

“すす”を連続除去して燃費を改善する技術

1. マフラー（DPF）の役割と課題

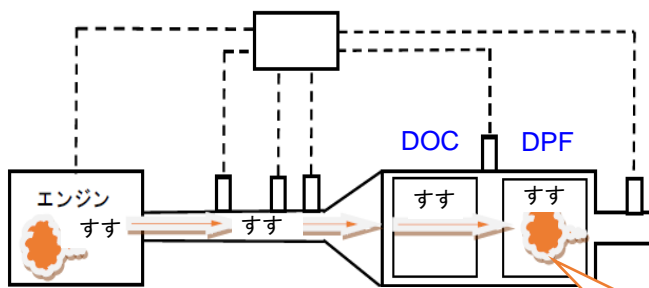


図1 排気管に設置されたDPFの役割と課題

図1に、エンジンの排気系統に設置されたDPF（ディーゼル微粒子捕集フィルター）の役割と課題を示す。

エンジンにおける燃料の燃焼によって“すす”（黒煙）が生成される。“すす”は規制によりDPFにおいて捕集する必要があるが、捕集した状態を放置するとDPFに堆積してエンジン性能が低下するため、定期的に堆積した“すす”を除去する必要がある。

すす（黒煙）が詰まると燃費が悪化

2. DPFの詰まりによる燃費の悪化

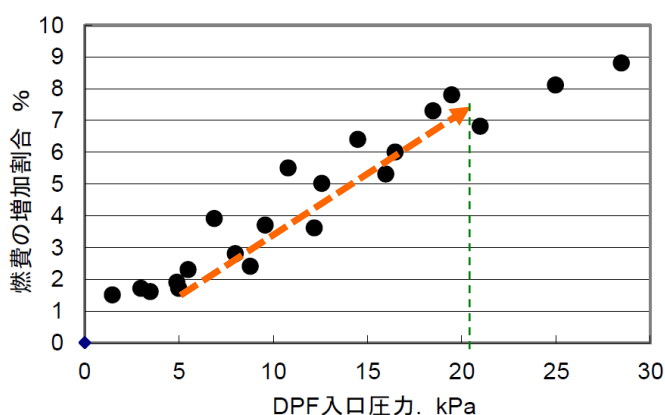


図2 排気管内圧力の増加による燃費の悪化

—出典：自動車技術会 2022 年春季学術講演会 講演予稿, No.075)

図2に、DPFが詰まると排気管内圧力が上昇すると燃費が悪化することを示す。この図において、排気管内圧力が約20kPaになると燃費が約8%悪化している。これは、

- (1) DPFに“すす”が堆積すると排ガスの流路が狭められるため排ガスの流量が減少
- (2) 排ガスの流量が減少すると、過給機の性能が低下して燃焼に必要な空気量が不足
- (3) 燃焼に必要な空気量が不足すると、燃焼室内において不完全燃焼が発生し、燃費が悪化するとともに、“すす”の生成量も増加
- (4) これを繰り返すことにより、DPFの詰まりが加速度的に増加して燃費も悪化するためと考えられる。

3. DPFの性能を維持する方法（これまでの技術）

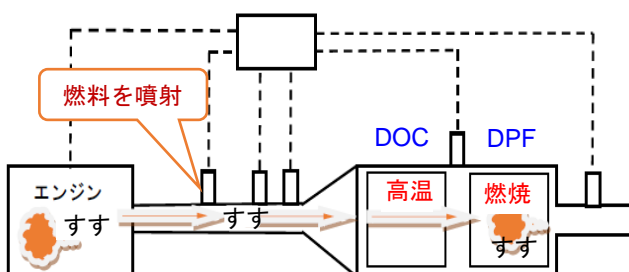


図3 ポスト噴射技術

DPFに“すす”が堆積して排気の流れが悪化し、エンジン性能が低下して、燃費が悪化するのを防止するための技術を大別すると、

- (1) 燃料に添加剤を混合することにより、“すす”を低減する技術
- (2) 図3に示すように、排気に燃料を噴射して（ポスト噴射）、高温の燃焼ガスを生成して“すす”を燃焼して除去する技術
- (3) DPFを取り外して整備工場で洗浄し、再び設置する方法がある。

