

VR だきボイラの低公害燃焼技術

Pollution Minimum Combustion Technology of VR Fired Boiler

技術本部 徳田君代*1 一ノ瀬利光*2
 藤村皓太郎*2
 原動機事業本部 荒川善久*3 藤井 宏*4

近年、超重質油である VR (Vacuum Residue) を石油精製所内でのボイラ燃焼として利用できないかとの検討がなされている。この VR は従来のアスファルトよりさらに高粘度であるとともに硫黄分・窒素分・残留炭素分及び重金属類の含有量も非常に多いため、よりクリーンな燃焼を行う必要がある。当社はたゆまぬ研究開発の成果とこれまでに蓄積した技術と豊富な実績から現在までに 23 缶に上るアスファルト・高粘度重質油だきボイラを納入しており、実用化のための技術蓄積を行ってきた。今回、当社の 2 t/h 燃焼試験炉を用いて、超高粘度 VR を発電用燃料として使用するための燃焼性能確認試験を行い、安定な着火及びクリーン燃焼について確認した。

In recent years, research on whether VR (vacuum residue), an extra-heavy oil, can be used as a boiler fuel in petroleum refineries has been undertaken. Cleaner combustion technology of this VR is required because it has an extremely high viscosity and extraordinarily high contents of sulfur, nitrogen, Conradson carbon and heavy metals, etc. Based on the successful results of our continuing research and development efforts over a long term, accumulated technology and extensive experience of extra-heavy oils, MHI has already supplied as many as 23 boilers fired by asphalt or high viscosity extra-heavy oils. This demonstrates the availability of a practical combustion technology for such extra-heavy oils without any problems. Recently using our 2 t/h combustion test furnace, MHI conducted a combustion performance verification test on this VR for the purpose of using extra-high viscosity vacuum residue as a fuel for power generation. This test confirmed that the stable ignition and clean combustion of VR could be achieved by the available technology.

1. ま え が き

石油産業を取りまく環境として製品の白油化が進んでおり、この傾向は今後も着実に進むと考えられる。そのため余剰となる高粘度・高硫黄の重質残渣油を極力減少させるために減圧蒸留装置による深絞りによる精製が進められている。この深絞りによって得られた重質残渣油が VR (Vacuum Residue) である。VR は粘度が従来のアスファルトよりさらに高く、硫黄分・窒素分・残留炭素分及び重金属類の含有量も非常に多い⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このことから、一般ユーザ側の規格やその輸送の面で、そのままでは一般市場で販売することは難しい。このため製油所内のボイラ用新燃料としての適用が検討され始めている。

この VR をボイラ用燃料として見た場合、アスファルトやオリマルジョン[®]のような重質油との共通点が多い。輸送等のハンドリングを考慮した場合は燃料の水エマルジョン化が有効となるが、ボイラ燃料として使用する場合は、VR をそのまま燃焼させることが好ましい⁽³⁾⁽⁸⁾。

当社は、重質油に関するたゆまぬ研究開発の成果と、これまでに蓄積した技術と豊富な実績⁽⁴⁾⁽⁷⁾から、現在までに 23 缶に上るアスファルト・高粘度重質油だきボイラを納入しており、実用化の技術としては確立している。しかし VR が非常に高粘度であることや、近年地球に優しいエネルギー技術への要求が高まり、よりクリーンな燃焼が要求されていることから、さらなる低公害燃焼技術開発が求められている。VR を発電用燃料として使用するために今回、当社の 2 t/h 燃焼試験炉を用いて燃焼性能確認試験を行った。その結果、安定な着火及び低公害性について確認したので本報で紹介する。

表 1 各種 VR 性状
Features of VR

		C 重油	Asphalt	VR-A	VR-B	VR-C	VR-D
高位発熱量	kcal/kg	10 300	10 020	9 950	9 850	9 650	10 070
流動点	℃	-15	45	—	70	100	—
灰分	wt %	0.01	0.06	0.05	0.05	0.06	0.02
水分	wt %	<0.1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—
残留炭素分	wt %	10.8	53.0	28.0	26.20	37.7	26.2
S	wt %	2.33	4.93	5.56	4.2	4.8	1.18
N	wt %	0.24	52	0.47	0.53	0.43	1.07
V	ppm	80	100~200	135	243	159	66.8
Ni	ppm	10.4	50	43.2	82	72	53.1
Na	ppm	30	100	66.1	—	26.6	39.4

