海水淡水化多段フラッシュ蒸発装置の部分負荷への動特性に関する実験

佐藤 真士・伊ヶ崎 文和
菅 田 孟・外 山 茂 樹
堀 田 和 之*・遠 山 武**

東京工業試験所 プロセス開発部†

多段フラッシュ蒸発装置の大幅な負荷変動についての動特性は発電との二重目的といった場合に問題となる。こうした場合の多段フラッシュ蒸発装置の動特性を知るために、3,000 m³/d のテストプラントを用いて実験的研究を行った。すなわちステップ状の入力変化を与え、応答からフーリエ変換により周波数伝達関数を計算しボード線図を求めた。その結果多段フラッシュ蒸発装置の制御および部分負荷運転に対する次の基礎的知見を得た。入力によって装置特性が異なること、簡単な次数遅れ系では表現が困難であること、制御の観点からはほぼ 1.0~1.5 rad/min 以下の特性に注目すればよいこと、その他部分負荷定常運転によって安定運転の限界値を図的に得たこと、などである。

緒 言

近い将来に予想されている水不足に対処するため、わが国では通商産業省工業技術院が大型工業技術研究開発制度(大型プロジェクト)として「海水淡水化と副産物利用」の研究を取り上げ、大型多段フラッシュ蒸発装置の開発を中心に組織的な研究を推進している。このプロジェクトで開発目標としている 10~20 万 m³/日規模の大型プラントは火力発電所の背圧タービンからの蒸気を造水装置の加熱用蒸気とする二重目的プラントとして実用化されるとみられている。そこで、動特性研究としては電力需要変動に対する造水装置の追従性についての研究が課題となる。すなわち、加熱蒸気量の大幅な低下により造水装置は部分負荷運転に至るが、その過程および逆過程の動特性についての研究である。これは造水装置の起動や停止時における動特性にも関連するものとなる。

造水装置を多段プロセスとみた場合にこの種の動特性研究としては蒸留塔について多くの研究^{2,8,12,15,16)}がある。これらは線形化近似モデルを導き、その実験的検証を行ったものである。またシグナルフローダイアグラム法による研究も Ceaglske³⁾ や大沢ら¹⁰⁾ によって行われている。海水淡水化では多重効用法に関して大谷¹¹⁾ の、多段フラッシュ法に関して青木ら¹⁾ の研究がある。大谷は三重効用缶について線形化モデルを導き実験データとの比較検討によりモデルは適用できるとしている。青木らは 28 段の多段フラッシュ蒸発装置について線形化モデルにより検討を加えている。しかし実験的検証は行っていないし、系の安定運転に直接影響する液レベルの変動

に触れていない。

以上の研究はすべて、全負荷付近での動特性についての研究であり、部分負荷状態に至る大幅な変動過程の動特性といった観点からは行っていない。これに対し、著者らは部分負荷状態に至る過程を取り上げた。多段フラッシュ蒸発装置では各段の液レベルがある範囲内を越えて低下するとオリフィスを通して次段への吹き抜けを起こすし、上昇すると生成水への飛沫の混入によって生成水純度が悪化する。極端な場合には伝熱管の浸漬を起こすことになる。そこで全負荷状態から部分負荷状態には液レベルがある範囲内におさまるようにブラインヒータ出口のブライン温度を下げ、次いで循環ブライン流量を下げるといった逐次操作を行えばよい。これらのことから部分負荷状態に至る過程の動特性を明らかにする第 1 段階として、各部分負荷においてその状態の伝達関数を求め、全過程の特性について基礎的知見を得ること、および上述のような逐次操作による制御を可能とする情報を得ることを目的として、各部分負荷における動特性を大型プロジェクト研究の一環として設置した 39 段のフラッシュ蒸発装置を用いて実験的に求めることを試みた。

実験データから系の動特性を求める研究としては、モーメント法によって系の近似モデルを求める研究^{4,9)}、あるいはデータのフーリエ変換により系の周波数伝達関数を求める研究^{6,7)}がある。著者らは後者の方法により、系の周波数伝達関数をボード線図上に求め、系の動特性について検討を加えた。

