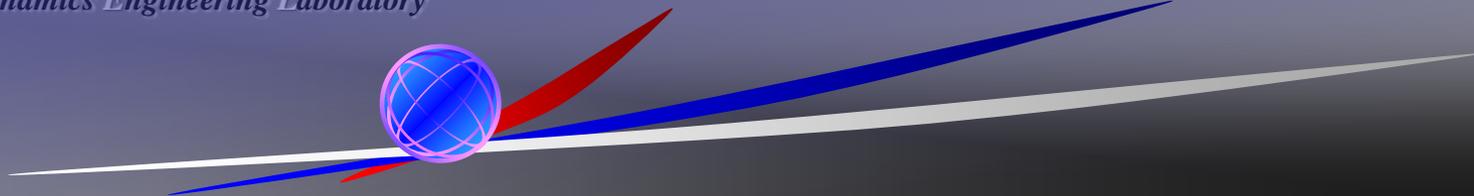




第17回若手科学者によるプラズマ研究会

次世代宇宙開発にむけたヘリコンプラズマスラスタの研究

Space Propulsion and AeroDynamics Engineering Laboratory



西田浩之, 中村隆宏, 篠原俊二郎(東京農工大)

船木一幸(JAXA宇宙研)

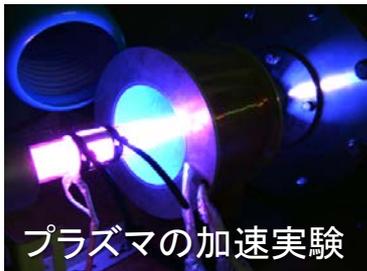
羽田亨(九州大)

谷川隆夫(東海大)

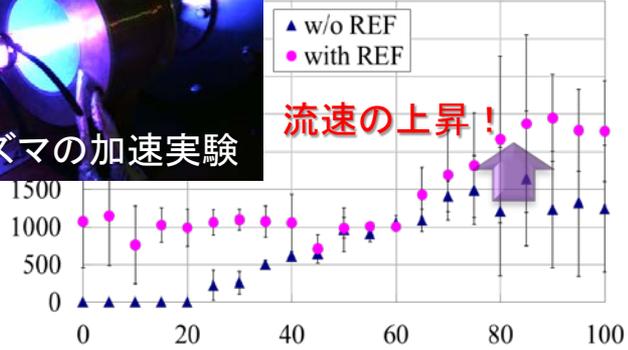
流れを能動的に制御する

大気圧プラズマによる流体制御技術 “プラズマアクチュエータ”

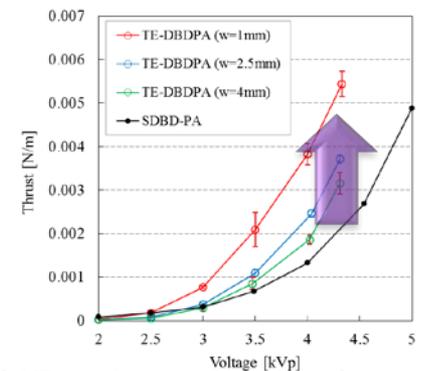
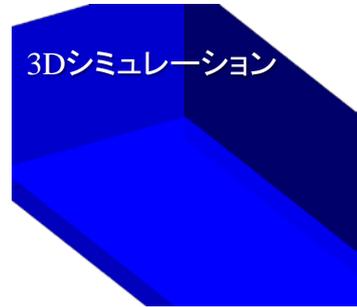
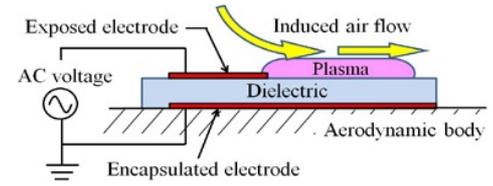
高密度プラズマの無電極加速技術



※基盤S(分担)
※JAXAと共同研究



✓ 回転電場型無電極プラズマ加速のコンセプトを実証



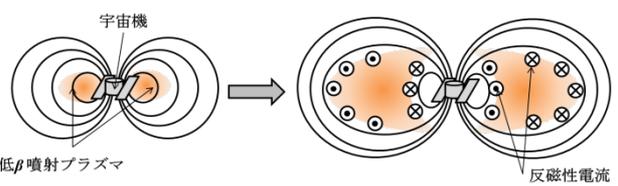
新型アクチュエータの性能評価

✓ 新型を開発. 性能を3倍以上に.

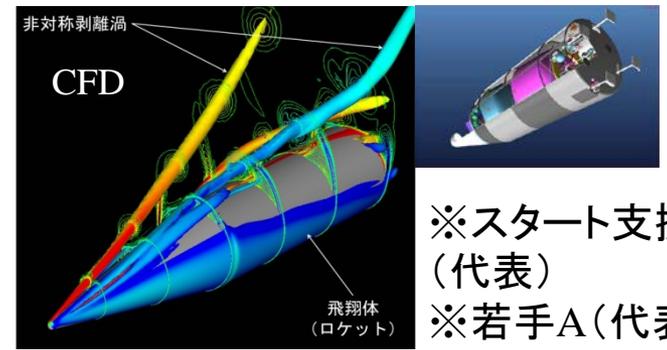
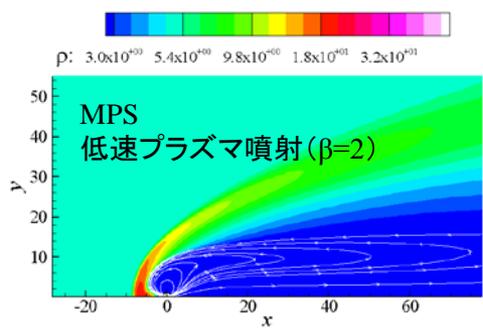
大迎角飛翔体の空力制御技術

太陽風プラズマを利用した宇宙推進技術

✓ コンセプトを実証(磁場インフレーションで推力3倍)



磁場インフレーションを利用する磁気プラズマセイル



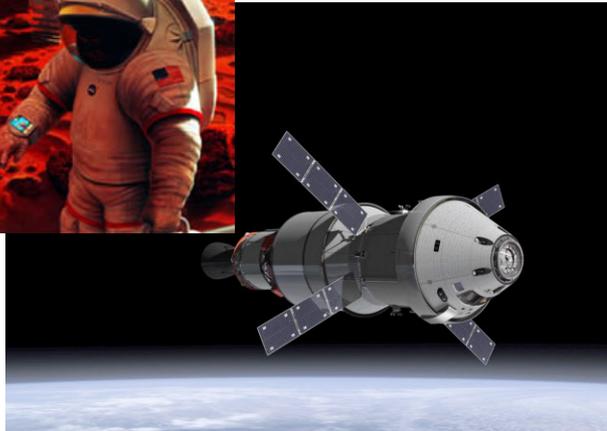
※スタート支援(代表)
※若手A(代表)

✓ プラズマアクチュエータによる比例的横力制御の実証

背景 一次世代宇宙開発



火星有人探査



オリオン(NASA)



太陽発電衛星

- これまでにない大規模な軌道間輸送が必要
 - **高推力・高比推力(燃費)・長寿命な宇宙推進システムが必要**

背景 — 電気推進 —

Typical electric propulsion systems

電気推進

電力により推進剤にエネルギーを与え、高速で排気 ⇒ 推力

- 電熱加速：アークジェットスラスタなど
- 静電加速：イオンエンジンなど
- 電磁加速：MPSスラスタなど

化学推進と比べ低い推力、そして高い比推力(燃費)



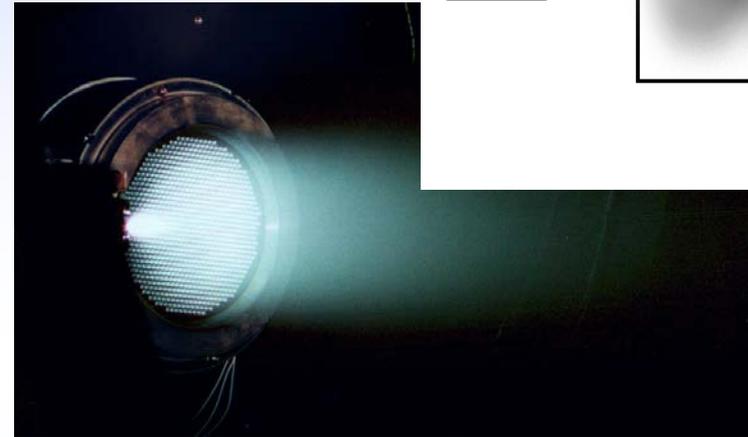
静止衛星の姿勢制御などの長時間にわたる運用、深宇宙探査や大規模軌道間輸送など、長距離長時間にわたる宇宙ミッションでの活躍



