(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2017-227393
(P2017-227393A)
(43)公開日　平成29年12月28日(2017.12.28)

(51)Int.Cl.		F I		テーマコード（参考）
F22G 5/12	(2006.01)	F22G	5/12	B

審査請求 未請求　請求項の数 8　ＯＬ　（全 16 頁）

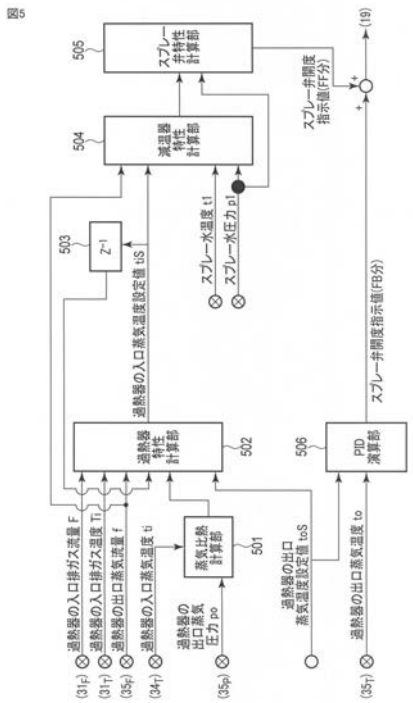
(21)出願番号　特願2016-124300 (P2016-124300)
(22)出願日　平成28年6月23日 (2016.6.23)

(71)出願人　000003078
株式会社東芝
東京都港区芝浦一丁目１番１号
(74)代理人　100108855
弁理士　蔵田　昌俊
(74)代理人　100103034
弁理士　野河　信久
(74)代理人　100075672
弁理士　峰　隆司
(74)代理人　100153051
弁理士　河野　直樹
(74)代理人　100179062
弁理士　井上　正
(74)代理人　100189913
弁理士　鵜飼　健

最終頁に続く

(54)【発明の名称】蒸気温度制御装置、蒸気温度制御方法、および発電システム

(57)【要約】
【課題】排熱回収ボイラ内に設置された過熱器における蒸気温度を適切に制御する。
【解決手段】実施形態における蒸気温度制御装置は、蒸気を発生させるボイラ内に設置された過熱器の出口蒸気温度の測定値が出口蒸気温度設定値に一致するように、前記過熱器の上流側に設置されて当該過熱器に供給される蒸気を冷却する減温器に供給する水の流量に関する第１指示値を演算するフィードバック制御部と、前記出口蒸気温度が変動する要因に基づいて前記減温器に供給する前記水の前記流量に関する第２指示値を演算するフィードフォワード制御部と、前記第１指示値と前記第２指示値を加算する加算器とを有する。
【選択図】図５



【特許請求の範囲】
【請求項１】
蒸気を発生させるボイラ内に設置された過熱器の出口蒸気温度の測定値が出口蒸気温度設定値に一致するように、前記過熱器の上流側に設置されて当該過熱器に供給される蒸気を冷却する減温器に供給する水の流量に関する第１指示値を演算するフィードバック制御部と、
前記出口蒸気温度が変動する要因に基づいて前記減温器に供給する前記水の前記流量に関する第２指示値を演算するフィードフォワード制御部と、
前記第１指示値と前記第２指示値を加算する加算器と
を備えることを特徴とする蒸気温度制御装置。
【請求項２】
前記要因には、前記過熱器を通過する排ガスの流量および前記過熱器に供給される蒸気の流量が含まれる
ことを特徴とする請求項１記載の蒸気温度制御装置。
【請求項３】
前記フィードフォワード制御部は、
前記要因に基づいて前記過熱器の入口蒸気温度に関する入口蒸気温度設定値を演算する過熱器特性計算部と、
前記入口蒸気温度設定値に基づいて前記第２指示値を演算する減温器特性計算部と
を備えることを特徴とする請求項１または請求項２記載の蒸気温度制御装置。
【請求項４】
前記過熱器特性計算部は、前記過熱器における熱交換量の繰り返し演算および前記入口蒸気温度設定値の繰り返し演算をそれぞれ実行可能に構成され、かつ、
前記熱交換量の繰り返し演算を演算周期の１回ごとに実行するとともに、前記入口蒸気温度設定値の繰り返し演算を前記演算周期の複数回に亘って実行するように構成されることを特徴とする請求項３記載の蒸気温度制御装置。
【請求項５】
前記過熱器特性計算部は、前記要因の静特性に基づいて前記入口蒸気温度設定値を演算することを特徴とする請求項３または請求項４のいずれか１項に記載の蒸気温度制御装置。
【請求項６】
前記過熱器特性計算部は、前記要因の前記静特性および動特性に基づいて前記入口蒸気温度設定値を演算することを特徴とする請求項５記載の蒸気温度制御装置。
【請求項７】
蒸気を発生させるボイラ内に設置された過熱器の出口蒸気温度の測定値が出口蒸気温度設定値に一致するように、前記過熱器の上流側に設置されて当該過熱器に供給される蒸気を冷却する減温器に供給する水の流量に関する第１指示値を演算し、
前記出口蒸気温度が変動する要因に基づいて前記減温器に供給する前記水の前記流量に関する第２指示値を演算し、
前記第１指示値と前記第２指示値を加算して前記減温器に供給する前記水の前記流量を調整する
ことを特徴とする蒸気温度制御方法。
【請求項８】
過熱器と、当該過熱器の上流側に配置されて当該過熱器に供給される蒸気を冷却する減温器とを備えるボイラと、
前記ボイラの前記過熱器からの前記蒸気により駆動される蒸気タービンと、
前記蒸気タービンを駆動する前記蒸気の蒸気温度を制御する蒸気温度制御装置を備え、
前記蒸気温度制御装置は、
前記過熱器の出口蒸気温度の測定値が出口蒸気温度設定値に一致するように、前記減温器に供給する水の流量に関する第１指示値を演算するフィードバック制御部と、

