

論文 高性能長寿命イリジウムプラグの開発*

Development of High Ignitability and Long Life Iridium Spark Plug

長村 弘法

Hironori OSAMURA

阿部 信男

Nobuo ABE

The development of a long life and high ignitability spark plug has become essential in response to the future engine revolution tasks. While improving ignitability, the discharge part of the spark plug needs to be reduced in size.

However, this has been quite difficult because of the limitations by current platinum alloys in terms of wear.

To dramatically improve spark plug wear resistance, we researched electrode materials and developed new precious metal iridium-rhodium alloy which is four times as resistant to wear as current platinum alloy.

Through this development we have been able to produce an iridium spark plug that surpasses the conventional platinum technology. The new iridium spark plug was used in high volume vehicle production for the first time in the world. And now, this is being used increasingly in various fields given the trends in engine development.

Key Words : Iridium Spark Plug, Iridium Rhodium Alloy, Long Life, High Ignitability

1. まえがき

地球温暖化の抑制、環境汚染防止の観点より、エンジン研究開発は、『低燃費』及び『低エミッション化』が主要な課題となっている。これらのエンジン課題に対し、スパークプラグは希薄燃焼化、高スワール化、大量EGR等、一層厳しい着火環境にさらされ、従来にも増して燃焼安定性の実現が求められている。

この要請に答えるためには、着火性の向上を狙いプラグ電極を細径化することが最も効果的である。細径電極は火炎核成長を抑制する消炎作用が少なく、燃焼が悪化する条件下でも確実な着火を可能にすることができる。しかし、従来の白金合金材料では電極消耗抑制に限界があり、細径化と寿命の両立は極めて難しいとされてきた。

今回、耐消耗性の飛躍的向上を狙い、高融点・耐酸化性を併せ持つ新材料の研究に取り組んだ。その結果、現状の白金プラグに対し、寿命・性能を圧倒する次世代プラグを実現した。(Fig.1)

本報では、その材料開発経緯、及び究極の細径プラグについて、その特性を紹介する。

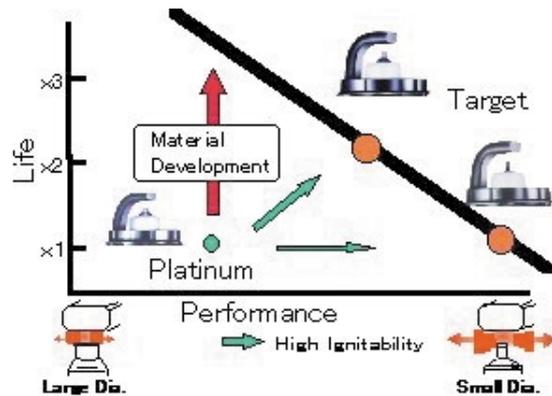


Fig. 1 Spark plug Development concept

2. 開発課題

プラグの電極消耗は、火花エネルギーにより、放電部が局所的に溶融飛散する火花消耗と、高温燃焼雰囲気下での酸化消耗からなり、耐消耗性を向上させるためには、双方を改善する必要がある。Fig.2は、各種高融点材料についての火花消耗及び、1000 での酸化消耗を示している。横軸が火花消耗比(Pt=1)、縦軸が酸化消耗比(Pt=1)を示す。白金より融点が約700 高いイリジウムの耐消耗性ポテンシャルは白金より高いことがわかる。

* SAE の了解を得て、SAE1999-01-0796 を和訳し加筆転載
 *(社)自動車技術会の了解を得て、1999 年秋季大会学術講演会前刷集・発表No.5 より加筆転載

