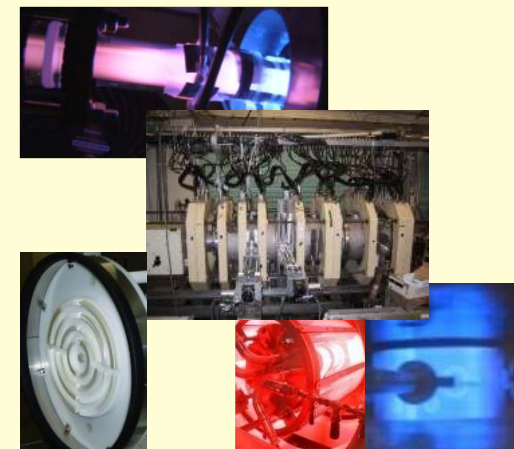
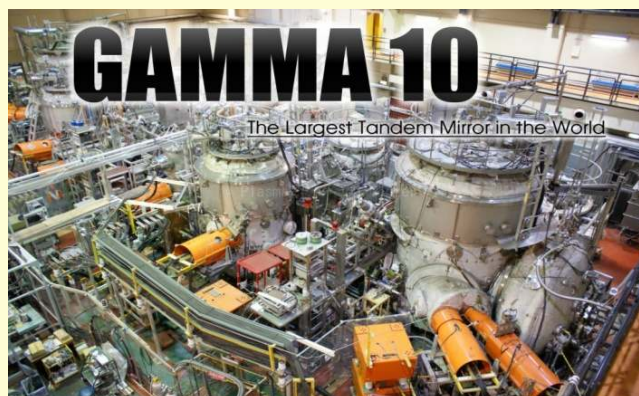
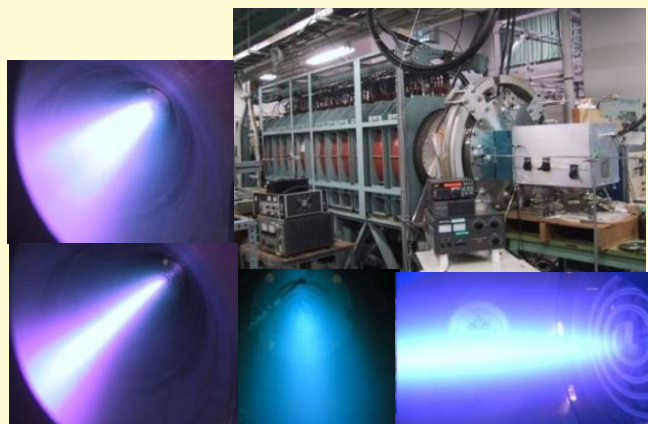


プラズマ端での高密度 プラズマ流生成・制御の基礎研究



九州大学 大学院総合理工学研究院
東京農工大学 大学院工学研究院

<http://www.tuat.ac.jp/~sinohara/>

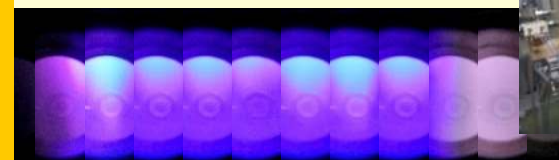
篠原 俊二郎

九州大学 大学院総合理工学研究院 羽田 亨

<http://www.esst.kyushu-u.ac.jp/~space/>

筑波大

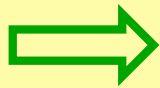
市村真、池添竜也
横山拓郎、宇賀神ゆめと



Outline

広域ヘリコン高密度プラズマ科学の進展

~ MHz, kW $\Rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$: 幅広い運転領域と応用



新規スタート：ガンマ 10 対象
関係者との議論と方向性の決定

1. ヘリコン波とは？

プラズマ源の重要性 cf. 高周波プラズマ生成法

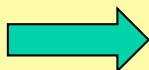
分散関係、励起アンテナと応用研究例

2. ヘリコン波プラズマ源の開発と応用：我々の研究例

構造形成、密度分布とプラズマ流分布制御

3. 大容量高密度ヘリコンプラズマ：短軸長化、高ベータ

4. 今後の展望：ヘリコンプラズマによる貢献



プラズマ端での高密度
プラズマ流生成・制御の基礎研究



ヘリコン
プラズマ源の
開発と応用
(解説)

Key Issues for Plasma Sources

Basic Studies
& Application

★ Helicon Source is Promising !

1. High-Density: e.g., High-Speed Processing
 $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ w/ Flexible Operation



ICP, SW, ECR $< 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, CCP $< 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

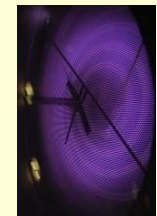
2. Large Area or Large Volume: Efficiency & Flexibility

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



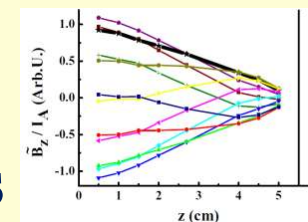
3. Low Aspect Ratio: Efficiency for Application

$A = L/D = 0.5 \Rightarrow 0.075$ *cf.* $A = R/a$



Characterization: Importance

Production, Profile, Wave Structures



★ High Beta, Flow: Structure and Instabilities (Fusion, Space Plasma etc.)

Helicon Wave Plasma

Highly Efficient
Plasma Production

Bounded Whistler Wave $\Rightarrow$ High-Density Plasma

$$\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$$

$$\sim \text{MHz, kW} \Rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

Wide Operational Region

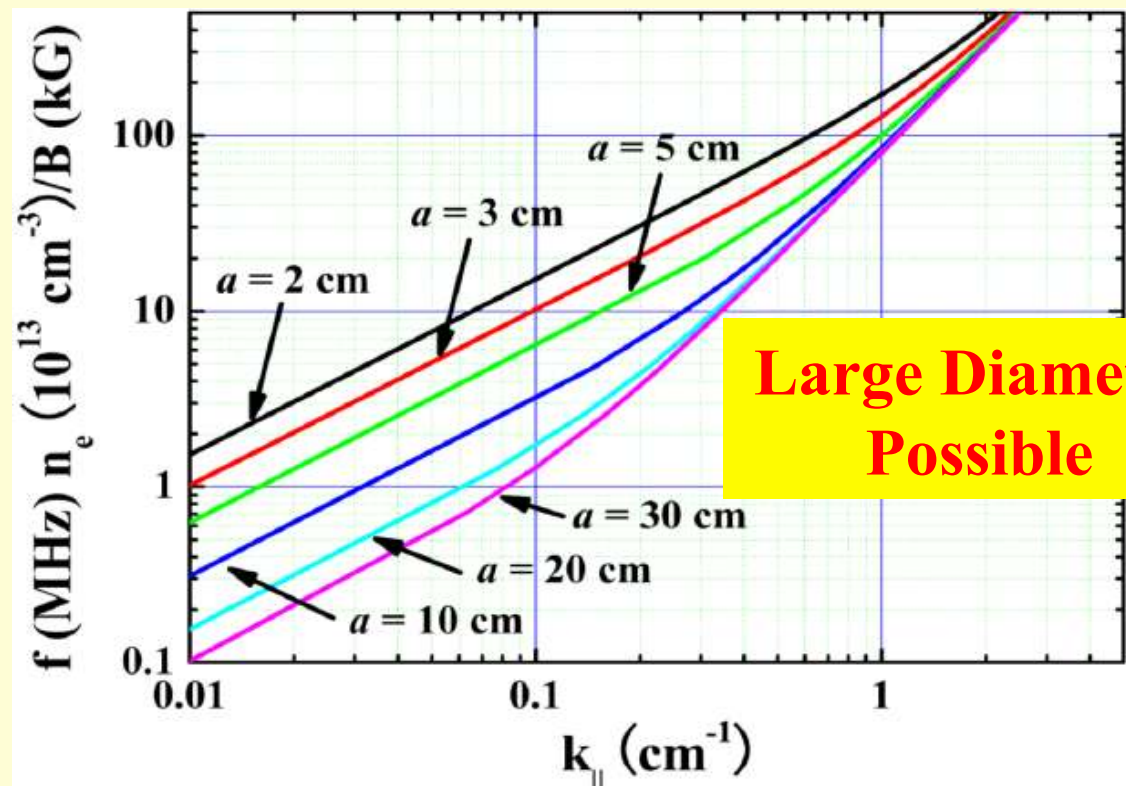
Promising Plasma Source: Many Applications

★ 非線形現象、構造形成

基礎実験、プロセス、
核融合 (e.g., ステラレータ)
ガスレーザー、
宇宙プラズマモデリング
プラズマ加速/ 推進 ...

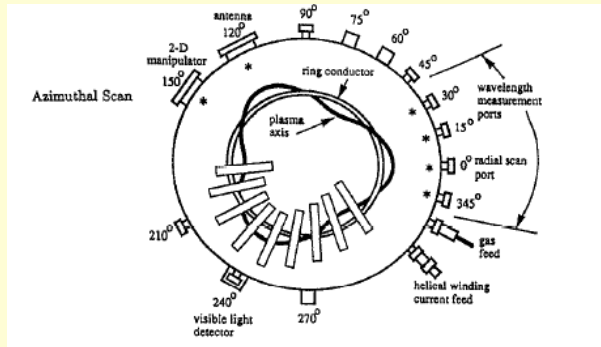
Dispersion Relation

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



Examples of Application

Nuclear Fusion

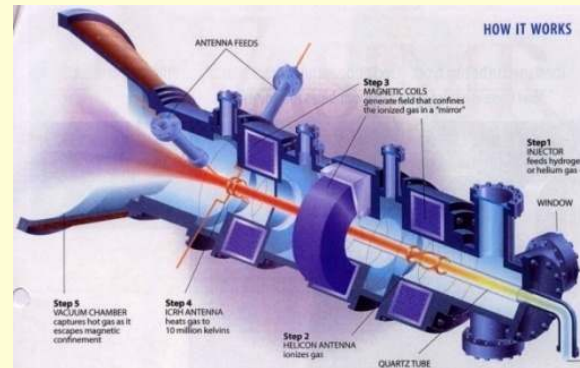


SHEILA (ANU)

B. C. Zhang *et al*, POP (1995).

+ Heliotron DR, TJ-K

Plasma Thruster



VASIMR

F. R. Chang-Díaz *et al*. (NASA)

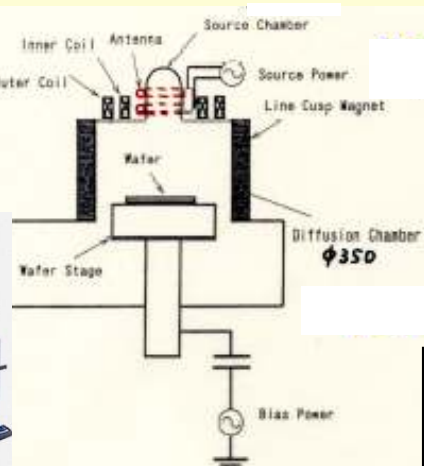
Basic Study, Space Plasma Simulation



Industrial Application

Etching Device

T. Tsukada *et al*., JJAP (1994).



PWI (Ceramics)

S. Shinohara *et al*. (2009).

Outline

広域ヘリコン高密度プラズマ科学の進展

~ MHz, kW $\Rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$: 幅広い運転領域と応用

新規スタート: ガンマ 10 対象
関係者との議論と方向性の決定

1. ヘリコン波とは？

プラズマ源の重要性 cf. 高周波プラズマ生成法

分散関係、励起アンテナと応用研究例

2. ヘリコン波プラズマ源の開発と応用: 我々の研究例

構造形成、密度分布とプラズマ流分布制御

3. 大容量高密度ヘリコンプラズマ: 短軸長化、高ベータ

4. 今後の展望: ヘリコンプラズマによる貢献

プラズマ端での高密度
プラズマ流生成・制御の基礎研究

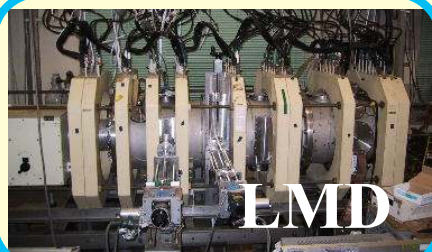
代表者

開発した高密度ヘリコンプラズマ源

制御した7つのユニークな装置：多くの世界記録



LMD-U

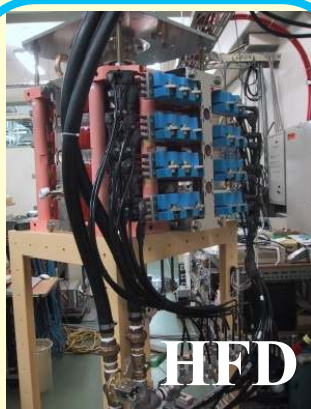


LMD



LDD

九大 → 東京農工大 (一部)
種々のアンテナ
(40-45 cm ϕ , 120-374 cm ^{l})



HED

九大→東京農工大
世界最強磁場 (完成当時)
10 kG
(10 cm ϕ , 30-100 cm ^{l})



LHPD

宇宙研
世界最大容量
(74 cm ϕ , 486 cm ^{l})

最小アスペクト比
($A = 0.075$)

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



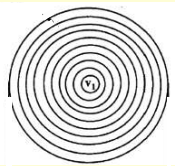
東京農工大
世界最小容量
(2.5 cm ϕ , > 4.7 cm ^{l})



THD

東海大
新アンテナ
(20 cm ϕ , 100 cm ^{l})

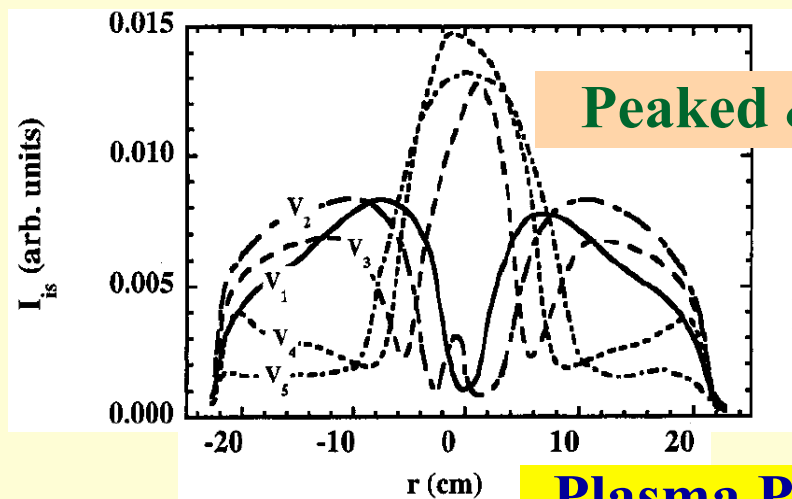




LMD Applications (No. 1)

Low Density
(Voltage Biasing)

Profile Control

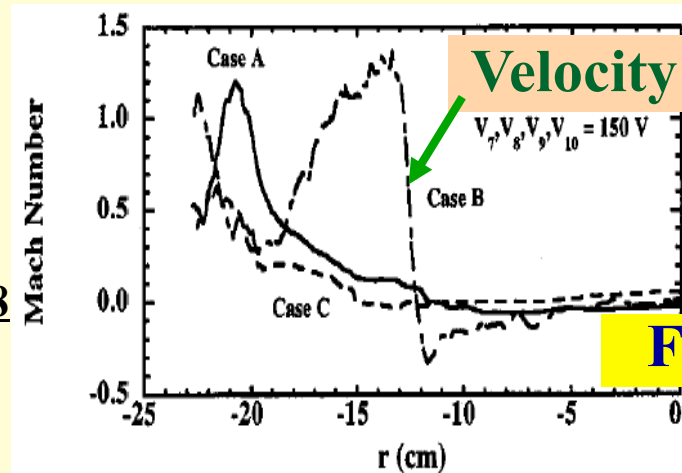


Peaked & Hollow

Phys. Plasmas 8
(2001)1154.

Plasma Processing

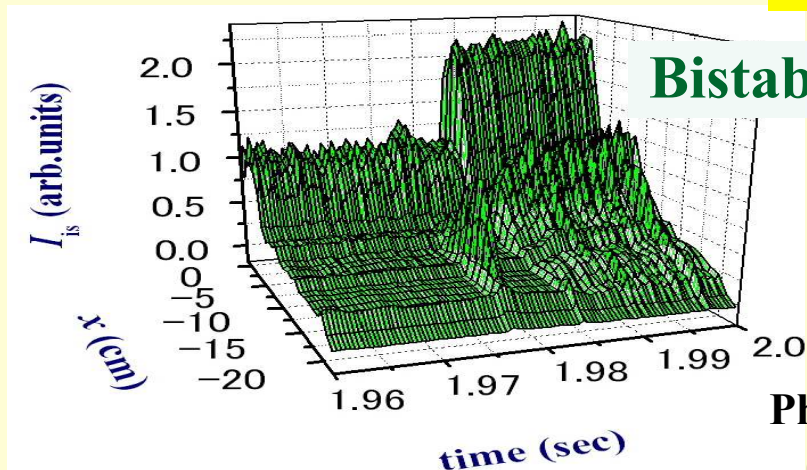
Plasma Flow Control



Velocity Shear

Fusion

Density Transition



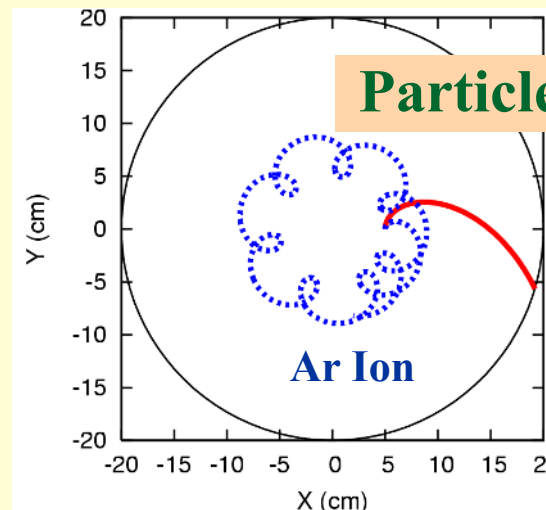
Bistable

Fusion

Hysteresis
(Statistics)

Phys. Plasmas 9
(2002) 4540.

Particle Orbits



Xe Ion

Jpn. J. Appl.
Phys. 46 (2007)
4276.

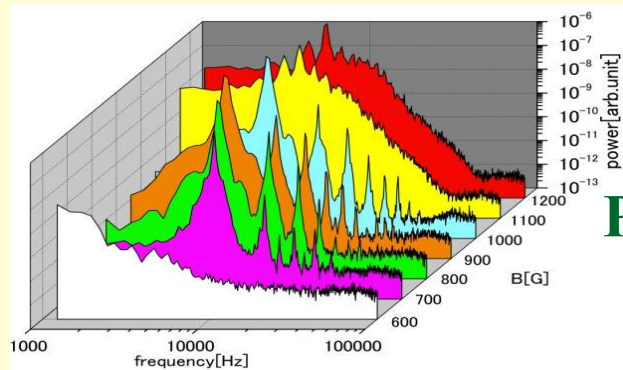
Mass Separation

$$v_{\theta} = \frac{\omega_{ci} r}{2} (-1 \pm \sqrt{1 - 4E_r / rB_z \omega_{ci}})$$

LMD-(U) Applications (No. 2)

High Density

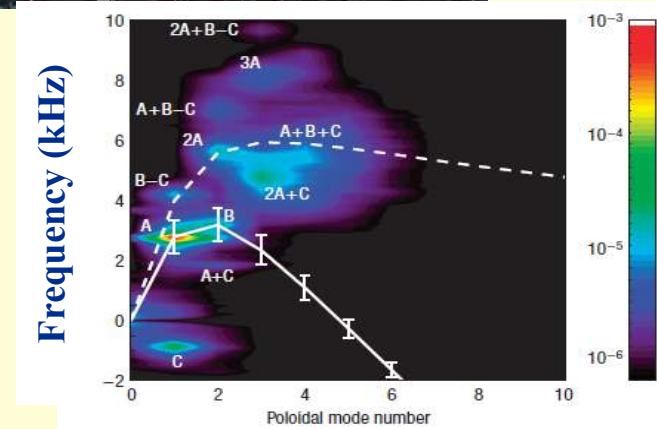
Turbulence Study



Power Spectra

SPR (JSPS)

P.I.: Prof. S.-I. Itoh



Mode Coupling

Poloidal Mode

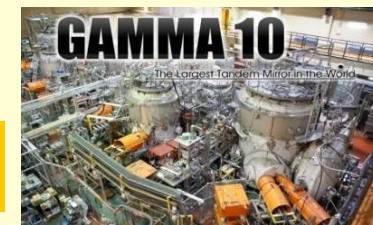
PWI (Ceramics)



(Nature Phys. 4 (2008) 721 etc.)

Basic & Application Studies

★ Linear Machine



Fusion, Basic Plasma, Propulsion, Space Plasma, Processing ...

期待されるターゲットプラズマ：高密度、幅広い運転領域、制御性

生成機構解明、機能性プラズマ生成/インテリジェント制御



w/ 宇宙研



アンテナ開発、特許 2 件取得



w/ 東海大



世界最大容量：2.1 m³
世界最小容量：23 cm³
世界最強磁場：10 kG
世界最薄：5.5 cm

(最大と最小直径、最小軸長)

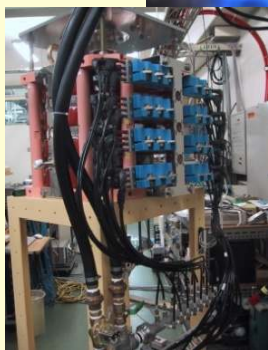


w/ 東京農工大



★ プラズマ推進

九大から
東京農工大



プラズマ分布制御

種々の

プロセス源

超音速プラズマ流制御

遠心/異種イオン

分離

遷移現象

乱流研究

安定性：基礎/核融合

安定性：基礎/核融合

国内外への広い波及効果

基礎研究用プラズマ源

半導体関連、機能性材料

材料照射

新領域への展開

(滅菌、ダスト、新配位)

Outline

広域ヘリコン高密度プラズマ科学の進展

~ MHz, kW $\Rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$: 幅広い運転領域と応用

新規スタート: ガンマ 10 対象
関係者との議論と方向性の決定

1. ヘリコン波とは？

プラズマ源の重要性 cf. 高周波プラズマ生成法

分散関係、励起アンテナと応用研究例

2. ヘリコン波プラズマ源の開発と応用: 我々の研究例

構造形成、密度分布とプラズマ流分布制御

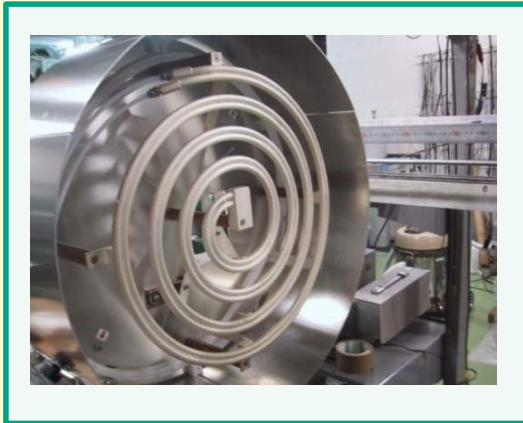
3. 大容量高密度ヘリコンプラズマ: 短軸長化、高ベータ

4. 今後の展望: ヘリコンプラズマによる貢献

プラズマ端での高密度
プラズマ流生成・制御の基礎研究

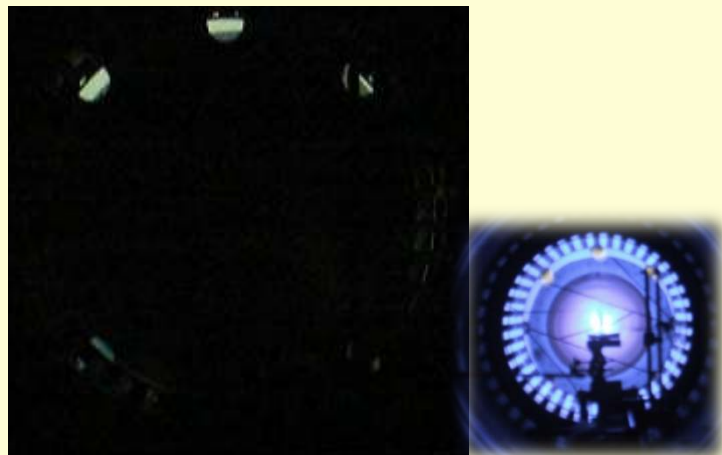
The Largest Helicon Device

(Third Type)

