

LATEでのECHによる球状トカマク形成

開いた磁場配位から閉じた磁気面構造(球状トカマク平衡配位)への自発的遷移

京都大学大学院エネルギー科学研究科

吉永 智一, 打田 正樹, 田中 仁, 前川 孝

発表内容

1. 背景と目的
2. 実験結果
3. 理論的考察
4. まとめ

背景および目的

球状トカマク(ST)は、コンパクトな形状に高ベータのプラズマを閉じ込めることができ魅力的である。

St炉を実現するためには、中心部のOHソレノイドを除き、それに変わる手法でプラズマを立ち上げる必要がある。

ECH/ECCDは放電の開始、プラズマ電流の立ち上げ、および駆動を同時に実現する可能性がある。

LATEの目的: ECHのみを用いた球状トカマク平衡形成

定常垂直磁場の下での自発的な電流生成による初期平衡形成

2.45 GHz, 20 kW → $I_p \sim 3.3$ kA at $B_v = 34$ Gauss

5 GHz, 130 kW → $I_p \sim 7$ kA at $B_v = 85$ Gauss

初期平衡形成後、垂直磁場を緩やかに増加→プラズマ電流増大

2.45 GHz, 30 kW → $I_p \sim 7.2$ kA at $B_v = 78$ Gauss



Low Aspect ratio Torus Experiment Device

LATE Parameters:

Vacuum vessel

(diameter = height = 1m)

Center post (diameter=11.4 cm)

Toroidal coils operation (achieved):

60 kAT, 10 s. or 90 kAT, 0.1 s.

Microwave Power:

2.45 GHz(10kW,CW and 20kW, 2s.)

5.0 GHz (160 kW, 0.06 sec)

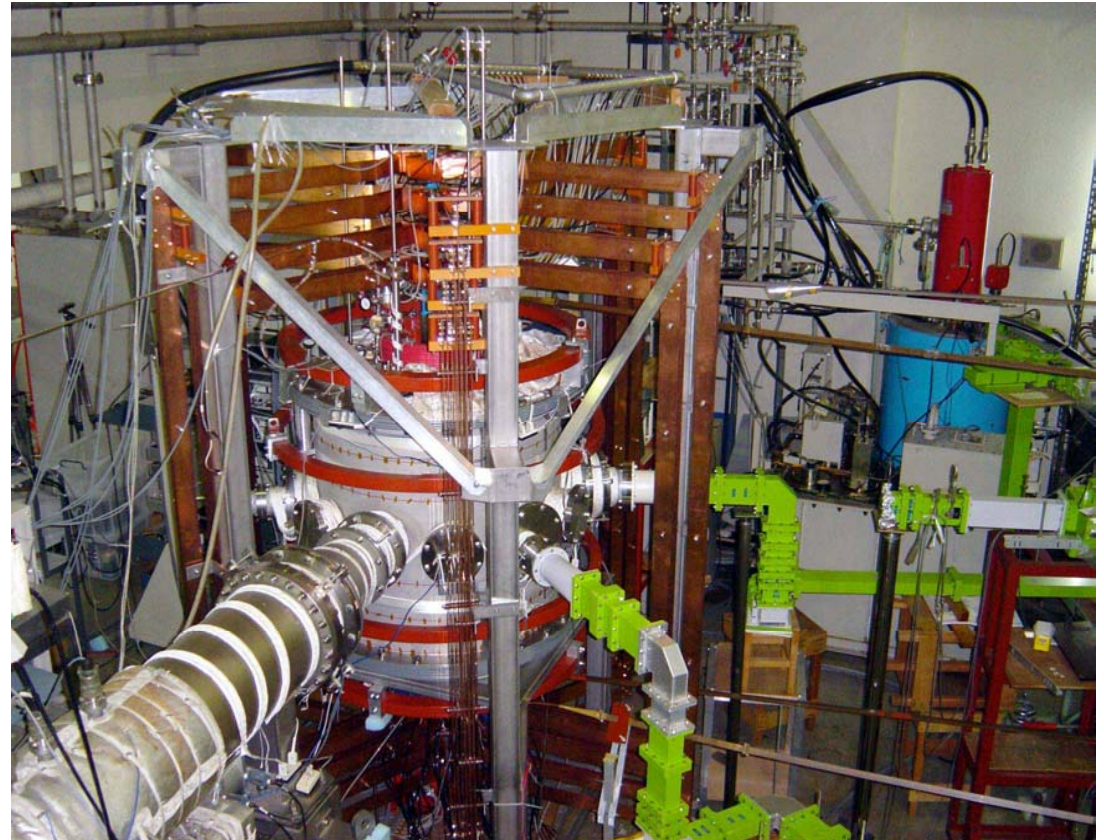
Diagnostics:

4mm interferometer (2channels),

Video camera, Flux loops,

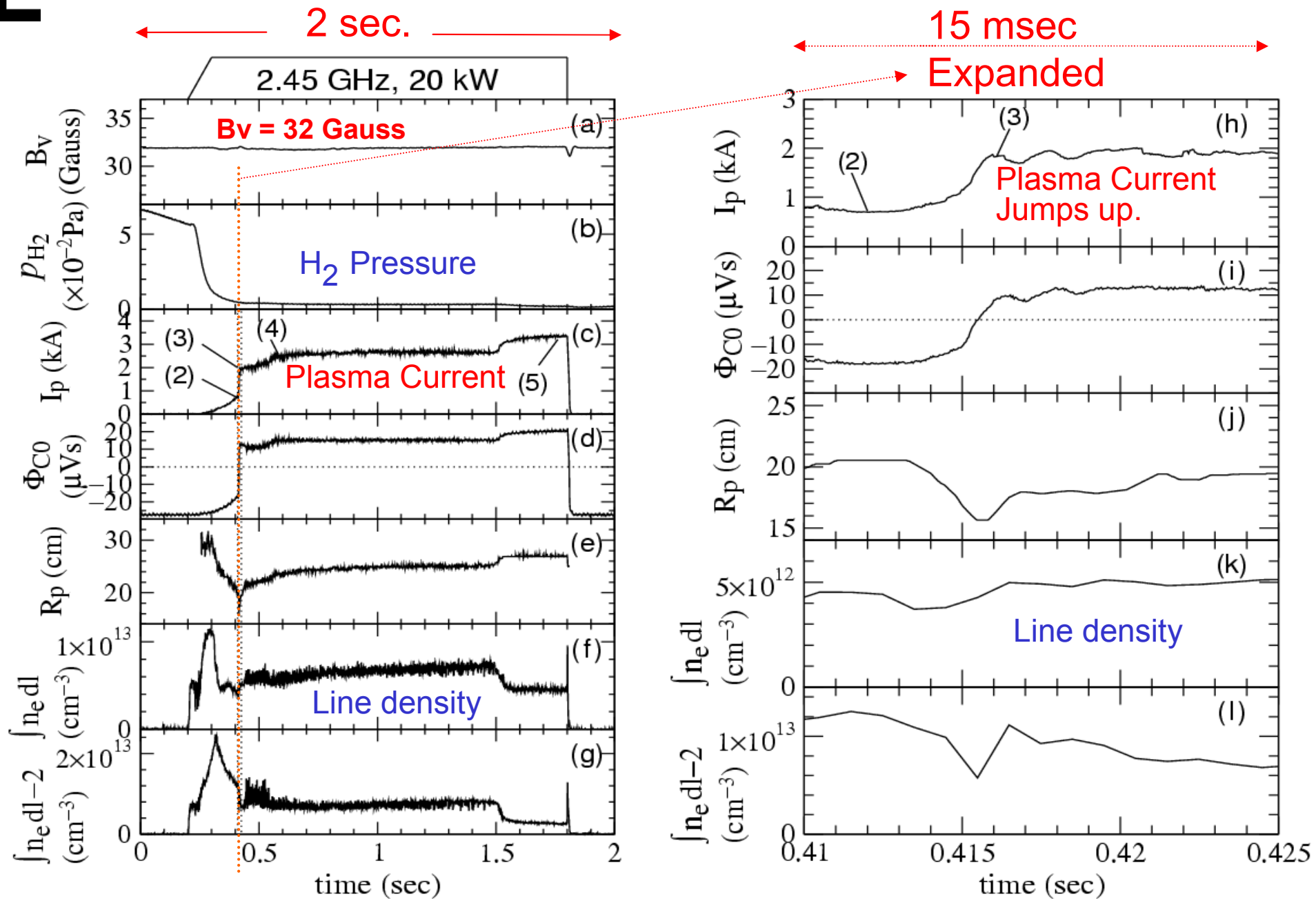
Langmuir probes,Spectrometer,

Four SX cameras.



