

サブテーマ3-1 シーケンシャル・ユース・システム構築法の開発

1. はじめに

廃棄物を新たな製品や無害な物質に転換する要素技術が経済性も考慮して真に有効かどうかは、その要素技術だけでは判断できず、その場所で利用可能な熱源や他の廃棄物、および同時に利用可能な他の要素技術等を総合して判断しなければならない。本サブテーマでは、廃棄物や廃熱の質と量、様々な利用可能要素技術とその稼働コスト、最終製品(安定処分品)の候補とその価格が与えられた条件下で、廃棄物や廃熱を有効に利用する最適なプロセス構成をシステムティックに導出する手法の開発を目的として研究を進めた。研究は、①要素技術と対象システムのモデル化、②廃棄物・廃熱シーケンス合成問題の定式化と解法の開発、③シーケンシャル・ユース構成提案システムの開発、の3段階で行った。以下、各段階での成果をふまえ、開発したシステムについて説明する。

2. 要素技術と対象システムのモデル化

本研究では、複数の流れを混合して特定の要素技術に適した入力とする、あるいは要素技術への入力原料の濃度によって出力の濃度も変わるといった状況を考慮して、最適なプロセス構成を提案することを目的としている。この点をふまえ、流れや要素技術のモデル化を行った。

流れについては各成分の流量を要素に持つベクトルで表現することとした。このように表すことにより、流れの混合については単純にベクトルの加算で表現できる。また、要素技術や外部出力に対する濃度制約等も線形の不等式で表現可能である。しかしながら、流れの分岐については、分岐前後で組成が変わらないという制約を課す必要がある。従来このような制約を考慮すると、流れの分岐は成分流量と分配率の積という二次の項を持つ式として表現せざるを得なかった。本研究では、関連文献の調査から、0-1変数の利用により、線形関係を維持したままで流れの分岐を表現できる手法を見いだすとともに、2進数の原理を利用し、既存の手法に比べはるかに少ない0-1変数で、流れの分岐を扱えるモデルを開発した。

要素技術は、複数の入力と複数の出力を有するものとした。そして、各出力は入力の線形結合で表せると仮定しモデル化した。要素技術の運転に必要な電力や薬品は、特定の入力流れの量に比例すると仮定し、それらも個々の入力流れとした。得られたプロセス構成の評価については、原料コストや製品の販売利益、要素技術の利用コストを、系中の特定の流れの量に比例する値として表現した。また、要素技術の利用の有無に依存する固定コストは、0-1変数を導入することによりモデルに組み込んだ。

従来のプロセス合成の研究では、廃棄物と廃熱どちらか一方しか扱われていない。これは、モデル化に際し、全く異なる定式化が必要となることによる。例えば、熱の場合は熱交換の可能性を判断するのに、受熱側と与熱側双方の温度レベルと熱容量を考慮しなければならない。本研究では、熱交換温度をいくつかの領域に分割することで、流体間の熱交換可能性を表現する手法を導出した。この手法を用いることで、廃棄物と廃熱の流れを1つの問題の中で同時に扱うことのできるモデルを開発した。

3. 廃棄物・廃熱シーケンス合成問題の定式化と解法の開発

前項で開発された要素技術や流れの分配モデル、廃棄物と廃熱を同時に考慮したシステムモデルを用いて、廃棄物や廃熱の質と量、様々な利用可能要素技術とその稼働コスト、最終製品(安定処分品)の各候補の価格が与えられた条件下で、廃棄物や廃熱を有効に利用する最適なプロセス構成をシステムティックに導出する手法を提案し、その解法を開発した。

プロセス全体の構造の決定には、スーパーストラクチャーを用いる方法を採用した。下右図は、下左図のようなプロセス構造が考えられる場合のスーパーストラクチャーを示す。各流れと要素技術との結合関係、要素技術内での入出力関係が線形式で表されることから、スーパーストラクチャー全体の関係も 0-1 変数を含む線形の関係式で表現できる。