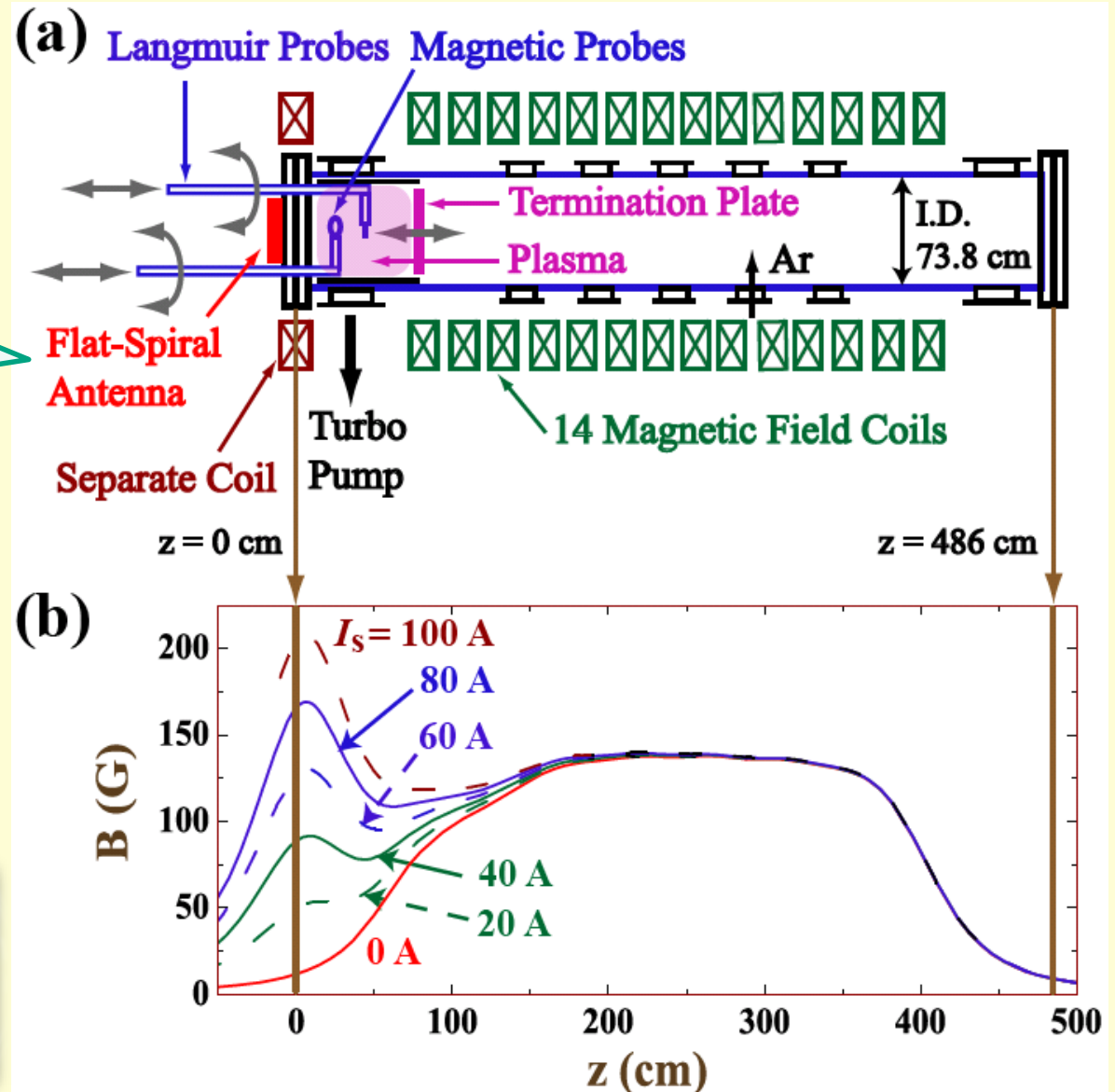


(43 cm ϕ , 0.5-4 Turns)

(Outside Quartz Window)

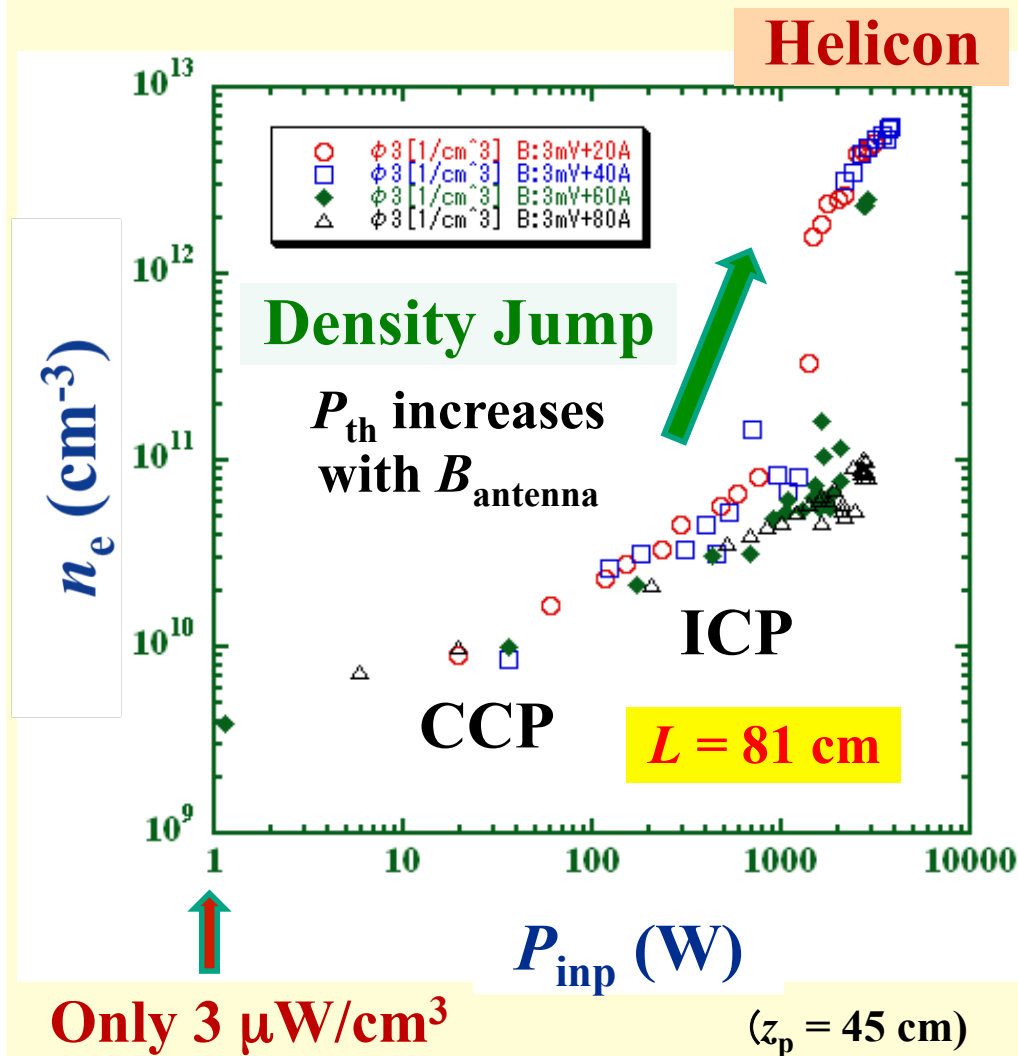


From End, Viewing Antenna



$D = 74$ cm

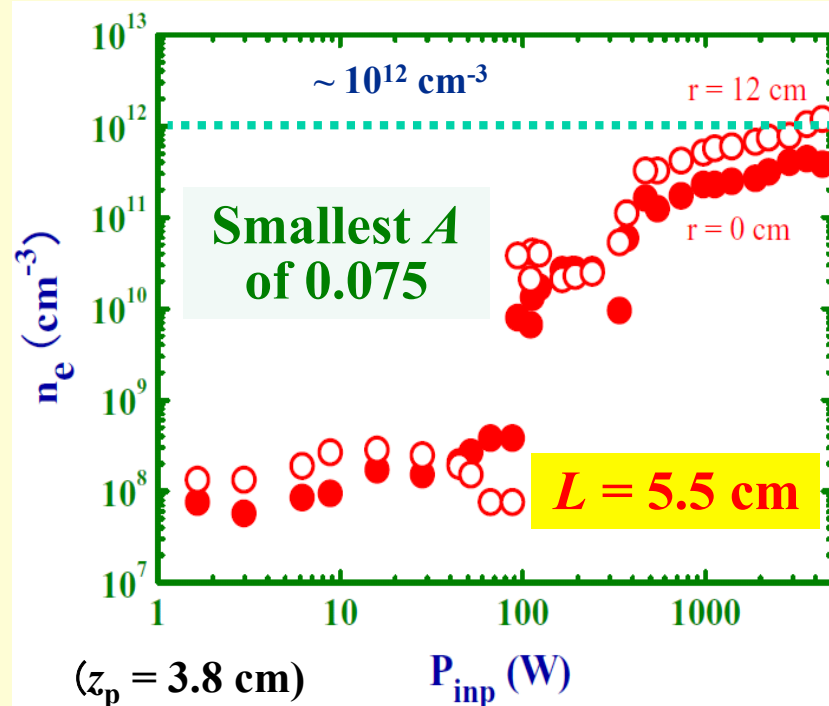
Excellent Production Efficiency n_e vs. P_{inp}



n_e close to 10^{13} cm⁻³
with $P_{\text{inp}} < 4$ kW

$L = 486$ cm

Excellent Production Efficiency of
 $\sim 10^{15}$ Particles/W

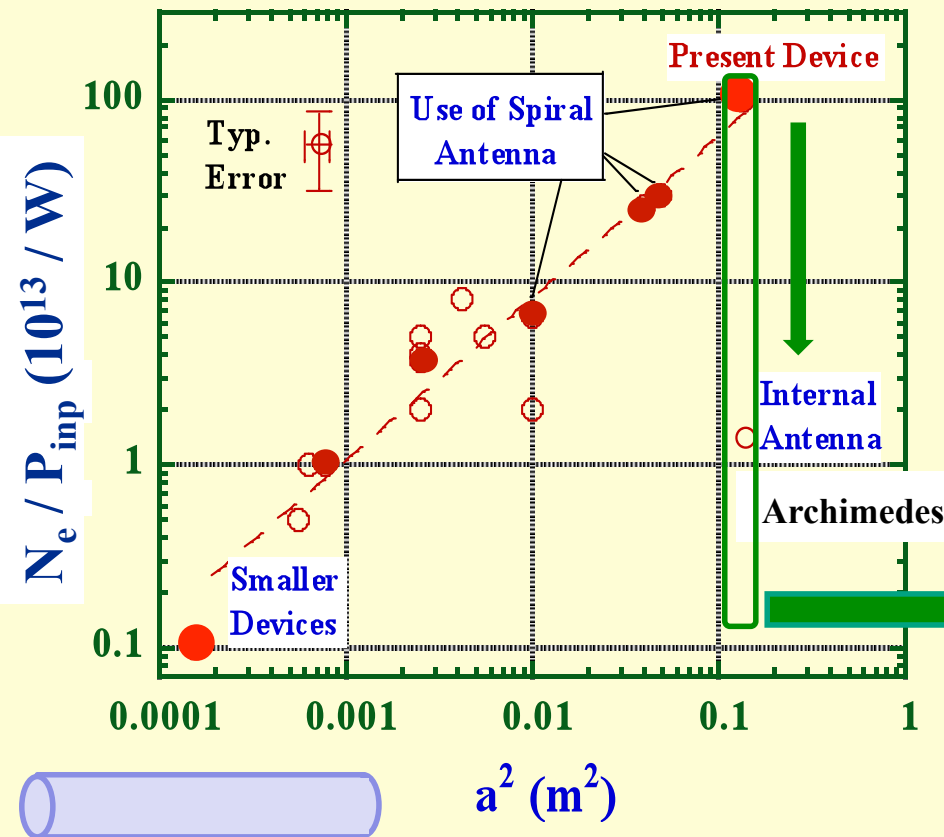


Particle Production Efficiency (Exp.)

Loss Across the Field

Small Radius a
 Long Axial Length L
 Weak Magnetic Field B

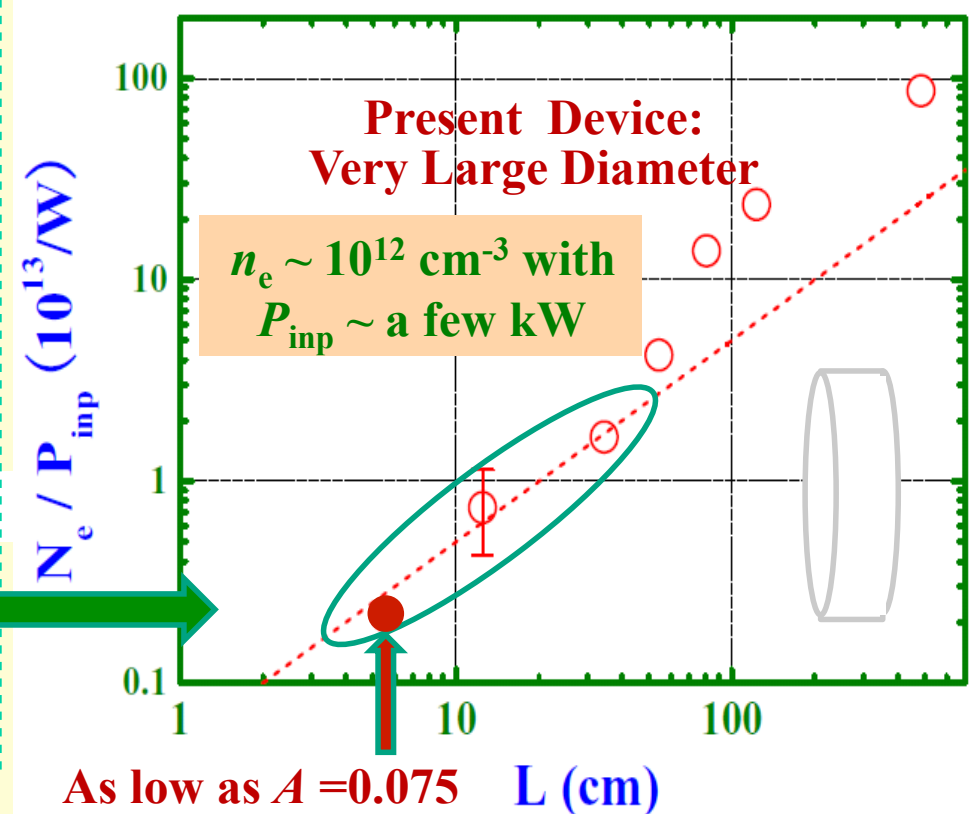
$$N_e / P_{\text{inp}} \propto a^2$$



Loss Along the Field

Large a
 Short L
 Strong B

$$N_e / P_{\text{inp}} \propto L$$



High Beta Effect

Basic, Fusion
& Space Physics

★ MHD Conditions

Beta = Plasma Pressure / Mag. Pressure
Industrial Application: Efficiency

Normalized Scale Lengths (ρ/a)
Hall Parameter ($\Omega_c \tau$)
Resistive Time (Characteristic Time)
cf. Mag. Reynolds Number

+ New Findings !?

★ Diamagnetic Effect:
Spatio-Temporal Structures
(+ Particle Behavior & Excited Waves)
cf. Magnetic Hole

★ Induced Instabilities:
Mirror, Fire Hose, Alfvén Ion Cyclotron,
Drift Alfvén Instabilities ...



★ Initial Try of Reaching High Beta Value with Low Magnetic Field

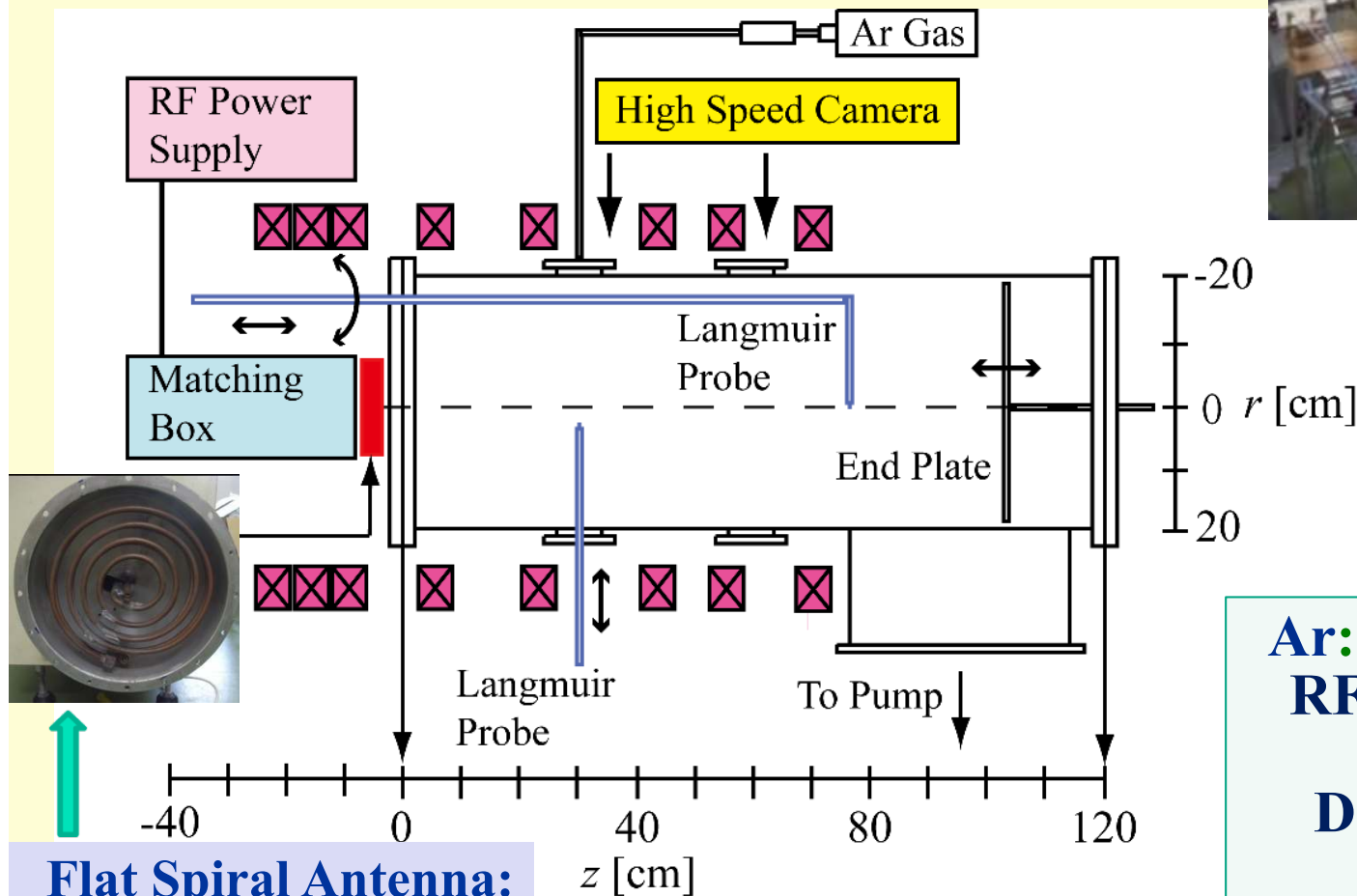
cf. ★ Low Aspect Ratio

Large Diameter (Helicon) Device

Up to 0.16 m^3

40 cm I.D.

Axial Length L : 9.5 – 126 cm



RF System & Results

S. Shinohara et al.,

Jpn. J. Appl. Phys.

35 (1996) 4503.

Plasma Sources Sci.

Technol. **10** (2010) 052313.

Ar: 3 mTorr – 10 mTorr

RF Frequency: 7 MHz

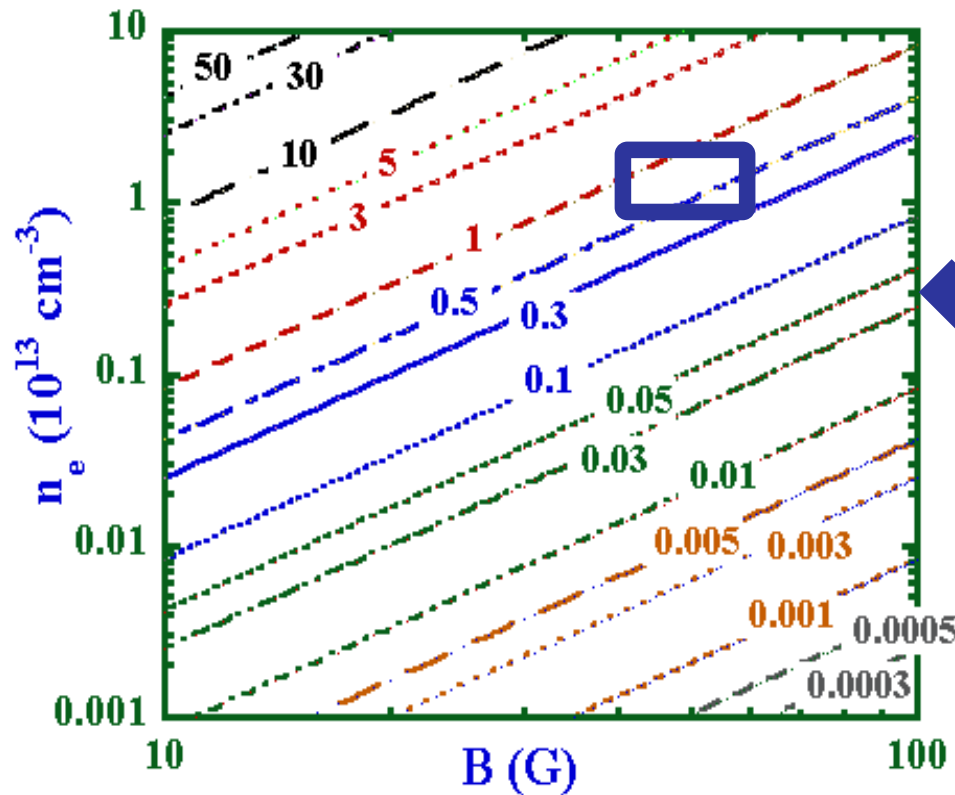
RF Power: 5 kW

Discharge Duration:

~ 12 ms (10 pps)

Flat Spiral Antenna:
18 cm ϕ , 4 Turns

Beta and Density in (P_{Ar} , B) Space

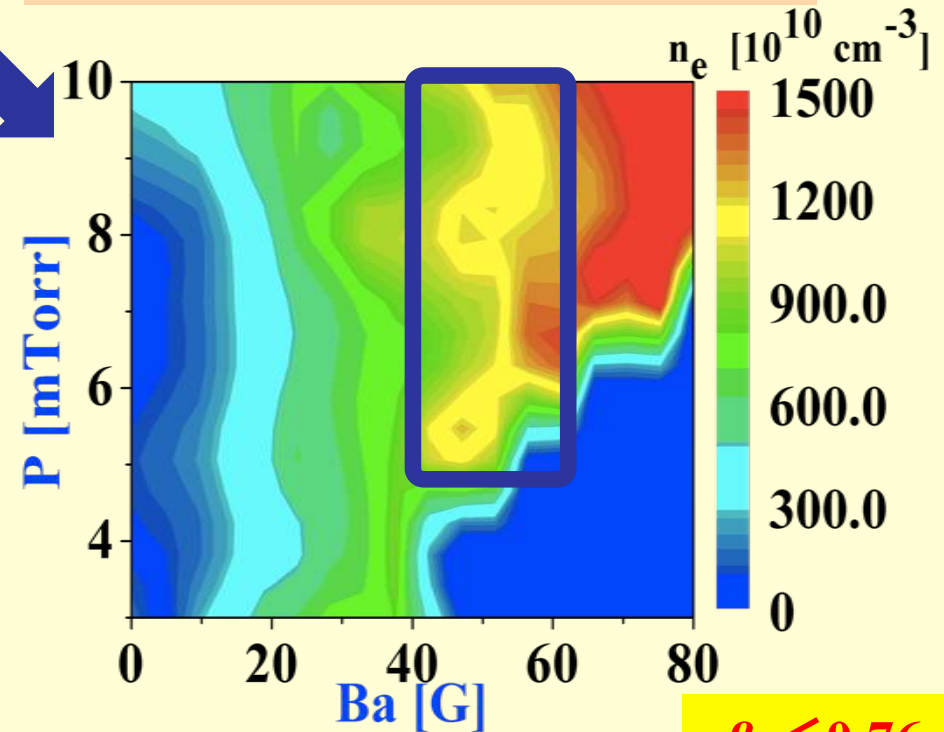


[Contour of Beta]

(Ratio of Plasma Pressure to Mag. One)

MHD Conditions:
Larmor Radius, $\Omega_c \tau$, Skin Time

High Density $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$



$\beta_0 < 0.76$

[Contour of Electron Density]

High Beta: Structure and Instabilities
(Fusion, Space Plasma etc.)

