

ビーム放射分光法を用いたLHDにおける 密度揺動計測

核融合研, 東大高温プラズマセ^A

○大石鉄太郎, 門信一郎^A, 居田克巳, 吉沼幹朗

Contents

- ビーム放射分光法(Beam Emission Spectroscopy: **BES**)の原理
- LHDにおけるBES計測システムの構築・改良
- BESによる密度揺動の計測例: 周辺部MHDモードの計測

揺動計測の必要性とビーム放射分光法(BES)の位置付け

核融合反応による発電炉を目指したトーラスプラズマの閉じ込め研究において、プラズマの粒子輸送や熱輸送は、密度・温度・静電ポテンシャルなどの揺動と関連があるとされている。

→揺動を計測し、その特性を把握することが実験的アプローチの第一歩

- 静電プローブ...高温プラズマへの適用に難あり
- ブラッグ散乱...「長波長揺動ほど揺動レベルが高い」という計測結果
⇔ブラッグ散乱では長波長揺動ほど計測が難しい



長波長揺動計測法の発展が必要



ビーム放射分光法(Beam Emission Spectroscopy : BES)の登場
(R. Fonck et al., RSI61(1990)3487, PBX-Mトカマクで最初の計測に成功)

- BESの特徴
 - プラズマとの衝突によって励起した中性粒子ビームからの輝線を観測
 - 数cm程度の波長を持つ長波長揺動計測に適する
 - 多点同時計測と結像光学系によるイメージ計測が可能
 - 密度分布や密度勾配も同時に計測可能

BESの計測原理と研究の背景

- 高エネルギーの中性粒子ビームをプラズマに入射
→ビーム粒子はプラズマとの衝突により励起
→脱励起する時の輝線(以下「**ビーム輝線**」(Beam Emission)と表記)を計測。
- **ドップラーシフト**を利用して、
ビーム輝線を背景光から分離。
- **ビーム輝線強度の式**

$$I \approx \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} \cdot h\nu \cdot \Delta V \cdot \Delta\Omega / 4\pi$$

$$\cdot \frac{(n_e \cdot n_{beam} \cdot \langle \sigma_e v \rangle + n_i \cdot n_{beam} \cdot \langle \sigma_i v \rangle)}{= n_e \cdot n_{beam} \cdot v_{beam} \cdot (\langle \sigma_e v \rangle / v_{beam} + \sigma_i)}$$

e-H⁰ collision **H⁺-H⁰ collision**

- **密度揺動**

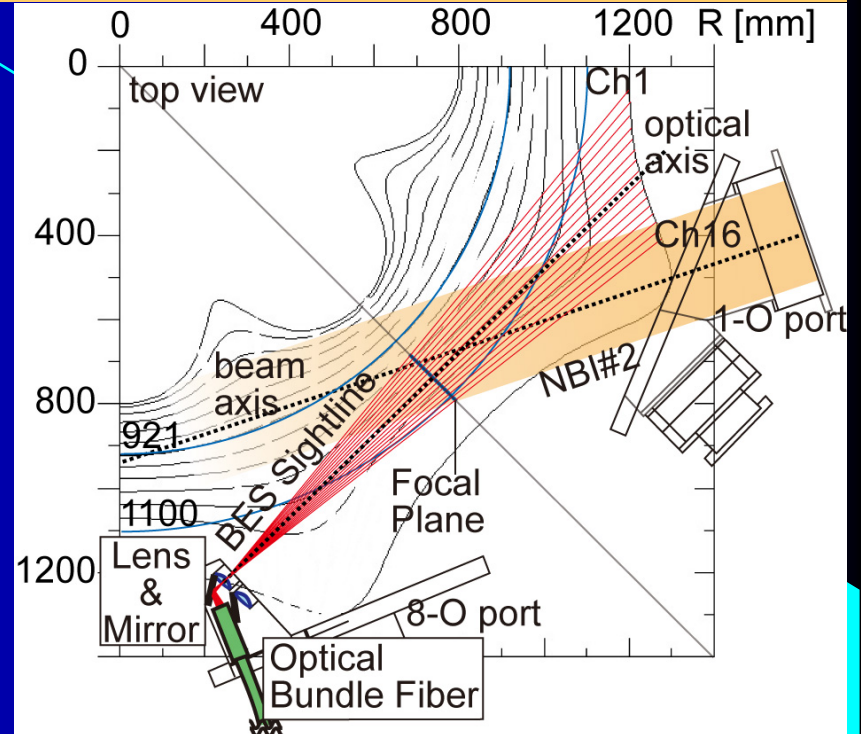
$$\frac{\tilde{I}}{I} = F \left(\frac{\tilde{n}_e}{n_e}, \frac{\tilde{n}_i}{n_i}, \frac{\tilde{n}_{beam}}{n_{beam}}, \langle \sigma_e v \rangle (T_e, \tilde{T}_e) \right)$$

