

新開発 1.6L 水平対向直噴ターボエンジンの開発・紹介 *

佐々木礼¹⁾

Development of 1.6L Horizontally-Opposed Direct Injection Turbo Gasoline Engine

Rei SASAKI

. KEY WORDS: heat engine, spark ignition engine,[A1]

1.まえがき

2014年6月にリリースしたスバルレヴォーグのコンセプトワードである『革新スポーツツアラー』の名に恥じない“ロングツーリング性能”と、スバルに期待される“AWD+ターボ”の走りを高次元で両立させながら、国内専用ユニットの象徴といえるレギュラーガソリン専用に向けたFB16DITエンジンを新開発した。2012年に市場導入したFA20DITエンジン¹⁾と2011年にスバルインプレッサに搭載したFB16エンジン²⁾を融合させ、既存のFB16エンジンに対し、クランクシャフトを除くほぼ全ての部品を刷新して生まれた1.6リッター水平対向直噴ターボエンジンを紹介する。

2.エンジン開発コンセプト

国内専用車レヴォーグに相応しい圧倒的な環境性能と、スバルに求められる走りの性能をレギュラーガソリンで実現。同じく排出ガス性能についても触媒仕様の最適化を行い、平成17年基準75%低減(JC08CH)に対応。燃費・出力とともに高次元でバランスさせたスバルの新時代を象徴する全性能を進化させたエンジンである。(Fig. 01).



Fig.01 FB16DIT engine

出力性能は14MY LEGACY 2.5リッター相当以上の特性を持ち、ターボエンジン独特の低回転(1800rpm)から高回転(4800rpm)までのフラットなトルクによる乗りやすさと、それ以降の馬力をフラットにすることによる伸びのある気持ちのよいフィーリングを実現し、幅広いお客様のニーズに応えるものとなっている(Fig. 02).

エンジン諸元をTable.01に示す。

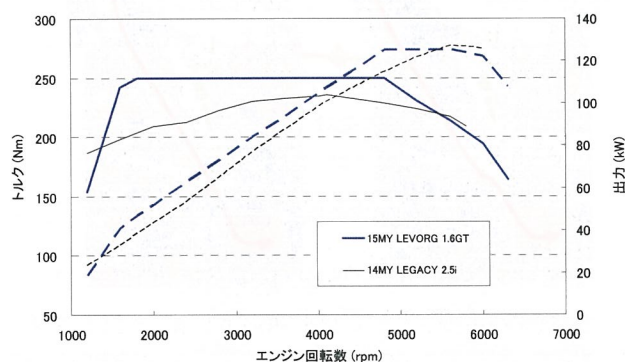


Fig.02 Engine torque curve

Table.01 Engine specification

■エンジン	15MY LEVORG 1.6GT	14MY LEGACY 2.5i
型式・種類	FB16 水平対向4気筒turbo	FB25 水平対向4気筒
	1.6L DOHC 16バルブデュアルAVCS	2.5L DOHC 16バルブ AVCS
内径×行程(mm)	78.8×82.0	94.0×90.0
総排気量(cc)	1599	2498
圧縮比	11.0	10.0
最高出力[ネット] (kW(PS)/rpm)	125(170)/4800~5600	127(173)/5600
最大トルク[ネット] (N・m(kgf・m)/rpm)	250(25.5)/1800~4800	235(24.0)/4100
燃料供給装置	筒内直接燃料噴射装置	マルチポイントインジェクション
燃料種類	無鉛レギュラー	無鉛レギュラー
排出ガス 燃料消費率[JCO8] (km/ℓ)	平成17年基準75%低減(JC08CH) 17.4	平成17年基準75%低減(JC08CH) 14.4

3.燃焼設計

3.1 TGVのコンセプト

吸気ポートや燃焼室設計は、FA20DITの思想を継承しているが、FB16DITでは、TGV(タンブル・ジェネレーション・バルブ)を更に進化させた。

FA20DITで採用したTGVは、吸気ポートの内側を閉じる事で、吸気ポート外側に強い気流を発生させ、筒内にタンブ

* 2015年2月27日 自動車技術会シンポジウムにて発表。

1) 富士重工業(株) (181-8577 東京都三鷹市大沢3-9-6)
sasaki.rei@subaru-fhi.co.jp

ル流を生成している。これを順TGVと呼ぶ。また吸気ポート内に設置した隔壁は、4:6の比率である。

一方、FB16DITのTGVは、吸気ポートの外側を閉じる事にした。更なる燃費性能向上を狙い吸気ポート形状を検討する過程で、TGVを逆向きに設置した方が、これまで以上に混合気の均一性が向上する事が判った。これを、逆TGVと呼ぶ。また、より広い運転領域で燃費性能向上を図る為、隔壁は5:5の比率とした (Fig.03)。

