

明 細 書

発明の名称：

基板処理装置、温度制御プログラム、半導体装置の製造方法及び温度制御方法

技術分野

[0001] 本開示は、基板処理装置、温度制御プログラム、半導体装置の製造方法及び温度制御方法に関する。

背景技術

[0002] 基板処理装置の一例として、半導体製造装置があり、さらに半導体製造装置の一例として、縦型装置があることが知られている。縦型装置では、複数の基板（以下、ウエハともいう）を多段に保持する基板保持部としてのポートを、基板を保持した状態で反応管内の処理室に搬入し、複数のゾーンで温度制御しつつ基板を所定の温度で処理することが行われている。これまで、従来ヒータの温度制御では降温時にヒータオフとしていたが、近年、基板処理後の降温特性を積極的に向上させることが行われている。

[0003] 例えば、特許文献１は、ヒータユニットによる加熱と、クーリングユニットによる冷却を並行させて、所定の昇温レート及び所定の降温レートに追従させる半導体製造装置を開示する。また、特許文献２は、予め温度特性を自動取得した後に、その特性を利用して温度制御することで調整者による制御性能のばらつきを防止する半導体製造装置を開示する。

[0004] ここで、上述したクーリングユニット構成での冷却ガス流量の制御では、急速冷却中、ゾーン毎の降温速度の変化が異なり、ゾーン間の温度履歴に差を生じる場合がある。また、ＰＩＤ演算によるフィードバック制御では、適切なパラメータを予め定めておく必要があるが、このＰＩＤパラメータの最適化は、試行錯誤しながら最適値を探す手順を採らざるをえず、かつ、その成果は調整者の勘と経験に頼るところが大きい。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：国際公開第2018/100826号パンフレット

特許文献2：特開2019-145730号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 本開示の目的は、最適なパラメータにより、ゾーン間での温度偏差を改善することができる技術を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0007] 本開示の一態様によれば、

基板を処理する処理室を内部に構成する反応管と、

前記反応管の外側に設けられ、前記基板を加熱する加熱部を有するヒータユニットと、

前記ヒータユニットと前記反応管との間の空間に冷却媒体を供給する冷却バルブを有するクーリングユニットと、

前記クーリングユニットに前記冷却媒体を供給する排気ファンと、

前記排気ファンの情報、将来の目標となる最終目標温度、前記冷却バルブの開度をそれぞれ含み、前記加熱部の温度、及び前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を推測する予測モデルを取得し、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度、前記冷却バルブの開度、前記排気ファンの情報をそれぞれ取得して前記予測モデルに従って算出される予測温度列と現在の目標温度から前記最終目標温度まで変化するときの変化の割合により算出される目標温度列との誤差が最小となるように、前記冷却バルブの開度を調整する冷却制御部と、

を有する技術が提供される。

発明の効果

[0008] 本開示によれば、最適なパラメータにより、ゾーン間での温度偏差を改善

することができる。

図面の簡単な説明

- [0009] [図1]本開示の一実施形態に係る基板処理装置を示す一部切断正面図である。
- [図2]本開示の一実施形態に係る基板処理装置の正面断面図である。
- [図3]本開示の一実施形態に係る温度制御部を説明するための図である。
- [図4]本開示の一実施形態に係る基板処理装置におけるコンピュータのハードウェア構成を示す図である。
- [図5]本開示の一実施形態に係る冷却制御部の内部の制御ブロック図である。
- [図6]本開示で使用する第1の有効制約法を説明するフロー図である。
- [図7]本開示で使用する第2の有効制約法を説明するフロー図である。
- [図8]本開示の他の実施形態に係る冷却制御部の内部の制御ブロック図である。
- [図9]本開示の急冷予測モデル生成時の冷却制御部の内部の制御ブロック図である。
- [図10]本開示の急冷予測モデルの自動取得処理の一例を示す制御ブロック図である。
- [図11]本開示の一実施形態に係る成膜処理のうち温度に関する処理の一例を示すフローチャートを示す図である。
- [図12]図11に示したフローチャートにおける炉内の温度変化を示す図である。
- [図13]図11に示したフローチャートにおける制御部200と温度制御部64と冷却制御部300の動作を説明するための図である。
- [図14]図14(A)は、比較例に係る冷却制御部を用いて温度制御を行った場合の、各ゾーンの炉内温度とゾーン間温度偏差を示した図である。図14(B)は、本実施例に係る冷却制御部を用いて温度制御を行った場合の、各ゾーンの炉内温度とゾーン間温度偏差を示した図である。
- [図15]図15(A)は、本実施例に係る冷却制御部において排気ファンの情報を用いずに温度制御を行った場合の炉内温度の実測値と予測温度とそれ

らの誤差を示した図である。図 15 (B) は、本実施例に係る冷却制御部を用いて温度制御を行った場合の炉内温度の実測値と予測温度とそれらの誤差を示した図である。

発明を実施するための形態

[0010] <本開示の一実施形態>

以下、本開示の一実施の形態を図面に即して説明する。なお、以下の説明において用いられる図面は、いずれも模式的なものであり、図面に示される、各要素の寸法の関係、各要素の比率等は、現実のものとは必ずしも一致していない。また、複数の図面の相互間においても、各要素の寸法の関係、各要素の比率等は必ずしも一致していない。

[0011] 本実施の形態において、図 1～図 3 に示されているように、本開示に係る基板処理装置 10 は、半導体装置の製造方法における処理工程を実施する処理装置 10 として構成されている。

[0012] 図 1 に示された基板処理装置 10 は、支持された縦形の反応管としてのプロセスチューブ 11 を備えており、プロセスチューブ 11 は互いに同心円に配置されたアウトチューブ 12 とインナチューブ 13 とから構成されている。アウトチューブ 12 は石英 (SiO_2) が使用されて、上端が閉塞し下端が開いた円筒形状に一体成形されている。インナチューブ 13 は上下両端が開いた円筒形状に形成されている。インナチューブ 13 の筒中空部の内部は後記するボートが搬入される処理室 14 を形成しており、インナチューブ 13 の下端開口はボートを出し入れするための炉口 15 を構成している。後述するように、ボート 31 は複数枚の基板としてのウエハを長く整列した状態で保持するように構成されている。したがって、インナチューブ 13 の内径は取り扱うウエハ 1 の最大外径（例えば、直径 300 mm）よりも大きくなるように設定されている。

[0013] アウトチューブ 12 とインナチューブ 13 との間の下端部は、略円筒形状に構築されたマニホールド 16 によって気密封止されている。アウトチューブ 12 およびインナチューブ 13 の交換等のために、マニホールド 16 はア

ウタチューブ 12 およびインナチューブ 13 にそれぞれ着脱自在に取り付けられている。マニホールド 16 が CVD 装置の筐体 2 に支持されることによって、プロセスチューブ 11 は垂直に据え付けられた状態になっている。以後、図ではプロセスチューブ 11 としてアウタチューブ 12 のみを示す場合もある。

[0014] アウタチューブ 12 とインナチューブ 13 との隙間によって排気路 17 が、横断面形状が一定幅の円形リング形状に構成されている。図 1 に示されているように、マニホールド 16 の側壁の上部には排気管 18 の一端が接続されており、排気管 18 は排気路 17 の最下端部に通じた状態になっている。排気管 18 の他端には圧力制御部 21 によって制御される排気装置 19 が接続されており、排気管 18 の途中には圧力センサ 20 が接続されている。圧力制御部 21 は圧力センサ 20 からの測定結果に基づいて排気装置 19 をフィードバック制御するように構成されている。

[0015] マニホールド 16 の下方にはガス導入管 22 がインナチューブ 13 の炉口 15 に通じるように配設されており、ガス導入管 22 には原料ガス供給装置および不活性ガス供給装置（以下、ガス供給装置という。）23 が接続されている。ガス供給装置 23 はガス流量制御部 24 によって制御されるように構成されている。ガス導入管 22 から炉口 15 に導入されたガスは、インナチューブ 13 の処理室 14 内を流通して排気路 17 を通って排気管 18 によって排気される。

[0016] マニホールド 16 には下端開口を閉塞するシールキャップ 25 が垂直方向下側から接するようになっている。シールキャップ 25 はマニホールド 16 の外径と略等しい円盤形状に構築されており、筐体 2 の待機室 3 に設備されたボートエレベータ 26 によって垂直方向に昇降されるように構成されている。ボートエレベータ 26 はモータ駆動の送りねじ軸装置およびベローズ等によって構成されており、ボートエレベータ 26 のモータ 27 は駆動制御部 28 によって制御されるように構成されている。シールキャップ 25 の中心線上には回転軸 30 が配置されて回転自在に支持されており、回転軸 30 は

駆動制御部 28 によって制御されるモータとしての回転機構 29 により回転駆動されるように構成されている。回転軸 30 の上端にはボート 31 が垂直に支持されている。

[0017] ボート 31 は上下で一对の端板 32、33 と、これらの間に垂直に架設された三本の保持部材 34 とを備えており、三本の保持部材 34 には多数の保持溝 35 が長手方向に等間隔に刻まれている。三本の保持部材 34 において同一の段に刻まれた保持溝 35 同士は、互いに対向して開口するようになっている。ボート 31 は三本の保持部材 34 の同一段の保持溝 35 間にウエハ 1 を挿入されることにより、複数枚のウエハ 1 を水平にかつ互いに中心を揃えた状態に整列させて保持するようになっている。ボート 31 と回転軸 30 との間には断熱キャップ部 36 が配置されている。回転軸 30 はボート 31 をシールキャップ 25 の上面から持ち上げた状態に支持することにより、ボート 31 の下端を炉口 15 の位置から適当な距離だけ離すように構成されている。断熱キャップ部 36 は炉口 15 の近傍を断熱するようになっている。

[0018] プロセスチューブ 11 の外側には、縦置き加熱装置としてのヒータユニット 40 が同心円に配置されて、筐体 2 に支持された状態で設置されている。ヒータユニット 40 はケース 41 を備えている。ケース 41 はステンレス鋼 (SUS) が使用されて上端閉塞で下端開口の筒形状、好ましくは円筒形状に形成されている。ケース 41 の内径および全長はアウトチューブ 12 の外径および全長よりも大きく設定されている。また、本実施の形態では、複数の制御ゾーンとして、ヒータユニット 40 の上端側から下端側にかけて、七つの制御ゾーン U1、U2、CU、C、CL、L1、L2 に分割されている。

[0019] ケース 41 内には断熱構造体 42 が設置されている。本実施の形態に係る断熱構造体 42 は、筒形状好ましくは円筒形状に形成されており、その円筒体の側壁部 43 が複数層構造に形成されている。また、側壁部 43 を上下方向で複数のゾーン(領域)に隔離する仕切部 105 と、側壁部 43 の内側に設けられ、処理室 14 のウエハ 1 を加熱する加熱部としての発熱体 56 を備え

る。

[0020] ヒータユニット40は、図3に示すように、温度制御部64によって制御されるように構成されている。また、ヒータユニット40には、制御ゾーンU1、U2、CU、C、CL、L1、L2に対応して各制御ゾーンに1対ずつ熱電対65と熱電対66が設けられている。