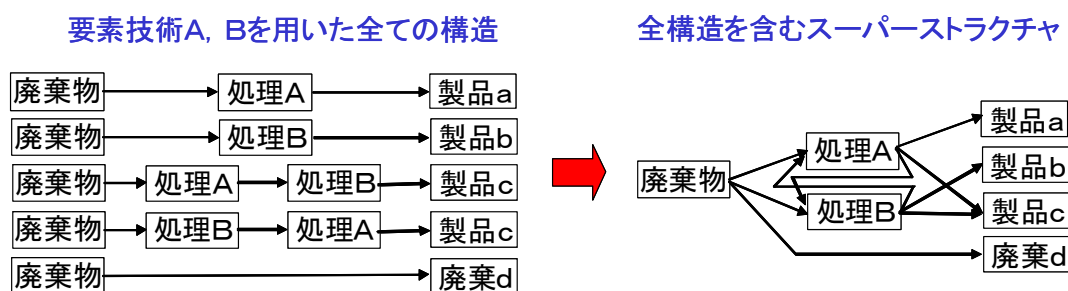


図1 スーパーストラクチャー

最適解を求めるためのソルバーとしては、シーケンシャル・ユース・システム構築支援システムへの組み込みを考慮し、フリーの混合整数線形計画ソルバー lp_solve(Version 5.5.0.10)を最終的に採用した。最適化により、スーパーストラクチャー中のいくつかの流れの流量が0となり、必要な要素技術とその大きさ、プロセス全体の構成が定まる。

0-1 変数を含む最適化では、同じ問題であってもその定式化の仕方により、最適解を求めるのに必要な計算時間は大きく異なる。ここでは、様々な形式で定式化された問題に対して、最適解導出時間を比較し、よりよい定式化法を選択した。無駄な最適解探索をしないように解法の改善を行い、大規模な問題での最適解導出時間を短縮した。また、大規模な問題に対して、最適解が得られる前に計算を停止しても、その時点までの最良解が得られるようにアルゴリズムを構築した。

4. シーケンシャル・ユース構成提案システムの開発

前2項の成果を踏まえ、シーケンシャル・ユース・システム構築に実際に利用可能なソフトウェアのプロトタイプを構築することと、構築したシステムを現実の問題に適用してその有効性を検証することを目的として研究を実施した。また、要素技術の評価システムと、対象システムに不足している要素技術を提案できるシステムを上記プロトタイプシステムに組み込んだ。

構築したシステムでの最適構成導出の流れと、情報入力画面の一例を図2に示す。図2のフロー図の順に情報を入力していくことにより、最適な構成を導出できる。得られた結果は、表やグラフとして表示される。そして、得られた結果を見て情報を修正し再度最適化を行う、という手順を繰り返すことで、人間系が考慮すべきでモデル化できないような

点も考慮したプロセス構造を定めることができる。この考え方をを用いることにより、現在運転中のプロセスに新たな要素技術を導入することの効果も容易に検証できる。

開発した支援システムを電子部品工場排水処理プロセスを対象とし、新規要素技術導入によるコストの削減や負荷増大時の増設問題等を検討し、開発したソフトウェアが有効であることを確認した。検討した系での廃棄物や要素技術の情報を図3に示す。

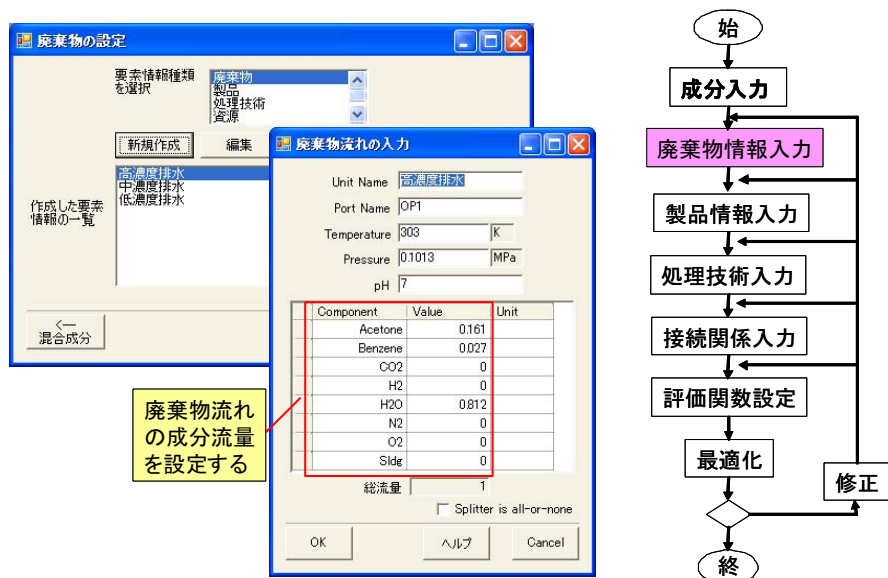


図2 最適化の流れ (右) と開発したソフトウェアの情報入力画面(左)