Outline

広域ヘリコン高密度プラズマ科学の進展

~ MHz, kW $\Rightarrow$ 10^{13} cm⁻³: 幅広い運転領域と応用

新規スタート: ガンマ 10 対象
関係者との議論と方向性の決定

1. ヘリコン波とは？

プラズマ源の重要性 cf. 高周波プラズマ生成法

分散関係、励起アンテナと応用研究例

2. ヘリコン波プラズマ源の開発と応用: 我々の研究例

構造形成、密度分布とプラズマ流分布制御

3. 大容量高密度ヘリコンプラズマ: 短軸長化、高ベータ

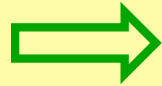
4. 今後の展望: ヘリコンプラズマによる貢献

プラズマ端での高密度
プラズマ流生成・制御の基礎研究

4. 今後の展望：ヘリコンプラズマによる貢献

広域ヘリコン高密度プラズマ科学の進展

~ MHz, kW $\Rightarrow$ 10^{13} cm^{-3} : 幅広い運転領域と応用



新規スタート：ガンマ 10 対象
関係者との議論と方向性の決定

I. 高密度プラズマ源

初期プラズマ生成 cf. 分布制御

壁洗浄

プラズマ-壁相互作用

cf. APSEDAS (Helicon)

II. 高密度プラズマ流制御

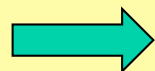
周・軸方向 cf. 平衡と安定性制御

III. 高ベータプラズマ

構造形成、安定性：動的変化

cf. AIC (GAMMA 10)

★ 理論・シミュレーション
研究との比較



プラズマ端での高密度
プラズマ流生成・制御の基礎研究

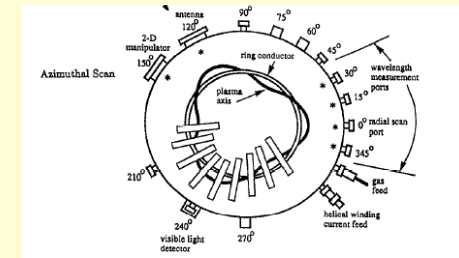
I. 高密度プラズマ源

初期プラズマ生成

cf. 分布制御

開放端系 OK

ガス種



環状系 SHEILA

+ TJ-K, Heliotron DR ...

壁洗浄

開放端系 OK

ガス種

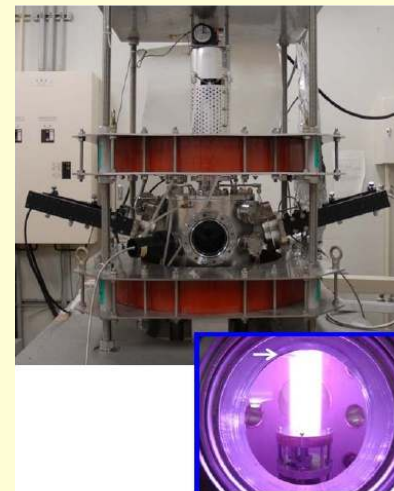
環状系 ?

cf. TDC, GD, Baking

プラズマ壁相互作用

LMD, SMD, HFD

cf. Ceramics

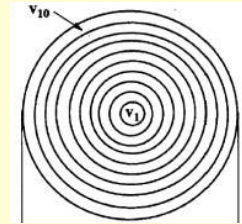


cf. APSEDAS
(Helicon)

II. 高密度プラズマ流制御

周方向プラズマ流

e.g., 多重極電圧バイアス法

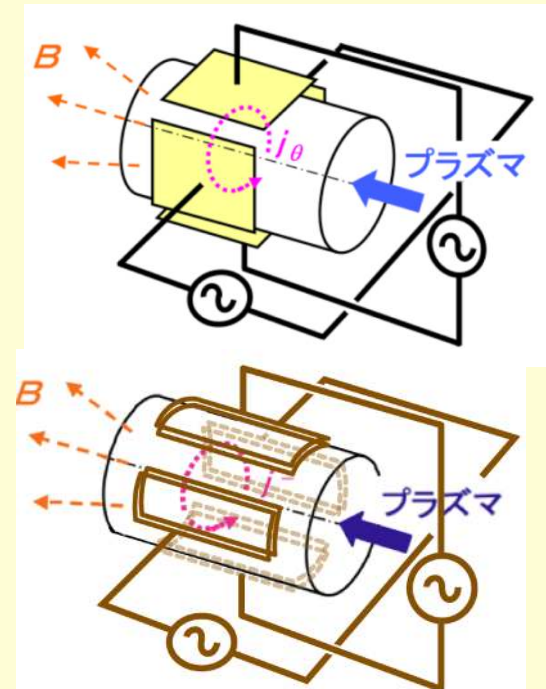


開放端系 OK

軸方向プラズマ流

開放端系 OK

e.g., 新プラズマ推進法
(プロジェクト)



平衡と安定性制御

e.g., 分布制御、乱流制御

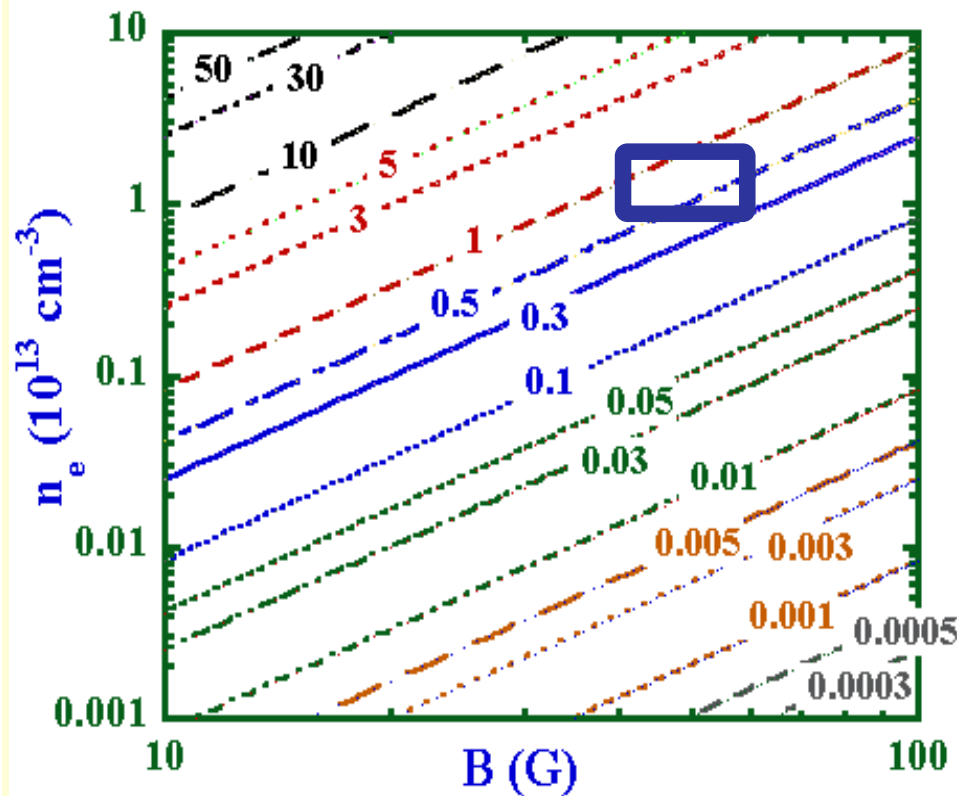
不純物排出
プラズマ粒子補給

e.g., $n_e \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$
 $v \gg 10^3 \text{ m/s}$
(定常可能)

c.f. ICR

III. 高ベータプラズマ

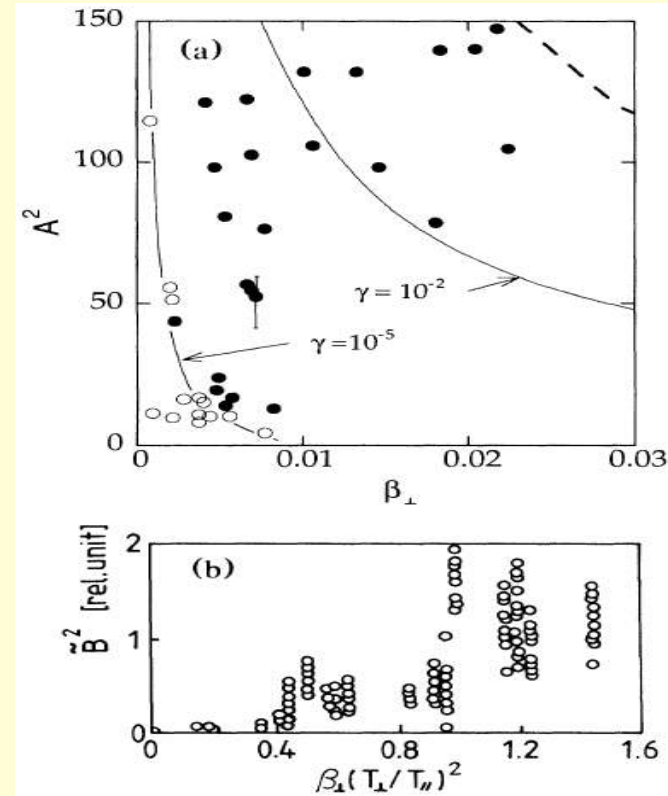
無電流
低磁場・高密度



密度－磁場空間での
ベータ値

$$\beta = p_e / (B_0^2 / 2\mu_0)$$

$$\star B^2 / 2\mu_0 + p_e > B_0^2 / 2\mu_0$$



β と磁場揺動の関係

cf. AIC (GAMMA 10)

○ : 揺動なし
● : 揺動あり

Larmor Radius < Plasma Radius

$$\Omega_c \tau < 1 \text{ (Ion)}, > 1 \text{ (Electron)}$$

$$\star \tau = \mu_0 \sigma a^2 < \text{Discharge Duration}$$

広域ヘリコン高密度プラズマ科学の応用

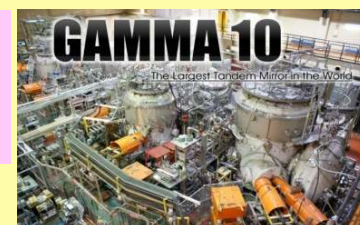
★ 関連研究者

~ MHz, kW $\Rightarrow$ 10^{13} cm $^{-3}$: 周辺制御、輸送制御

★ 基礎



新規スタート: ガンマ 10 対象
関係者との議論と方向性の決定



I. 高密度プラズマ源

初期プラズマ生成 cf. 分布制御

壁洗浄

プラズマ-壁相互作用

cf. APSEDAS (Helicon)

II. 高密度プラズマ流制御

周・軸方向 cf. 平衡と安定性制御

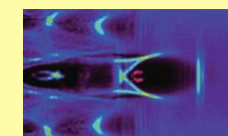
III. 高ベータプラズマ

構造形成、安定性: 動的変化

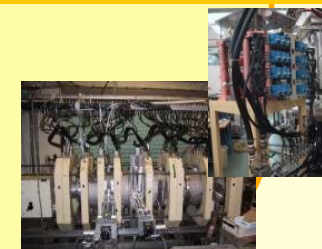
cf. AIC (GAMMA 10)



プラズマ端での高密度
プラズマ流生成・制御の基礎研究

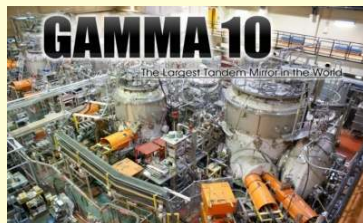


★ 理論・シミュレーション
研究との比較



広域ヘリコン高密度プラズマ科学の応用

★ 関連研究者



~ MHz, kW $\Rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$: 周辺制御、輸送制御

I. 静電、磁気計測 (1D, 2D, 3D: マルチ) 機動性

静電プローブ (SP, DP, TP: MP)

磁気プローブ

IEA

ロゴスキーコイル

II. 光計測

高速度カメラ

分光器 1.5 m

LIF

IR カメラ

III. その他



2次元駆動



48 チャンネル



フォトロン
FASTCAM SA : 1 MFPS



1.5 m 分光器



ダイオードレーザー
(TOPTICA) : 0.5 W
668.6 nm (蛍光442 nm)

[波動を用いた主なプラズマ生成法の比較]

(プラズマプロセス分野) cf. NLD (磁気中性線放電)

	CCP (容量性結合)	ICP (誘導性結合)	電子サイクロ トロン波	ヘリコン波	表面波
周波数 (MHz)	0.05~13.56↑	1~20↑	2450↓	5~30	1~10000
圧力 (mTorr)	100~5000	0.5~200	0.1~10	0.3~30	5↓~3000
磁場 (G)	0	0	~875↓ (固定)	50~1000	0
励起法	平行平板	コイル	導波管 スロット	コイル	スロット 導波管 誘電板
電子密度 (cm ⁻³)	10 ⁹ ~10 ¹¹	10 ¹¹ ~10 ¹³	10 ¹¹ ~10 ¹³	10 ¹² ~10 ¹³	10 ¹⁰ ~10 ¹²
波動	非伝搬 (近接場)	非伝搬 (近接場)	伝搬	伝搬	伝搬
逆アスペ クト比	3~10	2~5	0.5~2↑	0.5~2↑	0.1~2↑
生成機構	統計加熱 衝突減衰 二次電子 加速	衝突減衰 無衝突 電子加熱	電子サイクロ トロン減衰 衝突減衰	衝突減衰 電子ランダ ウ減衰? T&E減衰?	衝突減衰 無衝突 電子加熱?

(核融合分野)

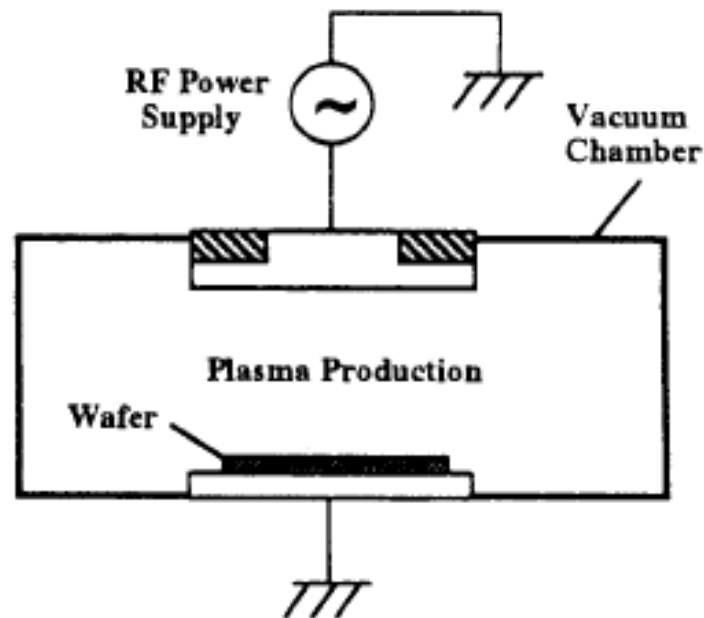
生成、加熱、電流駆動

電子サイクロトロン及びイオンサイクロトロン周波数領域の波。
低域混成波、アルフヴェン波

(EBW, HHFW)

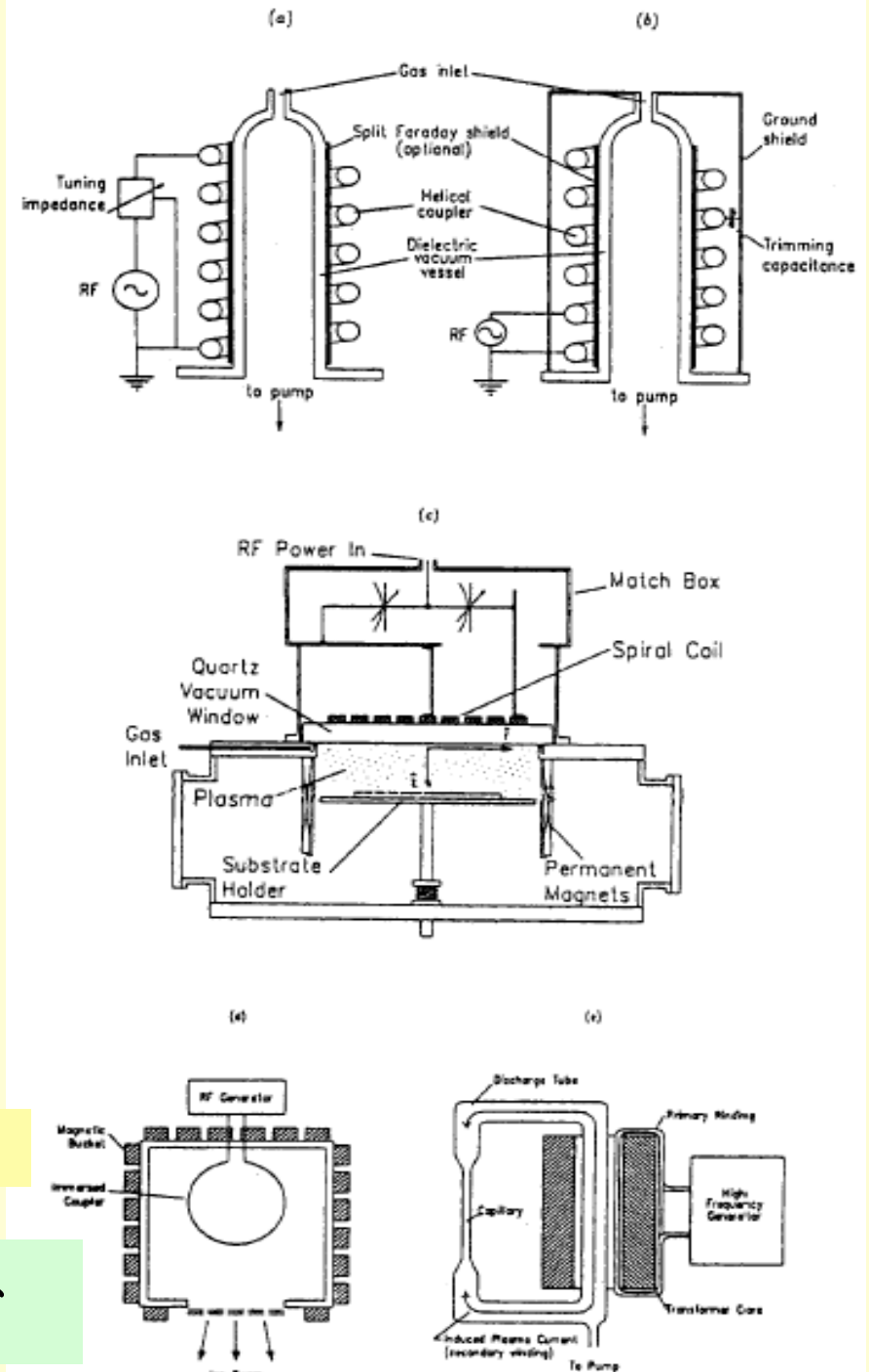
典型的な容量性結合型プラズマ (CCP) : 平行平板型

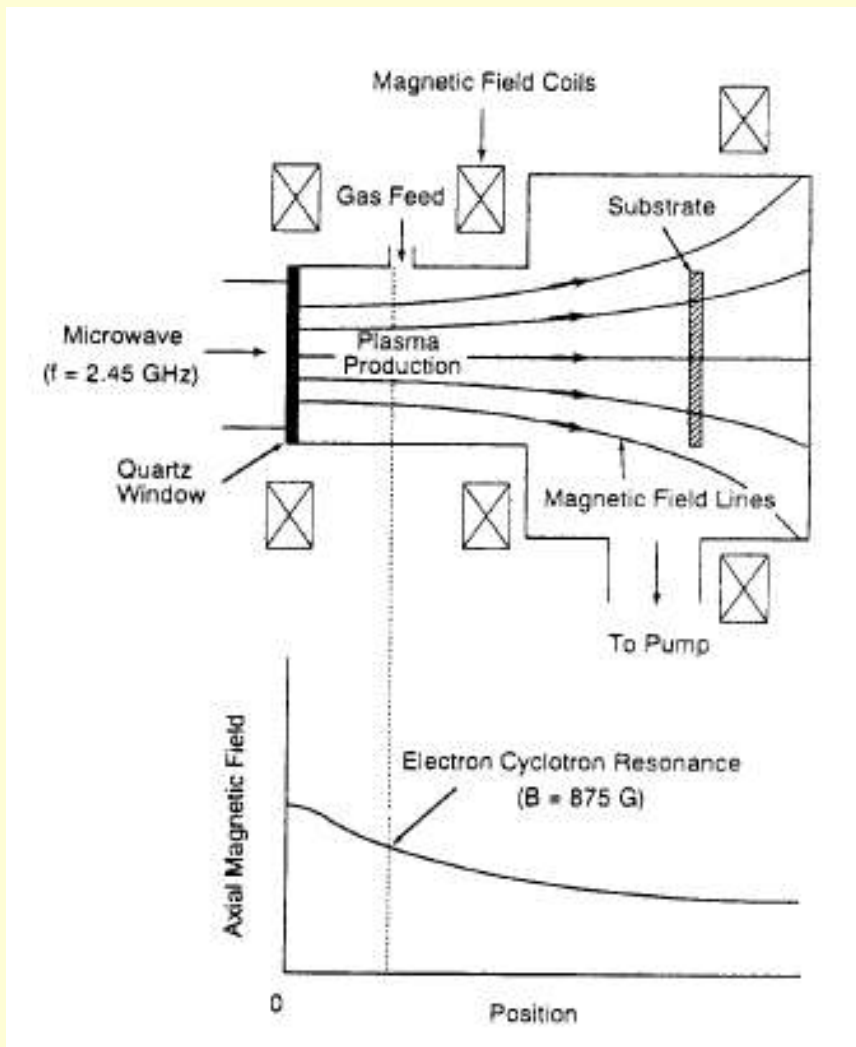
低電離度：シース近傍統計加熱、
衝突減衰、二次電子加速



様々な誘導性結合型プラズマ (ICP)

高周波電場誘導：シース（衝突の有無、
電子熱運動）、密度ジャンプ

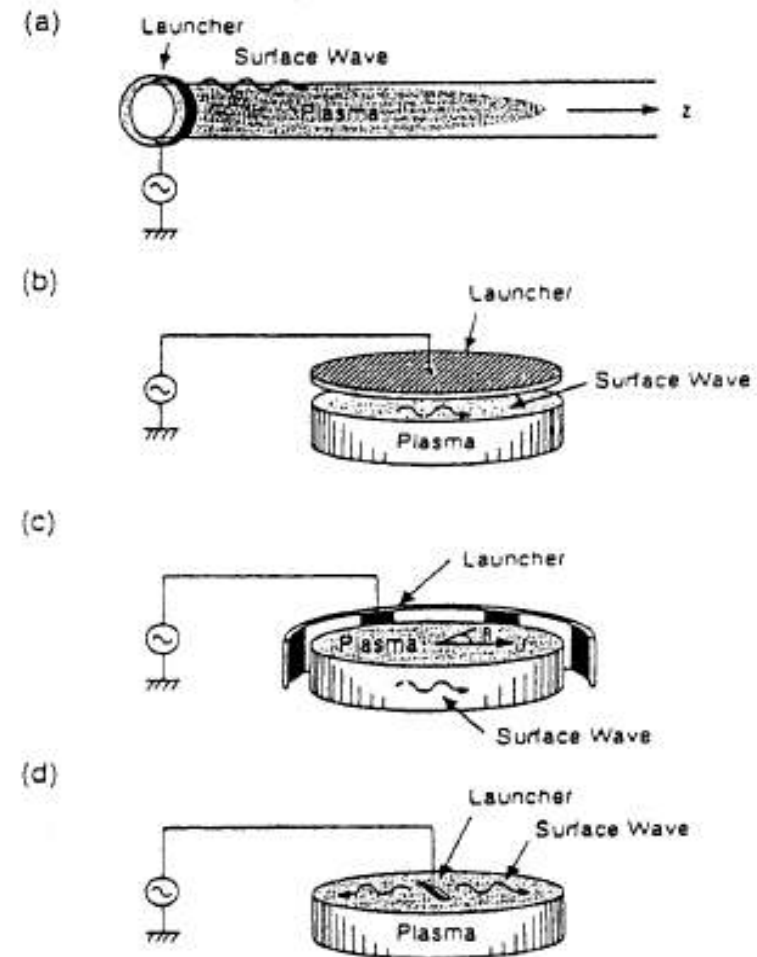




典型的な電子サイクロトロン共鳴 プラズマ (ECR) : 発散磁場型

左右偏波、磁気ビー
チ

S. Shinohara: Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 4695.



様々な表面波プラズマ源 (SW)

表面電荷波

小特集「表面波プラズマの生成とその応用」
プラズマ・核融合学会誌 72 (1996) 621.

