

適用事例

## 自動車の燃焼添加における低温プラズマの応用

**概要：**

**高圧下での低温プラズマによる燃焼点火シミュレーションの紹介。**

# イントロダクション

WAVE FRONT

ICEエンジンの点火にスパーク（熱プラズマ）が長く使用されている。

- 局在化した点火カーネル
- 希薄燃料の点火には有効でない

最近では非平衡プラズマの利用に重点が置かれている。

Coaxial Geometry  
(Small Inter-electrode Gap ~mm)

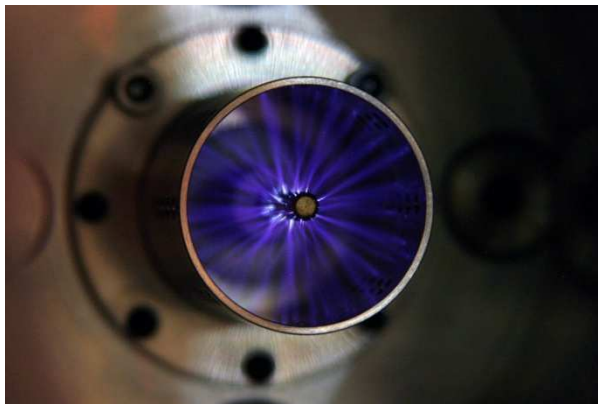


Photo From : University of Southern California Pulsed Power Research Group  
<http://www.usc.edu/dept/ee/Gundersen/combustion.html>

Corona Geometry  
(Large Inter-electrode Gap ~cm)



[www.etatech.us/Technical-Papers/ECCOS-Advanced-Ignition-System.ppt](http://www.etatech.us/Technical-Papers/ECCOS-Advanced-Ignition-System.ppt)

WAVE FRONT

Copyright © 2013 Wave Front Co.,Ltd All Rights Reserved.

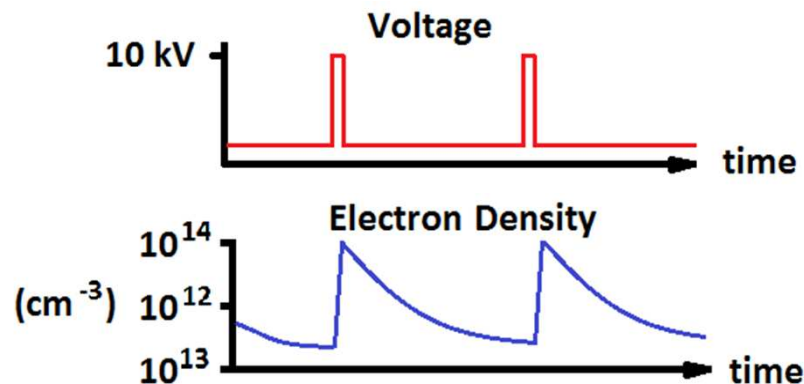
# 燃焼点火のためのナノ秒パルシング

WAVE FRONT

大気圧の空気を効率的に電離するための技術

高電圧を非常に短時間印加(1-100 ns)

イオン化しプラズマを生成するには十分長く、電子の再結合時間よりは短いパルスを与える。



優位点

- 電子のみを選択的に高エネルギーに加熱
- プラズマがスパークへ遷移することを防止

# シミュレーションにて考慮した化学反応、および条件

WAVE FRONT

- Methane-air plasma chemistry mechanism
  - Species and pathways relevant to plasma time scale ( $\sim 10$ 's ns)

- 26 Species :

E, O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>4</sub><sup>+</sup>, O<sub>4</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub>(a1), O<sub>2</sub>(b1), O<sub>2</sub><sup>\*</sup>, N<sub>2</sub>(A), N<sub>2</sub>(B), N<sub>2</sub>C, N<sub>2</sub>(a1), CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub><sup>+</sup>, CH<sub>3</sub><sup>+</sup>, CH<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sup>-</sup>

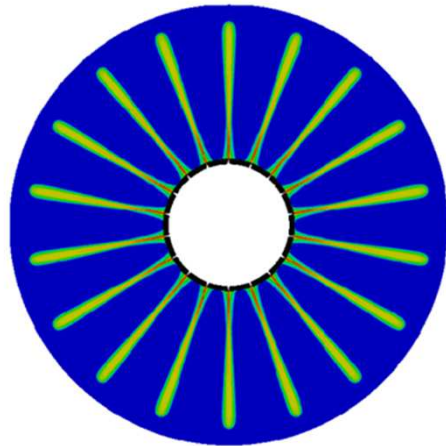
- 85 Reactions :