5. 終わりに

シーケンシャル・ユース・システム構築に実際に利用可能なソフトウェアのプロトタイプを構築するとともに、構築したシステムを現実の問題に適用してその有効性を検証した。提案した支援システムは以下のような問題にも適用可能である。

- ・現状の設備で、どこまで処理コストを削減できるか。
- ・現状の設備でどこまで処理量を増やせるか。
- ・廃棄物毎のボトルネック工程はどこか。
- ・処理量増の様々なシナリオに対して、どの設備増強が適切か。
- ・設備変更をできるだけせずに行える処理量増案はどれか。
- ・排水基準が変更された際の対応は可能か。
- ・代替案は、コストがどこまで下がれば採用できるか。

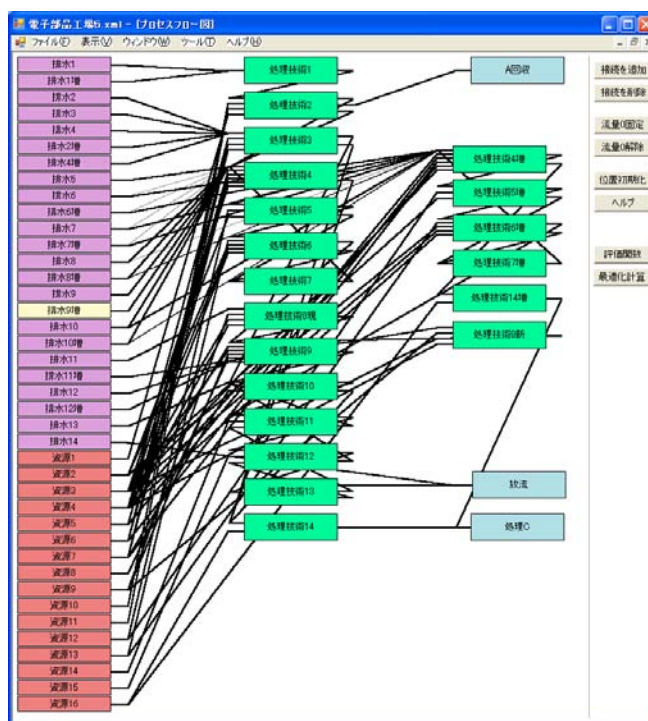


図3 電子部品製造工場廃液系への応用

本サブテーマで開発した支援システムは、廃棄物系のみならず物質と熱の両方を扱う様々な対象に適用可能である。たとえば、コプロダクション(物質・熱併産システム)の設計手法や最適なバイオマス利用システム構造の検討等にも利用可能であり、今後これらの方面に応用展開を図っていく予定である。

研究テーマ：3-1 経済的なシーケンシャル・ユース・システム構築法

研究リーダー： 京都大学大学院工学研究科 長谷部 伸治
 共同研究者： 京都大学大学院工学研究科 加納 学
 関西日本電気(株) 山口浩司、西口佳孝、三好君雄、安藤 勝、
 田尻孝介、矢谷龍男、二神義英
 積水化学工業(株) 沼田雅史、藤阪朋弘、佐藤宏史
 雇用研究員： 谷口 智

1

研究計画(5年間)

	14	15	16	17	18	19
1) 要素技術と対象システムのモデル化						
①無機H・H情報の収集と整理	←————→					
②H・H情報の収集と組成同定	←————→					
③要素技術のモデル化	←————→					
④ H・Hの混合・分配過程のモデル化	←————→					
⑤ H・Hの同時使用を考慮したシステムのモデル化	←————→					
2) H・Hシーケンス合成問題の定式化と解法の開発						
① H・Hシーケンス合成問題の解法の検討	←————→					
② H・H価値の評価法の検討		←————→				
③ H・Hシーケンス合成問題の定式化		←————→				
④モデル工場への適用			←————→			
3) SU構成提案システムの開発						
①SU構成提案システムの開発(コア研)			←————→			
②モデル工場での検証(関西日本電気, 積水化学)					←————→	
③要素技術評価法の開発(京大)				←————→		
④不足要素技術提案システムの開発(京大)				←————→		

