

特集 耐消耗性に優れた低コスト高着火性スパークプラグの開発*

Development of a Low Cost Spark Plug with High Ignitability and Excellent Wear Resistance

中尾 裕史

Hiroshi NAKAO

端 無 憲

Ken HANASHI

中村 義裕

Yoshihiro NAKAMURA

横山 泰二

Taiji YOKOYAMA

A Spark plug used in small vehicles is required both ignitability and low cost in addition to good wear resistance. Currently high ignitability spark plugs cannot satisfy the requirements of low cost due to the use of precious metals like Platinum and Iridium on their electrode and the use of complex manufacturing processes. In order to solve these problems we have developed an excellent wear resistant material and simple fine-emboss electrode based on this new material, and which does not use precious metals and welding. We have introduced these technologies in a new Super Ignition Spark Plug. As a result, we have achieved high ignitability, low cost and high wear-resistance in a new spark plug.

Key words: Spark ignition engine, Spark plug, Ignition system, Super ignition plug, Fine-emboss electrode

1. はじめに

ガソリンエンジンの高効率化, 低エミッション, 省燃費, メンテナンスフリーなどのニーズに対応するため, スパークプラグには高着火性と長寿命が求められてきた。高着火性は, プラグ電極部で発生する火花をいかに強くすることが鍵で, そのためにはプラグの電極を細くする必要がある。反面, 電極の消耗はエンジンの燃焼室内の高温, 酸化雰囲気で発生する材料の酸化や火花によるスパッタによる体積減少であり, これを向上させるには電極の径を太くする必要がある。これら相反する要求を満たすため, デンソーは独自開発のイリジウム合金を採用し, $\Phi 0.7$ mm の中心電極径で高着火性を実現しかつ長寿命を両立したイリジウムプラグや, 接地電極にも $\Phi 0.7$ mm 細径の白金合金を採用することにより, 究極の高着火性ならびに長寿命を両立させた高着火性イリジウムプラグを製品化した。

しかし, 地球環境保護意識の高まりから, 燃費規制¹⁾³⁾ 排ガス規制は世界的に更に厳しくなる傾向にあり, ガソリンエンジンはリーン化, 高スワール化で非常に着火しにくい環境になりつつある。このエンジンは高級車のみならず最近では小型車まですべてのカテゴリーの自動車に採用されつつあり, スパークプラグに対する着火性向上の要求が高まってきた。特に小型車においては着火性と低コストの両立が求められており, 貴金属チップを用いて電極を細径化したスパークプラグでは高コストのため, この要求に応えることができない。

低コストである従来のニッケル材を電極に用いたスパークプラグでは, 着火性を向上させるために電極を

細径化した場合, 電極の消耗が大幅に増加してしまい, 寿命の低下となる。

これらの低コストと高着火性を両立させるため, 耐消耗性に優れたニッケル材料を開発し, 貴金属チップを用いることなく電極を細径化することを実現した。

本論文では低コスト, 高着火性スパークプラグの開発について紹介する。

2. 電極材料の開発

プラグの消耗は電極材の酸化消耗, 放電によるスパッタ消耗, 高温による溶融が大きな要因として考えられている。特に酸化消耗は材料が高温雰囲気下で酸化することにより母材から剥離が発生する。材料の酸化抑制には, 特にクロムの添加量を増加させることは耐酸化性に効果が大きいことがこれまでの研究で知られている。現在量産されているスパークプラグの接地電極はほとんどが耐酸化性向上のため添加元素を 20% 以上含有している。しかし, クロムなどの添加元素の量を増やし, ベース金属としての純度が下がると, 結晶格子にひずみが生じ, 原子間結合力が低下するため, 火花エネルギーによるスパッタリング現象により消耗が増加し, Fig. 1 のように耐火花消耗性が悪化してしまう。また, 純度が低下すると, 結晶格子の振動や自由電子の動きが阻害されるため, 熱伝導が悪化してしまう。即ち現在, 量産されているスパークプラグの接地電極は耐火花消耗性, 熱伝導を犠牲にしている。

従来はスパークプラグ用電極の耐酸化性と耐火花消耗性, 熱伝導性は相反する特性であり, 同時に向上させ

* 2009年9月28日 原稿受理

ることが難しいと考えられていた。しかし、今後の市場ニーズを満足させるためには、これらの特性を同時に向上させることが必要であると捉え、材料開発に取り組んだ。Fig. 2 に材料開発の位置付けを示す。

