

プラズマ・イオンビームの基礎と応用に関するスクール
2025/2/20-21理化学研究所 和光キャンパス

負イオンビームメニスカスの 外場応答とビーム集束性

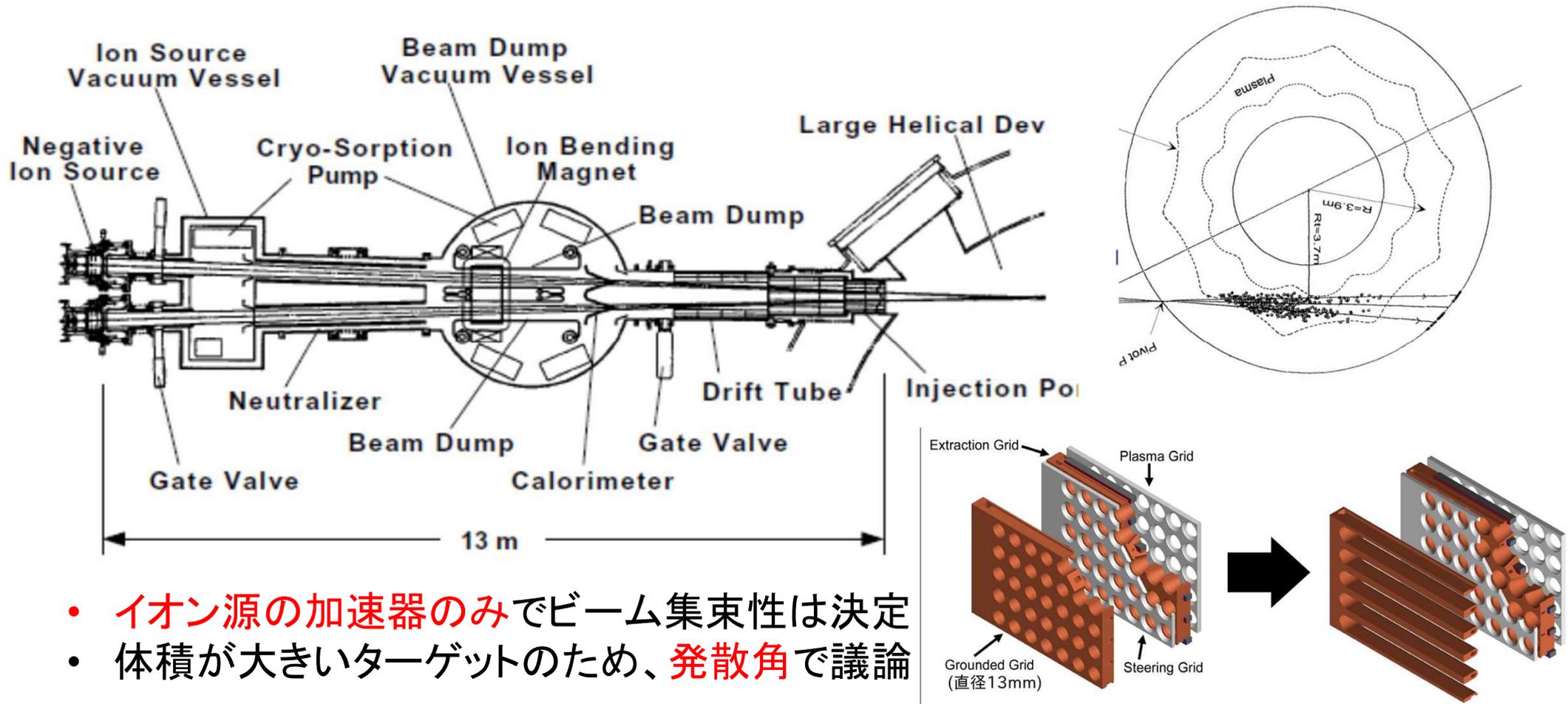
永岡賢一 核融合科学研究所 名古屋大学理学研究科
中野晴久 核融合科学研究所 名古屋大学工学研究科
長壁正樹 核融合科学研究所 総合研究大学院大学

K. Nagaoka, et al., "Response of negative ion beamlet width and axis deflection to RF field in beam extraction region", Scientific Reports, 15, 1494 (2025).

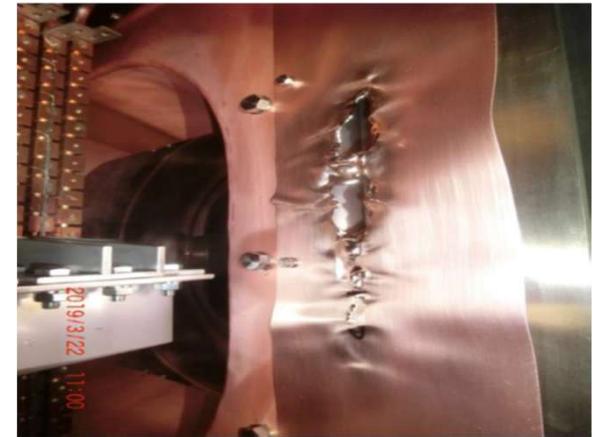
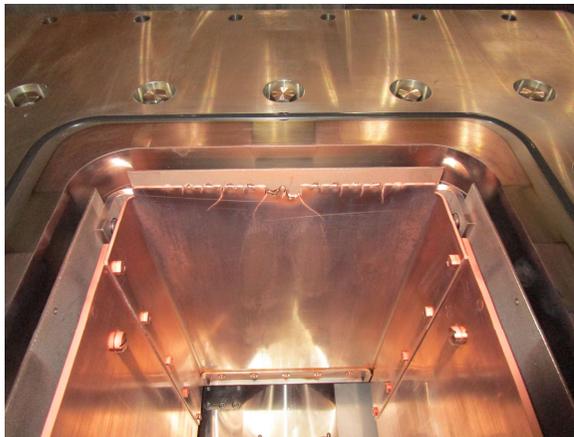
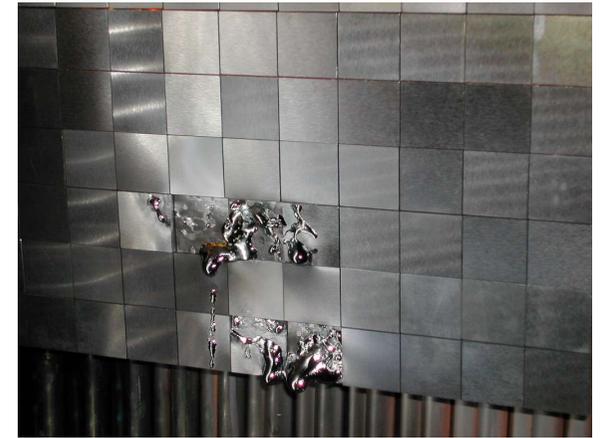
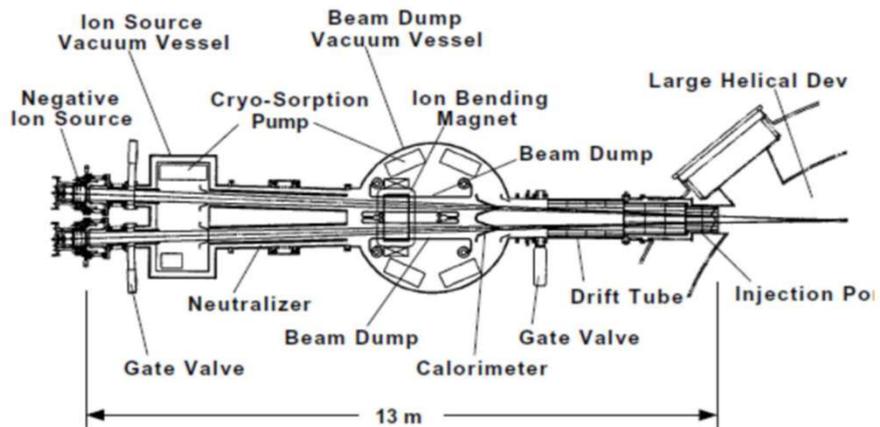
目次

