(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4622128号
(P4622128)

(45)発行日　平成23年2月2日(2011.2.2)　(24)登録日　平成22年11月12日(2010.11.12)

(51)Int.Cl.		F I		
F23L 15/02	(2006.01)	F23L	15/02	
G06F 17/12	(2006.01)	G06F	17/12	
G06F 17/13	(2006.01)	G06F	17/13	
G06Q 50/00	(2006.01)	G06F	17/60	100
C21D 1/52	(2006.01)	C21D	1/52	L

請求項の数 1　(全 17 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願2001-83316(P2001-83316)
(22)出願日　平成13年3月22日(2001.3.22)
(65)公開番号　特開2002-276930(P2002-276930A)
(43)公開日　平成14年9月25日(2002.9.25)
審査請求日　平成19年12月3日(2007.12.3)

前置審査

(73)特許権者　000002118
住友金属工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜４丁目５番３３号
(74)代理人　100081352
弁理士　広瀬　章一
(72)発明者　木村　義久
大阪府大阪市中央区北浜４丁目５番３３号
住友金属工業株式会社内
(72)発明者　高谷　幸司
大阪府大阪市中央区北浜４丁目５番３３号
住友金属工業株式会社内

審査官　中田　誠二郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】熱交換領域の温度推定方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
固体と固体とは異なる気体とが共存し、固体と前記気体とを接触させて熱交換を行う熱交換領域の温度を推定する方法であって、前記固体と前記気体とをそれぞれが含む複数の区画に前記熱交換領域を分割し、分割したそれぞれの区画における前記固体と前記気体との体積割合をそれぞれの区画での前記気体が通過する部分の体積の割合である空隙率に基づいて設定し、それぞれの区画における前記固体と前記気体のそれぞれの温度を固体と気体のそれぞれのエネルギ収支に基づいて、前記体積割合を含む下記式（ｉ）および（ｉｉ）に示されるエネルギ収支の式の２元連立方程式の解として、それぞれの区画毎に計算にて求め、前記熱交換領域の温度分布を推定することを特徴とする熱交換領域の温度推定方法。
【数１】

$$a_g T_g + b_g T_s = c_g \qquad (\mathrm{i})$$

$$a_s T_g + b_s T_s = c_s \qquad (\mathrm{ii})$$

ここで、

【数２】

$$\begin{cases} a_g = \dfrac{1}{\Delta t} + convg_0 - difg_0 + exg \\ b_g = -exg \\ c_g = \dfrac{T_g^{\,n}}{\Delta t} - convg_e + difg_e + Q'_h + Q'_r \end{cases} \qquad (iii)$$

$$\begin{cases} a_s = -exs \\ b_s = \dfrac{1}{\Delta t} - difs_0 + exs \\ c_s = \dfrac{T_s^{\,n}}{\Delta t} + difs_e \end{cases} \qquad (iv)$$

であり、上記式（ｉｉｉ）および（ｉｖ）における$convg_0$、$convg_e$、$difg_0$、$difg_e$、Qh'、Qr'、exg、$difs_0$、$difs_e$およびexsは、それぞれ下記のとおりである。

【数３】

$$convg_0 = \frac{1}{\varepsilon_B}\left(\frac{U}{\Delta x}+\frac{V}{\Delta y}+\frac{W}{\Delta z}\right)$$

$$convg_e = -\frac{1}{\varepsilon_B}\left(\frac{U}{\Delta x}T_{g,j-1}+\frac{V}{\Delta y}T_{g,k-1}+\frac{W}{\Delta z}T_{g,l-1}\right)$$

$$difg_0 = -\frac{2\lambda_{ge}}{\rho_g C_{pg}}\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)$$

$$difg_e = \frac{\lambda_{ge}}{\rho_g C_{pg}}\left(\frac{T_{g,j+1}+T_{g,j-1}}{\Delta x^2}+\frac{T_{g,k+1}+T_{g,k-1}}{\Delta y^2}+\frac{T_{g,l+1}+T_{g,l-1}}{\Delta z^2}\right)$$

$$Q'_h = \frac{\sum_i R_i(\Delta H_i)}{\rho_g C_{pg}\varepsilon_B}$$

$$Q'_r = \frac{Q_r}{\rho_g C_{pg}\varepsilon_B}$$

$$exg = \frac{a_p U_t}{\rho_g C_{pg}\varepsilon_B}$$

$$difs_0 = -\frac{2\lambda_{se}}{\rho_s C_{ps}}\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)$$

$$difs_e = \frac{\lambda_{se}}{\rho_s C_{ps}}\left(\frac{T_{s,j+1}+T_{s,j-1}}{\Delta x^2}+\frac{T_{s,k+1}+T_{s,k-1}}{\Delta y^2}+\frac{T_{s,l+1}+T_{s,l-1}}{\Delta z^2}\right)$$

$$exs = \frac{a_p U_t}{\rho_s C_{ps}(1-\varepsilon_B)}$$

なお、上記式におけるパラメータの定義は下記のとおりである。

ρ_g：ガス密度　[kg/m³]
ρ_s：煉瓦密度　[kg/m³]
ε_B：空隙率　[－]
R_i：成分ｉの生成速度　[kg/m³/s]
C_{pg}：ガス比熱　[kcal/kg/℃]　T_g：ガス温度　[℃]
C_{ps}：煉瓦比熱　[kcal/kg/℃]　T_s：煉瓦温度　[℃]
λ_g：ガス熱伝導率　[kcal/m/s/℃]　λ_s：煉瓦熱伝導率　[kcal/m/s/℃]
a_p：有効比表面積　[m²/m³]　Ut：総括熱伝達係数　[kcal/m²/s/℃]
ΔHi：成分ｉの反応熱[kcal/kg]　Qr：輻射熱　[kcal/m³/s]
U,V,W：x,y,z方向流速　[m/s]
（i=CO、CO_2、H_2、H_2O、CH_4、O_2、N_2）
ここで、添字e, tは有効、乱流を示す。

