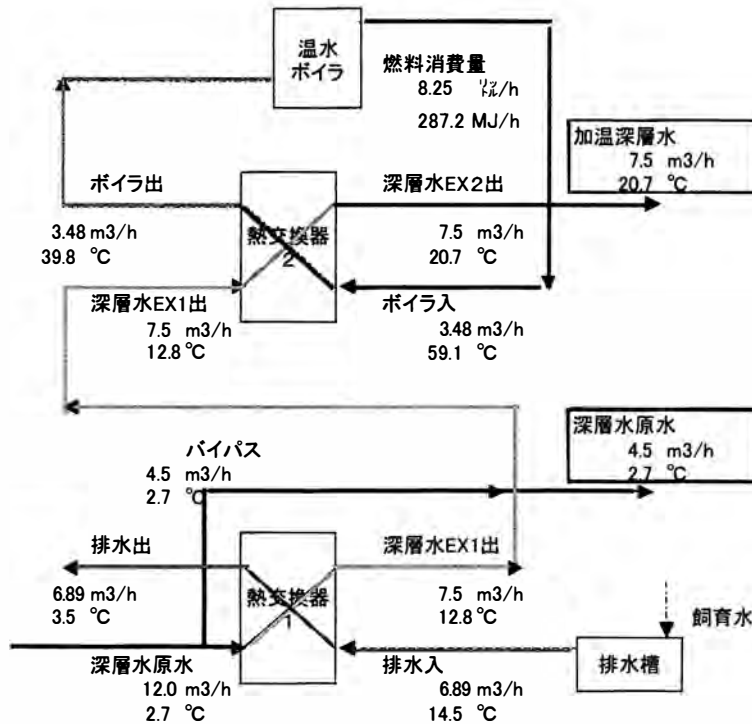


図 4. システム各部の水温と流量 (飼育排水からの熱回収).

水 6.89 m³/h との熱交換によって 12.8 °C まで加温され、熱交換器 2 へ送られる。深層水原水の一部 4.5 m³/h は熱交換器 1 をバイパスして深層水給水温度の調整用に 2 次側へ給水される。

熱交換器 2 へ送られた深層水は、ボイラ温水との熱交換によって設定温度の 20.7 °C に調温され、加温深層水貯水槽に貯留される。このときの、ボイラにおける燃料消費量は 8.25 L/h で、ボイラ効率 は 0.87 であった。

加温深層水貯水槽に貯留された深層水は、熱交換器 1 をバイパスしてきた深層水原水との混合によって水温調整されて、各飼育水槽へ供給される。

システムの省エネルギー効果

システム各部の計測によって、温度管理システムの運転状況が安定していることが確認できたことから、エネルギー解析は図 4 に示した平均値で行なった。

本システムでは深層水排水から熱回収を行なうことによって深層水加温の省エネルギー化を図っているが、熱回収を行わず、全ての加熱をボイラーで行うシステムと比較した場合の省エネルギー率を算出した結果を表 2 に示す。

表 2. 省エネルギー率 (飼育排水からの熱回収).

システム項目	本システム 熱回収あり	従来システム 熱回収なし
1 次エネルギー使用量	363.1 MJ/h	713.6 MJ/h
内訳		
時間当たり灯油消費量	8.246 L/h	18.957 L/h
熱交換器 1 の熱回収量	317.1 MJ/h	
深層水原水供給ポンプ動力	3.7 kW	3.7 kW
排水回収ポンプ動力	2.2 kW	0.0 kW
ボイラ温水循環ポンプ動力	1.5 kW	1.5 kW
省エネルギー率=	0.491	

本システムにおいて、深層水原水を所定の給水温度まで加熱するに要する投入エネルギーは、ボイラの燃料と深層水原水供給ポンプ、排水回収ポンプおよびボイラ温水ポンプの電力である。

一方、熱回収を行わない場合は、深層水の全量をボイラで加熱することになり、排水回収ポンプの電力が不要になる。

表 2 より、本システムの省エネルギー率は 50 % 程度と推定され、熱回収を行なうことにより、大きな省エネルギー効果があることが確認された。

ここにおいて、従来システムの燃料使用量は、灯油の低位発熱量を 43.5 MJ/kg (10,400 kcal/kg, 比重 0.8) として、また、電力の 1 次エネルギー換