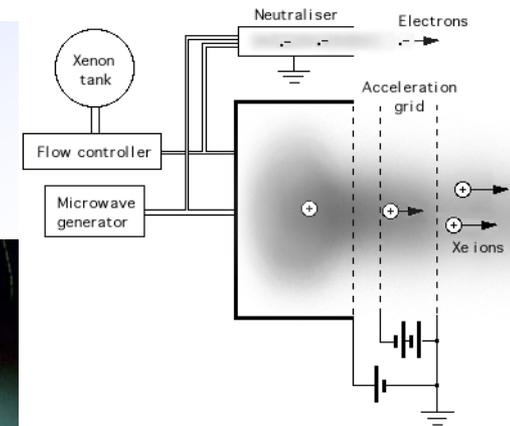
電気推進の実用例 -HAYABUSA (イオンエンジン)-



小惑星ITOKAWAへのサンプルリターン
ミッション



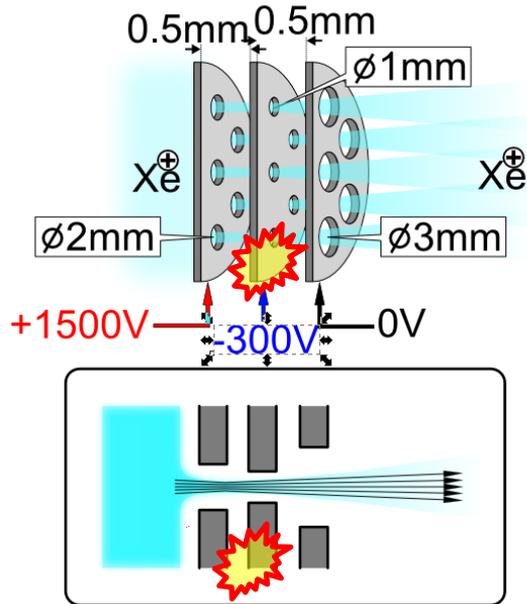
μ -10 イオンエンジン



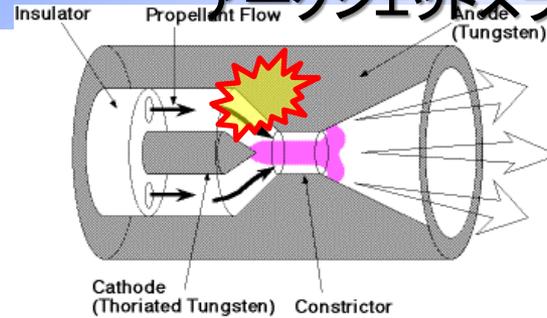
- **長時間・長距離にわたるミッションでの電気推進の信頼性と有用性を実証**
- **大型化・大電力化により, 電気推進の可能性はさらに広がる**

電気推進の課題 - 電極損耗による寿命制限 -

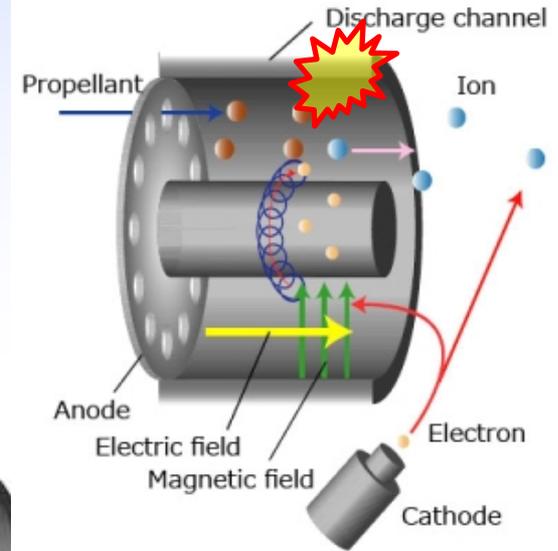
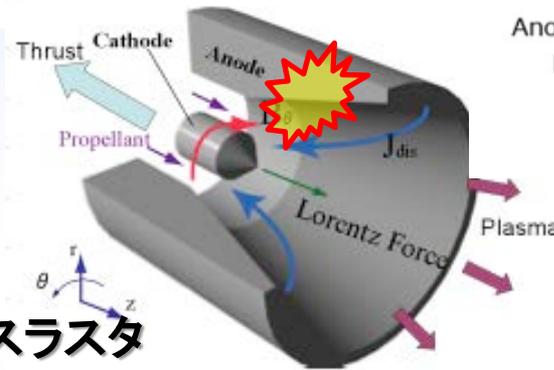
イオンエンジン



アークジェットスラスタ



MPDスラスタ



ホールスラスタ

プラズマと放電電極・加速電極が接触

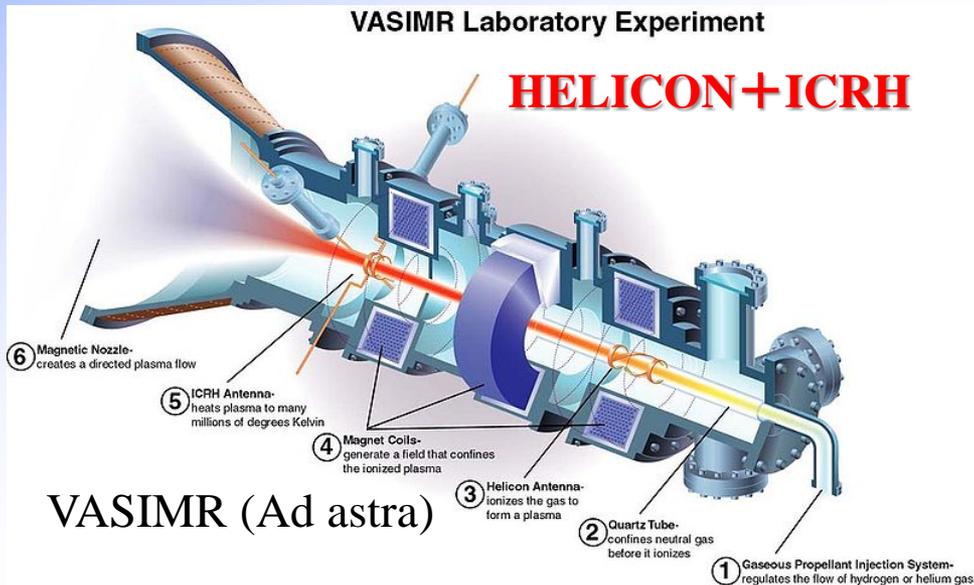
- 放電とプラズマ加速による電極損耗 ⇒ 寿命制限
- 電極のスパッタによるコンタミネーション ⇒ 性能の低下

無電極電気推進の研究

無電極電気推進の研究開発 —長寿命な電気推進システム—

VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)

HDLT (Helicon Double Layer Thruster)



200 kW (推進効率70%以上, 推力5N, 比推力4000秒)

HDLT (ANU)

ヘリコンプラズマ源を用いた無電極電気推進研究のプロジェクト

Booklet & Homepage

Frontline Scientific Research Projects Advanced in JAPAN

— Newly Selected Large-scale Research Projects under FY2009
Grants-in-Aid for Scientific Research —



Dr. Funaki Prof. Tanikawa Prof. Hada



Dr. Nishida

Dr. Shamrai

本研究の目標



電磁加速型ヘリコンプラズマスラスタの開発

Grant-in-Aid for Scientific Research (S)



Title of Project: Research and Development of a Novel Electrodeless Plasma Rocket Engine Using a Helicon Source

FY2009-2013

Shunjiro Shinohara
(Kyushu University, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Associate Professor)

Research Area: Aerospace Engineering, Plasma Science

Keywords: Propulsion/Engine, Plasma Applications, Aerodynamics

【Purpose and Background of the Research】

Electrodeless schemes to accelerate the plasma in which the plasma is only applied electromagnetic field have already been used in the laboratory. For example, computer simulations, experiments will all be in close contact with one another. The performance of all the six

electrodeless schemes to accelerate the plasma in which the plasma is only applied electromagnetic field have already been used in the laboratory. For example, computer simulations, experiments will all be in close contact with one another. The performance of all the six



Project

our electrodeless, thus ing plasma rocket engines

Helicon Electrodeless Advanced Thruster

plasma production and acceleration.

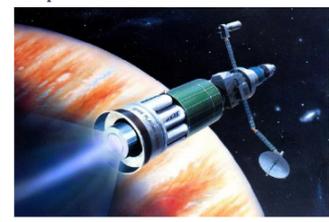


Figure 1. Artist's rendition of a spaceship with

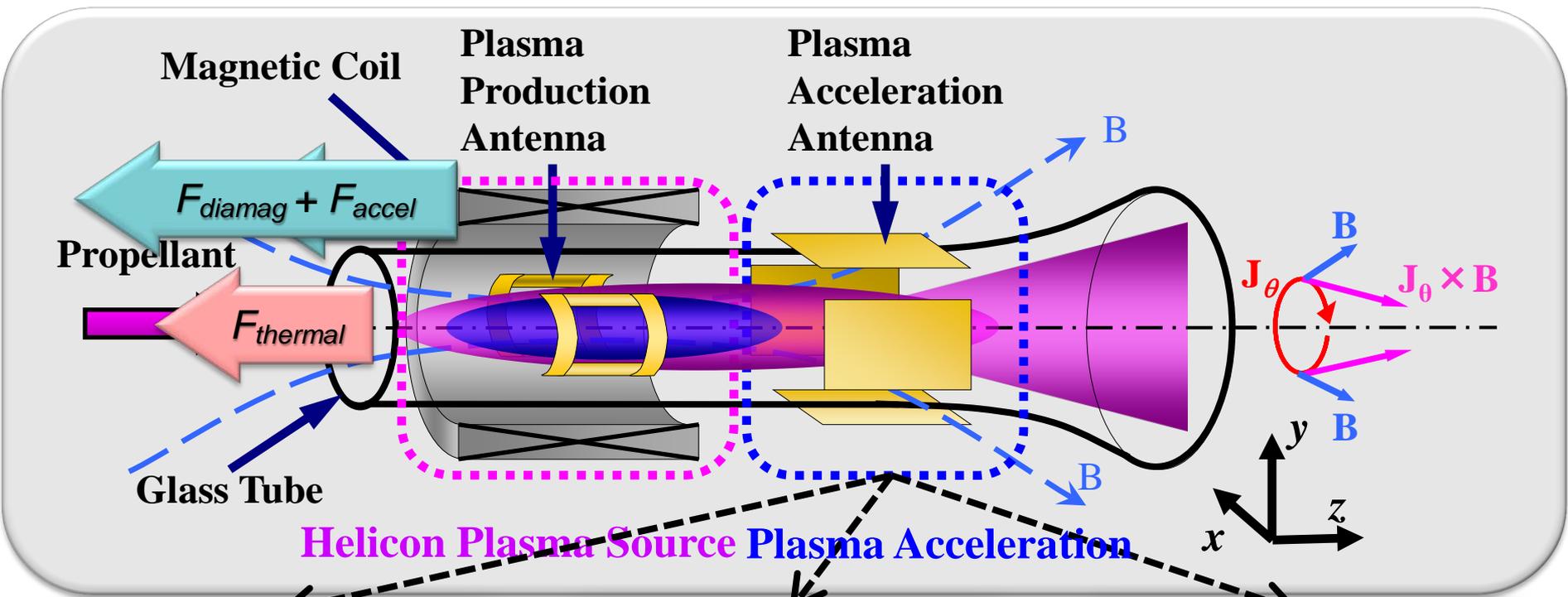
during the course of our project will lead to some novel concepts in developing a plasma engine for interstellar travel using interstellar plasma as a propellant and some spin-offs, such as a completely electrodeless plasma processing system for manufacturing computer chips and an advanced concept plasma incinerator for waste treatment.

