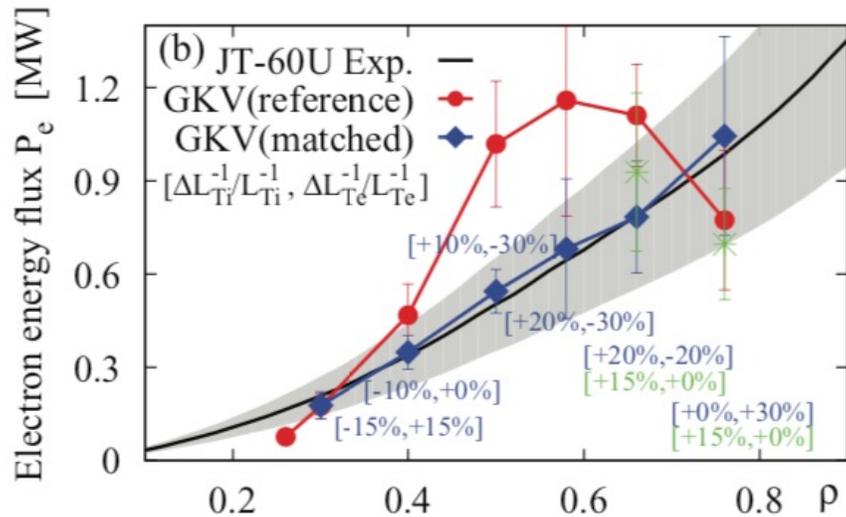


# 定量プラズマ乱流輸送物理 の創設

小林達哉

謝辞：次期計画検討における仲田資季様，永岡賢一様，徳澤季彦様，井戸毅様(九大)をはじめとする多くの方々との議論に基づく内容です。

# 一般的な乱流輸送研究の現状

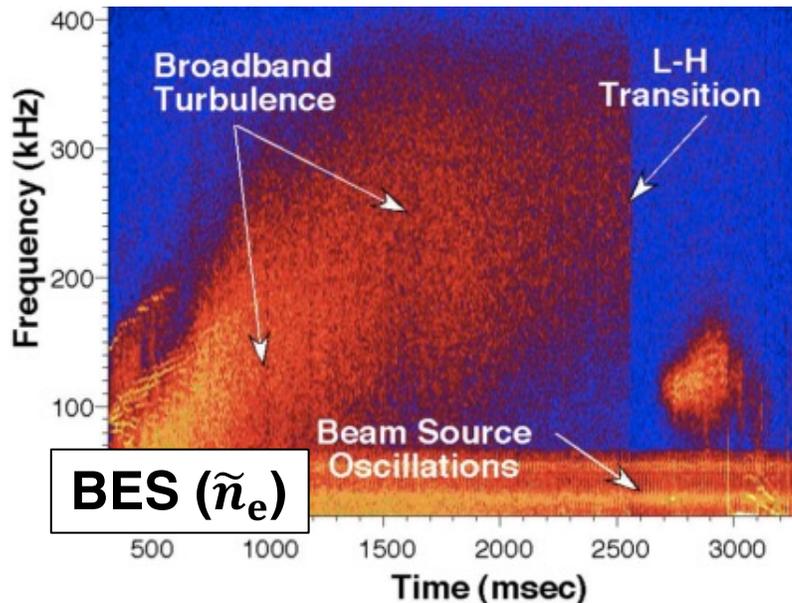


Nakata+, Nucl. Fusion **56** 086010 (2016)

- 定常状態の保存則を基に輸送を評価

$$\cancel{\frac{3}{2} \frac{\partial nT}{\partial t}} = -\frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial r} (V' q) + P$$

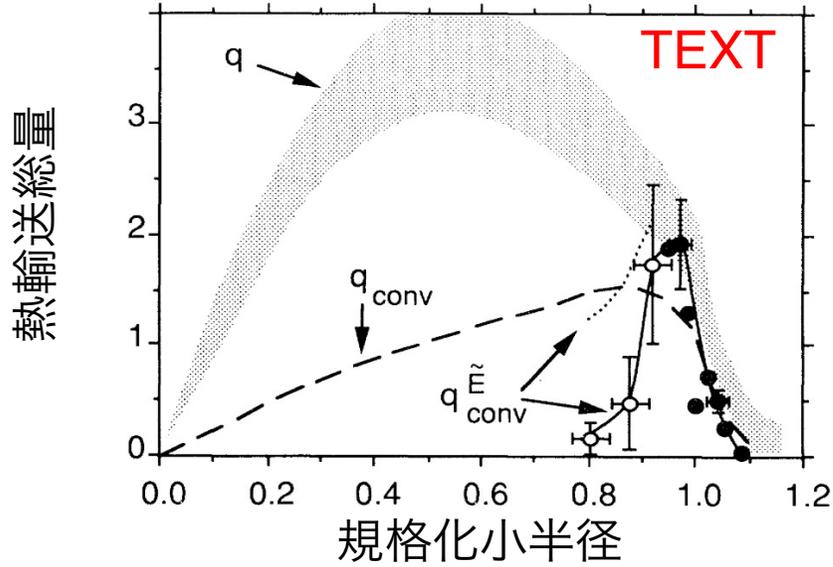
- 輸送を担う乱流の性質を実験的に同定できない
- シミュレーションの結果と比較して乱流の性質を議論 (帰納的アプローチ)



McKee+, Plasma Fusion Res. **2** S1025 (2007)

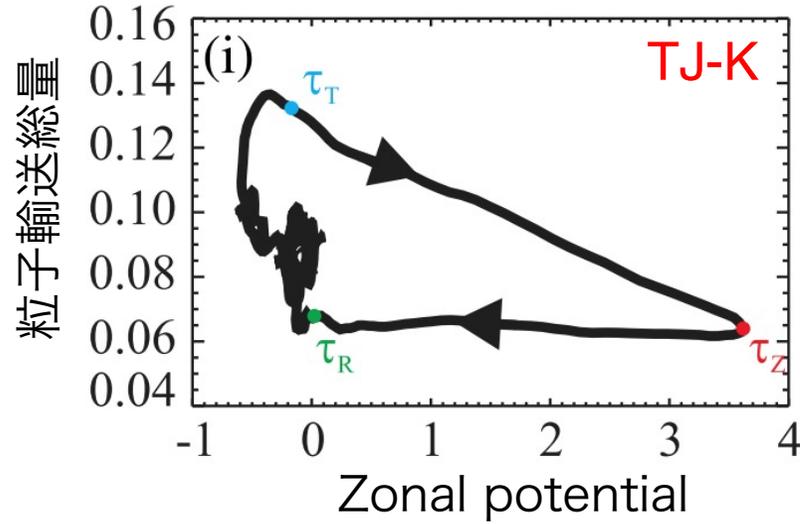
- 多くの場合密度揺動が「乱流」の近似値とされる
- 密度揺動が  $q \propto \langle nT\phi \rangle$  をよく表すかは自明でない
- 乱流輸送研究に未解決の問題が多く残されている根本的な原因 (局所 vs 非局所, LH遷移における帯状流の役割, 同位体効果, etc.)

# 乱流輸送の直接計測の例



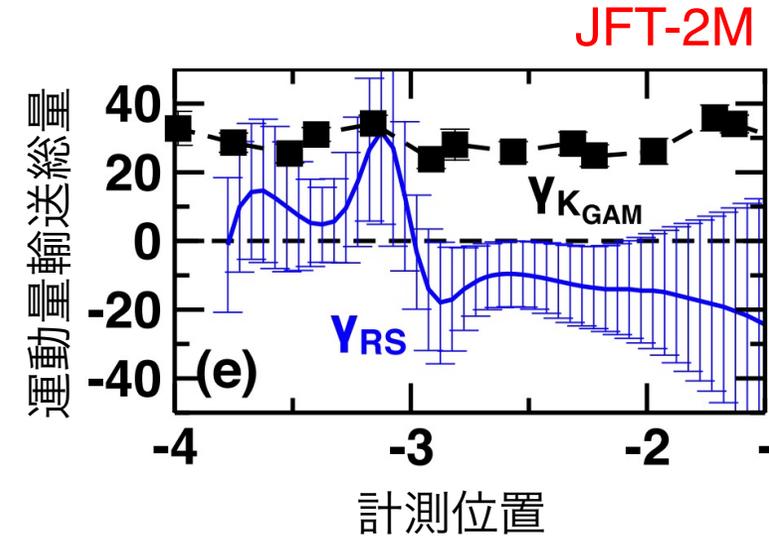
Ritz+, Phys. Rev. Lett. **62** 1844 (1989)

➤ 周辺で対流輸送が支配的



Birkenmeier+, Phys. Rev. Lett. **110** 145004 (2013)

➤ 帯状流が総輸送を抑制



Kobayashi+, Phys. Rev. Lett. **120** 045002 (2018)