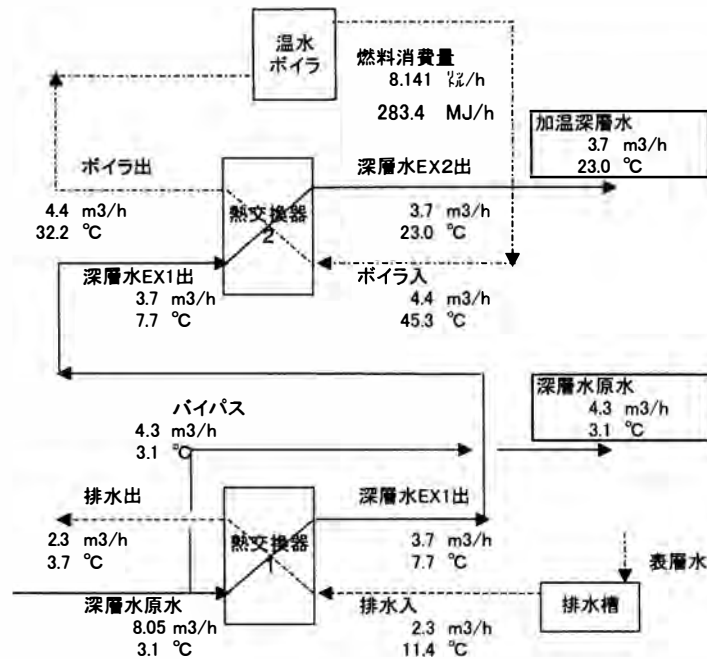


図 5. システム各部の水温と流量 (表層水からの熱回収：冬期).

算係数は $1 \text{ kWh} = 10.256 \text{ MJ}$ として求めた.

冬期における表層水からの熱回収モード

平成 16 年 2 月 11 日から 2 月 18 日にかけて、冬期における表層水からの熱回収モードにおける運転状況の計測を行なった。生物飼育側では多段飼育実験が行なわれており、多段システムを構成する 3 つの飼育水槽の水温は、それぞれ $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ に設定されていた。このため、最終水槽からの排水は $8 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度で排水されており、熱回収源として、比較的高温の深層水排水が得られない状況であった。したがって、温度管理システムの実際の運転では、この季節において水温が $11 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度で安定している表層水を排水貯留槽へ導入して、深層水飼育水排水の代替となる熱回収源として使用している状況であった。

システムの運転状況

システム各部の温度と流量の計測結果から、温度管理システムの運転は安定して行なわれていることが確認された。図 5 には、システム各部の温度と流量の計測値を計測期間の平均値で示す。

図 5 において、深層水原水 $8.05 \text{ m}^3/\text{h}$ は $3.1 \text{ }^\circ\text{C}$ で熱交換器 1 へ送られ、そのうち $3.7 \text{ m}^3/\text{h}$ が熱回収源である表層水で加熱され $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$ に上昇して熱交

換器 2 へ送られる。残りの $4.3 \text{ m}^3/\text{h}$ は熱交換器 1 をバイパスして $3.1 \text{ }^\circ\text{C}$ で 2 次側へ送られている。この間、熱回収源となる表層水は $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$ が $11.4 \text{ }^\circ\text{C}$ で流入し、 $3.7 \text{ }^\circ\text{C}$ まで温度低下して系外へ放水されている。このときの熱源水である表層水 (SSW) と、被加熱側となる深層水 (DSW) との流量比 (S/D) は 0.62 となっている。

熱交換器 2 へ送られた $3.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$ の深層水は、ボイラ温水との熱交換で加熱されて $23.0 \text{ }^\circ\text{C}$ で加温深層水水槽へ送られている。このときのボイラの燃料消費量は 8.141 L/h 、燃料発熱量は 283.4 MJ/h (67.7 Mcal/h)、ボイラ効率は 0.84 であった。

また、図 5 において熱交換器の熱交換性能を見ると、熱交換器 1 入口の深層水原水温度と熱交換器 1 の排水出口温度の差 (アプローチ) は、平均で $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度となっている。一般的な熱交換器の設計では、熱回収量と熱交換器所要面積の経済的な最適化の観点から、この温度差 (アプローチ) は $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度で設定されることから、本システムでは排水からの熱回収が積極的に、かつ、効率的に行われていることが確認される。