隔壁比率5:5における順TGV閉と逆TGV閉における吸気バルブ中心断面の流れをCFD (流体解析) (4)(5)(6)で示す (Fig.04)。順TGV閉が形成する流れは、筒内に流入した後、やや蛇行する傾向があった。逆TGV閉は、吸気ポートから排気側ペントループ面まで直線的でスムーズな流れが形成されている。

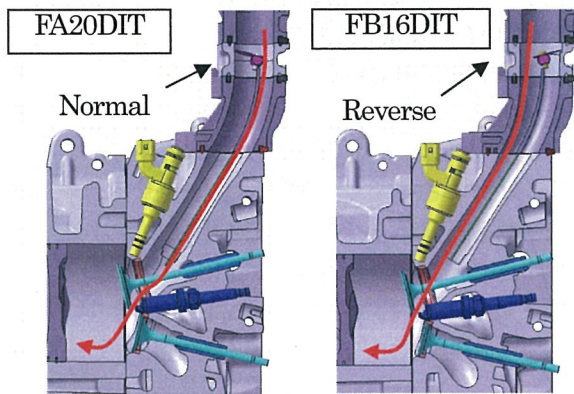


Fig.03 Air flow process

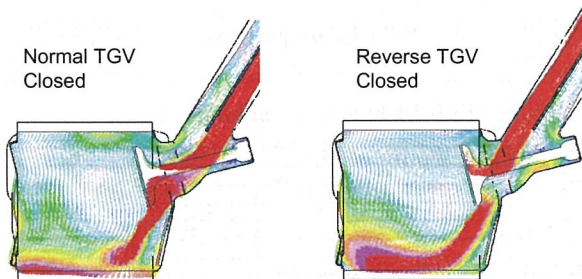


Fig.04 Comparison of CFD analysis (1200rpm, 120deg)

3.2 TGVの混合気分布

順TGV閉と逆TGV閉におけるCFDの混合気分布をFig.05に示す。吸気行程中で噴射した燃料は、タンブル流に乗って筒内を移動しながら拡散する。この時、逆TGV閉の方が混合気の移動速度が速く、より短時間で筒内に拡散していく様子が把握できた。

同じ条件におけるLIF (Laser Induced Fluorescence) 可視化計測による混合気分布を、Fig.06に示す。CFD結果と同様に、逆TGV閉の方が、混合気の移動速度が速い事を確認した。

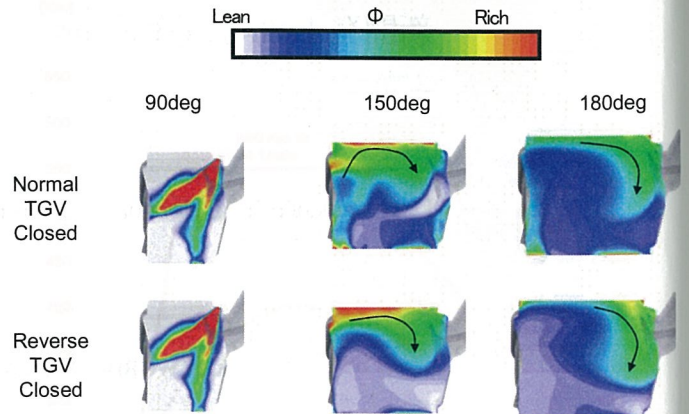


Fig.05 Comparison of CFD analysis (1250rpm)

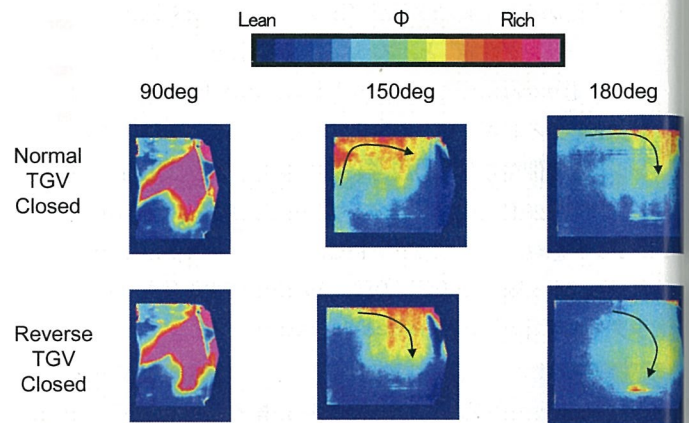


Fig.06 Comparison of LIF experiment (1250rpm)

