第4章　計画・設計

第1節　施設計画

§19　導入計画手順

本技術の施設計画の策定手順を示す。

【解説】

施設計画の策定手順フローを**図 19-1** に示す。「**第 3 章　導入検討**」において、導入効果が見込まれると判定されたものについて、**図 19-1** の手順で施設計画を策定する。

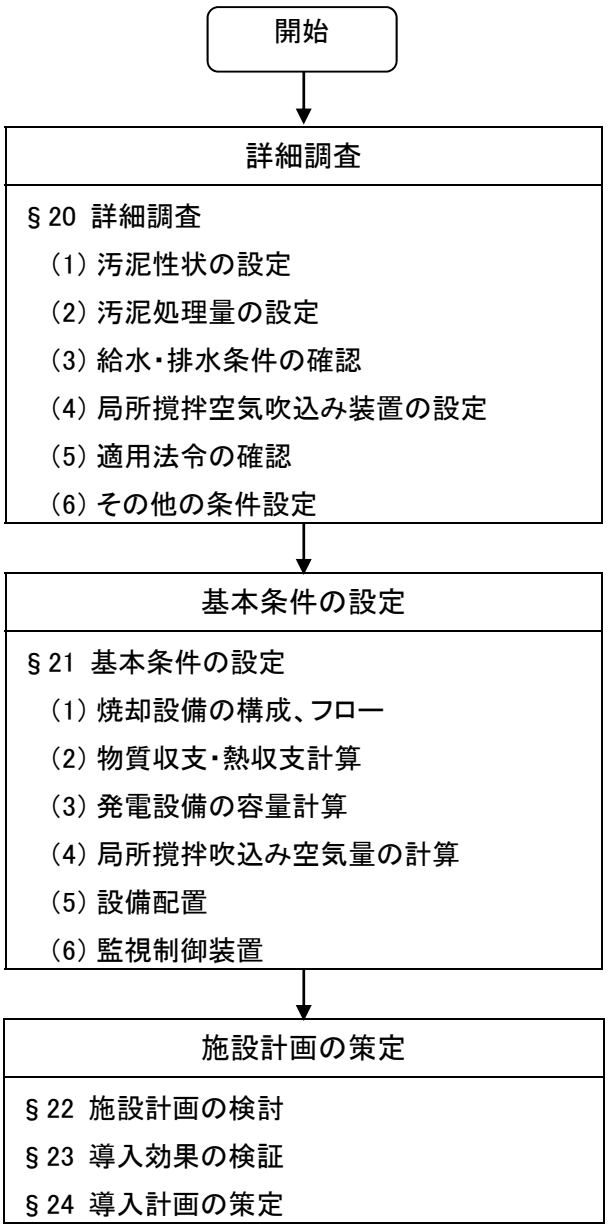


図 19-1　施設計画の策定手順フロー

§20　詳細調査

導入計画の検討に先立ち、「**§14　基礎調査**」に基づき詳細調査を行い、以下の基本条件の設定を行う。

【解説】

導入検討時に§14にて基礎調査を実施しているが、将来の汚泥発生予測量及び過去数年分のデータを用いて分析し、四季の影響を評価する等より詳細な調査を行い§21 で行う計算条件を設定する。調査項目を**表** 20-1 に示す。

表 20-1　**詳細調査項目**

調査項目	手段	目的
下水処理場の将来計画	計画資料等	汚泥処理量の決定　→(2)
脱水汚泥の種類(混合生汚泥、消化汚泥)、量および性状	管理日報等	汚泥性状の設定　→(1) 汚泥処理量の設定　→(2)
既存ユーティリティの種類および利用可能量	管理日報等	給水・排水条件　→(3)
下水処理水の処理方式および供給量、供給圧力、水質、温度	管理日報等	給水・排水条件　→(3)
汚泥処理施設の運転管理状況	管理日報等	汚泥処理量の設定　→(2)
汚泥処理設備からの N_2O、NOx 排出状況	管理日報等	局所撹拌空気吹込み装置の設定 →(4)
汚泥焼却炉の最小流動化空気量	計画資料等	局所撹拌空気吹込み装置の設定 →(4)
大気汚染防止法、各自治体の公害防止条例等	届出書類 自治体資料等	適用法令の確認　→(5)
環境アセスメント、近隣地域との各種協定等	自治体資料等	適用法令の確認　→(5)

(1)　汚泥性状の設定

実態調査(対象場所の汚泥分析結果平均値・国土交通省 国土技術政策総合研究所実施のアンケート結果を考慮)の結果を基に**表 20-2** の各項目の値を整理する。そして、脱水汚泥性状範囲についてとりまとめを行う。脱水汚泥性状範囲の設定は、廃熱ボイラ設備、蒸気タービン設備の適切な設備容量の選定に必要不可欠である。

表 20-2　汚泥性状の設定

項目	内容		備考
脱水汚泥含水率(%)	変動幅X_{min}～X_{max}		代表値X_S＝(X_{min}＋X_{max})/2
脱水汚泥可燃分割合(%)	変動幅Y_{min}～Y_{max}		代表値Y_S＝(Y_{min}＋Y_{max})/2
可燃分組成(%-VS)	炭素	Z_C	分析データより
	水素	Z_H	
	窒素	Z_N	
	酸素	Z_O	
	硫黄	Z_S	
高位発熱量(MJ/kg-DS)	H_{HV}		試算式より算出※1
低位発熱量(MJ/kg-wet)	L_{HV}		試算式より算出※2

※1:H_{HV}(MJ/kg-DS)＝4.186×{(58.3×Y_S)－193}

※2:L_{HV}(MJ/kg-wet)＝(H_{HV} －(Z_H×9×Y_S) ×2.5)×(1－X_S)－X_S×2.5

「汚泥焼却炉の省エネルギー化に関する調査報告書」(建設省都市局下水道部・日本下水道事業団)[10]より引用。

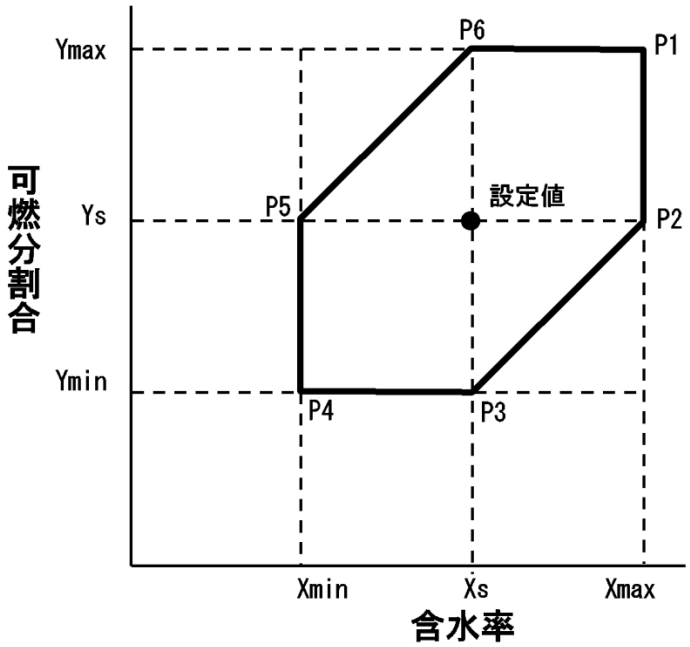


図 20-1 脱水汚泥性状範囲

(2)　汚泥処理量の設定

1)　焼却設備

焼却設備の処理量設定に当たっては、四季を通じた流入水量当たりの発生汚泥量の変化や、季節変動パターンを把握し、設備を決める要素として十分に考慮しながら収支計算、計画処理汚泥量を算出する。算出された処理量に対し、通年の発生汚泥量の変動を検討し、設備の処理規模を決める。一般的に、下水汚泥焼却設備では汚泥処理の安定性を第一として、計画 1 日最大汚水量より算出される日最大汚泥量を用いて処理規模が決められている。

2)　発電設備

エネルギー利用を目的とする焼却発電設備での処理量設定に当たっては、建設費が比較的高く、発電能力に対して十分な発電出力が得られない場合、著しく不経済となり得るため、適正な処理規模を見極める必要がある。

発電設備を構成する機器には余剰蒸気を安定的に水へ戻す復水器を設置することが一般的で、汚泥量が増加し、発電できない余剰蒸気が発生した場合においても、復水器で余剰蒸気を処理することで、焼却量の調整による蒸気発生量の調整を不要とし、焼却設備の通常運転に影響を与えることなくエネルギー利用の運転を続けられる。また、通常の焼却設備は 1 年に 1 回程度の定期整備期間を設けるため、設備稼働率最大を 85%とする。

このように、焼却発電設備の処理規模を設定するに際しては、設備の経済的な運転を最優先した日平均汚泥量を基本とする。

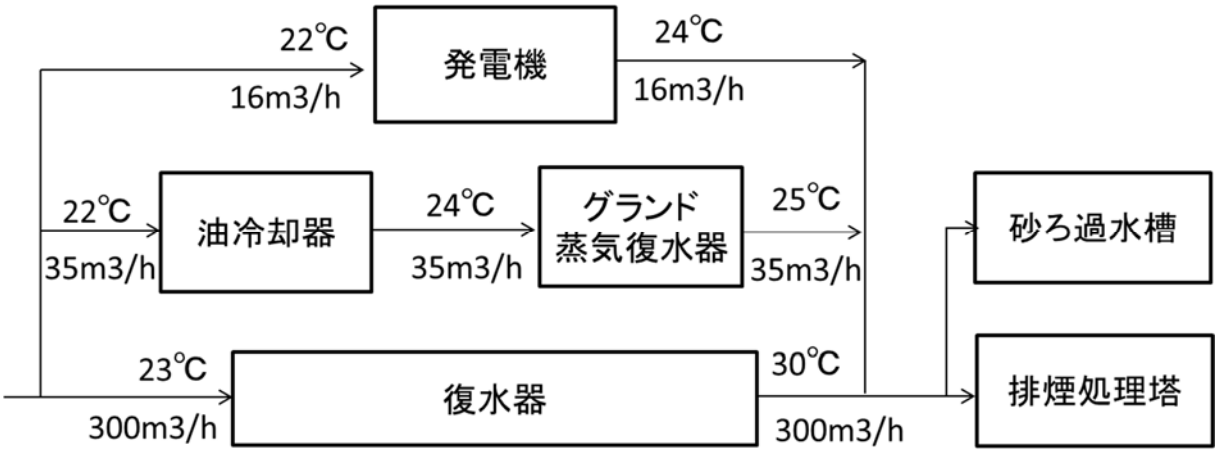
(3)　給水・排水条件の確認

給水としては復水タービン発電の冷却水に使用する下水処理水と、ボイラ給水に用いる上水が必要である。各々の取水箇所、給水可能な量上限値、給水水質、温度等を確認する。冷却水に利用するにあたり、下水処理水は砂ろ過を行い、砂ろ過水として利用することを前提に検討を進める。なお、実証フィールドにおける砂ろ過水の水質は pH7.1、塩化物イオン濃度 66mg/L、SS 濃度 1mg/L 未満程度であり、実証試験中においては大きなトラブルは発生していない。