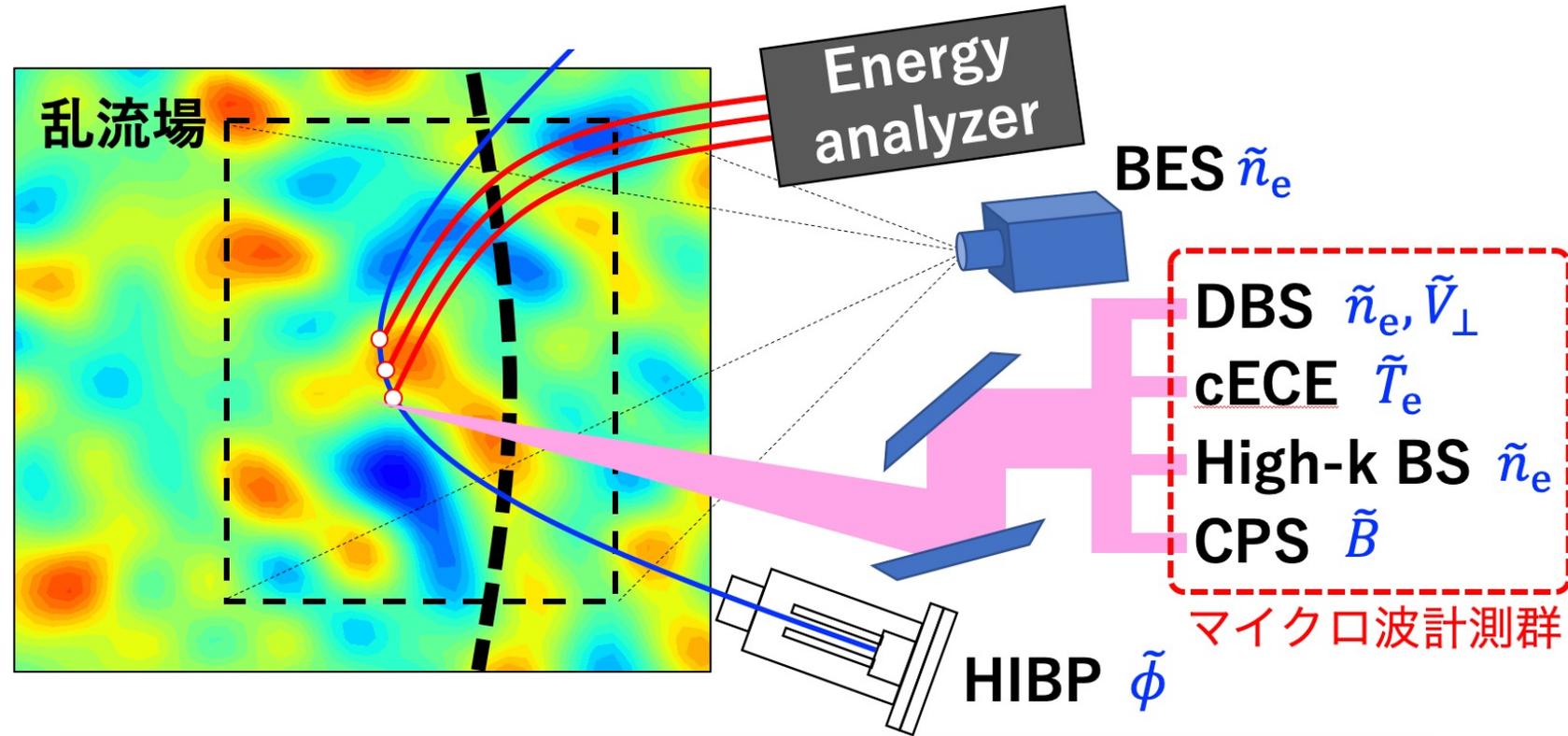
➤ ドリフト波が帯状流をレイノルズ応力を介して励起

• これまでは限られた条件でしか実現しなかった

• 系統的に取り組めば、数々の未解決課題に回答を与えることが可能

# 研究方法：異種計測器連携による輸送の定量測定

- 定量乱流輸送研究に特化した装置を、計測器群を含めて設計
- 多点同時計測で、磁気面積分した輸送量を評価
- 帯状流も同時計測可能

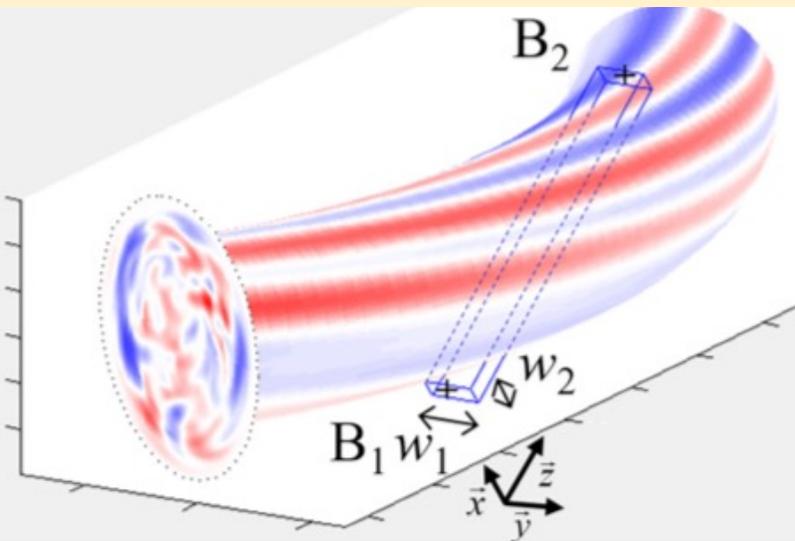


- 実機でどこまでできるかは未知数

➤ 「輸送計測の定量性」と「計測器導入の実現性」の妥協点を計測シミュレーターで探索

# 段階的アプローチ

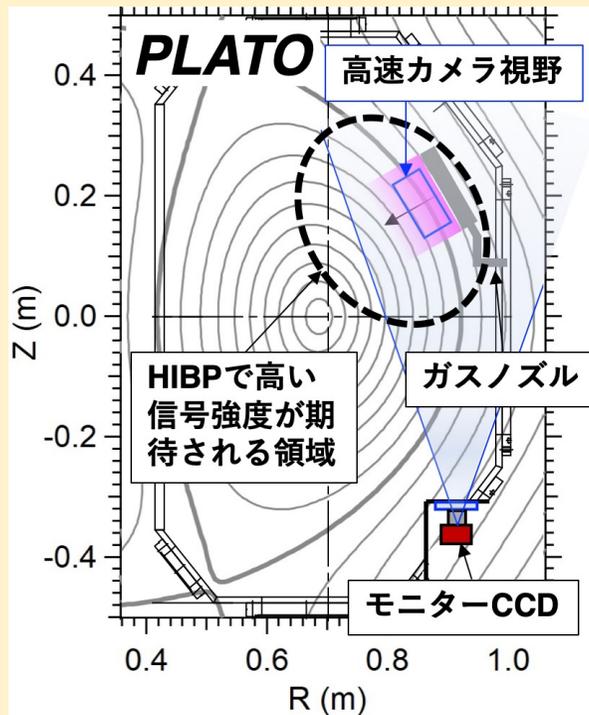
## 1. 実現可能性の検証



N. Kasuya, M. Numami+, Nucl. Fusion 58 106033 (2018)

- 計測器シミュレーターの活用
- 計測原理をシミュレーション, 得られるデータを解析→実際の輸送総量と比較

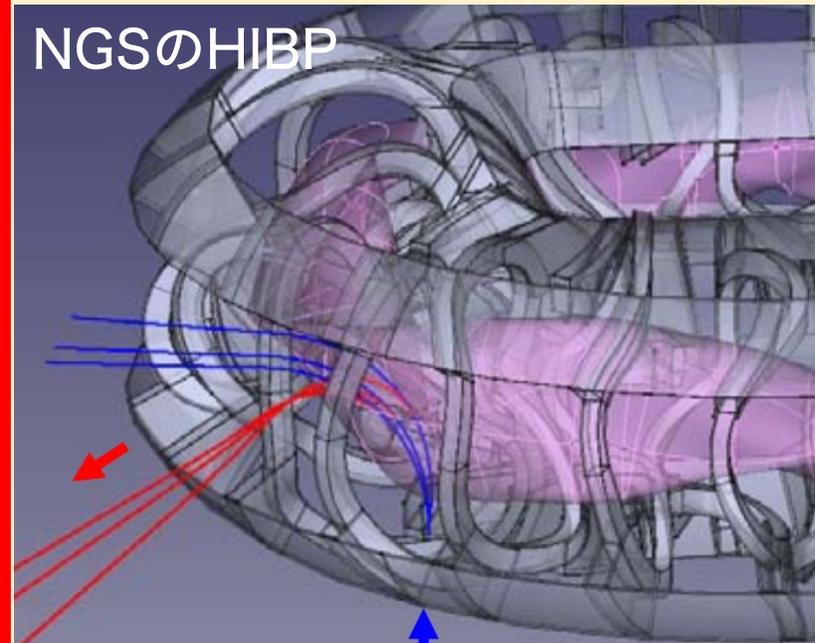
## 2. 小規模装置での実証



- 共同研究で同位置異種計測器連携を実証
- PLATO装置(九州大学)で, HIBPとガスファイブリングの連携運転を提案→**科研費採択(2021-)**

## 3. 系統的实验の立ち上げ

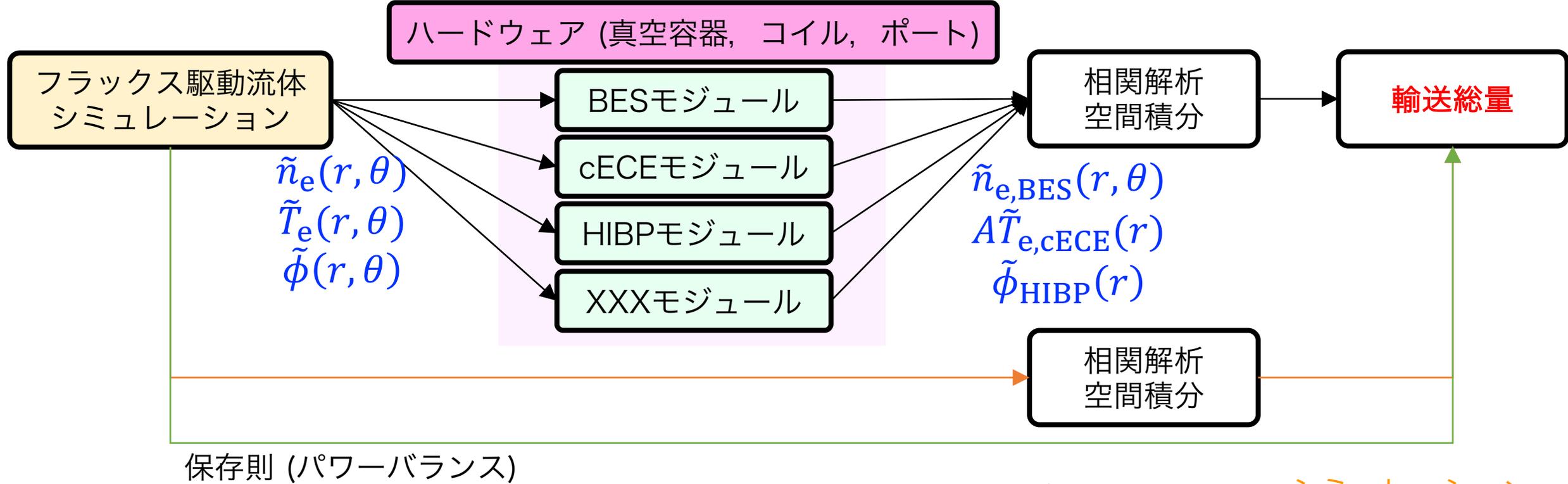
NGSのHIBP



井戸他、物理学会秋 (2020)

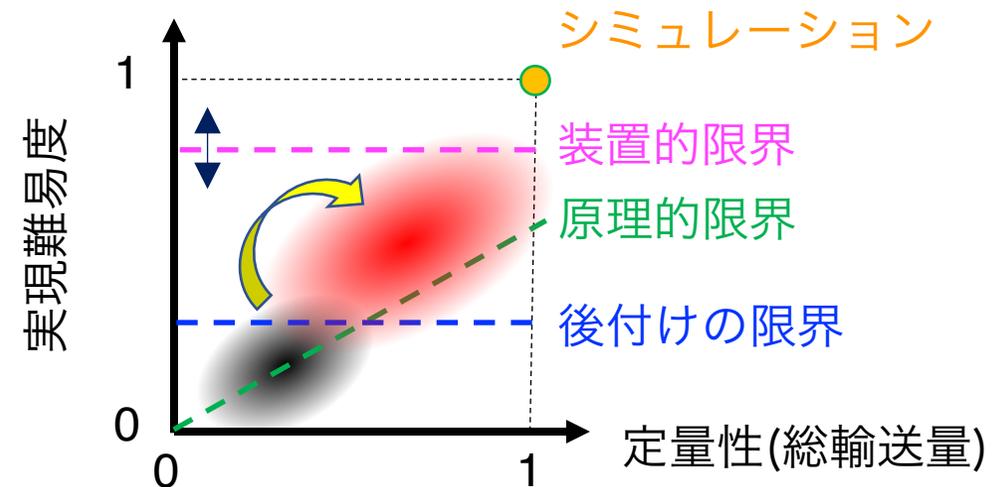
- 軸対象装置が理想
- 計測器シミュレーターでの設計を基に実機を作成
- 大型予算が必要
- 他のユニットとの連携必要

