

# Development of an Engine Management Strategy and a Cost Effective Catalyst System to meet SULEV Emission Requirements demonstrated on a V-6 Engine

Heiko Oertel, Oliver Wildner  
Robert Bosch GmbH

Klaus Mueller-Haas, Manuel Presti  
Emitec GmbH

Copyright © 2003 SAE International

## ABSTRACT

この報告では、低コストのシステム構成により V6 エンジンの排ガスエミッションを最小化し、SULEV 目標を達成するための方法を重点的に説明する。

調査は以下の 3 部構成にて行われた。

A) 第 1 段階では、エンジンマネージメントがローエミッションと触媒のライトオフ性能に与える影響を最適化した。

B) 次に、別報に示されている高セル密度触媒システムをエンジンテストベンチでテストした。この段階では、いっそう最適化された触媒コンセプトのモデル化とライトオフ性能予測のために、熱データとエンジンエミッションを使用した。

C) プログラムの最終段階では、高セル密度および多機能シングル担体システムを含むテストマトリックスの、FTP サイクルでの浄化性能を調査した。

本調査の結果には、革新的なエンジンマネージメント対策とコスト効果の高いメタル担体触媒設計を組み合わせ、SULEV 排ガス基準を達成する取組みが示されている。

## INTRODUCTION

将来、排ガス規制がますます強化される方向にある中、SULEV のような厳しい排ガス規制を満たす、低コストかつ堅牢な駆動システムを設計することは難問であり、とりわけ大排気量のエンジンについてそのことがいえる。この報告では、革新的なエンジンマネージメント対策と触媒コンバータの最適レイアウトを組み合わせることで、将来の排ガス規制を達成するコスト効果の高い方法を提供できることを実証する。

調査に用いたエンジンは、デュアル可変カムと鋳鉄製エグゼーストマニホールドを備え、二次空気導入なし、EGR なし、クローズカップルドコンバータ 2 個を装備した 3.6 リットル PFI

V6 エンジンである。このベースラインエンジンは LEV2 排ガス要求を満たしている。このエンジンを、排ガス排出量のいっそうの最小化と排ガスおよび触媒担体の温度をアイドリング開始後 20 秒以内に SULEV 要求予想値 (触媒床温 500°C) まで上げることを目指して、エンジンテストベンチでテストした。そのために、コールドスタート対策のためのエンジンマネージメントキャリブレーションの最適化に向けて、排ガス温度およびエンジンエミッションの温度について調査した。始動後のエミッションレベルおよび要求触媒温度を実現するために、以下の開発ステップが実行された。

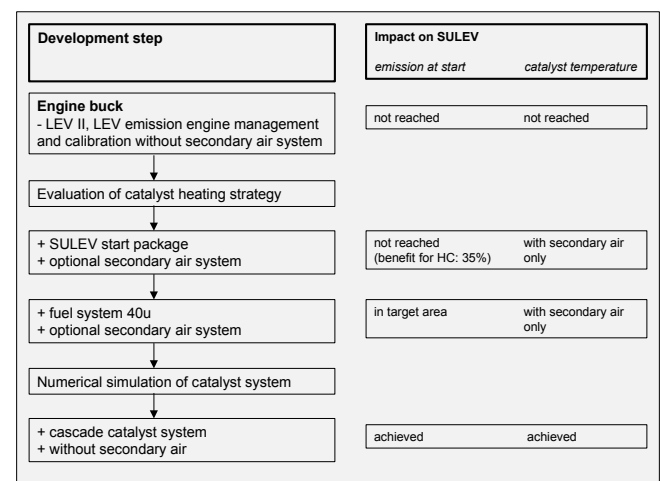


Figure 1: development steps

各開発ステップについては追って詳しく論じる。主な課題は、二次空気導入によらずにエミッションの減少および触媒ライトオフを実現することである。

エンジンマネージメントのキャリブレーションおよび最適化のため、ベースラインとして、本来 SULEV 対応を目的に設計されたわけではない 1.1 リットル、600cps の触媒を使用した。平行して、低コストの触媒コンバータを開発する目的で、触

媒のライトオフ性能と設計を研究するための数値ツールを使用した。

エンジンのコールドスタート対策を最適化し、触媒のレイアウトを決定した後に、エンジンマネジメントをさらに最適化、高温過渡条件下におけるテールパイプエミッションを最小化する努力がなされた。この調査のため、燃料システム、触媒システムおよび対応するソフトウェアとキャリブレーションを段階的に改良し、その段階ごとにシャーシダイナモメーター上で FTP テストを実施した。

## A) ENGINE MANAGEMENT

Figure 1内の EMS 関連の手法は以下である。

触媒の温度上昇評価(Catalyst Heating Evaluation)

1. コンバータ上流での発熱反応
2. 二次空気導入の影響

エンジン始動の最適化(Engine Start Optimization)

3. エンジンスタートフレアのコントロール
4. 始動時および始動後の燃料供給の最適化

燃料システムおよび点火システムの最適化(Optimized Fuel and Ignition System)

5. SMD を小さくするための燃料噴射圧の上昇
6. 点火エネルギーの増加

## CATALYST HEATING EVALUATION

### 1. Exothermic Reaction before converter:

FTP コールドスタートのアイドリング段階をシミュレーションするために、エンジンをダイナモメーターに取り付けた。触媒温度の上昇と触媒上流温度を評価するため、入口排ガス温度および担体床温を記録するための熱電対を取り付けた。Figure 2に、二次空気導入あり/なしのそれぞれの構成における温度推移を示す。2つの構成において、エンジン速度はほぼ同じである。

