

水平伝熱管式多重効用造水装置

Horizontal Tube Multi-Effect Desalination Plants



来住宜剛	Yoshitaka Kishi	①
上更谷幸治	Koji Kamisaratani	①
津路真邦	Masakuni Tsuji	①
大塚裕之	Hiroyuki Ohtsuka	②
大島翼	Tsubasa Ohshima	②
井上隆之	Takayuki Inoue	①

あ ら ま し

蒸発法海水淡水化装置の一つである多重効用造水装置（MED）は、多段フラッシュ法（MSF）と比べ、熱効率が高く、消費電力が低い、メンテナンスが容易などの特徴を持っている。また運転温度が70℃以下と低いことから幅広いグレードの材料の適用が可能である。

当社では、この運転操作が容易で高い熱効率を兼ね備えている水平伝熱管式MEDの開発を完了し、開発で得た伝熱特性をもとに関西電力株式会社高浜発電所に第一号機を建設した。本設備は、蒸気式圧縮機（サーモコンプレッサー）を採用し、造水比10以上の高い熱効率を達成し、また導電率10 μ S/cm以下の高純度の生産水水質を満足している。本報では、プロセスの概要と運転結果、さらに新技術の開発について報告する。

Abstract

Multi-effect desalination (MED), a form of evaporation process for seawater desalination, is characterized by higher heat efficiency, lower electrical power consumption and easier maintenance than the multi-stage flash (MSF) method. Furthermore, a wider range of material grades is applicable because it can be operated under temperatures of less than 70°C.

Hitachi Zosen Corporation has completed the development of a simple operation and high heat efficiency horizontal tube MED, and based on experimental data of heat transfer coefficient, successfully installed the first plant in the Takahama Power Station of Kansai Electric Power Co. Inc. Equipped with a thermo-compressor, this plant has achieved a high Gain Output Ratio (GOR) of more than 10 and a high purity conductivity of less than 10 μ S/cm. This paper presents an outline of the process and the results of operation, and reports on the development of the new MED technology.

1. 緒 言

蒸発法の造水装置において、当社が最も得意としているMSF（多段フラッシュ法）に加え、急速に大型化が進み、市場での存在感を拡大している水平伝熱管式MEDの基本性能の開発を終え、関西電力株式会社高浜発電所（福井県高浜町）に、水平伝熱管式MEDの1号機を納入した。本装置は1,300t/dの造水能力を有し、サーモコンプレッサー、効用予熱器を設置した高効率設計と

なっている。また蒸気変換器の採用により、蒸気復水と生産水を分離回収できる。運転面においては、試運転期間を長期間設け、性能確認のための運転データの採取に加え、異なるミストエリミネーター設置によるミスト捕集効果の比較運転も実施した。本論文では性能試験結果とその後の運転状況およびミストエリミネーターの比較、さらに新技術の開発状況について報告する。

2. 装置概要

2.1 プラント仕様 本装置は、海水約7,200t/dから淡水1,300t/dを生産することができる。蒸発器の

① Hitz日立造船㈱ 環境・エネルギー・プラント本部 プラント・エネルギー計画部
② Hitz日立造船㈱ 技術開発本部 環境・プラント研究室

性能を示す蒸気消費量あたりの生産水量（造水比）は、10kg/kg以上の高効率設計となっている。生産水水質に関しては、ボイラー給水にも対応できる導電率 $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下である。

2.2 プロセスフロー 本装置のフロー図を図1に示す。MEDは、複数の伝熱管を有した蒸発室（効用）により構成される。本装置は発電所内の補助蒸気（既設蒸気コンバータより供給される）を熱源として、7効用から成る蒸発器によって淡水を生産するプラントである。

補助蒸気にはボイラー用薬品が含まれており、そのまま蒸発器へ供給すると蒸気の凝縮水（蒸気復水）と生産水が混合されてしまうため、補助蒸気は一旦蒸気変換器へ送られ、蒸気変換器にてボイラー用薬品を含まない蒸気へと変換される。

蒸気変換器より発生した蒸気はサーモコンプレッサーを通り、第1効用の加熱蒸気となる。この加熱蒸気は第1効用に供給される海水を蒸発させると同時に凝縮し、自らが生産水となる。

