

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6216558号  
(P6216558)

(45) 発行日 平成29年10月18日(2017.10.18)

(24) 登録日 平成29年9月29日(2017.9.29)

(51) Int.Cl. F I  
**G05B 13/04 (2006.01)** G05B 13/04  
**C10J 3/54 (2006.01)** C10J 3/54 Z

請求項の数 8 外国語出願 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2013-152996 (P2013-152996)	(73) 特許権者	515322297
(22) 出願日	平成25年7月23日 (2013.7.23)		ゼネラル エレクトリック テクノロジー
(65) 公開番号	特開2014-38609 (P2014-38609A)		ゲゼルシャフト ミット ベシュレンク
(43) 公開日	平成26年2月27日 (2014.2.27)		テル ハフツング
審査請求日	平成25年7月23日 (2013.7.23)		General Electric Te
審判番号	不服2015-14739 (P2015-14739/J1)		chnology GmbH
審判請求日	平成27年8月6日 (2015.8.6)		スイス国 バーデン ブラウン ボヴェリ
(31) 優先権主張番号	61/674, 659		シュトラーセ 7
(32) 優先日	平成24年7月23日 (2012.7.23)		Brown Boveri Strass
(33) 優先権主張国	米国 (US)		e 7, CH-5400 Baden,
(31) 優先権主張番号	13/946, 115		Switzerland
(32) 優先日	平成25年7月19日 (2013.7.19)	(74) 代理人	100137545
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 荒川 聡志
		(74) 代理人	100105588
			弁理士 小倉 博

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ケミカルループの動作最適化方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

クロスオーバパイプ(220, 320)を介して互いに接続されたループAとループBとを含むケミカルループプラントの動作最適化方法であって、

前記ループAおよびループBの各々は、ライザ(253, 353)と、分離ユニット(211, 311)と、ディップレグ(213, 313)と、シールポット(215, 315)と、下方パイプライン(251, 351)とを備えており、

前記ライザ(253, 353)は、空気/ガス中に同伴された固体粒子を上方に、次いで水平上方パイプライン(255, 355)を介して、前記空気/ガスから前記固体粒子を分離する分離ユニット(211, 311)へと運び、

前記分離ユニット(211, 311)は、前記固体粒子を、ディップレグ(213, 313)を介してシールポット(215, 315)へと下方に供給し、

前記シールポット(215, 315)は、接続点において、クロスオーバパイプ(220, 320)を介して他方のループへ、または、リターンレグ(217, 317)を介して下方パイプライン(251, 351)へと前記固体粒子を選択的に送り、

前記空気/ガスは前記下方パイプライン(251, 351)内に導かれて、前記固体粒子は前記下方パイプライン(251, 351)の上方へと前記ライザ(253, 353)まで吹き戻され、

前記方法は、

(a) 前記ライザ(253, 353)、クロスオーバパイプ(220, 320)、ディッ

プレッグ ( 2 1 3 , 3 1 3 ) およびリターンレッグ ( 2 1 7 , 3 1 7 ) について、質量平衡式から以下の次数低減モデル ( ROM ) を生成するステップと、

【数 1】

$$\tau \frac{d(\Delta P_{re\_A})}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_A} - c_f)} \left( f_1(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_A} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right)$$

$$\tau \frac{d(\Delta P_{re\_B})}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_B} - c_f)} \left( f_2(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_B} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \quad 10$$

$$\tau \frac{d(\Delta P_{AtoB})}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{AtoB} - c_f)} \left( f_3(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{AtoB} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right)$$

$$\tau \frac{d(\Delta P_{BtoA})}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{BtoA} - c_f)} \left( f_4(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{BtoA} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \quad 20$$

$$\tau \frac{d\Delta P_{riser\_A}}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_A} - \beta v_g^2)} \left( m_{riser\_A} - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_A} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right)$$

$$\tau \frac{d\Delta P_{riser\_B}}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_B} - \beta v_g^2)} \left( m_{riser\_B} - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_B} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \quad 30$$

$$\frac{dL_A}{dt} = \frac{m_{L\_A} - f_1(u) - f_3(u)}{\rho_s \pi_d^2 \varepsilon_{dipleg}}$$

$$\frac{dL_B}{dt} = \frac{m_{L\_B} - f_2(u) - f_4(u)}{\rho_s \pi_d^2 \varepsilon_{dipleg}} \quad 40$$

( 式中、 $\tau$  はパイプ内の特性時間であり、 $g$  は重力加速度であり、 $A_m$  はパイプの断面積であり、 $\alpha$  は固体の摩擦係数であり、 $c_f$  はファニングの摩擦係数であり、 $\beta$  はガスの摩擦係数であり、 $v_g$  はガス速度であり、 $P_{re\#A}$  はループ A のリターンレッグ ( 2 1 7 ) の圧力降下であり、 $P_{re\#B}$  はループ B のリターンレッグ ( 3 1 7 ) の圧力降下であり、 $P_{AtoB}$  はループ A からループ B へのクロスオーバーパイプ ( 2 2 0 ) の圧力降下であり、 $P_{BtoA}$  はループ B からループ A へのクロスオーバーパイプ ( 3 2 0 ) の圧力降下であり、 $P_{riser\#A}$  はループ A のライザ ( 2 5 3 ) の圧力降下であり、 $P_{riser\#B}$  はループ B のライザ ( 3 5 3 ) の圧力降下であり、 $m_{riser\#A}$  はループ A のライザ ( 2 5 3 ) の固体質量流量であり、 $m_{riser\#B}$  はループ B のライザ ( 3 5 3 ) の固体質量流量であり、 $L_A$  はループ A のディップレッグ ( 2 1 3 ) の長さであり、 $m_{L\#A}$  はループ A の固体質量流量であ

り、 $m_{L\#B}$ はループBの固体質量流量であり、 $\rho_s$ は固体密度であり、 $r_d$ はディップレグのパイプ径であり、 $\phi_{dipleg}$ はディップレグのボイド率であり、 $u$ はシールポット(215, 315)に対する制御入力であり、 $f_1(u)$ はループAのリターンレグ(217)の固体質量出力であり、 $f_2(u)$ はループBのリターンレグ(317)の固体質量出力であり、 $f_3(u)$ はループAからループBへのクロスオーバーパイプ(220)の固体質量出力であり、 $f_4(u)$ はループBからループAへのクロスオーバーパイプ(320)の固体質量出力であり、以下の式が成立する)

【数2】

$$m_{riser\_A} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_A} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha} + \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{BtoA} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha}, \quad 10$$

$$m_{riser\_B} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_B} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha} + \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{AtoB} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha},$$

$$m_{L\_A} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_A} - \beta v_g^2) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha}$$

$$m_{L\_B} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_B} - \beta v_g^2) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha} \quad 20$$

(b) 制御器システムによって、前記次数低減モデル(ROM)に前記質量入力( $u$ )を供給し、前記次数低減モデル(ROM)の質量出力( $f_1(u) \sim f_4(u)$ )を求めて、前記ケミカルループプラントに関する最適設定を決定するステップと、

(c) 制御器システムによって、前記ケミカルループプラントの最適動作を得るために、前記最適設定を前記ケミカルループプラントのループA及びループBの各々のシールポット(215, 315)に対する最適信号として供給するステップと

を含む、方法。

【請求項2】

前記制御器システムが非線形モデル予測制御器(NMPC)とオブザーバとを備えており、前記ステップ(b)および(c)が、

ループAおよびループBの両方の、複数のユーザ設定値、複数の圧力測定値、複数の固体質量流量および複数の固体レベルを非線形モデル予測制御器(NMPC)によって受け取るステップと、

ループAおよびループBに関する、シールポット(215, 315)に対する最適信号(F1/F2, F4/F5, S1/S2, S6/S7)および真空ポンプ/吸い込みファンに対する最適信号(Pump A, Pump B)を前記非線形モデル予測制御器(NMPC)によって生成するステップと、

シールポット弁を制御するための前記信号(F1/F2, F4/F5)および真空ポンプ/吸い込みファンを制御するための前記信号(Pump A)をループAに前記非線形モデル予測制御器(NMPC)によって供給するステップと、

シールポット弁を制御するための前記の算出された設定(S1/S2, S6/S7)および真空ポンプ/吸い込みファンを制御するための前記の算出された設定(Pump B)をループBに前記非線形モデル予測制御器(NMPC)によって供給するステップと、

ループAおよびループBから圧力および差圧の測定値をオブザーバによって受け取るステップと、

ループAおよびループBにおける固体質量流量および固体レベルを前記オブザーバによって計算するステップと、

前記ループ A およびループ B の固体質量流量および固体レベルを前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) の次数低減モデル ( R O M ) に前記オブザーバによって供給するステップと

からなる、請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】

前記ユーザ設定値は、ループ A の差圧 ( D P 4 7 A ) およびループ B の差圧 ( D P 4 7 B )、ループ A の圧力 ( P 2 )、ループ B の圧力 ( P 2 b )、ならびに、ループ A における差圧の、ループ A およびループ B の両方の全体差圧に対する比 (  $D P 1 2 / ( D P 1 2 + D P 1 2 b )$  ) である、請求項 2 記載の方法。

【請求項 4】

前記制御器システムが非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) とオブザーバとを備えており、前記ステップ ( b ) および ( c ) が、

ループ A およびループ B の両方の、複数のユーザ設定値、複数の圧力測定値、複数の固体質量流量および複数の固体レベルを非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって受け取るステップと、

ループ A およびループ B の、シールポット ( 2 1 5 , 3 1 5 ) に対する最適信号 ( F 1 / F 2、F 4 / F 5、S 1 / S 2、S 6 / S 7 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンに対する最適信号 ( P u m p A、P u m p B ) を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって生成するステップと、

ループ A に、シールポット弁を制御するための前記信号 ( F 1 / F 2、F 4 / F 5 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するための前記信号 ( P u m p A ) を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって供給するステップと、

ループ B に、シールポット弁を制御するための前記の算出信号 ( S 1 / S 2、S 6 / S 7 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するための前記の算出信号 ( P u m p B ) を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって供給するステップと、

ループ A およびループ B から圧力および差圧の測定値をオブザーバによって受け取るステップと、

ループ A およびループ B における固体質量流量を前記オブザーバによって計算するステップと、

ループ A およびループ B の前記固体質量流量を非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) の次数低減モデル ( R O M ) に前記オブザーバによって供給するステップと