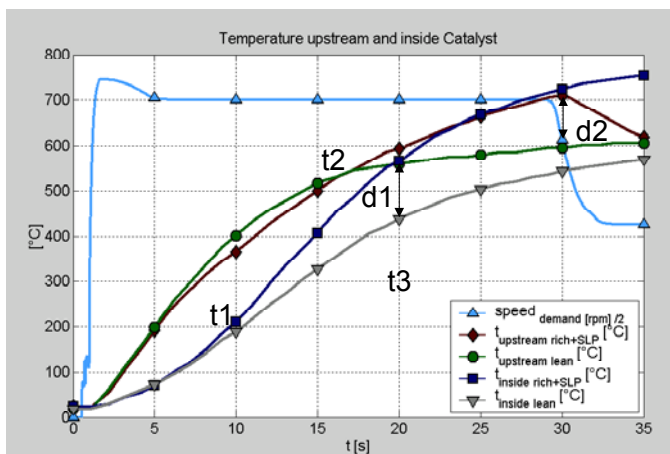


Figure 2 Evaluation of catalyst heating strategy

t2 まで触媒上流温度の上昇は見られないが、その後 d2 までの間に触媒上流で発熱反応が始まっている。発熱反応は、エグゾーストマニホールドの二重スチールチューブの最適化と、二次空気導入システムによって改善することができた。現行の構成では、FTP 用に使用可能な触媒上流発熱反応は得られない。

t1 の後、SAI 構成の触媒床の温度過渡度が速くなるが、これは燃料増量(エンジン  $\lambda$  値 = 0.77)による発熱反応の結果である。20 秒後の触媒床温度(t3)は、SAI 構成の方が約 130 Kelvin(d1)高い。エンジン  $\lambda$  値のリッチ化によりもたらされた HC は、触媒内でのみ反応した。エンジン  $\lambda$  値のリッチ化が早すぎるか、または強すぎると、HC が触媒内で完全に反応しきらない可能性がある。

触媒上流で熱反応が起きなかった一方、このベースライン触媒を予想される SULEV レンジにまで加熱するためにやはり二次空気が必要であった。

### 2. Influence of secondary air injection

エンジンエミッションを最小限に抑制するため、エンジンは空燃比リーン状態で始動させる。触媒ライトオフ後、燃料供給を増量に切り換え、二次空気を加えて発熱反応を起こさせ、全体のライトオフを加速する。エンジンのローエミッションを最適化するために、燃料減量補正により最初の触媒反応が始まるまで、燃料増量タイミングを遅らせる必要があった。二次空気導入を伴う燃料増量補正は、エンジンより排出されるローエミッションの増加、および触媒床全体の温度低下を最初から引き起こすと考えられる。

V6 エンジンにおいては、リッチ - コンバータ加熱段階で、エンジンマスフローに対応するために非常に多量の二次空気マスフローが必要であった。二次空気マスフローを少なくした状態では、エグゾースト  $\lambda$  値がリッチ化するのを避けるために、燃料増量補正の度合を制限した。2 通りの SAI マスフローに対応するエグゾースト  $\lambda$  値の記録結果をFigure 3に示す。

この調査では、十分なマスフローを確保するため 2 台の二次空気ポンプを使用した。Figure 4に、二次空気ポンプが 1 段の場合と 2 段の場合の SAI マスフローの比較を示す。エンジン速度はほぼ同じであるので、エンジンマスフローは比較可能である。

Figure 3 と 4 に、二次空気使用の限界を示す。1 台の二次空気ポンプはエンジンマスフローの上昇に追従できず、余剰トルクと可能な燃料増量に制限が生じた。大型の二次空気ポンプまたは 2 台の二次空気ポンプを並べて組み込むことは、実装上不可能である。

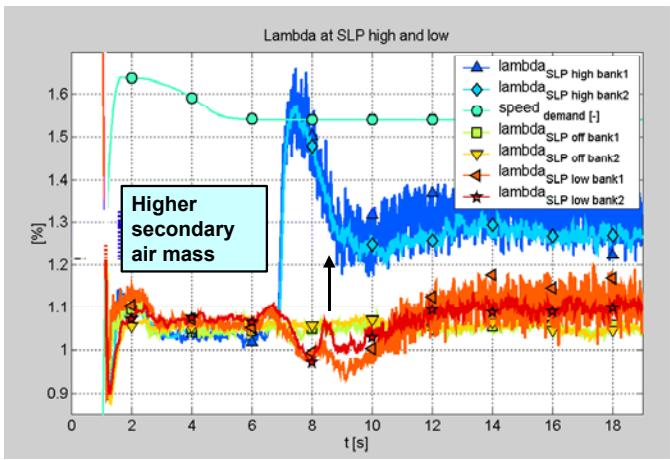


Figure 3: Exhaust lambda without SAI and at high and low SAI, engine enrichment to 0.75

十分な二次空気マスフローをエグゾーストシステムに供給するためには、二次空気システムの最適化が不可欠である。

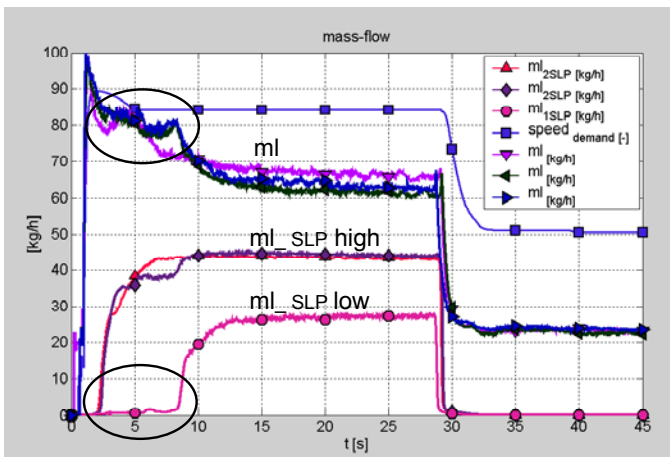


Figure 4: Engine and SAI mass flow at high and low SAI, high engine mass suppresses SAI

