U.D.C. 621.177.4

サイクロンスチームセパレータ

Cyclone Steam Separators

林 安 治* 関 口 安 通*

内 容 梗 概

バブコックサイクロンスチームセパレータは、すでに広く紹介されているものであるが、140 kg/cm² (2,000psi)をこえる高圧高温大容量ボイラの建設がつぎつぎと計画されている現状にさいし、190kg/cm² (2,700psi)の高圧自然循環ボイラの設計を可能ならしめた、その機能、構造、効果などにつき、あらた めて図表を主として取纒め、いわゆる気水分離装置に対するあたらしい考案改善の二三を紹介した。

〔I〕緒 言

われわれはすでに設計圧力 121 kg/cm², 蒸気温度 541 °C, 再熱 541°C, 260 t/h ボイラの製作に着手しており, 現在,近い将来の製作着手を目標として,設計圧力 190 kg/cm², 蒸気温度 571°C, 再熱 541°C, 最大蒸発量 590 t/h ボイラの計画に入つている。この設計圧力は自然循 環ボイラの上限と考えられており,しかも自然循環方式 としてはバブコックボイラにおいてのみ可能な圧力であ る。かかる高圧自然循環ボイラの設計を可能ならしめた ファクタの1つに、サイクロンスチームセパレータの優 秀な性能がある。バブコックサイクロンスチームセパレ ータは、古く 1936 年完成され、1941 年には早くも設 計圧力 186 kg/cm² のボイラの建設を実現せしめ, 第二 次大戦後における火力プラントの高圧高温大容量化に大 きな役割をはたしている。本文では、このサイクロンス チームセパレータの基礎的考察,構造,実績,効果など につき,図表を主として解説したい。



〔II〕 基礎的考察

(1) 気水分離

バブコックサイクロスチームセパレータ(以下サイク ロンと称す)では,吸熱して発生蒸気を含む籬水から蒸 気を分離する第一次分離をサイクロンにて行い,高圧タ ービンに使用してトラブルを起さぬような蒸気純度をう るため,蒸気中の微細な水滴を除去する第二次分離をス クラバで行う⁽¹⁾。これらの構造については後記する。

(2) 重力式とサイクロン式の分離力の比較 重力による分離力 F_G は

 $F_G = \Phi_1 g(d_w - d_s)$ であらわされる。

g は重力の加速度

d_w, *ds* はそれぞれ水および蒸気の比重
水と蒸気の比重差 *d_w*-*ds* は圧力により第1図のよう
に変化する。

* 日立製作所日立工場

ゲーヂ 圧力 (PSI)

第1図 飽和蒸気と飽和水の比重差 Fig. 1. Effect of Pressure on Density of Steam and Water at Saturated Temperature



第2図 サイクロンの作用説 明図 Fig. 2. Schematic Diagram of Cyclone Steam Separator

一方遠心力による分離力 Fo は

--- 1 -----

1342 昭和 31 年 11 月

$$F_c = \Phi_2 w^2 r (d_w - d_s) = \Phi_2 - \frac{v^2}{r} (d_w - d_s)$$
 であらわされる。

- w は角速度
- v は円周速度
- r は半径

サイクロン内での分離は第2図でわかるように $F_o \ge F_g$ の合成力であるから $F'_o = \Phi \sqrt{\left(\frac{v^2}{r}\right)^2 + g^2} (d_w - d_s)$ であらわされ、分離力は速度の自乗に比例しサイクロン 半径に逆比例して増大するが、これは圧力損失と構造上 からの制限があつて、重力のみによる分離力の約20~30 倍が普通である。

(3) サイクロンの容量

サイクロン内の圧力損失は $\Delta P = C \frac{v^2}{2g} r$ であらわさ れ、Cはサイクロンの形で決まる係数であるが、バブ式サ イクロンはその構造上この係数が小さく、圧力損失が分 離力に比して少ないのが特長であり、このため 190 kg/ cm² 級の自然循環ボイラが支障なく運転されている。