4. これまでの技術の課題（問題点）

- (1) 燃料添加剤は、燃料の着火性改善、燃焼改善、燃料系の洗浄などに効果を発揮するものがほとんどで、“すす”を低減する効果があるとする添加剤も、その具体的な低減効果とその理由は示されていない。
- (2) “ポスト噴射技術”は、余分な燃料を必要とする（燃費の悪化）とともに、高温ガスにの温度管理に不具合があると、DPFの溶損や触媒の高温劣化が起こる可能性がある。
- (3) DPFを取り外して整備工場で洗浄し、再び設置するという方法を用いた場合、DPFの取り外し、工場への搬送、DPFの洗浄、工場からの搬送、DPFの設置というコスト（日数と費用）が発生するばかりではなく、その間、替りのDPFを設置するか、業務を停止する必要がある。

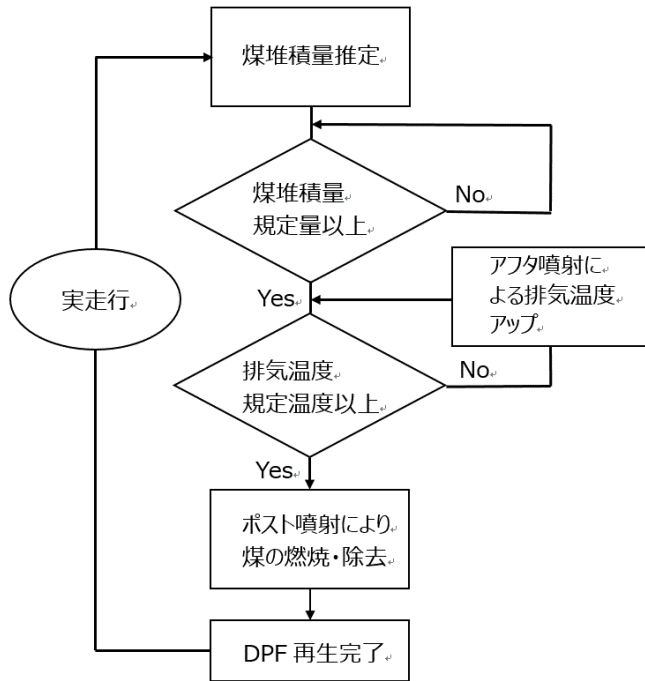


図 4 DPF 強制再生システムの基本制御

—出典：鈴木孝幸編『増補二訂版ディーゼルエンジンの徹底研究』グランプリ出版—

図 4 に、DPF 強制再生システムの基本制御を示す。DPF に捕集した煤堆積量の推定を行い、捕集した煤量が規定量以上に達すると強制再生を行う。この時、排気温度が規定値（酸化触媒の活性温度）以下の場合には、アフタ噴射により排気温度を上昇させ、排気温度が規定値以上になったらポスト噴射を行い、未燃燃料を排気管に送り込み、酸化触媒で酸化させ DPF に流れる排気温度を高めて DPF を強制再生する。排気温度が規定値以上の場合、ポスト噴射だけで DPF を強制再生する。強制再生時の DPF 入口温度は、煤の燃焼が可能でかつ DPF の溶損や触媒の高温劣化を防ぐため一般的には 600℃前後に温度をコントロールする必要がある。本システムでは、排気温度センサにより排気温度を確認しながら、排気温度を最適に保つようにポスト噴射量をコントロールしている。