からなる、請求項 1 記載の方法。

【請求項 5】

前記ユーザ設定値は、ループ A の差圧 ( D P 4 7 A )、ループ B の差圧 ( D P 4 7 B )、ループ A の圧力 ( P 2 )、ループ B の圧力 ( P 2 b )、および、ループ A およびループ B の両方の全体差圧に対する比 (  $D P 1 2 / ( D P 1 2 + D P 1 2 b )$  ) である、請求項 4 記載の方法。

【請求項 6】

前記制御器システムが非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) を備えており、前記ステップ ( b ) および ( c ) が、

複数のユーザ設定値、ループ A およびループ B の両方の、複数の内部状態変数の値を非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって受け取るステップと、

ループ A およびループ B の、シールポット ( 2 1 5 , 3 1 5 ) に対する最適信号 ( F 1 / F 2、F 4 / F 5、S 1 / S 2、S 6 / S 7 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンに対する最適信号 ( P u m p A、P u m p B ) を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって生成するステップと、

ループ A に、シールポット弁を制御するための前記信号 ( F 1 / F 2、F 4 / F 5 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するための前記信号 ( P u m p A ) を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって供給するステップと、

ループ B に、シールポット弁を制御するための前記の算出信号 ( S 1 / S 2、S 6 / S

10

20

30

40

50

7) および真空ポンプ/吸い込みファンを制御するための前記の算出信号 ( P u m p B ) を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) によって供給するステップと  
からなり、

ループ A は、前記ループ A の内部状態変数の値を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) の次数低減モデル ( R O M ) に供給し、

ループ B は、前記ループ B の内部状態変数の値を前記非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) の次数低減モデル ( R O M ) に供給する、

請求項 1 記載の方法。

【請求項 7】

前記ユーザ設定値は、ループ A 内の固体質量流量速度 ( m s A )、ループ B 内の固体質量流量速度 ( m s B )、ループ A からループ B への固体質量流量 ( m s A t o B )、ループ B からループ A への固体質量流量 ( m s B t o A ) およびディップレグ ( 2 1 3 , 3 1 3 ) における固体レベル ( L d s ) である、請求項 6 記載の方法。

【請求項 8】

前記制御器システムがニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) を備えており、前記ステップ ( b ) および ( c ) が、

ループ A の差圧 ( D P 4 7 A ) およびループ B の差圧 ( D P 4 7 B ) をニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) によって受け取るステップと、

ループ A のシールポット弁に対する最適信号 ( F 1 / F 2 )、ならびに、ループ B のシールポット弁に対する最適信号 ( S 1 / S 2 ) を前記ニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) によって生成するステップと、

ループ A およびループ B に、シールポット弁を制御するために前記信号 ( F 1 / F 2 、 S 1 / S 2 ) をそれぞれ前記ニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) によって供給するステップと、

ループ B に、シールポット弁を制御するために前記信号 ( S 1 / S 2 、 S 6 / S 7 ) を前記ニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) によって供給するステップと、

差分装置によって、ループ A から圧力 ( P 2 A ) およびループ B から圧力 ( P 2 B ) を受け取り、差圧信号 ( D P 6 ) を生成するステップと、

前記差分装置に接続された第 2 の P I D ( P I D 2 ) によって、前記差圧信号 ( D P 6 ) を受け取り、ループ B の空気ポンプを駆動する信号 ( P u m p B ) を生成するステップと、

比装置によって、ループ A から差圧 ( D P 1 2 A ) およびループ B から差圧 ( D P 1 2 B ) を受け取り、入力値の比に関連した比信号 ( D P 1 2 R a t i o ) を生成するステップと、

前記比装置に接続された第 1 の P I D ( P I D 1 ) によって、前記比信号 ( D P 1 2 R a t i o ) を受け取り、ループ B の前記シールポット弁を動作する信号 ( S 6 / S 7 ) を生成するステップと、

負荷ベース F F 制御器によって、ループ A に供給される一次空気/ガスの信号 ( W 1 )、および、ループ B に供給される一次空気/ガスの信号 ( W 3 ) を生成するステップと  
からなり、

ループ A は、ループ A の圧力信号 ( P 2 A )、ループ A の差圧信号 ( D P 1 2 A ) およびループ A の差圧信号 ( D P 4 7 A ) を前記差分装置、前記比装置および前記ニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) にそれぞれ供給し、

ループ B は、ループ B の圧力信号 ( P 2 B )、ループ B の差圧信号 ( D P 1 2 B ) およびループ B の差圧信号 ( D P 4 7 B ) を前記差分装置、前記比装置および前記ニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) にそれぞれ供給する、

請求項 1 記載の方法。

【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

## 【技術分野】

## 【0001】

政府支援の研究または開発に関する表示

アメリカ合衆国政府は、エネルギー省契約 No. DE - FC 26 - 07 NT 43095 に従い、本発明における所定の権利を有する。

## 【0002】

関連出願の相互参照

本願は、米国仮特許出願第 61 / 674 , 659 号 ("Nonlinear Model Predictive Control for Chemical Looping Process."、2012年7月23日出願) (その全ての開示は参照により本明細書中に含まれる) の優先権の利益を主張する。

10

## 【0003】

本発明は、米国特許第 8 , 160 , 730 号 ("Fuzzy Logic Control and Optimization System"、発明者: Xincheng Lou、2012年4月17日発行)、米国特許出願公開第 2011 / 0190939 号 ("Control and Optimization System and Method for Chemical Looping Processes"、発明者: Xincheng Lou、Abhinaya Joshi、Hao Lei、2011年8月4日公開)、米国特許出願公開第 2009 / 0222136 号 ("Control and Optimization System"、発明者: Xincheng Lou、2009年9月3日公開)、米国特許出願公開第 2009 / 0222108 号 ("Integrated Controls Design Optimization"、発明者: Xincheng Lou、2009年9月3日公開) (いずれも全体が参照により本明細書中に含まれる) に関連する。

20

## 【背景技術】

## 【0004】

本発明は、ケミカルループプロセスのための動作最適化システムに関し、より詳細には、非線形モデル予測制御器を用いるケミカルループプロセスのための制御最適化システムに関する。

## 【0005】

ケミカルループ処理

典型的なケミカルループ (CL) システムでは、カルシウムベースまたは金属ベースの化合物などの固体が、たとえば、第1のリアクタ (酸化器と呼ばれる) と第2のリアクタ (還元器と呼ばれる) との間で「ループされる」、高温プロセスが用いられる。酸化器内では、酸化器に注入された空気からの酸素が酸化反応において固体により捕捉される。捕捉された酸素は、その後、酸化固体により、たとえば石炭などの燃焼および/またはガス化のために用いられるべき還元器まで運ばれる。還元器内での還元反応の後、固体 (もはや捕捉酸素を有しない) は再び酸化されるために酸化器に戻され、このサイクルが繰り返される。

30

## 【0006】

燃料と空気との比に依存して、酸化反応および還元反応において異なるガスが生成される。結果として、燃料と空気の比は、CLシステムが異なるやり方で利用可能なように制御可能である: たとえば、ガスタービン、燃料電池および/または他の水素ベースの用途のための水素を生成するハイブリッド燃焼 - ガス化プロセスとして; ガスタービンおよび/または燃料電池用の種々の量の水素と二酸化炭素を含有する合成ガス (シンガス) を生成するハイブリッド燃焼 - ガス化プロセスとして; または、燃焼ベースの蒸気発電プラント用の燃焼プロセスとして。

40

## 【0007】

CLプロセスは、たとえば、従来の循環流動層燃焼 (CFB) プラントなどの伝統的なプラントのプロセスよりも複雑である。結果として、CLプロセスに用いられる伝統的なプラント制御は、不可避免的に、各CLループのための個別の制御ループとなる。しかし、正確な制御は各ループにおける多数のパラメタの調整制御に依存し、パラメタはループ間で重なるため、各CLループ用の個別の制御ループを用いることは非効率的であり、CLプロセスの性能を最適化しない。

50

## 【0008】

さらに、CLプロセスは多層流および化学反応を含み、これらは質量輸送および化学反応速度に起因するプロセスの時間遅延および非線形性によって特徴付けられる。結果として、プロセス設計の初期段階における制御最適化システムを考慮しない伝統的な発電プラントの設計は、プロセスパフォーマンスおよびシステムオペラビリティの全体最適化に関してさらに不十分である。

## 【0009】

また、CLプロセスにおける変数の多くは、他の変数との非線形な関係、たとえば変数のループ間相互作用、を有する。結果として、プロセスモデルは、これらの多重相互依存変数関係を効果的に特徴化するように開発される必要がある。

10

## 【0010】

ケミカルループ技術は、隔離可能なCO<sub>2</sub>の個別流を生成可能な熱生成方法であり、温室効果ガスの排出を低減できる。このコンセプトは、高温の化学的および熱的ループ技術を利用するプロセスに基づいている。先のプロジェクトにおいて研究を行った際、ケミカルループプラントは、最大95%のCO<sub>2</sub>を捕捉できる一方で、資本コストおよび電気コストに関して非常に好ましく評価された。しかし、プロセスの本質的な非線形性および固体粒子の多重ループ相互作用に起因して、システムが所望の化学反応を維持し、安定なエネルギー生産を提供することができるように、粒子流を制御し、ループ内の反応物(固体)の輸送を安定化することは、非常に困難な課題である。

## 【0011】

非線形モデル予測制御

ケミカルループプロセスに関する安定性および最大利益性という目標を達成するため、高度なプロセス制御設計は、この技術の開発における重要な要素の1つとなっている。モデル予測制御(MPC)は、モデルに基づくプロセス制御の高度な方法の1つである。これは、プロセスの内部動的モデルと、最適な制御移動を計算するための最適化ソルバとを用いる、多変数制御アルゴリズムである。非線形モデルに基づき、線形または非線形コスト関数と、状態および入力変数についての一般非線形制約とを考慮するMPCスキームは、よく考えられた非線形モデル予測制御(NMPC)である。非線形モデル予測制御(NMPC)は図1に概略的に示されている。

20

## 【0012】

プラント1への入力変数(または操作変数)について値が与えられており、すなわち、制御が意図されている。プラント1は、NMPC100に供給される出力を生成し、NMPC100は、少なくとも1つの入力と少なくとも1つの出力との間の非線形式によって定められる内部非線形モデル120を含む。