サイクロン内の水と蒸気との分離速度 Vo は

$$V_{\sigma} = \frac{d^2 (d_w - d_s) v^2}{K r \eta_w}$$

ここに d は蒸気泡の半径



第3図 運転圧力と上昇管出口蒸気許容含有率 (体積比および重量比)

Fig. 3. Max. Allowable Rate Leaving Riser for Various Pressures (Steam by Volume and Weight)

K は定数

ηw は圧力水の粘度 であらわされるから,分離の距離をD,気水混合物がサ イクロン内を流れる距離を S'とすれば

 $\frac{D}{V_{o}} \leq \frac{S'}{v}$, stit $D \leq K'Sv$ (til S lift)

アンによる角度)

となる。すなわちサイクロン内の速度だけを増してもサ イクロンの各部の寸法がこれに合致したものでなければ 有効な分離はのぞめない。

サイクロンの容量を、蒸発量/サイクロンの箇数、す なわち単位時間当りの蒸気分離量で示すこととし、これ と各箇のサイクロン内を単位時間内に通過する気水混合 物の量との比を考えると、これは確水循環比にひとし い。汽罐ではこの循環比が少ないほど損失エネルギーは 減り、降水管も少なくてよいが、加熱上昇管内の気水混 合物の蒸気割合がある限度をこせば、管内壁の水膜が切 れて熱伝達を阻害し、場合によつては管が過熱され破裂 するので、この水膜が切れずに熱伝達を阻害しない程度 に蒸気含有割合を押えねばならぬ。この割合は運転圧力 によつて変り、第3図 (2) に示す程度が限度とされてお り、また蒸気の容積と重量の関係は圧力により第3図(5) のように変るのでこれらから第4図のような確水循環比



第5図 サイクロン容量と汽罐圧力の関係 Fig. 5. Relation between the Capacity of Cyclone and the Operating Pressure of Boiler

圧力が高くなるほど循環比は減少し、これがサイクロンの容量決定の大きな函数となるため第5図の一例に示す



- 2 -



第6図 スクラバでの蒸気制限速度 Fig. 6. Allowable Velocity of Steam in the Scrubbers

ように圧力の上昇につれてサイクロンの容量は増加して くる。

(4) スクラバ

サイクロンで第一次分離を終えた蒸気はサイクロンの 直上に設けられた小型のスクラバで整流および第二次分 離を行い,さらに蒸気取出口の前に設けられた大型のス クラバで第二次分離を完了する。ストークスの法則によ れば蒸気が水滴を持去る速度 V は

$$V = \frac{2g r^2 (d_w - d_s)}{9 \eta_s}$$
ここに r は水滴の半径



第7図 サ イ ク ロ ン 構 造 図 Fig. 7. Construction of the Cyclone Steam Separator



1343

ηs は蒸気の粘度

であらわされる。この式からわかるように蒸気速度をで きるだけ減少するとともに水滴の径を大きくすることが はなはだ効果的なわけで,スクラバ内では,微細な湿分 をたがいに凝集させて水滴とし,第二次分離を行つてい る。

また蒸気速度は水と蒸気の比重差にも比例するから純 度の高い蒸気をうるには高圧になるほどこの速度をおそ くしなければならぬ。この速度と圧力の関係は大略**第**6 図のごとくである。

〔III〕構 造

基本的な構造についてはすでによく知られているので 簡単に説明する。第7図はサイクロン装置の取付断面 図。第8図はその配置状況を示す。汽水混合物は上昇管 によつて汽胴に導かれ,そらせ板に案内されて,保有す る運動エネルギーによつてサイクロン内に切線方向に流 入し,遠心力により水はサイクロン周壁に押しつけら れ,蒸気は中心部に集つて上昇する。分離された水はサ イクロン底部の羽根から排出されるがこの羽根はサイク ロン内の水の切線方向の運動エネルギーを静圧に変えて 外部の水頭に打ち勝つて水をサイクロン外に排出する役 目をしている。バブコック式サイクロンではドラム内の 水位がサイクロン頂部附近まで上昇しても分離にあまり Fig. 8. Arrangement of the Cyclone Steam Separators in Drum

