

U-KACCボイラ

— 革新的ボイラ構造により難燃性石油残渣を有効活用 —

U-KACC Boiler

— Technology to Effectively Utilize Residual Fuel from Oil Refinery



森 宏之① Hiroyuki Mori
 戸田 信一② Shin-ichi Toda
 荻野 智行③ Tomoyuki Ogino

オイルコークスなどの難燃性石油残渣を燃料として有効活用でき、超低NOx・低ばいじんでクリーンな燃焼を可能としたU-KACC (Upgraded Kawasaki Advanced Clean Combustion) ボイラを開発した。富士石油(株)／袖ヶ浦製油所向けのアスファルトピッチ焼きU-KACCボイラでは、新規バーナ開発も含めて新たな技術課題を克服した設計・製作を進めている。今後も当社の技術力を生かして省エネ・省資源化に貢献できるボイラ供給に努めていく。

Kawasaki has developed the Upgraded Kawasaki Advanced Clean Combustion (U-KACC) boiler, which achieves ultra-low-NOx, low-dust combustion by effectively utilizing petroleum coke and other residues from refinery as fuel. The asphalt pitch-fired U-KACC boiler that Kawasaki is currently designing for Fuji Oil Company, Ltd.'s Sodegaura Refinery will feature a new burner and other improvements, developed to overcome some new technological issues. Kawasaki will continue to improve its expertise and develop boilers that consume less energy and resources.

まえがき

近年、エネルギーの有効利用が促進されており、従来では取り扱いが難しかった石油コークスやアスファルトピッチ (ASP) といった石油精製過程で発生する固体残渣をボイラ燃料として活用するニーズが高まっている。一方、こうした石油残渣は揮発分が少ないことから安定した専焼運転が難しく、バナジウムを含んだ灰分も多いことから灰付着、灰溶解によるトラブルが多発し、従来タイプのボイラでは長期連続操作が困難であった。

本稿では、このような残渣を燃料として有効活用すべく開発したU-KACCボイラの特長を説明するとともに、2014年10月に受注した富士石油(株)袖ヶ浦製油所向けのASP焼きボイラの計画概要、ASP専用バーナ開発、プラント計画上の配慮点などについて紹介する。

1 U-KACCボイラの特長

当社は既存技術としてアスファルトなどの液体残渣をクリーンに燃焼可能なKACC (Kawasaki Advanced Clean Combustion) ボイラを保有している。このボイラをベースにさらに改良を加え、石油コークスなどの灰分を含んだ固体残渣にも適用できるように新規開発したものがU-KACC (Upgraded-KACC) ボイラである。

KACCボイラとU-KACCボイラの構造・機能の比較を図1に示す。KACCボイラは燃焼室中間部に大きな絞りを設けて、燃焼室を上下に分割した特殊な構造としている。耐火材で覆われた下部燃焼室では、バーナに供給する空気を大幅に絞ることで高温還元燃焼によるNOx低減を図り、水冷壁構造の上部燃焼室では2段燃焼空気による低温酸化雰囲気により燃焼完結性を向上させている。この2つの燃焼室の組み合わせにより、アスファルトなどの液体石油残渣燃料であっても低NOx、低ばいじん燃焼を可能としている¹⁾。

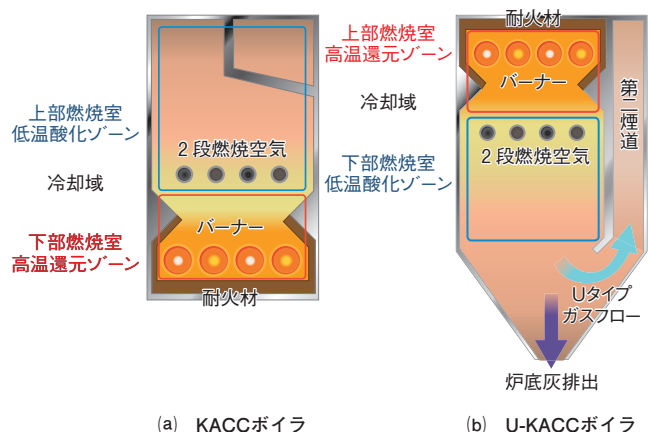


図1 KACCボイラとU-KACCボイラの構造・機能の比較
 Fig. 1 Comparison between KACC boiler and U-KACC boiler