前記出口蒸気温度が変動する要因に基づいて前記減温器に供給する前記水の前記流量に関する第２指示値を演算するフィードフォワード制御部と、
前記第１指示値と前記第２指示値を加算する加算器と
を備えることを特徴とする発電システム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明の実施形態は、蒸気温度制御装置、蒸気温度制御方法、および発電システムに関する。
【背景技術】
【０００２】
コンバインドサイクル型の火力発電システムにおけるガスタービン排ガスの高温化、温度変化の急峻化に伴い、排熱回収ボイラにおける温度制御が困難になる傾向がみられている。この対策として、排熱回収ボイラ内に設置された過熱器の出口における蒸気温度を予測し、この予測値に基づいて過熱器の間に設けられた減温器の制御を行う方法がある。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００３】
【特許文献１】特開２０１６－０５７０２６号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
しかしながら、過熱器の出口における蒸気温度を予測し、この予測値に基づいて減温器の制御を行う方法では、制御装置における予測値の演算に多くのコストがかかり、単一の演算周期内に予測演算が終了しない場合がある。これを避けるためには、制御装置における予測演算以外の演算を削減するか、より高性能な制御装置を導入する必要がある。
【０００５】
本発明が解決しようとする課題は、排熱回収ボイラ内に設置された過熱器における蒸気温度を適切に制御することが可能な蒸気温度制御装置、蒸気温度制御方法、および発電システムを提供することである。
【課題を解決するための手段】
【０００６】
一の実施形態によれば、蒸気温度制御装置は、蒸気を発生させるボイラ内に設置された過熱器の出口蒸気温度の測定値が出口蒸気温度設定値に一致するように、前記過熱器の上流側に設置されて当該過熱器に供給される蒸気を冷却する減温器に供給する水の流量に関する第１指示値を演算するフィードバック制御部と、前記出口蒸気温度が変動する要因に基づいて前記減温器に供給する前記水の前記流量に関する第２指示値を演算するフィードフォワード制御部と、前記第１指示値と前記第２指示値を加算する加算器とを有する。
【発明の効果】
【０００７】
本発明によれば、排熱回収ボイラ内に設置された過熱器における蒸気温度を適切に制御することができる。
【図面の簡単な説明】
【０００８】
【図１】第１の実施形態における発電システムの構成例を示す模式図。
【図２】第１の実施形態における発電システムの排熱回収ボイラの出口蒸気温度の制御装置の基本的な構成例を示す図。
【図３】第１の実施形態における発電システムの、熱交換量により定まる、第２過熱器の入口蒸気温度の設定値を求める手順の一例を示すフローチャート。
【図４】第１の実施形態における発電システムの、熱交換量により定まる、第２過熱器の

入口蒸気温度の設定値を求めるためのタイミングチャートの一例を示す図。
【図５】第１の実施形態における発電システムの、排熱回収ボイラの出口蒸気温度の制御装置の具体的な構成例を示す図。
【図６】第１の実施形態における発電システムの、排ガス温度が変化した場合の時間方向の変化の一例を示す図。
【図７】第２の実施形態における発電システムの、排熱回収ボイラの出口蒸気温度の制御装置の具体的な構成例を示す図。
【図８】第２の実施形態における発電システムの、排ガス温度が変化した場合の時間方向の変化の一例を示す図。
【発明を実施するための形態】
【０００９】
以下、実施形態について図面を用いて説明する。
（第１の実施形態）
図１は、第１の実施形態における発電システムの構成例を示す模式図である。図１の発電システムは、排熱回収方式によるコンバインドサイクル型の火力発電システムである。
【００１０】
図１の発電システムは、ガスタービン１と、圧縮機２と、第１発電機３と、排ガス配管４と、排熱回収ボイラ５と、ドラム１１と、下降管１２と、蒸発器１３と、第１蒸気配管１４と、第１過熱器１５と、減温器１６と、第２蒸気配管１７と、第２過熱器１８と、減温器バルブ１９と、制御装置２０と、主蒸気配管２１と、主蒸気弁２２と、バイパス配管２３と、バイパス弁２４と、蒸気タービン２５と、第２発電機２６とを備えている。制御装置２０は、蒸気温度制御装置の例である。
【００１１】
図１の発電システムはさらに、排ガス配管４上に設けられた流量計31_Fおよび温度計31_Tと、ドラム１１に設けられた圧力計32_Pと、第１蒸気配管１４上に設けられた温度計33_Tと、第２蒸気配管１７上に設けられた温度計34_Tと、主蒸気配管２１上に設けられた流量計35_F、温度計35_T、および圧力計35_Pと、蒸気タービン２５用の回転数計測器３６と、第２発電機２６用の電気出力計測器３７とを備えている。
【００１２】
図１の発電システムでは、圧縮機２により圧縮された空気によりガスタービン１が回転し、この回転を利用して第１発電機３が発電を行う。ガスタービン１から排出された排ガスは、排ガス配管４を介して排熱回収ボイラ５に送られる。排熱回収ボイラ５に送られた排ガスは、排熱回収ボイラ５内に設置された第２過熱器１８、第１過熱器１５、蒸発器１３の順でその熱が利用され、排熱回収ボイラ５から排出される。
【００１３】
一方、ドラム１１内の水は、下降管１２を介して排熱回収ボイラ５内の蒸発器１３に送られ、蒸発器１３内で排ガスの熱により加熱されることで、飽和水蒸気となる。この蒸気は、第１蒸気配管１４を介して排熱回収ボイラ５内の第１過熱器１５に送られ、第１過熱器１５で過熱された後、減温器１６で冷却される。減温器１６で冷却された蒸気は、第２蒸気配管１７を介して排熱回収ボイラ５内の第２過熱器１８に送られ、第２過熱器１８で再び過熱される。制御装置２０は、蒸気冷却用の水を減温器１６に供給するための減温器バルブ１９の開度を調整して、減温器１６での蒸気の冷却量を調整することで、第２過熱器１８の出口蒸気温度を設定値に制御することができる。
【００１４】
第２過熱器１８で過熱された蒸気（主蒸気）は、主蒸気配管２１を介して蒸気タービン２５に送られる。図１の発電システムでは、蒸気タービン２５が主蒸気により回転し、この回転を利用して第２発電機２６が発電を行う。バイパス配管２３は、蒸気タービン２５の上流で主蒸気配管２１から分岐している。主蒸気配管２１の主蒸気流量は、主蒸気配管２１上の主蒸気弁２２の開度が制御装置２０により調整されることで、目標値に制御される。また、蒸気タービン２５の入口蒸気圧力は、バイパス配管２３上のバイパス弁２４の

開度が制御装置２０により調整されることで、目標値に制御される。

【００１５】

制御装置２０は、主蒸気配管２１の主蒸気流量の調整により、蒸気タービン２５の回転数を制御し、これにより第２発電機２６の電気出力を制御する。なお、蒸気タービン２５の回転数は、回転数計測器３６により計測され、第２発電機２６の電気出力は、電気出力計測器３７により計測される。

【００１６】

また、本実施形態の第２過熱器１８は、複数の熱交換器で構成されている。これらの熱交換器の各々は、蒸気と排ガスとの間の熱交換を行う。その結果、排ガスから蒸気に熱が移動することで、蒸気が加熱され、排ガスが冷却される。

【００１７】

よって、ガスタービン１からみた第２過熱器１８の出口排ガス温度（第２過熱器１８の排ガスの出口における当該排ガスの温度）は、ガスタービン１からみた第２過熱器１８の入口排ガス温度（第２過熱器１８の排ガスの入口における当該排ガスの温度）よりも低下する。第２過熱器１８の入口排ガス温度は、排ガス配管４上の温度計31_Tにより測定される。また、第２過熱器１８の出口排ガス温度は、第２過熱器１８内での蒸気と排ガスとの熱交換により決まる。なお、第２過熱器１８内の排ガスの流量は、排ガス配管４上の流量計31_Fにより測定される。

【００１８】

一方、減温器１６からみた第２過熱器１８の出口蒸気温度（第２過熱器１８の蒸気の出口における当該蒸気の温度）は、減温器１６からみた第２過熱器１８の入口蒸気温度（第２過熱器１８の蒸気の入口における当該蒸気の温度）よりも上昇する。第２過熱器１８の入口蒸気温度は、第２蒸気配管１７上の温度計34_Tにより測定される。また、第２過熱器１８の出口蒸気温度は、主蒸気配管２１上の温度計35_Tにより測定される。この、第２過熱器１８の出口蒸気温度は、第２過熱器１８内での蒸気と排ガスとの熱交換により決まる。なお、第２過熱器１８内の蒸気流量は、主蒸気配管２１上の流量計35_Fにより測定される。