第1効用で発生した蒸気（海水が蒸発した蒸気）は第2効用へ送られ、第2効用に供給される海水を蒸発させると同時に凝縮し、自らが生産水となる。この様な一連の蒸発と凝縮が以降の第3～第7効用で繰り返され、最終の第7効用で発生した蒸気は復水器で凝縮される。

プロセスフローを順を追って説明すると、

- ①熱源としての蒸気は既設蒸気コンバータから蒸気変換器に供給される。
- ②蒸気変換器で補助蒸気と生産水の熱交換を行い、ボイラー薬品を含まない変換蒸気を発生させる。

- ③蒸気変換器は、蒸発器の運転負荷に関係なく、蒸気変換器の圧力が一定になるように蒸気変換器入口蒸気圧力制御弁で制御される。
- ④蒸気変換器で発生した変換蒸気はサーモコンプレッサー駆動蒸気として供給され、第5効用の発生蒸気の一部を吸い込み、圧縮蒸気として、第1効用に供給される。外部から蒸気が供給されるのは第1効用のみで、第2効用以降は前の効用で発生した蒸気が加熱蒸気として利用される。
- ⑤各効用の凝縮水は、生産水連絡管により次効用に順に送られ、最終効用から生産水ポンプにて送水される。
- ⑥運転負荷は、生産水量を監視しながら、変換蒸気流量を調節することで行う。
- ⑦海水は、海水ストレーナを介し、海水予熱器に供給され、一年を通して一定温度で復水器に供給される。
- ⑧供給海水を蒸発器内に供給する前に、蒸発器内での発泡の抑制、伝熱面でのスケール生成の抑制のために消泡剤とスケール抑制剤を注入する。
- ⑨供給海水流量は、運転負荷に関係なく、一定流量になるように供給海水流量制御弁で制御されている。供給海水は熱効率を上げるために効用予熱器により予熱され供給される。
- ⑩蒸発器内に供給された海水は伝熱管外側を液膜となって流下し、伝熱管内側の蒸気によって温められ、一部が蒸気となって次の効用の熱源となる（図2）。一部が凝縮した濃縮海水（ブライン）は、連絡管により次効用に順に送られ、最終効用からブライン排出ポンプにて排出される。

