

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-54109

(P2010-54109A)

(43) 公開日 平成22年3月11日(2010.3.11)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
F 2 7 B 9/40 (2006.01)	F 2 7 B 9/40	4 K 0 5 0
F 2 7 B 9/20 (2006.01)	F 2 7 B 9/20	4 K 0 5 6
F 2 7 B 9/02 (2006.01)	F 2 7 B 9/02	5 F 0 5 1
F 2 7 D 19/00 (2006.01)	F 2 7 D 19/00 A	5 F 1 5 1
H 0 1 L 31/04 (2006.01)	H 0 1 L 31/04 H	
審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 14 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2008-218995 (P2008-218995)
 (22) 出願日 平成20年8月28日 (2008. 8. 28)

(71) 出願人 000004064
 日本碍子株式会社
 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号
 (74) 代理人 100078101
 弁理士 綿貫 達雄
 (74) 代理人 100085523
 弁理士 山本 文夫
 (74) 代理人 100154461
 弁理士 関根 由布
 (72) 発明者 青木 道郎
 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号
 日本碍子株式会社内
 (72) 発明者 近藤 良夫
 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号
 エヌジーケイ・キルンテック株式会社内
 最終頁に続く

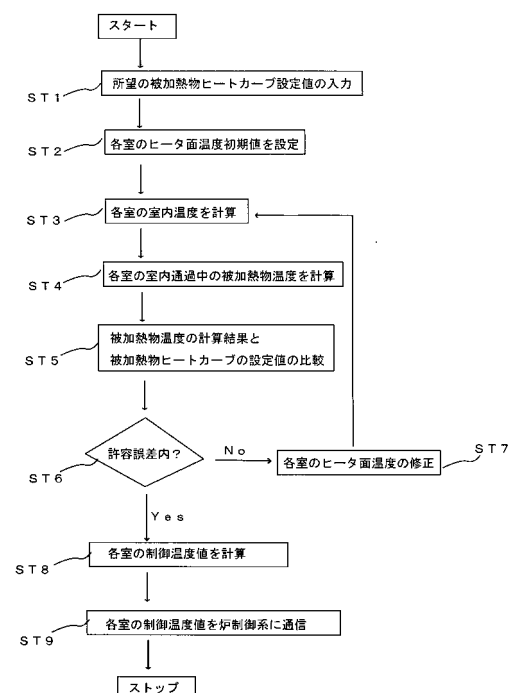
(54) 【発明の名称】 加熱室内温度決定方法および加熱室内温度最適化方法

(57) 【要約】

【課題】 現在または過去の加熱処理データの蓄積によらず、かつ、所望のヒートカーブを入力後、短時間で当該ヒートカーブを実現するための加熱室内温度を決定することが可能な技術を提供すること。

【解決手段】 各加熱室のヒータ面温度を暫定的に設定する工程と、暫定的に設定された各加熱室のヒータ面温度に基づいて加熱室内温度を決定する工程と、前記加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程と、前記の計算により得られた被加熱物ヒートカーブと、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブとの誤差を判断し、誤差が許容範囲に入るまで、暫定的に設定された各室ヒータ面温度を変化させながら、前2工程を繰り返し、誤差が許容範囲となったとき当該ヒートカーブ計算の引数として用いた加熱室内温度を最適加熱室内温度として採用する工程を有する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

搬送方向に区画された複数の加熱室内を順次移動しながら加熱される被加熱物が、所望のヒートカーブにより加熱されるように各加熱室の温度状態を自動調整するための、加熱室内温度決定方法であって、

予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブを実現しうる各加熱室内温度を計算するために、その初期条件として各加熱室のヒータ面温度を暫定的に設定する工程と、

暫定的に設定された各加熱室のヒータ面温度に基づいて、各加熱室のヒータ面以外の壁温度と室内流体温度とを計算し、前記の各加熱室のヒータ面温度とヒータ面以外の壁温度と室内流体温度とにより規定される加熱室内温度を決定する工程と、

前記加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程と、

前記の計算により得られた被加熱物ヒートカーブと、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブとの誤差を判断し、誤差が許容範囲に入るまで、暫定的に設定された各室ヒータ面温度を変化させながら、前記、計算を行う 2 工程を繰り返し、誤差が許容範囲となったとき、当該ヒートカーブ計算の引数として用いた加熱室内温度を最適加熱室内温度として採用する工程と、

を有することを特徴とする加熱室内温度決定方法。

【請求項 2】

暫定的に設定された各加熱室ヒータ面温度に基づいて各加熱室内温度を計算する工程は、

各加熱室を各々閉空間とみなし、空間分割法に基づく輻射熱解析を用いて各々の閉空間における熱収支を計算する際に、

(a) 流体の流れを閉空間の連結方向の 1 次元に限定した上で、閉空間内部での流体の供給・排出を考慮し、かつ、温度による流体の密度変化を考慮した流体温度に関するエネルギーの保存の式と、