影響をあたえない。

スクラバは波形の薄板を数多くならべた構造でここで 蒸気中の水分を凝集させて分離する。

最近の高圧汽罐ではサイクロンセパレータにも種々の 改良が加えられているのでその二,三を紹介する。

第9図および第10図は汽胴の両端に大口径の降水管を 配置した場合,流水勾配を必要とするため汽胴内部の水 位が中央部で高くなる傾向があり,これがはなはだしけ ればサイクロンの頂部に達してその分離効果を減ずるの で,これを防止するためサイクロンの下部に案内板を設 けて分離排出される水の残存エネルギーを利用して汽胴 の両端方向に流出させるようにしたものを示す。

第11図は汽胴鏡板部が急速起動時に中央部より温度が 低くなつて熱応力を生ずるのを防止するために確水循環 バッフルを設けたものである。

第12図は蒸気の給水による水洗装置の一例を示す。こ

1344 昭和 31 年 11 月

論



第9図 案内板付サイクロン略図 Fig. 9. Schematic Arrangement of Cyclones with Guide Vane



第10図 案内板付サイクロン詳細図 Fig. 10. Details of the Cyclone with Guide Vane



第12 図 蒸 気 水 洗 装 置 Fig. 12. Arrangement of Water Washing for Steam





第11図 急速起動用籬水循環バッフル Fig. 11. Circulating Baffles of Boiler Water for Quick Starting

れについては後章で詳説する。

〔IV〕 サイクロンスチームセパレータの効果

自然循環あるいは臨界圧以下の強制循環ボイラにおい て、ドラム内気水分離装置の効果は、乾燥度および純度 の高い蒸気をうることと、降水管への蒸気混入度を減少 して、より高い循環力をあたえることにある。この両作 用に対するサイクロンの高性能が 190 kg/cm² 級高圧自 然循環ボイラの設計を可能としたものであるが、つぎに それらの効果を例示する。

サイクロンスチームセパレータの使用により, 1,100 psi をベースとした循環量比は飽和水と蒸気の比重差とよく 一致する。

第13図 運転圧力に対する実際循環量 Fig. 13. Effect of Operating Pressure to Actual Circulating Flow Ratio

(1) 循環力すなわち降水管への蒸気混入防止に対する効果

効果の例を第13図,第14図,第15図に示す。

第 15 図は、1941 年発電開始した、 Indiana and Michigan Electric Co. Twin Banch P.S. ボイラの実 績で、このユニットは、高圧再熱単機単確方式の先駆を なしたものであり、バブコック社はこのボイラの設計製 作によつて、高圧大容量ボイラの設計に対する自信と経 験をえた。サイクロンの性能は図によつてあきらかであ るが、2本の28吋降水管中に 16.25 吋径のオリフィスを 設けて循環量を約 10% 減少してなお十分な循環力があ り、これによつてドラム中の流水勾配を減じて、ドラム 水位の許容範囲を広げることができた。

— 4 —











第15図 190 kg/cm² 級ボイラの自然循環におよぼすサイクロンと非加熱降水管の効果 Fig. 15. Effect of Cyclone Steam Separator and Unheated Down Comer on Boiler Circulation (For Operating Press 190 kg/cm²)

----- 5 -----

1346 昭和31年11月

評 <u>V</u> 日

論

第 38 巻 第 11 号







 (\mathbf{C}) インパクトボックス型の実績

100 kg/cm² 級ボイラにおける蒸気純度におよぼすサイクロンの効果 (その1) 第16 図 Effect of Cyclone Steam Separator on Steam Purity (No. 1) Fig. 16. (For Operating Pressure 100 kg/cm²)

