

# 【事業名】安定・高効率に熱電供給を実現できる次世代天然ガスコージェネシステムの技術開発

【代表者】千葉大学・教授 森吉 泰生

【実施予定年度】平成25～27年度

## (1)技術開発概要

### ①【概要・目的】

オンデマンドで発電ができる分散型電源の中で、安定して高効率に熱電供給できる天然ガスコージェネエンジンシステムの技術開発は喫緊の課題である。そこで、15%の熱効率向上、5%の排気熱利用率向上、5%の最大出力向上、低温プラズマによる点火プラグの2倍以上の長寿命化と未燃メタンの90%削減が可能要素技術を、ガス会社やエンジンメーカの協力により開発する。最終的に、実用化を意識して試作したシステムで上記目標値を実証する。

### ②【技術開発の詳細】

本事業は、次の1.～4.の4つの要素について、(a)～(h)の技術開発を行う。

1. 熱効率向上によるCO2削減と最大出力向上 (15%の熱効率改善と5%の最大出力改善を下記の(a)～(c)の新技术で実現する)
  - (a) 等温燃焼制御
  - (b) 過給器性能向上
  - (c) 冷却水システムの制御
2. 排熱エネルギー増加による熱供給量拡大 (5%の排熱エネルギー増大を下記の(a)と(c)の新技术で実現する)
  - (a) 等温燃焼制御
  - (b) 過給器性能向上
  - (c) 冷却水システムの制御
3. 低温プラズマ技術に基づく点火プラグ長寿命化と未燃メタン排出低減 (プラグ寿命を2倍にし、地球温暖化係数21の未燃メタンを90%削減する)
  - (a) 等温燃焼制御
  - (b) 過給器性能向上
  - (c) 冷却水システムの制御
  - (d) 低温プラズマ点火システム
  - (e) 長寿命ラジカル供給システム
4. 安定燃焼と熱電比率の制御によるフレキシブル運転実現
  - (a) 等温燃焼制御
  - (b) 過給器性能向上
  - (c) 冷却水システムの制御
  - (d) 低温プラズマ点火システム
  - (e) 長寿命ラジカル供給システム
  - (f) 燃料成分変化対応制御
  - (g) 筒内圧計測による燃焼制御
  - (h) 熱電ベストミックス燃焼制御

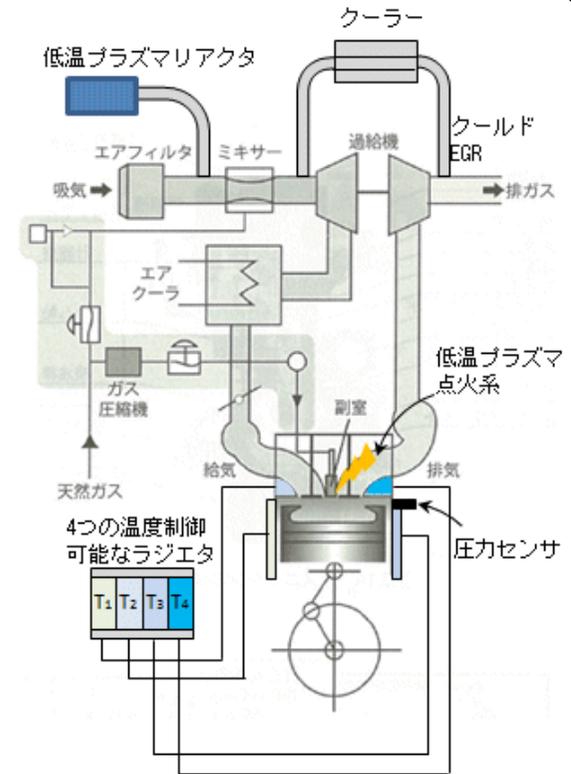
エンジン試作と実証試験(最終的に、試作したシステムで上記目標値を実証)

### ③【システム構成】

右図はエンジンシステム図である。未燃燃料の排出を低減するために吸気に長寿命ラジカルを供給し(e)、性能改善した過給器で十分な空気を供給する(b)。副室内の点火プラグには低温プラズ方式(d)を採用し、メンテナンス期間をこれまでより倍増させる。

熱効率改善のために、高圧縮比化、等温燃焼化(a)、冷却水への熱損失を減らせる冷却系の改良(c)、筒内圧力センサを使った安定燃焼制御(f, g)、熱電ベストミックス燃焼制御(h)を採用する。

