

大型 CFB ボイラによる高効率バイオマス発電

High-Efficient Power Generation with Large Scale Biomass Fuel Fired CFB Boiler

鎌田 大輝 KAMADA Taiki JFE エンジニアリング エネルギー本部 発電プラント事業部 設計部

要旨

脱炭素、カーボンニュートラルを背景に再生可能エネルギーを用いた電源創成が活況な中で、木質系バイオマス燃料による火力発電は安定した電力供給が可能な電源として注目されている。循環流動層（CFB）ボイラは高い燃焼効率と幅広い燃料適用性を有しており、木質系バイオマス燃料による高効率な発電に適した技術である。本稿では JFE エンジニアリングの循環流動層ボイラについて、これまでの変遷を燃料の適用に沿って紹介する。さらに、近年大型で高効率な発電設備の需要の高まりにより、JFE エンジニアリングではフィンランドのボイラメーカー（Valmet Technologies Oy）との業務提携により大型で再熱サイクルを採用した発電設備の提供を開始し、既に 5 件の納入実績を有している。その技術について紹介する。

Abstract:

Power generation with renewable energy is growing against backdrop of worldwide decarbonizing and carbon neutral movement. Among renewable energies, biomass fuel fired power generation provides more stable power supply, and thus it is promised as developing power sources. Circulating fluidized bed (CFB) boiler characterized with high combustion efficiency and variety of fuels is considered as suitable technology for the biomass fuel fired power generation. History of CFB boiler technology development in JFE Engineering is introduced along with changes of applied fuels. To meet demand for larger scale and higher efficiency of biomass fired power plant, JFE Engineering has been delivering larger scale power plants applying reheat system by partnership with Valmet Technologies Oy. Five power plants have already been built since 2019. Features of technology for these new plants are also introduced.

1. はじめに

温室効果ガスによる地球温暖化対策として脱炭素、カーボンニュートラルの動向が高まる中、再生可能エネルギーを筆頭に環境負荷の低い電源の確保が求められている¹⁾。再生可能エネルギーの中でも木質系バイオマス発電は安定した電源供給が可能であり、ベースロードおよび調整電源としての役割が期待され、注目されている。特に電力の固定価格買取制度（FIT）が設立されて以来、様々な手法による木質系バイオマスの発電利用が増加している。しかし、木質系バイオマス燃料は化石燃料に比べて発熱量、水分量など燃料性状のばらつきが大きくなる。木質系バイオマス燃料の利用拡大には、そのような燃料性状に対しても安定した運用ができる設備が求められる。JFE エンジニアリングが提供している循環流動層（Circulating Fluidized Bed, 以下 CFB）ボイラを用いた火力発電設備は安定した運用が期待できる有力な木質系バイオマス発電のひとつであり、近年納入件数が伸びている。本稿では CFB ボイラについて適用燃料の変遷に沿って紹介するとともに、近年市場ニーズが

高まっている発電設備の大規模化、高効率化に関する技術を紹介する。

2. CFB ボイラの概要と特徴

2.1 CFB ボイラの概要

図 1 に JFE エンジニアリングの CFB ボイラの概略図を示す。燃焼室内には大量の流動粒子を保有しており、炉底より供給する一次空気によりこの粒子を吹き上げて流動化させ流動層を形成する。燃焼室内に供給された燃料はこの流動層内で燃焼する。燃焼により発生した熱の一部はボイラ（水の蒸発）に使われ、一部は流動粒子に蓄熱され、燃焼室温度は 850~950°C に保たれる。写真 1 に運転中の CFB ボイラ燃焼室内の様子を示す。燃焼室は全体的に赤色となって全域に緩慢な燃焼場が形成されている。未燃の燃料粒子を含む流動粒子の一部は燃焼ガスの流れに乗って燃焼室を飛び出すため、それらを捕集、再燃焼するために燃焼室出口にはサイクロンが設置される。サイクロンで遠心力によって流動粒子と燃焼ガスが分離され、流動粒子は燃焼室に戻される。サイクロン下にはサイフォンを設置し、燃焼室とサ