(b) 各閉空間を構成する壁面を分割して分割面とし、分割面内温度一定と仮定した上で、各分割面厚み方向の壁温度に関する熱伝導方程式と、

(c) 各加熱室内壁面の射度に関する行列による代数方程式

を連立して解くことを特徴とする請求項 1 記載の加熱室内温度決定方法。

【請求項 3】

加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程は、

被加熱物形状を平板状に限定し、熱吸収は全て被加熱物の表面からの熱流入によるものとみなし、熱伝導解析により被加熱物の温度分布を計算する際に、

(a) 被加熱物内部での熱移動を表わす基礎方程式と、

(b) 輻射と対流の効果を加味する境界条件式

を解くことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の加熱室内温度決定方法。

【請求項 4】

請求項 1～3 の何れかに記載の加熱室内温度決定方法で最適加熱室内温度として採用された加熱室内温度に基づいて各加熱室制御温度設定値を計算する工程と、計算により得られた各加熱室制御温度設定値を各加熱室ヒータ制御系に通信する工程と、を有することを特徴とする加熱室内温度最適化方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、太陽電池基板等の被加熱物を熱処理するのに好適な、加熱室内温度決定方法および加熱室内温度最適化方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

太陽電池基板の製造においては、シリコンからなる基材の表面及び裏面に導電性の電極

10

20

30

40

50

材料をペースト状にして所定のパターンで印刷形成した後、熱処理炉内を連続的又は間欠的に移動させながら熱処理（乾燥、焼成等）する工程がある。当該太陽電池基板の熱処理においては、最高温度は800～900℃という高温が要求され、また、極めて短時間の内に基板温度を上昇・下降させる等、任意性に富んだ被加熱物ヒートカーブの実現が要求される。特に近年、太陽電池基板の熱処理に適用される被加熱物ヒートカーブによって、太陽電池の効率が数%～20%程度の幅で大きく変動することが報告されており、加熱炉の精密な温度制御が求められている。

【0003】

本願出願人は、任意性に富んだヒートカーブを実現可能とする技術として、加熱室の本体内部を進行方向に多室に分割し、かつ、搬送手段としてビームを採用することにより、各室の温度独立性を高めた加熱室を開示している（特許文献1）。しかし、各室の温度設定に際し、従来は、加熱室を運転しながら試行錯誤を繰り返して得られたノウハウに基づいて、所望のヒートカーブを得るための加熱室内温度に調節する手法が一般的であった。従って、例えば、太陽電池基板の電極材料の開発者や研究者等は、本題となる開発や研究以前に、本来加熱手段に過ぎない加熱室の温度決定に大きな労力と時間を割かなければならない問題があった。

10

【0004】

加熱室の温度制御に関して、将来における仮想設定加熱室内温度を計算し、現在の必要加熱室内温度と、この仮想設定加熱室内温度との差によって生じる将来の制御誤差を打ち消す方向に、現在の必要加熱室内温度を修正し、これを用いて設定加熱室内温度を決定する技術が開示されている（特許文献2）。しかし、当該技術は、加熱処理中に現在または過去の加熱処理データに基づいて設定加熱室内温度を最適に制御していく技術であって、現在または過去の加熱処理データの存在が必要とされるため、加熱処理開始以前に所望のヒートカーブを実現するための加熱室内温度を設定する際には適用できない問題があった。

20

【0005】

また、一般に、市販の汎用的な熱流体解析ソフトは加熱炉の専用ソフトではなく、またブラックボックス化されているため、例えば複数の加熱室からなる加熱炉の加熱室内温度最適化のように、多数のパラメータの効果を的確かつ迅速に計算結果に反映させることが必須となるケースへの適用は、極めて不向きであった。具体的には、汎用コンピュータで市販の汎用的な熱流体解析ソフトを用いて、所望の被加熱物ヒートカーブを実現することを目的として、複数の加熱室からなる加熱炉の加熱室内温度最適化のための計算を行う場合、加熱室内流体流れの計算を並列し、かつ計算設定に特別な工夫をせず当該ソフトのプログラムに計算を一任すると、一回の計算に数日を要していた。また、ソフトは前述のようにブラックボックス化されているため計算の基礎方程式を簡略化するためのコマンドの設定も容易ではなかった。

30

【特許文献1】特開2006-189236号公報

【特許文献2】特開平4-263024号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0006】

本発明の目的は、前記問題を解決し、現在または過去の加熱処理データの蓄積によらずに、所望のヒートカーブ入力値および当該入力値に基づく物理学的熱解析により、加熱処理開始以前に前記ヒートカーブを実現するための各加熱室制御温度を自動決定可能な加熱室内温度決定方法および加熱室内温度最適化方法であって、所望のヒートカーブを入力後5分～20分程度で、当該入力ヒートカーブを実現するための各加熱室内温度計算が可能な技術を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するためになされた本発明に係る加熱室内温度決定方法は、搬送方向に

50

区画された複数の加熱室内を順次移動しながら加熱される被加熱物が、所望のヒートカーブにより加熱されるように各加熱室の温度状態を自動調整するための、加熱室内温度決定方法であって、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブを実現しうる各加熱室内温度を計算するために、その初期条件として各加熱室のヒータ面温度を暫定的に設定する工程と、

暫定的に設定された各加熱室のヒータ面温度に基づいて、各加熱室のヒータ面以外の壁温度と室内流体温度とを計算し、前記の各加熱室のヒータ面温度とヒータ面以外の壁温度と室内流体温度とにより規定される加熱室内温度を決定する工程と、前記加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程と、前記の計算により得られた被加熱物ヒートカーブと、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブとの誤差を判断し、誤差が許容範囲に入るまで、暫定的に設定された各室ヒータ面温度を変化させながら、前記、計算を行う2工程を繰り返し、誤差が許容範囲となったとき、当該ヒートカーブ計算の引数として用いた加熱室内温度を最適加熱室内温度として採用する工程と、を有することを特徴とするものである。なお、通常ヒータ自体は複雑な形態を有するが、本発明では各加熱室に設けたヒータの集合体を一様温度の面放射体として取り扱い「ヒータ面」という概念を用いている。また、「室内流体温度」は通常、「ヒータ面温度」及び「ヒータ面以外の壁温度」よりもかなり低いことが多く、被加熱物温度に影響を与える温度因子となる。従って、本発明では、「加熱室内温度」をこれら3種類の要素（「ヒータ面温度」「ヒータ面以外の壁温度」「室内流体温度」）により規定される温度と定義して計算を行っている。