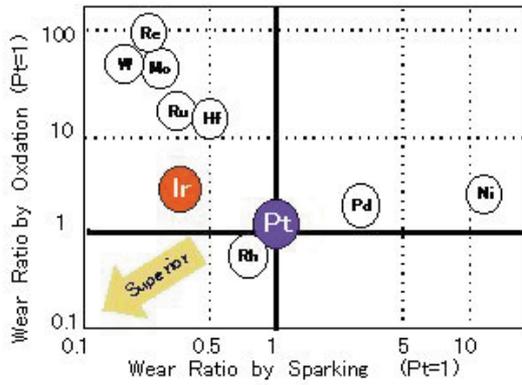


Fig. 2 Combined Effect on Wear Resistance

エンジン実機でのイリジウムの耐消耗性をFig.3に示す。イリジウムは一般走行において10万km走行後でもほとんど消耗が認められず、耐消耗性は良好である。

ただし、高温耐酸化性には難があり、特に高負荷運転時、酸化揮発による異常消耗が発生することがわかった。そこで我々はこのイリジウムの耐酸化性改善に取り組んだ。

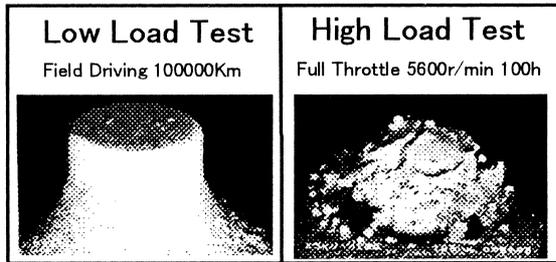


Fig. 3 Endurance Test

3. 耐酸化性向上検討

最初に純イリジウムの酸化特性を示す (Fig.4)

イリジウムチップを大気雰囲気中の電気炉に放置し温度と酸化性の関係を調査した。

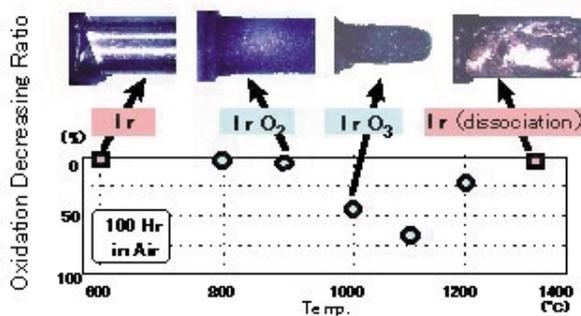


Fig. 4 Oxidation Characteristics of Pure Iridium

イリジウムは600 を超えるとIrO₂を生成する。このIrO₂は安定した酸化物であり、酸化減量は見られない。しかし900 を超えるとIrO₃を生成する。この酸化物は蒸気圧が高く、昇華しやすいため酸化減量が著しい。

一方1,200 を超えると、酸素はイリジウム金属表面から解離し酸化減量はみられなくなる。

この900 から1,200 までの酸化揮発特性が実際のエンジン使用時に問題となる。高負荷運転時、プラグ中心電極先端部は900 以上に上昇し、イリジウムの昇華雰囲気さらされるため、Fig.3に示すような異常消耗が発生したものと推定する。

そこで、イリジウムの酸化揮発を抑制する方法を検討した。方策としては耐酸化性に優れる金属で被覆する方法と、合金化する方法が考えられるが、コスト・量産性を考慮して合金化により耐酸化性が改善できないかという観点に絞って検討を進めた。

Fig.5に、純イリジウムに添加する金属を各種検討した結果を示す。横軸はIr及びIr合金の融点、縦軸は酸化消耗比(Pt=1)を示す。耐酸化性向上に最も効果が見られた材料は、イリジウムと同じ白金族のロジウムを添加したIr-Rh合金であった。

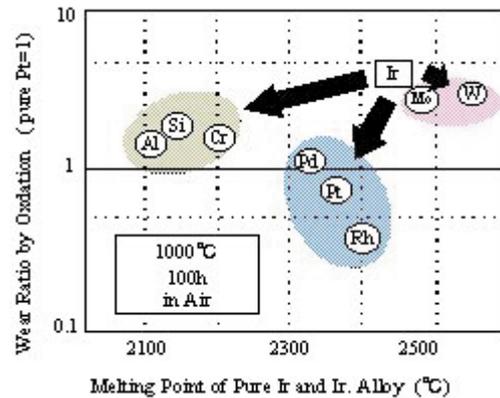


Fig. 5 Additive Metals' Effect to Oxidation Resistance

ロジウムはFig.2に示すように、白金より高温酸化性・火花消耗性に優れる材料で、またイリジウムと全率溶解が可能で、安定した合金を形成する。

これらの結果よりイリジウムの酸化揮発を抑制する方法としてロジウム添加を選定した。なお、最適添加量は耐消耗性・製造性等より10重量%とした。新合金の高負荷耐久試験結果をFig.6に示す。純イリジウムは異常消耗が発生するのに対し、開発材は酸化消耗性・火花消耗性共に良好である。