開発にあたり、従来の添加元素量を増加させていく手段とは逆に、いかに少ない添加元素量で目標を達成するかに着目した。具体的には純ニッケル材をベースとすることで、耐火花消耗性、熱伝導を大幅に向上させ、耐酸化性については熱伝導を向上させることによる温度低減効果と、極微量の元素を添加することによる酸化保護層形成により、酸化抑制を目指す。また、元素の添加量については上述したように添加量を増加させると耐火花消耗性が悪化するため、Fig. 3 に示すように純ニッケル材と比較して耐火花消耗を大幅に悪化させない2%以下の添加を目指す。

2.1 第一添加元素の検討

純ニッケル材をスパークプラグの接地電極として適用する上で最大の問題点は強度不足である。純金属では結晶粒の成長が大きく、結晶粒界のはたらきが弱くなり、機械的強度が低下する。また、高温下においては

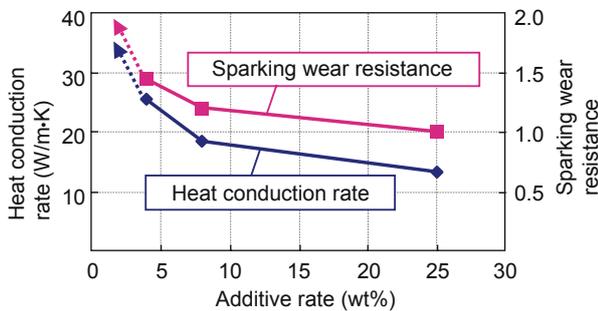


Fig. 1 Influence of additive rate

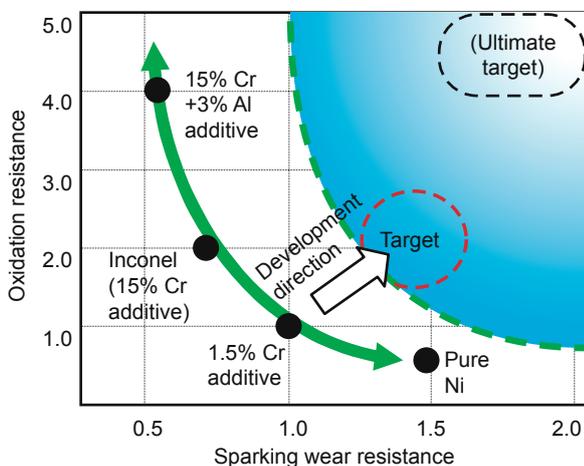


Fig. 2 Development target

ニッケル結晶粒界に酸素が容易に進入し、粒界の酸化が進行して粒界のはたらきを更に低下させ、強度低下を加速させる。金属の粒界酸化抑制には、イットリウムを微量添加することが最も効果的であることが過去の評価で分っている。その添加量については、ニッケルへの固溶限界である0.04%を上限とし、ニッケル-イットリウム合金 (Ni-Y) をベース材として検討した。

はじめに、Ni-Y電極のサーベイ評価とし、エンジン冷熱耐久試験を実施した。100時間後の接地電極先端の外観と断面を Fig. 4 に示す。Ni-Y材は電極の折損もなく、結晶粒界に亀裂の発生もなく良好な状態である。また火花消耗もインコネル材が電極先端部で消耗しているのに対し、Ni-Y材はほとんど消耗しておらず、耐火花消耗性が大幅に向上している。

ニッケルに微量のイットリウムを添加することで電極の折損防止および耐火花消耗性の大幅向上を達成することができたが、Ni-Y材を詳しく観察すると、表面が

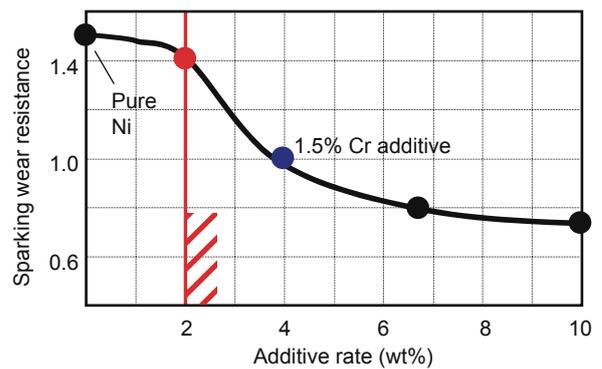


Fig. 3 Sparking wear vs additive rate

Engine: Inline 6, 3.0 Liters
Thermal cycle test

| | Appearance | Section |
|---------|------------|------------|
| Ni-Y | | |
| Pure Ni | | (breakage) |
| Inconel | | |