1) electron impact, 2) ion-ion, 3) ion-neutral, 4) neutral-neutral

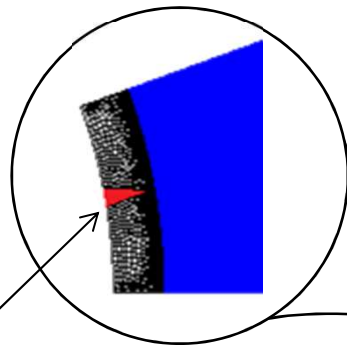
	A/F	CH <sub>4</sub> : O <sub>2</sub> : N <sub>2</sub>
Stoichiometric	17.2:1	0.054945 : 0.198462 : 0.746539
lean	40:1	0.02439 : 0.204878 : 0.0770732

# 計算形状 – 同軸電極 –

WAVE FRONT



- 20 degree slice
- ~60,000 cells
- 27 deg tip
- 40 kV square shape pulse (10 ns)



誘電体内に尖った電極が埋め込まれている。

ROUGHNESS ELEMENT  
(POWERED ELECTRODE)

DIELECTRIC  
SUBDOMAIN

SYMMETRY  
BOUNDARY

PLASMA  
SUBDOMAIN

GROUND

$r = 1.2 \text{ mm}$

SYMMETRY  
BOUNDARY

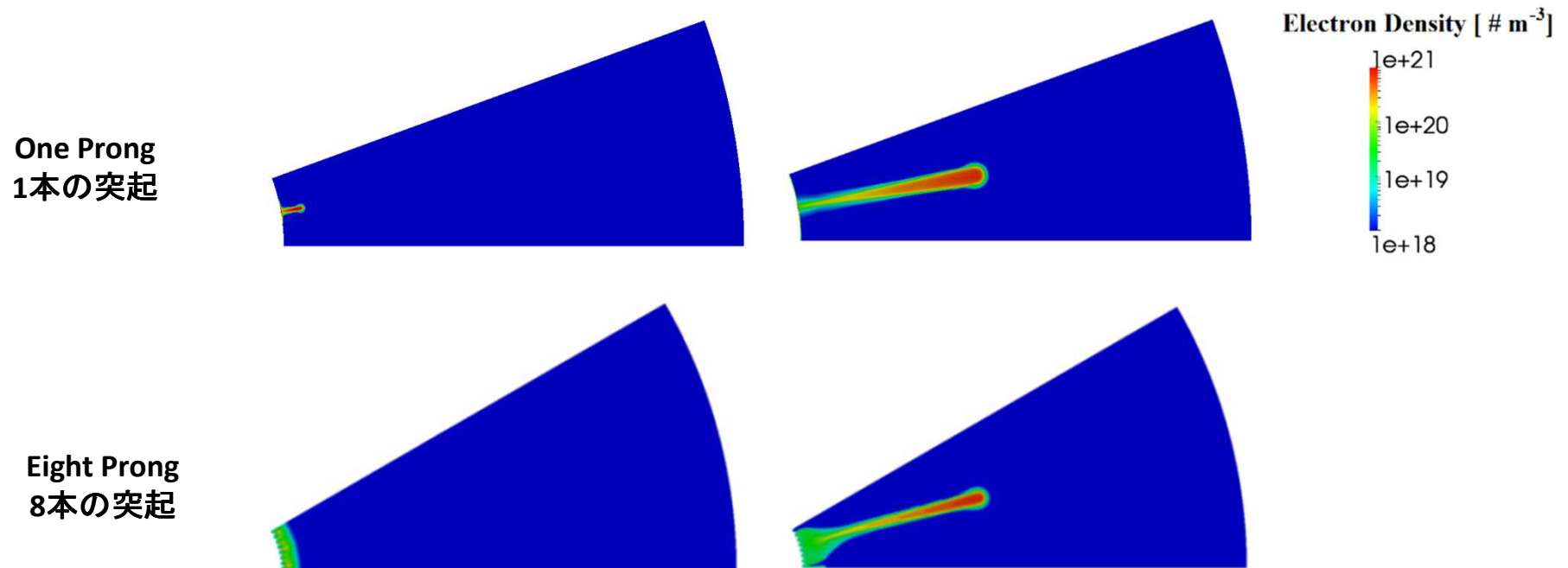
$r = 4 \text{ mm}$

WAVE FRONT

# 内側電極の粗密効果

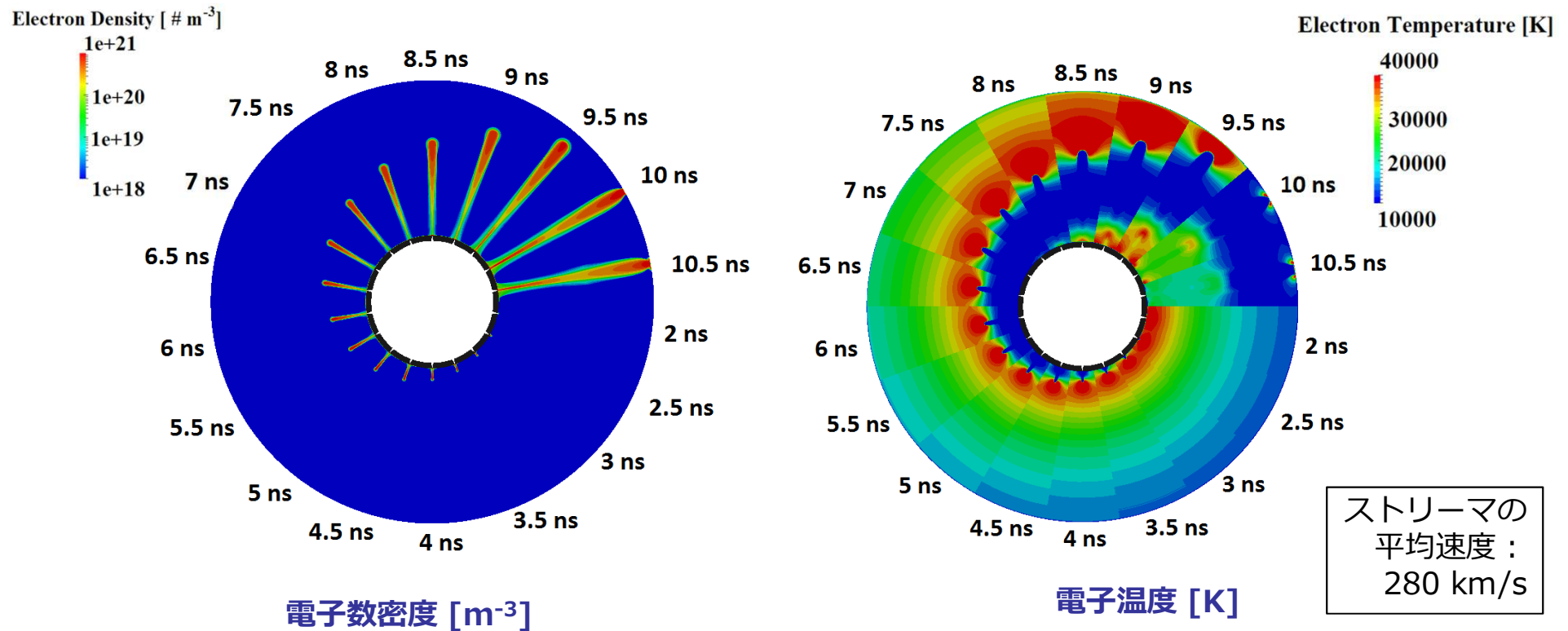
WAVE FRONT

- 複数のストリーマが尖った内側電極(突起)に発生
- 複数のストリーマは内側電極近傍で1つのストリーマに合体
- 1つの突起によるストリーマを考えればシミュレーションとしては十分



# 同軸電極点火器内でのプラズマ形成

WAVE FRONT



## Primary streamer followed by secondary streamer

8ns以降の中心電極付近の電子温度分布から、二次ストリーマの発生が分かる。一次ストリーマと二次ストリーマでは電子温度が異なり、着火遅れの改善に重要と思われるOラジカルは主に二次ストリーマで発生する。