High Load Test (Full Throttle 5600 r/min 100 h)

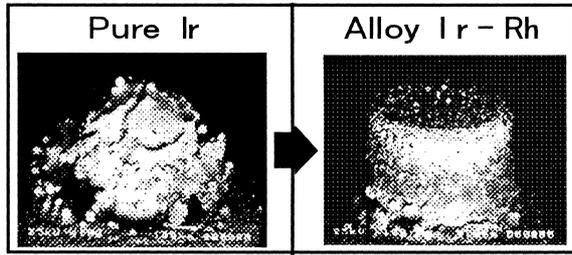


Fig. 6 Engine Test Result

そこでこの酸化揮発抑制効果について詳細に調査を行った。

Fig.7にエンジン耐久終了品のチップ断面写真と成分分析結果を示す。チップ表面層においてIrは一部揮発し、低濃度になっているのに対し、RhとOは表面層の方がリッチになっている。これはロジウム酸化物Rh₂O₃が表面部に残存していることを示している。この酸化皮膜がイリジウムの酸化揮発を抑制していると推定する。

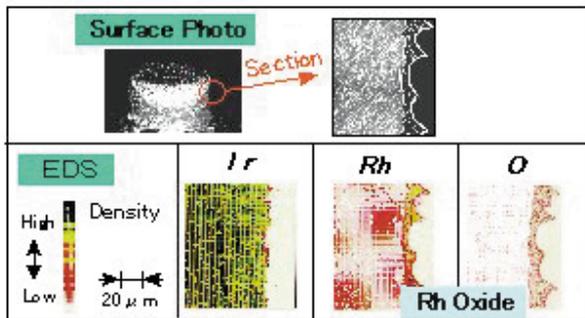


Fig. 7 SEM Image and Surface Analysis

酸化揮発抑制のメカニズムをFig.8で説明する。

高温酸化雰囲気において、Irは酸化物IrO₃となり、表面層より揮発する。一方Rhは酸化物Rh₂O₃を作るが、その蒸気圧は低く安定した酸化物としてチップ表面に残留する。

さらに酸化物生成自由エネルギーを見ると、Rh₂O₃の方がIrO₂よりも酸化物として安定である。そのため内部のIrが表面層のRh₂O₃の酸素と反応してIrO₃を生成する反応は起こりにくい。すなわち、内部への酸化は進行しない。