しかしながら、KACCボイラは灰分を含まない燃料においては長期連続運転が可能であるが、石油コークスやASPなどの灰分を含む燃料に対しては、炉底部に灰が堆積し長期連続運転には適さないという課題がある。

この課題を克服し固形の石油残渣燃料にも適用できるようにKACCボイラの燃焼室部分を倒立形とし、KACCボイラの特長を生かしつつ、炉底にホoppaを設置し、灰の連続排出を可能にしたのがU-KACCボイラである。

U-KACCボイラの基本的な燃焼システムはKACCボイラと同等であり、低NO_x、低ばいじん燃焼を達成するとともに、燃焼室下部に灰出し用のホoppaを設置し、燃焼ガスを反転させることで、炉底部での灰の分離を促進して、後流側の伝熱面におけるダスト負荷低減と灰付着によるドラフトロス増大、ダスト閉塞などの発生を抑制している²⁾。

2 性能確認

U-KACCボイラの有効性を確認するために、まず本社・技術開発本部の小型試験炉を用いて基本的な燃焼特性を確認し、次に得られたデータを基に実機サイズのモデルによるシミュレーション解析を実施した。

(i) 燃焼試験

燃焼試験は揮発分10%以下の難燃性の石油コークスを使用して実施した、図2(a)に示すように着火・燃焼は良好であり、火炎輝度も高く、バーナ空気比0.7前後の高温還元雰囲気での低NO_x化も確認した(図3)。

図2(b)に示すように長時間試験運転を終了した後の炉内においても、炉壁への灰付着が見られずクリーンな状態であった。これは上部燃焼室での還元雰囲気下においては、バナジウム灰が高融点な状態(例えばV₂O₅の融点は1,970℃、V₂O₄は1,640℃)であるため、灰が熔融せずに燃焼室下部に導かれ、低温酸化燃焼により冷却されながら徐々に酸化していくU-KACC独自の燃焼方式による効果であると推定される。さらに、図2(c)では炉底捕集灰はポーラス状の様相を示しており、未燃カーボンがほとんど無い良好な燃焼状態であることが確認できる。バグフィルタ捕集灰についても、図2(d)のように灰の粒子同士の結合は見られず、付着性の低い灰であることが確認された³⁾。

(ii) 燃焼シミュレーション解析

燃焼試験で取得したデータをベースに、実機サイズのU-KACCボイラのモデルを作成してシミュレーション解析を実施した。バーナの燃焼空気旋回方向や燃料粒子サイズなどの条件を変えた上で、燃焼ガス温度、ガス流れおよび滞留時間、燃料粒子から灰へ移行する燃焼反応挙動などを解析し、最適な設計条件を確認した⁴⁾。

以上の結果、U-KACCボイラが所定の性能を発揮し、難燃性石油残渣も燃料として有効活用できることが検証された。

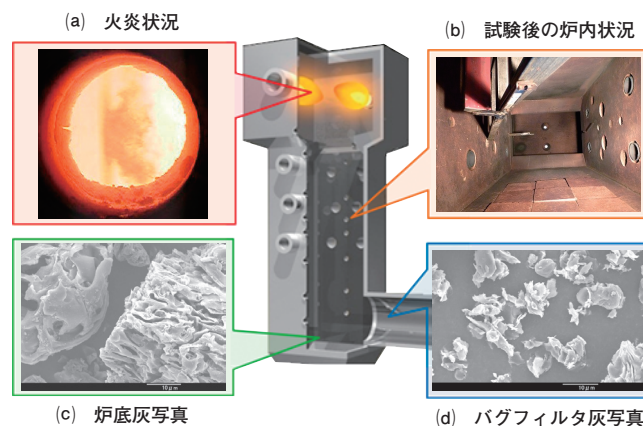


図2 燃焼試験炉での燃焼状況、炉内状況、灰写真
Fig. 2 Combustion state and internal conditions of a test furnace and ash photographs

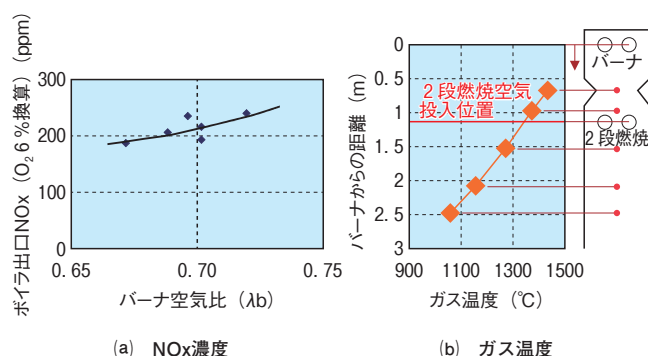


図3 燃焼試験炉でのNO_x濃度、ガス温度
Fig. 3 NO_x concentration and flue gas temperature of a U-KACC test furnace

