

核融合エネルギーフォーラム 第12回全体会合
「東北から世界を繋ぐプラズマ・核融合エネルギー」
(H30/ 2/13 東北大学 金属材料研究所)

プラズマ研究の新展開

～核融合から航空宇宙、新素材、医農工連携へ～

安藤 晃

東北大学・工学研究科

1. 電気情報系におけるプラズマ研究
2. プラズマ理工学と宇宙工学、核融合研究との連携
3. 磁気ノズルと比推力可変推進機
4. 核融合用 高周波負イオン源
5. 航空工学への展開: プラズマアクチュエータ (PA)
6. 材料科学への展開: プラズマナノ・カーボンデバイス
開発
7. プラズマ医療・農業への展開

電気エネルギーシステム専攻

(教授) 安藤 晃
(准教授) 高橋 和貴
(助教) 小室 淳史

- 先進宇宙プラズマ推進機の開発
- 高速・高密度プラズマ流の生成・制御と物理
- 核融合プラズマ加熱用負イオン源の開発
- プロセスプラズマシステムの開発と応用
- 高電圧・大気圧プラズマを利用した気流制御および環境応用技術開発
- プラズマシミュレーションモデルの開発

電子工学専攻

(教授) 金子 俊郎
(准教授) 加藤 俊顕
(助教) 高島 圭介
(助教) 佐々木 渉太

- フロンティアプラズマ(宇宙, 核融合, 気液界面)における非線形・輸送・界面現象の解明
- プラズマ利用次世代エネルギー源(太陽電池, 燃料電池, 核融合発電)創成の基礎研究
- プラズマ応用新規フラーレン・カーボンナノチューブ・グラフェンの創成
- プラズマ応用ナノバイオエレクトロニクスの開発研究(ナノカーボン・DNAネットワーク形成)
- プラズマ-医療・農業融合研究(遺伝子治療, 減農薬栽培, 成長促進)

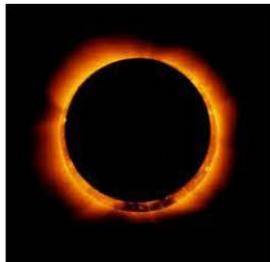
プラズマダイナミクス

スペースプラズマ加速現象の詳細解明
エッチング装置やスパッタリング装置開発
核融合プラズマ
電気推進機開発への応用

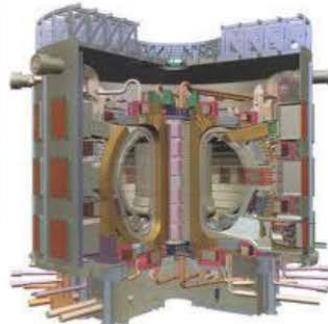
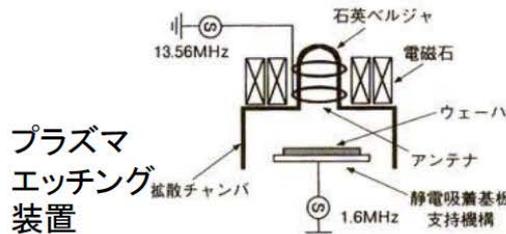
不均一磁場中のプラズマダイナミクスは多くのプラズマ理学・工学に関連する大きな研究トピックスである。



太陽フレア



オーロラ
太陽コロナ



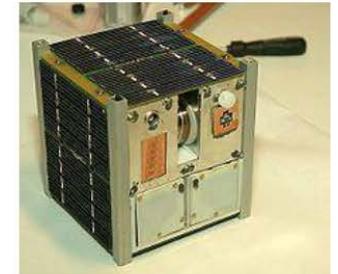
無電極プラズマ推進機開発

惑星探査用エンジン (> kW スラスト)
小型商業衛星への搭載 (< 数100W スラスト)
人口衛星制御 (長期運用が可能)

近年の宇宙利用開発産業における推進エンジンの重要性は大きく、長期運転が可能な推進エンジンの開発は必須である。

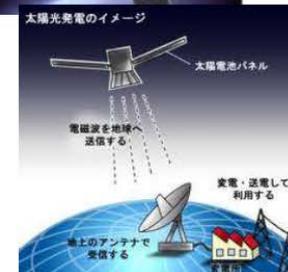


惑星探査

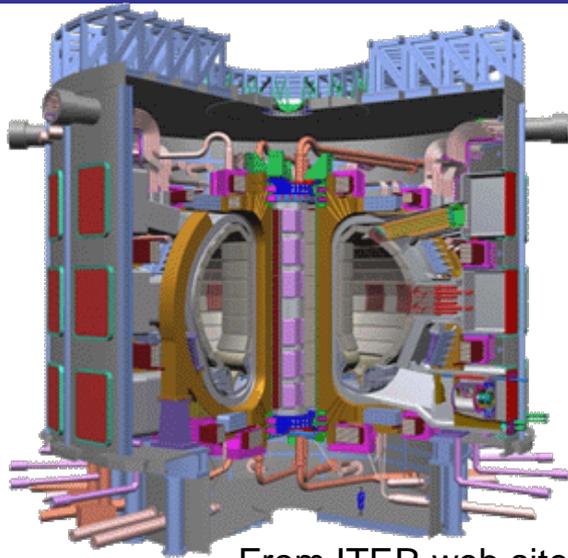


小型衛星 (CubeSat)

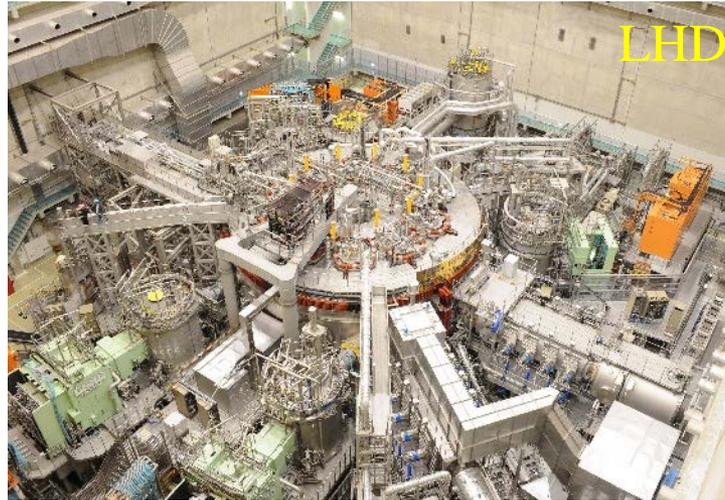
核融合炉
(ITER等)



宇宙太陽発電システム



From ITER web site



NBIシステムと負イオン源

我が国の水素負イオン源技術は世界一

- NBIは核融合プラズマ加熱法の重要な手段。計測用ビームとしても必要。
- 負イオン源をベースとした大電力定常動作が求められている。

長時間運転をめざしたRF負イオン源開発

ITERからDEMOへ NBIシステムの課題

- 定常動作
→大型RF負イオン源開発
- 中性化効率向上(60→100%)
→光中性化セル
- 高エネルギービーム(>MeV)
→静電加速から高周波加速へ

Ando-Takahashi lab in Sendai

Thruster

Fundamental plasma physics

Ion beam physics

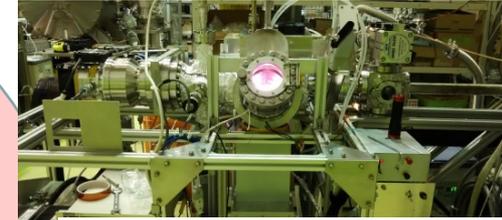
Industrial plasma devices

RF system development

HITOP

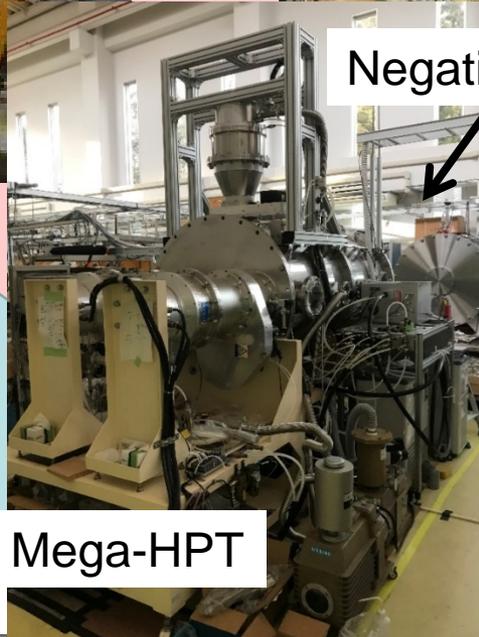


Negative ion source

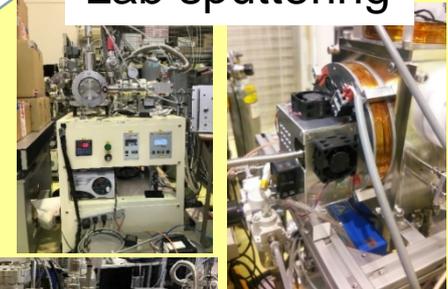


Ultra High vacuum sputtering

Negative ion source



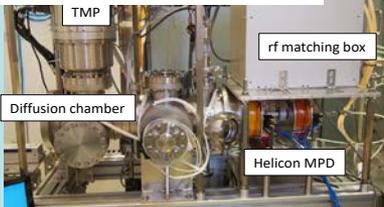
Lab sputtering



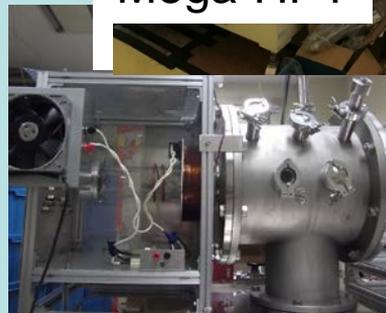
HPT-I



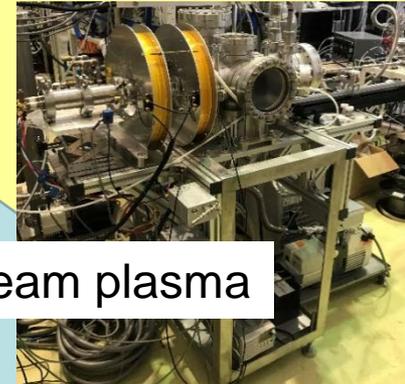
Helicon MPD



Mega-HPT



E-beam plasma

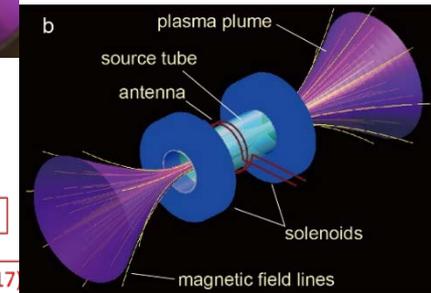
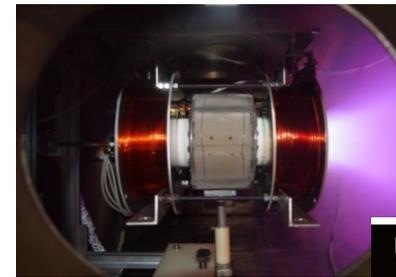
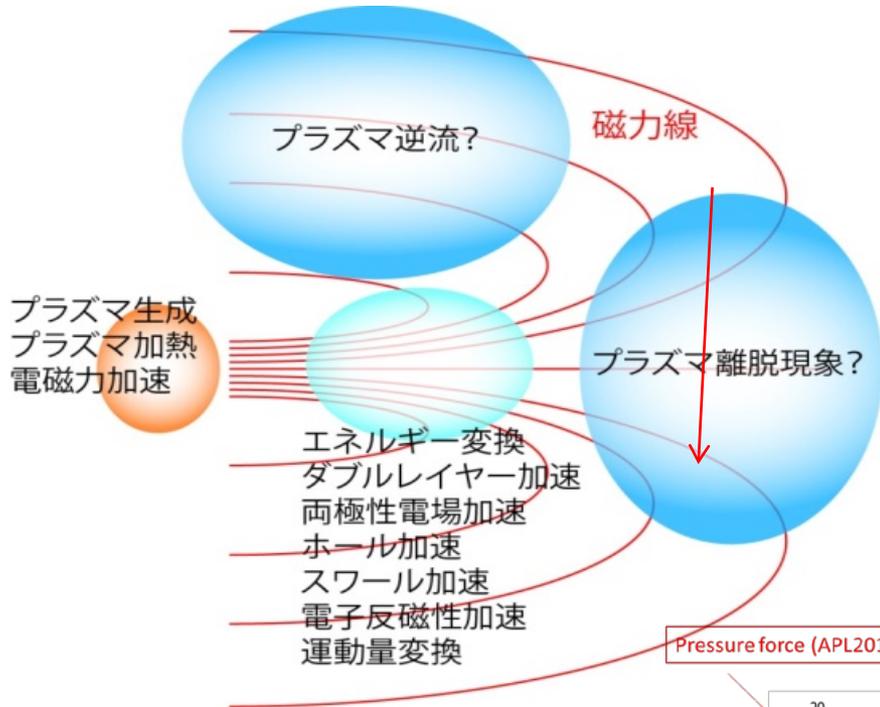


Magnetic nozzle plasma thruster

Magnetic nozzle thruster includes many aspects of physics

New space application

Space debris removal



Pressure force (APL2011)

Diamagnetic thrust (PRL2011, POP2012, PRL2013)

Stretching the magnetic field (PRL2017)

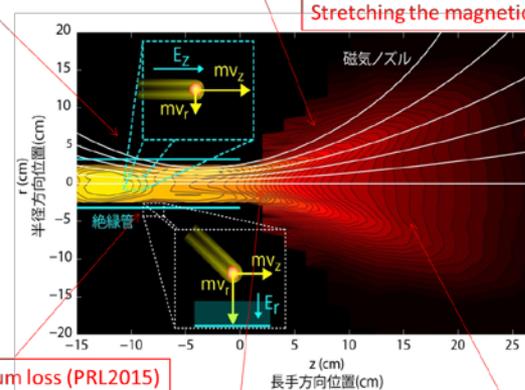
Fundamental physics issues

Plasma-neutral interaction (APL2016x2)

Momentum loss (PRL2015)

Spontaneous charge neutralization (Pop2007, PRL2011)

Adiabatic electron cooling (PRL2018)



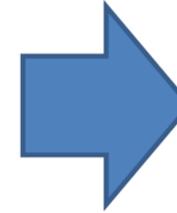
Space debris removal
(Scientific Reports 2018
日刊工業新聞
日経産業新聞
Phys. Org,
Euretek Alert,
Etc...)

化学推進機

化学燃料 (水素+酸素 等)を燃焼し一気に噴射する (化学推進).

特徴: 莫大な推進力 (数千 kN).
燃料使用量が多い.

噴射密度 大
噴射速度 小



打ち上げ時に使用する.

電気推進機

僅かな燃料 (Xe キセノン等)をプラズマ化し, イオンを電氣的な力(クーロン力 $F = qE$ 等)で加速することで, 超高速で噴射 (電気推進).

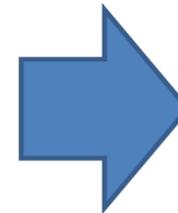
特徴: 小さい推進力 ($\mu\text{N} - 1\text{N}$).
燃料使用量が少ない.