1. 背景：-磁場核融合加熱ビーム集束性の課題
2. パービアンズとメニスカス
3. メニスカスの外場応答
4. 実験と結果
5. まとめ

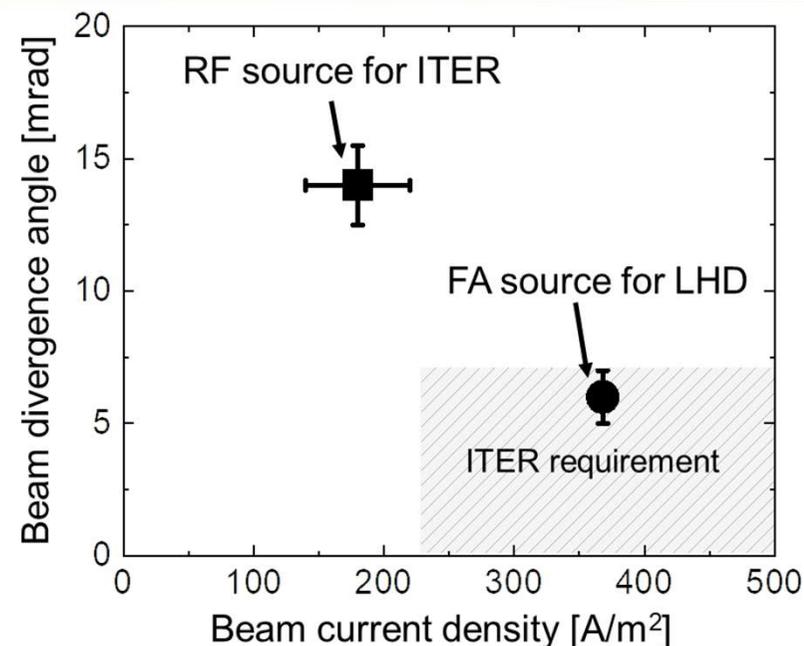
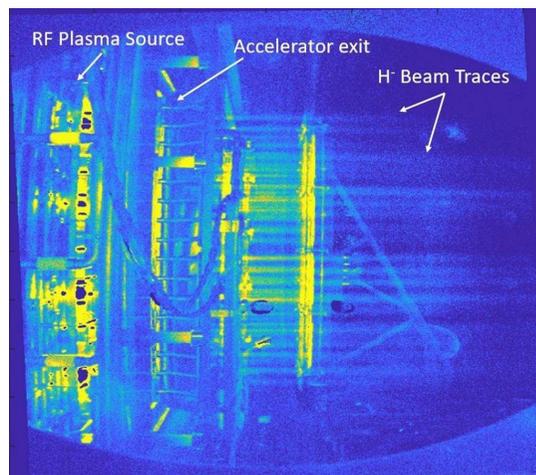
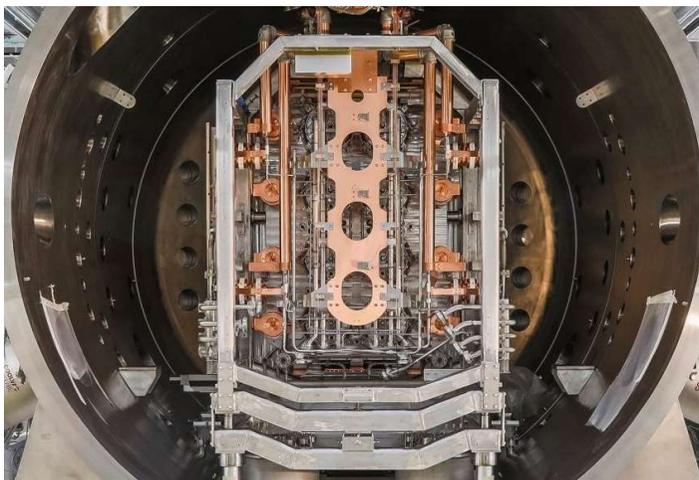
磁場核融合の加熱ビームの集束性



制御できないビームによる機器損傷



ITER-NBI開発においてもビーム集束性は重要課題



- ITER-NBIの開発は、ヨーロッパのチームを中心に進展。
- ITER用RF負イオン源の発散角は、要求値(仕様値)の2倍程度にとどまっている。一方で、LHD用FA-負イオン源のビーム集束性は良好。