なお、実証フィールドにおける砂ろ過水の水質条件から大きく乖離する場合は、高度処理設備を設置するなどの検討が必要な場合がある。水質による不具合例を　資料編　1.3.2 **復水器冷却水について**に記載する。

排水については排水の返流箇所、排水量上限値、排水水質基準、温度等を確認する。蒸気タービン発電機ではタービン出口部分に設置した復水器にて冷却水を用いて蒸気を冷却するため、温水が排水として発生する。冷却水として砂ろ過水を使用した場合、使用水量によるものの、給水温度が 20℃の時、排水温度は 25～30℃程度となる。通常の下水汚泥焼却設備において排煙処理塔の排水温度が　50～60℃程度であることを考えると温度の面で問題となることはないと考えられる。また、排水最大温度が 30℃程度であることを考慮すると、排煙処理塔の冷却水等へ再利用することも可能であり、砂ろ過水有効活用の面からも望ましい。

復水器の冷却に十分な冷却水量が確保できる場合は、復水器冷却に使用した冷却水をそのまま排煙処理塔等に供給して排出する方式が選定可能だが、十分な冷却水量が確保できない場合は、復水器の冷却に利用した水を砂ろ過水槽等に戻し、循環利用することを検討する。



（150wet-t/日、実証フィールドにおける例）

図 20-2　砂ろ過水フロー及び温度変化

(4)　局所撹拌空気吹込み装置の設定

汚泥処理設備からのN_2O、NOx 排出状況および汚泥焼却炉の最小一次空気（燃焼空気量－局所撹拌空気量）による流動化速度の調査結果をもとに、局所撹拌空気吹込み技術について、焼却炉周りの付帯設備の設置状況を考慮して吹込み空気流量、吹込み位置、ダクトルートについて詳細を設定する。 **§26 局所撹拌空気吹込み技術の設計**にて詳細の設計を行う。

(5)　適用法令の確認

本システム技術導入に当たり、汚泥焼却設備設置時の適用法令（大気汚染防止法、水質汚濁防止法、悪臭防止法、騒音規制法、振動規制法、建築基準法、ダイオキシン類対策特別措置法）に加え、代表的な法令に基づく届出等を以下に示す。

なお、各自治体による上乗せ規制がある場合があるので、個別の確認が必要である。

下記の届出に関する詳細事項（手続図や工事計画届出及び、許可申請に係る関連法規）については資料編　4.**発電設備設置時の法令に基づく届出等**に記載する。

1)　消防法及び火災予防条例等

焼却炉、ボイラの設置について、「設置届出」、また、補助燃料、作動油等の危険物を指定数量以上貯蔵または取扱う場合、「危険物設置許可申請（貯蔵所・取扱所）」、さらにすでに届出がなされている既存焼却設備を更新する場合や増設する場合などは「変更届出」が必要となる場合があるため、管轄の消防署に確認を行う。

2)　電気事業法

出力 90 万 kW 未満の火力発電所であって汽力（蒸気）を原動力とするものを設置する場合、電気事業法第 48 条第 1 項の規定により経済産業大臣に工事計画届出の提出等、必要な手続きを行わなければならない。代表的な手続き例を**図** 20-3 に示す。なお、この図は例であり、法令の改正等で変更となる場合があるため、計画に際しては最寄りの経済産業省産業保安監督部と協議を行うこと。また、営業開始後についても、定期事業者検査の実施と、定期安全管理審査の受審が必要となることに留意する。

主な手続き項目を以下に示す。

① 工事計画届出
② 保安規定の策定
③ 電気主任技術者の選任
④ ボイラー・タービン主任技術者の選任
⑤ 使用前自主検査
⑥ 使用前安全管理審査
⑦ 定期安全管理審査

このうち、①工事計画届出の添付資料として「発電所から電力系統への送電関係一覧図」、および「遮断器の三相短絡容量計算書」が必要であるため、電力会社への自家用電気使用の申込を早期にしておく必要がある。（上記計算書のうち、受電地点の三相短絡容量は電力会社より入手するものである）

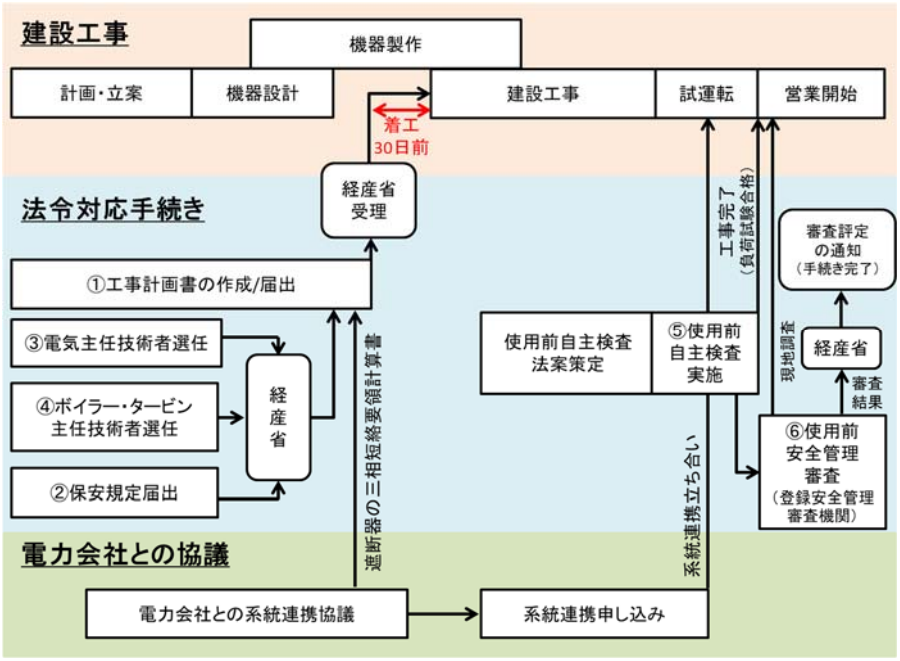


図 20-3　電気事業法に関する手続き例

3）　労働安全衛生法

タービン発電設備を設置しない廃熱ボイラには、労働安全衛生法が適用される。なお、発電用と発電以外の用途（乾燥用等）に併用するボイラの取扱いについては、焼却施設内で蒸気タービン発電を行っている場合でもボイラは労働安全衛生法の適用を受ける場合もあるので、小型の発電設備（誘導発電機など）を設置する場合は申請上留意する必要がある。必要な手続きを以下に挙げる。

① ボイラー取扱作業主任者の選任
② ボイラー据付作業の指揮者の選任
③ 整備業務の就業制限
④ 製造許可
⑤ 設置届
⑥ 構造規格
⑦ 構造検査
⑧ 溶接検査
⑨ 落成検査
⑩ 使用検査
⑪ 定期自主検査

⑫ 性能検査

電気事業法および労働安全衛生法適用の場合の必要な手続き詳細および主任技術者・取扱作業主任者の資格については資料編 4.**発電設備設置時の法令に基づく届出等**に記載する。

(6) その他の条件設定

その他の条件として、各処理場の状況に応じて、必要な条件設定を行う。

1) 既存設備の状況

既存設備の更新または増設の場合においては、既存設備の運転状況、撤去計画、将来計画などを確認し、維持管理性や配管等による熱ロスを考慮し適切な配置計画および機器更新範囲の設定を行う。発電設備の設置により消費電力が増加するため、既設の契約電力の余裕があるかを確認し、不足する場合は契約電力の変更を検討する。

2) 騒音

発電設備のうち、蒸気タービン発電機については騒音の発生があり対策を留意する必要がある。騒音の発生源は、蒸気タービン発電機の減速機部分が中心で、騒音値は装置にもよるが本発電設備規模の場合、85～90dB 程度となる。

ただし、蒸気タービンは騒音規制法上の届出の対象となっていない。対策としては、設置する建屋についてブロワ室と同様にケーシング等による防音構造とすることとが必要となる。加えて、防音カバーを設置することによりさらに防音を図ることも可能であるが、日常のメンテナンスの支障とならないようにすること、および設備からの放熱を考慮することが必要となる。廃熱ボイラについは稼動部もなく大きな騒音の発生源となることはない。

3) 振動

発電設備のうち、蒸気タービン発電機については高速で回転する機器であるため振動の発生はゼロではないが、通常運転中に防振装置などの振動対策が必要となるような振動を発生させることはない。また、蒸気タービンは振動規制法上の届出の対象とはなっていない。

設置に際しては、他の設備との共振等を防止するため堅固な基礎の上に設置することが望ましく、通常は鉄筋コンクリート製の基礎の上に設置固定する。

共振を防止するために、基礎の固有振動数は蒸気タービンの回転周波数、発電機の回転周波数から離す必要がある。

また、周囲に設置する点検架台等についても蒸気タービン発電機から直接固定することなく独立の架台とすることが望ましい。

騒音と同様に、廃熱ボイラについては稼動部もなく大きな振動の発生源となることはない。

4） 荷重条件

蒸気タービン発電機は、蒸気タービン、減速機、発電機から構成されている。

また、前述のように高速回転機器ではあるものの振動は非常に少ないが、耐震性はもちろんであるが動荷重にも考慮する必要がある。

廃熱ボイラについては、その構造上、熱水と蒸気を分離するボイラドラムが蒸発器等よりも高所に設置される水槽となるため、設計用水平震度は耐震クラス S として設計を行う。