2. VR 燃料性状

表 1 にこれまでに当社で燃焼させた VR の例を C 重油の性状と比較して示す。また、図 1 に温度・粘度特性を示す。

(1) 高粘度

粘度は C 重油に比べ非常に高い。常温では固化しており、C 重油バーナにおける噴霧適正温度 100 ℃でも、5 000 cP を超えており、噴霧適正粘度である約 20~30 cP に下げるためには 250~300 ℃まで加熱する必要がある。

(2) 高窒素分

C 重油の N 分が 0.24% であるのに対し、VR 中 N 分は 0.4~1.1% と 2 倍以上高く、排ガス中の Fuel NO_x が増加するため、低 NO_x バーナ⁽¹⁾⁽²⁾及び排煙脱硝装置の採用について検討する必要がある。

*1 長崎研究所火力プラント研究推進室長 *3 原動機技術センターボイラ技術部ボイラ技術二課長
 *2 長崎研究所火力プラント研究推進室 *4 原動機技術センターボイラ技術部ボイラ技術二課

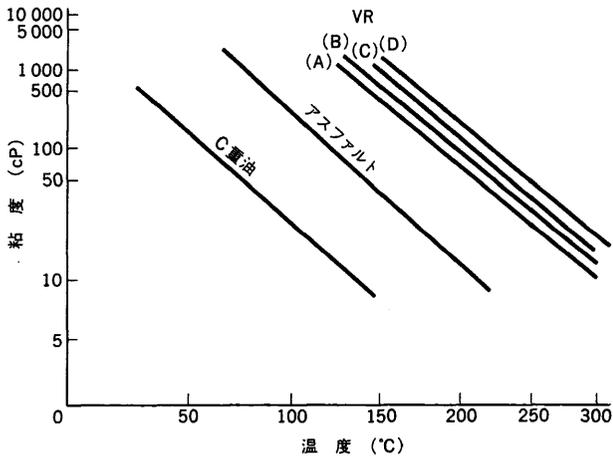


図1 温度・粘度線図 VRの安定燃焼には、250~300℃以上に加熱し、粘度を低下する必要がある。
Viscosity vs. temperature

(3) 高硫黄分

C重油のS分が2.33%であるのに対し、VRのS分は4~6%と2倍以上であり、排ガス中のSOxが増加するため、(a)排煙脱硫装置の採用、(b)高温腐食の対策としてMg系添加剤の採用、(c)再生回転式空気予熱器の低温腐食対策としての低温端平均メタル温度の適正化、等について検討する必要がある。

(4) 高残留炭素分

C重油の残留炭素分が10.8%であるのに対し、VRの残留炭素分は20~40%と2倍以上であり、排ガス中のばいじんが増加する。ばいじんの増加に伴い伝熱面の汚れが激しくなるため、スートブロワの増強及び最適配置等の検討が必要である。また、ばいじんは電気集じん機で除じんするのをベースとするが、ばいじん量はバーナでの噴霧粒径やO₂濃度の影響があるほか、NOx低減対策との兼ね合いで大きく変化するため、燃焼特性や排煙脱硫装置での除じん効果も考慮した総合的な検討が必要である。

3. VR 燃焼排ガス発生と機構

3.1 ばいじん⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

ばいじんは揮発分がガス化して未燃分として残った場合に生じるスート(すす)と、揮発分が抜けた後に残る炭素質のセノスファと燃料中の灰分の3種類のものから成っている。スートは数ミクロン以下の微粒子で、ばいじん中に占める重量割合は数%に過ぎないが、目視する場合には非常に濃く見える。これに対してセノスファは50~200ミクロン粒径の海綿状のもので、重質油燃焼ではばいじん重量の大半を占める。

また、スートはセノスファ中に残った揮発分が火炎後流部で蒸発して生成するものが多く、このためセノスファの発生が多い場合はスート量も多くなると言われている。セノスファは一般に油燃料中の残留炭素量に比例して増える傾向を持っている。

このことから、燃料中の残留炭素分の多いVRだきボイラではこのセノスファ発生量を低減するためバーナ噴霧油滴の微粒化、着火燃焼性の向上が重要となる。

3.2 NOx

表2にNOxの分類を示す。ボイラで発生するNOxは約95%がNOで残りはNO₂である。そして発生機構により燃料中のN分から発生するFuel NOxと、空気中のN₂とO₂から発生するThermal NOxに分けられ、さらに後者は高温場の滞留時間に比