SAI 構成の触媒床温は始動から 20 秒後に 550°C 以上あり、リーン - ベースラインのキャリブレーションでは 350°C であった。(Figure 5)

触媒の適切な加熱は、エミッションペナルティを受けることなく FTP の最初の峠を越すために不可欠である。しかしながら、20 秒間のテールパイプエミッションを総合して比較すると、リーン始動と二次空気使用との間に違いは見られなかった。

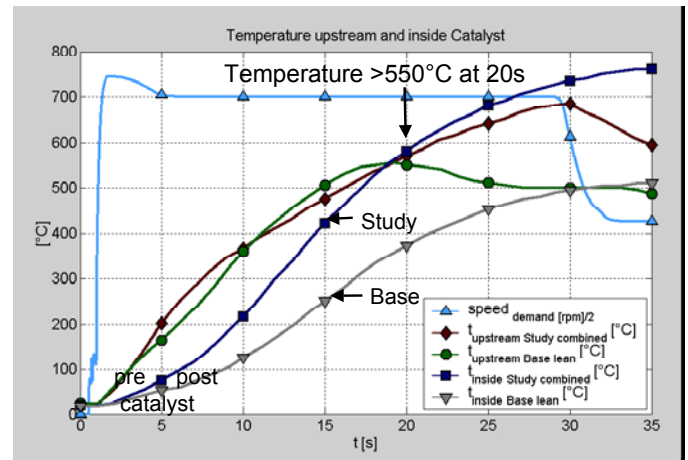


Figure 5: Temperature comparison SAI to lean base, upstream and inside catalyst

以上の結果には早くも、二次空気使用の限界が示されている。その後の調査では二次空気を使わず、リーンコンセプトと触媒の改良によりコスト効果の高いシステムを確立することに重点を移した。

## ENGINE START OPTIMIZATION

エンジン始動時、ローエミッションは低温の触媒を素通りする。したがって、始動時はローエミッションを抑制することが絶対に必要であり、その効果は FTP テストのバグ 1 にて直接確認することができる。

### 3. Control of engine start flare

始動時のエンジン速度上昇をモデル化することにより、始動後のインテークマニホールド圧をコントロールしながら下げるやり方は、エンジン始動最適化の有力な方法である。

始動時にエンジン速度をきめ細かくコントロールしながら上昇させることにより、マニホールド圧 500 mbar 以下で圧が揺らぐときに、壁面に付着した燃料油膜の全体が蒸発するのを防止できる。インテークマニホールドから来るこの燃料は、凝集して小さな液滴を形成し、まだ低温状態のコンバータを素通りし、エミッションを悪化させる。

始動時のエンジン負荷予測と適切なスロットル位置によりこれを防ぐことができる。始動時にスロットル位置を一定に保持し、トルク構造をスムーズに展開させることで、始動時に望ましい安定性が得られ、始動中に MAP が 500 mbar 以下に低下するのを防止できる。その様子を Figure 6 と 7 に示す。

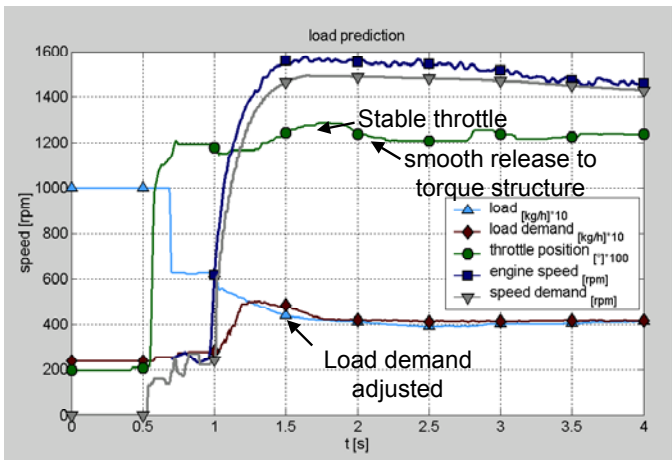


Figure 6: Engine load prediction at start

Figure 6は、安定したスロットル位置を提供するために、高いエンジン負荷でスロットルを絞らない自然な状態での始動が負荷予測においてどのように考慮されるかを示している。

バランスの取れたアイドルスピードコントロールとその動作有効能力を得るために、点火タイミングコントローラーのパラメータおよび境界使用の特定広域パラメータが始動直後から設定されている。

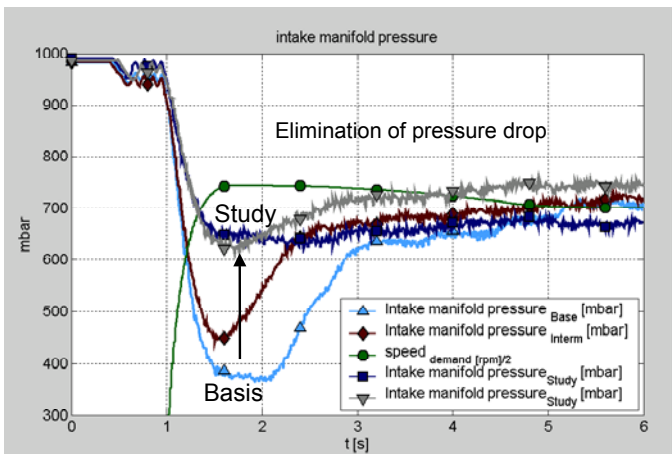


Figure 7: Elimination of pressure undershoot with described engine management measures