【Publications Relevant to the Project】

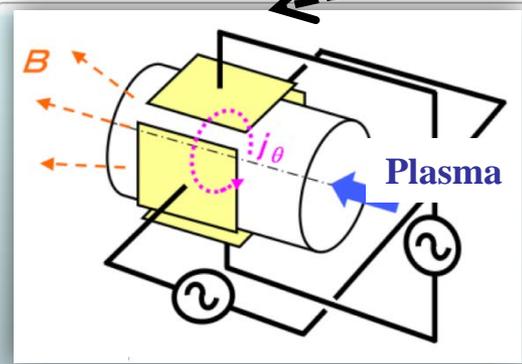
- S. Shinohara, et al.: Development of High-Density Helicon Plasma Sources and Their Applications, Phys. Plasmas 16, 057104 1-10 (2009)

Helicon Source Ex-
Electromagnetic
ME/SAE/ASEE
e & Exhibit
2007-5260.
3
ousand Yen
er Contact
-sinohara/

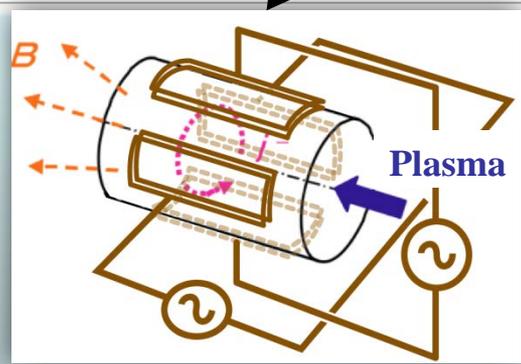
スラスタコンセプト



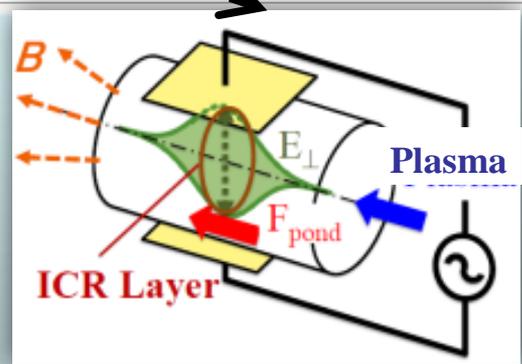
Helicon Plasma Source Plasma Acceleration



Rotating Electric Field



Rotating Magnetic Field



Ponderomotive / ICR

目的

ヘリコンプラズマ源を用いた電磁加速型無電極電気推進システムの開発が目標

- **ヘリコンプラズマ源の開発**
- **複数の加速方法 (RMF加速・REF加速・PA/ICR加速) についての原理実証**

数値シミュレーション／実験／理論解析

なぜヘリコンプラズマ源か？

1. 高密度プラズマを幅広い外部制御パラメータで生成可能

$> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ w/ Flexible Operation

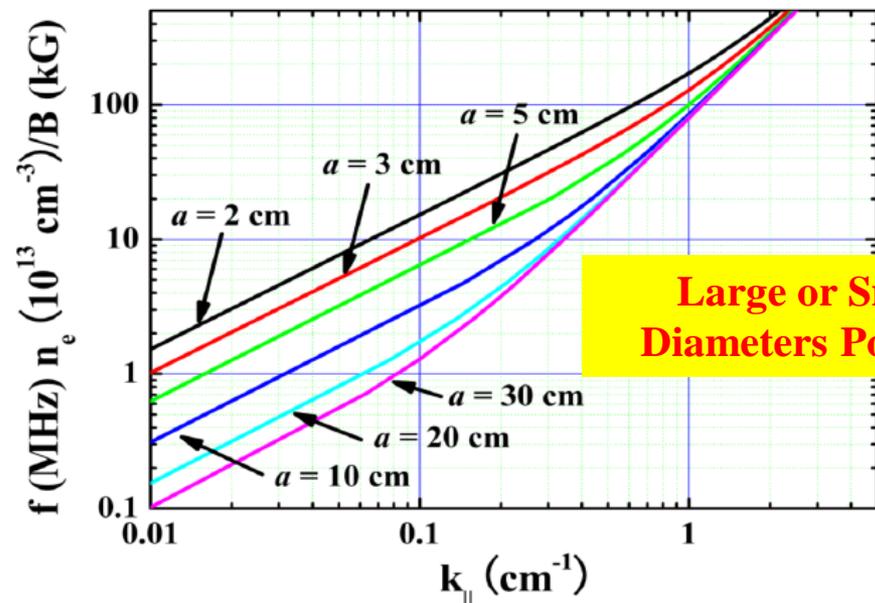
2. 様々なスケール・アスペクト比において高効率に生成可能

$D < 2.5 \text{ cm} \Rightarrow 74 \text{ cm}$, $V < 0.1 \text{ m}^3 \Rightarrow 2.1 \text{ m}^3$ cf. $D = 2.5 \text{ cm}$, $V = 23 \text{ cm}^3$

$A = L/D = 0.5 \Rightarrow 0.075$ ($L = 5.5 \text{ cm}$, $D = 74 \text{ cm}$)



$$k_{\parallel}^2(k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2) = \left(\frac{\omega \omega_{pe}^2}{\omega_{ce} c^2} \right)^2$$