表2 NOxの分類
Classification of NOx

Total NOx	Thermal NOx	Thermal NOx	空気中のN ₂ ガスとO ₂ ガスとが高温場で反応して生成する。Zeldovich機構によって計算できる。
		Prompt NOx	揮発分性 残炭分性
	Fuel NOx	揮発分性	燃料中の窒素化合物が燃焼時に放出されて空気中のO ₂ ガスと反応して生成する。
		残炭分性	揮発分中のN分と炭素質(残炭質)中のN分でNOxへの転換率が異なる。

例的に発生する狭義のThermal NOxと、燃焼時の炭化水素ラジカルによって発生するPrompt NOxに分けることができる。したがってNOxはこれらの3者の和で表される。この3者の特性については石英管を使った基礎試験により把握している。

基礎試験を行った結果、まずThermal NOxはZeldovich機構による計算と良い一致を見せている。低NOx運転を行っているボイラの火炎温度、滞留時間を考慮すると、炉内で発生するThermal NOxは10ppm前後と推定される。

またFuel NOx発生は、各種重質油を使用し、空気に替えてArとO₂ガス雰囲気中で試験を行い検討している。試験の結果、燃料中のN分が低いときはNOxへの転換率が高くなったが、N分が0.1%を超えると、25~30%の転換率にとどまるとの知見が得られている。この結果からC重油のN分が約0.2%のときの転換率は約100ppmのNOx値に相当し、N分が0.4~1.0%のVRではNOxは約150~350ppmと見込まれる。

次に、Prompt NOxは、Ar雰囲気中で試験を行い、全NOx値からThermal NOxとFuel NOxを差引いて求めることができる。Prompt NOxは、燃料中の残留炭素分との相関性が強く、VRでは70ppm程度のPrompt NOxの発生が考えられる。

これら3種のNOxは、いずれも酸素濃度と雰囲気温度の影響を受ける。酸素濃度が高いほどNOx発生量も多くなる。温度が高くなるとThermal NOxとPrompt NOxの発生量は多くなる傾向をもつが、Fuel NOxについては酸素濃度によって温度の影響が異なり、還元雰囲気では高温になるほどNOxへの転換率は低下し、酸化雰囲気では逆に転換率が上がることが確かめられている。このようなことから、VRでは火炎温度も高く、燃料中のN分と残留炭素分が多いため、Thermal NOx、Fuel NOx、Prompt NOxのいずれも多く発生すると予想される。

3.3 SOx

燃料中S分からは高温燃焼場においてSO₂が発生し、その後火炎後流の低温場においてSO₂の一部がSO₃に転換する。SO₂のSO₃への転換率は、雰囲気O₂濃度及び伝熱面等に付着、たい積しているバナジウム(V)の触媒作用によっても大きく影響される。

SO₂及びV等の重金属分は燃料中の全量相当が排ガス中に含有されるが、NOx、ばいじんは燃焼方式を最適化することで発生量を低減できる。超高粘度残渣油の低公害燃焼のためには、適正なバーナと燃焼方式の選定が重要となる。

4. 燃 焼 試 験

当社長崎研究所内の2t/hの燃焼試験炉にて実施した燃焼性能確認試験について紹介する。

表1のVR-(A)を供試燃料として燃焼試験を実施し、VRがボイラ用燃料として安定燃焼可能であることを確認した。燃焼試験の結果は以下のとおりである。

4.1 試験装置

試験炉は2t/h(公称)油だき単一バーナ円筒横置水冷燃焼炉を使用し、燃焼量700kg/hで行った。図2に燃焼試験炉の外観写真を示す。試験炉は内径2.2m、長さ7.5mで油だきボイラ実

