

## 技術論文

## Tier4 Final規制対応φ170エンジンの開発

## Development of φ170 Engines Conforming to Tier4 Final Emmissions Regulations

原 一 生  
Issei Hara  
折 田 哲 生  
Tetsuo Orita

2014年1月及び、2015年1月より施行されている Tier4 Final 排出ガス規制では、窒素酸化物 (NOx)、粒子状浮遊物 (PM) の排出量を従来規制値から大幅に低減させる必要があった。従来機に対して同等以上の性能・信頼性・耐久性を確保しつつ、さらに厳しくなった排出ガス規制を満足するために、Tier4 Final 排出ガス規制対応技術を織込んだ 23L クラスのエンジンを開発・商品化したので報告する。

To conform to the Tier 4 Final emissions regulations, which has been enforced since January 2014 and January 2015, it became necessary to significantly reduce the amount of nitrogen oxides (NOx) and particle matter (PM) than the former regulations. To meet the more restrictive emissions regulations while maintaining the performance, reliability, and durability of the engine equivalent to or even better than the existing products, we have developed and succeeded in productizing a new series of 23L class engines, featuring Tier 4 Final overcoming technologies.

Key Words: 建設機械, ディーゼルエンジン, 排ガス規制, Tier4 Final, 後処理装置

## 1. はじめに

ディーゼルエンジンは、信頼性・耐久性の高さと、小型から大型まで幅広い出力レンジを得られて熱効率が良いことから、産業界において動力源として広く使用されているが、排出ガス中の窒素酸化物 (以下 NOx と記す) や粒子状浮遊物 (以下 PM と記す) による環境や生体に及ぼす影響も指摘されている。その中において、建設機械用ディーゼルエンジンについても、1996 年以降、排出ガス規制が世界各国において強化されてきた。特に日本・米国・欧州の 3 極を中心とした排出ガス規制レベルが、排出ガス規制を牽引している。

130kW-560kW の出力レンジでは、2014 年 1 月より施行の米国の EPA Tier4 Final 排出ガス規制、欧州 EU による Stage IV、および 2014 年 10 月より施行の日本国内の建機指定制度・オフロード排出ガス規制、560kW 以上の出力レンジでは、2015 年 1 月より施行の米国の EPA Tier4 Final 排出ガス規制 (下線部分を以下「Tier4 Final 排出ガス規制」と記す) に適合するために、先行開発機種 (φ125, φ140 エンジン) にて採用した Tier4 Final 排出ガス規制対応技術を、φ170 エンジン (23L) に適用し開発・商品化を果たした。本稿では、Tier4 Final 排出ガス規制に対応した φ170 エンジン (23L) の概要と、その技術的特長について紹介する。

## 2. 建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガス規制動向

建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガス規制は、2014 年より Tier4 Final 排出ガス規制が導入され、新しい段階を迎えている。図 1 に現時点における、日本、米国、欧州における排出ガス規制動向を年次毎にまとめたものを掲げる。

		NOx / PM, *NOx+NMHC / PM, **NOx+HC / PM (g/kWh)													
		kW	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
日本	19...<37		8.0/0.80										6.0/0.4		4.0/0.03
	37...<66												4.0/0.3		4.0/0.025
	66...<75				7.0/0.40								4.0/0.25		3.3/0.02
	75...<130												6.0/0.30		3.3/0.02
米国	130...<560												6.0/0.25		0.4/0.02
	<19		8.5/0.4		7.5/0.8								7.5/0.4		
	19...<37				7.5/0.6								7.5/0.3		4.7/0.03
	37...<66												4.7/0.3		
欧州	66...<75				7.5/0.4								4.7/0.4		3.4/0.02
	75...<130				6.0/0.3								4.0/0.3		0.4/0.02
	130...<560				6.4/0.2								4.0/0.2		2.9/0.02
	>560				5.2/0.54								6.4/0.2		3.9/0.1
EU	19...<37				8.0/0.8								7.5/0.6		
	37...<66												7.0/0.4		4.7/0.025
	66...<75				7.0/0.4								4.7/0.4		
	75...<130				6.0/0.3								4.0/0.3		3.3/0.025
Tier	130...<560				6.0/0.2								4.0/0.2		0.4/0.025
													2.9/0.025		

