

《小特集》

逆浸透法海水淡水化用中空糸膜モジュールの
シミュレーション

熊野 淳夫*・関野 政昭**

ABSTRACT A reliable simulation model for the hollow fiber reverse osmosis module for seawater desalination is reported. The model introduced concentration polarization into the transfer equations, which are usually neglected, combined with the pressure drop in the fiber bore. In this model, friction-concentration-polarization model (FCP model), the membrane transport equations were derived from the solution-diffusion model and the concentration polarization model while the pressure drop in the fiber bore was introduced with the Hagen-Poiseuille equation. The membrane permeability constants in the solution-diffusion model were experimentally determined. The mass transfer coefficients in the concentration polarization model were calculated by previously derived equations. The model was verified by reverse osmosis using Toyobo's hollow fiber module for seawater desalination, and showed good agreement.

1. はじめに

昨年の夏は記録的な猛暑と異常渇水により各地で深刻な水不足が発生し、海水淡水化技術として逆浸透法が注目されたのも記録に新しい。この逆浸透法は相変化を伴わない膜分離法であるため、省エネルギープロセスとして、世界中の海水淡水化プラントに採用されている。図1に示すように主要海水淡水化逆浸透膜メーカーの実績累計は年々増加を続けており^{1),2)}、特にここ数年の増加は目覚ましく、1989年からの4年間で約2倍となりその累積は120万m³/日を越えている。海水淡水化技術全体としてみても蒸発法に次いで30%以上を占めるに至っている^{3),4)}。

このような逆浸透膜は、形態として平膜と中空糸膜に大別される。どちらの場合も膜の集合体であるモジュールと呼ばれる構成単位として使用される。この中で中空糸型逆浸透モジュールは単位容積当たりの膜面積を大量に確保できるため、最も効率的、経済的な形式となっており、工業的に広く普及している。このモジュールの最適設計やモジュール操作条件の適正化にモジュール性能のシミュレーションは極めて有効であ

る。しかし、この中空糸型逆浸透モジュールの場合は図2に示すように中空糸膜を透過した水は中空部を流れるため、そこには流動圧損が生じる。さらに、海水淡水化用モジュールの場合は塩除去率が99%以上と高いため、膜面での濃度分極が発生する。これまで中空糸型逆浸透膜モジュールの性能解析はいくつかなされてきたが^{5)~8)}、これらはすべて中空糸内流動圧損または膜面の濃度分極の一方が無視されていたり、適用条件域や物質移動係数の取扱いなどについて、不十分な点があり実測値との乖離が大きく、改良が望まれていた。

ここでは、中空糸内流動圧損と膜面の濃度分極を同時に考慮したFCPモデル (Friction-Concentration-Polarization Model) を提案し⁹⁾、これにより実測値との整合性が良好となった海水淡水化用中空糸膜モジュール性能のシミュレーションについて以下に報告する。

2. 中空糸膜モジュールのシミュレーション

2.1 中空糸膜モジュール

現在世界的規模で生産されている海水淡水化用中空糸型逆浸透モジュールは、デュポン社のPermasepと東洋紡のHollosepの二種である¹⁰⁾。ここでは、対象モジュールを東洋紡のHollosepとする。

東洋紡Hollosepの構造を図3に示す。外径160~163μmの三酢酸セルロース中空糸膜が、通常10⁵~

Simulation on Hollow Fiber Reverse Osmosis Membrane Module for Seawater Desalination. By Atsuo Kumano (Research Center, Toyobo Co., Ltd.) and Masaaki Sekino (Iwakuni Membrane Plant, Toyobo Co., Ltd.).

*東洋紡績(株)総合研究所

**東洋紡績(株)岩国機能膜工場

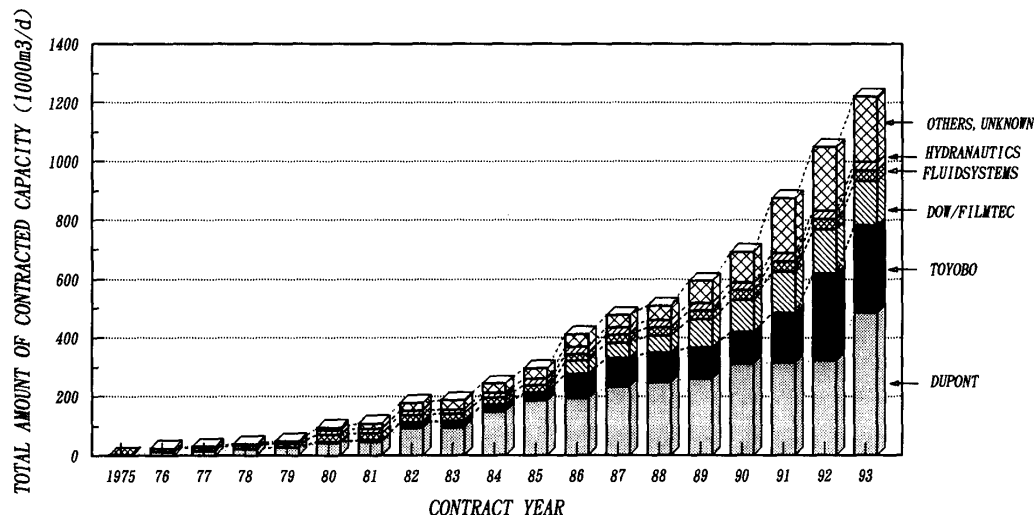


図1 海水淡水化用逆浸透装置—主要膜メーカーの実績累計—Contract Year Base (文献2)を用いて文献1)を修正)