2022 年 4 月 15 日受付

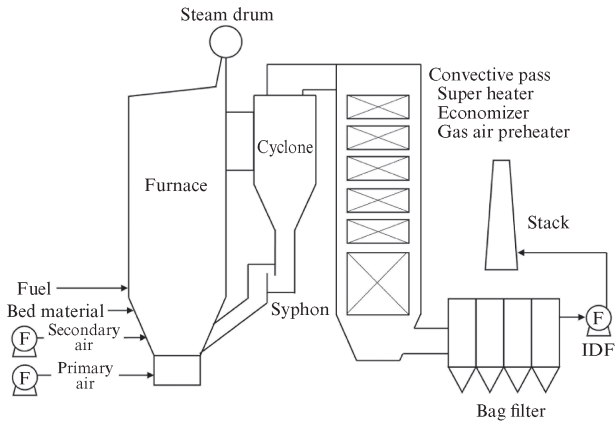


図1 CFBボイラ概略図

Fig. 1 Schematic diagram of CFB boiler



写真1 運転中のCFBボイラ内部の様子

Photo 1 Snapshot of CFB boiler combustion (inside boiler)

イクロンの圧力差を遮断（シール）している。サイクロンを通じた燃焼ガスは対流室へと導かれ、過熱器や節炭器などのボイラの各種管群と熱交換により冷却される。燃焼室および対流室はボイラの一部（水冷壁構造）となっており、流動粒子や燃焼ガスの熱を受けて蒸気を発生させている。また、流動粒子による摩耗から設備を保護するため、燃焼室の下部は耐火物で被覆される。

ボイラ立ち上げ時には流動粒子として主に珪砂が用いられ、その後燃焼に伴い燃焼灰や燃料随伴物と珪砂の混合物が流動粒子の役割を果たす。

2.2 CFBボイラの特徴

2.2.1 高い燃焼効率

燃焼室は燃焼による発熱と流動粒子の蓄熱により燃料の着火温度以上に維持されており、また燃料と空気が激しく混合されるために燃焼が促進される。このため、未燃が少なく高い燃焼効率が得られる。

2.2.2 低い環境負荷（ばい煙）

CFBボイラではバーナー燃焼のような局所的な高温場が形成されず、燃焼室全域にわたり比較的低温（850～950℃）な燃焼場が形成される。これにより窒素酸化物（以下、NO_x）の発生が低く抑えられる。さらに無触媒脱硝設備または触媒脱硝設備を設置し、より厳しい規制値へ対応できる。特に長い燃焼時間を利用し、直接尿素水もしくはアンモニア水を還元剤として煙道の適切な箇所に吹き込むことで、排ガス中のNO_xと反応させNO_x濃度を低減する無触媒脱硝は、触媒不要なので設備費を低く抑えられる。

また、硫黄酸化物（以下、SO_x）に対して同様に低温で長い燃焼時間を利用し、脱硫剤（石灰石またはドロマイト）を直接燃焼室に供給することで、燃焼室内で脱硫できる²⁾。このように脱硫剤の供給装置を設けるだけで脱硫できるため、コストを低く抑えられる。

2.2.3 幅広い燃料適合性

CFBボイラの大きな利点の一つは燃料の適応幅が広いことである。化石燃料である石炭から廃棄物系燃料、木質系バイオマス燃料まで多種多様な燃料を適用できる。また、ひとつのボイラで石炭専焼から木質系バイオマスなど他の燃料専焼まで対応する設計も可能である。燃料の安定的な確保が重要な発電所の運営では、この幅広い燃料適合性は大きな利点である。

