

■ 特 集 ■ 新燃焼技術

重質油燃焼の諸特性

Characteristics of Low Grade Oil Combustion

坂 井 正 康*

Masayasu Sakai

1 はしがき

石油事情の逼迫から、輸入原油量の消滅と劣質原油の活用が進められており、これに呼応して石炭への転換が急ピッチで進められている。一方、国内の灯油・軽油・A重油の石油製品中間三品の需要は着実に伸びつつあることから、重質油との供給にアンバランスが生じて来ている。このための対策として、C重油の重質化及至はアスファルトの燃料としての利用に業界の期待が寄せられている。

超重質油であるアスファルトを燃料とした産業用の実ボイラはこれまでに国内外を合せ10缶を数えていて、燃焼の実用化技術についてはほとんど問題はないが、現在の環境規制を考えると従来の技術をそのままで適用することは難しい。

即ち、重質油になるに従って、一般に性状は劣質化し、燃料中のN分、S分、灰分、残留炭素分、V（バナジウム）等の含有量が増える傾向にあり、燃焼排ガスのNO_x（窒素酸化物）、SO_x（硫黄酸化物）、ばいじんが増加し、ボイラ機器の腐食も厳しくなってくる。したがって、従来に増したこれらの対策が必要となってくる。

ここではこれらの問題に焦点を置き、重質油の燃焼と排ガスの諸特性について、これまでの一般石油燃料と比較しながら、その差異についての基本特性をまとめてみた。

2 重質油の性状

石油系燃料性状について筆者の燃焼試験に使用したものを例として表1に、また、粘度曲線を図-1に示した。

重油バーナによる噴霧燃焼の場合、燃料を加熱して油粘度を10~30cst（センチストークス）に抑える必要

があり、このためにはC重油の場合90~110°C、アスファルトでは200~250°Cに加熱する必要がある。燃焼排ガス中の公害物質の主因であるNO_x（NOとNO₂）の発生に影響する燃料中N分、SO_x（SO₂とSO₃）の生成および腐食の主因となるS分、また、ばいじん発生に影響の大きい残留炭素分等は重質化するにつれて多くなり、アスファルトではいずれの量もC重油の約2倍を含有している。

また、高温腐食の主因となるV（バナジウム）も多くなって来る。

3 重質油燃料の燃焼特性

3.1 着火と燃焼安定性

着火と燃焼の安定性を評価するのに燃料の引火点と発火点を目安にすることができる。引火点・発火点が低い程、安定した着火と燃焼が得られ易く、重質化してこれ等が高くなると着火しにくくなるが、先に述べたように重質油になる程噴霧の必要性から燃料温度を上げて使用するので、アスファルトの場合でも200°C程度に加熱しておけばバーナの噴霧燃焼において、着火と燃焼に不安はない。

