

# 論文 ガソリン直噴システム用新インジェクタの開発\*

## Development of a New Injector in Gasoline Direct Injection System

上田 信司  
Shinji UEDA

森 幸雄  
Yukio MORI

岩成 栄二  
Eiji IWANARI

小熊 義智  
Yoshitomo OGUMA

箕浦 陽介  
Yousuke MINOURA

The required fuel spray characteristics, controlled fuel pressure, and injector installation configurations in gasoline direct injection differ among manufacturers. As a result, there are currently a variety of injector types and configurations being proposed by many different component manufacturers.

This paper proposes a new injector design that both enables high fuel pressure operation by utilizing a highly efficient electromagnetic valve using a composite magnetic material for the injector actuator, and increases manufacturing productivity while also meeting the requirements of each engine manufacturer by simplifying the construction of the injector.

**Key Words :** Injector, Spray, Gasoline Direct Injection, Magnetic Material,

### 1. まえがき

近年、地球環境保護、温暖化防止の観点から、ガソリン直噴の低燃費とそれによる低CO<sub>2</sub>排出に着目し、多くのエンジンメーカーにてガソリン直噴エンジンの研究が進められ、市場での普及率も年々増加している。

そして、直噴エンジンの優位性を確保するため、各エンジンメーカーとも、エンジンの低負荷域ではより高回転域までの成層燃焼を、また高負荷域では均質燃焼による高出力を目指している。

しかしながら、各エンジンメーカーの燃焼コンセプトの違いにより、システム燃圧、噴霧形状、搭載形状が異なり、多くのコンポーネントメーカーから様々なインジェクタ方式、形状が提案されている<sup>1)</sup>。

本報では、インジェクタ駆動部に複合磁性材料を使用した高出力電磁弁を用いることにより、小型でかつ、高燃圧の作動も可能とし、また構成簡素化により、各エンジンメーカーの要求に応えつつ生産性を高めた新インジェクタを提案する。

### 2. 新開発インジェクタのコンセプト

新インジェクタ開発に当たり、我々は以下のようにコンセプトを設定した。

- ・小型で高いダイナミックレンジを持つ
  - ・部品組み替えによる要求仕様への対応容易化
  - ・構成簡素化による高生産性の実現
- である。

### 3. 開発品の特徴

Fig.1 に量産インジェクタ及び新開発インジェクタの概要を示す。量産品に比べ、新インジェクタは体格、部品点数、質量ともに約20%の低減されている。

新インジェクタはキー部品として複合磁性材料のスリーブを用いている。複合磁性材については後ほど詳述するが、これによりインジェクタの各部品形状及び設計を簡素化することができ、また一方向から組付可能な生産性の高い構造を考案することが可能となった。

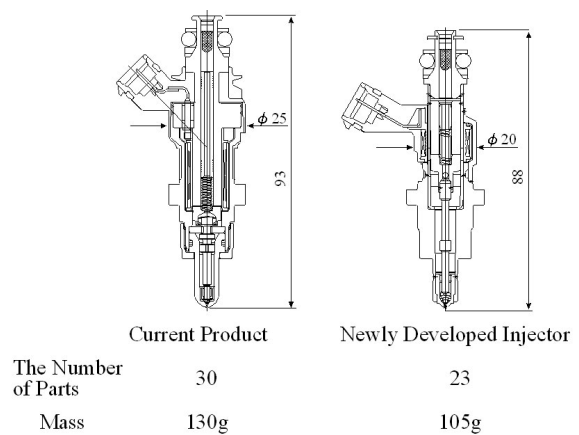


Fig. 1 Injector configuration

Table 1 に量産インジェクタと新開発インジェクタの諸元を示す。新開発インジェクタは従来インジェクタに比べ、制御燃圧範囲が広く、ダイナミックレンジ拡大が可能である。

\* SAE の了解を得て、SAE2000-01-1046 を和訳し加筆転載

Table 1 Comparison of Injector Characteristics

Injector Type	Current Product	Newly Developed Injector
Fuel Pressure	8 -13 MPa	6 -15 MPa
Static Flow Rate @12MPa	660 cm <sup>3</sup> /min	840 cm <sup>3</sup> /min
Dynamic Flow Range	Max. 55mm <sup>3</sup> /stroke @13 MPa	Max. 78mm <sup>3</sup> /stroke @15 MPa
	Max. 5mm <sup>3</sup> /stroke @8 MPa	Max. 5mm <sup>3</sup> /stroke @6 MPa