30

## 【0013】

非線形モデル120は、プラント1の種々のプロセスの数学モデルであり、これらの数学モデルはそれぞれに同じ入力供給されたときに、プラント1と同様の出力を与える。

## 【0014】

さらに、NMPC100は、非線形最適化器130を有する。非線形最適化器130は、入力制約範囲と少なくとも1つの目標を受け取る。非線形最適化器130は、出力を生成する非線形モデル120に、制約範囲内の入力値を与える。非線形最適化器130は、非線形モデル120の出力を監視し、保存する。非線形最適化器130は、出力を監視および保存しつつ、制約範囲にわたる複数の入力変数値についてこのプロセスを繰り返す。次いで、非線形最適化器は出力および目標を分析し、最適出力および当該最適出力に関連する入力を決定する。

40

## 【0015】

予測器110は、非線形モデル120と相互作用し、与えられた入力および出力変数について内部状態の値を予測する。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

50

## 【 0 0 1 6 】

【特許文献 1】米国特許第 8, 1 6 0, 7 3 0 号

【特許文献 2】米国特許出願公開第 2 0 1 1 / 0 1 9 0 9 3 9 号

【特許文献 3】米国特許出願公開第 2 0 0 9 / 0 2 2 2 1 3 6 号

【特許文献 4】米国特許出願公開第 2 0 0 9 / 0 2 2 2 1 0 8 号

【特許文献 5】米国特許第 7, 0 8 3, 6 5 8 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

## 【 0 0 1 7 】

N M P C を開発するため、ケミカルループシステムの数学モデルは、ケミカルループシステムの機能およびその制御構造を正確に表すように設計されなければならない。 10

## 【 0 0 1 8 】

通常、これらのモデルは非線形問題を解くものであり、各出力計算に必要な多数の計算によって、計算的に求められる。したがって、実用的には、高速に予測された出力に至るためには、モデルを用いる方法が存在しなければならない。

## 【 0 0 1 9 】

ケミカルループプラントを稼働するコストを考慮することは重要である。したがって、制御目標の 1 つは、単に動作を最適化する代わりに、動作コストを最適化することを含むべきである。したがって、その動作を安定化しかつその動作コストを最小化可能な、ケミカルループプロセスのための制御器が現在必要とされている。 20

## 【 0 0 2 0 】

上述のおよび他の特徴は、添付の図面および以下の詳細な説明に例示されている。

## 【 0 0 2 1 】

参照される図面は、例示的な実施形態を示し、同様の要素は同様の番号を有する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 2 2 】

【図 1】非線形予測制御器の概略図である。

【図 2】本発明に適合するケミカルループシステムの概略図である。

【図 3】本発明に適合可能なケミカルループシステムの別の実施形態の概略図である。

【図 4】図 2 のケミカルループシステムを制御する非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) の概略図である。 30

【図 5】非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) を用いる 2 レベルカスケード制御構造である。

【図 6】非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) を用いる 3 レベルカスケード制御構造である。

【図 7】圧力測定値のみが利用可能なケミカルループシステムの制御のための N M P C の概略図である。

【図 8】圧力測定値および固体レベル測定値のみが利用可能なケミカルループシステムの制御のための N M P C の概略図である。

【図 9】全ての測定値が利用可能なケミカルループシステムの制御のための N M P C の概略図である。 40

【図 1 0】二重ループ型ケミカルループシステムを制御するための N M P C / P I D ニューラルネットワーク型制御器の概略図である。

【発明を実施するための形態】

## 【 0 0 2 3 】

本明細書中には、ケミカルループ ( C L ) プラントの C L システム用の統合型プロセス設計および制御最適化システムが開示されており、これは米国特許第 7, 0 8 3, 6 5 8 号 ( その全体が本明細書中に参照により含まれる ) に、より詳細に記載されているものと同様である。

## 【 0 0 2 4 】

図面、特に図2を参照して、本発明に適合するケミカルループシステムが示されている。

【0025】

CLプロセスは、質量輸送速度および化学反応速度に起因する時間遅延とプロセス非線形性によって特徴付けられる、多層流および化学反応を含む。したがって、以下でより詳細に記載されるように、非線形最適化および制御技術はCLプロセスの制御に有用である。詳細には、例示の実施形態には、第一原理式（たとえば、質量、運動量、エネルギーおよび化学種の平衡）から導かれる非線形動的ケミカルループモデリングおよびシミュレーションを含む。このモデリングおよびシミュレーションには、常微分方程式（ODE）、代数方程式（AE）および偏微分方程式（PDE）の任意の組み合わせが含まれる。

10

【0026】

ケミカルループシステムは、第1のループすなわちループA（200）と、第2のループすなわちループB（300）とを有する。ループAはループAからループBへ粒状物質を通すクロスオーバーパイプ220を有する。同様に、クロスオーバーパイプ320は、ループBからループAに粒状物質を運ぶ。

【0027】

微粉および/または破碎炭素燃料、例えば石炭がループAのインレットパイプ219に供給される。

【0028】

これは、リターンレグ217を降下する粒状物質と混合され、下方パイプライン251、ライザ253および上方パイプライン255と吹き上げられ、ガス/粒子分離器（サイクロン211として示される）に送られる。

20

【0029】

ガスはサイクロン211の頂部から通される一方、粒状物質はディップレグ213を介してシールポット215へ通される。シールポット215は、数個の入力弁を有し、これらの入力弁は信号F1、F2、F4およびF5により遠隔より作動されて、特定量の粒状物質をシールポット215からリターンレグ217へまたはクロスオーバーパイプ220からループBへと吹き出す。

【0030】

同様に、ループBは同様に機能する同様の部分を有する。シールポット315は数個の入力弁を有し、これらの入力弁は信号S1、S2、S6およびS7により遠隔より作動されて、特定量の粒状物質をシールポット315からリターンレグ317へまたはクロスオーバーパイプ320からループAへと吹き出す。

30

【0031】

各ループ内の酸素および燃料の量の調整により、ケミカルキャリアはループA内で酸化され、ループB内で還元される。

【0032】

キャリアは酸素を運ぶのみであるため、燃料が酸化されて、CO<sub>2</sub>およびH<sub>2</sub>Oを生じ、これらは分離されてCO<sub>2</sub>が隔離される。これはNMPCでもって制御されるべきプロセスである。

40

【0033】

図3は、ケミカルループシステムの代替的实施形態を示す。図3は、2つのリアクタループ、すなわち、燃料リアクタループ500および空気リアクタループ600を示す。この図中の500番台および600番台の符号は、図2中の200番台および300番台で示される符号と機能的に対応している。固体または反応物としても知られる粒状物質は、ループ内を循環し、一方のループから他方のループへ通される。シールポットから出される粒状物質は、リアクタの底部または底部付近に供給される輸送空気またはガスによって、リアクタの上方に輸送される。

【0034】

燃料リアクタループ500において、粒状物質はパイプ555を通り、サイクロン51

50

1 Aおよび5 1 1 B内で分離され、サイクロン5 1 1 Aに動作可能に接続された第1のディップレグ5 1 3 Aを介して、サイクロン5 1 1 Bに動作可能に接続された第2のディップレグ5 1 3 Bを介して、シールポット5 1 5 A内で収集される。粒状物質はその後シールポット5 1 5 Aからリターンレグ5 1 7を介して燃料リアクタ5 2 3に通される。シールポット5 1 5 Aは信号F 1およびF 2により遠隔的に作動される入力弁を有し、シールポット5 1 5 Aから燃料リアクタ5 2 3へと特定量の粒状物質を吹き出す。シールポット5 1 5 Bは信号F 4およびF 5により遠隔的に作動される入力弁を有し、シールポット5 1 5 Bから燃料リアクタ5 2 3へと特定量の粒状物質を吹き出すとともに、クロスオーバーパイプ5 2 0を介して空気リアクタ6 5 3へと特定量の粒状物質を吹き出す。

【0035】

10

空気リアクタループ6 0 0において、粒状物質はパイプ6 5 5を通り、ディップレグ6 1 3内で収集される前にサイクロン6 1 1内で分離され、シールポット6 1 5 Aおよび6 1 5 B内へと分離される。シールポット6 1 5 Aは信号S 1およびS 2により遠隔的に作動される数個の入力弁を有し、シールポット6 1 5 Aからリターンレグ6 1 7へと特定量の粒状物質を吹き出す。シールポット6 1 5 Bは信号S 6およびS 7により遠隔的に作動される数個の入力弁を有し、シールポット6 1 5 Bからクロスオーバーパイプ6 2 0を介して燃料リアクタ5 2 3へと特定量の粒状物質を吹き出す。

【0036】

圧力制御装置5 9 0、6 9 0、たとえば真空ポンプまたは吸い込みドラフトファンは、燃料リアクタループおよび空気リアクタループの圧力をそれぞれ制御する。図2および4 20  
 に関連して本明細書中に同様に記載されるように、NMPC 1 0 0は、燃料リアクタループ5 0 0の圧力(P 2)を制御する圧力制御装置5 9 0を作動する信号(Pump A)を供給する。同様に、NMPC 1 0 0は、空気リアクタループ6 0 0(ループB)の圧力(P 2 b)を制御する圧力制御装置6 9 0を作動する信号(Pump B)を供給する。

【0037】

図2と異なり、図3のケミカルループシステムは、図2に示される下方パイプライン2 5 1を用いず、シールポット5 1 5 Aおよび6 1 5 Aからの粒状物質はリアクタ5 2 3および6 5 3に直接落ちる。また、燃料リアクタループ5 0 0は、2つのサイクロン、関連するディップレグおよび2つの個別のシールポット5 1 5 Aおよび5 1 5 Bを備えている。空気リアクタループ6 0 0は、2つの個別のシールポット6 1 5 Aおよび6 1 5 Bを 30  
 備える。

【0038】

図2および3に記載されるようなケミカルループプロセスに非線形モデル予測制御を適用するためには、いくつかの解決すべき問題がある。非線形モデル予測制御は図2のケミカルループの実施形態でもって以下で詳細に説明される一方、非線形モデル予測制御は図3のケミカルループの実施形態にも同様に適用可能である。

【0039】

解決すべき技術的問題

1. どのように非線形予測モデルを構築するか

プロセスモデルはNMPCにおいて決定的な役割を果たし、良いものの開発は産業においてNMPCを広く適用するための大きな挑戦である。 40

【0040】

2. どのように計算時間を削減するか

非線形モデリングは計算的(コンピュータ的)に費用がかかる傾向にあるため、計算的要件はNMPCの適用に関する基本的な制限を構成する。NMPCのケミカルループプロセスへの適用が成功するには、各制御時ステップにおける計算時間が分単位でなければならない。