3.2 燃焼速度

単一油滴（直径約2mm）における燃焼速度（単位

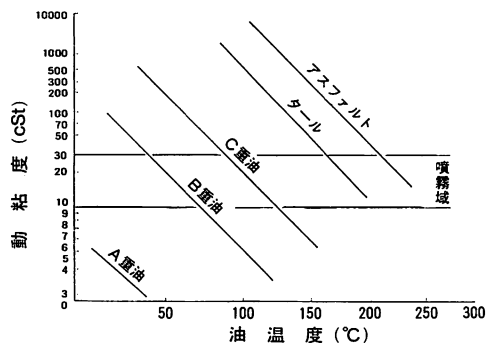


図-1 油粘度の比較

*三菱重工業(株)長崎研究所燃焼伝熱研究室室長

表1 石油系燃料性状の一例

種 別	ナフサ	軽油	A重油	B重油	C重油	直接脱硫残渣	間接脱硫残渣	道路用アスファルト		
									比重	15/4°C
工業分析	比重	15/4°C	0.682	0.805	0.846	0.918	0.941	0.920	0.993	0.918
	重粘度(50°C)	cSt	ⓐ(0°C) 0.59	2.1	2.5	28.5	87.6	109	1025	750 (150°C)
	流動点	°C	—	-5~-30	22.5	—	—	12.5	5	40
	灰分	Wt%	0	0.0	0.0	0.01以下	0.01以下	0.01	0.01	—
	残留炭素	Wt%	0	—	0.03	6.54	8.62	4.96	16.17	22
	水分	Wt%	0.01以下	0.01以下	0.01以下	0.01以下	0.02	0.1	0.05	0.03
	引火点	°C	-20以上	61	>60	80~96	85~102	200~240	200以上	295~320
	発火点	°C	230~270	180	190	200	240	—	—	—
元素分析	C	Wt%	83.9	85.3	85.0	85.2	85.0	85.8	85.3	83.75
	H	Wt%	15.6	13.8	13.7	12.3	11.9	12.7	10.7	10.26
	O	Wt%	0.47	0.4	0.39	0.4	0.5	0.7	0.4	—
	S	Wt%	0.035	0.49	0.88	1.97	2.37	0.63	3.28	4.8
	N	Wt%	0	0.00	0.03	0.13	0.22	0.14	0.35	0.50
	V	ppm	—	—	—	—	10~100	80~500	—	100~200
	高位発熱量	kcal/kg	11,430	10,860	10,800	10,460	10,370	10,670	10,110	10,210

時間における油滴表面積当りの燃焼量)も重質なもの程、遅く灯油を基準とするとC重油は約 $\frac{1}{2}$ 、アスファルトは約 $\frac{1}{2}$ である。

これらの燃焼速度は揮発分についてのもので、揮発分の燃焼が終ったあと、海綿状²⁾をした炭素質の固体燃焼に移ると、このときの燃焼速度は略 $\frac{1}{10}$ 程度に低下する。したがって、残留炭素分の多い重質油程燃焼完結に要する時間が長くなる。

3.3 バーナ燃焼における火炎特性

重油を噴霧燃焼させるバーナ炎は図-2のようにモデル化³⁾することができる。先ず、一次空気と噴霧油滴が混合し、主炎からの火炎伝播によって、この混合気が着火してフレイム・フロントを形成する。

このあと一次空気を主体とした一次燃焼を行ない、続いて二次空気の拡散による二次燃焼が行なわれる。

これまでの領域は主として揮発分の燃焼が行なわれるが、このあと残った炭素質は一次・二次燃焼が終ったあとの低O₂ガス雰囲気中で緩慢な燃焼を行ない、一般に云われるソフト・フレイム域をつくる。このような火炎特性は同一バーナを使用しても燃料によって大きく変ることがある。図-3は直径4.4m・長さ15mの横置

円筒炉の片端に燃焼量3t/hのバーナを取り付け、燃料を変えて燃焼させた試験での火炎温度と炉側壁の熱流束³⁾を示したものである。これよりアスファルトはC重油と略同じ火炎特性をもっており、軽質のナフサではこれとは全く異なり、参考として示したプロパンガス燃料に似た燃焼速度の遅い火炎特性をもっていることがわかる。この特性は次のように説明することができる。一次空気は安定な着火を行わせるために、一般に、全空気量の10~20%が使われ、残りは2次空気として供給する。したがって、燃焼速度は2次空気が火炎帯へ拡散して行く速度に支配され、単一油滴の燃焼速度より遅い燃焼速度となる。C重油やアスファルトの場合、油滴の蒸発速度が遅いため、二次空気の火

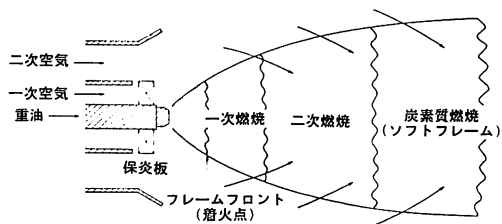


図-2 バーナ燃焼の火炎モデル

炎帯への拡散が容易に行われ、バーナ近くに燃焼率の高い高温炎帯を形成する。しかし、揮発分の燃焼が終わった後も炭素質の固体燃焼が残るため、発熱の極く少ない長いソフト・フレイム域を形成することになる。