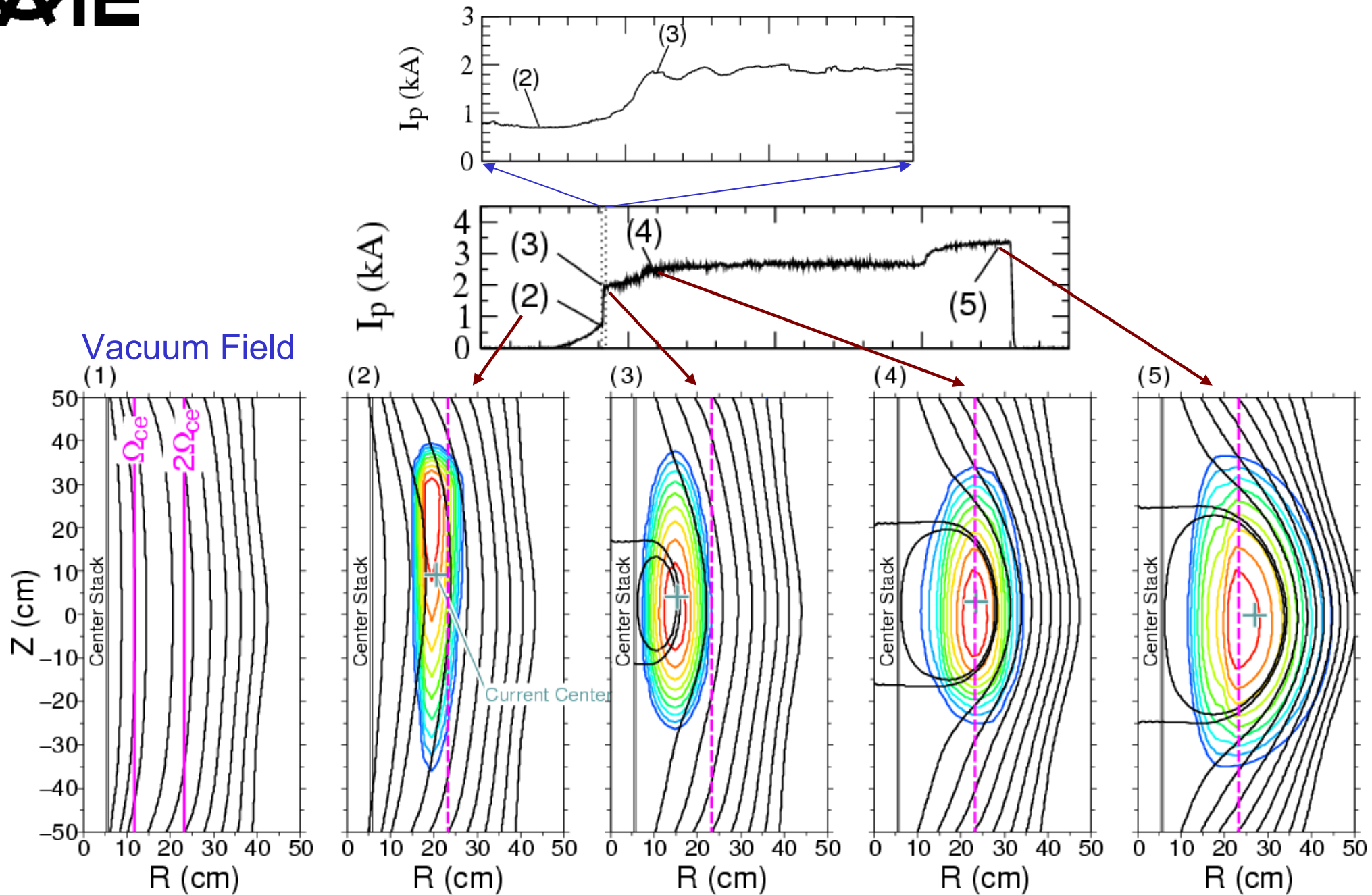


Typical Discharge



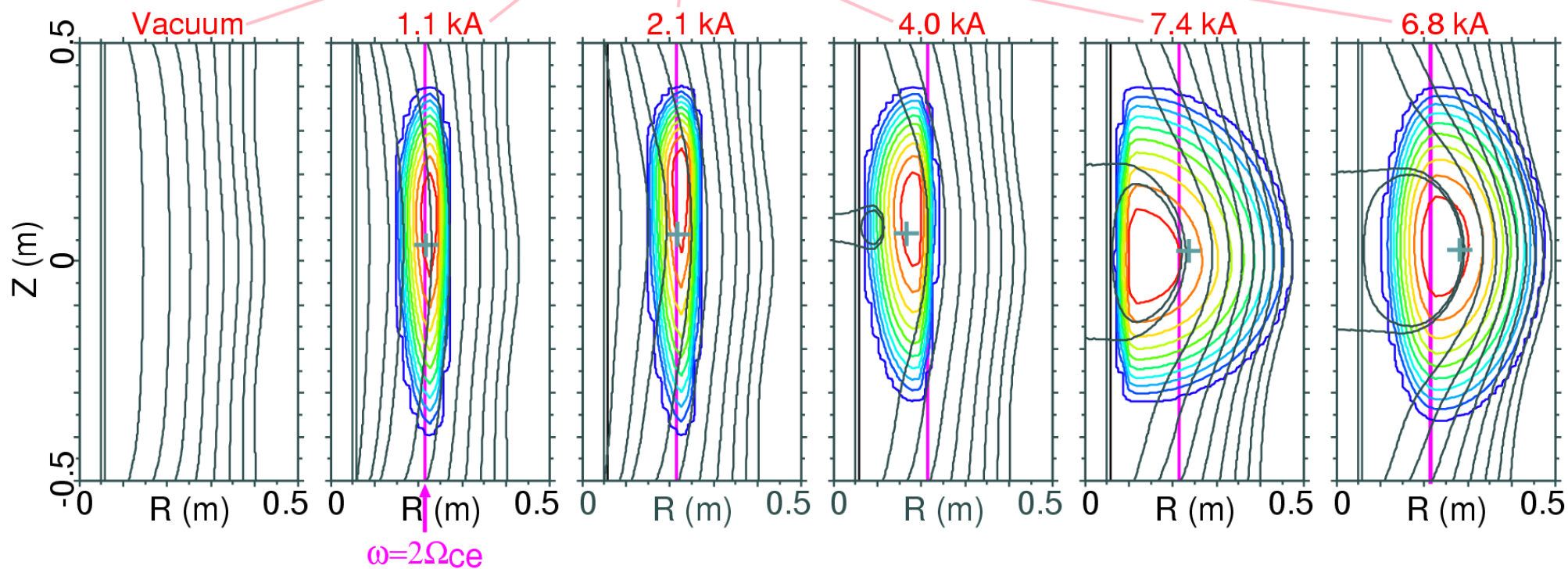
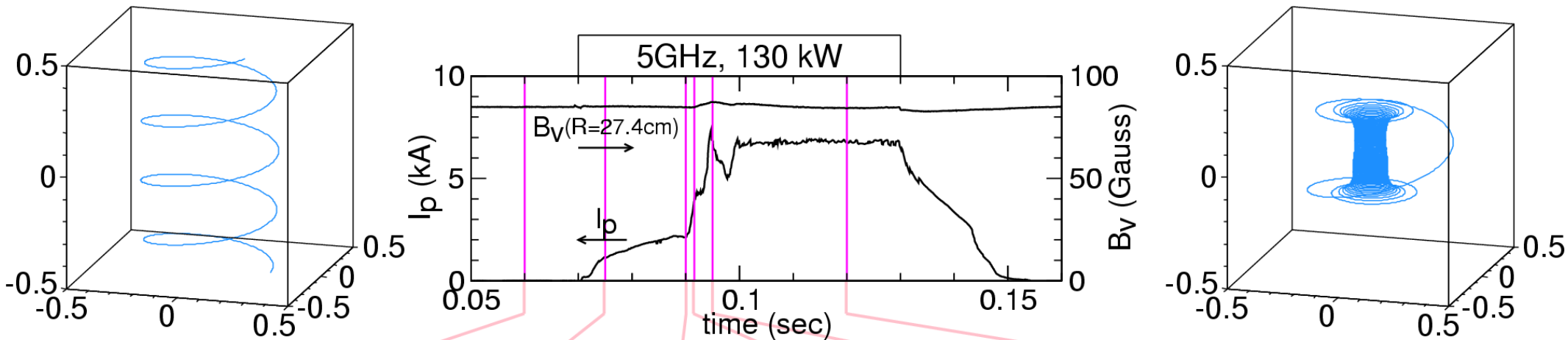