4. 新たに開発された燃料添加剤の機能

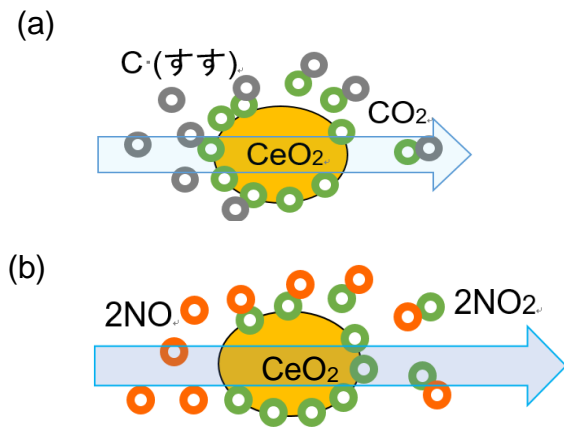


図 5 セリウム系触媒の機能

図 5 (a) に燃焼室における燃料添加剤 FCR58 による“すす”の低減作用を示す。セリウム系添加剤に含まれる CeO_2 （酸化セリウム）は高酸素濃度の領域において酸素を吸蔵し、“すす”が生成される酸素不足の領域でこれを“すす”に供給することにより“すす”の生成を抑制する。

図 5 (b) に、“すす”の酸化を促進して除去する機能を有する NO_2 の生成モデルを示す。図において、
 (1) CeO_2 （酸化セリウム）が O_2 （酸素）を吸蔵
 (2) 触媒の活性温度(機能を発揮できる温度)以上の条件下で、 NO （一酸化窒素）が O_2 を吸蔵した CeO_2 に衝突又はこれに近い状態で接触させることにより、 NO_2 （二酸化窒素）を生成
 (3) NO_2 が燃焼室、排気系統、及び DPF において C （すす）の酸化を促進して除去

- 触媒
- 触媒の活性化温度以上の沸点を持つ成分

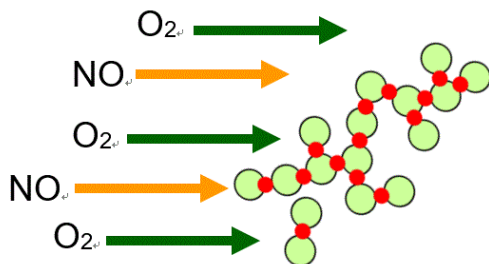


図 6 燃料添加剤 FCR58 に含まれる触媒の構造と機能を示すモデル図

図 6 に、燃料添加剤 FCR58 の機能を示すモデルを示す。FCR58 は、触媒と触媒を溶解する溶剤から構成されており、触媒の粒径は 10nm 以下である。このため、分離した状態（単独）では燃焼ガスや排ガスの流れとともに流動するため、 O_2 や NO との衝突やこれに近い接触を行うことによって触媒としての機能を果たすことは困難である。

FCR58 の溶剤中には高沸点成分が含まれており、この成分が触媒の活性温度以上において触媒粒子を互いに結合させる接着剤的な役割をして、触媒にブドウの房状や鎖状と形容される結合体を形成させることにより、 O_2 や NO が衝突しやすくしている。