始動時の余剰トルクのためのタイミング補正(遅角)も不可欠である。一般的に言って、すべての始動パラメータを高速に即時増加で閉ループ制御レベルに持っていくことが、エンジン回転数の上昇をコントロールし、マニホールド圧の減少を適度に抑制し、始動時の過剰なローエミッションを防ぐ最も効果的な方法であった。

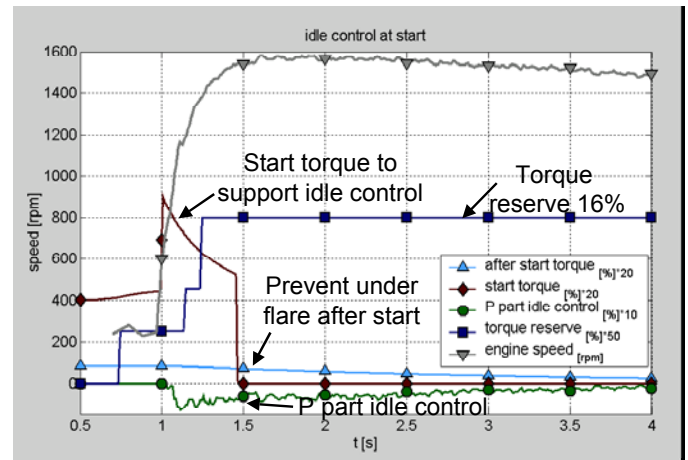


Figure 8: Torque reserve and idle control at start

#### 4. Optimization of start and after-start fueling

エンジンマネージメントの次のテーマは、始動時および始動後の燃料供給量の精密な最適化である。始動時および始動後のエンジンの燃料必要量は極めて非線形である。古典的アプローチは燃料供給の指数的減少であり、この段階にてエンジンの燃料必要量の追加も削減も考慮されなかった。

高速 FID を使って、エンジン回転数上昇時のシリンダ個別燃料供給を初めて調整することで、最適化を実現することができた。第 2 段階では、燃料供給全体をキャリブレーションしトレースの安定化を図った。

このエンジンマネージメント対策により、エンジンのハードウェアを変更することなく、始動後最初の 20 秒間の総合 HC 排出量を 35%減らすことができた。

### FUEL AND IGNITION SYSTEM

#### 5. Increase fuel pressure to establish small SMD

この時点で燃料システムを噴射圧 7 bar, 粒子サイズ 40  $\mu$  のインジェクタに変更した。粒子サイズの小型化は、ローエミッションを減らす方法として有効である[1]。燃焼が安定化しシリンダ内の反応がより完全になり、HC の排出が減少する。

また、安定燃焼の結果、始動後の燃料減量を早い段階で行うことができ、このことも HC の排出減少に寄与する。

リーン始動のエンジンマネージメント対策を維持しつつ、変更した燃料システムのキャリブレーションを実施した。一般的な調整に加えて、高まった燃料噴射圧を原因とする開遅延、および異なった動的フローに関して、始動時および始動後の新しいキャリブレーションが確立された(セクション 4 を参照)。

このようなエンジンマネージメント対策に加えて、40  $\mu$  SMD の燃料システムを採用した結果、コールドスタート時の HC ローエミッションの排出はFigure 9に見られる通り著しく減少した。この処置により、セクション 3 の回転数上昇条件を維持しつつ、始動後のエミッションを減らすことができた。

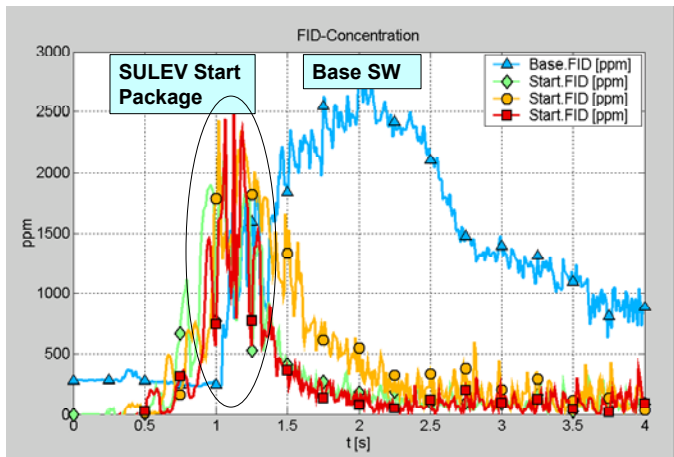


Figure 9: Reduced HC emissions during start, avoid evaporation of complete sections of wall applied fuel film

## 6. Increase ignition energy

セクション 5 で論じた高速燃料減量補正を補強する方法が点火エネルギーの増加である。

そのために、ベースラインシステムの 45mJ のものと比較できる、65mJ のエネルギーを供給する点火システムをエンジンに取り付けた。セクション 5 の調査のすべてをより強力な点火システムを使って実施した。

改良システムにおける HC の蓄積をベースラインと比較した結果を Figure 10 に示す。この燃料システムと強力な点火パワーにより、始動から 20 秒後の HC エミッションは約 40% 減少した。これは二次空気システムの効果には依存しない。というのも、上記の処置は二次空気ポンプが作動する前に効果を発揮するからである。