各要素試験は単気筒エンジンで行い、シミュレーションで予測された性能改善がほぼ実証された。次に6気筒18L出力250kWの市販エンジンをベースに改造を行い、効果を実証した。試作が困難な要素については、検証された3Dシミュレーションで効果を確認した。下に、試作したエンジンシステムの写真とエンジン側面写真を示す。



エンジンシステム図



エンジン側面写真

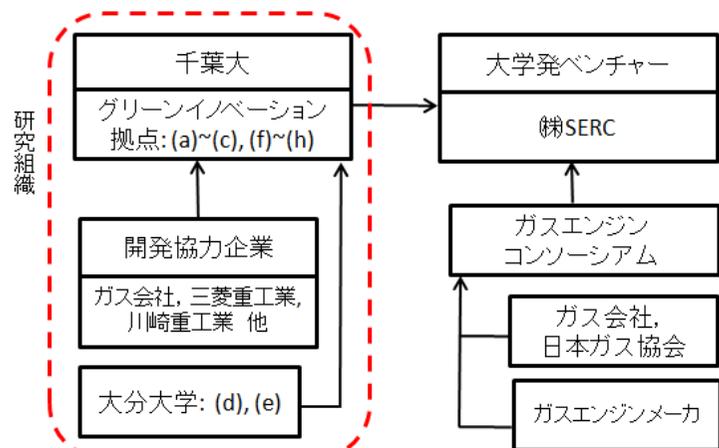


エンジンシステム写真

## (2)技術開発計画

### ①【実施体制】

破線で示した部分が本研究の実行組織で、千葉大学のグリーンイノベーション拠点の設備を使って行った。同時に、大学発ベンチャーの㈱SERCが主催するガスエンジンコンソーシアムと連携をとった。コンソーシアムでは、圧縮比を上げたときに問題となる課題に限定して研究を行った。その結果を受けて、本研究で試作する実機での実証を行った。実機を使った開発要素の試験や、具体的な使われ方や要望については、ガス会社(東京、大阪、東邦)、三菱重工業、川崎重工業などから開発協力企業として助言を受けた。これにより、システムの試作を行う際に、実用化を考えた最適設計やコストダウンについても検討したプロトタイプシステムを使った実証が可能となり、普及促進にも役立つ。



### ②【実施スケジュール】

下の表の開発項目ごとの期間と予算を示す。1. ~3. は温暖化ガス低減に関わる技術術で、4. は実稼働時のフレキシビリティ(オンデマンド熱電比、燃料や負荷変動への対応制御)を増すことで、実質的にCO2低減につながる技術である。基本的に最初にシミュレーションや基礎実験で要素ごとの検証を行った。ついで、最適化設計を行い、各要素技術を最終年度に組合せ、試作したシステムで実証と評価を行った。ここまでの過程を2015年度末までに行った。

	H25年度	H26年度	H27年度
1. 熱効率向上によるCO2削減と最大出力向上			
2. 排熱エネルギー増加による熱供給量拡大	37600千円	39600千円	
3. 低温プラズマ技術に基づく点火プラグ長寿命化と未燃メタン排出低減	20500千円	22500千円	
4. 安定燃焼と熱電比率の制御によるフレキシブル運転実現	12500千円	28500千円	
エンジン試作と実証試験	14000千円	14000千円	
その他経費(間接経費)	12690千円	21690千円	18690千円
合計	97290千円	182180千円	143290千円

### ③【目標設定】

○最終的な目標:

仕様: 出力MWクラス天然ガスコージェネエンジンシステム

性能: 発電用熱効率49%以上、高温排気エネルギー従来比5%以上増大  
省エネルギー率: 20%以上(従来型システム比)

1MWシステム1台当たりのCO2削減量: 367t/年

温暖化係数21の未燃メタンを90%削減することで、CO2換算で354t/年さらに低減可能。

### ④【事業化・普及の見込み】

○事業化計画

・2019年までに上記性能を満たす(CO2削減率20%以上)ガスコージェネエンジンシステムを、ライセンス供与などにより発売する。日本ガス協会も普及のためのPRを行う。