データ解析で除去

$$\frac{\tilde{I}}{I} = \frac{\tilde{n}}{n} (e, i)$$

- 揺動の局所値, 空間相関が計測可能。
- トカマク型装置には, 密度揺動計測法として適用例あり. (ex. TFTR, DIII-D)
⇒ヘリカル型装置には未適用だった。

計測システムの一例：CHSにおけるBES

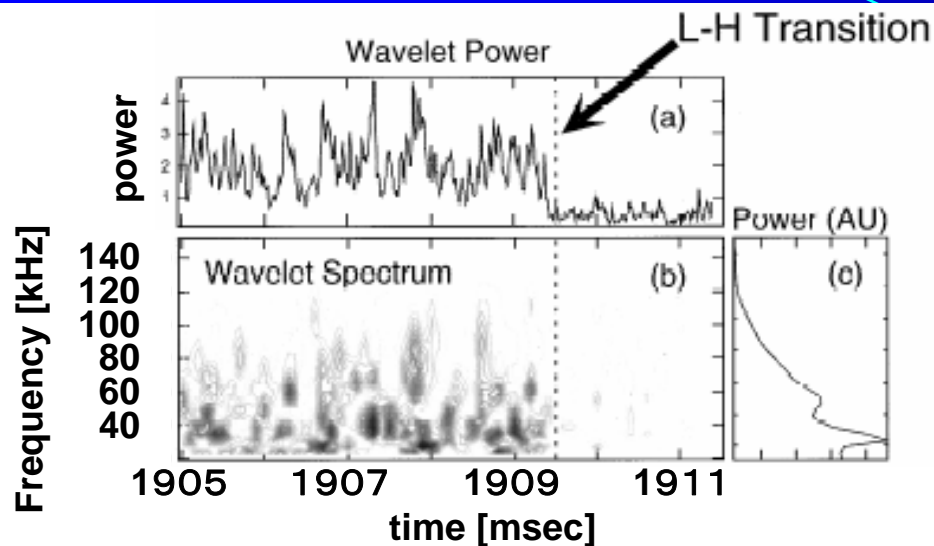


**LHD (Large Helical Device)と
CHS (Compact Helical System)における
BES計測研究**

- CHS: 2001~2002年度にシステム構築,
2003年度より周辺部輸送障壁形成時の
密度揺動を計測. (2006年8月に装置シャットダウン)
- LHD: 2005~2006年度にシステム構築,
2007年初頭から計測開始。