[0021] 熱電対65は、ヒータ熱電対であり、各制御ゾーンにおけるアウトチューブ12とヒータユニット40の間の温度を検出する。熱電対65は、各制御ゾーンにおける発熱体56近傍の周囲温度を計測するよう構成されている。以下において、熱電対65による検出温度をヒータ温度とする。また、発熱体56の温度をヒータ温度として用いてもよい。

[0022] 熱電対66は、カスケード熱電対であり、各制御ゾーンにおけるアウトチューブ12とインナチューブ13の間の温度を検出する。熱電対66は、各制御ゾーンにおける処理室14の温度である炉内温度を計測するよう構成されている。以下において、熱電対66による検出温度を炉内温度とする。

[0023] 温度制御部64は、各制御ゾーンにおける熱電対65及び熱電対66により検出された温度情報に基づき、各制御ゾーンの発熱体56への通電具合を調整し、処理室14の温度が制御部200により設定された処理温度になるよう所望のタイミングにて制御するよう構成されている。

[0024] また、ケース41内には、各ゾーンに逆拡散防止部としてのチェックダンパ104が設けられている。このチェックダンパ104の開閉により冷却媒体としての冷却ガス90がガス流路107を介して内部空間75に供給されるよう構成されている。図示しないガス源から冷却ガス90が供給されないときには、このチェックダンパ104が閉じられ、内部空間75の雰囲気気逆流しないよう構成されている。このチェックダンパ104の開く圧力をゾーンに応じて変更するよう構成してもよい。また、側壁部43の外周面とケース41の内周面との間は、金属の熱膨張を吸収するようブランケットとしての断熱布が設けられている。

[0025] 図1に示されているように、断熱構造体42の側壁部43の上端側には天

井部としての天井壁部 80 が内部空間 75 を閉じるように被せられている。天井壁部 80 には内部空間 75 の雰囲気気を排気する排気経路の一部としての排気孔 81 が環状に形成されており、排気孔 81 の上流側端である下端は内側空間 75 に通じている。排気孔 81 の下流側端は排気ダクト 82 に接続されている。排気ダクト 82 は、排気ファン 84 に接続されている。排気ファン 84 は、後述する冷却装置としてのクーリングユニットに冷却媒体としての冷却ガス 90 を供給し、排気ダクト 82 を介して排出するよう構成されている。

[0026] 圧力制御部 21、ガス流量制御部 24、駆動制御部 28、温度制御部 64、冷却制御部 300 は、それぞれ制御部 200 と電氣的に接続され通信することができるように構成されている。圧力制御部 21、ガス流量制御部 24、駆動制御部 28、温度制御部 64、後述する冷却制御部 300 は、それぞれ制御部 200 の指示に従ってそれぞれ制御されるよう構成されている。

[0027] [クーリングユニット 301 の構成]

次に、本実施形態におけるクーリングユニット 301 について図 2 を用いて詳述する。

[0028] 本実施形態におけるクーリングユニット 301 は、複数の制御ゾーンに対応する複数の冷却ゾーン(U1, U2, CU, C, CL, L1, L2)に分割され、冷却ゾーン毎に、冷却ガス 90 を供給する吸気管 101 と、吸気管 101 に設けられ、ガスの流量を調整するコンダクタンスバルブとしての冷却バルブ 102 と、プロセスチューブ 11 に向けて冷却ガスを噴出する複数の開口穴(急冷穴) 110 と、を備えた構成となっている。冷却バルブ 102 は、ヒータユニット 40 とプロセスチューブ 11 との間の内部空間 75 に冷却媒体としての冷却ガス 90 を供給する。

[0029] 冷却バルブ 102 を開閉させることにより、各冷却ゾーンのゾーン長の比率に応じて吸気管 101 に導入される冷却ガス 90 の流量を設定し、開口穴 110 からプロセスチューブ 11 に向けて噴出されるガスの流量及び流速が調整されるよう構成されている。つまり、冷却バルブ 102 は、吸気管 10

1 内の構成物に応じて冷却制御部 300 によりバルブの開度が調整されることにより、各冷却ゾーンに導入される冷却ガス 90 の流量及び流速を変更することができる。すなわち、冷却バルブ 102 は、各冷却ゾーンで異なる開度に制御可能な構成となっている。冷却バルブ 102 は、冷却制御部 300 によって制御されることが可能なように構成されている。

[0030] また、吸気管 101 の、冷却バルブ 102 の下流側には、チェックダンパ 104 が設けられ、処理室 14 からの雰囲気気の逆拡散を防止する。冷却ガス 90 は、内部空間 75 の上側に設けられた排気口 81 から排気される。このため、チェックダンパ 104 は、冷却ガス 90 を効率よく溜めるように各ゾーンに設けられ、急冷未使用時は、吸気管 101 と断熱構造体 42 との間の対流を防止している。

[0031] また、ポート 31 に載置されるウエハ 1 が保持される領域の最上段と略同じ高さからウエハ 1 が保持される領域の最下段までの各冷却ゾーン(例えば、図 2 では、U2, CU, C, CL, L1)に吹出される冷却ガス 90 の流量及び流速が均等になるように開口穴 110 が設けられている。具体的には、開口穴 110 は、冷却ゾーン内で周方向及び上下方向に同じ間隔で設けられ、ガス流路 107 を介して内部空間 75 に吹出するように構成されている。

[0032] 上述したヒータユニット 40 に用いられる断熱構造体 42 は、クーリングユニット 301 としても用いられる。断熱構造体 42 は、上述したように、円筒形状に形成された側壁部 43 を有し、該側壁部 43 が複数層構造に形成されている。ここで、側壁部 43 は、上下方向で、複数の冷却ゾーン (U1, U2, CU, C, CL, L1, L2) に区分けされるように構成する。例えば、仕切部が、側壁部 43 を上下方向で、複数の冷却ゾーン (U1, U2, CU, C, CL, L1, L2) に隔離する構成でもよく、仕切部 105 と側壁部 43 の間に空間を設ける構成としてもよい。ガス流路 107 は、吸気管 101 と内部空間 75 とを連通し、冷却ゾーン毎に開口穴 110 を介して内部空間 75 へ冷却ガス 90 を吹出するように構成されている。

[0033] また、開口穴 110 は、吹出される冷却ガス 90 が発熱体 56 を避けるよ

うに配置されている。

[0034] また、本実施形態では、制御ゾーンの数と冷却ゾーンの数的一致するように仕切部105が配置されるよう構成されている。この形態に限定されることなく制御ゾーンの数と冷却ゾーンの数が任意に設定される。

[0035] 排気ダクト82は、排気ファン84に接続されており、排気ファン84の排出機能によって冷却ガス90を排出するように構成されている。

[0036] また、冷却制御部300は、冷却バルブ102と電氣的に接続されており、冷却バルブ102の開度を指示するように構成されている。。また、冷却制御部300は、排気ファン84と電氣的に接続され、排気ファン84の動作のオンオフを指示するように構成されている。

[0037] 本実施形態におけるクーリングユニット301は、冷却制御部300を介して冷却バルブ102の開度を冷却ゾーン毎に調整することにより、そして同時に排気ファン84の起動をオンにすることにより、供給される冷却ガスの流量を冷却ゾーン毎に調整することができ、その結果、冷却能力を冷却ゾーン毎に調整することができる。

[0038] [制御部の構成]

次に、制御部200の構成について例示する。

[0039] 図4に示すように、制御部200は、CPU (Central Processing Unit) 201およびメモリ202などを含むコンピュータ本体203と、通信部としての通信IF (Interface) 204と、記憶部としての記憶装置205と、操作部としての表示・入力装置206とを有する。つまり、制御部200は一般的なコンピュータとしての構成成分を含んでいる。

[0040] CPU 201は、操作部の中枢を構成し、記憶装置205に記憶された制御プログラムを実行し、表示・入力装置206からの指示に従って、記憶装置205に記録されているプロセスレシピ（例えば、プロセス用レシピ）を実行する。

[0041] また、CPU 201の動作プログラム等を記憶する記録媒体207として

、ROM (Read Only Memory)、EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)、フラッシュメモリ、ハードディスク等が用いられる。ここで、RAM (Random Access Memory) は、CPUのワークエリアなどとして機能する。

[0042] 通信部204は、圧力制御部21、ガス流量制御部24、駆動制御部28、温度制御部64、冷却制御部300(これらをまとめてサブコントローラということもある)と電氣的に接続され、各部品の動作に関するデータをやり取りすることができる。

[0043] 記憶部205は、上述のプロセスレシピ等のファイルを記憶するプログラム格納領域を有し、このプログラム格納領域には、予め保持している炉内温度の予測モデルに従って算出された予測温度列を将来の目標温度列に近づけるようにヒータ供給電力を制御する手順を基板処理装置に実行させるプログラムや、本実施形態における後述する排気ファン84の情報、将来の目標となる最終目標温度、冷却バルブ102の開度をそれぞれ含み、ヒータの温度、及び、炉内温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を推測する急冷予測モデルに従って予測温度列と現在の目標温度から最終目標温度まで変化するときの変化の割合により算出される目標温度列との誤差が最小となるように、冷却バルブ102の開度を調整する手順を基板処理装置に実行させるプログラムが格納される。また、図示しないパラメータ記憶領域には、上述の各予測モデルや上述の各予測モデルを実現するための各種パラメータが少なくとも記憶されている。また、所定の温度帯における各予測モデルが少なくとも格納される。

[0044] 本開示の一実施形態において、制御部200を例に挙げて説明したが、これに限らず、通常のコンピュータシステムを用いて実現可能である。例えば、汎用コンピュータに、上述の処理を実行するためのプログラムを格納したCDROM、USB等の記録媒体207から当該プログラムをインストールすることにより、上述の処理を実行することもできる。また、通信回線、通

信ネットワーク、通信システム等の通信部204を用いてもよい。この場合、例えば、通信ネットワークの掲示板に当該プログラムを掲示し、これをネットワークを介して搬送波に重畳して提供してもよい。そして、このように提供されたプログラムを起動し、OS (Operating System) の制御下で、他のアプリケーションプログラムと同様に実行することにより、上述の処理を実行することができる。

[0045] [冷却制御部の構成]

次に、冷却制御部300の制御構成について図5を用いて説明する。

[0046] 冷却制御部300は、炉内温度取得部351、温度履歴記憶部353、排気履歴記憶部355、バルブ開度履歴記憶部357、個別特性作成部359、目標温度列作成部361、統合特性作成部363、制約付き最適化計算部365、開度信号供給部367により構成されている。

[0047] 入力端Sには、制御部200からの目標温度が入力される。入力端Fには、熱電対66からの炉内温度が入力される。入力端Lには、制御部200からの排気ファン84のオンオフ信号の情報が入力される。目標温度、入力端S及び入力端Fは、熱電対66の個数分だけ存在するが、図4では、同一構成のため一つだけ図示している。