3.3 TGVの実験結果

同一吸気ポート形状において、燃費代表点 (1200rpm, IMEP=300kPa) でファイアリング試験した結果を、Fig.07に示す。順TGV閉よりも、逆TGV閉の方が、図示燃料消費率 (ISFC)、図示平均有効圧変動率 (COV)、排ガス性能 (THC) が改善した。以上の結果から、CFD, LIF可視化計測、ファイアリング試験の3種類で、逆TGVの優位性が確認できた。

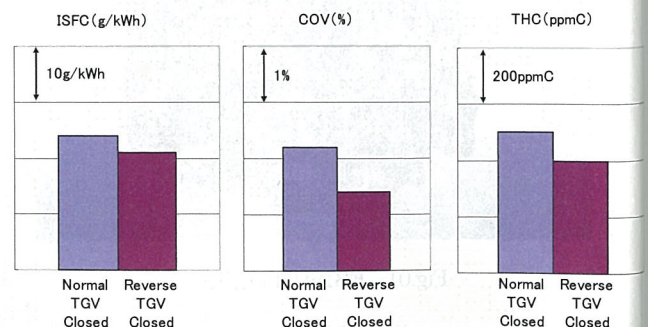


Fig.07 Comparison of Experimental result

3.4 ピストンのコンセプト

FA20DITの燃焼コンセプトを継承して、マルチホールインジェクタを採用している。また、混合気形成は、ウォールガイド方式とエアガイド方式を融合させた思想である。

ファストアイドル条件での2段階噴射制御の混合気分布の様子を、Fig.08に示す。吸気行程で1回目の噴射を行い、混合気を筒内全体に拡散させた後、圧縮上死点前で2回目の噴射を行う。この噴霧は、ピストン冠面に設置した浅皿型キャビティのステップをきっかけに、ピストン上方に向きを変える(ウォールガイド方式)。その後、ガス流動を利用する事で更に巻き上がり、スパークプラグ近傍に混合気を形成する効果がある(エアガイド方式)。

また、CFDとLIF可視化計測は良く一致しており、コンセプトの妥当性を検証しながら、ステップ形状の選定に貢献した(Fig.09)。

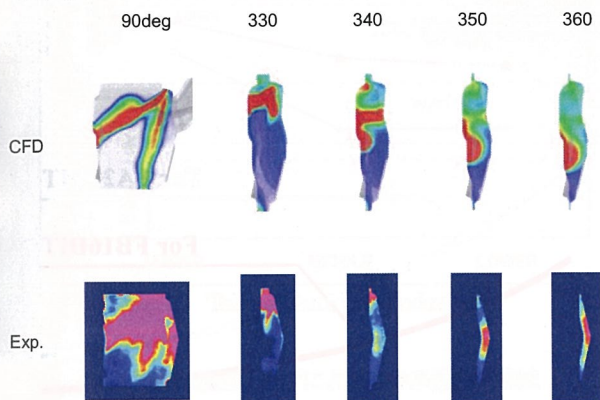


Fig.08 Comparison between CFD and experiment (Fast idle condition)

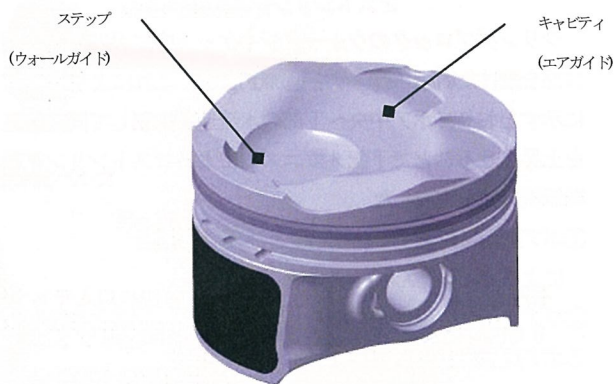


Fig.09 FB16DIT piston

4. 燃費性能向上技術

4.1 圧縮比の選定

FB16DITのコンセプトである燃費性能を追求するため、ハイオクガソリン仕様のFA20DIT ($\epsilon=10.6$) に対して、レギュラーガソリン対応させながらも、高圧縮比化に取り組んだ。