【0041】

3. どのように制御構造を定めるか

多重ループ相互作用のため、ケミカルループプロセスの制御は、複雑な多重入出力制御 50

の問題である。さらに、固体質量流量についておよびディップレグ内の固体残留量の長さについての測定値がないことから、NMPCの利点が得られる全体制御構造をどのように設計するかは未解決の問題である。

#### 【0042】

##### 4. どのようにコスト関数を設計し、制約を識別するか

NMPCは非線形最適化に基づく制御手法であり、NMPCは制約およびコスト関数に基づく次の最適な制御移動を与えうる。直接コスト（たとえば燃料および電力のコスト）と、間接コスト（たとえば制御パフォーマンス）との両方を含むコスト関数をどのように設計するかが、NMPCのケミカルループプロセスへの適用のメリットを決定する。

#### 【0043】

##### 可能な解決策

NMPC用の非線形モデルを生成する2つの方法がある。1つはテストデータに基づく経験的モデルを構築することである。もう1つは質量平衡、運動量保存およびエネルギー平衡ならびに化学種平衡を用いることにより、第一原理モデルを構築することである。

#### 【0044】

第1のアプローチについて、いくつかの非線形モデル識別技術、たとえばニューラルネットワークがある。一方、第2のアプローチについては、Alistom社のシミュレーションおよび制御チームは第一原理に基づくケミカルループプロセスのためのシミュレータを開発している。このシミュレータは、制御目的のモデルを開発するためのよいスタート地点を提供する。

#### 【0045】

1つの大きな問題は、NMPCから結果を得るために必要な計算時間が長いことである。これは、NMPC用の予測モデルが非常に複雑であり、予測時に結果を得るために長い計算時間を必要とすることによる。しかし、これは次数低減モデル（ROM）を用いることにより解決可能である。

#### 【0046】

もう1つの問題は、解くべき結果式が収束しない場合があることである。このため、大域的最適値を見つけ出すための最適化ソフトウェアのために長い時間がかかる場合がある。しかし、最近十年の大規模計算および最適化の大きな進歩により、非線形プログラミングに関する計算時間もまた大きく低減されている。

#### 【0047】

単純化NMPC解法は、多数の動作点（たとえば単位負荷状態）における多重線形モデルに基づくMPCを設計することである。全体の制御手法は最大の動作範囲に関して非線形を維持するが、制御器は各動作点において線形MPC設計に制限される。

#### 【0048】

ケミカルループプロセスおよび多重ループにおける変数同士の結合についてさらに理解することにより、コスト関数の設計改善およびNMPCについての制約のよりよい識別が可能である。

#### 【0049】

##### 新たに開発された特徴

##### 1. ケミカルループプロセスの制御に適用されるNMPC

MPCは石油化学産業および製油産業において用いられてきたが、NMPCに対する適用例は未だほとんど無い。さらに、ケミカルループプロセスは、開発途上の新たな技術であり、NMPCをこの新たな技術に適用することは初めてである。

#### 【0050】

##### 2. ケミカルループのための次数低減モデル

文献にある既存のモデリング方法と異なり、本発明にかかる二層流用の次数低減モデルは、モデルに基づく制御のための簡単かつ信頼性あるモデルを構築するためのより容易な方法を提供する。さらに、モデルの予測とともに、この次数低減モデルはプロセスを最適化するためにも用いることができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 5 1 】

## 3 . ケミカルループのためのニューラルネットワーク型 N M P C

次数低減またはモデル識別のためのニューラルネットワークモデルを用いて、N M P C モデリングへの代替的な解法が提供される。さらに、第一原理および経験的モデリングの両方を組み合わせることにより、今後のケミカルループプロセスシミュレーションおよび制御最適化に価値が加えられる。

## 【 0 0 5 2 】

## 4 . ケミカルループプロセスにおける N M P C の制御構造

N M P C のケミカルループ処理への適用の3つの異なる制御構造が、本発明においてまとめられている。これらの異なる制御構造には、基本的に、ケミカルループプロセスの制御における N M P C の3つの異なる役割が課される。

10

## 【 0 0 5 3 】

## 5 . コスト最適化（最小化）の設計

二重ループまたは多重ループにおける固体残留量の平衡を維持するため、N M P C についてのコスト関数の設計は圧力降下の比を含むべきである。伝統的な二次コスト関数はシステム全体の安定性を保証しない場合がある。さらに、安定な反応およびエネルギー生産を維持するため、温度、圧力、固体流および空気/ガス注入がコスト関数の設計に含まれるべきである。

## 【 0 0 5 4 】

実装の説明

20

次数低減モデル（ROM）

N M P C に関する次数低減モデルを設計するため、2つの制約を考慮しなければならない。一方では、モデルがプロセス動的特性を捕捉し、将来の出力を正確に予測するために十分正確でなければならない。他方では、モデルはリアルタイム制御器計算を実現するために十分単純でなければならない。本発明では、単純化第一原理モデル（制御目的の「次数低減モデル（ROM）」という）が提供される。二重ループケミカルループプロセスのためのROMを構築する方法の詳細を以下に示す。さらに、このROM方法に対して課されるべきいくつかの事項が存在する。

## 【 0 0 5 5 】

a ) このROM方法は、パイプ内の空気速度に従う圧力降下と固体質量流量との間の関係をモデル化するための方法を提供する。これはまた、制御設計において用いられるべき重要な関係の1つである。

30

## 【 0 0 5 6 】

b ) このROM方法は第一原理モデルの複雑性の次数を大きく低減可能である。たとえば、パイプ内の固体 - ガス流の動的特性を記述するためには、一般的に4つの偏微分方程式（PDE）を必要とする。しかし、このROM法では、ただ1つの常微分方程式（ODE）しか用いられない。

## 【 0 0 5 7 】

c ) このROM法はケミカルループプロセスの理解に基づく、たとえば、ライザにおける圧力降下と相互接続部における参照圧力との間の関係などの圧力関係についての単純な記述を表している。

40

## 【 0 0 5 8 】

数学的ROMの別の代替は、経験モデル（たとえばニューラルネットワーク）および他の種類の非線形モデル構造である。これは、第一原理モデルから次数低減モデルへの実行可能なアプローチであり、後述する。

## 【 0 0 5 9 】

## 1 . ケミカルループプロセスのどこに N M P C を適用するか

a ) N M P C は監督制御器としてケミカルループプロセスに適用可能であり、たとえば、N M P C はプロセスを直接操作しないが、線形モデル予測制御器（L M P C ）または比例積分微分（P I D ）制御器などの従属制御器のための設定点を提供する。N M P C は、

50

連続的にプロセスを変化させるための動的リアルタイム最適化器 ( R T O ) エンジンとして構成可能である。

【 0 0 6 0 】

b ) N M P C は負荷変化における固体流を制御するために直接制御器としてケミカルループプロセスに用いられる。

【 0 0 6 1 】

次世代発電プラントのための新技術として、ケミカルループプロセスは送電系統からの負荷需要に高速に追従する能力を有すると期待されている。これにはさらにケミカルループプロセスにおける制御システムがはるかに広い動作範囲でプロセスを変化させる能力を有することが必要である。この場合において、( 従来の制御設計によって通常用いられる ) 線形動的仮定は一般に N M P C 制御のための必要性をもはや示唆し続けない。N M P C を用いるパイロットケミカルループプロセスのための負荷変化制御の一般概念を図 4 に示す。

10

【 0 0 6 2 】

図 4 は図 2 のケミカルループの実施形態に関する N M P C 制御を提供する。N M P C 制御はまた、図 3 のケミカルループの実施形態にも適用可能であり、同様の参照符号は同様の機能を有する。異なるメガワット需要の要求は、制御器 2 6 0 および制御器 3 6 0 に供給される。

【 0 0 6 3 】

制御器 2 6 0 は一次空気 / ガス ( W 1 ) 2 7 1、ループ A からループ B への質量移動 2 7 3、ループ A に関するループ内固体流需要 2 7 5、および、P 2 A に必要な圧力 2 7 7 を予測する。

20

【 0 0 6 4 】

同様に、制御器 3 6 0 は一次空気 / ガス ( W 2 ) 3 7 1、ループ B からループ A への質量移動 3 7 3、ループ B に関するループ内固体流需要 3 7 5、および、P 2 B に必要な圧力 3 7 7 を予測する。

【 0 0 6 5 】

N M P C 1 0 0 は制御器 2 6 0 および 3 6 0 の全ての出力、ならびに、ループ内の測定された入力値、すなわち、ループ A についてのループ内固体流 ( D P 4 7 A ) 2 7 9、ループ B についてのループ内固体流 ( D P 4 7 B ) 3 7 9、ループ A 内の圧力 ( P 2 A ) 2 8 0、ループ A および B の圧力間の差圧 ( P 2 A - P 2 B ) 3 8 5、を受け取る。N M P C 1 0 0 はその後シールポット 2 1 5 の空気 / ガスインレット弁 F 2 を作動させる。シールポット 2 1 5 はループ A のリターンレグ 2 1 7 を通る固体流の量、および、ループ A からループ B への固体流の量を制御する。

30

【 0 0 6 6 】

同様に、N M P C 1 0 0 は次いでシールポット 3 1 5 の空気 / ガスインレット弁 S 2 を作動させる。シールポット 3 1 5 はループ B のリターンレグ 3 1 7 を通る固体流の量、および、ループ B からループ A への固体流の量を制御する。

【 0 0 6 7 】

同様に、N M P C 1 0 0 はループ A の圧力 ( P 2 ) を調整する真空ポンプ ( または吸い込みファンまたは圧力制御装置 ) 2 9 0 を作動する信号 ( P u m p A ) を供給する。N M P C 1 0 0 はループ B の圧力 ( P 2 b ) を調整する真空ポンプ ( または吸い込みファンまたは圧力制御装置 ) 3 9 0 を作動する信号 ( P u m p B ) を供給する。

40

【 0 0 6 8 】

N M P C 監督制御器を用いた制御構造

N M P C を用いた 2 レベルカスケード制御構造

図 5 は、N M P C を用いた 2 レベルカスケード制御構造を示す ( これはまた図 2 を参照して説明される ) 。この制御構造において、N M P C 1 0 0 は監督モードにある。N M P C 1 0 0 は下位レベルの P I D 制御器 4 1 0 に設定点を供給する。しかし、ケミカルループプロセスプラント 1 は、N M P C 1 0 0 により割り当てられた設定点に従って P I D 制