[0048] 吸気管101及び冷却バルブ102は、上述したように冷却ゾーン毎に設けられているが、図5では、説明のため一つだけ図示している。すなわち、冷却バルブ102は、各ゾーンにおいて異なる開度にすることができ、冷却ガスは、ゾーン毎に吸気管101に供給される。

[0049] 熱電対66は、インナチューブ13の内部空間の冷却ゾーンに対応する位置に、各ゾーンと同数配設され、ウエハ1の近傍の温度を微小電圧に変換して出力する。

[0050] 冷却制御部300は、予め設定された制御周期により、入力端S、入力端F及び入力端Lから入力信号を微小時間ごとに取得し、出力信号が微小時間ごとに更新出力されるよう構成されている。

[0051] 炉内温度取得部351は、熱電対66の微小電力を取得して、雑音除去の

ために平滑化し、その物理特性に従って検知温度に変換する。つまり、炉内温度取得部 351 は、熱電対 66 から検出された炉内温度を取得する。炉内温度取得部 351 は、熱電対 66 の個数分だけ存在する。

[0052] 温度履歴記憶部 353 は、炉内温度取得部 351 から全ゾーンの炉内温度又はヒータ温度を入力し、温度履歴記憶領域内にそれらのデータを一定期間記憶させる。温度履歴記憶部 353 は、温度履歴記憶領域内に対し、最初に取得した温度から所定間隔で順々に書き込んでいく。温度履歴記憶領域がデータで満たされた以降は、最も古いデータを捨て、その位置に新しいデータを書き込む。そのようにして、温度履歴記憶部 353 は、現在から一定期間だけ過去の温度を記憶することができるように構成されている。

[0053] 時刻に関する表示を統一するため、特定の時刻 t の処理で書き込まれた温度は、1 回前の温度（例えば、式 1 で示すところの $y(t-1)$ ）のように表示）として扱う。入力された温度は、書き込む時刻までの熱電対 66 の起電力の平均から算出する温度である。

[0054] 排気履歴記憶部 355 は、制御部 200 から排気ファン 84 のオンオフ信号を入力し、排気履歴記憶領域にその入力された排気ファン 84 のオンオフ信号に関するデータを一定期間記憶する。

[0055] バルブ開度履歴記憶部 357 は、全ゾーンの冷却バルブ 102 へ出力する開度情報をそれぞれ入力し、バルブ開度履歴記憶領域にそのデータを一定期間記憶する。バルブ開度履歴記憶部 357 は、バルブ開度履歴記憶領域内に対し、最初に取得した開度から所定間隔で順々に書き込んでいく。バルブ開度履歴記憶領域がデータで満たされた以降は、最も古いデータを捨て、その位置に新しいデータを書き込む。そのようにして、バルブ開度履歴記憶部 357 は、現在から一定期間だけ過去の開度を記憶することができるように構成されている。

[0056] 時刻に関する表示を統一するため、特定の時刻 t の処理で書き込まれた開度は、1 回前の温度（例えば、式 1 で示すところの $V_a(t-1)$ ）のように表示）として扱う。入力された開度は、前回の処理で算出され、今回の時刻ま

で継続して出力される開度である。

[0057] 個別特性作成部 359 は、詳細には後述する特定の冷却ゾーンの予測モデルとしての急冷予測モデルを記憶部 205 から取得し、炉内温度又はヒータ温度の所定の過去の温度データを温度履歴記憶部 353 から取得し、排気ファン 84 の所定の過去のオンオフに関するデータを排気履歴記憶部 355 から取得し、冷却バルブ 102 の所定の過去の開度データをバルブ開度履歴記憶部 357 から取得し、以下、式 2 及び式 3 で説明する個別入力応答特性行列 S_{sr} と個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} を算出する。個別入力応答特性行列 S_{sr} と個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} は、制御対象とする炉内温度の数（＝ゾーン分割数）だけ算出する。上述のように、急冷予測モデルは制御部 200 から取得するように記載しているが、冷却制御部 300 内に、例えば、急冷予測モデル記憶部を設けてもよい。上記はあくまで一例である。

[0058] [急冷予測モデル]

急冷予測モデルとは、ヒータ温度及び炉内温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を計算する数式であって次の式 1 を使用する。

[数1]

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) = & y(t-1) + a_1 \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_a(t-1) + a_2 \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_a(t-2) + \cdots \\ & + a_n \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_a(t-n) \\ & + b_1 \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_b(t-1) + b_2 \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_b(t-2) + \cdots + b_n \\ & \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_b(t-n) \\ & + c_1 \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_c(t-1) + c_2 \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_c(t-2) + \cdots + c_n \\ & \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot V_c(t-n) \\ & + d \cdot \{y(t-1) - y0\} \cdot \{f(t-1) + \cdots + f(t-m)\} / m \quad \cdots (式1) \end{aligned}$$

[数2]

ここで、 $\hat{y}(t)$ は、時刻 t の予測温度、 $y(t-1)$ は、1 回前の温度、
 $V_a(t-1), V_a(t-2), \dots, V_a(t-n)$ は、1 回前、2 回前、 $\dots$ 、 n 回前の当該冷却ゾーンの開度、
 $V_b(t-1), V_b(t-2), \dots, V_b(t-n)$ は、1 回前、2 回前、 $\dots$ 、 n 回前の当該ゾーンの一方に隣接するゾーンの開度、
 $V_c(t-1), V_c(t-2), \dots, V_c(t-n)$ は、1 回前、2 回前、 $\dots$ 、 n 回前の当該ゾーンの他方に隣接するゾーンの開度、
 $f(t-1), f(t-2), \dots, f(t-m)$ は、1 回前、2 回前、 $\dots$ 、 m 回前の排気ファン 8 4 のオン (= 1) オフ (= 0) のデータである。

[0059] y_0 は、基準温度であり、例えば、室温付近を想定している。基準温度 y_0 は、20℃以上30℃以下の範囲内の温度である。 $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n, d$ は、それぞれ所定の係数である。 n, m 値は、予め設定される値であり、必要な過去データ数を示す。予測モデルは、各冷却ゾーンについて記憶され制御演算に使用することができる。つまり、急冷予測モデルは、各々の温度帯に対応している。

[0060] 式 1 によると、1 回前の温度が基準温度 y_0 である場合、「 $y(t-1) - y_0$ 」は零となり、その結果、

[数3]

$$\hat{y}(t) = y(t-1)$$

[0061] となるので、予測温度 = 1 回前の温度 = 基準温度 y_0 となる。もし、炉内温度が仮に室温であった場合、冷却バルブ 102 の開度を全開として最大流量の冷却ガス (= 室温) を流しても炉内温度は不変である。そのことは、基準温度で式 1 は妥当であることを示している。

[0062] また、式 1 によると、例えば C ゾーンの温度に関する急冷予測モデルだとすれば、各係数に依存して、C ゾーンの冷却バルブ 102 の開度のみならず、隣接ゾーンの CU ゾーンや CL ゾーンの冷却バルブ 102 の開度も、予測温度に影響することを示している。これにより、各係数に依存して、ゾーン間の相互干渉を表現することができるようになっている。また、式 1 の急冷

予測モデルにおいて、定数項として、排気ファン８４のオン（＝１）オフ（＝０）のデータを用いることで、急冷開始時のゾーン間の温度誤差を改良することができるようになっている。ここで、排気ファン８４の駆動を開始したところで、急冷開始直前までは全ての冷却バルブ１０２が閉塞しているため、炉内温度に影響を及ぼさないとも考えられるが、急冷開始時の微小時間における排気ファン８４の動作による炉内雰囲気気の排気の影響を考慮することにより、急冷開始時のゾーン間の温度誤差が改良され、温度制御性が向上される。

[0063] ここで、隣接ゾーンは、冷却特性を鑑みて予め設定するようになっている。例えば、相互干渉具合によっては隣接２ゾーンが必要な場合がある。またクーリングユニットの特性上、冷却ガスは内部空間７５を上方向へ流れるので、例えば、鉛直下側の隣接２ゾーンのみを設定することもある。

[0064] また、式１によると、当該ゾーンや隣接ゾーンの冷却バルブ１０２の開度が全て零（＝全閉）の場合であっても、 d に係る項によって予測温度が変化するようになっている。これにより、吸気管１０１からの冷却ガス９０によるもの以外の冷却、例えば、自然冷却や意図しない隙間風による冷却を表現できるようになっている。

[0065] 上述した式１を次の式２に示すような状態空間モデルで表わす。

[数４]

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) \end{cases} \dots (式2)$$

[0066] ここで、行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ は次のようになる。なお、表記を簡単にするため $n=4$ 、 $m=3$ とした。

[数5]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_2 & a_3 & a_4 & b_2 & b_3 & b_4 & c_2 & c_3 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

[数6]

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

[0067] また、ベクトル $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ 、および、出力 $y(t)$ は次のようになる。

[数7]

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ Y \cdot V_a(t-1) \\ Y \cdot V_a(t-2) \\ Y \cdot V_a(t-3) \\ Y \cdot V_b(t-1) \\ Y \cdot V_b(t-2) \\ Y \cdot V_b(t-3) \\ Y \cdot V_c(t-1) \\ Y \cdot V_c(t-2) \\ Y \cdot V_c(t-3) \end{bmatrix}$$

[数8]

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} Y \cdot V_a(t) \\ Y \cdot V_b(t) \\ Y \cdot V_c(t) \\ Y \cdot \{f(t) + f(t-1) + f(t-2)\}/3 \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \hat{y}(t)$$

ただし、 $Y = \{y(t) - y_0\}$ である。

[0068] 式2において、時刻 t のとき $\mathbf{u}(t)$ を入力し、その後そのまま $\mathbf{u}(t)$ を入力し続けると、 $t+1$ 以降の予測温度は次の式3のようになる。

[数9]

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t+1) \\ \hat{y}(t+2) \\ \hat{y}(t+3) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(t+1) \\ y(t+2) \\ y(t+3) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^4 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t-1) + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t-1) + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \\ \sum_{i=0}^1 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ 2 \\ \sum_{i=0}^2 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{S}_{zr} + \mathbf{S}_{sr} \cdot \mathbf{u}(t) \cdots (\text{式3})$$

[数10]

但し

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+1) \\ \hat{y}(t+2) \\ \hat{y}(t+3) \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{zr} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^4 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t-1) + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t-1),$$

$$\mathbf{S}_{sr} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \\ \sum_{i=0}^1 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ 2 \\ \sum_{i=0}^2 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$\hat{\mathbf{y}}(t)$ は予測温度ベクトルである。

[0069] 式2では、表記を簡単にするために $n=4$ 、 $m=3$ として例示したが、式3はそれに限定されない。また、式3において、 $\mathbf{S}_{zr}$ は個別ゼロ応答特性ベクトル、 $\mathbf{S}_{sr}$ は個別入力応答特性行列である。

[0070] それぞれの行数は、制御周期とコントローラが使用するCPUの演算処理

性能に依存して許容される数だけ計算する。

[0071] 個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} は、予測温度ベクトルのうち過去の温度と過去の冷却バルブ 102 の開度に影響されて変化する変化量を示している。また、個別入力応答特性行列 S_{sr} は、予測温度ベクトルのうち今回算出した冷却バルブ 102 の開度に影響されて変化する変化量を示している。