10

20

【0008】

請求項2記載の発明は、請求項1記載の加熱室内温度決定方法において、暫定的に設定された各加熱室ヒータ面温度に基づいて各加熱室内温度を計算する工程は、各加熱室を各々閉空間とみなし、空間分割法に基づく輻射熱解析を用いて各々の閉空間における熱収支を計算する際に、(a) 流体の流れを閉空間の連結方向の1次元に限定した上で、閉空間内部での流体の供給・排出を考慮し、かつ、温度による流体の密度変化を考慮した流体温度に関するエネルギーの保存の式と、(b) 各閉空間を構成する壁面を分割して分割面とし、分割面内温度一定と仮定した上で、各分割面厚み方向の壁温度に関する熱伝導方程式と、(c) 各加熱室内壁面の射度に関する行列による代数方程式を連立して解くことを特徴とするものである。

30

【0009】

請求項3記載の発明は、請求項1または2記載の加熱室内温度決定方法において、加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程は、被加熱物形状を平板状に限定し、熱吸収は全て被加熱物の表面からの熱流入によるものとみなし、熱伝導解析により被加熱物の温度分布を計算する際に、(a) 被加熱物内部での熱移動を表わす基礎方程式と、(b) 輻射と対流の効果を加味する境界条件式を解くことを特徴とするものである。

【0010】

請求項4記載の加熱室内温度最適化方法は、請求項1～3の何れかに記載の加熱室内温度決定方法で最適加熱室内温度として採用された加熱室内温度に基づいて各加熱室制御温度設定値を計算する工程と、計算により得られた各加熱室制御温度設定値を各加熱室ヒータ制御系に通信する工程と、を有することを特徴とするものである。

40

【発明の効果】

【0011】

本発明に係る加熱室内温度決定方法によれば、所望のヒートカーブ入力値および当該入力値に基づく物理学的熱解析により、加熱処理開始以前に前記ヒートカーブを実現するための各加熱室制御温度設定値を決定することができるため、現在または過去の加熱処理データの蓄積が不必要となり、所望のヒートカーブを即座かつ自在に実現することが可能となった。

【0012】

50

請求項 2 に記載の発明では、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブを実現するために暫定的に設定された各加熱室の炉内ヒータ面温度に基づいて各加熱室内温度を計算する工程において、各加熱室を各々閉空間とみなし、輻射熱解析を用いて各々の閉空間における熱収支を計算する際に、加熱室内の熱収支を必要最小限の数式でモデル化したことにより、計算時間を、従来型の熱流体解析ソフトの適用時に比べて、圧倒的に短縮可能することが可能となった。また、本発明における計算式は、(a) 流体の流れを閉空間の連結方向の 1 次元に限定した上で、閉空間内部での流体の供給・排出を考慮し、かつ、温度による流体の密度変化を考慮した流体温度に関するエネルギーの保存の式と、(b) 各閉空間を構成する壁面を分割して分割面とし、温度および放射エネルギーを各分割面内で一定と仮定した上で、各分割面厚み方向の壁温度に関する熱伝導方程式と、(c) 各加熱室の射度に関する行列による代数方程式を連立して解くものであって、壁温度は差分法、流体温度はControl-volume法により、それぞれ陽的に解き、ある時間ステップでの壁温度から、それぞれの壁面の射度をSOR法で求め、次ステップでの壁温度を求めるための境界条件に組み込む、というように、複数の解析手法を対象に応じて併用することにより、計算時間の短縮化を可能としている。

10

【0013】

請求項 3 記載の発明では、炉内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程において、被加熱物形状を平板状に限定し、熱吸収は全て被加熱物の表面からの熱流入によるものとみなしている。すなわち、本発明では、加熱機構を、「それぞれ任意の温度分布を持ち相対する平面間の輻射熱交換」という視点からモデル化し、当該熱交換モデルに、被加熱物自身の移動を組み合わせ、対流加熱の効果を極力簡略化して、加熱室内を移動する被加熱物温度の熱伝導モデルを必要最小限の数式で表現可能としたことにより、計算時間を、従来手法（流体に関する諸指標はナビエ・ストークスの方程式という偏微分方程式に支配されるため、ナビエ・ストークスの方程式と熱伝導解析を併用して解く手法）に比べて、圧倒的に短縮可能することが可能となった。また、本発明では熱伝導解析により被加熱物の温度分布を計算する際に、(a) 被加熱物内部での熱移動を表わす基礎方程式と、(b) 輻射と対流の効果を加味する境界条件式を解くことにより、計算時間の短縮化を図りつつ、より理論的な被加熱物温度の予測を可能としている。