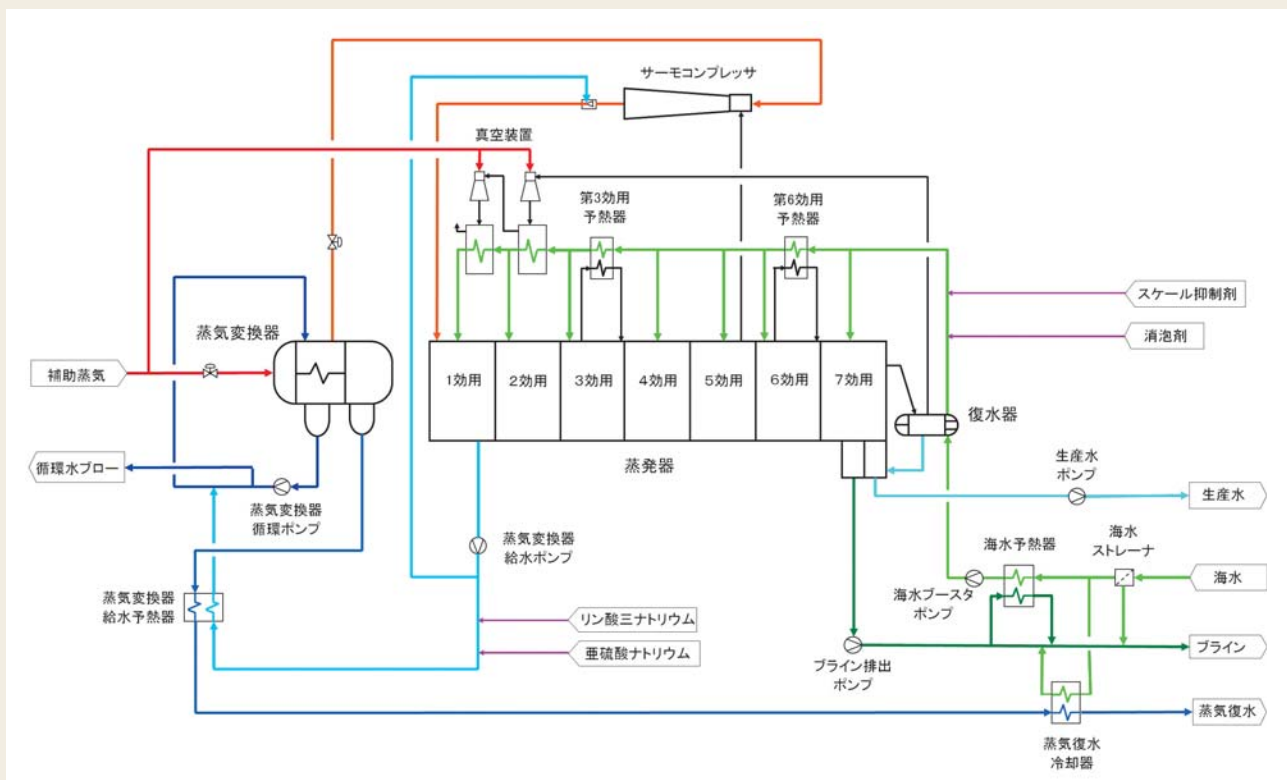


図1 プロセスフロー図

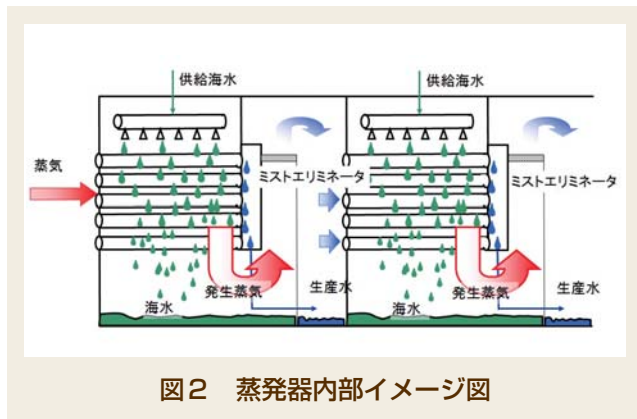


図2 蒸発器内部イメージ図

3. 運転結果

造水装置は、生産水量、蒸気消費量、生産水水質の要求を満足するように設計される。装置性能(効率)は、造水比(蒸気消費量あたりの生産水量)で表し、造水比が高いほど高効率の装置である。

3.1 試運転、性能試験結果 運転調整の後、24時間の性能試験を行い、設計性能(生産能力、蒸気消費量、生産水水質)の評価を行った。性能試験結果を表1に示す。性能試験では、安定した運転を行うことができ、プラント能力、生産水水質ともに仕様を満足する結果を得ることができた。

表1 性能試験結果

評価項目	仕様	結果	
生産水量	1,300t/d	1,307t/d	
蒸気消費量	5.8t/h	5.7t/h	
造水比	10.9kg/kg	11.4kg/kg	
生産水質	導電率	10 μ S/cm 以下	1.5 μ S/cm
	溶存酸素	0.01ppm 以下	0.01ppm
	温度	41°C 以下	蒸発器出口 41°C 冷却水回収後 43.2°C

試運転では、設計性能の確認だけでなく、手動でプラント起動、停止操作を行い、設計段階で検討しきれなかった運転手順、制御、保護回路の修正、改良を行った。また、運転パラメーターの急激な変動を抑えるための最適な操作速度、各因子の決定を行った。その結果、安全性および機器保護を重視した操作手順(シーケンス)を確立することができた。

3.2 長期運転状況 平成23年7月7日から平成24年6月22日までの約1年間の運転状況を整理し、性能、信頼性および安全性についてまとめた。

3.2.1 性能、信頼性 本装置は、100%負荷での運転を推奨しているが、実際の使用では水需要に伴い、負荷変更や、短期間の運転停止などが行われる。必要に応じて運転負荷の変更が行われているが、安定した運転制御を行うことができ、自らに起因した異常停止は頻発していない。また、安定した運転性能を示

し、水質等も満足している。

プラント運転時の条件を表2に、運転性能および水質分析結果を表3示す。

表2 運転条件

	用役	
海水	海水温度	11.9-27.2°C
	海水 pH	8.2
	全アルカリ度	109ppm
	全溶解固形分	39,000ppm
蒸気	蒸気圧力	0.76-0.78MPaG
	蒸気温度	173-174°C
運転負荷		50-100%