[0072] 以下、個別入力応答特性行列 S_{sr} 、個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} 、および、予測温度ベクトルを対応ゾーンで区別するときは、ゾーン a に対応する個別入力応答特性行列は S_{sr-a} 、ゾーン b に対応する個別ゼロ応答特性ベクトルは S_{zr-b} などと表記する。

[数11]

また、ゾーン e に対応する予測温度ベクトルは $\hat{y}_e(t)$ などと表記する。

[0073] 目標温度列算出部 361 は、設定温度が更新されるタイミングで、制御部 200 から目標温度、現在の目標温度およびランプレートを入力し、個別目標温度列ベクトル S_{tg} を算出する。ランプレートとは、現在の目標温度から、将来の目標となる最終目標温度まで変化する時の変化の割合を指示するものであり、例えば、1℃/分の設定ならば、1 分間に 1℃の割合で変化する指示を示している。制御部 200 から入力する情報は、例えば、現在の目標温度が 100℃であり、更新された設定温度が 200℃、ランプレートが 10℃/分のときは、目標温度 = 200℃、現在の目標温度 = 100℃、ランプレート = 10℃/分となる。その後、現在の目標温度が 200℃に達成する前、例えば 150℃のときに、設定温度が 300℃、ランプレートが 1℃/分に更新されたときは、目標温度 = 300℃、現在の目標温度 = 150℃、ランプレート = 1℃/分となる。

[0074] そして、目標温度列作成部 361 は、ランプレートが零の場合と、零以外の場合で作成する個別目標温度列ベクトル S_{tg} を切り替える。

[0075] まず、ランプレートが零のとき、目標温度列作成部 361 は、

(1) ランピング温度偏差 = 目標温度 - 現在の目標温度

(2) ランピング時間 = 絶対値 (ランピング温度偏差) ÷ 基準ランプレート

(3) 基準設定値＝現在の目標温度＋ランピング温度偏差×(1－exp(－経過時間÷(ランピング時間÷時定数)))

の基準設定値に従って個別目標温度列ベクトル S_{tg} を算出する。時定数には例えば 1.0 を設定する。

[0076] 次に、ランプレートが零以外のとき、目標温度列作成部 361 は、

(1) ランピング温度偏差＝目標温度－現在の目標温度

(2) ランピング時間＝絶対値(ランピング温度偏差)÷ランプレート

(3) 基準設定値＝現在の目標温度＋ランピング温度偏差×(経過時間÷ランピング時間)

の基準設定値に従って個別目標温度列ベクトル S_{tg} を算出する。

[0077] 個別目標温度列ベクトル S_{tg} は、以下の説明のため、式 4 のように表記する。

[数12]

$$S_{tg}(t) = \begin{bmatrix} S_{tg}(t+1) \\ S_{tg}(t+2) \\ S_{tg}(t+3) \\ \vdots \end{bmatrix} \dots (\text{式4})$$

[0078] 式 4 の時刻および行数は、式 3 等のそれらと対応する。目標温度列作成部 361 は、制御対象とする温度と同数、すなわち、熱電対 66 と同数だけ存在する。

[0079] 以下、個別目標温度列ベクトル S_{tg} を対応ゾーンで区別するときは、ゾーン a に対応する場合は S_{tg-a} 、ゾーン e に対応する場合は S_{tg-e} などと表記する。

[0080] 統合特性作成部 363 は、複数ある個別特性作成部 359 から個別入力応答特性行列 S_{sr} と個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} を入力し、および、複数ある目標温度列作成部 361 から個別目標温度列ベクトル S_{tg} を入力し、統合特性方程式を作成する。

[0081] まず、個別入力応答特性行列 S_{sr} を変形する。個別入力応答特性行列 S_{sr} は時刻 t のとき $u(t)$ を入力し、その後そのまま $u(t)$ を入力し続けたときの予測温度の変化量を示している。 $u(t)$ を保持せず、すべての制御タ

タイミングで異なる値 $u(t) \sim u(t + Np - 1)$ を入力したとすると、式 3 の右辺第 2 項は、次のようになる。なお、式 3 の行数を Np とした。

[数13]

$$\begin{bmatrix} C \cdot B & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ C \cdot A \cdot B & C \cdot B & 0 & \cdots & 0 \\ C \cdot A^2 \cdot B & C \cdot A \cdot B & C \cdot B & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C \cdot A^{Np-1} \cdot B & C \cdot A^{Np-2} \cdot B & C \cdot A^{Np-3} \cdot B & \cdots & C \cdot B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ u(t+2) \\ \vdots \\ u(t+Np-1) \end{bmatrix}$$

[0082] よく知られているモデル予測制御では、すべての演算処理のタイミングで異なる値 $u(t) \sim u(t + Np - 1)$ を入力することを仮定し、これらを計算して求める。しかし、冷却制御部 300 の CPU の演算処理性能が十分ではないため、本開示では、入力パターンを固定とすることによって式 3 の右辺第 2 項を次のようにする。

[数14]

$$\begin{array}{c} \text{u(t)を保持} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \\ \begin{bmatrix} C \cdot B & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ C \cdot A \cdot B & C \cdot B & 0 & \cdots & 0 \\ C \cdot A^2 \cdot B & C \cdot A \cdot B & C \cdot B & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C \cdot A^{Np-1} \cdot B & C \cdot A^{Np-2} \cdot B & C \cdot A^{Np-3} \cdot B & \cdots & C \cdot B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ u(t+2) \\ \vdots \\ u(t+Np-1) \end{bmatrix} \end{array} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} C \cdot B \\ C \cdot A \cdot B \\ C \cdot A^2 \cdot B \\ \vdots \\ C \cdot A^{Np-1} \cdot B \end{bmatrix}} \right\} \text{u(t)を保持}$$

[数15]

$$\begin{bmatrix} C \cdot B \\ C \cdot A \cdot B + C \cdot B \\ \sum_{i=0}^2 C \cdot A^i \cdot B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{Np-1} C \cdot A^i \cdot B \end{bmatrix} \cdot [u(t)]$$

[0083] 以上のように個別入力応答特性行列 S_{sr} を変形して、式 3 から次の式 5 を得る。

[数16]

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{S}_{zr} + \mathbf{S}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) \cdots (\text{式5})$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+1) \\ \hat{y}(t+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+Np) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{zr} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{Np+1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t-1) + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{Np} \cdot \mathbf{B} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t-1)$$

[数17]

$$\mathbf{S}_{dsr} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \\ \sum_{i=0}^2 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{Np-1} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

[0084] 式5において、 $\mathbf{S}_{dsr}$ を改めて個別入力応答特性行列とする。対応ゾーンで区別するときは、ゾーンaに対応する個別入力応答行列を $\mathbf{S}_{dsr-a}$ などと表記する。

[0085] 次に、上述した式5及び式4に関し、制御対象とする全冷却ゾーンに並べる。

[数18]

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{y}}_a(t) \\ \hat{\mathbf{y}}_b(t) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{y}}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{zr-a} \\ \mathbf{S}_{zr-b} \\ \vdots \\ \mathbf{S}_{zr-e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{dsr-a} \\ \mathbf{S}_{dsr-b} \\ \vdots \\ \mathbf{S}_{dsr-e} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t)$$

$$= \mathbf{U}_{zr} + \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) \cdots (\text{式6})$$

[数19]

$$\mathbf{U}_{tg} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{tg-a}(t) \\ \mathbf{S}_{tg-b}(t) \\ \vdots \\ \mathbf{S}_{tg-e}(t) \end{bmatrix} \cdots (\text{式7})$$

[0086] 以上のように、統合特性作成部363は、式6および式7で示される統合入力応答特性行列 $\mathbf{U}_{dsr}$ 、統合ゼロ応答特性ベクトル $\mathbf{U}_{zr}$ 、統合目標温度ベクトル $\mathbf{U}_{tg}$ を算出して出力する。

[0087] 制約付き最適化計算部 365 は、統合特性作成部 363 から統合入力応答特性行列 U_{dsr} 、統合ゼロ応答特性ベクトル U_{zr} 、統合目標温度ベクトル U_{tg} を入力し後述する有効制約法と呼ばれる方法によって、最適な今回の開度を計算する。

[0088] 開度信号供給部 367 は、冷却ゾーンの分割数、すなわち、接続されている冷却バルブ 102 と同数だけ存在し、所定の制御周期で、制約付き最適化計算部 365 から対応する開度を取得し、冷却バルブ 102 への開度指示を更新する。

[0089] [第 1 の有効制約法]

本開示で使用している、第 1 の有効制約法について説明する。

有効制約法は、次の式 9 の制約条件のもと、次の式 8 で与えられる評価関数 $f(x)$ を最大にする解ベクトル x を求める。

[数 20]

$$f(x) = c^T \cdot x - \frac{1}{2} x^T \cdot Q \cdot x \cdots (\text{式 8})$$

$$b \geq A \cdot x \cdots (\text{式 9})$$

[0090] 式 8、式 9 において、 c 、 Q 、 b 、 A は、与えられた定数行列またはベクトルである。また、記号 T は転置を表す。このとき、有効制約法は図 6 に示すフローを実施することによって解ベクトル x を求めることができる。

[0091] S201 では、式 9 の等号が有効にならない範囲の解 x_k を選択する。そして、式 9 の各行のうち等号が有効になる行の集まりを A_e 、 b_e とする。S201 では A_e 、 b_e とともに、空集合である。また、式 9 の各行のうち等号が有効にならない行の集まりを A_d 、 b_d とする。S201 では $A_d = A$ 、 $b_d = b$ である。

[0092] S203 では、次の連立方程式を解き、その解を x 、 λ とする。 $x = x_k$ ならば、S205 へ進む。 $x \neq x_k$ ならば、S207 へ進む。

[数 21]

$$\begin{bmatrix} Q & A_e^T \\ A_e & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ b_e \end{bmatrix}$$

[0093] S 2 0 5 では、 λ の要素が全て 0 以上かどうかを判定する。0 以上ならば S 2 1 3 へ進む。 λ の要素が全て 0 以上でなければ S 2 1 1 へ進む。

[0094] S 2 0 7 では、次の式 1 0 に従って α を求める。 b_i 、 a_i は、それぞれ A_d 、 b_d から 1 行を抜き出したものである。 $\alpha = 1$ ならば S 2 0 5 へ進む。 $\alpha < 1$ ならば S 2 0 9 へ進む。

[数 22]

$$\bar{\alpha} = \min_{i \in d} \left[\begin{cases} \frac{b_i - a_i \cdot x_k}{a_i \cdot (x - x_k)} & (0 < \text{分母}) \\ 1 & (\text{分母} \leq 0) \end{cases} \right]$$

$$\alpha = \begin{cases} \bar{\alpha} & (0 < \bar{\alpha} < 1) \\ 1 & (1 \leq \bar{\alpha}) \end{cases} \dots (\text{式 11})$$