RFがビーム集束性に直接影響するのか？

⇒ 負イオンメニスカスの外場応答を実験的に明らかにしたい。

目次

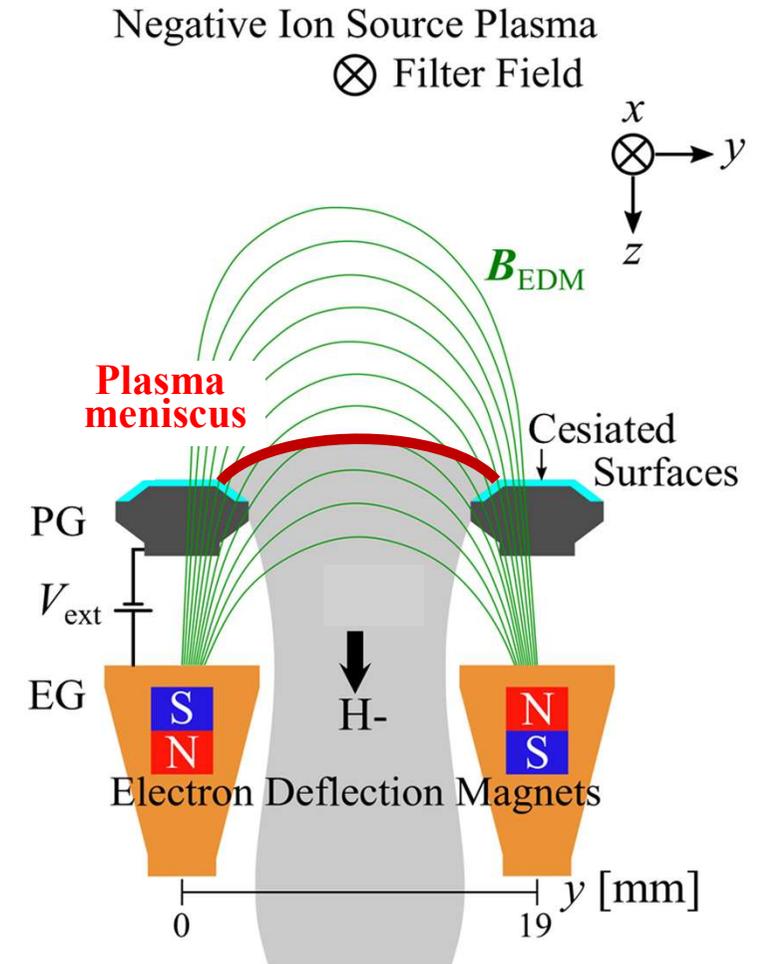
1. 背景：-磁場核融合加熱ビーム集束性の課題
2. パービアンズとメニスカス
3. メニスカスの外場応答
4. 実験と結果
5. まとめ

パービアンスと負イオンメニスカス

メニスカスは、ビーム加速の初段の静電レンズ。パービアンスは、メニスカス形成を決定するパラメータ;

$$w = w(\text{perveance})$$

$$\text{where perveance} = \frac{J_{\text{beam}}}{V_{\text{ext}}^{3/2}} \sim \frac{\text{Shielding}}{\text{Penetration}}$$

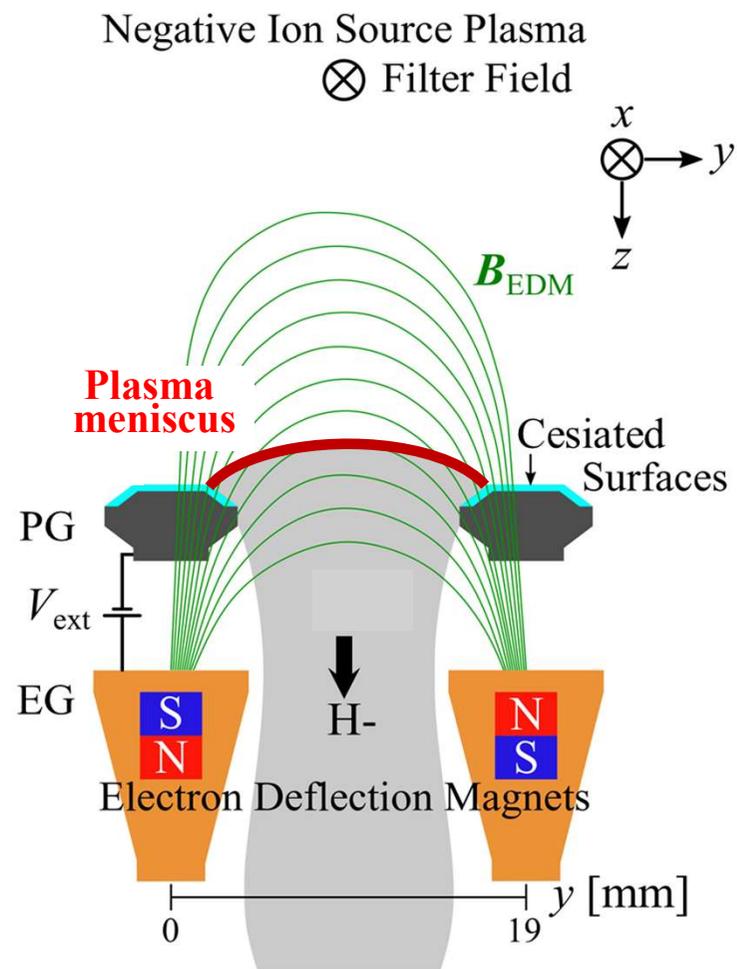
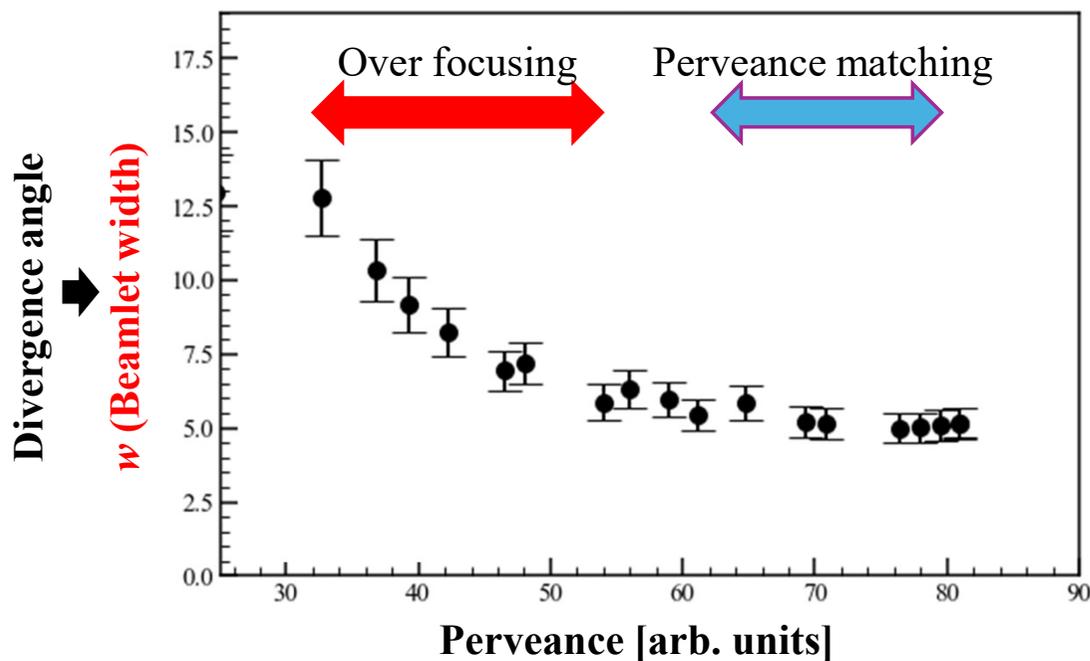