50

御器により直接調整される。

【 0 0 6 9 】

N M P C を用いた 3 レベルカスケード制御構造

N M P C 1 0 0 を用いた 3 レベルカスケード制御構造が図 6 に示されている。この制御構造において、N M P C 1 0 0 は、動的リアルタイム最適化 ( R T O ) としての役割を果たす。N M P C 1 0 0 は多数の制約に対する異なる動作点における独立変数の最適値を計算する。これらの値は、外部目標として L M P C 4 2 0 に渡される。次いで、下位レベル制御器 L M P C 4 2 0 は、これらの外部目標に関する設定点をどのように動かすかを決定し、設定点の次の移動を P I D 制御器 4 1 0 に供給する。P I D 制御器 4 1 0 はシステムの操作された変数を直接制御し、システムの調整された変数を L M P C 4 2 0 により割り

10

【 0 0 7 0 】

異なる測定値に対して、N M P C 制御構造は異なる。3 つの典型的な制御構造は、異なる測定値を対して固体質量流量を制御するために識別される。

【 0 0 7 1 】

以下の記載は、図 7 を参照する。使用モデルにおいて少なくとも 1 4 の状態変数が存在し、このモデルには圧力、固体質量流量および固体レベルが含まれる。圧力のみが測定可能であるとき、N M P C を実装するため、固体質量流量および固体レベルの状態変数の値を予測するため、オブザーバ 4 0 0 を構築する必要がある。図 7 に示される制御構造において、 $D P 1 2 / ( D P 1 2 + D P 1 2 b )$  は両方のループにおける固体平衡を示す重要な変数である。

20

【 0 0 7 2 】

図 7 中、N M P C 1 0 0 は、ループ A および B に関する圧力測定値のみが利用可能であるプラントにおいて用いられる。N M P C 1 0 0 は所望の設定点を受け取る。

$D P 4 7 A$  : ライザの差圧 ( ループ A )

$P 2$  : 接合部の圧力 ( ループ A )

$D P 1 2 / ( D P 1 2 + D P 1 2 b )$  : ループ A および B の間の圧力降下の比

$P 2 b$  : 接合部の圧力 ( ループ B )

$D P 4 7 B$  : ライザの差圧 ( ループ B )

【 0 0 7 3 】

N M P C 1 0 0 は以下の操作された変数に関する値を計算し、これをループ A に供給する。

$F 1 / F 2$  : シールポット弁への信号 ( ループ A )

$P u m p A$  : 真空ポンプまたは吸い込みファンへの信号 ( ループ A )

$F 4 / F 5$  : シールポット弁への信号 ( ループ A )

【 0 0 7 4 】

また、N M P C 1 0 0 は以下の操作された変数に関する値を計算し、これをループ B に供給する。

$S 1 / S 2$  : シールポット弁への信号 ( ループ B )

$P u m p B$  : 真空ポンプまたは吸い込みファンへの信号 ( ループ B )

$S 6 / S 7$  : シールポット弁への信号 ( ループ B )

【 0 0 7 5 】

オブザーバ 4 0 0 は、ループ A および B における種々の圧力を測定し、次の計算に用いられるべき固体質量流量および固体レベルを N M P C 1 0 0 に供給する。

【 0 0 7 6 】

本発明の別の実施形態が図 8 に示されている。N M P C 1 0 0 は所望の設定点を受け取る。

$D P 4 7 s$  : ライザの差圧 ( ループ A )

$P 2 s$  : 接合部の圧力 ( ループ A )

$L d s$  : ディップレグレベル

30

40

50

## 【 0 0 7 7 】

N M P C 1 0 0 はさらに以下のものに対する可変値を受け取る。

W 1 : 一次空気 / ガス ( ループ A )

m s \_ i n A : 質量入力 ( ループ A )

S 6 / S 7 : シールポット弁への信号 ( ループ B )

W 3 : 一次空気 / ガス ( ループ B )

## 【 0 0 7 8 】

また、N M P C 1 0 0 は、以下の操作された変数についての値を計算し、これをループ A に供給する。

F 1 / F 2 : シールポット弁への信号 ( ループ A )

F 4 / F 5 : シールポット弁値への信号 ( ループ A )

P u m p A : 真空ポンプまたは吸い込みファンへの信号 ( ループ A )

## 【 0 0 7 9 】

以下の入力はループ A に直接供給される。

W 1 : 一次空気 / ガス ( ループ A )

m s \_ i n A : 質量入力 ( ループ A )

## 【 0 0 8 0 】

また、N M P C 1 0 0 は、以下の操作された変数についての値を計算し、これをループ B に供給する。

S 1 / S 2 : シールポット弁への信号 ( ループ B )

S 8 / S 9 : シールポット弁への信号 ( ループ B )

P u m p B : 真空ポンプまたは吸い込みファンへの信号 ( ループ B )

以下の入力はループ B に直接供給される。

W 3 : 一次空気 / ガス ( ループ B )

S 6 / S 7 : シールポット弁への信号 ( ループ B )

## 【 0 0 8 1 】

オブザーバ 4 0 0 は、ループ A および B 内の種々の圧力を測定し、固定質量流量を決定し、この情報を N M P C 1 0 0 に戻す。ループ A および B 内の固体レベルおよび固体質量流量は次の計算に用いられる。

## 【 0 0 8 2 】

完全な情報制御構造における、N M P C を用いたケミカルループプロセスにおける負荷変化に関する典型的な動的応答が、図 9 に示されている。ここで、ループ A 2 0 0 およびループ B 3 0 0 は、内部状態変数の完全な情報を供給する。

## 【 0 0 8 3 】

#### ニューラルネットワーク

第一原理モデルの他に、上記に記載されかつ示されたように、経験モデルもケミカルループプロセスの制御に組み込み可能である。ニューラルネットワークは非線形システムのためのシステム識別方法の 1 つである。ニューラルネットワークモデルを用いたケミカルループプロセスのための N M P C が、図 1 0 に示されている。

## 【 0 0 8 4 】

図 1 0 は、二重ループ型ループシステムを制御するための N M P C / P I D ニューラルネットワーク型制御器の概略図である。ニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) はループ A およびループ B における圧力降下の測定値 ( D P 4 7 A および D P 4 7 B ) を入力として受け取る。これらの入力から、N N N M P C はその予めプログラムされた出力をループ A のシールポット弁 ( F 1 / F 2 ) およびループ B のシールポット弁 ( S 1 / S 2 ) に供給する。差分装置 9 2 0 は、圧力入力 P 2 A および P 2 B における差に基づいて差圧信号 ( D P 6 ) を生成し、比例積分微分器 ( P I D 2 ) 9 5 0 に信号 ( D P 6 ) を供給する。P I D 2 9 5 0 は信号 ( P u m p B ) をもってループ B の真空ポンプ / 吸い込みファンを動作させる。

## 【 0 0 8 5 】

10

20

30

40

50

比装置 930 は、ループ A における圧力降下 (DP12A) およびループ B における圧力降下 (DP12B) を受け取り、入力値の比に基づく差圧信号 (DP12Ratio) を生成する。信号 (DP12Ratio) はループ B のシールポット弁 (S6/S7) を動作させる PID1 960 に供給される。

【0086】

負荷に基づく FF 制御器 940 は、ループ A の信号 (W1)、(F4/F5)、および、ループ B の信号 (W3) を制御する。ループ A は、圧力 (P2A)、圧力差 (DP12A) および圧力差 (DP47A) を、差分装置 920、比装置 930 および NN NMP C 910 にそれぞれフィードバックとして供給する。

【0087】

同様に、ループ B は、圧力 (P2B)、圧力差 (DP12B) および圧力差 (DP47B) を、差分装置 920、比装置 930 および NN NMP C 910 にそれぞれフィードバックとして供給する。

【0088】

#### 二重ループにおける固体平衡

ケミカルループプロセスの異なる部分における圧力比は、レベルセンサ無しで制御する場合に関して、コスト関数に含まれなければならない。

【0089】

二重ループ型ケミカルループプロセスについての制御設計において、主要な制御目的の 1 つは、2 つのループ間の固体輸送を平衡化することである。しかし、いくつかの重要な測定可能変数 (たとえば、SPCV から来る固体質量流量およびディップレグ内の固体レベル) がないことから、測定可能変数 (たとえばシステム内の圧力または圧力降下) を用いた伝統的な二次コスト関数は、この状況下では制御目的を達成できない場合がある。理由の 1 つは、圧力および圧力降下が固体質量流量速度に高度に関係しているものの、これらは他の不明な変数により容易に影響されることである。

【0090】

しかし、実際の設備から観察され、理論分析に基づいて計算されるように、二重ループ型ケミカルループプロセスが定常モードで動作するとき、システム全体は圧力平衡にある。したがって、システムの異なる部分における圧力降下の比は固体質量流量およびディップレグの残留量レベルの合理的な表示を提供すべきである。結果として、圧力降下の比は、システム全体の安定性を維持するため、コスト関数において含まれるべきである。

【0091】

#### 部分 I のパイプラインについての次数低減モデル 使用される用語

10

20

30

【表 1】

$A$	面積
$V$	体積
$g$	重力加速度
$m_s$	固体質量流量速度
$\Delta P$	圧力降下
$L$	長さ
$\alpha$	摩擦係数
$\tau$	パイプ内特性時間
$P$	圧力
$\rho_g$	ガス密度
$\rho_s$	固体密度
$v_g$	ガス速度
$v_s$	固体速度
$\varepsilon$	ボイド率
$r$	パイプ径

10

## 【0092】

部分 I において考慮されるべき 4 つの主要な要素、すなわち、リターンレグ、クロス  
オーバーパイプ、ディップレグおよび S P C V がある。

20

## 【0093】

質量平衡に基づいて、リターンレグに関する集中化モデルは以下のように書ける。

$$(A.1) \quad \frac{d[\rho_s(1-\varepsilon_{out})V]}{dt} = A[\rho_s(1-\varepsilon_{in})v_{s\_in} - \rho_s(1-\varepsilon_{out})v_{s\_out}]$$

## 【0094】

表記の意味についての用語を参照されたい。 $m_{s\_in} = \rho_s A (1 - \varepsilon_{in}) v_{s\_in}$ 、 $m_{s\_out} = \rho_s A (1 - \varepsilon_{out}) v_{s\_out}$  として、式 (A.1) は以下のように書き直せる。

30

$$(A.2) \quad \frac{d\left(\frac{m_s V}{A v_{s\_out}}\right)}{dt} = m_{s\_in} - m_s$$