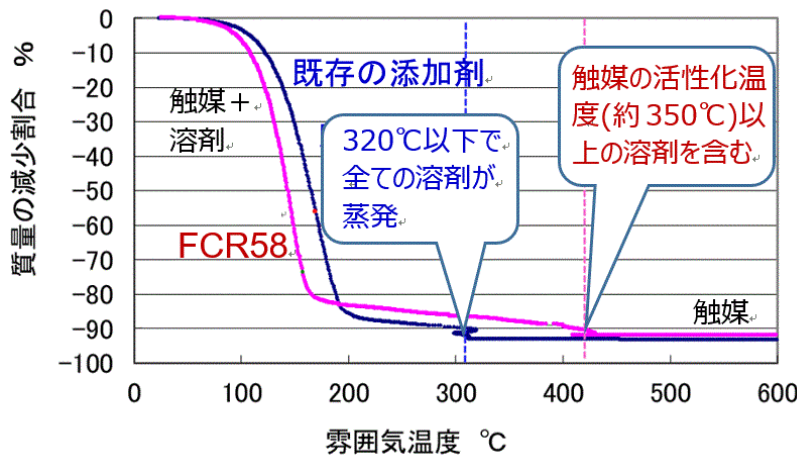


図7 燃料添加剤 FCR58 の留点分布

図7に、燃料添加剤 FCR58 の留点分布を示す。触媒の活性化温度である約 350℃以上の領域において、FCR 58 に含まれるそれよりも高沸点の溶剤が接着剤の役割をして、粒径が 10nm 以下の触媒をブドウの房状や鎖状と形容される結合体にして、容積と質量を増大させることにより、燃焼ガスや排ガス中に含まれる O₂ や NO と衝突またはこれに近い状態で接触できるようにする。これにより、触媒としての機能が向上し、NO₂ の生成が促進される。

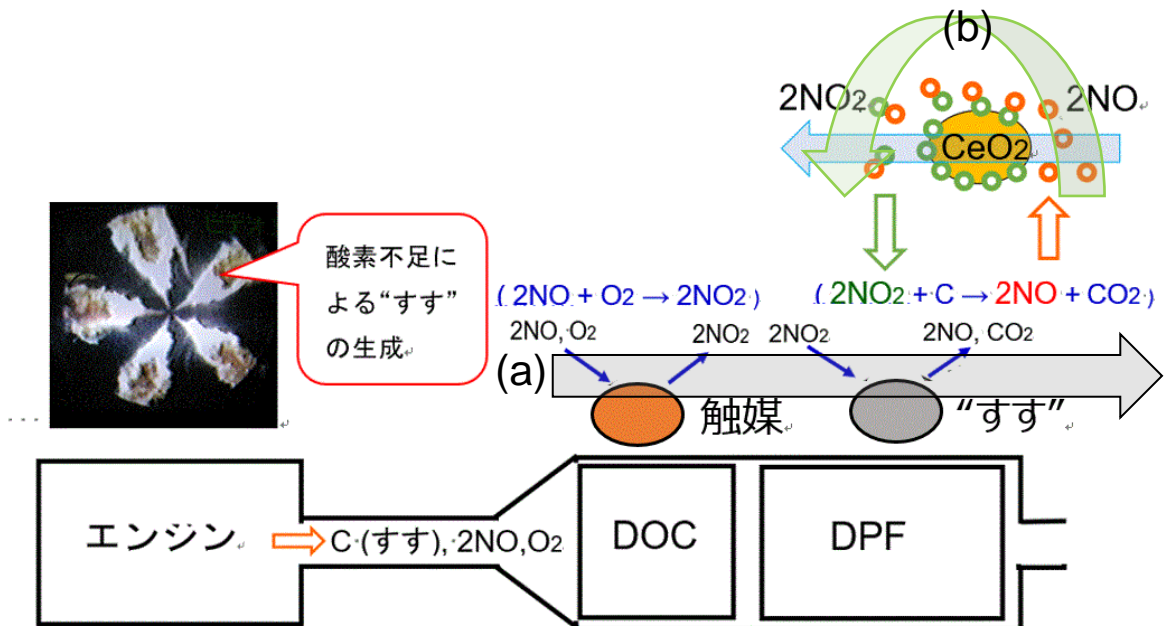


図8 燃料添加剤 FCR58 に含まれる触媒が DPF において“すす”を繰り返し除去するモデル図

図8に、燃料添加剤 FCR58 に含まれる触媒が DPF において“すす”を繰り返し除去するモデル図を示す。図に示すエンジンにおいて燃料が燃焼する際、主に酸素不足により“すす”が生成される。生成された“すす”は燃焼室内の温度が約 600℃以上において酸素と化合すると CO₂ (二酸化炭素) になるが (燃焼による“すす”の除去)、燃焼室の温度がそれ以下の領域や、燃焼に必要な酸素が十分に供給されなかった場合は“すす”の状態、排ガス中に含まれる O₂ (酸素)、NO (一酸化窒素) とともに、排気管を経て DOC (酸化触媒) に至る。