図1 日本・米国・欧州における排出ガス規制値

図2は米国EPA規制(130kW-560kW)を代表例に、これまでのTier1→Tier2→Tier3→Tier4規制の動きを、NOxとPMの排出ガス規制値を軸に、推移として示したものである。マクロ的に、各規制段階は5年毎に厳しくなっており、NOxとPMといった主たる規制値は、約30%レベルずつの低減が要求されている。

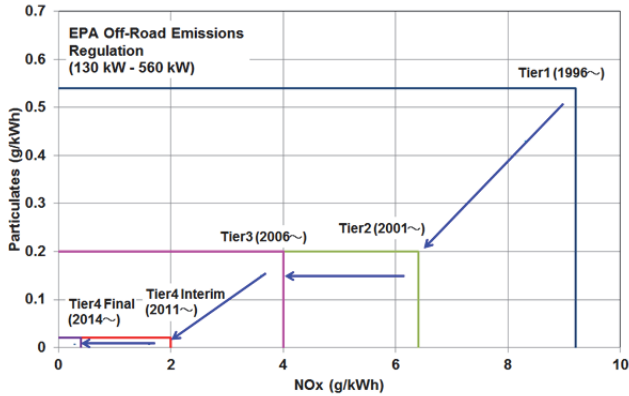


図2 米国EPA排出ガス規制値(130kW-560kW)

Tier4 Final 排出ガス規制において、130kW~560kW の出力カテゴリでは、米国、欧州、日本の排ガス規制に適合する必要があるため、Tier3 規制値に対して、NOx を 1/10 に、PM は 1/10 に低減させることが求められている。一方、560kW 以上の出力カテゴリでは、現時点、日本、欧州に規制はなく、米国の排出ガス規制に適合する必要があるため、Tier2 に対し、NOx を 1/2 に、PM は 1/5 にまで低減させることが求められている。

両カテゴリともに、NOx, PM の規制値が非常に厳しく、後処理装置の採用が必須となっている。

また、建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガス測定モードは、来から ISO08178 の C1 モードと呼ばれる定常 8 モードでの測定モードが採用されてきた。

130kW-560kW の出力カテゴリにおいては、2011 年の新規規制より、ノンロードトランジェントサイクルと呼ばれる過渡状態での測定モードが追加され、両者のモードでの測定結果をそれぞれ規制値に適合させる必要がある。

図3に建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガスの測定方法について示す。一方、560kW 以上の出力カテゴリにおいては、従来通り、定常 8 モードでの排出ガス測定モードのみとなっている。

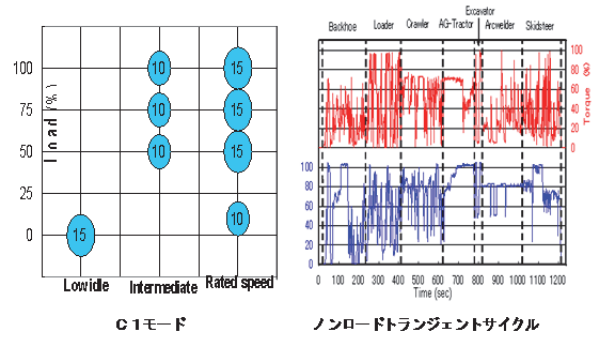


図3 建設機械用エンジン排出ガス測定方法(130kW-560kW)

Tier4 Final 排出ガス規制においては、特にノンロードトランジェントサイクルの測定モードで規制値に適合させるために、PM, NOx 後処理装置の高精度な制御が必要となってきた。

### 3. Tier4 Final φ170エンジンシリーズの概要

#### (1) φ170 エンジン (23L) の概要

前述した様に 130kW-560kW の出力レンジは 2014 年 1 月から米国・欧州、同年 10 月から日本の 3 極において、また、560kW 以上は 2015 年 1 月から米国において Tier4 Final 排出ガス規制が施行されている。この規制の施行にあわせて開発した Tier4 Final 排出ガス規制に適合するエンジンシリーズの中から、今回は、φ170 エンジン (23L) のエンジンを紹介する。

