

大型多管式貫流ボイラーにおける高圧ドレン回収

川重冷熱工業(株)

戸田 尹

Heat Recovery System of High Pressure Condensate on Drumless Water Tube Boiler

by Osamu Toda

1. はじめに

蒸気機関発明以来、蒸気はエネルギー変換手段ならびにエネルギー輸送媒体として広く利用されてきた。蒸気の持つ優れた特性、安全性を基調とした取扱い・入手および廃棄などの容易さ、ならびに潜熱の大きさから来るエネルギー輸送媒体としての長所により、現代の産業界においても未だその主役の座を他に譲ってはいない。蒸気を利用する場合の多くは、その潜熱を利用している。潜熱を放出した蒸気は凝縮水となりエネルギー輸送の役目を終了するが、それはまだ高温で、高い顕熱を有する。エネルギー資源の豊富な時代においては、凝縮水に残されたエネルギーは大気中に排出されていた。しかし、エネルギー資源の枯渇化、化石燃料大量消費による大気汚染・地球温暖化などの地球規模の環境問題の表面化などにより、エネルギーの有効活用は重要な課題となっている。蒸気が熱輸送媒体の主役であり、かつその蒸気を発生させるボイラーを製造するものとしては、この蒸気使用設備における省エネルギーを図ることが、課せられた社会的使命の一つと考えている。

2. 高圧ドレン回収

(1) ドレン回収における省エネルギーの特長

蒸気を使用する設備において、その発生源であるボイラー、それを消費する負荷器を含めた設備全体の熱効率を考えた場合、目的である熱輸送を終え潜熱を放出した凝縮水をボイラーへ戻すことは、ごく自然なことと言える。凝縮水の持つ熱エネルギーは、熱輸送を担っている潜熱の約1/3に相当する。これを無駄にするか否かは、設備全体の効率を大きく左右する。このような観点から、

既に省エネルギーを目的とした蒸気使用設備におけるドレン（凝縮水）回収は、広く実施されている。一般的には、ドレンは給水タンクへ回収する場合が多い。給水タンクは大気開放であるから給水タンクの熱収支上、給水タンク温度が100℃以下になる場合は、これで充分目的を達成できる。開放タンクへドレンを回収しても無駄を生じないドレン温度と回収率の関係を図1に示す。

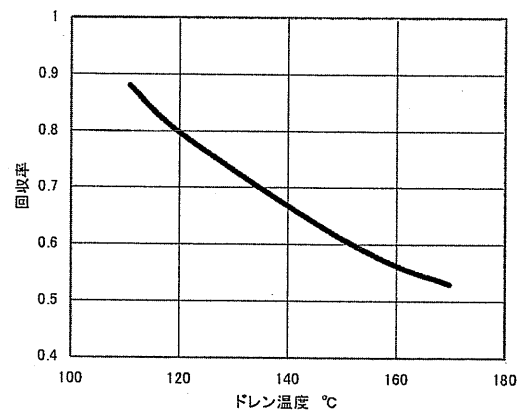


図1 限界回収率

これからもわかるように回収ドレンの温度あるいは回収率が高い場合は、この方法では余剰熱量が給水タンクから排気蒸気として大気中に放出され、無駄が生じる。この無駄をなくし、さらに省エネルギーを図る上においては、有圧ドレン回収が必要となる。特に加熱側温度が100℃以上を要求される設備、熱交換器の場合は、これからの排出ドレンが高エンタルピを有するため、無圧ドレン回収を行った場合、フラッシュ蒸気が多量に発生し、熱損失が増加する。100℃以上の有圧ドレンが大気圧に減圧したときの自己蒸発量（フラッ

シュ蒸気量)を図2に示す。ドレンの温度(圧力)が高いほどフラッシュ蒸気量は増加するので、ドレンの圧力をできるだけ高く保ってフラッシュ蒸気量を抑制するのが、省エネルギー上好ましいことになる。したがって、省エネルギーのためのドレン回収はできるだけ高い圧力での回収「高圧ドレン回収」を目指すべきと言える。