20

【0014】

請求項 4 に記載の発明では、請求項 1～3 の何れかに記載の加熱室の室内温度決定方法で最適室内温度として採用された室内温度に基づいて各加熱室制御温度設定値を計算する工程と、計算により得られた各加熱室制御温度設定値を各加熱室ヒータ制御系に通信する工程を有することにより、ユーザーが所望の被加熱物ヒートカーブを入力するだけで、当該ヒートカーブを実現可能とする室内温度となった加熱室の準備が可能となる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

以下に図 1 のフローチャートを参照しつつ、本発明の方法の好ましい実施形態を示す。なお、本発明によれば、例えば図 2 に示すように、搬送方向に区画された複数の加熱室内を順次移動しながら加熱される被加熱物に所望のヒートカーブを実現するための各加熱室温度を自動決定することができる。

40

【0016】

図 1 のフローチャートに示すように、本発明の加熱室内温度決定方法は、予め入力 (ST1) された所望の被加熱物ヒートカーブを実現しうる各加熱室内温度を計算するために、その初期条件として各加熱室のヒータ面温度を暫定的に設定する工程 (ST2) と、暫定的に設定された各加熱室のヒータ面温度に基づいて、各加熱室のヒータ面以外の壁温度と室内流体温度とを計算し、前記の各加熱室のヒータ面温度とヒータ面以外の壁温度と室内流体温度とにより規定される加熱室内温度を決定する工程 (ST3) と、前記加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程 (ST4) と、前記の計算により得られた被加熱物ヒートカーブと、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブとの誤差を判断し (ST5, ST6)、誤差が許容範囲に入るまで、暫定的に設定された各室

50

ヒータ面温度を変化させながら（ST7）、ST3とST4の工程を繰り返し、誤差が許容範囲となったとき、当該ヒートカーブ計算の引数として用いた加熱室内温度を最適加熱室内温度値として採用する工程を有するものである。なお、上記の工程で得られた加熱室内温度決定値を実機の加熱室に適用する場合には、前記工程に続いて、最適加熱室内温度値として採用された室内温度に基づいて各加熱室制御温度設定値を計算する工程（ST8）と、計算により得られた各加熱室制御温度設定値を各加熱室ヒータ制御系に通信する工程（ST9）を備えることが好ましい。以下、図1に示した各工程について説明する。

【0017】

（ST1：所望の被加熱物ヒートカーブの入力）

ユーザーは図3に示すような、ソフトウェア操作画面を通じて、各室における被加熱物の目標温度1と滞在時間2を入力することができる。当該入力値に基づいて、希望ヒートカーブを描写するプログラムを用いて、所望の被加熱物ヒートカーブ3が得られる。

【0018】

（ST2：各加熱室のヒータ面温度の暫定的設定）

ST1で得られた所望の被加熱物ヒートカーブを実現しうる各加熱室内温度を計算するために、その初期条件として各加熱室のヒータ面温度を暫定的に設定される。当該設定は、例えば、各室において、被加熱物の滞在時間が5秒未満の場合には、所望のヒートカーブ+100℃、被加熱物の滞在時間が10秒未満の場合には、所望のヒートカーブ+50℃、それ以外の場合は、加熱時間を独立変数として線形補正を行って設定値とするプログラムを用いて行うことができる。なお、ヒータ面に暫定的に温度を与えるのではなく、単位面積あたりの発熱速度を指定して、当該ヒータ面の温度自体も計算値とする方法が別途考えられるが、その場合は暫定的な発熱速度の指定が極めて困難である。

【0019】

（ST3：各加熱室内温度を計算）

ST2で得られた各加熱室ヒータ面温度の暫定値に基づいて各加熱室の室内温度を計算する当該工程では、各加熱室を各々閉空間とみなし、各々の閉空間における熱収支を、輻射熱解析を用いて計算する際に、下記式（1）～（7）を連立させた基礎方程式を解くプログラムが実行される。なお、下記式（1）～（7）を導くために、閉空間内において、伝熱3形態（放射・対流・伝導）すべてを考慮した上での熱収支を解析することを目的として、数値モデルを構築した。従来モデルによる解析では、温度あるいは伝熱量を指定する特別な場合にのみ対応可能であったが、当該数値モデルは、一般の放射非平衡状態を取り扱えるため、より実用的なモデルとなった。特に、非平衡系における流体の取り扱いに関して、実験値との整合性を失わない範囲で可能な限り流体モデルを単純化し、計算の高速化を図った。具体的には、おおむね加熱炉が被加熱物進行方向に長い直方体形状をしていることに着目し、計算領域をすべて長方形の分割面で囲まれた直方体で近似し、形態係数の正確化をはかったこと、および各閉空間内部での流体の供給・排出は考慮し、温度による流体の密度変化も考慮する一方で、流れを閉空間連結方向の1次元に限定したことがあげられる。

【数1】

（a）流体温度に関するエネルギーの保存の式

$$\begin{aligned}
 M^0 - M^1 + M_{\text{sup}}^1 - M_{\text{exh}}^1 &= 0 \\
 M^1 - M^2 + M_{\text{sup}}^2 - M_{\text{exh}}^2 &= 0 \\
 &\vdots \\
 M^{N-1} - M^N + M_{\text{sup}}^N - M_{\text{exh}}^N &= 0 \quad \text{従って、} \\
 M^0 - M^N + \sum_{k=1}^N M_{\text{sup}}^k - \sum_{k=1}^N M_{\text{exh}}^k &= 0 \quad (1)
 \end{aligned}$$