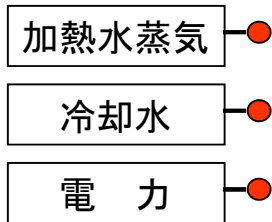
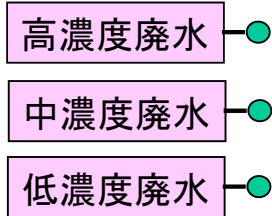
H・H: 廃棄物・廃熱
 SU: シーケンシャル・ユース

2

提案システムの特徴

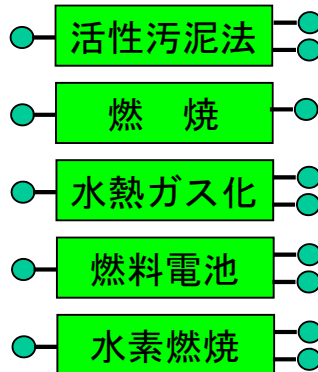
従来の考え方(どちらが経済的か)

様々な廃液

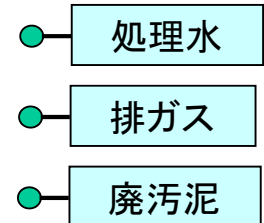


設備の特徴

様々な要素技術



多様な出力



本研究の考え方

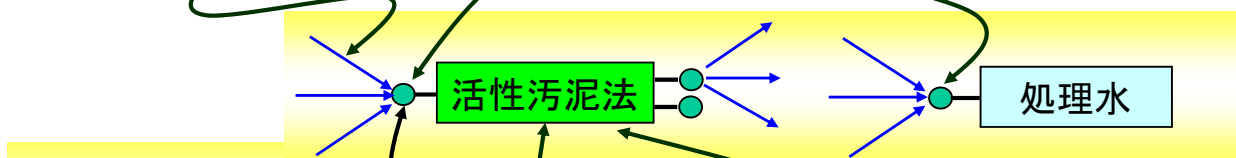
- ・何と何を混ぜて原料とするか
- ・どの要素技術を用いるか
- ・何を作るか
- ・使える廃ユーティリティはあるか

3

モデルの特徴

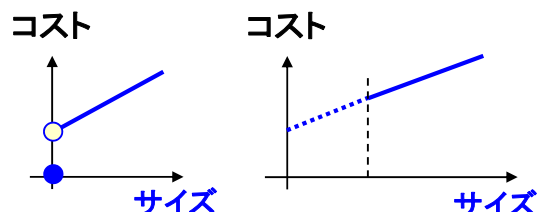
①多成分からなる流れを表現できる

②処理技術への入力や外部への出力は成分組成毎に不等号制約可
複数の成分が関係する制約も可 (19年度成果)



③処理技術の入出力は線形関係 (出力組成を固定しない)

④利用, 不利用による離散的なコスト可



⑥熱についても同時に考慮可能
処理技術への入力の予熱
や出力の冷却も考慮

⑤処理技術を使う際の最少利用量を設定可

4

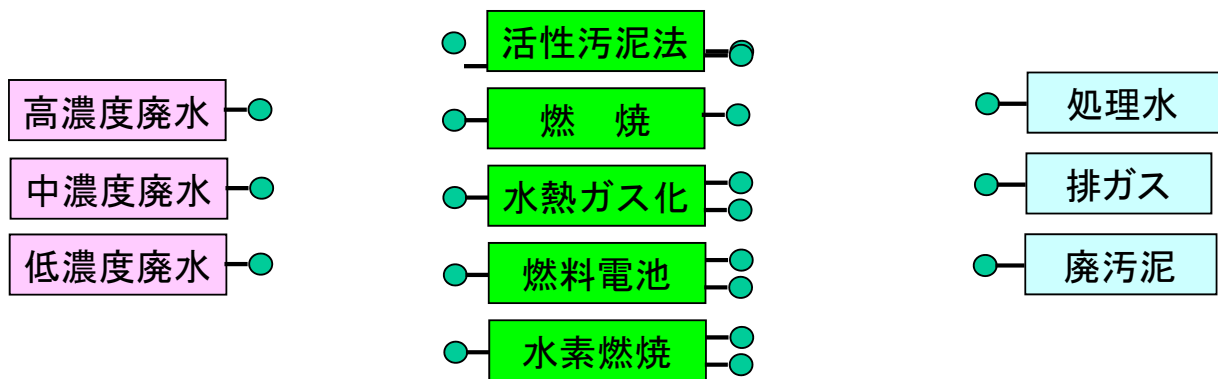
【問題の概要】

廃棄物: 濃度の異なる3種類の有機排水

処理技術: 活性汚泥法, 水熱ガス化, 水素燃焼, 燃焼(高濃度有機物)
燃料電池(水熱ガス化で生成した水素利用)