【００１９】

第２過熱器１８の出口蒸気温度は、それぞれの熱交換器等の金属部分を保護するために、所定の温度以下に制御する必要がある。一方、第２過熱器１８の出口蒸気温度が高いほど、第２発電機２６の発電効率は高くなる。そのため、第２過熱器１８の出口蒸気温度は、高温で一定値に維持されることが望ましい。

【００２０】

減温器１６は、蒸気に液相の水を加えることで、蒸気を冷却する。本実施形態の発電システムは、減温器１６による蒸気の温度低下と、第２過熱器１８による蒸気の温度上昇とのバランスにより、第２過熱器１８の出口蒸気温度を制御する。第２蒸気配管１７上の温度計34_Tは、減温器１６により冷却された後かつ第２過熱器１８により加熱される前の蒸気の温度を測定する。

【００２１】

第２過熱器１８の出口蒸気温度は、減温器１６での蒸気の冷却量を調整することで制御される。また、減温器１６での蒸気の冷却量は、減温器１６で蒸気に加える水の量により制御される。よって、第２過熱器１８の出口蒸気温度は、減温器１６に水を供給する配管に設けられた減温器バルブ１９の開度を調整することで制御可能である。すなわち、減温器バルブ１９の開度は、減温器１６に供給する水の流量に基づいて定まり、減温器１６に供給する水の流量に関する値をとる。

【００２２】

減温器バルブ１９の開度が増加すると、減温器１６で蒸気に加える水の流量（スプレー流量）が増加し、第２過熱器１８の出口蒸気温度が低下する。一方、減温器バルブ１９の開度が減少すると、減温器１６で蒸気に加える水の流量が減少し、第２過熱器１８の出口蒸気温度が上昇する。

【００２３】
制御装置２０は、減温器バルブ１９の開度の指令値Ｚを含む開度指令を出力する。この開度指令は減温器バルブ１９に供給され、その結果、減温器バルブ１９の開度が指令値Ｚに調整される。
【００２４】
次に、本実施形態の発電システムにおける制御方法と制御対象の関係について示す。制御装置２０は、排熱回収ボイラ５の出口における蒸気温度と主蒸気圧力とが設定値になるように制御する蒸気温度制御機能および蒸気圧力制御機能を有する。また、制御装置２０は、通常ＭＷ（メガワット）出力と呼ばれる、第２発電機２６の電気出力が設定値になるように、主蒸気弁２２の開度を制御する。この制御された主蒸気弁２２の開度により、主蒸気流量が定まり、蒸気タービン２５の回転数と第２発電機２６の電気出力とが決まる。
【００２５】
蒸気タービン２５の入口における主蒸気圧力は、制御装置２０が有する蒸気圧力制御機能により、設定値になるように制御される。制御装置２０が、主蒸気弁２２とは別のバイパス弁２４に対して開度指令値を出力することで、バイパス弁２４における蒸気流量が調整され、蒸気タービン２５の入口における主蒸気圧力が制御される。
【００２６】
図２は、第１の実施形態における発電システムの排熱回収ボイラの出口蒸気温度の制御装置の基本的な構成例を示す図である。図２で用いる記号の意味は以下のとおりである。
【００２７】
Ｃ１（ｓ）：フィードバック特性
Ｇ１（ｓ）：第１のプラント特性
Ｃ２（ｓ）：フィードフォワード特性
Ｇ２（ｓ）：第２のプラント特性
ＳＶ：設定値（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に関する制御設定値）
ＰＶ：外乱を含むプロセス値（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に関する測定値）
ｕ：操作量（スプレー弁開度（減温器バルブ１９の開度））
ｙ：外乱を含まないプロセス値（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度）
ｙ２：外乱のプロセス値（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度のうち外乱分）
ｄ：外乱（排ガス温度変化、排ガス流量変化、蒸気流量変化など）
上記の記号の意味の説明における括弧内で示した内容は、排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度制御の場合の具体例を示す。
【００２８】
まず、外乱ｄが発生していない場合を考える。ここで、外乱ｄは、排ガス温度、排ガス流量、蒸気流量等が変化することであり、出口蒸気温度が変動する要因となる。
第１プラント特性Ｇ１（ｓ）は、外乱ｄである排ガス温度変化、排ガス流量変化、蒸気流量変化等が発生していない場合において、操作量ｕであるスプレー弁開度から、外乱を含まないプロセス値ｙである排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度までの動特性を示す。
外乱ｄが発生していないため、外乱のプロセス値ｙ２＝０となり、外乱を含むプロセス値ＰＶ（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に関する測定値）は、外乱を含まないプロセス値ｙと同一である。
外乱を含むプロセス値ＰＶ（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に関する測定値）と設定値ＳＶとに差異がある場合は、フィードバック特性Ｃ１（ｓ）の入力が変化し、操作量ｕであるスプレー弁開度が変化し、フィードバック特性Ｃ１（ｓ）が適切に設定されている場合、一定時間後に、外乱を含むプロセス値ＰＶが設定値ＳＶに一致する。
【００２９】
次に、外乱ｄが発生している場合を考える。第２プラント特性Ｇ２（ｓ）は、外乱ｄが、外乱を含むプロセス値ＰＶ（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に関する測定値）に与える影響である。
外乱ｄが発生すると、第２プラント特性Ｇ２（ｓ）の影響を受けて、外乱を含むプロセ

ス値ＰＶ（排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に関する測定値）が変動する。

【００３０】

ここで、第２プラント特性Ｇ２（ｓ）の入力である外乱ｄが測定可能であって、図２中に点線で示すフィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）が存在する場合を想定する。

図２に示したＧ１（ｓ）、Ｃ２（ｓ）、Ｇ２（ｓ）について、Ｇ１（ｓ）Ｃ２（ｓ）＝Ｇ２（ｓ）となるようにフィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）を定めることができれば、（１）外乱ｄにより決まる（外乱のプロセス値）ｙ２の変化と、（２）フィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）による操作量ｕの変化により発生する、外乱ｄを含まないプロセス値ｙの変化とが同一となり、外乱を含むプロセス値ＰＶは変動しない。

【００３１】

フィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）の設定方法の一例について説明する。

フィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）は、排ガス温度変化、排ガス流量変化、蒸気流量変化などである。これらは、図１に示した第２過熱器１８において、排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度に影響する。従って、図１に示した第２過熱器１８にあわせて、フィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）を設定すればよい。

【００３２】

フィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）の一例として、外乱の静特性を模擬する対数平均温度差に基づく熱交換の式（１）を示す。この式（１）は、対数平均温度差ｄＴに基づいて熱交換量Ｑを算出する式である。

【００３３】

Ｑ＝ｈ×ｄＴ　…式（１）

ｄＴ＝{(TH_out －TL_out) －(TH_in －TL_in)}/log((TH_out －TL_out)／(TH_in －TL_in))

ｈ：伝熱係数(W/m^2 K)

TH_out：第２過熱器１８における出口排ガス温度(℃)

TH_in：第２過熱器１８における入口排ガス温度(℃)