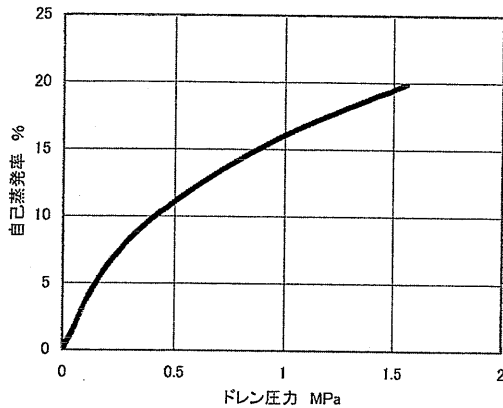


図2 フラッシュ蒸気量

(2) 代表的負荷器

従来から高圧ドレン回収を行っている代表的負荷器を表1に示す。

表1 代表的負荷器

負荷器	負荷パターン
コルゲートマシン	連続一定
抄紙機	連続一定
フライヤー	連続一定
ゴム加硫器	バッチ

これらは、使用した蒸気をほぼ100%高圧ドレンとして排出する機械で、高圧ドレン回収を行うことにより、その省エネルギー効果を得やすい。言い換えるとドレン回収しない場合には、設備熱効率が大変悪くなる機械である。それぞれの機械の中で実際に蒸気が消費されるのは、コルゲートマシン、抄紙器では主に加熱シリンダである。フライヤーは、熱交換器で揚げ油を蒸気で加熱する。揚げ物の適正油温は、180~200℃であるからそれを加熱する蒸気の圧力は2.0MPa以上(約212℃)が必要である。蒸気加熱式フライヤーは、安全性

と熱効率が高く、かつ、油槽の温度を均一にできるのが特長である。この場合も使用蒸気は100%還流ドレン系統によりボイラーへ戻すことができ、これを高圧のまま回収することで設備全体の熱効率をより高くすることができる。

3. 高回収率実現の条件

高い回収率でドレン回収を実現するのに必要な条件としては、

- ①ボイラーの容積(水側)が大きく還流ドレンの変動を吸収できる。
- ②ボイラーの給水流量・燃料流量が安定しており、かつ系の流量変動が小さい。

などが挙げられる。

特に、コルゲートマシンのように蒸気使用量が極めて安定した負荷器の場合、ドレンタンクなしでも高い回収率を実現できる。言い換えると、

- ①系が還流ドレンの流量変動を吸収できる容積を有すること。
- ②系の流量変動をなくし、蒸発量=使用蒸気量=環流ドレン量=給水量=蒸発量の平衡を保つこと。

が回収率を高くできる条件となる。

4. 多管式貫流ボイラーにおける高圧ドレン回収

多管式貫流ボイラーは、法的規制優遇処置(取扱い資格・検査・公害規制等)・低コスト・高効率・省スペースなどの特長により、その蒸気ボイラーの設置台数に占める割合は概ね80%に達している。これらの大半は小型ボイラーであるが、今回テーマとしている高圧ドレン回収を行うボイラーは蒸気圧力が高く、最高使用圧力は0.98MPaを超え小型ボイラーではなくなる。しかし、多管式貫流ボイラーの特長が買われ、その占有率が日々増加している状況である。そこで、高圧ドレン回収を行う場合の当社製従来型多管式貫流ボイラーと燃焼・給水共比例積分制御を行う多管式貫流ボイラー(以下連続制御式多管貫流ボイラーと言う)のそれぞれの特長を紹介する。