図4にφ170 エンジンシリーズの排気量と出力レンジを示す。また、図5に、このエンジンを搭載する建設機械アプリケーションの代表例を示す。

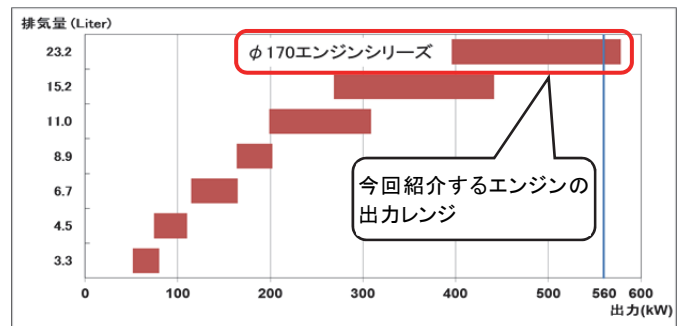


図4 エンジンシリーズの排気量と出力



図5 建設機械アプリケーションの代表例

- (2) Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンの開発の狙い
  - (a) 日本・米国・欧州 3極の Tier4 Final 排出ガス規制に適合
  - (b) 尿素水消費量を考慮した燃料消費量で従来機と同等以下を狙う (130kW-560kW の出力レンジ)
  - (c) ベースエンジンの変更は最小限に留めて、コンポーネントは他のコマツ Tier4 Final 対応エンジンの技術を採用
  - (d) 建設機械用エンジンとしての過酷な環境や使われ方での信頼性・耐久性の確保

表1 にこれまでの排出ガス規制と織込み技術の変遷を示す。表2 に今回の開発の狙いを達成するための主要織り込み技術について示す。

表1 排出ガス規制と織込み技術の変遷

排出ガス規制	対応技術
Tier2対応	①空冷アフタークーラ + ②高圧噴射 (ユニットインジェクタ)
Tier3対応	①空冷アフタークーラ + ②' 高圧噴射 (160MPa対応) + ③Exhaust Gas Recirculation
Tier4 Final対応 (560kW以下)	①空冷アフタークーラ + ②' 高圧噴射 (200MPa対応) + ③' Exhaust Gas Recirculation + ④可変ターボ + ⑤Komatsu Diesel Particulate Filter + ⑥Selective Catalytic Reduction
Tier4 Final対応 (560kW超)	①空冷アフタークーラ + ②' 高圧噴射 (200MPa対応) + ③' Exhaust Gas Recirculation + ④可変ターボ + ⑤Komatsu Diesel Particulate Filter

表2 23Lクラスのエンジン主要織り込み技術

対応排出ガス規制		Tier3	Tier4 Final(560kW以下)	Tier4 Final(560kW超)
エンジンモデル	unit	SAA6D170E-5	SAA6D170E-7	SAA6D170E-7
気筒数	---	6		
ボア×ストローク	mm×mm	170×170		
排気量	Liter	23.15		
燃料噴射装置	---	コモンレールシステム	コモンレールシステム (2サブライポンプ)	
最高燃料噴射圧	MPa	160	200	
ターボチャージャ	---	固定	可変	
Exhaust Gas Recirculation	---	付き (多管式)	付き (フィン&チューブ)	
エンジンコントローラ	---	CM850	CM2350	
ブローバイガスの処理	---	大気解放	吸気還元	
後処理装置	---	無し	Komatsu Diesel Particulate Filter + Selective Catalytic Reduction	Komatsu Diesel Particulate Filter

φ170 エンジンでは、3年間という短期間で Tier3 排出ガス規制対応から一挙に Tier4 Final 排出ガス規制対応する開発となった。そのため Tier4 Final 排出ガス規制対応技術は実績のある他のコマツエンジンで採用している技術を採用した。

また、φ170 エンジン独自の2 サプライポンプ コモンレール式燃料噴射システムおよび2系統の後処理装置が大きな開発要素となり、大型の建設機械で使用されるエンジンであるため、従来機と同等以上の性能・信頼性・耐久性を確保するために、品質確認に多くの時間を費やした。

主な規制対応技術は、電子制御式高圧コモンレールシステムの高圧化、可変ターボチャージャの採用、Exhaust Gas Recirculation Valve (EGR Valve) 制御の高精度化、Exhaust Gas Recirculation Cooler (EGR Cooler) の大容量化、ブローバイガスを大気に放出せずに吸気に戻すブローバイガス吸気還元システム (Komatsu Closed Crankcase Ventilation: KCCV) の採用などである。