# 想定される研究活動



- 計測システムの実現性と定量性はトレードオフの関係

➤ 実現可能な定量乱流輸送物理の領域を提案



# まとめ

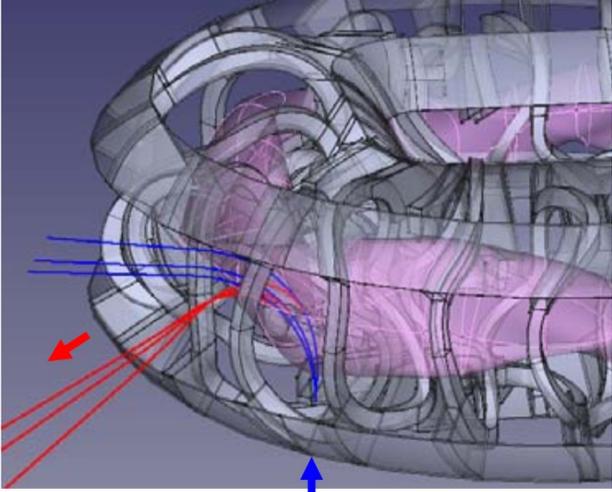
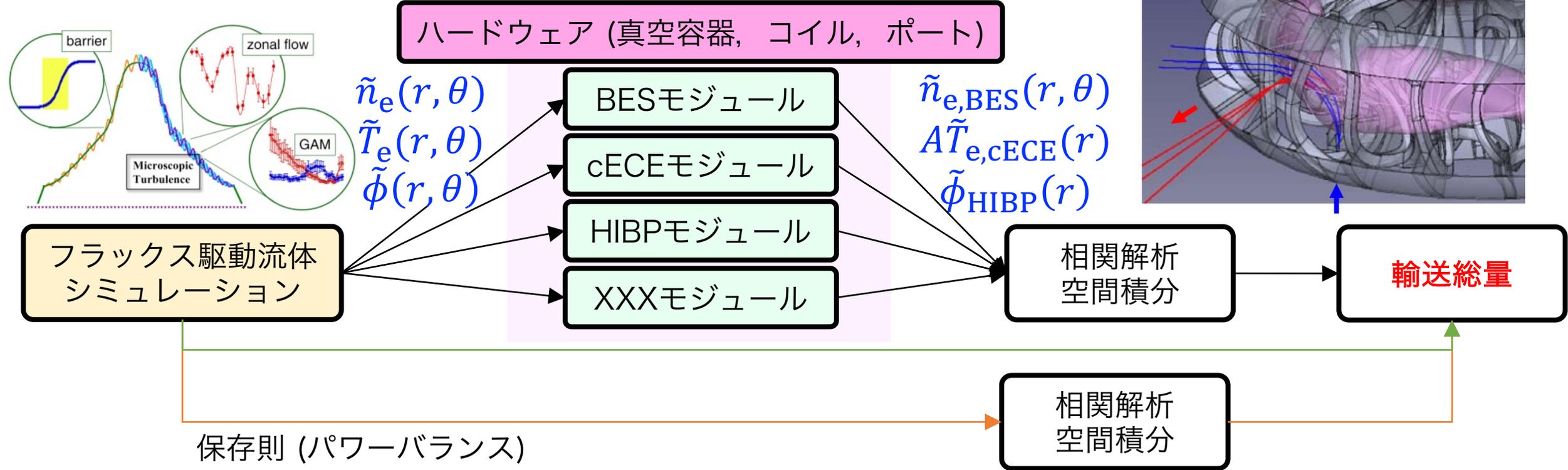
- 現在の「後付け乱流計測装置」による研究では、未解決課題を解明することは困難
- 課題解決のために必要な計測器群を導入するための実験装置を提案
- 「街灯の下で鍵を探す」状態からの脱却  
Itoh & Itoh AIP Conf. Proc. 1993, 020012 (2018)



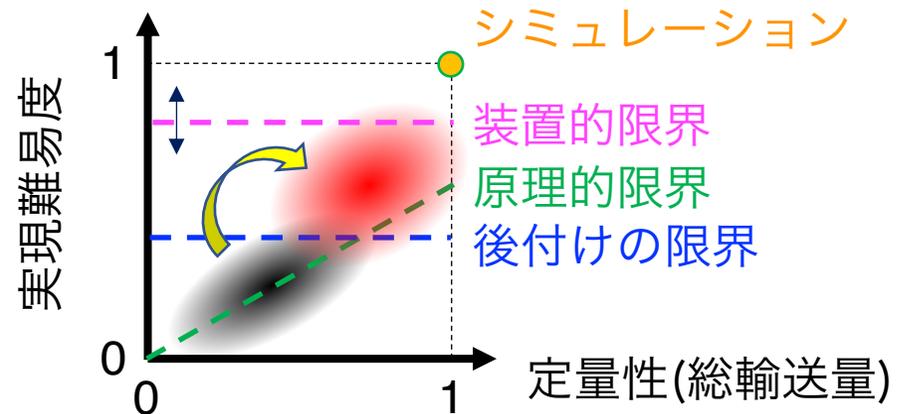
# インパクト

- 世界的潮流である装置の大型化・集中化に逆行 → 乱流物理研究者を惹きつける
- 核融合の長年の課題に回答を与えるだけでなく、非平衡開放系における構造形成機構の定量同定という新たな研究手法を与える

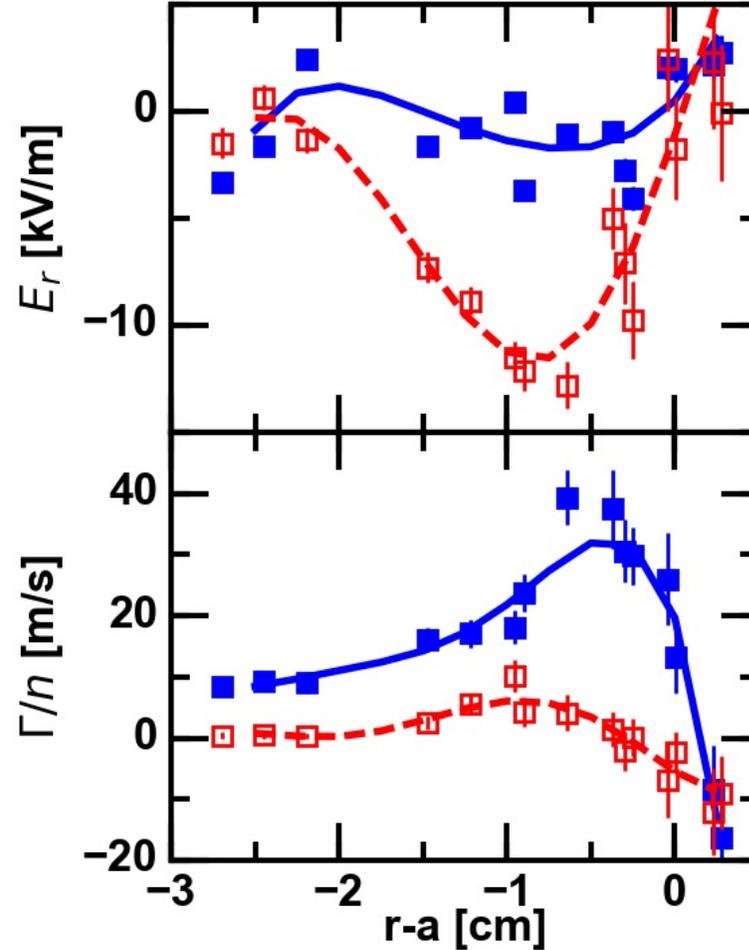
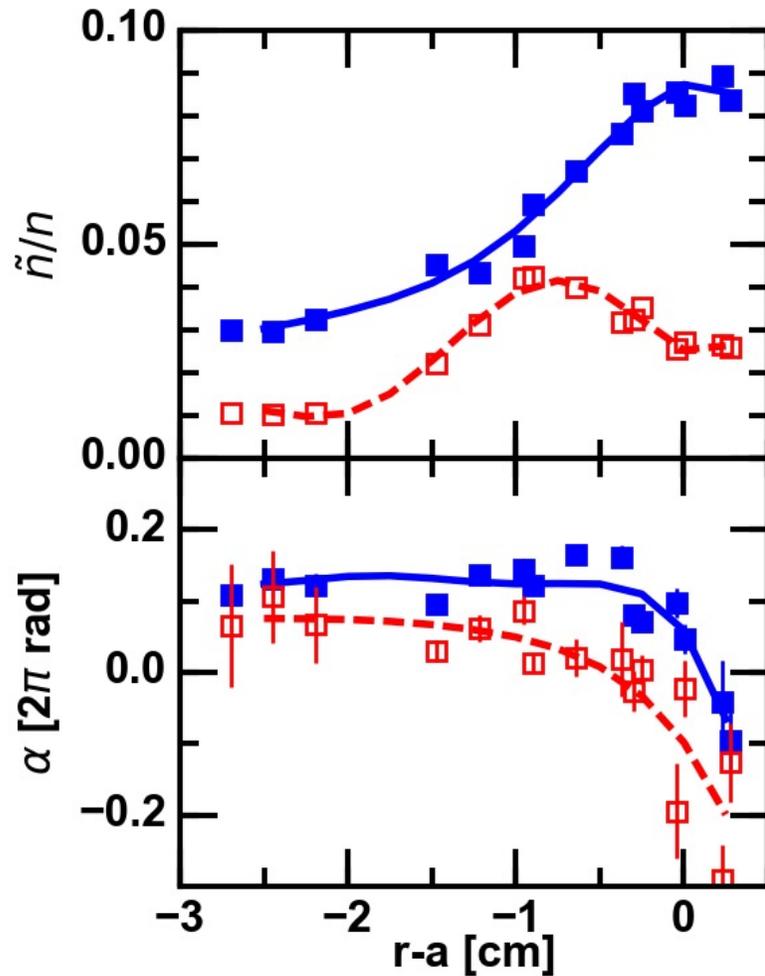
# 想定される研究活動