パービアンスと負イオンメニスカス

メニスカスは、ビーム加速の初段の静電レンズ。パービアンスは、メニスカス形成を決定するパラメータ;

$$w = w(\text{perveance})$$

$$\text{where perveance} = \frac{J_{\text{beam}}}{V_{\text{ext}}^{3/2}} \sim \frac{\text{Shielding}}{\text{Penetration}}$$



目次

1. 背景：-磁場核融合加熱ビーム集束性の課題
2. パービアンズとメニスカス
3. **メニスカスの外場応答**
4. 実験と結果
5. まとめ

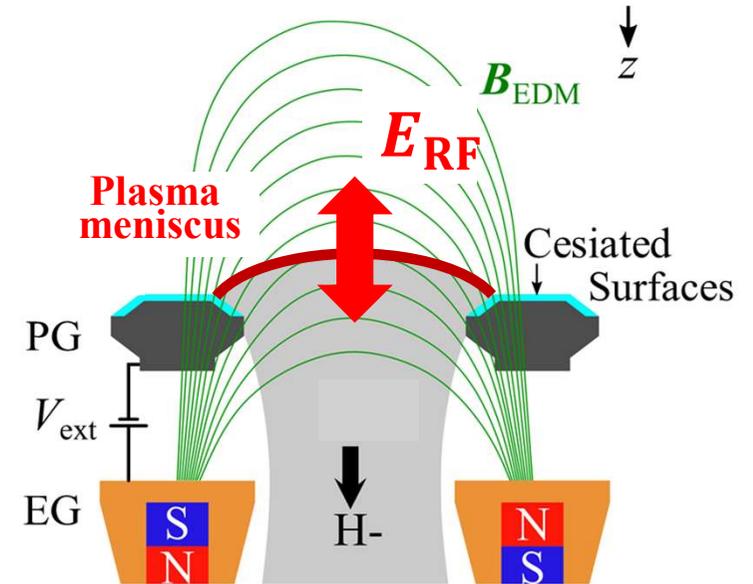
メニスカスの外場応答

仮説:

RF電場は、メニスカスに直接影響を与える。

パービアンズとRF電場の摂動でメニスカスが決まる。

$$\begin{aligned} w &= w(\text{perv.} + \alpha \tilde{E}_{\text{RF}}) \\ &= \langle w \rangle + \tilde{w} \\ &= \langle w(\text{Perv.}) \rangle + \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial \text{Perv.}} \cdot (\alpha \tilde{E}_{\text{RF}}) \end{aligned}$$



メニスカスの外場応答

仮説:

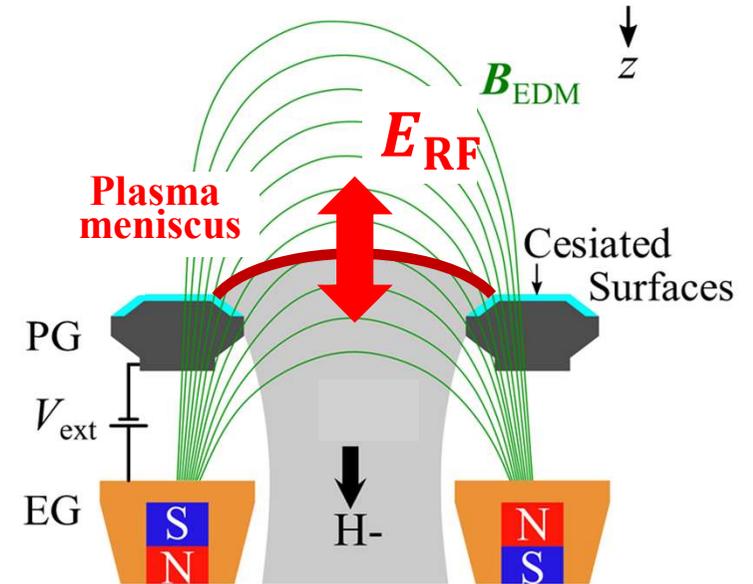
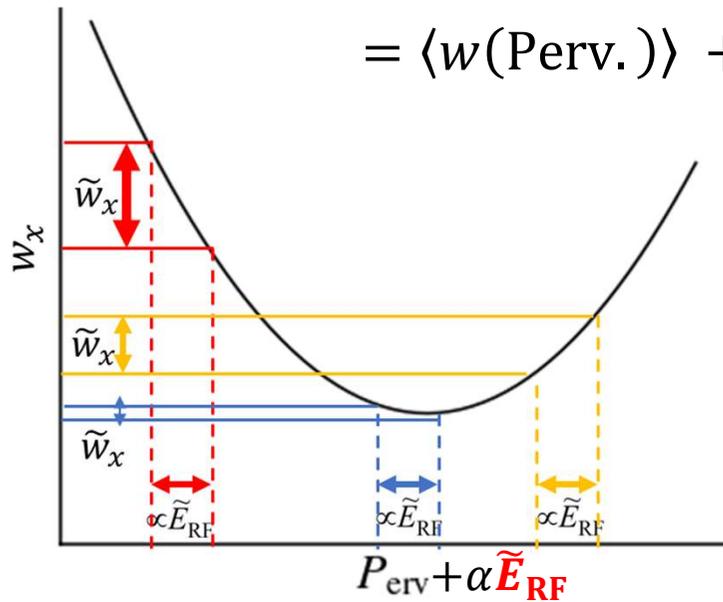
RF電場は、メニスカスに直接影響を与える。

パービアンスとRF電場の摂動でメニスカスが決まる。

$$w = w(\text{perv.} + \alpha \tilde{E}_{\text{RF}})$$

$$= \langle w \rangle + \tilde{w}$$

$$= \langle w(\text{Perv.}) \rangle + \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial \text{Perv.}} \cdot (\alpha \tilde{E}_{\text{RF}})$$