推力: $F = \dot{m}U$ [N]

ロケットを動かす力

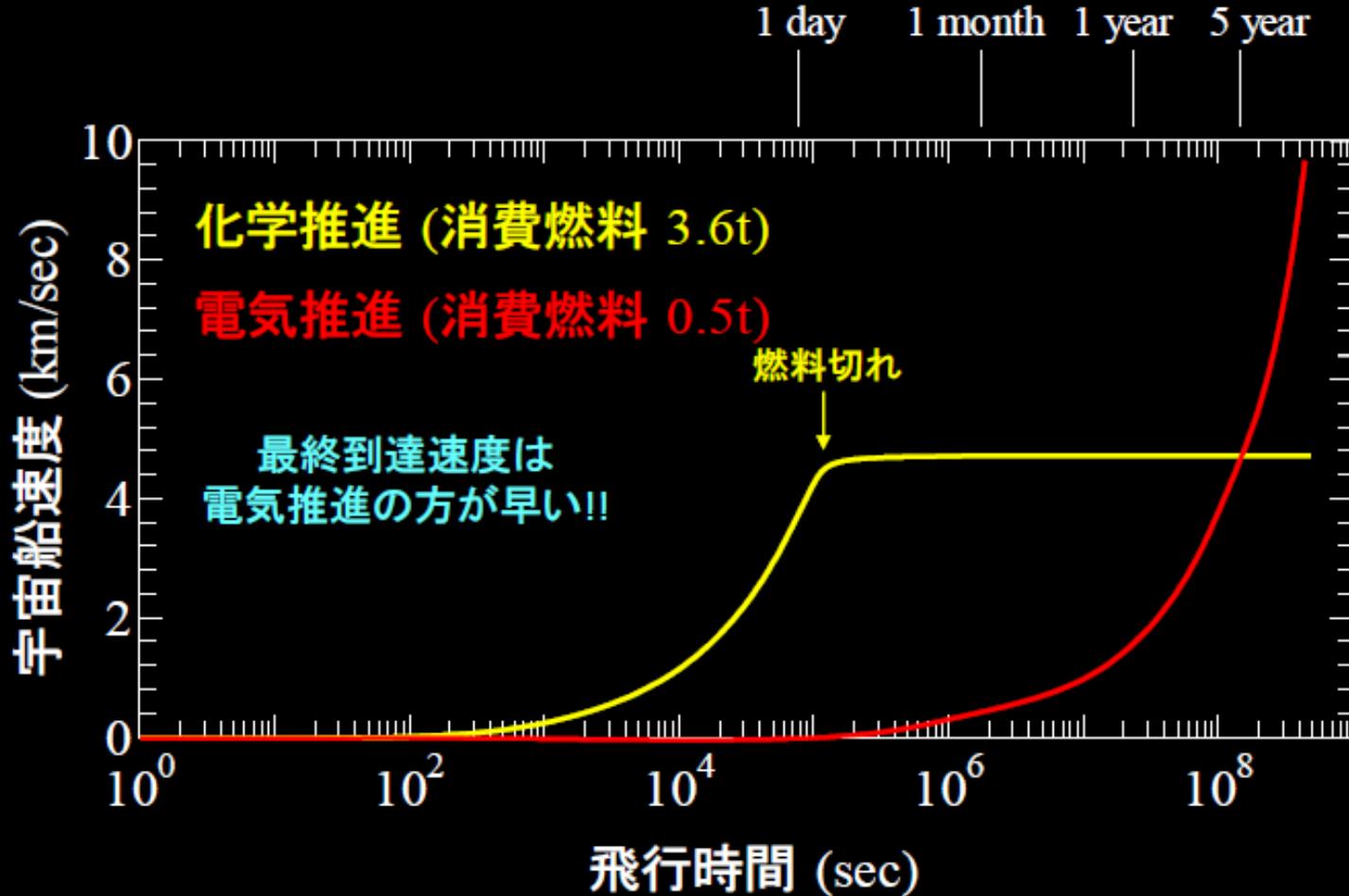
比推力: $I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} = \frac{U}{g}$ [sec]

ロケット燃料の排出速度 (ロケットの燃費)



宇宙空間での主推進エンジンとして使用. (衛星運用, 惑星探査)

到達速度（化学推進と電気推進）





小惑星「イトカワ」

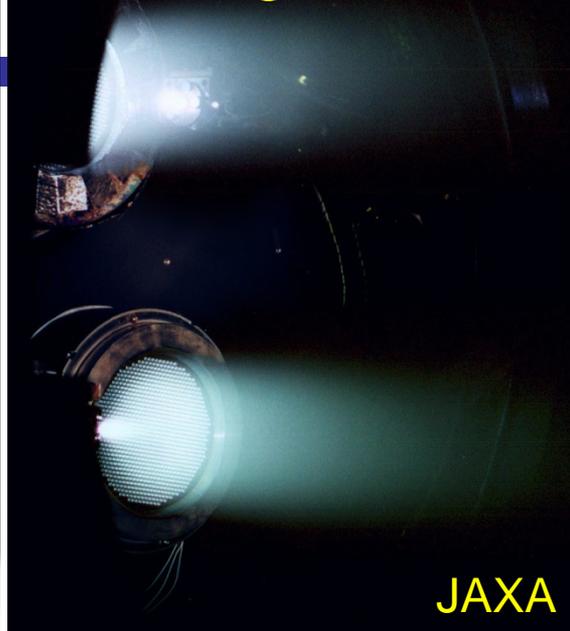
「Hayabusa」

月以外の天体に送り込み、
戻ってきた人類初の宇宙船



JAXA

「Ion Engine」



JAXA



イオンエンジン



ホールスラスタ



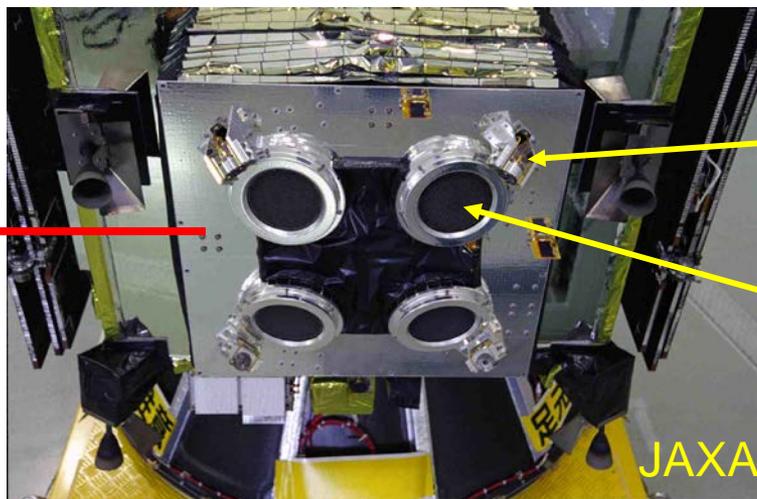
DCアークジェット



MPDスラスタ



JAXA



中和器
(電子源)

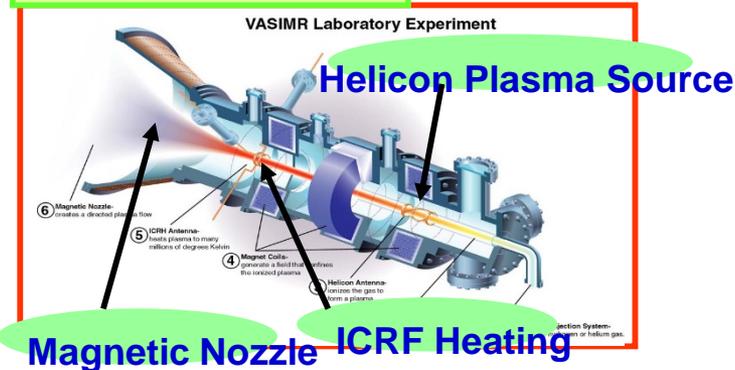
イオン源

JAXA

全質量510kg (液化キセノン66kg、化学燃料64kg)

発電能力2.6kW

VASIMR型推進機



RF Power

Variable

Plasma Production

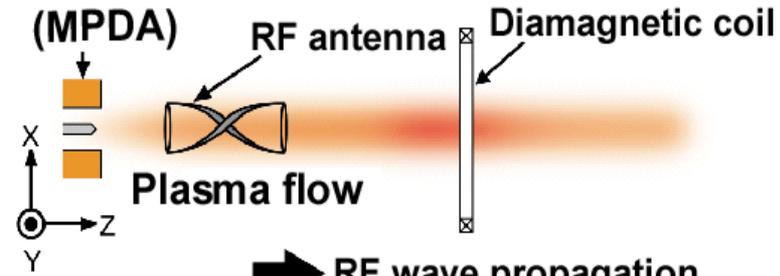
Plasma Heating

Thrust

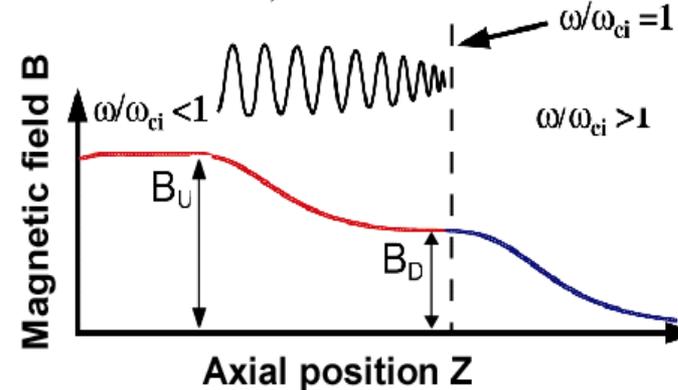
Specific Impulse

- ➡ Variable I_{sp} (more than 10000sec)
- ➡ controlled by RF power distribution
- ➡ no electrode system

Plasma source



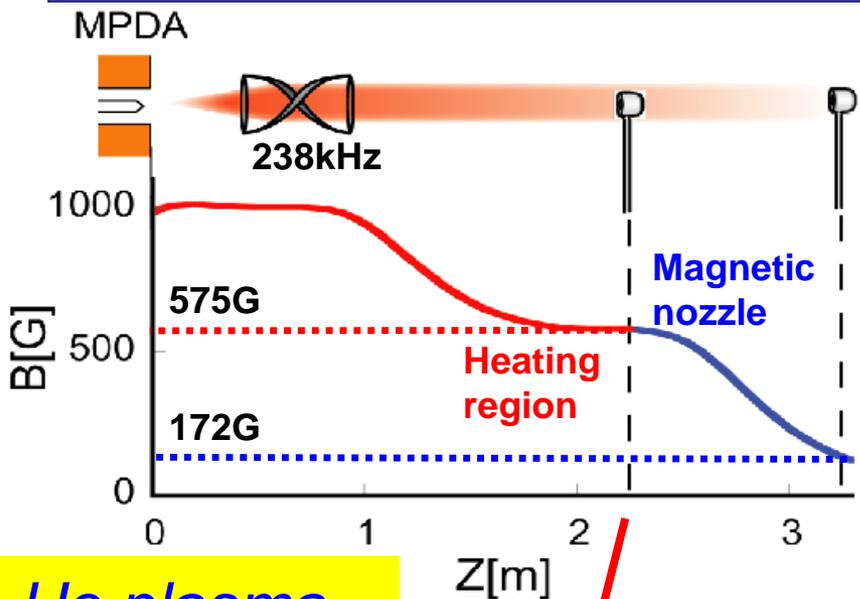
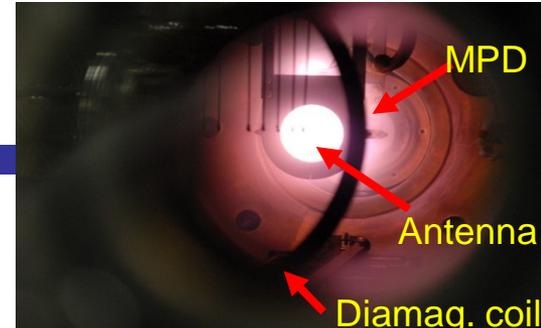
RF wave propagation



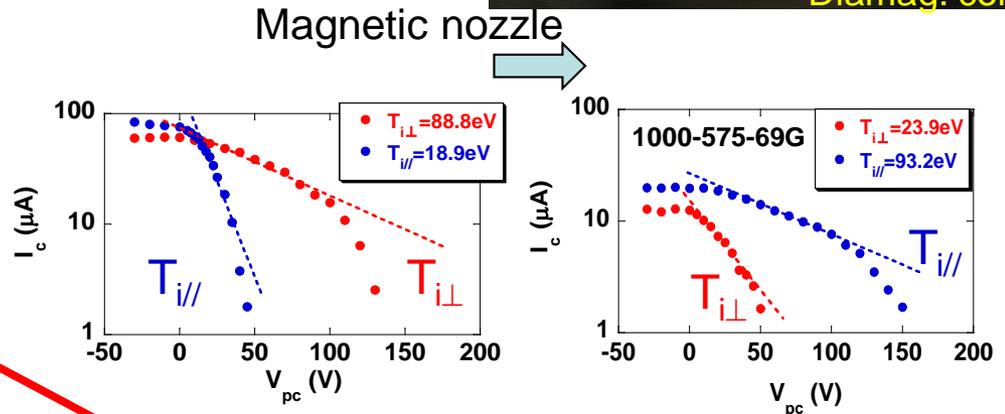
東北大での研究

- 高周波加熱と磁気ノズル制御の実証
- He及びHでの研究成果
→ ArやKrなどの利用へ
- MPDから完全RF化へ
→ FET電源を用いたRFプラズマ生成

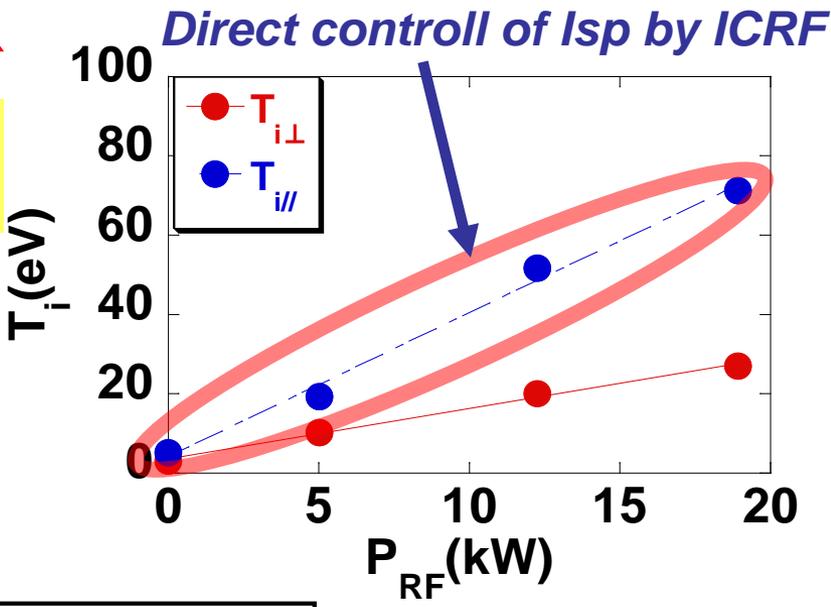
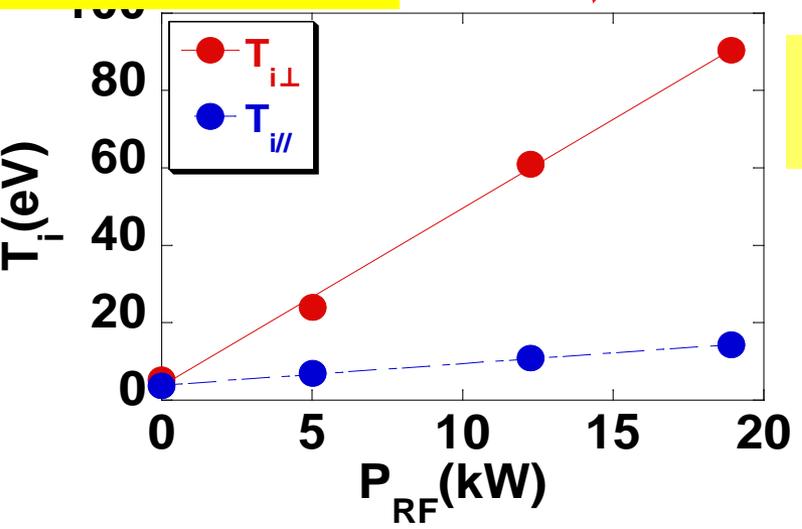
RF電力制御による比推力可変性能