[0095] S 2 0 9 では、式 1 0 に従って α (< 1) を求めたときに使用した制約 [b_i 、 a_i] を、 A_d 、 b_d から削除し、 A_e 、 b_e へ追加し、S 2 0 3 へ進む。

[0096] S 2 1 1 では、負値で最小となる λ の要素を選択し、 A_e 、 b_e に含まれる制約のうち対応するもの [b_i 、 a_i] を、 A_e 、 b_e から削除し、 A_d 、 b_d に追加し、S 2 0 3 へ進む。

[0097] S 2 1 3 では、S 2 0 3 で求めた解 x を最適解として終了する。

[0098] 図 6 に示した有効制約法は、付帯乗数 λ を使用して式 9 の各行のうち等号が有効になる行の組合せを探索することにより、式 9 を満たしかつ式 8 を最大にする解を求めることができる。

[0099] [有効制約法の制御への適用]

次に、本開示での有効制約法の適用方法について説明する。

[0100] 統合特性作成部 3 6 3 において、式 6 で炉内温度の予測温度列（予測温度ベクトル）を、式 7 で目標温度列（統合目標温度ベクトル）を得ることができた。そこで、制約付き最適化計算部 3 6 5 では、評価関数として、目標温度列と予測温度列の誤差の 2 乗を採用する。評価関数 $V(u(t))$ は、次の式 1 1 のようになる。

[数23]

$$\begin{aligned}
V(\mathbf{u}(t)) &= [\mathbf{U}_{tg} - (\mathbf{U}_{zr} + \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t))]^T \cdot [\mathbf{U}_{tg} - (\mathbf{U}_{zr} + \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t))] \\
&= [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]^T \cdot [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}] - 2[\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]^T \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{U}_{dsr} \\
&\quad \cdot \mathbf{u}(t) \\
&= (\text{定数項}) - 2 \left([\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]^T \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) - \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) \right) \\
&= (\text{定数項}) - 2 \left([\mathbf{U}_{dsr}^T \cdot [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]]^T \cdot \mathbf{u}(t) - \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \cdot [\mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{U}_{dsr}] \right. \\
&\quad \left. \cdot \mathbf{u}(t) \right) \cdots (\text{式11})
\end{aligned}$$

[0101] 式11の第2項の外側の丸かっこ内部と式8を比較すると、式8のc、Qは、それぞれ以下の式に置き換えることができる。

[数24]

$$\mathbf{c} = \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}], \quad \mathbf{Q} = \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{U}_{dsr}$$

[0102] これにより、前述の有効制約法により、式11の第2項の外側の丸かっこ内部を最大にする解を得ることができる。従い、評価関数 $V(\mathbf{u}(t))$ を最小にする解を求めることができ、目標温度列と予測温度列の誤差の2乗を最小にする評価関数 $V(\mathbf{u}(t))$ を作成し、この評価関数 $V(\mathbf{u}(t))$ が最小となるように連立方程式を計算する。そして、この連立方程式を解くことにより、予測温度列の解に含まれる冷却バルブ102の開度を取得することができ、冷却制御部300は、冷却バルブ102の開度を調整する。

[0103] 次に、制約に関する式9については、表記を簡単にするためゾーンa～ゾーンcの開度に関するもののみを例示すると、次の式12に示すように、各ゾーンの電力供給値 k_a 、 k_b 、 k_c にそれぞれ矢印左側の上下限リミットが与えられた場合、矢印右側のように不等式を立てることで、式9に当てはめることができる。次の式12において、 LL_a 、 UL_a はそれぞれゾーンaに対する電力供給値の上限と下限、 LL_b 、 UL_b 、 LL_c 、 UL_c も同様にそれぞれゾーンb、ゾーンcに対する電力供給値の上限と下限である。例えば、 $LL_a = 0\%$ 、 $UL_a = 100\%$ のように設定される。

[数25]

$$\begin{aligned} LL_a \leq V_a(t) \leq UL_a \\ LL_b \leq V_b(t) \leq UL_b \\ LL_c \leq V_c(t) \leq UL_c \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} UL_a \\ LL_a \\ UL_b \\ LL_b \\ UL_c \\ LL_c \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \cdots (式12)$$

[0104] [第2の有効制約法]

[0105] 次に、本開示で使用可能な第2の有効制約法について説明する。上述した図6に示した有効制約法では、CPUの演算処理能力が十分ではない場合には、既定の制御周期で計算が終了しない場合があった。そこで、図6のフローに代えて、図7のフローで解ベクトル x を求めることができるようにした。

[0106] 図6における第1の有効制約法との違いは、開始直後にS215を追加し、S201をS217へ処理変更し、S209とS211から追加したS219へ進むようにし、S219における判定によってS203またはS213へ進むようにしたことである。下記においては、第1の有効制約法との違いについてのみ説明する。

[0107] S215では、ループ回数を初期化する。

[0108] そして、S217では、式9の等号が有効にならない範囲の解 x_k を選択する。後述するS219で最適化計算が途中終了する場合に備えて、特に、選択解を式9の等号が有効にならない範囲の上限値とした。例えば、ゾーンaの開度が、 $0 \leq V_a(t) \leq 100$ の場合、選択解を $V_a(t) = 99.9$ などとする。そのように選択することにより、S209で追加される制約は上限制約が優先されることになるので、最適化計算が途中終了したとしても、安全な計算結果を出すことができる。

[0109] S219では、ループ回数をカウントアップし、既定回数以内であれば、S203へ進む。既定回数を越えた場合は、S213へ進んで、直前のS203で求めた解 x を最適解として終了する。

[0110] 図7のようなフローにすることによって、最適解の計算を必要最小限の処

理で終わることができるため、既定の制御周期以内で計算が終了できるようになる。

[0111] <本開示の第2の実施形態>

次に、本開示の第2の実施形態について説明する。本開示の第2の実施形態における冷却制御部300では、熱電対66の代わりに熱電対65が検出する温度を炉内温度取得部351に入力する。すなわち、炉内温度取得部351は、熱電対65が検出するヒータ温度を取得して目標温度に従って制御する。これにより、熱電対66を備えない構成であっても、熱電対65が検出する温度を用いることにより上述した実施形態によるものと同様の効果を得ることができる。

[0112] <本開示の第3の実施形態>

次に、本開示の第3の実施形態について説明する。

[0113] 図8は、本開示の第3の実施形態に係る冷却制御部300の内部の制御ブロック図である。第3の実施形態では、図5に示す制御ブロック図における統合特性作成部363の代わりに統合特性作成部369を、制約付き最適化計算部365の代わりに最適化計算部371を用いる。以下において、上述した図5に示す制御ブロックと異なる部分のみを以下に説明し、同じ部分は詳細な説明を省略する。

[0114] 統合特性作成部369は、ゾーン分割数ある個別特性作成部359から個別入力応答特性行列 S_{sr} と個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} を入力し、および、ゾーン分割数ある目標温度列作成部361から目標温度列ベクトル S_{tg} を入力し、統合特性方程式を作成する。

[0115] 統合特性方程式は、式6と式7ではなく、次の式13と式14に示す方法で作成する。

[数26]

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_a(t) \\ \hat{y}_b(t) - \hat{y}_a(t) \\ \vdots \\ \hat{y}_e(t) - \hat{y}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{zr-a} \\ S_{zr-b} - S_{zr-a} \\ \vdots \\ S_{zr-e} - S_{zr-a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{dsr-a} \\ S_{dsr-b} - S_{dsr-a} \\ \vdots \\ S_{dsr-e} - S_{dsr-a} \end{bmatrix} \cdot u(t) \\ = U_{zr} + U_{dsr} \cdot u(t) \quad \cdots (式13)$$

[数27]

$$U_{tg} = \begin{bmatrix} S_{tg-a} \\ S_{tg-b} - S_{tg-a} \\ \vdots \\ S_{tg-e} - S_{tg-a} \end{bmatrix} \dots (\text{式14})$$

[0116] 式13、式14では、2段目以降に、それぞれゾーンaとの差を配している。ゾーンaを差の基準とすることは予めパラメータ等で設定できるようにする。ここではゾーンaを差の基準としたが、ゾーンa以外のゾーンであってもよい。また、式13、式14の時刻および行数は、式6、式7に対応する。

[0117] そして、統合特性作成部369は、式13および式14で示される統合入力応答特性行列 U_{dsr} 、統合ゼロ応答特性ベクトル U_{zr} 、統合目標温度ベクトル U_{tg} を算出して出力する。

[0118] 制約付き最適化計算部371は、統合特性作成部369から統合入力応答特性行列 U_{dsr} 、統合ゼロ応答特性ベクトル U_{zr} 、統合目標温度ベクトル U_{tg} を入力し、上述した有効制約法によって、最適な今回の開度を計算する。

[0119] 最適化計算部371では、評価関数として、基準ゾーンに関しては目標温度列と予測温度列の誤差の2乗、その他のゾーンに関しては当該ゾーンの予測温度列と基準ゾーンの予測温度列の差の2乗を加算したものを採用する。但し、当該ゾーンの予測温度列と基準ゾーンの予測温度列の差の2乗を加算したのに関しては重み行列 Z を考慮する。評価関数 $V(u(t))$ は次に式15のようになる。

[数28]

$$\begin{aligned}
V(\mathbf{u}(t)) &= [\mathbf{U}_{tg} - (\mathbf{U}_{zr} + \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t))]^T \cdot \mathbf{Z} \cdot [\mathbf{U}_{tg} - (\mathbf{U}_{zr} + \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t))] \\
&= [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]^T \cdot \mathbf{Z} \cdot [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}] - 2[\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) \\
&= (\text{定数項}) - 2 \left([\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) - \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{U}_{dsr} \cdot \mathbf{u}(t) \right) \\
&= (\text{定数項}) - 2 \left([\mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}]]^T \cdot \mathbf{u}(t) - \frac{1}{2} \mathbf{u}^T(t) \cdot [\mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{U}_{dsr}] \cdot \mathbf{u}(t) \right) \cdots (\text{式15})
\end{aligned}$$

[数29]

すなわち、

$$\mathbf{c} = \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot [\mathbf{U}_{tg} - \mathbf{U}_{zr}], \quad \mathbf{Q} = \mathbf{U}_{dsr}^T \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{U}_{dsr}$$

[0120] と置き換えると、上述した有効制約法を適用することができる。

ここで、重み行列 $\mathbf{Z}$ は、基準ゾーンの偏差にかかる評価への重みについては1を、その他のゾーンの基準ゾーンからの差にかかる評価への重みについては $\mathbf{Z}$ を配した対角行列である。 $\mathbf{Z}$ は、例えば1～10の値を採る。

[数30]

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z} \cdot \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z} \cdot \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z} \cdot \mathbf{E} \end{bmatrix}, \mathbf{E} \text{は単位行列} \cdots (\text{式16})$$

[0121] 図8で示される冷却制御部300の制御方法によれば、温度を制御する際に、各ゾーンに配された温度のゾーン間温度偏差を考慮して制御することができ、各ゾーンに配された温度の降温を概ね同時に同じ温度履歴で制御することができる。