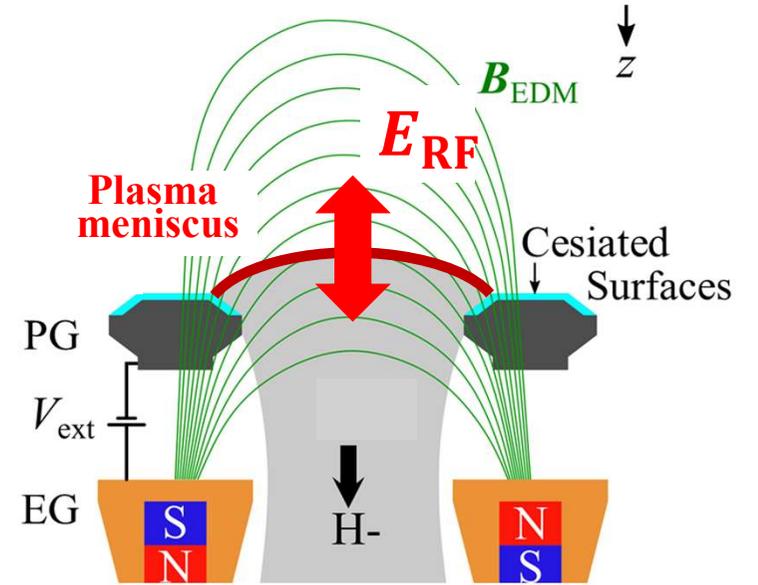
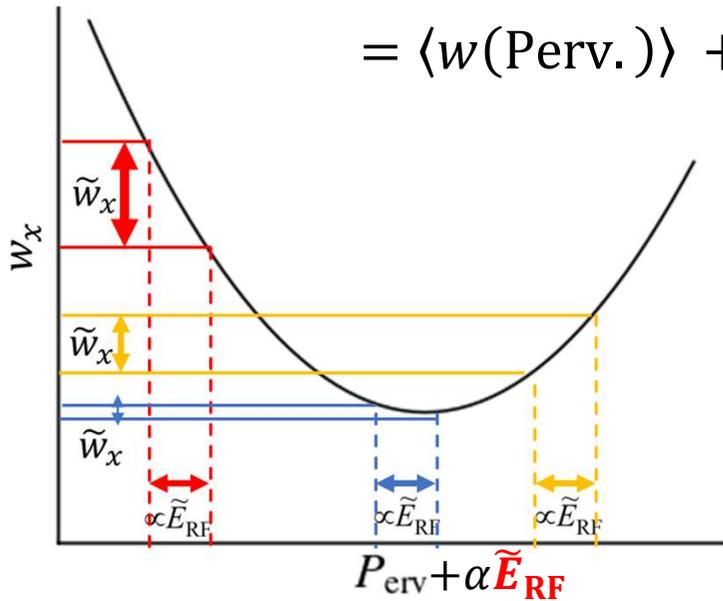


メニスカスの外場応答

仮説:

RF電場は、メニスカスに直接影響を与える。
 パービアンズとRF電場の摂動でメニスカスが決まる。

$$\begin{aligned}
 w &= w(\text{perv.} + \alpha \tilde{E}_{\text{RF}}) \\
 &= \langle w \rangle + \tilde{w} \quad \textcircled{1} \\
 &= \langle w(\text{Perv.}) \rangle + \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial \text{Perv.}} \cdot (\alpha \tilde{E}_{\text{RF}}) \quad \textcircled{2}
 \end{aligned}$$



実験検証;

- メニスカスの応答をビームレット挙動から評価 $\textcircled{1}$
- 3つのステップで実験観測を整理

$$\tilde{w} \propto \tilde{E}_{\text{RF}} \quad \textcircled{2}$$

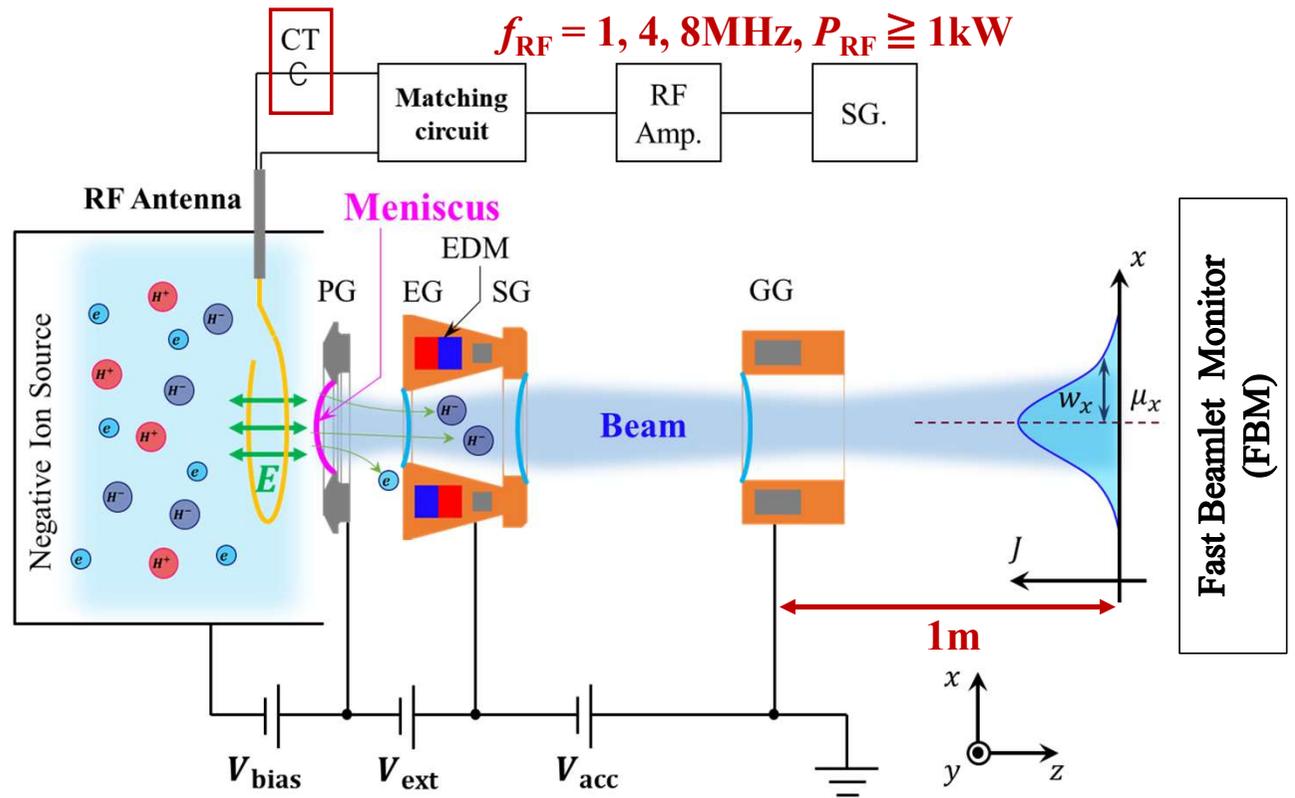
$$\tilde{w} \propto \frac{\partial \langle w \rangle}{\partial \text{Perv.}} \quad \textcircled{3}$$