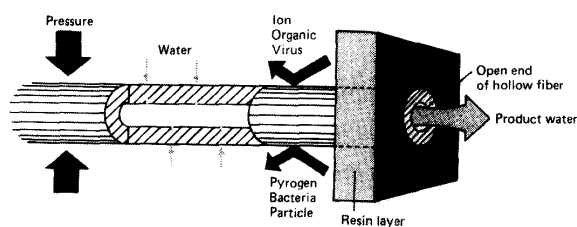


図2 中空糸膜による分離

10⁶本、分散管となる多孔芯管の周りに交差積層して巻き付けられ、その円筒体の両端部はエポキシ樹脂によって接着固定されている。両端部のうち、一端部は切断され、中空糸が開口されるとともにチューブシー

ト部（接着開口部）を形成する。膜透過液はこの開口部より流出する。この円筒状の中空糸集束体すなわちエレメントは、受圧板と共に圧力容器に挿入され、逆浸透モジュールを構成している。

膜分離操作は、次のように行われる。すなわち、高圧ポンプにより加圧された供給液は、モジュール端板の供給口よりモジュールへ圧入され、モジュール中心部に設けられた分散管から、放射方向に中空糸集束体内へ移送・分配される。この中空糸集束体内の各中空糸膜において、供給液は膜透過液と非透過の濃縮液とに分離される。膜透過液は、中空糸膜の内側へ流入し、中空糸内流路を通過して系外へ取り出される。一方、濃縮液は、中空糸集束体内の中空糸膜外側を流れ

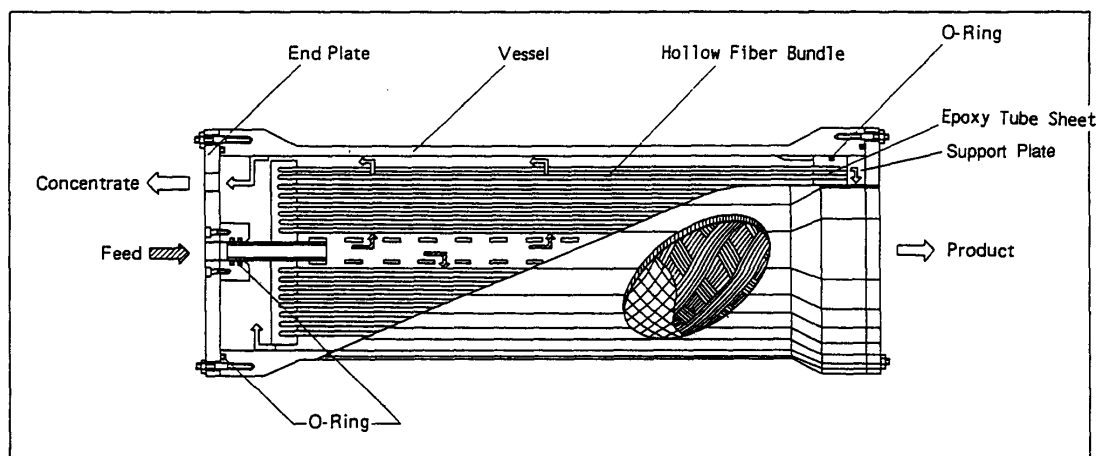


図3 逆浸透中空糸膜モジュール構造（東洋紡製 Hollosep の場合）

ながら徐々に濃縮され、通過した後、中空糸集束体と圧力容器との間の環状流路を経由して排出される。ここで、モジュール内は、濃縮液接続配管に付設された背圧弁によって、所定の圧力、回収率（透過流量/供給流量）に維持されるシステムがとられている。

2.2 基礎式

2.2.1 膜透過式

膜透過モデルとして、次の2パラメータで表記される実用的な溶解拡散モデル¹¹⁾を使用する。この溶解拡散モデル式は次式で示される。

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \Pi) \quad (1)$$

$$J_s = B \Delta C \quad (2)$$

ここで、 J_w は水の透過流束、 J_s は溶質の透過流束であり、 A 、 B はそれぞれ純水透過係数、溶質輸送係数である。また ΔP 、 $\Delta \Pi$ 、 ΔC は、それぞれ膜間の有効差圧、浸透圧差、溶質の濃度差である。

膜表面の境界層では、Kimura と Sourirajan¹²⁾が提案した Film Theory モデル¹³⁾を適用した。

Film Theory モデルでは、膜不透過溶質は、膜面で蓄積され、濃度分極層を形成する。この濃度分極層での物質収支は次式で表される。

$$J_s = C J_v - D \, dC/dx \quad (3)$$

ここに、 C は溶質濃度、 D は拡散係数、 x は膜表面からの垂直方向距離である。

濃度分極層の厚みを δ とすると次の境界条件より

$$\left. \begin{aligned} C &= C_B (\text{バルクでの溶質濃度}) \text{ at } x=0 \\ C &= C_M (\text{膜表面での溶質濃度}) \text{ at } x=\delta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3)を積分して次式が得られる。

$$(C_M - C_P) / (C_B - C_P) = \exp(J_v/k) \quad (5)$$

ここに

$$J_v = (J_w + J_s) / \rho_P \quad (6)$$

$$C_P = J_s / J_v \quad (7)$$

式(5)右辺の物質移動係数 k は、中空糸外径 d_o を用い次式で示される。

$$Sh = k d_o / D = Sh(Re, Sc) \quad (8)$$

本計算では、関野、藤原⁹⁾が、東洋紡8インチ径モジュールで導いた次の式(9)を使用する。

$$Sh = 0.048 Re^{0.6} Sc^{1/3} \quad (9)$$

2.2.2 流動圧損式

中空糸内の圧力 P_p を求めるための流動圧損は、Hagen-Poiseuille 式で求められる。

$$dP_p/dz = 128 \mu Q_p / (\pi d_i^4) \quad (10)$$

ここに、 P_p は中空糸内圧力、 z は軸方向距離、 Q_p 、 μ はそれぞれ中空糸内透過液の流量、粘度、 d_i は中空糸内径である。

一方、供給液の中空糸外の圧力 P_B を求めるための中空糸集束体内の流動圧損には、Ergun 式¹⁴⁾が適用できるものとする。

$$\begin{aligned} -dP_B/dr &= 150(1-\varepsilon)^2 \mu / (\varepsilon^3 d_p^2) V_s \\ &\quad + 1.75(1-\varepsilon) \rho / (\varepsilon^3 d_p) V_s^2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 ε は空隙率、 ρ は密度、 d_p は比表面積径を表しており、中空糸の場合 $d_p = 1.5 d_o$ である。また V_s は中空糸集束体内の空塔速度を表している。