-5

サイクロンスチームセパレータ







d サイクロンセパレータ型の実績

1347



K は籬水中の溶解固形分 1 P.P.m. に対する比電導度 micromnter/cm 第16図 100 kg/cm² 級ボイラにおける蒸 気純度におよぼすサイクロンの効果(そ の2)

Fig. 16. Effect of Cyclone Steam Separator on Steam Purity (For Operating Pressure 100 kg/cm²) (No. 2)

(2) 蒸気の純度におよぼす効果

第16図⁽²⁾ ⓐ~ ⓓ 設計圧力 98 atg, 蒸発量 227 t/h の ハイヘッドセクショナルボイラに3種の気水分離装置を 設けて,発生蒸気の純度を試験したもので, ⓓにサイク ロンの効果を示している。

第17図⁽³⁾北海道電力株式会社,江別発電所において, 昭和11年納入 CTM 型ボイラの気水分離装置を昭和29年 改造され,その効果を試験されたものである。

第18図~**第20**図⁽¹⁾水位,負荷, 罐水濃度などの影響を 示す。

〔V〕 蒸気中へ含有される珪酸の除去

蒸気圧力が 1,000 psi をこえるようになつて, 珪酸に よるタービンデポジットの問題が注目され, 今日なお完 全な対策が立つ状態にはいたつていない。サイクロンが 蒸気中の水分除去にはなはだ有効で, 蒸気純度を高める ことは実証されたが, 蒸気中へ気化して持去られる塩類 に対して, 特別の効果を有せぬことは原理上あきらかな

- 7

昭和31年11月

日 立 評

論

第 38 巻 第 11 号









籬 水 P.H

9.8~10.8 1076~1774 P.P.m.





第18図 サイクロンの性能におよぼす水位の影響 Fig. 18. Effect of Water Level on Cyclone Performance



第19図 蒸気純度におよぼすボイラ負荷の影響 Fig. 19. Effect of Load Variation on Steam Purity



---- 8 --

サイクロンスチームセパレータ









第22図 各圧力の飽和温度水中におけるシリカ溶 解度

Fig. 22. The Solubility of Quartz in Water at the Saturation Temperature for Pressures from 100 to 3,206 psi



1349



- 第21図 運転圧力と確水中のシリカ含有量が蒸気 中への気化シリカ量におよぼす関係および飽和 蒸気と過熱蒸気のシリカ溶解度
- Fig. 21. Approximate Relationships between Pressure, Boiler Water Silica, Silica Carryover, and Silica Solubility in Saturated and Superheated Steam

ので今日ふたたび第12図に示した水洗滌方式が考慮され、実施されるようになつた。

蒸気中に気化する珪酸量は,運転圧力と, 確水の珪酸 含有量に関係するとして, 第21図⁽⁴⁾が発表されており, これによると高圧ボイラにおける確水の許容珪酸量は, 第23図 2重水洗装置付サイクロン説明図 Fig. 23. Schematic Diagram of Cyclone Steam Separator with Dual Water Washing

第1表 籬水中の最大珪酸含有量 Table 1. Maximum Silicic Acid Content in Boiler Water

運 転 圧 力 (psi)	籬水中の最大珪酸含有量 (P.P.m.)				
600~800	25 max				
801~1,000	15 max				
1,001~1,500	5 max				
1,500以上	3 max				

2,500 psi 級に対しても 3 P.P.m. max としている。

実に苛酷なものとなる。Straub氏⁽⁵⁾は、さきに運転圧 力 1,250 psi (88 kg/cm²)において、P.H. 約 11、で確水 の珪酸含有量が 5 P.P.m. 以下のときは、タービンデポ デットは発生しない。また蒸気中の珪酸が 0.1 P.P.m. を

____ 9 ____



b	タ	-	ボ	ス	チ	-	4	セ	パ	V	-	タ	実	績
	(]	2	h p		N	ドサ	-	+ -	LV		2	=)	1)	