DOC に至った NO と O₂ は、図8(a)に示すように、DOC に担持された触媒の働きにより NO₂ となり (2NO+O₂→2NO₂)、DPF に堆積した“すす”を酸化により除去 (2NO₂+C→2NO+CO₂) した後、DPF から排出される。

通常、NO₂ は、DPF に堆積した“すす”を酸化により除去 (2NO₂+C→2NO+CO₂) した後、NO となった状態で DPF から排出されるが、図8(b)に示すように、燃料中に燃料添加剤 FCR58 を混合した場合、図6に示すように、排ガス中に含まれる「ブドウの房状や鎖状と形容される結合体となって O₂ や NO が衝突しやすい状態になった CeO₂ (酸化セリウム) 」の働きにより、NO は DPF 内部において NO₂ になり、“すす”を酸化して除去し NO となるが、再び排ガス中に含まれる CeO₂ の働きにより NO₂ が生成される。この反応を繰り返すことにより、DPF に堆積した“すす”は連続して酸化により除去される。

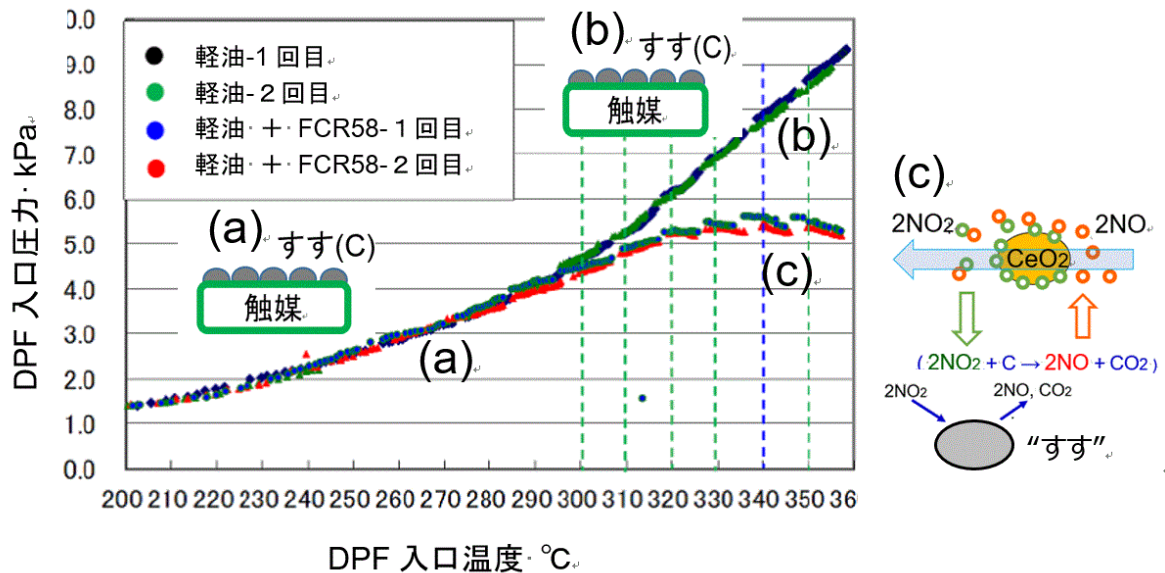


図9 燃料添加剤 FCR58 によるDPFに堆積する“すす”の低減効果
 —出典：自動車技術会 2023 年春季学術講演会講演予稿, No.005)