これに対し、ガス燃料や蒸発速度の速いナフサでは一次燃焼域で燃料ガス層を形成し、二次空気の拡散はガス対ガスの分子拡散となるため、バーナ近くでは高燃焼率とはならず、炎帯後流で最大燃焼率をもつようになり、炎帯温度と側壁熱流束はともにC重油やアスファルトの場合より低い値となる。アスファルトの炎帯特性からみて重質油の場合の火炉設計はC重油と同等とみて良いことがわかる。

4 重質油燃焼排ガスの性状

4.1 NO_xの発生と対策

(1) NO_xの発生特性

燃焼場で発生するNO_xは略95%がNOで残りはNO₂である。発生機構からみると燃料中のN分から発生するNO_x (Fuel NO_xと呼ぶ) と空気中のN₂とO₂より発生するThermal NO_xに分けられ、さらに後者は高温場の滞留時間に比例的に発生する狭義のThermal NO_x (以下Thermal NO_xと呼ぶ) と燃料が燃焼する際にラジカルの存在によって瞬時に発生するPrompt NO_xに分けることができ、NO_xの全量はこれら三者の和として表わすことができる。この

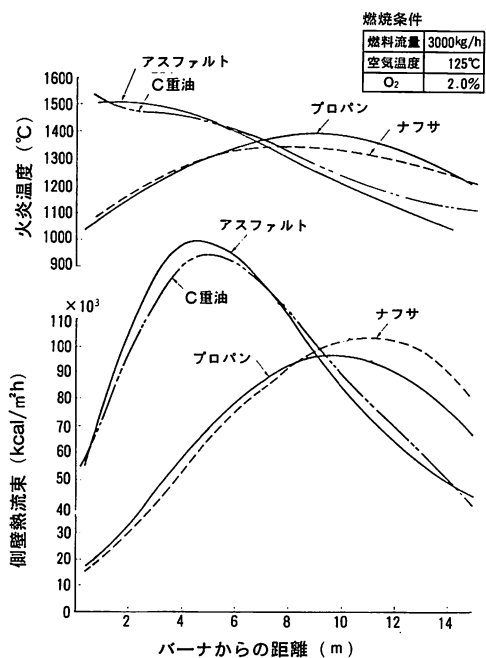


図-3 各種燃料の炎帯温度と熱流束の変化

三者の特性を電気で加熱した直径50mmの石英管で行なった基礎試験の結果を基にしてその概要を説明する。

まずThermal NO_xについてはN₂とO₂を所定濃度に混合し、ガス流量又は石英管長さを変化させ、また、石英管内の反応温度も種々に変えてNO_xの発生量を計測した。

その結果を図-4に示す。この結果はZeldvich機構による計算と良い一致をみせた。この結果からみて、低NO_x運転を行なっている実ボイラの場合では炎帯中心部が約1500°C、炉出口部排ガス温度は1000~1300°Cで、滞留時間2~3秒であるから、Thermal NO_xは10ppm前後の値とみてよい。

次にFuel NO_x発生試験では、石英管中に約200mgの重質油を入れた磁製ポートを入れ、Ar (アルゴンガス) とO₂の混合ガス (O₂濃度21%) を送って燃焼させる。

この間、石英管内の反応温度は一定に保っておく。ここで発生したNO_xは燃料中のN分によって発生したものであるからFuel NO_xとみることができる。燃料中N分の転換率として試験結果を整理したものを図-5に示す。