2.2.3 物質収支式

中空糸内の物質収支は次のように与えられる。

$$dQ_p/dz = \pi d_o J_v, \quad l_s \leq z \leq l_s + l_A \quad (12)$$

ここに、 l_s 、 l_A は各々中空糸のチューブシート部の長さ、有効部の長さである。

式(10)を微分し、式(12)を代入する。

$$d^2 P_p / dz^2 = 128 \mu / d_i^4 d_o J_v \quad (13)$$

式(13)は、次の境界条件を有する。

$$P_p = P_0 \quad \text{at } z=0 \quad (14)$$

$$P_p = P_0 + dP/dz|_{l_s} l_s \quad \text{at } z=l_s \quad (15)$$

$$dP_p/dz = 0 \quad \text{at } z=l_s + l_A \quad (16)$$

中空糸集束体内での物質収支は次のようになる。

$$\begin{aligned} dQ_B/dr &= -2\pi r L_A (1-\sigma) J_v \xi, \\ D_I/2 \leq r \leq D_O/2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} d(Q_B C_B)/dr &= -2\pi r L_A (1-\sigma) J_v C_P \xi, \\ D_I/2 \leq r \leq D_O/2 \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、 Q_B 、 C_B は各々中空糸の外側（バルク）の流量、溶質濃度、 r は半径方向距離、 L_A は中空糸束有効長、 σ は中空糸の充填密度、 D_I 、 D_O は各々中空糸集束体の内径、外径、 ξ は単位容積当たりの膜面積である。

東洋紡モジュールでは、中空糸は多孔芯管の周りに螺旋状に巻き付けられている。そこで、膜面積は次のように表される。

$$dS = \pi d_o l_A \, dN \quad (19)$$

l_A は有効中空糸長である。

2.2.4 物性値

供試液である塩化ナトリウムの浸透圧、粘度、拡散係数等の物性値は、主に I.C.T および Sourirajan's Table¹⁵⁾に記載のデータを引用した相関式で与えた。

膜性能（純水透過係数 A 値、溶質輸送係数 B 値）は、中空糸膜の透過実験より濃度分極が無視できる実験条件下で得た実測値を、中空糸内流動圧損を零外挿して算出した値を用いた。

また、 A 値の供給液温度の依存性は、Perry's Handbook¹⁶⁾に示される水粘度の推算式より得られる水粘度の温度依存性から導いた。 B 値の温度依存性

は、水の拡散係数の温度依存性に Stokes-Einstein 式による $D\mu/(273.2+t)=\text{const.}$ を適用して導いた。

2.3 数値計算

上記の数学モデルの各方程式を連立して計算するに当たり、差分法による数値計算法を使用する。中空糸集束体長手方向 (z 方向) を n 等分、中空糸集束体半径方向 (r 方向) を m 等分する。計算モデル図を図 4 に示す。図 4 における中空糸セグメント Δz での透過液流速 J_{vij} 、透過液溶質濃度 C_{Pij} 、中空糸内圧力 P_{Pij} に注目する。

まず、式(1)、(2)は次のように展開される。

$$\begin{aligned} J_W &= A[(P_B - P_P) - (\Pi_M - \Pi_P)] \\ &= A[(P_B - P_P) - \alpha\Phi(C_B - C_P)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} J_S &= B(C_M - C_P) \\ &= B\Phi(C_B - C_P) \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、

$$\Pi = \alpha \cdot C \quad (22)$$

$$\Phi = (C_M - C_P) / (C_B - C_P) \quad (23)$$

ここで、溶液浸透圧は、溶液の溶質濃度に比例する、即ち、式(22)で表されるものとする。そして、濃度分極係数 Φ は、式(23)で定義されるものとする。

従って、中空糸セグメント Δz での透過液流速 J_{vij} は、式(6)、(20)、(21)より次式で示される。

$$\begin{aligned} J_{vij} &= [A(P_{Bij} - P_{Pij}) - (\alpha A - B)\Phi_{ij}] \\ &\quad \times (C_{Bij} - C_{Pij}) / \rho_{Pij} \end{aligned} \quad (24)$$

ここに、 Φ_{ij} は、式(5)、(23)より、

$$\Phi_{ij} = \exp(J_{vij}/k_{ij}) \quad (25)$$

物質移動係数 k_{ij} は、式(9)より、

$$\begin{aligned} k_{ij} &= 0.048(D_{ij}/d_o)(d_o V_{Bij} \rho_{Bij} / \mu_{Bij})^{0.6} \\ &\quad \times (\mu_{Bij} / \rho_{Bij} D_{ij})^{1/3} \end{aligned} \quad (26)$$

一方、透過液の溶質濃度 C_{Pij} は、式(7)、(21)、(24)より導出される C_{Pij} に関する二次方程式の解として示される。

$$C_{Pij} = (-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}) / (2a_2) \quad (27)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= -B\Phi_{ij}C_{Bij}\rho_{Pij} \\ a_1 &= A(P_{Bij} - P_{Pij}) - (\alpha A - B)\Phi_{ij}C_{Bij} \\ &\quad + B\Phi_{ij}\rho_{Pij} \\ a_2 &= (\alpha A - B)\Phi_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

