

■ 特 集 ■ 省エネルギー

熱交換プロセスの省エネルギー構成とアプローチ温度

Synthesis of Heat Exchanger System for Energy Saving and Approach Temperature

高松 武一郎*

Takeichiro Takamatsu

寺下 雅之***

Masayuki Terashita

仲 勇 治**

Yuji Naka

高田 康晴****

Yasuharu Takada

はじめに

複数の加熱を要する流体と複数の冷却を要する流体間でどの様な熱交換システムを合成すればよいかは、化学プロセスでは勿論の事、多くのプロセス産業において共通の重要な課題である。この問題に関しては従来より数多くの研究があり¹⁾、何れも電算機採用設計(Computer Aided Design, CAD)を主としたものである。その考え方を大別すると、次の五つにまとめられる。

その第1は、熱交換システムで考えられるすべての構造を含んだ拡大したシステム構造をつくり、適当な評価関数のもとで通常の最適化の数的手法をもって問題を解き、不要の熱交換器、不要の分流はその値が0となることから最適な構成を定めようとするものである^{2), 3)}。第2に、Whistler⁴⁾によって提案された熱量ダイヤグラムの考え方を利用して最適構成問題を定式化する方法^{5) ~ 8)}がある。第3は、熱交換器についての化学工学的知見や過去の経験則などにもとづくいくつかの設計原理を利用するヒューリスティックなCADの方法であるが、最適性の保証はない⁹⁾。大規模、複雑な最適問題の探索範囲を軽減する方法にブランチ&バウンド法があるが、この方法を熱交換システムの構成問題に応用したものを第4の考え方として分類できる^{10) ~ 12)}。最後の5番目の考え方としていわゆる進化

的方法ともいえる方法がある。これは実行可能なある熱交換システムの構造を基準にとり、この構造を修正したとき評価関数の値が改善されるかどうかを逐次計算して最適な構成を探索してゆこうというものである^{13), 14)}。

上記のような熱交換システムの最適構成の問題は、評価関数のなかに加熱あるいは冷却に要するユーティリティを入れておけば、十分熱交換プロセスの省エネルギー構成の解が得られる筈である。したがって問題が解けることのみをもって設計、合成の問題が終了したと考えるのであるならば、今更熱交換プロセスの省エネルギー構成を取り上げなくてもよいかもかもしれない。しかし工学として重要なことは、如何に簡便に必要な精度内で熱交換プロセスの省エネルギー構成ができるか、ということであり、また最適構成の計算結果のみでなく、それが最適構成である原理的、物理的な意味づけが忘れられてはならない。

本論文は熱交換プロセスの省エネルギー構成を、有効エネルギー損失をできる丈小さくするという熱力学的観点と関係づけながら行なうことを目的として、複数の熱交換器におけるアプローチ温度の有効性を数値実験的に検討した結果をまとめたものである。

熱交換プロセスの熱有効エネルギー損失とTQ線図

1) 熱交換器の熱有効エネルギー損失

高温流体側、低温流体側とも顕熱変化による熱交換器の熱有効エネルギー損失(Thermal Available Energy Loss) Δe_s は

* 京都大学工学部化学工学教室教授

〒606 京都市左京区吉田本町

** 京都大学工学部化学工学教室

*** "

**** "

$$\begin{aligned} \Delta e_s &= \int_{T_0}^{T_1} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ + \int_{T_0}^{t_2} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ \\ &\quad - \int_{T_0}^{T_2} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ - \int_{T_0}^{t_1} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ \\ &= \int_{T_2}^{T_1} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ - \int_{t_2}^{t_1} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ \quad (1) \end{aligned}$$

で表わされる。この Δe_s を $(1 - T_0/T)$ 対 Q 線図上に画くと第1図(a)に示すように、斜線をつけた面積として表わされる。この面積が小さい程熱有効エネルギー損失が少ない熱交換器ということになる。なお縦軸を温度 T にとっても比較する熱交換の温度範囲が同じ程度ならば熱有効エネルギー損失の大小の定性的判断は変わらないと考えられるので、以下簡単のため T Q 線図で議論を進める。