3. 適用燃料の変遷と技術的対応

表1にJFEエンジニアリングが納入した特徴的なCFBボイラプラントについて、その諸元を示す。

3.1 石炭

当社では1980年代に流動層炉の技術開発に着手し、基礎技術を蓄積してきた。1990年にドイツのシュタインミュラー社との技術提携により市場へのCFBボイラ提供が本格化し、1997年に初号機と2号機の納入に至った（プラントA、表1）。これらのボイラはセメント工場内への電力供給を目的とした自家発電用の石炭焚きボイラであった。セメント生産では多量の電力を必要とするため、安価な燃料である石炭による自家発電の需要があった。多様な石炭種を使用できるCFBボイラはこれに応えるものであり、燃料石炭の選択の自由度が高く有利であった。また、プラントAなどの硫黄分の多い石炭焚きでは、燃焼室への石灰石供給設備を設け、炉内で脱硫している。

3.2 廃棄物系燃料

2000年代になると石炭よりもさらに安価な燃料による発電の需要が高まり、廃棄物系燃料が注目されるようになった。廃棄物系燃料としては建築廃材などの木質系燃料、廃プラスチックフラフやRPF（Refuse Paper and Plastic Fuel）

表 1 使用燃料に特徴付けられる JFE 製 CFB ボイラプラントの諸元
Table 1 Specification of JFE CFB boiler plant characterized by type of fuel

	A	B	C	D	E	F
Year	1997	2002	2005	2015	2015	2018
Main steam pressure (MPaG)	10.3	6.08	5.7	6.3	10.2	6.3
Main steam temperature (°C)	543	400	453	470	541	483
BMCR *1 (t/h)	105	180×2	45	70	185	56
Power generation (MWe)	30	—	10	12.7	49	12.4
Fuel	Coal, Petroleum coke	Plastic fluff	Wood chip (scrap)	Wood chip, PKS	Wood pellet, PKS	Wood chip, PKS

*1 Boiler maximum continuous rating

などのプラスチック系燃料，廃タイヤなどが挙げられる（プラント B, C 表 1）。

3.2.1 腐食への対応

建築廃材では防腐剤など木材の処理に使用された薬剤による伝熱管への灰付着等の影響が懸念される。またプラスチック系廃棄物燃料は塩素が含まれることが多いため、高温腐食に対する配慮が必要となる。JFE エンジニアリングでは都市ゴミ焼却炉用ボイラで、これらの課題に対する技術を既に有していたため、それを応用することで解決した。

3.2.2 異物への対応

廃棄物系燃料では不燃性の異物が多く注意が必要である。具体的には、建築廃材では釘やボルトなどの金物類，廃タイヤではタイヤの構成部品であるビードワイヤが挙げられる。写真 2 には燃焼室から実際に排出された金属類などの異物の写真を示す。これらの不燃性の異物が燃焼室内に蓄積すると、流動層が阻害され燃焼不良，燃焼ガス性状の悪化が懸念される。さらに流動層の下部に沈降し一次空気の吹出ノズルに閉塞や損傷を引き起こし、燃焼不能になることが懸念される。このため、廃棄物系燃料を使用する場合は、これら不燃性の異物を速やかに燃焼室から排出できることが安定運転の上で重要となる。JFE エンジニアリングでは燃焼室底部の構造を見直し、廃棄物系燃料に対応した炉床を開発した。

3.2.3 環境負荷（ばい煙）への対応

廃棄物系燃料を使用する場合は、性状により高度な排ガス処理を求められる場合がある。前述の NOx, SOx に加えて次のような事例がある。塩素を多く含む場合は HCl およびダイオキシン類の排出規制に配慮する必要がある。HCl 低減策は煙道への消石灰吹込みである。HCl を消石灰と反応させて CaCl₂ として安定化しバグフィルタで捕集する。同様にダイオキシン類の低減策は煙道への活性炭吹き込みである。ダイオキシン類を活性炭に吸着させバグフィルタで捕集する。表 1 中のプラント B と C では、ばい煙規制によ



写真 2 CFB ボイラから排出された不燃性の異物
Photo 2 Incombustible impurities discharged from CFB boiler