- 各計測器モジュールに与える制約(実現難易度)とそれによって失われる定量性を評価  
→妥協点を探る



# 定量乱流輸送研究の例1

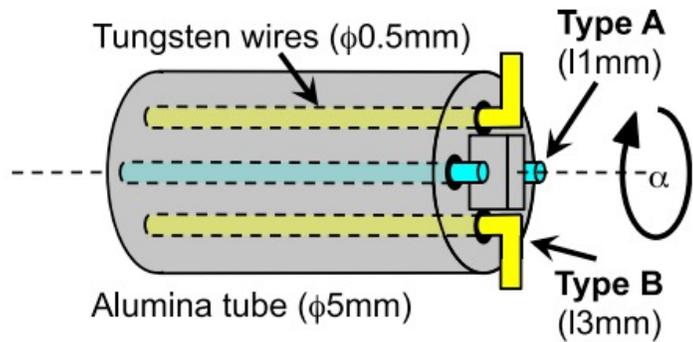
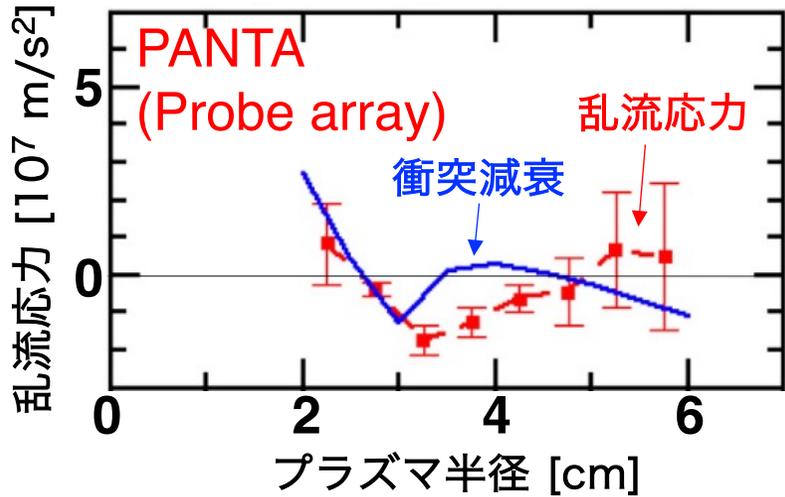


JFT-2M (HIBP)

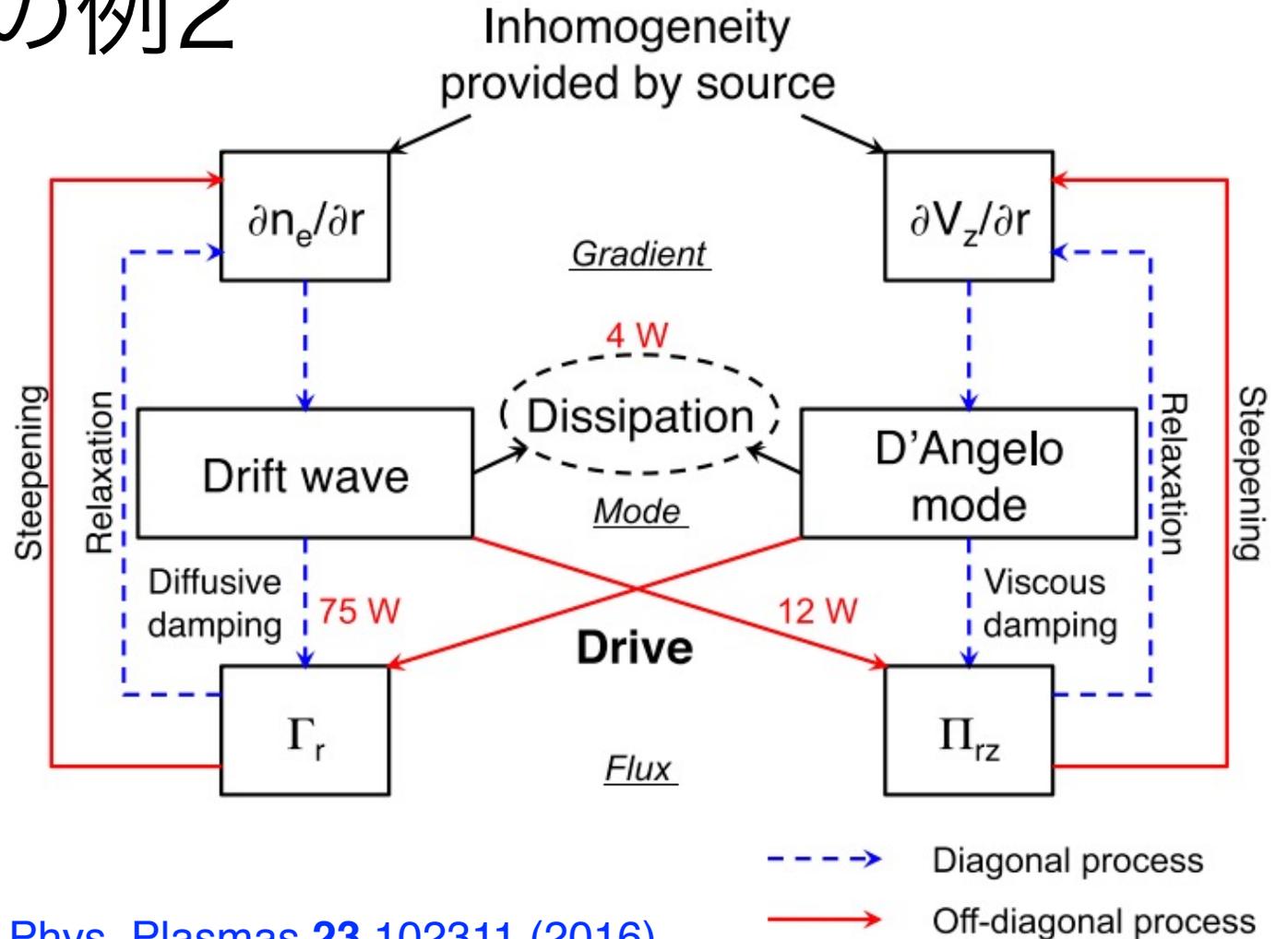
Kobayashi+, Sci. rep. 7 14971 (2017)

- LH遷移における輸送の抑制は、密度揺動減少だけでなく位相差減少によってもたらされる
  - 密度揺動だけ見ている場合、半分の定量性しか担保されない
  - ExB シアリングによる乱流振幅抑制は、現象の一面を捉えているに過ぎない

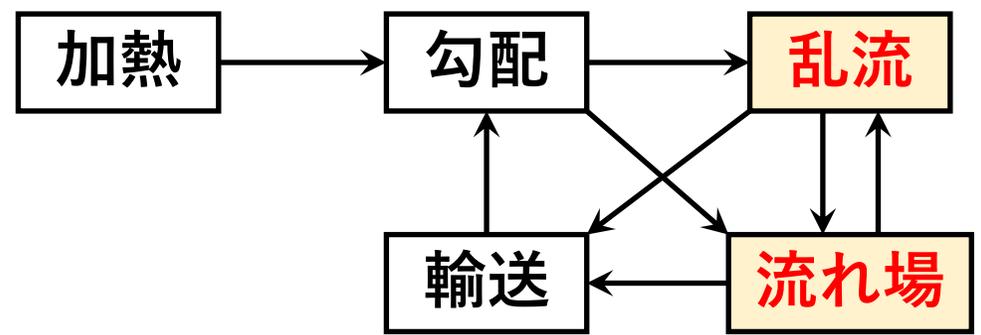
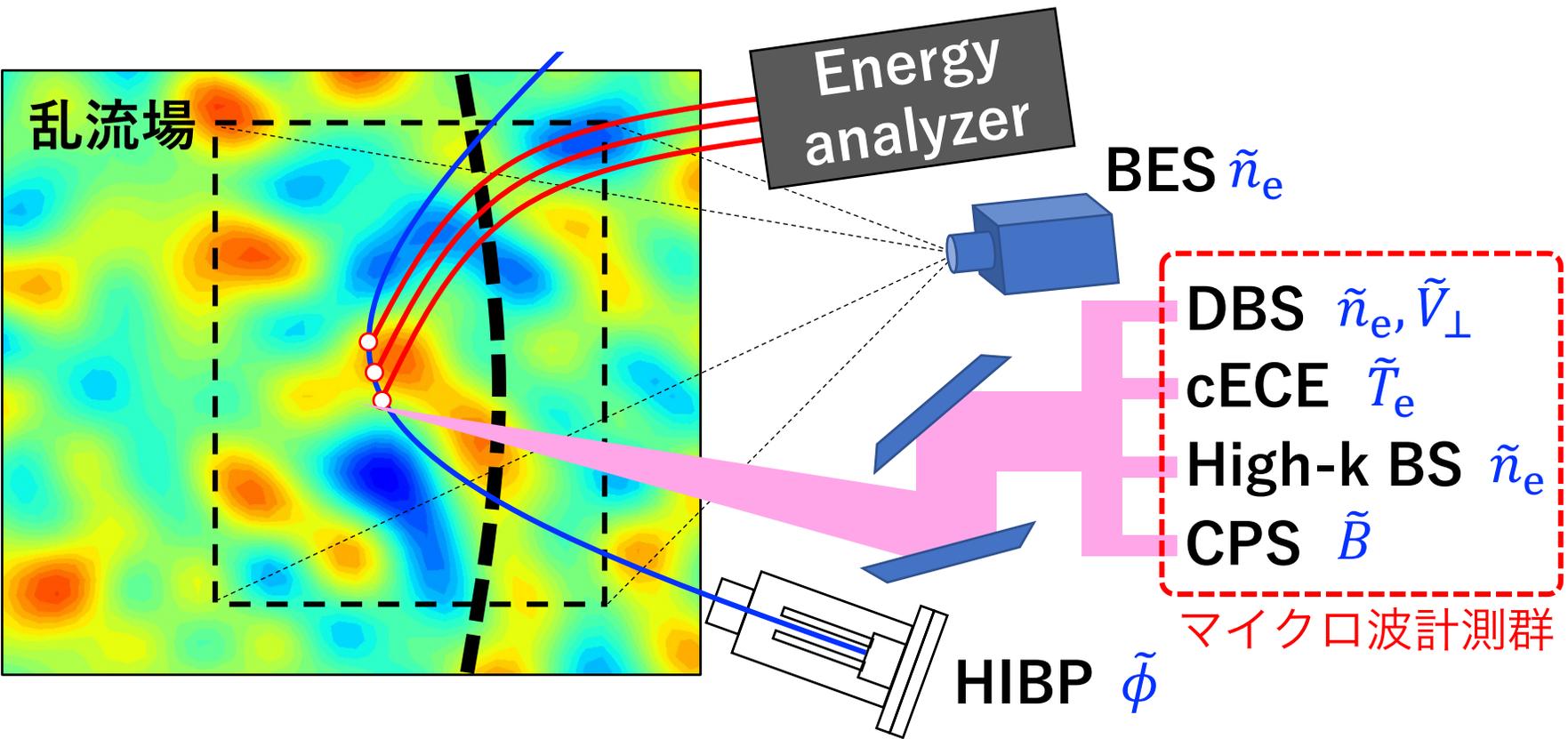
# 定量乱流輸送研究の例2



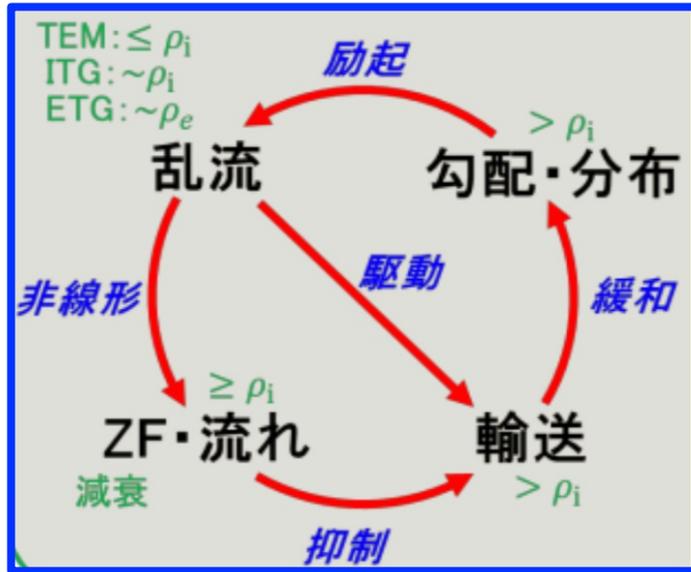
Kobayashi+, Phys. Plasmas **23** 102311 (2016)