10

20

30

40

【数 2】

時間ステップを n として、

$$\begin{aligned}
 V^K \cdot C_g^K \cdot \rho_g^K \frac{T_g^{K,(n+1)} - T_g^{K,(n)}}{\Delta t} = & M^{K-1} \cdot C_g^{K-1} \cdot T_g^{K-1,(n)} - M^K \cdot C_g^K \cdot T_g^{K,(n)} \\
 & + M_{\text{sup}}^K \cdot C_{g,\text{sup}}^K \cdot T_{g,\text{sup}}^K - M_{\text{exh}}^K \cdot C_{g,\text{exh}}^K \cdot T_{g,\text{exh}}^K \\
 & + \sum_{l=0}^7 \alpha_l^K S_l^K (T_{w,l,1}^K - T_g^{K,(n)})
 \end{aligned} \quad (2)$$

(b) 各分割面厚み方向の壁温度に関する熱伝導方程式

10

【数 3】

炉内 l 面上の射度 G_l 、外来照射 J_l として、熱伝導方程式

$$\frac{\partial T_{w,l}}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T_{w,l}}{\partial x^2} + \frac{Q(x)}{c\rho} \quad (Q = \text{単位体積あたり発熱速度}) \quad (3)$$

境界条件

【数 4】

20

$$-k \frac{\partial T_{w,l}}{\partial x} = \left\{ \varepsilon_l \cdot J_l - \varepsilon_l \cdot \sigma \cdot T_{w,l}^4 + \alpha_l \cdot (T_g - T_{w,l}) \right\} \quad (x=0) \quad (4)$$

【数 5】

$$k \frac{\partial T_{w,l}}{\partial x} = \left\{ \varepsilon_{l,\text{outer}} \cdot J_{\text{outer}} - \varepsilon_{l,\text{outer}} \cdot \sigma \cdot T_{w,l}^4 + \alpha_{l,\text{outer}} \cdot (T_g - T_{w,l}) \right\} \quad (x=X) \quad (5)$$

【数 6】

30

 l 面から m 面を見た形態係数を F_{lm} とすると

$$\left\{ \begin{array}{ll} G_l^K = J_s^{K-1} & (l=4, K=2 \sim N) \\ J_4^{K+1} & (l=5, K=1 \sim N-1) \\ 0 & (l=6,7 : \text{Control Volume間に隔壁ない場合}) \\ \varepsilon_l^K \cdot \sigma \cdot \{T_{w,l}^K\}^4 + (1 - \varepsilon_l^K) \cdot J_l^K & (\text{others}) \end{array} \right. \quad (6)$$

$$J_l^K = \sum_{m=0}^7 F_{lm}^K \cdot G_m^K \quad \text{ただし、} F_{ll}^K = 0, F_{46}^K = F_{64}^K = 0, F_{57}^K = F_{75}^K = 0$$

40

【数 7】

(c) 各加熱室の射度に関する行列による代数方程式

$$\begin{bmatrix}
 1 & A_{01}^K & A_{02}^K & A_{03}^K & A_{04}^K & A_{05}^K \\
 A_{10}^K & 1 & A_{12}^K & A_{13}^K & A_{14}^K & A_{15}^K \\
 A_{20}^K & A_{21}^K & 1 & A_{23}^K & A_{24}^K & A_{25}^K \\
 A_{30}^K & A_{31}^K & A_{32}^K & 1 & A_{34}^K & A_{35}^K \\
 & & & & 1 & \\
 & & & & & 1 \\
 & & & & & & 1 \\
 & & & & & & & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 G_0^K \\
 G_1^K \\
 G_2^K \\
 G_3^K \\
 G_4^K \\
 G_5^K \\
 G_6^K \\
 G_7^K
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \varepsilon_0^K \cdot \sigma \cdot \{T_{w,0,1}^K\}^4 \\
 \varepsilon_1^K \cdot \sigma \cdot \{T_{w,1,1}^K\}^4 \\
 \varepsilon_2^K \cdot \sigma \cdot \{T_{w,2,1}^K\}^4 \\
 \varepsilon_3^K \cdot \sigma \cdot \{T_{w,3,1}^K\}^4 \\
 \sum_{m=0}^7 F_{5m}^{K-1} \cdot G_m^{K-1} \\
 \sum_{m=0}^7 F_{4m}^{K+1} \cdot G_m^{K+1} \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (7)$$

ただし、 $A_{lm}^K = -(1 - \varepsilon_l^K) F_{lm}^K$ 記載なき成分=0

ここで、記号は以下のとおりとする。

t：時間，

<流体> T_g ：温度，V：体積，C：定圧比熱，M：質量流量，<壁> T_w ：温度， ρ ：密度，c：比熱，S：壁面積，X：壁厚み， α ：熱伝達率，k：熱伝導率， σ ：ステファン・ボルツマン定数

20

【0 0 2 0】

(S T 4：各室の室内通過中の被加熱物ヒートカーブを計算)

前記の加熱室内温度条件下で得られる被加熱物ヒートカーブを計算する工程では、下記の昇温理論式(8)～(14)を解くプログラムを実行する。

【数 8】

(a) 被加熱物内部での熱移動を表わす基礎方程式

$$\begin{aligned}
 & \partial \Theta_{(x,y,z,t)} / \partial t + V \cdot \partial \Theta_{(x,y,z,t)} / \partial x \\
 & = a \cdot (\partial^2 \Theta_{(x,y,z,t)} / \partial x^2 + \partial^2 \Theta_{(x,y,z,t)} / \partial y^2 + \partial^2 \Theta_{(x,y,z,t)} / \partial z^2)
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