り炉内脱硫設備に加え、煙道への消石灰供給設備，活性炭供給設備を備えた。

3.2.4 フラフ状プラスチック燃料への対応

フラフ状廃プラスチックのようなフィルム状の燃料の搬送では、気送によりボイラへ供給する。プラント B は国内初の廃プラスチック専焼の CFB ボイラ³⁾ であり、気送設備により廃プラスチックフラフをボイラへ安定供給している。ここで実用化した廃プラスチックの気送技術は後続の案件でも採用され、プラスチック系廃棄物燃料を安定して利用できる手法を確立できた。

3.3 木質バイオマス系燃料

2012 年より始まった FIT 制度により、バイオマス系燃料、特に木質系バイオマスをを用いた発電設備の需要は飛躍的に高まった。それに先立ち、JFE エンジニアリングでは、2005 年にプラント C で建築廃材による廃棄物系木質燃料による専焼運転を可能にしている。一方、近年ではバイオマス発

電の活況に伴い海外産の木質系バイオマス燃料を輸入し利用する例が増えている。この場合よく利用されるのはパーム椰子殻 (Palm Kernel Shell, 以下 PKS), 木質ペレット, 木質チップなどである。表1のプラントAは1997年の竣工時には石炭焼きCFBボイラであったが2013年にPKS供給設備の追加改造工事を行い、国内初のPKS専焼が可能なCFBボイラとしてバイオマス発電を開始している。当時はPKSの利用例が少なく、PKSに関して不明な点も多かったが、それまでに蓄えた技術で時代のニーズをいち早く取り込み技術的な課題解決に取り組んだ。ここで得たPKSに関する知見は後続のプラントに継承されている。

3.3.1 更なる環境負荷 (ばい煙) への対策

プラントEは大都市近郊の工業地帯に位置しており、排ガス中のSOx濃度が2.2 ppm (実O₂ Dry) 以下、NOx濃度が30 ppm (6% O₂ Dry) 以下という厳しい規制値が要求された。そのため湿式脱硫設備と触媒脱硝設備を設置し規制値に対応した。

3.3.2 高含水率燃料への対応

プラントD, Fは間伐材とPKSを利用したプラントである。間伐材は破碎チップの形態で燃焼室へ供給される。木質チップはその原料となる木材の状態により含水率が大きく変化する。含水率が高い場合には燃焼室温度が低下し、燃焼不良などを引き起こす恐れがある。特にプラントFでは計画されていた燃料の含水率が50%と高かったため、燃焼室形状を見直して高含水率燃料へ対応した設計とした。なお、実際に使用したのは計画をさらに上回る平均含水率約55%の燃料であったが、安定して運転できている。

4. FIT 発電への対応 (カーボンニュートラル)

2017年にFIT制度における20 MW以上のバイオマス発

電による買取価格が24円/kWhから21円/kWhに引き下げられたことや、2018年からは10 MW以上のバイオマス発電については入札による価格決定となったことなど、バイオマス発電市場の変化により、昨今ではこれまで以上に高効率なバイオマス発電のニーズが高まっている。本章では木質系バイオマス発電の高効率化に対するJFEエンジニアリングの取り組みを紹介する。

4.1 プラントの大型化

汽力発電の場合、発電効率はボイラとタービンのそれぞれの効率を掛け合わせたものになる。ボイラ効率は規模によらずおよそ90%程度である一方、タービン室効率は小型のもので30%強、中型のもので40%程度と規模に依存する傾向があるため、発電プラントを大型化することが発電効率を高める手段となる。JFEエンジニアリングではそれに対応するため、発電量50 MWに対応するCFBボイラを開発した。従来のCFBボイラに比べて大型となるため、サイクロンを2基にするなど大幅に設計変更した。2015年から2021年までに50 MW級CFBボイラを4缶納入しており、いずれもバイオマス専焼運転が可能なボイラとなっている。