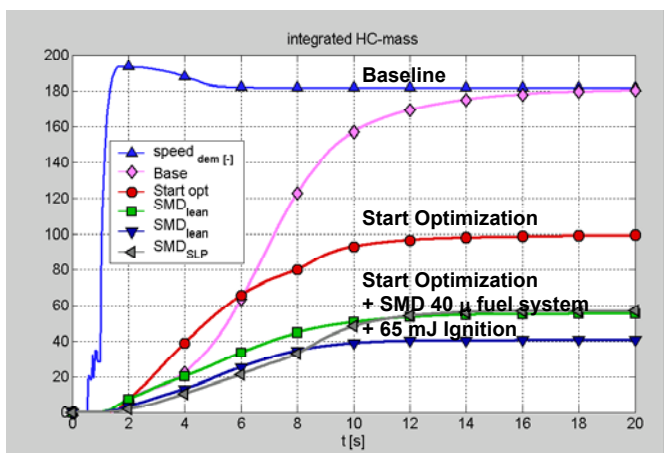


Figure 10: Intermediate emission benefits compared to baseline at 20s after start with described measures

このプログラムステージではまだ、アイドリング開始から 20 秒後に希望する触媒温度に到達するために二次空気システムが必要であった。

エンジンマネジメントシステムのテスト結果を次表にまとめる。

	SAI 適用	SAI なし リーン始動
排ガスインレット温度の推移	同等	
排ガスマスフロー	110 kg/hr	65kg/hr
触媒床温	20 秒後に 500°C	20 秒後に 350°C
HC テールパイプエミッション	同等	

プログラムのこの時点までの結果から、エンジンエミッション、テールパイプエミッションともに、アイドリング開始後 20 秒間の排出を著しく減少できることが確認された。HC ローエミッションをベースライン (LEVII) に比べ 75% 減らすことができた。

この大幅な減少は、二次空気の使用に依存することなく実現された。それは、エンジンが低負荷条件 (アイドリング) で動作しているためである。しかし、FTP テストサイクルに合格するには、最初の 20 秒以内に触媒床温を 500°C 以上に引き上げることが絶対の条件となる (Figure 11)。

二次空気システムを使用しない場合、別報にて示されている高セル密度触媒システムを使用することでこの目標を実現できる。これについては以下の調査 B) で取り上げる。

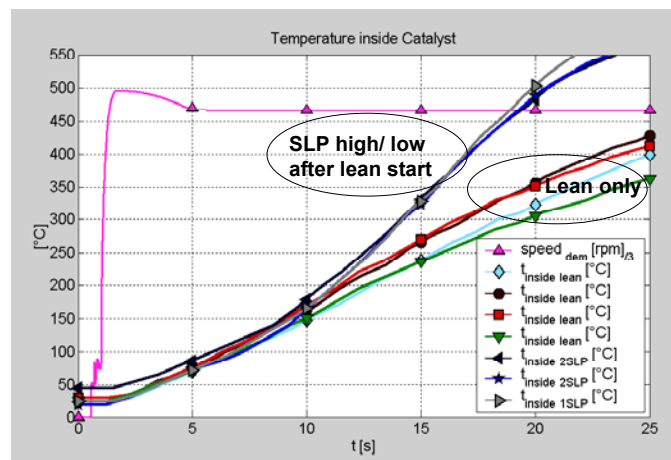


Figure 11: Comparison of Catalyst 1inch bed temperature with and without SLP at engine start

## B) NUMERICAL STUDY

過去の報告で、小径および高密度セル担体技術のライトオフ面での利点が指摘されている[5, 6, 7, 8]. カスケードコンバータシステムまたはコニカルコンバータシステムには、断面積が小さく背圧が最小であるため、高速加熱、ひいては高速ライトオフを実現できるという利点がある[2, 3, 4].

エンジンベンチで記録した排ガス温度、マスフローおよびガス濃度を使って、コンバータの設計別に 25 秒間のアイドリング段階の触媒ライトオフ性能をシミュレーションした. この目的のため、2 次元数値解析ツール「KatProg」を使い、触媒断面積と担体セル密度の影響を調査した.

- 触媒の直径:  $\varnothing 85$ ,  $\varnothing 110$ ,  $\varnothing 118$
- 担体セル密度: 600, 900, 1200cps

担体長さはこの加熱段階においては二義的意味しか持たないため、すべてのコンバータにおいて一定 (60mm) に保った.

担体の前面位置は同じであると仮定し、したがって排ガス温度条件はすべての計算において一定とした. アイドリング段階の排ガス温度およびマスフローをFigure 12に示す. 小型コンバータシステムのさらなる利点は明らかで、実装に有利であること、カスケードコンバータシステムの位置に近づけられること、があげられる. 各バンクの排ガスパイプの設計が対称なため、排ガス温度は同様になる. 排ガスマスフローの半分が触媒ライトオフの予測に使用される.

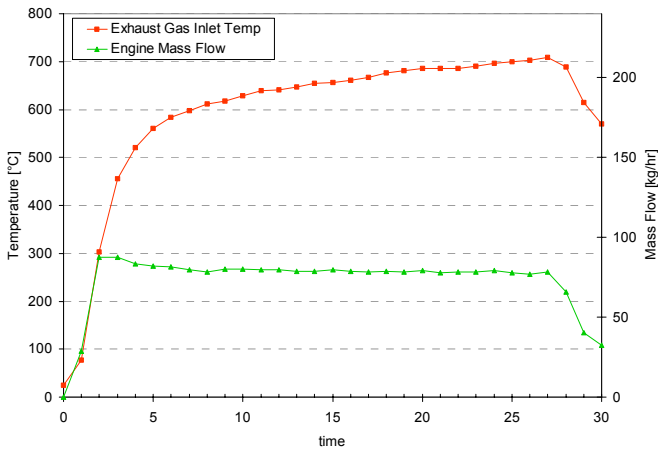


Figure 12: Exhaust gas temperature and mass flow during the lean start.

前端面から 25mm 位置の中心における担体シミュレーション温度を Figure 13に示す. 85mm 径では、118mm 径のものに比べ、同じ位置の床温が約 109Kelvin 高いことが分かる. 前端面から 25mm 位置の径方向の温度プロファイル比較結果を Figure 14に示す. 85mm コンバータの計算温度の方が著しく高くなった.