表3 長期運転性能および水質分析結果

評価項目	仕様	結果	
造水比 (GOR)	10.9kg/kg	10.9kg/kg (100%負荷時平均)	
生産水導電率	10 μ S/cm 以下	0.6~6.2 μ S/cm (平均 1.8 μ S/cm)	
生産水温度	41°C 以下	41.9°C (100%負荷時平均)	
生産水質	塩素イオン	3.0ppm 以下	0.5ppm 未満
	シリカ	10mg/L 以下	2.0mg/L 未満
	濁度	1.0mg/L 以下	1.0mg/L 未満
	全鉄	0.05ppm 以下	0.03ppm 未満
	溶存酸素	0.01ppm 以下	0.01ppm 以下
	ホウ素	1mg/L 以下	0.02mg/L 未満

(1) **運転状態** 運転状況、停止理由を図3にまとめた。長期運転の期間を通じて、水需要に応じた起動、停止、連続運転を安定して行うことが出来た。

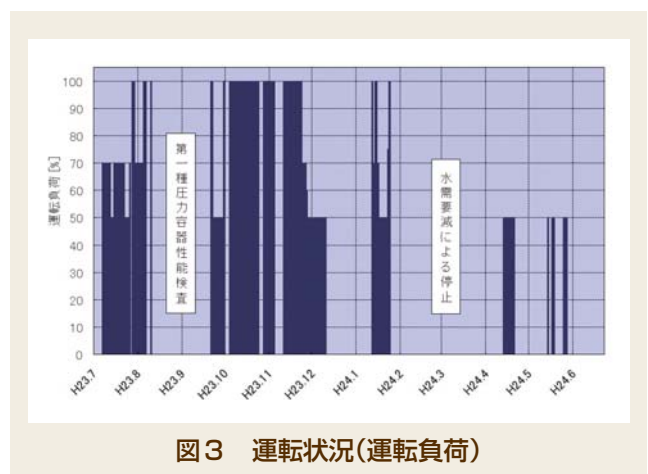


図3 運転状況(運転負荷)

(2) **生産水量** 生産水量(運転負荷)の設定値と生産水量を図4に示す。運転負荷は、水需要に応じて50%~100%(27.3m³/h~54.6m³/h)で設定されている。設定値に対し、生産水量は供給蒸気量を自動制御することで調整しており、設定値と生産水量の差異はなく、安定した運転制御が行えている。

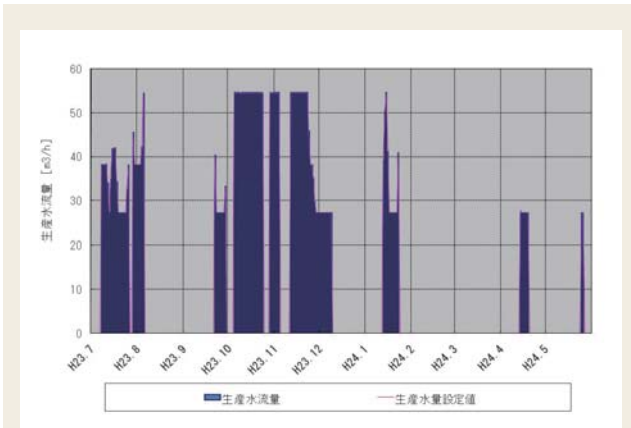


図4 生産水設定値と生産水量

(3) 蒸気消費量 蒸気消費量の推移を図5に示す。蒸気消費量は、熱源として使用する補助蒸気（蒸気復水流量）と、真空装置に使用するエゼクター駆動蒸気（エゼクター入口蒸気流量）で表される。補助蒸気流量は、運転負荷に伴い増減しているが、経時的な増加はみられず、安定している。

真空装置のエゼクター入口蒸気流量も、定格である0.7t/hで安定しており、異常はみられない。

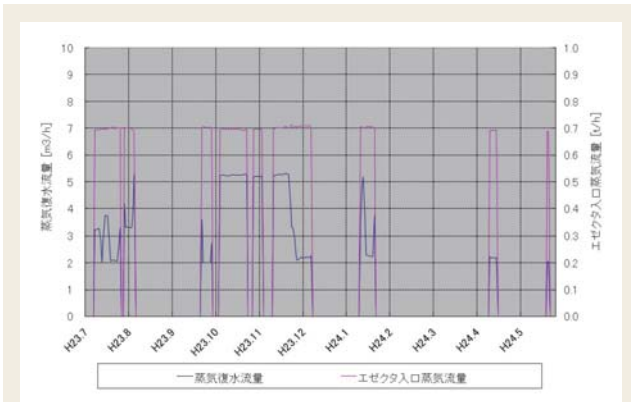


図5 蒸気消費量

(4) 生産水導電率 生産水導電率の推移を図6に示す。導電率は多少の変動はあるが、運転負荷に関係なく、設計仕様の $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下を満足し、運転開始時の性能($2\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下)を維持している。