30

【数 9】

(b) 被加熱物表面の熱伝達に関する境界条件

$$\frac{\partial \Theta_{(x,y,z,t)}}{\partial x} = -1/k \cdot (\alpha \cdot (u - \Theta_{(x,y,z,t)})) \quad (9)$$

$$x=0$$

$$\frac{\partial \Theta_{(x,y,z,t)}}{\partial x} = 1/k \cdot (\alpha \cdot (u - \Theta_{(x,y,z,t)})) \quad (10)$$

$$x=X$$

10

$$\frac{\partial \Theta_{(x,y,z,t)}}{\partial y} = -1/k \cdot (\alpha \cdot (u - \Theta_{(x,y,z,t)})) \quad (11)$$

$$y=0$$

$$\frac{\partial \Theta_{(x,y,z,t)}}{\partial y} = 1/k \cdot (\alpha \cdot (u - \Theta_{(x,y,z,t)})) \quad (12)$$

$$y=Y$$

$$\frac{\partial \Theta_{(x,y,z,t)}}{\partial z} = -1/k \cdot [\delta \varepsilon_{w(x,y)} \cdot \left\{ \int_{A1} \varepsilon_{H1(x,y)} \cdot (u_{H1(x,y)}^4 - \Theta_{(x,y,z,t)}^4) \cdot dF_{1(x,y)} \right\} + \alpha \cdot (u - \Theta_{(x,y,z,t)})] \quad (13)$$

$$z=0$$

20

$$\frac{\partial \Theta_{(x,y,z,t)}}{\partial z} = 1/k \cdot [\delta \varepsilon_{w(x,y)} \cdot \left\{ \int_{A2} \varepsilon_{H2(x,y)} \cdot (u_{H2(x,y)}^4 - \Theta_{(x,y,z,t)}^4) \cdot dF_{2(x,y)} \right\} + \alpha \cdot (u - \Theta_{(x,y,z,t)})] \quad (14)$$

$$z=Z$$

ここで、記号は以下の通りとする。

- t : 時間
 θ : 被加熱物温度 (計算の目的となる物理量)
 x : 被加熱物 x (進行) 方向寸法 (x : 0 ~ X)
 y : 被加熱物 y (幅) 方向寸法 (y : 0 ~ Y)
 z : 被加熱物厚さ (z : 0 ~ Z)
 k : 被加熱物熱伝導率
 α : 被加熱物熱拡散率
 V : 被加熱物 x 方向速度
 u : 炉内雰囲気温度
 α : 対流熱伝達係数
 u_{H1} : 上面ヒータ温度
 u_{H2} : 下面ヒータ温度
 ε_{H1} : 上面ヒータ放射率
 ε_{H2} : 下面ヒータ放射率
 ε_w : 被加熱物放射率
 dF₁ : (被加熱物上面のある着目点から上面ヒータ面内のある微小面を見た) 形態係数
 dF₂ : (被加熱物下面のある着目点から下面ヒータ面内のある微小面を見た) 形態係数
 A₁ : 上面ヒータ面面積
 A₂ : 下面ヒータ面面積
 σ : ステファン・ボルツマン常数

30

40

50

(8)～(12)式の4式は、被加熱物の四周(端面)での熱の授受を表す。一般に第3種境界条件とよばれ、端面での熱流束が、端面温度と周囲温度との差に比例するという考えに基づく。対流加熱による効果を表し、右辺は特にニュートンの冷却則とも呼ばれる。(13)と(14)の両式は、第3種境界条件に輻射(赤外線)加熱による効果を付加したものである。異なる2面間の輻射的熱交換は、ステファン・ボルツマンの法則が一般的に良く使われるが当該式は両面の温度がそれぞれある一定値に保たれているという前提でしか使用できない。(13)(14)の両式は、その点を改良し、相対する2面が任意の温度分布をなす場合にも適用できるようにしたものである。被加熱物面内にある微小面 Δw を仮定し、相対する面(ヒータ面)も同様に細かく細分化することを考えると、 Δw と全ヒータ面との熱交換は多くの2面間熱交換の総和としてとらえることができる。この考え方を基本にした(13)(14)式を被加熱物の上下面全面で成り立つと仮定すれば、平板状の被加熱物と任意の温度分布を持つ上下ヒータ面との熱交換を数式化したことになる。ただし、(13)(14)式に温度の4乗項が入っており解析的に解くことができない。従って何らかの数値的な方法で解を求める必要がある。本モデルでは、差分法を用いて、理論式を解析する。差分法は偏微分方程式を解く一般的な方法のひとつであり、連続的な微分方程式を、有限個の代表点に付いての代数方程式に変換する方法であるが、計算に際しては、その代表点を選ばなければならない。そのため、計算領域を多数の格子(メッシュ)に分割する必要がある。このようにメッシュを設定することで、処理が困難な積分を、有限の足し算に変換できる。プログラム構築の容易さの観点から、上ヒータ面、被加熱物面、下ヒータ面それぞれについて、両面の格子点 x 、 y 座標を一致させることが好ましい。なお、 18×18 のメッシュに対応したプログラムをひとつ構築しておけば、計算対象の寸法変化に柔軟に対応できる。

10

20

【0021】

(ST5、ST6：ヒートカーブの誤差の検討)