- 乱流の励起, 非線形発展, 非対角相互作用, 分布飽和の過程を実験的に定量化
  - エネルギー散逸過程を同定
  - トーラス装置で実施すればシミュレーションとの比較が進む



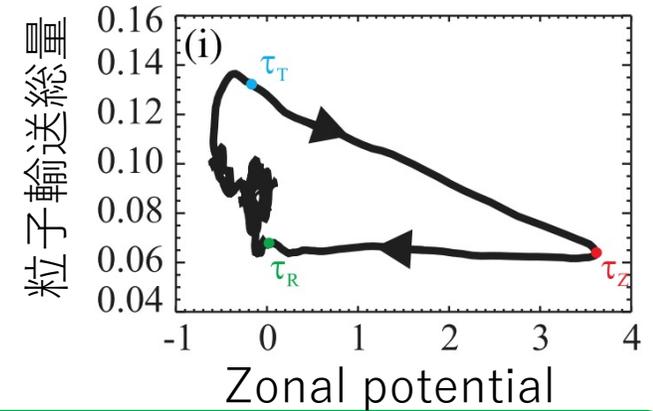
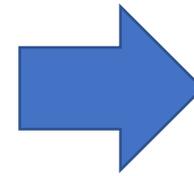
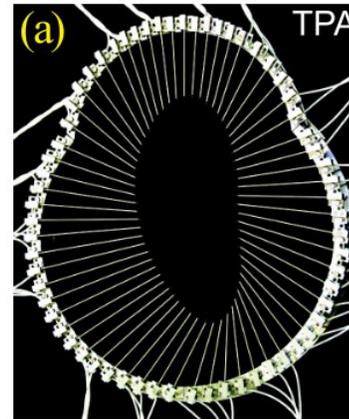
# 求められる定量性に関する考察



ZFと粒子・運動量・熱輸送総量を定量計測し、配位の最適性を議論する

例：TJ-K  
ポロイダルプローブ  
アレイで  $V_f$ ,  $I_{is}$  を計測

Birkenmeier (2013)



## 実空間領域

小半径：初期配位では乱流が強くなる領域，乱流抑制配位ではZFが現れる領域。

ポロイダル分布：乱流分布がバルーニング構造なら，低磁場側赤道面を測って  $m=1$  近似。運動量輸送はPS的に上下非対称性が鍵。

トロイダル分布：単一セクションでの値を代表値として扱えるか？

## 計測する必要のある物理量

粒子輸送・熱輸送を対象とし， $\tilde{\phi} - \tilde{n}_e$  および  $\tilde{\phi} - \tilde{T}_e$  のペアを計測，イオン系はおいおい。

# 妥当性の検証

## 実空間領域

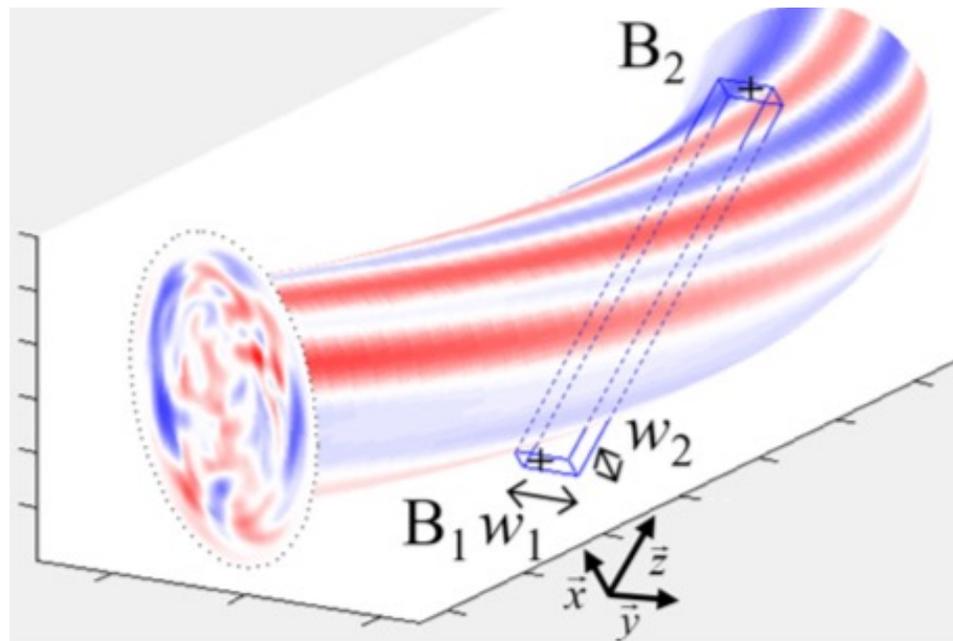
小半径：初期配位では乱流が強くなる領域，乱流抑制配位ではZFが現れる領域。

ポロイダル分布：乱流分布がバルーニング構造なら，低磁場側赤道面を測って $m=1$ 近似。運動量輸送はPS的に上下非対称性が鍵。

トロイダル分布：単一セクションでの値を代表値として扱えるか？

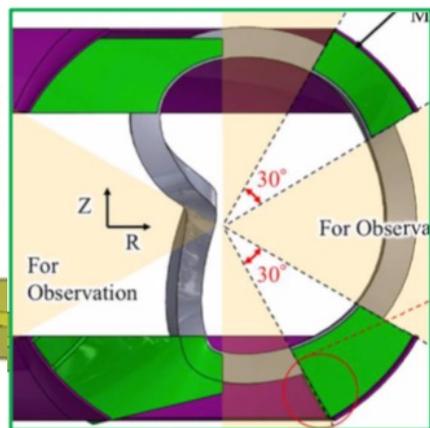
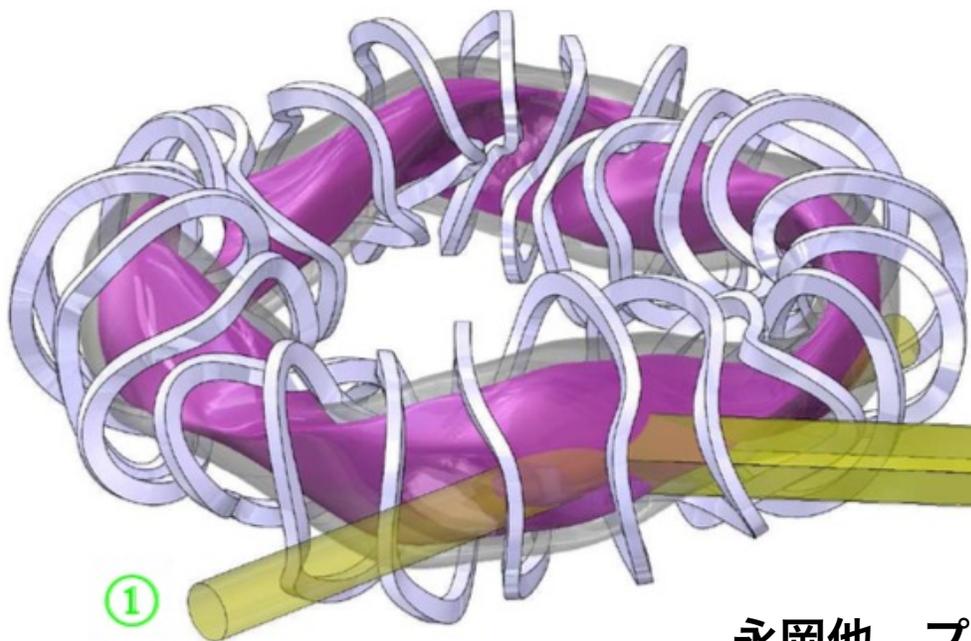
## 計測する必要がある物理量

粒子輸送・熱輸送を対象とし， $\tilde{\phi} - \tilde{n}_e$ および $\tilde{\phi} - \tilde{T}_e$ のペアを計測，イオン系はおいおい。

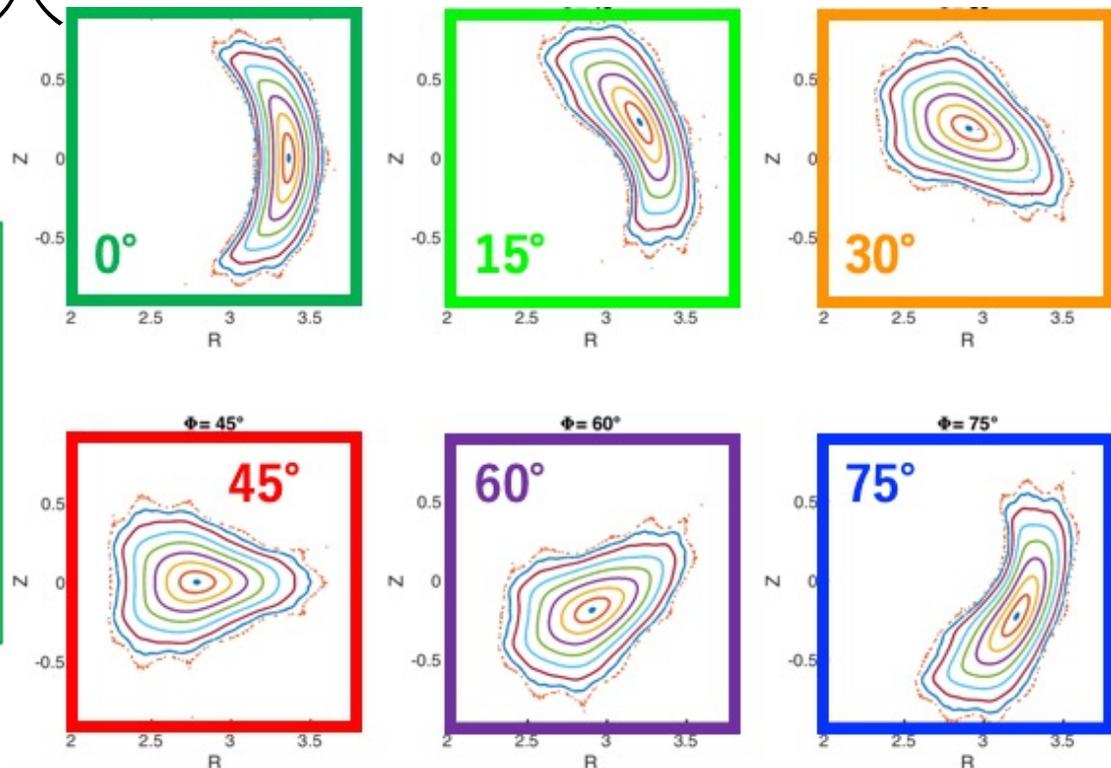


- 計測の都合から出た上記の考察は必ずしも妥当とは限らない
- 上記の考察を基に設計した計測器でどこまで定量性が出せるか検討する必要がある
- Synthetic diagnosticsの活用が鍵