図6 に 560kW 以下の出力レンジのホイールローダ用、図7 に 560kW 以上の出力レンジのダンプトラック用 SAA6D170E-7 エンジンの外観形状を示す。

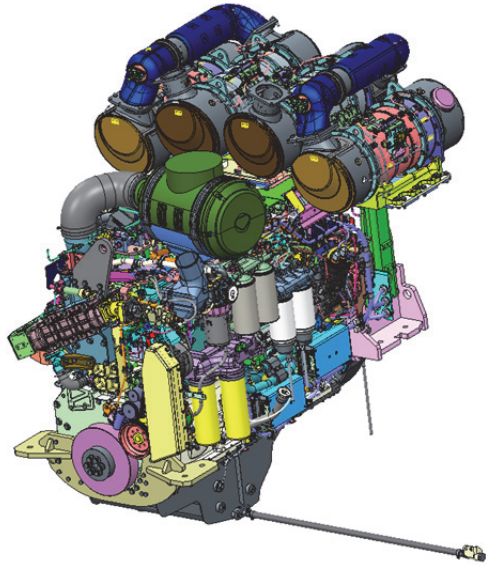


図6 Tier4 Final (560kW以下) 対応 SAA6D170E-7 エンジン

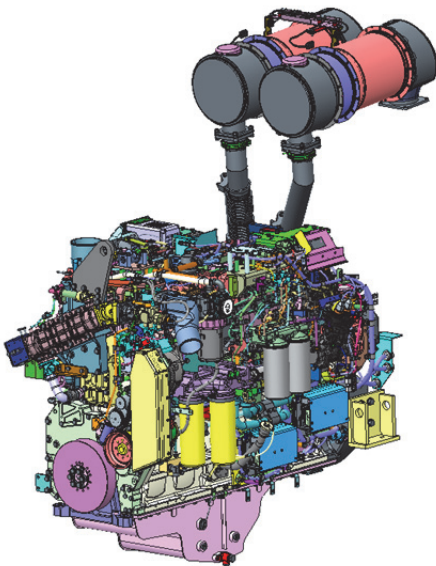


図7 Tier4 Final (560kW以上) 対応 SAA6D170E-7 エンジン

#### 4. Tier4 Final排出ガス規制対応エンジン技術

今回開発を行った $\phi 170$  エンジンで、日本・米国・欧州の最新排出ガス規制に適合させながら、前述した開発の狙いである従来機に対して同等以上の性能(出力・燃費)確保を実現するキーコンポーネントについて、以下に紹介する。

##### (1) 燃焼噴射系システム

前述の通り、 $\phi 170$  エンジン開発では、従来機に対し同等以上の出力・燃費性能を確保しながら、2段階厳しいTier4 Final 排ガス規制への適合を実現するために、更なる高EGR率化によるNOx低減策を織込んだ。最高噴射圧力200MPaの電子制御式コモンレールシステムを採用しTier3規制対応時より他のエンジン系列に先駆けて採用した新燃焼室形状(Two Stage Combustion Chamber: TSCC)と組み合わせて性能チューニングを実施した。

コモンレールシステムを高圧化する際に技術的なハードルとなったものが、サプライポンプの吐出能力である。 $\phi 170$ エンジンは1気筒あたりの排気量が多いことから、投入する噴射量も多く、噴射圧力を従来の160MPaから200MPaにアップすることによりサプライポンプの吐出能力の限界を超えるため、2台のポンプを搭載し吐出能力を確保した。図8に大型エンジンの1気筒あたりの噴射量比較を示す。

定格点の噴射量比率(11L vs 15L vs 23L)