(1) 当社製従来型多管式貫流ボイラーの場合

一般的多管式貫流ボイラーの多くが、その制御方法として下記を採用している。

① 燃焼制御が3位置制御

② 給水量制御がオンオフ制御

当社製従来型多管式貫流ボイラーも同様である。

これは、制御システムが単純であり低コストで実現可能であることが最大の理由であろう。しかし、このことによって、この制御方式を採用する場合は給水量および蒸発量を一定に保つことができない特性を有することになる。この場合、給水側はオンオフ制御であるから給水量0%またはほぼ120~150%の範囲で変動を繰り返す。燃料側は、0-50-100%で切換わる。燃焼量50%と100%では、蒸気使用量と釣り合いそうに思えるが、給水オンオフ制御との関係から、蒸発量が50%あるいは100%で一定に落ち着くことはなく、常に変動を繰り返す。ドレン回収を行う場合には、給水オフ時は高圧ドレンが余ってしまう。それを溜め込むタンクがない限り給水タンクへ放出する以外になくなる。もっとも、全く系外に放出するわけではないのでドレンの熱量がすべて損失になることはない。例えば、0.78MPaで回収したドレンを100℃のタンクに放出すると高圧ドレンの持つ約44%の熱量を大気中に放散することになる。このように、当社製従来型多管式貫流ボイラーでの高圧ドレン回収では、ボイラー自身が生ずる流量変動を吸収できるタンクを設けないと炉筒煙管ボイラーまたは水管ボイラー並みの高回収率を実現できないという特性がある。

(2) 当社製大型多管式貫流ボイラーの場合

① 当社製大型多管式貫流ボイラーイフリーストシリーズの概要

a) 外観写真1, 2

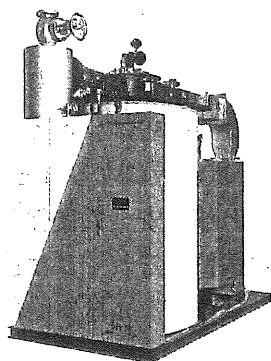


写真1 IF-6000GE (化粧ケーシング付OP)

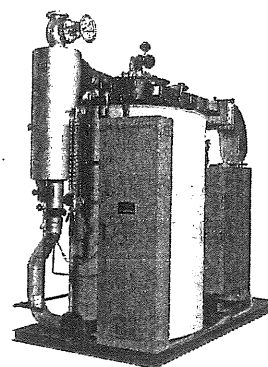


写真2 IF-6000GE (標準)

- b) 最大蒸発量
(実際) 5 070~2 535kg/h
(伝熱面積30m²以下)
- c) 最高使用圧力 最高 3.2~1.56MPa
- d) 燃焼量制御 比例積分動作
- e) 給水量制御 比例積分動作
(気水分離器水位による)
- f) バーナターンダウン 1/6
(ガス焚き時送風機インバータ制御)
- g) 取扱い資格
ボイラー取扱い技能講習修了者
- h) 多缶設置時制御
比例積分制御による缶数制御
(PI缶数制御)

上記は、イフリーストシリーズの主要目であり、多管式貫流ボイラーでは唯一最大蒸発量5 070kg/hを実現している。伝熱面積は30m²以下であり、ボイラー取扱い技能講習修了者が取扱うことができる。燃焼量・給水量共比例積分制御を行う。バーナターンダウンはガス焚きの場合、送風機のインバータ制御を行って水管の過熱などを招くことなく1/6まで絞ることができる。これらは当社製多管式貫流ボイラー独自の優れたシステムメカニズムにより実現した特長である。

② 高回収率の実現

当社製大型多管式貫流ボイラーにおけるドレン回収の特長は、炉筒煙管ボイラーや水管ボイラー並みの回収ができることである。すなわち、コルゲートマシンのように蒸気使用量が安定している。