[ホイッスラー波の性質]

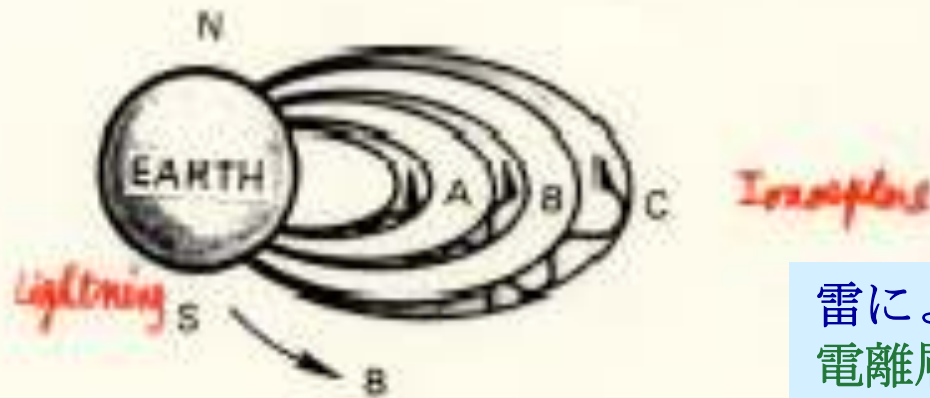
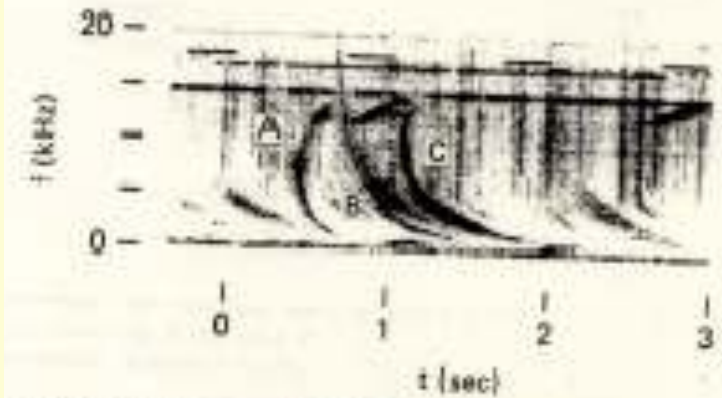


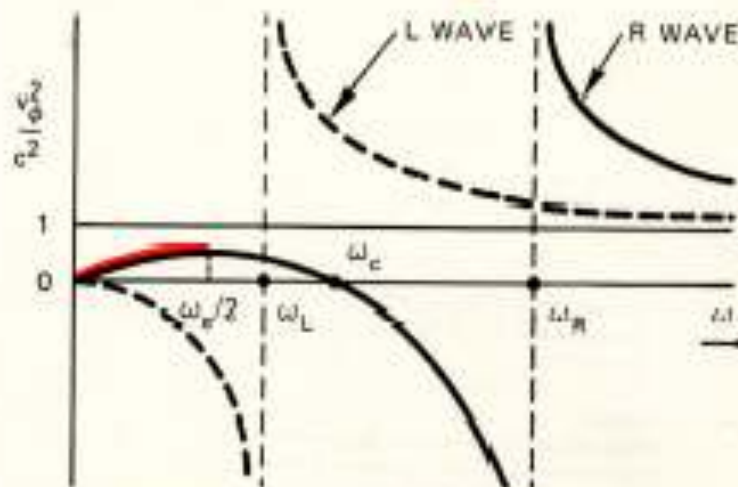
Diagram showing how whistlers are created. The channels A, B, and C refer to the signals so marked in Fig. 4-40. FIGURE 4-41

雷による生成：
電離層での伝搬



Actual spectrograms of whistler signals, showing the curvature caused by the low-frequency branch of the R-wave dispersion relation (Fig. 4-39). At each time t , the receiver rapidly scans the frequency range between 0 and 20 kHz, tracing a vertical line. The recorder makes a spot whose darkness is proportional to the intensity of the signal at each frequency. The downward motion of the dark spot with time then indicates a descending glide tone. [Courtesy of D. L. Carpenter, *J. Geophys. Res.* 71, 695 (1966).]

F.F. Chen: *Introduction to Plasma Physics* (Clarendon Press, NY, 1984)



The v_{ph}^2/c^2 vs. ω diagrams for the L and R waves. The regions of nonpropagation ($v_{ph}^2/c^2 < 0$) have not been shaded, since they are different for the two waves.

FIGURE 4-39

高音から低音へ

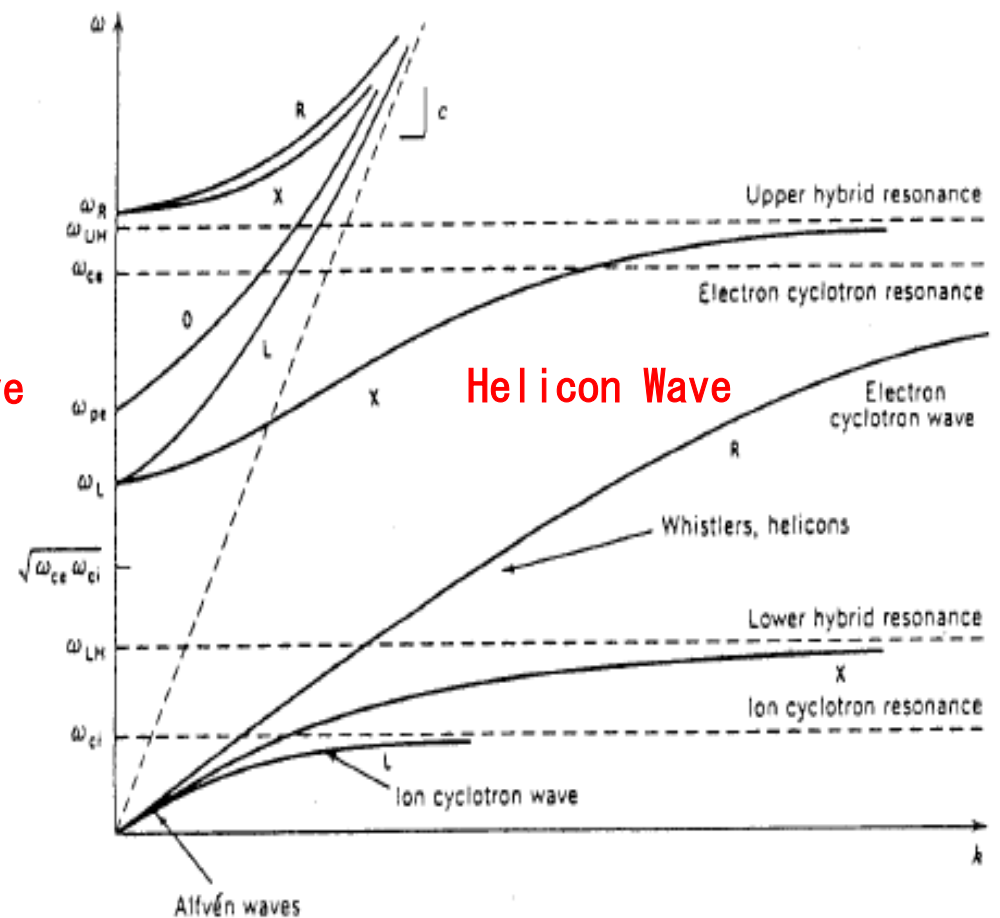
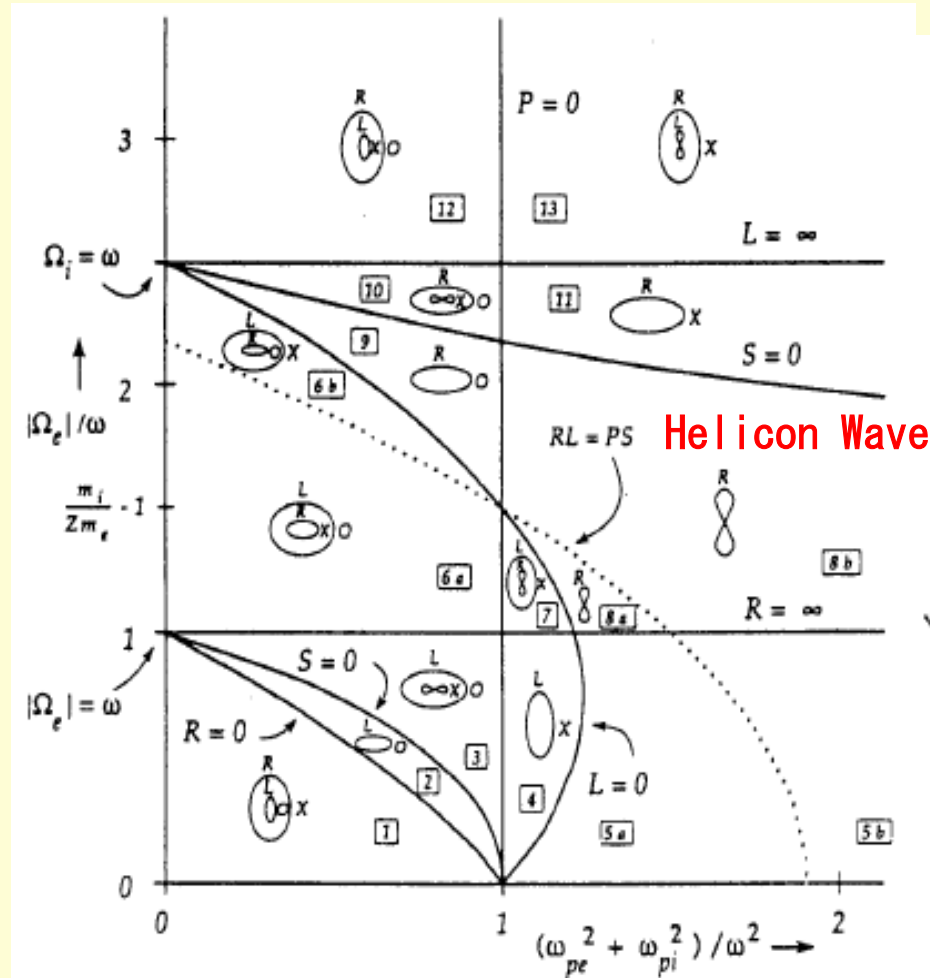
分散関係

$$(R) \quad n^2 = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2 \omega_L^2}{1 \mp \omega \omega_L \omega_R}$$

$$\omega_p \omega_R \quad \text{if } \omega > \omega_L \left(\omega < \frac{\omega_R}{2} \right)$$

ヘリコン波の性質

[Propagating Region of Helicon Wave]



by Stix

by Lieberman & Lichtenberg

⇒ Bounded Whistler Wave

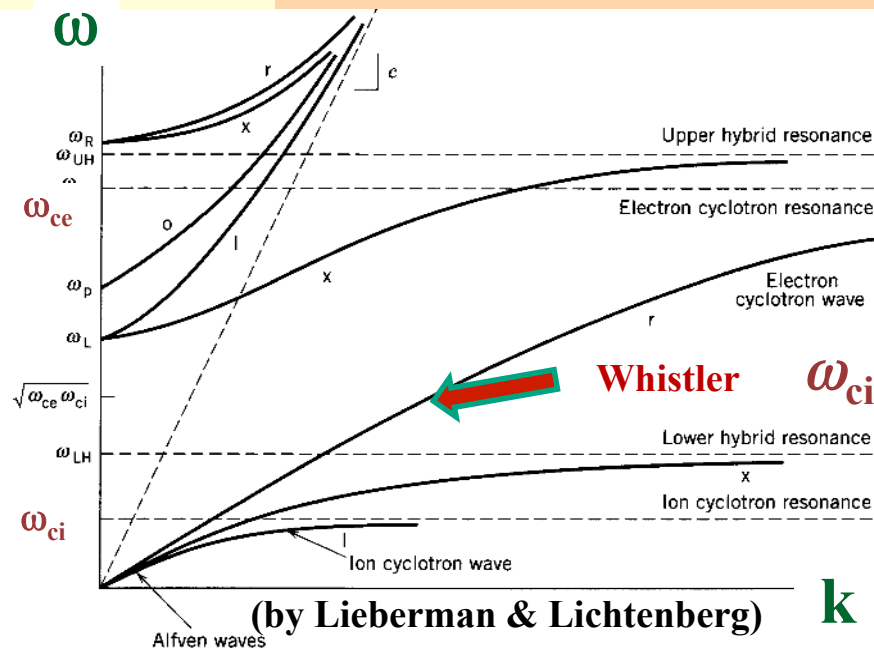
History & References

1962-: Lehne & Thoneman, Proc. Phys. Scr. 85 (1965) 301.

1970-: Boswell, Phys. Lett. 7 (1970) 457.

Plasma Phys. Control. Fusion 26 (1984) 1147.

Chen, Plasma Phys. Control. Fusion 33 (1991) 339.....



Now, More Than 50 Papers Per Year !

Basic Study $\Rightarrow$ Application



Review Papers e.g.,

Chen, Phys. Plasmas 3 (1996) 1783.

Shinohara, Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 4395, J. Plasma Fus. Res. 78 (2002) 5.

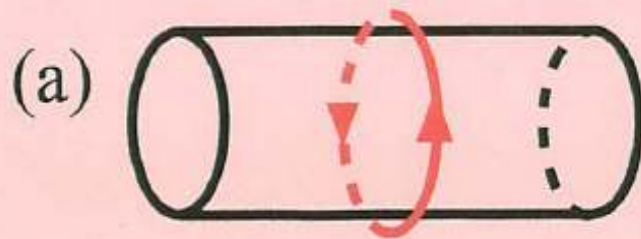
Memoir in Physical Society of Japan 64 (2009) 519.

Shoji & Sakawa, J. Plasma Fus. Res. 74 (1998) 29.

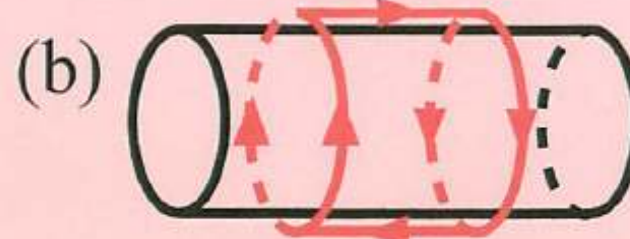
Boswell & Chen, IEEE Trans. Plasma Sci. 25 (1997) 1229.

Chen & Boswell, IEEE Trans. Plasma Sci. 25 (1997) 1245.

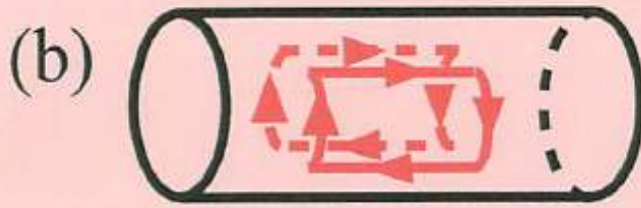
Various Types of Helicon Antenna



Loop Antenna



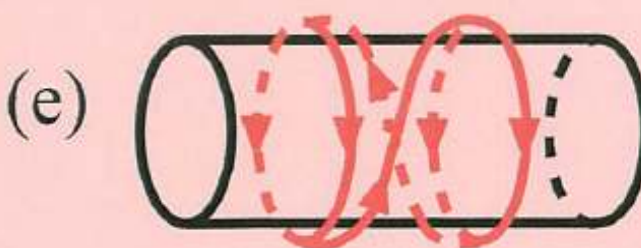
w/o Helical Pitch



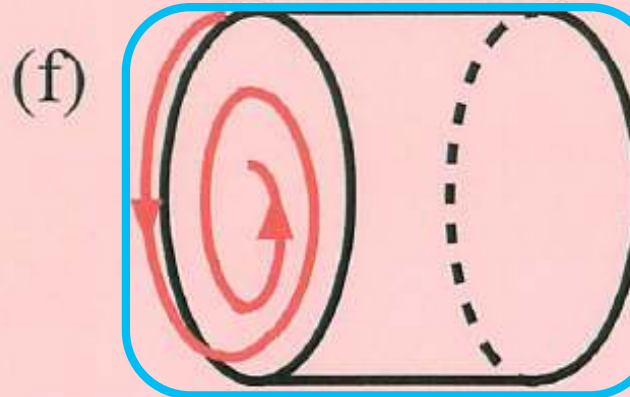
Saddle Coils



Type III Antenna



**Helical Antenna
w/ Half-Wavelength**



Flat Spiral Antenna

cf. Internal Antenna

**Mostly (a) – (e):
around the Small
Insulation Tube
(Side Wall)**

**For Large
Plasma Diameter
(End of Chamber)**

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

Dispersion Relation

F. F. Chen, Plasma Phys.
Control. Fusion 33 (1991) 339.

$$\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$$

マクスウェルの方程式 + 一般化されたオームの式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}_0 / e n_e$$



$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$

$$\exp[i(k_{\parallel} z + m\theta - \omega t)]$$
$$\alpha = (\omega / k_{\parallel}) (\omega_{pe}^2 / \omega_{ce} c^2)$$

$$B = B_0 \hat{z}, \quad k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2 = \alpha^2$$

$$i\omega \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times (\mathbf{j} \times \mathbf{B}_0) / en_0$$
$$= (\mathbf{B}_0 \cdot \nabla) \mathbf{j} / en_0 = (ik B_0 / en_0) \mathbf{j}$$

プラズマの抵抗（衝突項）は無視
電流は電子が担う（ $\mathbf{E} \times \mathbf{B}_0$ ドリフト）

$\mathbf{j} \parallel \mathbf{B}$: Force Free（無力磁場配位）

Bessel Function の解 $\Rightarrow$ 磁気再結合：逆転磁場ピンチ、太陽表面等

★ 衝突項導入：ヘリコン波（長波）と TG波（短波）

ダブルベルトラミ

渦と流れが平行

S. M. Mahajan & Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 4863.

高効率ヘリコンプラズマ生成機構

衝突減衰とランダウ減衰が候補
統一的に説明できず長年の懸案

↓
励起されたヘリコン波から静電波である
Trivelpiece-Gould 波へモード変換

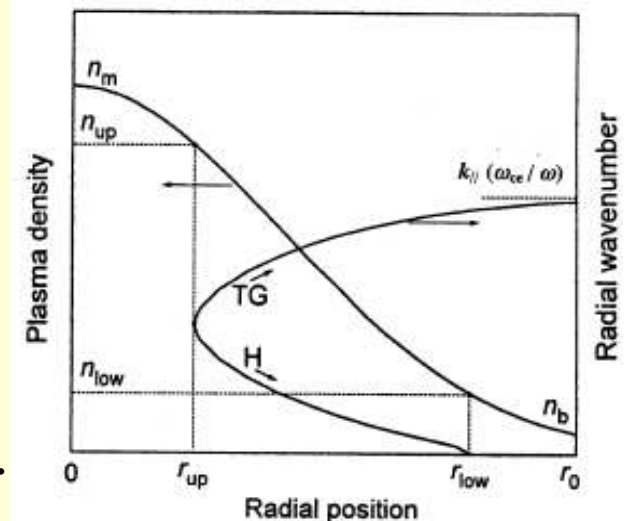
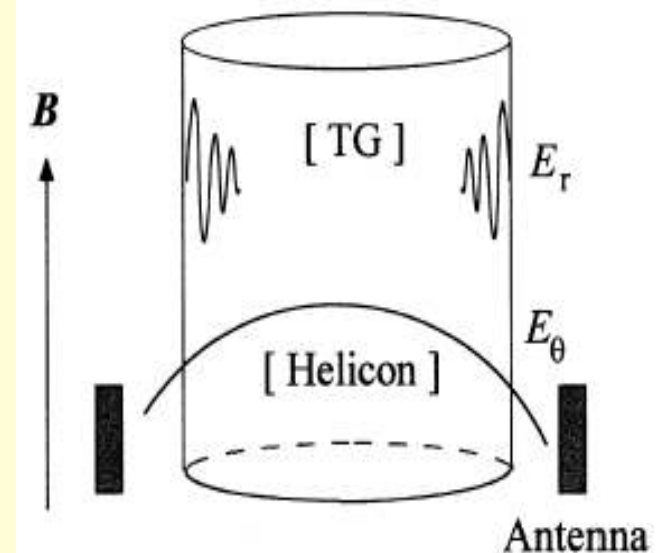
理論： Dr. Shamrai

静電波の高減衰によるプラズマ生成モデル
プラズマ中の波動現象：基礎物理学的に興味深い

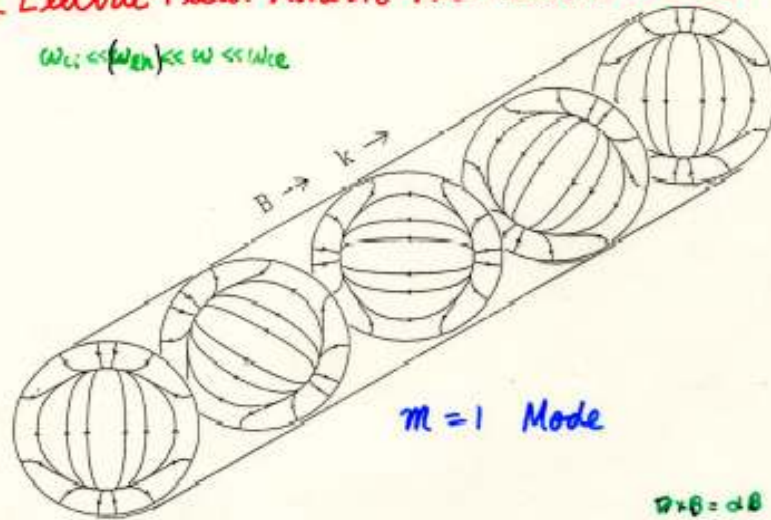
実験と理論の一致：
波動構造
アンテナ抵抗のパラメータ依存性

S. Shinohara & K. P. Shamrai, Plasma Phys. Control. Fusion **42** (2000) 865.
K. P. Shamrai & S. Shinohara, Phys. Plasmas **8** (2001) 4659.