前記の計算により得られた被加熱物温度に基づいてヒートカーブを描写するプログラムを用いて、被加熱物温度計算値に基づく被加熱物ヒートカーブ4が得られる。ST5、ST6では、当該被加熱物ヒートカーブ4と、予め入力された所望の被加熱物ヒートカーブ3との誤差を検討するプログラムが実行される。誤差が許容範囲内の場合、当該ヒートカーブ計算の引数として用いた加熱室内温度が最適化の目的値として採用される。一方、誤差が許容範囲外の場合、ST7で暫定的に設定された各室ヒータ面温度を変化させ、当該

30

【0022】

(ST7：誤差範囲外の場合、ヒータ面温度の暫定値の修正)

誤差が許容範囲の設定値外の場合、各室において以下のプログラムを適用する。

1)前記誤差(=Xとする)が $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内の部屋は「計算完了」とし、再計算しない。2)Xが $\pm 10^\circ\text{C}$ を上回った部屋のみ再度自動で室内温度設定。3)上面温度の再設定値は、各室において、Xを基本として、被加熱物厚み $=300\mu\text{m}$ の時は、設定補正量 $=X \times 1.5$ 、被加熱物厚み $=100\mu\text{m}$ の時は、設定補正量 $=X$ 、その間は、被加熱物厚みを独立変数として線形補間する。

40

【0023】

(ST8、ST9：温度設定計算値に基づく、制御温度値の決定とヒータ制御)

なお、前記計算工程で得られたヒータ面温度値は、そのまま実際のヒータ制御温度として採用することはできない。その理由は、ヒータと温度計の位置関係にある。特にヒータが図2の3に示した近赤外線ランプ型であると、ヒータの構造上、発熱体自身の温度を直接、温度計により接触測定することは困難である。その場合ヒータ出力は、ヒータ近傍に設置される温度計が検知する温度を一定に保つように調整され、それを制御温度と呼ぶ。したがって、制御温度は、前記ヒータ面およびヒータ以外の面からの輻射、および室内流体による対流伝熱、の複合により規定される温度となるため、それを決定するために更に別途ロジックによる計算が必要となる。その具体的なロジックは加熱室の構造により変動

50

するが、おおむね S T 6 までの工程で決定されたヒータ面温度、ヒータ面以外の壁温度及び室内流体温度の単純平均もしくは加重平均値となる。その後、当該値が制御系に通信されて、実際の加熱室のヒータが当該制御値により、出力制御される。

【0024】

(実施例)

図 1 に示したフローチャートに従って構築されたシミュレーションソフトに、S T 3 及び S T 4 の計算モデルを適用し、室内温度最適化の迅速性を評価した。所望のヒートカーブを入力し、加熱室内温度最適化の迅速性について評価した。シミュレーションを開始してから約 10 分で、所望のヒートカーブと誤差 3 % 以内のヒートカーブを実現する加熱室内温度が決定された。コンピュータは、汎用コンピュータを使用した。

10

【0025】

(比較例)

熱流体解析用の市販ソフトウェアプログラムを使用し、図 1 に示したフローチャートに従って加熱室内温度最適化時間を評価した。所望のヒートカーブと誤差 3 % 以内のヒートカーブを実現する加熱室内温度が決定されるまでに、約 10 時間が必要であった。コンピュータは、汎用コンピュータを使用した。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図 1】本発明の構成を説明するフローチャートである。