ドレンの還流率がほぼ100%であるような負荷器の場合でも、ドレンタンクなしで高い回収率の高圧ドレン回収ができる。

多管式貫流ボイラーでこれが可能となる理由を以下に説明する。

高圧ドレンの回収率を高くするには、高圧ドレン回収系統外へのドレンの放出を防ぐ必要がある。これには前述の如く二つ方法がある。

①系の流量変動を吸収できる容積を設けること。

②系の流量変動を無くし、蒸発量＝使用蒸気量＝環流ドレン量＝給水量＝蒸発量の平衡を保つこと。

炉筒煙管ボイラーや水管ボイラーでは、ボイラー自身が①を満足しているためこれにより回収率を高くすることができる。多管式貫流ボイラーは、自身でその容積を持たないのでこの方法で回収率を高めるためには、大きなドレン回収タンクを別に設ける必要がある。したがって、当社製大型多管式貫流ボイラーでは系の流量変動をなくし系の平衡を保つ方法をもって高いドレン回収率を実現することになる。前述の当社従来型多管式貫流ボイラーの特性、すなわち燃焼3位置制御および給水オンオフ制御の特性を想起して頂くと②の方法は不可能である。では、なぜ当社製大型多管式貫流ボイラーでは②の方法が採れるのかであるが、これは、連続制御の採用にある。ここで言う連続制御とは、燃焼・給水共比例積分制御を行うことで、これによって、ボイラー出力を蒸気負荷と平衡させることができる。すなわち、要求負荷量＝蒸発量＝給水量とすることができる。多管式貫流ボイラーでの連続制御は、単にコストをかけその制御系を設ければ実現すると言うものではなく水位制御システムの根幹に関わる点がある。ボイラーの水位制御の目的は伝熱面の安全性確保である。炉筒煙管ボイラー・水管ボイラーでの水位と言えば、胴・気水胴の水位一つと考えてよいが、多管式貫流ボイラーの水位を詳細に見ると、本体水管・本体水柱管（管柱）・気水分離器・気水分離器水柱管（管柱）とそれぞれに水位がある。ここではそれらを代表するものとして、

次の二つの水位を考える。

- ①本体水管水位
- ②気水分離器水位

一般的多管式貫流ボイラーは、①が目標値になるように水位制御する。（本体水位制御 図3）当社製貫流ボイラーは、②が目標値になるよう制御する。（気水分離器水位制御 図4）

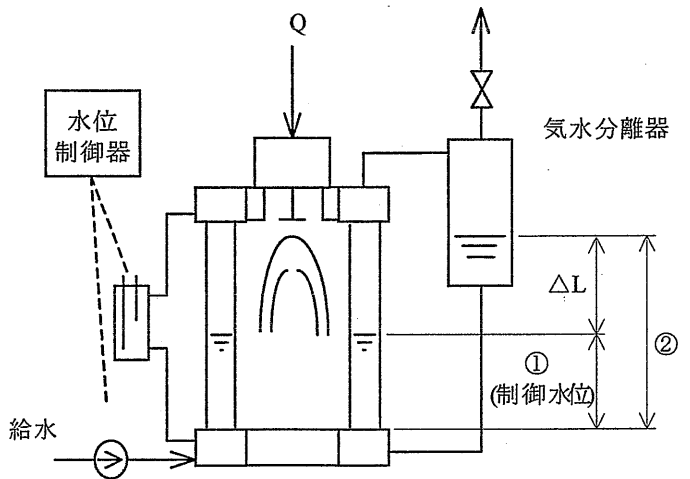


図3 水位制御（本体）

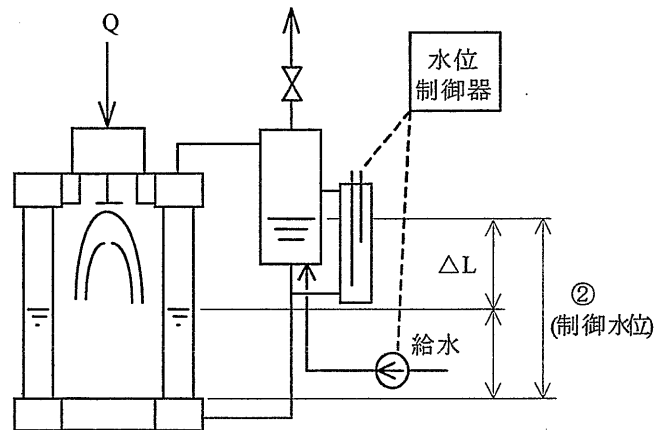


図4 水位制御（気水分離器）

ボイラー運転中の水位①②は、管内流動のため異なった水位を示し、①より②が常に上方に位置する。①と②の差は、ボイラー蒸発量により異なり、蒸発量が大になるほど差は大となる。水位①は水管上部の安全性確保を、水位②は蒸気乾き度確保を担うそれぞれに重要なものである。水位①の適性レベルは、一般的多管式貫流ボイラーでの「水位制御」に見られるように、燃焼量大→低、燃焼量小→高である。この特性