プラズマ電流分布と磁気面の成長 (2.45GHz 20kW Experiment)



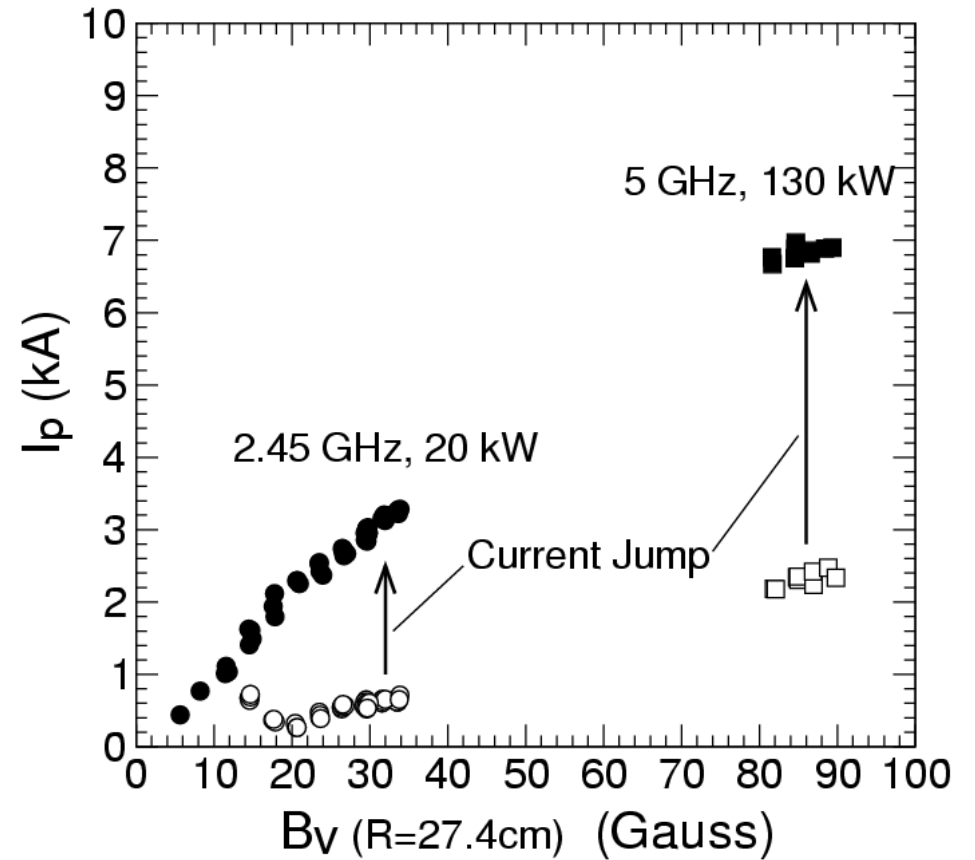
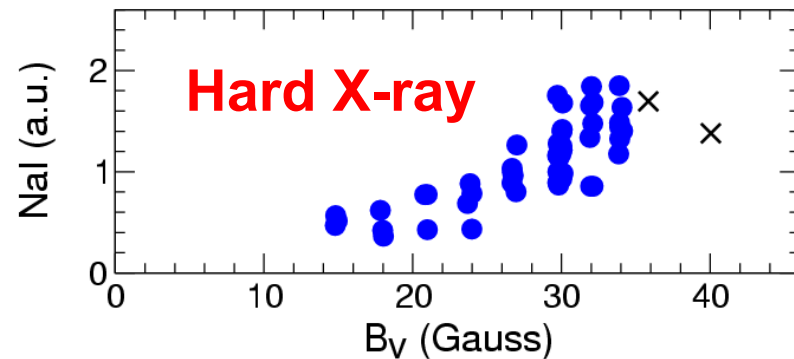
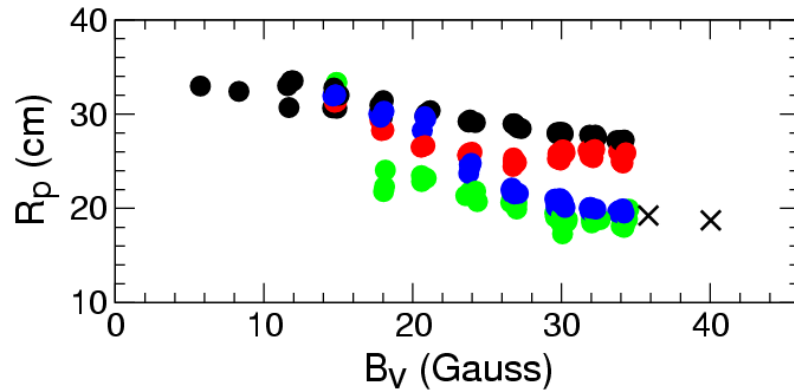
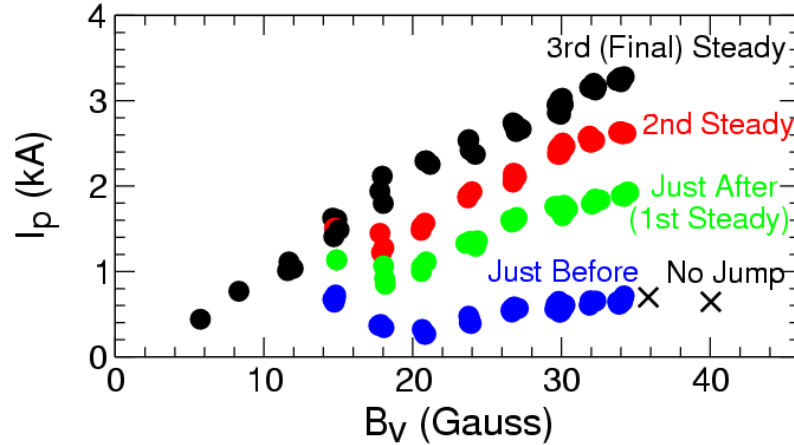


プラズマ電流分布と磁気面の成長 (5GHz 130kW Experiment)





Hard X-ray appears with increase of B_V





平衡の観点からの考察 1

プラズマを平衡状態に保つために必要な垂直磁場は

$$B_v = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \left\{ \log(8R/a) + l_i/2 - 3/2 + \beta_p \right\}$$

ここで

$$\beta_p = \frac{2\mu_0 \langle p \rangle}{B_a^2} \propto \frac{\langle p \rangle}{I_p^2} \quad B_a = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$$