## 【0095】

パイプ内の特性時間である、 $\tau = (V / A v_{s\_out})$  を定義する。リターンレグ内の固体速度は、それほど変わらないため、(A.2) は最終的に以下のように書ける。

$$(A.3) \quad \tau \frac{dm_s}{dt} = m_{s\_in} - m_s$$

40

## 【0096】

リターンレグ内で、摩擦が、圧力降下への主要な寄与および停止した固体の影響を構成し、加速効果がパイプ内の空気速度および固体速度が低いために無視できると仮定する。すなわち、

$$(A.4) \quad \Delta P_{re} = \Delta P_{ms} + \Delta P_f$$

であり、式中、 $P_{ms}$  および  $P_f$  は停止固体および摩擦の影響からの圧力降下をそれぞれ表す。

## 【0097】

50

さらに、 $P_{ms}$  は以下のように書ける。

$$(A.5) \quad \Delta P_{ms} = \frac{m_s g \tau}{A_m}$$

【 0 0 9 8 】

摩擦は2つの部分で構成されている。1つは空気とパイプ壁との間の摩擦であり、もう1つは空気と固体との間の摩擦である。リターンレグ内の空気速度は非常に低く、ほとんど変化しないため、空気とパイプ壁との間の摩擦から生じる圧力降下はほぼ一定であると仮定する。ファニング式に基づいて、摩擦による圧力降下は一般的に相対速度の二乗に比例する。空気速度が低く、固体質量流量速度が固体速度に関係することを考慮して、おおよそ摩擦による圧力降下は以下のように書ける。

$$(A.6) \quad \Delta P_f = \alpha m_s^2 + \beta v_g^2 = \alpha m_s^2 + c_f$$

【 0 0 9 9 】

式 ( A . 4 ) から、以下が得られる。

$$(A.7) \quad d\Delta P_{re} = \left( \frac{g\tau}{A_m} + 2\alpha m_s \right) dm_s$$

$$(A.8) \quad m_s = \frac{\sqrt{\left( \frac{g\tau}{A_m} \right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha}$$

【 0 1 0 0 】

( A . 7 ) および ( A . 8 ) を ( A . 3 ) に代入して、最終的に以下が得られる。

$$(A.9) \quad \tau \frac{d(\Delta P_{re})}{dt} = \sqrt{\left( \frac{g\tau}{A_m} \right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re} - c_f)} \left( m_{s\_in} - \frac{\sqrt{\left( \frac{g\tau}{A_m} \right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right)$$

【 0 1 0 1 】

クロスオーバーパイプに関して、モデル方法は同じ着想に従うようにすることができる。

【 0 1 0 2 】

ディップレグについて、捕捉されるべき2つの重要な関係が存在する。1つは固体のレベル変化であり、もう1つはディップレグ内の圧力降下である。ディップレグ内の固体レベルについてのモデルは質量平衡に基づいて以下のように構築できる。

$$(A.10) \quad \frac{dL}{dt} = \frac{m_{s\_in} - m_{s\_out}}{\rho_s \pi_d^2 \varepsilon_{dipleg}}$$

【 0 1 0 3 】

実際の施設におけるテストから、ディップレグ内の圧力降下はライザ内の圧力降下と関係し、サイクロンとの相互接続点からの圧力降下に比例することが観察されている。この次数低減モデルにおいて、代数式が ( A . 1 1 ) に示されるようなこの関係を記述するために採用される。

10

20

30

40

$$(A.11) \quad \Delta P_{dip\_leg} = a(P_{cyclone} - P_2 - \Delta P_{re}) + b$$

式中、aおよびbは、決定される実験定数である。

【0104】

以下の関係がSPCVにおける関係を表すために用いられる。

$$(A.12) \quad \begin{pmatrix} m_A \\ m_B \\ m_{AtoB} \\ m_{BtoA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(F_1, F_2, F_4, F_5, S_1, S_2, S_6, S_7) \\ f_2(F_1, F_2, F_4, F_5, S_1, S_2, S_6, S_7) \\ f_3(F_1, F_2, F_4, F_5, S_1, S_2, S_6, S_7) \\ f_4(F_1, F_2, F_4, F_5, S_1, S_2, S_6, S_7) \end{pmatrix} \quad 10$$

【0105】

部分IIにおけるパイプラインのための次数低減モデル

ライザは、部分IIにおける最も重要な構成要素である。部分Iにおけるパイプラインと異なり、固体速度は部分IIにおいてはるかに速い。したがって、空気とパイプ壁との間の摩擦も、モデルにおいて考慮されるべきである。

【0106】

ライザ内で、圧力降下は停止固体および摩擦からも生じる。したがって、以下のようになる。 20

$$(A.13) \quad \Delta P_{riser} = \Delta P_{ms} + \Delta P_f$$

$$(A.14) \quad \Delta P_{ms} = \frac{m_s g \tau}{A_{in}} \quad \text{かつ} \quad \Delta P_f = \alpha m_s^2 + \beta v_g^2$$

【0107】

(A.13)から、以下が容易に得られる。

$$(A.15) \quad d\Delta P_{riser} = \left( \frac{g\tau}{A_{in}} + 2\alpha m_s \right) dm_s + 2\beta v_g dv_g \quad 30$$

$$(A.16) \quad m_s = \frac{\sqrt{\left( \frac{g\tau}{A_{in}} \right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_{in}}}{2\alpha}$$

【0108】

(A.15)および(A.16)を(A.3)に代入して、ライザに関する次数低減モデルは以下のように書ける。

$$(A.17) \quad \tau \frac{d\Delta P_{riser}}{dt} = 2\alpha v_g \frac{dv_g}{dt} + \sqrt{\left( \frac{g\tau}{A_{in}} \right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser} - \beta v_g^2)} \left( m_{s\_in} - \frac{\sqrt{\left( \frac{g\tau}{A_{in}} \right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_{in}}}{2\alpha} \right) \quad 40$$

【0109】

空気速度の動的特性が高速であると仮定して、 $dv_g/dt$ は式中で無視できる。最終的に以下が得られる。

(A.18)

$$\tau \frac{d\Delta P_{riser}}{dt} = \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser} - \beta v_g^2)} \left( m_{s\_in} - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_{in}}}{2\alpha} \right)$$

【 0 1 1 0 】

ライザ内の圧力降下を用いた線形関係は、相互接続点における推測圧力に用いられる。

$$(A.19) \quad P_2 = P_{cyclone} + c\Delta P_{47} + d$$

10

式中、cおよびdは決定される定数である。

【 0 1 1 1 】

まとめると、二重ループ型ケミカルループプロセスについての動的次数低減モデルは以下のように書ける。

$$\begin{aligned}
\tau \frac{d(\Delta P_{re\_A})}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_A} - c_f)} \left( f_1(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_A} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \\
\tau \frac{d(\Delta P_{re\_B})}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_B} - c_f)} \left( f_2(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_B} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \\
\tau \frac{d(\Delta P_{AtoB})}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{AtoB} - c_f)} \left( f_3(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{AtoB} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \\
\tau \frac{d(\Delta P_{BtoA})}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{BtoA} - c_f)} \left( f_4(u) - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{BtoA} - c_f)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \\
\tau \frac{d\Delta P_{riser\_A}}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_A} - \beta v_g^2)} \left( m_{riser\_A} - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_A} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right) \\
\tau \frac{d\Delta P_{riser\_B}}{dt} &= \sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_B} - \beta v_g^2)} \left( m_{riser\_B} - \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_m}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_B} - \beta v_g^2)} - \frac{g\tau}{A_m}}{2\alpha} \right)
\end{aligned}$$

$$\frac{dL_A}{dt} = \frac{m_{L\_A} - f_1(u) - f_3(u)}{\rho_s \pi r_d^2 \varepsilon_{dipleg}}$$

$$\frac{dL_B}{dt} = \frac{m_{L\_B} - f_2(u) - f_4(u)}{\rho_s \pi r_d^2 \varepsilon_{dipleg}}$$

式中、 $u$  はシステムの制御入力であり、これらは S P C V に流入する空気流であり、下記式が満たされる。

$$m_{riser\_A} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_A} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha} + \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{BloA} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha},$$

$$m_{riser\_B} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{re\_B} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha} + \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{AtoB} - c_f) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha},$$

$$m_{L\_A} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_A} - \beta v_g^2) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha}$$

$$m_{L\_B} = \frac{\sqrt{\left(\frac{g\tau}{A_{in}}\right)^2 + 4\alpha(\Delta P_{riser\_B} - \beta v_g^2) - \frac{g\tau}{A_{in}}}}{2\alpha}$$

10

## 【 0 1 1 2 】

最終的に 8 つの O D E が存在し、これらはこの R O M を定義するために用いられる。

## 【 0 1 1 3 】

制約の扱い

制約の設計はケミカルループプロセスの制御に大きく影響する。二種類の制約が存在する。

20

## 【 0 1 1 4 】

1 つは「ハードな制約」であり、これはプロセス動作全体の間で違反されることはない。アクティブなハードな制約によって、N M P C 制御器における余分のフィードバック項が導入される場合がある。これは、所定のアクティブな集合を有する制約された閉ループシステムの不安定性をもたらす、そして、これは調整パラメタの選択によらない。ケミカルループプロセスにおけるハードな制約には、S P C V からの固体流を生成する最小吹込空気流速、物理設計に起因する最大空気流速、圧力シールを維持するためのディップレグ内の最小固体レベル、および、ライザ内の最大固体質量流量が含まれる。

30

## 【 0 1 1 5 】

もう 1 つは「ソフトな制約」であり、これは、プロセス中に違反されることはあるが、コスト関数にペナルティが加えられる。ケミカルループプロセスにおけるソフトな制約には、所望レベル付近での許容範囲内の固体レベルの変化、空気流の許容動作範囲、および、所望の動作点の上下の圧力降下の許容変動が含まれる。

## 【 0 1 1 6 】

プラント / モデルミスマッチを有する定常状態オフセットの排除

プラントと R O M との間でのミスマッチは常に存在する。実際、このミスマッチは N M P C 制御における定常状態エラーを引き起こす場合がある。この複雑性を避けるため、制御ループは、定常状態オフセットをなくすために積分器要素を含んでいなければならない。ケミカルループプロセスについての N M P C の設計において、ライザ内の圧力降下は重要であり、これには正確な制御が必要であるため、ライザ内の圧力降下に関する積分器要素は、プラント / モデルのミスマッチからくる定常状態オフセットをなくすために非線形 R O M に直接加えられて良い。