【図 2】搬送方向に区画された複数の加熱室内を順次移動させながら加熱される被加熱物の説明図である。

20

【図 3】本発明の実施に用いるソフトウェア操作画面の説明図である。

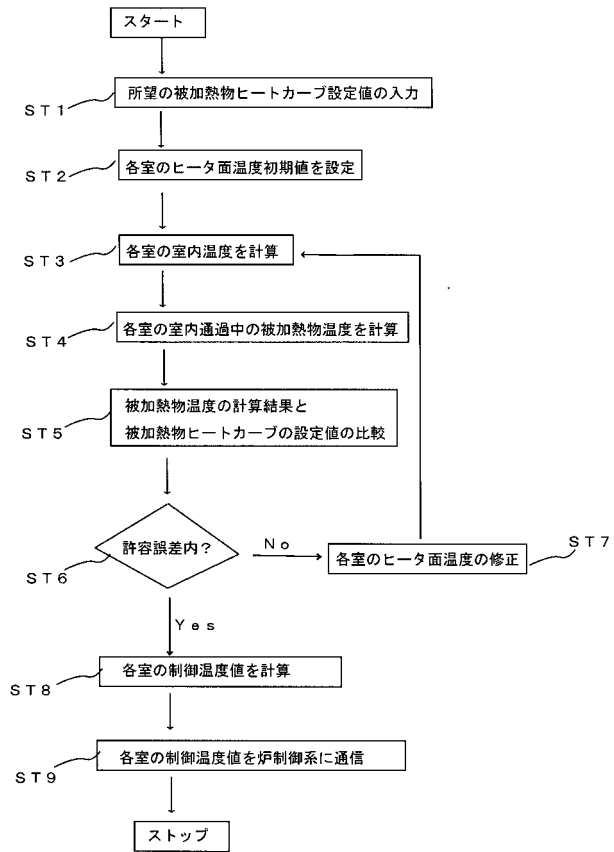
【符号の説明】

【0027】

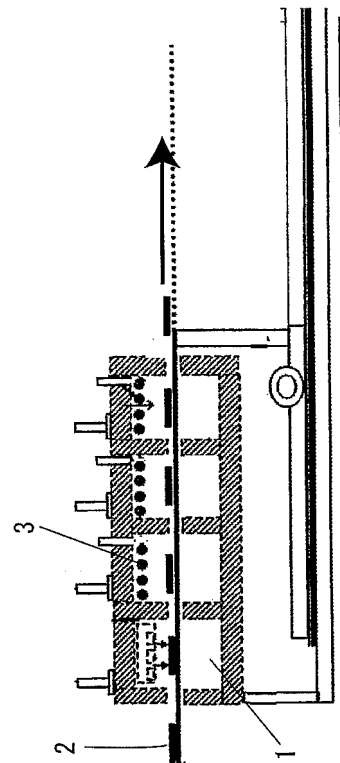
- 1 加熱室
- 2 被加熱物
- 3 ヒータ
- 4 ソフトウェア操作画面に表示された製品温度入力値
- 5 ソフトウェア操作画面に表示された製品温度維持時間
- 6 ソフトウェア操作画面に表示された所望のヒートカーブ
- 7 ソフトウェア操作画面に表示された設定温度計算値
- 8 ソフトウェア操作画面に表示された計算値に基づくヒートカーブ

30

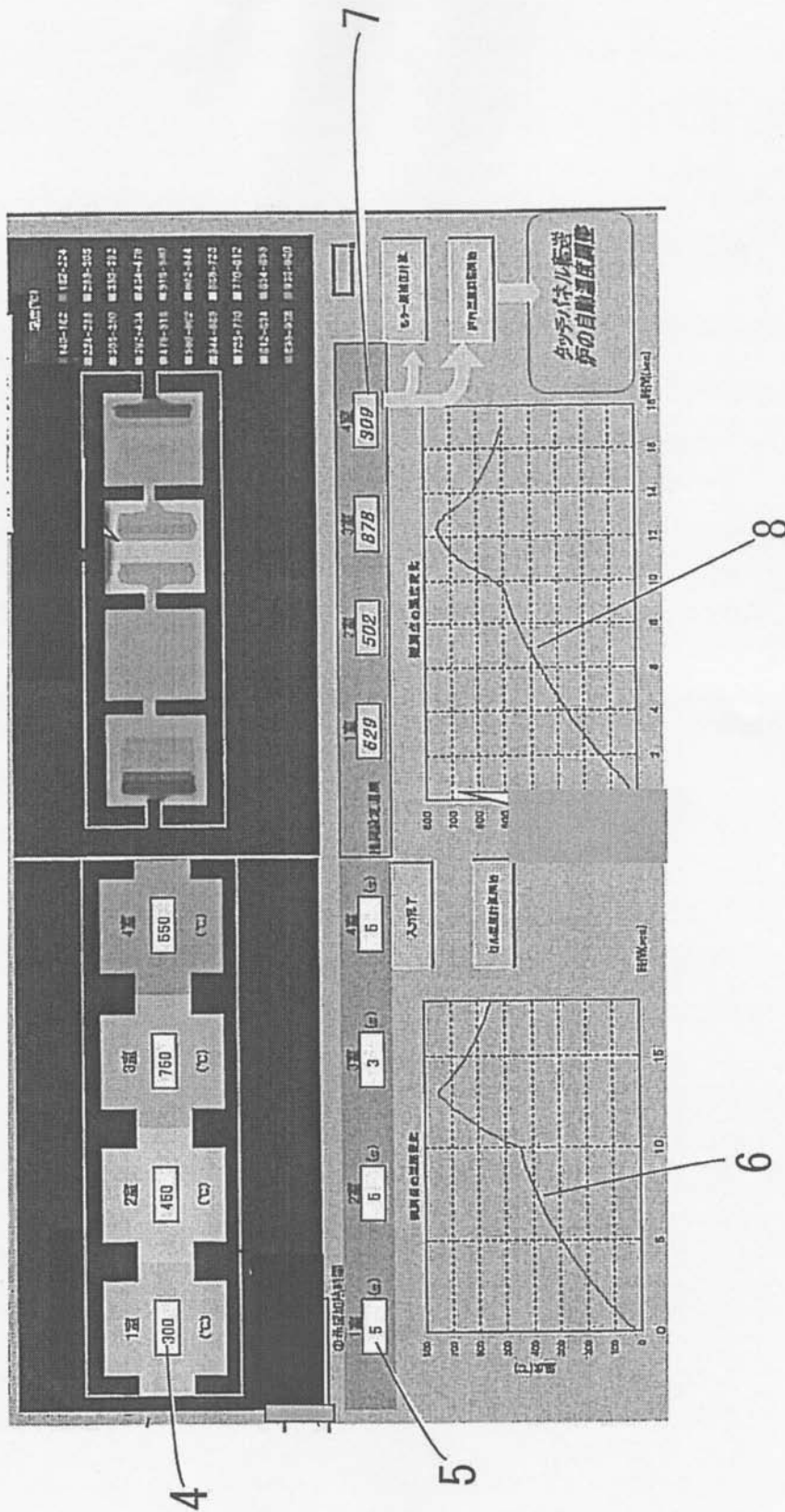
【図 1】



【図 2】



【図 3】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード (参考)
H O 1 L 31/04 M

Fターム(参考) 4K050 AA02 BA05 BA17 CA13 CC07 CD22 CG01 EA05
4K056 AA09 BB05 CA06 CA18 FA03 FA12 FA23
5F051 CB24 CB30
5F151 CB24 CB30