・2020年に、MWクラスコージェネエンジンの市場で本システムのシェアを80%に高める。

・エネルギー環境会議が平成24年9月に発表した「革新的エネルギー・環境戦略」にあるコージェネによる発電量を2010年に対し2030年では約5倍にする目標を加速させる。発電コストが2010年の11.5円/kWh(熱利用分含む)はLNG火力の10.7円/kWhより高いが、20%効率を改善すれば、ガスコージェネの方が安価になる。

○事業展開における普及の見込み(~2020年)

実用化段階コスト上昇目標: 574円/CO2トン (200円/kWh)

実用化段階単純償却年: コスト上昇分は1年以下(従来型(1MW)とのコスト差額は20万円)

1MW/台とすると下表のようになる。価格競争力に優れるため急速な普及が期待できる。

年度	2017	2018	2019	2020
目標販売台数(台)	0	0	340	1700
目標販売価格(円/台)			従来+20万円/台	従来+20万円/台
CO2削減量(t-CO2/年)	0	0	125kt/年	626kt/年

### (3)技術開発成果

#### ①【これまでの成果】

(1)熱効率向上によるCO2削減と最大出力向上：単気筒エンジンで検証された要素技術を量産6気筒エンジンベースの実証用エンジンに適用し、熱効率15%改善と5%の最大出力向上を数値目標とした。この結果、熱効率の達成率は92%、最大出力は100%達成できた。

(2)排熱エネルギー増加による熱供給量拡大：実証用エンジンにて、排熱エネルギーの5%増大を数値目標とした。この結果、100%達成した。

(3)低温プラズマ技術に基づく点火プラグ長寿命化と未燃メタン排出低減：低温プラズマによる点火技術を確立し、プラグの耐久性を評価する方法を提案し、耐久性評価を行った。試作したプラズマリアクターによる未燃メタン削減は20%を実現した。これ以上の低減もエネルギーを投入すれば可能であるが、排熱を上回るエネルギー投入が必要となり実用上意味が無いことが分かった。

#### ②【CO2削減効果】

##### ○2020年時点の削減効果 (試算方法パターン B-b, II-i)

- ・国内潜在市場規模:総発電量21280MW(2010年で9500MW(コージェネレーションエネルギー高度利用センター調査, 毎年8.4%で増加。
- ・2020年度に期待される最大普及率: 技術の完成度とコストパフォーマンスに優れるため, 新規販売台数の8割を見込める。
- ・2020年1年間に新規に販売されるエンジンの総発電量21280MW(既存機のリプレイスと純粋な増加分を足すと, 毎年総発電量の10%が新型エンジンに切り替わる。
- ・2020年の1年間CO2削減量: 新規導入コージェネシステムから排出されるCO2が3.91Mトンで, その8割が本システムに置き換わり, 20%のCO2削減が行えるので,  $3.91 \times 0.8 \times 0.2 = 0.626$ Mトンとなる。

##### ○2025年時点の削減効果 (試算方法パターン B-b, II-i)

- ・国内潜在市場規模:総発電量31300MW(2010年で9500MW(コージェネレーションエネルギー高度利用センター調査, 毎年8.4%で増加。
- ・2025年度に期待される最大普及率: 技術の完成度とコストパフォーマンスに優れるため, 新規販売台数の8割を見込める。
- ・2025年1年間に新規に販売されるエンジンの総発電量31850MW(既存機のリプレイスと純粋な増加分を足すと, 毎年総発電量の10%が新型エンジンに切り替わる。
- ・2025年の1年間CO2削減量: 新規導入コージェネシステムから排出されるCO2が5.85Mトンで, その8割が本システムに置き換わり, 20%のCO2削減が行えるので,  $5.85 \times 0.8 \times 0.2 = 0.936$ Mトンとなる。

#### ③【成果発表状況】

- ・田上, 牛丸, 菅, 窪山, 森吉ほか, 繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性に関する研究-非平衡プラズマの点火特性-, 日本燃焼学会誌論文集, 56-175, pp.59-66, 2014.
- ・田上, 森吉, 堀田, 非平衡プラズマと点火, 日本燃焼学会誌 57-180, p120-126, 2015.
- ・茶堂(発表者), 菅, 橋本, 田上, 嶋田, 繰り返しナノパルス放電を用いた非平衡プラズマの点火特性に関する研究, 日本機械学会九州支部総会・講演会講演論文集, 2014.3
- ・野村(発表者), 稲富, 田上, 窪山, 森吉, 堀田, 低温プラズマの点火特性に関する研究, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, 2015.11.16, つくば国際会議場