潜熱同志の熱交換の場合(例えば蒸発缶などにおける凝縮潜熱と蒸発潜熱との交換など)は温度変化がなく、熱有効エネルギー損失 Δel は

$$\begin{aligned} \Delta el &= \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - \left(1 - \frac{T_0}{t}\right) Q \\ &= \left(\frac{T_0}{t} - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (2) \end{aligned}$$

で表わされ、第1図(b)に示すように矩形の面積で示さ

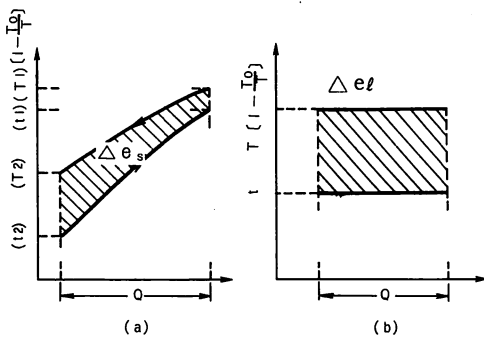


図-1 熱交換器の有効エネルギー損失

れる。

2) 熱交換ネットワークの熱有効エネルギー損失

第2図(a)は2種類の加熱すべき流体を水蒸気で加熱し、2種類の冷却すべき流体(1種類は凝縮)を冷却水で冷却する場合の TQ 線図を示したものである。

(b)図上に(a)図と同様の折線グラフを画き、

$$\begin{aligned} \Delta ABC &= \Delta AEC, \quad \Delta efg = \Delta eHg \\ \Delta I h A &= \Delta I F A, \quad \Delta J H I = \Delta J G I \end{aligned}$$

の作図原理により、複合熱需要線 $DEFGJe$ が画ける。また $\Delta c'bc = \Delta d'bd$ の作図より、複合熱供給線

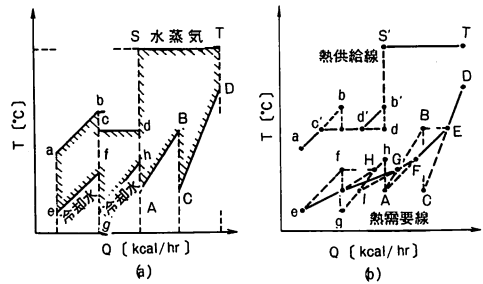


図-2 複合熱供給・需要線図

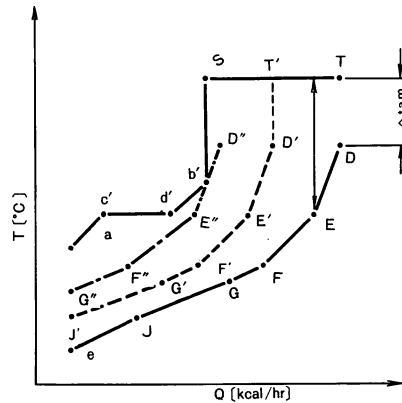


図-3 複合熱供給・需要線図とアプローチ温度

$TSb'd'c'a$ が画ける。(b)図における両折線間の面積は作図より(a)図の斜線端取りの面積、すなわちこの複数熱交換システムの熱有効エネルギー損失になる^{15), 16)}。

複合熱有効エネルギー損失とアプローチ温度

第3図に第2図で得られた複合熱供給・需要線を再び画いてあるが、この両線の対応関係から熱交換システムの構成が与えられる。例えば、第2図(b)における加熱を要する CD の部分の流体の E から D までは水蒸気で加熱をすると、第2図(a)の凝縮を要する cd の部分は第3図では $c'd'$ になっており、その部分に対応する冷却水は eJ の一部と JG の一部で行なうように考えることが示される。

この両複合線の垂直方向の距離は各熱交換部分の温度差であり、それぞれの熱交換器のアプローチ温度 Δt_a も示されている。 $TSb'd'c'a$ と $DEFGJe$ との間の熱交換システムのなかでアプローチ温度の最も小さい部分は間隔 TD のところであることもわかる。

さて第3図で $DEFGJe$ を $D'E'F'G'J'$ のように左の方へ平行移動させてゆくと、この熱交換システムの有効エネルギー損失が小さくなり、必要水蒸気量は