以下のように規格化する

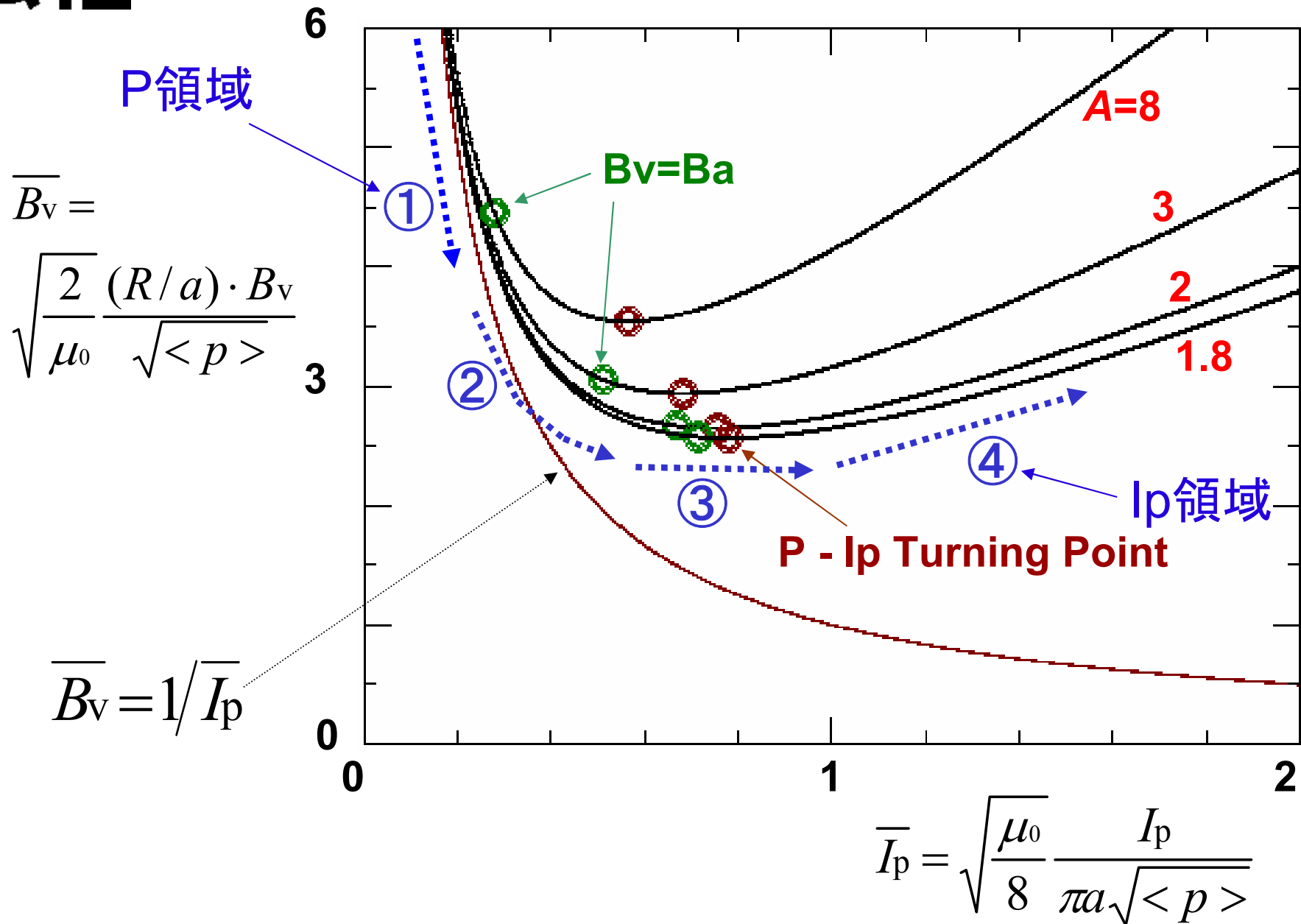
$$\overline{B_v} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0}} \frac{(R/a) \cdot B_v}{\sqrt{\langle p \rangle}} \quad \overline{I_p} = \sqrt{\frac{\mu_0}{8}} \frac{I_p}{\pi a \sqrt{\langle p \rangle}}$$

$$\overline{B_v} = \Gamma(A, li) \cdot \overline{I_p} + 1/\overline{I_p}$$

$$\Gamma(A, li) = \log(8A) + li/2 - 3/2 \quad A = R/a$$



$$\overline{B}_v = \Gamma(A, li) \cdot \overline{I}_p + 1/\overline{I}_p$$





Step ①: 外部垂直磁場の下での圧力駆動電流

∇B ドリフトによって垂直方向に流れる電流密度は、

$$J_z = 2p / RB_t.$$

電子は、荷電分離によって生じる電場を打ち消す様に、螺旋状の磁場に沿って流れる。

この電流密度のトロイダル成分は、

$$J_t = J_z \times (B_t / B_v) = 2p / RB_v.$$

プラズマ圧力によって駆動される全トロイダル電流は、

$$I_p = J_t \times \pi a^2 = 2\pi a^2 \langle p \rangle / RB_v.$$

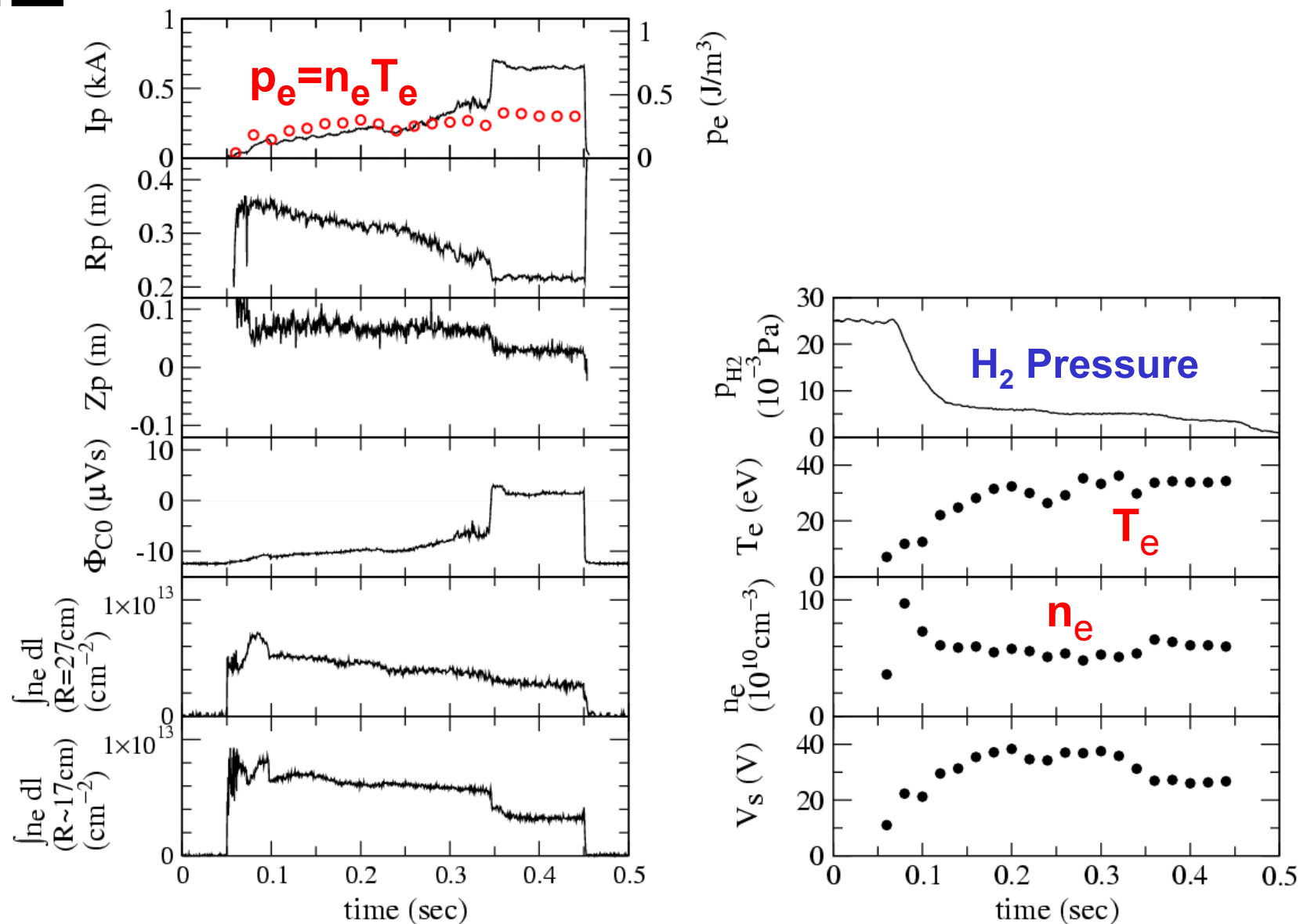
規格化した B_v と I_p の表式を用いると、

$$\overline{I_p} = 1 / \overline{B_v} \quad \text{即ち} \quad \overline{B_v} = 1 / \overline{I_p}$$