Fig. 4 Evaluation of material property of electrode

かなり荒れており、粒の発生が見受けられる。この粒の成分分析結果を Fig. 5 に示す。分析の結果、カリウムやリンなどの燃料やオイルに含まれる成分が検出され、酸素は検出されていない。このことから、電極表面の粒は酸化物ではなく、燃焼ガスの残留物による表面侵食であることが分かる。

2.2 第二添加元素の検討

次に Ni-Y 材の燃焼残留物による表面侵食防止策として、Ni-Y 材に新たに別元素を微量添加し、その元素の酸化保護層を電極表面に形成させる。微量添加する元素の選定にあたってはニッケルより酸素と結合しやすく、且つ微量で安定した酸化保護層を形成することができる元素の中から Ni-Y 材の融点、熱伝導を低下させない元素を選定した。物性調査結果からアルミニウム (Al)、シリコン (Si)、ハフニウム (Hf) が上記要求を満たす元素である。

選定した元素を Ni-Y 材に微量添加した電極を再びエンジン冷熱耐久試験を実施し、添加元素の効果を調べたところ、Fig. 6 に電極外観を示すとおり、シリコンがもっとも粒の抑制効果が高いと言える。

2.3 第三添加元素の検討

ここまでの検討により、ニッケルに微量のイットリウムとシリコンを添加 (Ni-Y-Si 材) することで、強度、燃焼残留物に対する耐侵食性低下をさせずに、耐火花消耗性を大幅に向上させることができた。しかし、開発した Ni-Y-Si の耐久試験後の断面を観察したところ、Fig. 7 に示すように酸化層が電極表面だけでなく、電極内部にまで進行している。

この電極を EMPA 分析したところ、シリコンの酸化物が表面だけでなく電極内部にまで拡散し、更にニッケル結晶の粒界および粒内で断続的に粗大化し、酸素

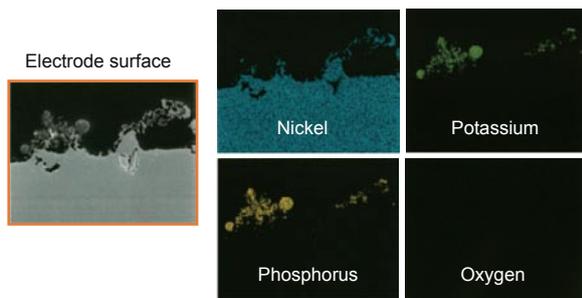


Fig. 5 Surface analysis of Ni-Y electrode

の侵入を抑制できていない。これは、ニッケル中におけるシリコン酸化物の拡散速度が速いため、シリコン酸化物がニッケルの結晶粒内に進行し、ニッケルの内部酸化が深くなっているためと推定できる。そこで、内部酸化を抑制するため、第三の元素としてシリコンより酸素と結合しやすく、またシリコンより酸化物の拡散が遅く、且つ Ni-Y-Si 材の融点、熱伝導を低下させない元素を選定した。物性調査の結果、チタン (Ti)、ニオブ (Nb)、ジルコニア (Zr)、ホウ素 (B) を選定し、Ni-Y-Si 材に微量添加し、再度エンジン冷熱試験を実施した。その結

Engine: Inline 6, 3.0 Liters
Thermal cycle test

| Material | Appearance |
|----------|------------|
| Ni-Y | |
| Ni-Y-Al | |
| Ni-Y-Hf | |
| Ni-Y-Si | |

Fig. 6 Surface erosion comparison

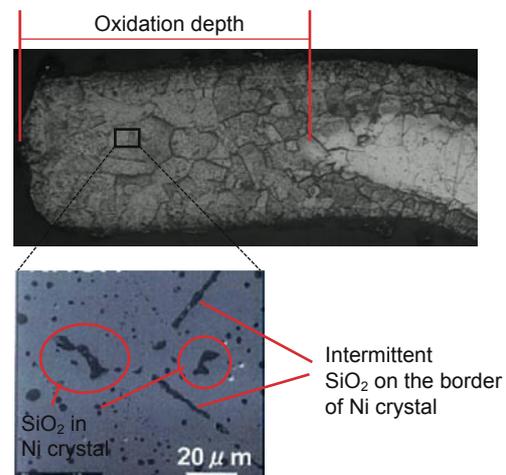


Fig. 7 Oxidation analysis of Ni-Y-Si Electrode

果, チタンを微量添加した材料が酸化抑制に一番効果があった. Fig. 8 に断面写真を示す.