T SからT' S'に減少し、必要冷却水量も減少することは明らかである。しかし一方では熱交換システムの温度差、アプローチ温度が小さくなってゆき、熱交換器システムの所要伝熱面積は当然大きくなる。また熱供給線と熱需要線との対応関係が変り、最小アプローチ温度の箇所も変わってくる。例えば、DEFGJ'e線のG Fの部分は水蒸気で加熱する構成になっているが、D' E' F' G' J'の線ではG' F'は凝縮すべきC' d'の一部と冷却を要する流体d' b'の一部とによって熱交換される構造になってくる。最小アプローチ温度 Δt_{am} もT-D間であったものが、d' b'とG' F'との交換の部分に表われてくる。

D' E' F' G' J'をなお左の方に平行移動させると、D" E" F" G"に示すようについに熱供給線と熱需要線とが接してしまうようになり、この場合の最小アプローチ温度は0℃であり、必要伝熱面積は無窮大となる。したがって最小アプローチ温度がある有限の適当な値をとるときが実際の意味から熱有効エネルギー損失の最小の熱交換システムということができる。

もし先見的に最適な最小アプローチ温度(Δt_{am})optがわかかっておれば、TQ線図を利用して熱交換システムの最適構成を考えるのが極めて簡単になることが予想される。

潜熱間熱交換システムの最適最小アプローチ温度

第4図は、ab, cdの両蒸発部分をABの水蒸気で、CD, EFの凝縮の部分をef, ghの冷却水で行なうTQ線図と熱需要線図を最も左に移動させたときの線図a' b' c' d' h' とを示している。

第4図に示したような図でCD, EF, ab, cdのそれぞれの温度レベルと熱量は種々の場合が起こりうる。そこでどの様な場合においても、最適最小アプローチ温度が変らなければ設計上非常に便利であるため、不規則に100題の問題を作成し、各問題に対して最小アプローチ温度を種々にかえて熱交換経費を計算して最適最小アプローチ温度の存在を検討した。

熱供給線では、最も温度の高い水蒸気の温度は180℃に固定し、冷却水は25℃から50℃までの温度上昇により行なうとして必要冷却水量が定められる。熱供給流体の数を水蒸気の流れを除いて8種類とした。熱供給側は160℃～60℃の範囲で、熱需要側は170℃～70℃の範囲でそれぞれ乱数により8種類づつの温度レベルと熱量を選んで100種類の問題を作成した。交換熱量は全体として凡そ $\lambda \times 10^6 \sim 10^5$ (kcal/hr) (λ は係数)の間にくるようにした。第4図からわかるように熱供

給線と熱需要線の温度レベルは離散的に変化しているため、最小アプローチ温度 Δt_{am} を0℃以上すべての温度について実現可能とは限らない。その場合は実現不可能なその最小アプローチ温度に最も近くてより大きい最小アプローチ温度の場合の経費に等しいとして数値計算を行なった。第4図の原理により潜熱間熱交換システムの構成が自動的に定まるが、現実には熱交換器の数が多くなりすぎたり、配管が複雑になりすぎたりするなどの理由から熱有効エネルギー損失は多少犠牲にしても熱交換器の省略、総合が行なわれることが予想される。この方法としてはいわゆる多目的問題の解法を利用することなどが考えられるが、ここではT-Q線図上に現われる構成そのものの直接的な評価(配管経費などは含まない)のみを対象とした。

熱交換システムの評価は、

$$J = \alpha S (\Delta t_{am}) + \beta W (\Delta t_{am}) + r \sum_i \left(\frac{Q_i (\Delta t_{am})}{U} \right)^n \quad (3)$$

で計算した。ここで、

J: 熱交換経費 [円/年]

α : 180℃の水蒸気の価格 [円/kg] 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 に変化させた。

S: 180℃の水蒸気の必要量 [kg/年]

β : 25℃の冷却水の価格 [円/kg], 0.01 [円/kg]

W: 冷却水が25℃から50℃になるとして求めた必要冷却水量 [kg/年]