40

## 【 0 1 1 7 】

代替的实施形態

本発明は、以下において用いることができる。

- 1 . 化学的および熱的な製造と二層流輸送、たとえば循環流動層およびケミカルループプロセスを含む、化学ユニットのための設計モデルに基づく制御。
- 2 . 制御設計および制御調整をサポートする化学ユニットのシミュレーション。
- 3 . 二層流型化学ユニットにおけるプロセスおよびパフォーマンスの最適化。

50

## 【 0 1 1 8 】

－実施形態では、本明細書中にはループ A および B を含むケミカルループプラントの動作最適化方法が記載されており、該方法において、各ループは、空気／ガス中に同伴された固体粒子を上方に、次いで水平上方パイプラインを介して、流体から固体粒子を分離する分離ユニットへと運ぶライザを含み、分離ユニットは、固体粒子をディップレグを介してシールポットへと下方に供給し、シールポットは、接続点において、クロスオーバーパイプを介して他方のループへ、または、リターンレグを介して下方パイプラインへと固体粒子を選択的に送り、流体は下方パイプライン内に導かれて、固体粒子は当該下方パイプラインの上方へとライザまで吹き戻される。該方法は、ライザ、ディップレグおよびリターンレグ毎に、空気および粒子の加速度、質量流量、圧力降下、圧力に関する項を用いる質量平衡式を生成することと、摩擦を定める項以外のリターンレグに関する圧力降下項を削除することと、リターンレグにおける加速度項を削除することと、摩擦によるリターンレグの圧力降下を定数に設定することとにより、次数低減モデル（ROM）を生成するステップと、ROMに種々の入力（ $u_i$ ）を供給し、ROMの出力（ $y_i$ ）を監視して、ケミカルループプラントに関する最適設定を決定するステップと、ケミカルループプラントの最適動作を得るために、最適設定をケミカルループプラントに供給するステップと、を含む。

10

## 【 0 1 1 9 】

より特定のな実施形態では、非線形最適化器は、ROMに種々の入力値（ $u_i$ ）を供給するようROMと相互に影響し、最適な入力設定（ $u_i$ ）を決定するようROMの出力（ $y_i$ ）を監視する。

20

## 【 0 1 2 0 】

別の実施形態では、ループ A およびループ B を含むケミカルループプラントの動作最適化のための制御器システムが記載されている。該システムは、非線形モデル予測制御器（NMPC）と、オブザーバとを有し、非線形モデル予測制御器（NMPC）は、ループ A および B の両方の、複数のユーザ設定値、複数の圧力測定値、複数の固体質量流量および複数の固体レベルを受け取り、ループ A および B に関する、シールポットに対する最適信号（ $F_1 / F_2$ 、 $F_4 / F_5$ 、 $S_1 / S_2$ 、 $S_4 / S_5$ ）および真空ポンプ／吸い込みファンに対する最適信号（ $Pump A$ 、 $Pump B$ ）を生成し、シールポット弁を制御するための信号（ $F_1 / F_2$ 、 $F_4 / F_5$ ）および真空ポンプ／吸い込みファンを制御するための信号（ $Pump A$ ）をループ A に供給し、シールポット弁を制御するための算出された設定（ $S_1 / S_2$ 、 $S_4 / S_5$ ）および真空ポンプ／吸い込みファンを制御するための算出された設定（ $Pump B$ ）をループ B に供給するよう適合されており、オブザーバは、ループ A および B から圧力および差圧の測定値を受け取り、ループ A および B における固体質量流量および固体レベルを計算し、ループ A および B の固体質量流量および固体レベルをNMPCに供給するよう適合されている。

30

## 【 0 1 2 1 】

より特定のな実施形態では、ユーザ設定値は、ループ A の差圧（ $DP_{47A}$ ）およびループ B の差圧（ $DP_{47B}$ ）、 $F_2$ 、 $F_{2b}$ 、ならびに、ループ A における差圧の、ループ A および B の両方の全体差圧に対する比（ $DP_{12} / (DP_{12} + DP_{12b})$ ）である。

40

## 【 0 1 2 2 】

別の実施形態では、ループ A およびループ B を含むケミカルループプラントの動作最適化のための制御器システムが記載されている。該システムは、非線形モデル予測制御器（NMPC）と、オブザーバとを有し、非線形モデル予測制御器（NMPC）は、ループ A および B の両方の、複数のユーザ設定値、複数の圧力測定値、複数の固体質量流量および複数の固体レベルを受け取り、ループ A および B の、シールポットに対する最適信号（ $F_1 / F_2$ 、 $F_4 / F_5$ 、 $S_1 / S_2$ 、 $S_6 / S_7$ ）および真空ポンプ／吸い込みファンに対する最適信号（ $Pump A$ 、 $Pump B$ ）を生成し、ループ A の、シールポット弁を制御するための信号（ $F_1 / F_2$ 、 $F_4 / F_5$ ）および真空ポンプ／吸い込みファンを制御

50

するための信号 ( Pump A ) を供給し、ループ B の、シールポット弁を制御するための算出信号 ( S 1 / S 2 、 S 6 / S 7 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するための算出信号 ( Pump B ) を供給するよう適合されており、オブザーバが、ループ A および B から圧力および差圧の測定値を受け取り、ループ A および B における固体質量流量を計算し、ループ A および B の固体質量流量を N M P C に供給するよう適合されている。

【 0 1 2 3 】

より特定のな実施形態では、ユーザ設定値は、 D P 4 7 A、 D P 4 7 B、 F 2、 F 2 b および D P 1 2 / ( D P 1 2 + D P 1 2 b ) である。

【 0 1 2 4 】

別の実施形態では、ループ A およびループ B を含むケミカルループプラントの動作最適化のための制御器システムが記載されている。制御器システムは、非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) を有し、当該非線形モデル予測制御器 ( N M P C ) は、複数のユーザ設定値、ループ A および B の両方の、複数の内部状態変数の値を受け取り、ループ A および B の、シールポットに対する最適信号 ( F 1 / F 2 、 F 4 / F 5 、 S 1 / S 2 、 S 6 / S 7 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンに対する最適信号 ( Pump A 、 Pump B ) を生成し、ループ A の、シールポット弁を制御するための信号 ( F 1 / F 2 、 F 4 / F 5 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するための信号 ( Pump A ) を供給し、ループ B の、シールポット弁を制御するための算出信号 ( S 1 / S 2 、 S 6 / S 7 ) および真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するための算出信号 ( Pump B ) を供給するよう適合されており、ループ A は該ループ A の内部状態変数の値を N M P C に供給し、ループ B は該

10

20

【 0 1 2 5 】

より特定のな実施形態では、ユーザ設定値は、ループ A 内の固体質量流量速度 ( m s A )、ループ B 内の固体質量流量速度 ( m s B )、ループ A からループ B への固体質量流量 ( m s A t o B )、ループ B からループ A への固体質量流量 ( m s B t o A ) およびディップレグにおける固体レベル ( L d s ) である。

【 0 1 2 6 】

別の実施形態では、ループ A およびループ B を含むケミカルループプラントの動作最適化のためのニューラルネットワーク型 ( N N ) 制御器システムが記載されている。該システムは、ループ A の差圧 ( D P 4 7 A ) およびループ B の差圧 ( D P 4 7 B ) を受け取り、ループ A のシールポット弁に対する最適信号 ( F 1 / F 2 )、ならびに、ループ A およびループ B の真空ポンプ / 吸い込みファンについてのループ B のシールポット弁に対する最適信号 ( S 1 / S 2 ) を生成し、ループ A および B のシールポット弁を制御するために信号 ( F 1 / F 2 ) および ( S 1 / S 2 ) をそれぞれ供給し、ループ B のシールポット弁を制御するために信号 ( S 1 / S 2 、 S 6 / S 7 ) を供給し、ループ B の真空ポンプ / 吸い込みファンを制御するために信号 ( Pump B ) を供給するよう適合されたニューラルネットワーク型非線形モデル予測制御器 ( N N N M P C ) と、ループ A から圧力 ( P 2 A ) およびループ B から圧力 ( P 2 B ) を受け取り、差圧信号 ( D P 6 ) を生成するよう適合された差分装置と、差分装置に接続されており、差圧信号 ( D P 6 ) を受け取り、ループ B の空気ポンプを駆動する信号 ( Pump B ) を生成する P I D 2 と、ループ A から差圧 ( D P 1 2 A ) およびループ B から差圧 ( D P 1 2 B ) を受け取り、入力値の比に関連した信号 ( D P 1 2 R a t i o ) を生成するよう適合された比装置と、比装置に接続されており、信号 ( D P 1 2 R a t i o ) を受け取り、ループ B のシールポット弁を動作する信号 ( S 6 / S 7 ) を生成するよう適合された P I D 1 と、ループ A に供給される信号 W 1、および、ループ B に供給される信号 W 3 を生成する負荷ベース F F 制御器と、を有しており、ループ A は信号 ( P 2 A )、信号 ( D P 1 2 A ) および信号 ( D P 4 7 A ) を差分装置、比装置および N N N M P C にそれぞれ供給し、ループ B は信号 ( P 2 B )、信号 ( D P 1 2 B ) および信号 ( D P 4 7 B ) を差分装置、比装置および N N N M P C にそれぞれ供給する。

30

40

【 0 1 2 7 】

50

別の実施形態では、燃料リアクターループおよび空気リアクターループを有するケミカルループプラントの動作最適化方法が記載されている。該方法において、燃料リアクターループは、空気/ガス中に同伴された固体粒子を上方に、次いで、水平上方パイプラインを介して、流体から固体粒子を分離するよう適合された第1の分離ユニットに運ぶための燃料リアクタを有し、分離ユニットは、固体粒子を下方に第1のディップレグを介して第1のシールポットに供給し、第1のシールポットは固体粒子をリターンレグを介して燃料リアクタに送り、燃料リアクタは、第2のシールポットと動作可能に結合されており、第2のシールポットは、粒子を選択的に、クロスオーバーパイプを介して空気リアクタに送るか、または、燃料リアクタへと上方へ輸送し、空気リアクターループは、空気/ガス中に同伴された固体粒子を、上方に、次いで、水平上方パイプラインを介して、流体から固体粒子を分離するために適合された分離ユニットに運ぶための空気リアクタを有し、分離ユニットは、固体粒子をディップレグを介して下方に第3のシールポットおよび第4のシールポットに供給し、第3のシールポットは、固体粒子をリターンパイプを介して空気リアクタに選択的に送り、第4のシールポットは、固体粒子をクロスオーバーパイプを介して燃料リアクターループに選択的に送る。該方法は、リアクタ、ディップレグおよびリターンレグ毎に、圧力、圧力降下、質量流量、空気および粒子の加速度に関する項を用いる質量平衡式を生成することと、摩擦を定める項以外のリターンレグに関する圧力降下項を削除することと、リターンレグにおける加速度項を削除することと、摩擦によるリターンレグの圧力降下を定数に設定することとにより次数低減モデル(ROM)を生成するステップと、ROMに入力( $u_i$ )を供給し、ROMの出力( $y_i$ )を監視して、ケミカルループプラントに関する最適設定を決定するステップと、ケミカルループプラントの最適動作を得るために、最適設定をケミカルループプラントに供給するステップとを含む。