3 富士石油(株)袖ヶ浦製油所向けU-KACCボイラ

(1) 計画概要

今回の新設ボイラ・タービン発電設備は、袖ヶ浦製油所で生産される固形のASPを主燃料としたもので、電力供給源の転換を図りエネルギーコスト低減に大きく寄与するものと期待されている。ボイラ主要目を表1に示す。

一方で、燃料としてのASPの取り扱いの難しさから、さまざまな配慮を施した設計が必要となる。

アスファルトピッチ (ASP) と石油コークス、石炭(れき青炭)およびVR(減圧蒸留残渣)との燃料性状比較を表2に示す。

ASPの特徴は次の通りである。

表1 ボイラ主要目
Table 1 Boiler specifications

ボイラ形式	U-KACC式 単胴放射形自然循環ボイラ
蒸発量(t/h)	295
蒸気圧力(過熱器出口)(MPaG)	10.3
蒸気温度(過熱器出口)(°C)	503
通風方式	平衡通風
主燃料	アスファルトピッチ(ASP)

表2 ASPと他の燃料との性状比較
Table 2 Comparison between ASP and other fuels

項目	ASP	石油コークス	石炭 (れき青炭)	VR
高位発熱量 (MJ/kg)	7,960	8,300~8,500	4,000~6,000	9,500~10,000
揮発分 (wt%)	40.6	10~13	30~40	-
固定炭素 (wt%)	59.1	87~90	45~55	20~30
窒素分 (wt%)	1.4	1~3	2	~1
硫黄分 (wt%)	6 (最大8)	4~7	1以下	4~6
バナジウム (ppm)	600~900	<1,500	-	<250
灰分 (wt%)	0.3	0.2~1.0	10程度	0.03

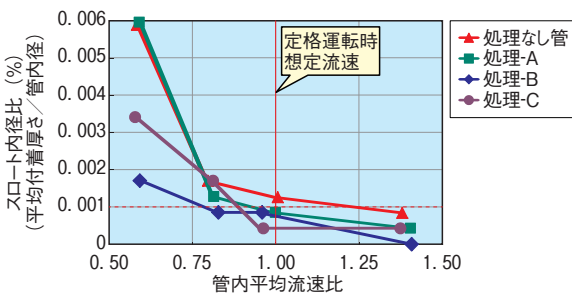
- ・高硫黄分であり、耐腐食対策、SO_x対策が必要
 - ・高濃度のバナジウムを含有しており、伝熱管への灰付着、高温腐食対策に配慮が必要
 - ・VRの10倍程度の灰分を有しており、炉底での燃焼灰堆積を防ぐための灰出し機能が必要
 - ・軟化点が180℃と低く付着性が高いため、燃料搬送系統およびバーナにおける付着・閉塞対策が必要
- これらの特徴を考慮して最適な設計・計画を行っている。

(2) 設計上の特徴

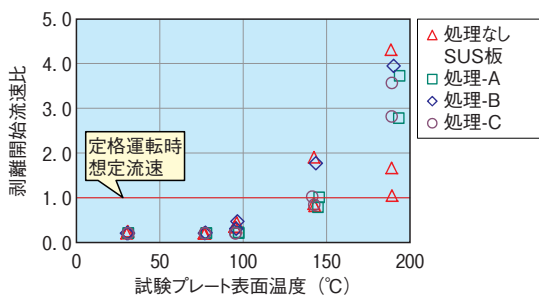
(i) ASPバーナ，ボイラ内燃焼性

今回燃料とするASPは、常温では固体であり微粉状に粉砕し輸送可能であるが、約180℃から軟化し始め、付着しやすい性質がある。このため、バーナ構造物への付着・流路閉塞を防止するための冷却構造が必要になる。