1. 実験装置と実験方法

海水を淡水化する多段フラッシュ蒸発装置の概念図を Fig. 1 に示す。海水は熱放出口の伝熱管に入り、予熱さ

† 〒151 渋谷区本町 1-1-5

* 北海道大学工学部 衛生工学科

** 日本大学 生産工学科

れて大部分は海に放出される。一部は補給水として熱回収部に導かれる。海水は伝熱管内を流れる間にフラッシュ室で発生する蒸気を凝縮し昇温する。この海水はここを出るとブラインヒータに導かれ、さらに外部からの加熱蒸気によって昇温し、フラッシュ室に導かれ、沸騰し蒸気を発生する。これを逐次低圧段へ導き蒸発を繰り返す。発生した蒸気は伝熱管表面で凝縮し淡水となってトレイに集められ、生成淡水として系外に取り出される。

ブラインヒータ出口のブライン温度はスケール析出限界から最高温度を 121°C と限定される。全負荷運転における循環ブライン流量は造水容量から決まる。各段の液レベルは全負荷状態で各段間のオリフィスの開口面積を調整し、各段均一になるようにされる。そして、オリフィスはこの状態に固定される。

この装置の主な調節計は Fig. 1 に示すように、ブラインヒータ出口ブライン温度 T_{Bmax} をコントロールする TRC と、循環ブライン流量 W_R をコントロールする FRC および最終段の液レベルをコントロールする LIC である。この調節系ではブラインヒータの熱入力に変化があったり、 W_R が変化したりして、負荷に変動が起これると各段の液レベルが変化することになる。液レベルの変動はある範囲を越えると前述のようにプラントの正常な稼動に支障をきたすことになる。よって実験では負荷変動による影響が大きく、装置の安定運転に大きく関与している液レベルの応答に注目した。

実験装置の主な仕様を Table 1 に示す。実験装置は東京工業試験所臨海研究施設に設置した日産 $3,000\text{ m}^3$ の造水容量をもつ 39 段の高流速長管式多段フラッシュ蒸発プラントである。実験装置のフラッシュ室は幅 1.00 m 、高さ 2.60 m で、1 段あたりの長さは熱回収部 3.24 m 、熱放出版 6.11 m 、1 段あたりの伝熱面積は熱回収部 164.4 m^2 、熱放出版 200.6 m^2 である。著者らの実験時には高流速化実験を行っており、フラッシュ室幅をせばめ、 W_R は $1,000\text{ m}^3/\text{hr}$ であった。このことにより、フラッシュ室単位幅あたりの流量は、設計時の $900\text{ m}^3/\text{hr}$ から約 $1,670\text{ m}^3/\text{hr}$ に高流速化していた。

このプラントには Fig. 1 に示す以外に多くの計装品を取り付けた。それらからの信号はミニコンピュータを中心に構成したデータ処理装置¹³⁾で集録した。液レベルの検出は DP セルによったが、1~4, 8, 14 段の信号はペンレコーダにも同時に記録した。

多段フラッシュ蒸発装置の負荷に関する成績係数(単位加熱蒸気量あたりの造水量)は、収支関係を単純化すると移動単位数と温度幅に関する一つの式で表すことができる¹⁴⁾。この関係から移動単位数にかかわる循環ブライン流量 W_R とフラッシュ温度幅にかかわる最高ブライン温度 T_{Bmax} とが負荷変動を支配する変数であるこ

Fig. 1 Schematic diagram of MSF test plant

Table 1 Specification of MSF test plant

Type	Long tube high flow rate multi-stage flash evaporator				
Capacity of Water	3,000 m ³ /d				
Performance Ratio	11				
Number of Stage (N), Dimension of Stage and Heat Transfer Area (A)					
	N	width [m]	height [m]	length [m]	A [m ²]
heat recovery section	36	1.00	2.60	3.24	164.4
heat rejection section	3	1.00	2.60	6.11	200.6
Sea Water Temp. on Design	25.0°C				
Brine Temp. at Outlet of Brine Heater (T_{Bmax})	121.0°C				
Blowdown Temp.	34.0°C				
Blowdown Brine Concentration Ratio	2.0				
Recycle Brine Flow Rate (W_R)					
(at design flow rate)	900 m ³ /hr (900 m ³ /hr m-width)				
(at high flow rate test)	1,000 m ³ /hr (1,670 m ³ /hr m-width)				