He plasma



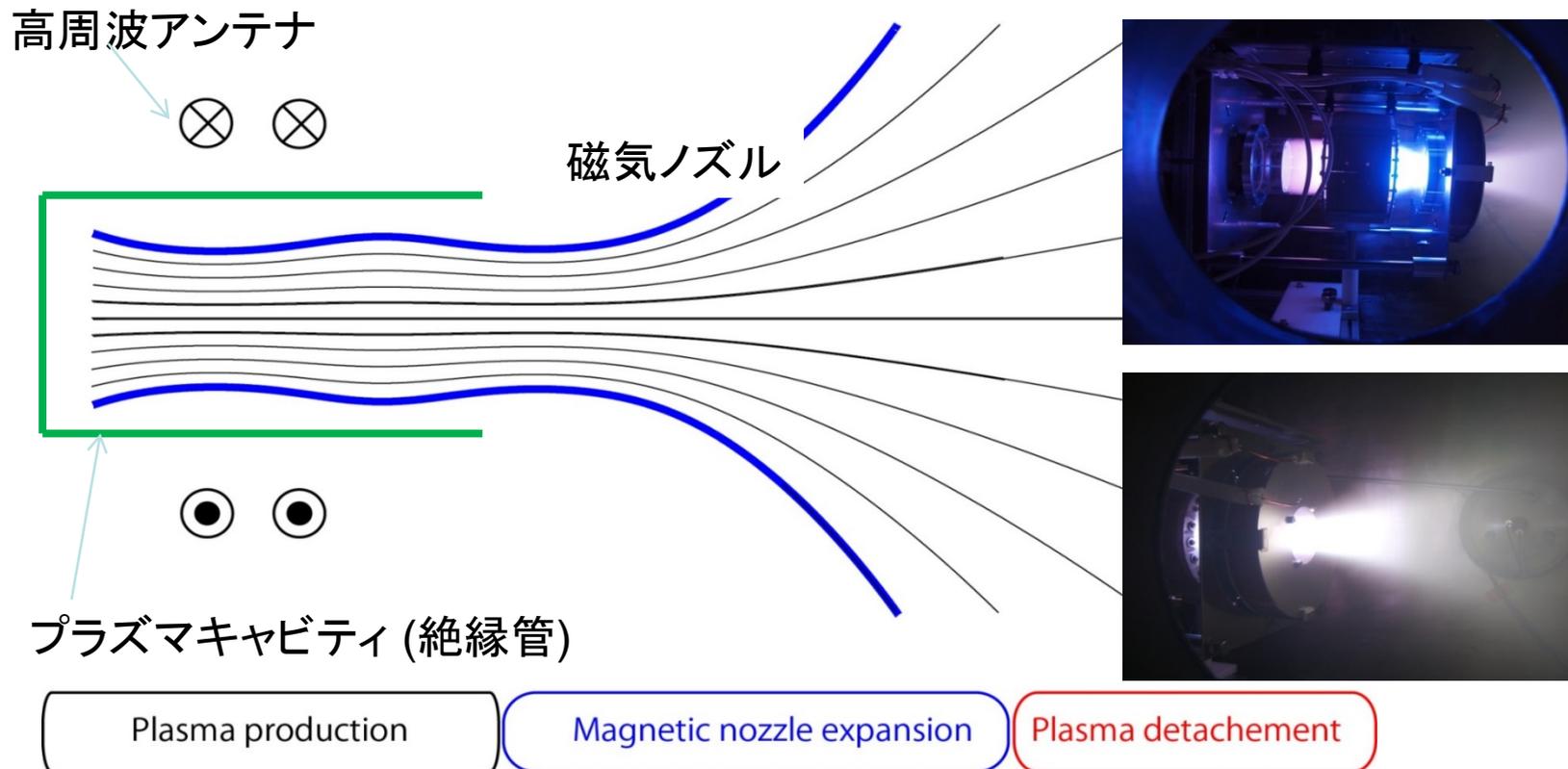
Magnetic Nozzle



He, B_U - B_D - B_N =1000-525-112G, f_{RF} =238kHz, $n_i=1.0 \times 10^{17} m^{-3}$ (at $Z=2.33m$ 、 $P_{RF}=19kW$)

Electrodeless Helicon Plasma Thruster

Target: a few ten W - A few kW power thruster



The momentum source of the helicon thruster is that of electrons (mainly pressure), which are easily coupled with the rf power.

Laboratory Observation of a Plasma-Flow-State Transition from Diverging to Stretching a Magnetic Nozzle

Kazunori Takahashi* and Akira Ando

Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

(Received 20 February 2017; revised manuscript received 18 April 2017; published 2 June 2017)

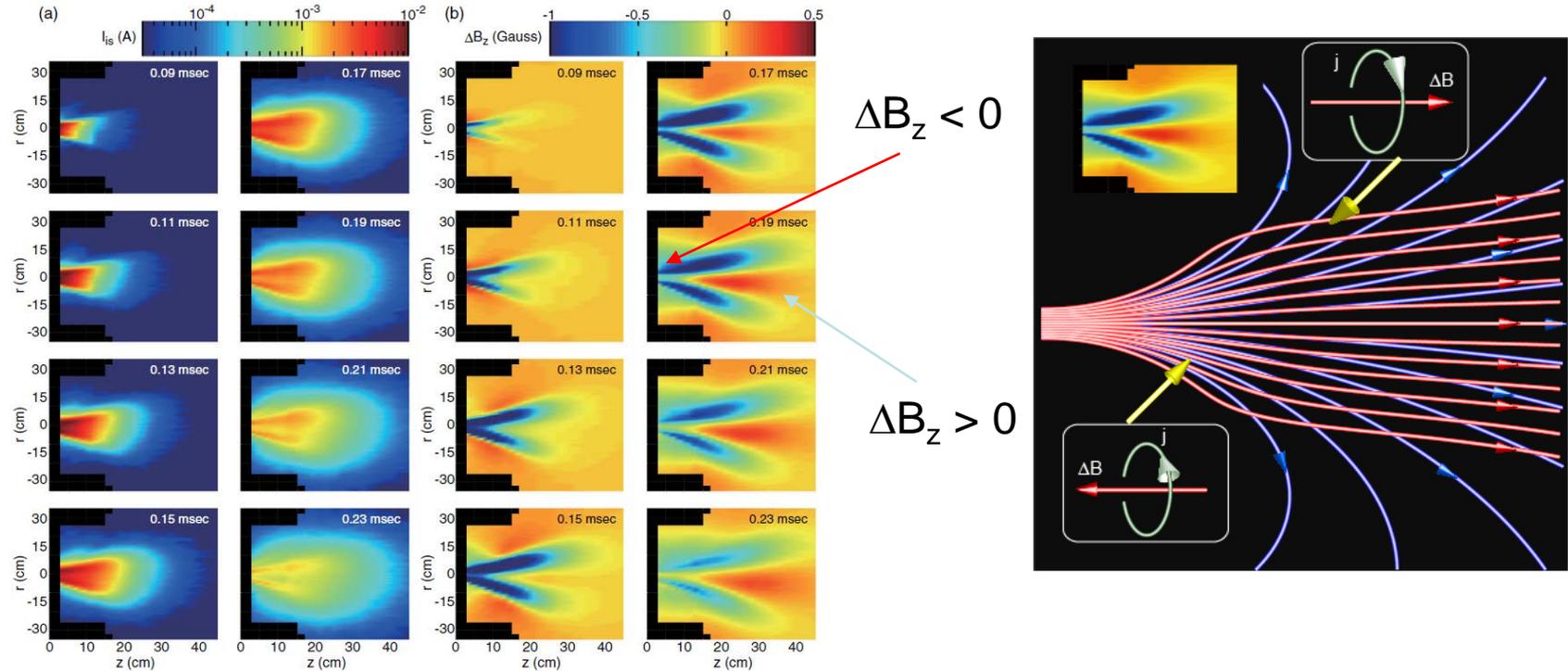


FIG. 2. Spatiotemporal evolution of (a) I_{1s} and (b) ΔB_z , taken for $I_B = 4.5$ A and $P_{rf} = 5$ kW. The rf power is triggered at $t = 0$ and the signals are averaged over 16 shots, where the measurements are performed at ~ 1200 points (~ 20 points along z and ~ 60 points along r). A movie can also be found as Supplemental Material [29].

Space debris removal

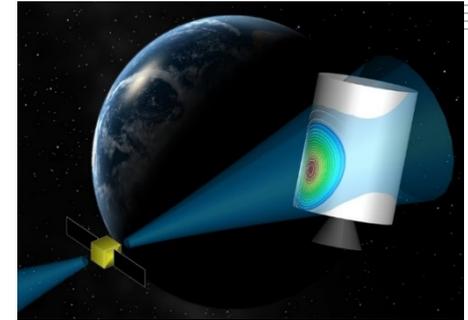
www.nature.com/scientificreports

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN Demonstrating a new technology for space debris removal using a bi-directional plasma thruster

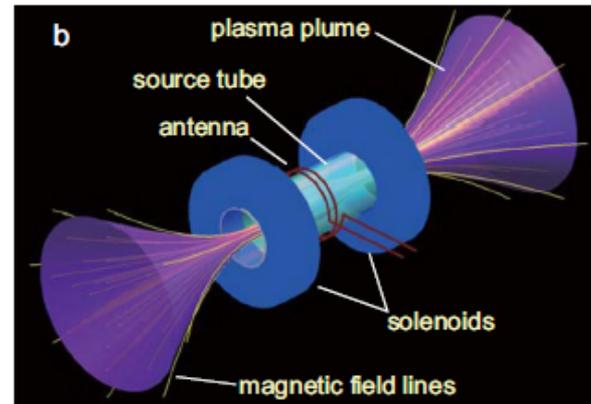
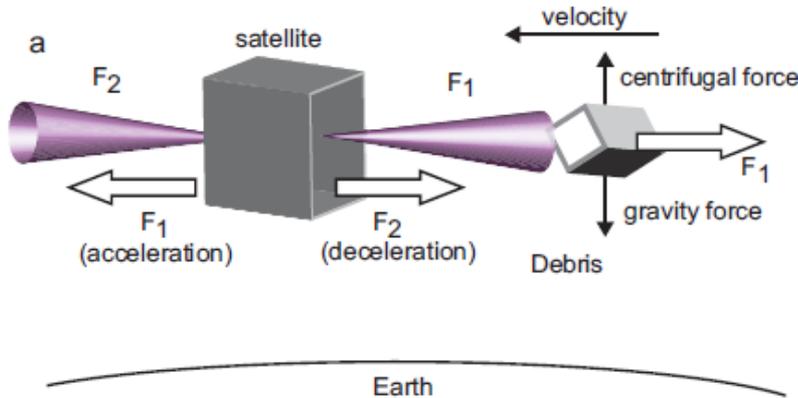
Kazunori Takahashi¹, Christine Charles², Rod W. Boswell² & Akira Ando¹

Received: 8 May 2018



<https://leosweep.upm.es/en/>
the ion beam shepherd (IBS) technology

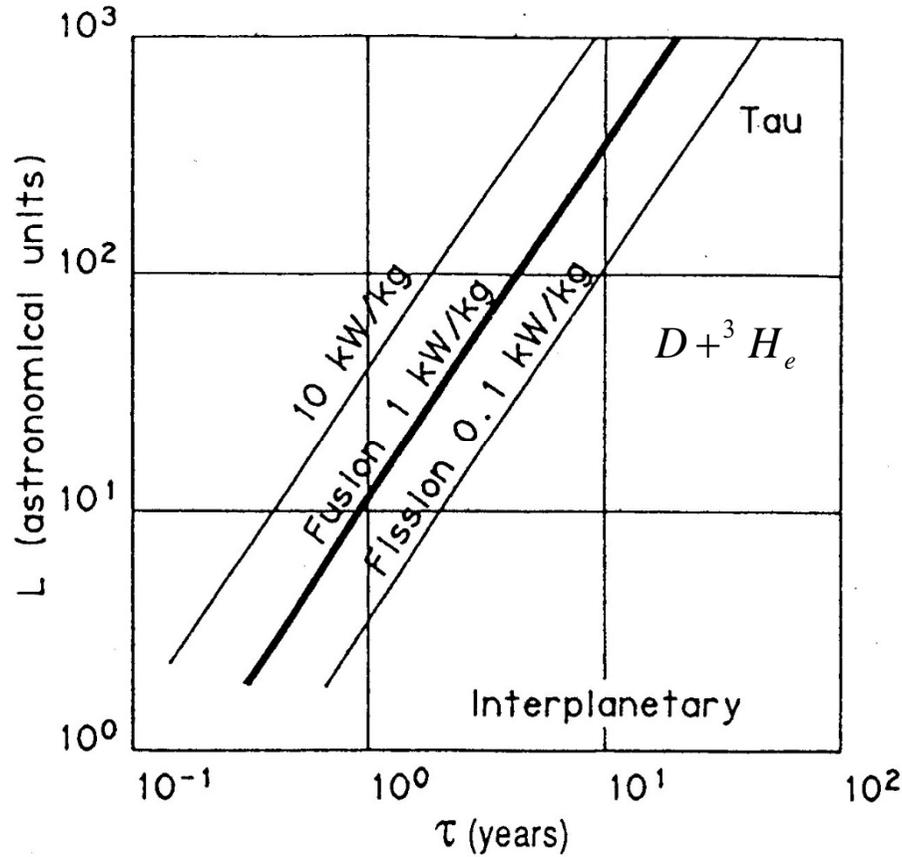
Concept of the space debris removal by the bi-directional helicon thruster



Very similar to the ion-beam shepherd method, but can be done **with only the single**

核融合推進 (Fusion Propulsion)

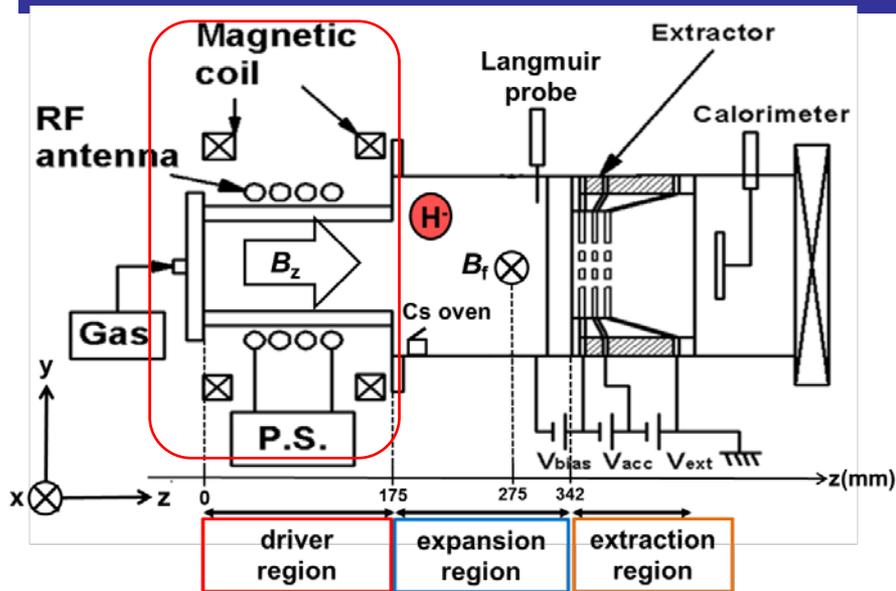
飛行距離と時間に対する比出力の影響



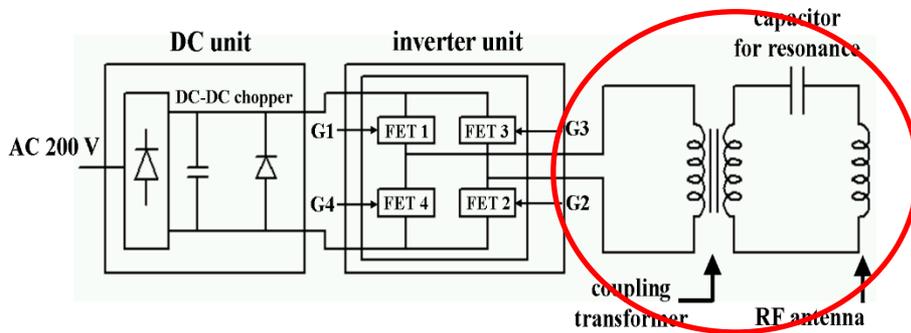
D-He³ Fusion



高周波(RF)イオン源の開発

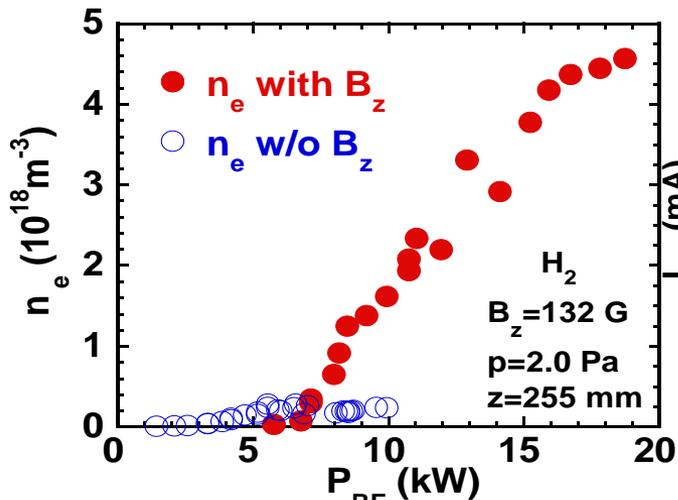


FET-RFシステム



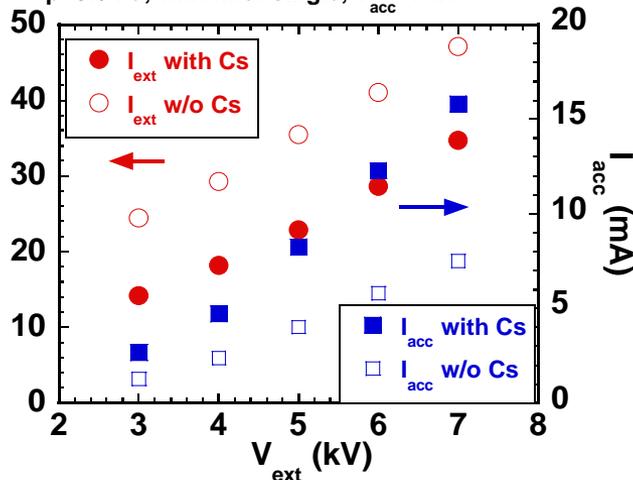
$P_{RF} = 35 \text{ kW}$, CW, $f_{RF} < 0.5 \text{ MHz}$