目次

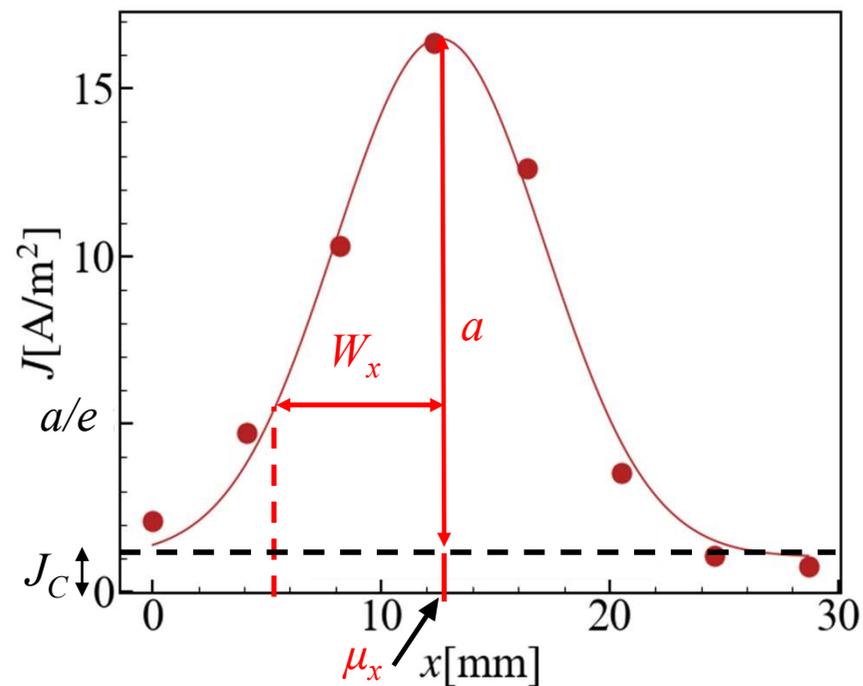
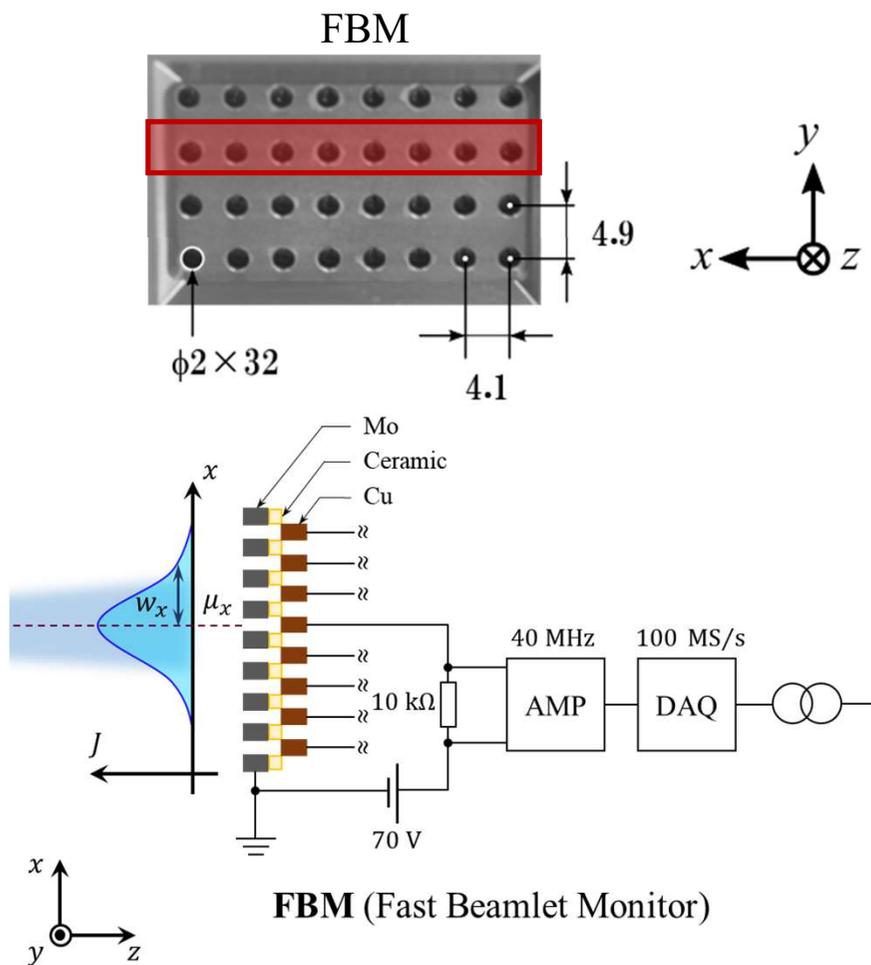
1. 背景：-磁場核融合加熱ビーム集束性の課題
2. パービアンズとメニスカス
3. メニスカスの外場応答
4. 実験と結果
5. まとめ