BESで何が測れるか？ - 既往の研究(トカマク) -

L-H遷移時の乱流揺動の抑制



M. Jakubowski : DIII-Dトカマク

L-H遷移時の周辺部の乱流の抑制を観測。

データ解析はウェーブレット変換による。

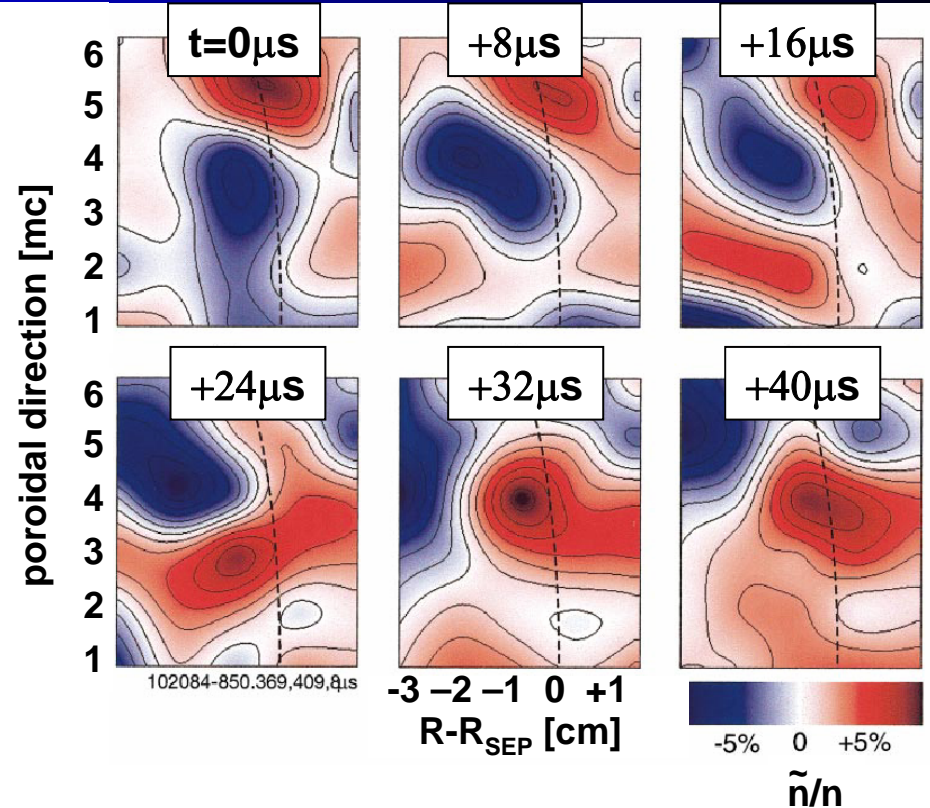
(a)周波数積算された揺動パワーの経時変化,

(b)揺動の周波数スペクトルの経時変化

(c)時間積算された周波数スペクトル。

RSI70(1999)874

乱流のイメージング計測



G. Mckee : DIII-Dトカマク

ポロイダル方向に6本,

径方向に5本のファイバレイを用いての,
揺動の2次元分布 = イメージング計測。

RSI74(2003)2014

- 揺動の局所値, 空間相関が計測可能.