§21 基本条件の設定

本システムの基本条件の設定を以下の通り行う。

(1) 高効率発電及び局所撹拌空気吹込み技術を導入した焼却設備の構成、フロー

(2) 物質収支・熱収支計算

(3) 発電設備の容量計算

(4) 局所撹拌空気吹込み設備の空気量の計算

(5) 設備配置方針

(6) 監視制御装置

【解説】

(1) 高効率発電及び局所撹拌空気吹込み技術を導入した焼却設備の構成、フロー

下水汚泥焼却設備に高効率発電及び局所撹拌空気吹込み技術を導入した場合の下水汚泥焼却設備の構成、フローについて整理を行う。

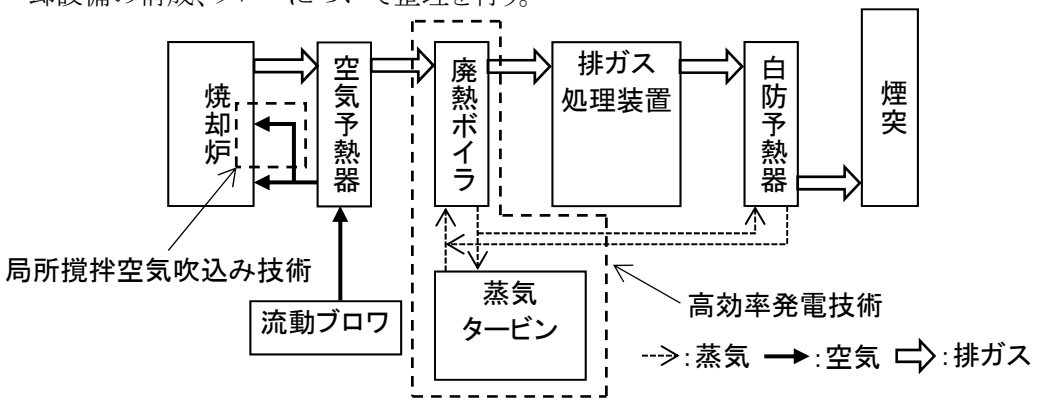


図 21-1　高効率発電及び局所撹拌空気吹込み技術を導入した下水汚泥焼却設備の構成、フロー

※白煙防止予熱器については必要な場合のみ設置する。

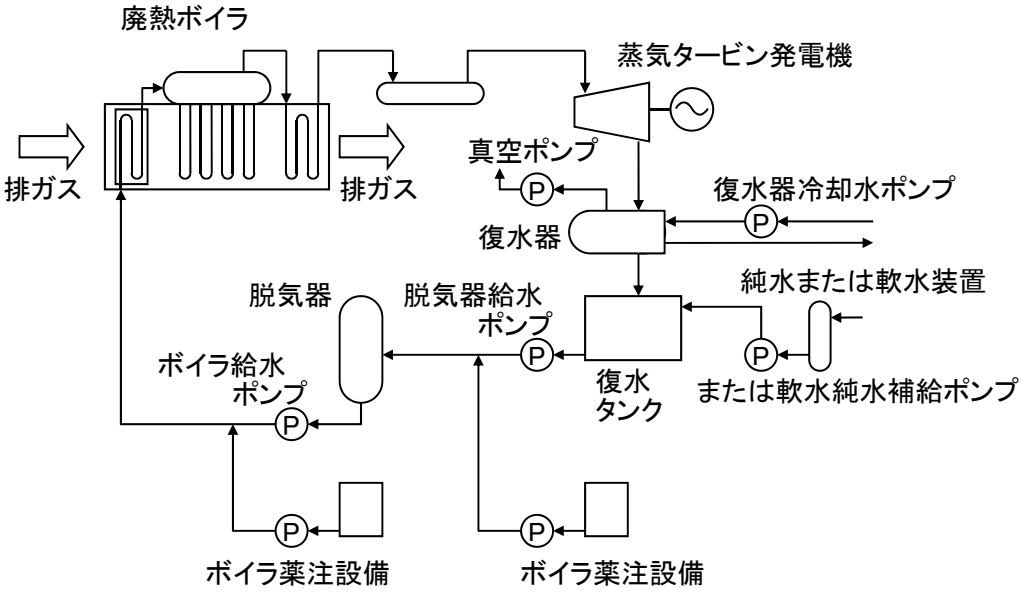


図 21-2　発電設備の構成

(2) 物質収支・熱収支計算

下水汚泥焼却設備に高効率発電技術を導入した想定フローにおいて、汚泥性状から、焼却炉の物質収支・熱収支計算および空気予熱器・廃熱ボイラの熱収支計算を行う。

1) 焼却炉の物質収支・熱収支計算

汚泥投入量、汚泥性状、空気比より、炉出口排ガス量および排ガス温度を算出する。

必要なパラメータとして以下があげられる。

・汚泥処理量 ［wet-t/日］
・汚泥含水率 ［%］
・汚泥熱量 ［kJ/kg-DS、kJ/kg-VTS 等］
・汚泥可燃分比率 ［%］
・汚泥成分比率 ［%］
・炉体放散熱量 ［%］
・熱交換器放散熱量 ［%］
・補助燃料熱量［MJ/Nm^3、MJ/kg 等］

2) 発生蒸気量の算出

1)の計算結果および発生蒸気条件に基づき、発生蒸気量を算出する。

必要なパラメータとして以下があげられる。

・ダスト性状
・ボイラ給水温度［℃］

以下条件についても設定を行う。

・排ガス量 ［Nm^3/h］
・燃焼排ガス組成 ［%］
・ボイラ入口排ガス温度 ［℃］
・ボイラ出口排ガス温度 ［℃］
・発生蒸気温度 ［℃］
・ボイラ放散熱量 ［GJ/h］

3) 発電出力の算出

1)、2)の計算結果およびタービン性能曲線に基づき、発電出力を算出する。

必要なパラメータとして以下があげられる。

・下水処理水温度（四季）［℃］

以下条件についても設定を行う。

・タービン入口蒸気温度 ［℃］
・タービン入口蒸気圧力 ［MPa］
・復水器真空度(復水器内部圧力)［kPaA］
・機械損失 ［%］

4)　排ガス処理設備、灰搬出設備等の計算

従来の下水汚泥焼却設備の計算方法等を参考とし、算出する。

(3)　発電設備の容量計算

(2)物質収支・熱収支計算において求められた廃熱ボイラで回収される熱量を基準に、発電設備を構成する機器の容量計算を行う。

計算結果例を**表** 21-1 に示す。

表 21-1　発電設備の容量

焼却量	60wet-t/日	100wet-t/日	150wet-t/日	200wet-t/日
発電量	161kW	286kW	461kW	649kW
発電設備消費電力	72kW	76kW	83kW	89kW
その他設備動力削減	22kW	32kW	43kW	53kW
実質発電量	111kW	242kW	421kW	613kW

容量計算例については、資料編 **3.ケーススタディ**に示す。

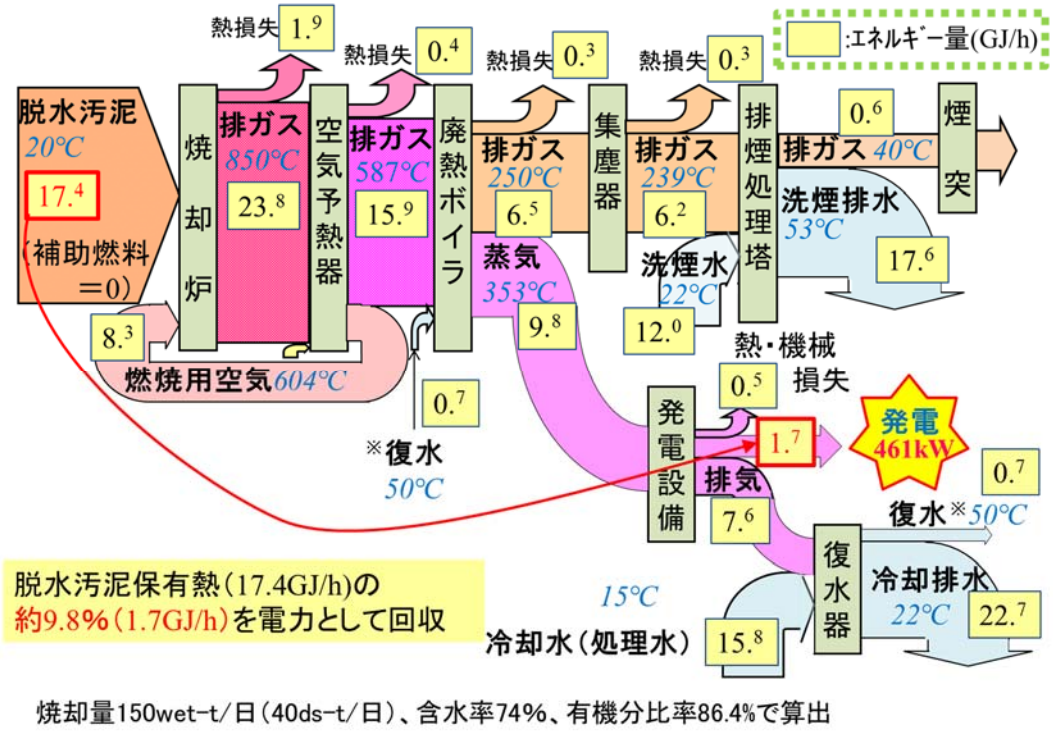


図 21-3　熱収支計算結果の一例

(4) 局所撹拌空気吹込み設備の空気量の計算

(2)1)において算出した燃焼空気量および、**§20 詳細調査**において調査した最小流動化速度より、局所撹拌空気量を設定する。**図 21-4** に局所撹拌空気吹込み技術の模式図を示す。局所撹拌空気の吹込み高さ、吹込み方向などの他条件と合わせ、十分な炉内撹拌効果が得られる空気量とする。ただし、燃焼空気量(Q_I)から局所撹拌空気量(Q_K)を引いた値が最小流動化空気量(Q_L)を下回ってはならない。最小流動化空気量(Q_L)は最小流動化速度(V_L)より算出する。最小流動化空気量は局所撹拌空気吹込み設備の設置の有無により変化しないが、局所撹拌空気吹込み設備を運転することにより、燃焼空気の一部が局所撹拌空気として利用され、実質的に砂層に供給される空気量が変化することに留意する。燃焼空気量(Q_I)に対する局所撹拌空気量(Q_K)の割合(空気比)は 10～20%程度を目安とする。最終的には炉の形状等の影響を受けるため、吹込み空気流量を変化させてシミュレーションを行い、撹拌効果が高く高温場が広くなるような吹込み空気流量を選定する。

燃焼空気量(Q_I)、局所撹拌空気量(Q_K)、最小流動化空気量(Q_L)の間には下記関係が成り立つよう計画し、**表 21-2** の留意すべき項目に留意し計画を行う。

燃焼空気量(Q_I)[Nm^3/h]－局所撹拌空気量(Q_K)[Nm^3/h]＞最小流動化空気量(Q_L)[Nm^3/h]