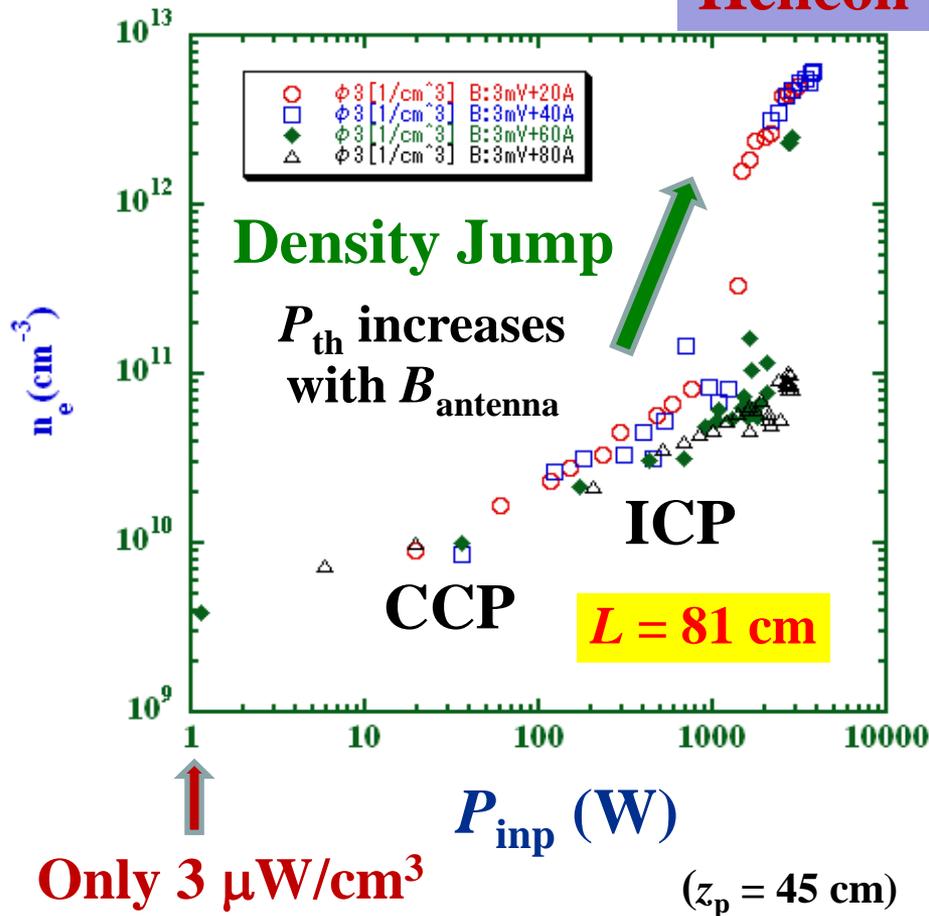
ヘリコン波の分散関係

ヘリコン波によるプラズマの生成効率と磁場による閉じ込め性能



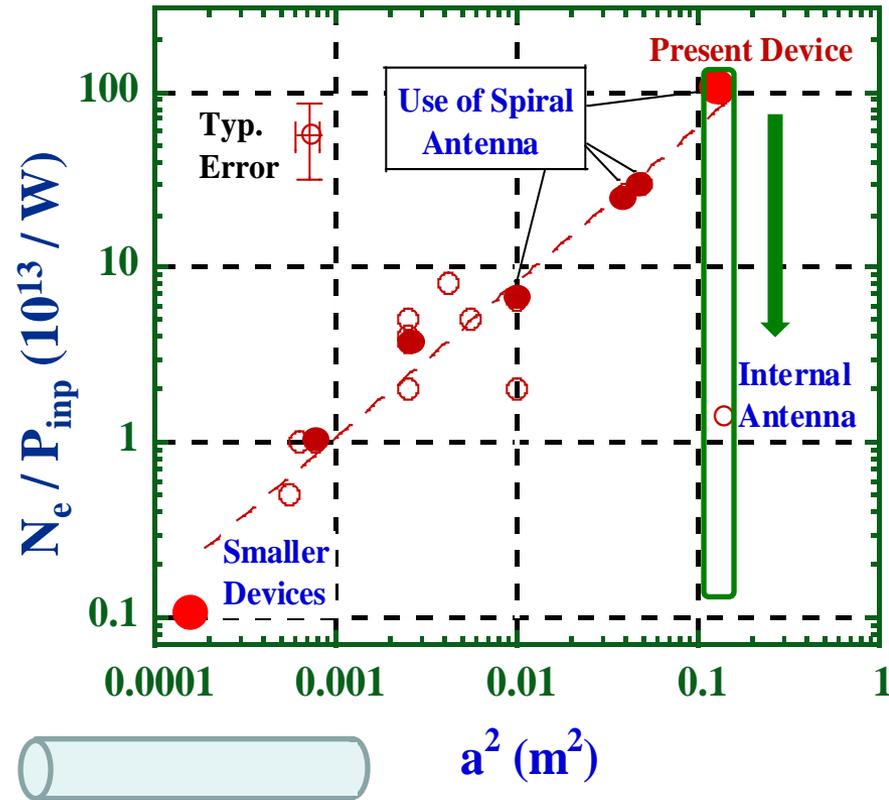
LHPD

Helicon



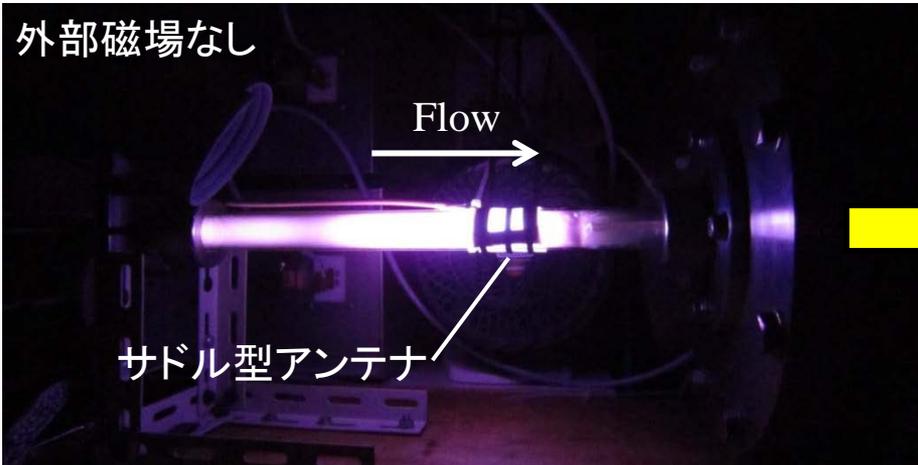
弱磁場 / 小プラズマ・長軸

$$N_e / P_{in} \propto a^2$$

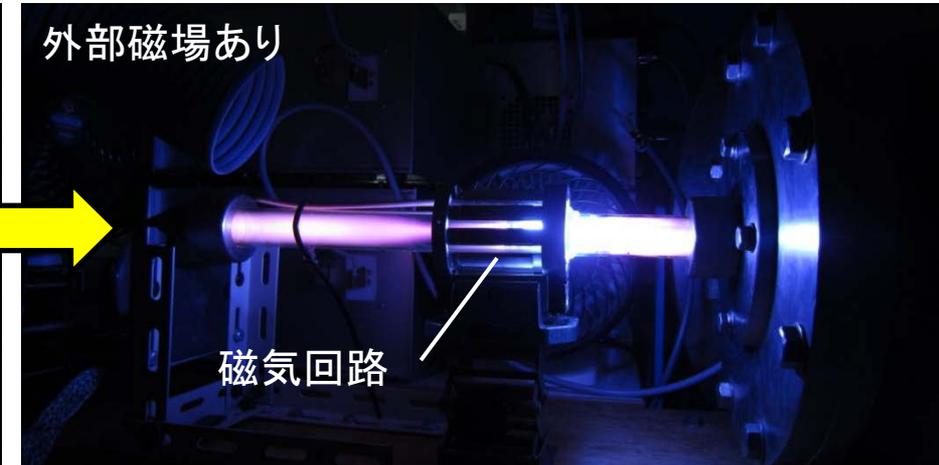


磁場を横切る方向のプラズマロス

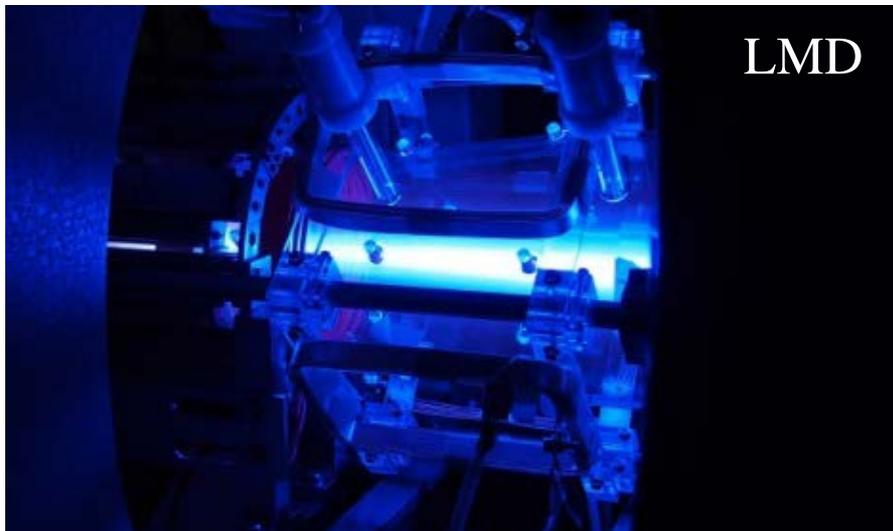
ヘリコンプラズマ源 (ブルーモードのプラズマ)



電子密度: $1.9 (\pm 0.1) \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$



$2.1 (\pm 0.08) \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$



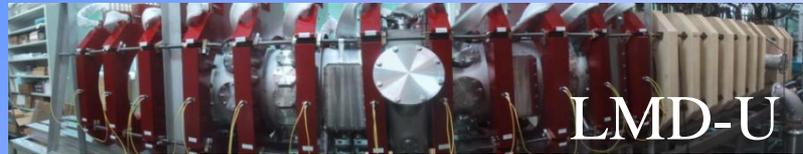
Ar gass mass flow rate: 50 sccm

RF power: 3 kW

B field: over 1000 gauss

Electron number density: $5.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ヘリコンプラズマ源開発の実績



LMD-U



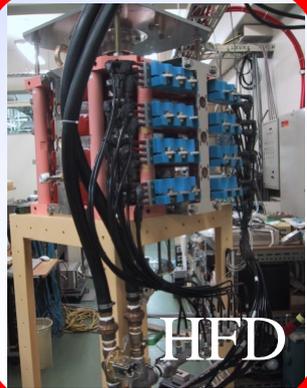
LMD



LDD

九州大学
(40-45 cm ϕ , 120-374 cm l)

東京農工大



HFD

九州大学
強磁場装置
10 kG
(10 cm ϕ , 30-100 cm l)



LHPD

ISAS, JAXA
最大容量
(74 cm ϕ , 486 cm l)

最小アスペクト比
(A = 0.075)

$D < 15 \text{ cm} \Rightarrow 74 \text{ cm}$, $V < 0.1 \text{ m}^3 \Rightarrow 2.1 \text{ m}^3$



東京農工大
(2.5 cm ϕ , > 4.7 cm l)



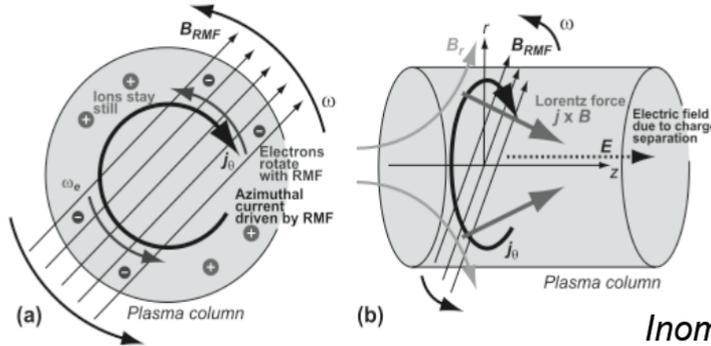
THD

東海大
New Antenna
(20 cm ϕ , 100 cm l)



回転磁場型加速(1) -加速の理論-

Plasma acceleration using RMF*



Inomoto, 2008

$$E - (j \times B)/e n_e = \eta j$$

RMFがプラズマ中に完全浸透している場合

$$F \propto n \omega B_r R^3$$

典型的な実験条件において

$$\omega = 6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}, \quad R = 0.05 \text{ m}$$

$$n_e = 10^{18} \text{ m}^{-3}, \quad B_z = 0.05 \text{ T}$$

Rotating Magnetic Field (ω)	$B_{\perp} \sim \exp(i\omega t)$
Inductive Electric Field (ω)	$E_z \sim \exp(i\omega t)$
Axial Ohmic current (ω)	$J_z \sim \exp(i\omega t)$
Azimuthal current (DC)	$J_{\theta} \sim \langle J_z \times B_{\perp} \rangle$
Axial Lorentz force (DC)	$F_z = J_{\theta} \times B_r$