中空糸セグメント Δz での透過液圧力 P_{Pij} は、差分化して次式で示される。

$$P_{Pij} - P_{Pij-1} = 128\mu_{Pij}\Delta z^2 d_o / d_i^4 \sum_{j=1}^n J_{vij} \quad (29)$$

チューブシート部では、中空糸内への膜透過はなく、式(14)に示すように中空糸開口部の圧力 P_0 に収斂する。そこで、

$$\begin{aligned} P_{Pi1} - P_0 &= 128\mu_{Pij}l_s\Delta z d_o \\ &\quad / d_{is}^4 \sum_{j=1}^n J_{vij} \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、 d_{is} 、 l_s は、各々チューブシート部の中空糸

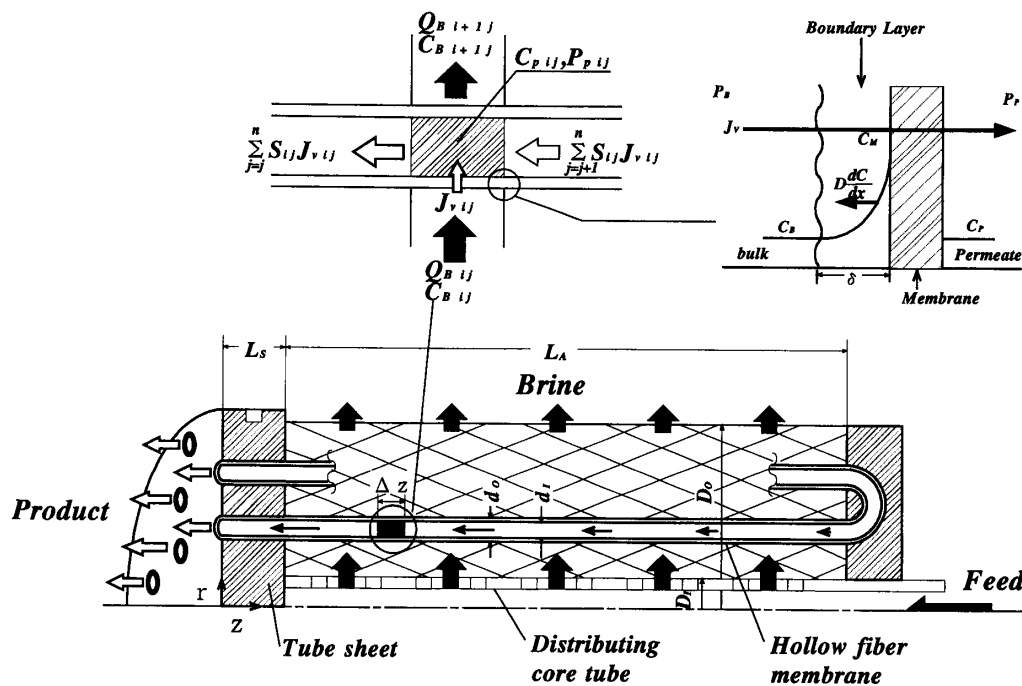


図4 計算モデル

内径，中空糸長である。

一方，中空糸セグメント Δz に作用する外圧即ち，中空糸集束体内の供給液圧力 P_{Bij} は，式(11)より次式で示される。

$$P_{Bij} - P_{Bi+1j} = \{150(1-\varepsilon)^2 \mu_{Bij} / (\varepsilon^3 d_p^2) V_{Sij} + 1.75(1-\varepsilon) \rho_{Bij} / (\varepsilon^3 d_p) V_{Sij}^2\} \Delta r \quad (31)$$

ここに，

$$V_{Sij} = Q_{Bij} / (2\pi r_i \Delta L) \quad (32)$$

次に，供給液物質収支について，差分化を行う。

式(17)，(18)は， $V_B = V_S / \varepsilon = Q_B / (2\pi r \Delta L \varepsilon)$ の代入により，次のように変形される。

$$Q_{Bij} = Q_{Bi+1j} + S_{ij} J_{vij} \quad (33)$$

$$C_{Bij} Q_{Bij} = C_{Bi+1j} Q_{Bi+1j} + S_{ij} C_{Pij} J_{vij} \quad (34)$$

膜面積については，各分割セグメントの中空糸本数，長さにより，式(19)で求める。

$$S_{ij} = 4\pi \sigma L_A (r_i^2 - r_{i-1}^2) / d_0 n \quad (35)$$

中空糸型逆浸透モジュールのトータル性能は，従って，式(24)–(35)を使用して， J_{vij} ， C_{Pij} ， S_{ij} を求め，これらを乗加算して求められる。

$$Q_{PT} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (J_{vij} S_{ij}) \quad (36)$$

$$C_{PT} = \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (C_{Pij} J_{vij} S_{ij}) \right\} / Q_{PT} \quad (37)$$

2.4 計算方法

式(36)，(37)を算出するためのコンピュータフローチャートを図5に示す。入力値として，中空糸膜特性・形状，中空糸集束体形状，逆浸透操作条件および供給液物性が必要である。

計算は，先ず図4で，供給液入口部の初期半径座標位置において，中空糸長手方向の計算から始める。中空糸最奥部から計算し，中空糸開口部の圧力が，透過液出口圧力 P_0 に等しくなるまで，中空糸最奥部の中空糸内圧 P_{Pin} を変化させて繰り返し計算を行う。この時，各セグメントの J_{vij} ， C_{Pij} ， P_{Pij} の計算は，先ず Φ_{ij} を仮定して， J_{vij} ， k_{ij} ， Φ_{ij} の順に計算を行い， Φ_{ij} 計算値と Φ_{ij} 仮定値とが合致するまで，繰り返し計算されることになる。上記計算終了後，半径方向に1メッシュ進め，中空糸長手方向を行っていく。