冷熱耐久試験で評価した Ni-Y-Si-Ti 電極を EPMA 分析したところ, ニッケル結晶粒界および粒内でチタンがシリコンより先に酸素と結合して安定した微細な酸化物を形成しニッケル内部での酸素を抑制している. また, シリコンは電極の表面のみで酸素と結合し酸化保護層を形成しており, Fig. 9 に示すとおり, 良好な耐酸化性が得られている.

以上の検討より, ニッケルに微量のイットリウム, シリコン, チタンを添加することにより, Fig. 10 に示すように耐火花消耗性を従来材の 1.5%クロム材と比較し, 耐火花消耗性を 1.4 倍, 耐酸化性を 1.8 倍まで向上させることに成功している.

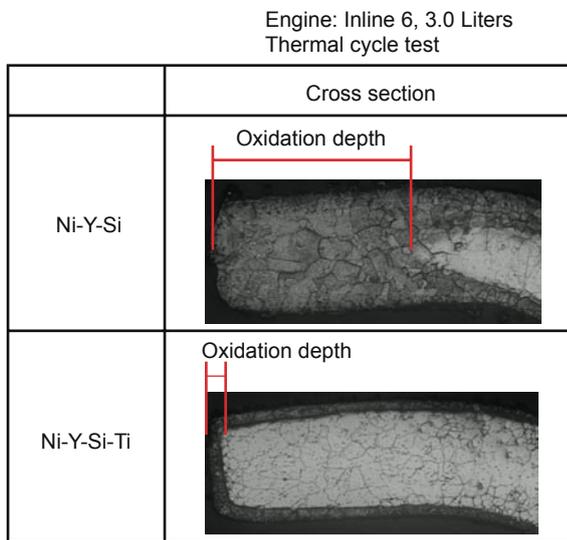


Fig. 8 Oxidation depth comparison

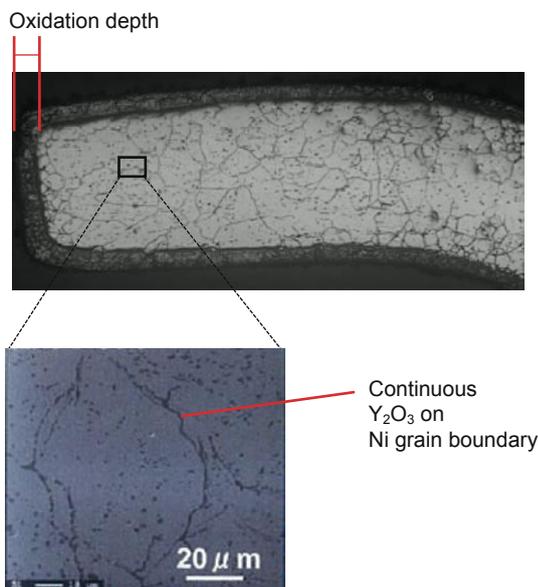


Fig. 9 Oxidation analysis of Ni-Y-Si-Ti Electrode

3. 貴金属チップを用いない細径電極の実現

3.1 接地電極細径化

従来のスパークプラグにおける細径化の方法は, 細径貴金属チップを溶接するというものであった. しかしこの方法では貴金属の材料コスト, 溶接する製造工数が増大してしまう. そこで今回の開発では, 接地電極母材を直接加工して細径形状を実現している. 具体的な方法として, 開発した電極材 (Ni-Y-Si-Ti) の特長の一つである材料の軟らかさを生かして, 接地電極を中心電極方向に押し出して細径形状を成形している. Fig. 11 にその概念図を示す. この製法により従来の細径電極スパークプラグと比較して材料コスト, 製造工数ともに削減することが可能である.