TL_in：第２過熱器１８における入口蒸気温度(℃)

TL_out：第２過熱器１８における出口蒸気温度(℃)

同式では、第２過熱器１８における出口排ガス温度と第２過熱器１８における出口蒸気温度とは熱交換量により決まる。また、熱交換量は、第２過熱器１８の出口排ガス温度と第２過熱器１８の出口蒸気温度により変化する。従って、両方を満たすように、熱交換量、第２過熱器１８の出口排ガス温度、第２過熱器１８の出口蒸気温度を定める必要がある。このため、熱交換量を繰り返し算出する必要がある。

【００３４】

以上、フィードフォワード特性のうち、図１に示した第２過熱器１８における熱交換のモデル化について示した。上述したモデルで算出した量は熱交換量Ｑである。

熱交換量Ｑから第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値を算出する方法を示す。この、入口蒸気温度の設定値は、出口蒸気温度の測定値を出口蒸気温度の設定値に一致させるように制御するための値である。

この設定値の算出方法の基本は、第２過熱器１８の出口蒸気温度の設定値から、熱交換量Ｑに相当する分だけ温度を低下させた温度を、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値とする方法である。この式を以下の式（２－１），（２－２）に示す。以下、式（２－１），（２－２）あわせて式（２）と呼ぶことがある。

【００３５】

Tin_set＝Tout_set－ΔＴ　…式（２－１）

ΔＴ＝Ｑ／Ｆｓ／Ｃｓ　…式（２－２）

Ｑ：熱交換量(kW)

Ｆｓ：蒸気の流量(kg/sec)

Ｃｓ：蒸気の比熱(kJ/kg・K)

ΔＴ：第２過熱器１８での温度上昇(℃)

Tin_set：第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値(℃)
Tout_set：第２過熱器１８の出口蒸気温度の設定値(℃)
式（２）では、熱交換量Ｑにより、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setが定まる様子を示している。しかし、式（１）に示すように、熱交換量Ｑは第２過熱器１８の入口蒸気温度により変化する。この、第２過熱器１８の入口蒸気温度は、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setにより決まる。
従って、式（２）で算出した、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setにより熱交換量Ｑが変化するため、式（２）を繰り返し用いて、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを繰り返し演算する必要がある。

【００３６】

結局、熱交換量Ｑを求めるために上記の演算を式（１）に従って繰り返す収束計算を行い、さらに、熱交換量Ｑにより定まる、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを式（２）に従って繰り返す収束計算を行う必要がある。つまり、最終的に第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを求めるためには、熱交換量Ｑを求めるための繰り返し演算と合わせて２重の繰り返し演算を行う必要がある。このため、多くの計算コストがかかり、場合によっては、制御装置２０の１演算周期以内では演算が終了しない虞がある。

【００３７】

ところで、第２過熱器１８の出口蒸気温度の変化の周期は、一般的な制御装置の１演算周期（たとえば２００ミリ秒)よりも十分遅い。従って、第２過熱器１８の出口蒸気温度を制御するためには、制御装置２０がその１演算周期内に第２加熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setの収束計算を終了させる必要はなく、この収束計算を制御装置の複数の演算周期に亘って実施するようにしても構わない。すなわち、本実施形態では、上記の熱交換量Ｑと第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを求めるための２重の繰り返し演算（収束計算）のうち、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを求めるための繰り返し演算（収束計算）を、制御装置の複数の演算周期に亘って実施するように構成している。

【００３８】

一例として、制御装置２０は、熱交換量Ｑを求めるための繰り返し演算を制御装置２０の１演算周期毎に実施し、この熱交換量Ｑにより定まる、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを求めるための繰り返し演算を、制御装置２０の複数演算周期にわたって行なう。これにより、制御装置２０の１演算周期あたりの計算コストを削減することが可能となるので、出口蒸気温度を制御するための演算が制御装置２０の１演算周期以内で終了しないことに起因する問題を回避できる。

【００３９】

上記の演算について説明する。図３は、第１の実施形態における発電システムの、熱交換量により定まる、第２過熱器の入口蒸気温度の設定値を求める手順の一例を示すフローチャートである。
まず、制御装置２０は、初期熱交換量を以下の式（３）に従って設定する（Ｓ３０１）。

Ｑ＝ｈ（Tout_set－Tin）　…式（３）

次に、制御装置２０は、式（２）を用いて第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値を演算する。すなわち、制御装置２０は、第２過熱器１８での温度上昇を式（２－２）に従って算出し（Ｓ３０２）、さらに、第２過熱器１８での入口蒸気温度を式（２－１）に従って算出する（Ｓ３０３）。上記の通り、第２過熱器１８の入口蒸気温度により熱交換量Ｑが変化するため、この時点で算出された第２過熱器１８の入口蒸気温度に対して繰り返し演算（収束計算）を行なう必要があるが、制御装置２０は、この時点で算出された第２過熱器１８の入口蒸気温度を第２過熱器１８の入口蒸気温度設定値Tin_setとして第２過熱器１８での蒸気温度制御に使用する（Ｓ３０４）。
制御装置２０は、蒸気温度制御が終了したかどうかを判断する（Ｓ３０５）。制御終了

、例えば制御対象のプラントの停止信号を受信したときであれば（Ｓ３０５のＹｅｓ）、制御装置２０は演算を終了する。制御終了でなければ（Ｓ３０５のＮｏ）、制御装置２０は、入力条件での熱交換量Ｑを式（１）の繰り返し演算により収束計算する（Ｓ３０６）。その後、制御装置２０は、第２過熱器１８での温度上昇を再度算出する（Ｓ３０６→Ｓ３０２）。この際、Ｓ３０２およびＳ３０３のステップにおいて第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setが式（２）（式（２－１）および式（２－２））によって繰り返して演算され、Ｓ３０４のステップで出力され第２過熱器１８での蒸気温度制御に使用される第２過熱器１８の入口蒸気温度設定値Tin_setの値が変更（修正）される。このようにして、第２加熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setについては、その繰り返し演算である収束計算を制御装置２０の複数の演算周期に亘って実施しながら、入口蒸気温度の設定値Tin_setが収束するまでの間、収束計算が完了する前の暫定的な第２過熱器１８入口の入口蒸気温度設定値を第２過熱器１８での蒸気温度制御に使用する。

【００４０】

さらに、上記のＳ３０１～Ｓ３０４，３０６が発生する順序について説明する。図４は、第１の実施形態における発電システムの、熱交換量により定まる、第２過熱器の入口蒸気温度の設定値を求めるためのタイミングチャートの一例を示す図である。

制御装置２０は、演算周期ａが開始される前に、初期交換熱量を設定する（Ｓ３０１）。制御装置２０は、演算周期ａでＳ３０１～Ｓ３０３の処理を行なう。ここで、制御装置２０は、Ｓ３０３での演算結果を用いて、図４で演算周期ｂとして示した次の演算周期にて、Ｓ３０６の処理を行なう。

結局、制御装置２０は、各演算周期で演算した、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを用いて蒸気温度制御を実施しながら、使用した第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを用いつつ、次の演算周期において、第２過熱器の入口蒸気温度の設定値Tin_setを再度演算する。このように第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを制御装置２０の複数演算周期に亘って繰返し演算することにより最終的に第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setは収束し、第２過熱器１８の入口蒸気温度は設定値に制御される。