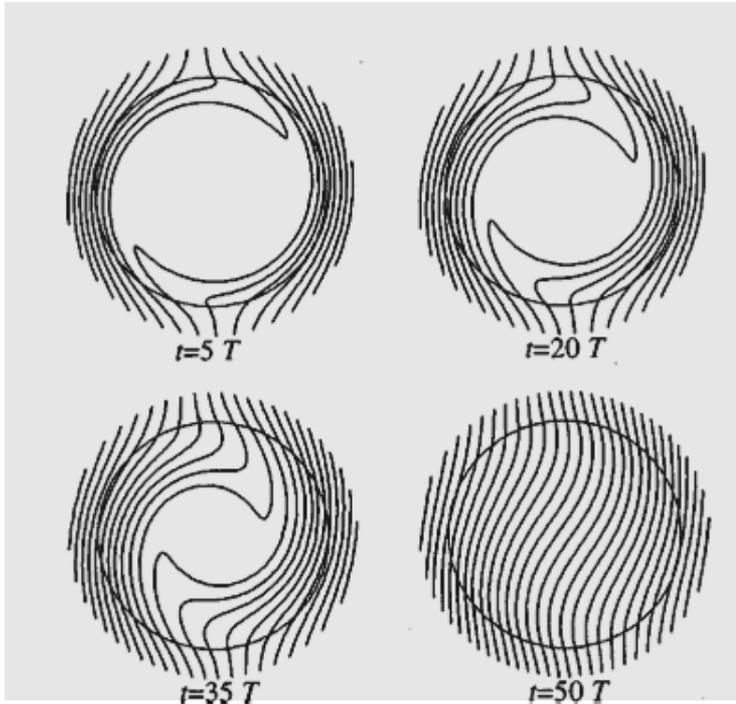
$\nabla \times E = -\partial B / \partial t$
collision
<u>nonlinearity</u>
radial B field

$$F \approx 100 \text{ mN}$$

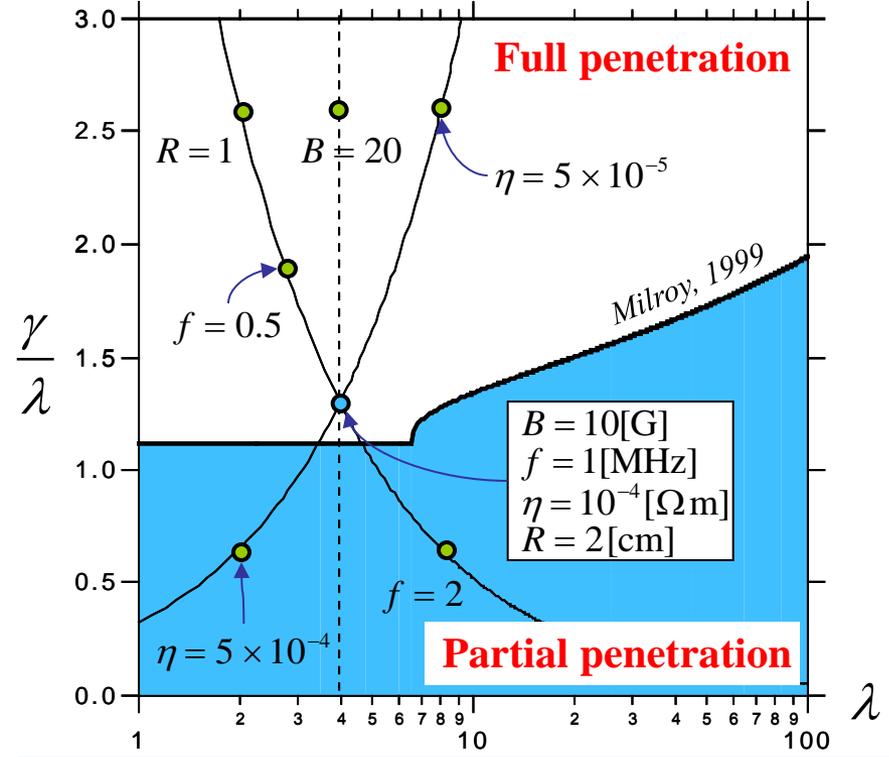
*Rotating Magnetic Field: Jones, 1979; Hugrass et al., 1980; Hoffman, 1998 etc

プラズマ中にRMFが浸透する条件は？

回転磁場型加速(2) - 磁場の浸透 -



cf. Fluid Simulation by Milroy, 1999



RMFの浸透

→ J_θ 生成

$$\lambda = \frac{R}{\delta} = R \left(\frac{\mu_0 \omega}{2\eta} \right)^{1/2} \quad \gamma = \frac{\omega_{ce}}{v_{ei}} = \frac{B_\omega}{ne\eta}$$

Plasma Radius /Skin Depth

Hall Parameter

RMFの浸透のためには...

Large B_ω , Small η , Small n , ω & R

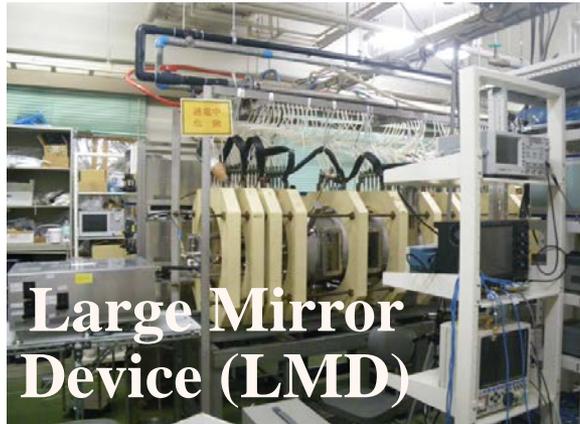
推力とトレードオフの関係

$$F \propto n\omega B_r R^3$$

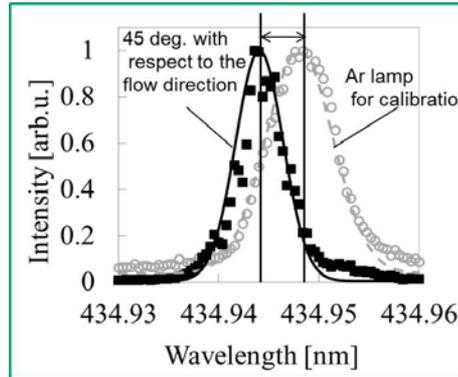
回転磁場型加速(3) —原理実証実験—

- ✓ 流速
- ✓ 電子・中性ガス密度
- ✓ 電子温度

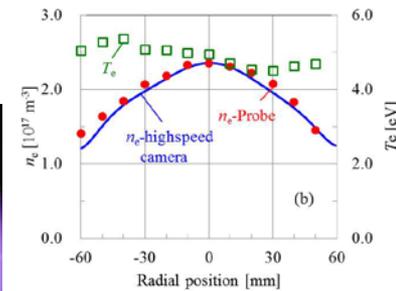
分光計測



Large Mirror Device (LMD)



東京農工大



高速度カメラ

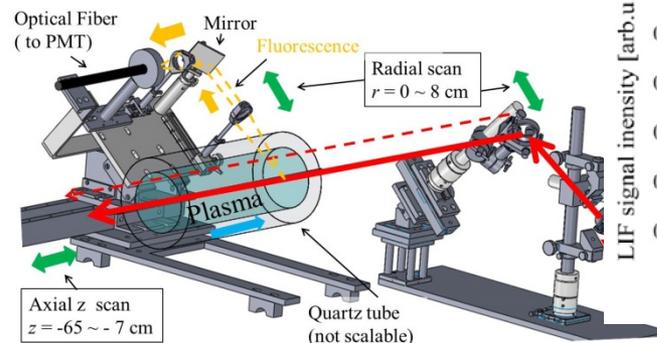
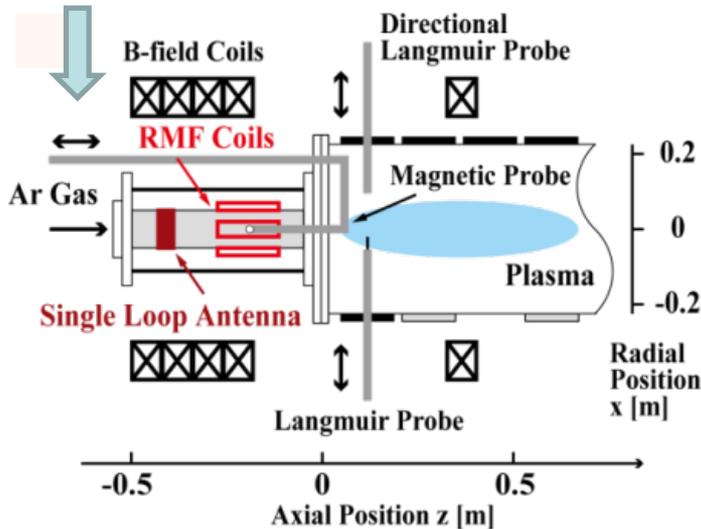
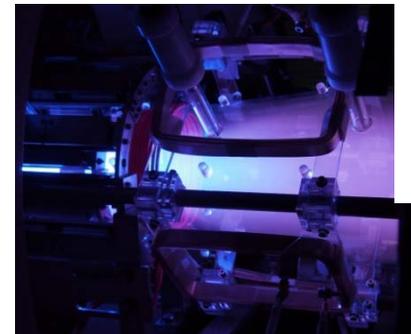
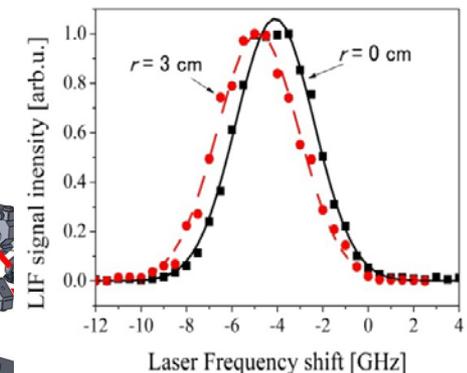