コスト: 重油コスト(熱量が不足した場合) + 電力売却益(燃料電池)
+ 電力コスト(活性汚泥法と水熱ガス化)

装置の建設コストは含まず.



使用成分の入力

- ・成分リストから選択
- ・リストになければ、「ユーザー定義成分」で作成
- ・複数成分に関わる制約等に使うため
「混合成分」も設定可能

The screenshot shows two overlapping windows from the software. The foreground window is titled '成分の入力' (Component Input) and contains a list of '使用成分リスト' (Used Component List) with items like Acetone, Benzene, CO2, H2, H2O, N2, O2, and Slde. It features '成分選択' (Component Selection) and '成分除外' (Component Exclusion) buttons. The background window is titled '混合成分の設定' (Mixture Component Settings) and includes buttons for '新規作成' (New), '編集' (Edit), and '削除' (Delete). It contains instructional text about defining mixture components and a '成分名変更' (Change Component Name) button.

要素情報の入力(廃棄物)

- ・「要素情報種類」で「廃棄物」を選択し、「新規作成」をクリックすると、右図の「廃棄物流れの入力」画面が表示される。
- ・処理すべき廃棄物のデータ(定数)を設定
- ・下図では、廃棄物として3流れが設定済み。

廃棄物の設定

要素情報種類を選択

要素情報種類: 廃棄物

製品
処理技術
資源

新規作成 編集 削除

作成した要素情報の一覧

高濃度排水
中濃度排水
低濃度排水

コピー

ファイルからコピー

↑

↓

← 混合成分

ヘルプ

→ 仮想熱源

廃棄物流れの入力

Unit Name: 高濃度排水

Port Name: OP1

Temperature: 303 K

Pressure: 0.1013 MPa

pH: 7

Component	Value	Unit
Acetone	0.161	
Benzene	0.027	
CO2	0	
H2	0	
H2O	0.812	
N2	0	
O2	0	
Sludge	0	

総流量: 1

Splitter is all-or-none

OK ヘルプ Cancel

廃棄物流れの成分流量を設定する

7

要素情報の入力(製品)

- ・「要素情報種類」から「製品」を選択して、「新規作成」をクリックすると、「製品流れの設定」画面(右図)が表示される。
- ・製品流れには、排水基準の濃度制約や総流量制約などの各種制約条件を設定可能。
- ・左図の3製品に対して、右図では特に制約をつけず、Unit Nameのみ設定。

製品の設定

要素情報種類を選択

要素情報種類: 廃棄物

製品
処理技術
資源

新規作成 編集 削除

作成した要素情報の一覧

処理水
排ガス
廃汚泥

← 混合成分

ヘルプ

→ 仮想熱源

製品流れの設定

Unit Name: 処理水

Port Name: IP1

成分流量制約: Acetone >= 0 登録

濃度制約: Acetone >= 0 登録

温度制約: Temperature = 303 K

成分流量間制約: Acetone >= 0 * Acetone 登録

総流量制約: Total Flow >= 0 登録

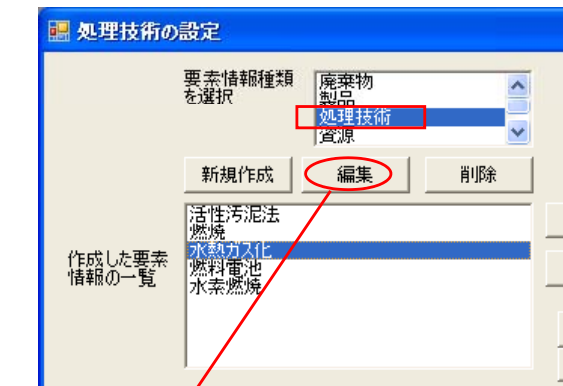
pH制約: pH >= 7.0 登録

混合成分: >= 0 登録

OK Stream Table ヘルプ Cancel

8

要素情報の入力(処理技術:1)