【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
本発明は、例えば、気体である第１の物質と固体である第２の物質とを接触させて熱交換を行う熱交換領域の温度推定方法に関する。
【０００２】
【従来の技術】
気体と固体とを接触させて熱交換を行う蓄熱体や蓄熱室などの熱交換領域を備える燃焼装

置に、リジェネバーナ、コークス炉、熱風炉などがある。これらの装置では、熱交換領域を通過する気体から固体に熱が移動し蓄熱する状態と、固体から気体へ熱が移動し気体を加熱する状態とがあり、これらの状態がある一定の時間間隔で切替わることで、外部への熱放出を低減し、熱効率を上げ、省エネルギを実現している。

【０００３】

図１は、リジェネバーナの模式図である。同図に示すように、リジェネバーナ１１は、内部にアルミナボールやセラミックハニカムなどの固体１２を充填した熱交換領域である蓄熱体１３を有し、蓄熱体１３の内部を燃料や空気などの気体が固体と接触して通過できるように構成される。

【０００４】

図２は、リジェネバーナ２１，２２を備えた加熱炉２３の概要図である。図２に示すように、リジェネバーナは２本１組で使用され、一方のリジェネバーナ２１が燃焼状態にあるとき、他方のリジェネバーナ２２が排気状態とされる。リジェネバーナ２１では、燃料２５と空気２６は蓄熱体を通過する際に蓄熱体内に充填されたアルミナボールやセラミックハニカムなどの固体と接触して高温に加熱された後、炉内へ噴射され混合燃焼する。リジェネバーナ２２では、炉内で発生した高温の燃焼ガス２４は蓄熱体を通過する際に固体と接触して温度が低下し、固体の温度は上昇する。通常、数１０秒から数分の短い時間間隔で燃焼と排気の切り替えが行われる。

【０００５】

図３は、コークス炉の構造の概要を示す模式図で、同図（ａ）は平面図、同図（ｂ）は同図（ａ）のＢ－Ｂ'断面図、同図（ｃ）は同図（ｂ）のＣ－Ｃ'断面図である。図３（ａ）～（ｃ）に示すように、コークス炉は燃焼室３１、炭化室３２および熱交換領域である蓄熱室３３から構成される。蓄熱室は内部にガスが通過する通路を有する煉瓦が充填されており、この蓄熱室３３を通って予熱された燃料ガスと空気は燃焼室３１内で混合燃焼し、その熱で石炭が乾留され、コークスが製造される。蓄熱室と燃焼室はそれぞれ２室で１組となり、燃焼側と排気側がある。燃焼側の燃焼室を通過した燃焼ガスは排気側の燃焼室に到達し、蓄熱室を通過し、その蓄熱室の煉瓦と熱交換した後、大気中へ排気される。通常、２０～３０分の時間間隔で、燃焼側と排気側との切り替えが行われる。

【０００６】

図４は、熱風炉の構造の概要を示す模式図で、同図（ａ）は燃焼時の状態、同図（ｂ）は送風時の状態である。図４（ａ）、（ｂ）に示すように、熱風炉は燃焼室４１と熱交換領域である蓄熱室４２とからなる。図４の熱風炉は燃焼室と蓄熱室とが分かれている外燃式であるが、蓄熱室内に燃焼室がある内燃式の熱風炉もある。熱風炉の操業は、図４（ａ）に示すように、燃焼室で燃料と空気を燃焼させて蓄熱室を予熱する燃焼時と、図４（ｂ）に示すように、予熱された蓄熱室に低温空気を通過させて、空気を１２００℃超の高温に予熱する送風時とに分かれる。

【０００７】

図５は、図４の蓄熱室を構成する煉瓦を模式的に示す概要図である。図５に示すように、蓄熱室内は、内部にガスが通過する複数の通路５２を有する煉瓦５１が充填される。燃焼室内で燃料と空気が混合燃焼して生じた高温の燃焼ガスは、煉瓦を通過しながら煉瓦と熱交換し、煉瓦の温度が上昇する。送風時には低温空気がこの煉瓦を通過し、燃焼時とは逆に煉瓦から空気へと熱が移動し、空気の温度が上昇する。このような作用をなす熱風炉が高炉１炉につき３～４基設置され、それぞれが６０分から１００分程度の時間間隔をおいて燃焼と送風を切替え、連続的に高炉へ１２００℃を超える高温空気を送風することが可能となる。

【０００８】

【発明が解決しようとする課題】

上述のように、リジェネバーナ、コークス炉および熱風炉などの燃焼装置では、気体と煉瓦やアルミナボールなどの固体とを接触させて熱交換を行い、燃焼ガスのエネルギを回収し、省エネルギを実現している。しかしながら、リジェネバーナの蓄熱体、コークス炉や