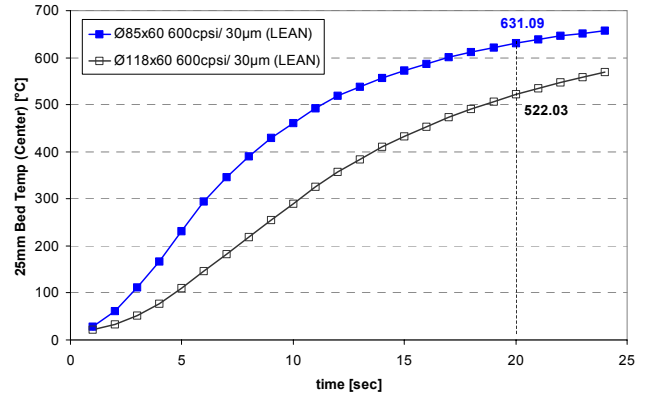


Figure 153: Predicted bed temperature 25mm after front face at the center depending on diameter

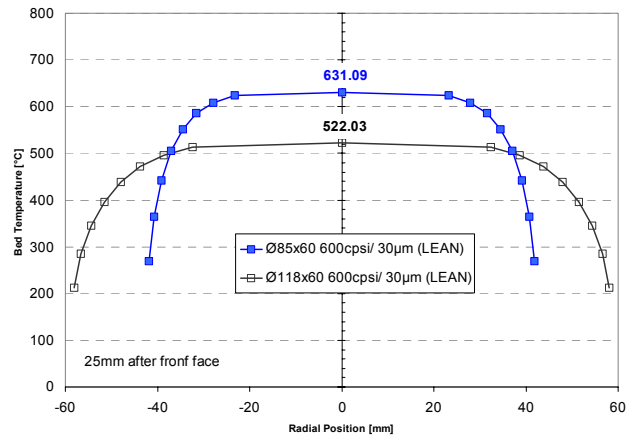


Figure 164: Predicted bed position temperature 25mm after front face (t=20 seconds)

径およびセル密度の関数としての浄化率をFigure 175 に示す.  $\varnothing 85$ mm の最大触媒効率、16 秒後に達成された. その後はアクティブな GSA により最大浄化率が制限される.  $\varnothing 85$ mm, 1200cps 担体は、最初の 20 秒間に優れたライトオフ優位性を示し、16mg の蓄積 HC が見られた ( Figure 186). そのようなわけで、 $\varnothing 85$ mm, 600cps 担体の予測 HC は、 $\varnothing 118$ mm, 1200cps 担体に比べ低くなっている.

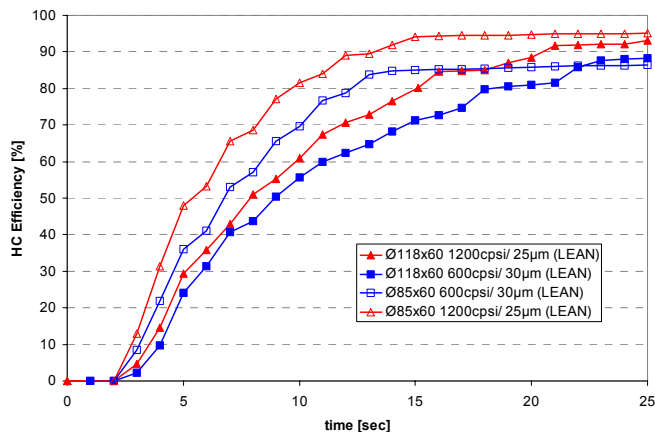


Figure 175: Calculated HC Light-Off depending on diameter and substrate cell density

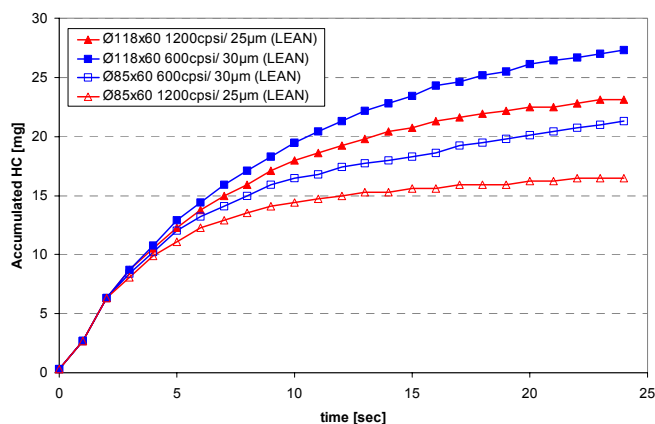


Figure 186: Accumulated HC after converter depending on the design - only one bank

予測 HC の結果をセル密度の関数として、担体径に対して記述したグラフをFigure 197 に示す。担体径を118mmから85mmに小さくすると、HC のエミッションは15~20%少なくなる。1200cps の担体は600cps の標準設計に比べ、あらゆる径においてHC が10%減少した。

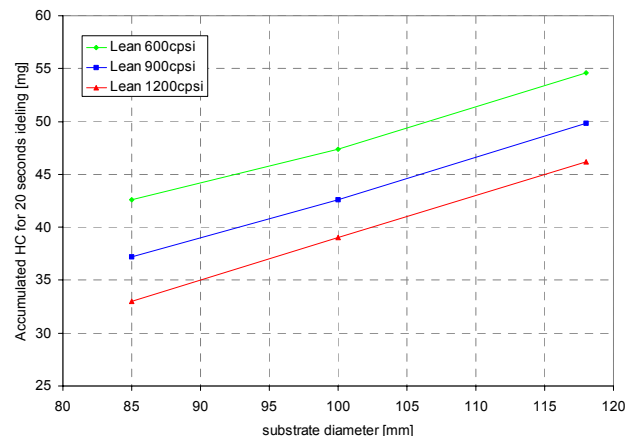


Figure 197: HC prediction depending on cell density and diameter (only 20 seconds idling)