となり、放電初期においてプラズマ電流が低い領域(P領域)における平衡の式に一致する。



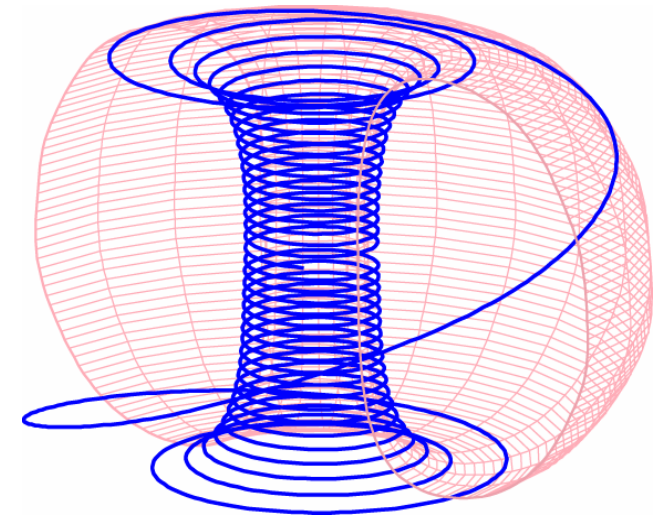
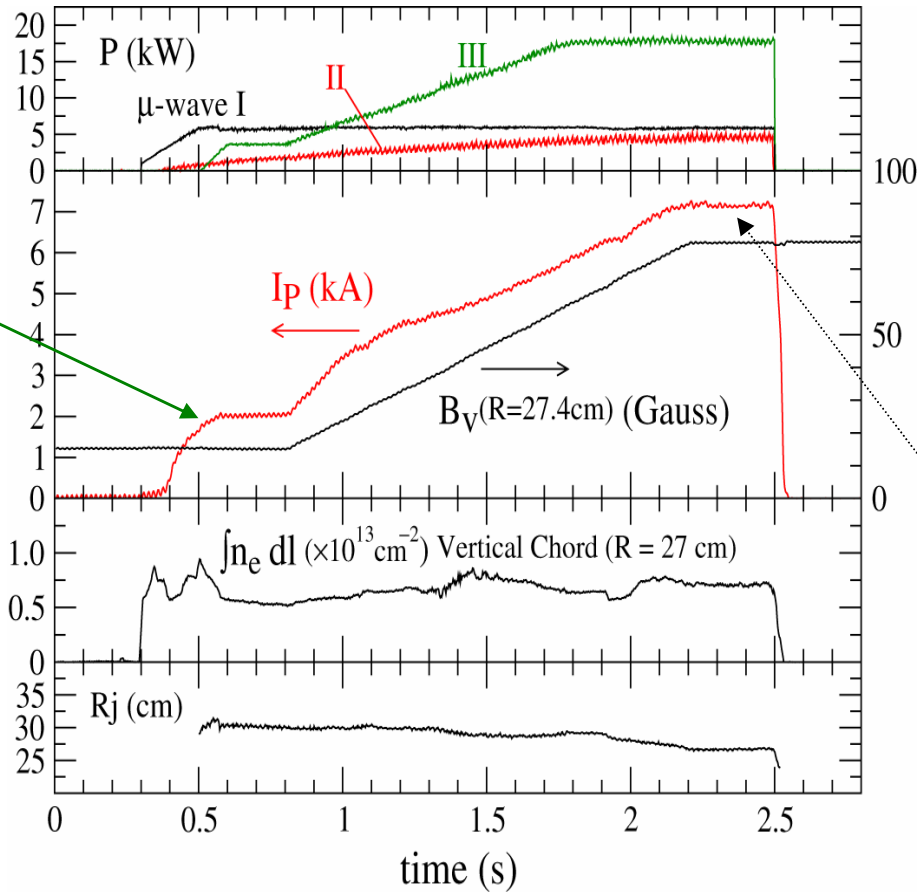
Jump 前の電流は、電子圧力に比例して増加 (from 2.45 GHz 5kW experiment).





Step ④: Jump後の電流は、外部垂直磁場の増加と共に増加

Spontaneous formation

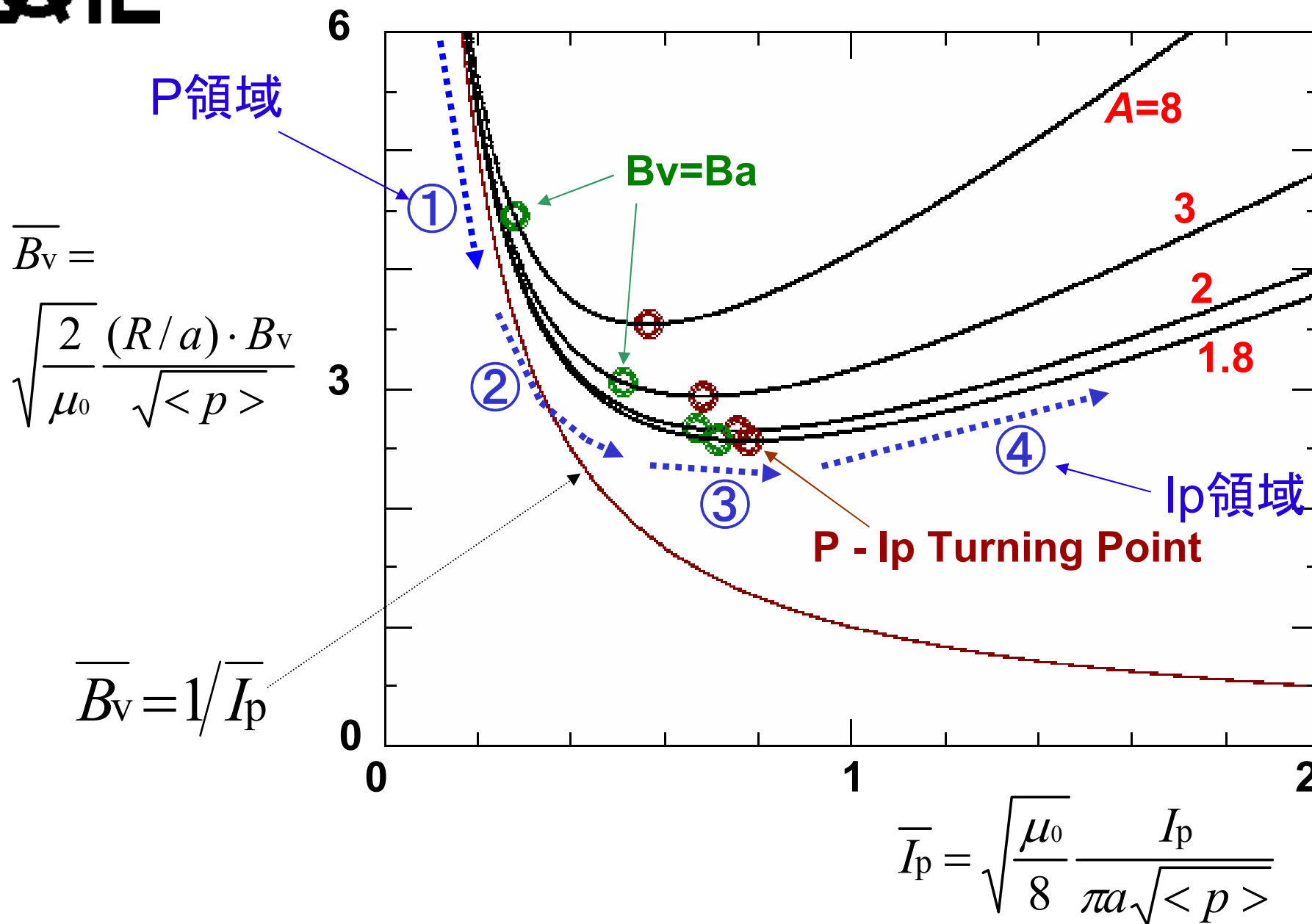


Field line at the final stage of the discharge.