LHDにおけるBES 計測開発の方針

観測視線の構築

(1) 6-TからNBI#3を観測 (ポロイダルor径方向波数) **既設**

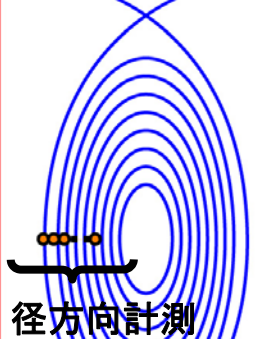
光量・空間分解能の改善が必要

(2) 10.5-LからNBI#1 (径方向波数) **新設**

(3) 7-TからNBI#4 (ポロイダル・径方向波数) **新設**

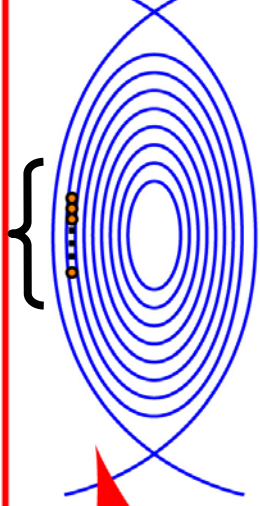
荷電交換と共用

(2) 10.5-L->NBI#1

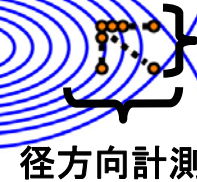


ポロイダル方向計測

(1) 6-T->NBI#3



(3) 7-T->NBI#4



ポロイダル方向計測

(2) NBI#1

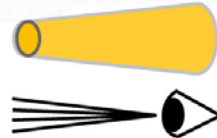
(2) 10.5L: 径方向視線

(1) NBI#3

(3) NBI#4

(1) 6-T: ポロイダル方向視線

(3) 7-T: ポロイダル
方向/径方向両用視線



: 加熱用中性水素原子ビーム

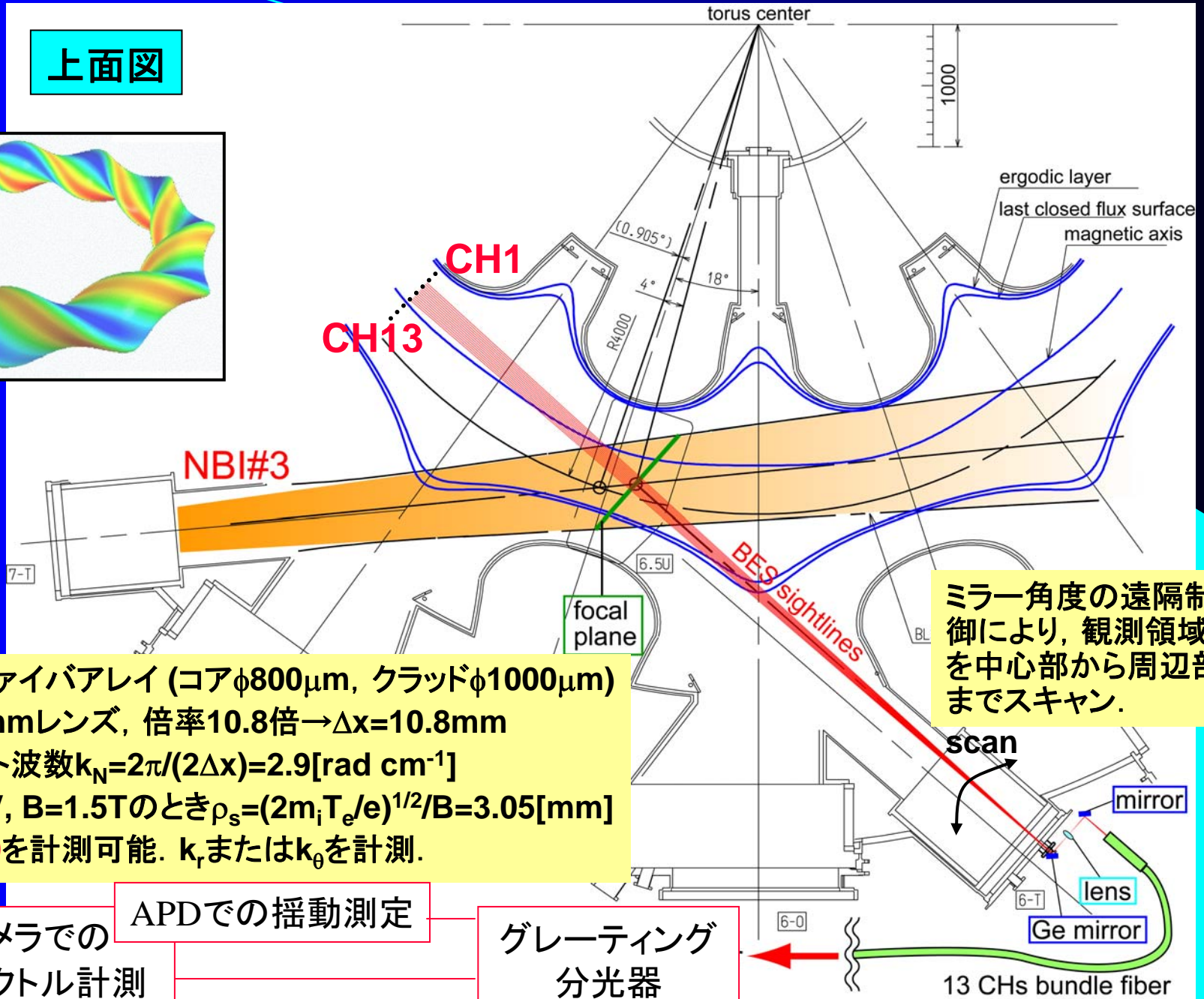
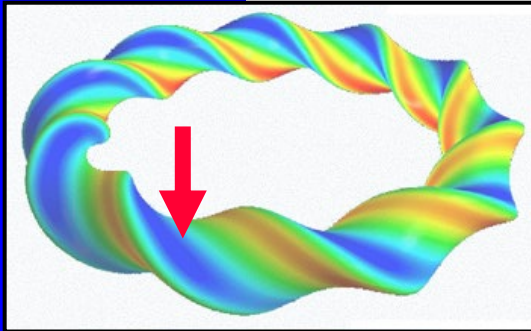
: ビーム放射分光法観測視線