図9に、燃料添加剤 FCR58 によるDPFに堆積する“すす”の低減効果を示す。
 図において、

- (a) DPF 入口温度（排ガス温度）が触媒の活性化温度以下の状態では、図5に示すような、「触媒の作用により排ガス中に含まれる O₂ と NO から NO₂ を生成」という機能を行うことができないため、図9(a)に示すように、DPF 入口圧力は上昇を続け、“すす”が DPF に担持された触媒の表面に堆積し続ける。このような状態が続くと、遂には、“すす”が触媒の表面を覆ってしまう
- (b) “すす”が触媒の表面を覆ってしまうと、DPF 入口温度が触媒の活性化温度以上になっても、排ガス中に含まれる O₂ と NO が触媒と接触することができなくなるため、触媒の機能が発揮できなくなる。
 ⇒ ポスト噴射により DPF に堆積した“すす”を燃焼させて除去する必要がある。
- (c) これに対し、燃料に FCR58 を混合することにより、DPF 入口が触媒の活性化温度以上になると、燃焼室、排気系統、DPF において“すす”は繰り返し酸化されて除去されるため、DPF 圧力は上昇しなくなるとともに、下降に転じる（DPF に堆積した“すす”が連続除去される状態になる）。

図10に、燃料添加剤 FCR58 によりDPFに堆積した“すす”を酸化して除去する機能を示す。
 図に示すように、DPF に“すす”が堆積して触媒の表面を覆った状態でも、燃料に FCR58 を混合することにより DPF に堆積した“すす”を連続して酸化し除去することができる。

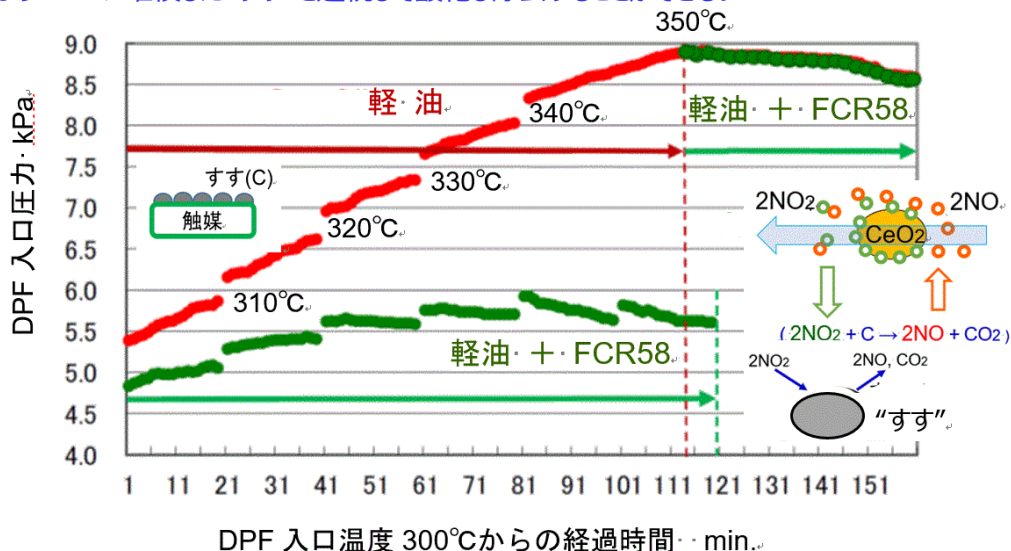


図10 燃料添加剤 FCR58 によりDPFに堆積した“すす”を酸化して除去する機能
 —出典：自動車技術会 2021 年秋季学術講演会講演予稿, No.018)

5. 「すす」を連続除去して燃費を改善する技術」の概要と燃費改善効果

5.1 「すす」を連続除去して燃費を改善する技術」の概要

図 11 に新技術のコンセプトである「すす」を連続除去して燃費を改善する技術」の概要を示す。

これまで、DPF に「すす」が堆積して燃費が悪化した後に「ポスト噴射」により「すす」を約 600℃の高温で燃焼させて除去していたが、本技術を用いることにより触媒の働きにより「すす」の酸化を促進する NO₂（二酸化窒素）を繰り返し生成し、約 350℃という比較的低温で連続して「すす」を酸化して除去することが可能となる。

図 12 に、燃焼室における「すす」の低減効果を示す。本技術は、燃焼ガス及び排ガス中に多量に存在する O₂（酸素）と NO（一酸化窒素）から「すす」の酸化を促進する NO₂ を生成して「すす」を除去する技術であるため、燃焼室、排気系統及び、DPF において「すす」を酸化により連続して除去することが可能である。