モード変換の概念図



$$\omega_{ci} \ll \omega_{eh} \ll \omega \ll \omega_{ce}$$

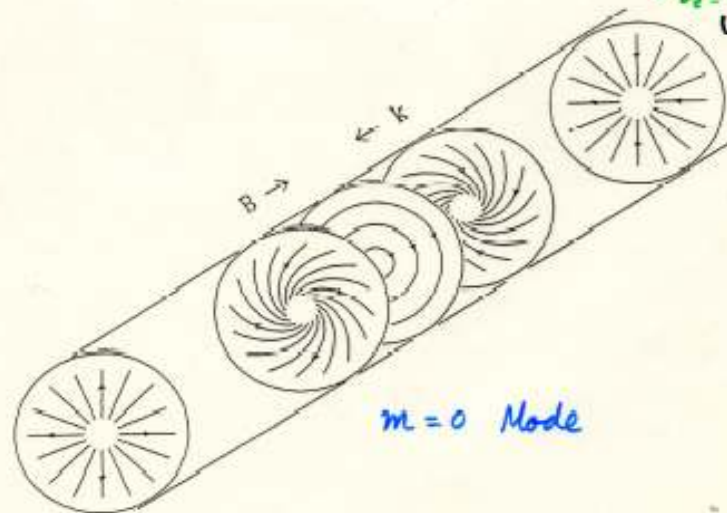


$m=1$ Mode

Instantaneous electric field pattern for an $m=+1$ helicon wave in space

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

$$\begin{cases} B_r = C_1 J_{m-1} + C_2 J_{m+1} \\ B_\theta = i(C_1 J_{m-1} - C_2 J_{m+1}) \\ B_z = C_3 J_m \end{cases} \quad (\text{uniform density})$$

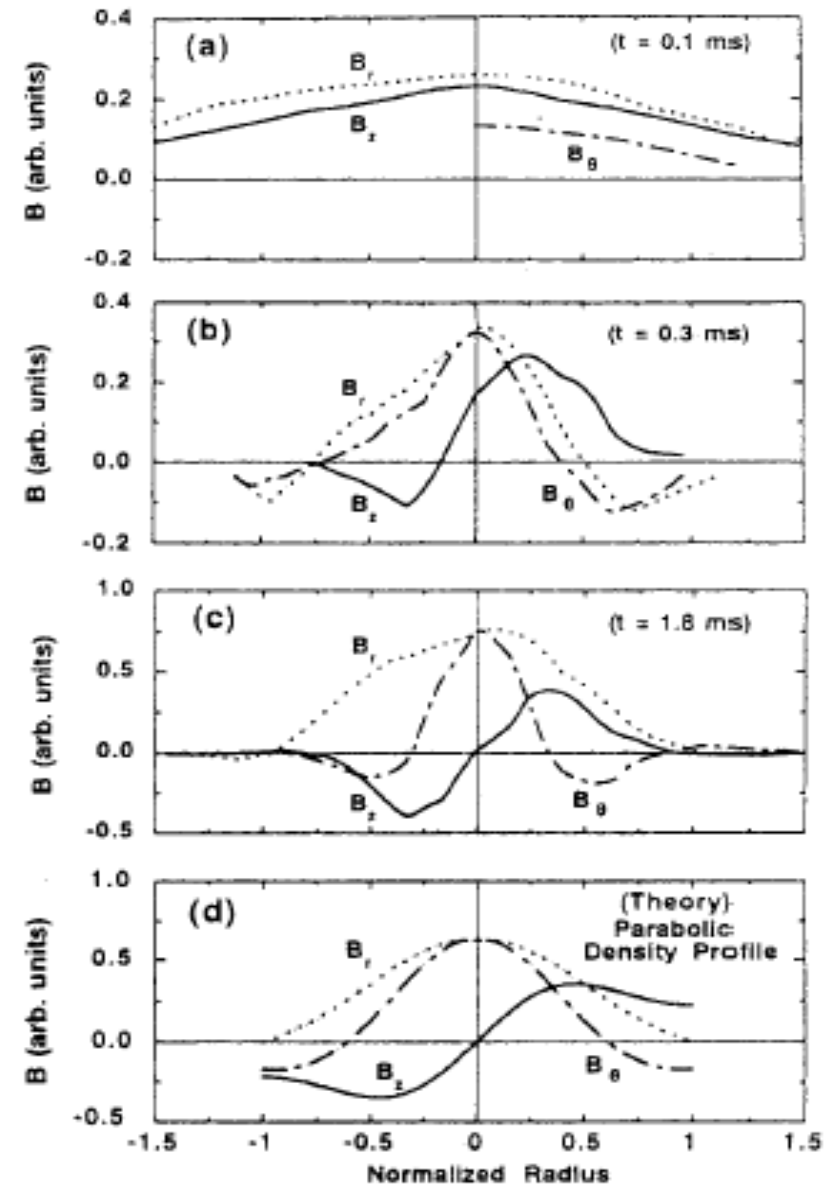


$m=0$ Mode

Instantaneous electric field pattern for an $m=0$ helicon wave in space

F.F. Chen, Plasma Phys. Control Fusion
33 (1991) 339.

cf. Boswell



S. Shinohara, Y. Miyauchi and Y. Kawai:
Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) L731.

理論と実験：
ベッセル関数

境界条件と励起波動

境界が絶縁体 : $j_r = 0$ ($r = a$) $\Rightarrow B_r = 0$

境界が導体 : $E_\theta = 0 \Rightarrow B_r = 0$

$$m\alpha J_m(k_\perp a) + k_\parallel a J'_m(k_\perp a) = B_r = 0$$

$$J_1(k_\perp a) = 0 \quad (m = 0)$$

$$J_1(k_\perp a) = (k_\parallel a k_\perp / 2\alpha) (J_2 - J_1) \quad (m = 1)$$

$$B_r = (-k/\omega)E_\theta = (2A/T)[(m\alpha/r)J_m(k_\perp r) + kJ'_m(k_\perp r)] \cos(m\theta + kz - \omega t)$$

$$B_\theta = (k/\omega)E_r = -(2A/T)[\alpha J'_m(k_\perp r) + (mk/r)J_m(k_\perp r)] \sin(m\theta + kz - \omega t)$$

$$B_z = 2ATJ_m(k_\perp r) \sin(m\theta + kz - \omega t), E_z = 0$$



$m = 0$

$$B_r = -AkJ_1(k_\perp r) \cos(kz - \omega t)$$

$$B_\theta = -A\alpha J_1(k_\perp r) \sin(kz - \omega t)$$

$$B_z = Ak_\perp J_0(k_\perp r) \sin(kz - \omega t)$$

$$E_r = A\omega(\alpha/k)J_1(k_\perp r) \sin(kz - \omega t)$$

$$E_\theta = A\omega J_1(k_\perp r) \cos(kz - \omega t)$$

$$E_z = 0$$

【高効率プラズマ生成機構解明】

初期：衝突減衰とランダウ減衰が候補 → 統一的に説明できず長年の懸案



励起されたヘリコン波から静電波である Trivelpiece-Gould 波へモード変換

静電波の高減衰によるプラズマ生成モデル

by Dr.
Shamrai

プラズマ中の波動現象として基礎物理学的に興味深い内容

波数の虚数部

衝突減衰（ヘリコン） $k_{iH} = \nu_e k_{\perp} / \omega_{ce} \sim \nu_e \omega^2 / k_{\parallel}^3 \delta^4 \omega_{ce}^3$ (ヘリコン波伝搬領域)

ランダウ減衰（ヘリコン） $k_{iL} = [2 \pi^{0.5} \omega k_{\perp} \zeta^3 \exp(-\zeta^2)] / \omega_{ce}$

衝突減衰 (TG) $k_{iTG} \sim k_{\parallel} \nu_e \omega_{ce} / (\omega^2 + \nu_e^2)$
(但し スキン長 $\delta = c / \omega_{pe}$ 、 $\zeta = \omega / k_{\parallel} V_{Te}$)

減衰

ヘリコン波 $W_B \gg T \gg W_E$: 全エネルギー $W (= W_B + T + W_E)$ の減衰を、 T だけでの説明は無理

TG 波は $T \gg W_B \gg W_E$ であり短波長のこの波の衝突減衰は大きい

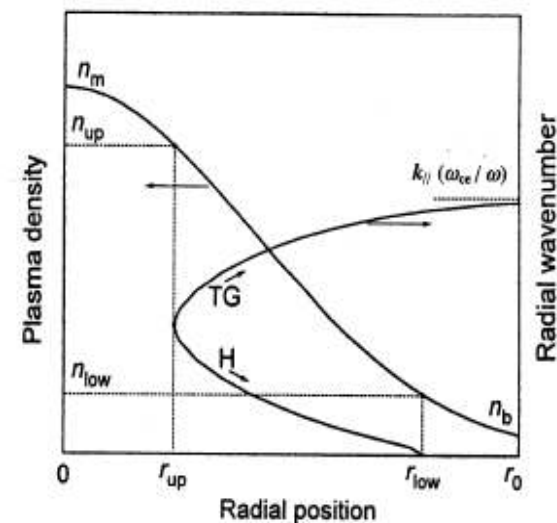
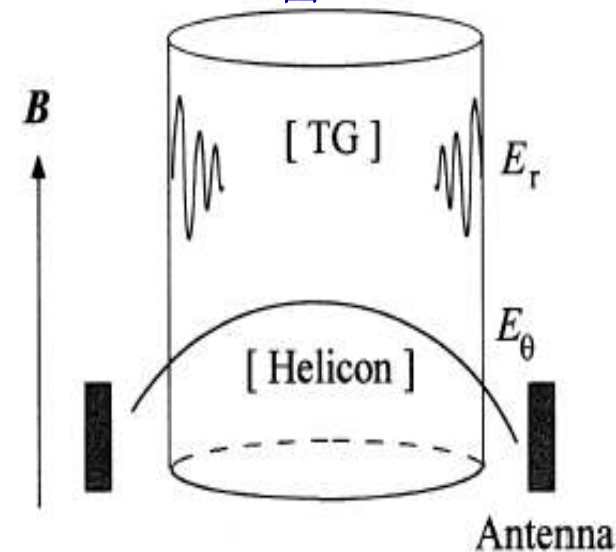
(波動磁場と電場のエネルギー W_B 、 W_E 、粒子のエネルギー T)

モード変換

共鳴 (分散関係) と非共鳴過程 ($j_r \sim E_r + i(\omega_{ce} / \omega) E_{\theta} \sim 0$)

モード変換の概念

図



Double Beltrami

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$

$j \parallel B$: Force Free (無力磁場配位)

Bessel Function : 磁気再結合 : 逆転磁場ピンチ、太陽表面など

★ 衝突項導入 : ヘリコン (TG波) : 長波 (短波)

ダブルベルトラミ

S. M. Mahajan & Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 4863.

Z. Yoshida, S. M. Mahajan & S. Osaki, Phys. Plasmas **11** (2004) 3660.

Two Fluids: Hall MHD (Macro & Micro scales)

(Ion Skin Depth, Cyclotron Motion)

$$E + V_e \times B + \frac{1}{en} \nabla p_e = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} V + (V \cdot \nabla) V = \frac{e}{M} (E + V \times B) - \frac{1}{Mn} \nabla p_i$$

$$\partial_t \Omega_j - \nabla \times (U_j \times \Omega_j) = 0 \quad (j=1,2)$$

$$\begin{cases} \Omega_1 = B, \\ U_1 = V - \varepsilon \nabla \times B, \end{cases} \quad \begin{cases} \Omega_2 = B + \varepsilon \nabla \times V, \\ U_2 = V. \end{cases}$$

$$U_j = \mu_j \Omega_j \quad (j=1,2)$$

$$\nabla \times G_{\pm} = \lambda_{\pm} G_{\pm},$$

$$\lambda_{\pm} = \frac{1}{2\varepsilon} [(b - a^{-1}) \pm \sqrt{(b - a^{-1})^2 - 4(1 - b/a)}]$$

$$B = C_+ G_+ + C_- G_- ,$$

$$V = (a^{-1} + \varepsilon \lambda_+) C_+ G_+ + (a^{-1} + \varepsilon \lambda_-) C_- G_-$$

Comparison of Helicon Source Size

● Large Diameter/Large Volume

JAXA(ISAS): (75 cm^φ, 486 cm^l) (New) (Spiral Antenna)

Kyushu Univ.: (45 cm^φ, 170 cm^l) (Spiral Antenna)

NM Tech.: (43 cm^φ, 400 cm^l) ALPHA (Antenna Array) Small Plasma Radius

MPI: (40 cm^φ, 400 cm^l) VINETA Small Plasma Radius

UCSD: (20 cm^φ, 250 cm^l) CSDX

Australian Nat'l Univ.: (20 cm^φ, 50 cm^l) + (90 cm^φ, 250 cm^l) WOMBAT

Auburn Univ.: (15 cm^φ, 250 cm^l) ALEPSI

Ruhr Univ.: (15 cm^φ, 200 cm^l) + (60 cm^φ, 100 cm^l) (Multipole, Weak Field)

WVU: (15 cm^φ, 157 cm^l) HELIX + (200 cm^φ, 450 cm^l) LEIA (Weak Field)

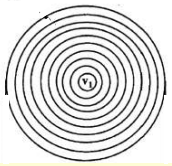
● Small Diameter/Small Volume

JAXA (ISAS): (2.5 cm^φ, 4.7 cm^l) (New) (10 - 100 MHz)

Nagoya Univ.: (4.5 cm^φ, 10 cm^l)

WVU (6 cm^φ, 15 cm^l): CHEWIE (Low Density)

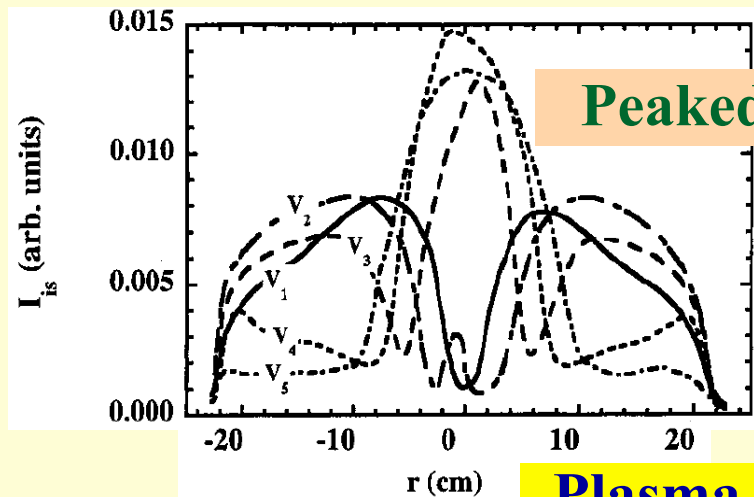
KAIST: (5 cm^φ, 30 cm^l) (98 MHz)



LMD Applications (No. 1)

Low Density
(Voltage Biasing)

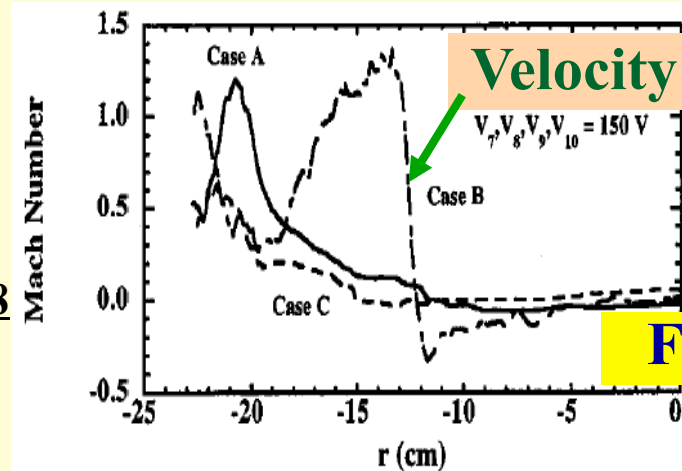
Profile Control



Phys. Plasmas 8
(2001)1154.

Plasma Processing

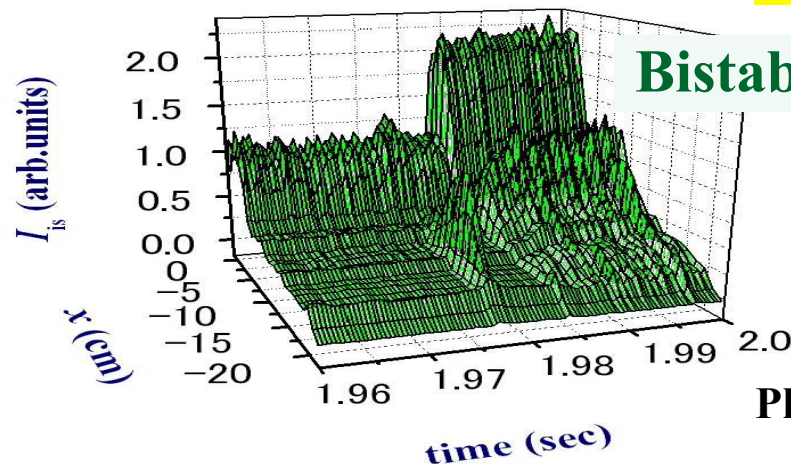
Plasma Flow Control



Fusion

Density Transition

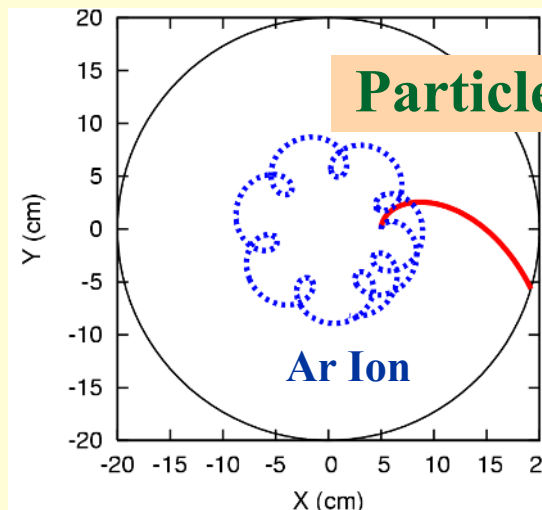
Fusion



Hysteresis
(Statistics)

Phys. Plasmas 9
(2002) 4540.

Particle Orbits



Jpn. J. Appl.
Phys. 46 (2007)
4276.

Mass Separation

$$v_{\theta} = \frac{\omega_{ci} r}{2} (-1 \pm \sqrt{1 - 4E_r / rB_z \omega_{ci}})$$

The Largest Helicon Device (No. 1)

Up to 2.1 m³

73.8 (75) cm I.D. (O.D.)

5.5 – 486 cm Axial Length: L

Ar: 0.75 mTorr – 7.5 mTorr

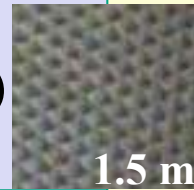
RF Frequency: 7 MHz

RF Power: 5 kW

Discharge Duration: 12~40 ms (1 pps)

**End Plate: Transparency ~35 %
(SUS: Punching Plate 0.5 cm^t)**

(or Plate w/o Holes or Mica Plate w/o Holes)



Refs.

Rev. Sci. Instrum. 75 (2004) 1941.

Phys. Plasmas 12 (2005) 044502 & 16 (2009) 057104.

Thin Solid Films 506-507 (2006) 564.

J. Plasma Fus. Res. 8 (2008) 00006.

Plasma Sources Sci. Technol. 19 (2010) 034018.

Memoir in Physical Society of Japan 64 (2009) 519.

cf. Archimedes Technol. G.



**Helicon Plasma
(Blue Mode)**

Large Volume

⇒ Fusion, Basic Study (Space Plasma Simulation), Application

Low Aspect Ratio A (So far $A = L/D > 0.5$)

⇒ Plasma Propulsion & Processing

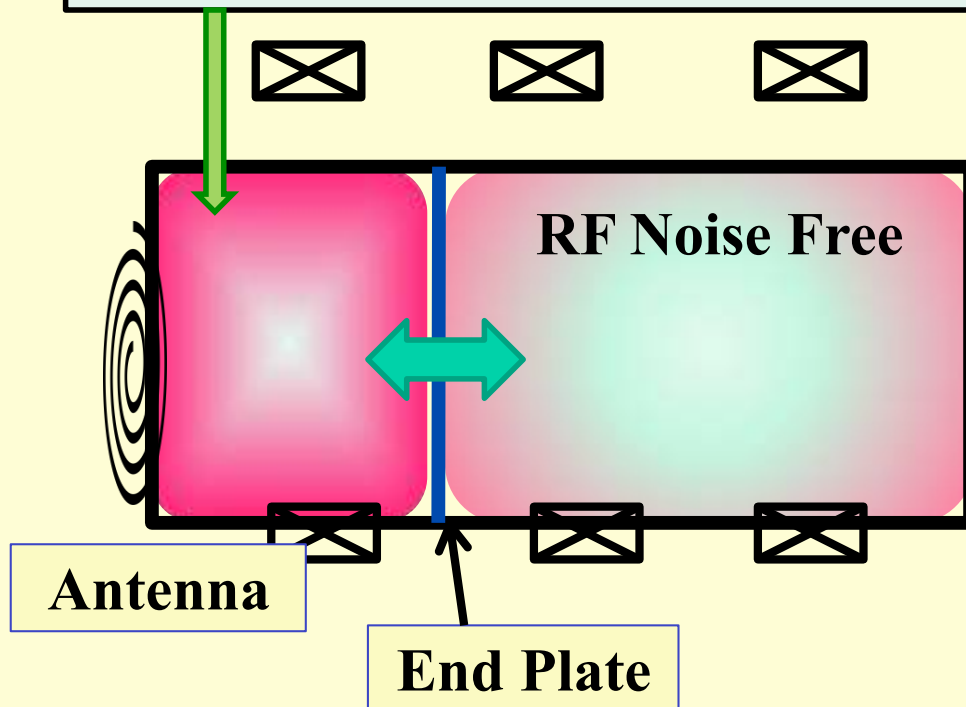
cf. Boundary Condition (Axial Direction)

$$cf. A = R / a$$

★ Development
Profile Control
Production Scaling
Wave Structures

LHPD: Large Helicon Plasma Device

- Excellent Production Efficiency
- A as low as 0.075 (5.5 cm Length)



Particle Production Efficiency I (Calc.)

Scaling: *12th Int. Cong. on Plasma Physics* (2004) p. 179. hal-00002013

Loss Across the Field

Small Radius a
Long Axial Length L
 Weak Magnetic Field B

**Ion: Weakly
Magnetized**

$$N_e / P_{\text{inp}} \propto a^2$$



$$n_e / P_{\text{inp}} \propto 1 / L$$

$$P_{\text{inp}} = (2 \pi a) (L) (D_{i \perp} \nabla n_s) E$$

$$\Rightarrow N_e / P_{\text{inp}} = a^2 / 4.8 D_i E f$$

Loss Along the Field

Large a
Short L
 Strong B

$$N_e / P_{\text{inp}} \propto L$$



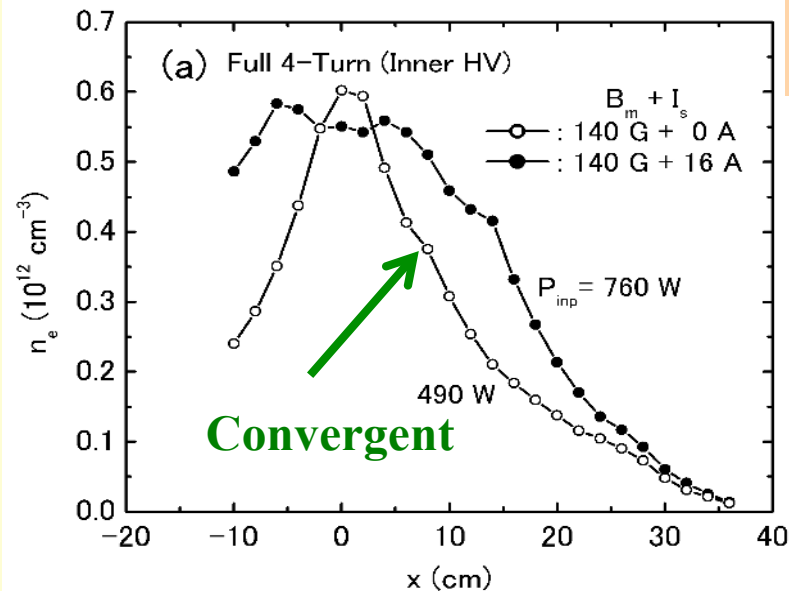
$$n_e / P_{\text{inp}} \propto 1 / a^2$$

$$P_{\text{inp}} = n_s C_s E (2 \pi a^2)$$

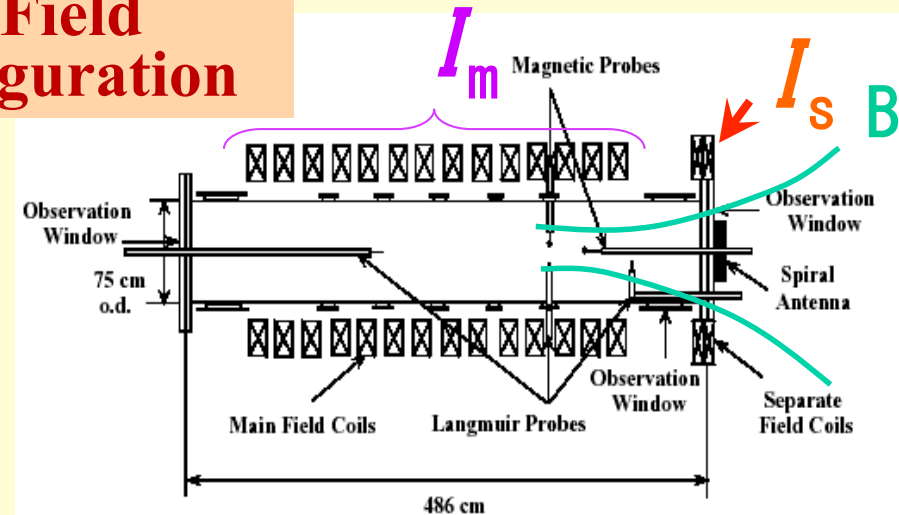
$$\Rightarrow N_e / P_{\text{inp}} = L / 2 C_s E f$$

