

大規模水族館のライフサポートシステムにおける節水計画

Water-saving plan for life support systems in large-scale aquariums

株式会社 竹中工務店
Takenaka Corporation

坂本 馨
Kaoru Sakamoto

キーワード：循環ろ過(Circulation filtration)、井水処理(Well water treatment)、
海水取水(Seawater intake)、オゾン処理(Ozone treatment)、
水流シミュレーション(Water flow simulation)

1. はじめに

日本最初的水族館は、1897年(明治30年)に神戸市で開催された第2回大日本水産博覧会に合わせ開設された和田岬水族館と言われている。その流れを汲んで1957年(昭和32年)に須磨海浜公園に須磨水族館が新設され、1987年(昭和62年)に須磨海浜水族園と名称を改め、全面建替えされた。いずれも我が国を代表する規模と設備を有する水族館として、長く市民に親しまれてきた。しかし、築30年以上が経過し、施設の老朽化や展示の魅力低下が顕著となったことから、水族館の建替えを中心とした海浜公園エリアの抜本的な再整備を民設民営によって行うこととなり、2024年6月に国内有数の規模を誇る水族館 神戸須磨シーワールドとして生まれ変わることとなった。展示総水量は旧施設の約3,250 m³から約13,000 m³へと大幅に増え、飼育排水を全量公共下水道に放流する必要がある本計画地の特性上、下水インフラ負担低減及び下水処理場への負荷低減の観点から排水量削減が求められた。本稿では水族館の心臓部であるライフサポートシステムにおける節水計画について報告する。

2. 計画概要

2.1 施設概要

本計画は自然海岸の景勝地に立地する水族館を核とした既存の海浜公園の景観や環境を保存・育成しながら、地域コミュニティと観光リゾートが融合する新しい施設に再整備する計画である。

水族館は、魚類や海獣類を飼育・展示する一般的な水族館「アクアライブ」、飼育生物の屋外プールと飲食・物販店舗を有する「ドルフィンスタジアム」「オルカスタジアム」の合計3棟によって構成されている。

表 1. 施設概要

	アクアライブ	ドルフィン スタジアム	オルカ スタジアム	合計
建築面積 (m ²)	3,681	*3489	*4754	3,681
延床面積 (m ²)	8,859	6,051	8,811	23,721
建物高さ (m)	20	27	28	-
展示総水量 (m ³)	8,501	2,349	2,156	13,006

※プール面積除く

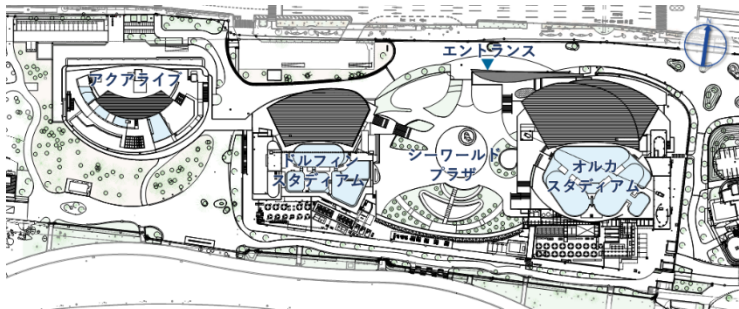


図 1. 配置図



写真 1. 施設鳥瞰

2.2 ライフサポートシステム

水族館の水処理設備はライフサポートシステムとも呼ばれ、展示生物にとって、その住環境となる飼育水を常に良好な状態に保つことで、その生命や健康を維持するまさに生命維持装置（Life Support System）である。

飼育水の水利用方式は、水槽内の水を連続的に浄化処理し再利用することで新鮮海水による1日あたりの補給水量を水槽容量の数%~10%程度に留める閉鎖循環方式とすることが、水質や水温のコントロールの観点からも一般的である。閉鎖循環方式では生物の排泄物、残餌由来の懸濁物質の発生、アンモニアの増加のほか、溶存酸素量の低下、藻類や雑菌の繁殖等によって飼育水の水質が悪化する。これは展示生物にとって好ましくない水環境となり、また来館者にとっても展示生物の視認性が悪化して展示効果が損なわれるため、濾過循環設備、取排水設備、薬注殺菌装置、温度調節装置、空気源装置等からなるライフサポートシステムによって適切に処理することが必要となる。