このメカニズムにより、イリジウムの酸化揮発が抑制でき、エンジン試験において、イリジウムの耐酸化性を飛躍的に改善することができたものとする。

Fig.9に今回開発したイリジウム合金材と現状の白金合金材を用いたスパークプラグの耐消耗性を示す。

横軸は電極径 縦軸はプラグギャップ拡大比率を示す。同一の電極径で比較すると、イリジウムプラグは白金プラグより略4倍耐消耗性に優れている。

この新合金材を用いることにより、今後のエンジンニーズに対して、スパークプラグの設計自由度を大幅に向上することが可能になった。

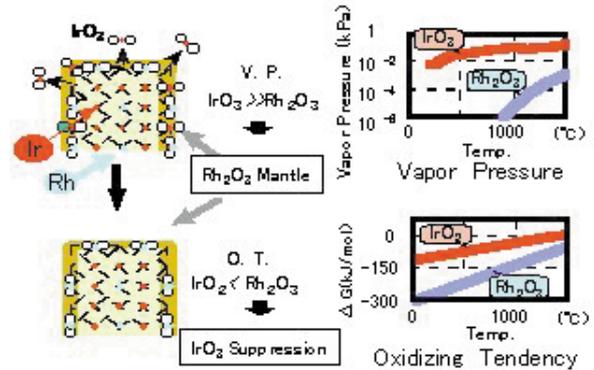


Fig. 8 Suppressing Volatilization Mechanism

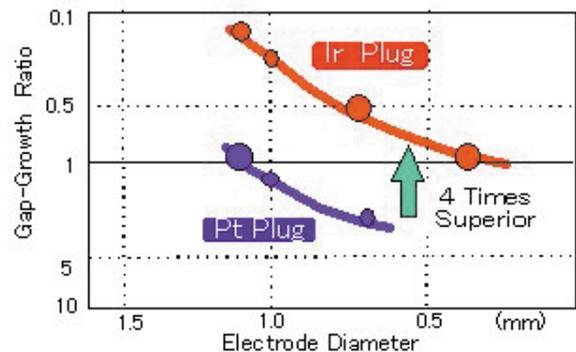


Fig. 9 Wear Resistance Pt Alloy and Ir Alloy

4. イリジウムプラグによる燃焼改善効果

今回開発したイリジウム合金により、従来の白金技術では達成できなかった究極の寿命・性能の実現を目指した。

具体的には、次の2種類の実用化を図った。

- 1) 超高性能プラグ(電極径 0.4 : 白金と同等寿命)
- 2) 高性能メンテナンスフリープラグ
(電極径 0.7 : 白金比2倍寿命)

Fig.10に今回開発した2種類のイリジウムプラグ、従来の白金プラグ、及び一般プラグの特徴及び放電部写真を示す。以下、本報では究極の細径電極を有する「超高性能プラグ」の特性を示す。

プラグ中心電極を細径化することにより、電圧低減・着火性向上が図れることは一般に知られている。Fig.9に示すごとく、イリジウムプラグは電極径0.4mmにて現状白金プラグ 1.1mmと同等の耐消耗

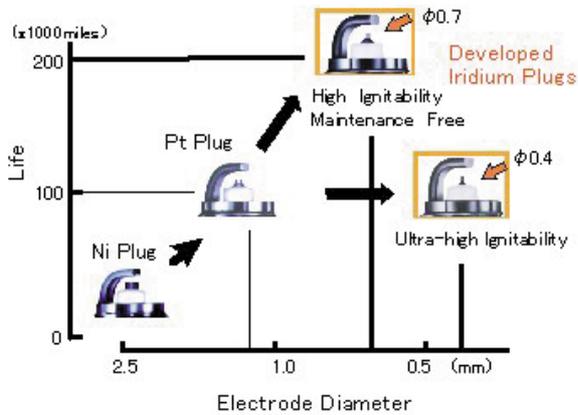


Fig. 10 Outline of Spark Plugs

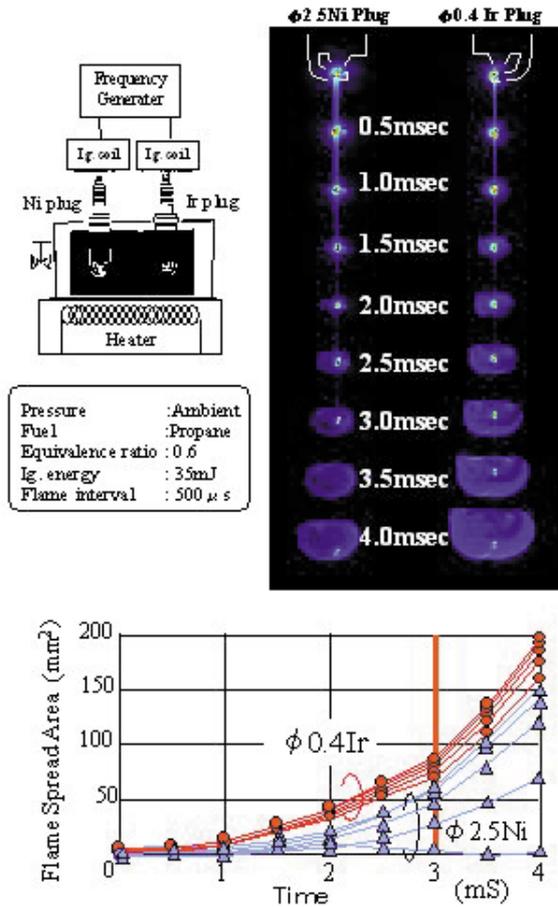


Fig. 11 Effect of Electrode Diameter on Ignitability
- Flame Propagation Speed -

性が得られる。そこで、白金プラグ並みの寿命を維持し、究極の性能を発揮させるため、電極径 0.4mm という世界最小径の極細長寿命プラグを設定した。

プラグ電極の細径効果を確認するため、大気圧雰囲気中の燃焼可視化装置を用いて、希薄混合気中での火炎伝播状況を調査した (Fig.11)