Q_i : TQ線図上で構成された第i番目の熱交換器での交換熱量、これは Δt_{am} を変化させて複合熱供給・需要線の対応から熱交換器の構成を行なうと Δt_{am} の関数として変化する。

U: 総括伝熱係数 [kcal/m²hr℃] 2000, 2500, 40

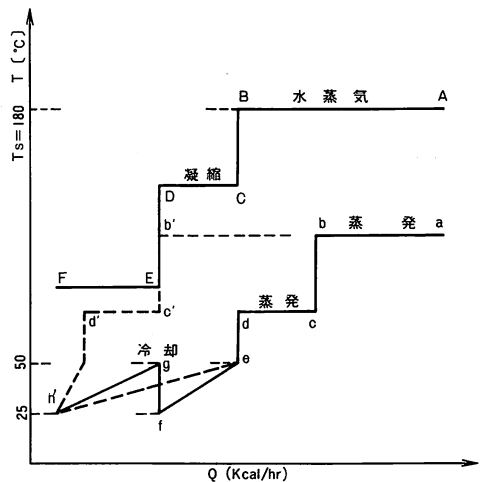


図-4 潜熱間熱交換システム

00 に変化させた。ただしすべての熱交換器に共通であるとする。

n: 熱交換器の伝熱面積から価格を計算する場合の係数, 0.812 とした。

r: 熱交換器の伝熱面積から経費を計算する場合の係数で建設費と減価償却費(10年)とを考慮したものである。標準の値として 231.2×10^3 を用いた。

なお 1 年間の運転時間は 8500 hrs とした。

以上の様な問題設定において, 例えば,

$$\sigma = 0.5, \quad \nu = 2500, \quad r = 231.2 \times 10^3,$$

$$\beta = 0.01$$

の条件下で熱供給流体の数 8 と固定された 180°C の水蒸気および熱需要流体の数 8 と 25°C から 50°C に温度上昇する冷却水の間で熱交換をする問題 100 題をつくり, それぞれ 1 間について Δt_{am} を変えて J を計算する。その結果問題 1 題につき J を最小とする $(\Delta t_{am})_{opt}$ が求まり,

$$\mu_i(\Delta t_{am}) = J_i(\Delta t_{am}) / J_i(\Delta t_{am})_{opt} \quad (4)$$

i: 第 i 番目の問題

により J の最小値からのずれの比率を各問題 1 題につき計算する。問題は 100 題あるから第(4)式の μ の値の 100 問の平均値を

$$\bar{\mu}(\Delta t_{am}) = \sum_{i=1}^{100} \mu_i(\Delta t_{am}) / 100 \quad (5)$$

: 熱交換経費倍率

により計算し, これを Δt_{am} に対して点綴すると, 例えば第 5 図のなかの 1 本の曲線が画けることになる。

この図から明らかなように, $\bar{\mu}$ の値が 1.0 に最も近

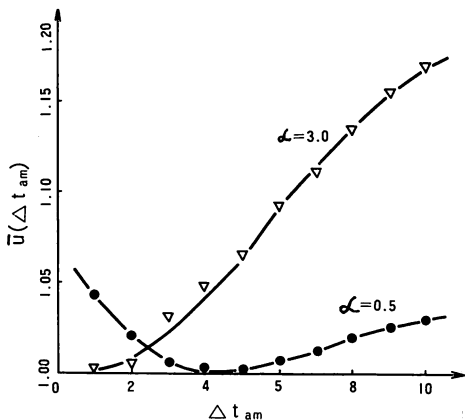


図-5 最小アプローチ温度と熱交換経費倍率
($\alpha = 2.0, \beta = 0.01, r = 231.2 \times 10^3$
 $\mu = 2500$)

い値を示す Δt_{am} が作成した 100 問の問題に対して平均的に J の値の最小にする $(\Delta t_{am})_{opt}$ と考えることができる。第 5 図は水蒸気の単価の変化に対して $(\Delta t_{am})_{opt}$ がどのように変わるかも示したものであり, 水蒸気価格が高いと $(\Delta t_{am})_{opt}$ が小さい値になるという当然の結果を示している。