Fig. 1 (b) Fluorescence receiving optics

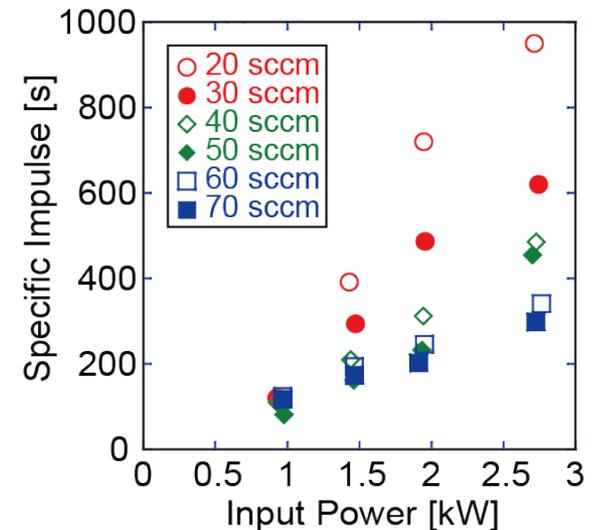
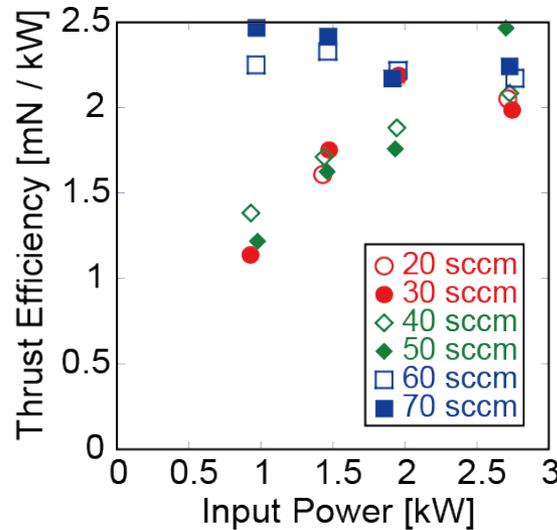
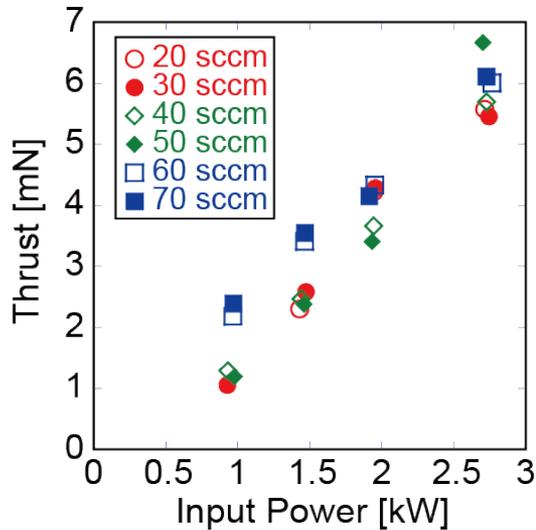
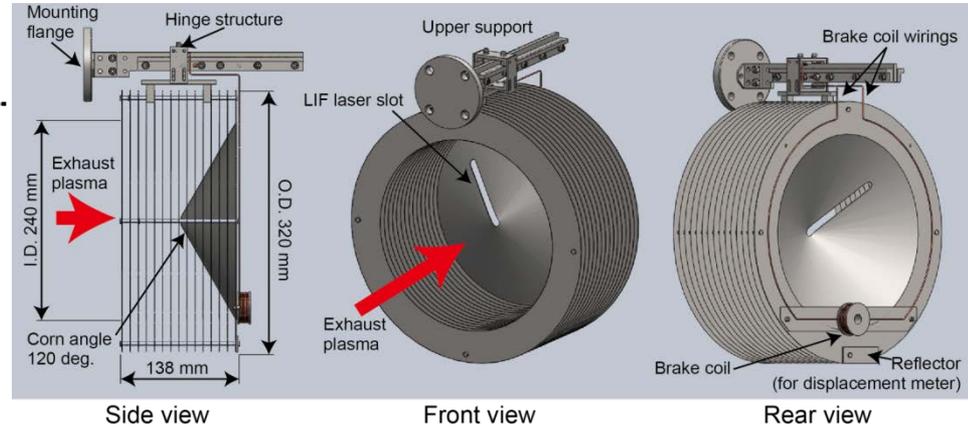
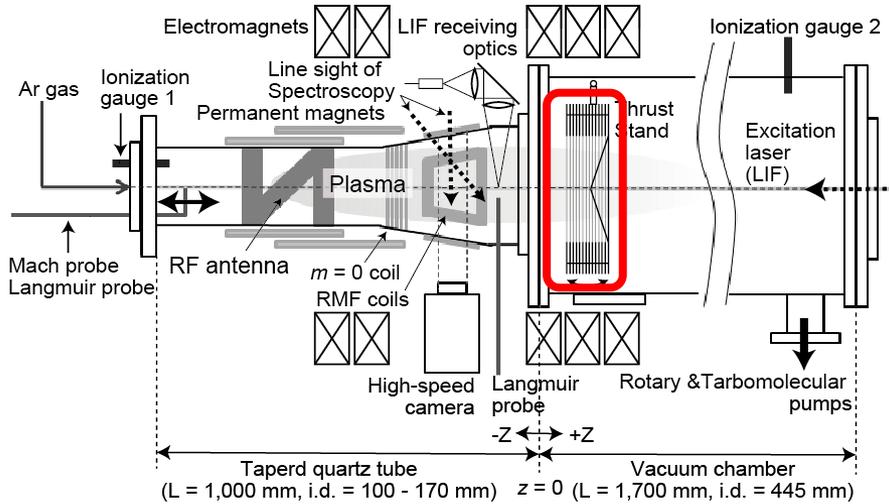
Fig. 1 (a) Laser injecting optics



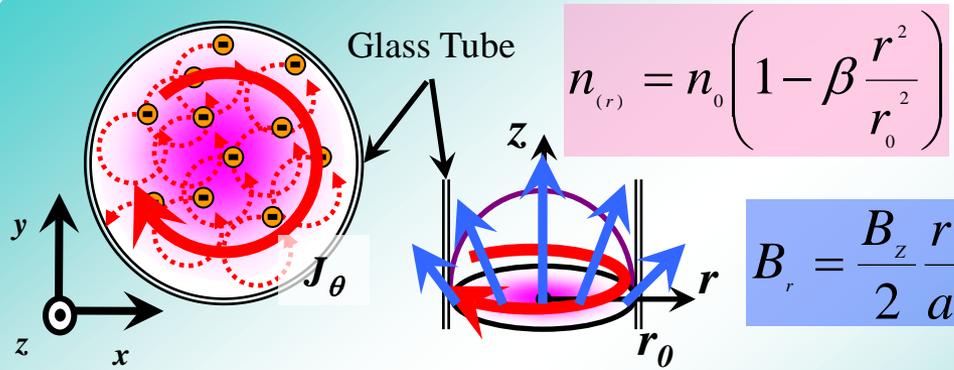
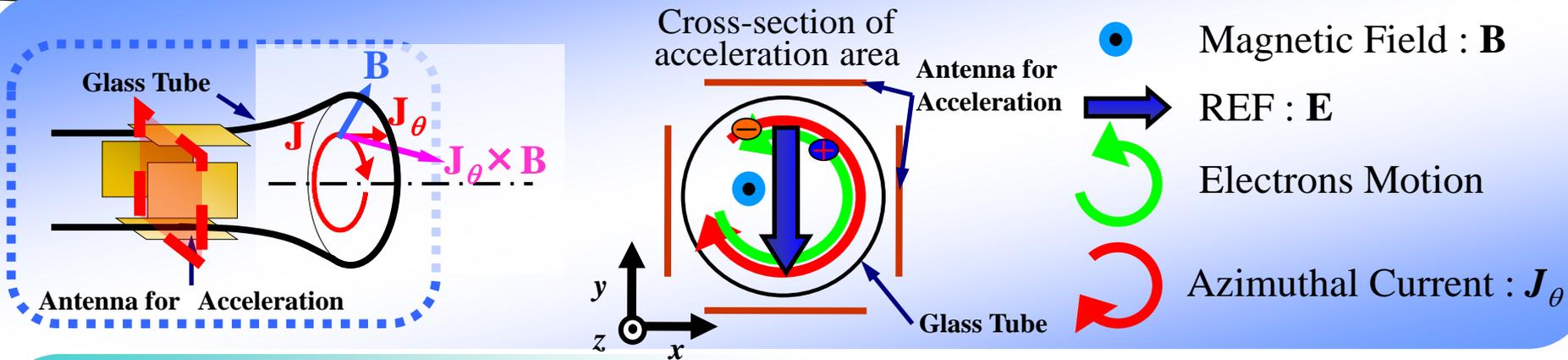
LIF