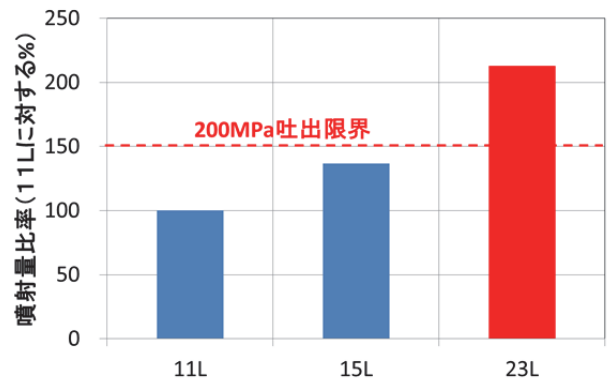


図8 1気筒あたりの燃料噴射量比較

この 2 サプライポンプ共通レールシステムは、連携した 2 台の Engine Control Unit (ECU) を用いて各サプライポンプを駆動することで安定した制御を実現している。各サプライポンプから吐出された燃料を 1 つの共通レールに集め、各気筒に配分することにより高噴射量、高噴射圧を実現している。こうした燃焼改善策により NOx・PM を低減したうえで、前述の定格出力によるエミッション規制値に応じた後処理装置を適用しエンジンシステムとして Tier4 Final エミッション規制を満足するエンジン性能を達成することができた。図 9 に 2 サプライポンプ共通レールシステム構成を示す。

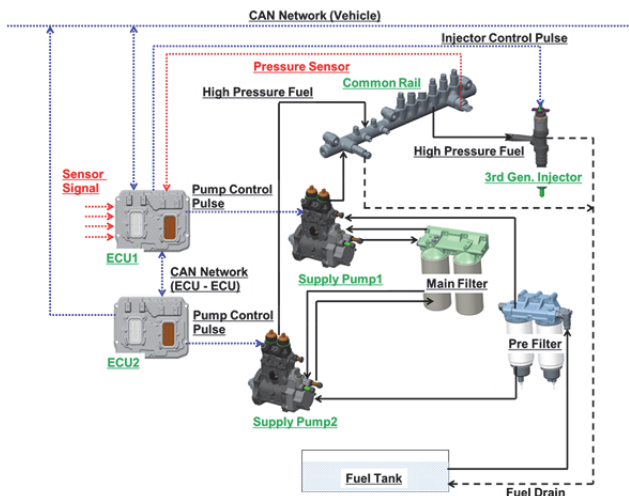


図 9 2 サプライポンプ共通レールシステム構成図

また、Selective Catalytic Reduction (SCR) システムを採用したアプリケーションにおいては、尿素水の消費量も燃費と同様にお客様のコストアップにつながることから燃料消費量と尿素消費量の合計が、現行機の燃料消費量に対して同等以下になるよう燃料消費率を低減したチューニングを実施した。図 10 にφ170 エンジンアプリケーションにおける現行機との定格点燃料消費率比較を示す。

φ170エンジン燃費比較[g/kWh]

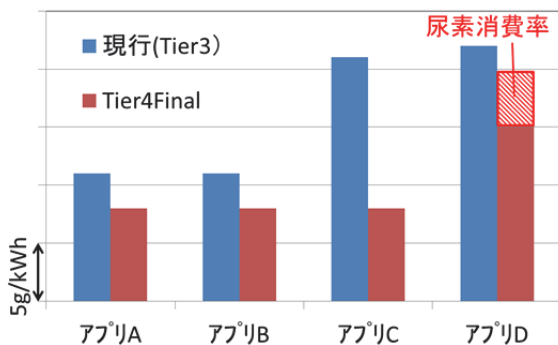


図 10 φ170 エンジン燃費比較 (現行 vs Tier4 Final)

(2) Exhaust Gas Recirculation Valve (EGR Valve)

EGR Valve は、他のコマツ製 Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンで採用されている油圧サーボ機構を追加した油圧駆動方式を採用した。図 11 にコンパクトで高精度、高信頼性 EGR Valve 外観形状を示す。

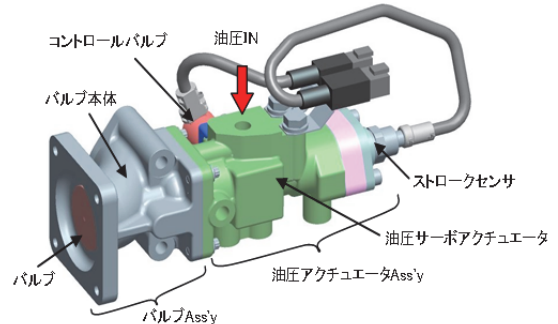


図 11 EGR Valve の外観形状

(3) Exhaust Gas Recirculation Cooler (EGR Cooler)

NOx の大幅低減のため大容量の EGR ガスの温度を十分に下げることが重要となる。このため、従来の多管式からフィン&チューブ式に変更し、EGR ガス流路である扁平チューブ内にフィンを設置する構造を採用した。