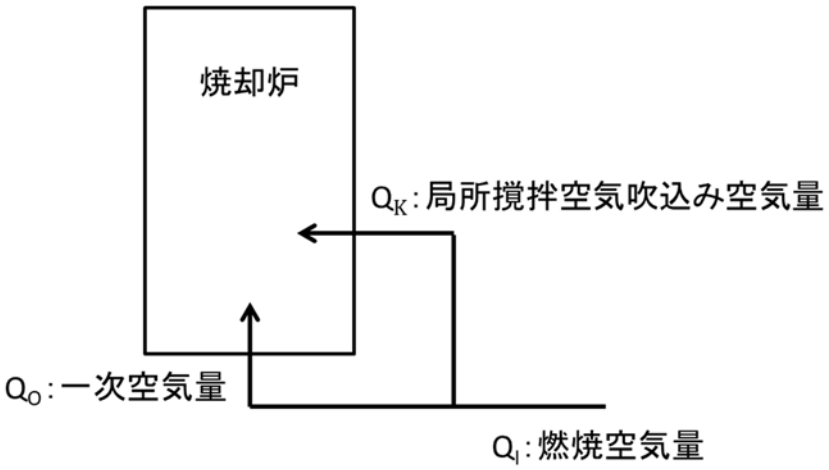


図 21-4 局所撹拌空気吹込み設備模式図

表 21-2 留意すべき項目

項目	留意すべき理由
一次空気量が最小流動化空気量を下回らないようにする (Q_O>Q_L)	不流動を避けるため
局所撹拌空気量の割合(空気比) Q_K=Q_I×10～20%	不流動を避けるため

※燃焼空気量(Q_I) ― 局所撹拌空気量 (Q_K)＝ 一次空気量(Q_O)とする

(5) 設備配置方針

発電設備は、熱回収のための廃熱ボイラと回収した廃熱で発生させた蒸気を用いて発電を行う蒸気タービン発電機から構成される。発電設備の容量計算に基づき、発電設備の標準的な寸法例および、既存設備の状況、撤去計画、将来計画などを確認し、設備配置の計画を行う。各設備の寸法例については、資料編 2.4 **フロー、配置**を参照のこと。

また、本項における配置方針の検討は、基本設備フローが敷地の制約条件から明らかに不適となる可能性を排除することを目的としており、詳細な配置検討は **§ 22** 以降で決定するものとする。

1) 廃熱ボイラ

熱源となる排ガス中のダストが多い下水汚泥焼却設備に設置する廃熱ボイラには、運転中のダストの除去が比較的容易な水管式ボイラが採用される。水管式ボイラには、一般的に広く用いられている横型(**図** 21-5)と、設置面積が少なくてすむ比較的小規模の設備に用いられる縦型(**図** 21-6)がある。横型の場合、小型のものを除いて自然循環式が採用されるが、縦型の場合、自然循環が困難なため循環ポンプによる強制循環が行われる場合が多い。

また、発電に用いる蒸気は、熱落差を大きくしタービンでの発電効率を向上させるため乾燥等の熱源として用いる飽和蒸気ではなく飽和蒸気をさらに過熱した過熱蒸気が使用される。このため、発電用の廃熱ボイラは、ボイラへの給水を予熱するエコノマイザ(予熱器、節炭器)とボイラ本体に加えて、スーパーヒーター(過熱器)が設置される。

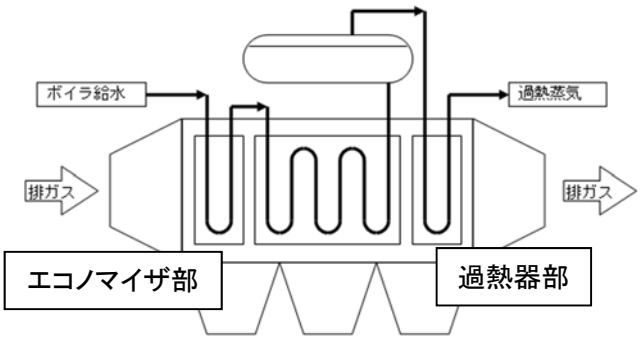


図 21-5 横型ボイラ

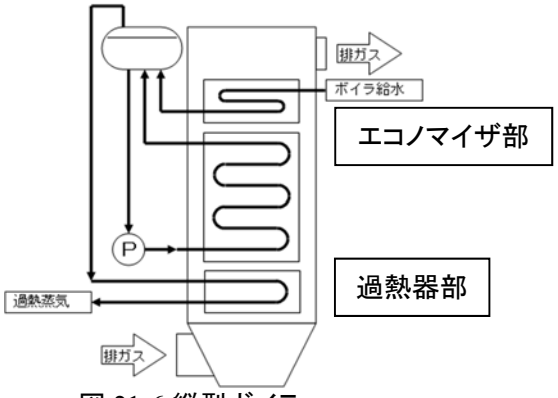


図 21-6 縦型ボイラ

2） 蒸気タービン発電機

蒸気タービン発電機においては、一般に蒸気の供給がタービンの上部から、蒸気の排出がタービンの下部から行われる。これは、蒸気が凝縮して発生するドレンの排出を考慮したものとなっている。復水式タービン発電機の概略図を**図** 21-7 に示す。なお、本システムの設置に必要な配置例については資料編 2.4 **フロー、配置**に示す。

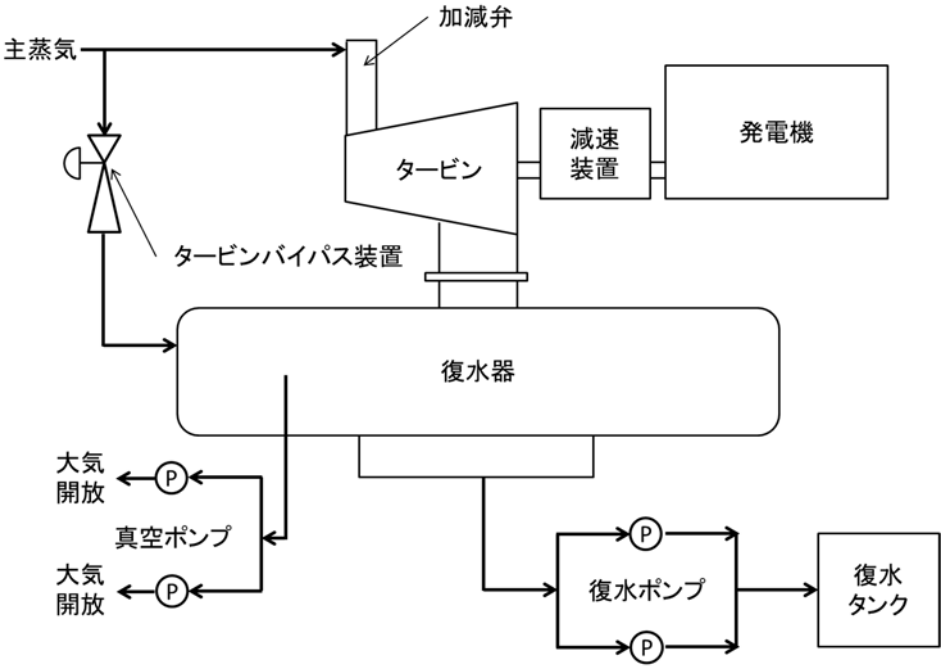


図 21-7 復水式タービン発電機概略図

(6) 監視制御装置

監視制御装置については、新設・追加設置を問わず、運転状況を適切に把握するために必要な項目を測定可能なように設計する。新設の場合は焼却炉側の監視制御装置と一体として設計を行うが、既設焼却設備への追加設置の場合は、監視制御装置の一体化は難しいため、設備の運転状況を把握するために必要な信号を取得し、独立した監視制御装置を設置する。

§22　施設計画の検討

本技術を導入する施設の計画では、以下の項目を実施する。

(1)主要設備

(2)機器の仕様・容量決定

(3)設備配置

【解説】

(1) 主要設備

1) 廃熱ボイラ

焼却炉の廃熱ボイラは、基本形式、缶水(ボイラ内部水)の循環方式、焼却炉との組合せ構成上の相違等によって、**表 22-1** のように分類される。各形式にはそれぞれ特色があり、設備の容量・規模・質あるいは熱回収容量等、目的に応じて適切な選択を行う。

表 22-1 廃熱ボイラの形式

分類項目	各種形式又は方式
① 基本形式	水管式ボイラ、煙管式ボイラ等
② 缶水循環方式	自然循環方式、強制循環方式、自然／強制循環併用方式
③ 受熱面の形態	放射形、接触形
④ 形状	縦型・横型

2) タービン

焼却設備で使用されるタービンの基本的な形式には、背圧式タービンと復水式タービンの二種類があり、施設の規模や熱利用状況に応じた蒸気量により選択を行うが、基本的には効率の高い復水式タービンを採用する。

3) 蒸気復水設備

蒸気式空気予熱器や温水器等のように、熱利用機器で凝縮潜熱が使われて復水になるものはそのままボイラへ循環使用することができるが、余剰の高圧蒸気や、蒸気タービンで仕事をした低圧排気はまだ大量の潜熱をもっているので、この蒸気のもつ潜熱を奪い復水にして再びボイラに使用できるように、熱交換器、つまり復水器が必要となる。

復水設備は、復水器、・復水タンク、復水ポンプ、フラッシュタンク、真空ポンプ等から構成される。

なお、蒸気復水設備の冷却は、下水処理水を有効利用する。また、余剰蒸気量、蒸気タービンの通過蒸気量等負荷の変動を考慮して、容量に余裕を持つようにする。必要冷却水量に対して、利用可能な下水処理水量が少ない場合は、循環利用を考慮する。その場合には水質管理が重要となる。

4)　局所撹拌空気吹込み装置

§21 基本条件の設定で設定した局所撹拌吹込み空気量をもとに、局所撹拌空気の吹込み高さ・位置・吹込み角度・ノズル口径等を設定する。設定においては炉内設置のセンサーとの位置関係や砂層高さ等を考慮する。詳細については**§26 局所撹拌空気吹込み技術の設計**を参照されたい。各仕様について十分な炉内撹拌効果が得られる仕様にする必要があるが、焼却炉によって適切な設定仕様は異なる。そのため、**§14 基礎調査**において汚泥焼却炉の炉体仕様を調査し、各炉体に応じて適切な仕様を設定する必要がある。

(2)　機器の仕様・容量決定

§21 基本条件の設定をもとに、発電設備の主要構成機器および局所撹拌空気吹込み装置の仕様・容量の設計を行う。なお、具体的な検討方法は本章第 2 節に記述する。また、受変電設備については発電設備の設置に伴い、発電設備運転中と停止中で受電電力量が変化する。このことに留意して、設計を行うこと。

(3)　設備配置

§21 基本条件の設定での配置方針検討及び、(2)機器の仕様・容量の決定にて決定した機器仕様を基に設備配置を検討する。詳細については資料編 2.4 **フロー、配置**を参照のこと。設備の配置に際しては、**§25、26** 等の施設設計に係る項目についても留意し、決定するようにする。

§23　導入効果の検証

施設計画の検討に基づき、再度導入効果について検討を行う。最終的に、試算した導入効果が得られることを検証する。

【解説】

§15 導入効果の検討にて検討を実施しているが、本項では詳細条件を設定し、再度導入効果について検討する。計画・設計の進捗に伴い決定された機器の消費電力や、配置決定による機器仕様の変更等を反映し、導入効果を検討するように留意する。