[0122] [急冷予測モデルの更新処理の構成]

[0123] 式1に例示した急冷予測モデルの自動取得手順について説明する。この手順により、急冷予測モデルの係数（式1における $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n, d$ ）が決定される。

[0124] 図9は、急冷予測モデル生成時に冷却制御部300で行われる処理ブロッ

ク図を図示したものである。

[0125] ランダム開度信号供給部 373 は、制御部 200 からの命令により、3 値離散値のうちランダムに選択された開度（以下、ランダム開度）を、対応する冷却バルブ 102 に指示する。ランダム開度信号供給部 373 は、冷却ゾーン数、すなわち、冷却バルブ 102 と同数だけ存在する。ランダム開度の取りうる値、変更までの継続時間は、制御部 200 から入力するか、または、予めパラメータ等で設定できるようになっている。

[0126] 急冷予測モデル更新部 375 は、制御部 200 からの命令により、急冷予測モデルを記憶部 205 から取得し、必要な過去の温度データを温度履歴記憶部 353 から取得し、必要な過去の排気ファン 84 のオンオフに関する情報を排気履歴記憶部 355 から取得し、必要な過去の開度に関する情報をバルブ開度履歴記憶部 357 から取得し、その時点で得られる最新の急冷予測モデルを算出し更新して再度記録する。急冷予測モデルの更新は、開始後、予め定められた周期で繰り返し行われ、予め定められた時間だけその動作を繰り返して終了する。

[0127] 急冷予測モデル更新部 375 は、冷却ゾーン数、すなわち、冷却バルブ 102 と同数だけ存在する。急冷予測モデルの項数（式 1 における n , m 値）や相互干渉具合（式 1）等は、制御部 200 から入力するか、または、予めパラメータ等で設定できるようになっている。

[0128] [急冷予測モデルの更新方法]

次に急冷予測モデル更新部 375 で行われる急冷予測モデルの更新方法について説明する。本開示における更新方法は、逐次最小 2 乗法と呼ばれる方法を使用する。次の式 17 は、式 1 を行列・ベクトルを使用して表記したものである。

[数31]

予測温度と1回前の温度の差の予測値 $\widehat{\Delta y}(t)$ は、次の式17のように示される。

$$\widehat{\Delta y}(t) = \mathbf{x}^T(t) \cdot \boldsymbol{\theta}(t) \cdots (\text{式17})$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} Y \cdot V_a(t-1) \\ \vdots \\ Y \cdot V_a(t-n) \\ Y \cdot V_b(t-1) \\ \vdots \\ Y \cdot V_b(t-n) \\ Y \cdot V_c(t-1) \\ \vdots \\ Y \cdot V_c(t-n) \\ Y \cdot \{f(t-1) + \cdots + f(t-m)\}/m \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta}(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) \\ \vdots \\ a_n(t) \\ b_1(t) \\ \vdots \\ b_n(t) \\ c_1(t) \\ \vdots \\ c_n(t) \\ d(t) \end{bmatrix}$$

[0129] ただし、 $Y = y(t-1) - y_0$ としている。

ここで、時刻 t は、今回の処理を表し、 $\mathbf{x}(t)$ の要素のうち最新データが $V_a(t-1)$ となっているのは、前述のように、今回の処理で得られる開度等の時刻を $t-1$ としたからである。

[0130] 予測モデルの最新の係数 $\boldsymbol{\theta}(t)$ を次の式18のように計算する。

[数32]

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{\theta}(t-1) + \eta(t) \cdot \mathbf{k}(t) \cdots (\text{式18})$$

$$\mathbf{k}(t) = \frac{\mathbf{P}(t-1) \cdot \mathbf{x}(t-1)}{\rho + \mathbf{x}^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1) \cdot \mathbf{x}(t-1)}$$

$$\eta(t) = \Delta y(t-1) - \mathbf{x}^T(t-1) \cdot \boldsymbol{\theta}(t-1)$$

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{\rho} (\mathbf{P}(t-1) - \mathbf{k}(t) \cdot \mathbf{x}^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1))$$

[0131] ここで、 $\Delta y(t-1)$ は今回取得した温度と前回取得した温度との差 ($= y(t-1) - y(t-2)$) である。 ρ は忘却係数とよばれるパラメータで、予めパラメータとして設定する。 $\mathbf{P}(t)$ は係数誤差相関行列であって更新ごとに急冷予測モデルと共に記録される。初期値に例えば100～1000を要素とする単位行列を設定する。

[0132] 急冷予測モデルの係数 $\boldsymbol{\theta}(t)$ は、予め設定された時間の経過後に冷却制御部300内の所定の記憶領域に記録される。

[0133] [急冷予測モデルの自動取得手順]

次に、図10を用いて冷却制御部300で行われる急冷予測モデルの自動取得手順について説明する。

[0134] S300では、制御部200の指示により、炉内温度を目標温度T1へ制御する。このとき、ヒータユニット40、温度制御部64及び熱電対66のフィードバックループにより制御される。

[0135] S304では、制御部200からの指示により排気ファン84の駆動が開始（オン）され、同時に、制御部200からの指示により冷却制御部300で急冷予測モデルの更新が、図9に示した構成で開始される。図9で説明したように冷却制御部300は、一方で各冷却ゾーンの冷却バルブ102へ独立にランダム開度を指示し、他方で急冷予測モデルを更新（式18）する。このステップの開始時刻から予め設定された時間だけ経過すると、ランダム開度の指示を停止するとともに急冷予測モデルを確定し、冷却制御部300内の所定の記憶領域に記録する。また、このステップの終了時に制御部200は排気ファン84の駆動を停止（オフ）する。

[0136] S306では、S304で確定した急冷予測モデルが妥当かどうか判断する。判断する条件は、S304を実行した回数、または、S304実行中の予測モデルの収束状況、または、それらの組み合わせを採用する。

[数33]

予測モデルの収束状況とは、急冷予測モデルの係数の変化量（ $=\|\theta(t) - \theta(t-1)\|$ ；係数変化のノルム）が閾値より大きい小さいかで判断する。

[0137] 判断の結果妥当ではない（=No）ならば、再びS300に戻る。判断の結果妥当（=Yes）ならば、急冷予測モデルの自動取得手順を終了する。確定した妥当な急冷予測モデルは、後述する降温ステップS5で本開示の温度制御を実施するとき、個別特性作成部359で読み出されて使用される。

[0138] [本開示の第2の急冷予測モデル]

次に、本開示の第2の急冷予測モデルについて説明する。

上述した式1の急冷予測モデルにおいて、予測温度の精度を十分にすると

めに、式1の予め設定しておくn値を、十分大きい値に設定することが必要な場合がある。しかし、冷却制御部300のCPUの演算処理性能が十分ではないため、n値を大きくすると所定の制御周期で制御演算を終えることができない場合があった。そこで、本開示者らは、上述した式1の急冷予測モデルに代えて、次の式19の急冷予測モデルを使うことができることを見出した。

[数34]

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) = & y(t-k) + a_1 \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_a(t-k) + a_2 \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_a(t-2k) + \dots \\ & + a_n \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_a(t-nk) \\ & + b_1 \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_b(t-k) + b_2 \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_b(t-2k) + \dots + b_n \\ & \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_b(t-nk) \\ & + c_1 \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_c(t-k) + c_2 \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_c(t-2k) + \dots + c_n \\ & \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot V_c(t-nk) \\ & + d \cdot \{y(t-k) - y_0\} \cdot \{f(t-k) + \dots + f(t-mk)\} / m \quad \dots (式19) \end{aligned}$$

[0139] ここで、例えばk=2、または、k=10のような自然数を選び、
y(t-k)は、k回前の温度の基準温度からのずれ、
V_a(t-k)、V_a(t-2k)、・・・、V_a(t-nk)は、k回前、2k回前、・・・、nk回前の当該冷却ゾーンの開度、
V_b(t-k)、V_b(t-2k)、・・・、V_b(t-nk)は、k回前、2k回前、・・・、nk回前の当該ゾーンの一方に隣接するゾーンの開度、
V_c(t-k)、V_c(t-2k)、・・・、V_c(t-nk)は、k回前、2k回前、・・・、nk回前の当該ゾーンの他方に隣接するゾーンの開度、
f(t-k)、f(t-2k)、・・・、f(t-mk)は、k回前、2k回前、・・・、mk回前の排気ファン84のオン(=1)オフ(=0)に関する情報であり、他の要素は、上述した式1と同様である。

[0140] そして、式19は、k=1とすると上述した式1に一致する。すなわち、式19は、予測温度を推定する材料としてnk回前までのデータを使用するが、演算量を抑えるためkサンプルごとのデータのみを使用している。

[0141] なお、kサンプルごとのデータのみを使用するとノイズ等により外れ値を

使用することがあるので、例えば単純移動平均等のローパスフィルター処理を施した後のkサンプルごとのデータを使用するようにした、次の式20を用いてもよい。

[数35]

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) = & y_{ave}(t-k) + a_1 \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-a}(t-k) + a_2 \cdot \{y(t-k) - y0\} \\ & \cdot V_{ave-a}(t-2k) + \cdots + a_n \cdot V_{ave-a}(t-nk) \\ & + b_1 \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-b}(t-k) + b_2 \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-b}(t-2k) + \cdots + b_n \\ & \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-b}(t-nk) \\ & + c_1 \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-c}(t-k) + c_2 \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-c}(t-2k) + \cdots + c_n \\ & \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot V_{ave-c}(t-nk) \\ & + d \cdot \{y(t-k) - y0\} \cdot \{f_{ave}(t-k) + \cdots + f_{ave}(t-mk)\} / m \quad \cdots (式20) \end{aligned}$$

[数36]

ここで、例えば、

$$y_{ave}(t) = \frac{\sum_{i=1-k}^{k-1} y(t-i)}{2k-1}$$

あるいは

$$\begin{aligned} V_{ave-a}(t) &= \frac{\sum_{i=0}^{k-1} V_a(t-i)}{k} \\ f_{ave}(t) &= \frac{\sum_{i=0}^{k-1} f(t-i)}{k} \end{aligned}$$

などとする。

[0142] 急冷予測モデルとして、上述した式19または式20を用いることで、特性に含まれる周波数成分が比較的小さい場合でも、精度よく予測温度を取得することができ、かつ、制御演算量を少なくすることができる。

[0143] 次に、基板処理装置10で行われる温度シーケンスに一例について図11～図13を用いて説明する。図12で示されている符号S1～S6は、図11の各ステップS1～S6が行われることを示している。

[0144] ステップS1において、炉内温度を処理温度T1より低い目標温度T0に維持する。制御部200は、目標温度を温度制御部64に入力する。温度制御部64は、熱電対66又は熱電対65が検出した温度をフィードバックし、制御部200から入力される目標温度に基づいて、電力供給回路63への