- ・熊(発表者), 森吉, 高橋, 山田ほか, 副室構造が副室式天然ガスエンジンの燃焼特性及び熱効率への影響, 内燃機関シンポジウム, 講演論文集, 2015.12.8, 京都テルサ
- ・植原(発表者), 高橋, 山田, 窪山, 森吉, 副室式ガスエンジンのサイクルシミュレータの構築, 自動車技術会関東支部2013年度学術研究講演会(2014)
- ・高橋(発表者), 森吉, 山田, 副室式火花点火ガスエンジンの熱効率改善に関する研究, 自動車技術会関東支部2014年度学術研究講演会 G3-3(2014)
- ・保木本, 窪山, 森吉, 山田, 3次元数値シミュレーションによる副室式ガスエンジンの燃焼解析, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.830, (2015).
- ・S.HOKIMOTO(発表者), T.KUBOYAMA, Y.MORIYOSHI, T.YAMADA, Combustion Analysis in a Natural Gas Engine with Pre-chamber by Three-dimensional Numerical Simulation, Technology Development of the Gas Engine investigated by Industry -Academia-Government Collaboration-, The 4th International Conference on Micro generation and Related Technology, PaperID063, 30 October, 2015.
- ・Y.Moriyoshi(発表者), Q.Xiong, Y.Takahashi, T.Kuboyama, K.Morikawa, T.Yamada, M.Suzuki, K.Tanoue, J.Hashimoto, Combustion Analysis in a Natural Gas Engine With Pre-Chamber to Improve Thermal Efficiency, Proc. of CIMAC, No.262(2016)

#### ④【技術開発終了後の事業展開】

量産エンジンに上記の要素技術を投入するに当たり, 可変動弁系や高効率高過給システムは, 設計当初からエンジンメーカーとの設計をメーカー一緒に取り組んで行かないと実現が困難である。低温プラズマ方式にすることで点火プラグ長寿命化が達成できることが証明できたが, パルス電源やプラグ本体の耐久性については今後の課題である。

#### ○量産化・販売計画

- ・2019年までに, 各要素技術の実用化開発を推進。
- ・2025年までに, 量産エンジンに上記要素技術を投入できる新型機関の開発を行い, システム全体の低コスト化, 高効率化及び省力化を推進。需要が増大する海外への展開も図る。

#### ○事業拡大シナリオ

年度	2016	2019	2025 (最終目標)
各要素技術の実用化開発	低温プラズマ点火方式の実用開発を優先	低温プラズマ点火方式の実用開発を優先	
要素技術を投入できる新型機関開発			各要素技術の実機関への組み込み
海外への事業展開		要素技術の売り込み	高効率な新型機関の販売

#### ○シナリオ実現上の課題

ガスエンジンは既存のディーゼルエンジンベースに改造して製品化しており, 本研究成果をそのまま短期間で製品化することは難しい。一方, 世界的にガスエンジンの需要は急速に高まっており, 海外からの高性能エンジンの発表もあって, 専用エンジン開発の可能性もでてきた。本研究と並列に, これまで5社(三菱重工業, 川崎重工業, 東京ガス, 大阪ガス, 東邦ガス)とコンソーシアム活動を行ってきた。これらの成果も取り入れて, 引き続き産学連携を強化し, 成果の実用化を目指す。

# ○参考資料1

- 1, 実証用6気筒エンジンで、要素技術の導入により熱効率を15%改善できることを実証すること
- 2, 実証用6気筒エンジンテストにて、排熱エネルギーの5%増大を確認すること



実証用6気筒エンジン



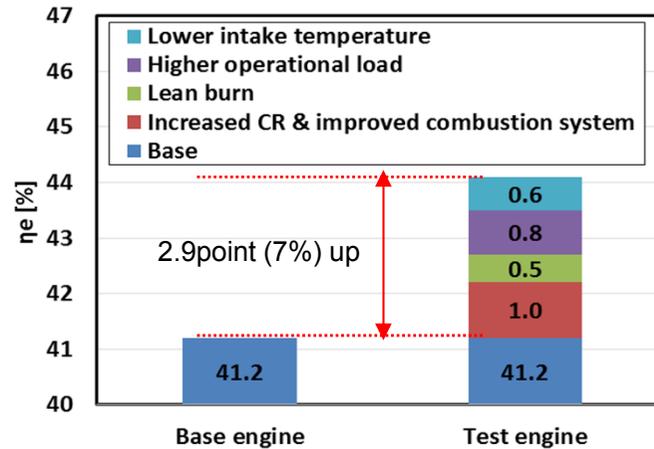
初期仕様 (φ3.4mm × 4)    設変仕様 (φ2.54mm × 7)