熱風炉の蓄熱室などのように、気体と固体とが共存して熱交換を行う熱交換領域の温度解析は困難であり、燃焼装置の操業やその設計は経験的に行われているのが実状である。そのため、種々の問題を抱えている。

【０００９】

例えば、リジェネバーナでは、蓄熱するアルミナボールなどの固体の大きさやその固体の材料を変更した場合、その都度、様々な条件で実験して、熱効率を最大とする最適な操業条件を見出すという作業が必要となる。また、リジェネバーナの製作に於いても、数多くの試行錯誤の設計と試作ならびに試験を必要とし、多くの時間と莫大な費用がかかるという問題を抱えている。

【００１０】

コークス炉は、設備規模が大きく、一度建設してしまうと、再度設計変更して、建設するのは不可能であるため、最適な設計を行うことが重要となる。しかしながら、コークス炉の熱交換領域である蓄熱室は複雑な構造を有するため、その設計は半経験的に行われている。そのため、熱効率の観点からは必ずしも最適な設計とは云えないときがあり、例えば、乾留不足などにより乾留時間の延長が必要となるという問題がある。また、蓄熱室は高温の排ガスが通過する部分と予熱される前の常温の燃料や空気が通過する部分が煉瓦壁を隔てて、隣接して設計されることが多い。そのため、熱膨張差により、煉瓦壁内部に亀裂などが生じ、乾留不良などの問題が発生する恐れがある。

【００１１】

また、熱風炉では、蓄熱室の煉瓦に耐火度、熱間容積安定性および経済性の観点から珪石煉瓦が多く使用されている。珪石煉瓦は６００℃以下で、容積変化が著しいため、特に１４００℃超の高温となる熱風炉上部に設けた珪石煉瓦の温度が６００℃以下とならないように操業する事が重要となるが、操業条件の決定は、操業者の経験や勘に基づいて行われている。

【００１２】

そのため、煉瓦積み替えなどにより操業条件を大きく変化させる必要が生じた場合、珪石煉瓦温度が大きく低下し、珪石煉瓦の崩壊等の問題が発生することがある。また、高炉休止時での大気運転時には、通常の高温送風から必要最小限の燃料投入しか行わないので、蓄熱室上部の珪石温度が低下し、クリープによる煉瓦崩壊などが多く発生し、最悪の場合には操業を停止して、煉瓦積み替えなどの大がかりな補修等を余儀なくされる。

【００１３】

ところで、気体と固体とを接触させて熱交換を行う熱交換領域の温度推定を困難にしてきたのはアルミナボールなどの固体が充填された状態やコークス炉や熱風炉の煉瓦の様に、気体の通過する部分と熱が蓄積される部分とが複雑な構造をもつことと、気体の流れ、気体温度およびアルミナボールや煉瓦などの固体の温度を同時に、しかも非定常に予測しなければならず、これらのモデリング手法や数値計算手法が確立されていなかったことが大きな原因である。

【００１４】

本発明の課題は、上記従来の問題に鑑み、例えば、気体と固体との間の熱移動現象を伴う熱交換領域において、これまで不可能であった熱交換領域の温度分布の推定を可能とする熱交換領域の温度推定方法を提供することにある。

【００１５】

【課題を解決するための手段】

本発明は、固体と固体とは異なる気体とが共存し、固体と前記気体とを接触させて熱交換を行う熱交換領域の温度を推定する方法であって、前記固体と前記気体とをそれぞれが含む複数の区画に前記熱交換領域を分割し、分割したそれぞれの区画における前記固体と前記気体との体積割合をそれぞれの区画での前記気体が通過する部分の体積の割合である空隙率に基づいて設定し、それぞれの区画における前記固体と前記気体のそれぞれの温度を固体と気体のそれぞれのエネルギ収支に基づいて、前記体積割合を含む下記式（ｉ）および（ｉｉ）に示されるエネルギ収支の式の２元連立方程式の解として、それぞれの区画

毎に計算にて求め、前記熱交換領域の温度分布を推定することを特徴とする熱交換領域の温度推定方法、である。

【数４】

$$a_g T_g + b_g T_s = c_g \qquad (\mathrm{i})$$

$$a_s T_g + b_s T_s = c_s \qquad (\mathrm{ii})$$

ここで、

【数５】

$$\begin{cases} a_g = \dfrac{1}{\Delta t} + convg_0 - difg_0 + exg \\ b_g = -exg \\ c_g = \dfrac{T_g^{\,n}}{\Delta t} - convg_e + difg_e + Q'_h + Q'_r \end{cases} \qquad (\mathrm{iii})$$

$$\begin{cases} a_s = -exs \\ b_s = \dfrac{1}{\Delta t} - difs_0 + exs \\ c_s = \dfrac{T_s^{\,n}}{\Delta t} + difs_e \end{cases} \qquad (\mathrm{iv})$$

であり、上記式（ｉｉｉ）および（ｉｖ）における$convg_0$、$convg_e$、$difg_0$、$difg_e$、Q_h'、Q_r'、exg、$difs_0$、$difs_e$およびexsは、それぞれ下記のとおりである。