A. Ando et al, Rev. Sci. Instrum., 81(2010).

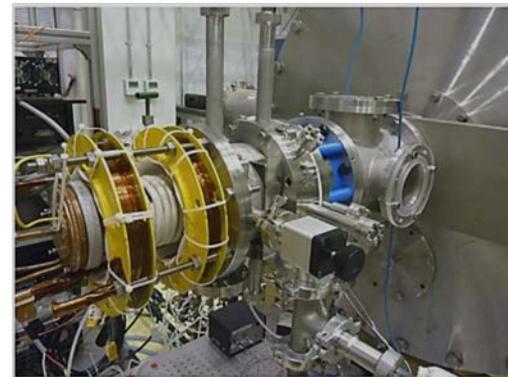


B_z印加時に密度上昇

20111105
f=324~328 kHz, V_c = 250V, P_{RF} = 15 kW, B=18.7 mT,
p=0.6 Pa, with filter single, V_{acc} = 7 kV

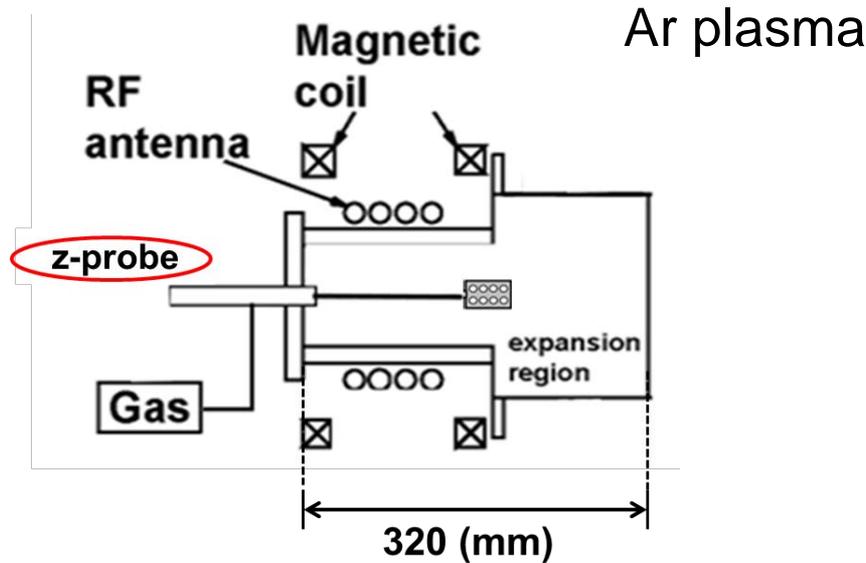


Cs導入とビーム引き出し実験

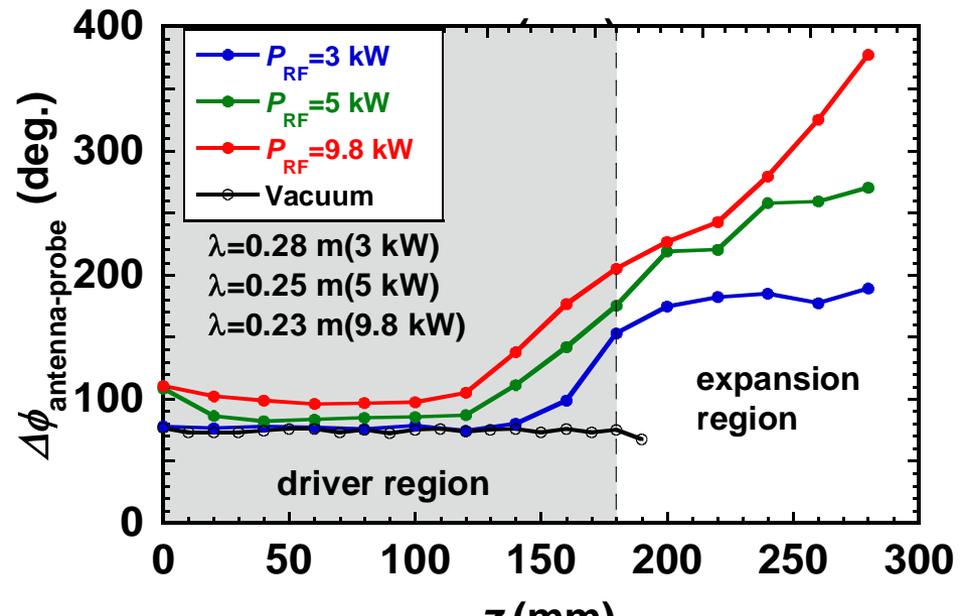
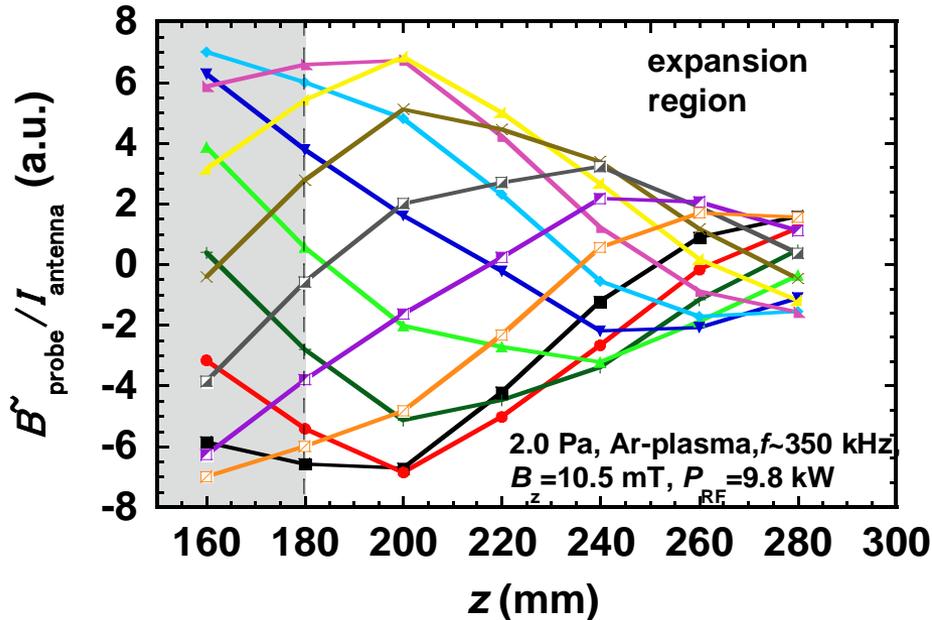
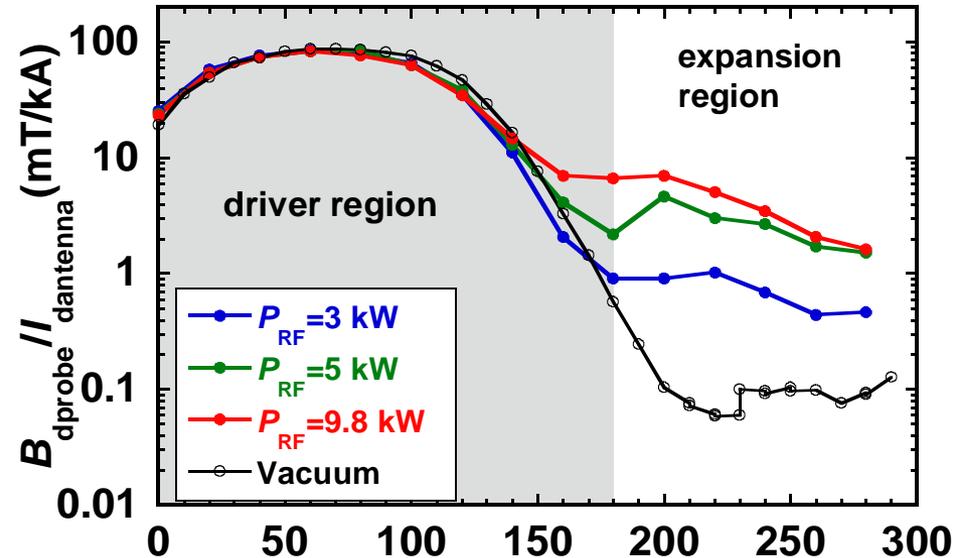


- 10¹⁹m⁻³を超えるRF生成高密度水素プラズマの実現
- Cs導入と長時間動作

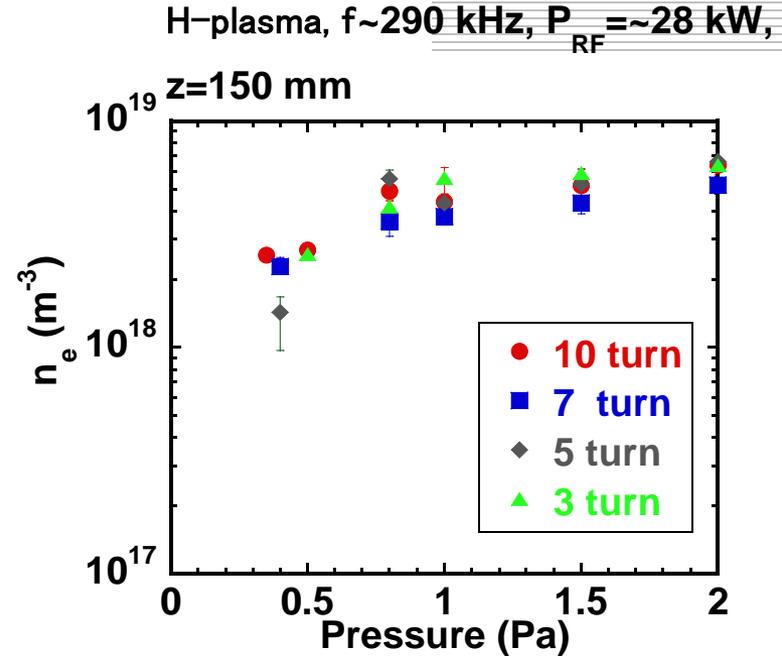
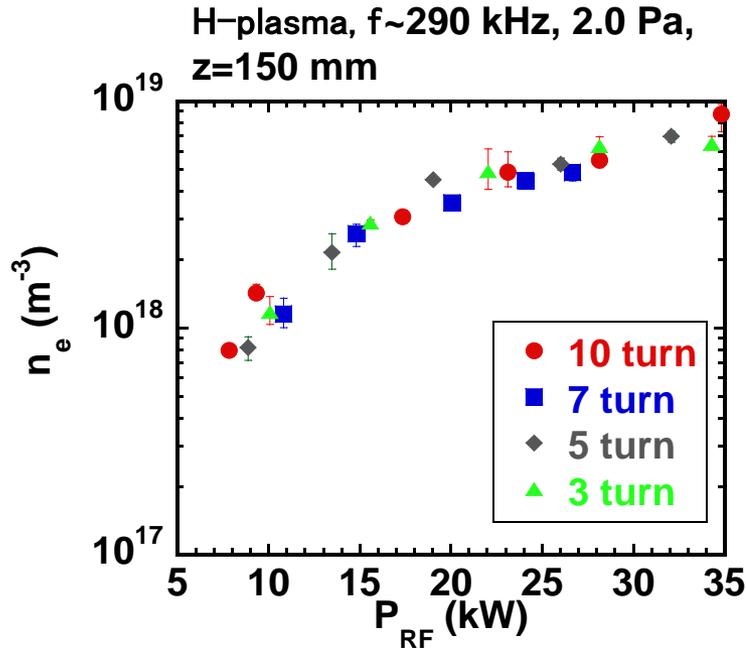
RFイオン源内でのヘリコン波観測



2.0 Pa, $B_z = 10.5$ mT, $P_{RF} = 3$ kW, 5 kW, 9.8 kW, Vacuum (10.2 kPa)



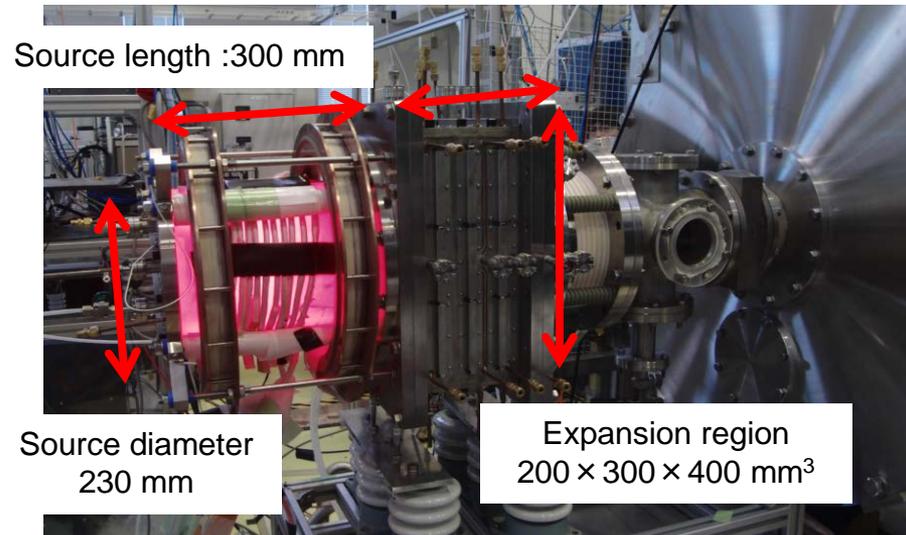
大型RF負イオン源の開発



- $10^{19} m^{-3}$ 水素RFプラズマの生成を確認。約0.3 Paの低圧放電が生成可能

→より高密度な放電へ

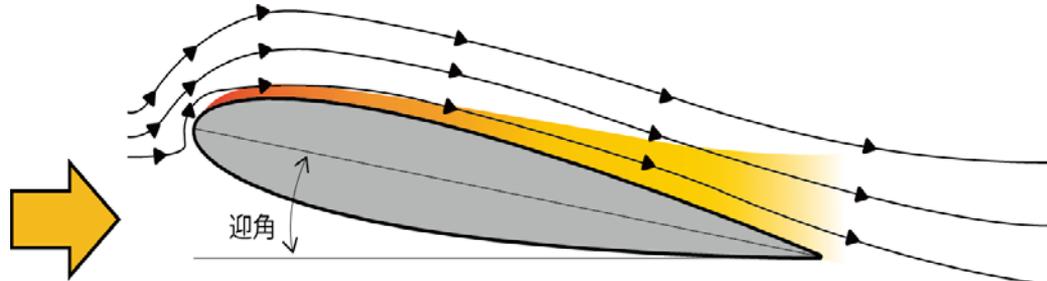
- 高効率RFイオン源開
- ビーム加速、安定性評価
- 長時間動作試験(Cs挙動)へ