これよりみてN分が小さいときは高い転換率であるがC重油クラスのN分が0.1%を越えると、25~30%

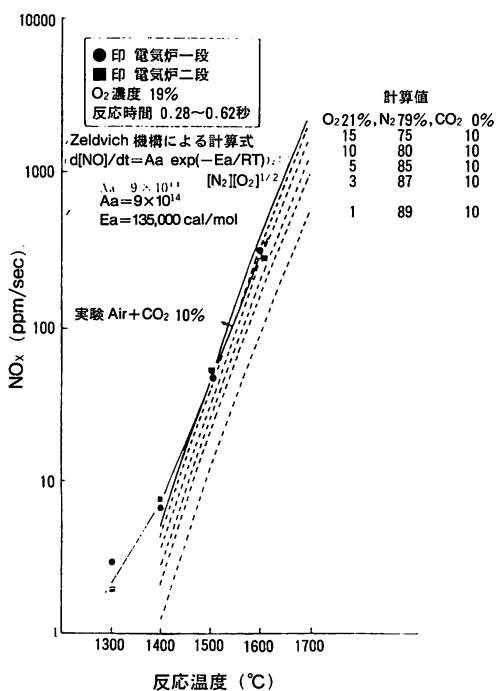


図-4 Thermal NO_xの発生

の転換率に納まって来ている。C重油のN分約0.2%のときの転換量は約100ppm程度のNO_x値に相当する。

次に、Prompt NO_xは、Fuel NO_xと同方式にし、ArとO₂に換えてN₂とO₂ (O₂濃度21%)の混合ガスを送ることによって全NO_xを得ることができるので、このNO_x値から先のThermal NO_xとFuel NO_xを差し引いて求めることができる。この結果を図-6に示す。この図に示してあるように燃料中の残留炭素分との相関性が強く、重質油では70ppm程度のPrompt NO_xの発生が考えられる。

これら三種のNO_xはいずれも酸素濃度と雰囲気温度の影響を受ける。酸素濃度は高い程NO_x発生量も多くなる。温度についてもThermal NO_xとPrompt NO_xについては多くなる傾向をもつが、Fuel NO_xについては酸素濃度によって温度の影響が異なり、空気不足の場合、高温になる程転換率は低下し、酸素濃度が高い場合は逆に転換率も上がることが確かめられている。

このようなことから、重質油では火炎温度も高く、燃料中N分と残留炭素分が多くなるため、Thermal NO_x、Fuel NO_x、Prompt NO_xのいずれも多量に発生することになる。

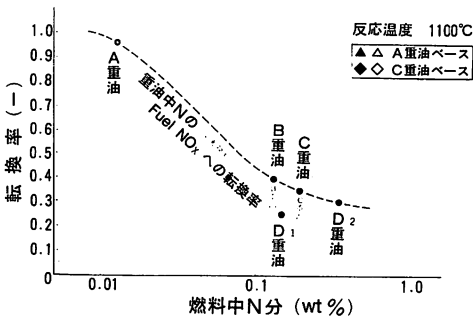


図-5 燃料中N化合物のFuel NO_x転換率

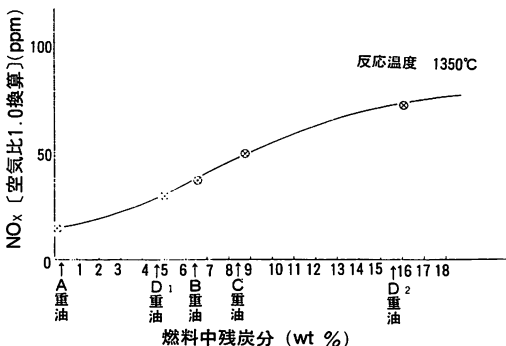


図-6 Prompt NO_xと燃料重質度との関係

(2) NO_x対策

アスファルトのように重質化するに従ってNO_x値は高くなるが、NO_xの発生及び低減の諸特性は定性的にはC重油と同じ性質を示し、これまでのNO_x対策はすべて有効に活用できる。図-7はバーナ燃焼での過剰酸素濃度 (Ex_xO₂) によるNO_xの変化を示したものであるがアスファルトとC重油は全く同じ特性を示している。このほか、GR法 (排ガス再循環法)、OFA法 (オーバー・ファイア・エア法又は二段燃焼法)、低NO_xバーナ⁴⁾や炉内脱硝法^{5) 6)} (燃焼技術の延長) についても同様の効果が期待できる。