従来技術採用時と比較し、本技術の導入により、コスト、エネルギー削減効果、温室効果ガス削減効果においてどのような効果が得られるか、その効果を算出、検証する。

§24　導入計画の策定

導入効果の検証後、導入計画書に検討結果をとりまとめる。

【解説】

導入効果の検証結果を確認後、導入計画書を取りまとめる。

導入計画書には、導入計画手順、詳細調査、基本条件の設定、導入効果を記載するものとする。

第 2 節　施設設計

§25 高効率発電技術の設計

基本計算を基に、高効率発電技術の設計を行う。

(1)　排ガス条件の設定
(2)　廃熱ボイラ設備の設計
(3)　復水式タービンの設計
(4)　ダクト･配管の設計
(5)　灰搬出設備の設計
(6)　共通設備の設計
(7)　計装設備の設計
(8)　制御方法
(9)　安全対策

【解　説】

(1)　排ガス条件の設定

高効率発電設備の設計行うにあたっては、汚泥焼却量、汚泥性状、空気比より熱収支計算を基に排ガス量及び温度を算出し、下記設備の容量を決定する。

条件設定に必要なパラメータを以下に示す。

1)　汚泥処理量[wet-t/日]
2)　汚泥含水率 [%]
3)　汚泥熱量 [kJ/kg]
4)　汚泥可燃分比率 [%]
5)　汚泥成分比率 [%]
6)　炉体放散熱量 [%]
7)　熱交換器放散熱量 [%]
8)　補助燃料熱量 [kJ/Nm^3、kJ/kg]

(2)　廃熱ボイラ設備の設計

本設備は排ガスから熱回収を行い、蒸気を発生させる廃熱ボイラと補機類から構成される。廃熱ボイラにおいて効率的な熱回収を実施できるような廃熱ボイラ設備全体での最適設計を実施する必要がある。各機器の設計上の留意点を以下に示す。

1)　廃熱ボイラ

燃焼排ガスの保有熱量を水と熱交換し、発電用熱源等として利用するための蒸気を発生させる装置であり、形式はボイラ水を循環ポンプによって強制的に循環させる強制循環式、ボイラ水の温度差による比重差で循環させる自然循環式などがある。設置場所等の状況を判断して適切な形式を選定する。概略図を**図 25-1** に示す。構造は縦または横に配列された水管の上部に汽水胴(ボ

イラドラム）を設けており、水管の外側を燃焼排ガスが通過し、水管の内部で加熱され汽水胴（ボイラドラム）で蒸気が発生する構造となっている。水管は排ガス流と直角になるように配置され、排ガス流れが鉛直方向の縦型ボイラでは横に配列された水管が、排ガス流れが水平方向の横型ボイラでは縦に配列された水管が用いられる。縦型と横型は現地の設置スペース、ダクトルート等を考慮して選定する。なお、蒸気を飽和温度以上とする場合は過熱器を付随させる。発電効率の向上のためには、過熱蒸気とすることが望ましい。

また、ボイラ水管に付着したダストを払い落とすため、スートブロー（空気式または蒸気式） を付属させる。煤吹装置は定期的に自動運転を行う。灰吹き設備の運転頻度については、ボイラの運転状況を確認して適切な頻度を設定する。詳細は資料編 1.3.5 **ボイラスートブロー洗浄頻度について**を参照のこと。払い落とされたダストは、本体下部のシュートから、灰搬出装置に排出される。さらに、汽水胴内が設定圧以上になった場合に、装置保護のため圧力を逃す安全弁を具備する。

給水条件については、選定する蒸気条件により異なるため、JIS 規格（JISB8223-2015）に定められた条件（ボイラの運転圧力等）に応じて軟水装置または純水装置を設ける。

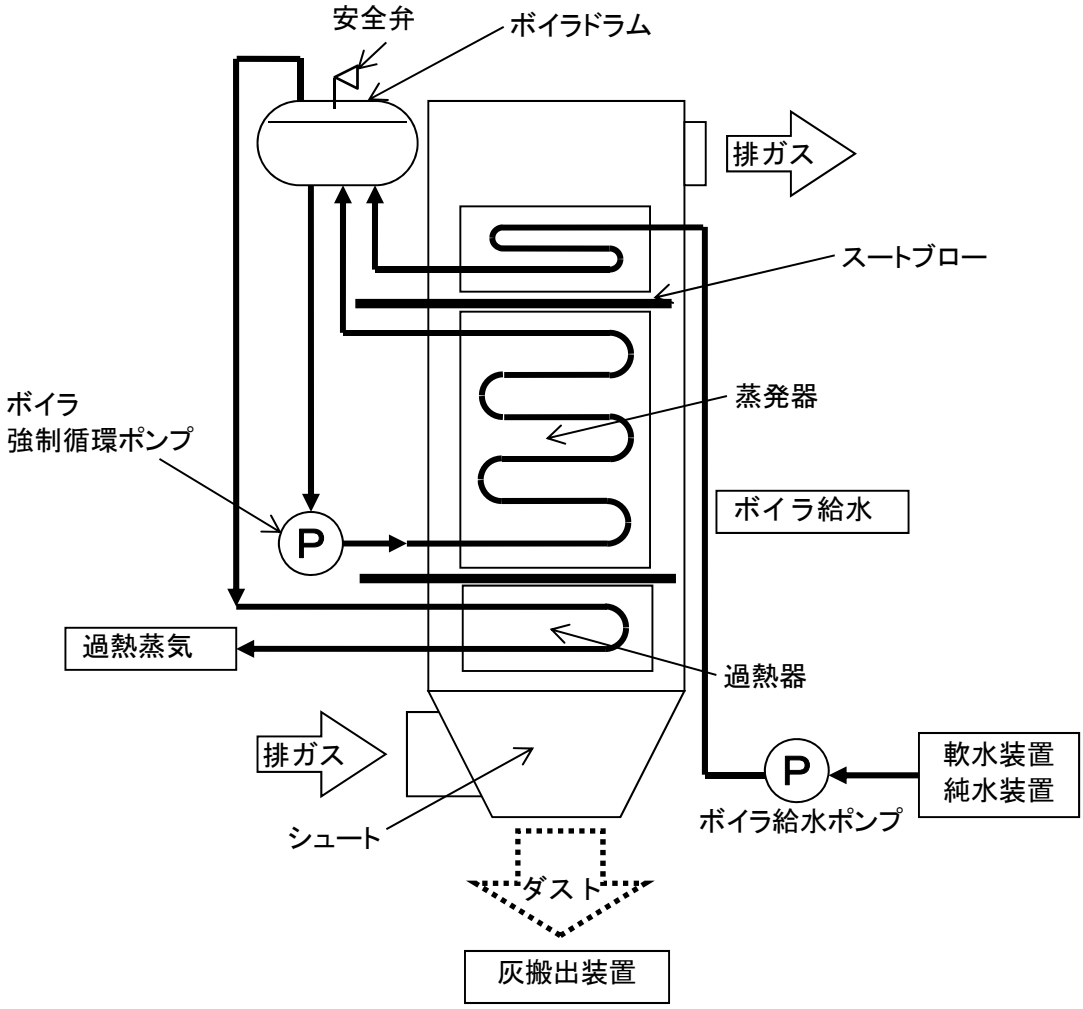


図 25-1 廃熱ボイラ概略図(縦型)

廃熱ボイラを設計する上で必要な諸数値は下記の通りであり、各数値については脱水汚泥性状の変動幅(**図 20-1　脱水汚泥正常範囲**参照)を考慮し、すべての汚泥条件において安全に運転可能となるように数値を選定するとともに安全装置を具備する。

・排ガス温度（入口・出口）（℃）
・排ガス量（乾・湿）（Nm^3/h）
・排ガス組成（CO_2、H_2O、O_2、N_2 等）（％）
・回収蒸気圧力 （MPaG）及び温度 （℃）

上記数値から検討された発生蒸気量から、ボイラの常用蒸気量と最大蒸気量を決定し、付帯機器の容量計算に使用する。廃熱ボイラの付帯機器としては下記の通り。

2)　ボイラ給水ポンプ

廃熱ボイラのボイラドラムに給水するための高揚程のポンプである。形式については高圧を保持するボイラドラムへ給水を行うポンプのため、揚程が不足すると給水不全が発生する可能性があることに留意し揚程及び給水温度を考慮して多段又は単段タービンポンプ等の適切な揚程のものを選定する。給水量は発生蒸気量に応じて制御する。

なお、ボイラ給水ポンプの故障停止時に廃熱ボイラが空焚きとなるため、保安上予備機を設ける必要がある。

3)　ボイラ強制循環ポンプ（必要な場合）

廃熱ボイラ缶水を強制的に循環させるためのポンプである。形式はキャンドポンプ等の適切な揚程のものを選定する。高温かつ強アルカリ性の缶水を循環させるため、ポンプ形式及び材質の選定には注意が必要となる。

なお、ボイラ強制循環ポンプの故障停止時には、水管への循環水の供給が停止し、水管の破損を招く恐れがあるため、保安上予備機を設ける必要がある。

4)　ボイラ薬注設備

ボイラ水の水質を基準値内に維持するために、ボイラ水配管中にスケールの形成等を防止するための規定の薬品を注入する装置であり、貯留タンクと注入ポンプにより構成される。ボイラ薬品は使用する軟水または純水水質により注入量を決定する必要がある。

5)　軟水装置および純水装置

軟水装置はボイラ給水として利用する水中に含まれるカルシウムイオンやマグネシウムイオンなどの陽イオンを、イオン交換樹脂の働きでナトリウムイオンに置き換える働きを持つ装置である。カルシウムイオンやマグネシウムイオンは、濃度や pH、温度など条件が揃うと、二酸化炭素や、イオウ化合物やリン酸などと結合してスケールを析出させる。スケールはボイラ水管内に付着して、伝熱

効率を低下させたり水の流路を狭めたりする。しかしナトリウムイオンは解離性が高く、完全に水分を失わない限り析出しにくい（スケール化しにくい）ため、スケールによるトラブルを防ぐことができる。イオン交換樹脂の再生には、食塩水（塩化ナトリウム)を用いるため、ユーティリティとして工業塩を用いる。

蒸気が高圧（2.0MPa 以上）の条件においては、ナトリウムイオンまで除去した純水を用いる必要があり、純水装置を用いる必要がある。純水装置は陽イオン交換樹脂と陰イオン交換樹脂により構成されており、その再生には塩酸ならびに苛性ソーダが用いられる。