とがわかる。

よって、実験は次の方法により温度変化を入力とする場合と W_R の変化を入力とする場合の二とおり行った。Fig. 1 において、① FRC は自動とし、TRC を手動に切り換え、 T_{Bmax} にステップ状の微小変化を与え、 T_{Bmax} がほぼ一定になるとその値に TRC の設定点を変え自動に戻す。② TRC は自動で FRC を手動に切り換え、 W_R にステップ状の微小変化を与え、 W_R がほぼ一定になるとその値に設定点を変え自動に戻す。この場合、熱回収部の伝熱管内ブライン流量と第 1 段入口フラッシュブライン流量とが同時に変わる。また実験から W_R をステップ状に変化させたときの T_{Bmax} はほぼ一定値にコントロールされていることを確認した。以上の操作から、実験で対象とした系は Fig. 1 の熱回収部、熱放出版であって、熱回収部第 1 段より左側に示したブラインヒータなどは系に含んでいない。①および②にステップ変化を系に入力したあと、十分に定常に達したところで逐次これらを繰り返して各部分負荷におけるこの装置の応答を調べた。この間データ処理装置を 0.5 分ごとに全点走査し、データを磁気テープに集録した。

集録したデータから次の関係式により周波数伝達関数のゲインと位相を入出力データのフーリエ変換により求める方法をとった。この実験では入力 $y(t)$ (T_{Bmax} または W_R) は Fig. 2 の T_{Bmax} のように正確なステップ関数とはならない。すなわち $y(t)$ はそれに対する出力 $x(t)$

Fig. 2 Response of brine level in 8th stage to step down T_{Bmax} change

Fig. 3 Transfer-function (a; Gain, b; Phase) of brine level in 8th stage obtained for step down T_{Bmax} change

(第8段液レベル)とともに、ある一定値から他の一定値へと変化する関数であり、これを便宜上ステップ関数と呼ぶことにする。いま正確な単位ステップ入力に対する応答がステップ関数 $f(t)$ となるようなシステムの周波数伝達関数を $G_F(j\omega)$ とすると、次式が成立する。

$$G_F(j\omega) = f(\infty) - j\omega F_b(j\omega) \quad (1)$$

ただし

$$F_b(j\omega) = \int_0^{\infty} \{f(\infty) - f(t)\} e^{-j\omega t} dt = F[f(\infty) - f(t)]$$

ここで

$$f(0^-) = f(0^+) = 0$$

を前提した。

この実験の場合、単位ステップ応答がそれぞれ $y(t)$ および $x(t)$ となるような仮定のシステムの周波数伝達関数を $G_Y(j\omega)$ および $G_X(j\omega)$ とすると明らかに

$$G_X(j\omega) = G_Y(j\omega)G(j\omega) \quad (2)$$

であるからこのシステムの周波数伝達関数 $G(j\omega)$ は次式で求められる。

$$G(j\omega) = G_X(j\omega)/G_Y(j\omega) \quad (3)$$

よって、ゲイン $|G(j\omega)|$ と位相 $\angle G(j\omega)$ は次式から計算される。

$$|G(j\omega)| = \sqrt{G_{XI}^2 + G_{XR}^2} / \sqrt{G_{YI}^2 + G_{YR}^2} \quad (4)$$

$$\angle G(j\omega) = \tan^{-1}(G_{XI}/G_{XR}) - \tan^{-1}(G_{YI}/G_{YR}) \quad (5)$$

ここで添字 I は虚数部、 R は実数部を表す。

なお実際の計算にあたっては入出力は $E(t) = \{f(t) - f(0)\} / \{f(\infty) - f(0)\}$ として無次元化した。またフーリエ変換には Filon の公式⁹⁾を用いた。こうして求めたプロセスの周波数伝達関数のゲインと位相とはボード線図に描いてプロセスの特性を知ることにした。

2. 実験結果とその考察

予備実験により、この実験装置では第8段の液レベルが最も大きく変動し安定化運転を支配することがわかった。Rosenbrock ら¹²⁾は蒸留塔に関して途中段に変化の大きいところがあることを報告している。そこで第8段に注目し、その測定結果をまとめた。