LHDのプラズマ形状

大半径	3.9 m
平均小半径	0.6 m
Multi polarity l	2
Toroidal periods m	10

LHDにおけるBES計測システム

上面図



ミラー角度の遠隔制御により、観測領域を中心部から周辺部までスキャン。

- 13chファイバレイ (コアφ800μm, クラッドφ1000μm)
- f=400mmレンズ, 倍率10.8倍→Δx=10.8mm
- ⇒ ナイキスト波数 $k_N = 2\pi / (2\Delta x) = 2.9 [\text{rad cm}^{-1}]$
- ⇒ $T_e = 1\text{keV}$, $B = 1.5\text{T}$ のとき $\rho_s = (2m_i T_e / e)^{1/2} / B = 3.05 [\text{mm}]$
- ⇒ $k_{\rho_s} < 0.89$ を計測可能. k_r または k_θ を計測.

CCDカメラでの波長スペクトル計測

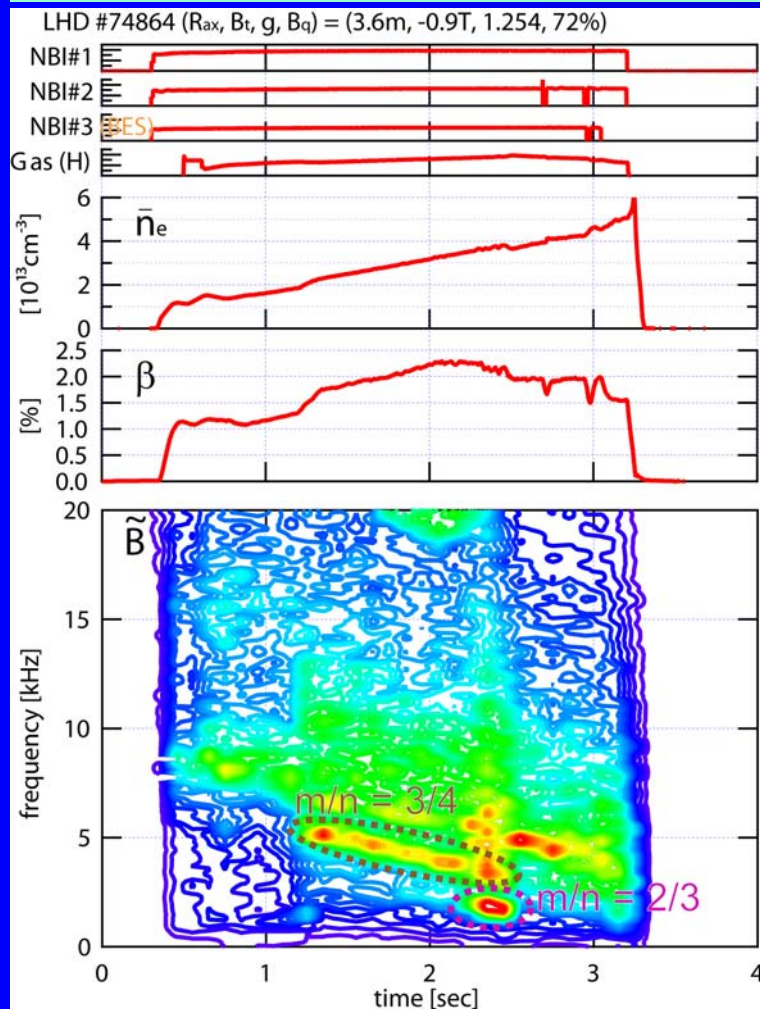
APDでの揺動測定

グレーティング分光器

13 CHs bundle fiber

揺動計測例 (1) - 高 β 実験における周辺部MHDモード -

高 β 実験の放電波形例



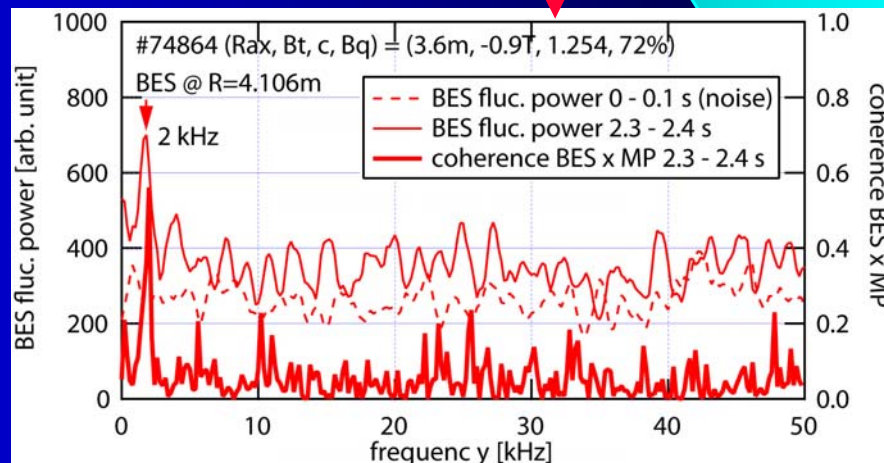
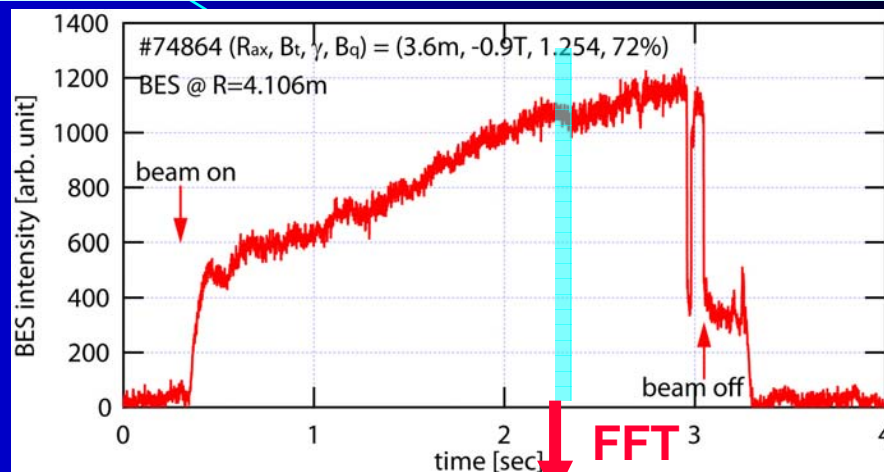
#74864

放電後半で $m/n = 3/4$ (3~5 kHz)および
 $2/3$ (2 kHz)のMHDモードが発生する。
 (核融合研・榊原氏によるモード解析)

BES信号の経時変化と周波数スペクトル(プラズマ周辺部)