【００４１】

なお、各演算周期はそれぞれ一定の周期であってもよいし、不定の周期であってもよい。図３および図４では、各演算周期ａ，ｂ，…，ｎにおいて第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを１回のみ計算している例を示したが、各演算周期ａ，ｂ，…，ｎの少なくともいずれかにおいて第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setを複数回繰り返し演算するように構成してもよい。この場合、例えば演算周期ａやｂにおいては繰り返し演算を２回行なうなど、各演算周期ａ，ｂ，…，ｎでの繰り返し演算の回数を予め与えてもよい。あるいは、繰り返し演算の収束判定に用いる残差の閾値を複数設定し、制御装置２０の演算周期ａ，ｂ，…，ｎが進むにつれて収束判定に用いられる残差の閾値が小さくなるように与えてもよい。さらに、これらを組み合わせて、例えば、最初の演算周期ａでは１回の演算、次の演算周期ｂでは１回繰り返し演算を行ない合計２回の演算、その次の演算周期ｃでは繰り返し演算の結果求まる残差が比較的大きな第１残差閾値を下回るまでの繰り返し演算、そしてその次の演算周期ｄ以降では残差が第１残差閾値よりも小さな第２残差閾値を下回るまでの繰り返し演算、をそれぞれ行わせるように設定してもよい。

【００４２】

このように構成した場合、例えば最初の演算周期（図４における演算周期ａ）においては、Ｓ３０４のステップで出力されて蒸気温度制御に使用される第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setは繰り返し演算が収束した後の収束値に対して比較的大きな残差を含んだ暫定的な値となるが、前述のように、第２過熱器１８の出口蒸気温度の変化の周期は、一般的な制御装置の演算周期（たとえば２００ミリ秒)よりも十分遅く、かつ、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値Tin_setが制御装置２０の複数の演算周期に亘って繰り返し演算されて最終的に残差の小さな収束値となる。従って、制御装置２０は、第２

過熱器１８の入口蒸気温度の設定値の演算に複数周期を要しても問題はない。このように本実施形態によれば、制御装置２０の各演算周期での演算を確実に終了させることができ、計算コストの増大を抑制できる。

【００４３】

以上を踏まえて、図２で基本的な構成を示した排熱回収ボイラ５の出口蒸気温度の制御装置２０について、具体的な構成を示す。図５は、第１の実施形態における発電システムの、排熱回収ボイラの出口蒸気温度の制御装置の具体的な構成例を示す図である。

【００４４】

図２にＣ１（ｓ）として示したフィードバック特性は、図５に示したＰＩＤ演算部５０６に該当し、フィードバック制御部を構成する。図２にＣ２（ｓ）として示したフィードフォワード特性は、図５に示した蒸気比熱計算部５０１、過熱器特性計算部５０２、演算部５０３、減温器特性計算部５０４、スプレー弁特性計算部５０５に該当し、これらがフィードフォワード制御部を構成する。

【００４５】

図２に示したＣ２（ｓ）に相当する、上記の各部５０１～５０５について説明する。外乱ｄに相当する入力は、（１）第２過熱器１８の入口排ガス流量（第２過熱器１８内を通過する排ガスの流量）の測定値Ｆ、（２）第２過熱器１８の入口排ガス温度の測定値Ｔｉ、（３）第２過熱器１８の出口蒸気流量（第２過熱器１８内を通過する蒸気の流量）の測定値ｆ、（４）第２過熱器１８の入口蒸気温度の測定値ｔｉ、（５）第２過熱器１８の出口蒸気圧力Ｐｏ、（６）スプレー水温度ｔ１、（７）スプレー水圧力ｐ１の７項目である。

蒸気比熱計算部５０１は、第２過熱器１８の出口蒸気圧力の測定値ｐｏと過熱器の入口蒸気温度の測定値ｔｉとに基づいて比熱を計算する。

過熱器特性計算部５０２は、式（１）、式（２）に基づいて、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳ（図３、図４におけるTin_set）を算出する。

ただし、式（１）、（２）の熱交換量Ｑについては、過熱器特性計算部５０２は、上記の（１）第２過熱器１８の入口排ガス流量の測定値Ｆ、（２）第２過熱器１８の入口排ガス温度の測定値Ｔｉ、（３）第２過熱器１８の出口蒸気流量の測定値ｆ、（４）第２過熱器１８の入口蒸気温度の測定値ｔｉに基づいて計算する。

【００４６】

演算部５０３は、過熱器特性計算部５０２の出力である、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳの出力を制御装置２０の１演算周期の間だけ遅延させるための演算を行なう。従って、演算部５０３は、過熱器特性計算部５０２の出力を１演算周期ずらして、再び過熱器特性計算部５０２の入力とする。つまり、演算部５０３は、過熱器特性計算部５０２により制御装置２０の１演算周期前に演算した、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳ（図３および図４におけるTin_set）を過熱器特性計算部５０２に再び入力する。

また、演算部５０３は、上記のように第２過熱器の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳの出力を制御装置２０の１演算周期の間だけ遅延させる代わりに、演算周期の前周期以前であれば、第２過熱器の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳの出力を制御装置２０の２以上の演算周期の間だけ遅延させるようにしてもよい。

【００４７】

減温器特性計算部５０４は、第２過熱器の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳ、スプレー水温度ｔ１、およびスプレー水圧力ｐ１に基づいて必要なスプレー流量を計算する。

スプレー弁特性計算部５０５は、減温器特性計算部５０４により計算したスプレー流量、およびスプレー水圧力ｐ１に基づいて、減温器１６に供給する水の流量に関する第２指示値であるスプレー弁開度指示値（フィードフォワード分）を計算する。スプレー弁開度指示値は、減温器１６で蒸気に加える水の流量の指示値を指す。制御装置２０は、この指示値に基づいて、蒸気冷却用の水を減温器１６に供給するための減温器バルブ１９の開度を調整して、減温器１６での蒸気の冷却量を調整する。