データは0.5分間隔にデータ処理装置で集録したものを中心に計算に用いた。サンプリング定理によって0.5分間隔のデータで信頼しうる最大周波数はフーリエ変換に矩形近似を用いたとき2 rad/minである。著者らはFilonの公式を用いたので、さらに高い周波数まで信頼しうることになるが、計算結果のバラツキはじめる点を一応の目安として2 rad/min以下のところに注目することとした。

2.1 T_{Bmax} 低下型ステップ入力の場合

Fig. 2に T_{Bmax} の低下型ステップ入力に対する第8段液レベルの応答例を示す。 T_{Bmax} の低下によって液レベルは初期にわずかに低下し、その後しだいに増加していく一般的傾向がわかる。初期の液レベルのわずかな低下は、より高温段の温度低下に伴う液レベルの上昇により、第8段でのブライン流量の減少および温度低下の時間遅れによって生じたものである。

Fig. 2に示すような応答から前述の方法で第8段液レベルの周波数伝達関数のゲインと位相とを計算し、その結果をFig. 3に示す。ゲインはFig. 3(a)より T_{Bmax} が

Fig. 4 Transfer-function (④; Gain, ⑤; Phase) of brine level in 8th stage obtained for step up T_{Bmax} change

116°C以上のところで正の側に山ができるのが特徴で、この山は T_{Bmax} の低下とともに低くなり低周波側へ移行することがわかる。またどの温度の場合も周波数 ω の低い方から高い方へ行くにしたがって、ゲインはいったん低下するが反転し $\omega = 0.5 \sim 1$ rad/min のところでピークを形成している。

位相は Fig. 3⑤より T_{Bmax} 121°C のときには図の周波数範囲では ω の高いところまで位相遅れがないが、 T_{Bmax} がより低い場合には $\omega = 0.3 \sim 0.4$ rad/min のところから急激に位相遅れが増大することが明らかとなった。

2.2 T_{Bmax} 上昇型ステップ入力の場合

測定結果から求めた第8段液レベルの周波数伝達関数のゲインと位相とを Fig. 4 に示す。ゲインは Fig. 4④より T_{Bmax} 101°C の場合を除いて、温度が高くなるにつれて ω の高いところまで低下せず、 ω の低いところの谷は105, 113, 115°C に対して、それぞれ -22, -10, -6 dB と温度と共に大きくなっている。また図の ω の高い方には Fig. 3 と同様、ピークが現れるが、全体として Fig. 3 とは違った特性を示している。

位相は Fig. 4⑤より ω が高くなるにしたがい単調に位相遅れが増大し、0.1~0.2 rad/min 付近で、どの温度に対しても 180 度に達している。また位相についても Fig. 3 とは違った特性がみられ、結局この系では T_{Bmax} のステップ入力の型によって得られた特性が異なることがわかった。

なお Fig. 4 には T_{Bmax} 101°C の場合のゲインと位相も示したが、これは T_{Bmax} 105°C 以上の場合の傾向とまったく異なる傾向を示した。これは図に省略した T_{Bmax} 103°C の結果とほぼ一致しており、105°C を境に装置特性が大幅に変化することがわかった。

Fig. 5 Transfer-function of brine level in 8th stage obtained for step down W_R change

2.3 W_R 低下型ステップ入力の場合

T_{Bmax} を一定に保ち、 W_R にステップ変化を与え、第8段液レベルの応答について検討した。求めたボード線図を Fig. 5 に示す。図からゲインは111°Cの方が高い周波数まで低下していないが、103°Cの傾向と一致したものであり、かつ位相もよく一致していることから、この場合には T_{Bmax} の影響は小さいことがわかった。 ω は1.5 rad/min 以下に注目すればよく、位相遅れは $\omega = 0.5$ rad/min 付近で180度である。

2.4 W_R 増加型ステップ入力の場合

測定結果から求めた第8段液レベルの周波数伝達関数のゲインと位相とを Fig. 6 に示す。ゲインは0.2 rad/min 付近までは ω が高くなるにしたがい小さくなるがさらに高くなると谷を形成し、次にピークが現れる。 T_{Bmax} 103°C の場合を除いて、 T_{Bmax} が高くなるにつれて、谷