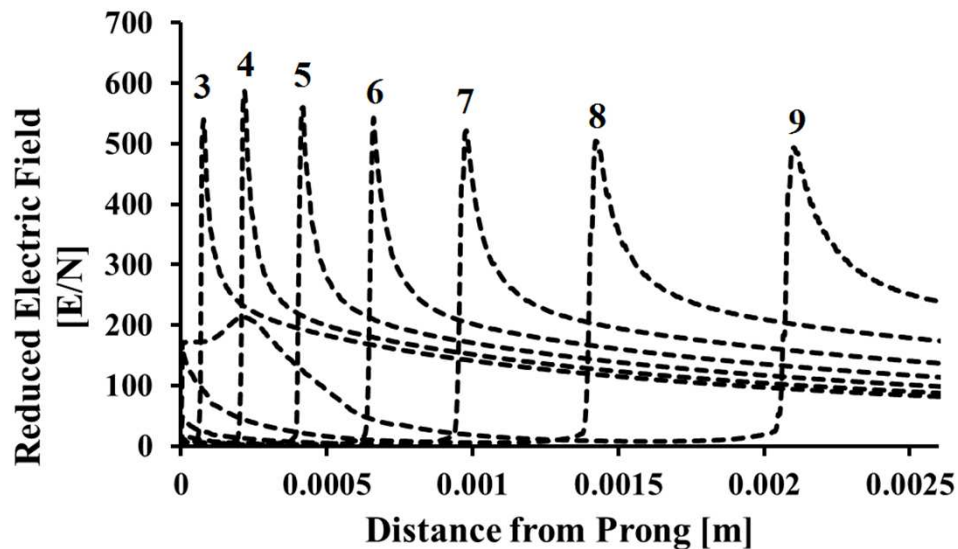
WAVE FRONT

# ストリーマ中心に沿った換算電場分布

WAVE FRONT

換算電場：電場強度と背景ガス密度との比 単位：Td (タウンゼント)

ピーク位置にストリーマの先端がある



- Primary streamer : ~500 Td
  - Secondary streamer : ~200 Td
- ⇒発生する化学種が異なる。

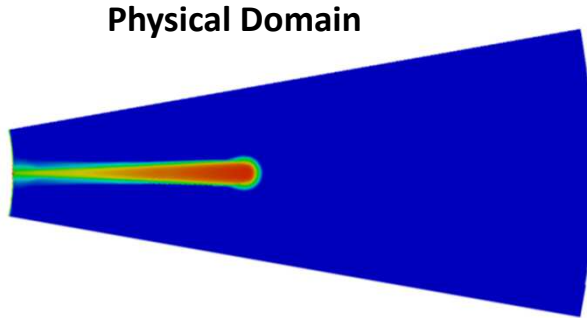
メタンの絶縁体破壊の閾値はおおよそ100Tdといわれている。  
二次ストリーマは、一次ストリーマで発生したプラズマが減衰することで、換算電場が閾値を超えたとき発生する。(二次ストリーマが発生する程度の長さのパルス幅が必要)