【数６】

$$convg_0 = \frac{1}{\varepsilon_B}\left(\frac{U}{\Delta x}+\frac{V}{\Delta y}+\frac{W}{\Delta z}\right)$$

$$convg_e = -\frac{1}{\varepsilon_B}\left(\frac{U}{\Delta x}T_{g,j-1}+\frac{V}{\Delta y}T_{g,k-1}+\frac{W}{\Delta z}T_{g,l-1}\right)$$

$$difg_0 = -\frac{2\lambda_{ge}}{\rho_g C_{pg}}\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)$$

$$difg_e = \frac{\lambda_{ge}}{\rho_g C_{pg}}\left(\frac{T_{g,j+1}+T_{g,j-1}}{\Delta x^2}+\frac{T_{g,k+1}+T_{g,k-1}}{\Delta y^2}+\frac{T_{g,l+1}+T_{g,l-1}}{\Delta z^2}\right)$$

$$Q'_h = \frac{\sum_i R_i(\Delta H_i)}{\rho_g C_{pg}\varepsilon_B}$$

$$Q'_r = \frac{Q_r}{\rho_g C_{pg}\varepsilon_B}$$

$$exg = \frac{a_p U_t}{\rho_g C_{pg}\varepsilon_B}$$

$$difs_0 = -\frac{2\lambda_{se}}{\rho_s C_{ps}}\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)$$

$$difs_e = \frac{\lambda_{se}}{\rho_s C_{ps}}\left(\frac{T_{s,j+1}+T_{s,j-1}}{\Delta x^2}+\frac{T_{s,k+1}+T_{s,k-1}}{\Delta y^2}+\frac{T_{s,l+1}+T_{s,l-1}}{\Delta z^2}\right)$$

$$exs = \frac{a_p U_t}{\rho_s C_{ps}(1-\varepsilon_B)}$$

なお、上記式におけるパラメータの定義は、後述する表１のとおりである。

【００１７】

【発明の実施の形態】

次に、本発明の実施の形態をフローチャートで説明する。なお、以下の説明では、第１の物質が気体（以下、ガスともいう）で、第２の物質が固体、具体的には煉瓦である場合を例にとるが、これに限定されるものではない。第２の物質が煉瓦以外の固体にも適用できる。また、第１の物質が液体で、第２の物質が固体である場合にも同様に適用できる。また、以下の説明では、熱交換領域が、蓄熱室である場合を例にとるが、これに限定されるものではない。第１の物質と第１の物質とは異なる第２に物質とが共存し、第１の物質と第２の物質とを接触させて熱交換を行う領域とすることができる。例えば、リジェネバーナの蓄熱体とすることができる。表１に以降の説明に用いる記号を示す。

【００１８】

【表１】

ρ_g：ガス密度	[kg/m³]	$\vec{U}$：流速	[m/s]
ρ_s：煉瓦密度	[kg/m³]	ω_i：成分ｉの重量分率	[－]
F：抵抗係数	[1/s]	D：ギッター煉瓦口径	[m]
ε_B：空隙率	[－]	A：代表長さ	[m]
D_e：有効拡散係数	[m²/s]	R_i：成分ｉの生成速度	[kg/m³/s]
p：圧力	[Pa]	μ：粘性係数	[kg/m/s]
ρ_0：基準密度	[kg/m³]	$\vec{g}$：重力加速度	[m/s²]
C_{pg}：ガス比熱	[kcal/kg/℃]	T_g：ガス温度	[℃]
C_{ps}：煉瓦比熱	[kcal/kg/℃]	T_s：煉瓦温度	[℃]
λ_g：ガス熱伝導率	[kcal/m/s/℃]	λ_s：煉瓦熱伝導率	[kcal/m/s/℃]
a_p：有効比表面積	[m²/m³]	Ut：総括熱伝達係数	[kcal/m²/s/℃]
ΔHi：成分ｉの反応熱[kcal/kg]			
k：乱流ｴﾈﾙｷﾞｰ	[m²/s²]	ε：乱流ｴﾈﾙｷﾞｰの消散率	[m²/s³]
ν：動粘性係数	[m²/s]	U,V,W：x,y,z 方向流速	[m/s]
R：気体定数		Le：ルイス数(= $\lambda/\rho CpD$)	
Qr：輻射熱	[kcal/m³/s]		

(i=CO、CO_2、H_2、H_2O、CH_4、O_2、N_2)

ここで、添字 e, t は有効、乱流を示す。

【００１９】

図６は、本発明の温度推定方法の一実施の形態を示すフローチャートである。

本実施形態の温度推定方法は、蓄熱室をガスと煉瓦とをそれぞれが含む複数の区画に分割し（ステップＳ１）、境界条件を設定する（ステップＳ２）。次いで、それぞれの区画に対して、所定の時間刻みで（ステップＳ３）で、ガス流れ場の計算（ステップＳ６）、化学種の計算（ステップＳ７）および温度の計算（ステップＳ８）を繰り返し行い、切替時間になったら（ステップＳ４）、境界条件を変更し（ステップＳ５）、ステップＳ６～ステップＳ８の計算を繰り返し行うことにより、それぞれの区画におけるガスと煉瓦のそれぞれの温度が求まり、蓄熱室の温度分布が推定される（ステップＳ９）。次に、ステップ１、ステップ６～８を詳述する。