プラズマアクチュエータ： 航空工学との連携

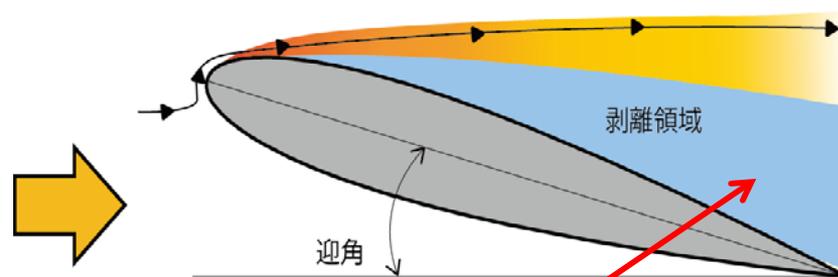
プラズマを翼面上で発生させ、剥離した気流の制御を行う

付着流れ = 揚力が発生している



フラップ(高揚力装置): 翼面積を増やすことで揚力を増す装置

剥離流れ = 揚力が発生していない

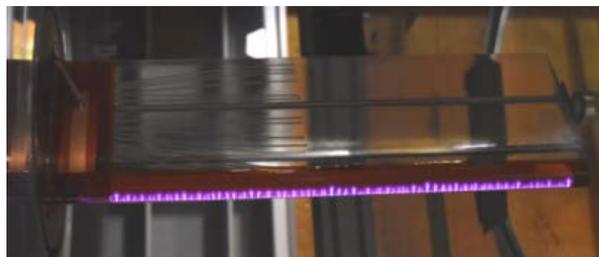


剥離領域
流れの速度が低下し、逆流が発生してしまっている

翼の表面でプラズマを発生させ、気流の流れを制御し、揚力を発生させる。

→ 火星飛行機へ

プラズマアクチュエータ



放電パラメータを変化させた際の特性
や火星大気中での効果を研究中・・・

シュリーレン法による流れ場の可視化



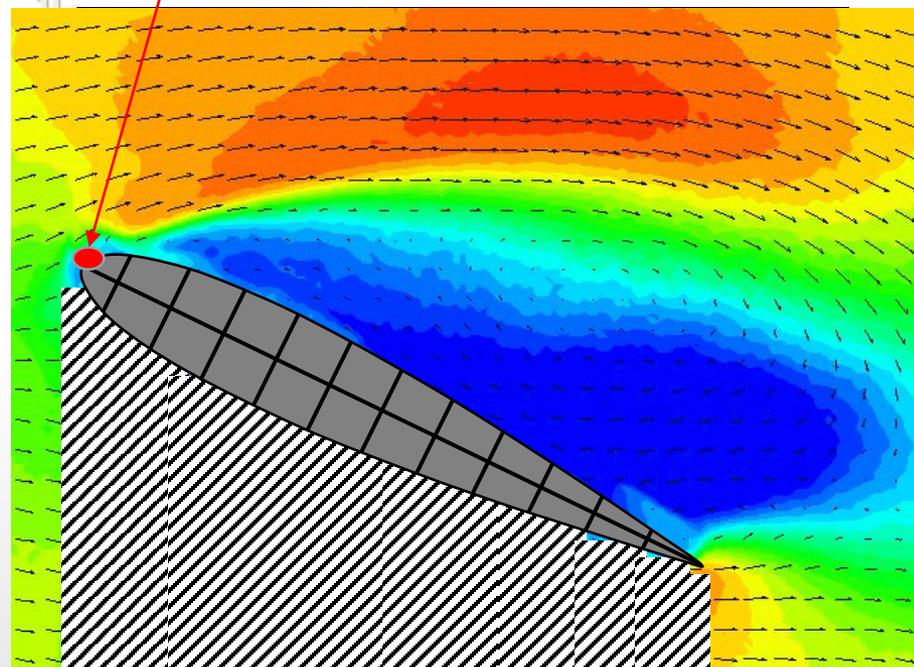
昨年からノズルを新しくした小型風洞



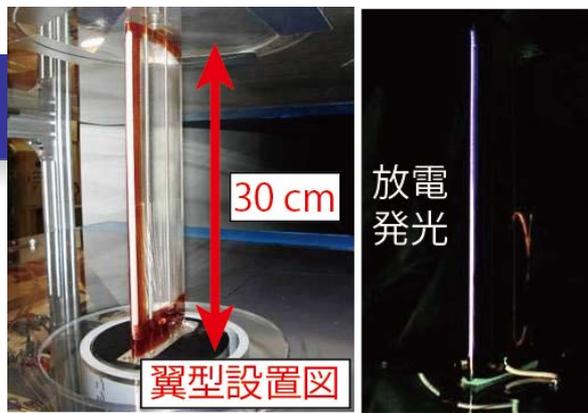
気流中でPAを駆動した時のシュリーレン像

先端でプラズマを発生

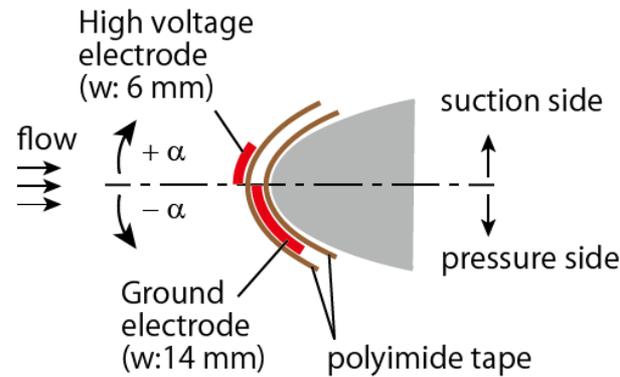
PIV法を用いた流れ場の可視化



PA駆動時における水平方向の流速分布

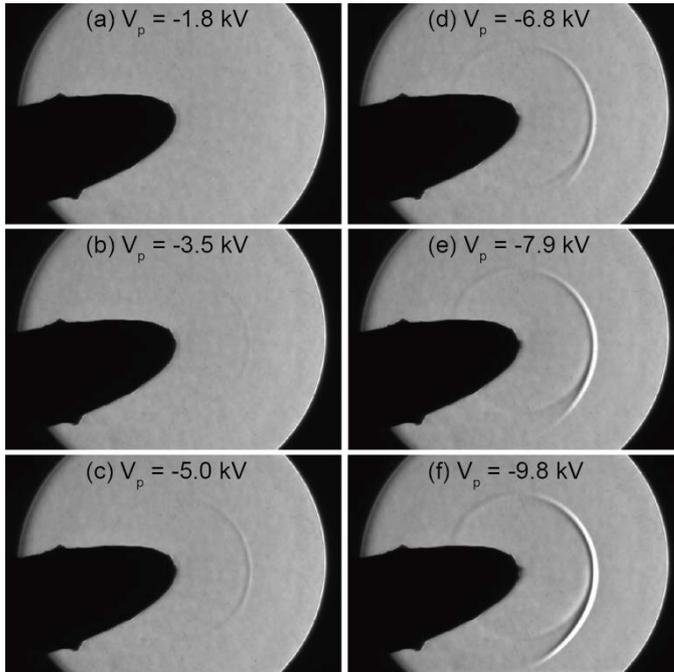


Experimental setups

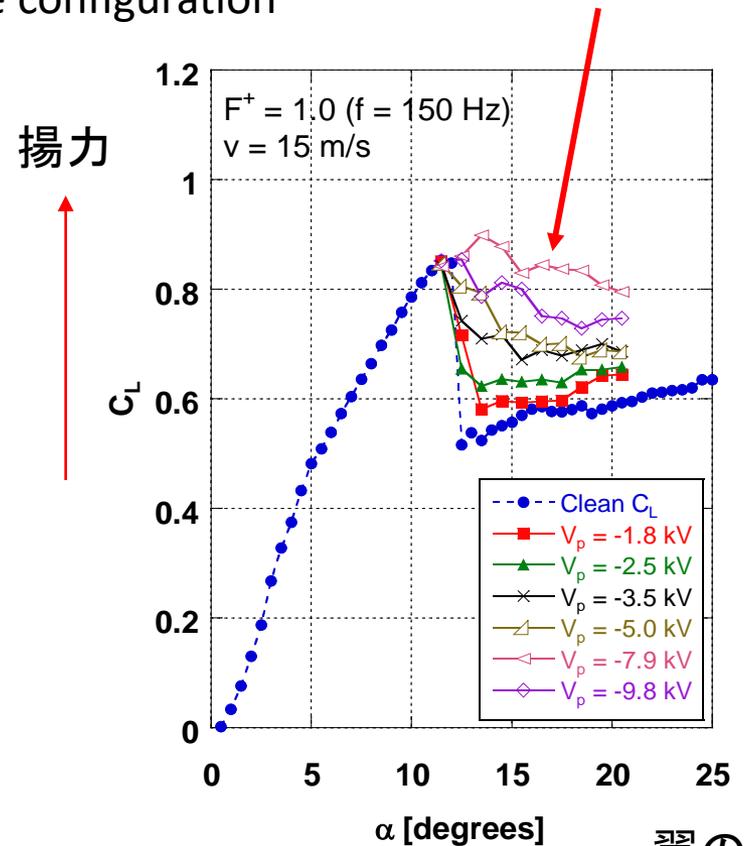


Electrode configuration

プラズマ発生によって揚力が回復している



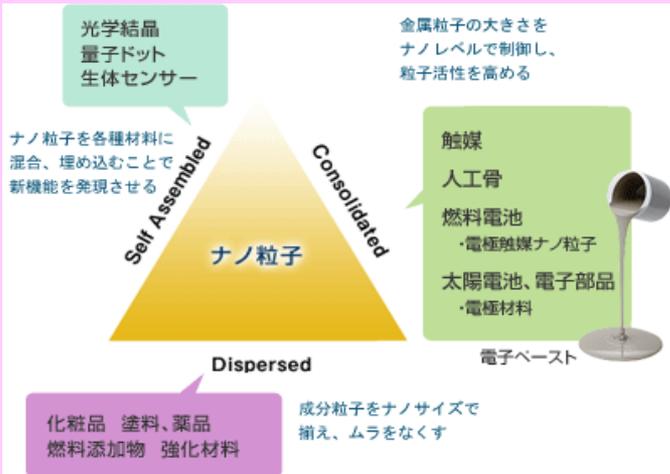
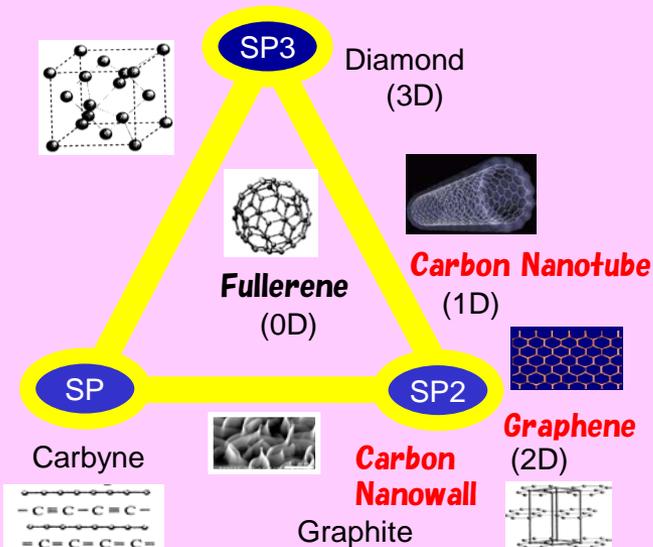
Schlieren visualization at 30 μ s after the discharge in quiescent air. The pulse peak voltages, V_p are (a) -1.8, (b) -3.5, (c) -5.0, (d) -6.8, (e) -7.9, and (f) -9.8 kV, respectively.



Lift coefficients in 15 m/s wind velocity.

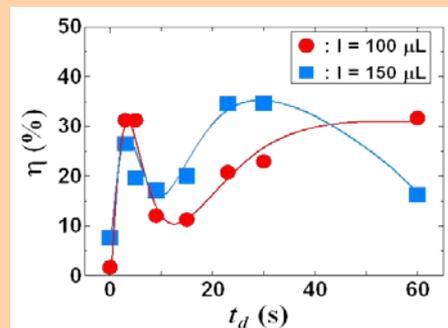
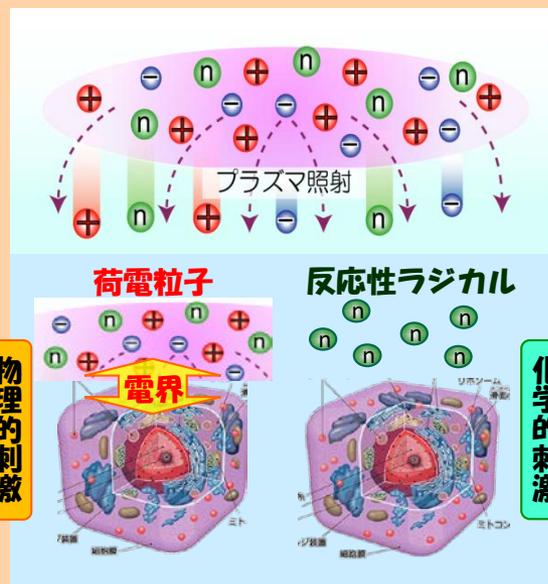
プラズマナノ・カーボンデバイス

プラズマで新機能性物質創成



プラズマ医療

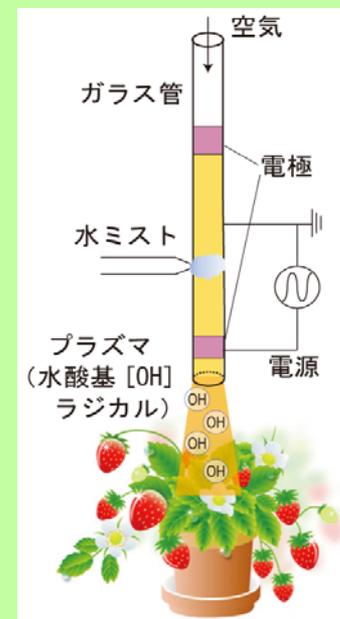
プラズマで細胞機能制御



薬剤導入効率 は 時間で制御可能!