(3)　復水式タービンの設計

本設備は廃熱ボイラで発生させた蒸気を電気エネルギーに変換する復水式タービン及び発電機と、補機類によって構成される。得られる蒸気量に対して発電量を最適化するため、蒸気量にあったタービン及び発電機の規模の選定と入口蒸気、出口蒸気各条件の設定が重要となる。各機器の設計上の留意点を以下に示す。

1)　復水式タービン発電機

廃熱ボイラで発生した蒸気の持つエネルギーを回転エネルギーに変換する装置で、形式は衝動型復水式タービンを基本とする。概略図を**図** 25-2 に示す。

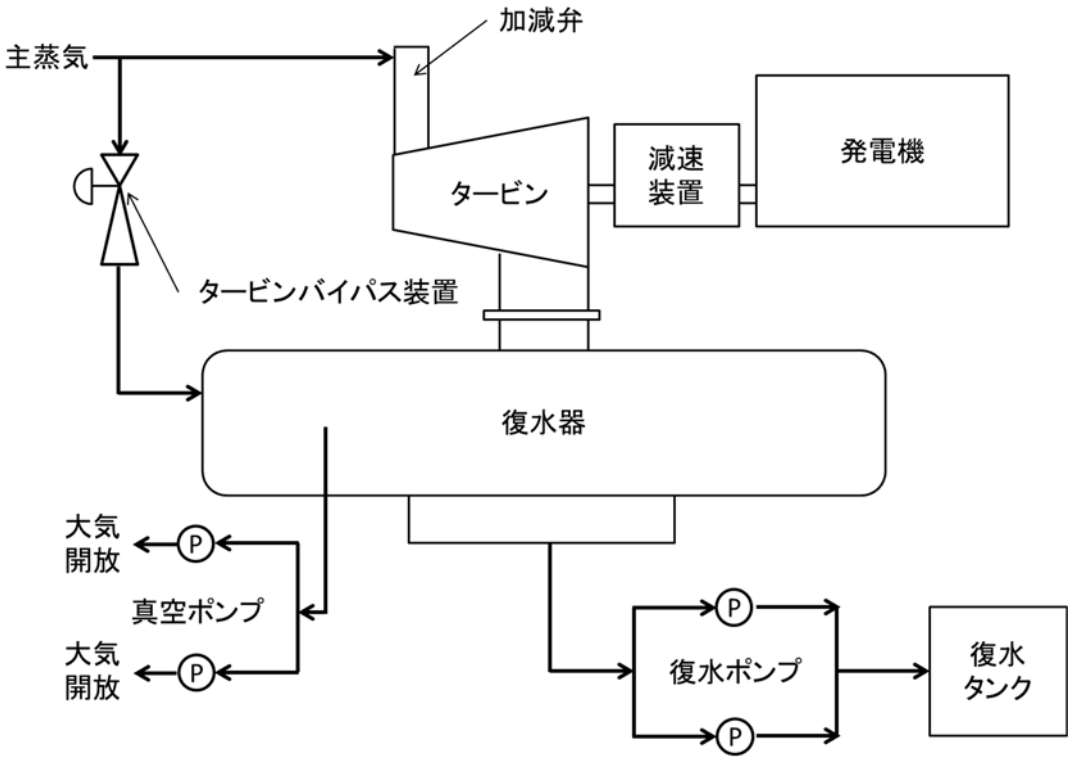


図 25-2 復水式タービン発電機概略図

復水式タービンにより得られた回転エネルギーは減速機を介して発電機に適した回転数まで調整され、発電機によって回転エネルギーから電気エネルギーへの変換を行う。

復水式タービン発電機を設計する上で必要な諸数値は下記の通りであり、各数値については脱水汚泥性状範囲（**図** 20-1 参照） を考慮する。

・入口蒸気圧力 （MPaG）、温度 （℃）
・タービン排気圧力 （kPaA）、温度 （℃）
・タービン入口蒸気量 （t/h）

※タービン排気圧力については、3）水冷式蒸気復水器に供給される冷却水温度と量から最適な条件を決定し選定する。

上記数値より検討された結果から、付帯機器の容量計算を実施する。復水式タービン発電機の主な付帯機器は下記の通り。

2） タービンバイパス装置

タービンバイパス装置は、タービン停止時に発生した蒸気を安全に減圧・減温し復水器にて処理可能とする設備であり、減圧部と減温部からなる。減圧・減温後の蒸気条件については水冷式蒸気復水器の能力を考慮して選定する。

3） 復水器

復水器は、蒸気を復水化させるための装置である。構造は多管式（シェル＆ チューブ式）を基本とする。**§ 14** で検討した利用可能な冷却水流量・温度・水質を考慮の上、適切な構造・材質を選定する。

容量としては、発生した蒸気をすべて復水化できる能力とし、その能力を満足できる冷却水量を確保する。下水処理水の性質によっては復水器内に付着物が発生する可能性があるため、定期整備時の清掃等対策を考慮する。詳細は資料編 1.3.2 **復水器冷却水について** を参照のこと。

4） 真空ポンプ

真空ポンプは、復水器中に導入される非凝縮性気体（窒素等）を取り除き復水器内の真空度を確保するために設置する。形式は水封式を基本とし、復水器の真空度を満足する容量を選定する。

5） 復水ポンプ

復水ポンプは、復水器で復水された復水を復水タンクに給水するために設置する。容量は復水を十分に給水可能な容量とする。

6)　復水タンク

復水タンクは、復水を一次的に貯留し、発電設備系内の蒸気・復水流量の変動を吸収するために設置する。容量は設置場所・コストを考慮し、想定される変動幅に対応可能なように選定する。

(4)　ダクト・配管の設計

ダクト及び配管設計時の留意点を以下に示す。

1)　ダクト

廃熱ボイラへ導入する燃焼排ガスは飛灰を含むため、灰の堆積を考慮して設計を行う。堆積が予想される部分についてはダクトに傾斜をつける等灰堆積を回避するような設計を行い、必要によってはハンドホール等を設置し、清掃が可能な構造とする。詳細については、資料編 1.3.4 **ダクト灰堆積について** を参照のこと。

また、ダクトからの放熱量が増加することにより、発電出力に大きな影響が出るため、十分な保温を検討する。詳細については資料編 1.3.1 **ダクト配管の放熱量について** を参照のこと。

2)　配管

蒸気の温度・圧力の低下は発電出力に大きく影響を与えるため、できる限り圧損が少なくなるよう配管設計を行い、十分な保温を実施する。ボイラと復水式タービンの設置場所についてはできる限り配管長を短くするように選定する。実証設備は蒸気配管長 90m 程度で、放熱量は 0.45％程度（春先に測定）である。外気温が 0℃程度～30℃程度まで変化した場合の放熱量を試算すると、放熱は 0.47％～0.43％程度となり、十分な保温を実施している状況の場合、外気温の変動による影響は極僅かであると思われる。配管長が長くなると圧力損失が増加し、必要な配管太さが大きくなるため、コストが増大する。得られるメリットと配管長を伸ばすことによるコストを十分に検討したうえで、配置を決定する必要があると思われる。詳細については、資料編 1.3.1 **ダクト配管の放熱量について** を参照のこと。

(5)　灰搬出設備の設計

本設備は廃熱ボイラにおいて排出される灰を灰ホッパまで移送する設備である。本設備は従来の灰搬出設備と同様に設計可能である。形式としては空気輸送、フライトコンベア等配置場所・コスト等を考慮して選定する。

(6)　共通設備の設計

本設備は発電設備に圧縮空気を供給する設備であり、従来設備と同様に設計可能である。各機器の設計上の留意点を以下に示す。

1)　空気供給設備

制御用・作動用等の圧縮空気を確保するために設ける。騒音、振動等を考慮した形式を標準とする。なお、形式によっては騒音・振動防止法において特定施設として扱われるため、設置場所に

は留意すること。また空気圧縮機の付属として、空気使用量の変化に対応するため空気槽を設け、制御用・作動用空気の除湿のため除湿器を設けるとともに、停電・断水等発生した場合においても安全に停止することができるよう留意する。

(7)　計装設備の設計

計測設備は、本実証設備の運転状況を適切に把握するために必要な項目を測定可能なように設計する。各設備における主な計測項目を**表 25-1** に示し、廃熱ボイラ及び蒸気タービンについて、計測器の配置位置をフロー上に示した

表 25-1　高効率発電設備の主な計測項目

設備名称	計測項目
廃熱ボイラ設備	ボイラドラム水位・圧力、給水流量・温度、排ガス温度（入口・出口）、ボイラ缶水 pH・電気伝導度、ボイラ循環水流量
蒸気タービン発電機	蒸気流量、タービンバイパス蒸気流量、タービン入口蒸気温度・圧力、排気温度・圧力、復水器内圧力・温度、復水流量、
灰搬出設備	集塵装置圧損、空気量（空気輸送の場合）
ユーティリティ設備	空気槽圧力