以下同様にして，濃縮液出口部の半径座標位置まで，同種の計算を進めていく。こうして，各セグメントの J_{vij} ， C_{Pij} が求まると，これらを合計したモジュールのトータル性能値 Q_{PT} ， C_{PT} を得る。上記のトータル性能値 Q_{PT} と計算当初に仮定した供給液量 Q_F の比より回収率を求め，この回収率が当初の設定回収率に

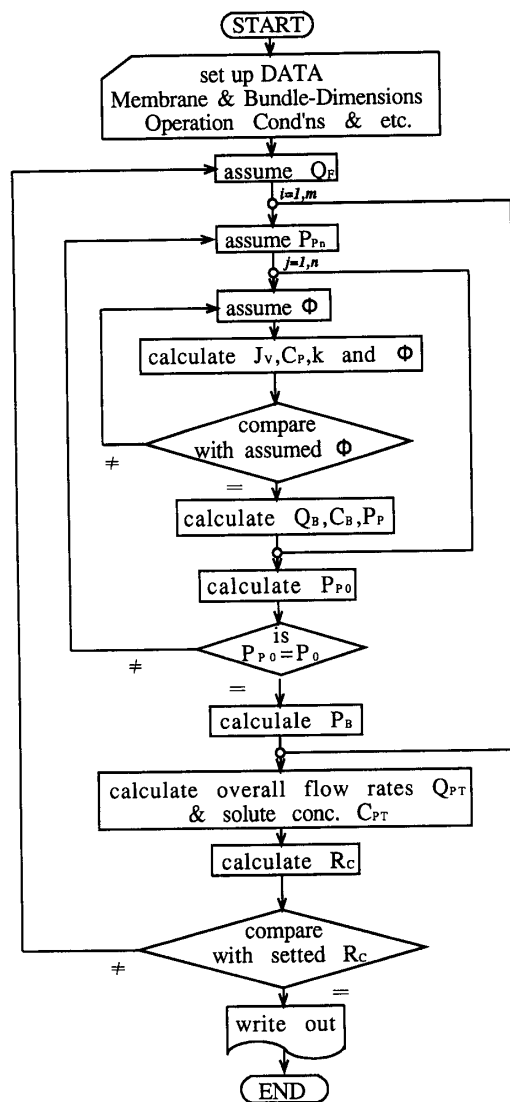


図5 FCPモデルでの数値計算フローダイアグラム

合致するまで，仮定供給量 Q_F を変更して，計算を進めていくことになる。ここで，分割数 m ， n は，出力収斂値との誤差が，最大0.2%以内に納まるように設定した。

3. 実データによるシミュレーションの検証

3.1 逆浸透モジュール実験

供試モジュールとして東洋紡モジュールHollosep™を使用する。1エレメント1ベッセル型の標準型8インチ径モジュールとして，海水淡水化用モジュールHR8355を選定した。その仕様を表1に示す。

実験装置概略を図6に示す。装置は，逆浸透モジュール，高圧ポンプ，恒温コントロール装置，レリーフ

表1 中空糸膜モジュール仕様

Model HR8355 for seawater		
Nominal productivity	[m ³ /s]	1.4×10^{-4}
Nominal salt rejection	[%]	99.4
Standard operating conditions:		
C_F	[kg/m ³]	35
P_F	[MPa]	5.5
T_F	[°C]	25
R_c	[-]	0.30
Dimensions:		
D_i	[m]	0.04
D_o	[m]	0.19
L_s	[m]	0.07
L_A	[m]	0.99
N	[-]	5.98×10^4
σ	[-]	0.55
S	[m ²]	361
Characteristics of hollow fiber:		
$d_o \times 10^6$	[m]	163
$d_i \times 10^6$	[m]	70
A	[kg/(m ² ·s·Pa)]	2.9×10^{-10}
B	[m/s]	8.1×10^{-10}

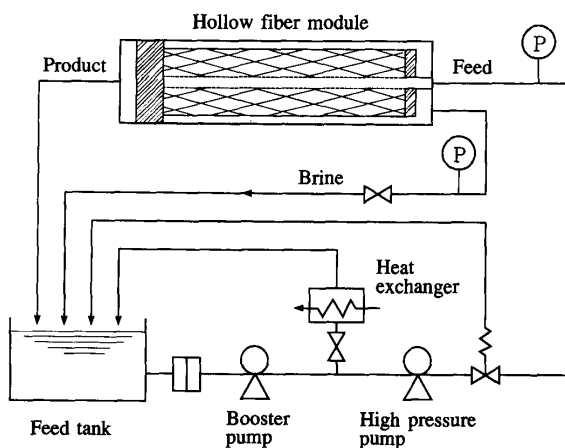


図6 逆浸透モジュール実験装置のフロー図

弁等から構成されている。供給液は、塩化ナトリウム水溶液であり、フィードタンク内で所定濃度・温度に調整維持され、ブースターポンプ、高圧ポンプを経て、再度フィードタンク内へ戻される循環系にて、実験は行われる。

各実験条件は、供給液として、30~45 kg/m³ 濃度の塩化ナトリウム水溶液を、回収率として0.1~0.4、操作圧力として5.5~6.5 MPa、温度は、20~40°Cの実験範囲を採用した。

3.2 結果および考察

上記の逆浸透モジュール実験によって得られたモジュールの諸特性値を、FCPモデルによる計算値と比較、検討する。

供給液濃度、回収率の異なる条件について行った本実験の実測値と計算値との比較を、図7に示す。図中の実線は前章で示したシミュレーションモデル、すなわちFCPモデルによる計算値を表しており、良好な整合性が認められる。