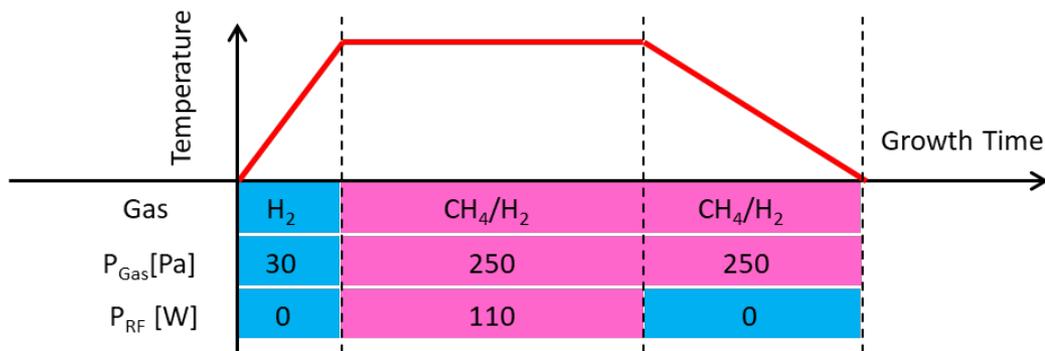
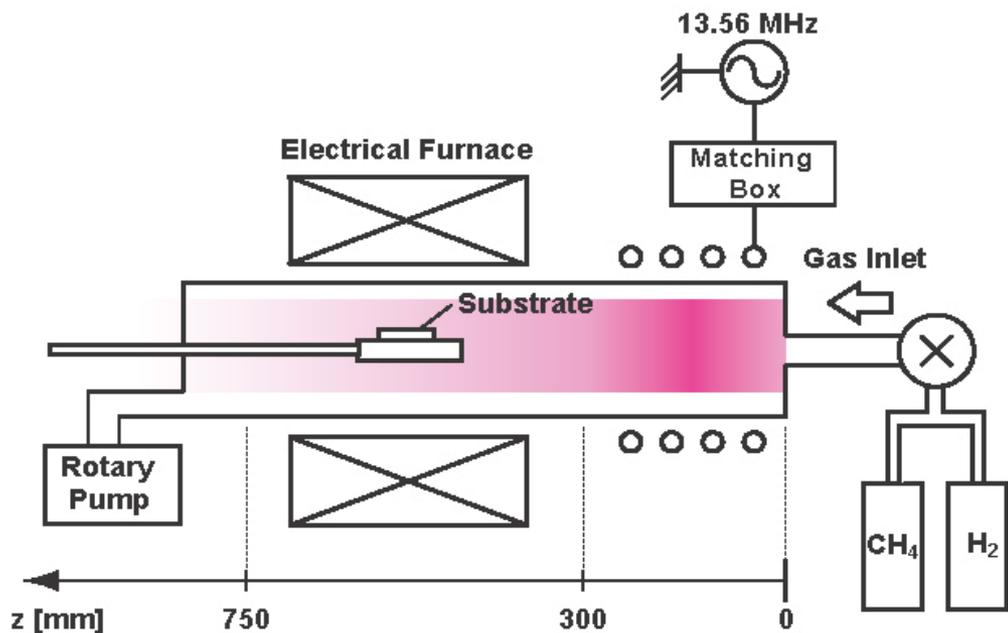
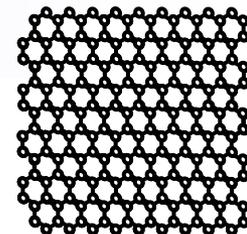
プラズマ農業

プラズマで無農薬栽培



いちごハウスでの実証試験

グラフェンナノリボン合成装置と方法

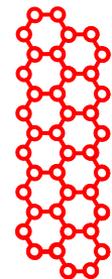


□ グラフェン

- 高いキャリア移動度
 - 高い光透過率 (~97.7%)
 - バンドギャップ: ゼロ
- ⇒ 半導体デバイスへの応用が困難

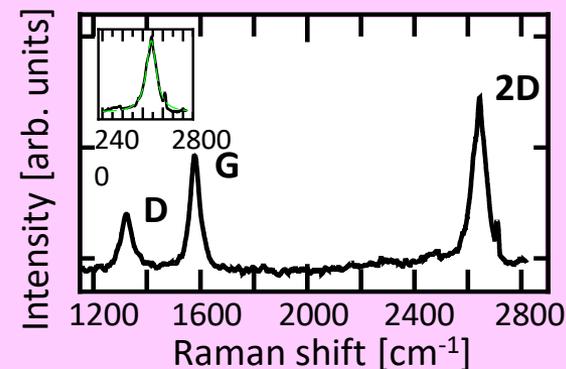
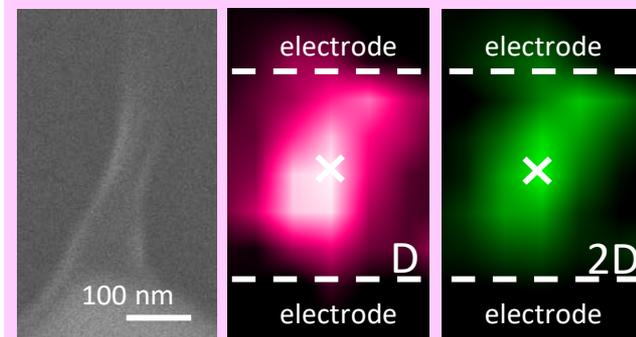
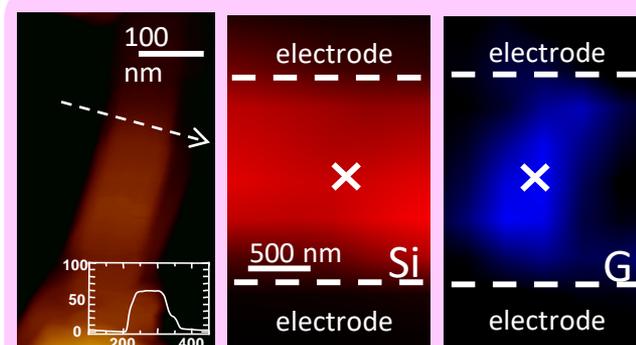
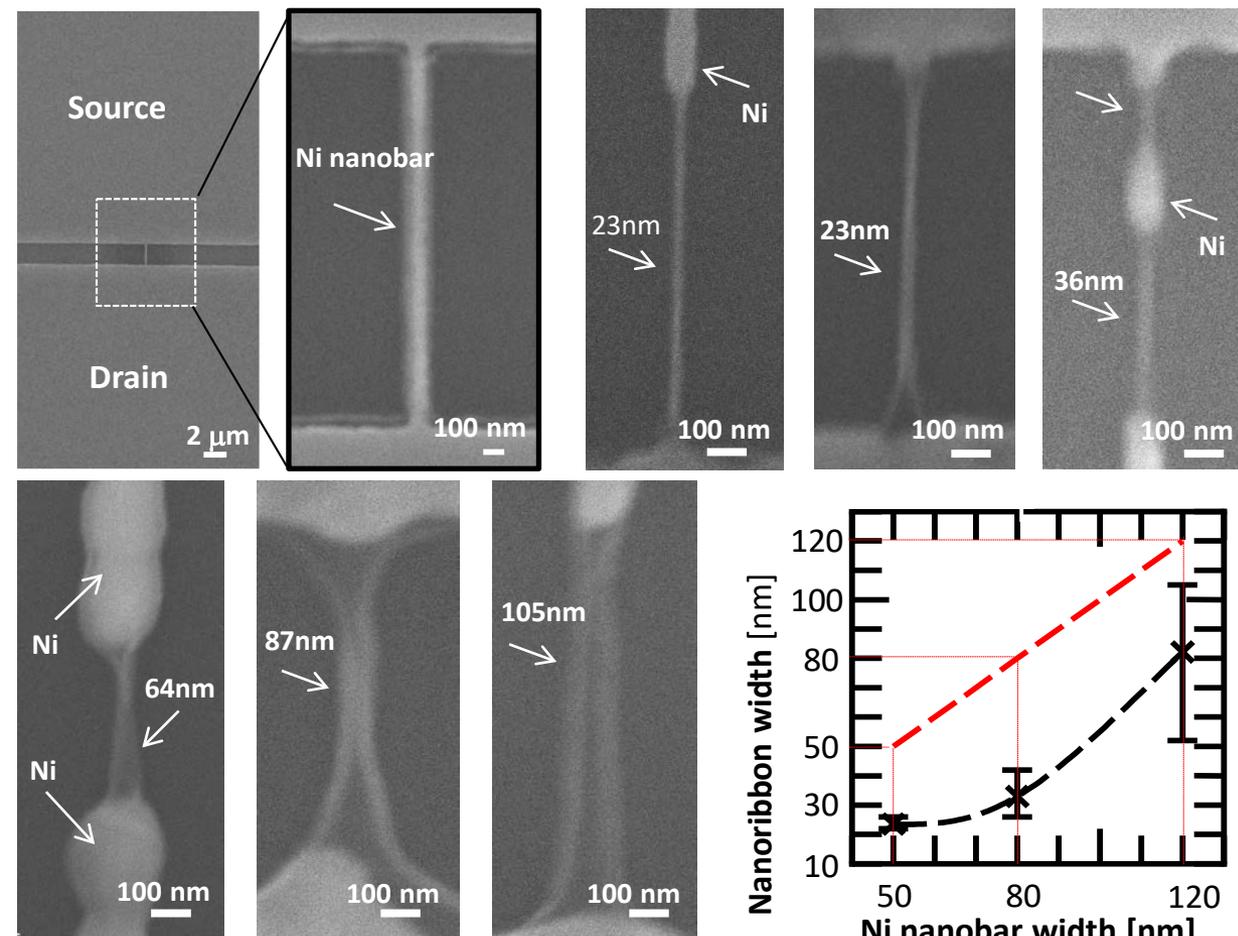
□ グラフェンナノリボン

- 半導体
- バンドギャップの制御にはリボン幅を精密制御が必要
- デバイス応用には集積化技術の確立が必要不可欠



グラフェンナノリボンの半導体デバイス応用には、合成技術の発展が必要不可欠

RH-PCVDにより合成したグラフェンナノリボン



- 高品質グラフェンナノリボンの位置選択合成に世界で初めて成功
- グラフェンナノリボンの幅は初期のNiナノバーの幅によりある程度制御可能

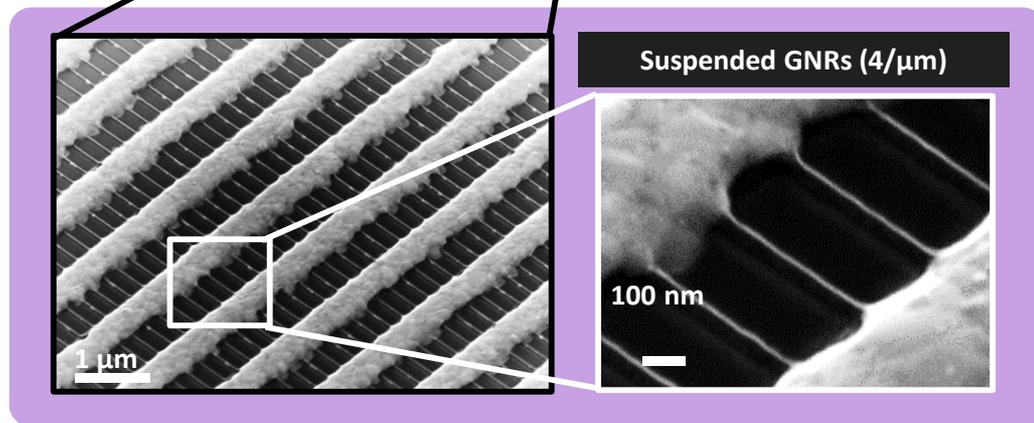
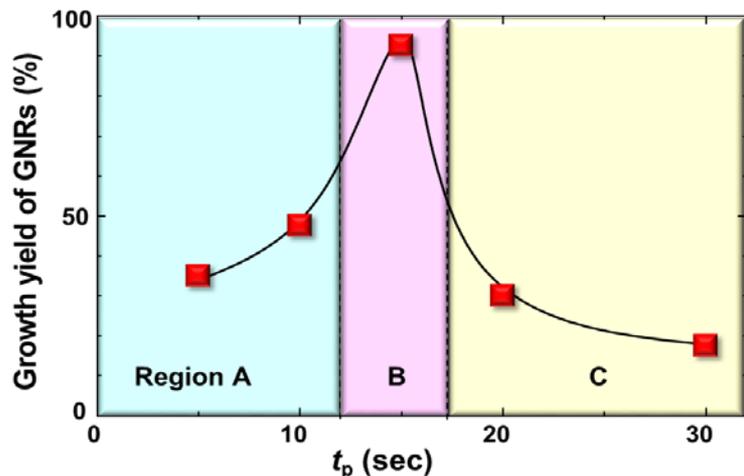
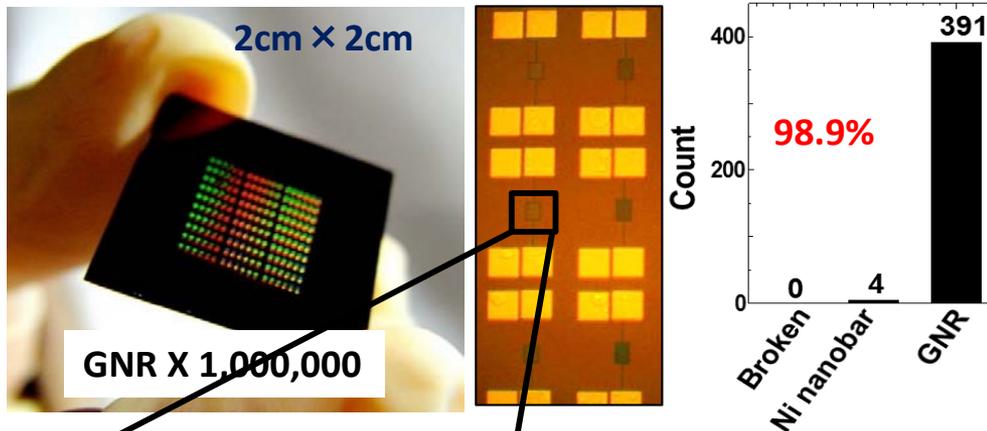
ウェハースケール大面積合成: 高効率大面積合成

Method

Ni nanobars array

GNRs array

Plasma CVD



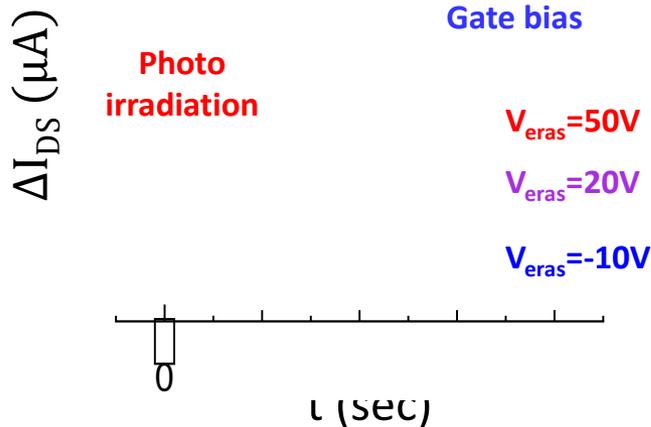
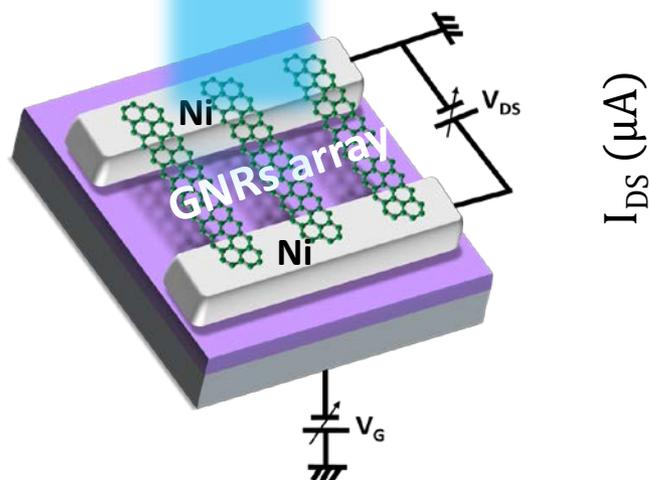
H. Suzuki, T. Kaneko, Y. Shibuta, M. Ohno, Y. Maekawa, and T. Kato, Nature Communications 7 (2016) 11797

◆ 合成条件を最適化することで架橋グラフェンナリボンのウェハースケール合成に世界で初めて成功した

t_p : Plasma irradiation time

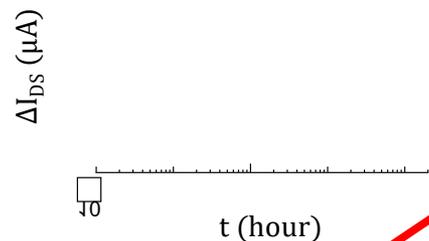
GNRの不揮発性メモリ応用

酸素プラズマ機能化



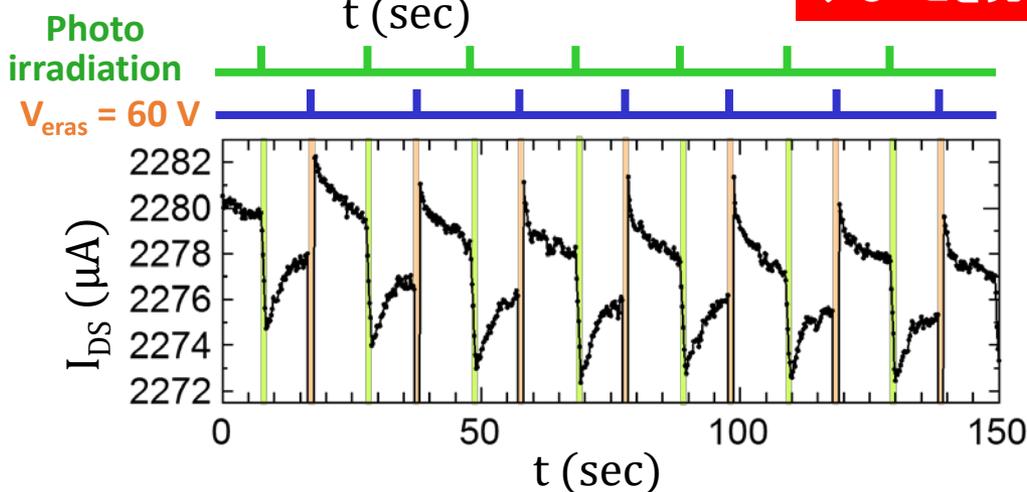
V_G をパルス的に印加することで、元の伝導状態に戻ることが判明 (不揮発性メモリの消去動作)