回転磁場型加速(4) -原理実証実験-

ターゲットスタンドによる推力計測



回転電場型加速(1) - 加速原理と理論解析 -



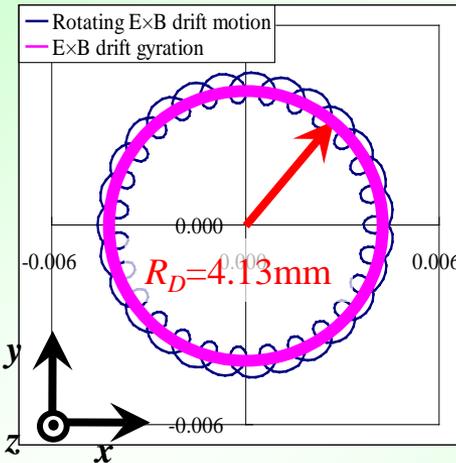
理論推力モデル(1次元電場浸透モデル)

$$F = \frac{\pi}{4} e \beta n_0 L \frac{r_0^2}{a} \frac{E_{p0}^2}{\omega B_z}$$

Reduction rate of plasma density : β
 Plasma density at the center : n_0
 Axial length of acceleration area : L
 Radius of thruster : r_0

Radius of magnetic coil : a
 Penetrated Electric Field: E_{p0}
 REF frequency : ω
 Axial magnetic Field : B_z

一様磁場中において、回転電界により駆動される電子の軌道



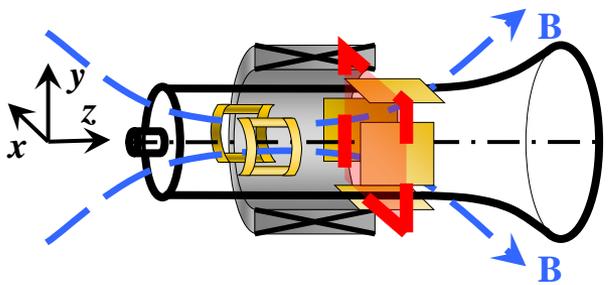
$$\frac{R_L}{R_D} = \frac{v_\perp m_e \omega}{q E} = 0.11$$

$$\frac{\omega_c}{\omega} = \frac{e B}{m_e \omega} = 28$$

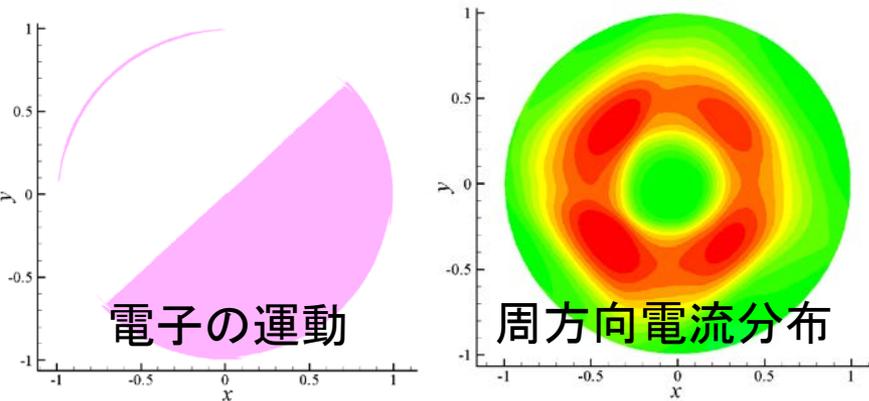
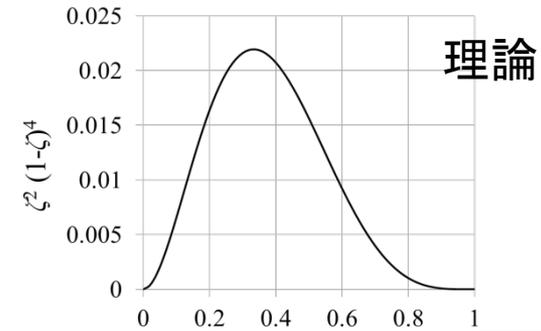
$E \times B$ ドリフト旋回運動 $R_D = E/B_z \omega$

回転電場型加速(2) -シミュレーションと理論による原理実証-

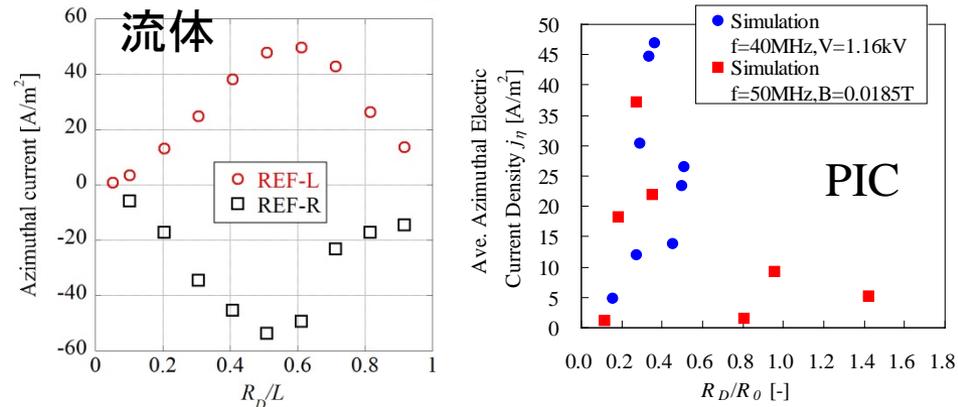
- 理論的定式化(電子流体モデル)
- Particle-in-Cell(PIC)シミュレーション
- 3流体プラズマシミュレーション
- 回転電場による周方向電子電流の生成を確認(数値的実証)
- 周方向電子電流の大きさを特徴づける無次元パラメータの一つを明示