一般に、静的噴射量は噴孔面積を拡大、縮小することにより調節可能であるが、それに伴い、最小噴射量も増減し、ダイナミックレンジは変化しない。しかし、新開発インジェクタでは、高出力電磁弁により、従来と同等の最小噴射量を確保しつつ、静的流量を従来の約1.3倍とすることが可能となった。その構造的特徴を以下に示す。

#### 4. 構造的特徴

##### 4.1 燃料シール構造

従来、多くのインジェクタは燃料シールとしてOリングシールを用いている。当社量産インジェクタではOリングとハーメチックシールを用いている。それに対し新開発インジェクタでは、レーザ溶接により部品の固定と燃料シールを実現している。

##### 4.2 電気コネクタ部

量産品の電気コネクタ成形までの概略工程は、次のようになっている。まず、ステータコアに巻線用のボビンを挿入し、ボビンにターミナルを固定後巻線をする。巻線後ヨークを組み付け、ステータコアとヨークをレーザ溶接により固定し、その状態で電気コネクタをインサート成形している。

それに対し新開発インジェクタでは、コイル及び電気コネクタはモジュール化され、インジェクタ本体への組付は、スリーブにコイルモジュールを挿入し、その外側からプレス加工されたヨークをスリーブに溶接することにより固定されている。

コイルモジュールは完全に燃料と分離されているためシール構造が不要である。

##### 4.3 流量調整部

インジェクタの静的流量は、噴孔部流量とニードルがリフトしたときのシート部流量により決定される。

量産インジェクタでは、ニードルリフトをマッチング加工により決定している。新開発インジェクタではステータコアを精密圧入することによりリフトを決定している。リフト調整後、ステータコアはスリーブにスポット溶接により固定される。

##### 4.4 噴霧形成部

Fig.2に噴霧形成部を示す。噴霧形状は、エンジンメーカーの燃焼コンセプトにより要求特性が異なるため、噴霧形成部はエンジン取付部と別体構造とし、噴霧形成部の組み替えにより対応できる構造とした。

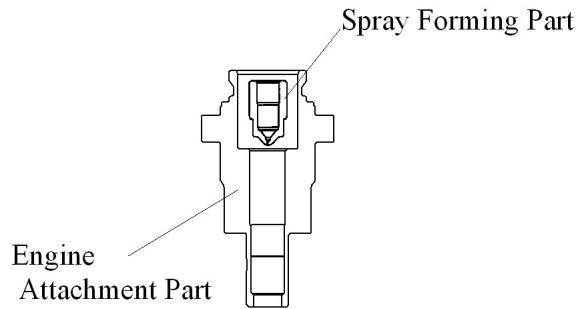


Fig. 2 Spray forming part

##### 4.5 エンジン取付部

Fig.3にエンジン取付状態を示す。

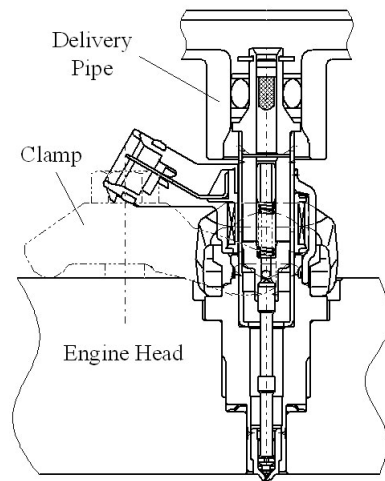


Fig. 3 Installation of the injector

エンジン搭載上重要なインジェクタ機能としては、エンジンヘッドへの固定部とエンジン筒内ガスのシール部である。量産品では、エンジンヘッドへの固定部はヨークと一体化されており、また、筒内ガスシール部は別部品であるリテーニングナットで構成されている。

それに対し新開発インジェクタでは、エンジンヘッドへの固定部と筒内ガスシール部が一部品で構成されており、エンジンヘッドへの固定部とガスシール部の位置関係を自由に設定することが可能である。