Photo irradiation



光照射後も伝導特性の変化が維持 (パーシステント光伝導特性)

酸素プラズマで機能化したGNRにパーシステント光伝導特性が発現することを発見



GNRのパーシステント光伝導特性を活用して“書き込み”、“読み出し”、“消去”の不揮発性メモリ基本動作を繰り返し行うことに成功

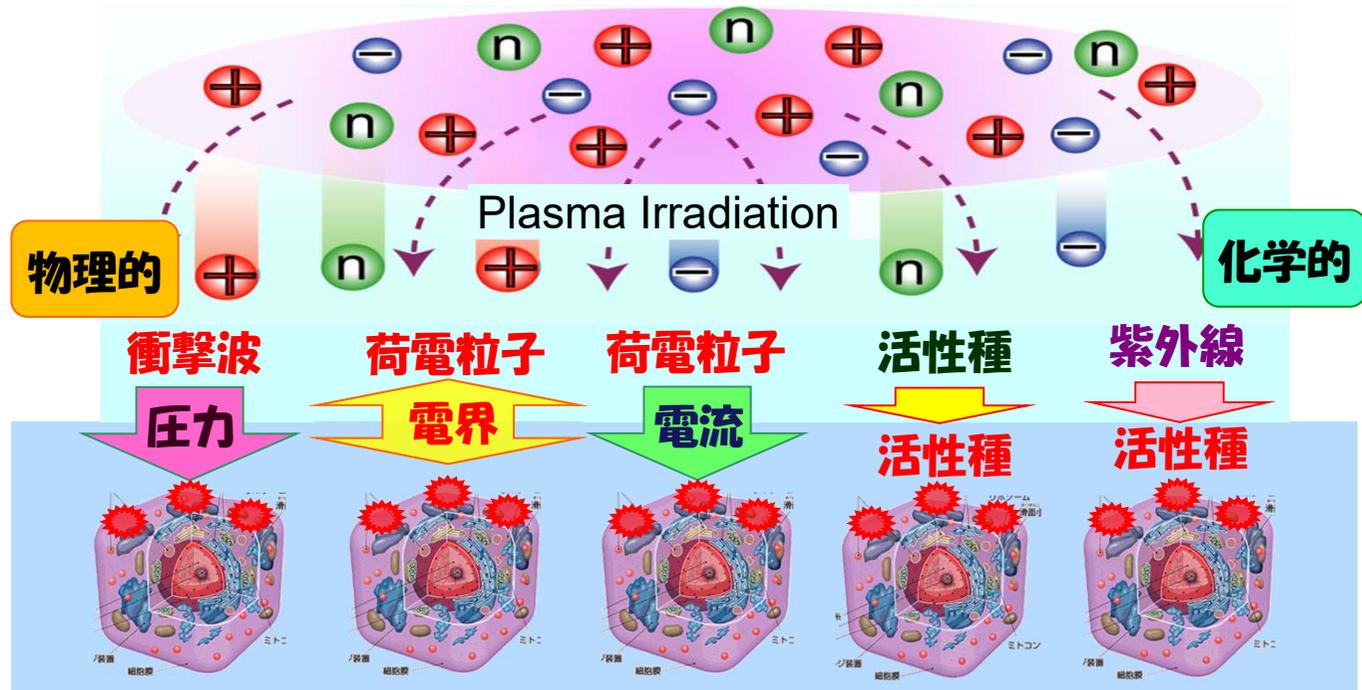
プラズマ医療：細胞への遺伝子・薬剤導入

目的

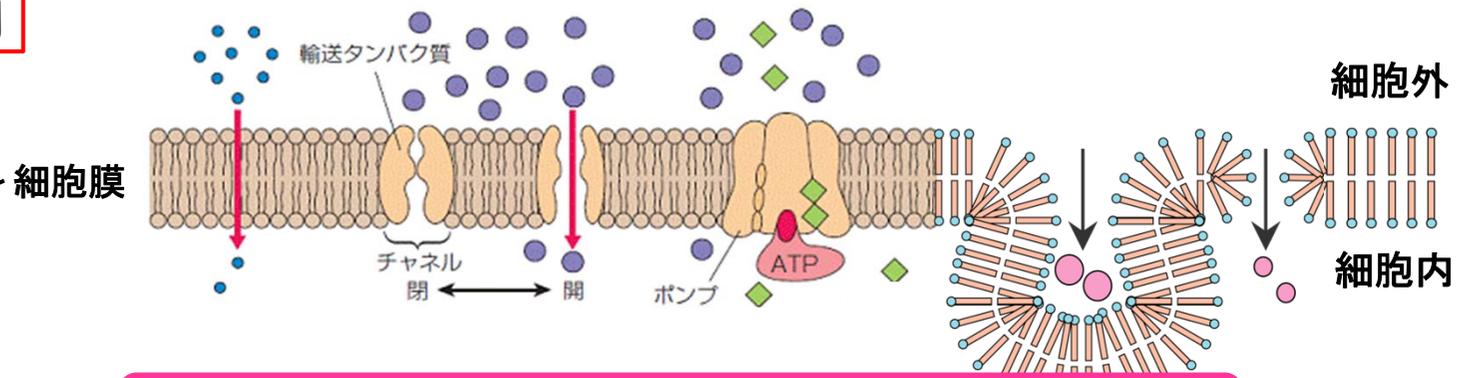
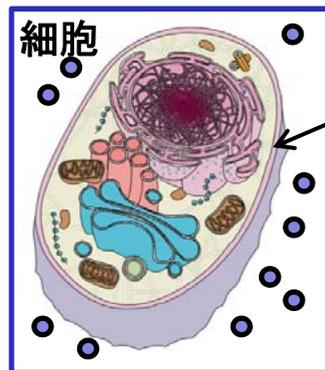
- 高効率遺伝子導入
- 低侵襲遺伝子導入
- 非選択遺伝子導入
- 無副作用遺伝子導入

課題

- プラズマ中の何が膜輸送に作用しているのか
- プラズマは細胞膜の何に作用しているのか



膜輸送機序解明

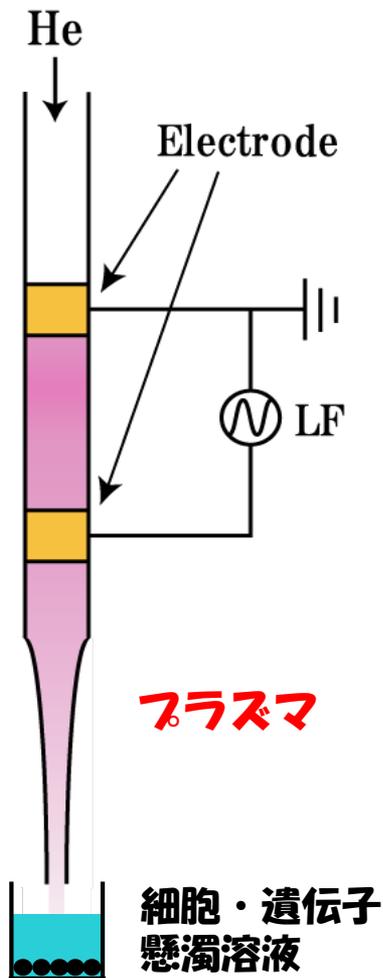


- 膜輸送体
- イオンチャンネル
- トランスポーター
- エンドサイトーシス
- 小孔

大気圧気液界面プラズマによる薬剤模擬分子導入



大気圧プラズマジェット



蛍光物質(薬剤模擬)

- ・YOYO-1 5 μ M
- ・LIVE/DEAD Stain

細胞

- ・3T3L1細胞(マウス繊維芽細胞)
- ・MCF-7細胞(ヒト乳癌細胞)

実験パラメータ

ガス種: He

周波数: 10 kHz

極板間距離: 33mm

電極: Cu

ガラス管先端の内径: 2mm

印加電圧: $V_{p-p} = 6.8 \sim 12.5$ kV

プラズマ照射時間: $t_i = 1 \sim 60$ s

照射距離: $z = 5$ mm

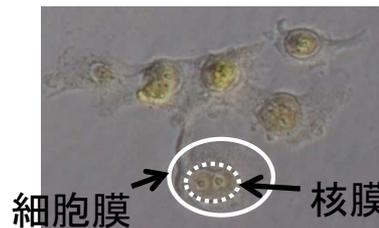
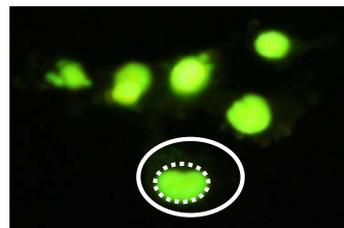
ガス流量: $f = 3.0$ slm

液量: $l = 10 \sim 150$ μ L

Control



Plasma



Fluorescence
YOYO-1

Bright Field

プラズマ照射

YOYO-1細胞内導入

核膜に到達

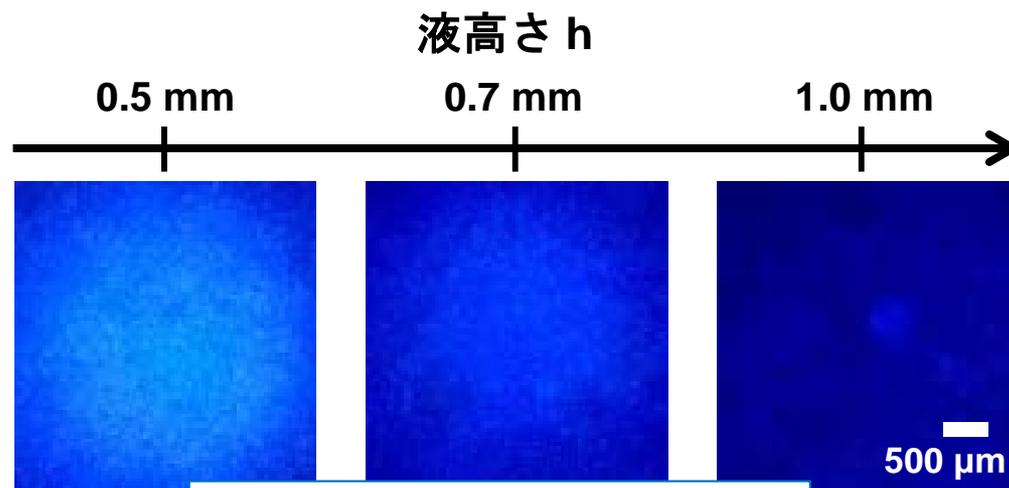
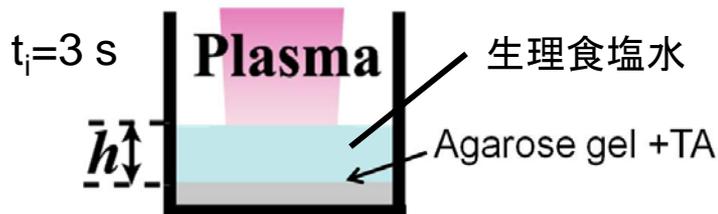
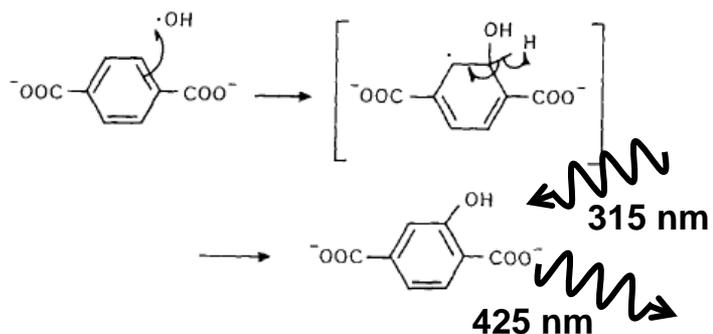
DNAと結合

蛍光強度増

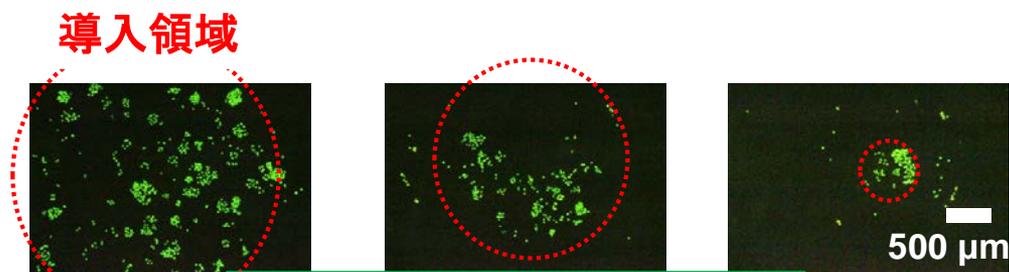
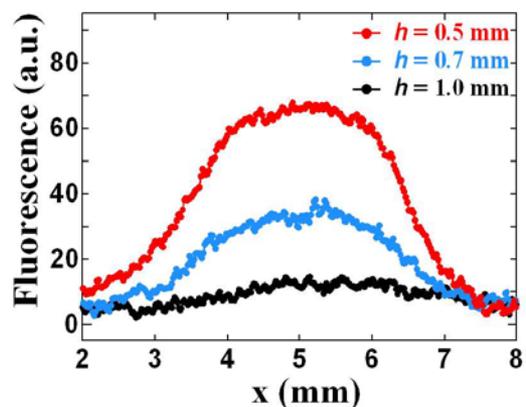


プラズマ照射による薬剤模擬分子導入の主要因子解明

テレフタル酸(TA)を用いたOHラジカル測定

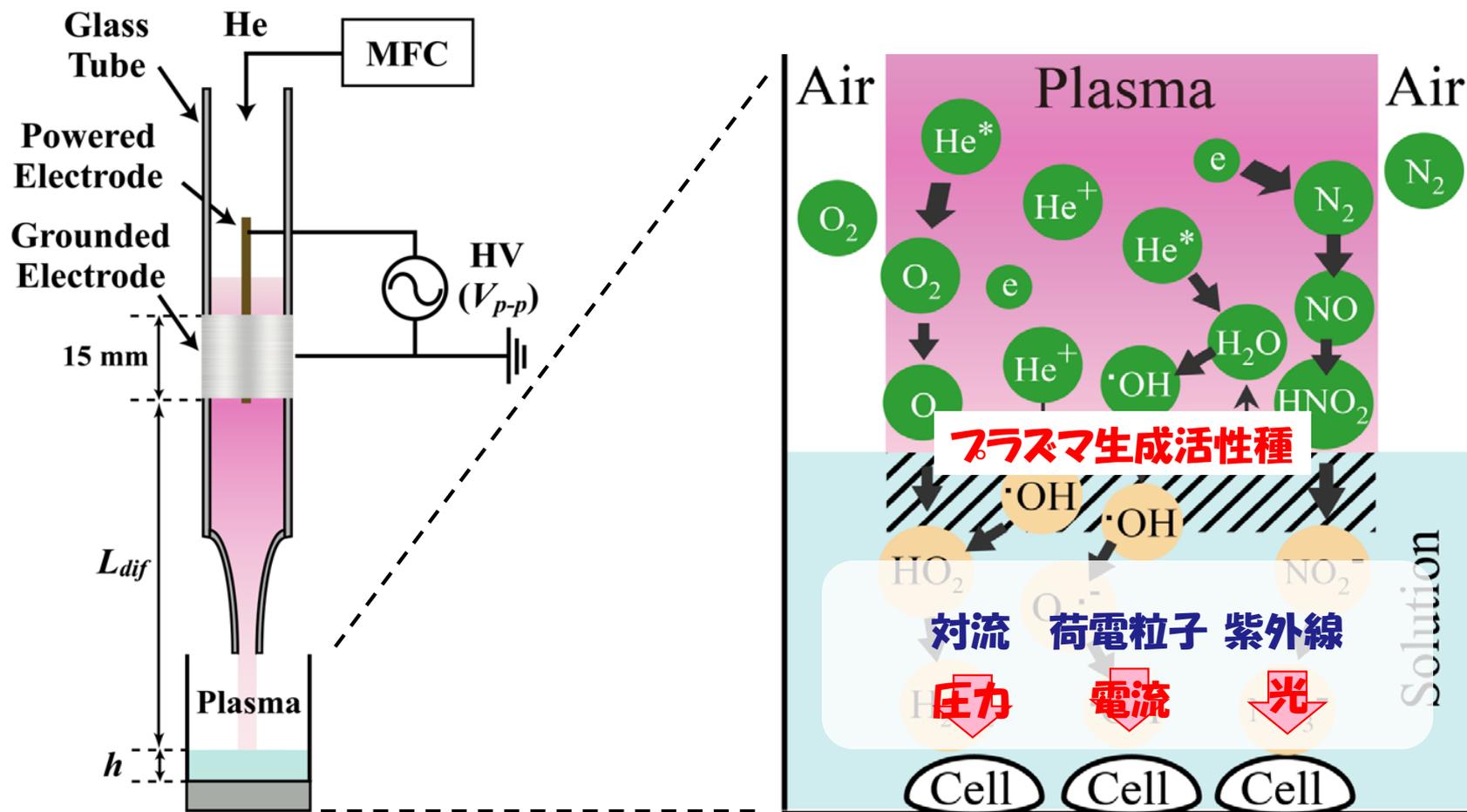


TA蛍光図 (OHラジカル分布)