さて $\bar{\mu}$ にもとづく $(\Delta t_{am})_{opt}$ は 100 問の平均的なものであるから, 各問題一つづつが $(\Delta t_{am})_{opt}$ を用いて最適構成したときとそれぞれの問題固有の最適な $(\Delta t_{am})_{opt}$ を用いて最適構成をした時との偏差が考察されねばならない。

$$S = \frac{J_i((\Delta t_{am})_{opt}) - J_i((\Delta t_{am})_{opt})}{J_i((\Delta t_{am})_{opt})} \quad (6)$$

の値の分布を調べたものの一例が, 第 6 図の(a), (b)である。図からわかるように 100 問中殆んどが 0.5 % の偏差内にある。

上記の計算のほか, r を 231.2, 462.4, 693.6 と変化させた計算, U を 2,000, 2,500, 4,000 に変化させた計算, 全体の交換熱量の範囲 λ を 2, 3, 4 に変化させた計算などを行って, 第 5 図, 第 6 図のような考察を行った。その結果行なった計算範囲では, β, λ, U の $(\Delta t_{am})_{opt}$ に及ぼす影響は殆んどなく, r は α と同程度の影響が認められた。これらのすべての計算において多いに見つっても問題の 95% は偏差が 0.

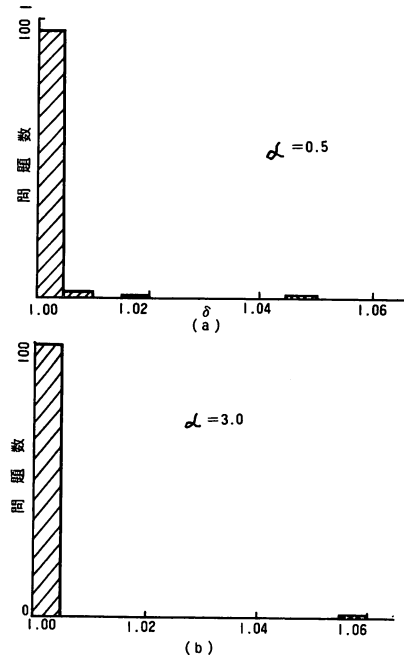


図-6 平均最適最小アプローチ温度 $(\Delta t_{am})_{opt}$ を用いたときの眞の最適値からの偏異
($\alpha = 2.0, \beta = 0.01, r = 231.2 \times 10^3, \nu = 2500$)

5%以内に入っており、最大の偏差は10%を超えることはなく、 $(\Delta t_{am})_{opt}$ の存在を考慮して熱交換システムの構成の基準解を出すことは十分工学的価値があると考えられる。現実には配管経費その他の考察から基準解が修正されるであろうから、その時 $(\Delta t_{am})_{opt}$ を変動させて真の最適性を検討することが出来る。

顕熱間熱交換システムの最適最小アプローチ温度

顕熱間熱交換システムの構成には第7図および第8図に示すような自由度が考えられる。すなわち、第7図(a)のAB, CDの熱供給流体, ab, cdの熱需要流体はAED, aedの複合線で表現できる。両複合線の何れか一方の折点のところで分割して熱交換器を構成すると考えると第7図(b)のような2個の熱交換器となる。この場合は1個の熱交換器が出入口での温度は等しいが複数の流体同志の熱交換を実施しなくてはならない。このような構成を(A)と便宜上呼ぶことにする。

また分流によって1対の流体間でのみ熱交換すると考えると第8図(a)のAB, CF, EDおよびae, fb, cdのように分割でき(b)図のような構成となる。これを(B)の構成と呼ぶ。

潜熱間の熱交換の数値計算と同様に

- α : 2, 3, 4 [円/kg]
- β : 0.005, 0.01, 0.02 [円/kg]
- r : 231.2×10^3 , 346.8×10^3 , 462.4×10^3
- U : 500, 1000, 1500 [kcal/m²hr°C]