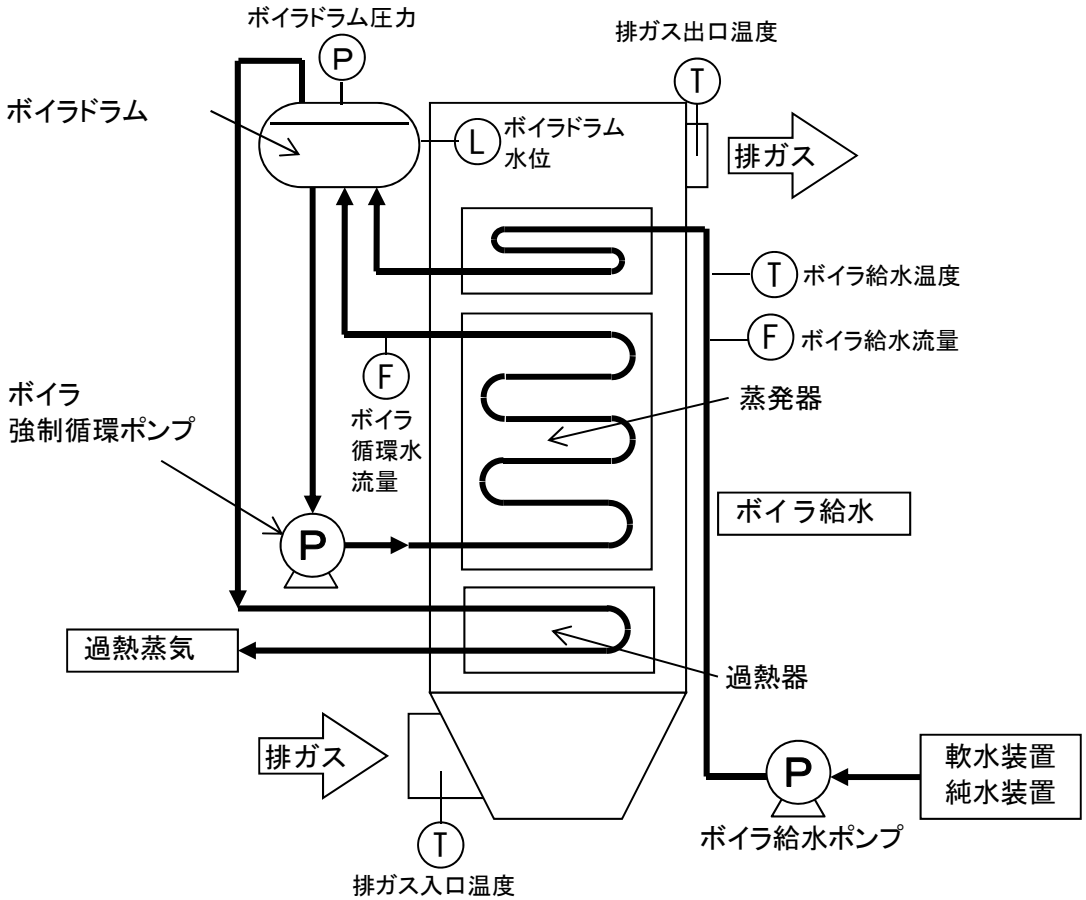


図 25-3　廃熱ボイラ 計測器配置模式図

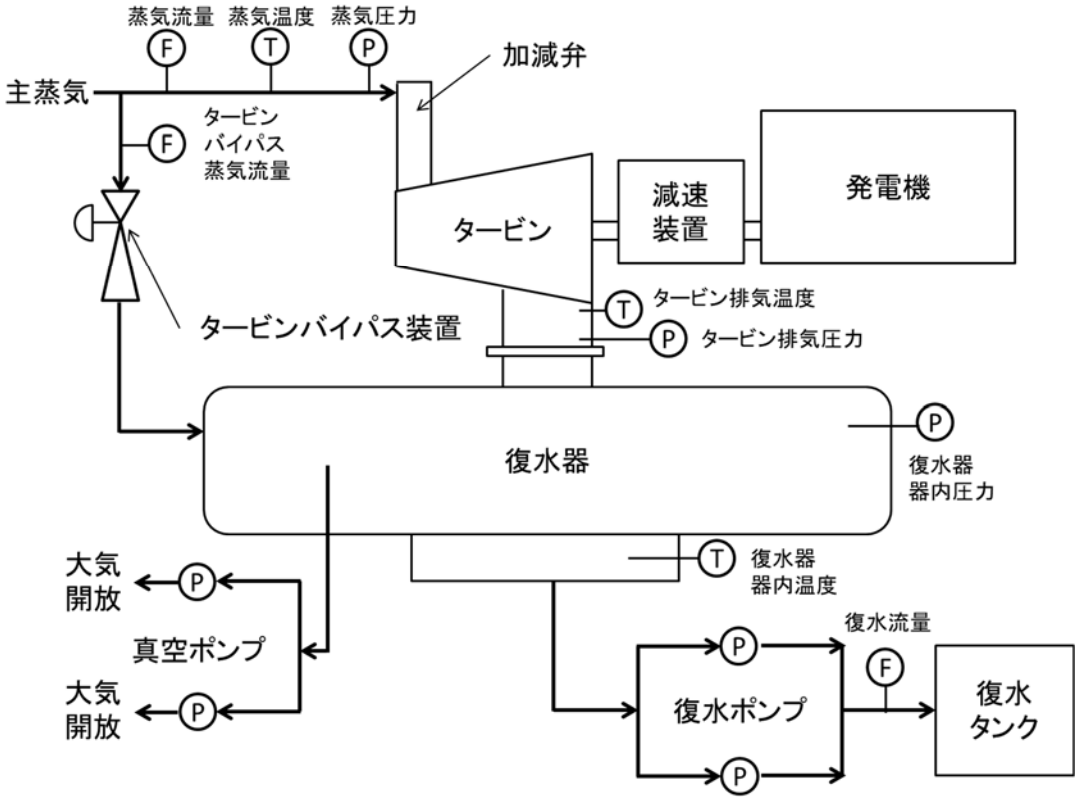


図 25-4　蒸気タービン発電機 計測器配置模式図

(8)　制御方法

1)　廃熱ボイラ

廃熱ボイラの自動制御は、ボイラドラム水位制御、ボイラドラム圧力制御、過熱蒸気温度制御を行う。ボイラドラム水位制御については、ボイラドラム液位、給水量、蒸発量、の 3 要素からドラムレベル制御を行う3 要素制御を基本とする(**図** 25-5 参照)。ボイラドラム圧力についてはタービン側で主蒸気圧力を制御し、調整する。過熱蒸気温度制御については、方式として過熱器をバイパスさせる制御あるいは過熱蒸気を減温器に導入し設定温度まで制御する方式があり、適切な形式を選定する。

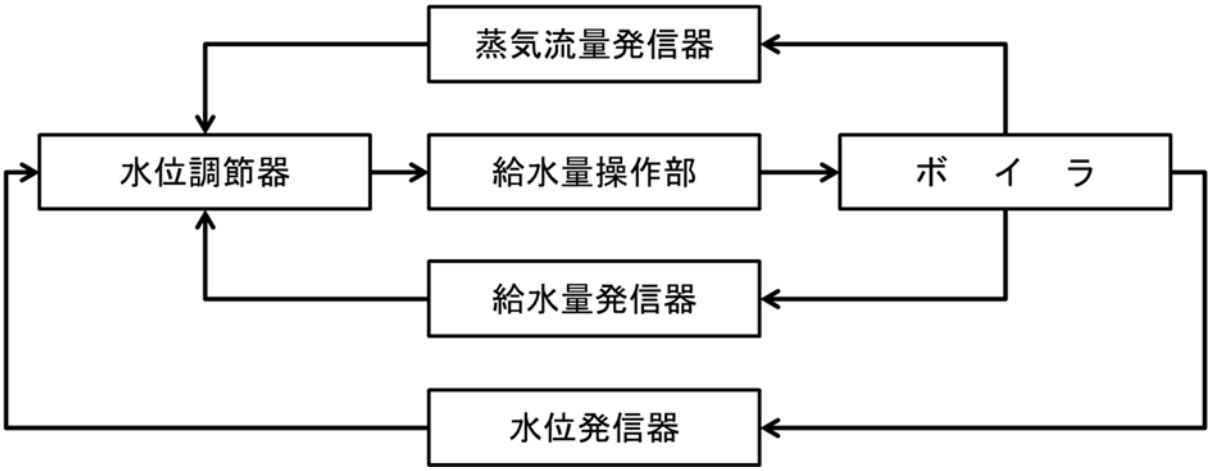


図 25-5　ボイラドラム水位制御ブロック図(3 要素制御例)

2)　タービン

蒸気タービンの制御については、主蒸気圧力等が一定となるようにタービンの蒸気加減弁を制御し、タービンへの蒸気流量に応じた発電を行う主圧制御と、タービン出力を設定し、設定値に見合った発電量となるようにタービンの蒸気加減弁開度を調整する負荷制御がある。負荷制御実施時にはタービンに導入される蒸気量が減り、主蒸気の圧力が上昇するため、タービンバイパス減温器にて主蒸気圧力が設定圧以上に上昇しないように余剰蒸気のバイパス処理を行う。なお、設定圧については、タービン入口蒸気圧力が設計値以上となることが無いよう設定する。

(9)　安全対策

従来の汚泥焼却設備と同様の安全対策(火傷防止、落下・転落防止、巻込まれ防止、酸欠防止等)を行う。

§26 局所撹拌空気吹込み技術の設計

基本計算を基に、局所撹拌空気吹込み設備の設計を行う

(1)　局所撹拌吹込み設備の設計

(2)　計装設備の設計

(3)　制御設備の設計

(4)　その他

(5)　安全対策

【解　説】

(1)　局所撹拌空気吹込み設備の設計

局所撹拌空気吹込み設備は、空気予熱器により加熱された燃焼空気の一部を分岐し、砂層よりも上部で再度吹き込むことで、砂層での抑制燃焼とフリーボード部での高温燃焼を促進し NO_x、N_2O の排出を抑制することを目的とする設備である。局所撹拌空気吹込み設備については下記の通り設計する。

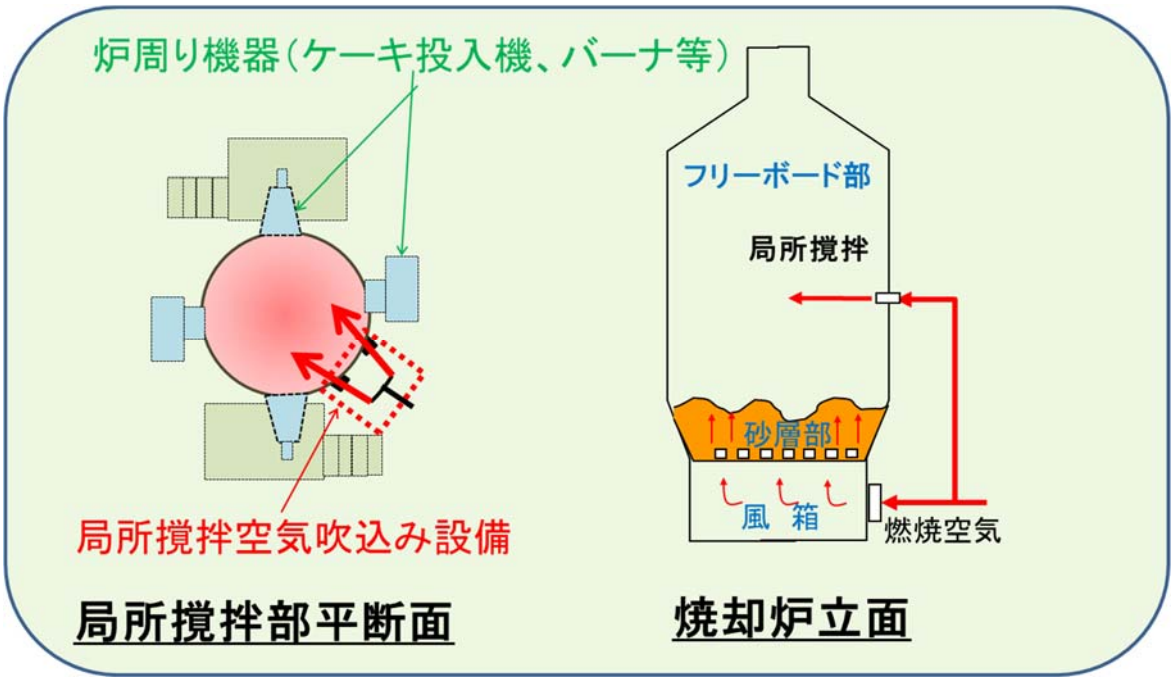


図 26-1　局所撹拌空気吹込み装置概略図

1)　局所撹拌空気吹込み位置

局所撹拌空気の吹込み位置については、炉の寸法等に留意して検討し、砂層内での抑制燃焼の達成とフリーボード部の高温化を達成するため、目安として砂層よりも上部且つ炉体高さの半分程度の位置に設置する。局所撹拌空気の吹込みに伴い、炉内温度のセンサー等に悪影響を与えないよう横方向の設置位置を決定する。詳細の確認には各パラメータを変化させてシミュレーションを実施し、炉内温度分布を検討の上決定する。**表 26-1** にシミュレーション時の検討項目、**図 26-2** に局所撹拌空気吹込みシミュレーション例を示す。局所撹拌空気の吹込みにより、焼却炉フリーボード部に吹込み前 840～850℃から最大 30℃程度上昇し 860～880℃の高温場が形成されるという結果が得られた。