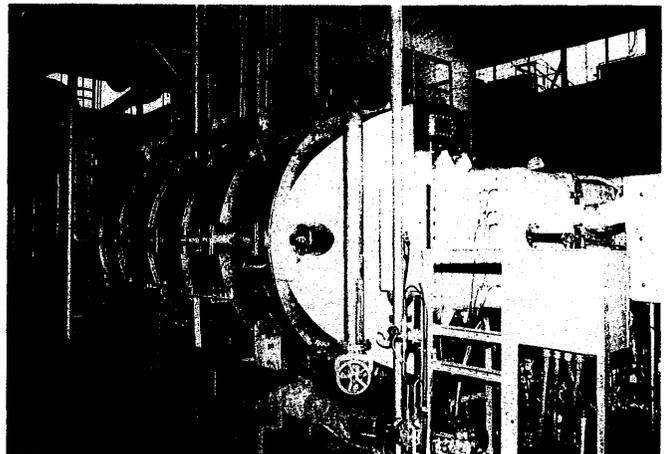


図2 燃焼試験炉外観 実機自家発用バーナと同規模のバーナ試験が可能な燃焼試験炉。 Test furnace overview

缶の燃焼性を把握することができる。図3は燃焼試験炉の系統である。本試験で用いた燃料は、ドラム缶で製造元から運ばれたものを重機破碎し、燃料タンクにて加熱溶解して使用した。燃料の供給系統は、上流部にC重油タンクを併設している。燃焼炉起動時はC重油を燃焼し、その後高粘度油であるVRに燃料系統を切替えて試験を実施した。燃料供給管は温度を高温に保つためスチームトレースする構造を採用し、粘度を一定以下に抑え、供給の安定化を図っている。バーナは当社のシングルボディPMバーナをVRだき用に改良したものを使用した。バーナチップはアトマイズ用蒸気と燃料の中間混合型である。本バーナの燃料高濃度拡散炎(Conc炎)と燃料低濃度予混合炎(Weak炎)の組合せにより、低NOx燃焼が可能となる⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁹⁾。

4.2 燃焼状況

燃焼状況の観察結果を図4に示す。同一条件下におけるC重油の燃焼状況と比較している。VRの着火、燃焼性は、バーナ噴出直後のハローコーン(リング状保炎渦)も安定して形成されており、C重油並みの安定した燃焼となっている。

4.3 排ガス性状

VR及びC重油燃焼時の排ガス中NOx及びばいじん発生特性を図5に示す。VRのNOx値は、燃料中窒素分に起因するFuel

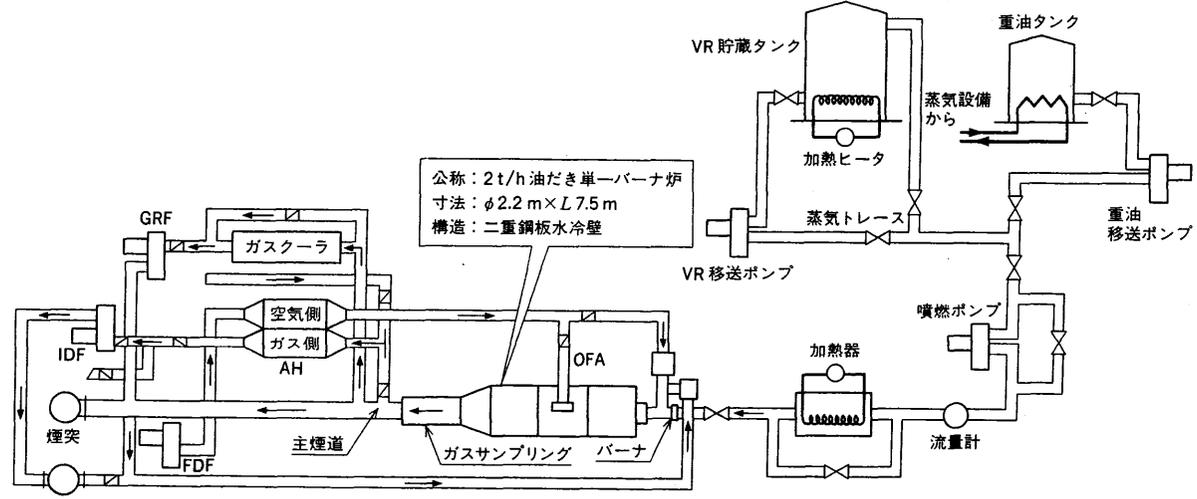


図3 装置系統図 高温VR貯蔵、輸送系統、燃焼炉及び排ガス系統を具備した燃焼試験装置の系統を示す。 Test furnace system flow diagram