農工大

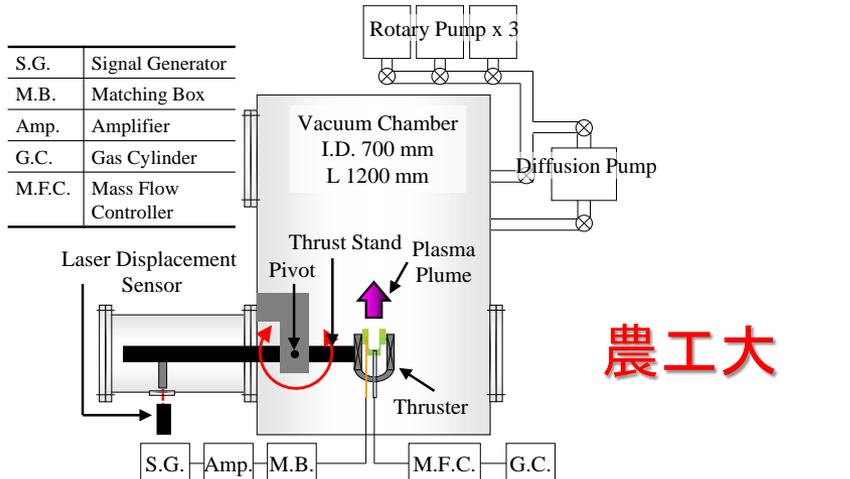


3流体プラズマシミュレーション

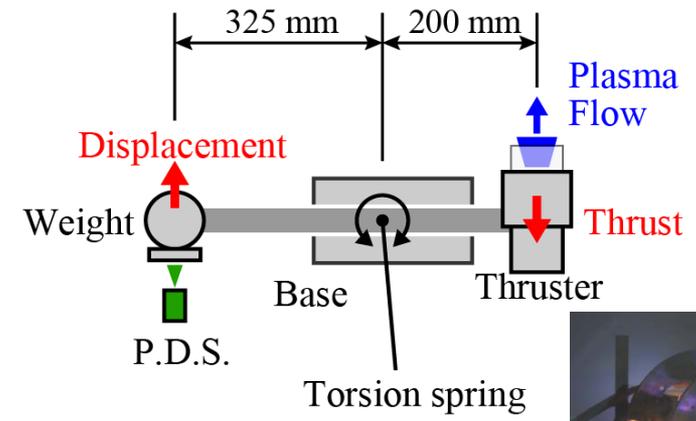


周方向電流の R_D/L 特性

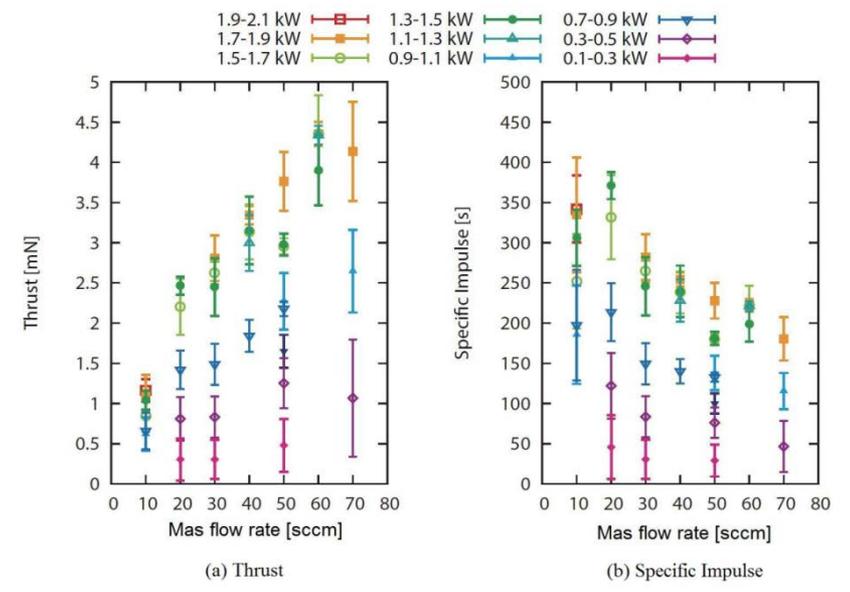
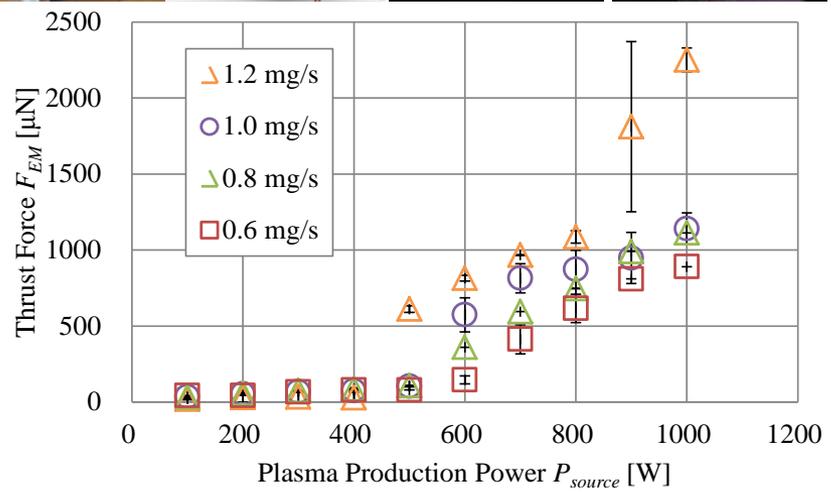
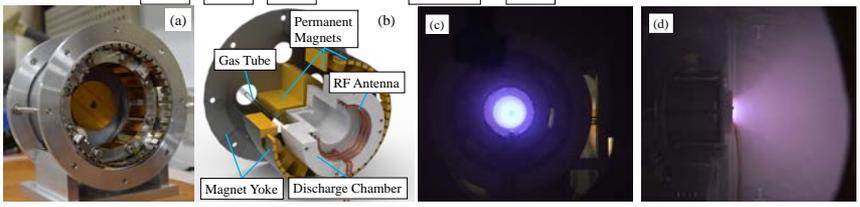
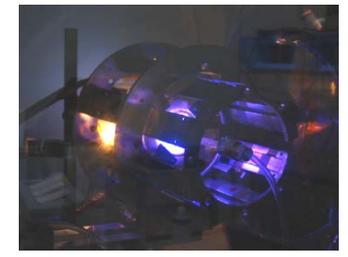
回転電場型加速(3) —原理実証実験—



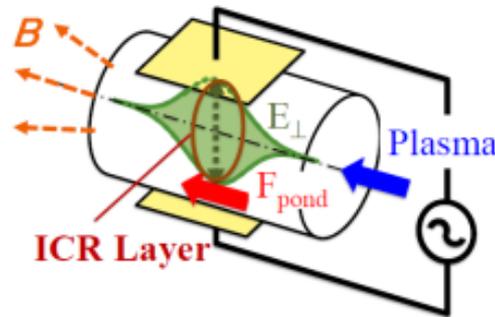
農工大



ISAS/JAXA



イオンサイクロトロン共鳴 (ICR) & Ponderomotive 加速 (PA) (1)

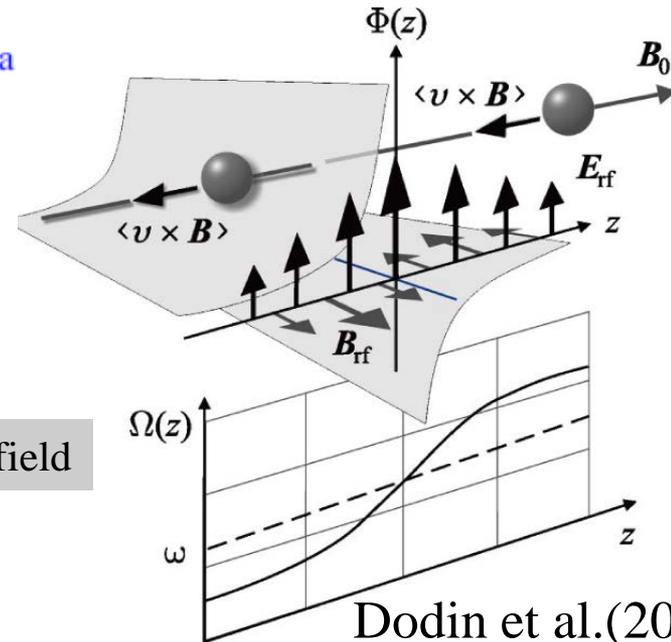


イオンの運動方程式

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E}_{rf}(r,t) + \mathbf{v} \times (\mathbf{B}_{rf}(r,t) + \mathbf{B}_0(r)))$$

External EM field

Inhomogeneous B field



Dodin et al.(2004)

プラズマ加速のプロセス

ICR + Magnetic Mirror

- VASIMR engine
- \perp heating \parallel acceleration

Ponderomotive acceleration

- pure \parallel acceleration
- less ion-wall loss

Ponderomotive Potential

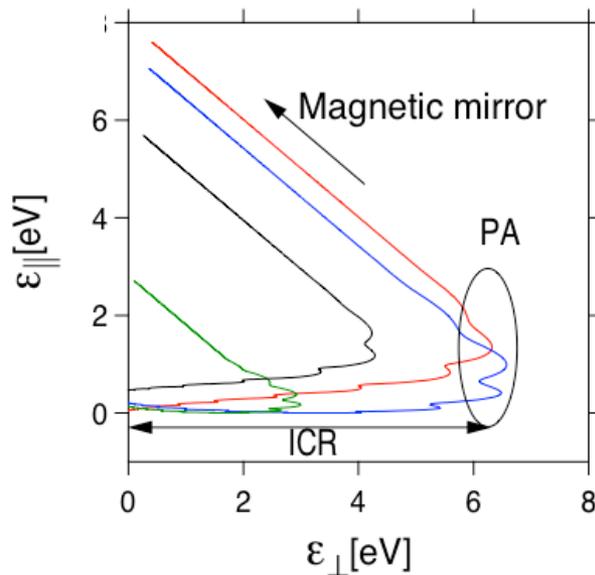
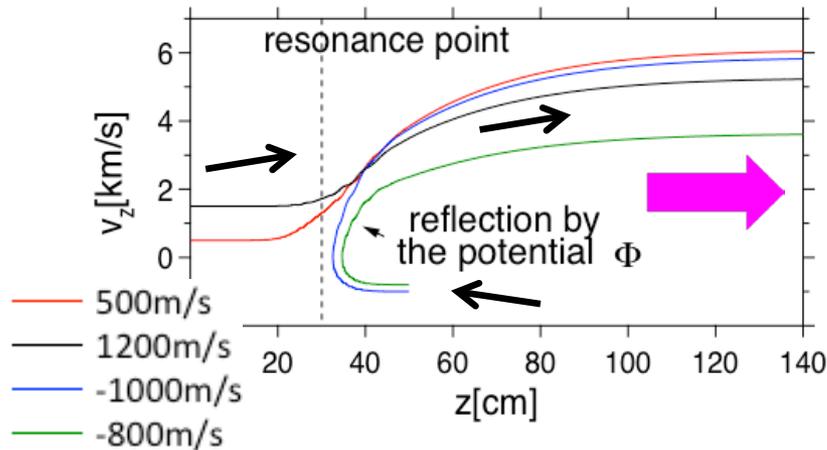
$$\Phi(r) = \frac{q^2}{4m} \frac{E_{rf}^2(r)}{\omega^2 - \Omega^2(r)}$$

Flips sign at $\omega - \Omega$

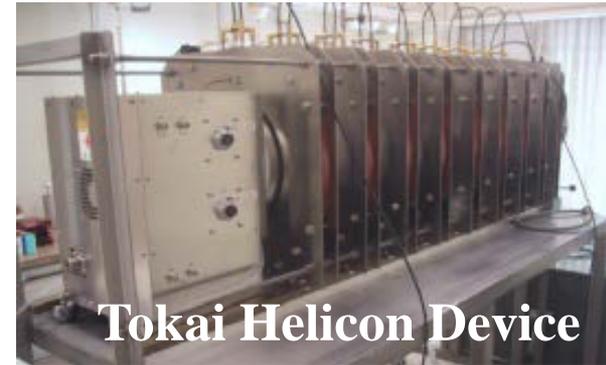
Ⓜ Ions can be accelerated unidirectionally

イオンサイクロトロン共鳴 (ICR) & Ponderomotive 加速 (PA) (2)

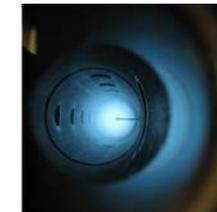
□ テスト粒子シミュレーション



□ 実証実験の計画



Side View



End View

東海大学

- Ponderomotive 加速を增強
 - 壁へのプラズマロス

まとめ

長寿命な大電力型プラズマスラストの実現を目指し、無電極電磁加速型ヘリコンプラズマスラストの開発を行っている。

- スケーリング則も含め、大小様々なヘリコンプラズマ源の開発に成功。電気推進への適用に十分な性能。
- 複数の加速方式(回転磁場型・回転電場型・ICR/PA型他)について、理論解析・シミュレーション・実験により原理実証のための研究を実施
 - 回転磁場型: FRCからのコンセプトにより、周方向電流の誘起メカニズムは明確。プラズマ加速の実証へ。
 - 回転電場型: シミュレーション, 理論解析により原理実証, 推力計測によりその性能を評価。
 - CR/PA型: テスト粒子シミュレーションにより、粒子の加速原理を確認。実証実験を準備中。

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Takeshi Matsuoka, Fumiko Otsuka and late Prof. Kyoichiro Toki for his great contribution to this study.

This work was supported by the Grant-in-Aid for Scientific Research under Contact No. (S) 21226019 from the Japan Society for the Promotion of Science.