Jump後のプラズマループ平衡は、既にプラズマ電流のフープ力が支配的となっている (I_p 領域) と考えられる。



Step ② および ③ において電流を駆動する機構が必要





単一粒子の閉じ込め

$$\nabla B \text{ drift : } V_{\nabla B} = -\frac{m(v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2/2)}{eRB_t}$$

$$\text{Z drift associated with the parallel drift along the helical field line : } V_{\parallel} \frac{B_v}{B_t}$$

$$\text{Total Z drift : } V_d = V_{\parallel} \frac{B_v}{B_t} - \frac{m(v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2/2)}{eRB_t}$$

開いた外部磁場の下では、 $V_d=0$ となる電子のみが閉じ込められる。

一方、閉じた磁気面が十分に成長した段階 ($B_a (= \mu_0 I_p / 2\pi a) \gg B_v$) では、全ての電子が閉じ込められる。

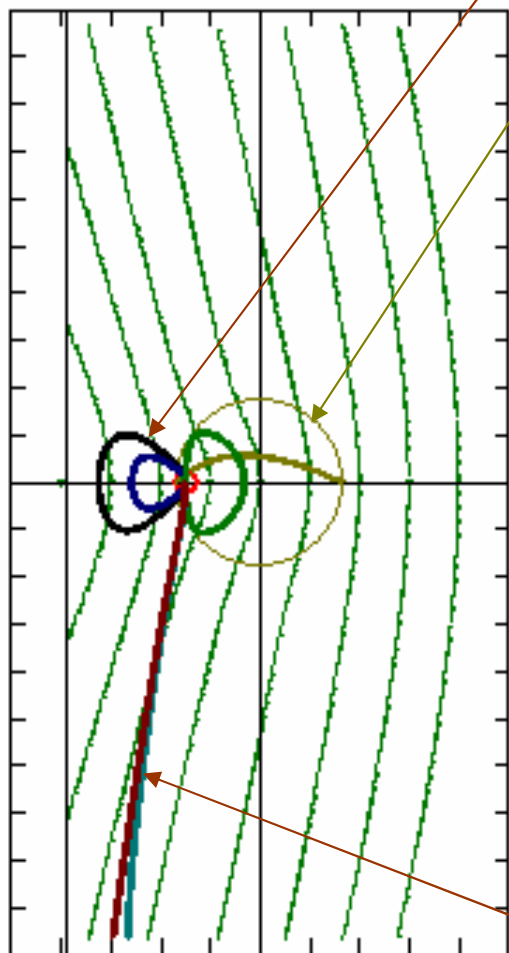


Particle Trajectories (Model Calculations)

(Forward electrons become confined with increase of plasma current)

ELECTRON TRAJECTORY MAPPING
FIELD PARAMETERS
R0 = 0.25
BT0 = 0.0260
Bz0/B0 = 0.1000
Ba/Bz0 = 0.3000
decay index = 0.10
n*alpha = 0.0100
fxxx/n*alpha = -2.0000
Aspect Ratio = 3.00

Electron Trajectory for Various Pitch Angles (We = 4 keV)