OFA投入率=15~20%, Ex.O₂=2%

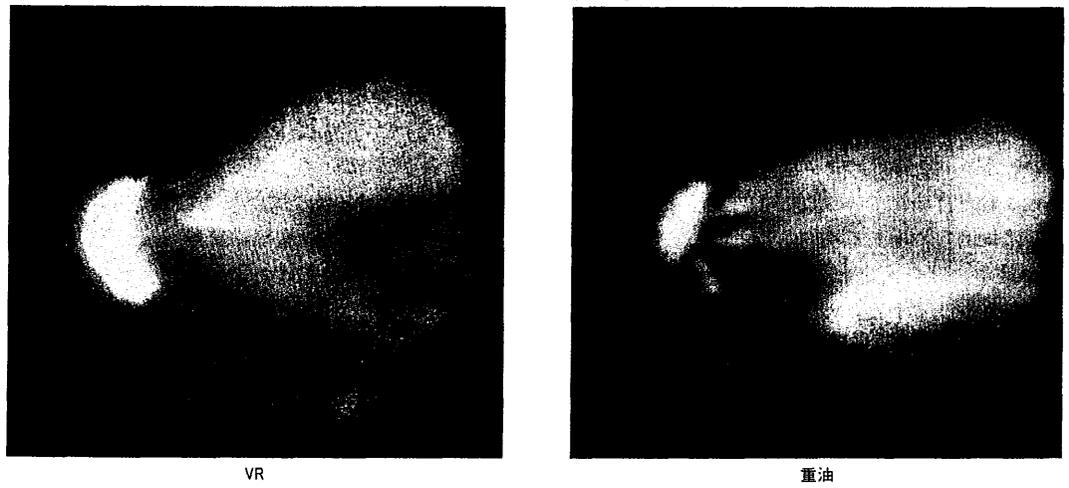


図4 燃焼状況 VR燃焼について、C重油同等の着火、燃焼安定性が確認できた。 Combustion status

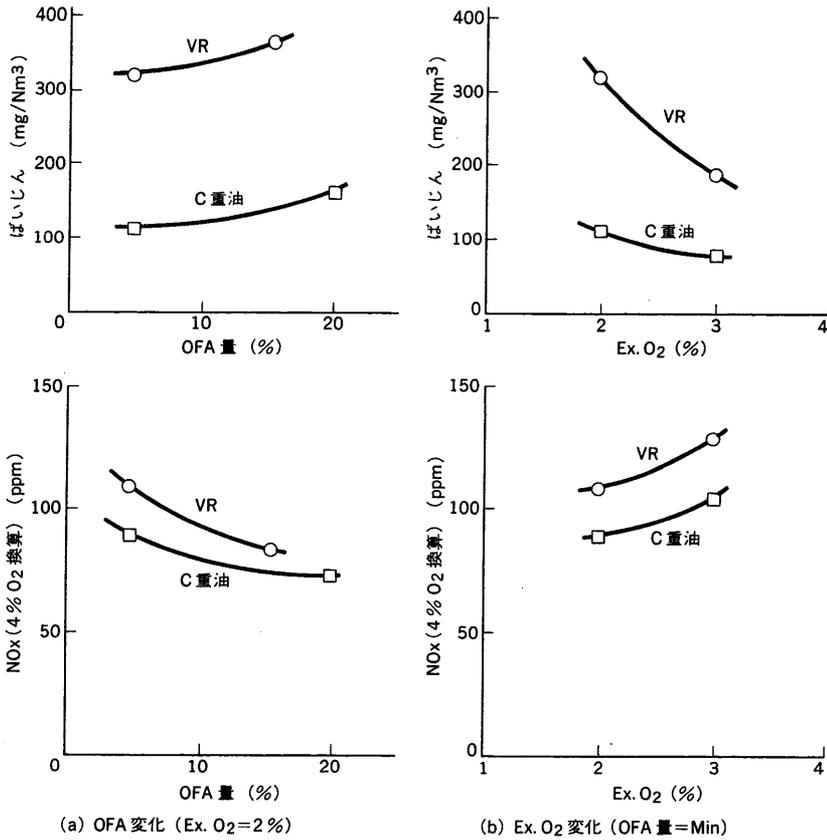


図5 燃焼特性 VRのNOxばいじん発生特性はC重油より若干多いが、これはVRの性状によるもので、良い燃焼状況が達成できた。
Characteristic of combustion

NOxがC重油に比べ高めの値をとるが、OFA量やEx.O₂量に対する燃焼特性パターンはほぼ同一であることが分かる。また、ばいじん量はC重油より高い値となっているがこれは燃料中の残留炭素分に比例した値となっている。