【００２０】

区画分割（ステップＳ１）：図７は、蓄熱室の一部を複数の区画に分割した場合の例を示す斜視図である。符号７１は蓄熱室、７２は区画を示す。図７に示すように、蓄熱室７１を複数の区画７２に分割する。前述したように蓄熱室は、内部をガスが通過する複数の通路を備えた煉瓦で構成されており、それぞれの区画が通路と煉瓦を含むように、すなわちガスと煉瓦（以下、固体とも云う）とを含むように分割される。複数の区画に蓄熱室を分割する仕方は特に限定されるものではない。例えば、それぞれの区画内に数十～数百の通路を有するように分割される。なお、それぞれの区画におけるガスと固体の体積割合は、それぞれの区画の空隙率（区画に占める通路体積の割合）に基づいてそれぞれの区画毎に設定される。

【００２１】

ガス流れ場の計算（ステップＳ６）：非定常、圧縮性を考慮したガスの物質収支を示す式（１）、ガスの運動量の収支を示す式（２）、ガスの乱流エネルギの収支を示す式（３－１）、乱流エネルギの消散率の収支を示す式（３－２）およびガスの状態方程式（４）からそれぞれの区画におけるガスの速度を求める。なお、式（３－１）、式（３－２）は、

乱流モデルとして、標準的なｋ－εモデルを用いている。

【００２２】

【数１】

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{U}) = 0 \qquad (1)$$

【００２３】

【数２】

$$\frac{\partial \rho_g \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{U}\vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_e \nabla \vec{U}) + F\left|\rho_g \vec{U}\right|\rho_g \vec{U} + (\rho_g - \rho_0)\vec{g} \qquad (2)$$

ここで、 $F = \frac{2f}{D\rho_g}\frac{1}{\varepsilon_B{}^2}$

【００２４】

【数３】

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k\vec{U}) = \nabla \cdot (\frac{\nu_e}{\sigma_1}\nabla k) + P_k - \varepsilon \qquad (3\text{-}1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\vec{U}) = \nabla \cdot (\frac{\nu_e}{\sigma_2}\nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k}(C_1 P_k - C_2 \varepsilon) \qquad (3\text{-}2)$$

但し、

$$P_k = \nu_e\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z}\right)^2\right]$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \nu_e = \nu + \nu_t$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_1 = 1.0, \quad \sigma_2 = 1.3$$

【００２５】

【数４】

$$p = \rho_g R T_g \qquad (4)$$

【００２６】

化学種の計算（ステップＳ７）：ガスの流れ場の計算（ステップＳ６）で得られたガスの速度と、化学種の収支を示す式（５）とから、それぞれの区画ごとにガスの各成分の反応量とガスの組成を求める。なお、この化学種の計算は、燃料と空気が反応する燃焼反応を取り扱える。

【００２７】

【数５】

$$\frac{\partial \rho_g \omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \omega_i \vec{U}) = \nabla \cdot (\rho_g D_e \nabla \omega_i) + R_i \qquad (5)$$

【００２８】
温度の計算（ステップＳ８）：化学種の計算にて得られたガスの各成分の反応量とエネルギ収支を示す式（６－１）、式（７－１）とからそれぞれの区画毎にガス温度と煉瓦温度とを求める。なお、式（６－１）はガスのエネルギ収支を、式（７－１）は煉瓦のエネルギ収支を表す。
【００２９】
【数６】

$$\varepsilon_B \frac{\partial \rho_g C_{pg} T_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g C_{pg} T_g \vec{U}) = \nabla \cdot (\varepsilon_B \lambda_{ge} \nabla T_g) + \sum_i R_i (\Delta H_i) + Q_r + a_p U_t (T_s - T_g) \qquad (6\text{-}1)$$

$$(1-\varepsilon_B) \frac{\partial \rho_s C_{ps} T_s}{\partial t} = \nabla \cdot ((1-\varepsilon_B) \lambda_{se} \nabla T_s) - a_p U_t (T_s - T_g) \qquad (7\text{-}1)$$

【００３０】
上記ガス流れ場の計算～温度の計算を所定の時間刻みで繰り返し行い、切替時間になったら、境界条件が切り替わり、上記と同様な計算を行うことにより、それぞれの区画毎にガス温度と煉瓦温度が演算され、蓄熱室の温度分布が予測できる。
【００３１】
次に、上記温度の計算を詳述する。
蓄熱室は前述したように煉瓦を規則正しく積み上げることで構成されている。この煉瓦は、例えば、図５に示すように、燃焼ガスや空気が通過するための断面が円形状あるいは多角形状の複数個の通路５２を備える。
【００３２】
一般的に、固体である煉瓦と燃焼ガスまたは空気との熱交換を数値計算で解析する場合、煉瓦である固体部分とガスが通過する部分とをそれぞれ有限幅の区画に分割し、ガスが通過する部分でのガス流れと伝熱を計算し、それと同時に固体部分での伝熱を計算する手法が考えられる。しかし、蓄熱室内は複数の通路を有する多数の煉瓦により築炉されており、この手法では、区画数が膨大となり、有意な時間で、蓄熱室内の非定常の温度を求めることは不可能である。
【００３３】
そこで、本発明では、蓄熱室内のガス流れを詳細に解くのではなく、マクロ的に取り扱う。つまり、前述したように、蓄熱室をそれぞれの区画が通路と煉瓦を含むように、すなわちガスと煉瓦（固体）とを含むように分割し、ガスと固体との体積割合をそれぞれの区画での空隙率に基づいて設定する。
【００３４】
それぞれの区画において、ガスと固体に関するエネルギ収支の式がそれぞれ前記式（６－１）と式（７－１）に相当する。
次に、式（６－１）、式（７－１）の解き方について述べる。式（６－１）と式（７－１）を差分化し、一の区画のガス温度ならびに煉瓦温度と、その区画の周囲の区画におけるガス温度と煉瓦温度とを分離すると、式（６－２）、式（７－２）が誘導される。なお、T_g^nとT_s^nは、それぞれΔｔ時間前のガス温度と煉瓦温度を表す。
【００３５】
【数７】