はすべての多管式貫流ボイラーに共通である。

一方、水位②の適性レベルは、燃焼（蒸発）量大→低、これは気水分離室の容積確保に必要である。これでわかるように、水位①を制御すると燃焼量大で制御位置→低、燃焼量小で制御位置→高とする必要がある。これは既に実施されていることであるが、燃焼量を連続制御し、バーナターンダウンもできるだけ拡大する上では、技術的には不可能ではないにしても、複雑な制御を行わなければならない。水位②を一定値で制御すると、水位①は成り行きで理想的な動きとなり、バーナ燃焼性能を100%活用した広い制御範囲の連続制御を無理なく行うことができるのである。

5. 大型多管式貫流ボイラーにおける連続制御の有効性

(1) ボイラー寿命に与える影響

断続制御（3位置・オンオフ制御など）を行う場合、ボイラープロセスの状態は常に変動する。たとえばバーナが100%燃焼を続けていたとしても、給水がオンオフするためボイラーの蒸発量が一定になることはない。負荷器がその変動を許容できる場合は、実用上差し支えない。しかし、ボイラーにとっては、燃焼量および給水量の大幅かつ瞬間的な変更がダメージとして蓄積されて行くことは十分考えられる。特に、このような性質のダメージは操作量の絶対値が大きくなるにともなって大きくなる。したがって、このような断続制御はボイラーが大きくなると無理が生じやすくなる。ただ、熱疲労面での考慮が適正に行われていれば、このようなダメージが表面化するには長い時間を要するので、一般的に言われている多管式貫流ボイラーの寿命7～10年を計画に入れていけばよいことになるのかもしれない。当社製連続制御式大型多管貫流ボイラーの場合は、このような熱衝撃が小さいことや気水分離器水位制御により水管の局部加熱を生じないこと、同時に局部濃縮も防止できること、脱気機能付気水分離器での溶存酸素の低減によるピッチング腐食の防止、下部管寄せへの給水温度の上昇による燃焼ガス側低温腐食の防止などにより寿命は、15～20年を有するものと

考えている。

(2) エコマイザーによる排熱回収

比例積分制御で連続的に給水量を制御することにより、高圧ドレン回収を行う場合もエコマイザーを設けることが可能である。エコマイザーを設けた場合、0.78MPaドレン回収でもボイラー効率90%を実現することができる。ドレン回収によって、給水温度が上昇すると常温給水に比べてエコマイザーの取熱量は低下する。回収ドレンの圧力が上昇するとエコマイザーへの給水温度が上昇し、その傾向は強くなるが負荷器のドレン排出トラップは通常0.3MPa程度の差圧が必要であるのでボイラー蒸気圧力も上昇する。ボイラー蒸気圧力が上昇するとボイラー本体出口排ガス温度も上昇する（図5）ため、やはりエコマイザーは省エネルギーに有効となる。

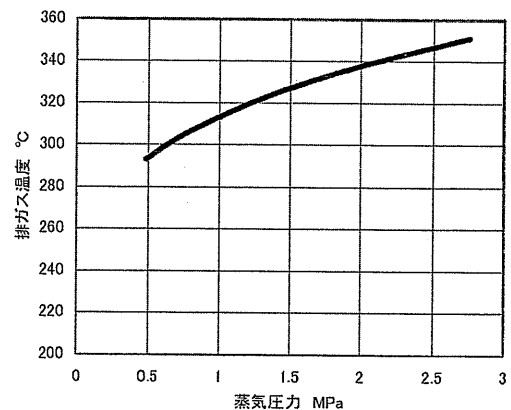


図5 排ガス温度

給水をオンオフ制御する場合は、給水が停止した時エコマイザーで蒸発が発生しウォータハンマ現象を招く。さらに、バーナ3位置制御では給水停止状態で最大燃焼の組み合わせも有り得るため、ウォータハンマ現象を避けることはできない。かつ、エコマイザーの吸収熱量を上げるとエコマイザー出口給水温度が飽和温度に近づくためこれも難しくなる。