3. 水源及び取水システム

3.1 海水

生物に適した飼育水の確保は極めて重要であり、水族館の根幹をなすものである。清澄な海水を年間通して安定的に取水することにより水使用量を最小限に抑えることが可能となる。当該地は瀬戸内海に面していることから、旧施設では近接する護岸に取水ポンプを設置し揚水管で直接取水する方式であった。そのために、吸込揚程の限界から水深4m程度の表層水を取水していたため、水質や水温の安定性に欠け、貝類を中心とした付着生物による揚水管の閉塞も課題となっていた。加えて阪神・淡路大震災の際には、送水管が複数箇所破損するなどして、数日間にわたり取水不能に陥った。

新施設ではこれらの経験を教訓とし、水質、水温の安定性に優れ、また、信頼性も大きく向上する沖合自然導入鉛直取水方式を採用した。

取水ポイントは、①十分な取水水深の確保、②取水管敷設工法として採用された推進工法の施工限界、③関係官庁および周辺関係者との協議を踏まえて決定された。当該地域には離岸堤や潜堤といった海岸保全施設があり、また、阪神高速の延伸による地下トンネル建設が予定されていることからこれらとの干渉を避けるよう取水管の敷設ルート及び深度を慎重に計画した。取水管敷設工事は前述の推進工法によって行い、海底掘削工事を取水先端周辺のエリアに限定することで海水浴客や周辺漁業への影響を最小にするように配慮した。

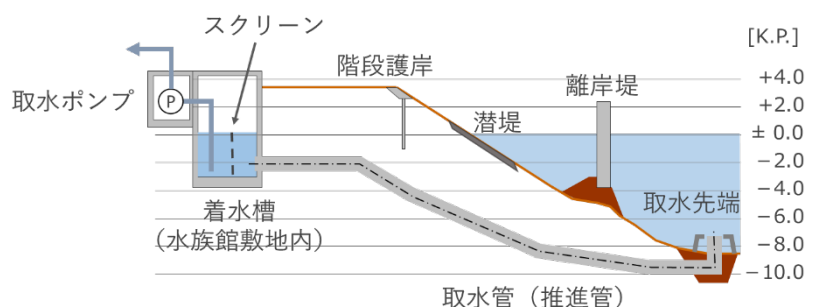


図4. 海水取水設備縦断面図

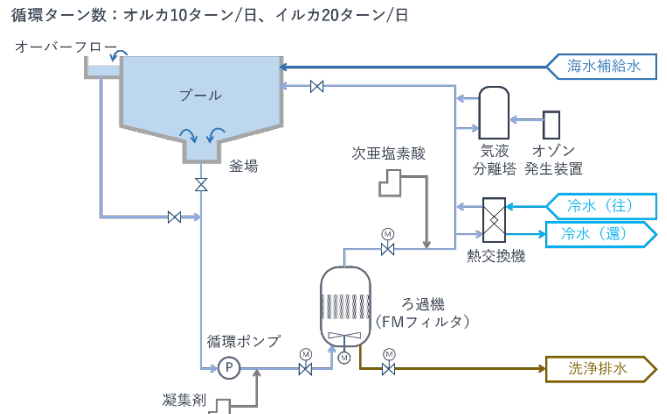


図2. 海獣類(鯨類)濾過循環フロー

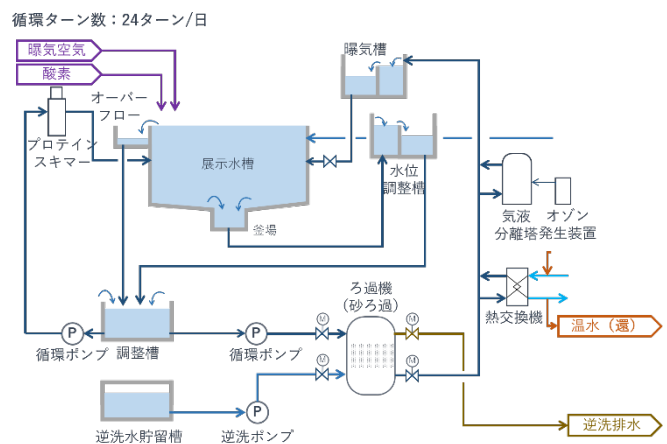


図3. 魚類濾過循環フロー

また、付近に河口があるため表層水の淡水混入と、海底付近での漂砂の影響が懸念されたため、取水口にペロシティキャップとLデッキを設け、それらの緩和を図った。取水先端は海底から 2m 突出する形状となることから、周辺漁業者と協議のうえ取水口周りに漁網対策カバーを設置することとした。(図 5)