予測結果は断面積の小さな触媒では熱物理学的利点のため早く加熱されることを示している。これを高密度セル技術と組み合わせると、高速ライトオフが実現される。その反面、排ガス流量が増えた段階で最高の変換効率を得るために設計の追加チューニングが必要となる。

エンジンベンチでの更なるキャリブレーションと排ガス最適化のために、径85mm、1200cpsの後段にØ110mm、1000cpsの担体を接続したカスケードコンバータシステムを製作した。

## CASCADE CONVERTER SYSTEM

ライトオフ性能を調べるため、このカスケードシステムをベースラインコンバータと同じ位置に取り付けた。カスケード触媒についても、セクション3、4、5および6で説明したのと同じ処置によりコールドスタート対策を最適化した。

フロント触媒床温は始動から7秒後に500°Cを超えた。それに対し2番目の担体の加熱速度はベースライン触媒と同等のレベルであった。

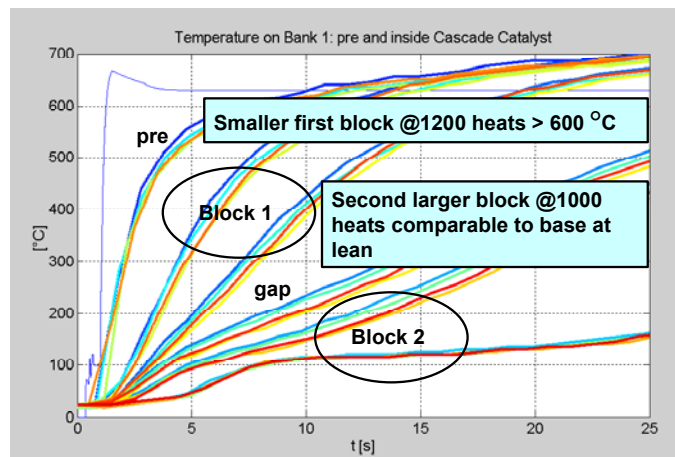


Figure 18: Cascade Catalyst temperatures

カスケード触媒を使った場合のHCエミッションは、始動期間を通じて50%削減された(Figure19を参照)。

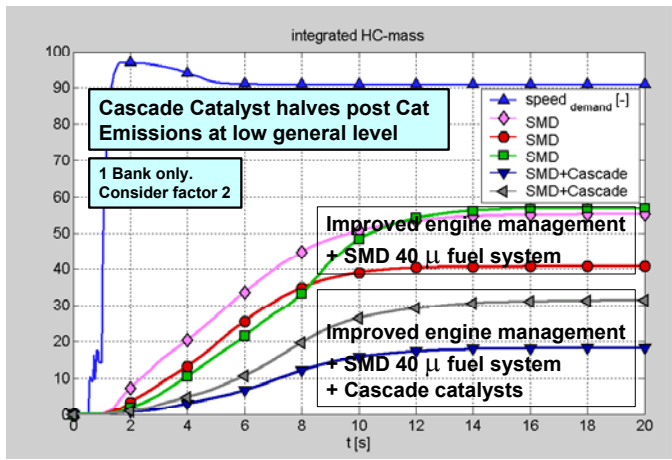


Figure19: Emission benefit of cascade catalyst system

これで、始動後の触媒温度とエミッションレベルは、予想される SULEV レンジに入ったことになる。20 秒後の蓄積 HC は 1 バンクあたり 20~30mg のレンジであり、合計 HC エミッション量は 40~60mg となる。

### C) FTP TESTING

FTP テストは以下の段階に従って実施された。

1. 車両ベースラインテスト. 道路走行距離にして 120,000 マイル相当にエージングした 600cpsi コンバータを使用.
2. ベースラインの 120k コンバータおよび 7 bar 燃料システムでエンジンを始動するためのエンジンマネージメントの調整
3. 改良型エグゾーストマニホールドによる高温運転, 点火エネルギーの増加, および 120k ベースラインコンバータに対応するためのエンジンマネージメントの調整
4. 前述のすべてのハードウェアおよびカスケードコンバータを設置したうえでのエンジンマネージメントの調整

この報告書の執筆時点で、段階 1 と 2 が終了していた。段階 2 のレベルで、FTP テストサイクル段階 1 の HC 排出は 50%以上削減され (Figure 20), その間 NOx のレベルは維持された。また、FTP からのモード解析データは最初の 20 秒間の FID 測定から得られる総合 HC 値に対応していた。

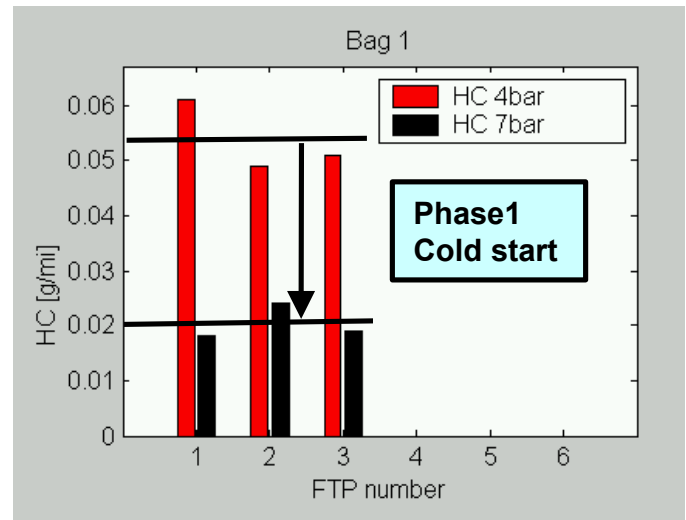


Figure 20: HC bag 1 of FTP

トータルの FTP HC エミッション値は燃料噴射圧を 7 bar に上げたことにより、37%減少した。

段階 3 と 4 で HC の一段の減少が期待され、SULEV エミッション目標レベルは達成できると予想される。

## Conclusion

### Engine management optimizations

コールドスタート時の燃料増量と併せて二次空気導入システムを採用しても、触媒上流側の排ガス温度は大きく上昇しない。一方で、発熱エネルギーにより触媒の加熱が加速される。