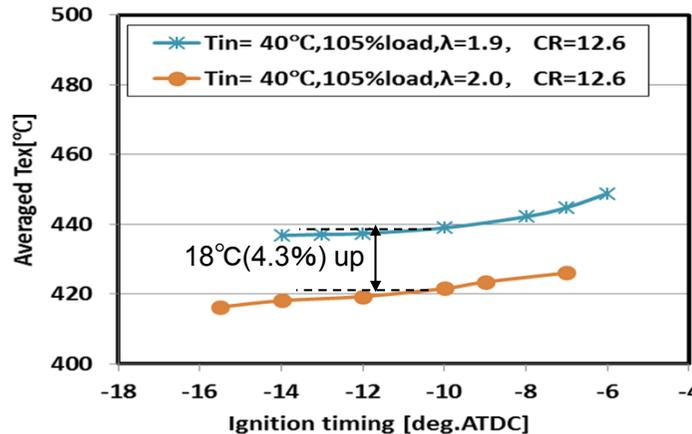
初期仕様 (深皿,  $\epsilon=10.8$ )    設変仕様 (浅皿,  $\epsilon=12.6$ )

## テストで要素技術の導入により熱効率の改善効果

- ・ 圧縮比向上と燃焼システム変更の効果 ( $\epsilon=10.8 \rightarrow 12.6$ )
- ・ 過給リーンバーンの効果 ( $\lambda=1.9 \rightarrow 2.0$ )
- ・ ノッキング抑制と運転可能な負荷向上の効果 (Load=100% $\rightarrow$ 105%)
- ・ 吸気冷却の効果 ( $T_{in}=40^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$ )

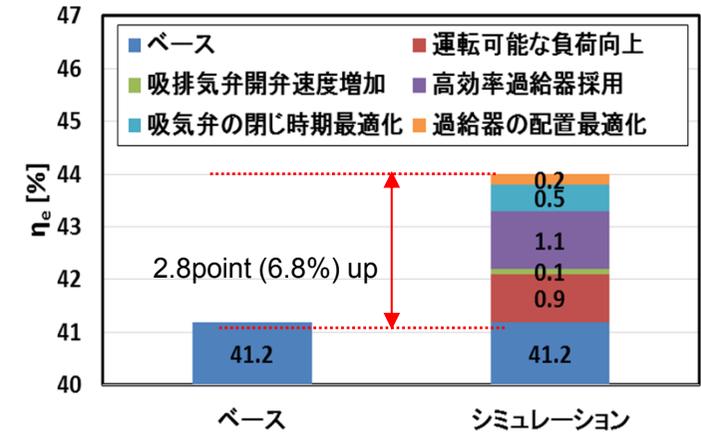


## 排気エネルギー増大による熱供給量拡大



## シミュレーションで検証した熱効率の改善効果

- ・ 運転可能な負荷向上の効果(負荷100% $\rightarrow$ 110%)
- ・ 吸排気弁開弁速度増加
- ・ 高効率過給器採用
- ・ 吸気弁の閉じ時期最適化
- ・ 過給器の配置最適化



## 結果まとめ

- ・ 高圧縮比化, 希薄燃焼, 高負荷化, 吸気温度低下による熱効率向上効果を実験的に検証した結果, 正味熱効率がベースよりも7.0%upできることを実証した.
- ・ 実験的な検証が困難な熱効率向上技術(更なる高負荷化, バルブ開弁速度増加, バルブタイミングの最適化, 過給機効率と過給機配置の最適化)の効果, 実験的に精度が検証されたシミュレーションツールにより数値的に検証した結果, 正味熱効率がベースより6.8%upできることを示した.
- ・ 合わせて13.8%の熱効率向上効果を確認できた. 目標(15%向上)に対する達成率は92%である.
- ・ 排熱エネルギーを増加させるには, 空気過剰率 $\lambda$ を下げ, 105%負荷時,  $\lambda=2.0$ から $\lambda=1.9$ への変更で, 利用可能排気エネルギーは8.1%増加した.