図6 生産水導電率

3.2.2 安全性 事故・災害は発生せず、機器・設備の機能に影響を及ぼす損傷もなく、運転が行えている。蒸発器の開放点検においても、伝熱管の汚れはほとんどなく、蒸発器内部に腐食等は見られなかった。

総運転時間が短かった影響もあるが、開放点検後の運転状態は試運転時同等と良好であり、伝熱管の酸洗を必要とせず連続運転が可能な状態である。

3.3 デミスター試験 本装置では2種類のミストエリミネーターを取り付け可能な構造とし、ワイヤーメッシュデミスター、ベーンミストエリミネーターそれぞれを使用した試験運転を行った。

3.3.1 ワイヤーメッシュデミスター ワイヤーメッシュデミスターは、図7のように、ステンレスワイヤーで編んだ網を多層に折り曲げマット状にしたものである。蒸気中に含まれる不純物ミストを細い線に慣性衝突させて除去するタイプの分離器であり、上昇気流中のミストを重力落下により除去できるような水平に設置される。ワイヤーメッシュデミスターの特徴は加工が容易なことにあり、メッシュ編み目ピッチ、メッシュ密度を調整することで使用流体、運転条件に対応できるようになっている。蒸発法に適用されるミストエリミネーターはワイヤーメッシュデミスターが主である。

ワイヤーメッシュデミスターは、軽量、安価で手軽であるが、設置方向が水平のみという制限がある。最小捕集ミスト径は数 μm ～ $10\mu\text{m}$ 程度と微細なミストまで捕集が可能である。

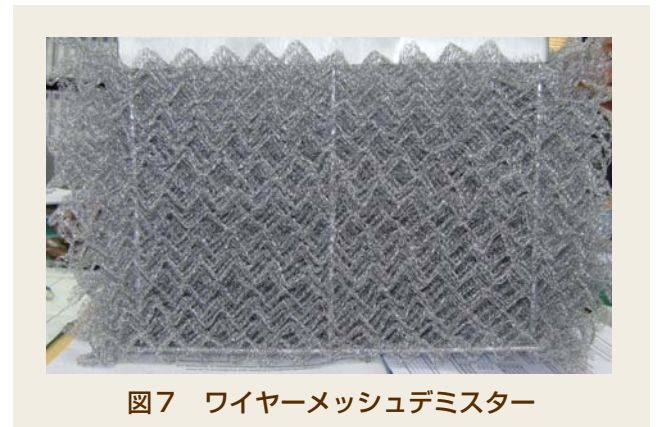


図7 ワイヤーメッシュデミスター

3.3.2 ベーンミストエリミネーター ベーンミストエリミネーターは「ベーン」もしくは「シェブロン」と呼ばれる折れ板が一定隙間で配置されており、その間に蒸気を通し、蒸気を慣性力で折れ板に衝突させミストを分離する。

ベーンミストエリミネーターは最小捕集ミスト径が $10\mu\text{m}$ 程度とワイヤーメッシュデミスターの捕集ミスト径より大きい。圧力損失はワイヤーメッシュデミスターの半分程度である。ベーンには、ミスト衝突によって液滴となったドレン分が下流に流されるのを防ぐ「フック」または「ポケット」と呼ばれる遮蔽板が溶接されているタイプも存在する。本装置では生産水質に関し万全を期すために図8のようなフックタイプを採用した。ベーンミストエリミネーターは水平方向だけでなく、垂直方向にも設置可能であ

ることから、ワイヤーメッシュデミスターを設置する場合と比べ、蒸発器サイズの小型化が期待できる。



図8 ベーンミストエリミネーター

3.3.3 ミストエリミネーター性能評価 2種類のデミスターを用いて、100%負荷での連続運転を実施した。

生産水導電率の平均値は、 $1.5\mu\text{S}/\text{cm}$ と $1.4\mu\text{S}/\text{cm}$ で、十分な同伴ミストの除去性能が得られた。