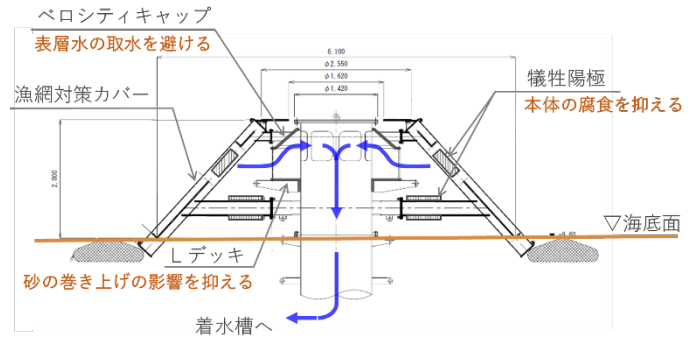


図 5. 取水先端

取水管の口径は取水量から決定すると $\phi 450\text{mm}$ 程度で十分であったが、ムラサキイガイやフジツボ類などの生物付着が旧施設でも多く見られたため、片側 200mm 程度の付着余裕代を考慮し、また、管内での潜水作業も可能なサイズとして $\phi 1000\text{mm}$ で計画した。合わせて取水流速を小さくすることで、流れ藻やクラゲ、塵芥、魚類の流入を極力抑えることを意図した。取水口や取水管には鋼材が用いられるため、アルミニウムブロックを用いた犠牲陽極方式による電気防食を実施している。

3.2 井水

飼育用淡水の使用量は $95\text{m}^3/\text{日}$ であり、全て井戸水を利用する計画とした。当該地域の地下水は鉄・マンガン含有が多かったため、次亜塩素酸ナトリウムを注入したうえで砂ろ過機によるろ過を行っている。加えてアンモニア態窒素の含有も多く、次亜塩素酸ナトリウムの注入量が多くなり残留塩素濃度が飼育水に適さないことが懸念されたため、最終段に活性炭ろ過を備え、さらに、処理水槽にチオ硫酸ナトリウムを注入可能とし万一の事態に備えている。

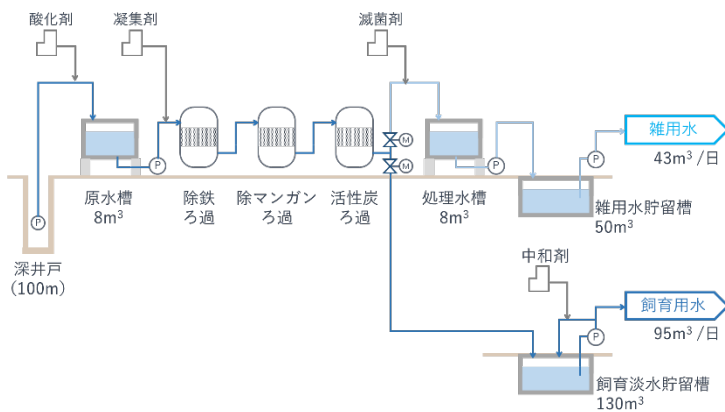


図 6. 井水処理フロー



写真 2. 井水処理設備

4. 循環ろ過設備

水槽飼育水は連続的に浄化処理し再利用する循環ろ過方式とすることで水質を維持し、新鮮海水の 1 日あたりの補給量を水槽容量の数%程度に抑え、海水取水量（すなわち排水量）を抑え環境負荷を小さくし水温調節に要するエネルギーコストも削減している。

循環ターン数は多いことが望ましいが、限られた設備スペース、経済合理性を考慮して必要最小限の循環ターン数でいかに効率よく水質維持を行うことが出来るか、運営事業者とともに綿密に調整して決定した。ろ過機は水槽容量や展示生物、展示内容に応じて、節水や省エネルギーにも配慮して砂ろ過機と FM フィルターの 2 種類を使い分けて採用した。

4.1 ろ過機本体（砂ろ過機）

砂ろ過機は展示水量 5m³ 以下の水槽は重力式開放型、5m³ を超える水槽は円筒型密閉圧力式（写真 3）とし、内径 φ2,400mm 以上を内面ゴムライニングを施した鋼板製、φ2,400mm 未満を FRP 製とした。

ろ材は水道用ろ材（JWWA A-103 2006-2）相当品 0.6mm、均等係数 1.4 以下を用い、ろ層厚は 700mm とし、汚濁の激しい取水ろ過や海獣類水槽についてはアンスラサイト 200mm+ろ砂 500mm の複層ろ過として、ろ過効率を高めている。