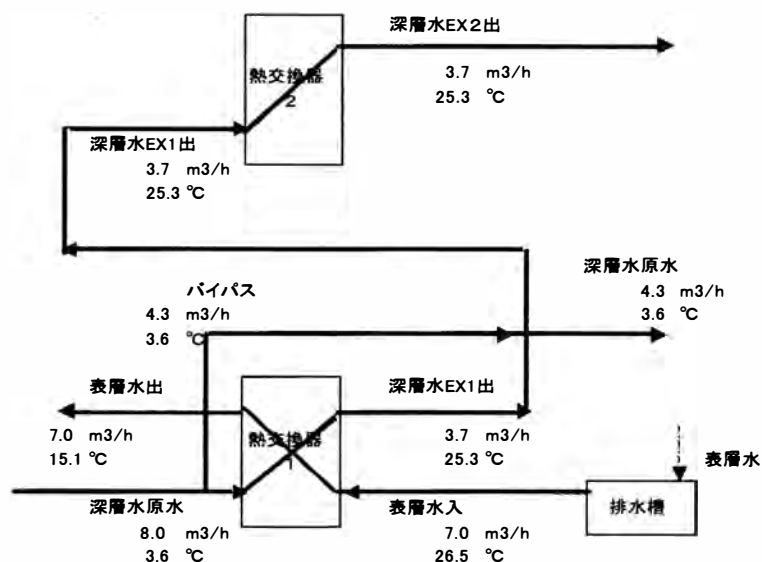


図 6. システム各部の水温と流量 (表層水からの熱回収：夏期).

システムの省エネルギー効果

システム各部の計測によって、温度管理システムの運転状況が安定していることが確認できたことから、エネルギー解析は、図 5 に示した平均値を基にして行なった。

この結果、本システムと非熱回収システムの 1 次エネルギー投入量は、3.1 と同様の考え方で表 3 のように求められ、本システムにおいては、今回の運転状況のように低水温の熱回収源しか得られない場合においても、非熱回収システムに比べて 15 % 程度の省エネルギー効果が得られることが確認された。

夏期における表層水からの熱回収モード

平成 16 年 8 月 11 日から 8 月 30 日にかけて、夏期における表層水からの熱回収モードでの運転状況の計測を行なった。生物飼育側では 3.2 と同様の多段飼育実験が行なわれており、最終水槽からの排水は 8 °C 程度で、熱回収源として比較的高温の深層水排水が得られない状況であった。したがって、温度管理システムの実際の運転では、この季節において平均水温が 26 ~ 28 °C 程度と高くなる表層水を排水貯留槽へ導入して、深層水飼育水排水の代替となる熱回収源として使用している状況であった。

システムの運転状況

システム各部の温度と流量の計測結果から、温度管理システムの運転は安定して行なわれていること

表 3. 省エネルギー率 (深層水からの熱回収：冬期)

システム項目	本システム 熱回収あり	従来システム 熱回収なし
1 次エネルギー使用量	359.4 MJ/h	420.7 MJ/h
内訳		
時間当たり灯油消費量	8.141 L/h	10.548 L/h
熱交換器 1 の熱回収量	71.2 MJ/h	
深層水原水供給ポンプ動力	3.7 kW	3.7 kW
排水回収ポンプ動力	2.2 kW	0.0 kW
ボイラ温水循環ポンプ動力	1.5 kW	1.5 kW
省エネルギー率 =	0.146	

が確認された。図 6 には、システム各部の温度と流量の計測値を計測期間の平均値で示す。

図 6 において、深層水原水 8.0 m³/h が 3.6 °C で熱交換器 1 へ送られ、そのうち 3.7 m³/h が熱回収源である排水 (表層水) で加熱されて 25.3 °C に上昇して熱交換器 2 へ送られ、残りの 4.3 m³/h は熱交換器 1 をバイパスして 2 次側へ送られている。この間、熱回収源となる表層水は 7.0 m³/h が 26.5 °C で流入し、15.1 °C まで低下して系外へ放水されている。