# 具体的な計測器設計の現状



① 永岡他、プラ核年会 (2019)



トライアル配位 ( $R = 3 \text{ m}$ ,  $a \sim 0.4 \text{ m}$ ,  $N = 4$ ) の工学設計を基に計測器の導入を検討

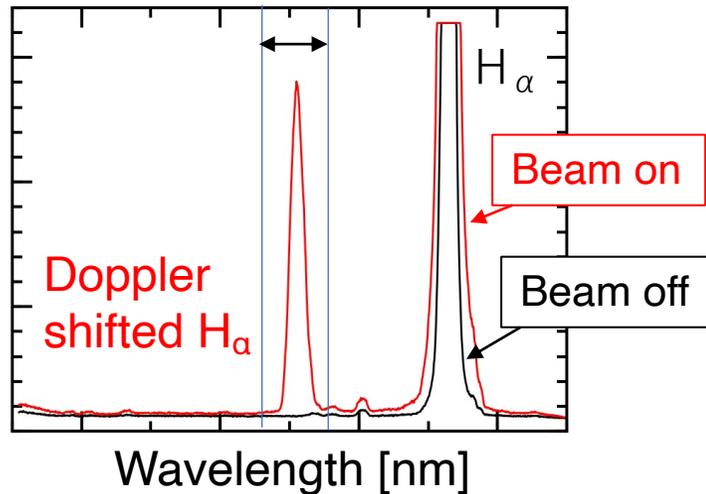
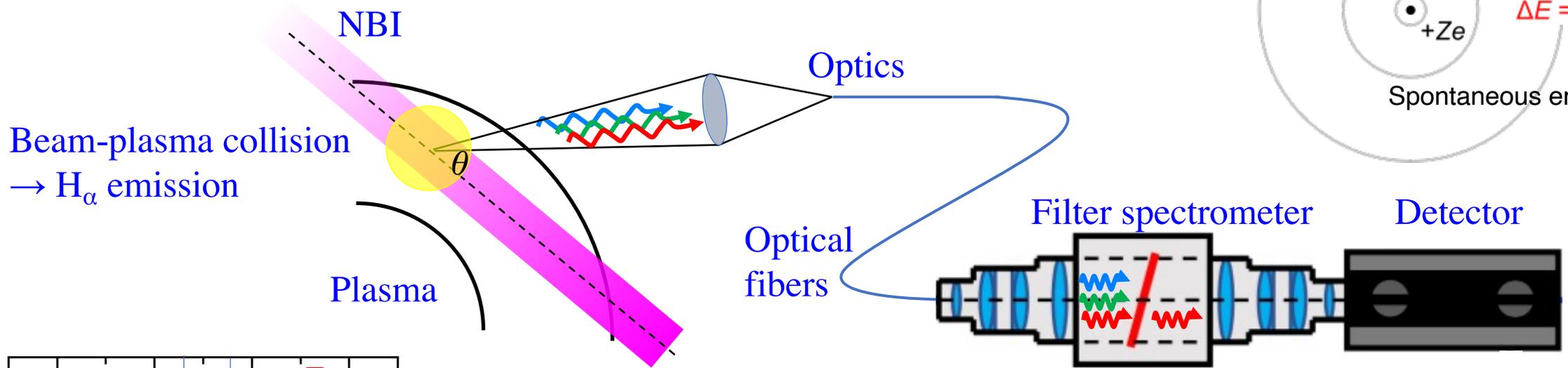
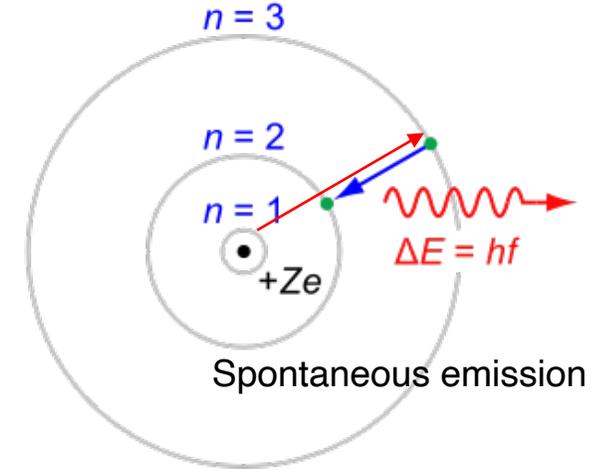
- ビーム放射分光計測 (BES) : 密度揺動イメージ, 速度場揺動
- マイクロ波計測 (ECE, ドップラー反射計など) : 温度揺動, 密度揺動, 速度場揺動
- 重イオンビームプローブ : 静電位揺動, 密度揺動

計測器によって最適なトロイダルセクションが異なる

# ビーム放射分光(BES)を用いた乱流計測

Electron impact excitation:  $e^- + H_{beam}^0 \rightarrow e^- + H_{beam}^{0*}(n)$

Ion impact excitation:  $H_{bulk}^+ + H_{beam}^0 \rightarrow H_{bulk}^+ + H_{beam}^{0*}(n)$



✓ 干渉フィルターを用いてビーム発光揺動のみを計測

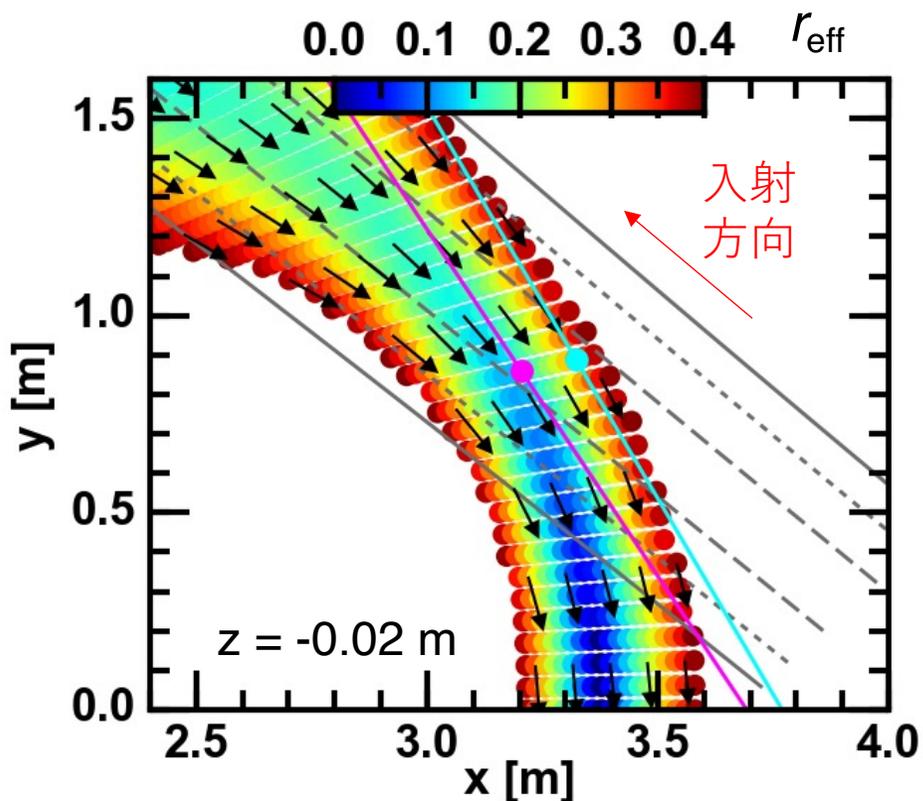
- 局所電子密度揺動の高時空間分解計測
- 多視点化による空間構造の同定
- 揺動パターン追跡による速度場の同定

# 視線設計

1. ビームの減衰が小さく，BES光学系がイオン源と干渉しない領域
2. 周辺領域をカバー
3. 磁力線と平行

$\phi = 75 \text{ deg}$   
Outer midplane

内・外2視点の磁力線を延長し，その交点にレンズを設置



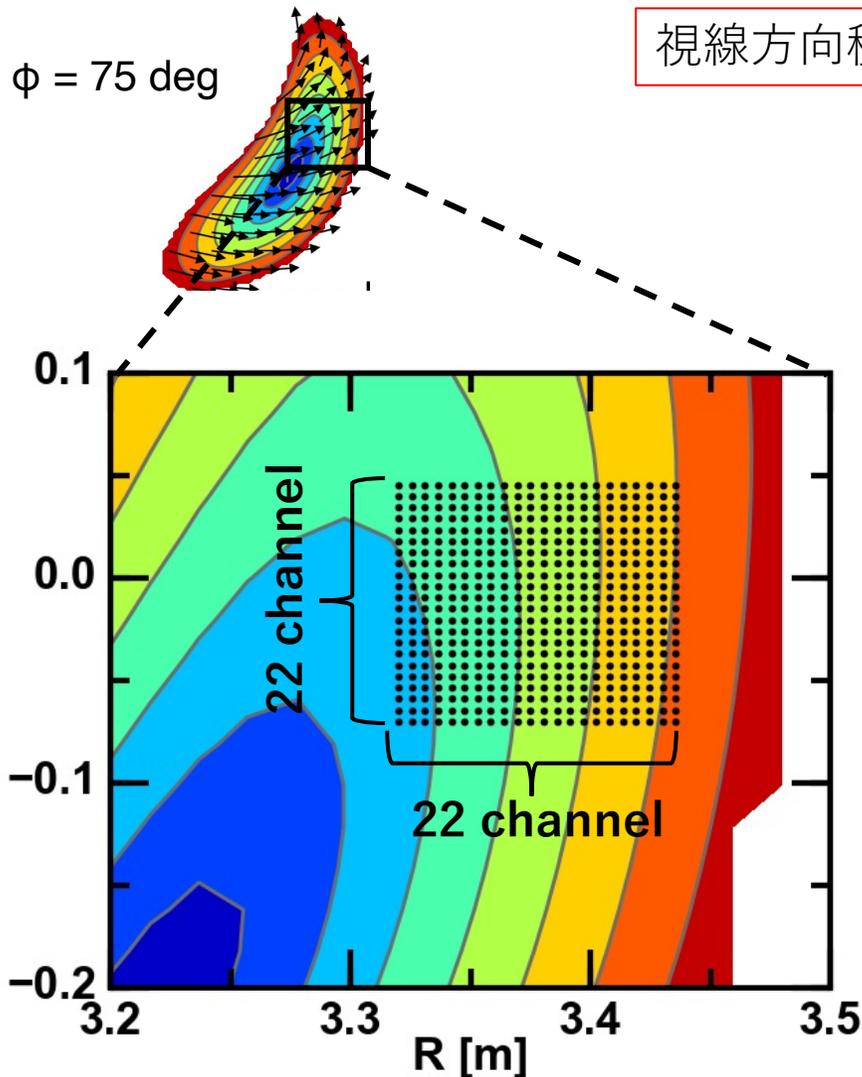
- レンズとターゲットの距離： $L \sim 2.4 \text{ m}$
- 拡大率  $M = (L-f)/f$