細径電極は放電により生成した火炎核の熱エネルギーを吸収する消炎作用が少なく、点火コイルから供給されるエネルギーを無駄なく火炎核成長に投入することができる。従って、燃焼の悪化する、希薄燃焼下においても急速な火炎伝播が可能になり、確実な着火が可能にすることができる。

さらに、細径電極の効果を確認するため、実際のエンジンにて燃焼解析を実施した。Fig.12にアイドリング800r/min、理論空燃比条件における燃焼圧P [MPa]と熱発生率dQ [J]を調査した結果を示す。イリジウムプラグは燃焼圧力が上昇していることがわかる。

これはFig.11で説明したように、電極細径効果により、急速な火炎伝播が可能になり熱発生率を増加させることができたからである。その結果、図示平均有効圧 (IMEP) も上昇している。

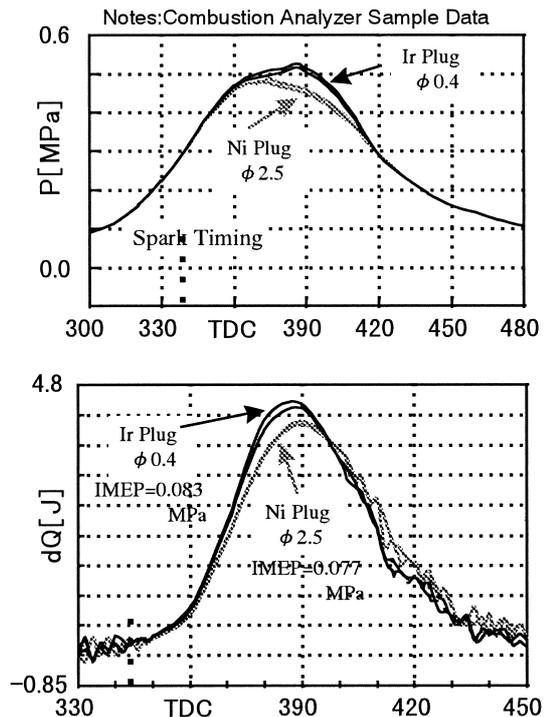


Fig. 12 Effect of Electrode Diameter on ignitability
- Combustion Pressure & Heat Release Rate -

そこで以下、今後の燃費・排ガス規制強化に即したエンジン開発課題に対して、細径プラグによる燃焼改善効果の一例を紹介する (Fig.13)

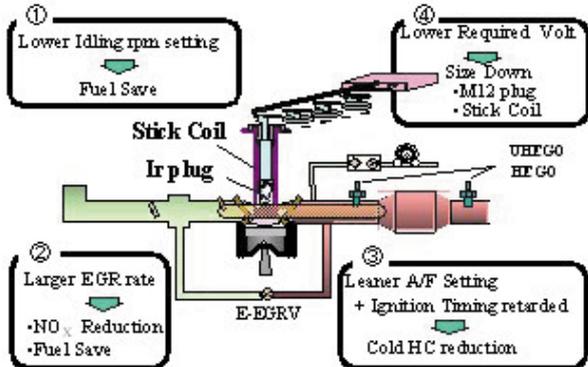


Fig. 13 Benefit of 0.4 Ir plug

例えば、着火性向上効果により燃焼安定性が向上し、アイドリングの低回転化・大量EGR化・空燃比リーン化等を図ることができ、燃費・エミッションの改善が可能になる。

また要求電圧低減効果により、点火コイル・スパークプラグの小型化が可能になり、エンジン設計自由度が拡大し、出力向上・エンジンコンパクト化を図ることができる。

以下、具体的に評価結果を説明する。

(1) アイドリング安定性 / 燃費低減

IS (Idle Speed Control) をカットした状態で暖機後のエンジン回転変動を調査した。白金プラグをイリジウムプラグに交換するだけで回転数が上昇、回転変動幅は減少する。そこでアイドリング回転数を回転変動が白金と同じになるまで低下させ燃料消費量を調査した。