Fig. 6 Transfer-function (a); Gain, (b); Phase) of brine level in 8th stage obtained for step up W_R change

Fig. 7 Brine level in 8th stage in each stationary partial load operation long after step down W_R or T_{Bmax} change

の値は次第に大きくなり、ゲインの変化は小さくなる。この傾向は $103^{\circ}C$ ではまったく異なったものである。図には示していないが、 $105^{\circ}C$ および $101^{\circ}C$ での傾向は、この $103^{\circ}C$ の結果とよく一致していることから、 T_{Bmax} 上昇型の場合と同様、 $105^{\circ}C$ 付近を境に、この場合も装置特性が大幅に変化することがわかった。

位相は ω が高くなるにしたがい位相遅れは増大するが、さらに高くなると反転してピークを形成し、それ以降は急激に位相遅れが増大する傾向をもつ。この位相の谷の周波数はゲインの谷の周波数とほぼ一致している。また位相遅れの谷とピークとの差は温度が高いほど小さくなり、ゲインの谷とピークとの関係と一致している。

Fig. 5 との比較から W_R 低下型の場合とはまったく異なる特性を持っていることがわかった。

以上のように第8段階液レベルの応答について、入力の種類と型とに対して、それぞれの結果を示してきた。その結果、入力の型が異なると装置特性が異なること、この系は簡単な次数遅れ系では表せないこと、一般に

T_{Bmax} が高くなるにしたがいゲインの変化は小さくなり ω の高いところまで減衰しなくなることを、しかしほぼ $1.0 \sim 1.5 \text{ rad/min}$ 以下の周波数範囲に注目すればよいこと、 T_{Bmax} 上昇型と W_R の増加型では T_{Bmax} $105^{\circ}C$ 付近を境に装置特性が大幅に変化することがわかった。さらに T_{Bmax} と W_R との入力による第8段階液レベルのそれぞれの応答はほぼ同じ周波数範囲に注目すればよいことから T_{Bmax} の外乱に対して W_R を操作量あるいは W_R の外乱に対して T_{Bmax} を操作量とした制御の可能性について基礎的知見が得られた。

2・5 部分負荷運転における液レベル静特性

多段フラッシュ蒸発装置の負荷を大幅に変化させた場合の静特性を知ることは、この装置の制御を考える上で最も基礎的な知見を得ることになる。部分負荷運転における液レベルの静特性データが、以上の動特性実験の結果として求めた。第8段階の結果を Fig. 7 に示す。図は W_R を横軸に液レベルを縦軸にとり、 T_{Bmax} をパラメータとした。この実験装置では液レベルが 200 mm 以下ではオリフィスを通して次段へ蒸気の吹き抜けが起こり、 $1,200 \text{ mm}$ 以上では生成水純度が急激に悪化するというように、これらの値がそれぞれ安定運転の上下の限界値となっている。図から T_{Bmax} 一定では W_R が減少するにしたがって液レベルは減少し、ほぼ W_R と直線関係にあること、 W_R 一定では T_{Bmax} が小さいほど液レベルが高くなること、などがわかる。また T_{Bmax} $116^{\circ}C$ 以上の負荷の大きいところでは、液レベルはほぼ設計値 ($400 \sim 500 \text{ mm}$) 近くにあり、 W_R の変化、 T_{Bmax} の変化の影響が小さいことがわかった。

結 言

海水淡水化大型多段フラッシュ蒸発装置の動特性に関する実験研究として加熱蒸気量の変動に対する造水装置

の大幅な負荷の変動運転に適用する解析モデルを検討するため、大型プロジェクト研究の一環として運転した3,000 m³/d テストプラントの入出力データをフーリエ変換し周波数伝達関数として求め解析した。