【００４８】
　また、図１に示したＣ１（ｓ）に相当する、ＰＩＤ演算部５０６は、第２過熱器１８の出口蒸気温度の設定値ｔｏＳ、および第２過熱器１８の出口蒸気温度の測定値ｔｏ（TL_out）を入力としたＰＩＤ演算を行い、この演算の結果を減温器１６に供給する水の流量に関する第１指示値であるスプレー弁開度指示値（フィードバック分）として出力する。
【００４９】
　制御装置２０は、第２指示値であるスプレー弁開度指示値（フィードフォワード分）に第１指示値であるスプレー弁開度指示値（フィードバック分）を加算する加算器を備え、加算器において加算した値を、図２に示したＧ１（ｓ）への操作量ｕとして出力する。
　結局、制御装置２０は、外乱ｄを入力としてスプレー弁開度指示値（操作量ｕ）を算出する。この操作量ｕにより、出口蒸気温度の測定値を出口蒸気温度の設定値に一致させるように制御することができる。
【００５０】
　以上、第１の実施形態では、第２過熱器１８の出口蒸気温度を制御するための、制御装置２０内における演算が単一の演算周期内に終了しないことに鑑み、第２過熱器１８の出口蒸気温度を制御するための演算を制御装置２０の複数周期内で完了することができる。これにより、出口蒸気温度の測定値を出口蒸気温度の設定値に一致させるように制御することができるので、排熱回収ボイラ内に設置された過熱器における蒸気温度を適切に制御することができる。
【００５１】
　（第２の実施形態）
　次に、第２の実施形態について説明する。なお、この第２の実施形態について、第１の実施形態で説明した内容と同一の内容については説明を省略する。
　第１の実施形態では、図２に示したＧ１（ｓ）、Ｃ２（ｓ）、Ｇ２（ｓ）について、Ｇ１（ｓ）Ｃ２（ｓ）＝Ｇ２（ｓ）となるようにＣ２（ｓ）を定めることができれば、外乱により決まるｙ２と、Ｃ２（ｓ）によるｕの変化により発生するｙの変化が同一となり、ＰＶが変動しないと説明した。
　そこで、第１の実施形態では、フィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）の設定について、対数平均温度差を用いる方法を示した。しかし、この対数平均温度差に基づいたフィードフォワード特性Ｃ２（ｓ）の設定では、静的特性のみを模擬していた。このため、定常値においては、Ｇ１（ｓ）Ｃ２（ｓ）（Ｇ１（ｓ）とＣ２（ｓ）との積）とＧ２（ｓ）とがほぼ一致することが期待できるものの、外乱が急変した場合などは対応できなかった。
【００５２】
　このように外乱が急変した場合の制御の例について説明する。図６は、第１の実施形態における発電システムの、排ガス温度が変化した場合の時間方向の変化の一例を示す図である。図６では、（ａ）第２過熱器１８の入口排ガス温度の測定値Ｔｉ、（ｂ）第２過熱器１８の入口排ガス流量の測定値Ｆ、（ｃ）第２過熱器の出口蒸気温度の測定値ｔｏ、（ｄ）第２過熱器１８の出口蒸気流量の測定値ｆ、および（ｅ）減温器１６のスプレー流量ｆ１を示す。
【００５３】
　制御装置２０は、第２過熱器１８の入口排ガス温度の測定値Ｔｉ（図６の（ａ））が外乱として変化した場合、減温器１６のスプレー流量ｆ１（図６の（ｅ））を制御する。上述のように外乱が急変した場合は、スプレー流量ｆ１が急激に増加する。第２過熱器１８の金属熱容量があるため、第２過熱器１８の出口蒸気温度の測定値ｔｏが上昇するまでには、遅れが発生する。
【００５４】
　一方、スプレー流量ｆ１が急激に増加した場合は、第２過熱器１８の出口蒸気温度の測定値ｔｏが上昇するよりも早いタイミングで、この出口蒸気温度の測定値ｔｏが減少することがある。この場合、図６（ｃ）に示したように、第２過熱器１８の出口蒸気温度の測定値ｔｏは一旦減少する。この場合、フィードバック制御が働いて、減温器１６のスプレ

ー流量ｆ１が減少する。これにより第２過熱器１８の出口蒸気温度の測定値ｔｏは上昇に転じ、再びフィードバック制御が働いて、設定値通りとなる。

【００５５】

このように、第１の実施形態に示した、対数平均温度差にもとづいたＣ２（ｓ）の設定では、静特性のみを模擬してＧ１（ｓ）Ｃ２（ｓ）＝Ｇ２（ｓ）となるようにＣ２（ｓ）を定めていたため、外乱が急変した場合などは変動により偏差が生じる。

【００５６】

図７は、第２の実施形態における発電システムの、排熱回収ボイラの出口蒸気温度の制御装置の具体的な構成例を示す図である。

第２の実施形態では、第１の実施形態における、制御装置２０の１演算周期の間だけ出力を遅延させる演算部５０３が、１次遅れ演算部６０３に変更されている。つまり、第２の実施形態では、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値ｔｉＳ（図３および図４におけるTin_set）の時系列データを１次遅れにより加工したデータを過熱器特性計算部５０２の入力として用いる。この場合、各演算周期は一定の周期である。

【００５７】

また、１次遅れに限らず、第２過熱器１８の入口蒸気温度の設定値の時系列データを例えば３次以上の高次遅れにより加工したデータを過熱器特性計算部５０２の入力として用いるようにしてもよい。

【００５８】

第２の実施形態における効果について説明する。図８は、第２の実施形態における発電システムの、排ガス温度が変化した場合の時間方向の変化の一例を示す図である。図６と同様に、図８では、（ａ）第２過熱器１８の入口排ガス温度の測定値Ｔｉ、（ｂ）第２過熱器１８の入口排ガス流量の測定値Ｆ、（ｃ）第２過熱器の出口蒸気温度の測定値ｔｏ、（ｄ）第２過熱器１８の出口蒸気流量の測定値ｆ、および（ｅ）減温器１６のスプレー流量ｆ１を示す。

【００５９】

図８（ｅ）に示すように、第２の実施形態では、第１の実施形態と比較して、減温器１６のスプレー流量ｆ１の変化が緩和されている。これにより、出口蒸気温度が変動する要因の静特性だけでなく、出口蒸気温度が変動する要因の動特性を考慮して、Ｇ１（ｓ）Ｃ２（ｓ）＝Ｇ２（ｓ）となるようにＣ２（ｓ）を定めることができる。

【００６０】

以上のように、第２の実施形態では、第１の実施形態を実施したときで外乱が急変した場合に発生する偏差の影響を改善することができる。

【００６１】

なお、本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

【００６２】

また、各実施形態の制御装置２０により実現する手法は、計算機（コンピュータ）に実行させることができるプログラム（ソフトウエア手段）として、例えば磁気ディスク（フロッピー（登録商標）ディスク、ハードディスク等）、光ディスク（ＣＤ－ＲＯＭ、ＤＶＤ、ＭＯ等）、半導体メモリ（ＲＯＭ、ＲＡＭ、フラッシュメモリ等）等の記録媒体に格納し、また通信媒体により伝送して頒布することもできる。なお、媒体側に格納されるプログラムには、計算機に実行させるソフトウエア手段（実行プログラムのみならずテーブルやデータ構造も含む）を計算機内に構成させる設定プログラムをも含む。本装置を実現する計算機は、記録媒体に記録されたプログラムを読み込み、また場合により設定プログラムによりソフトウエア手段を構築し、このソフトウエア手段によって動作が制御される

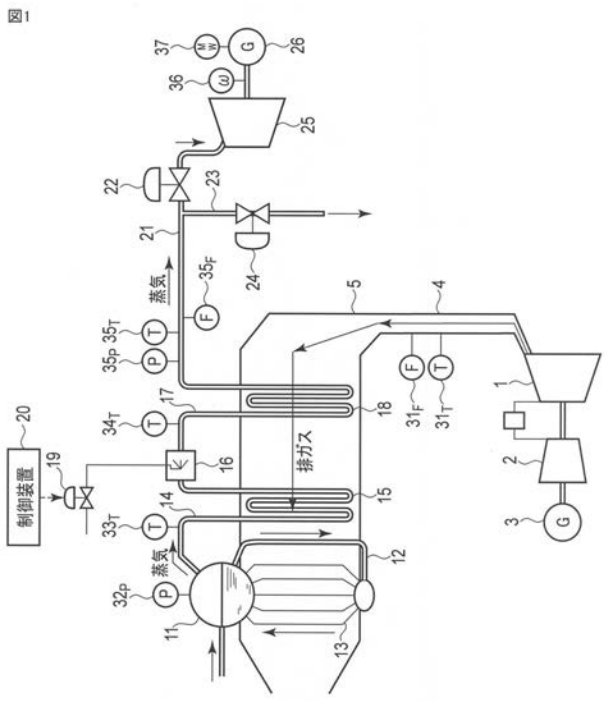
ことにより上述した処理を実行する。なお、本明細書でいう記録媒体は、頒布用に限らず、計算機内部あるいはネットワークを介して接続される機器に設けられた磁気ディスクや半導体メモリ等の記憶媒体を含むものである。