#### 【0128】

より特定のな実施形態では、非線形最適化器は、ROMに種々の入力値( $u_i$ )を供給するようROMと相互に影響し、最適な入力設定( $u_i$ )を決定するようROMの出力( $y_i$ )を監視する。

#### 【0129】

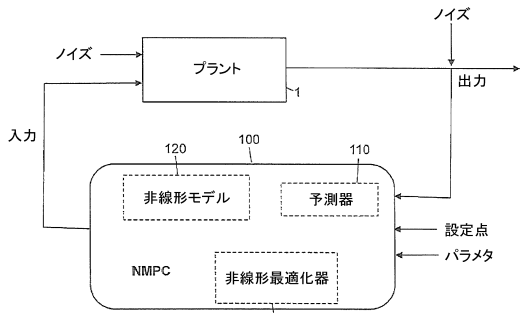
本発明について種々の例示的实施形態に関して説明したが、本発明の範囲から逸脱すること無く、種々の変更が可能であり、等価物をその構成要素と置換可能であることは当業者には理解されるであろう。さらに、本発明の実質的な範囲から逸脱すること無く、特定の状態または内容を本発明の教示に適合するために多くの修正がなしえる。したがって、本発明は、本発明を実施するためにおこなわれた最良の形態として開示された特定の实施形態に限定されず、本発明は、添付の請求項の範囲にある全ての実施形態を含む。

#### 【符号の説明】

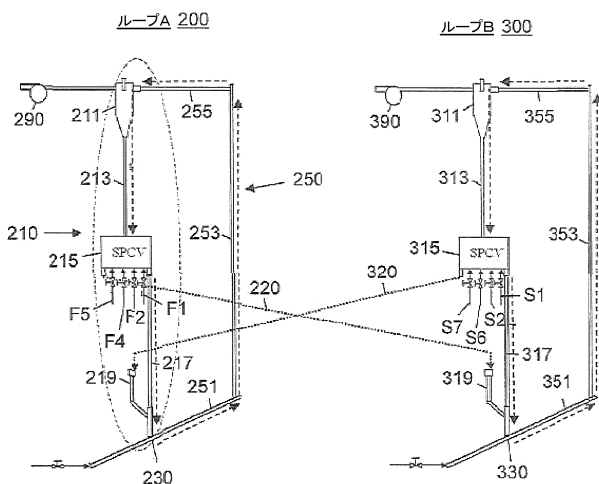
#### 【0130】

100 NMPC、200 ループA、300 ループB、220、320 クロスオーバーパイプ、219、319 インレットパイプ、213、313 ディップレグ、215、315 シールポット、217、317 リターンレグ、251、351 下方パイプライン、253、353 ライザ、255、355 上方パイプライン、211、311 サイクロン、500 燃料リアクターループ、511 A、511 B サイクロン、513 A、513 B ディップレグ、515 A、515 B シールポット、517 リターンレグ、523 燃料リアクタ、555 パイプ、600 空気リアクターループ、611 サイクロン、613 ディップレグ、615 A、615 B シールポット、620 クロスオーバーパイプ、653 空気リアクタ、655 パイプ、590、690 圧力制御装置

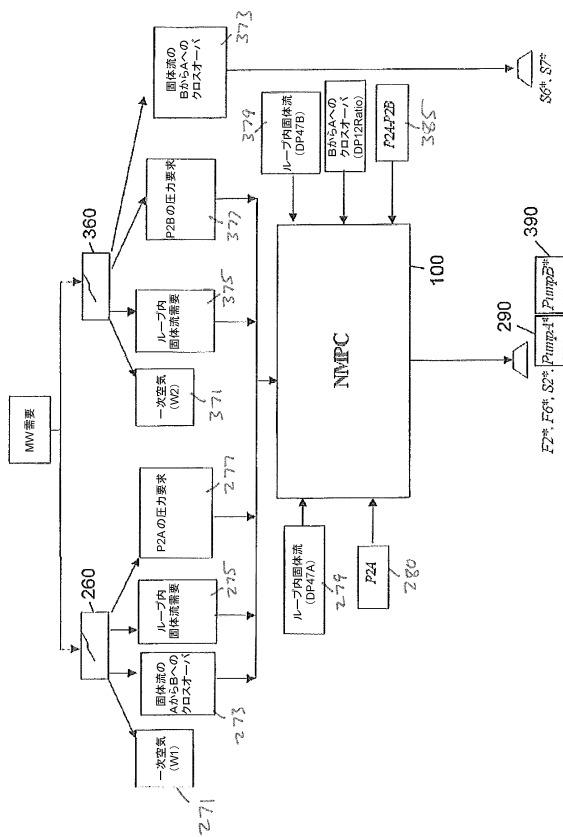
【図1】



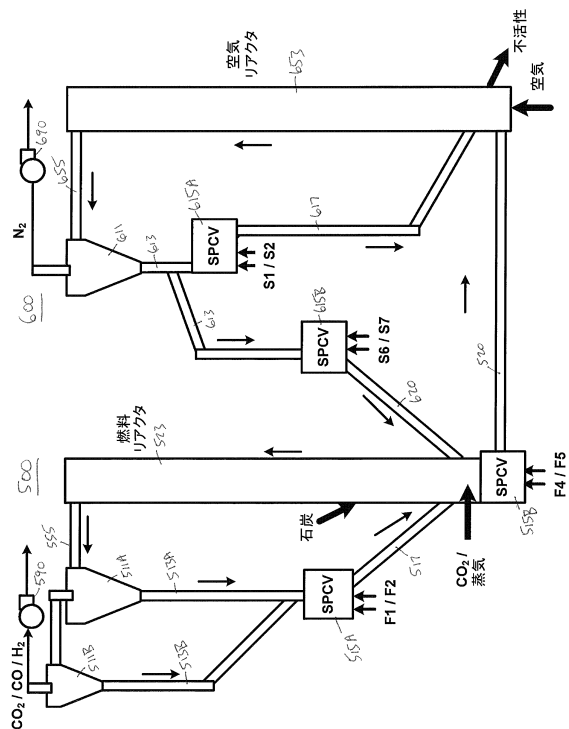
【図2】



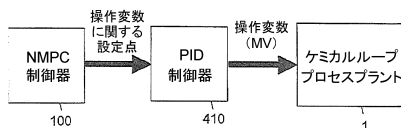
【図4】



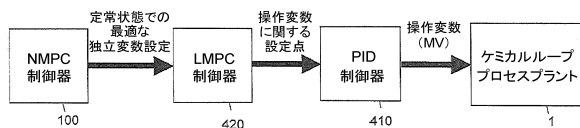
【図3】



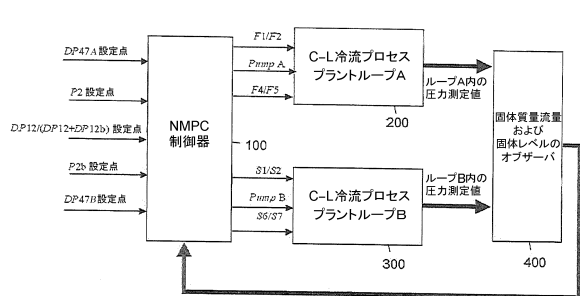
【図5】



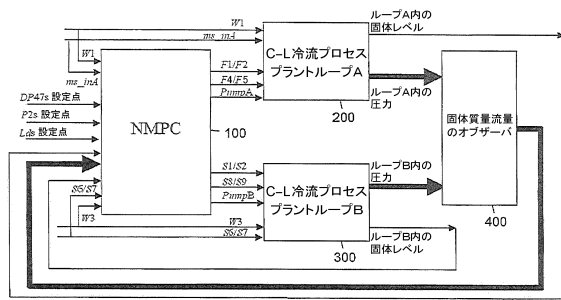
【図6】



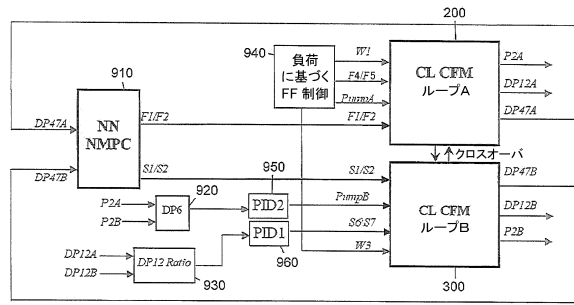
【図7】



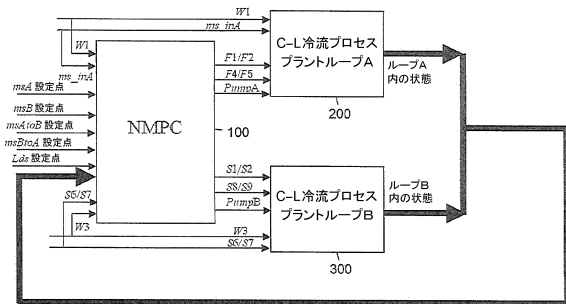
【図 8】



【図 10】



【図 9】



## フロントページの続き

(74)代理人 100129779

弁理士 黒川 俊久

(74)代理人 100113974

弁理士 田中 拓人

(72)発明者 アブヒナヤ ジョシ

アメリカ合衆国 コネチカット グラストンベリー ハンプシャー・ドライブ 176

(72)発明者 ハオ レイ

アメリカ合衆国 オハイオ メイソン マーブル・リッジ・レーン 4160

(72)発明者 シンシェン ロウ

アメリカ合衆国 コネチカット ウェスト・ハートフォード プロクター・ドライブ 25

## 合議体

審判長 平岩 正一

審判官 西村 泰英

審判官 刈間 宏信

(56)参考文献 特表2011-513861(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G05B 13/04