そこで、まずバーナ構造物材へのASP付着性を評価することを目的として基礎試験を実施し、各種の表面処理や流



(a) 表面処理，流速が及ぼす付着量への影響



(b) 表面処理，温度が及ぼす剥離流速への影響

図4 ASP付着性基礎試験結果
Fig. 4 Results of ASP adhesion test

速，温度に対する付着特性を確認した。その結果，図4に示すように，付着厚さは定格運転時想定流速下では表面処理によりスロート内径比0.001%以下に抑制できること，および表面温度を100℃以下とすることで付着成長の無いことが確認できた。

次に，この結果を踏まえて冷却構造を備えた付着対策バーナを検討し，前述の燃焼試験炉を改造してバーナ単体による燃焼試験を実施した。燃焼試験時のASP燃焼状況を図5に示す。冷却構造がない場合は30分程度で図5(a)のように流路閉塞して燃焼継続が困難となるが，適切な冷却構造を設けることにより，バーナ表面への付着を抑えて流路閉塞なく連続運転が可能となり，図5(b)のように良好なASPの燃焼性を確認できた。また，付着対策バーナによる燃焼試験時の運転データを図6に示す。ガス温度，O₂濃度共に長時間にわたり安定しており，今回開発した付着対策バーナであれば付着性の高いASPでも長時間の連続安定運転が可能であることを確認した。

ASPの燃焼が適切に行われ，U-KACCとしての高温還元ゾーン，および低温酸化ゾーンが形成されている状況をシミュレーション解析により確認した。

図7(a)に示すU-KACC火炉内のガス温度分布図をみると，上部の還元ゾーンで1,500℃以上の高温域が形成されており，下部の酸化ゾーンでは徐々に冷却されていく様子が分かる。

図7(b)は，バーナから出た燃料粒子の軌跡を示してお

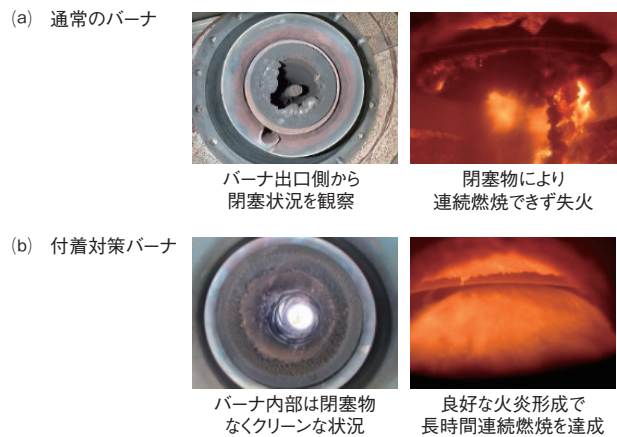


図5 ASPバーナ試験結果 (ASP燃焼状況の比較)
Fig. 5 Results of ASP burner test (comparison of combustion states)

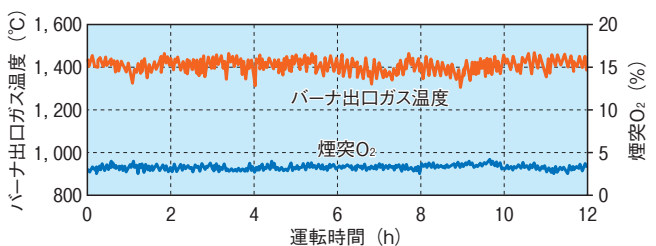


図6 ASP燃焼試験結果 (ガス温度およびO₂濃度)
Fig. 6 Results of ASP combustion test (gas temperature and O₂ concentration)