電力供給値を制御することによって、炉内温度が目標温度 T_0 を維持するよう制御する。このときウエハ 1 は、処理室 14 に搬入されていない。このステップ S 1 から後述するステップ S 4 まで、制御部 200 は、排気ファン 84 の駆動をオフとするとともに、排気ファン 84 のオフ信号に関する情報を、冷却制御部 300 の排気履歴記憶部 355 に通知する。また、ステップ S 1 から後述するステップ S 4 まで、冷却制御部 300 による温度制御は行われず、冷却バルブ 102 は閉塞した状態である。

[0145] ステップ S 2 において、予め指定された枚数のウエハ 1 がボート 31 に装填されると、ウエハ 1 群を保持したボート 31 はシールキャップ 25 がボートエレベータ 26 によって上昇されることにより、インナチューブ 13 の処理室 14 に搬入（ボートローディング）されて行く。上限に達したシールキャップ 25 はマニホールド 16 に押接することにより、プロセスチューブ 11 の内部をシールした状態になる。ボート 31 はシールキャップ 25 に支持されたままの状態では処理室 14 に存置される。このとき、ボート 31 およびウエハ 1 の温度は、炉内温度 T_0 より低く、且つ、ボート 31 に保持されたウエハ 1 を炉内へ挿入した結果、炉外の雰囲気（室温）が炉内に導入されるため、炉内の温度は一時的に T_0 より低くなるが、温度制御部 64 による制御により炉内の温度は若干の時間を経て再び T_0 に安定する。

[0146] ステップ S 3 において、プロセスチューブ 11 の内部が排気管 18 によって排気される。また、温度制御部 64 がシーケンス制御することにより、温度 T_0 からウエハ 1 に所定の処理を施すための目標温度 T_1 まで、徐々に炉内温度を昇温させる。プロセスチューブ 11 の内部の実際の上昇温度と、温度制御部 64 のシーケンス制御の目標温度との誤差は、熱電対 65、66 の計測結果に基づくフィードバック制御によって補正される。また、ボート 31 がモータ 29 によって回転される。

[0147] ステップ S 4 において、プロセスチューブ 11 の内圧および温度、ボート 31 の回転が全体的に一定の安定した状態になると、プロセスチューブ 11 の処理室 14 には原料ガスがガス供給装置 23 によってガス導入管 22 から

導入される。つまり、温度制御部 64 は、所定の制御周期で、ヒータ温度又は炉内温度及び電力供給値を取得し、発熱体 56 に出力される電力供給値を調整するよう制御することにより、炉内温度を目標温度 T1 で維持して安定させる。ガス導入管 22 によって導入された原料ガスは、インナチューブ 13 の処理室 14 内を流通して排気路 17 を通って排気管 18 によって排気される。処理室 14 を流通する際に、原料ガスが所定の処理温度に加熱されたウエハ 1 に接触することによる熱 CVD 反応により、ウエハ 1 に所定の膜が形成される。

[0148] 所定の処理時間が経過すると、ステップ S5 において、処理ガスの導入が停止された後に、窒素ガス等のパージガスがプロセスチューブ 11 の内部にガス導入管 22 から導入される。同時に、冷却ガス 90 が吸気管 101 からチェックダンパ 104 を介してガス流路 107 に供給される。そして、複数の冷却ガス供給口としての開口穴 110 から内部空間 75 に吹出する。そして、開口穴 110 から内部空間 75 に吹き出した冷却ガス 90 は排気孔 81、排気ダクト 82 及び排気ファン 84 を介して排気される。

[0149] ステップ S5 では、基板への処理終了後に、炉内温度を温度 T1 から再び比較的低い温度 T0 まで速やかに降温（降下）させる。このとき、制御部 200 は、排気ファン 84 の駆動を開始（オン）するとともに、排気ファン 84 のオン信号に関する情報を、冷却制御部 300 の排気履歴記憶部 355 に通知する。そして、冷却制御部 300 による制御により、冷却バルブ 102 の開度を調整して所望の温度軌跡を得るように制御する。このとき、温度制御部 64 による温度制御は行わず、ヒータユニット 40 に出力される供給電力を零とする。すなわち、温度制御部 64 は、各制御ゾーンの発熱体 56 に出力される電力供給値を零にするように構成される。

[0150] 以上の冷却ガス 90 の流れにより、ヒータユニット 40 全体が強制的に冷却されるために、断熱構造体 42 はプロセスチューブ 11 と共に大きいレート（速度）をもって急速に冷却されることになる。なお、内部空間 75 は処理室 14 から隔離されているために、冷却ガス 90 を使用することができる

。しかし、冷却効果をより一層高めるためや、ガス内の不純物による高温下での発熱体５６の腐蝕を防止するために、窒素ガス等の不活性ガスを冷却ガスとして使用してもよい。

[0151] 処理室１４の温度が目標温度Ｔ０に下降すると、ステップＳ６において、シールキャップ２５に支持されたボート３１はボートエレベータ２６によって下降されることにより、処理室１４から搬出（ボートアンローディング）される。このとき、制御部２００は、排気ファン８４の駆動をオフとするとともに、排気ファン８４のオフ信号に関する情報を、冷却制御部３００の排気履歴記憶部３５５に通知する。また、このとき冷却制御部３００による温度制御は行われず、冷却バルブ１０２を閉塞する。

[0152] そして、処理を施すべき未処理のウエハ１が残っている場合には、ボート３１上の処理済ウエハ１が未処理のウエハ１と入れ替えられ、これらステップＳ１～Ｓ６の一連の処理が繰り返される。

[0153] 上述したステップＳ１～Ｓ６の処理は、いずれも目標温度に対し、炉内温度が予め定められた微小温度範囲にあり、且つ予め定められた時間以上その状態が続くといった安定状態を得た後、次のステップへ進むようになっている。そのため、例えばステップＳ３の昇温ステップにおいて速やかに炉内温度を目標温度Ｔ１へ収束させることが重要な制御性能指標となる。

[0154] また、ボート３１に保持された複数のウエハ１に同じ処理を施すため、これらのステップでは、複数の制御ゾーンの炉内温度が略同一の温度軌跡を経ることが求められる。そのため、複数の制御ゾーンの炉内温度のうち最大値から最小値を差し引いた値（以下、ゾーン間温度偏差と記す）を小さくすることが重要な制御性能指標となる。

[0155] 本開示による冷却制御部３００によれば、ゾーン間偏差を小さくすることができる。また、ヒータの個々の温度特性のばらつきが大きい場合や、担当エンジニアが十分に時間を得られない場合でも、熱特性を自動で取得することができ、パラメータ調整なく、または、容易にパラメータ調整して最適な制御方法を得ることができる。そのため、期待する装置の性能を容易に得

ることができる。また、本開示による冷却制御部 300 によれば、急冷開始時の微小時間における排気ファン 84 の動作による炉内雰囲気中の排気の影響を考慮することにより、急冷開始時のゾーン間の温度誤差が改良され、温度制御性が向上される。

[0156] [実施例 1]

次に、本開示の冷却制御部 300 を上述の降温ステップ（ステップ S5）に適用した場合の実施例 1 について図 14（A）及び図 14（B）を用いて説明する。

[0157] 図 14（A）は、比較例に係る冷却制御部 300 を上述した図 11 におけるステップ S5 に適用した場合の各ゾーンの炉内温度軌跡を示した図である。図 14（B）は、本実施例に係る冷却制御部 300 を上述した図 11 におけるステップ S5 に適用した場合の各ゾーンの炉内温度軌跡を示した図である。比較例に係る冷却制御部は、基準ゾーン以外の熱電対により検出された温度を基準ゾーンの熱電対により検出された温度との偏差が零になるように冷却バルブ 102 の開度を制御するものである。

[0158] 図 14（A）に示す比較例に係る温度制御によるゾーン間温度偏差と、図 14（B）に示す本実施例に係る温度制御によるゾーン間温度偏差を比較すると、本実施例に係る温度制御を行うことにより、ゾーン間温度偏差を小さくできることが確認された。なお、図 14 では、図 3 に示す L2～U1 ゾーンの炉内温度を実際に比較した。

[0159] [実施例 2]

次に、本開示の冷却制御部 300 を、上述した図 11 におけるステップ S5 の降温ステップに適用した場合の実施例 2 について図 15（A）及び図 15（B）を用いて説明する。

[0160] 図 15（A）は、本実施例に係る冷却制御部 300 において排気ファン 84 の情報を用いずに急冷予測モデルを使用する温度制御を行った場合の炉内温度の実測値と予測温度とそれらの誤差である予測モデル誤差を示した図である。図 15（B）は、本実施例に係る冷却制御部を用いて温度制御を行

った場合の炉内温度の実測値と予測温度とそれらの誤差である予測モデル誤差を示した図である。

[0161] 図15(A)及び図15(B)に示すように、排気ファン84の情報を用いた急冷予測モデルを使用する温度制御を行うことにより、排気ファン84の情報をを用いないで急冷予測モデルを使用する温度制御を行う場合と比較して、急冷実測値と予測温度の誤差が小さくなり、予測モデル誤差が小さくなることが確認された。特に、急冷開始時の予測モデル誤差を小さくすることができ、温度制御性が向上することが確認された。

[0162] 以上、本開示の実施形態を具体的に説明したが、本開示は上述の実施形態及び実施例に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能である。

[0163] なお、上述した実施形態では、ステップS5において急冷予測モデルを使用する温度制御を行うことを記載しているが、他のステップにおいても同様に予測モデルを用いた温度制御を行っていてもよい。例えば、ステップS4において、温度制御部64が、所定の制御周期で、ヒータ温度又は炉内温度及び電力供給値を取得し、記憶部205に記憶された予測モデルを使用して、最終目標温度と予測温度とのズレが最小となるように、発熱体56に出力される電力供給値を調整するよう制御することにより、炉内温度を目標温度T1で維持して安定させるようにしてもよい。

[0164] なお、上述した実施形態では、温度制御部64と冷却制御部300とをそれぞれ別に設ける例について説明したが、本開示は、これに限定されず、温度制御部64と冷却制御部300とを1つの制御部にしてもよい。

[0165] また、上述の実施形態では、ウエハ200上に所定の膜を形成させる例について説明したが、本開示は、膜種は特に限定されない。例えば、ウエハ200上に窒化膜(SiN膜)や金属酸化膜等、様々な膜種を形成させる場合にも、好適に適用可能である。