上記の結果、Fig.4に示すように、新開発インジェクタはすべて一方からの組付にて対応可能であり、組付ラインの自動化が容易である。

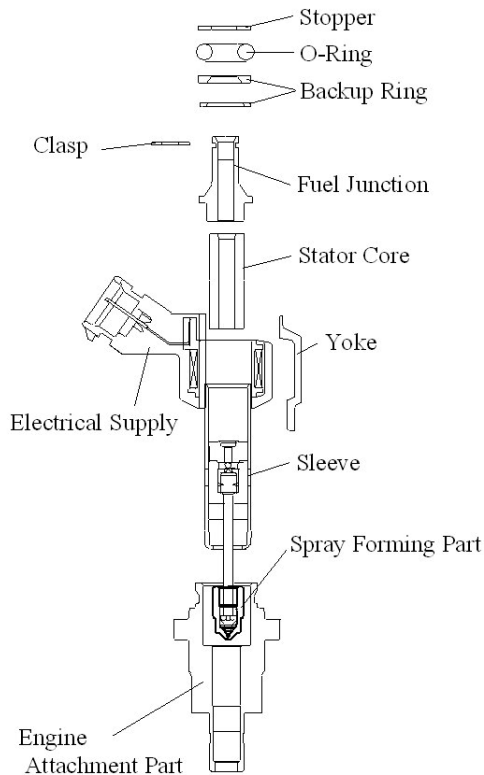


Fig. 4 Assembly process

4.5 電磁弁の構成 複合磁性材料の応用

本インジェクタの電磁弁構造と磁気回路をFig.5に示す。電磁弁は、ステータコア、ムービングコア、ヨーク、コイル、及びスリーブで磁気回路が構成されている。スリーブはインジェクタ内の燃料をシールすると同時に、磁気を効率的に流すために、ステータコアとムービングコアの対抗部周辺は非磁性が望ましく、ステータコアとヨーク間、ムービングコアとヨーク間は強磁性が望ましい。

そのため、従来の低圧用インジェクタではFig.6に示すように非磁性材と磁性材を溶接により接合し磁気回路を構成している。しかし、その場合、溶接工数及び溶接部の信頼性確保が必要である。そこで我々は、本インジェクタのスリーブに、非磁性部及び強磁性部を一部材で構成可能な複合磁性材の使用を検討するこ

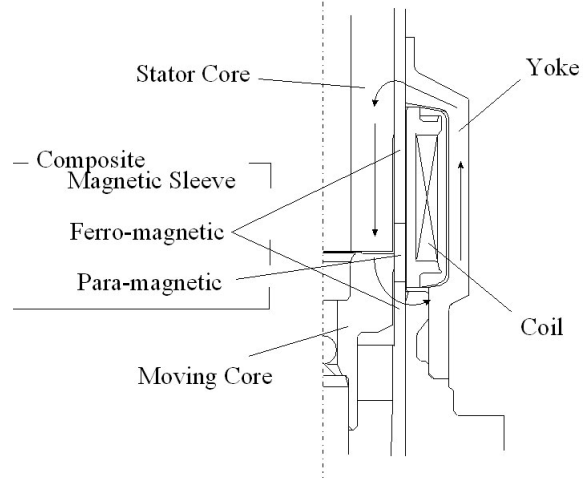


Fig. 5 Magnetic circuit

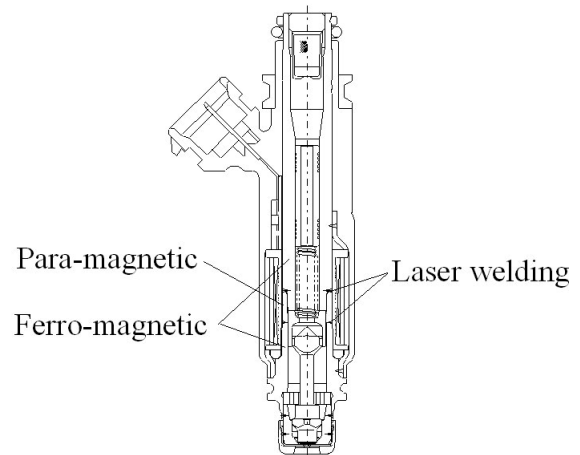


Fig. 6 Injector for Port-Injected Engine

ととした。

複合磁性材料の素材は非磁性であるオーステナイト系ステンレスである。オーステナイト系ステンレスは溶体化状態ではオーステナイト組織であり、冷間加工することによりマルテンサイト組織へと変態し、強磁性を示すことは知られている。このマルテンサイトの一部を加熱しオーステナイトに戻すことにより複合磁性材料は得られる。しかしながら、従来から有るオーステナイト系ステンレス、例えばSUS304<sup>2)</sup>では冷間加工によるマルテンサイトへの変態量が少なく、十分な磁気特性は得られない。