熱交換器 1 において設定温度の 20 °C より高い温度にまで加温された深層水は、計測期間中、熱交換器 2 においてボイラからの加熱をまったく受けていない。

システムの省エネルギー効果

システム各部の計測によって、温度管理システムの運転状況が安定していることが確認できたことか

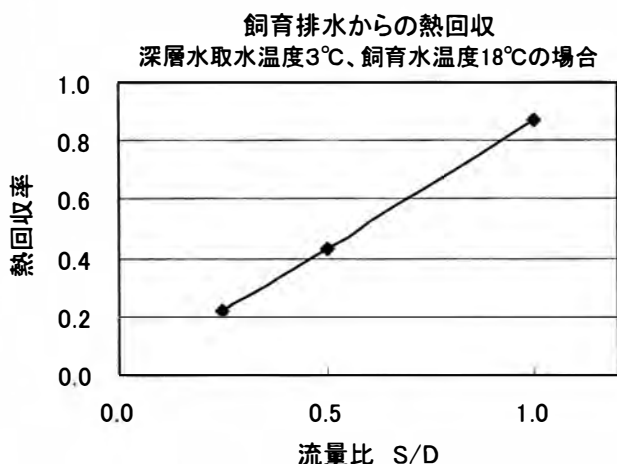


図7. 飼育排水を回収熱源とした場合の熱回収率。

表4. 省エネルギー率（表層水からの熱回収：夏期）

システム項目	本システム 熱回収あり	従来システム 熱回収なし
1次エネルギー使用量	60.5 MJ/h	448.7 MJ/h
内訳		
時間当たり灯油消費量	0.0 L/h	11.353 L/h
熱交換器1の熱回収量	336.1 MJ/h	
深層水原水供給ポンプ動力	3.7 kW	3.7 kW
排水回収ポンプ動力	2.2 kW	0.0 kW
ボイラ温水循環ポンプ動力	0.0 kW	1.5 kW
省エネルギー率＝	0.865	

ら、エネルギー解析は、図6に示した平均値を基にして行なった。

図6の結果をもとに求めた熱交換器1の熱回収量と省エネルギー効果を表4に示す。

本システムにおいて、深層水原水は熱交換器1で表層水から336.1 MJ/hの加熱を受けており、熱交換器2における灯油の使用量はゼロであった。すなわち、深層水原水は25.3℃までの加熱量の100%を表層水から受けており、熱回収率は100%であった。

また、本システムにおいては、深層水原水供給ポンプと排水ポンプの動力分のエネルギーを使用しており、非熱回収システムではボイラ温水循環ポンプが運転されることを考慮して求めた、本システムの非熱回収システムに対する省エネルギー率は約85%となった。

今回の計測においては、夏期における表層水の水温が26～28℃と高いことから、表層水からの熱

回収によってボイラ運転がまったく不要となり、大きな省エネルギー効果が得られることが確認された。

4. 飼育排水と表層水からの熱回収率の推定

深層水温度管理システムの運転状況の実測結果を基にしたシステム構成機器の性能解析の結果から、飼育排水や表層海水から熱回収を行う場合の、本システムの年間の熱回収率を熱源水（SSW）と深層水（DSW）の流量比S/Dをパラメーターとして推定した。ここにおいて、熱回収率＝回収熱量／深層水原水を飼育水温度まで加熱するに要する熱量、とした。

生物飼育排水を回収熱源とする場合

今回の計測によるシステム各部の水温変化の状況より、排水貯留槽の水温は飼育水温度から1℃程度低下し、熱交換器1における深層水原水温度と排水出口温度の温度差（アプローチ）は1℃程度となることが確認された。

この実測結果を基に、本システムにおいて生物飼育排水を回収熱源として、深層水原水温度を3℃、飼育水温度を18℃とした場合の年間の熱回収率を推定した結果を図7に示す。

図7において、熱回収率は飼育排水と深層水の流量比S/Dによって直線的に変化し、深層水と飼育排水が同量の流量比S/D＝1.0で85%程度、飼育排水の量が深層水の1/4となる流量比S/D＝0.25で20%程度になるものと推定される。

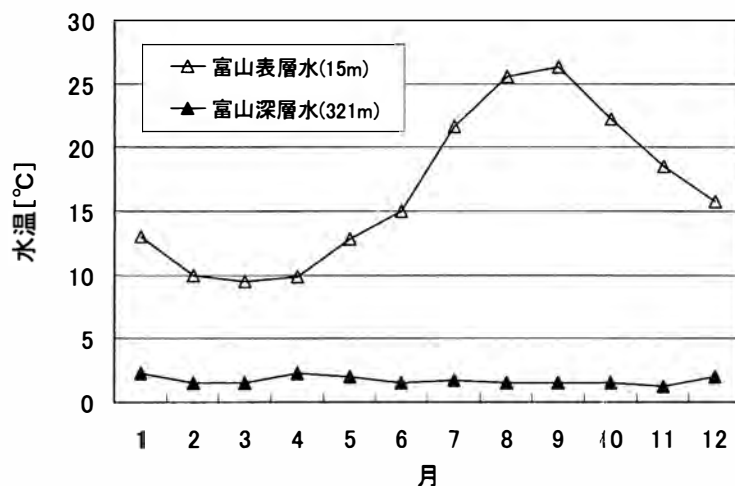


図8. 富山県水産試験場における深層水と表層水の年間水温変化.