などの条件の種々の組み合わせについて計算を行なった。

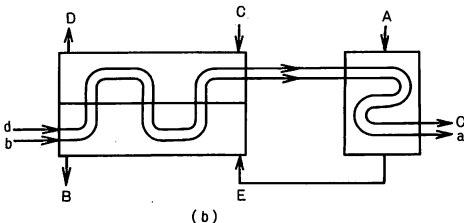
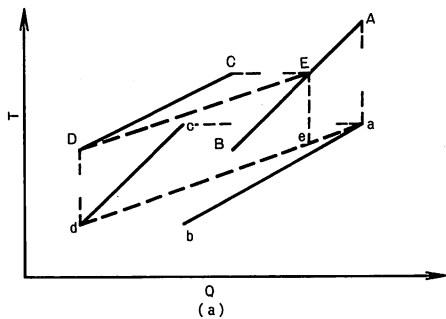


図-7 複合熱供給・需要線よりの熱交換システムの構成 (A)

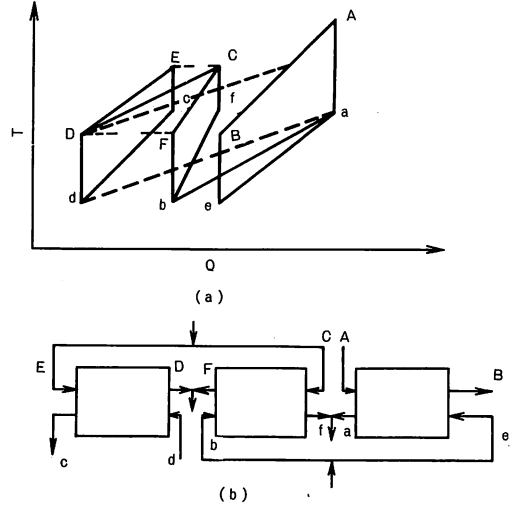


図-8 複合熱供給・需要線よりの熱交換システムの構成 (B)

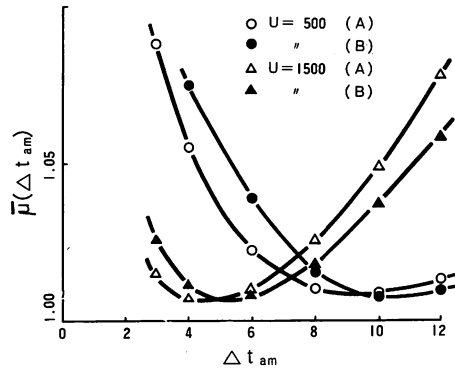


図-9 最小アプローチ温度と熱交換経費倍率
($\alpha = 3.0$, $\beta = 0.01$, $r = 231.2 \times 10^3$)

ただし、水蒸気と冷却水以外の流体の数は熱供給、熱需要それぞれ5本づつ、全交換熱量は $10^4 \sim 3 \times 10^3$ [kcal/hr°C]の範囲とし、乱数によってその温度レベルと熱量をかえた問題をそれぞれのパラメータの組み合わせについて100問づつ作成した。

第9図は構成法(A), (B)の両方について総括伝熱係数Uの変化の影響をみたものである。この図からUが小さい場合 $(\Delta t_{am})_{opt}$ は小さくなること、構成(A), (B)の差はそれ程大きくはないことなどが認められる。

潜熱間熱交換の場合より以上に $(\Delta t_{am})_{opt}$ を用いる時の信頼性も高い。

あとがき

本研究は熱交換システムの最適構成をT-Q線図を利用して行なうとき、複合熱供給・需要線間の最小アプ

ローチ温度の最適値が利用できれば極めて便利であることが予想されるため、その存在の可能性を数値実験によって確かめたものである。その結果、交換熱量のレベル、量などに無関係に最適最小アプローチ温度の存在がほぼ認められることがわかった。