当社製連続制御式大型多管貫流ボイラーで高圧ドレン回収を行った場合のエコマイザー出口排ガス温度、ボイラー効率、燃料削減率を図6、7、8に示す。ドレン回収率50%と95%では、ボイラー給水温度の上昇により、エコマイザーの吸収

熱量が低下し、ボイラー効率は約2%低下するが、燃料使用量は約10%削減できる。その結果、A重油を使用した場合の燃料原単位は図9のようになる。

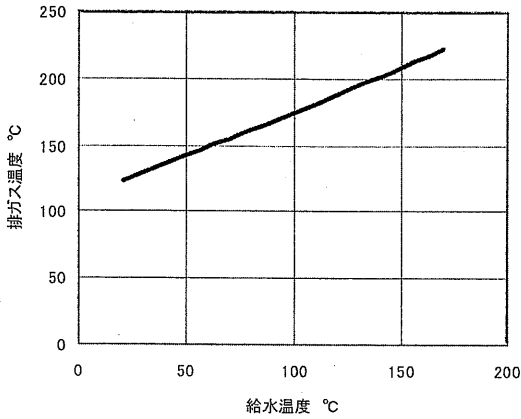


図6 エコノマイザー排ガス温度

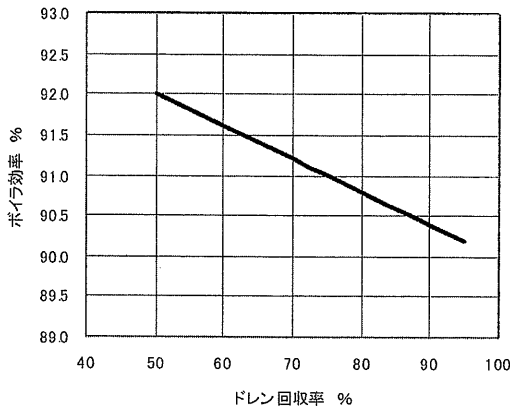


図7 ドレン回収率—ボイラ効率

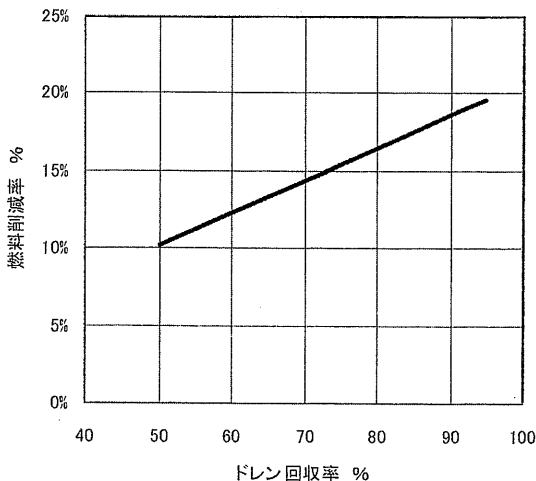


図8 ドレン回収率—燃料削減率

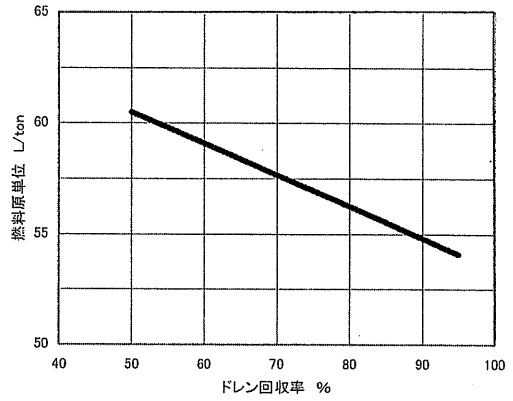


図9 ドレン回収率—燃料原単位

6. ブロー率とボイラー効率

ブローを行う目的は、ボイラー水中の不純物濃度を許容値内に抑え、スケールの付着や腐食を防止することである。ドレン回収率を上げることによって、システムへの補給水量を削減すれば、それともなって不純物の持込み量を減少させられるので、ブロー率を低減することができる。