YOYO-1蛍光図 (導入領域)

将来展望：プラズマ複合刺激による薬剤模擬分子導入

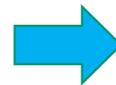


プラズマアグリ® 高付加価値農産物栽培法の開発

大気圧空気プラズマ

プラズマの殺菌効果を活用した

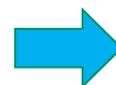
農薬不使用栽培



**化学物質が
残留しない**

プラズマの短寿命活性種による

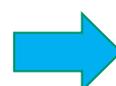
機能性成分制御



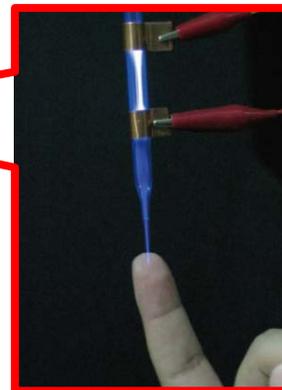
**高付加価値
農産物・食品**

プラズマ源に空気をを用いることで

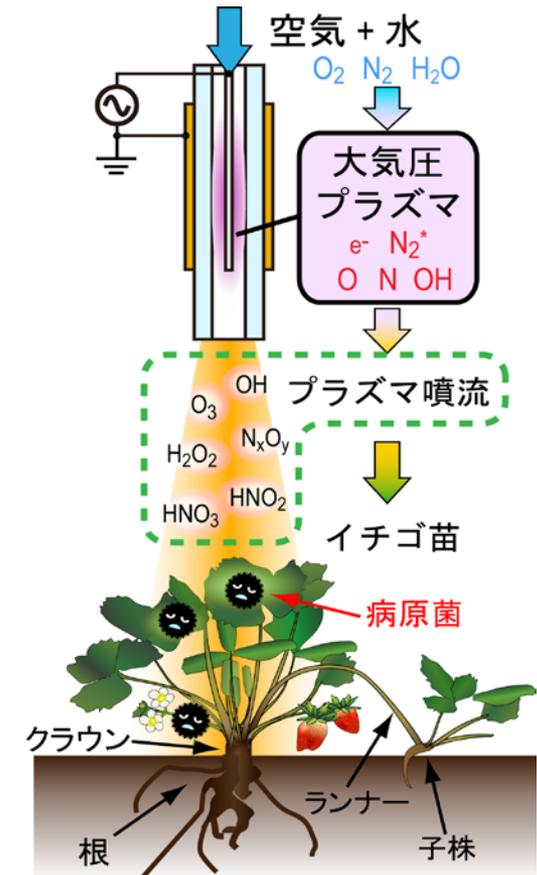
超低コスト・安全・清潔



**生産コスト
削減**



大気圧空気プラズマジェット



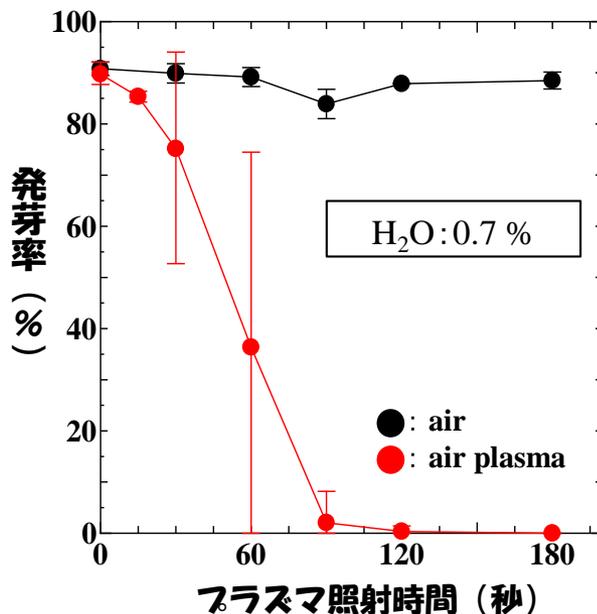
水導入プラズマによる高効率殺菌

イチゴ炭疽病胞子(分生子)の発芽率の プラズマ照射時間・水分濃度依存性

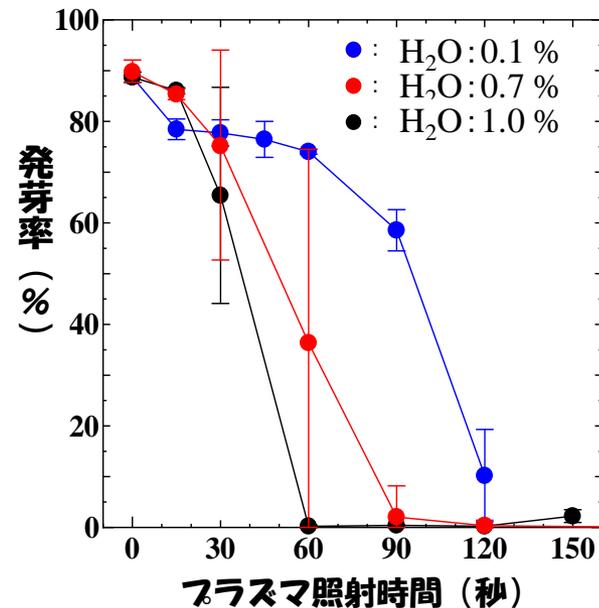
外気温: 20°C

空気流量: 16 L/min

<空気プラズマ照射結果>

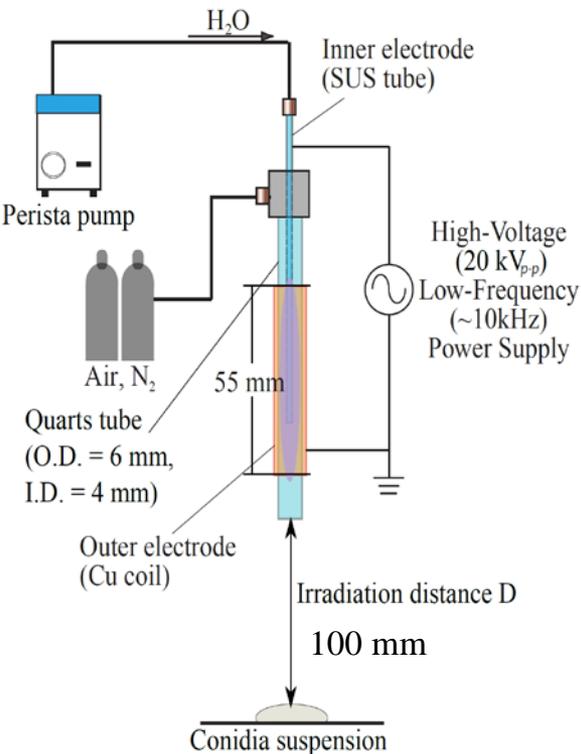


<水濃度と発芽率の関係>



空気の湿度を調整するだけで、殺菌効果が2倍以上に!!

特許第5909831号「病原菌および害虫の駆除装置」



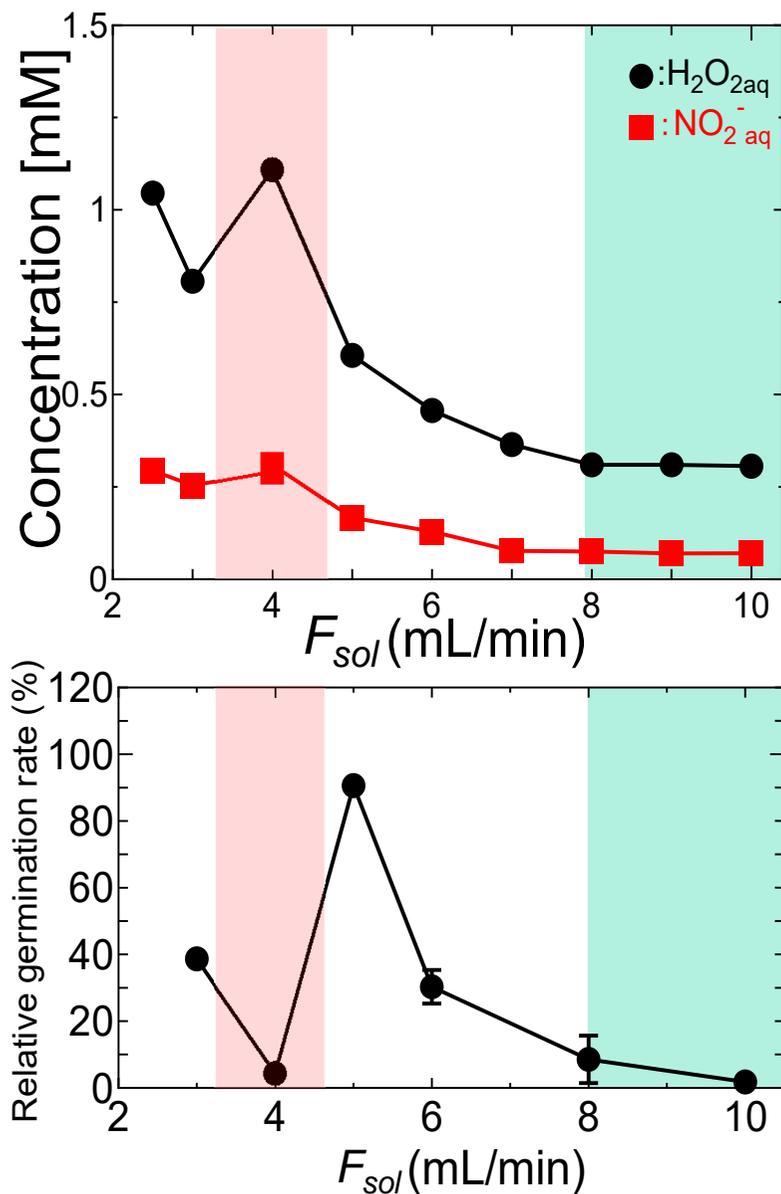
発芽: 発芽管が伸長中

長径 約 20 μm

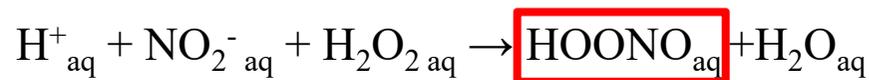
20 μm



発芽抑制（殺菌）に寄与するプラズマ生成活性種



低流量域・・・ H_2O_2 と NO_2^- 濃度 高



P. Lukes, et al.: Plasma Sources Sci. Technol. **23** (2014) 015019.

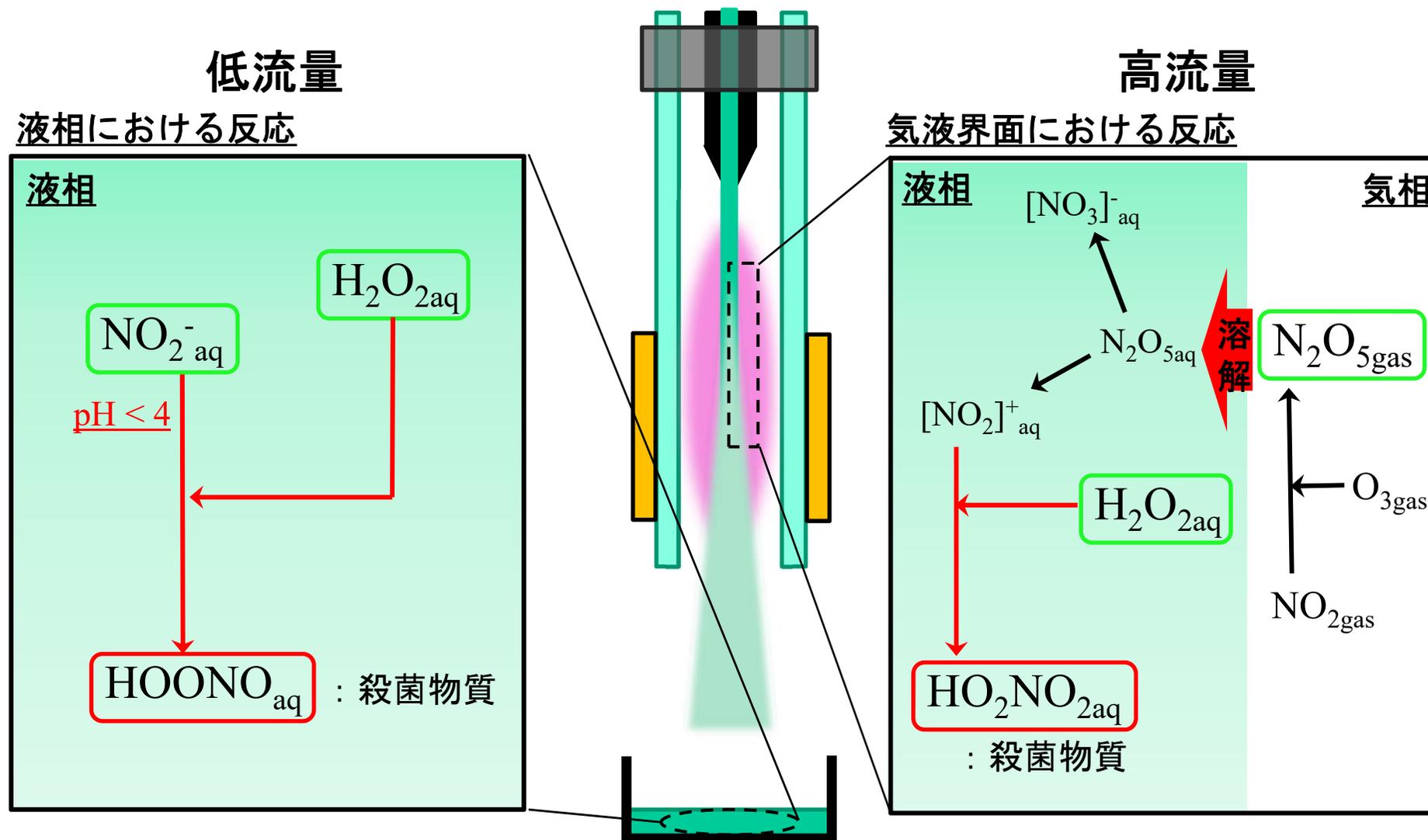
高流量域・・・ H_2O_2 と NO_2^- 濃度 低

✓ F_{sol} 増加と共に活性種生成量が低下

✓ H_2O_2 と NO_2^- の濃度の低下にも関わらず、高い発芽抑制効果.

➤ H_2O_2 と NO_2^- 以外の要因が発芽抑制に関係している可能性.

プラズマ照射溶液流量による殺菌作用活性種の差異



- 核融合研究で培った研究成果や技術力は多岐にわたる応用研究に生かされている。
- 大学と研究機関との共同研究、人材育成が今後も重要。

ご清聴ありがとうございました。