図 12 に Tier4 Final 排出ガス規制対応するために採用した大容量 EGR Cooler の外観形状及び構造を示す。

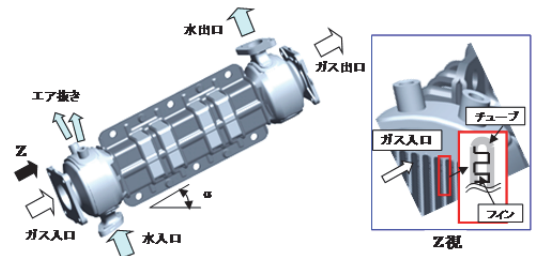


図 12 EGR Cooler の外観形状及び構造

#### (4) 可変ターボチャージャ

可変ターボチャージャは、他のコマツ製 Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンにて採用されている、ノズルをスライド方式によりスライドさせて通路幅を変化させる機構を採用し、排気量にマッチしたサイズの可変ターボチャージャを新規開発した。

また、駆動方式は前述の EGR Valve と同様に自社の技術である油圧駆動方式を採用した。

可変ターボチャージャを採用した事により、広い運転領域での EGR が可能となり、燃料消費率の低減、加速性に配分する事により、車両性能向上に大きく貢献した。

図 13 に可変ターボチャージャの構造を示す。

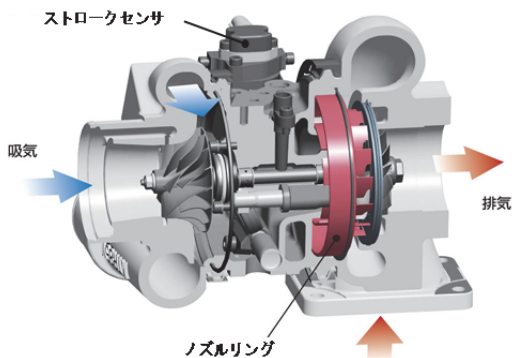


図 13 可変ターボチャージャの構造

#### (5) ブローバイ吸気還元システム

(Komatsu Closed Crankcase Ventilation: KCCV)

他のコマツ製 Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンにて採用されているブローバイガス吸気還元タイプを採用した。

KCCV フィルタは、建機の使われ方に耐える剛性の高いアルミ本体に、ターボ吸気負圧でクランクケースが減圧することを防止するための調圧弁と、フィルタ目詰まりを検出する圧力センサを備えた、高信頼性、かつコンパクトなデザインを採用している。図 14 に KCCV の外観形状を示す。

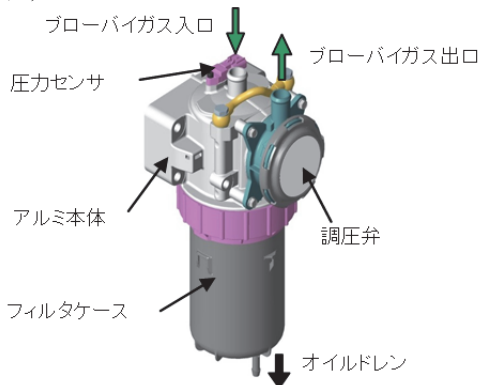


図 14 KCCVの外観形状

## 5. 後処理装置

Tier4 Final 排出ガス規制に対応するため、排気ガス中のすすを浄化するための Komatsu Diesel Particulate Filter (KDPF) と NOx を 1/10 以下に低減する尿素 Selective Catalytic Reduction システム (SCR) を出力に合わせて組み合わせて採用している。

φ170 エンジン用としての後処理装置は、φ125 エンジンやφ140 エンジンで開発した後処理装置との共通化を図りながら、図 6、7 の Tier4 Final 対応 SAA6D170E-7 エンジンにあるように 2 系統の後処理装置として搭載している。

2 系統の後処理装置は協調制御され、均等に排気ガスを浄化できるようになっており、また故障診断も個別に行い、モニタにて区別して状況を確認できるなど、信頼性向上やサービス性の向上を図っている。