WAVE FRONT



# 同軸型放電における各粒子種の収量

WAVE FRONT



計算領域をこの大きさに仮定して化学種の平均数密度を計算（コロナ放電と結果を比較するため）

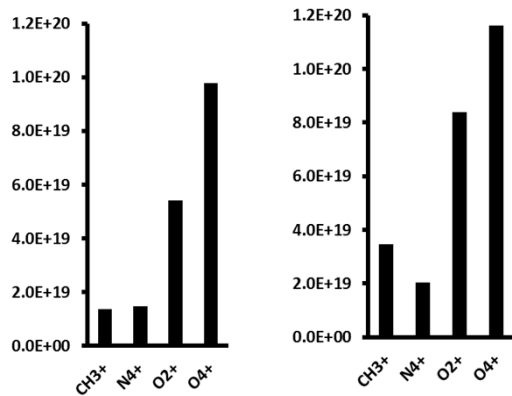


0.2 mm



4 mm

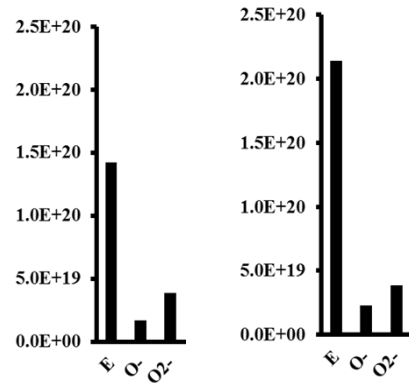
## Positive Ions



Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比

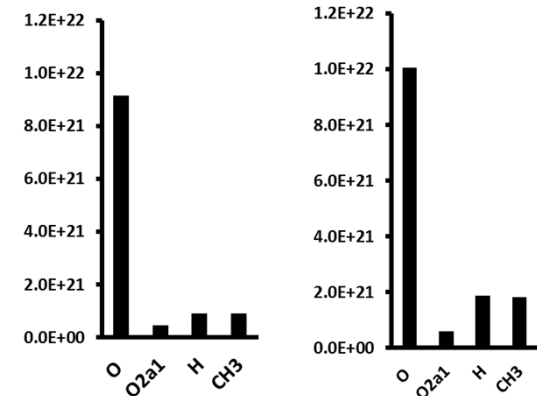
## Negative Ions



Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比

## Radicals



Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比

希薄の条件でもOラジカルが理論空燃比の条件とほぼ同量発生する

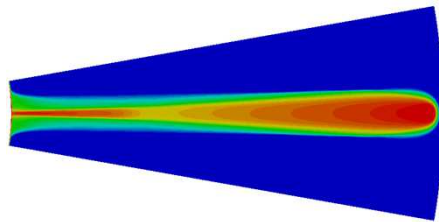
WAVE FRONT

# 同軸型放電における O ラジカルの密度

WAVE FRONT

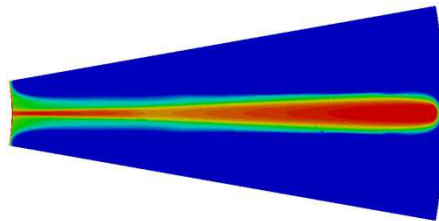
Lean  
希薄空燃比

9.7 ns

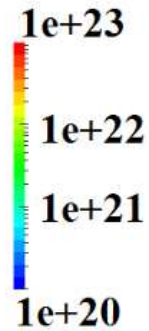


Stoich  
理論空燃比

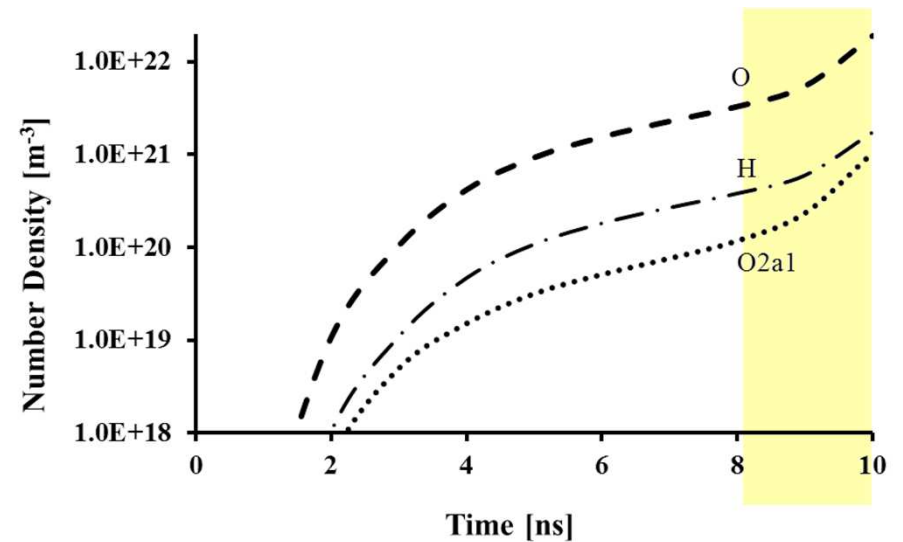
8.8 ns



O Density [ $\text{m}^{-3}$ ]



Radical Density Transients (LEAN)  
ラジカル密度の時間変化(希薄空燃比)