まずノック抑制を狙い、シリンダヘッド内の冷却回路を見直し、スパークプラグや排気バルブ周りの冷却改善を行った。さらに圧縮比を変えた試験を行い、最適解を導いた。

圧縮比を変更した場合のISFCと出力の関係をFig.10に示す。高圧縮比 ($\epsilon=11.0, 11.5$) とすることでISFCは改善するが、圧縮比を11.5まで上げるとISFC改善効果は少なくなる。

最終的には、出力と燃費のバランスから圧縮比11.0を採用した。

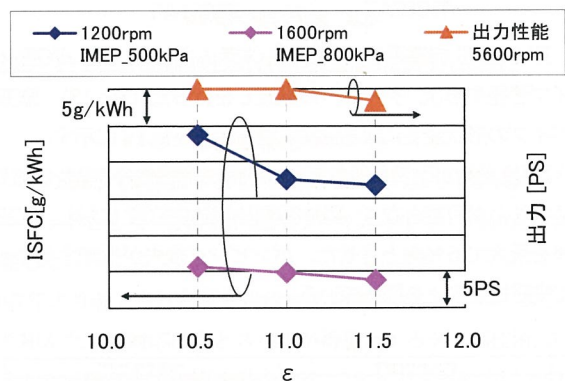


Fig.10 Effect of compression ratio

4.2 多段噴射領域の拡大

FB16DITは燃費改善を狙いファストアイドルに加えて走行中も多段噴射(吸気行程、圧縮行程で各1回噴射)を実施している。

同一噴射量の条件で単段から多段噴射にすると、吸気行程中の噴射量が減るため、気化潜熱による混合気温度低下がし難くなり、壁面からの受熱量が抑制される。更に、圧縮行程で2回目の燃料を噴射する事で気化潜熱を再度利用でき、圧縮上死点での筒内の混合気温度が低下する(Fig.11)。

噴射回数と噴射時期をエンジン回転数と負荷などの運転条件に応じ最適制御させ、均質度の向上、等容度改善、ISFC改善の効果が得られた(Fig.12)。

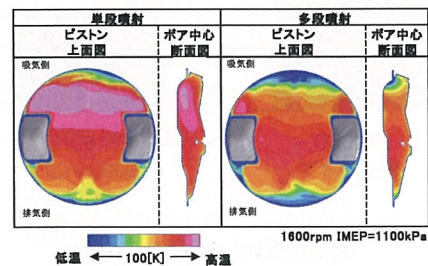


Fig.11 Comparison of temperature distribution (TDC)

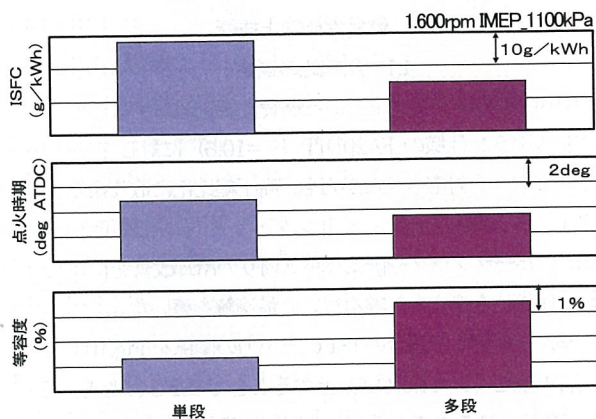


Fig.12 Effect of multiple injection

4.3 EGR システム

FA20DIT で採用した EGR システムをベースに、EGR パイプ管径や形状、クーラーの見直しを行った (Fig.13)。EGR パイプの形状変更による燃費改善効果を Fig.14 に示す。

EGR 分配が改善し各気筒管に均等で高流量の EGR を取り込むことが可能となり、FB16DIT は FA20DIT に対し、EGR 率を最大で 5% 向上させた。ポンピング損失が低減することで燃費性能向上を図っている。