Overview of the Experimental Setup

RF Antenna

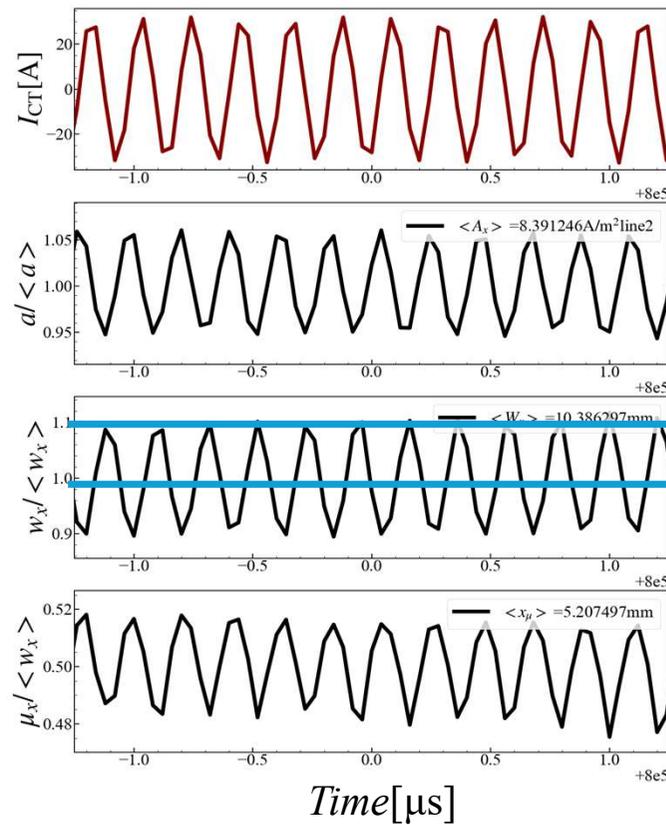
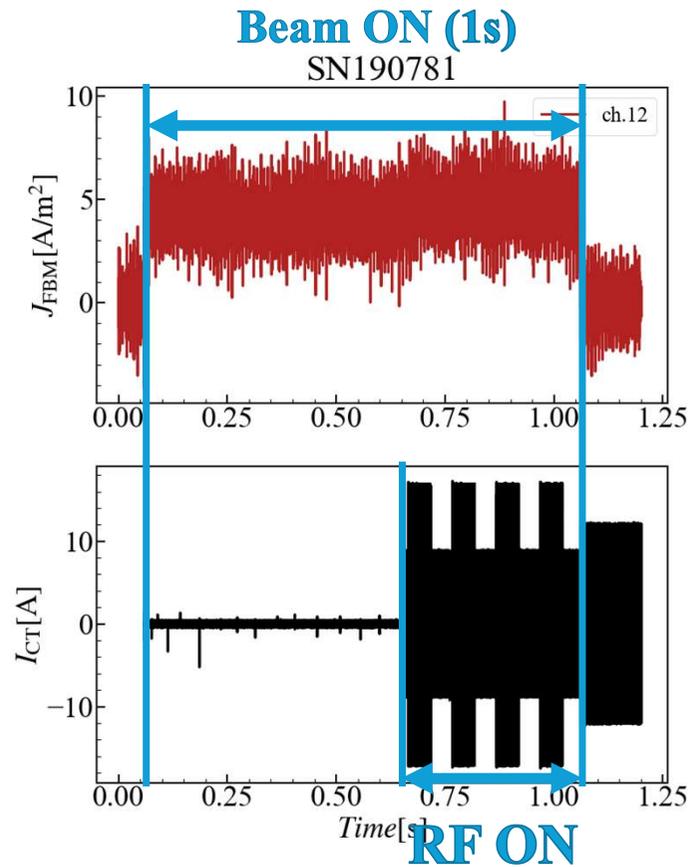


Fast Beamlet Monitor



$$J(x) = a \exp \left[- \left(\frac{x - \mu_x}{w_x} \right)^2 \right] + J_c$$

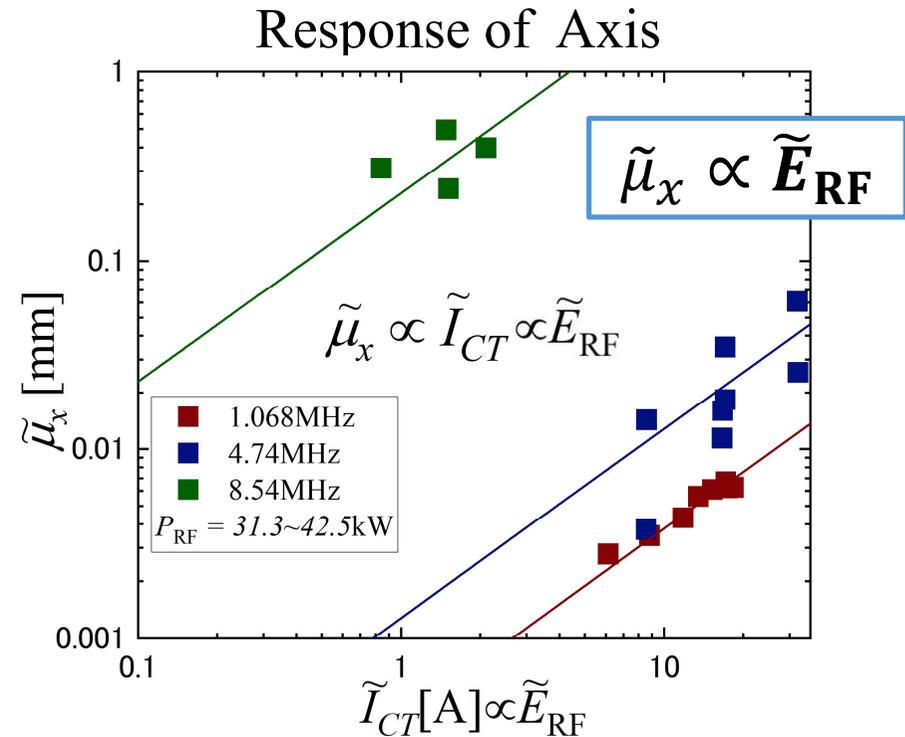
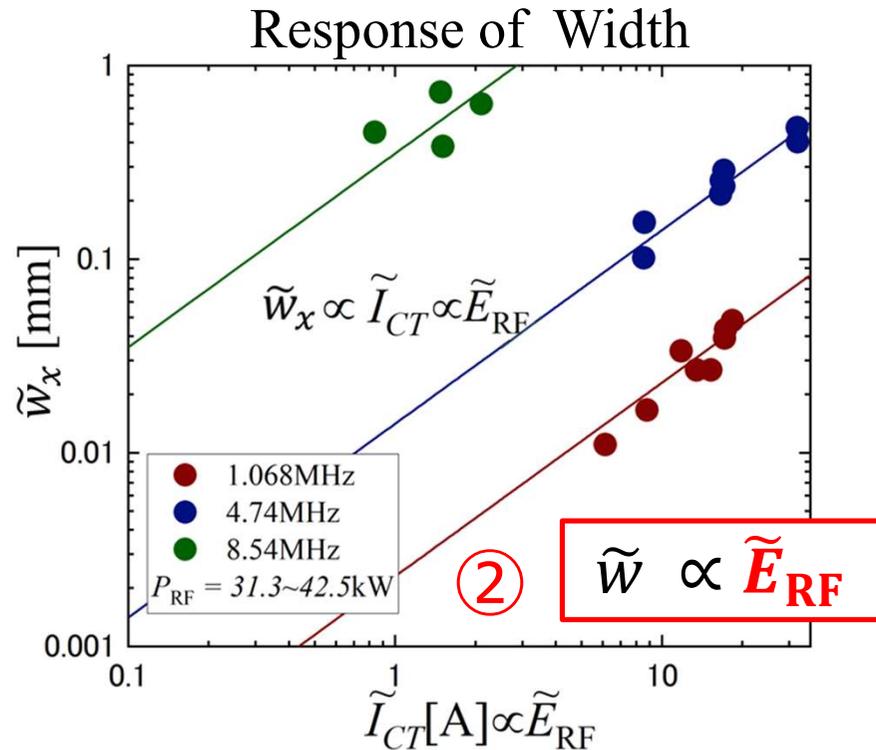
Beamlet Responses to RF Electric Field