写真 3. 砂ろ過機

4.2 ろ過機本体（FM フィルター）

処理量大きいオルカ・イルカプールのろ過機には、樹脂製ろ材（写真 4）で固液分離が行われる FM（Floating Media）フィルター（写真 5、6）を採用した。用いられるろ材の比重が 1 より小さく、砂ろ過機とは異なり、ろ過機内上部にろ材層が形成され、原水はろ過機底部から流入し上向流によって処理され、ろ過機上部から流出する。目詰まりしたろ材層は、底部に備え付けられた攪拌機によって保有水を流動させ解きほぐされた上で、目詰まり物が剥離され、沈降分離されることで再生される。（表 2）



写真 4. FM フィルターろ材

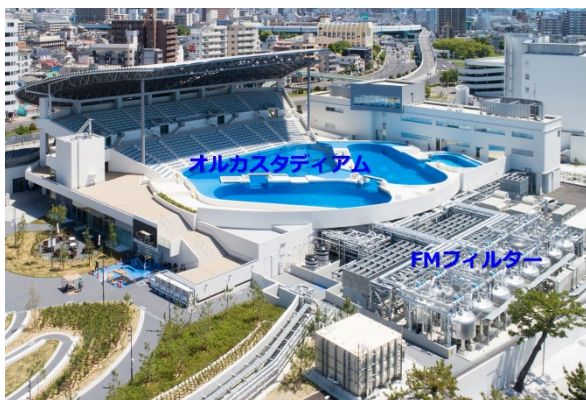


写真 5. FM フィルター設置状況



写真 6. FM フィルター外観

表 2. FM フィルターろ材洗浄工程

① ろ過工程	② 攪拌工程	③ 静置工程
<p>循環水はフィルタ下方から流入し浮上ろ材で汚濁物質が捕捉され、処理された水は水槽へ戻る。</p>	<p>循環水の流入を止め、攪拌機を駆動し水流を生じさせ、ろ材から汚濁物質を剥離させる。</p>	<p>攪拌機を停止し、ろ材と剥離した汚濁物質を比重差により沈降分離させる。</p>
<p>下部排水口より汚濁水を排出する。</p>	<p>循環水を通し、フィルタ内部に残存する汚濁物質を排出する。</p>	<p>再びろ過工程に戻る。</p>

この洗浄の際に外部水を必要とせず、フィルター内の保有水を排水するのみであるので、逆洗ポンプ等の補機が不要であり、砂ろ過機と比べると洗浄水の使用量（排水量）も大幅に低減される。また、ろ過速度も砂ろ過機に比べると最大 1.5 倍ほど速くすることができるので、塔サイズを小さくすることが可能となり省スペース化にも効果がある。オルカ・イルカのプールのろ過機を従来技術である砂ろ過機とした場合と今回採用した FM フィルターの場合とで排水量を比較検討した結果を表 4 にまとめた。FM フィルターの採用によって 627m³/日の排水量削減を達成した。

表 3. 砂ろ過機/FM フィルター比較

	砂ろ過方式（従来）	FM フィルタ方式（今回）
システム構成		
ろ過速度	20~25m/h	25~30m/h
洗浄方式	通水方向とは逆の方向から、水を流すことによって、ろ材を洗浄する	攪拌機で水流を発生させ、ろ材に捕捉された汚濁物質を剥離、沈降させた後に排水する
洗浄頻度	1回/2日	1回/1日
洗浄排水量※	72m ³ /回・基 36m ³ /日	20m ³ /回・基 20m ³ /日

※φ3.2mでの比較、砂ろ過の逆洗時間は15分とした

4.3 補助設備

(1) オゾン処理装置

無声放電式 PSA オゾナイザーによって発生させたオゾンガスを、エゼクターにより循環水に混合させ、気液分離塔で未反応オゾンガスを分離排出させる装置で、殺菌及び透明度向上を目的として、鯨類プール、魚類大水槽に設置した。万が一のオゾンガス漏洩対策としてオゾンガスモニターを具備している(写真7)