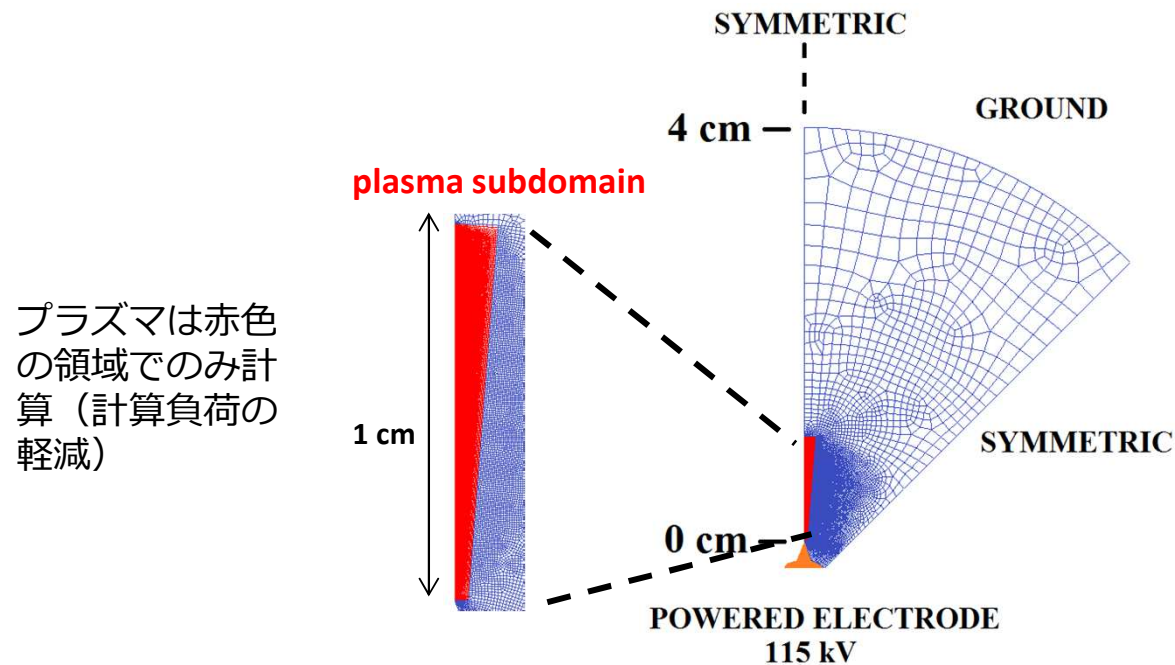


Oラジカルは主に二次ストリーマにおいて生成される

WAVE FRONT

# 計算形状 - コロナ型 -

WAVE FRONT

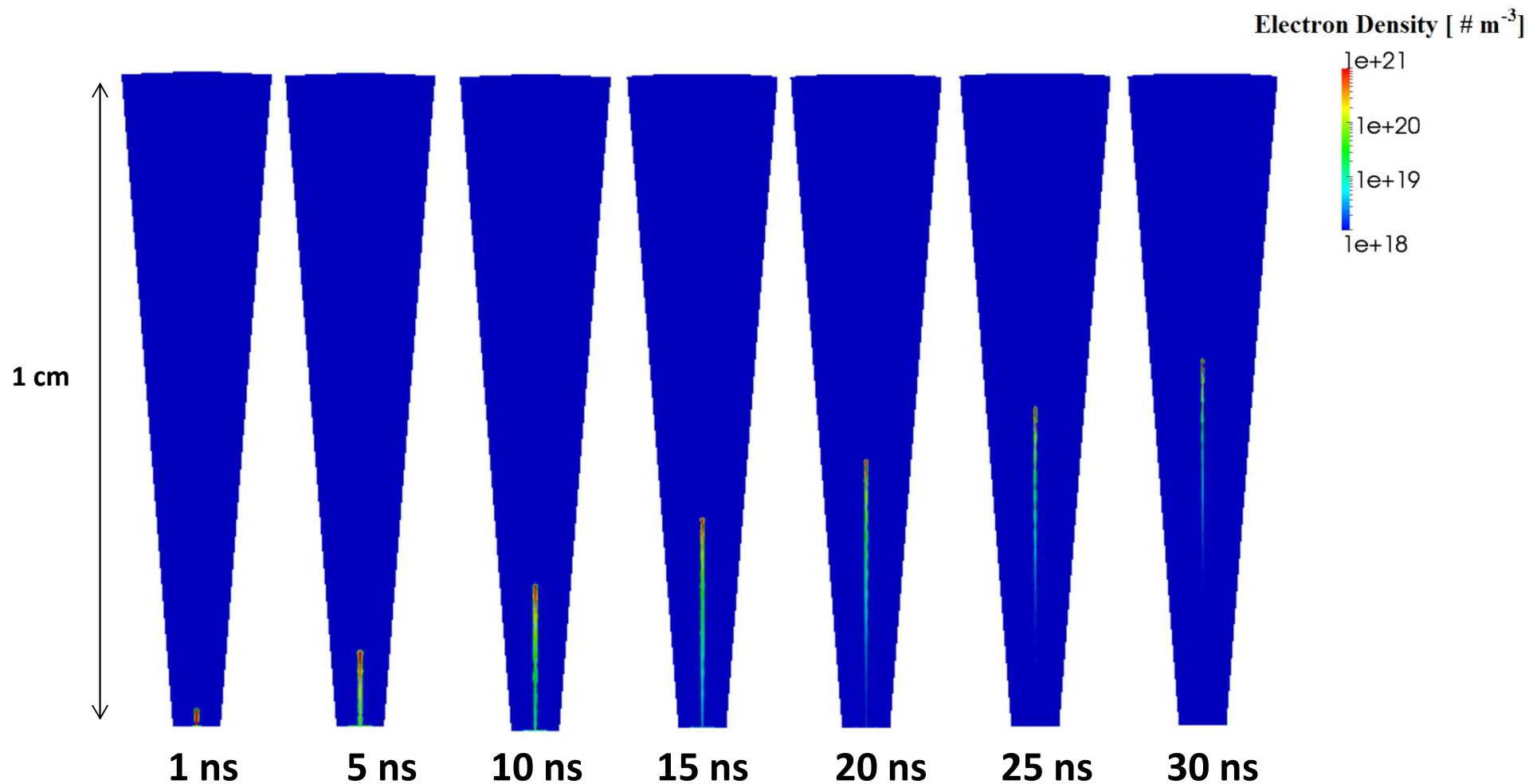


- 45 degree slice
- Inset plasma domain
- ~75,000 cells
- 115 kV pulse ( 30 ns )

WAVE FRONT