$$\frac{T_g - T_g^n}{\Delta t} + convg_0 T_g + convg_e = difg_0 T_g + difg_e + Q'_h + Q'_r + exg(T_s - T_g) \quad (6\text{-}2)$$

$$\frac{T_s - T_s^n}{\Delta t} = difs_0 T_s + difs_e - exs(T_s - T_g) \quad (7\text{-}2)$$

【００３６】
ここで、$convg_0$と$convg_e$は、式（６－１）中の対流項（左辺第２項目）に係る係数で、$difg_0$、$difg_e$は、式（６－１）中の熱伝導項（右辺第１項目）に係る係数である。$difs_0$と$difs_e$は、式（７－１）中の熱伝導項（右辺第１項目）に係る係数である。また、Qh'、Qr'は、それぞれ式（６－１）を変形した後の発熱項と輻射項を示す係数、exgおよびexsは熱交換項を示す係数である。
【００３７】
ここで、式（６－２）と式（７－２）をT_gとT_sで整理すると式（６－３）と式（７－３）が導かれる。
【００３８】
【数８】

$$a_g T_g + b_g T_s = c_g \quad (6\text{-}3)$$

$$a_s T_g + b_s T_s = c_s \quad (7\text{-}3)$$

【００３９】
したがって、T_gとT_sについての２元連立方程式の式（６－３）、式（７－３）を解くことによりガス温度と煉瓦温度が求まる。上記式（６－３）と式（７－３）から求める方法を第１の方法という。
【００４０】
また、第１の方法の代わりに、以下に示す第２の方法で求めても良い。すなわち、式（６－２）のT_sと式（７－２）のT_gをそれぞれT_s^nとT_g^nと仮定すると、式（６－４）、式（７－４）が導かれる。ガス温度は式（６－４）から、また、煉瓦温度は式（７－４）から演算される。
【００４１】
【数７】

$$T_g = \frac{c_g - b_g T_s^n}{a_g} \quad (6-4)$$

$$T_s = \frac{c_s - a_s T_g^n}{b_s} \quad (7-4)$$

【００４２】
なお、式（６－３）、式（７－３）、式（６－４）、式（７－４）中のa_g、b_g、c_g、a_s、b_s、c_sは下記の式（６－５）、式（７－５）で示される。
【００４３】
【数１０】

ここで、

$$\begin{cases} a_g = \dfrac{1}{\Delta t} + convg_0 - difg_0 + exg \\ b_g = -exg \\ c_g = \dfrac{T_g^n}{\Delta t} - convg_e + difg_e + Q'_h + Q'_r \end{cases} \quad (6\text{-}5)$$

$$\begin{cases} a_s = -exs \\ b_s = \dfrac{1}{\Delta t} - difs_0 + exs \\ c_s = \dfrac{T_s^n}{\Delta t} + difs_e \end{cases} \quad (7\text{-}5)$$

【００４４】

以上のように、ガス温度と煉瓦温度を求める方法には上述した２つの方法が考えられるが、現実的には第１の方法である式（６－３）と式（７－３）を連立して解く方が計算での時間刻みを大きくとることが可能となり、遙かに計算負荷を低減できる。したがって、第１の方法が望ましい。

【００４５】

本発明の方法により、これまで不可能であった熱交換領域の温度分布を予測することが可能となり、熱交換領域を備える燃焼装置の操業方法の最適化や設計の最適化が可能となる。

【００４６】

図８は、構造解析のフローチャートの一例である。図８に示すように、前述したステップＳ１～ステップＳ９からなる熱流動解析で得られた温度を入力条件として、熱交換領域を複数の構造解析用区画に分割し（ステップＳ１０）、構造解析（ステップＳ１１）を実施することで、熱交換領域の各部に発生する熱応力を推定（ステップ１２）することが可能となる。したがって、例えば、コークス炉や熱風炉などの蓄熱室の熱応力の観点からの検討も可能になる。

【００４７】

【実施例】

熱交換領域を備える燃焼装置として熱風炉を例に、本発明の効果を説明する。

高さ４７ｍの熱風炉を対象に表２に示す操業条件に基づき、前述した第１の方法と第２の方法について、計算の時間刻みを種々変更して３次元非定常解析を行った。また、計算精度を検証するために、実際の熱風炉の炉高方向に熱電対を挿入し、複数の高さレベルにおいて、蓄熱室の煉瓦温度を計測した。

【００４８】

【表２】

	時間 (min)	入/出	種類	流量 (Nm^3/hr)	温度 (℃)	圧力 (MPa)	位置
燃焼	98	入	燃料ガス	54717	22	－	b5
			空気	75705	226	－	b4
		出	－	－	－	0.0006	b2
送風	59	入	空気	236760	179	－	b1
		出	－	－	－	0.29	b3