[0166] また、上述の実施形態に係る基板処理装置のような半導体ウエハを処理する半導体製造装置などに限らず、ガラス基板を処理するLCD(Liquid Cry

tal Display) 製造装置にも適用することができる。

符号の説明

[0167]	1	ウエハ（基板）
	4 0	ヒータユニット
	8 4	排気ファン
	3 0 0	冷却制御部
	3 0 1	クーリングユニット

請求の範囲

- [請求項1] 基板を処理する処理室を内部に構成する反応管と、
 前記反応管の外側に設けられ、前記基板を加熱する加熱部を有するヒータユニットと、
 前記ヒータユニットと前記反応管との間の空間に冷却媒体を供給する冷却バルブを有するクーリングユニットと、
 前記クーリングユニットに前記冷却媒体を供給する排気ファンと、
 前記排気ファンの情報、将来の目標となる最終目標温度、前記冷却バルブの開度をそれぞれ含み、前記加熱部の温度、及び前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を推測する予測モデルを取得し、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度、前記冷却バルブの開度、前記排気ファンの情報をそれぞれ取得して前記予測モデルに従って算出される予測温度列と現在の目標温度から前記最終目標温度まで変化するときの変化の割合により算出される目標温度列との誤差が最小となるように、前記冷却バルブの開度を調整する冷却制御部と、
 を有するよう構成されている基板処理装置。
- [請求項2] 前記冷却制御部は、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度を記憶する温度履歴記憶部と、前記排気ファンのオンオフ信号を記憶する排気履歴記憶部と、前記冷却バルブへ出力する開度情報を記憶するバルブ開度履歴記憶部と、を有し、前記温度履歴記憶部、前記排気履歴記憶部及び前記バルブ開度履歴記憶部は、一定期間、各データを記憶するよう構成されている請求項1記載の基板処理装置。
- [請求項3] 前記冷却制御部は、前記予測モデルを取得すると共に、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度の過去の温度データ、前記排気ファンの過去のオンオフのデータ、前記冷却バルブの過去の開度データを取得し、個別入力応答特性行列

と個別ゼロ応答特性ベクトルを算出する作成部を更に有する請求項 1 記載の基板処理装置。

[請求項4] 前記予測モデルは、前記予測温度を計算する数式であり、次の式 1 で表される請求項 1 記載の基板処理装置。

[数1]

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) = & y(t-1) + a_1 \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_a(t-1) + a_2 \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_a(t-2) + \cdots \\ & + a_n \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_a(t-n) \\ & + b_1 \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_b(t-1) + b_2 \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_b(t-2) + \cdots + b_n \\ & \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_b(t-n) \\ & + c_1 \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_c(t-1) + c_2 \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_c(t-2) + \cdots + c_n \\ & \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot V_c(t-n) \\ & + d \cdot \{y(t-1) - y_0\} \cdot \{f(t-1) + \cdots + f(t-m)\} / m \quad \cdots (式1) \end{aligned}$$

[数2]

ここで、 $\hat{y}(t)$ は、時刻 t の予測温度、 $y(t-1)$ は、1 回前の温度、 $V_a(t-1), V_a(t-2), \cdots, V_a(t-n)$ は、1 回前、2 回前、 $\cdots$ 、 n 回前の当該冷却ゾーンの開度、 $V_b(t-1), V_b(t-2), \cdots, V_b(t-n)$ は、1 回前、2 回前、 $\cdots$ 、 n 回前の当該ゾーンの一方に隣接するゾーンの開度、 $V_c(t-1), V_c(t-2), \cdots, V_c(t-n)$ は、1 回前、2 回前、 $\cdots$ 、 n 回前の当該ゾーンの他方に隣接するゾーンの開度、 $f(t-1), f(t-2), \cdots, f(t-m)$ は、1 回前、2 回前、 $\cdots$ 、 m 回前の排気ファンのオンオフのデータであり、 y_0 は、基準温度、 n 、 m 値は、予め任意に設定される値であり、 $a_1, \cdots, a_n, b_1, \cdots, b_n, c_1, \cdots, c_n, d$ は、それぞれ所定の係数である。

[請求項5] 前記基準温度 y_0 は、室温付近の 20°C 以上 30°C 以下の範囲内の温度であり、

前記 n 、 m 値は、必要な過去データ数である請求項 4 記載の基板処理装置。

[請求項6] 前記作成部は、次の式 3 で表される式を作成する請求項 3 記載の基板処理装置。

[数3]

$$\hat{y}(t) = S_{zr} + S_{sr} \cdot u(t) \quad \cdots (式3)$$

[数4]

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+1) \\ \hat{y}(t+2) \\ \hat{y}(t+3) \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{zr} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^4 \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t-1) + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^3 \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}(t-1),$$

$$\mathbf{S}_{sr} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \\ \sum_{i=0}^1 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ \sum_{i=0}^2 \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{B} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

式3の、 $\mathbf{S}_{zr}$ は個別ゼロ応答特性ベクトル、 $\mathbf{S}_{sr}$ は個別入力応答特性行列である。 $\hat{\mathbf{y}}(t)$ は予測温度ベクトルである。

[請求項7]

前記個別ゼロ応答特性ベクトル $\mathbf{S}_{zr}$ は、前記予測温度ベクトルのうち過去の温度と過去の開度に影響されて変化する量を示し、前記個別入力応答特性行列 $\mathbf{S}_{sr}$ は、前記予測温度ベクトルのうち今回算出した開度に影響されて変化する量を示す請求項6記載の基板処理装置。

[請求項8]

前記冷却制御部は、次の式4で示される個別目標温度列ベクトル $\mathbf{S}_{tg}$ を算出する目標温度列作成部を更に有し、

前記目標温度列作成部は、目標温度、現在の目標温度および現在の目標温度から最終目標温度まで変化する時の変化の割合から前記個別目標温度列ベクトル $\mathbf{S}_{tg}$ を算出するよう構成されている請求項6記載の基板処理装置。

[数5]

$$\mathbf{S}_{tg}(t) = \begin{bmatrix} S_{tg}(t+1) \\ S_{tg}(t+2) \\ S_{tg}(t+3) \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \dots \quad (\text{式4})$$

式4の時刻 t および行数は、式3の時刻 t および行数と対応する。

[請求項9]

前記目標温度列作成部は、前記目標温度と前記現在の目標温度のランピング温度偏差を算出し、前記ランピング温度偏差の絶対値を前記変化の割合で除算し、

前記変化の割合が零の場合、次の式で基準設定値を算出し、

基準設定値＝現在の目標温度＋ランピング温度偏差×（１－e×p
（経過時間÷（ランピング時間÷時定数））

前記変化の割合が零以外の場合、次の式で基準設定値を算出し、
基準設定値＝現在の目標温度＋ランピング温度偏差×（１－e×p
（経過時間÷（ランピング時間））

前記基準設定値に従い前記個別目標温度列ベクトル S_{tg} を算出する
請求項８記載の基板処理装置。

[請求項10] 前記冷却制御部は、前記個別入力応答特性行列 S_{sr} と、前記個別ゼロ
応答特性ベクトル S_{zr} と、前記個別目標温度列ベクトル S_{tg} から、
所定の方程式を作成する統合特性作成部を更に有し、

前記統合特性作成部は、前記個別入力応答特性行列 S_{sr} を次の式で
示される個別入力応答特性行列 S_{dsr} に変換するように構成されている
請求項８記載の基板処理装置。

[数6]

$$S_{dsr} = \begin{bmatrix} C \cdot B \\ C \cdot A \cdot B + C \cdot B \\ \sum_{i=0}^2 C \cdot A^i \cdot B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{Np-1} C \cdot A^i \cdot B \end{bmatrix}$$

[請求項11] 前記統合特性作成部は、前記個別ゼロ応答特性ベクトル S_{zr} と前記
個別入力応答特性行列 S_{dsr} と前記個別目標温度列ベクトル S_{tg} をそれ
ぞれ前記制御対象となる全冷却ゾーンに並べて、統合入力応答特性行
列 U_{dsr} 、統合ゼロ応答特性ベクトル U_{zr} を含む予測温度列と、統合目
標温度ベクトル U_{tg} を含む目標温度列をそれぞれ作成するように構成
されている請求項１０記載の基板処理装置。

[請求項12] 前記冷却制御部は、前記目標温度列と前記予測温度列の誤差の２乗
を示す評価関数を作成し、前記評価関数が最小となるように所定の連
立方程式を計算する計算部を更に有し、

前記計算部は、前記所定の連立方程式を解くことにより、前記予測温度列の解に含まれる前記冷却バルブの開度を取得するように構成されている請求項 1 1 に記載の基板処理装置。

[請求項13] 前記冷却制御部は、所定の制御周期で、前記計算部から取得した前記冷却バルブへの開度に更新する開度信号供給部を有するように構成されている請求項 1 2 に記載の基板処理装置。

[請求項14] 前記ヒータユニットは、複数の制御ゾーンに分割され、各制御ゾーンの温度を検出する温度センサが設けられ、

前記クーリングユニットは、複数の冷却ゾーンに分割され、各冷却ゾーンに前記冷却バルブがそれぞれ設けられる請求項 1 に記載の基板処理装置。

[請求項15] 各冷却ゾーンの加熱部の温度、および、処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度の予測温度を予測する予測モデルは、各々の温度帯に対応している請求項 1 4 に記載の基板処理装置。

[請求項16] 基板を処理する処理室を内部に構成する反応管と、
前記反応管の外側に設けられ、前記基板を加熱する加熱部を有するヒータユニットと、
前記ヒータユニットと前記反応管との空間に冷却媒体を供給する冷却バルブを有するクーリングユニットと、
前記クーリングユニットに前記冷却媒体を供給する排気ファンと、
を備えた基板処理装置において実行される温度制御プログラムであって、

前記排気ファンの情報、将来の目標となる最終目標温度、前記冷却バルブの開度をそれぞれ含み、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を推測する予測モデルを取得する手順と、

前記加熱部の温度、および、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度、前記温度比率、前記冷却バルブの開度、前記排気

ファンの情報をそれぞれ取得する手順と、

前記予測モデルに従って算出される予測温度列と現在の目標温度から前記最終目標温度まで変化するときの変化の割合より算出される目標温度列との誤差が最小となるように前記冷却バルブの開度を調整する手順と、

を前記基板処理装置に実行させる温度制御プログラム。

[請求項17]

基板を処理する処理室の温度を所定の温度から処理温度に昇温させる工程と、前記処理温度に維持し前記基板を処理する処理工程と、前記処理工程後、前記処理室の温度を前記処理温度から降温させる工程と、を有する半導体装置の製造方法であって、

前記処理室の温度を降温させる工程では、

加熱部の温度、および、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度、冷却バルブの開度、排気ファンの情報をそれぞれ取得する工程と、

前記排気ファンの情報、将来の目標となる最終目標温度、前記冷却バルブの開度をそれぞれ含み、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を推測する予測モデルに従って算出される予測温度列と現在の目標温度から前記最終目標温度まで変化するときの変化の割合より算出される目標温度列との誤差が最小となるように前記冷却バルブの開度を調整する工程と、

を有する半導体装置の製造方法。

[請求項18]

前記処理室の温度を降下させる工程では、前記加熱部から出力される電力供給値を零にするように構成される請求項17記載の半導体装置の製造方法。

[請求項19]

加熱部の温度、および、処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度、冷却バルブの開度、排気ファンの情報をそれぞれ取得する工程と、

前記排気ファンの情報、将来の目標となる最終目標温度、前記冷却バルブの開度をそれぞれ含み、前記加熱部の温度、及び、前記処理室の温度のうち少なくともいずれか一つの温度を予測する予測温度を推測する予測モデルに従って算出される予測温度列と現在の目標温度から前記最終目標温度まで変化するときの変化の割合より算出される目標温度列との誤差が最小となるように前記冷却バルブの開度を調整する工程と、
を有する温度制御方法。