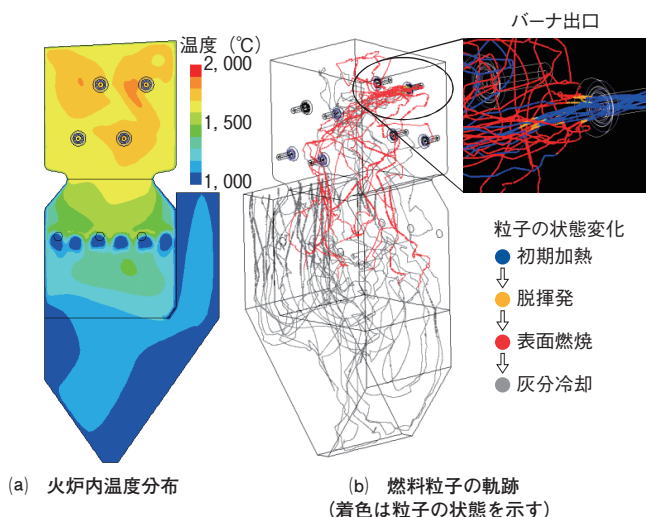


図7 ASP焼きU-KACCボイラ燃焼シミュレーション
Fig.7 ASP combustion simulation analysis of U-KACC

り、粒子の状態変化を着色している。バーナ出口で急激に加熱され揮発分を放出して燃焼開始し、チャーとなった後は表面燃焼状態となり、やがて燃え尽きるまでの軌跡が分かる。同図から、上部の燃焼ゾーンでチャーとなった粒子は、下部燃焼ゾーンでおおむね燃え尽きている状況が分かる。したがって、反転したガスに搬送される粒子は燃え残った灰分が主成分となる。

(ii) 燃料の粉碎・供給設備

ASPはHGI（ハードグロブ指数）が158と硬度が低く付着性があることから、燃焼粉碎機は石炭焼きで一般的に使われているローラミルではなく、衝撃式ミルを採用した。また、ASPの粉碎試験を実施した上で、最適なハンマー数、ミルの回転数を選定している。

微粉碎したASPは空気搬送にてバーナに供給するが、搬送管内部での付着・閉塞が発生しないように、適切な固気比、搬送管ルート、バンド管形状を選定している。

(iii) 火炉の腐食対策

U-KACCでは上部燃焼室における高温還元燃焼を行っており、二段燃焼空気を投入して酸化燃焼が完結するまでのゾーンにおいては、燃料中の高硫黄分による硫化還元腐食が懸念される。このため、腐食対策として還元部燃焼室パネルには、外層がステンレスの密着二重管を使用している。

(iv) 伝熱管への灰付着対策

従来形のボイラにおける高温酸化燃焼では、バナジウムを含んだ燃焼灰が低融点化し、燃焼室水管、過熱器管などへの灰付着によるスラッシング、ファウリング、腐食増大などの弊害が発生する。そのため燃料中にマグネシウム系添加剤を混入して対応している場合が多いが、U-KACCの燃焼方式では未燃が少ないことと、高温還元雰囲気下におけるバナジウム灰の高融点化の効果もあり、燃焼室水管への灰付着が少ない。

また、炉底から大半の灰を分離排出してガス中の灰濃度

を低下させ、第二煙道で十分にガス温度を低下させることにより、その後流側の対流伝熱面における灰付着も大幅に低減させている。このため灰の融点を上げるための燃料添加剤を使う必要がなく、運転費用の低減に貢献している。

(v) 環境対策（排ガス処理設備）

袖ヶ浦地区の厳しい環境規制に対応するため、最新鋭の排ガス処理設備を設置する計画である。

- ① NO_x対策として、U-KACCの超低NO_x性能に加えアンモニア注入による選択接触還元方式の排煙脱硝装置を設置する。U-KACCでは灰中未燃分が少なく、灰の付着性が低いため、脱硝触媒の目詰まりが起りにくいという特長も持っている。
- ② SO₂対策として、高効率の湿式脱硫装置（水酸化マグネシウム法）を設置し、吸収塔は詰まりが発生しづらい多段トレイ方式を採用した。薬剤は経済性の高い山マグをスラリー化して使用する。
- ③ 集塵装置は乾式の電気集塵機を採用する。
- ④ SO₃ミストによる紫煙対策として脱硫装置の後流側に湿式の電気集塵機を設置する。

あとがき

富士石油(株)袖ヶ浦製油所向けのASP焼きU-KACCボイラは予定通り設計、工事が進んでおり、2017年に実施される試運転、性能試験において良好な燃焼性能を実機で確認できるものと期待される。

今後もU-KACCボイラをはじめとしたエネルギーの有効利用および環境負荷低減に寄与するボイラ設備の開発・拡販を進め、さまざまな顧客ニーズに応えていく所存である。

参考文献

- 1) 大村, 谷口, 吉山, 田部, 西村: “ボイラ極低NO_x燃焼技術”, 川崎重工技報, No.153, pp.14-17 (2003)
- 2) 末光: “オイルコークス専焼 超低NO_x・低ばいじんボイラ (U-KACCボイラ)”, 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門ニューズレター第43号 (2011)
- 3) 特許 第P5496862号, “石油残渣焼きボイラの燃焼室汚れ防止燃焼方法”
- 4) 特許 第P5501198号, “低NO_x・低煤塵燃焼方法およびボイラ燃焼室”



森 宏之



戸田 信一



荻野 智行