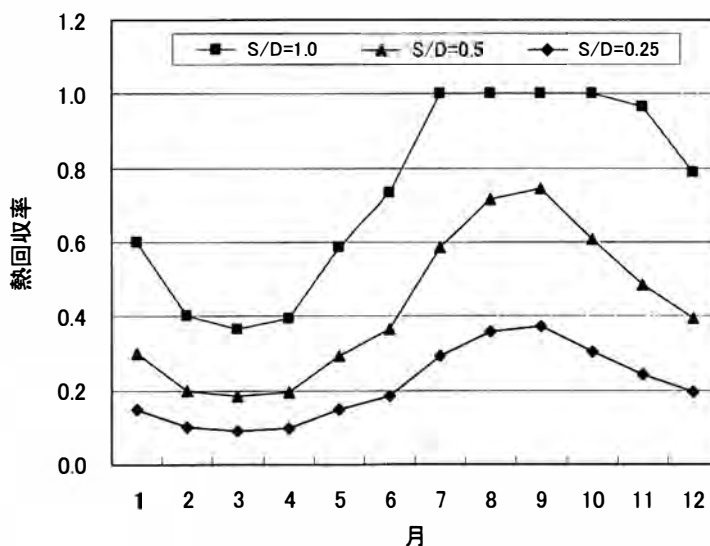


図9. 表層水を回収熱源とした場合の熱回収率の変化.

表層海水を回収熱源とする場合

富山県水産試験場における深層水と表層水の月平均水温の推移（三森・中島，2001）を図8に示す。深層水は年間を通じて2～3℃で安定して推移しており、表層水は年間10～26℃と大きく変化している。

図8に示す深層水と表層水の温度条件において、表層水を熱回収源として、また、飼育水温度を18℃とした場合の本システムの年間の熱回収率は、本システムの表層水を熱源水とした熱回収運転の実測において熱交換器1のアプローチが1℃程度となることが観測されていることから、表層水温度の季節変化と流量比S/Dの変化によって、図9に示すように変化するものと推定される。

すなわち、表層水と深層水の水量が同量となる流量比 $S/D = 1.0$ の場合、夏期の熱回収率は100%で、他の加熱エネルギーは不要となり、表層水の水温が低下する期間でも40%程度の熱回収率が期待される。また、表層水の水量が深層水の水量の1/4となる $S/D = 0.25$ でも、表層水の水温が高い夏期には40%弱の熱回収率が期待でき、表層水が低水温となる時期でも10%程度の熱回収率が期待できる。

5. 結論と今後の課題

飼育排水や表層海水から熱回収を行うことにより効率的に温度調節を行う深層水温度管理システムの

実証実験の結果から、排熱回収は大きな省エネルギー効果を有することが確認された。

この結果、熱回収を行わないシステムと比較した設備投資額の単純回収年数は、設定水温 20℃、深層水供給量 15 m³/h、稼働率が 100% の場合で 2 年以下（排熱回収に要する設備投資額をエネルギーコストの差額で除した値）となり、排熱回収は LCC の観点からも非常に有効な手段と判断される。（本システムの経済性評価についての詳細は「深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書（2001）」（参考文献）を参照されたい。）

一方、排熱回収における保守上の問題点として、飼育排水からの熱回収を継続的に行なうためには、排水貯留槽や排水熱交換器のメンテナンスが不可欠であり、これらの保守作業が現場にとって大きな負担になれば、いくら省エネルギー効果が大きくても、排水熱回収システムの導入は敬遠されることになる。飼育水排水からの熱回収を行う場合には、排水中の汚れや残餌の処理を自動化して、排水貯留槽や排水熱交換器の保守管理が容易に出来るように計画することが必要である。

謝 辞

本論文は、(社)マリノフォーラム 21 で平成 12 年度から平成 16 年度まで実施した「深層水多段利用型水産増養殖技術の開発」における開発項目の一つとして行なった「効率的温度管理システムの開発」の成果をまとめたものである。関係者の皆様に、記して、感謝の意を表します。

文 献

- 三森智裕・中島敏光（2001）深層水利用施設における熱エネルギー量及び物質の供給能力について。海深研，2，23-27。
- 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，22，54-55。
- 社団法人マリノフォーラム 21（2001）効率的温度管理システムの開発。深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書，15-31。
- 社団法人マリノフォーラム 21（2002）効率的温度管理システムの開発。深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書，49-54。
- 社団法人マリノフォーラム 21（2003）効率的温度管理システムの運転性能評価。深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書，35-40。
- 社団法人マリノフォーラム 21（2004）効率的温度管理システムの運転性能評価。深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書，29-37。
- 社団法人マリノフォーラム 21（2005）効率的温度管理システムの開発。深層水多段利用型水産増養殖技術の開発に関する報告書，印刷中。

（2005. 9. 13 受付，2005. 11. 16 受理）