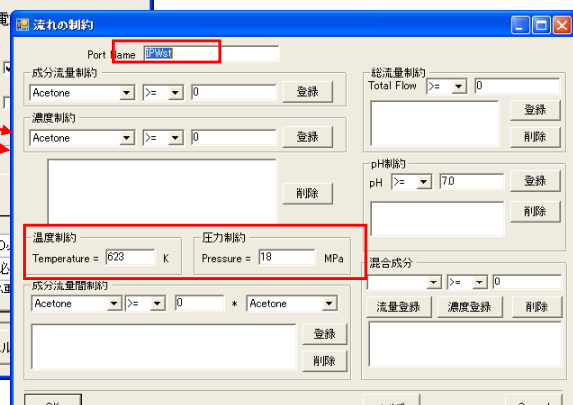
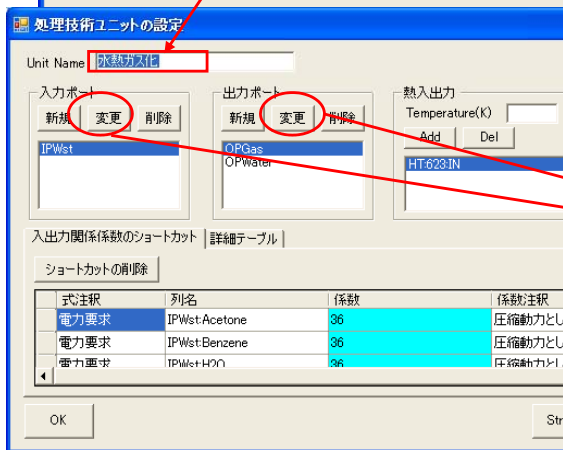


・「要素情報種類」で「処理技術」を選択し、「新規作成」をクリックすると、「処理技術ユニットの設定」画面が開く。今回は、既に設定された5つの処理技術から、「編集」で「水熱ガス化」を選択(左下図)。

・水熱ガス化では、1つの入力ポート(IPWst)と2つの出力ポート(OPGas、OPWater)が必要であり、それらのPort Nameが設定されている。

・水熱ガス化は高温高压の操作で、入出力流れは熱交換を要するので、各入出力ポートには温度と圧力が設定されている(右下図)。

【補足】接続流れの両端ポートに温度差があると、熱交換ネットワークに流れが自動的に組み込まれる。



9

要素情報の入力(処理技術:2)

・水熱ガス化は吸熱反応なので、操作温度レベル以上の熱入力が必要。「Temperatureボックス」に623を入力し、「In」をチェックして「Add」をクリック。

・原料圧縮動力として電力を必要とするので、「電力入出力」の「ElcIn」にチェック。

・各種入出力ポートが設定されると、「詳細テーブル」の列ヘッダーに入出力ポートの成分流量変数を設定可能となる。ここに、入出力関係を記述。

・「熱入出力」と「電力入出力」が設定されると、「式追加」ボタン上のボックスでElcPwr:INやHT:623:INが選択可能となる。

・まず、入出力関係式中で使用する流量変数を「0固定リスト」から解除。

式注釈	Output	比較	定数項	IPWst:Acetone	IPWst:Benzene	IPWst:H2O	OPGas:CO2	OPGas:H2	OPWater:H2O
電力要求	ElcPwr:IN	=	0	36	36	36	0	0	0
熱量要求	HT:623:IN	=	0	8552.3	13056.6	0	0	0	0
OPGas:CO2	0	=	0	3*mw(CO2)/mw(Acetone)	6*mw(CO2)/mw(Benzene)	0	-1	0	0
OPGas:H2	0	=	0	8*mw(H2)/mw(Acetone)	15*mw(H2)/mw(Benzene)	0	0	-1	0
OPWater:H2O	0	=	0	-5*mw(H2O)/mw(Acetone)	-12*mw(H2O)/mw(Benzene)	1	0	0	-1

要素情報の入力(処理技術:3)

- ・詳細テーブルに処理技術の入出力関係式を設定.
- ・変数間の入出力関係の係数を表に展開.
- ・Output列に設定できるのは、熱ポートと電力ポートと0のみ.
- ・最後に「OK」ボタンをクリックして変更を確定.