今、表2に示す原水を軟化処理して補給水として使用した場合を例にとって必要ブロー率を試算してみる。表3はボイラー水の管理基準値である。(JIS B 8223ボイラー水質管理基準、特殊循環ボイラー圧力3.0MPa以下から抜粋)

必要ブロー率は、補給水水質とボイラー水管理基準値の各項目の濃縮倍率の最も低くなる項目で決定する。ここでは、シリカの許容濃縮倍率が6倍と最も小さくなるのでドレン回収率=0%のときには、必要ブロー率は約17%となる。(ブロー

表2 原水水質

項目	単位	原水
電気伝導度 (mS/m)	mS/m	15
pH(25°C)		7.5
酸消費量 (8.3) (CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	—
酸消費量 (4.8) (CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	59
全硬度 (CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	78
カルシウム硬度 (CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	22
塩化物イオン	mg/l	10
シリカ (SiO ₂)	mg/l	50
鉄分	mg/l	0.1

表3 ボイラー水水質基準

項目	単位	ボイラー水
電気伝導度(mS/m)	mS/m	≤300
pH(25℃)		11.0~11.8
酸消費量(8.3)(CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	≤500
酸消費量(4.8)(CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	≤600
全硬度(CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	—
カルシウム硬度(CaCO ₃)	CaCO ₃ mg/l	—
塩化物イオン	mg/l	≤300
シリカ(SiO ₂)	mg/l	≤300
鉄分	mg/l	—

率は濃縮倍数の逆数)

回収ドレンは、ボイラーでのキャリーオーバーがない限り基本的に純水と考えて差し支えなく、特にスケール付着要因となるシリカはない。ただし、鉄分は復水回収システムで発生しボイラーの腐食要因となることがあるので、別途管理する必要がある。ボイラーへの給水は、回収ドレンと補給水の混合水となるので、例えば、ドレン回収率が50%とするとボイラー給水のシリカ濃度は、補給水の1/2となる。このボイラー給水水質から許容濃縮倍数を求めると14倍となり、必要ブロー率は7.5%となる。このドレン回収率と必要ブロー率との関係を図10に示す。

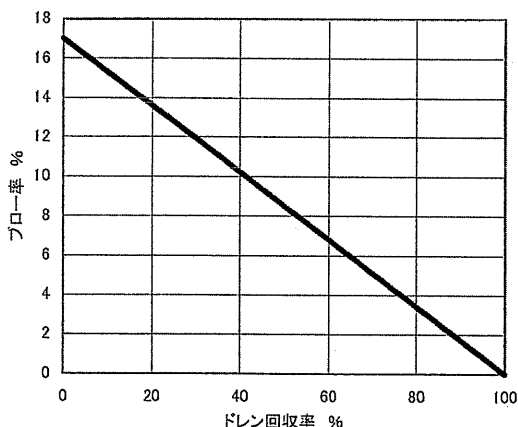


図10 ドレン回収率とブロー率

このようにドレン回収率を上げるとブロー率を下げる事が可能となり、ブロー損失が減少してボイラー効率を上げることができる。それ以外にも、補給水量・薬品使用量・廃水処理量・電力量

が減少するので設備のランニングコストは相乗的に改善される。ドレン回収率が高い場合は、給水タンクの温度も上昇するし、給水タンクへの補給水も減少するためブロー水を充分冷却できない。したがって、高温のまま排出することになるが見方によってはせっかく回収した高圧ドレン水をさらにエネルギーを加えて(温度を上げて)排出することになり無駄である。