表 4. 砂ろ過機/FM フィルター 排水量比較

	プール名称	砂ろ過方式（従来）			FM フィルタ方式（今回）		
		直径 [m]	基数	排水量 [m ³ /日]	直径 [m]	基数	排水量 [m ³ /日]
オルカろ過機構成	メイン	3.2	8	289.4	3.2	6	124.8
	ブリーディング	3.2	6	217.0	3.0	5	88.0
	サブ	3.2	6	190.8	3.2	4	83.2
	メディカル	3.2	1	23.9	2.4	1	10.6
イルカろ過機構成	メイン	3.2	6	217.0	3.2	5	104.0
	ブリーディング	3.2	2	72.3	2.8	2	30.2
	サブ1	3.0	1	31.8	2.6	1	12.7
	サブ2	3.0	2	63.6	2.6	2	25.4

計 1106m³/日

計 479m³/日

水使用量削減 ▲627m³/日

(2) プロテインスキマー（泡沫分離装置）

エゼクターにより発生させた微細気泡に懸濁物を吸着させ、浮上分離させる装置で、国産メーカー製としては最大級となる水槽容量 50m³ 用をはじめ、より高い透明度を求められる魚類水槽 3 系統に設置した (写真 8)



写真 7. オゾン処理装置外観



写真 8. プロテインスキマー外観

(3) 次亜塩素酸注入装置

海獣類水槽に殺菌目的で設置、使用量の多い海獣類水槽は海水電解装置（写真 9）とし、オゾン併用となる鯨類プールについては、屋外タンクに貯留した次亜塩素酸ソーダをダイヤフラムポンプで循環系統に注入する方式とした。

(4) 凝集剤注入装置

海獣類水槽のろ過効率を高める目的で使用した。屋外タンクに貯留した PAC（ポリ塩化アルミニウム）凝集剤をダイヤフラムポンプで循環系統のろ過機前段に注入している（写真 10）



写真 9. 海水電解装置

5. 大型水槽の水流シミュレーション

水槽の飼育水をさらに効率よく循環ろ過させるためには、ろ過循環の吐出口、釜場、オーバーフロー、補給水供給口が適切に配置され、各所の流量のバランス良い分布を計画しなければならない。本計画では SOLIDWORKS Flow Simulation を用いた CFD 解析による水流シミュレーションを実施したうえで配置を決定した。吐出口から釜場、オーバーフローへのショートサーキットや顕著な淀み箇所がないように、また、水槽内は緩やかな時計回りの水流になるように配慮した（図 7）