#### (1) Komatsu Diesel Particulate Filter (KDPF)

図 15 に KDPF の内部構造を示す。

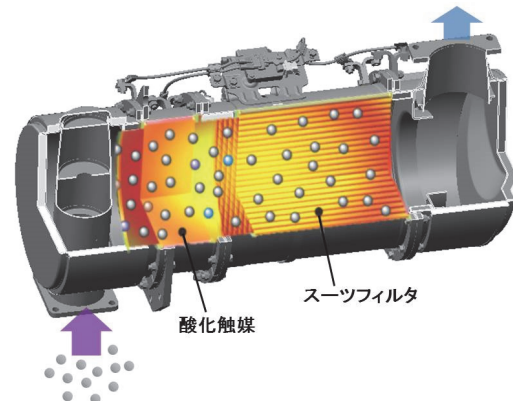


図 15 KDPF の構造

KDPF は、酸化触媒を触媒付スーツフィルタの前段に配置する連続再生式フィルタシステムであり、通常の運転時はすすを連続的に燃焼させることのできるシステムである。また、低温環境での作業や軽負荷作業などの際に、すすが溜まったことをコントローラで自動的に検出し強制的にフィルタを再生できる制御システムを搭載することで、様々な使われ方に対応するシステムとなっている。

- (2) 尿素 Selective Catalytic Reduction システム (SCR)  
 図 16 に尿素 SCR システムの搭載状況を示す。

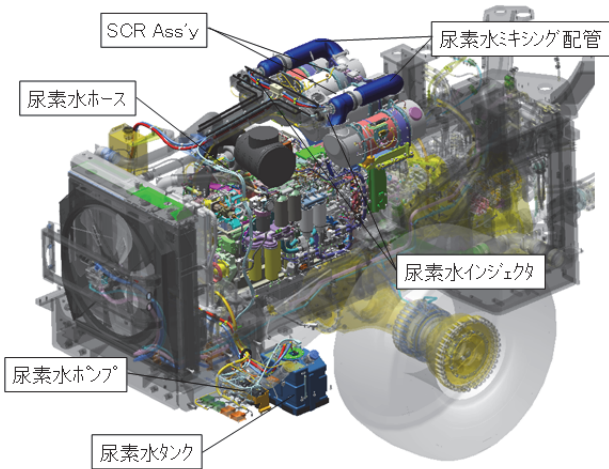


図 16 尿素 SCR システムの搭載

尿素水タンクから先の 尿素水ポンプや尿素水インジェクタは 2 系統のシステムとなっており、それぞれの尿素水インジェクタから噴射された尿素水は尿素水ミキシング配管を通じて、SCR 触媒を内蔵した SCR Ass'y に導かれる。

### (3) 尿素水供給システム

尿素水供給システムは、尿素水タンク、尿素水ポンプおよび、尿素水インジェクタから構成される。

尿素水ポンプで加圧された尿素水は尿素水インジェクタから排気ガス中に噴射される。尿素水はエンジンの稼働状態と SCR Ass'y の状態により、常に適切な噴射量に制御される。

また、尿素水は-11℃で凍結するため、低温環境下での稼働のために尿素水タンク、尿素水ポンプおよび尿素水ホースは、解凍と保温の機能を備えている。

### (4) 尿素水ミキシング配管

尿素水ミキシング配管では、排気ガス中に噴射された尿素水がアンモニアなどに分解され排気ガス中に均一に分散されるよう設計されている。

- (5) Selective Catalytic Reduction (SCR) Ass'y  
 図 17 に SCR Ass'y の内部構造を示す。

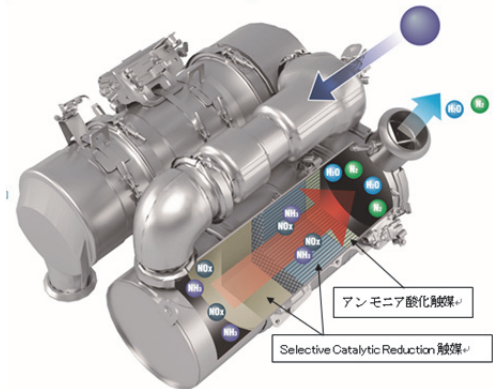


図 17 SCR Ass'y の内部構造

SCR Ass'y は、SCR 触媒と、その後流のアンモニア酸化触媒で構成されている。SCR 触媒では、排気ガス中の NOx は尿素水の分解で生成されたアンモニアと選択的に反応し、無害な窒素と水へ分解される。SCR Ass'y の状態は、搭載しているセンサにより車両稼働中常に監視されており、NOx 低減と SCR 反応で余ったアンモニアの排出防止を両立するよう最適に制御されている。