（注）位置（ｂ１～ｂ５）：図４参照

圧力：ゲージ圧力

【００４９】

第１と第２のそれぞれの方法において、時間刻みを変更した際の解の信頼性と計算時間比を表３に示す。なお、解の信頼性は、計算が発散しないで解が得られる場合を○印で、計算が発散し、解が得られない場合を×印で示す。また、計算時間比は、第１の方法で時間刻みを０．０５ｓとして計算した場合の計算時間を１００とした相対値である。

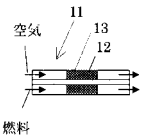
【００５０】
【表３】

区分	時間刻み(s)	解の信頼性	計算時間比(-)
第１の方法	0.05	○	100
	0.1	○	63
	1	○	37
	10	○	12
	50	○	5
第２の方法	0.05	○	100
	0.1	○	63
	1	×	-
	10	×	-
	50	×	-

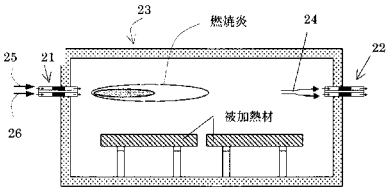
【００５１】
表３に示すように、第２の方法では計算の時間刻みが０．１ｓなら解が得られるが、０．２ｓとなると計算が発散してしまい解が得られなかった。第１の方法では、時間刻みは５０ｓとしても安定に計算を進行することができ、最終的な解が得られた。また計算効率からは時間刻みを５０ｓとした条件で最も短い時間で計算を終了することが可能となった。
【００５２】
図９は、蓄熱室内の煉瓦温度の時間変化の実測と計算の結果を比較して示すグラフである。なお、実測と計算における煉瓦の位置は、図４に示す●印の各点(煉瓦下端からの距離：０．５、１０、１５、２６m)である。
【００５３】
図１０は、蓄熱室の炉高方向での煉瓦温度とガス温度との実測と計算の結果を比較して示すグラフである。図中、実線と破線はそれぞれ固体温度（煉瓦温度）とガス温度の計算結果で、□印は、図４に示す●印の各点（煉瓦下端からの距離：０．５、１０、１５、２６m、および煉瓦上端）の測定結果である。なお、図９と図１０における計算値は、第１の方法で、時間刻みを５０ｓとした場合である。
【００５４】
図９と図１０に示すように、計算と実測はよく対応がとれ、解析モデルの計算精度が高いことが確認できた。さらに各部の温度を推定することが可能となり、これによって、例えば、操業中の蓄熱室上部の珪石温度や下部の金物温度を事前に予測することが可能となり、炉寿命の延長が可能となる。また、事前に炉内温度を推定することが可能となり、耐火煉瓦を品質や耐久度に応じて、適所に配置することができ、炉の最適設計が可能となる。
【００５５】
【発明の効果】
本発明によれば、第１の物質と第１の物質とは異なる第２の物質とを接触させて熱交換を行う熱交換領域、例えば、リジェネバーナの蓄熱体あるいはコークス炉や熱風炉の蓄熱室の温度分布の推定が可能となり、これまで試行錯誤的に行われてきた操業の最適化や設計の最適化が可能となる。
【図面の簡単な説明】
【図１】リジェネバーナの模式図である。
【図２】リジェネバーナを備えた加熱炉の概要図である。
【図３】コークス炉の構造の概要を示す模式図で、同図（ａ）は平面図、同図（ｂ）は同図（ａ）のＢ－Ｂ' 断面図、同図（ｃ）は同図（ｂ）のＣ－Ｃ' 断面図である。
【図４】熱風炉の構造の概要を示す模式図で、同図（ａ）は燃焼時の状態、同図（ｂ）は送風時の状態である。

【図５】図４の蓄熱室を構成する煉瓦を模式的に示す概要図である。
【図６】本発明の温度推定方法の一実施の形態を示すフローチャートである。
【図７】蓄熱室の一部を複数の区画に分割した場合の例を示す斜視図である。
【図８】構造解析のフローチャートの一例である。
【図９】蓄熱室内の煉瓦温度の時間変化の実測と計算の結果を比較して示すグラフである。
【図１０】蓄熱室の炉高方向での煉瓦温度とガス温度の実測と計算との結果を比較して示すグラフである。
【符号の説明】
１１、２１、２２：リジェネバーナ、
１２：固体、１３：蓄熱体、
２３：加熱炉、２４：燃焼ガス、
２５：燃料、２６：空気、
３１、４１：燃焼室、３２：炭化室、
３３、４２、７１：蓄熱室、５１：煉瓦、
５２：通路、７２：区画。