その結果各部分負荷運転に対して、 T_{Bmax} と W_R とのそれぞれの入力に対して、この装置の安定運転を支配する第8段液レベルの周波数伝達関数をボード線図上に求めることができた。同時に各部分負荷における液レベルの限界値が T_{Bmax} をパラメータとして W_R に対して求めた。これらから部分負荷運転に至る過程の特性が明らかとなった。すなわち、①入力の型によって装置特性が異なること、②周波数伝達関数のゲインには、いずれの場合にも、谷とピークが現れ、簡単な次数遅れ系では表せないこと、③ T_{Bmax} が高くなるにしたがいゲインは一般に ω の高いところまで減衰しないこと、④しかしこの系ではほぼ1.0~1.5 rad/min 以下の周波数領域の特性に注目すればよいこと、⑤ T_{Bmax} と W_R とはそれぞれ互いに一方の外乱に対して他方が操作変数となりうること、⑥液レベルの静特性が得られ、 T_{Bmax} 116°C 以上の高負荷運転では液レベルの変動は小さいこと、などの一般的特性が明らかとなった。以上のようにこのプロセスの特性を明らかとする上で、ここに適用した入出力のフーリエ変換により周波数伝達関数を求める方法は有効であることがわかった。

Literature cited

- 1) Aoki, H. and K. Hayakawa: Preprints of the 47 th Annual Meeting of the Atomic Energy Soc., Japan, D51, Kyoto (1972)
- 2) Armstrong, W. D. and R. M. Wood: *Tran. Instn. Chem. Engrs.* (London), 39, 65 (1961)
- 3) Ceaglske, N. H.: *AIChE J.*, 7, 653 (1961)
- 4) Hotta, K., H. Ozoe and K. Iinoya: *Trans. Soc. Instrument Control Engrs.* Japan, 4, 143 (1968)
- 5) Hotta, K., H. Ozoe and K. Iinoya: *ibid.*, 4, 265 (1968)
- 6) Hotta, K., H. Araki and K. Iinoya: *Seigyo Kogaku*, 12, 29 (1968)
- 7) Hougen, J. O. and R. A. Walsh: *Chem. Eng. Prog.*, 57, 69 (1961)
- 8) Levy, R. E., A. S. Foss and E. A. Grens II: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 8, 765 (1969)
- 9) Nihon Jidoseigyo Kyokai: "Process Seigyo Hand-book", Asakura, p. 304 (1965)
- 10) Osawa, T., T. Yokota and S. Sato: *Kagaku Kōgaku*, 31, 88 (1967)
- 11) Ohtani, H.: *Hitachi Zosen Tech. Review*, 35, (No. 1), 45 (1974)
- 12) Rosenbrock, H. H.: *Tran. Instn. Chem. Engrs.* (London), 40, 35 (1962)
- 13) Sato, M., T. Sugeta, S. Toyama and T. Tohyama: *Bull. Soc. Sea Water Sci.*, Japan, 30, 87 (1976)
- 14) Sato, M., K. Tahara, S. Toyama and T. Sugeta: *ibid.*, 26, 91 (1972)
- 15) Stainthorp, F. P. and H. M. Searson: *Tran. Instn. Chem. Engrs.* (London), 51, 42 (1973)
- 16) Stainthorp, F. P.: *ibid.*, 51, 51 (1973)

(1977 年 2 月 4 日受理; 日本海学会第 27 年会 (福岡, 1976 年 6 月) にて発表)

An Experiment on Dynamics of a Desalting Multi-Stage Flash Evaporator for a Partial Load

Masahito Sato, Fumikazu Ikazaki, Tsutomu Sugeta, Shigeki Toyama, Kazuyuki Hotta* and Takeshi Tohyama**

National Chemical Laboratory for Industry, Tokyo 151

Dynamics of a multi-stage flash evaporator (MSF) under wide load changes become a problem, such as at a dual purpose plant of a MSF and a power. Experiment were conducted to analyse the dynamics of a MSF in case of widely changing load using the 3,000 m³/d test MSF plant. Responses to step input changes are obtained to get the frequency transfer-functions and Bode diagrams through Fourier's transformation. Consequently, the following basic information was obtained about a control and a partial load operation of a MSF plant. This process shows different dynamics corresponding to types of input changes, namely step up and step down. Transfer-function of the MSF is difficult to describe by a simple time lag system. It is sufficient that dynamics of the MSF under 1.0~1.5 rad/min frequency is only considered in order to control this process. Also the limit values of stable operations is given in the figure through stationary partial load operations.

* Faculty of Engineering, Hokkaido Univ.

** Faculty of Manufacture Engineering, Nihon Univ.