さらなる高効率化のため、自社でのボイラ大型化開発と並行して、海外ボイラメーカーとの提携による大型プラントの商品展開を進めた。そして、2015年にフィンランドのバルメット社と業務提携し、同社の大型CFBボイラを日本市場に提供している。同社は世界各国に90缶以上のCFBボイラを納めており、最大のもは蒸発量698 t/hの納入実績がある。この業務提携で、JFEエンジニアリングは2019年から2021年にかけて75 MW級4缶、112 MW級1缶を納入している。バルメット社製ボイラを採用したプラントの仕様について表2に示す。

表2 バルメット社製CFBボイラプラントの諸元
Table 2 Specifications of Valmet CFB boiler plant

	G	H	I	J	K
Year	2019	2019	2019	2020	2021
Main steam pressure (MPaG)	14.1	14.1	14.1	17	14.1
Steam temp. (Main/Reheat) (°C)	557/540	557/540	557/540	560/540	557/540
BMCR* ¹ (t/h)	235	235	230	370	229
Power generation (MWe)	74.95	75	74.95	112	75
Fuel	Wood chip, PKS, Coal	PKS, EFB* ² pellet, Coal	Wood pellet, PKS	Coal, Wood pellet, PKS	Wood pellet, PKS
CO ₂ reduction* ³ (t/year)	230 000	230 000	250 000	110 000	250 000

*1 Boiler maximum continuous rating

*2 Empty fruits bunch

*3 Approximate estimation considering fuel type and power generation capacity

4.2 高効率化 (1)～再熱サイクルの採用

従来 JFE エンジニアリングが納入してきた発電設備のプラント効率向上は再生サイクルによるもので、50 MW 級の発電設備における発電端効率は約 36 % (低位発熱量基準) であった。さらなる発電効率向上のためにバルメット社のボイラを導入したことで再熱タービン、再熱・再生サイクルの適用が可能となった。表 2 に示す 5 プラントでは 40 % (低位発熱量基準) を超える発電端効率を達成している。図 2 には再熱・再生サイクルにおける水・蒸気サイクルの概要を示す。再熱サイクルでは高压タービンで仕事をした蒸気を復水せず、ボイラ (再熱器) で再加熱し過熱度を復活させる。この蒸気を使って中・低压タービンで再度仕事を取り出すことでサイクル効率が改善されるため、発電効率の向上が見込める。再熱器を備えたボイラの実績をもつ、バルメット社との提携により短期間で大型かつ高効率の発電設備を市場へ供給する体制を整えられた。現在では表 2 に示す 5 プラントに続き、新たに 75 MW 級と 112 MW 級の発電設備の建設プロジェクトが進行中である。

4.3 高効率化 (2)～蒸気条件の高温・高圧化

再熱・再生サイクルに加えて、発電効率をさらに向上させるには、蒸気の高温・高圧化が有効となる。一方で、蒸気の高温・高圧化はボイラからの制約を受ける。特にバイオマスを燃料に用いることで、燃焼排ガスによる伝熱管の高温腐食が懸念され、蒸気条件を決定する際の制約となる。バルメット社の CFB ボイラは高温過熱器と高温再熱器を流動砂層内に配置し、腐食成分を含む燃焼ガスとの接触を絶つことで腐食のリスクを大幅に低減している。この流動砂層内に設置された過熱器・再熱器は、流動化空気量の調整により蒸気温度制御可能で、制御のための減温水量を低減できるので、中・低压タービンでの排気損失を抑えてサイクル効率の向上を実現できる。

4.4 プラント運転の自動化 (省力化)

JFE エンジニアリングでは CFB ボイラの自動運転技術に力を入れてきた。この取り組みはバルメット社製 CFB ボイラの採用後も変わらず、再熱サイクルの採用により複雑化した大規模発電設備でも円滑に起動・停止できる。具体的には、発電設備の起動・停止に必要な機器の起動・停止手順をシーケンス化し、ソフトウェア上で自動的に進行させている。シーケンスの各ステップ移行はタイマーやプロセス値を用いて判定し、画期となるシーケンスのステップの開始にはオペレータによる確認 (STOP/GO 判断) を設けている。プラント操作は原則ソフトウェアが判断して自動で指令を出し、場合により操作端末画面上のアナウンスでオペレータに操作を促すことで進行できるようにしている。一連の起動・停止に関する操作の進捗状況は可視化されて端末画面