イリジウムプラグは、アイドリングで約3%の燃費向上効果が見られた (Fig.14)

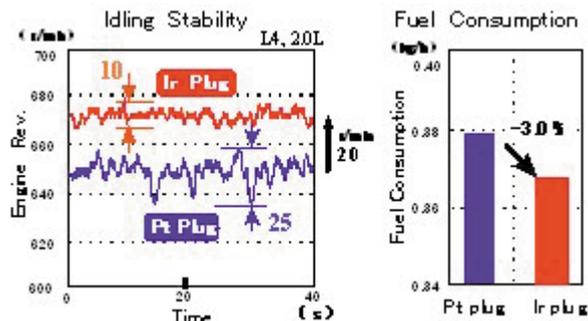


Fig. 14 Idling Stability & Fuel Efficiency

(2) EGR増量によるNOx低減

EGR量を増加させ安定燃焼限界を調査した。Fig.15

に、本評価条件下でのイリジウムプラグ使用によるNOx排出量の低減効果を示す。

イリジウムプラグ使用によりトルク変動が抑制され、白金プラグのEGR率が15.5%に対し、イリジウムプラグは18%までEGR率を増大することができた。その結果、NOx排出量は白金プラグに比べ25%低減することができた。

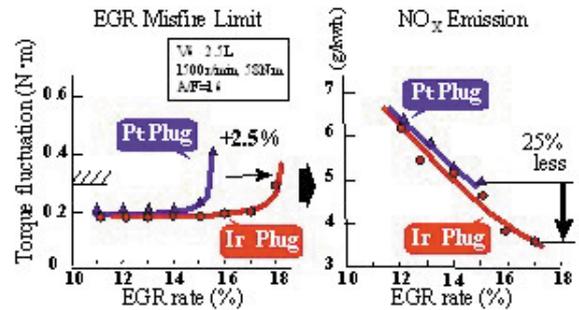


Fig. 15 Larger EGR rate / NOx Reduction

(3) 冷間始動時のHC低減

LA #4 コールドスタートモードでは始動直後、触媒が活性化するまでのHC排出低減が課題となる。そこで始動時の空燃比に対するエミッション値を調査した。Fig.16にその評価結果を示す。横軸は空燃比(A/F)、縦軸はHC排出量である。イリジウムプラグは空燃比を約0.7リーン設定でき、その結果HC排出量を60%低減することができた。

また、一般的に暖機過程で点火時期を遅らせて排気温度を上昇させ、触媒の早期活性化を図る手法は知られている。しかし、点火時期を遅らせると燃焼が悪化するため、あまりリタードすることはできなかったが、イリジウムプラグは着火性に優れ、大量リタードの実現も可能となる。

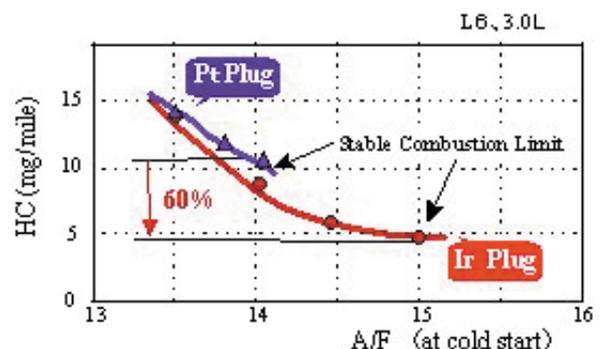


Fig. 16 Cold HC reduction

(4) 要求電圧低減 / プラグ小型化による搭載性向上

Fig.17 に要求電圧が最も高くなる条件(急加速)での要求電圧測定結果を示す。横軸は電極径、縦軸は要求電圧である。電極径が細くなる程電界が強くなり、局所的な絶縁破壊が起こりやすくなるため、要求電圧を低くできる。本評価では 0.4 にすることにより 6kV 電圧低減をはかることができた。