エンジンスタートフレア、始動時/始動後燃料供給最適化などのエンジンコールドスタート対策により、HC ローエミッションの排出が 35%低減される。

燃料噴射システムの更なる最適化 (燃料の噴射圧を高め、噴射燃料粒子サイズを微小化) と点火エネルギーの増加により、二次空気導入システムを採用せずに HC ローエミッションの排出が 40%低減される。

### Catalyst design optimization

EMS の開発によりエンジンエミッションは大幅に減少したが二次空気導入なしでは SULEV 基準値をクリアできない。これは主要システムのコスト面でのデメリットを意味している。

このことから、触媒のライトオフ性能を最大にするため、新型触媒コンバータの設計 (担体の熱・物理特性およびウォッシュコート技術) が必須となる。

コンバータは数値解析を用いて設計された。特定の担体直径において、カスケードシステムによる最大のライトオフ性能を達成するため、セル密度とコンバータ容積配分が最適化された。

エンジンベンチでの実験は予測通りの結果で非常に良好な成績であり、高セル密度カスケードコンバータのメリットも確認できた。FTP においてコールドスタート段階で捕集した排ガスも要求 SULEV レベルをクリアした。それでもなお、SULEV をクリアするためには全 FTP 段階で、最大の触媒処理効果が要求される。

## Outlook

革新的エンジンマネジメント対策と、最適化された触媒コンバータのレイアウトとの組み合わせは、SULEV 要求を満たす大排気量エンジンを低コストで実現する最も効率的な手段である。

エンジンマネジメント面では、シリンダの個別  $\lambda$  制御とダブルフィードバック燃料調整が今後の重点研究課題となろう。

次の開発段階では触媒設計の更なる最適化が予定されている。とりわけ、孔開きフォイルや酸素センサ内蔵型などの革新的な担体技術のテストが実施される。前者は担体内での高度のミキシングを可能にし、デュアル担体システムの必要性を解消する。後者はコールドスタート後、閉回路制御動作に移行するまでの時間を著しく短縮する。さらに、担体内に酸素センサを組み入れることで、センサの急速なエージングとウォーターハンマーからセンサを保護することができる。

このような多機能シングル担体システムへの取り組みによってシステムの高度な単純性を維持しつつ、SULEV に対応するための低コストのソリューションがもたらされる。

## ACKNOWLEDGMENTS

この調査のために多大なサポートを受けたことに対し、筆者らは GMPT の Daniel Nicholson および Fred McCuiston に謝意を表明する。

## DEFINITIONS, ACRONYMS, ABBREVIATIONS

**EMS:** Engine Management System エンジンマネジメントシステム

**FTP:** Federal test Procedure 連邦テスト手順

**FID:** Flame Ionization Detector 炎イオン化検出器

**GSA:** Geometric Surface Area 幾何学的表面積

**HC:** Hydro Carbon 炭化水素

**MAP:** Intake Manifold Pressure インテークマニホールド圧

**NOx:** Oxides of Nitrogen 窒素酸化物

**SAI:** Secondary Air Injection 二次空気導入

**SMD:** Sauter Mean Diameter ザウタ平均粒径

## REFERENCES

1. W. Samenfink, H. Albrodt, M. Frank, M. Gesk, A. Melsheimer and J. Thurso, "Strategies to Reduce HC-Emissions During the Cold Starting of a Port Fuel Injected Gasoline Engine", SAE Paper 2003-01-0627
2. E. Otto, F. Albrecht, J. Liebl, "The Development of BMW Catalyst Concepts for LEV/ULEV and EU III/IV Legislations 6 Cylinder Engine with Close Coupled Main Catalyst", SAE Paper 980418, 1998
3. B. Pfalzgraf, M. Firtzen, J. Siebler, H.-H. Erdman Audi AG, "First ULEV Turbo Gasoline Engine – The Audi 1.8ltr 125kW 5-Valve Turbo", SAE Paper 2001-01-1350
4. W. Maus, R. Brueck, "The Conical Catalytic Converter - Potential for Improvement of Catalytic Effectiveness", SAE 982633
5. K. Mueller-Haas, C. Webb, J. Rieck, "FTP and US06 Performance of Advanced High Cell Density Metallic Substrates as a Function of Varying Air/Fuel Modulation", SAE Paper 2003-01-0819
6. G. Holy, R. Brueck, P. Hirth, "Improved Catalyst Systems for SULEV Legislation; First Practical Experience", SAE Paper 2000-01-0500
7. B. Pfalzgraf, M. Rieger, G. Ottowitz, Audi AG, "Close Coupled Catalytic Converter for Compliance with LEV/ ULEV and EGIII Legislation – Influence of Support Material, Cell Density and Mass on Emission Results", SAE 960261
8. P. Marsh, F. Acke, R. Konieczny, R. Brueck, P. Hirth, "Application Guideline to Define a Catalyst Layout for Maximum Catalytic Efficiency", SAE Paper 2001-01-0929