【符号の説明】

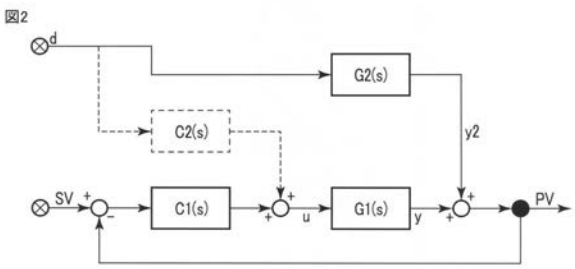
【００６３】

１…ガスタービン、２…圧縮機、３…第１発電機、４…排ガス配管、５…排熱回収ボイラ、１１…ドラム、１２…下降管、１３…蒸発器、１４…第１蒸気配管、１５…第１過熱器、１６…減温器、１７…第２蒸気配管、１８…第２過熱器、１９…減温器バルブ、２０…制御装置、２１…主蒸気配管、２２…主蒸気弁、２３…バイパス配管、２４…バイパス弁、２５…蒸気タービン、２６…第２発電機、31_F、35_F…流量計、31_T、33_T、34_T、35_T…温度計、32_P、35_P…圧力計、３６…回転数計測器、３７…電気出力計測器、５０１…蒸気比熱計算部、５０２…過熱器特性計算部、５０３…演算部、５０４…減温器特性計算部、５０５…スプレー弁特性計算部、５０６…ＰＩＤ演算部、６０３…１次遅れ演算部。

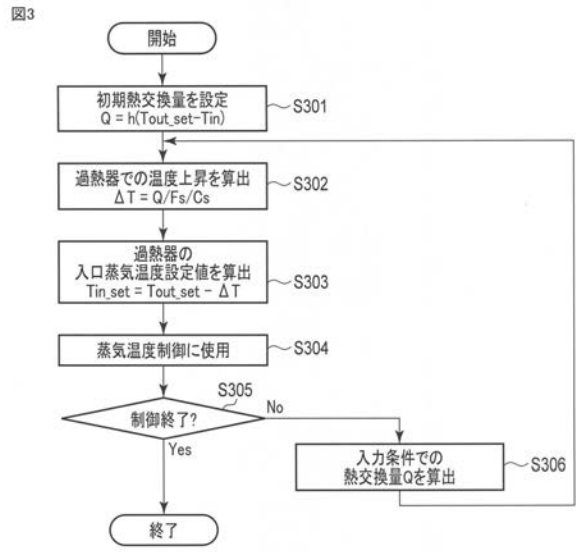
【図１】



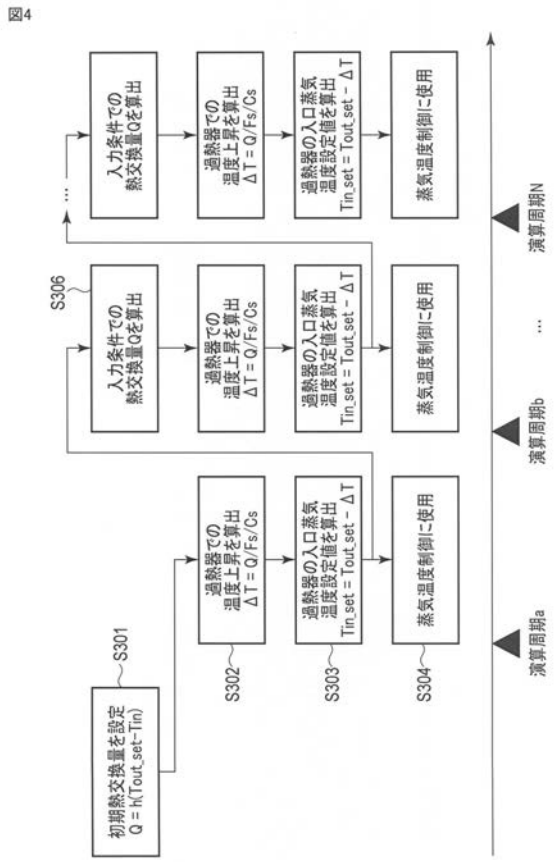
【図２】



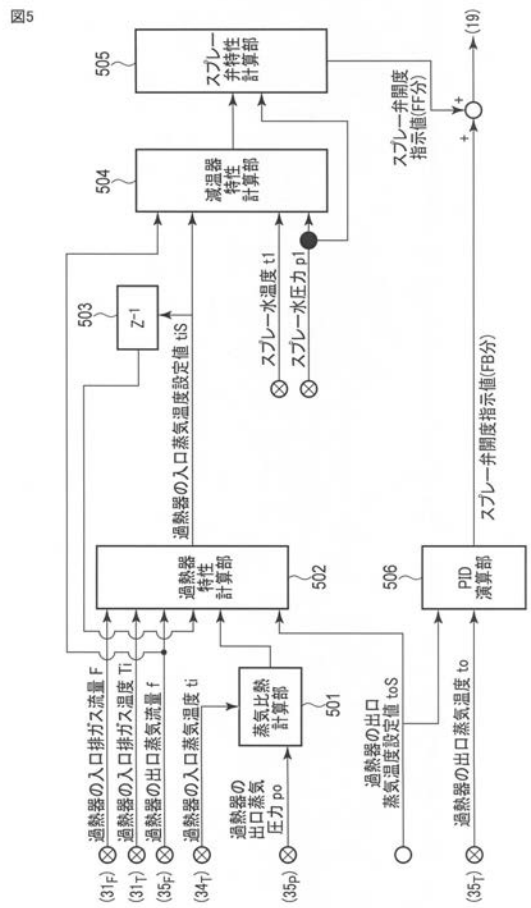
【図３】


図3
開始
初期熱交換量を設定
Q = h(Tout_set-Tin)
S301
過熱器での温度上昇を算出
ΔT = Q/Fs/Cs
S302
過熱器の
入口蒸気温度設定値を算出
Tin_set = Tout_set - ΔT
S303
蒸気温度制御に使用
S304
S305
制御終了?
No
Yes
入力条件での
熱交換量Qを算出
S306
終了