この細径電極の特徴を生かすことにより、プラグ小型化の際に課題となる碍子耐電圧低下分の補完、及びハウジングとの絶縁空間縮小による横飛び抑制をはかることができる。

プラグを小型化することにより、エンジン設計自由度が拡大し、搭載性向上が図れることはもとより、バルブ径拡大・冷却系の改良等によるエンジン出力向上の一助となる。

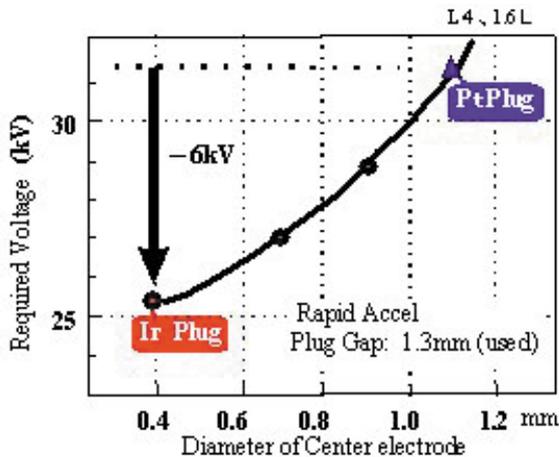


Fig. 17 Required Voltage Reduction

5. まとめ

スパークプラグの耐消耗性を飛躍的に向上するため、高融点・耐酸化性を併せ持つ電極材の研究に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) 純イリジウムは融点が白金より 700 高く火花消耗性は優れる。ただし、エンジンの高負荷運転域では酸化揮発が激しく、異常消耗を誘発するため実用化には難がある。
- (2) この高温酸化消耗を抑制するため、ロジウム添加合金を開発した。ロジウムはイリジウムより融点が低い、高温での耐酸化性に優れ、耐高温酸化性を飛躍的に向上させることができた。
- (3) イリジウム - ロジウム合金が耐高温酸化性に優れるメカニズムは、イリジウムが酸化揮発する高負荷運転域において、安定したロジウム酸化物がチップ表面層に残留し、イリジウムの酸化揮発を抑

制する防波堤になっていることによる。

この新合金を世界で初めてスパークプラグに適用し、これまでの白金技術を超越した高性能・長寿命イリジウムプラグの開発に成功した。具体的に次の 2 種類を実用化した。

- (1) 超高性能プラグ(電極径 0.4 : 白金と同等寿命)
- (2) 高性能メンテフリープラグ
(0.7 : 白金比 2 倍寿命)

本報では特に、電極径 0.4 の超高性能プラグについて、具体的なエンジン評価結果を示し、プラグでの燃焼改善例を提案した。

今後、燃費・排ガス等の規制強化に対し、より一層の燃焼改善が求められるが、プラグによりエンジン開発の手助けができることを期待して結びとする。

<参考文献>

- 1) 長村 弘法 他：高性能長寿命イリジウムプラグの開発 JSAE No.993953Z(1999)
- 2) H. Osamura, N. Abe : Development of New Iridium Alloy for Spark plug Electrodes, SAE 1999-01-0796
- 3) 大聖 泰弘：自動車用原動機の現状と将来 自動車技術会 論文集, Vol.52, No7(1998)
- 4) 大島 崇文 他：スパークプラグの電極形状に関する一考察(第 2 報), JSAE No912263(1991)
- 5) 西尾 兼光 他：スパークプラグ極細電極の耐消耗性改善に関する研究, 自動車技術会 論文集 Vol.24, No4. (1993)
- 6) Eoin.W.Gray et al. : Electrode erosion by particle ejection in low-current arcs. Journal of Applied Physics. Vol.45. No2(1974)
- 7) A.S.Darling : Some Properties and Applications of the Platinum-Group Metals.The Institute of Metals. Review175.(1973)
- 8) 川村 博 他：新型 1GZ-FE エンジンの開発 トヨタテクニカルレビュー 207(1997)



< 著 者 >



長村 弘法
(おさむら ひろのり)
セラミック技術部
スパークプラグの開発・設計に従
事 .



阿部 信男
(あべ のぶお)
セラミック技術部
スパークプラグの開発・設計に従
事 .