そこで、テストサンプルにて70%冷間圧延後の強磁性特性B40と、さらにこれらを熱処理し、オーステナイトに逆変態させたときの比透磁率のHeq<sup>3)</sup>に対する特性をFig.7に示す。

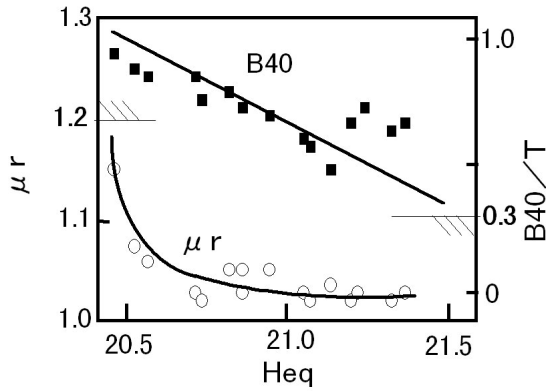


Fig. 7 Variation of magnetic properties as a function of Hiramama & Ni equivalent : Heq

Heqは平山のNi当量<sup>4)</sup>であり、Heqは下式で表される。

$$\text{Heq} = [\text{Ni}] + 0.65[\text{Cr}] + 0.98[\text{Mo}] + 1.05[\text{Mn}] + 0.35[\text{Si}] + 12.6[\text{C}]$$

ここで、[Ni]、[Cr]等は材料中の各構成元素の質量%を示す。Fig.7より、磁気特性を最大限に活用できる化学組成を得ることができる。Heqを20.5～21.5の範囲に管理することにより、磁束密度 0.3T(B40)及び比透磁率 1.2を得ることができる。上記の材料によるスリーブの製造工程をFig.8に示す。

次に、この複合磁性材料の磁束密度が最小のときのインジェクタ吸引力特性を示す。スリーブ以外の磁気回路構成部品であるステータコア、ムービングコア、ヨークは従来インジェクタで使用している13Cr電磁ステンレスを使用している。複合磁性材の磁気特性が0.3T@B40を想定し、このときの吸引力特性を動磁場解析にてシミュレートした結果を、量産インジェクタと比較しFig.9に示す。電磁弁駆動回路はコンデンサ容量：10μF、コンデンサ電圧：150Vで計算されている。

この結果より、新開発インジェクタは従来インジェクタに比べ吸引力が18%向上し、制御燃圧も量産品の13MPaに対し、15MPaまで向上している。

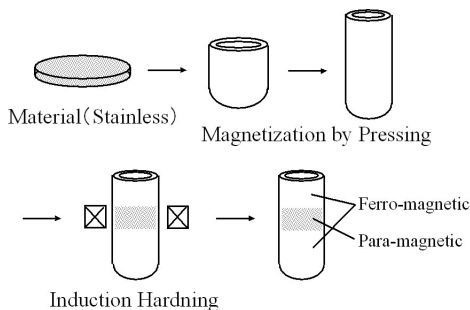


Fig. 8 Composite magnetic material

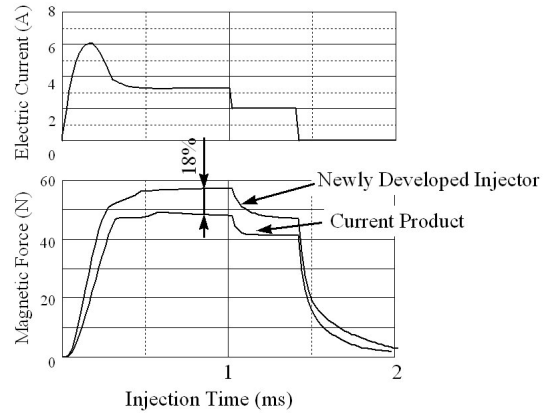


Fig. 9 Magnetic force

#### 4.7 噴霧形成

噴霧はエンジン性能を決める重要特性であり、各エンジンメカの燃焼コンセプトにより要求特性が異なる。そこで、噴霧形成部はその他の部材とは別体構造とし、噴霧形成部のみの変更によりその要求に応えられる構造とした。