## 実証テストエンジン仕様は初期仕様より

### 設計変更箇所

- ・ トーチ孔(等温燃焼): 燃焼システム改善
- ・ 主燃焼室体積(圧縮比向上): 熱効率向上
- ・ 副室底形状: 燃焼の安定化

## ○参考資料2

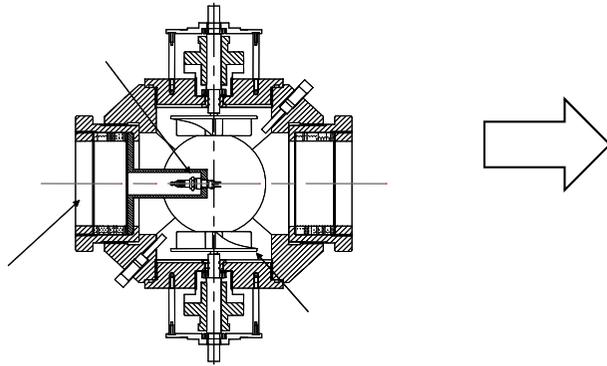
低温プラズマ技術に基づく点火プラグ長寿命化と未燃メタン排出低減

(d)低温プラズマを実現し従来比2倍の寿命をもつ点火プラグを実用化する。

低温プラズマ用点火  
プラグ初期試作完成



定容燃焼器にて実験



### 目標

- (1)初期試作点火プラグで基礎データを取得する。
- (2)プラグの耐久性の評価を行う

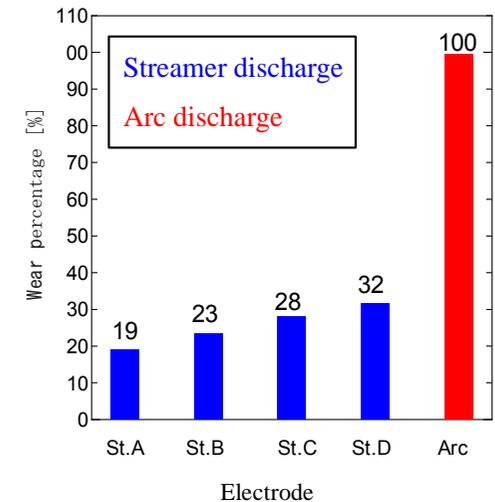
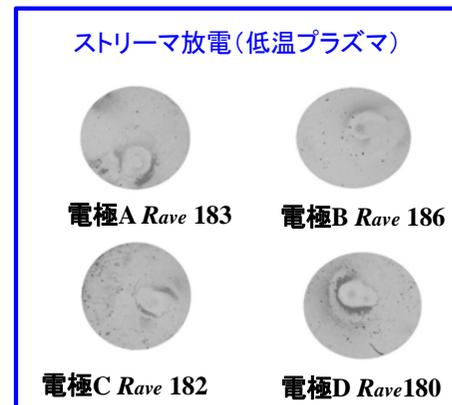
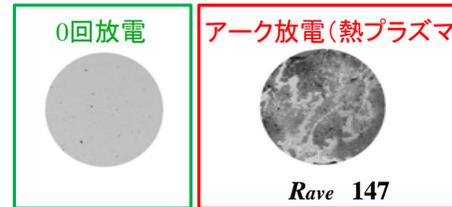
### 結論

- 1.低温プラズマ点火は、従来の火花点火(熱プラズマ)と同様に可燃混合気を点火できること、適切な電極距離、形状を選択することで低温プラズマの点火特性が大きく向上することがわかった。
- 2.電子顕微鏡を用いたプラグの耐久性試験を行い、放電メカニズムの違いによる試料表面の酸化が観察され、**ストリーマ放電によりプラグの耐久性が向上することが分かった。**

### プラグの耐久性の評価について

400J投入時における、40倍の電極表面状態と、摩耗割合を調べた。右図にアーク放電(熱プラズマ)と、ストリーマ放電(低温プラズマ)時の各電極40倍画像ならびに摩耗割合を示す。図よりストリーマ放電において**摩耗割合は全て35%以下に抑えられている**事が見て取れる。次に画像に着目すると、アーク放電の画像は全体的に黒に変色した部分が多く見られるのに対して、ストリーマ放電では黒い変色が明確に確認できなかった。アーク放電では、電極表面で酸化反応が進行したのに対して、ストリーマ放電では極表面の酸化が抑制されたためと考える。