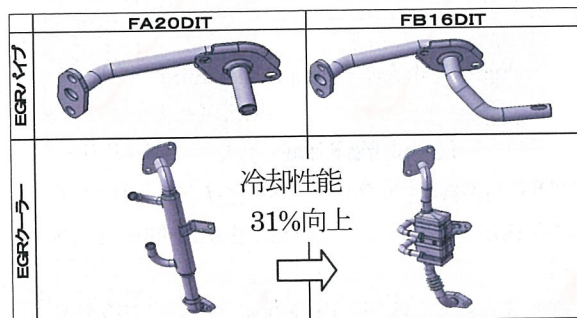


Fig.13 EGR pipe and cooler

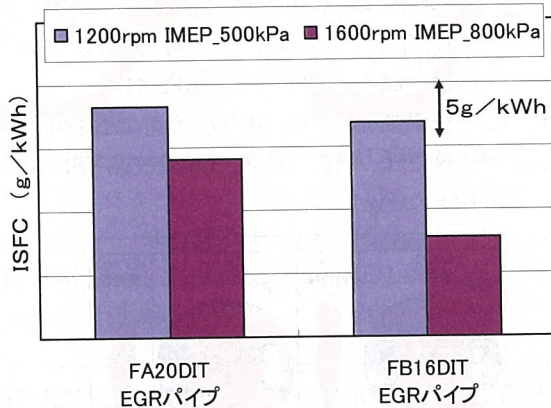


Fig.14 Effect of EGR pipe

4.4 フリクション低減

燃費性能の向上においてエンジン各部のフリクション損失

を低減させることが不可欠である。FB16DIT では FA20DIT の技術を継承しつつ、更なる新しいフリクション低減技術を採用した (Table.02)。

Table.02 List of low friction item

1	エンジンオイル低粘度化による摺動抵抗減
2	ピストン・コンロッド軽量化による慣性質量減
3	ウォータージャケットスペーサ (WJS) によるピストンリング摺動抵抗減
4	摺動部鏡面仕上げによる動弁系摺動抵抗減

4.4.1 エンジンオイル低粘度化による摺動抵抗減

オイル粘度を全温度域で FA20DIT より低減させることで、攪拌抵抗および摺動部の摩擦抵抗低減を図った。油温と油粘度の相関を Fig.15 に示す。高粘度指数基油を採用することで必要な摩擦耐力を確保した。

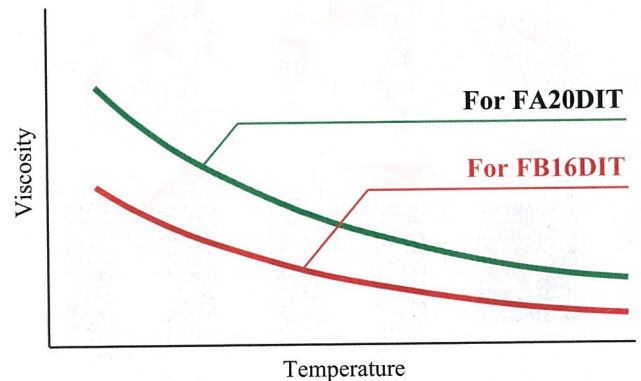


Fig.15 Viscosity property of engine oil

4.4.2 ピストン・コンロッド軽量化による慣性質量減

ピストン・コンロッドは FB16DIT の性能特性に合わせた新設計とし、ダウンサイジング効果も併せて FA20DIT 比▲28%の軽量化を実現した。

4.4.3 ウォータージャケットスペーサ (WJS) によるピストンリング摺動抵抗低減

シリンダブロックのウォータージャケット内にボア上部に開口部を設けた樹脂スペーサを追加 (Fig.16)。これにより Fig.17 に示すとおり、ボア中央～下部の水流速を抑制して同部壁温を上昇させることで下記メカニズムによるピストンリング摺動抵抗低減を実現した。

①ボア壁面に付着する油膜粘度と油膜厚さ低減

によるオイルせん断抵抗低減

②ボア上下間の温度差を減らしてフリクション悪化要因となるボア変形抑制

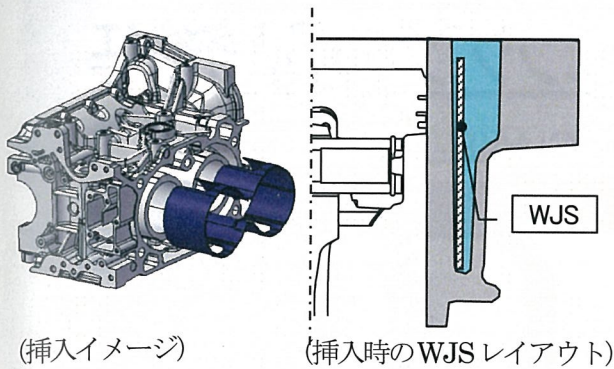


Fig.16 Water Jacket Spacer (WJS)