N_e : Total Number of Electrons, n_s : Edge Electron Density
 f : Form Factor ($n_s = f n_e$), v_i : Ion Collision, C_s : Ion Sound Velocity
 E : Energy to Produce Ion and Electron Pair, $D_{i \perp}$: Ion Diffusion $\sim kT_i / m_i v_i$

Radial Density Profile Control ($L = 486$ cm)



1. Field Configuration



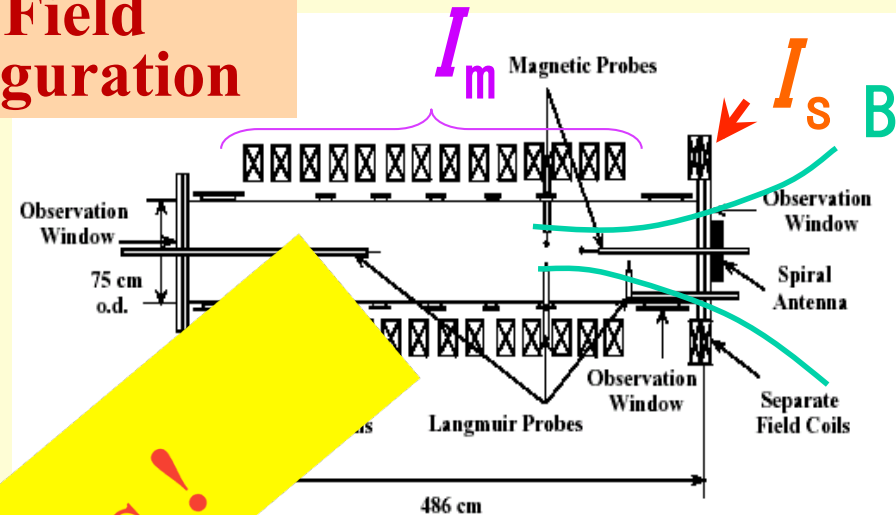
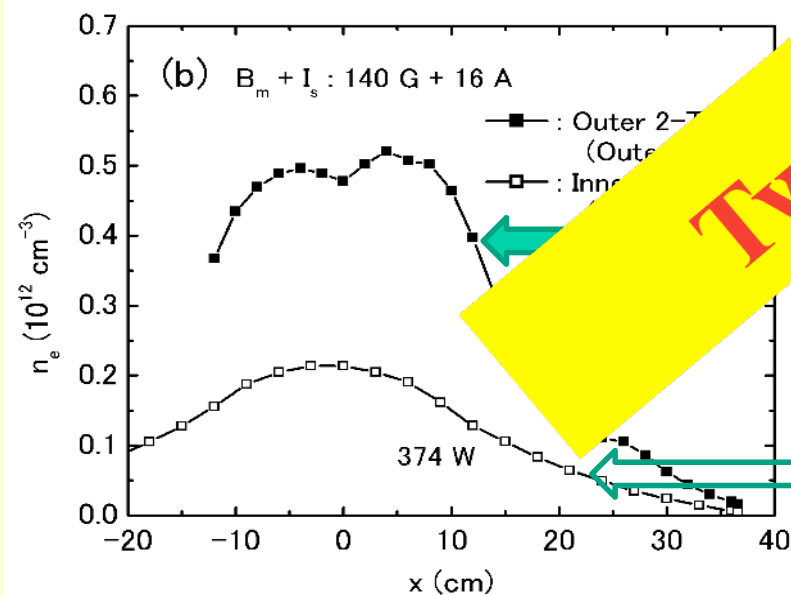
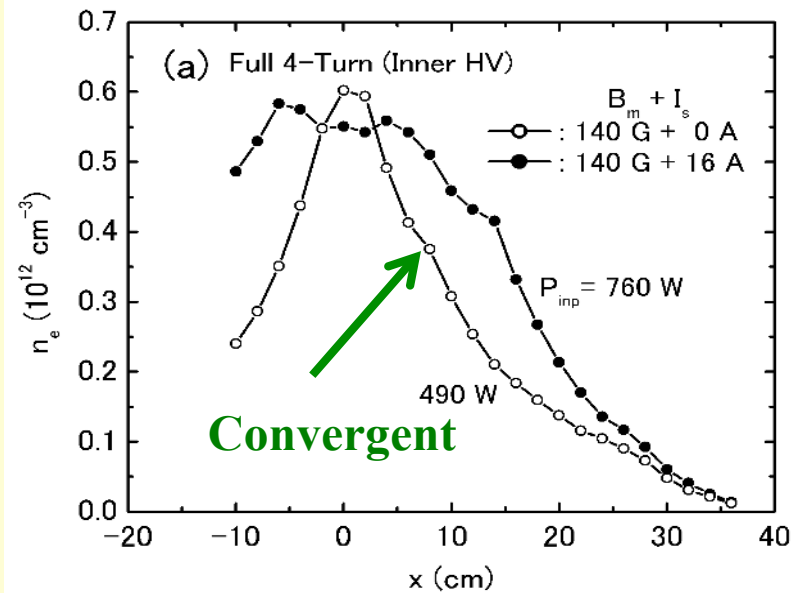
2. Antenna Configuration



Importance: Processing, Fundamental Study

Radial Density Profile Control ($L = 486$ cm)

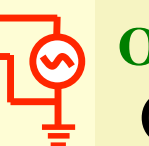
1. Field Configuration



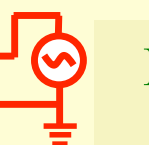
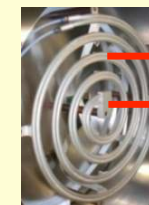
Two Patents!



**Full 4-Turn
(Inner HV)**



**Outer 2-Turn
(Outer HV)**



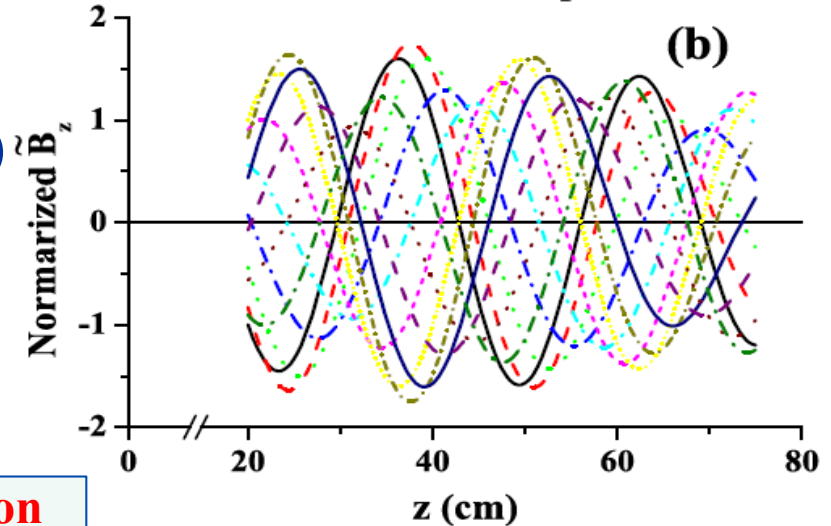
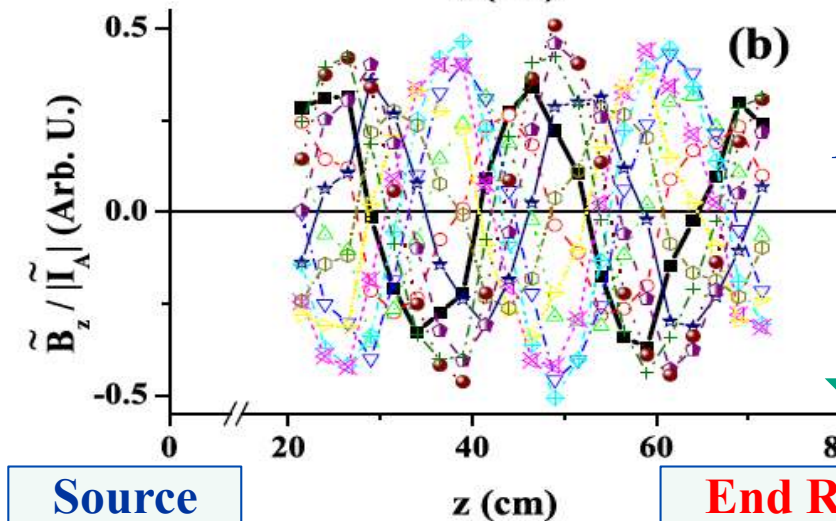
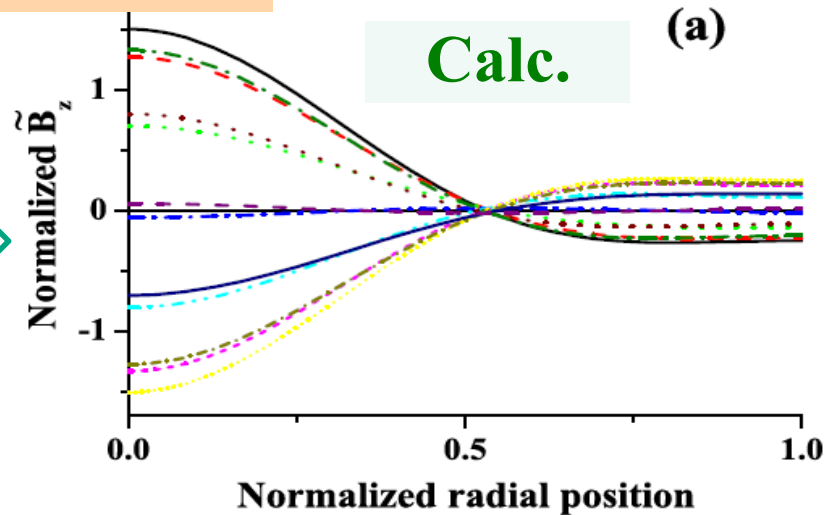
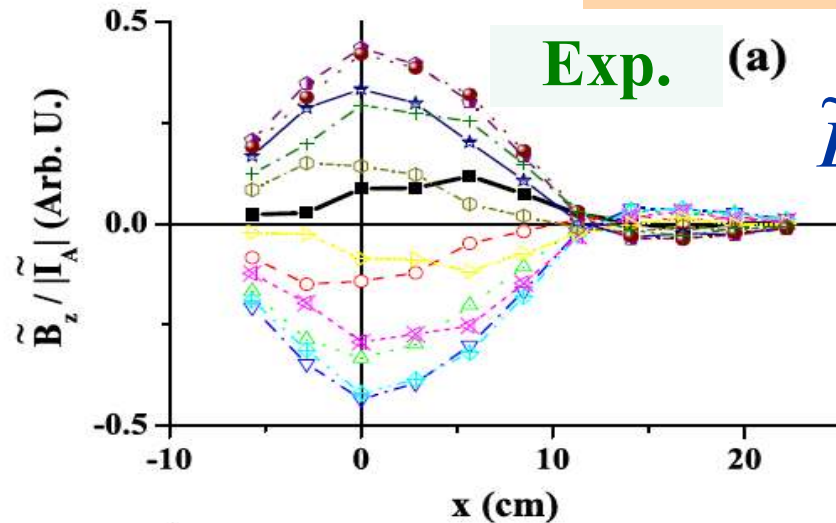
**Inner 2-Turn
(Outer HV)**

- HV Point
- Connection Position

End Effect

Wave Structures I: $\tilde{B}_z(r,z)$ ($L = 81$ cm)

Good Agreement



Source

End Reflection

1.9 kW, HV in, 2-Turn, $I_s = 60$ A

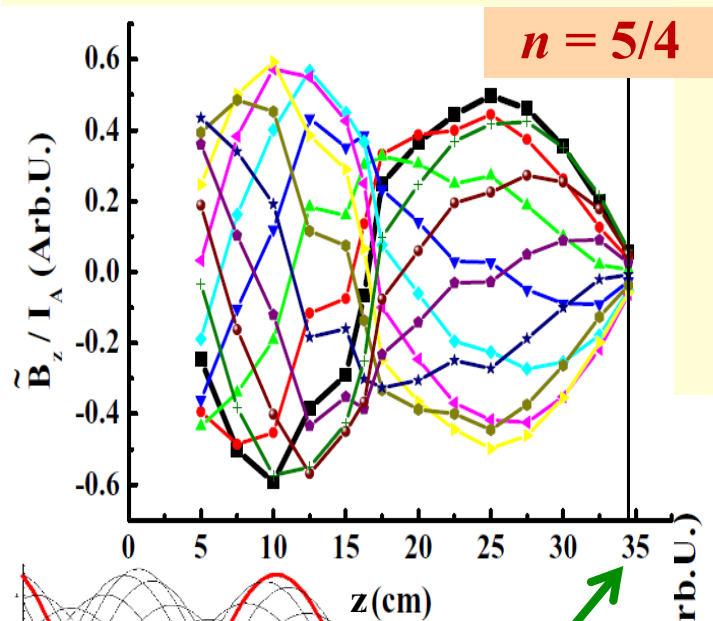
cf. High Radial Modes

Amp. Ratio (2nd.)/(1st.) = 0.51 , Phase diff. = -6.5 degs.

@ $z = 51.5$ cm, Reflection: 50 %, Coll. & Landau Dampings

Standing Wave Like Pattern

Wave Structures II: $\tilde{B}_z(z)$ (Short L)



End Plate
34.5 cm

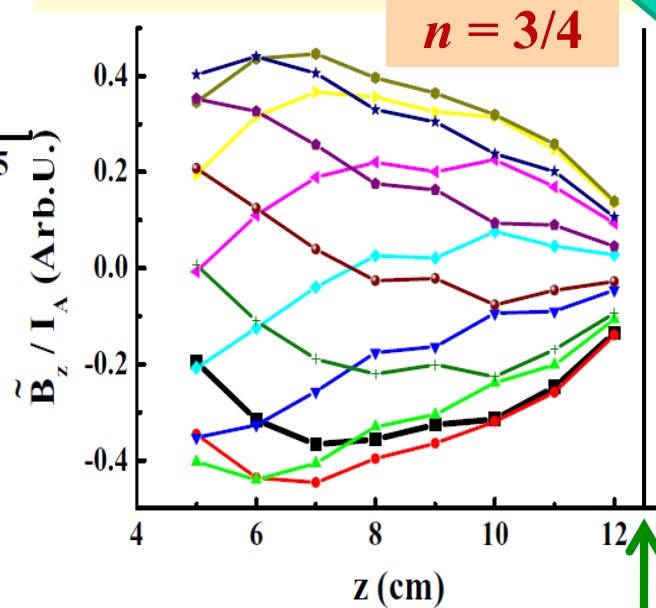
Calculation

Antenna Side: Loop
End Plate Side: Node

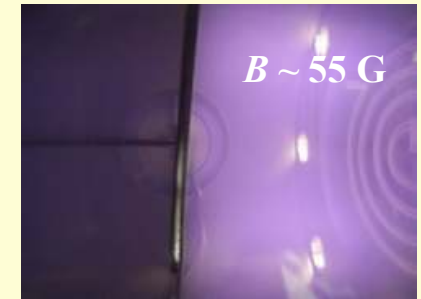
• $n = 1/4 + p/2$ (p : Integer)

• Agreement with the Dispersion Relation

Lower Axial
Mode Number n ,
Decreasing Length

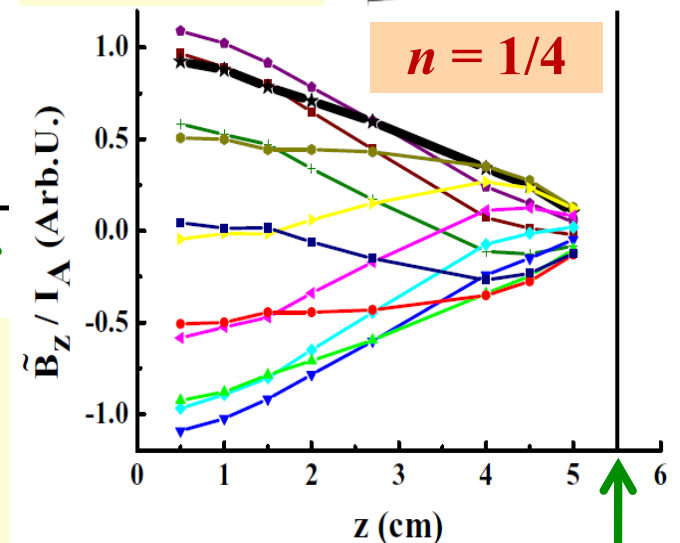
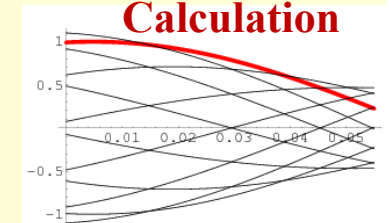


12.5 cm



End Plate

Calculation



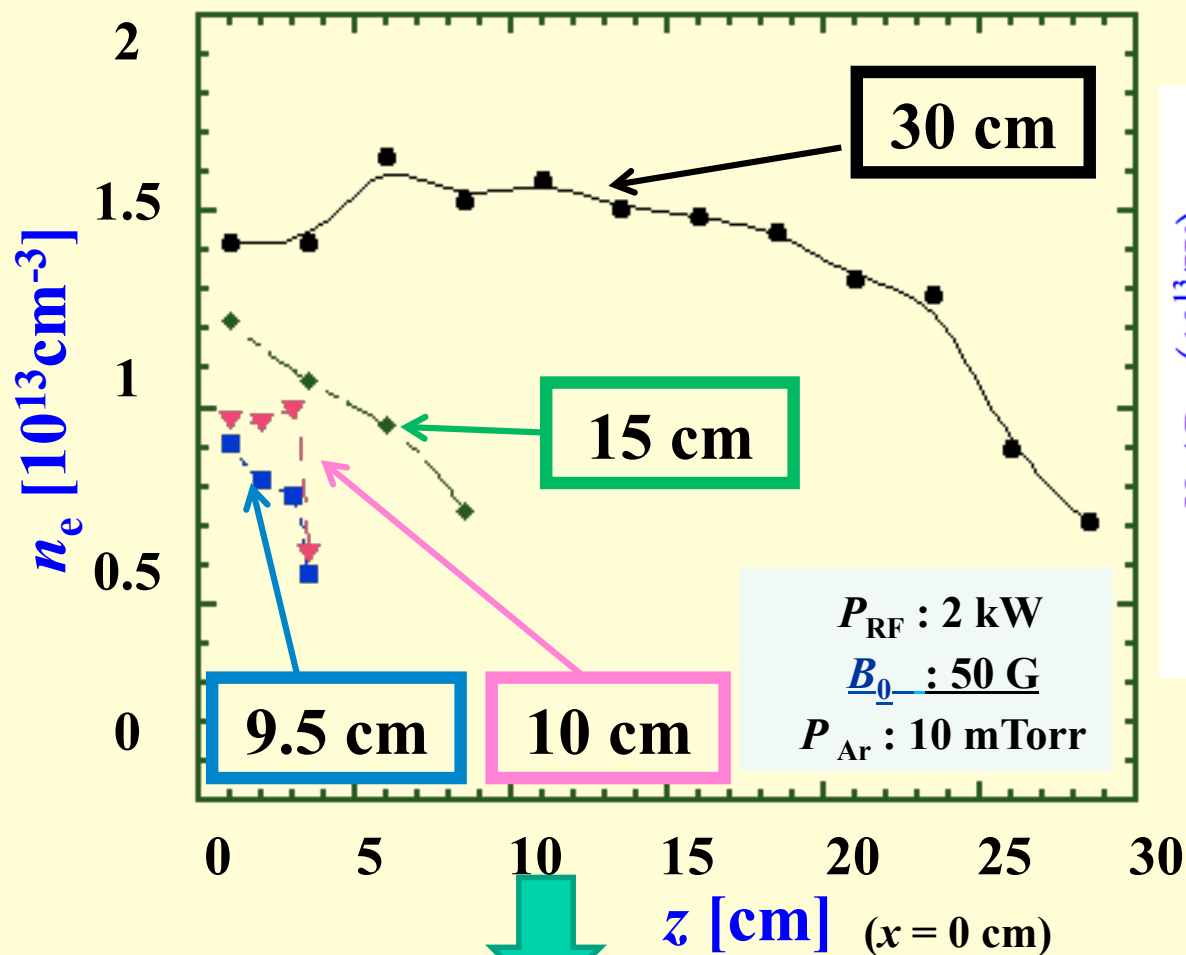
(1.5 mTorr)

5.5 cm

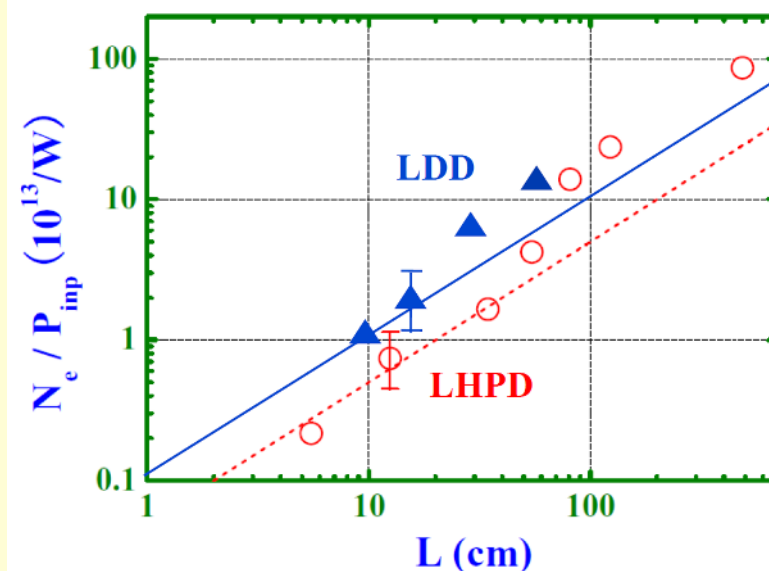
Axial Electron Density Profiles

Short Axial Length

Uniform Field



$$N_e / P_{\text{inp}} \propto L$$



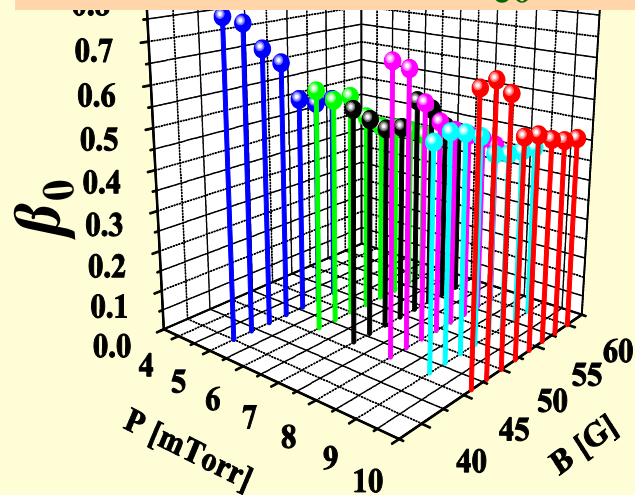
$$n_e / P_{\text{inp}} \propto 1/a^2$$

A as low as 0.25

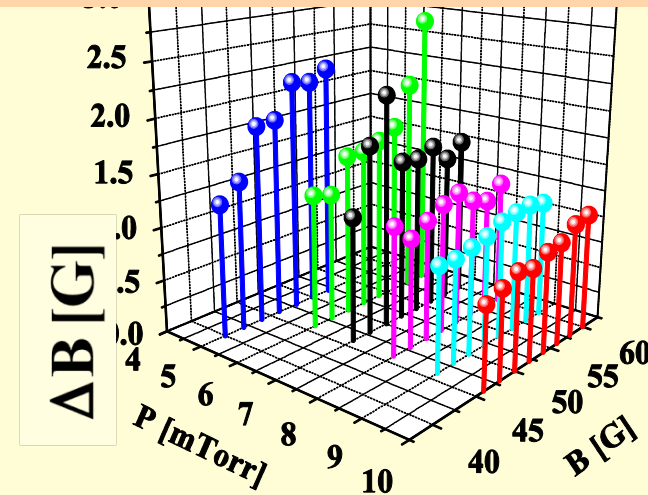
Even Though Short Length of $L \sim 10 \text{ cm}$, High Density $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Beta and Diamag. Effect in (P_{Ar}, B) Space

Central Beta: $p_{e0} / (B_0^2/2\mu_0)$



$P_{RF} : 2 \text{ kW}, L : 50 \text{ G}$ ($x = 0 \text{ cm}, z = 30 \text{ cm}$)



$$\beta_0 < 0.76$$

Small Diamag. Effect: $\Delta B/B < 4.5 \%$ (cf. 50 %)