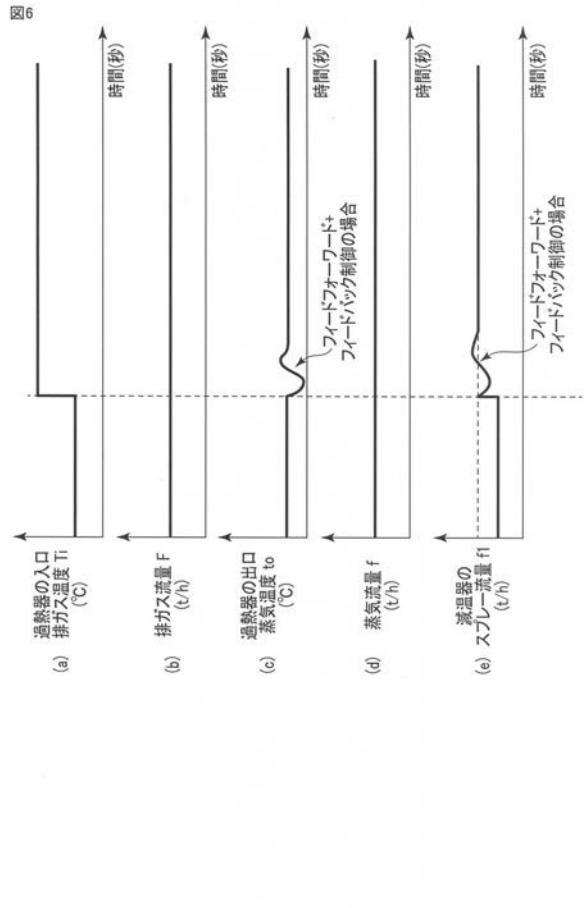
【図４】


図4
入力条件での
熱交換量Qを算出
過熱器での
温度上昇を算出
ΔT = Q/Fs/Cs
過熱器の入口蒸気
温度設定値を算出
Tin_set = Tout_set - ΔT
蒸気温度制御に使用
S306
S301
S302
S303
S304
演算周期N
演算周期b
演算周期a
初期熱交換量を設定
Q = h(Tout_set-Tin)

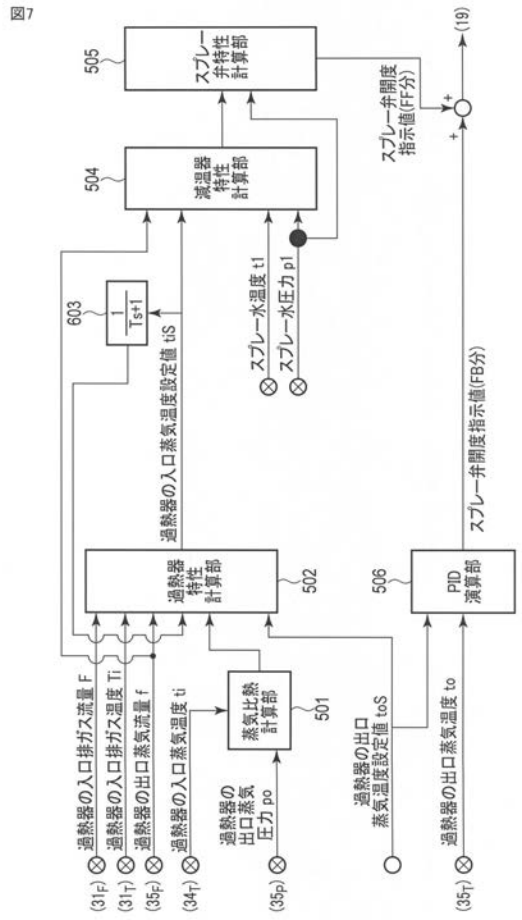
【図５】


図5
505
スプレー
弁特性
計算部
504
減温器
特性
計算部
503
Z-1
スプレー弁開度
指示値(FF分)
(19)
スプレー水温度 t1
スプレー水圧力 p1
過熱器の入口蒸気温度設定値 tiS
スプレー弁開度指示値(FB分)
過熱器
特性
計算部
502
506
PID
演算部
501
蒸気比熱
計算部
過熱器の入口排ガス流量 F
過熱器の入口排ガス温度 Ti
過熱器の出口蒸気流量 f
過熱器の入口蒸気温度 ti
過熱器の
出口蒸気
圧力 po
過熱器の出口
蒸気温度設定値 toS
過熱器の出口蒸気温度 to
(31F)
(31T)
(35F)
(34T)
(35P)
(35T)

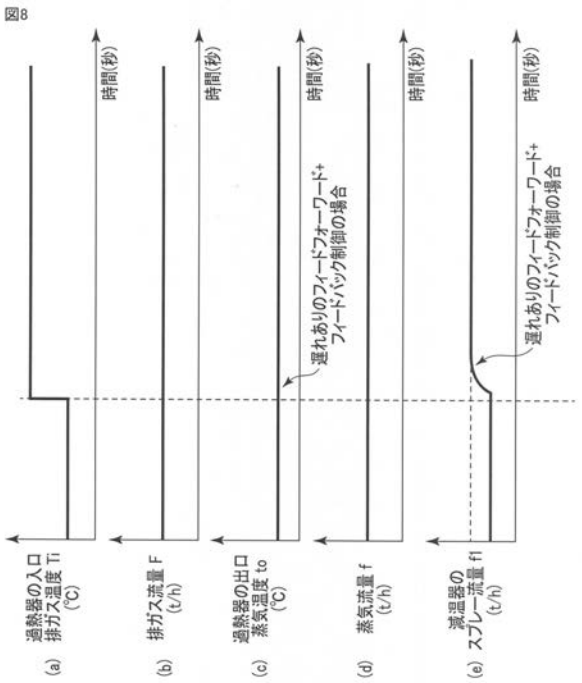
【図６】


図6
時間(秒)
フィードフォーワード+
フィードバック制御の場合
過熱器の入口
排ガス温度 Ti
(℃)
(a)
排ガス流量 F
(t/h)
(b)
過熱器の出口
蒸気温度 to
(℃)
(c)
蒸気流量 f
(t/h)
(d)
減温器の
スプレー流量 f1
(t/h)
(e)

【図７】


図7
過熱器の入口排ガス流量 F
過熱器の入口排ガス温度 Ti
過熱器の出口蒸気流量 f
過熱器の入口蒸気温度 ti
過熱器の出口蒸気圧力 po
過熱器の出口蒸気温度設定値 toS
過熱器の出口蒸気温度 to
蒸気比熱計算部
501
過熱器特性計算部
502
PID演算部
506
603
1/(Ts+1)
過熱器の入口蒸気温度設定値 tiS
減温器特性計算部
504
スプレー弁特性計算部
505
スプレー水温度 t1
スプレー水圧力 p1
スプレー弁開度指示値(FF分)
スプレー弁開度指示値(FB分)
(19)

【図８】


図8
過熱器の入口排ガス温度 Ti (℃)
(a)
排ガス流量 F (t/h)
(b)
過熱器の出口蒸気温度 to (℃)
(c)
蒸気流量 f (t/h)
(d)
減温器のスプレー流量 f1 (t/h)
(e)
時間(秒)
遅れありのフィードフォーワード+フィードバック制御の場合

フロントページの続き

(72)発明者　村山　大
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内
(72)発明者　清水　佳子
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内
(72)発明者　明比　豊博
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内
(72)発明者　秋山　紗耶加
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内
(72)発明者　石川　鉄郎
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内
(72)発明者　田丸　慎悟
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内