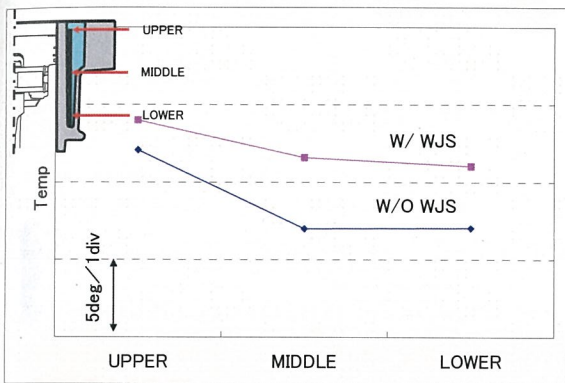


Fig.17 Temperature of cylinder bore

4.4.4 摺動部鏡面仕上げによる動弁系摺動抵抗減

Fig.18 で示す吸排気バルブのステム部及びカムシャフトのジャーナル部において、加工面を鏡面レベルまで磨きこんだ“鏡面仕上げ”とすることで摺動部の摩擦抵抗を低減させた。

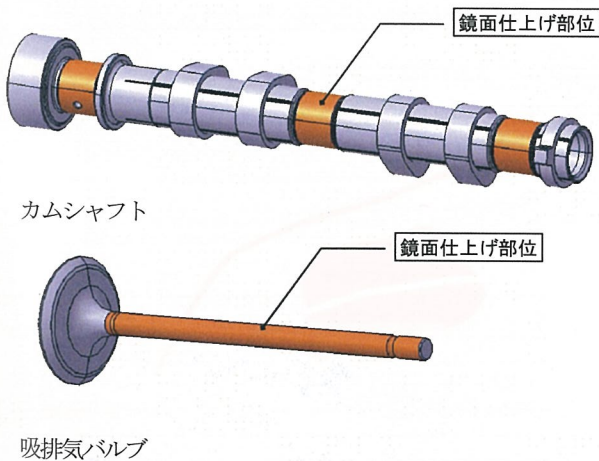


Fig.18 Area of mirror finish

上述アイテム以外にも細部にわたるフリクション低減策を織り込むことで Fig.19 に示すとおり FA20DIT 比▲18%のフリクション低減を実現した。

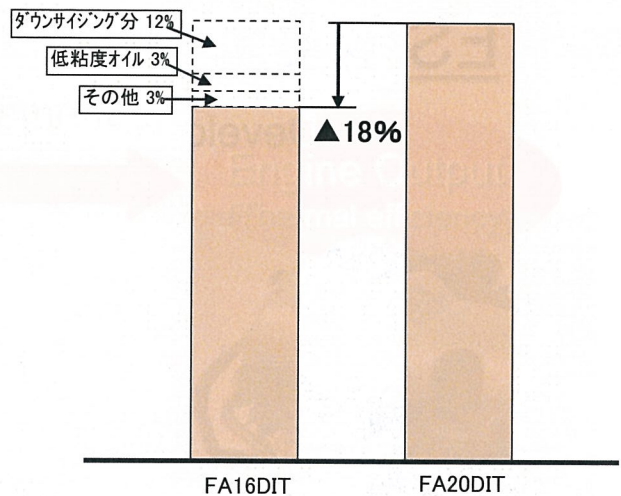


Fig.19 Friction comparison of FA1.6DIT and FA20DIT

5. まとめ

スバルの新時代を象徴する LEVORG に相応しい、国内専用パワーユニットとして、水平対向直噴ターボエンジン『FB16DIT』を開発した。

2010 年より導入された第三世代水平対向エンジンから一貫して取り組んだ環境対応技術とスバルが得意とするターボ技術、先に導入した直噴ターボ技術を融合させ、2.5 リッター相当以上の出力性能と圧倒的な燃費性能を高次元で両立させ、且つレギュラーガソリンで対応し、革新スポーツツアラーの名に恥じない最高のパワーユニットを提供できた。

参考文献

- (1) 永野ほか3名：水平対向直噴ターボガソリンエンジンの開発（第1報），スバル技報 No.39（2012）
- (2) 二神ほか5名：水平対向直噴ターボガソリンエンジンの開発（第2報），スバル技報 No.39（2012）
- (3) 竹内ほか11名：新型インプレッサの紹介，スバル技報 No.39（2012）
- (4) 石田ほか4名：非定常筒内流動ライトCAEの開発とPIVによる精度検証 第二報，スバル技報 No.36（2009）
- (5) 石田ほか5名：レーザー計測を用いた筒内非定常流動CAE解析の精度検証，第20回内燃機関シンポジウム，20090040（2009）
- (6) 中山ほか5名：ガソリン直噴エンジンの混合気濃度分布の解析，スバル技報 No.38（2011）