写真 10. 凝集剤注入装置

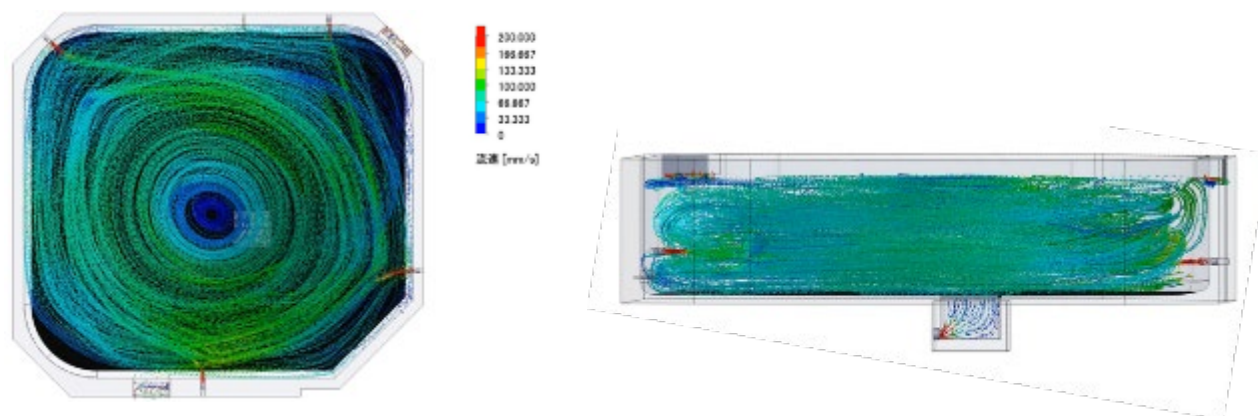
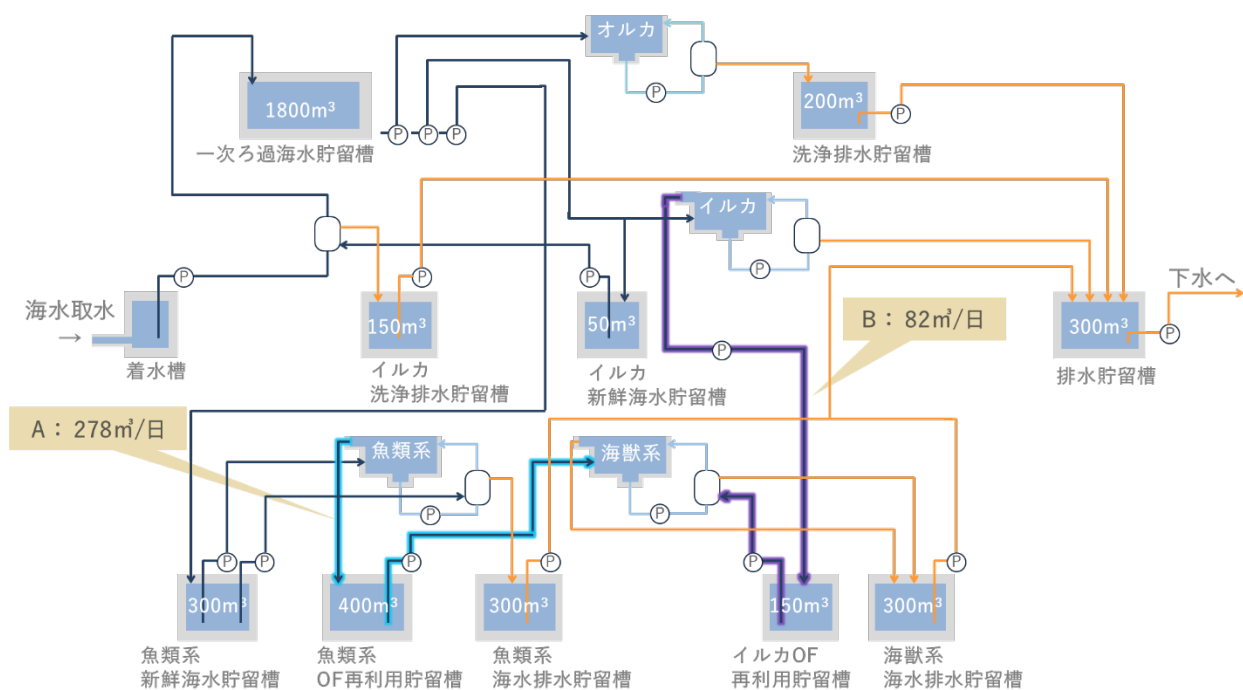


図 7. 水流シミュレーション

6. カスケード利用

飼育水に求められる水質のグレードは無脊椎動物（クラゲ等）＞魚類＞鰭脚類（アシカ・アザラシ等）・鯨類（イルカ・オルカ）という順で高く、生物由来の汚染の程度はその真逆となっているので、カスケード利用によって水使用量の削減を図った。具体的には、①魚類水槽のオーバーフロー排水を海獣系水槽の補給水に利用（278m³/日）、②イルカオーバーフロー排水を海獣系水槽ろ過機の逆洗水に利用している（81.6m³/日） 図 8 に飼育海水の給排水全体フローを示す。これらにより 360m³/日の排水量削減を達成した。



- A : 魚類水槽オーバーフロー排水を海獣水槽補給水に利用 278m³/日
- B : イルカ水槽オーバーフロー排水を海獣ろ過機洗浄水に利用 82m³/日

水使用量削減 ▲360m³/日

図 8. カスケード利用

7. まとめ

オルカ・イルカ用ろ過機に FM フィルターを採用することで従来技術の砂ろ過に比べて 627m³/日、飼育水のカスケード利用によって 360m³/日、合計 987m³/日の節水効果となり、施設全体の飼育海水使用量としては 42%削減の見込みとなった。

また、安定した海水や淡水が得られる取水システムに加え、水流シミュレーションによってろ過循環の効率を最大限発揮できるように配慮した。今後は施設運用データから飼育水運用状況の検証を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 磯舜也ら : 取水設備と前処理, 日本海水学会誌 35 巻 4 号 (1981)
- 2) 鈴木孝明 : 浄化处理技術と実態, 活魚大全 (1990)
- 3) 矢野孝一 : 特殊設備計画 水族館, 建築設備集成 11 (1992)
- 4) 岩泉孝司 : 水族館の水処理施設と水質管理, 空気調和・衛生工学会誌 67 巻 7 号 (1992)
- 5) 忠田浩 : 水族館の生物飼育設備, 建築設備と配管工事 (2007)
- 6) 坂本馨 : 生きているミュージアム・NIFREL の Life Support System について
給排水設備研究会誌 36 巻 2 号 (2019)