信号の経時変化

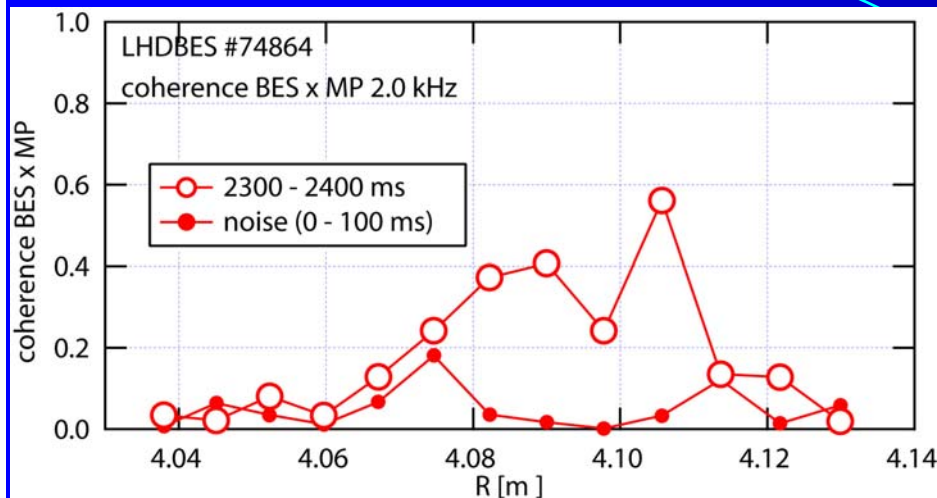
... NBIのon/offに同期. 局所的な密度の経時変化を示す.



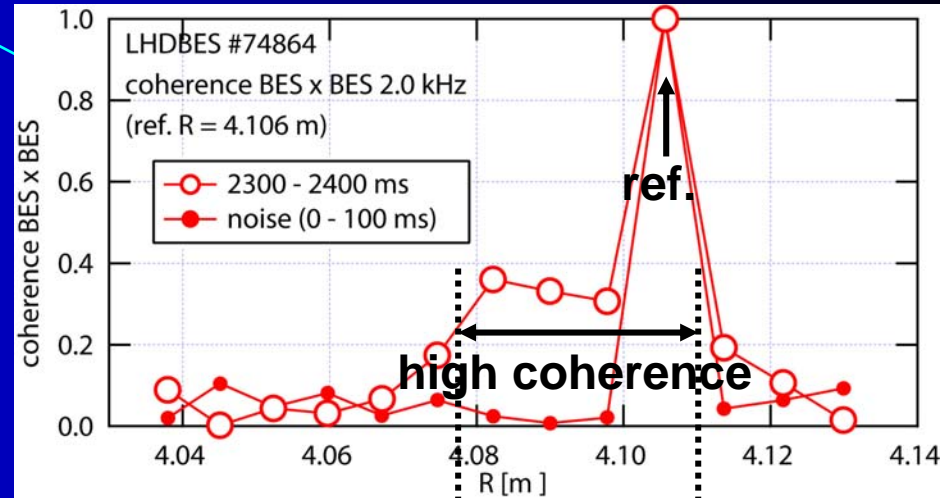
BES周波数スペクトル, BESx磁気プローブのコヒーレンス
 ... 2kHzにコヒーレントなピーク.
 ⇨乱流計測(数10~数100 kHz)のためにはS/N改善が必要.