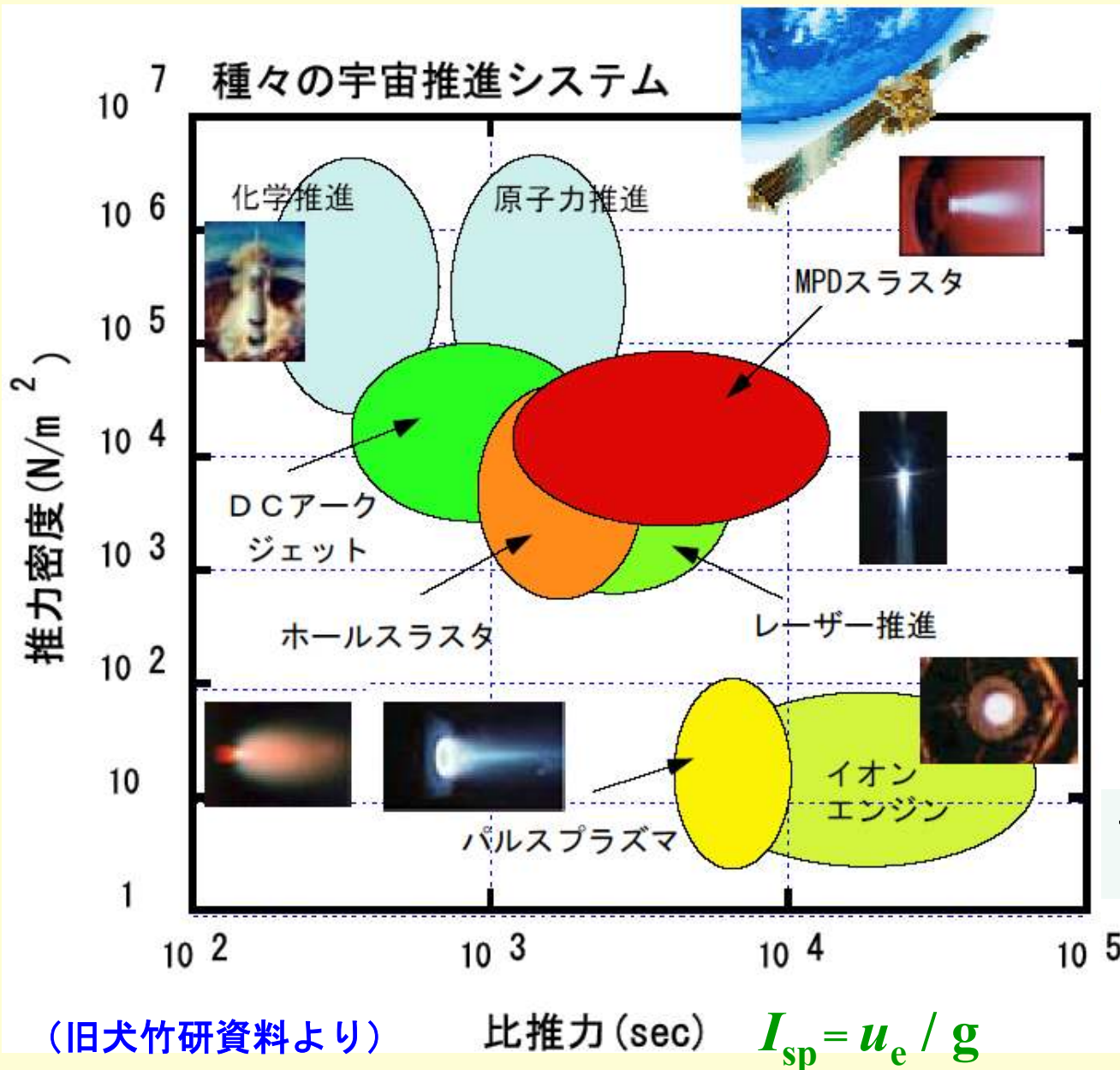
$$\star B^2/2\mu_0 + p_e > B_0^2/2\mu_0$$

Larmor Radius < Plasma Radius

$$\Omega_c \tau < 1 \text{ (Ion)}, > 1 \text{ (Electron)}$$

$$\star \tau = \mu_0 \sigma a^2 < \text{Discharge Duration}$$

比推力-推力空間での推進システム



ロケット公式

$$\Delta V = u_e \ln \frac{M_i}{M_f}$$

($\Delta V, u_e$: 増分速度、排出速度
 M_i, M_f : 初期、最終質量)

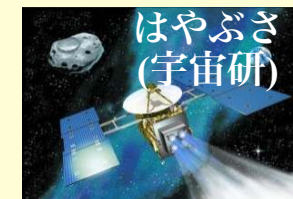
推力 F と比推力 I_{sp} の関係

$$F = \frac{2\eta_t P}{g I_{sp}}$$

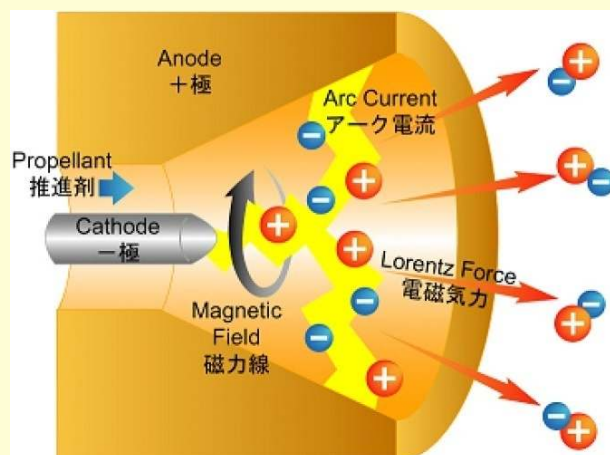
★ 電気推進法
 静電加速
 電熱・電磁加速

← 深宇宙探査

+ 小型衛星 (低高度/静止軌道):
 姿勢制御、デブリ除去等

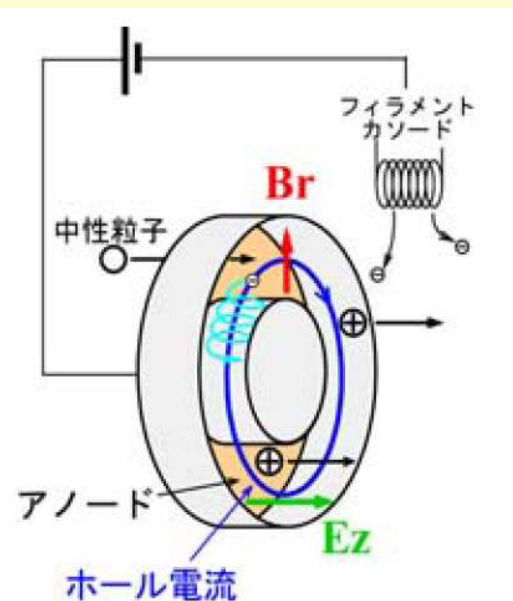


プラズマ推進の例



MPD

(宇宙研資料)

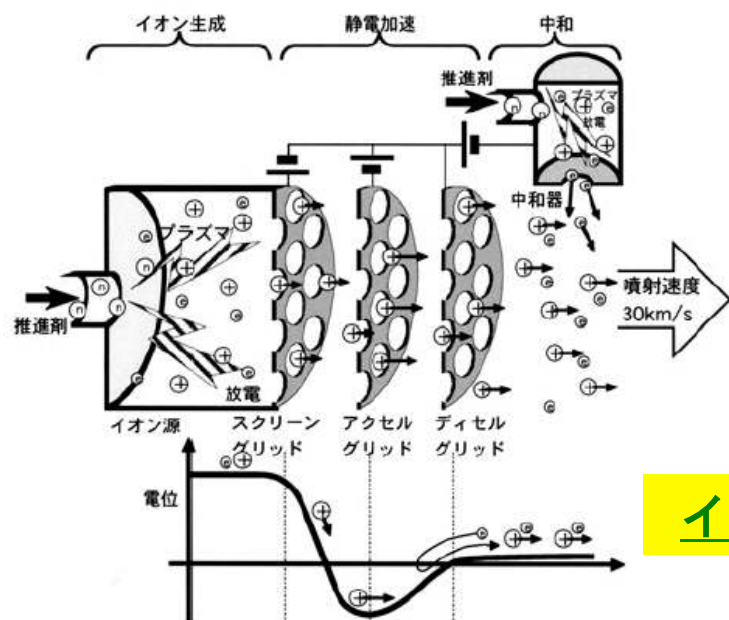


ホールスラスター

(犬竹研資料)

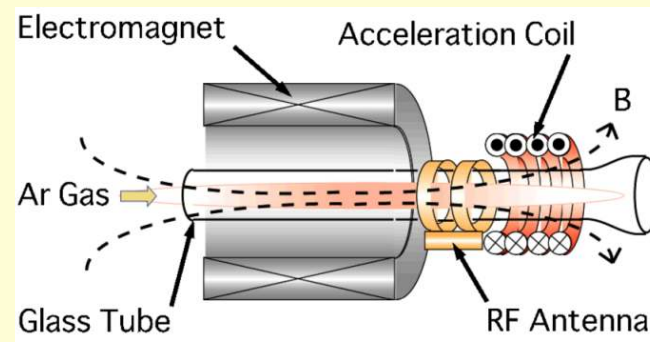


磁気セール (ワシントン大)



イオンエンジン

(国中資料)



電磁推進 (篠原)

先進プラズマ推進プロジェクト (II)



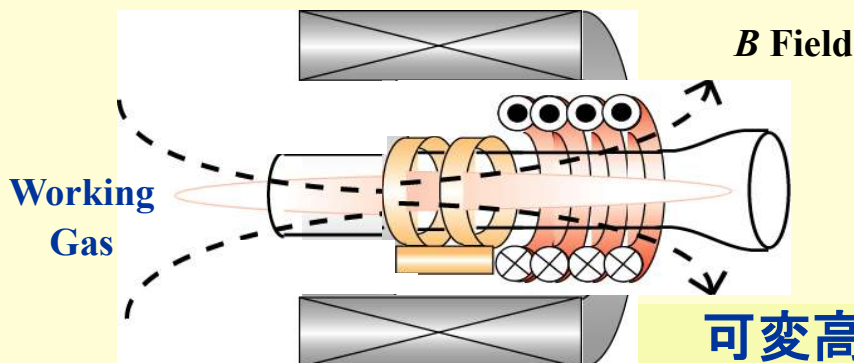
プロジェクト研究



先進アイデアと技術
(プラズマ物理学)

将来の 無電極 プラズマ推進

(プラズマと電極：直接接触なし)



可変高比推力

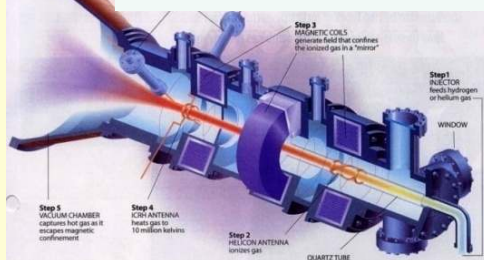
ヘリコン 高密度プラズマ生成

長寿命

高効率

+ 先進電磁推進

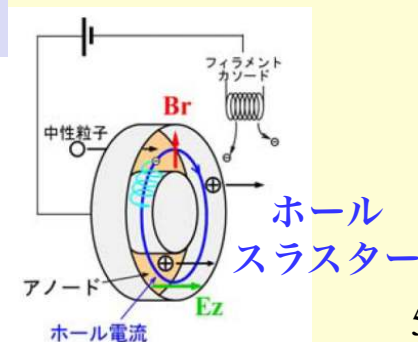
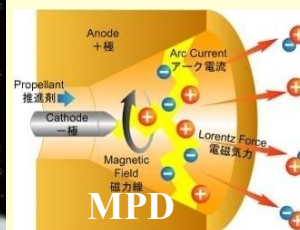
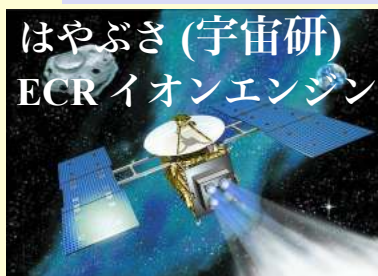
VASIMR (NASA)



Helicon
+ ICRF

強いプラズマ-壁相互作用

はやぶさ (宇宙研)
ECR イオンエンジン



科学研究費：基盤研究 (S)

先進プラズマ推進

High-Density
Helicon Plasma

Initial Try of New Propulsion Scheme

cf. NASA "VASIMR"

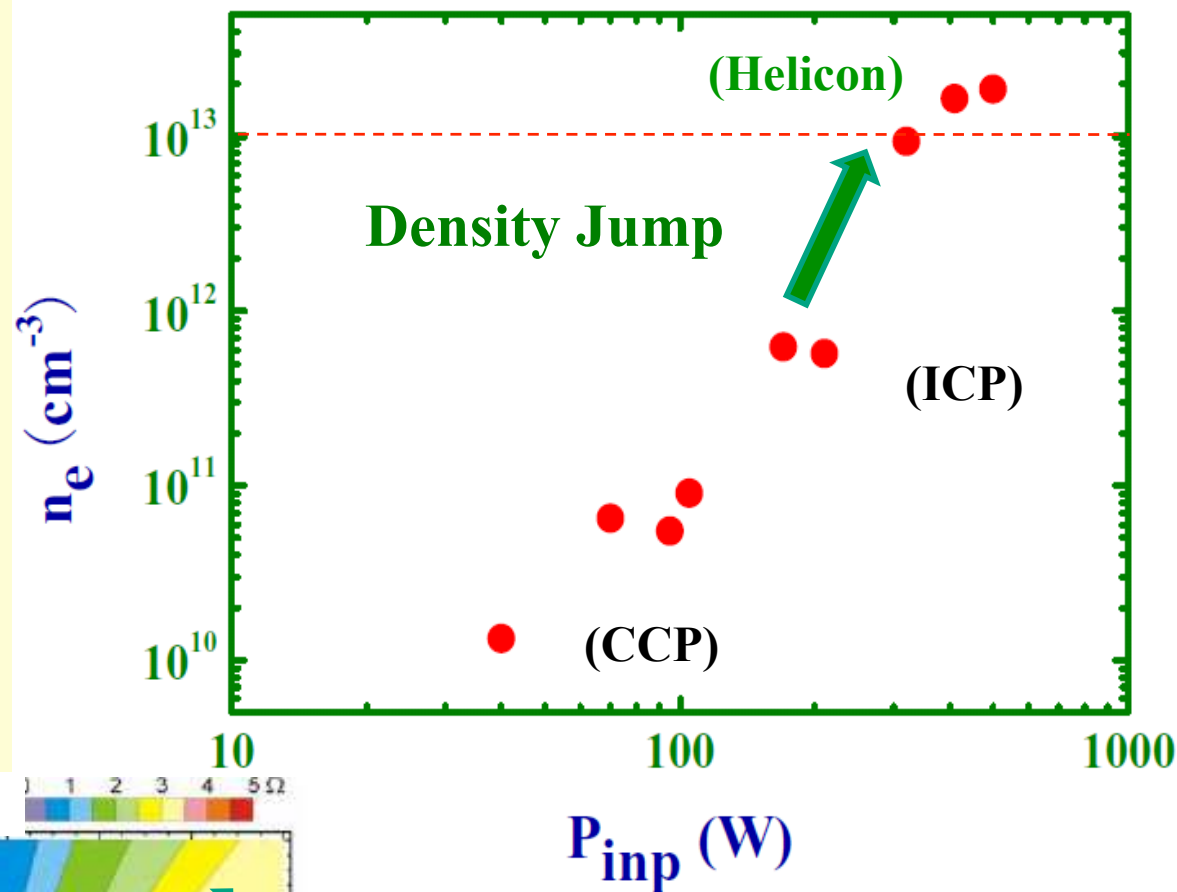
ヘリコン波を用いた先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究開発

基盤研究 (A)、(B)、(C) 等の蓄積

故都木教授、谷川教授、羽田准教授、船木准教授、西田准教授、
Shamrai博士 等と共同研究



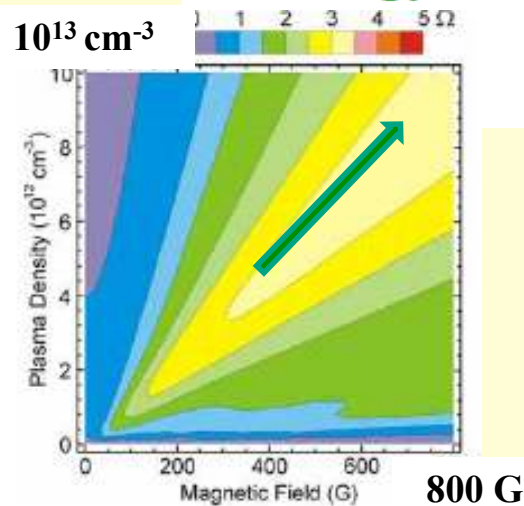
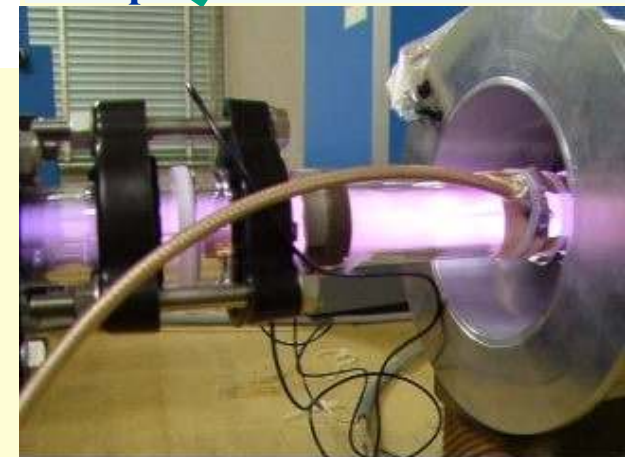
High-Density Plasma Production 2.5 cm I.D. (Smallest D)



$\sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Achieved @ 500W



P_{inp} : Blue Mode



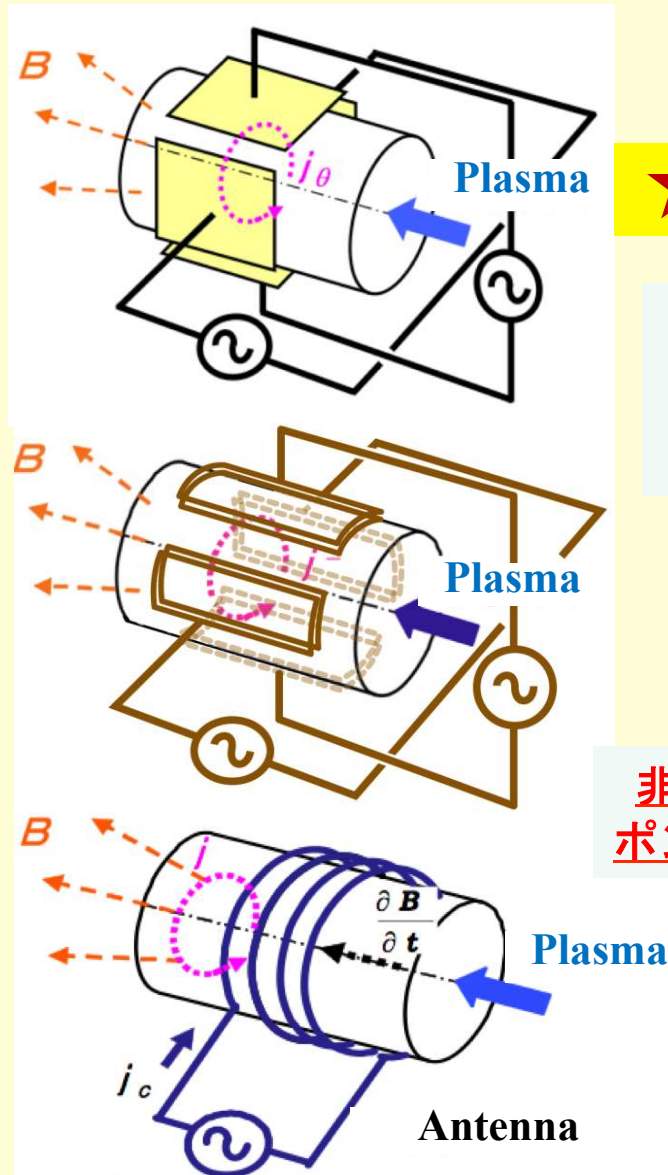
Antenna Loading
in (B, n_e) Space
(Calc. By Shamrai)

(27.12 MHz, 0.5 mg/s, 800 G)

先進プラズマ推進プロジェクト

無電極MPD
スラスタ

無電極 (アンテナがプラズマと無接触)



+ 高密度ヘリコンプラズマ源

★ 原理実証実験 (進行中)

回転電場 (REF)
回転磁場 (RMF)
(非対称) 周方向電流

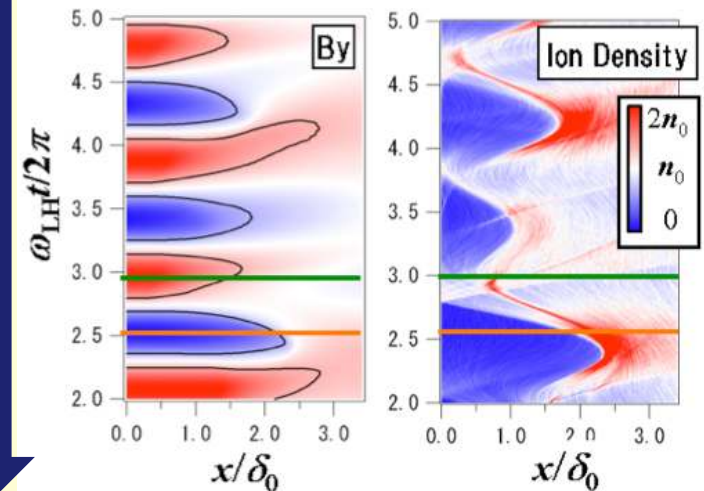
$$F_z = j_\theta \times B_{r0}$$

+ 他の方法

非線形波動、ダブルレアー
ポンデロモーティブ力

e.g., PIC、流体 ...