造水比も、ワイヤーメッシュ、ベーンともに $11.4\text{kg}/\text{kg}$ と良好な結果を得た。

表4 デミスター性能比較結果

	ワイヤーメッシュデミスター	ベーンミストエリミネーター
生産水導電率 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	1.5	1.4
造水比 [kg/kg]	11.4	11.4

ベーンミストエリミネーターは最小捕集ミスト径が大きいが、生産水導電率の仕様を満足するだけでなく、ワイヤーメッシュデミスターと同等の性能が得られた。このことから、MEDに対して、ベーンミストエリミネーターが十分に適用できることが確認できた。

4. MED 新技術開発について

今日ではMED造水装置の大型化が進み、最大で単機造水能力 $68,000\text{t}/\text{d}$ クラスのプラントが建設されている。また、省エネルギー性や経済性を考慮した様々な技術が導入されている²⁾。このような技術動向の中、グローバル市場で勝ち抜いていくためには、競争力のある大型プラントを市場投入していく必要があり、当社でも、新技術を投入した魅力ある製品の開発を継続的に進めている。

本章では、当社が独自に開発した高伝熱性能を発揮できる伝熱管群（バンドル）、および、サーモコンプレッサーの性能計算技術について紹介する。

4.1 高性能バンドル開発 当社では、平成13年に水平伝熱管式のMED造水装置の開発に着手して以来、保有する実験プラント（図9）を用いて新技術の開発および設計データの取得を行ってきた。この実験プラントは、世界最大クラスのバンドルにも対応可能であり、

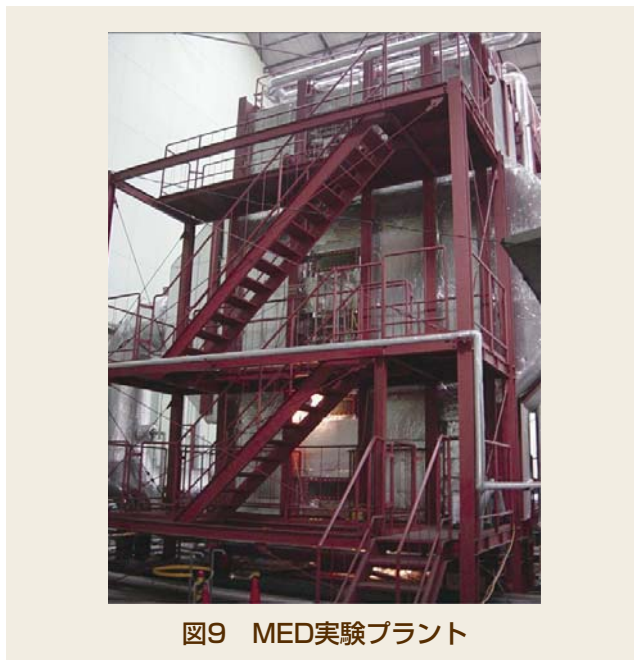


図9 MED実験プラント

供給海水量やバンドルの伝熱性能といった設計における重要なパラメーターを実機スケールで取得することができる³⁾。

従来からMED大型化への課題は、図2に示すバンドルにおける、伝熱管外側の液膜減少による局所的な伝熱管の焼き（ドライアウト）の抑制が重要であることがわかってきた⁴⁾。バンドルに供給する海水流れに偏流が生じると、バンドル下部でドライアウトが発生して伝熱面積としての機能を果たせなくなり伝熱性能が著しく低下し、かつ伝熱管にスケールが析出することもある。

そこで当社は、バンドルでの発生蒸気流れに着目し、従来から問題視されてきたブラインの偏流を解消してドライアウト発生を抑制でき、かつ蒸気流速を増加させて伝熱性能を向上できるバンドルを開発した。これにより、少ない伝熱面積で効率的な造水が可能となり、供給海水量の低減も期待できる。一方で、高蒸気流速による蒸気流れの圧力損失増大によるエネルギー損失も懸念されるため、実験により詳細な伝熱性能の把握に努めてきた。図10に従来バンドルの伝熱係数に対する、新たに開発したバンドルの伝熱係数の比を示す。横軸は蒸