まず、スワール噴霧について示す。構成は、Fig.10に示すように、エンジン取付部、噴霧形成部、スワラー、ニードルにより構成される。

実際に噴霧を観測した結果をFig.11に示す。

一般に、噴霧軸方向はインジェクタ搭載角度及びエンジンのピストン形状により決定される。

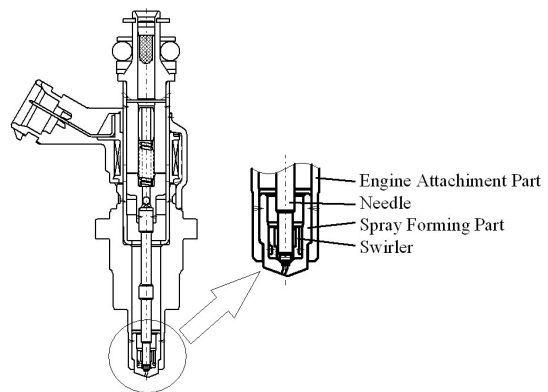


Fig. 10 Construction of swirl injector

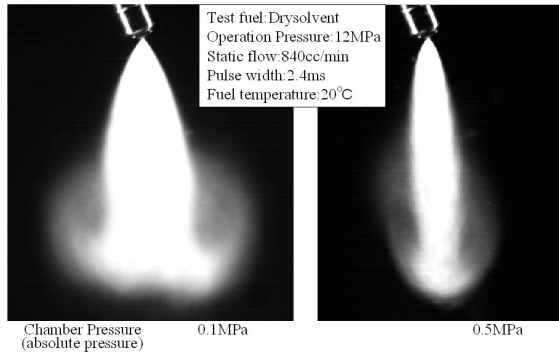


Fig. 11 Swirl spray

これに対し、トヨタD-4にて採用されたファン噴霧を構成する噴霧形成部について説明する。

Fig.12に噴孔部の形状を示す。噴孔形状は非常に薄い扇状であり、噴射軸方向はインジェクタ搭載角度及びエンジンのピストン形状により決定される。

噴孔の加工はFig.13に示す微細放電加工により形成される。

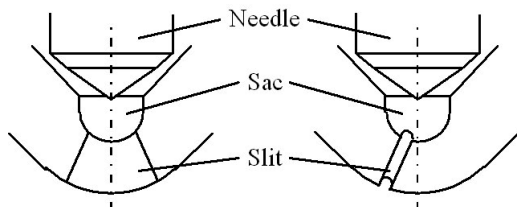


Fig. 12 Slit nozzle

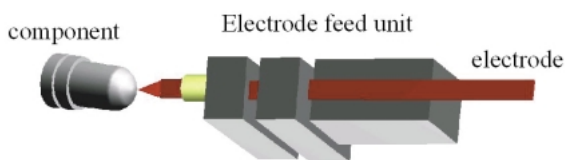


Fig. 13 Fine electric discharge processing

この噴孔形状により、いかに扇状に広がる噴霧が形成されるかを検証するため、サック内及び噴孔内の燃料の流れ解析結果をFig.14及びFig.15に示す。この結果より、ニードル開口部よりサック内に流れ込んだ燃料がスリット内で広がり、扇状に噴射されることがわかる。また、この噴霧形状は噴孔の加工寸法によりコントロールすることができる。

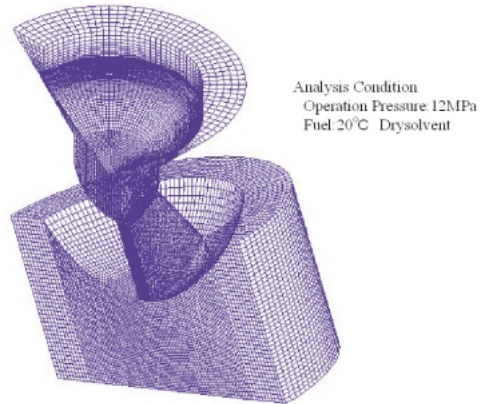


Fig. 14 Flow analysis (1)