# 電子数密度の時間変化 -コロナストリーマ-

WAVE FRONT



ストリーマの平均速度：  
180 km/s

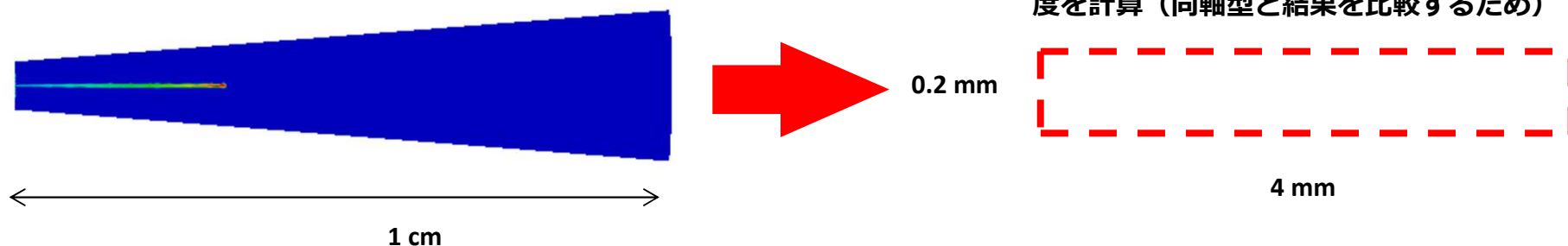
WAVE FRONT

# コロナストリーマにおける各粒子種の収量

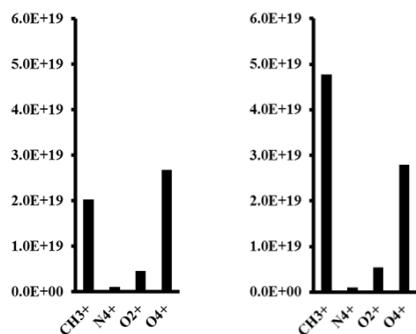
WAVE FRONT

Physical Domain

計算領域をこの大きさに仮定して化学種の平均数密度を計算 (同軸型と結果を比較するため)