いま、NO_xと燃料中N分の関係を、各種NO_x対策ごとに評価するとほぼ図-8のようになる。このうち炉内脱硝法のNO_xレベルは筆者の試験炉 (重油1 t/h 燃焼コーナ・ファイアリング炉) の結果で、その他のレベルは実ボイラの実績を基準に評価したものである。

4.2 SO_x発生と対策

(1) SO_xの発生特性

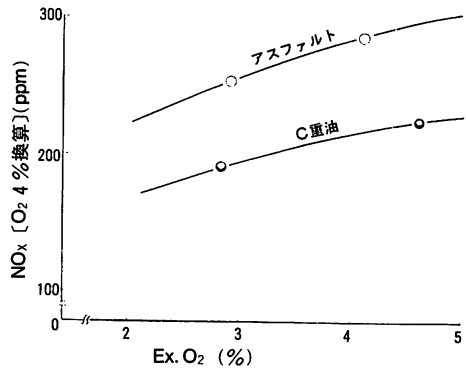


図-7 NO_xと過剰酸素 (Ex_xO₂) との関係

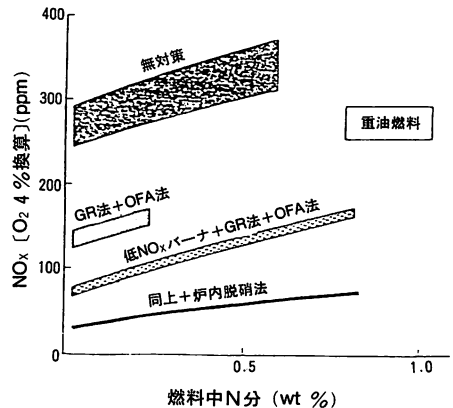


図-8 低NO_x燃焼法の評価

SO_x (SO₂とSO₃) は燃料の含有する総てのS分が燃焼して発生するので、SO_xと燃料中S分は比例関係にあり、さらにSO_x中の機器の腐食に関するSO₃はSO_x量に略比例する。SO₃の発生率は燃焼空気のEx_xO₂(過剰酸素濃度)に著しく影響を受け、Ex_xO₂が小さい程、SO₃の発生量も少なくなる⁷⁾。実機の例を図-9に示す。SO₃の発生は排ガス温度が低い程多くなり、煙道での灰の触媒作用によっても増大する。

(2) SO_x対策

S分に関する問題としては排ガス中のSO_xによる機器の腐食がある。排ガス中のSO_xを処理する脱硫装置は既成技術であることと燃焼による制御には関与しないのでここでは省略する。また、腐食についても対策手法はほぼ完成されているのでここでは燃焼法と腐食に関係する事項、すなわち、低酸素燃焼の腐食抑制効果を中心に説明する。Sによる腐食には、SO₃から生じた硫酸による低温腐食とNa, V, S分の溶融塩状の燃焼灰による高温腐食がある。

いずれの腐食に対しても低O₂燃焼の効果が大きい。図-11は低温腐食に関するもので空気予熱器低温端バスケットの腐食率のEx_xO₂による変化を示しており、Ex_xO₂が1.5~2.0%になると腐食率が急激に低くなっている様子がわかる⁷⁾。