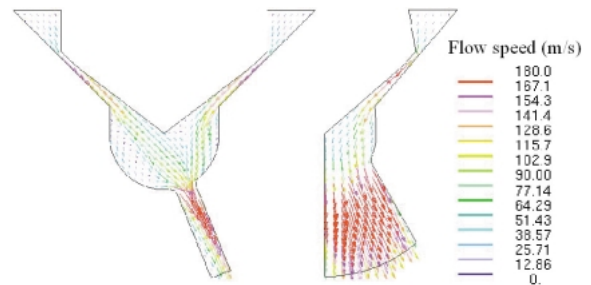


Fig. 15 Flow analysis (2)

次に実際の噴霧を観察した結果をFig.16に示す。

これは大気圧場にて噴射開始2ms後の噴霧形状をストロボ発光により撮影したものである。正面からの噴霧は扇状となり、側面からは薄い扁平の噴霧形状であることがわかる。また、Fig.17に示すレーザシート法による濃度分布測定結果からも、ほぼ均質な扁平の噴霧であることがわかる。

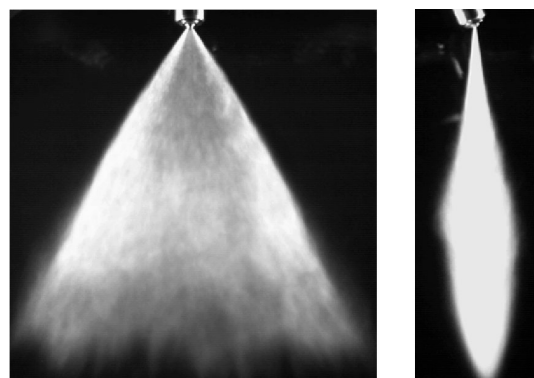


Fig. 16 Fan Spray Patterns

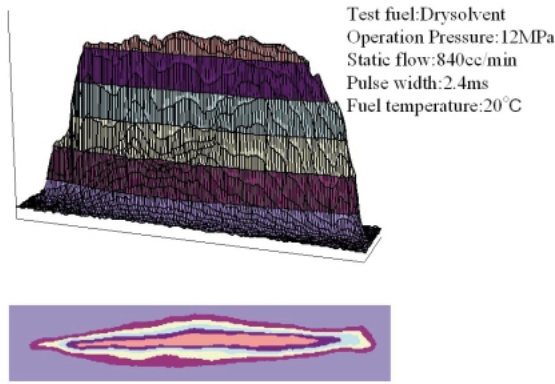


Fig. 17 Spatial Distribution

### 5. むすび

本報告では、次世代インジェクタとして以下の提案をした。

インジェクタ駆動部の磁気回路及び燃料シールに複合磁性パイプを用いることにより、量産インジェクタに対し吸引力特性を18%向上させ、噴射特性を

向上した。

エンジン取付部及び噴霧形成部を別体とし、エンジン側の搭載及び噴霧要求に対応可能な構成とした。コイル及び電気供給部をモジュール化させ、シール構造を簡素化した。

上記 ~ により全て一方向からの組付が可能であり、組付ラインの自動化を容易とした。

### <参考文献>

- 1) C.Preussner,C.Doring,S.Fehler and S.Kampmann: " GDI:Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance ", SAE980498
- 2) JIS G 4305:1999(J)
- 3) Y.Tanimura,K.Takeuchi,T.Terada,S.Sugiura and Y.Katayama: " Compact Magnetic Solenoid Valves Using a Composite Magnetic Material ", SAE970852
- 4) T.Hirayama and M.Odagiri: " Journal of the Japan institute of metals ", Vol.34,No.5 (1970)

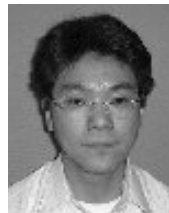
---

### <著 者>



上田 信司  
(うえだ しんじ)

エンジン機器技術2部  
ガソリン直噴インジェクタの開発に従事。



小熊 義智  
(おぐま よしとも)

エンジン機器技術2部  
ガソリン直噴インジェクタの開発に従事。



森 幸雄  
(もり ゆきお)

エンジン機器技術2部  
ガソリン直噴,EFIインジェクタの開発に従事。



箕浦 陽介  
(みのうら ようすけ)

エンジン機器技術2部  
ガソリン直噴インジェクタの開発に従事。



岩成 栄二  
(いわなり えいじ)

エンジン機器技術2部  
ガソリン直噴インジェクタの開発に従事。