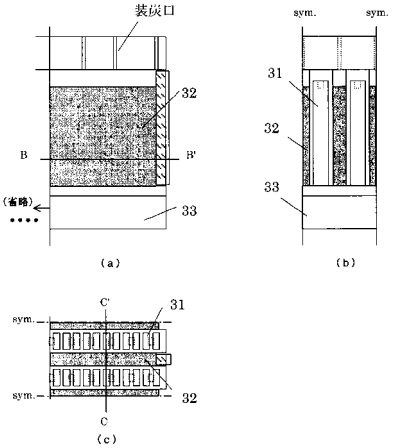
【図１】



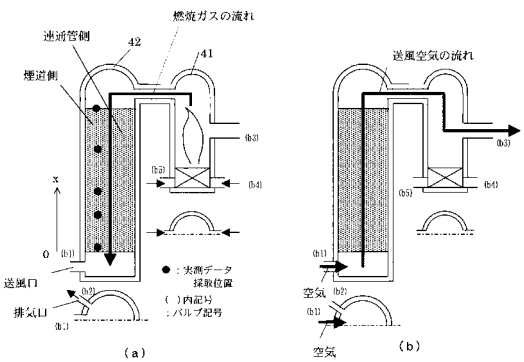
【図２】



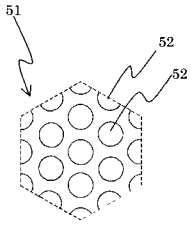
【図３】



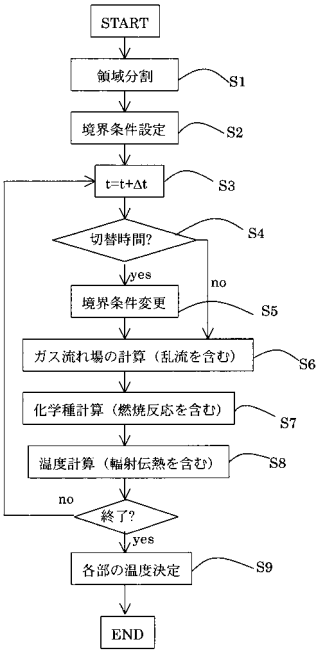
【図４】



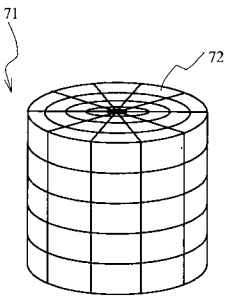
【図５】


51
52
52

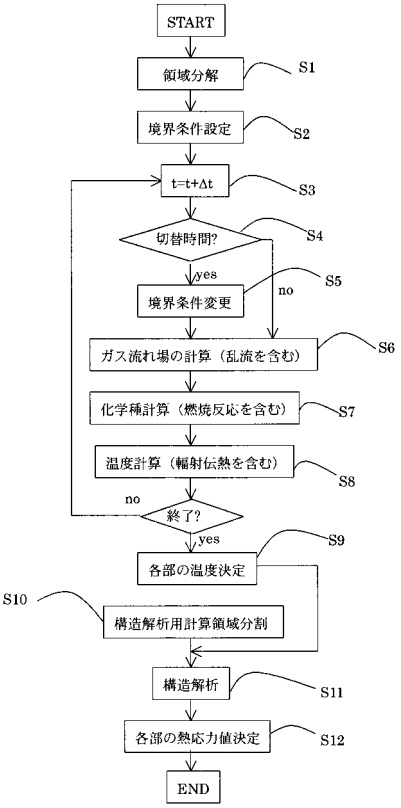
【図６】


START
領域分割
S1
境界条件設定
S2
t=t+Δt
S3
切替時間?
S4
yes
no
境界条件変更
S5
ガス流れ場の計算（乱流を含む）
S6
化学種計算（燃焼反応を含む）
S7
温度計算（輻射伝熱を含む）
S8
no
終了?
yes
各部の温度決定
S9
END

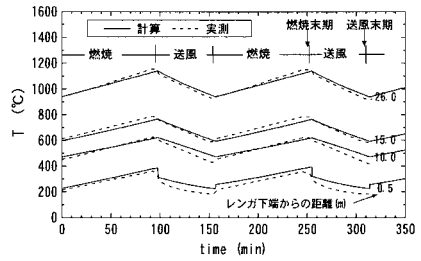
【図７】


71
72

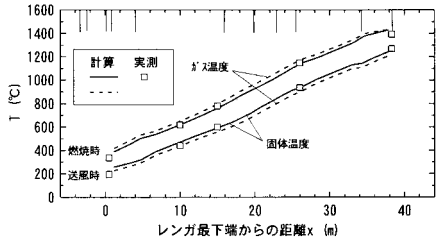
【図８】


START
領域分解
S1
境界条件設定
S2
t=t+Δt
S3
切替時間?
S4
yes
no
境界条件変更
S5
ガス流れ場の計算（乱流を含む）
S6
化学種計算（燃焼反応を含む）
S7
温度計算（輻射伝熱を含む）
S8
no
終了?
yes
各部の温度決定
S9
S10
構造解析用計算領域分割
構造解析
S11
各部の熱応力値決定
S12
END

【図９】


計算
実測
燃焼末期
送風末期
燃焼
送風
燃焼
送風
T (℃)
time (min)
26.0
15.0
10.0
0.5
レンガ下端からの距離(m)

【図１０】


計算
実測
ｶﾞｽ温度
固体温度
燃焼時
送風時
T (℃)
レンガ最下端からの距離x (m)

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
F27D 17/00 (2006.01) F27D 17/00 101A

(56)参考文献 特開平11－035945（JP，A）
特開昭64－074580（JP，A）
特開昭62－077413（JP，A）

(58)調査した分野(Int.Cl.，DB名)
F23L 15/02
C10B 29/02