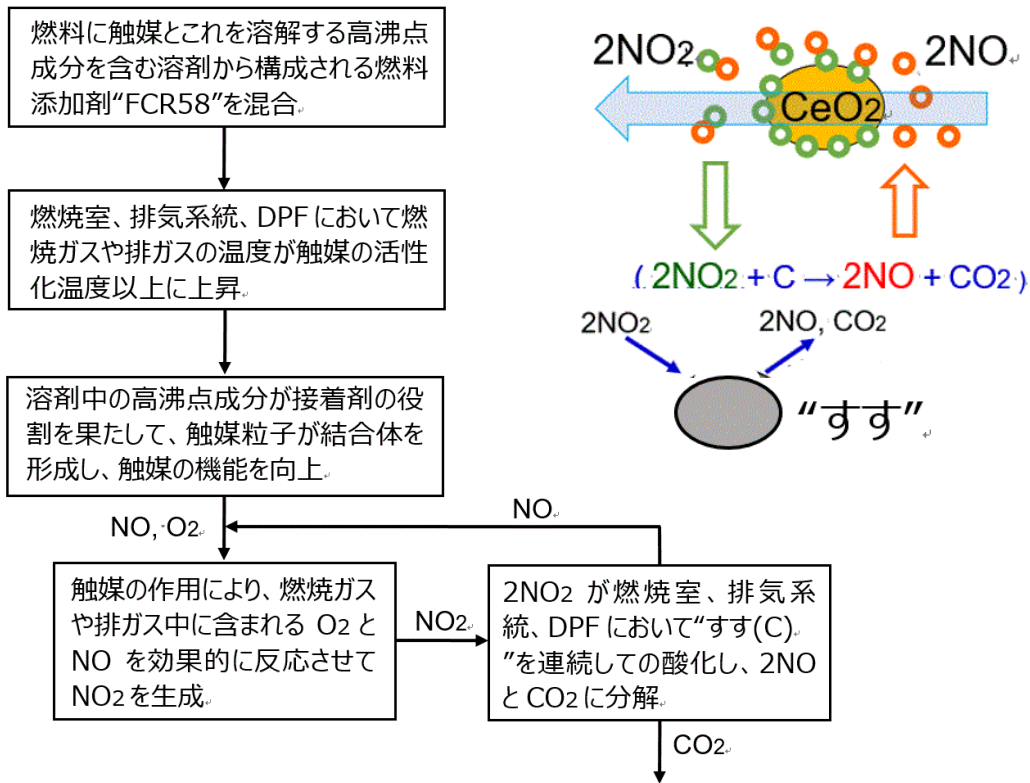


図 11 「すす」を連続除去して燃費を改善する技術」の概要

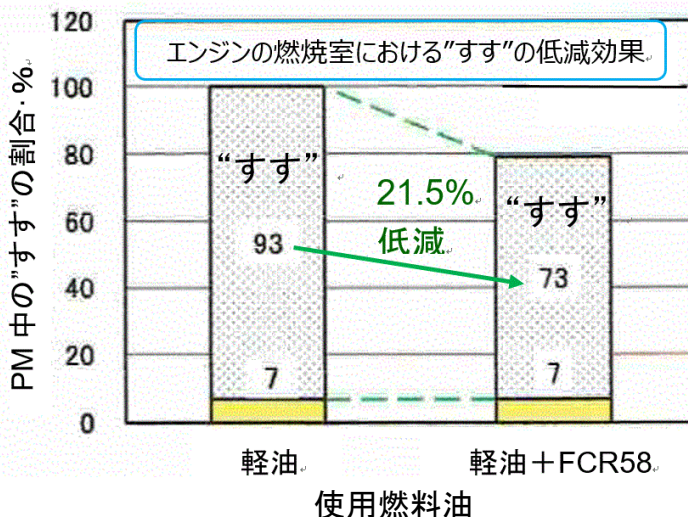


図 12 「すす」を連続除去して燃費を改善する技術」の燃焼室における「すす」の低減効果
—出典：日本マリンエンジニアリング学会 令和 3 年学術講演会 講演論文集