式注釈	Output	比較	定数項	IPWst:Acetone	IPWst:Benzene	IPWst:H2O	OPGas:CO2	OPGas:H2	OPWater:H2O
電力要求	ElcPwr:IN	=	0	36	36	36	0	0	0
熱量要求	HT:623-IN	=	0	8552.3	13056.6	0	0	0	0
OPGas:CO2	0	=	0	3*mw(CO2)/mw(Acetone)	6*mw(CO2)/mw(Benzene)	0	-1	0	0
OPGas:H2	0	=	0	3*mw(H2)/mw(Acetone)	15*mw(H2)/mw(Benzene)	0	0	-1	0
OPWater:H2O	0	=	0	-5*mw(H2O)/mw(Acetone)	-12*mw(H2O)/mw(Benzene)	1	0	0	-1

Diagram below the table: $\begin{pmatrix} E \\ H \\ O \\ 0 \end{pmatrix} = \text{定数} + \begin{pmatrix} \text{係数} \\ \text{行列} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{流量} \\ \text{変数} \end{pmatrix}$

11

接続流れの設定

- ・「接続流れの設定」で、廃棄物、処理技術、製品等の入出力間の接続の作成、削除を行う。この作業は、「接続流れの設定」画面上でもできるが、フロー図上の方が簡単.
- ・「フロー図表示」をクリックすると、これまでに設定した要素がブロックになった画面が表示される(下図)。
- ・新たに接続流れを作成するには、要素技術ブロックから突き出ている出力側と入力側のポートをクリックし(赤く変わる)、「接続を追加」ボタンをクリックする。削除は、接続線を選択して「接続を削除」をクリック。

	OutUnitName	OutPortName	InUnitName	InPortName
高濃度排水	OP1	活性汚泥法	IPWst	
中濃度排水	OP1	活性汚泥法	IPWst	
低濃度排水	OP1	活性汚泥法	IPWst	

補足: フロー図は開いたままにしておいてもかまいません。またメニューからも開けます。

12 297

複合変数と評価関数の設定

- 「複合変数の設定」は、今回は不要。
- 評価関数は次式で表され、これを最小化する。

$$\sum \{ (\text{コスト係数}) \times (\text{流量変数}) \}$$
- 新規に作成したときは、「コスト係数詳細」に名前と単価と単位を設定し「追加/更新」で「コスト係数一覧」に加えておく。

- 本例では、電力コストと重油のコストを考慮。
- 電力コストを例を説明
 - 「コスト係数一覧」から「電力」を選択
 - 電力ポートを設定した要素(たとえば燃料電池)を要素一覧から選択
 - 燃料電池に設定された各種ポートから「ElcPwr:OUT」を選択します。
 - 「追加」をクリック。

補足: Read(File)ボタンで他のファイル中のコスト係数を呼び出せます。

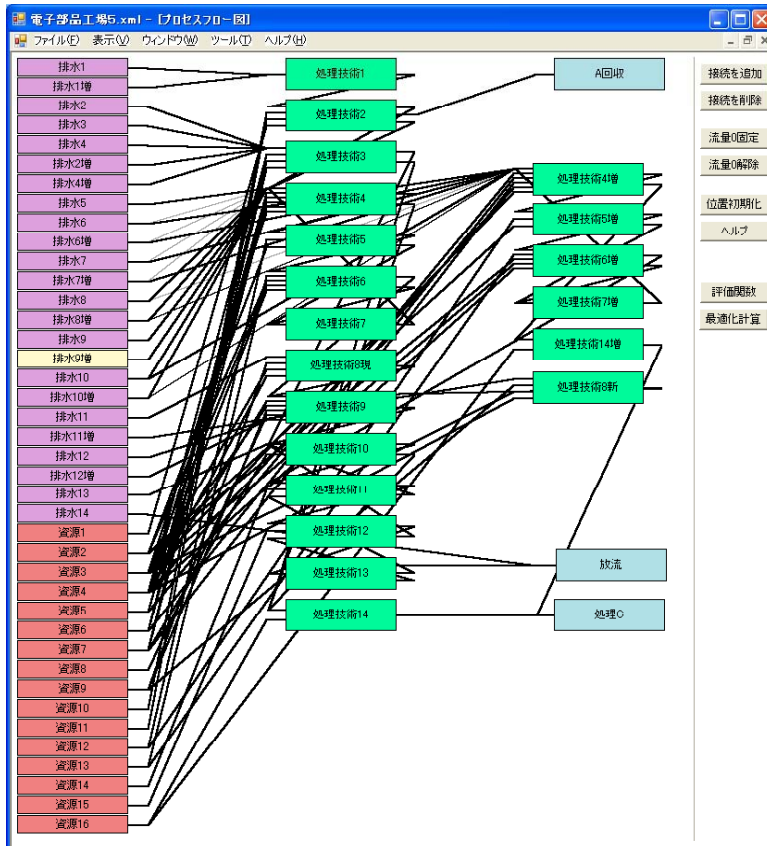
注: 燃料電池は発電電力で売却益を得るので、コスト最小化問題では負のコストにする必要がある。これは、「変数一覧」で「燃料電池」の電力ポートを選択して「+/-」ボタンをクリック。