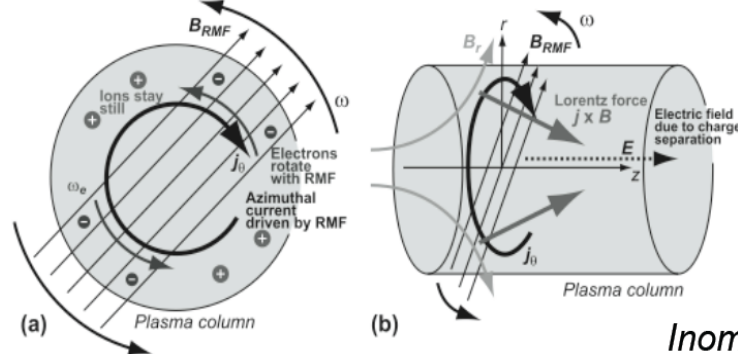
シミュレーション例



★ 理論 + シミュレーション
粒子/流体/電磁場解析

緊密な会合
データ共通化

RMF: Rotating Magnetic Field



Inomoto, 2008

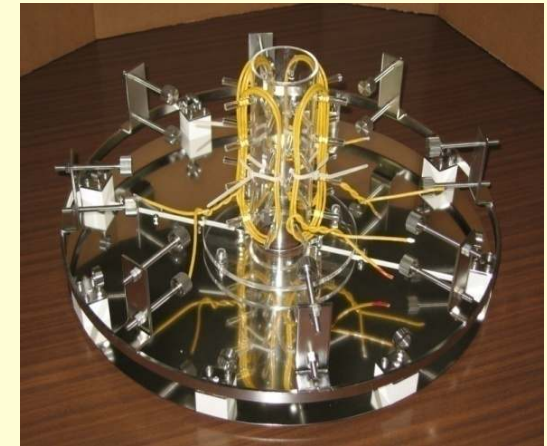
$$E - (\mathbf{j} \times \mathbf{B})/e n_e = \eta \mathbf{j}$$

Rotating Magnetic Field (ω)	$\mathbf{B}_\perp \sim \exp(i\omega t)$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ Resistivity (Collision) nonlinearity radial B field
Inductive Electric Field (ω)	$E_z \sim \exp(i\omega t)$	
Axial Ohmic current (ω)	$\mathbf{J}_z \sim \exp(i\omega t)$	
Azimuthal current (DC)	$\mathbf{J}_\theta \sim \langle \mathbf{J}_z \times \mathbf{B}_\perp \rangle$	
Axial Lorentz force (DC)	$\mathbf{F}_z = \mathbf{J}_\theta \times \mathbf{B}_r$	

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

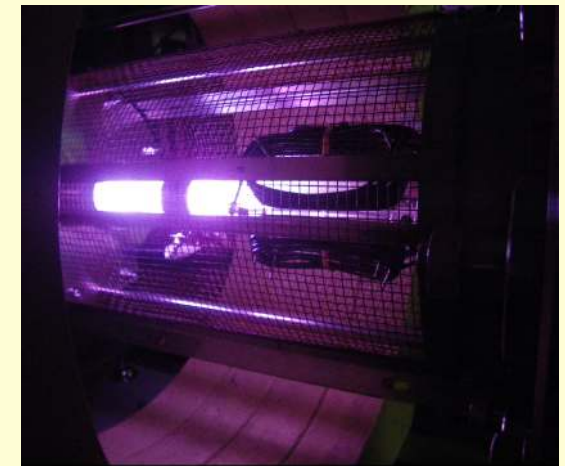
Penetration Condition of the RMF into a Plasma

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



Our Proto Type

(Inside of V.V)



Our Second Type

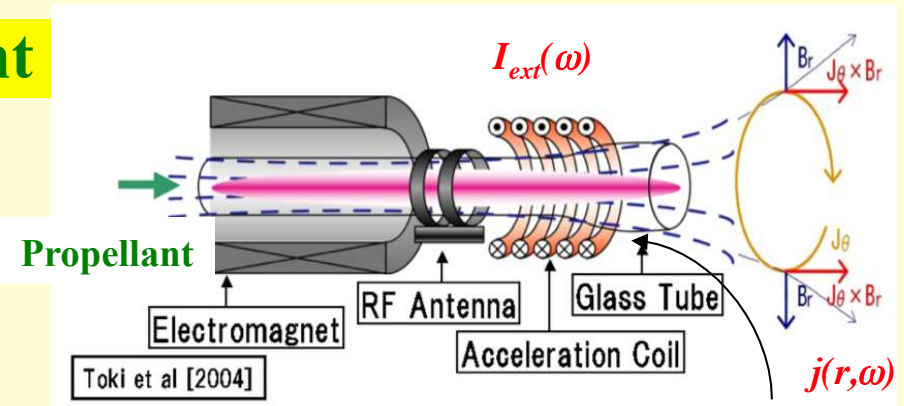
(Outside of V.V)

★ Multi Loops: Azimuthal Current

X Mode Disp. Relation Boundary Condition

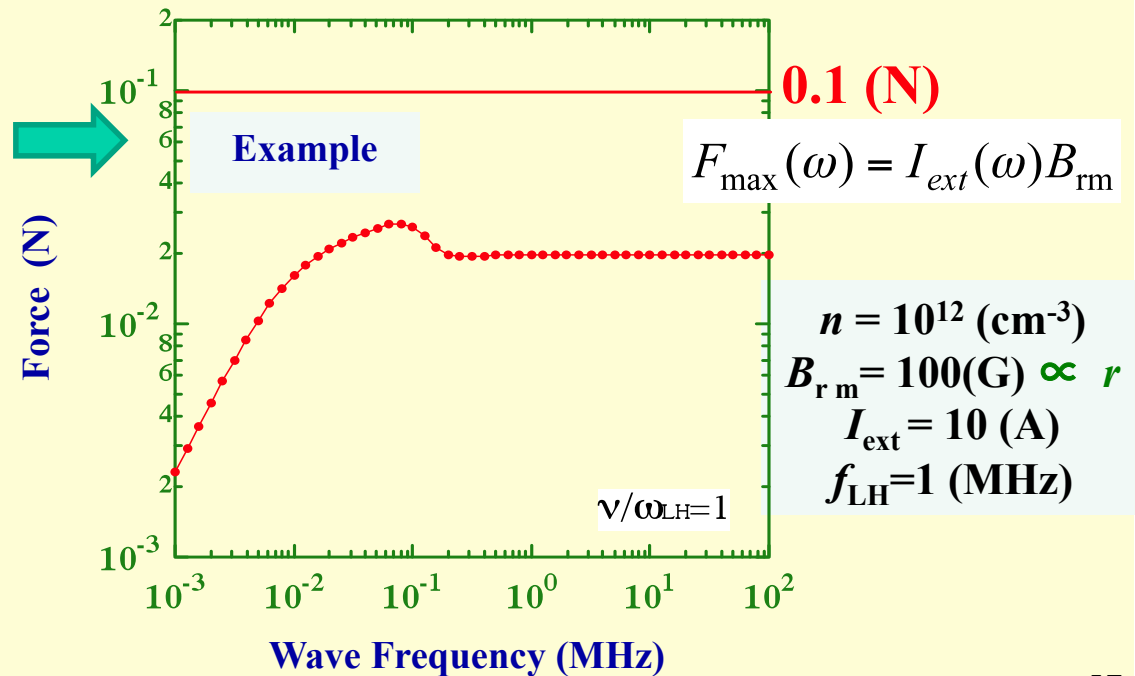
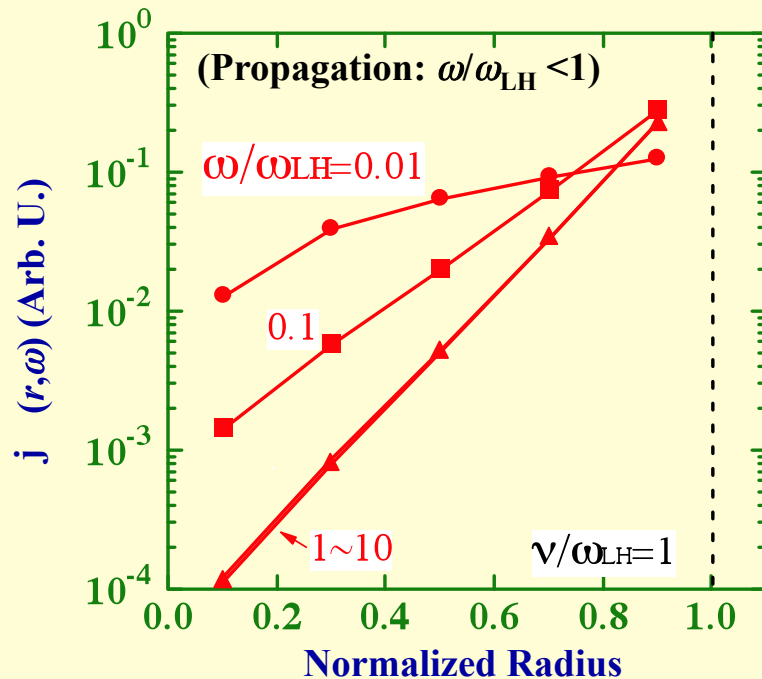
($k_z = 0$)

$I_{ext}(\omega)$: External Current
 $j(r, \omega)$: Induced Current Density
 $= C(r, \omega) I_{ext}(\omega) / \pi R^2$
 $C(r, \omega)$: Response Function



$$F(\omega) = \int_0^L dz \int_0^R 2\pi r dr j(r, \omega) B_r(r)$$

Half Period





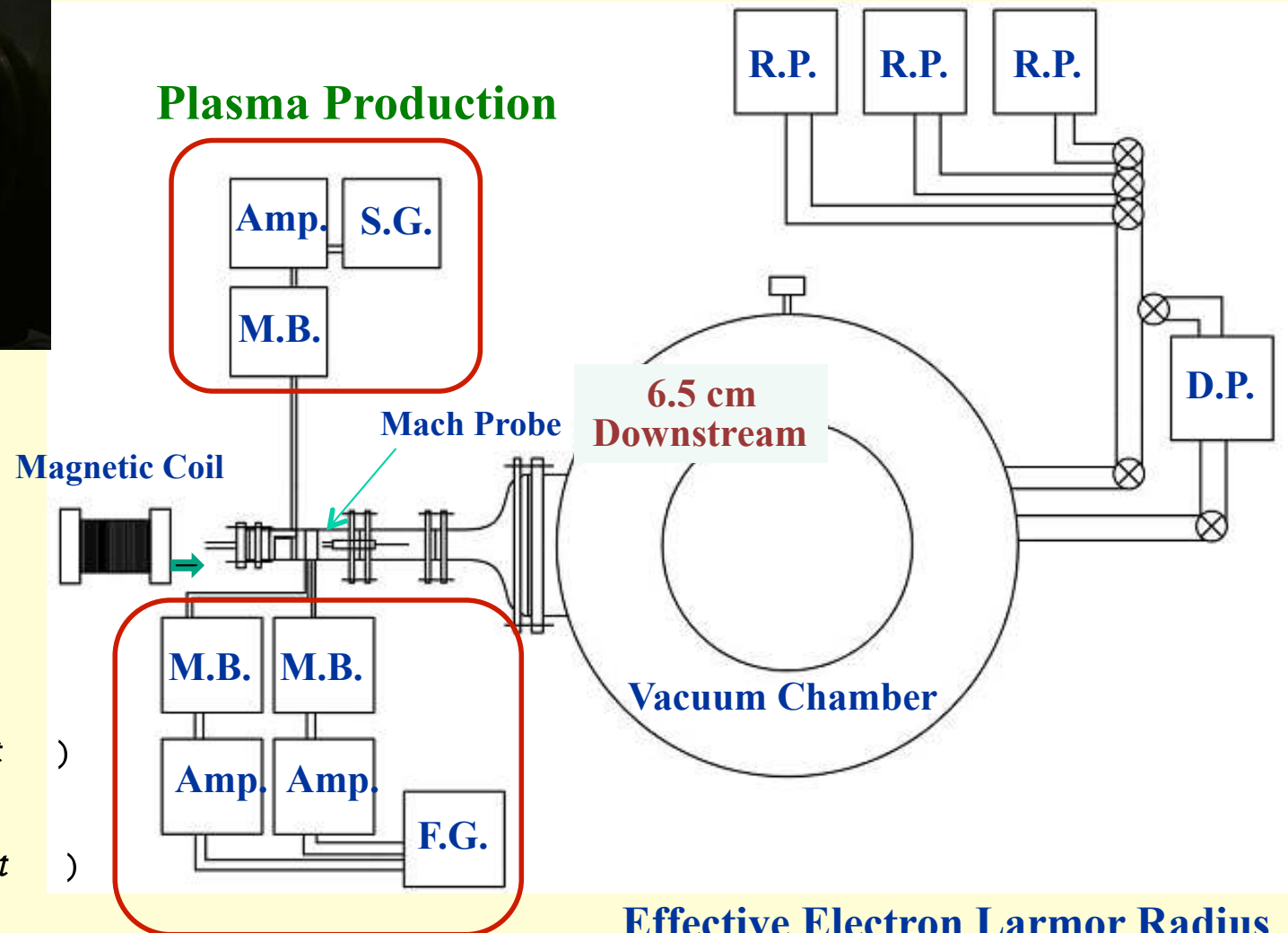
**Rotating
Electric Field
(Lissajous)**

Electron Motion

$$u_x = \frac{eE_0}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0)^2 - \omega^2}} \sin(\omega t)$$

$$u_y = \frac{eE_0}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0)^2 - \omega^2}} \cos(\omega t)$$

$$R_{L,eq.} = \frac{eE_0}{m_e \omega \sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + \nu^2}}$$



Plasma Acceleration

Effective Electron Larmor Radius

$$R_d = E / \omega B_{z0}$$

cf. Diamagnetic Current

推進効率

はやぶさ

比推力 3180[s]
推進効率 51 [%]
25 [mN/kW]

RMF

比推力 150[s]
推進効率 0.01 [%]
0.1 [mN/kW]



目標

$v(M) > 10$ 倍
 $S \sim 4$ 倍($r \sim 2$ 倍)
 $n > 5 \sim 10$ 倍

RMF

比推力 1500[s]
推進効率 20 % 以上
20 [mN/kW] 以上

Helicon: Future Potential Contribution

Nonlinearity — Complex/Structural Formation

Industrial Application

Nanotechnology/Materials, Environment,
Information/Telecommunication, Biotechnology ...

Basic Physics

Self Organization

Density Transition

Velocity Shear

Turbulence

High-Beta, PWI

Boundary Layer

Magnetic Reconnection

Gas Laser...

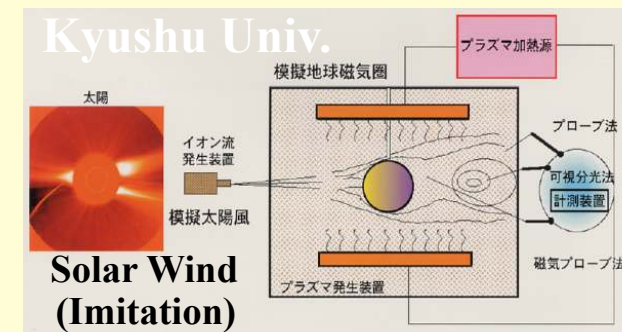
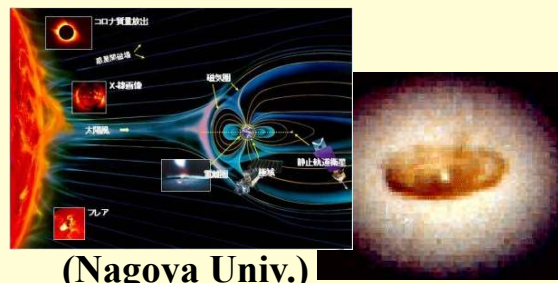


Pre-ionization

Wall Conditioning

Neutron Source ...

Fusion



Excitation of Various Waves

Magnetosphere

★ **Propulsion**

Dust (B , n_e ...)

Astrobiology (Biopolesis)...

Space Physics

多様なプラズマ

多くのシーズ/ニーズ

非常に広範な温度－密度領域

複雑性/構造的性

プラズマ基礎から応用への飛躍的展開



光

プラズマディスプレイ、光源、レーザー
リソグラフィー、マイクロプラズマ

熱

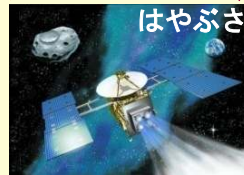
溶接/溶断、放電加工、精錬、ゴミ処理

電気

静電集塵機/塗装、空気清浄機、スイッチ素子
レーザー誘雷、MHD発電

力学

レールガン、加速器、ロケットエンジン、異種イオン/遠心分離

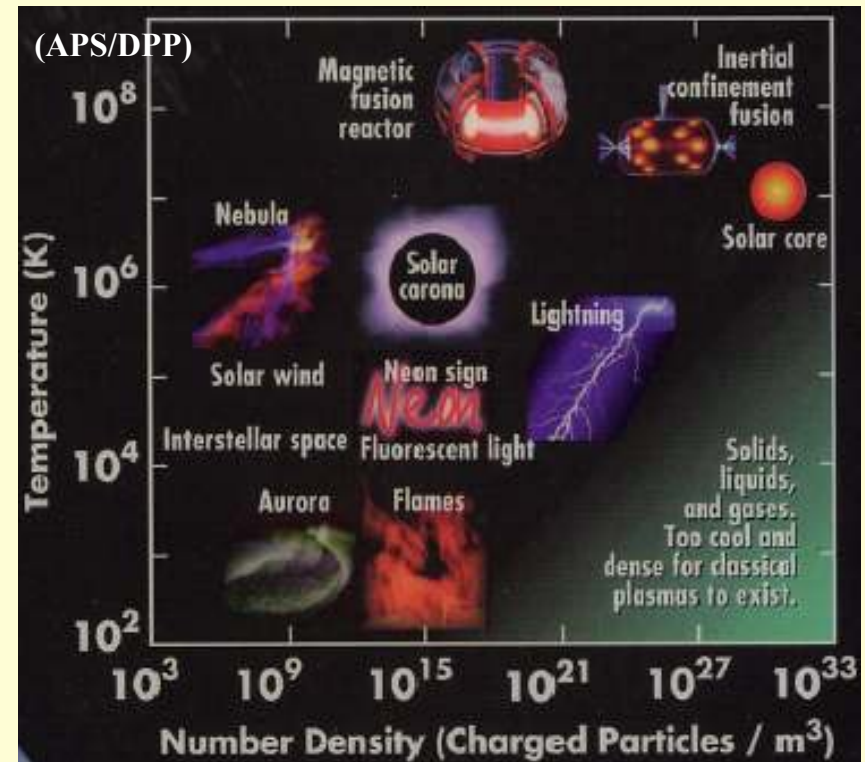


化学反応

エッチング、CVD、フラーレン/ナノチューブ
フロン/PCB分解、ダイヤモンド合成、環境、バイオ/医療/生命誕生

核反応

核融合



広域ヘリコンプラズマ科学

先進プラズマ研究へ貢献・展開

代表者 先進成果反映例 ヘリコンプラズマ科学

H22年度文部科学大臣表彰 科学技術賞

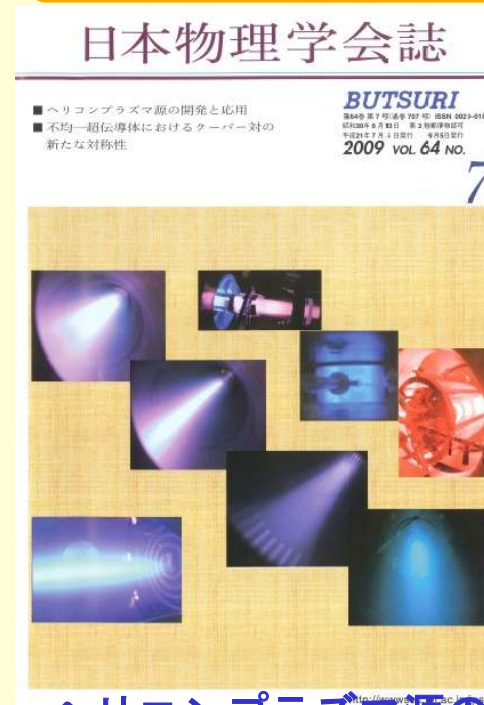


高密度ヘリコン波プラズマの
物理現象と工学的応用の研究

国際会議等招待講演

電離気体現象に関する国際会議 (ICPIG)
マイクロエレクトロニクスとプラズマ技術に関する国際会議 (ICMAP)
アジア太平洋プラズマ科学技術に関する国際会議 (APCPST)
アメリカ物理学会 (APS)
ヨーロッパ物理学会 (EPS)

表紙写真と解説



ヘリコンプラズマ源の
開発と応用

プラズマ・核融合学会誌でも解説

日本物理学会でも招待講演

特許 2 件

高周波プラズマの
発生方法

科学研究費

基盤研究(S)：代表
基盤研究(B)：代表
特別推進研究：分担
その他多数

査読論文

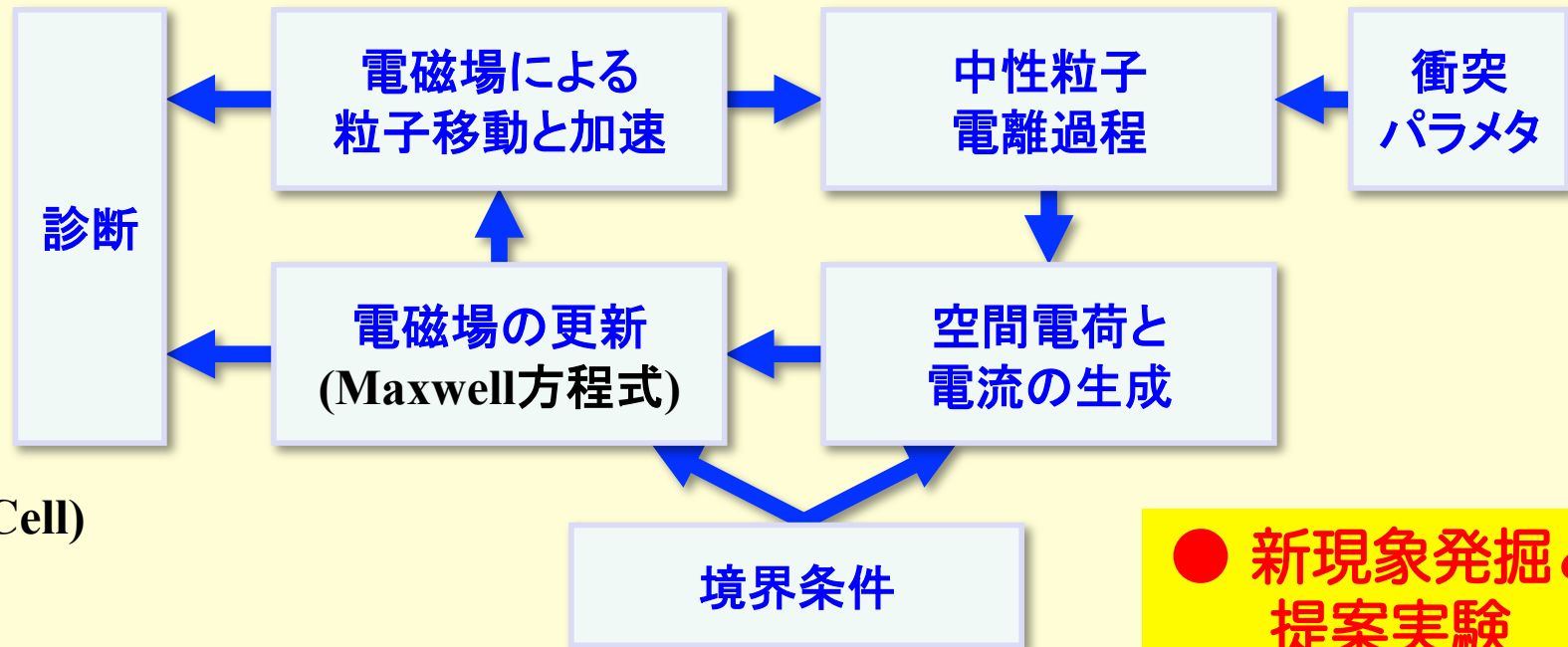
Nature Phys., Phys.
Plasmas, Plasma Phys.
Control. Fusion,
Thin Solid Films,
その他多数

羽田教授

H11年度
田中館賞受賞他

高ベータプラズマの PIC 計算機実験

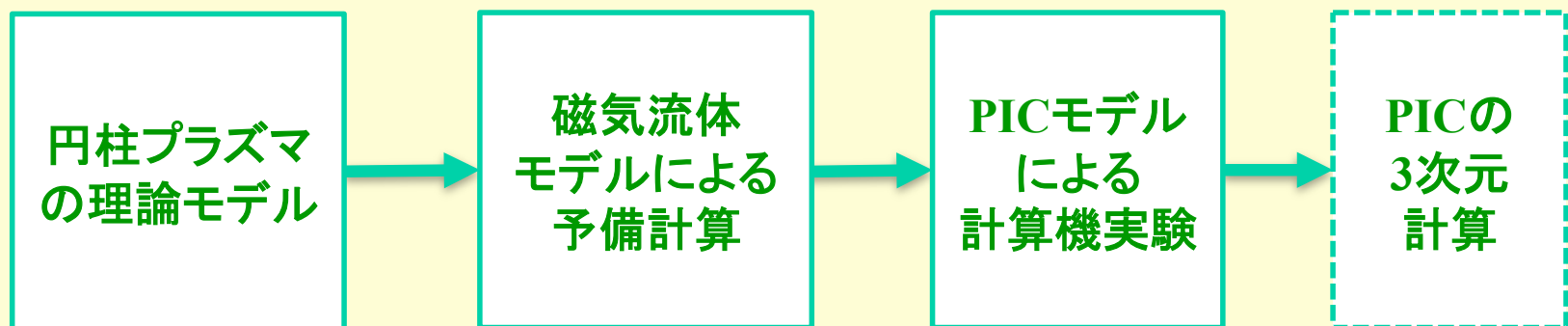
PIC計算 の概念



(Particle-in-Cell)

● 新現象発掘と
提案実験

今後の 研究計画



- 分散関係の確認
- プラズマおよび電磁場
パラメータ依存性確認

- 現実的密度分布での計算
- ヘリコン波とTG波との
カップリング確認

- プラズマ生成とロス評価
- 運動論的効果の考察
- 実験との比較検討

理論・シミュレーションによる支援研究

I. 高密度プラズマ源

初期プラズマ生成

壁洗浄

プラズマ-壁相互作用

II. 高密度プラズマ流制御

周・軸方向

III. 高ベータプラズマ

構造形成、安定性：動的変化

ヘリコンプラズマ：波動と高密度プラズマ生成

高ベータ領域を伝播する波動の解析：磁場ヌル点通過など
GAMMA10 の IAC に関連：

円柱プラズマ系でイオンの非等方性による波動励起