3.2 高着火性プラグの仕様

新しく開発した電極材料の特長を最大限に活用し, 中心電極径を $\Phi 1.5$, 接地電極は直接加工による $\Phi 1.5$ 細径形状とし, 従来のニッケルプラグの中心電極径 $\Phi 2.5$ に対し, 着火性を大幅に向上させた「高着火性スパークプラグ」を開発した. Fig. 12 に従来形状であるニッケルプラグおよび本開発により実現した高着火性スパークプラグの基本仕様を示す.

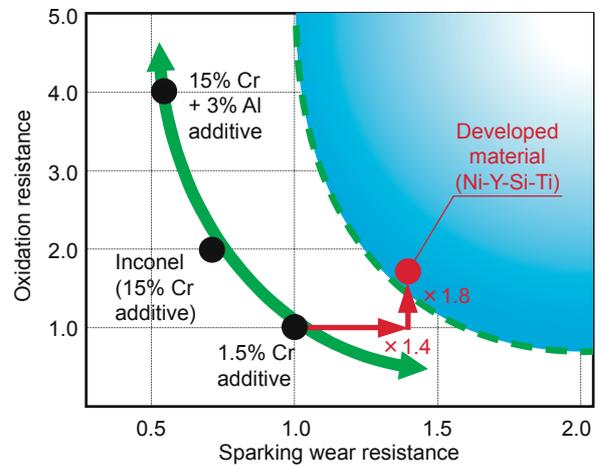


Fig. 10 Development result

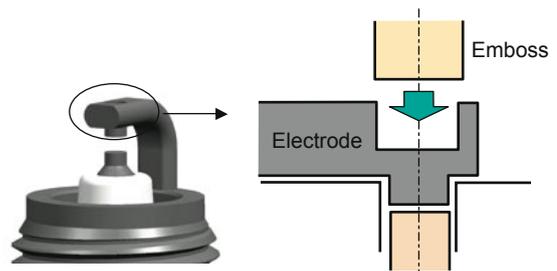


Fig. 11 Fine ground electrode process

4. 高着火性スパークプラグの効果

4.1 火炎成長の観察

高着火性プラグの効果を確認するため、可視化エンジンを用いてシュリーレン撮影により火炎成長観察を行った写真を Fig. 13 に示す。高着火性プラグは従来ニッケルプラグと比較して火炎の広がりが大きく、良好な着火性である。⁴⁾

4.2 細径接地電極の温度確認

今回開発した高着火性プラグはその開発材料が熱伝導に優れており、従来プラグと比較して耐熱性が問題となることはない。その検証した結果を Fig. 14 に示す。可視化エンジンにより、スパークプラグの電極温度分布を計測し、電極の先端温度を記載したものである。これにより接地電極が突き出しているにもかかわらず、従来のニッケルやイリジウムプラグと比較しても接地電極温度が低く、耐熱性に問題がないことが分かる。

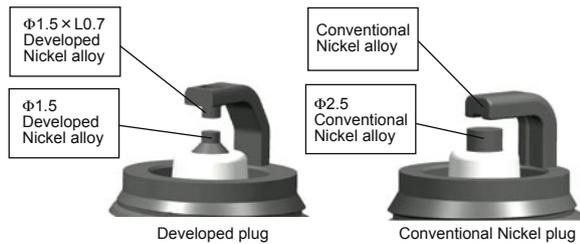


Fig. 12 Basic specification

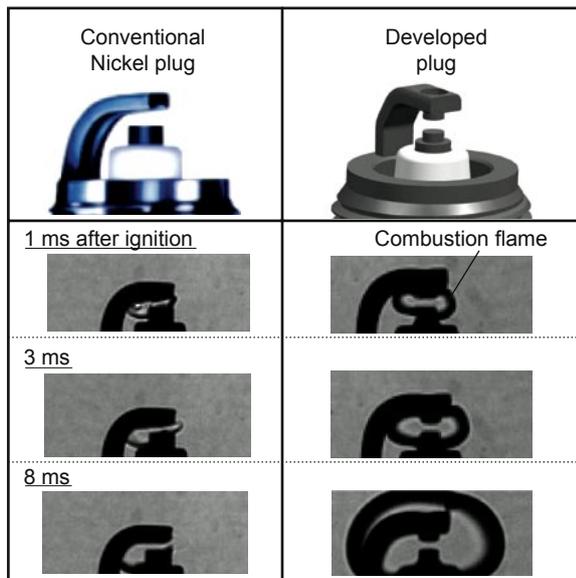


Fig. 13 Combustion flame comparison

4.3 燃費向上

次に Fig. 15 に 0.66 L, 3 気筒エンジンにてアイドリング時のリーン限界と燃費（5 分間の燃料消費量）を計測した結果を示す。評価は ISC (Idle speed control) を作動させ、平均回転数を 700 r/min にセットした状態で実施している。