最適化

コスト係数	単価	要素技術	ポート	成分	流量	コスト
重油	0.000514	HU15	HT-000:OUT		2223.97	1.14
電力	0.00306	活性汚泥法	ElcPwr:IN		10.4985	0.03
電力	0.00306	水熱ガス化	ElcPwr:IN		72	0.22
電力	-0.00306	燃料電池	ElcPwr:OUT		3376.88	-10.33
Sum	0				0	-8.94

- 「最適化パネル」では、ソルバーのオプションや分岐のパラメータを設定可能。
- ここでは単に「計算開始」をクリック。
- 評価関数の最小化計算が実行され、最適解が見つかったと「Status」ボックスに **An optimal solution was obtained.** と表示される。
- 結果は「フロー図」や「コスト一覧」や「Temperature Interval Diagram」で確認できる。
- この例では、高濃度排水と中濃度排水は水熱ガス化+燃料電池、低濃度排水は活性汚泥法という処理が最適。

電子部品製造工場廃液系への応用

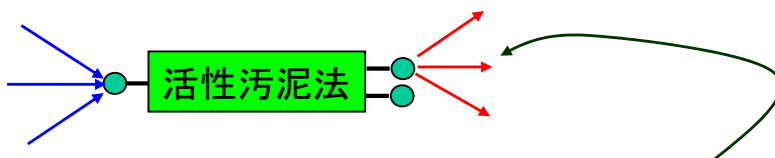


<検討項目>

- ・現状の設備で、どこまで処理コストを削減できるか。
- ・現状の設備でどこまで処理量を増やせるか。
- ・各廃棄物毎のボトルネック工程はどこか。
- ・処理量増の様々なシナリオに対して、どの設備増強が適当か。
- ・設備変更をできるだけせずに行える処理量増案はどれか。
- ・排水基準が変更された際の対応は可能か。
- ・代替案は、コストがどこまで下げれば採用できるか。

15

システム利用上の問題点



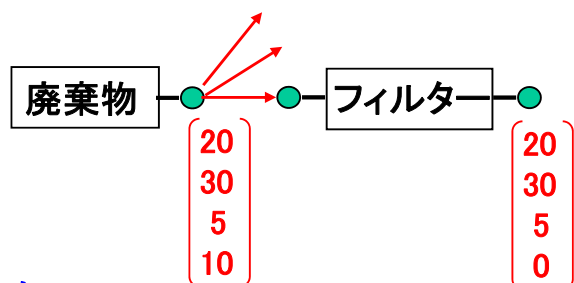
処理技術の出力が入力に依存し、分配を考えると関係が非線形になる

0-1変数を導入し混合整数線形計画問題としてモデル化

問題の規模が大きくなると0-1変数の数が増大(計算負荷の増大)

0-1変数を減少させる工夫

- ・分配率の逐次詳細化
- ・成分フィルターの利用
(本年度の成果)
- ・出力ベクトルの方向を固定
- ・出力はスカラーに
- ・明らかに最適でない相手と結合しない



16 299

今後の展開

エネルギー・物質併産(コプロダクション)システムへの展開



製鉄

エネルギー多消費型
素材産業の再編成



化学(TEC資料)



電力

従来失われていた
エクセルギー
(有効に取り出し
うる仕事量)を、
電力や水素として
回収し有効利用

本システムの適用
により新しい構造
創造の可能性

エネルギー系と物質系の同時最適化問題