図6に燃料中N分と発生NOx値の関係、図7に残留炭素分とばいじん濃度の関係を他燃料の燃焼結果と併せて示す。N分の増加とともにNOx (Fuel NOx)が増加し、また残留炭素分の増加とともにばいじん濃度が高めの値を示すことが分かる。VR低公害燃焼のためには低NOx、低ばいじんのための方策が必要となるが、これまでの当社の技術蓄積により十分クリアできるレベルである。

5. む す び

近年の石油精製で発生するVRを発電用燃料として使用するために当社の2t/h燃焼試験炉を用いて燃焼性能の確認試験を行

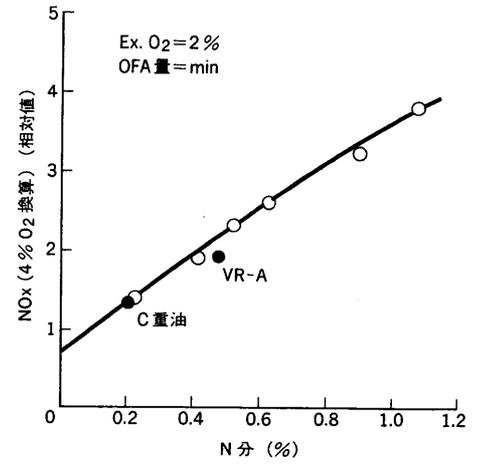


図6 燃料中N分とNOx値の関係
発生NOxは、燃料中のN分と良い相関があり、N分増加でNOxも増加する。
NOx vs. fuel-N

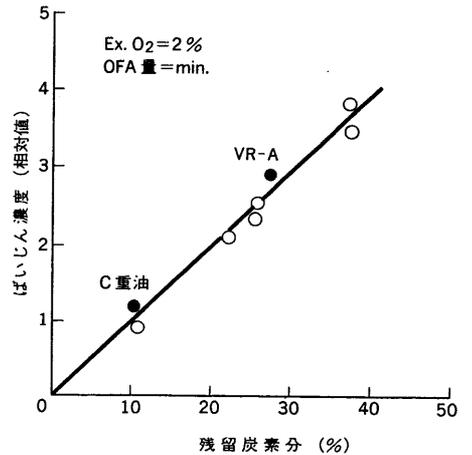


図7 燃料中残留炭素分とばいじん濃度の関係
ばいじん濃度は残留炭素分増加で増えるが、さらなる燃焼方式の改善によるばいじん及びNOxの低下が望まれる。
Dust loading vs. residual carbon content

った。その結果、VRだき改良PMバーナを使用し、バーナ噴霧に適正な粘度に加熱することで、発電用燃料として十分使用可能な安定着火、燃焼性を確認した。またNOx及びばいじん濃度は従来のC重油よりも高いものの、排煙脱硝装置及び脱じん装置を取付けることで環境規制に対応できることを確認できた。この燃焼技術開発成果とこれまでの重質油だきボイラの経験を反映することで、近年の超高粘度VRボイラは実現可能である。

参 考 文 献

- (1) 高橋恭郎ほか、油だき低NOxバーナの研究、日本機械学会論文集 No.780-6 (1978) p.119
- (2) 高橋恭郎ほか、低ばいじんPMバーナの開発、三菱重工技報 Vol.17 No.2 (1980) p.132
- (3) 重質油対策技術研究組合、重質油対策技術研究開発の動向、昭和56年度 (1981)
- (4) 立石又二ほか、粗悪燃料油滴の燃焼に関する研究、三菱重工技報 Vol.17 No.6 (1980)
- (5) 原田ほか、粗悪油を燃焼するボイラの諸問題、三菱重工技報 Vol.17 No.6 (1980)
- (6) 坂井正康、重質油燃焼の諸特性、エネルギー・資源 Vol.2 No.5 (1981) p.438
- (7) 坂井正康、ボイラにおける重質油の燃焼、三菱石油株式会社技術資料 No.62 (1984) p.12
- (8) 坂井正康、燃料の多様化、燃料性状と燃焼法、化学と工業 Vol.38 No.3 (1985) p.233
- (9) 大栗正治ほか、予燃焼方式による重質油の低NOx燃焼法の開発、三菱重工技報 Vol.26 No.1 (1989) p.36
- (10) 坂井正康ほか、重質油のばいじん発生に関する基礎研究、三菱重工技報 Vol.23 No.5 (1986) p.581
- (11) 佐賀井、ばいじんの発生機構、燃料協会誌 Vol.48 No. 508 (1969)