この技術は、ガスエンジンのみでなく、ガソリンなどを使う火花点火式エンジンにも応用でき、単一要素技術として実用化が期待できる。



# ○参考資料3

低温プラズマ技術に基づく点火プラグ長寿命化と未燃メタン排出低減:

(e)長寿命な一重項酸素ラジカルを生成させ、シリンダ内での未燃メタンの90%削減を実現する。



装置外観



装置内部



プラズマ発生部

紫外光を照射し、オゾンの発生を励起

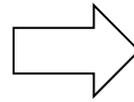
低温プラズマ用リアクター試作完成



紫外光照射装置

目標  
製作したプラズマリアクターで基礎データを取得する。  
先行研究から熱効率向上を考慮し改質率は25%以下とする。

改質率は25%以下の根拠  
メタンの場合、1ev/moleculeが16.4kWhに相当する。先行研究ではメタンの転換率は比投入エネルギーで増加する。メタンの低位発熱量相当の10eV/moleculeの電力で転換率は25%程度としている。このことからこれ以上の転換率では熱効率が悪化すると考えられる。



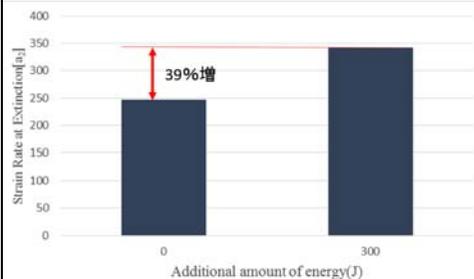
## 結論

1. 低温プラズマと紫外光を組み合わせたリアクターを試作してメタンの改質試験を行い、18%の改質を確認した。
2. 燃焼特性に及ぼす改質の影響を数値解析で調べ、消炎限界は39%向上、燃焼速度は9%向上、着火遅れの9.8%低減することが分かった。

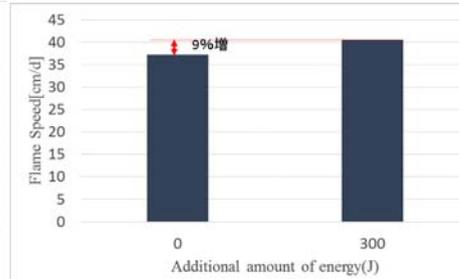
燃焼特性に及ぼす改質の影響  
燃焼特性に及ぼす改質の影響を数値解析で調べた。素反応モデルはGRI-Mech3.0を、数値解析はCHEMKIN-PROの下記モデル用いた。

- 「消炎限界」は対向流火炎モデル
- 「層流燃焼速度」は一次元予混合火炎モデル
- 「着火遅れ」は0次元反応計算モデル

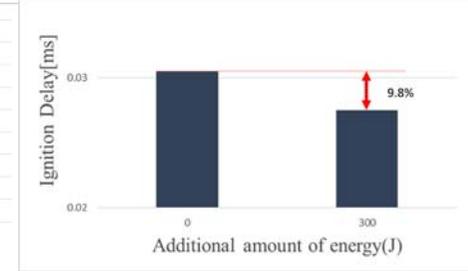
右図は改質の有無による各燃焼特性の結果である。図から消炎限界は39%向上、燃焼速度は9%向上、着火遅れの9.8%低減している。



消炎限界



層流燃焼速度



着火遅れ

## CO<sub>2</sub>排出削減対策技術評価委員会による終了課題事後評価の結果

- 評価点 6.2点（10点満点中）
- 評価コメント
  - － 要素技術の開発は一定程度の成果が得られたと評価する。
  - － 一部の部品が試作できず、シミュレーションによる検証に留まったこと、排気ガスや騒音・振動等の品質特性への対応が不明確である等、事業化に向けたハードルは残されており、今後は専用ガスエンジンの開発も視野に入れ、技術開発を加速させるとともに、品質特性の改善に努めることを期待する。
  - － 本事業の実施内容について積極的に成果を広く公表し、その際は環境省「CO<sub>2</sub>排出削減強化誘導型技術開発・実証事業」である旨を周知することを求める。
  - － 環境省補助金要項に従い採択時に告知したように、補助事業により整備された施設、機械、器具、備品その他の財産には、環境省補助事業である旨を必ず明示すること。