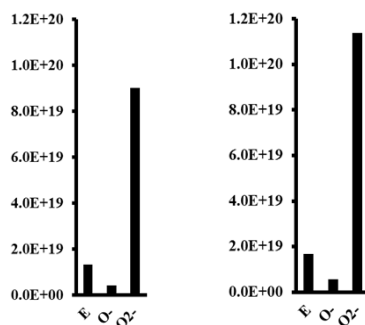
Positive Ions



Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比

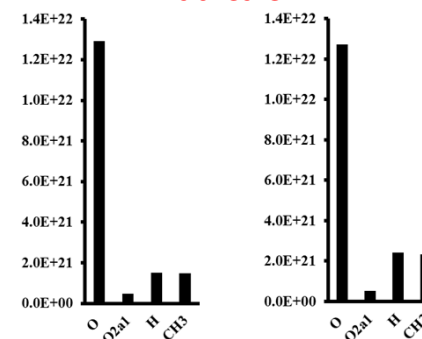
Negative Ions



Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比

Radicals



Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比

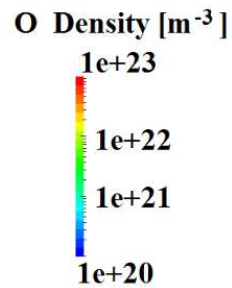
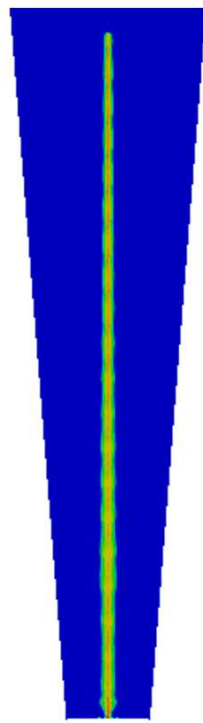
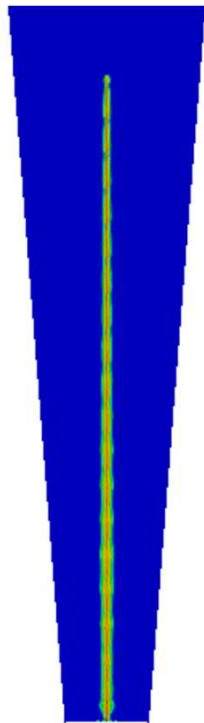
WAVE FRONT

# コロナストリーマにおける O ラジカルの密度

WAVE FRONT

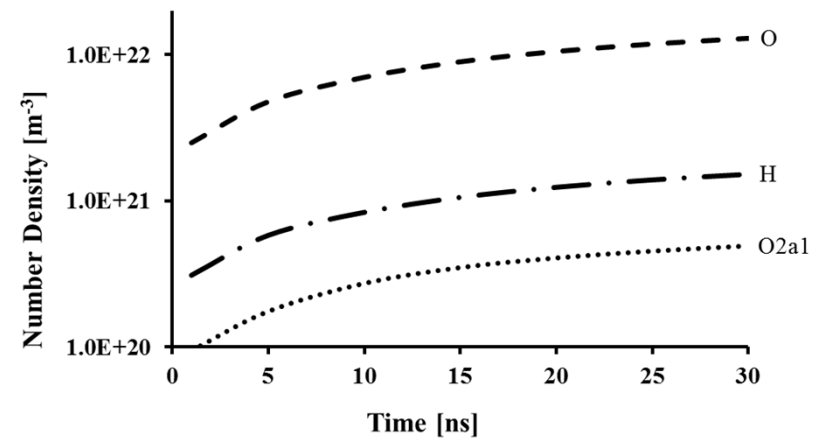
Lean  
希薄空燃比

Stoich  
理論空燃比



30 nanoseconds

Radical Density Transients (LEAN)  
ラジカル密度の時間変化 (希薄空燃比)



WAVE FRONT

# 結論 – 燃焼点火コールドプラズマシミュレーション –

WAVE FRONT

## 同軸電極形状

- 短いギャップのプラズマでは、一次、二次のストリーマが発生
- 二次ストリーマでラジカルの生成が最大

## コロナ形状

- 長いギャップのプラズマにより、一様分布のラジカルが発生
- 内側電極の先端部にて、ラジカル生成が最大

# お問い合わせ先

WAVE FRONT

株式会社ウェーブフロント

E-mail: [sales@wavefront.co.jp](mailto:sales@wavefront.co.jp)

Tel: 045-682-7070 (代)

FAX : 045-682-7071

Homepage: <http://www.wavefront.co.jp/>

所在地 :

〒220-6112

横浜市西区みなとみらい2-3-3 クイーンズタワーB 12F