7. 高圧ドレン回収の実績

当社製連続制御式大型多管貫流ボイラーのコレクターマシンとの1対1の実働実績を表4に示す。その配管フローを図11に示す。ボイラー運転圧力は1.25MPa、コレクターマシンからのドレン回収システムは2系統ある。高圧ドレン回収システムは、圧力0.74MPaで回収し、直接ボイラーへ給水される。もう一方は低圧であるため一旦給水タンクへ回収した後、再びボイラーへ給水される。蒸発量より高圧ドレンを差し引いた給水は、給水ポンプでボイラーへ補給される。回収された高圧ドレンと給水ポンプからの補給水は、エコマイザー入口で合流させることによりエコマイザーでの排熱回収を図っている。これによりエコマイザー排ガス温度は、約165~190℃程度に保持されている。連続ブロー率は約3.5%でボイラー水質を維持している。全ブローは行っていない。毎朝の操業開始時のドレン排出は、ドレンポット部でのドレン温度が80℃以上になると終了するように設定しているが、センサー誤差などにより実際には100℃で停止しており、排水量が多目となっている。

高圧ドレンの回収率は、高圧ドレン系に対しては約95.7%、全蒸気量に対しては約82.7%である。(何れも操業開始時初期ドレン排出量を除く)これらの値には計測誤差も含まれるが、これを考慮しても高圧系蒸気量に対するドレン回収率は、90%前後の高い回収率を実現しているものと考えている。

設備全体としては、この時点では低圧ドレン系のドレン回収状況が十分分析されておらず、給水タンクへは回収しているものの相当量の排気量が見られる。

このため燃料原単位 (=燃料量/蒸発量) は目標値66l/ton (使用燃料A重油にて) をクリアできていないが、この排気量が低減できれば目標達成は可能と考えられるので、この達成に向けて改善を図る予定である。

表4 運転実績

項目	単位	実績	備考	
給水量	ton	248.7	測定値	
蒸発量	ton	241.7		
高圧ドレン回収量	ton	187.7		
初期ドレン排水量	ton	14.7		
高圧系蒸気量割合	%	87		
低圧系蒸気量割合	%	13		
高圧ドレン回収率	%	95.7		(高圧系蒸気量に対して)
	%	82.7		(全蒸気量に対して)
ブロー量	ton	8.8		
ブロー率	%	3.5		
ボイラー効率	%	90	排ガス損失法 (排ガス温度180℃)	
運転時間	H	147	(平均12.25H/日)	

注) 高圧ドレン回収率は、初期ドレン排水量を除く

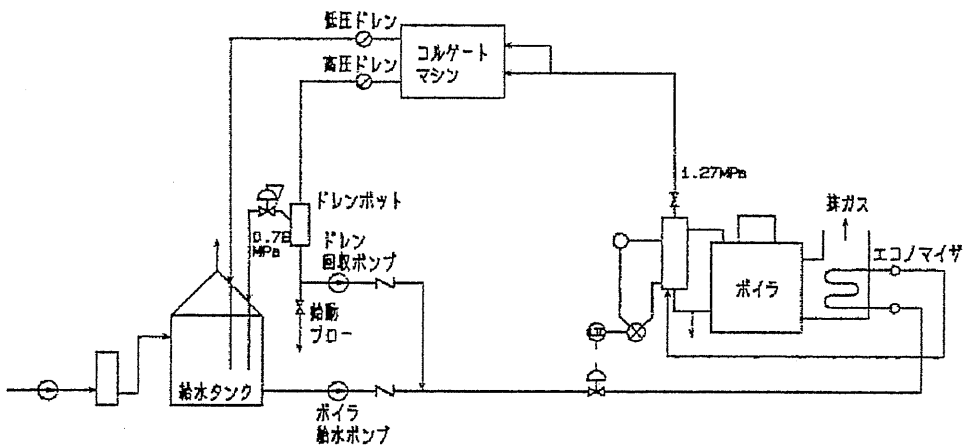


図11 配管系統図