Lens f	200 mm	300 mm	400 mm
拡大率	11	7	5
観測 $\phi$ (fiber $\phi = 0.8 \text{ mm}$ )	9 mm	5.5 mm	4 mm
Rチャンネル数	13	22	30

空間分解能が良く，レンズが大きくなりすぎない  
f=300mmのレンズを使って検討を進める

# 視線評価

レンズ位置・倍率が決まったら，ポロイダル断面にRxZ:22x22チャンネルのアレイを設置  
 →計測半径，空間分解能，磁力線との角度，期待される信号強度を計算

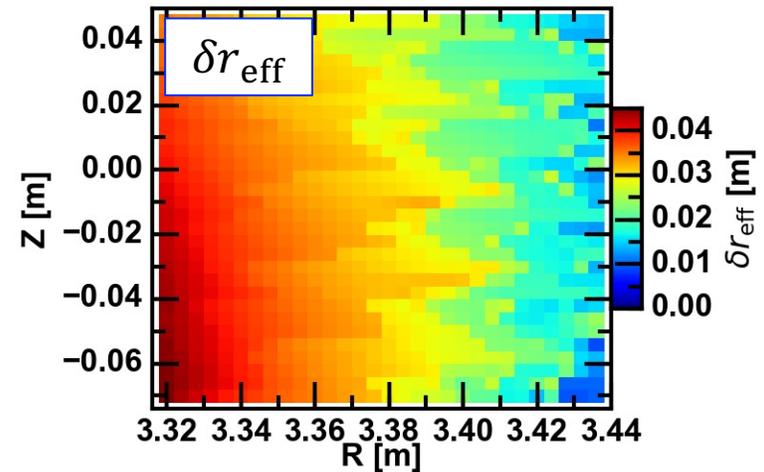
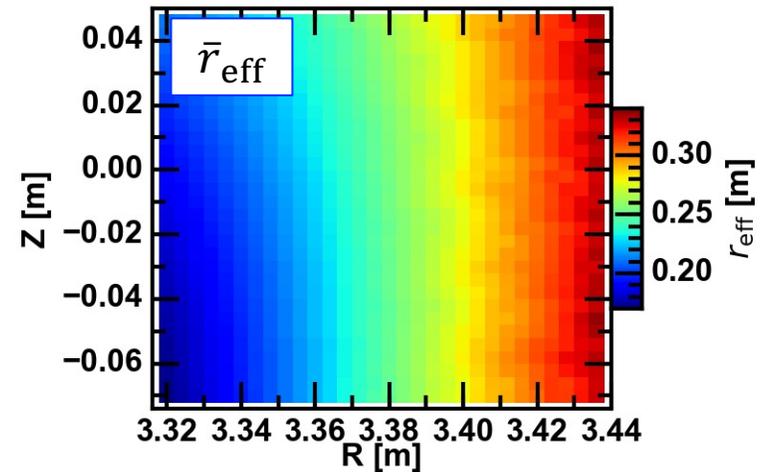
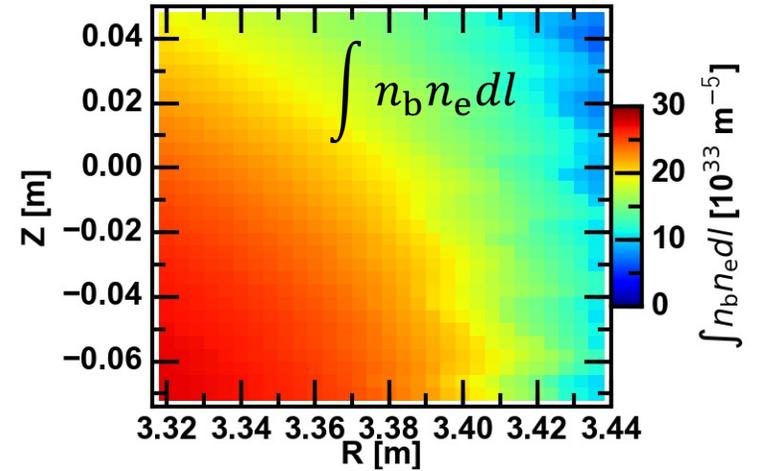


視線方向積分

$$I \propto a_F^2 \int n_b n_e dl$$

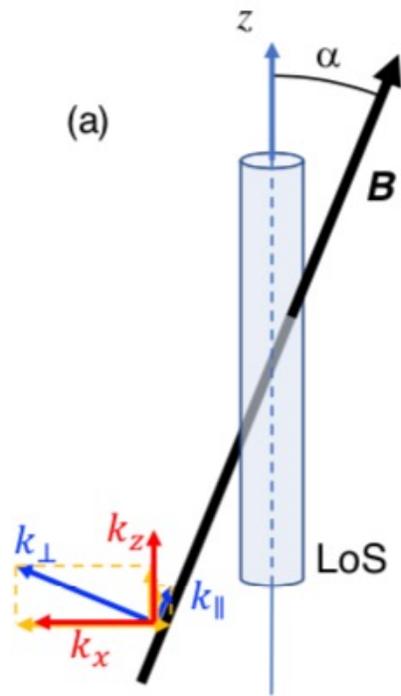
$$\bar{r}_{\text{eff}} = \frac{\int r_{\text{eff}} n_b n_e dl}{\int n_b n_e dl}$$

$$\delta r_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\int (r_{\text{eff}} - \bar{r}_{\text{eff}})^2 n_b n_e dl}{\int n_b n_e dl}}$$



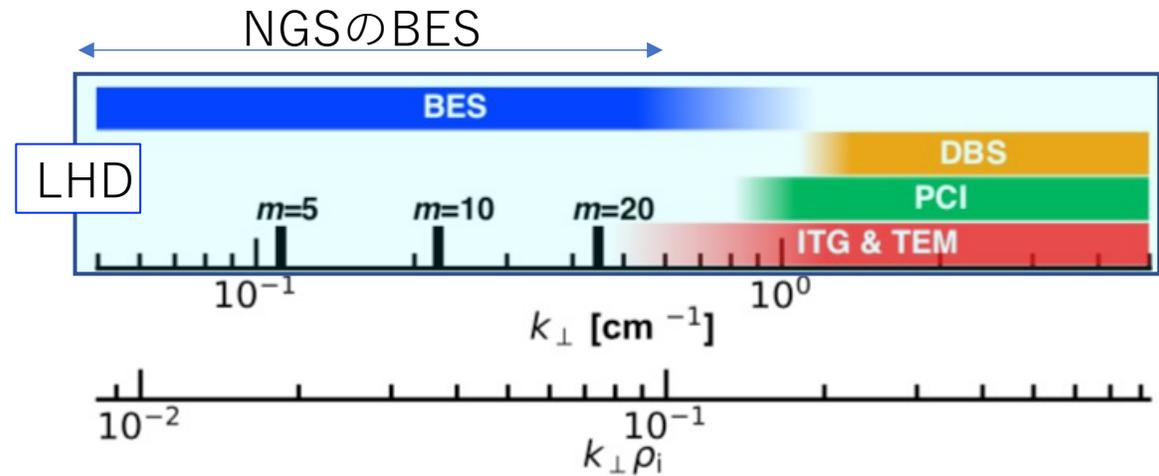
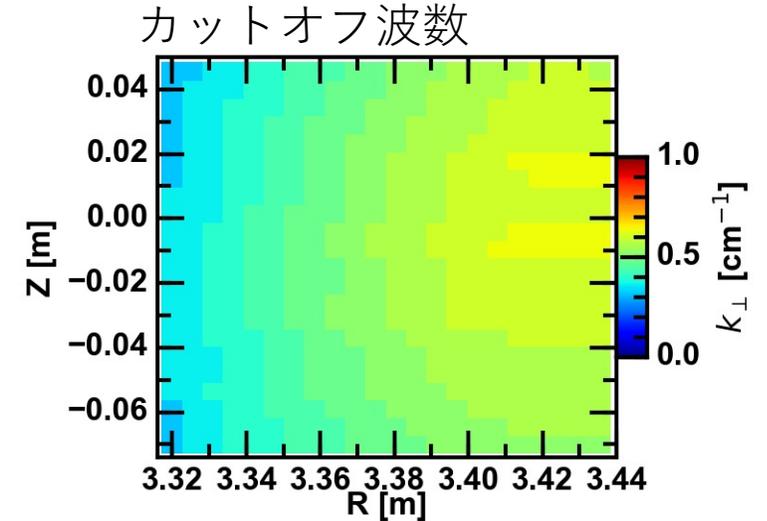
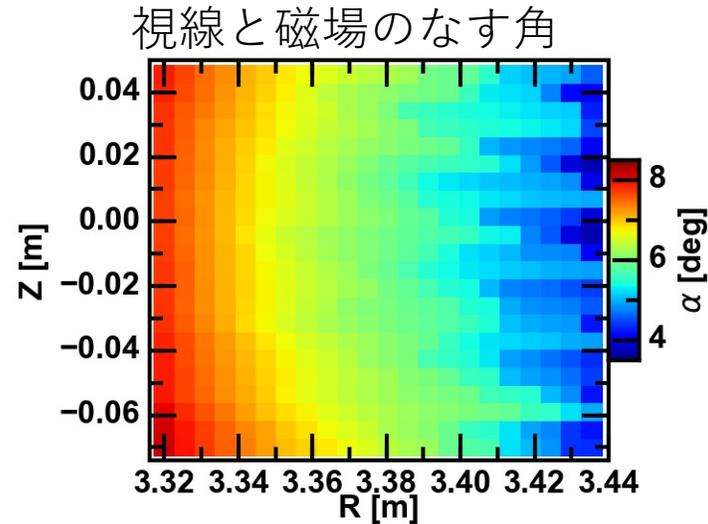
信号強度はLHDと同程度，空間分解能も良好 (3-20%)  
 小林他、物理学会秋 (2020)

# 波数カットオフの評価



$$k_z = k_{\parallel} \cos \alpha + k_{\perp} \sin \alpha$$

$\alpha \neq 0$ だと、 $k_{\perp}$ の混入で信号がカットオフされる

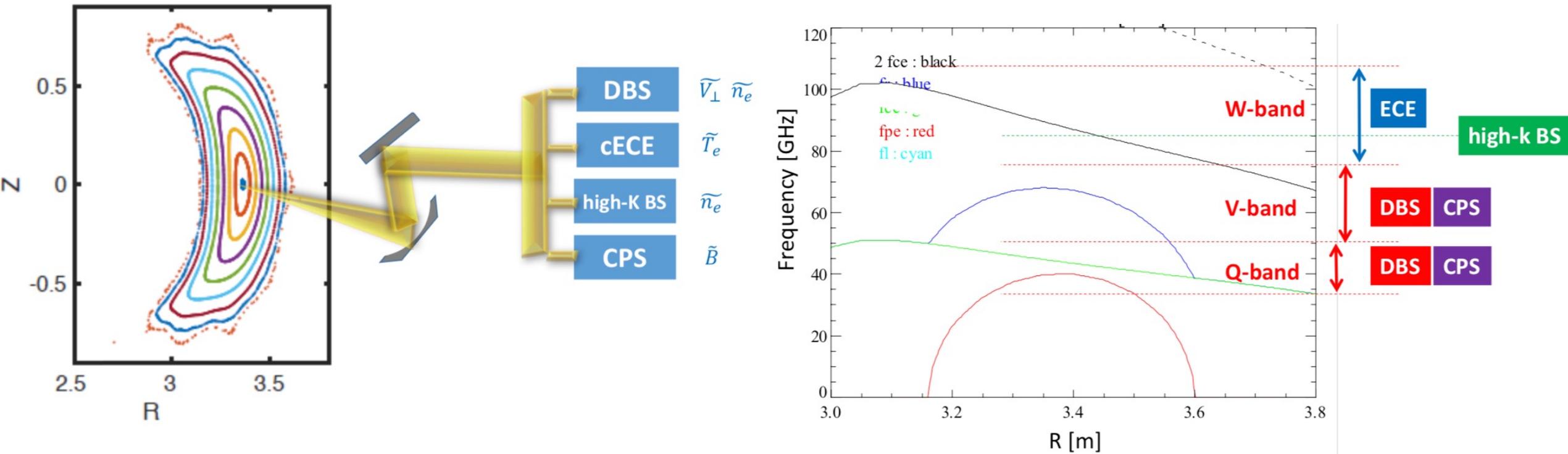


改善の余地あり:

視線方向のビーム広がりを抑える(シートビーム) or  $\alpha$ を抑える

# マイクロ波計測の検討

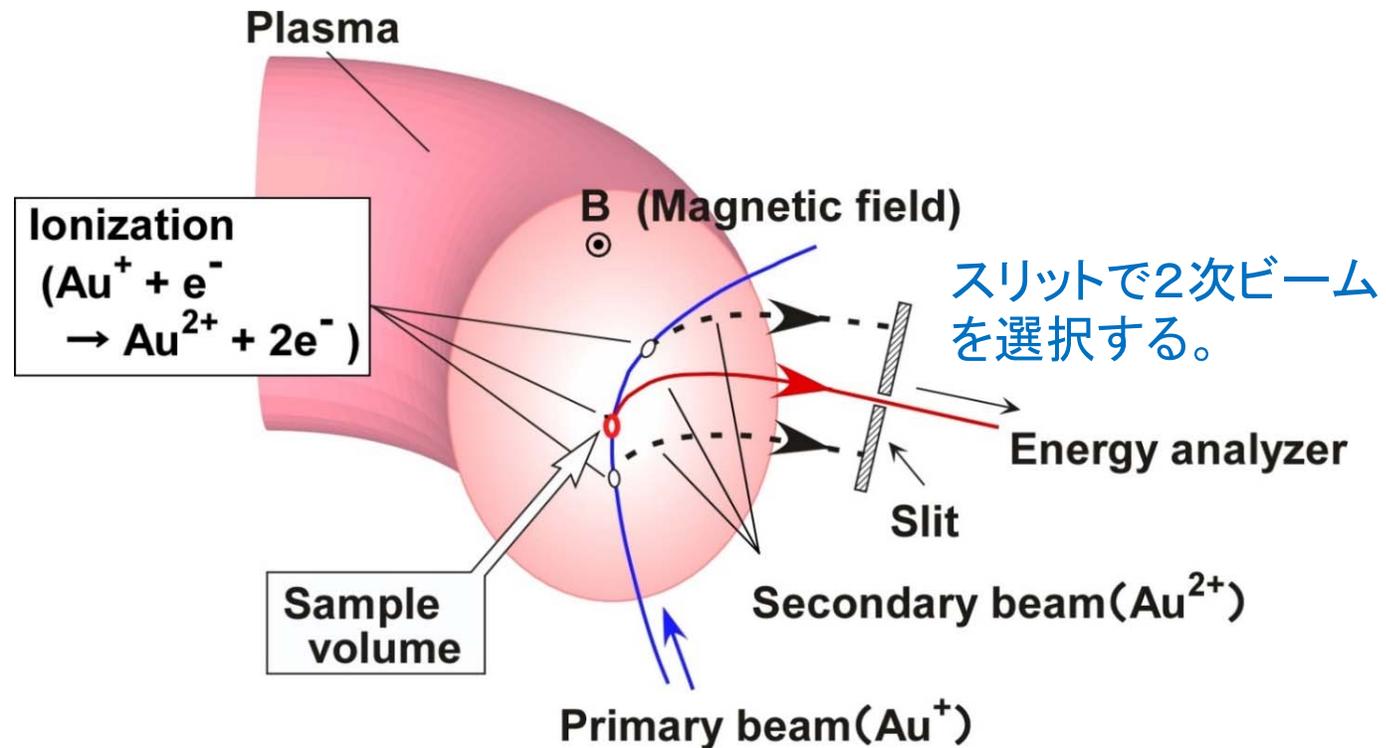
$\phi = 0 \text{ deg}$



- 同一視線で様々な物理量を同時計測できる。
- 磁場強度分布が $1/R$ 的な変化をする視線が利用できる。

# 重イオンビームプローブの検討

- 高温プラズマ中で、**電位揺動**、**密度揺動**、**磁場揺動**の計測が行える。  
→ **乱流(静電的、電磁的)の直接計測**。粒子束の評価。
- 乱流に影響を与える**電位分布**を計測することができる。



高エネルギー重イオンを入射する。  
(1次ビーム)

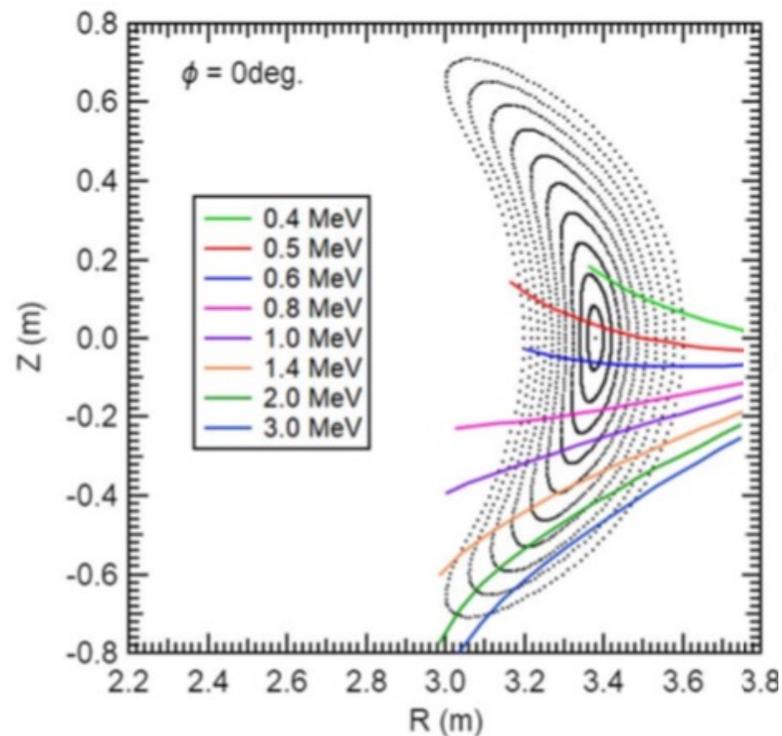
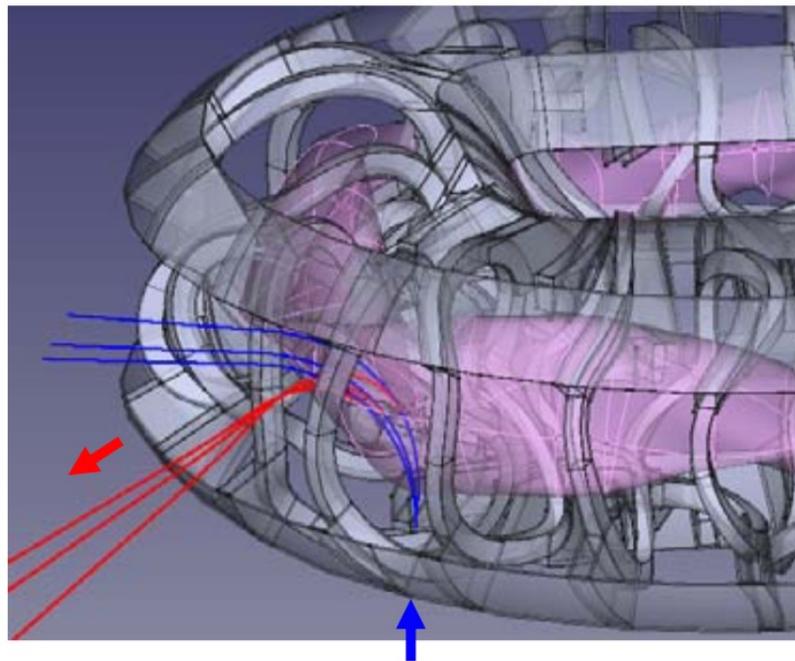
ビームエネルギーの変化  
→ イオン化点での電位

ビーム強度の変化  
→ プラズマ密度の変動

ビームのトロイダル方向の動き  
→ ポロイダル磁場揺動

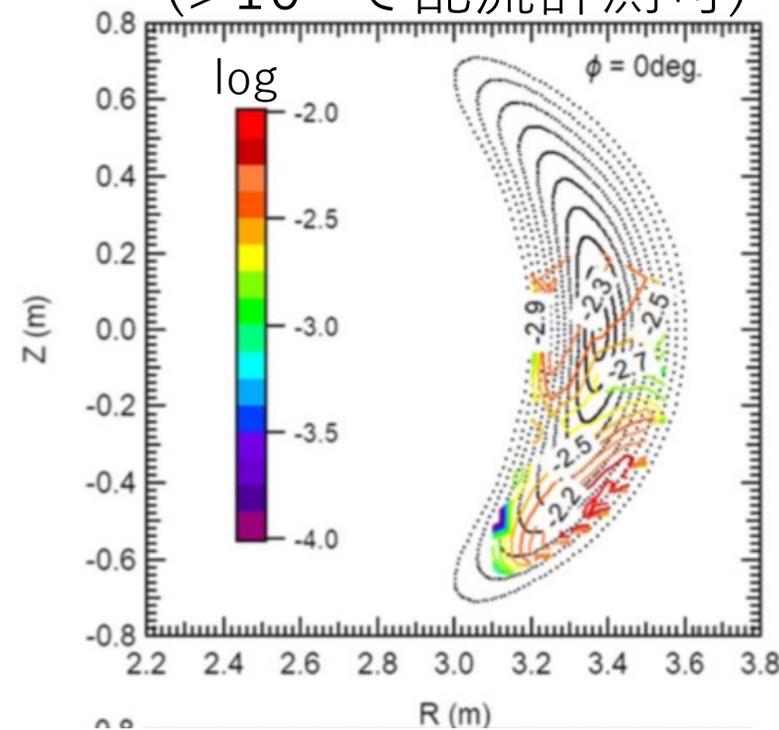
# 重イオンビームプローブの軌道・強度計算

計測位置



信号強度

(>10<sup>-3</sup>で乱流計測可)



- ビームエネルギー・入射角度を変化させることで計測位置をスキャン
- 高い信号強度が期待される
- ポテンシャル計測は、ZFおよび輸送同定の鍵、BESやECEと連携させる必要がある