次にこのFCPモデルを従来のモデルと比較、検討するために、中空糸内流動圧損を無視したNFモデル(Non-Friction Model)と、膜面の濃度分極を無視したNCモデル(Non-Concentration-Polarization Model)を挙げ検討した¹⁷⁾。

NFモデルの計算はFCPモデルにおいて、 $P_{Fj}=P_0$ として行った。

NCモデルでは、FCPモデルにおいて、 $\Phi_{ij}=1.0$ として計算した。

図8.1~図8.4に供給液濃度、回収率、圧力、温度をパラメーターに、上記の各モデルによる計算値と実測値とをプロットして示した。

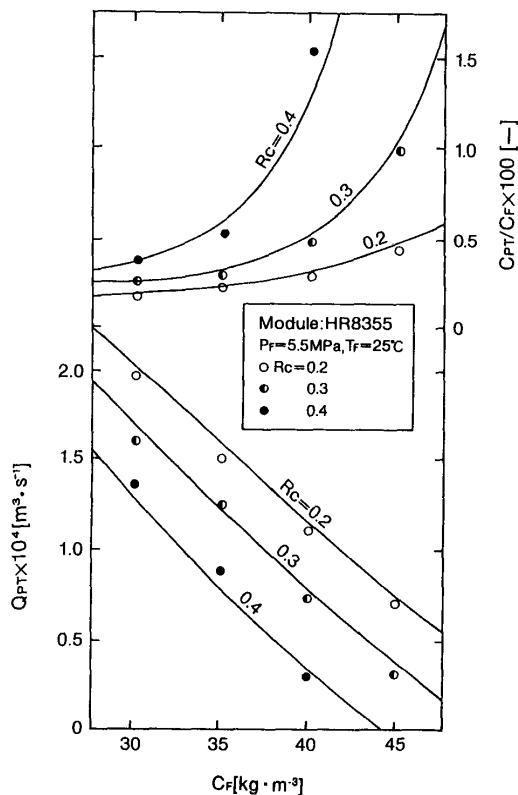
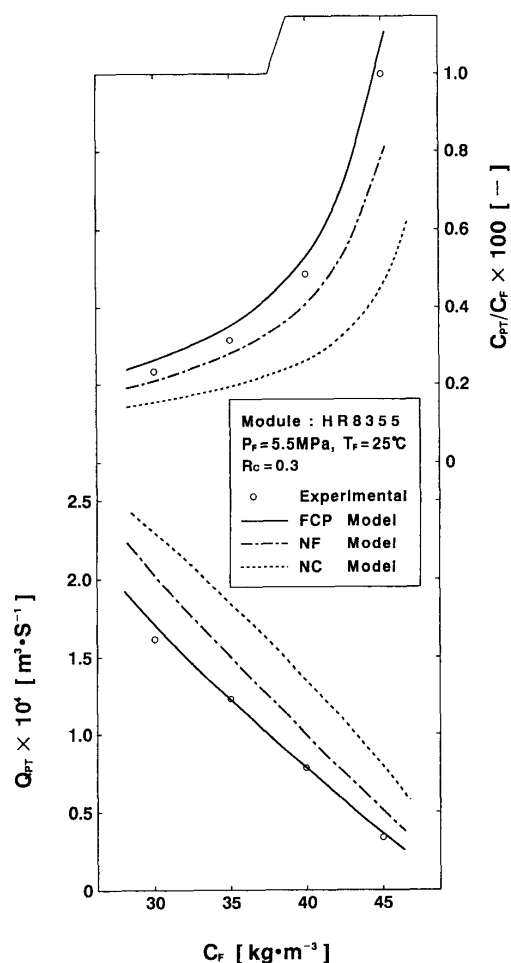
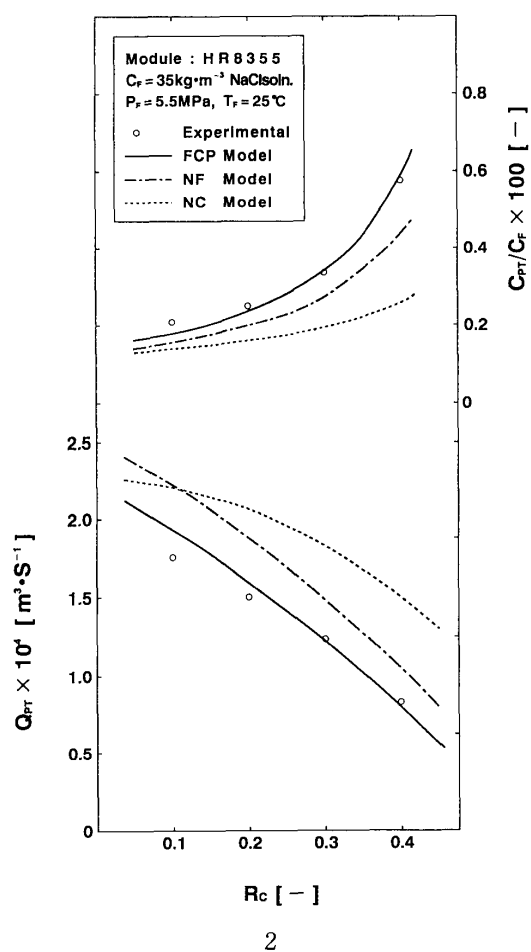


図7 モジュール性能の計算及び実験結果（供給液塩濃度の影響）



(供給液塩濃度の影響)



(回収率の影響)