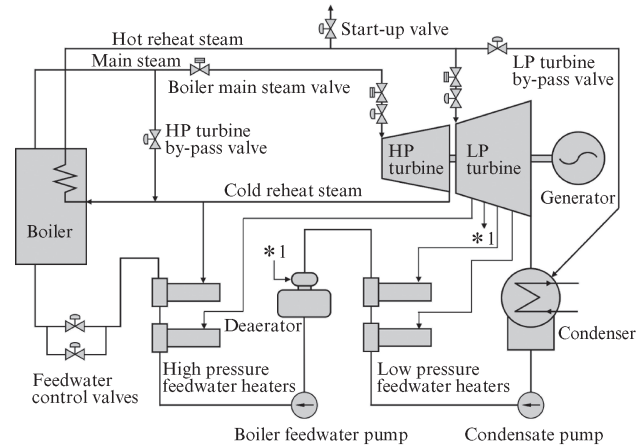


図 2 再熱・再生サイクルの概要

Fig. 2 Reheating and regenerative cycles

上に表示され、オペレータが的確に把握できるようにしている。このようにソフトウェアによるオペレータ支援で、設備の起動・停止におけるオペレータの負担を大幅に低減している。

4.5 プラント運転における高付加価値化 (DX 推進)

JFE エンジニアリングではこれまで説明したような設備面での高効率化に加えて、操業面でも効率の向上に取り組んでいる。

契約ユーザー向けに横浜本社敷地内に設置されたグローバルリモートセンター (Global Remote Center, 以下 GRC) でプラントの運転データや映像データなどを時系列に収集・蓄積し、JFE エンジニアリングによる遠隔監視や運転データ解析のサービス RODAS[®] に活用できるようにしている。また、GRC では遠隔操作に関するユーザー同意のもと、ソフトウェアや制御パラメータの変更作業を可能としている。これらの機能により、技術員を現地に派遣する必要がなくなり、トラブル対処の迅速化や効率化を実現している。また、収集されたビッグデータを効率よく分析するための独自の分析可視化ツール Pla'cello[®] により、ユーザー自身による運転データの解析も容易となっている。現在はこれに AI 技術を組み合わせ、プラントの異常をいち早く知らせる異常予兆検知技術やボイラの燃焼を最適化して発電収益向上を図る最適制御技術を開発している。

5. おわりに

木質系バイオマス燃料の発電利用として近年需要が伸びている CFB ボイラについて、適用燃料を切り口とした技術の紹介、ならびに発電設備の大型化・高効率化技術について紹介した。

(1) CFB ボイラは燃焼室内に保有する流動粒子の蓄熱効

果により様々な性状の燃料でも安定運転できる。

- (2) CFB ボイラは緩慢な燃焼特性により燃焼室での簡易脱硝・脱硫を行うことができ排ガス処理における設備費を抑制できる。
- (3) CFB ボイラは廃棄物系燃料にも高含水率の燃料にも対応できる。
- (4) バルメット社との提携による再熱・再生サイクルの採用、蒸気条件の高温・高圧化により設備の大型化、高効率化を達成した。
- (5) 自社で培ったプラント起動・停止の自動運転技術をバルメット社製 CFB ボイラにも適用し、複雑化した設備の運転を容易にした。
- (6) 遠隔で収集・蓄積した運転データをビッグデータとして活用し、遠隔監視や運転データ解析のサービスを提供し、異常予兆検知技術や最適制御技術へ展開している。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁. 第6次エネルギー基本計画. 2021
- 2) 堀尾正朝, 森滋勝. 流動層ハンドブック. 初版, 培風館, 1999, 432p.
- 3) 廃プラスチック専焼発電用循環流動層ボイラ. JFE 技報. 2004, no.3, p.56.



鎌田 大輝