5.2 「“すす”を連続除去して燃費を改善する技術」の燃費改善効果

図 13 に、燃料添加剤 FCR58 を燃料に混合した場合の燃費改善効果を明らかにするために実施した「実車試験」に用いた車両の写真を示し、表 1 に、実験の詳細を述す。また、図 14 に、実験結果を示す。

表 1 と図 14 において

(1) “添加剤無”及び、“軽油のみ”は、DPF に堆積した“すす”を“ポスト噴射”のみを用いて約 600℃の高温により燃焼させて除去した場合を示し、

(2) “添加剤有”及び、“軽油 + FCR58”は、DPF に堆積した“すす”を「“ポスト噴射”に加え、燃料に“FCR58”を混合することにより、DPF に堆積した“すす”を触媒の活性化温度である約 350℃の比較的低温状態で、酸化により除去した場合を示す。

これらの結果から、燃料添加剤 FCR58 を燃料に混合して燃焼室、排気系統、DPF において触媒の作用により“すす”を連続して酸化除去することにより、本実験範囲においては、燃費を 7%改善することが可能である。



図 13 実車試験に用いた車両

【最大積載量 15ton, 最高出力 279kW のトラックを用いた実証試験】

1. 試験実施日：令和 3 年 12 月 1 日～令和 4 年 4 月 14 日
2. 試験場所：福岡県北九州市から、福岡県田川市及び長崎県諫早市を定期的に往復
3. 目的：ダンプカーと同クラスのトラックを用いて、燃料添加剤の燃費改善効果を実証する。
4. 試験方法：約 5000km 毎に燃料への添加剤混合の有無を繰り返し、燃費(km/L)を計測
5. 試験結果：平均で約 7%の燃費改善効果を確認

表 1 実車試験の詳細

試験期間	添加剤の有無	走行距離 (km)	消費燃料 (L)	燃費 (km/L)	燃費改善率 (%)
2021-12/1-28	無	5788	2142	2.70	—
2022-1/5-28	有	4825	1677	2.88	6.7
2022-2/17-3/8	無	3459	1268	2.73	—
2022-3/9-4/14	有	7723	2659	2.91	7.8

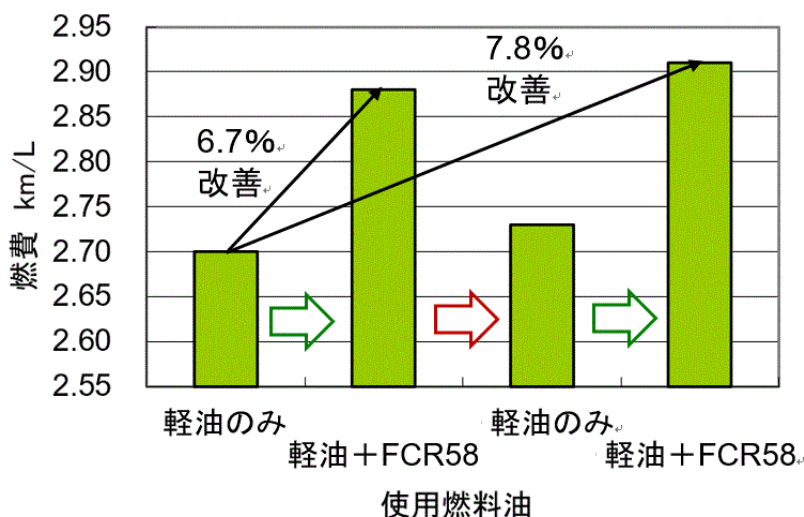


図 14 「“すす”を連続除去して燃費を改善する技術」の燃費改善効果
—出典：自動車技術会 2023 年春季学術講演会講演予稿, No.005)