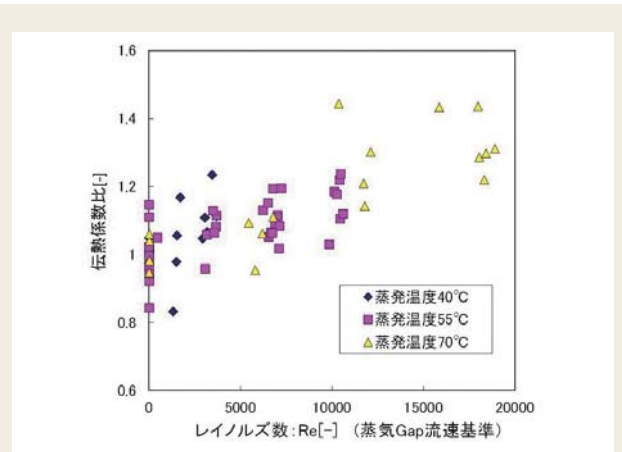


図10 蒸気流速と伝熱係数の関係

気流速基準のレイノルズ数としている。図10に示すように、蒸気流速の増加により伝熱性能を向上させることができる。その効果は蒸気温度が高温であるほど顕著である。バンドルの伝熱性能が向上することにより、伝熱面積を削減して材料費の低減に寄与することができる。

4.2 サーモコンプレッサー性能計算技術 当社は、低温効用で発生した低压蒸気をサーモコンプレッサーにより再圧縮し、高温・高压蒸気に転換して再度加熱蒸気として用いる蒸気圧縮 (Thermal Vapor Compression : TVC) 方式のMEDを採用している。サーモコンプレッサーは外部からの蒸気により駆動されて低温蒸気を吸引して圧縮するため、その吸引性能が造水比に与える影響は大きい。また、サーモコンプレッサーは一般的に一点設計が成されており、設計点以外での性能は保証されていない場合が多く、運転条件が変化した場合の吸引性能は不明な点が多い。

当社では、保有する基盤技術の一つである計算流体力学技術 (CFD) を用いて、サーモコンプレッサーの性能計算ツールの開発を進めている。図11に計算結果の一例として、運転条件が変化したときのサーモコンプレッサー内のマッハ数分布を示す。駆動蒸気側の条件を変更することにより、流れが影響を受けて、吸引比が大きく変化すること示している。これにより、運転条件が変化した場合の性能を明らかにして、最適な条件や形状を把握することが可能である。

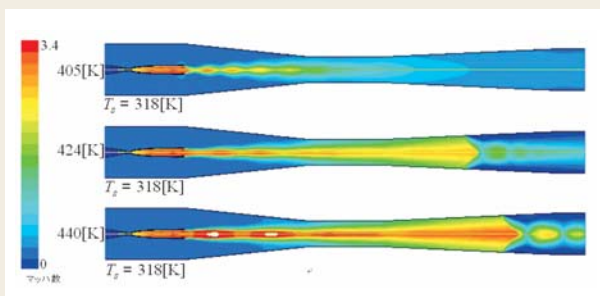


図11 サーモコンプレッサー性能計算一例(マッハ数分布)

5. 結 言

当社1号機の水平伝熱管式MEDにおいて、設計仕様を満足する性能試験結果を得ることができ、その後も安定した運転が行えている。これらの運転データを今後の設計、改善に反映させるとともに新技術の開発を進め、今後もさらなる魅力ある製品の供給に取り組んでいく。

最後に本報の執筆に際し、多大なご協力いただいた関西電力株式会社高浜発電所殿に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大塚裕之, 高木義信, 松浦哲也: 蒸気圧縮式多重効用造水装置, 日立造船技報, **2006**, 67 (1), 24-27.
- 2) 平井光芳ほか: NF/RO/MEDハイブリッド法による省エネルギー型海水淡水化について, 日本海水学会誌, **2008**, 62 (6), 265-270.
- 3) 井上隆之: 海水淡水化プラント, 日立造船技報, **2006**, 70 (1), 52-57.
- 4) 大塚裕之, 大島翼: 蒸気法海水淡水化技術の開発, 混相流, **2011**, 2 (1), 20-27.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 環境・エネルギー・プラント本部
プラント・エネルギー計画部
来住宜剛

Tel : 06-6569-0225 Fax : 06-6569-0303

e-mail : kishi@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Plant and Energy Systems Planning &
Engineering Department
Yoshitaka Kishi

Tel : +81-6-6569-0225 Fax : +81-6-6569-0303

e-mail : kishi@hitachizosen.co.jp



来住 宜 剛



上更谷 幸 治



津 路 真 邦



大 塚 裕 之



大 島 翼



井 上 隆 之