表 26-1 局所撹拌空気吹込みシミュレーション時の検討項目

検討項目	備考
FB 最高温度	N_2O 削減効果に影響
FB 高温範囲	N_2O 削減効果に影響
炉内 O_2 濃度	撹拌状況の確認のため
炉内 CO 濃度	撹拌状況の確認のため
滞留時間	

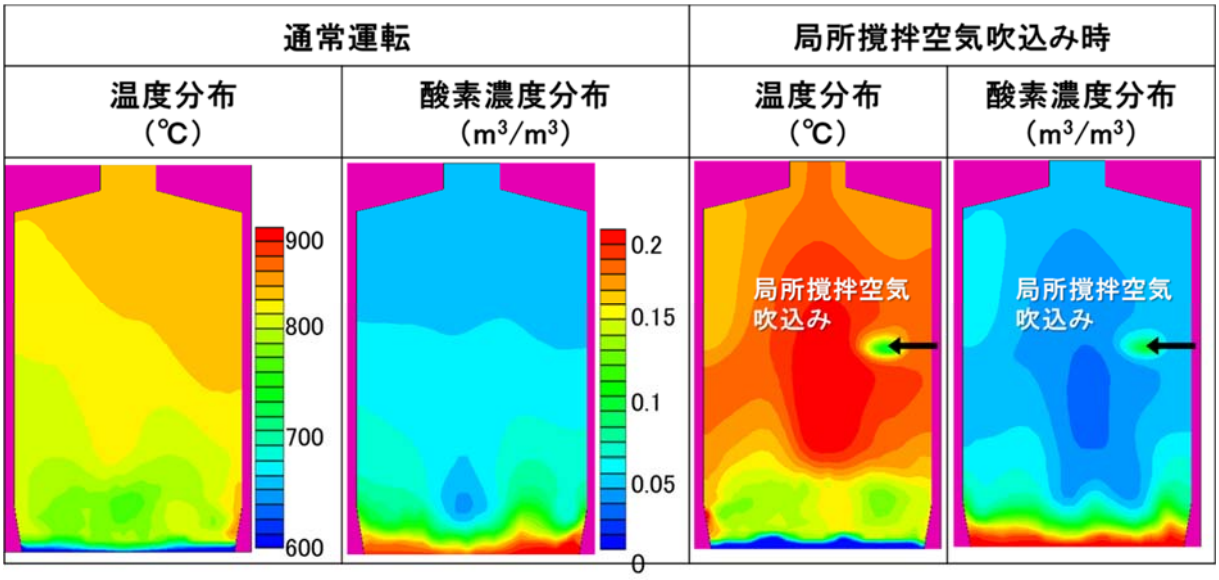


図 26-2 局所撹拌空気吹込みシミュレーション例

2)　局所撹拌空気吹込み角度

局所撹拌空気の吹込みノズルの吹込み角度については、局所撹拌空気吹込み位置の水平方向に設置し、水平面内でノズル同士が一定の角度となるように設計する。詳細の確認が必要な場合はシミュレーションを実施し、炉内温度分布を検討の上決定する。以下に局所撹拌空気吹込みノズル部の概略図を示す。

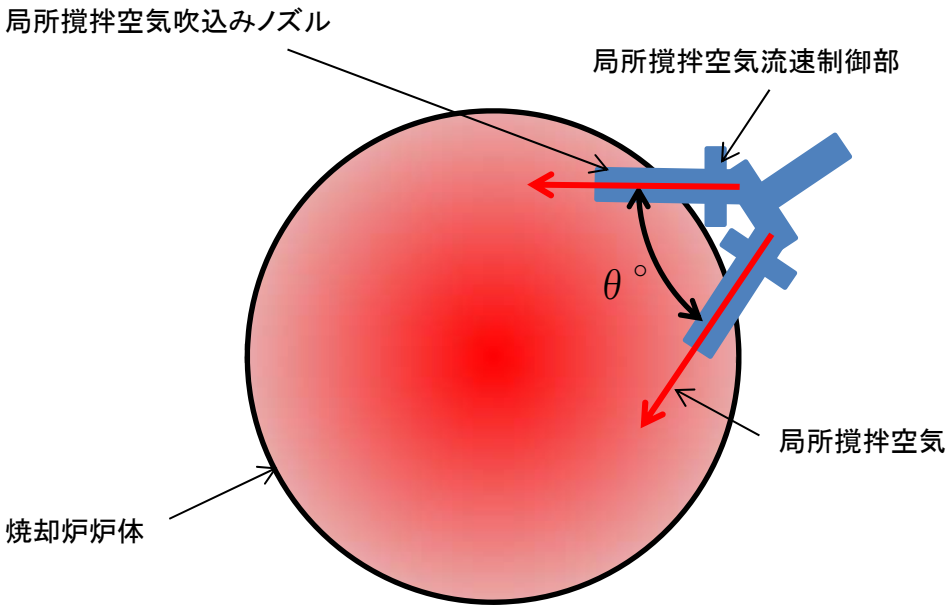


図 26-3　局所撹拌空気吹込みノズル部概略図

3)　局所撹拌空気吹込みノズル

局所撹拌空気吹込みノズルは、燃焼空気量の 10～20%程度を局所撹拌空気として吹込み可能なように設計を行う。また、流速の調整機能を備え、運転条件の調整が可能となるように設計する。吹込みノズルについては、熱伸び等を十分考慮して設計し、流速が高い吹込み運転の場合でも破損しない十分な強度を持つようにする。詳細は資料編 1.3.6 **局所撹拌空気吹込み装置損傷について**を参照のこと。

既設設備への追加設置を実施する場合は、既設設備と干渉しないように配管し、局所撹拌空気の分岐により、流動空気の圧力等に影響が無いか留意の上設計する。

(2)　計装設備の設計

計装設備は、本実証設備の運転状況を適切に把握するために必要な項目を測定可能なように設計する。本設備における主な計測項目を下記**表** 26-2 及び**図** 26-4 に示す。

表 26-2　**局所撹拌空気吹込み設備の主な計測項目**

設備名称	計測項目
局所撹拌空気吹込み設備	燃焼空気量、局所撹拌空気量、炉内温度、排ガス温度、排ガス濃度（O_2、N_2O、NO_x、CO 等）

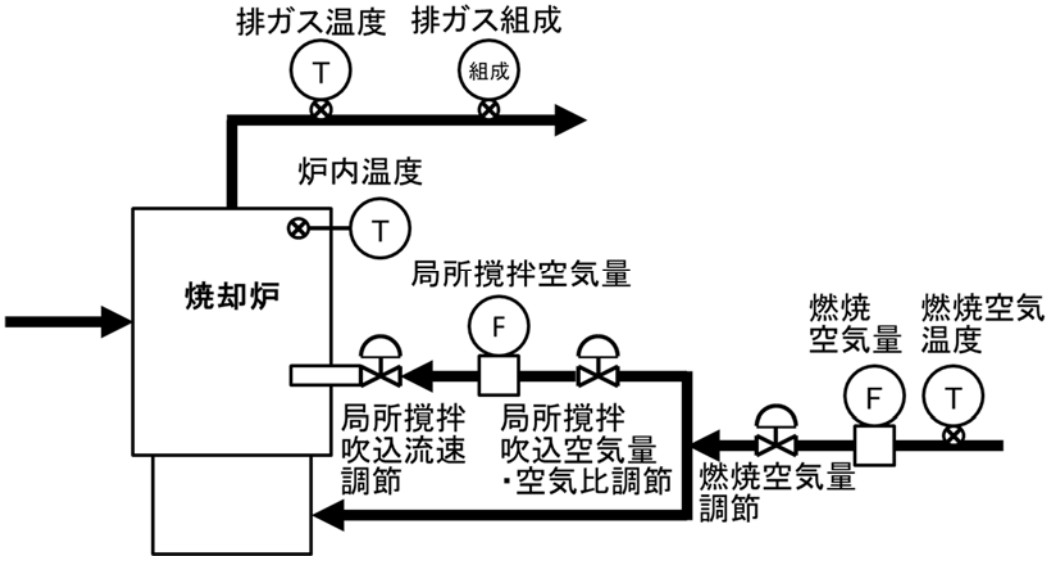


図 26-4　**局所撹拌空気吹込み設備計測器配置模式図**

(3)　制御設備の設計

局所撹拌空気吹込み設備の運転による N_2O、NO_x 削減効果を最大化するため、下記監視項目を監視し、パラメータを操作する。下記の**表 26-3** に監視項目及びパラメータの一覧を示す。さらに、局所撹拌空気の吹込みにより、流動空気量が流動下限値を下回らないようインターロックを設ける等の対応を行う。

表 26-3　監視項目と操作パラメータ

監視項目	操作パラメータ
・炉内温度 ・排ガス濃度（O_2、N_2O、NO_x、CO 等） ・燃焼空気比 ・焼却量 ・補助燃料使用量	・燃焼空気量（設備の設置状況による） ・局所撹拌空気量 ・局所撹拌空気吹込み流速

運転員は N_2O 濃度の上昇に対する局所撹拌空気量の調整や排ガス中酸素濃度の上昇に対する流動空気量の調整など、上記パラメータを監視し手動にて各操作パラメータの操作を行う。

運転員に必須とされる資格・経験等は無いが、焼却炉の運転と密接に関連しているため、通常の流動焼却炉の運転・操作に習熟していることが望ましい。なお、監視項目と操作パラメータにより自動化した制御運転も可能となる。

(4)　その他

砂層温度分布に偏差が生じた場合は、砂層の不流動が発生する恐れがあるため、状況に留意して運転を行う。不流動の発生に関する詳細は資料編 1.3.3 **焼却炉流動不良について**を参照のこと。

(5)　安全対策

従来の汚泥焼却設備と同様の安全対策（火傷防止、落下・転落防止、巻込まれ防止、酸欠防止等）を行う。