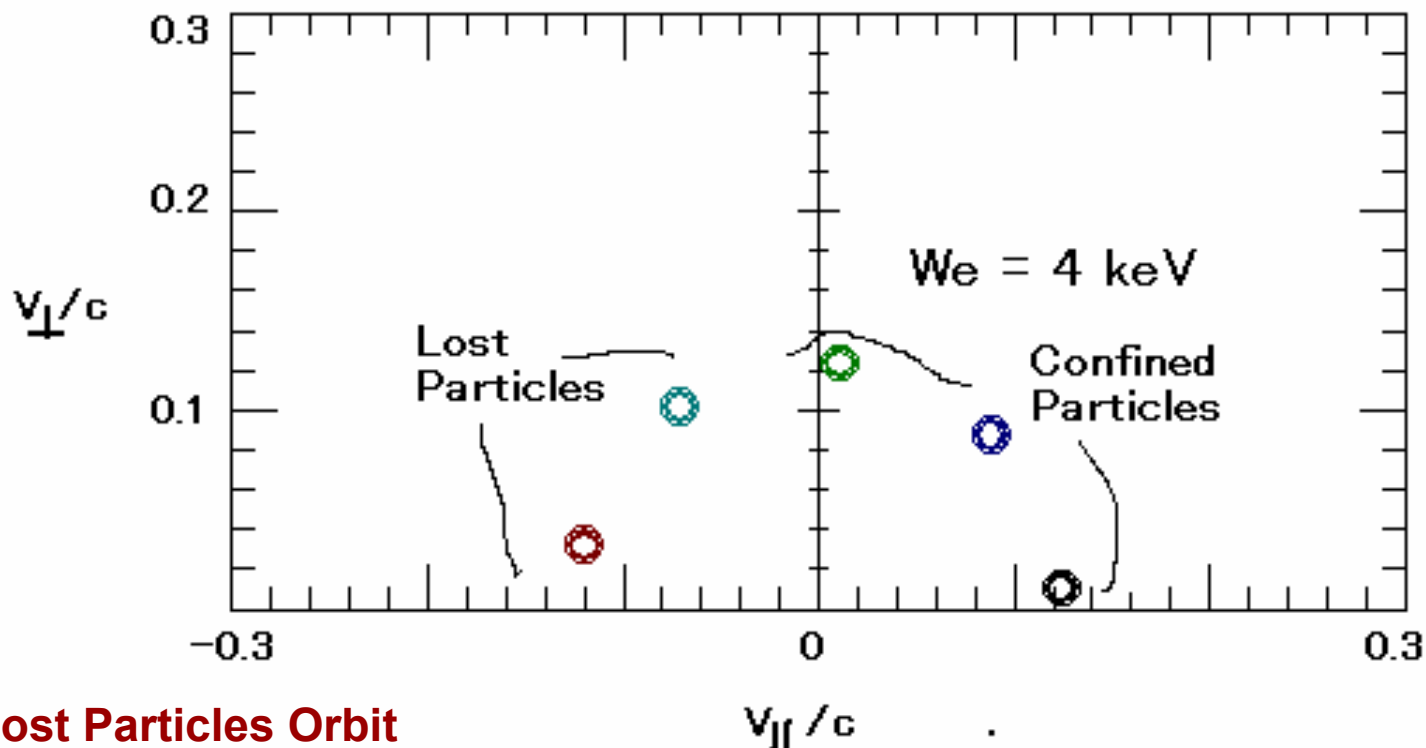


Confined Particles Orbit

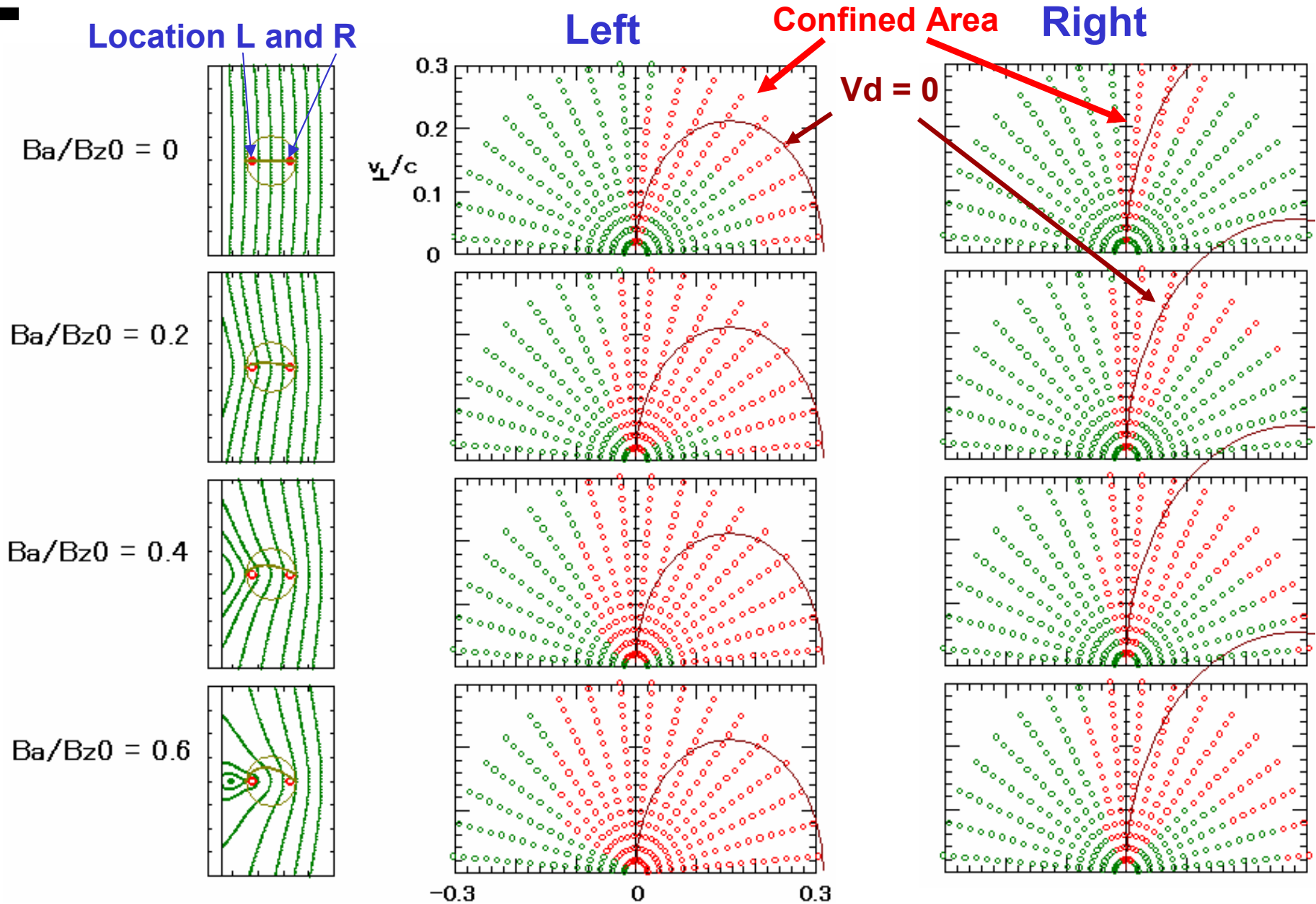
Plasma Current (Ba / Bz0=0.3)
(Circular Cross section)

Lost Particles Orbit

Electron Velocity Space

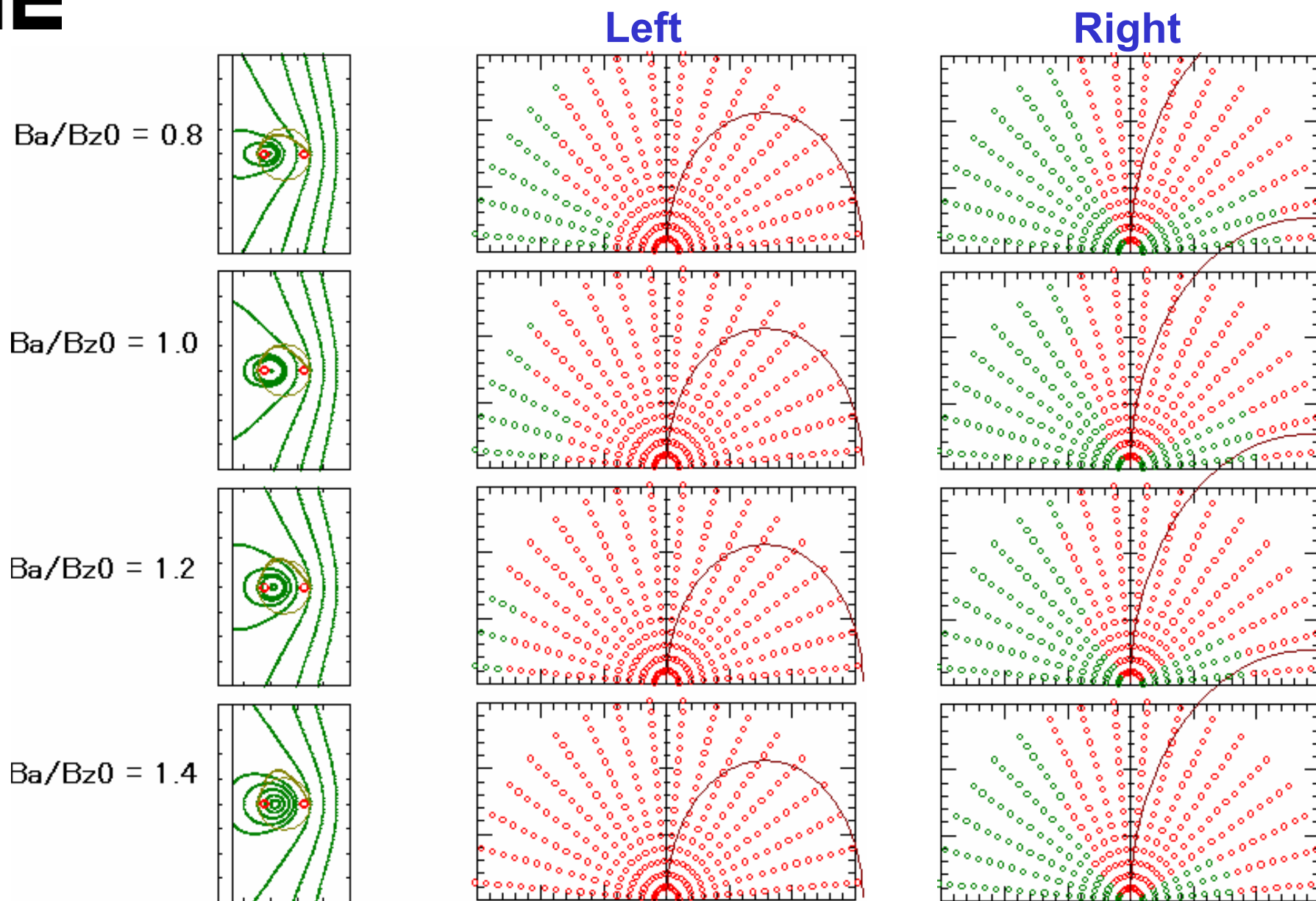


Confined area expands in forward direction as Ba (I_p) increases, manifesting very efficient current generation. (Confinement improves first at strong field (Left) side.)