①

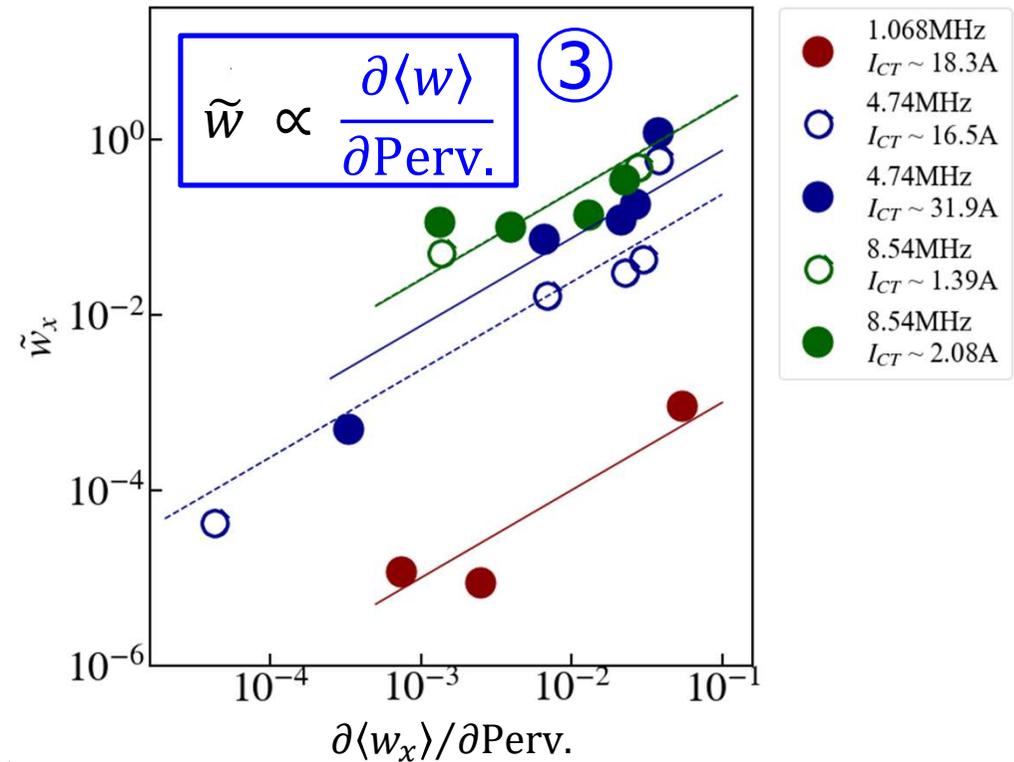
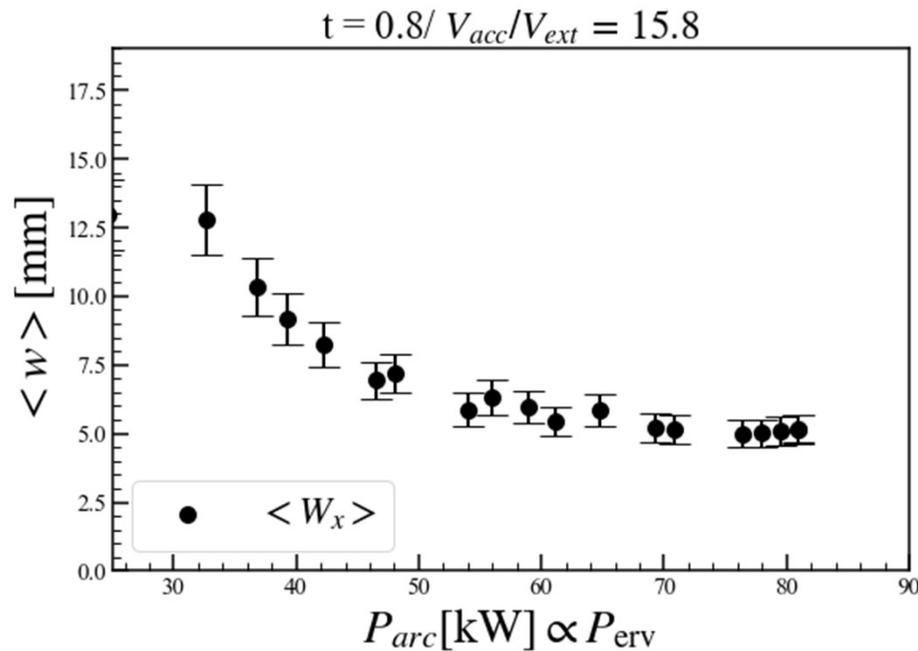
RF electric field may cause the degradation of the beamlet focusing.

RF Power Dependence



- The responses of the beamlet width is **proportional to RF electric field**.
- A similar response can be seen in the **responses of beamlet axis position**.
- The **lower the RF frequency**, the **smaller the response** of the beamlet.

Perveance dependence



- Perveance dependence was investigated.
- Oscillation amplitude of the beamlet width is almost proportional to the gradient of perveance curve

まとめ

1. イオンビーム集束性は、磁場閉じ込め核融合でも重要課題。負イオンメニスカスの外場応答を調べた。
2. 高周波電場に応答するビーム挙動を観測
3. パービアン依存性で実験観測は理解可能
4. 周波数依存性も観測

今後の課題

- ・ITERのRF負イオン源での検証
- ・正・負メニスカスの外場応答の違い