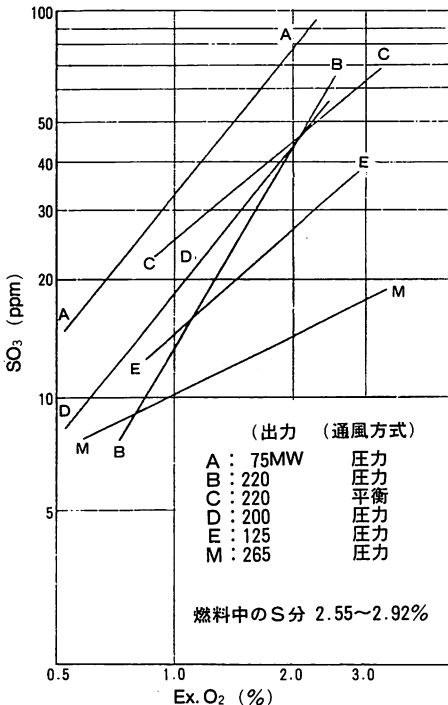


図-9 排ガス中のSO₃量と過剰酸素(Ex_xO₂)の関係

図-11は高温腐食に関するもので燃料灰の付着量とこの灰中のV化合物の組成のEx_xO₂による変化を示している⁷⁾。Ex_xO₂約0.8%近傍で急変しており、このEx_xO₂以下ではV₂O₅・V₂O₄が多く燃料灰の機器への付着量も少なく、腐食は軽減できるが、Ex_xO₂1%以上では前記V化合物が酸化して低融点のV₂O₅となり、燃焼灰の付着量が増加して腐食も進むことになる。

Ex_xO₂1%以上では前記V化合物が酸化して低融点のV₂O₅となり、燃焼灰の付着量が増加して腐食も進むことになる。

4.3 ばいじんの発生と対策

(1) ばいじんの発生特性

重油からのばいじんには揮発分がガス化して未燃として残った場合に生ずるスート(すす)と揮

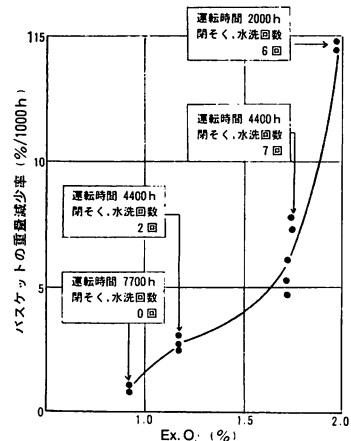


図-10 空気予熱器低温端バスケットの腐食量と過剰酸素(Ex_xO₂)の関係

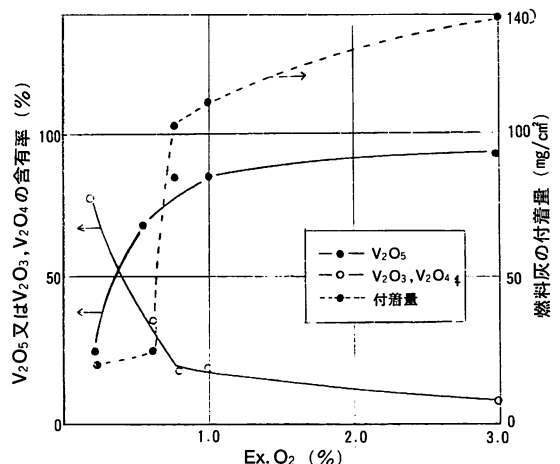


図-11 バナジウム酸化物の形態及び燃料灰の付着量と過剰酸素(Ex_xO₂)の関係

発分が抜けたあとに残る炭素質のセノスファと燃料中の灰分の三種に分けることができる。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みえる。これに対しセノスファは数10~200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云われている。⁸⁾

セノスファは油燃料中の残留炭素量に比例して増えるが、バーナの噴霧油滴を微粒化することによって油滴の燃焼完結を早めて低減させることができる。図-12は同一形成の実ボイラのばいじん実績データを燃料中の残留炭素分によって整理したもので図中のザウテル平均粒径は推算値であるが、先述の傾向をみることができる。