高着火性プラグは従来ニッケルプラグに対して燃焼変動を大幅に抑制することができ、燃費を 2% 向上させることができる。また、高着火性プラグは A/F をリーンに設定することができ、更なる燃費向上効果が期待できる。

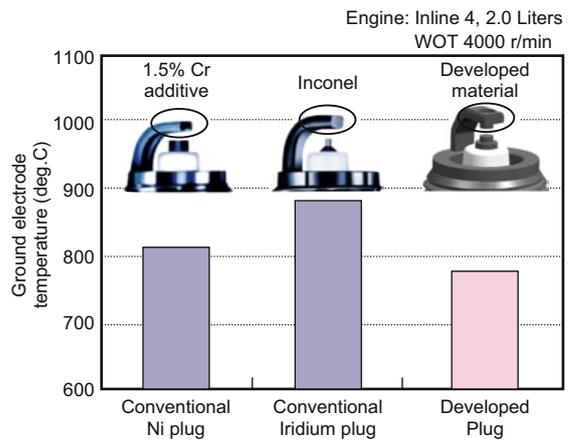


Fig. 14 Ground electrode temperature

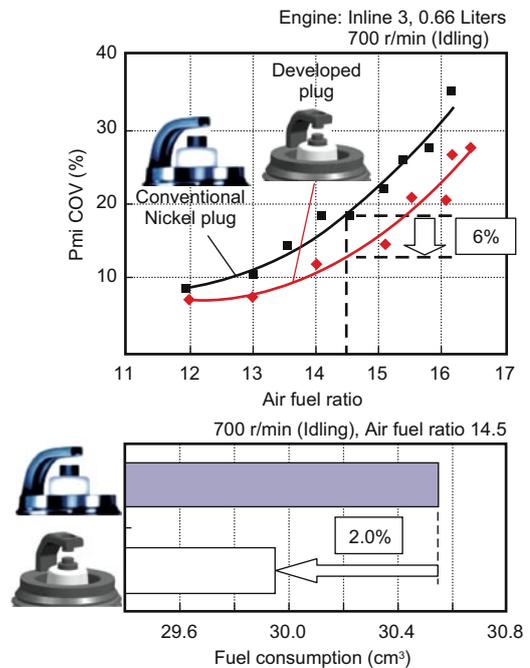


Fig. 15 Pmi COV, Fuel consumption comparison

5. おわりに

本研究では、耐酸化性、耐消耗性に優れた電極材料の開発に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) ニッケル母材への添加量を最小限にとどめ、かつ最適な元素を添加することで、電極の耐酸化性と耐消耗性を同時に向上させることができる。
- (2) 開発した材料の特長を生かし、貴金属合金を用いない「高着火性プラグ」を実現した。
- (3) 貴金属合金を用いない高着火性プラグにより、コストを大幅に上昇させることなく、燃費向上を実現することができる。

今後、燃費・エミッション等の規制強化に対し、本研究により開発された「高着火性プラグ」が燃焼改善の一助となることを期待して結びとする。

<参考文献>

- 1) 長村弘法: 高性能長寿命イリジウムプラグの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.67-99, pp. 17-20 (1999).
- 2) H.Osamura: Development of New Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes, SAE1999-01-0796 (1999).
- 3) Tsunenobu Hori: Super Ignition Spark Plug with Fine Center & Ground Electrodes, SAE2003-01-0404 (2003).
- 4) 頼田浩: 火花点火機関における点火・着火解析手法の開発, 第17回内燃機関シンポジウムテキスト, pp. 199-124 (2002).



<著 者>



中尾 裕史
(なかお ひろし)
エンジン機器技術部
スパークプラグの開発・設計に従事



端無 憲
(はなし けん)
エンジン機器技術部
スパークプラグの開発・設計に従事



中村 義裕
(なかむら よしひろ)
エンジン機器技術部
スパークプラグの開発・設計に従事



横山 泰二
(よこやま たいじ)
エンジン機器技術部
スパークプラグの開発・設計に従事