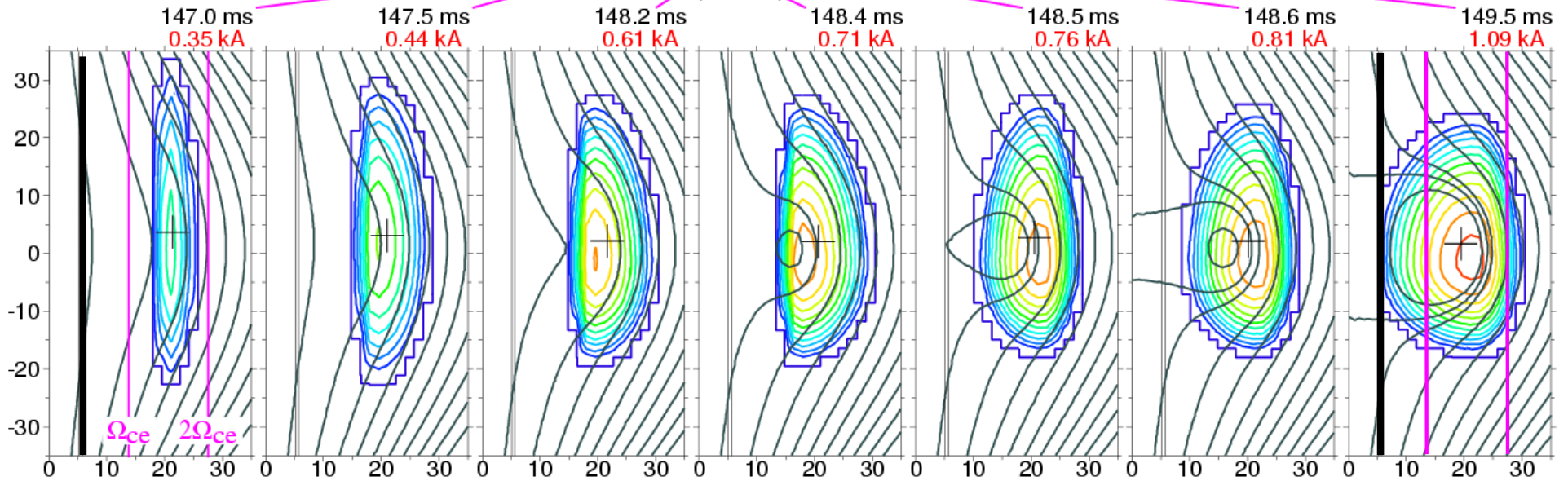
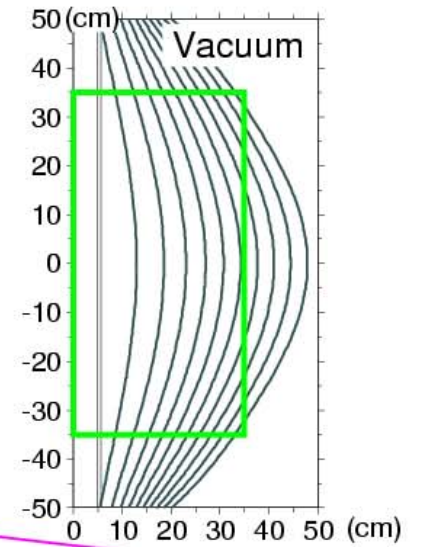
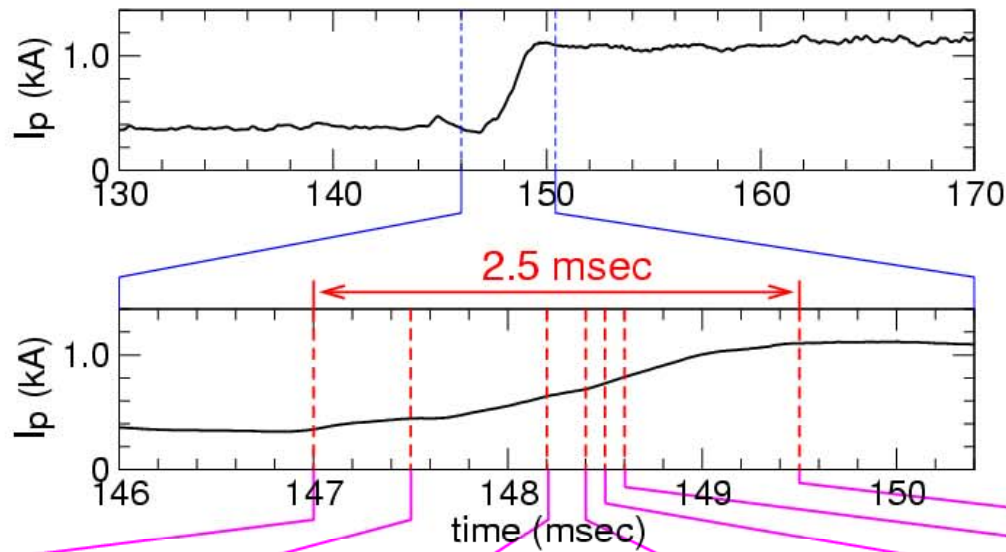


Confinement at weak field (Right) side improves as B_a increases over the external vertical field B_{z0} .



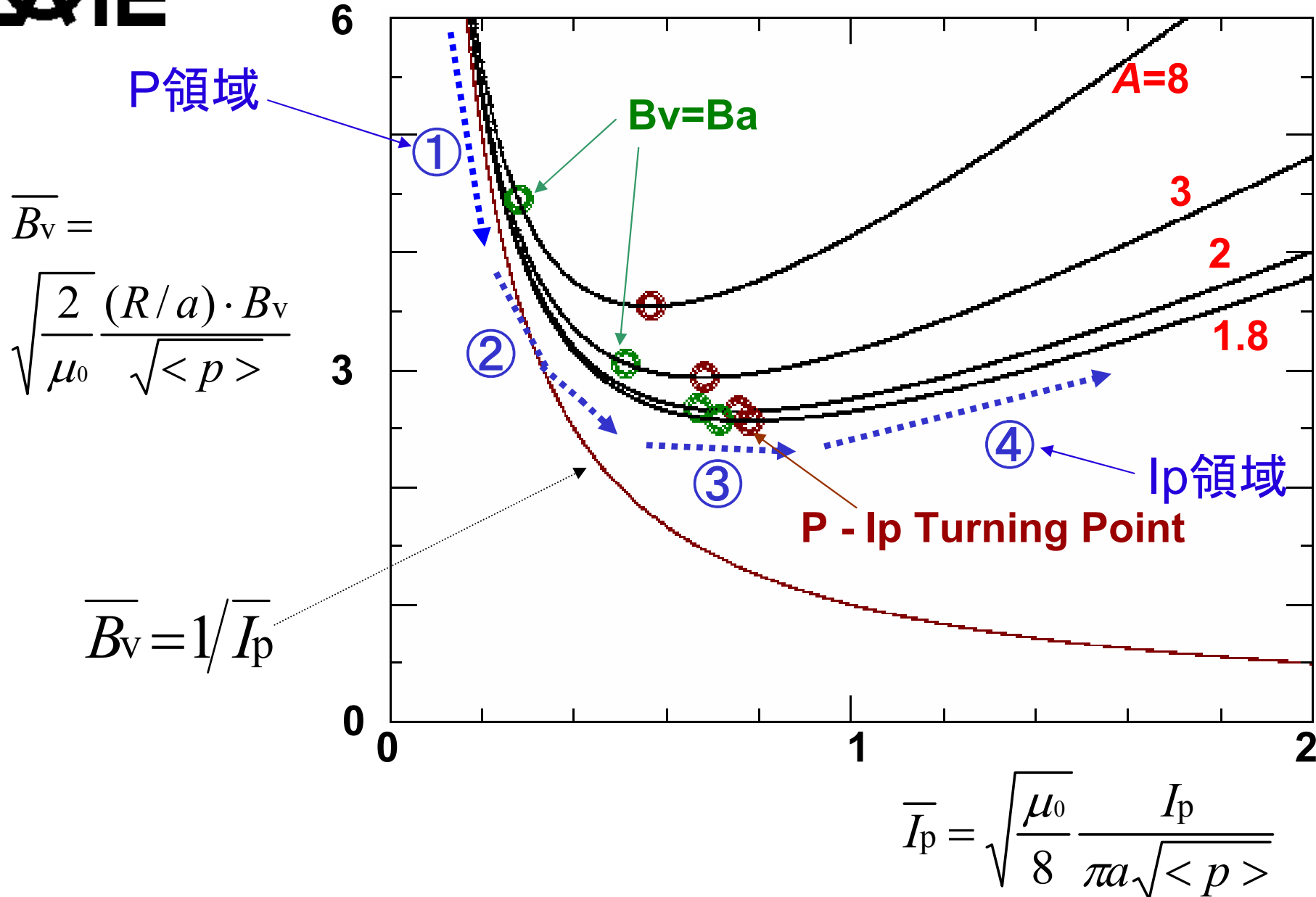


電流分布の強磁場側への拡大 (2.45GHz 5 kW experiment)





Bv=Ba point approaches to P - Ip Turning Point as the aspect ratio A becomes small and the efficient current generation works to transfer plasma equilibrium through ③.





まとめ

- 定常垂直磁場の下でのECHにより、開いた磁場配位から、閉じた磁気面構造への自発的遷移が起こる。
- 放電初期(遷移前)において、プラズマ圧力のフープカが支配的(P領域)でプラズマ電流はプラズマ圧力によって駆動される。
- 遷移後は、プラズマ圧力に比べてプラズマ電流のフープカが支配的な領域(Ip領域)に入っている。
- P領域から Ip領域への遷移を支える電流駆動機構として、速度空間における選択的な電子の閉じ込めが考えられる。