これらの後処理装置は、大きな衝撃が加わる建設機械の過酷な使用環境下においても、十分な信頼性・耐久性をもつよう設計されており、特に尿素ミキシング配管・SCR Ass'y および KDPF は、自社製造とすることで高い品質を保証している。

## 6. 電子制御システム

電子制御システムは、Tier4 Final 排出ガス規制対応のために採用された電子制御コモンレール噴射システム・可変ターボチャージャ・KDPF・尿素 SCR システムなどを制御するため、新規に開発された ECU を採用した。

本エンジンでは、2 台の ECU を搭載し専用ソフトウェアによって連携させることで 2 サプライポンプコモンレールシステムの安定した駆動と、2 系統の後処理装置が均一に排ガスを浄化させることを実現した。

Tier4 Final 排出ガス規制、特に SCR Inducement による出力の制限などに適合したエンジンと後処理装置の故障診断システムを新たに導入して、各 ECU が連携してシステム全体の高度な故障診断の実施を可能とした。

## 7. 信頼性・耐久性

今回の Tier4 Final 排出ガス規制対応φ170 エンジンシリーズの開発にあたっては、先行開発機種にて採用した Tier4 Final 規制対応技術の大型エンジンへの適用に際し、従来から培われてきた産業用エンジンの品質確認コードをすべて満足することはもちろんのこと、十分な品質を作り込むために、Tier4 Final 規制対応技術新技術対応として追加した新たな評価テストコードについても、大型エンジンの使われ方に沿った評価基準を設定し、十分な信頼性・耐久性の確認テストを実施した。

後処理装置の耐久性確認に関しては、KDPF と尿素 SCR システムを採用するにあたり、搭載するすべての建設機械アプリケーションでの実車の振動・衝撃加速度を評価し、それらを包括する評価条件を設定した。

エンジン耐久試験においては、建設機械アプリケーションの様々な稼働条件で、KDPF システムと尿素 SCR システムが安定して機能することと、新規に開発した制御パラメータの設定が最適であることを確認するために、実車計測データに基づき、各アプリケーションで想定される代表的稼働条件を模擬したサイクル運転にてサイクル耐久試験を行い、すすの堆積状況と尿素的析出物生成状況の確認試験を十分行った。

今回開発した Tier4 Final 排出ガス規制対応φ170 エンジン (23L) においては、ベンチ耐久試験を合計 1 万 5 千時間以上実施し、且つ車両の実用試験を合計 5 千時間以上実施することで、十分な信頼性・耐久性確認を行うことが出来た。

## 8. おわりに

新たに開発した Tier4 Final 排出ガス規制対応φ170 エンジン (23L) の概要と、その技術的特長について紹介した。

Tier4 Final 排出ガス規制対応のキーコンポーネントのほとんどを自社開発で行い、またその多くを自社生産とすることで、建設機械に要求される市場ニーズに合わせるだけでなく、競合他社との差別化をもはかった Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンシリーズを導入することができたものと考えている。

また、車両全体としても、自社の特長である低燃費・信頼性・耐久性を確保しただけでなく、環境に配慮した高品質の製品に仕上げることが出来たと考える。

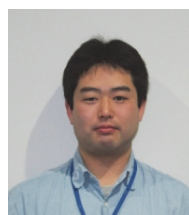
### [参考文献]

- 「建設の施工企画：日・米・欧の排出ガス規制対応技術」
- 「コマツ技報：Tier4 Final 規制対応φ125, φ140 エンジンの開発」
- 「建設機械施工：Tier4 Final 排出ガス規制対応エンジンの開発」

### 筆者紹介



Issei Hara  
はら いっせい  
原 一生 2008 年、コマツ入社。  
(株) アイ・ピー・イー  
中大型エンジン設計グループ



Tetsuo Orita  
おりた てつお  
折田 哲生 2001 年、コマツ入社。  
(株) アイ・ピー・イー  
中大型エンジン設計グループ

### 【筆者からひと言】

Tier4 Final 対応エンジンはすでに市場導入されており、市場での評価が気になるところです。