図8 FCPモデルと従来のモデルの比較 1~4

図8.1では供給液濃度が高くなるほど高浸透圧となるため膜透過量は減少し、中空糸内流動圧損が小さくなりその結果、透過流量についてはNFモデルはFCPモデルに漸近する。図8.2では、回収率が高い場合、供給液流速が小さくなり膜面の濃度分極が大きくなるためNCモデルでは実測値との乖離が大きくなる。図8.3では透過流量は圧力と共に増加し中空糸内流動圧損も増加するため、NFモデルの実測値との乖離は圧力と共に大きくなる。図8.4では透過流量が温度と共に増加するため圧力依存性の場合と同様にNFモデルで実測値との乖離が増大している。すなわち、NF, NCモデル共に実測値との乖離が大きく、海水淡水化用モジュールの場合浸透圧が大きいため、NCモデルでは乖離が特に大きい。膜面の濃度分極、中空糸内流動圧損を同時に考慮した本FCPモデルは実測値との整合性は良好であり、本モデルの妥当性が検証さ

れた。

4. おわりに

中空糸型逆浸透モジュールは、1970年代よりデュポン、ダウケミカル、東洋紡によって、製品化された。折しも国内では、1979年より通産省・創造水促進センターによる国家プロジェクトとして、茅ヶ崎800 m³/日逆浸透法海水淡水化実証テストが開始され、長期性能と経済性の確認、運転法の確立等を目指して、足掛け10年におよび実証試験が実施されてきた。ここで実証された東洋紡モジュールはその後大型化し、サウジアラビア・ジェッダ市で56,800 m³/日プラントに採用されるに至っている。

この中空糸型逆浸透モジュールの性能解析は1960年代半ばより1980年にかけて多くの論文が発表されているが、必ずしも実際のモジュール性能を反映している

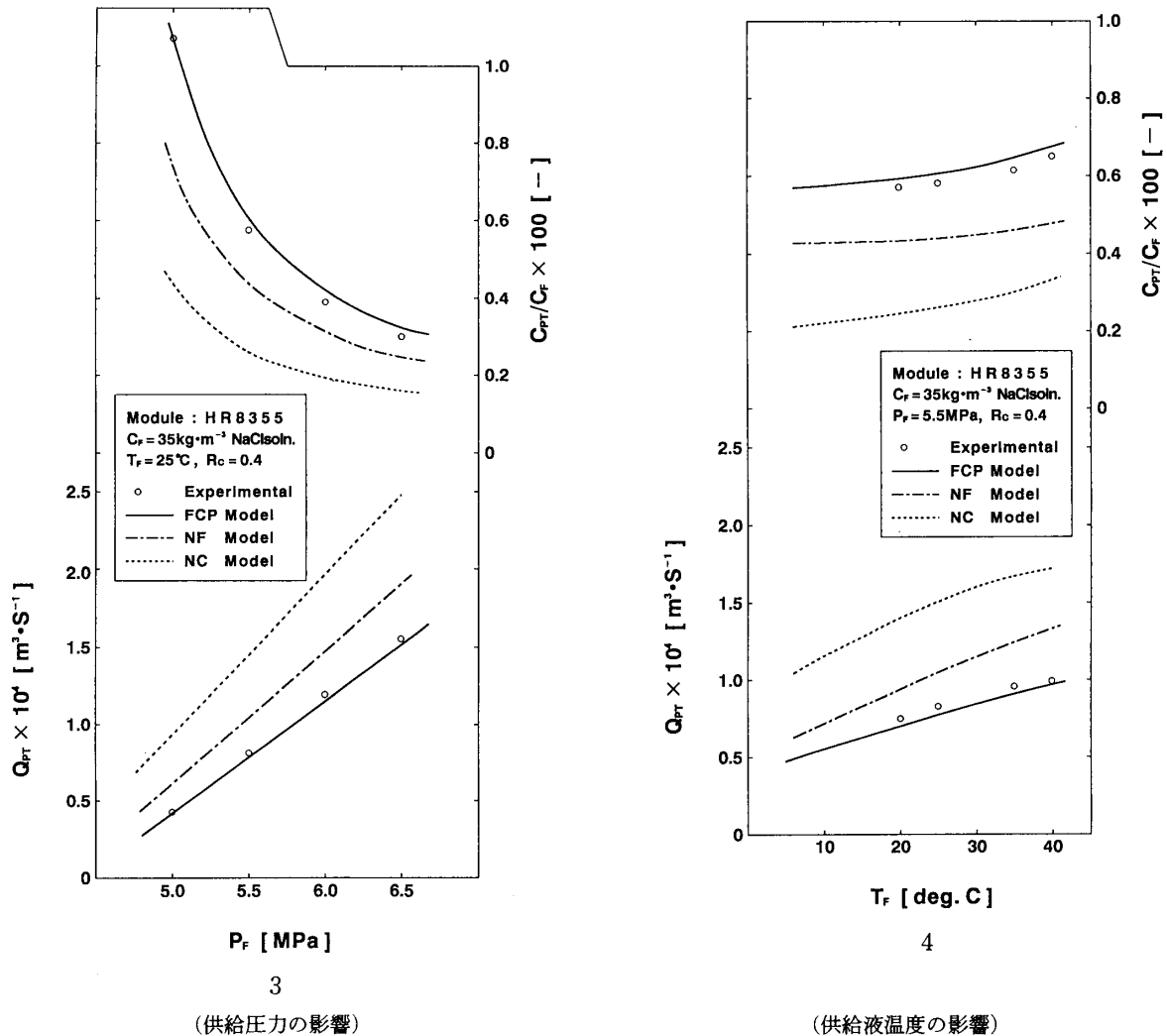


図8 FCPモデルと従来のモデルの比較1~4

とは言いがたく、実設計においても不都合を生じていた。

関野らは、ここで示した新規のシミュレーションモデルとして、FCPモデルを作成した。これは、膜透過式として Kimura-Sourirajan モデルすなわち溶解拡散モデル式および濃度分極モデル式を用い、実モジュールによる逆浸透実験を行い、物質移動相関式を導出し、中空糸内流動圧損、中空糸集束体内流動圧損の計算に各々 Poiseuille 式、Ergun 式を適用し、膜透過係数値には中空糸内透過液の流動圧損を零外挿して得た算出値を使用している。幸い本 FCP モデルは良く実モジュール性能を説明することができ、モジュール設計製作上の有力な手段となってきた。