試	験 No.	1	2	3
運転圧	力 (psi)	1250	1250	1250
蒸 発	量 (lb/h)	240,000	198,000	190,000
全循環	量 (lb/h)	-	840,000	840,000
罐水溶解固 gra	形分 am/gallm	(68.6 P.P.m.) 4	(1510 P.P.m.) 88	(1760 P.P.m.) 103
蒸気乾	度 (%)	99.75	99.77	99.7
水	位	ドラム中心	+3''	-1/4"
ドラム 10 ⁷ 蒸発量 全循環量	70 I/D×3200 185,000 lb/h 820,000 lb/h) <i>l,</i> セパレータ r) セパレータ田 r)	13箇 三力降下 1.81b/ (0.127	in² kg/cm²)

③ ターボスチームセパレータ構造図

第24図 ターボスチームセパレータの性能例 Fig. 24. Schematic Diagram and Performances of Turbo Steam Separator

こえるとシリカデポを生ずると報告している。

運転圧力に対して, 罐水中の珪酸制限値, あるいは蒸 気中の珪酸制限値をいくらにすればタービンデポヂット をなくしうるかについては, 定説がないが, バブョック 社は,サイクロンの使用を前提として,第1表のごとく運 転圧力と罐水の珪酸含有量の最大をきめている。これも 固定したものでなく, 圧力 900 psi で珪酸 5 P.P.m. 以 下をリョンメンドした例もある。

〔VII〕 結 言

サイクロンスチームセパレータは,バブコックボイラ の特長中大きい部分を占めるものであり,従来広く公表 された構造であるが,ここにあらためてその性能,効果 を取纒めてみた。サイクロンセパレータによつてほとん ど完成したかと考えられた気水分離も,気化塩類特に珪 酸の除去に問題があり,これに対するバブコックの対策 実施例を紹介した。紹介した実例は圧力,容量とも広い 範囲のボイラに応用できるようえらんだつもりである。 終りに御指導いただいた,バブコック日立株式会社三代 技術部長,引用させていただいた各論文の著者に感謝の 意を表する。

蒸気中の気化珪酸除去に対して**第12**図のごとき水洗滌 方式を使用するのは,飽和水における珪酸溶解度が**第22** 図⁽⁴⁾のごとく大きいことを利用したもので,**第23**図⁽⁵⁾に 示す例は,補給水が 40~60% におよぶ米国 Public Service Elctric and Gas Co. Linden P.S. の 2,500 psi ボイラに採用されているものである。

〔VI〕 遠心力を利用する気水分離装置の種類

第24図は, ターボスチームセパレータと称されている 遠心力利用気水分離装置の構造と性能を示したもので, この型式のセパレータを使用するボイラでは,自然循環 ボイラの運転圧力は 2,000 psi (140 kg/cm²) を限度とし ており,それ以上の圧力に対しては,循環ポンプを有す る強制循環ボイラをリコンメンドしている。

本例以外シェブロン型と称する横型サイクロン式があ り,いずれも運転圧力が 1,400 psi (100 kg/cm²) をこす ものには,遠心力を利用する装置を採用するようになつ た。

参照文献

- (1) 三代,林,蒸気ボイラにおける気水の分離と蒸気の純化について、火力発電, Vol. 6,第27号
- (2) M. D. Baker: Mechanical Purification of Steam within the Boiler Drum Tr. of ASME. Nov.-1939
- (3) 北海道電力江別 P.S. 第3号ボイラ工事効果調査 報告,昭和30年1月
- (4) C. Jacklin, and S.R. Browar: Corrolation of Silica Carry over and Solubility Studies. ASME. Paper No. 51-A-91. (Annuel Meeting, Nov.-1951)
- (5) F. G. Straub, and H. A. Graboski: Silica Deposition in Steam Turbines. Tr. of ASME July-1945
- (6) F. P. Fairchild: Linden Generating Station ASME. Paper (18th Annual Meeting, 1955)