(2) ばいじん対策

ばいじんの低減を図るためにはセノスファを減すことが有効で、このためには噴霧で微粒化し、燃焼用空気を均一に混合させることが重要である。

このほか、重油中に水を添加して混合し、油滴中

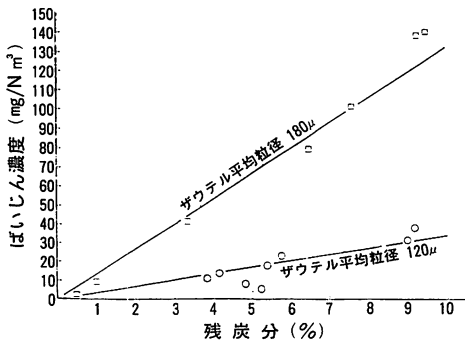


図-12 残炭分および噴霧径によるばいじん濃度の変化

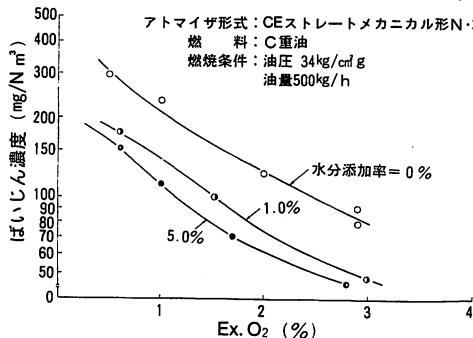


図-13 ばいじん濃度と過剰酸素 (O₂) の関係と水添加によるばいじんの低減

に数ミクロンの水滴として混在させ、燃焼時に水滴の突沸によって、油滴を分裂させて燃焼速度を早めてばいじんを低減させる方法がある。同様に油と水をエマルジョン燃料とすることも有効である。

また、空気過剰率を高くしてEx. O₂を上げることによってばいじんを低減できることは云うまでもない。

図-13にEx. O₂とばいじん濃度の関係と水添加によるばいじんの低減効果を試験炉試験の結果より示した。

5 あとがき

重油が重質化した場合の燃焼上の問題点と諸特性を一般の重油燃料と比較しながら述べて来た。これらを総合すると次のように結論づけることができる。

- 1) アスファルトクラスまでの重質油であれば噴霧によるバーナ燃焼が可能である。
- 2) 重質油燃焼では燃料中のN分, S分, 残留炭素分, バナジウム分, ナトリウム分, 灰分が増えるため, 腐食, NO_x, ばいじん, SO_x, いずれも増加する傾向にあり, その対策に留意する必要がある。
- 3) 腐食, NO_x対策として低O₂燃焼が不可欠と思われる。
- 4) 低O₂燃焼となった場合, ばいじんが急増する恐れがあり, 対策を必要とする。

ここでは噴霧燃焼が可能な場合の重質油について述べたが、さらに分解残渣即ちオイル・コークの燃焼についても既に研究が進められており、実用化の見通しが得られつつある。

参考文献

- 1) 立石ほか, 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, ('80-11)
- 2) 高橋ほか, 低ばいじんPMバーナの開発, 三菱重工技報 Vol. 17, No 2, ('80-3)
- 3) 坂井, 各種燃料の燃焼と炉内伝熱, 機械学会, 関西支部懇話会 ('79-9)
- 4) 高橋ほか, 油だき低 NO_xバーナの研究, 機論, No780-6 ('78-4)
- 5) 高橋ほか, 三菱M A C T 灯内脱硝法の基礎研究, 三菱重工技報, Vol 17, No 6, ('80-11)
- 6) 高橋ほか, 三菱M A C T 炉内脱硝法の実用化研究, 三菱重工技報, Vol. 17, No 6, ('80-11)
- 7) 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, ('80-11)
- 8) 佐賀井, ばいじんの発生機構, 燃料協会誌, Vol. 48, No 508 ('69)