現在、中空糸型逆浸透モジュールは海水淡水化市場において、従来の蒸発法プラントに次ぐ大きなシェア

を占めつつある。今後、発展期を迎えようとしている中空糸型逆浸透モジュールについて、本報告で記した FCP モデルがさらに役立つ事を期待する。

記号

A	= 純水透過係数	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$
B	= 溶質輸送係数	$[\text{m}/\text{s}]$
C	= 溶質濃度	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
D	= 拡散係数	$[\text{m}^2/\text{s}]$
D_I	= 中空糸集束体の内径	$[\text{m}]$
D_O	= 中空糸集束体の外径	$[\text{m}]$
d_I	= 中空糸内径	$[\text{m}]$
d_{IS}	= チューブシート部の中空糸内径	$[\text{m}]$
d_O	= 中空糸外径	$[\text{m}]$
d_p	= 比表面積径	$[\text{m}]$

J_S	= 溶質透過流束	[kg/(m ² ·s)]	M	= 膜表面
J_V	= 溶液透過ポリューム流束	[m ³ /(m ² ·s)]	P	= 透過側 (中空部側)
J_W	= 水透過流束	[kg/(m ² ·s)]	T	= 総和
k	= 物質移動係数	[m/s]		
L_A	= 中空糸束の有効長	[m]		
L_S	= チューブシート部の中空糸束の有効長	[m]		
l_A	= 中空糸の有効長	[m]		
l_S	= チューブシート部の中空糸の有効長	[m]		
m	= 径方向分割数	[—]		
N	= 中空糸本数	[—]		
n	= 軸方向分割数	[—]		
P	= 圧力	[Pa]		
P_0	= 透過水出口圧力	[Pa]		
Q	= 流量	[m ³ /s]		
Rc	= 回収率	[—]		
Re	= レイノルズ数, $d_0 V_B \rho / \mu$	[—]		
r	= 径方向座標	[m]		
S	= 膜面積	[m ²]		
Sc	= シュミット数, $\mu / \rho D$	[—]		
Sh	= シャーウッド数, kd_0 / D	[—]		
t	= 温度	[°C]		
V	= 流速	[m/s]		
V_S	= 空塔速度	[m/s]		
z	= 軸方向座標	[m]		

Greek letters

α	= 浸透圧係数	[Pa/kg·m ³]
Δ	= 差	[—]
ε	= 空隙率	[—]
ξ	= 単位容積当たりの膜面積	[1/m]
μ	= 粘度	[Pa·s]
Π	= 浸透圧	[Pa]
ρ	= 密度	[kg/m ³]
σ	= 中空糸束の充填密度	[—]
Φ	= 濃度分極係数	[—]

Subscripts

B	= バルク (シェル側)
F	= 供給側 (シェル側)
i	= 径方向座標の i 番目
j	= 軸方向座標の j 番目

参 考 文 献

- 1) 熊野：逆浸透法を用いた造水技術の最近の動向，繊維学会誌，48-2，70/76 (1992)
- 2) Klaus Wangnick: 1994 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report 13
- 3) 岩橋：海水の淡水化技術と分離膜への要求性能，ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム'95，5-5-1/5-2-8 (1995)
- 4) 塩田，森岡：砂漠に消えた水-海水淡水化装置，化学工業，55-10，748/750 (1991)
- 5) Dandavati, M. S., M. R. Doshi and W. N. Gill: Hollow Fiber Reverse Osmosis: Experiments and Analysis of Radial Flow Systems, Chem. Eng. Sci., 30, 877/886 (1975)
- 6) Hanbury, W. T., A. Yuceer, M. Tzimopoulos and C. Byabagambi: Pressure Drops along the Bores of Hollow Fibre Membranes-Their measurement, Prediction and Effect on Fibre Bundle Performance, Desalination, 38, 301/318 (1981)
- 7) Rautenbach, R. and W. Dahm: Design and Optimization of Spiral-Wound and Hollow Fiber RO-Modules, Desalination, 65, 259/275 (1987)
- 8) Ohya, H., H. Nakajima, K. Takagi, S. Kagawa and Y. Negishi: An Analysis of Reverse Osmotic Characteristics of B-9 Hollow Fiber Module Desalination, 21, 257/275 (1977)
- 9) 関野，藤原：中空糸型逆浸透モジュールの性能解析，化学工学論文集，17，1088/1095 (1991)
- 10) Moch, Jr., I.: Hollow Fiber Permeators and Reverse Osmosis, Desalination & Water Reuse, 3/2, 30/37 (1993)
- 11) Lonsdale, H. K., U. Merten and R. L. Riley: Transport Properties of Cellulose Acetate Osmotic Membranes, J. Appl. Polym. Sci., 9, 1341/1362 (1965)
- 12) Kimura, S. and S. Sourirajan: Analysis of Data in Reverse Osmosis with Porous Cellulose Acetate Membranes Used, AIChE J., 13, 497/503 (1967)
- 13) Bird, R. B., W. E. Stewart and E. N. Lightfoot: Transport Phenomena, Chap. 4, John Wiley & Sons, New York (1960)
- 14) Ergun, S.: Fluid Flow Through Packed Columns, Chem. Eng. Progr., 48, 89/94 (1952)
- 15) Sourirajan, S.: Reverse Osmosis, Logos Press., London (1970)
- 16) Perry, J. H.: Chemical Engineer's Handbook 3rd Ed., McGraw-Hill, New York (1950)
- 17) Sekino, M.: Precise Analytical Model of Hollow Fiber Reverse Osmosis Modules, J. Mem. Sci., 85, 241/252 (1993)