参考文献

- 1) 高松, 橋本, 西谷: システムと制御, **19**, 409 (1975)
- 2) Takamahsu, Hashimoto & Ohno: IEC Process Design Develop, **9**, 368 (1970)
- 3) 高松, 橋本, 西谷, 富田: Chem. Eng. Sci, **31**, 705 (1976)
- 4) Whistler: petrol Refinery, **27**, 83 (1948)
- 5) Kesler & Parker: Chem. Eng. Prog. Symp. Series, No. 92, 111 (1969)
- 6) Kobayashi, Umeda & Ichikawa: CES, **26**, 1367 (1971)
- 7) Nishida, Kobayashi & Ichikawa: CES, **26**, 1841 (1971)
- 8) 西村, 平泉, 鈴木: 化学工学, **34**, 1099 (1970)
- 9) Masso & Rudd: AIChE Journal, **15**, 10 (1969)
- 10) Lee, Masso & Rudd: IEC Fund. **9**, 48 (1970)
- 11) Siirola: AIChE 76th National Meeting, Tulsa (1974)
- 12) Mengies & Johnson: Can. J. Chem. Eng., **50**, 290 (1972)
- 13) McGalliard & Westerberg: Chem. Eng. J., **4**, 127 (1972)
- 14) Pho & Lapidus: AIChE J. **19**, 1182 (1973)
- 15) 伊藤, 新田, 城子, 梅田: 化学工学論文集, **5**, 1 (1979)
- 16) Umeda, Itoh & Shiroko: Chem. Eng. Prog., **74**, (7), 70 (1978)

話の泉

海水からのウランの回収

地球上の人口は無限に増加し、エネルギーの消費も加速度的に増加しつつある。そのエネルギーを賄うことが最近特に問題となっており、水力、火力、原子力、太陽などが対象となっている。

これらの内水力・太陽エネルギーは一先づ無限と考えられているが、量的には期待される程のものではない。現状では火力が主力となっているが、その化石燃料の先細りの見越しのために逐次原子力に肩代りせざるを得ない状況になりつつある。その資源としてのウランもまた推定されている埋蔵量も5百万トン足らずで、すでに底が見えかけている。

海水中のウランが最近話題となっている。海水中のウランは量としては4億トンといわれているが、何分にもその濃度が0.003 ppm (1000トンの海水中に3gのウラン)と極めて希薄で、回収としては何等かの方法で濃縮、抽出、吸着などの特殊な技術の開発が必要となる。吸着は結局次の工程の脱着、抽出で結果的には濃縮となるが、その濃縮の程度が一般の化学工業の場合とは桁違いに大きくなくてはならない。

最近のニュースによれば吸着には4種類の方法に大別され、四国工業技術試験所を中心としてそれぞれの実験を計画中である。

①の方法は含水酸化チタンの無機系の粒状のもので、活性炭との複合体でもともとイギリスのアイデアに改良を加えたものである。脱着は炭酸アンモンまたは重炭酸ソーダの水溶液で行なわれる。

②はアクリル繊維の表面にアミドキシム基を付着したもので、①より吸着量は遙かに大きく、脱着は酸で行なう。

③は大環状ヘキサケトンで、ウランを原子状で選択的に吸着する。脱着は炭酸アンモン水溶液を使用する。

④は磷酸化キトサンによって吸着するもので、①のチタン系のものよりよいといわれている。キトサンはかにかの殻から酸で抽出されるもので、すでに廃液処理に使用されている。

古い話であるが昭和10年頃徳山の海軍燃料廠で石炭の液化の研究がなされていたが、街の発明家とみられる技術者が或種のかにかの殻と石炭の反応によって液化できる技術を申し出たが、当時の海軍者は正式に取上げなかったとか。今から考えれば時節柄更めて検討する価値があるのではあるまいか。

海水中のウランの回収には大量の海水を広い面積の吸着層に接触通過するので、必然的に吸着速度、吸着飽和値の大きいことが必要条件となりその送水のための動力が問題となる。また吸着に先立って海水の清浄化も微生物の除去など上水程度までは必要ないとしても工程には入れるべきだろう。海水の送流には量だけ必要で圧力は特に必要ないことから、海水の干満は利用できないだろうか。特に干満差の大きい海岸或は瀬戸など立地条件としてはよいだろう。また波力発電、温度差発電との組み合わせも興味ある問題である。また浄化された大量の海水を回収が終わったからといってそのまま、放流(時には或程度の温水の場合もあるかも知れない)することはエネルギーの無駄で、イオン交換、逆浸透時には蒸溜による海水の淡水化に連繫することも一つの考え方となろう。

(F)