揺動計測例 - 周辺部MHDモード($m/n = 2/3, 2\text{kHz}$)の径方向構造 -

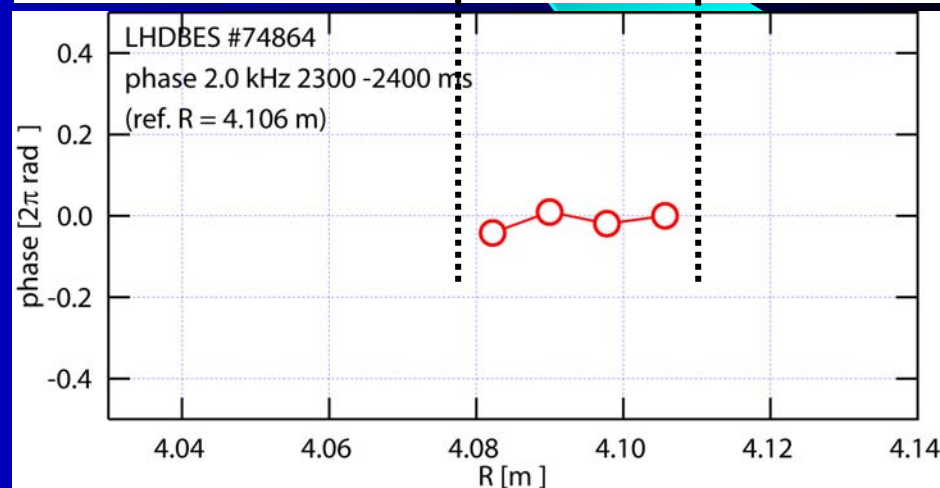
BESxMPコヒーレンス



BESxBESコヒーレンスとフェイズ



- コヒーレンス
...2kHzのモードはプラズマ周辺部,
数cm程度の有限の幅に局在.
- フェイズ
...コヒーレンスが大きい空間領域では
ほぼ同位相
→磁気島がプラズマの剛体回転と
ともに回転する描像と矛盾しない.

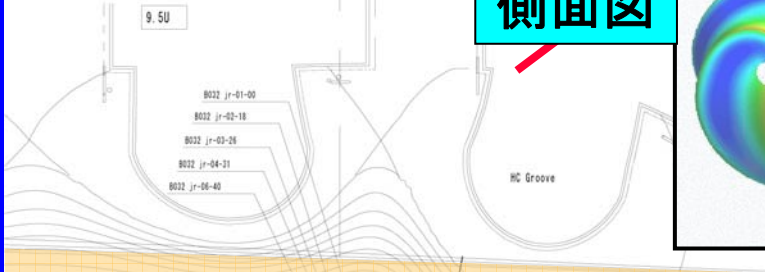


今後の課題

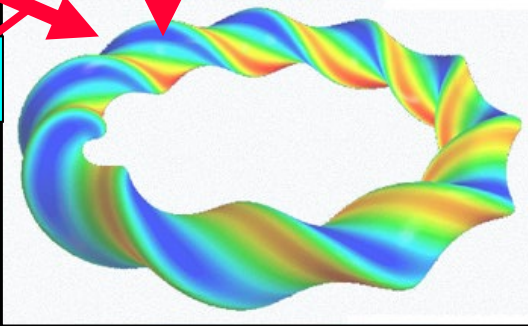
- モードの位置と有理面の位置との対応.
 - 線積分効果によるモード幅の過大評価の可能性の検討.
 - S/Nの改善
- 光学系の改善...大口径レンズの試用

光量と空間分解能の向上を目指した BES計測システムの増設

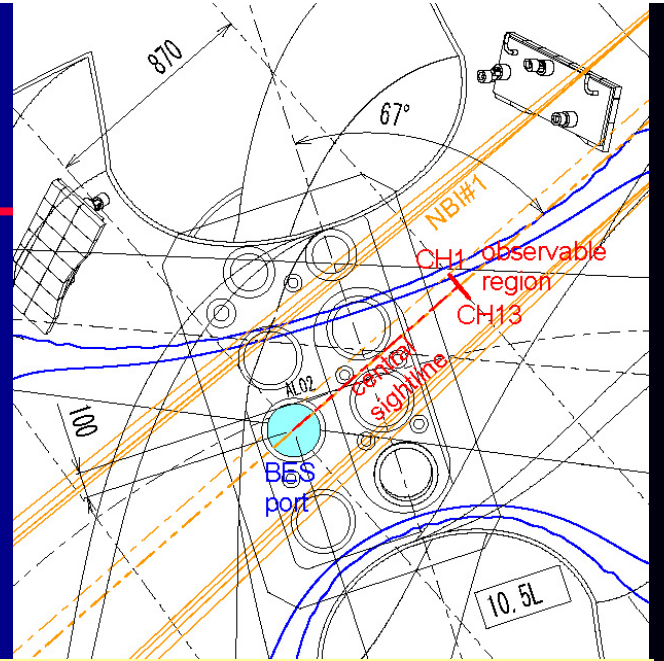
10.5-L->NBI#1システム
のポート断面図



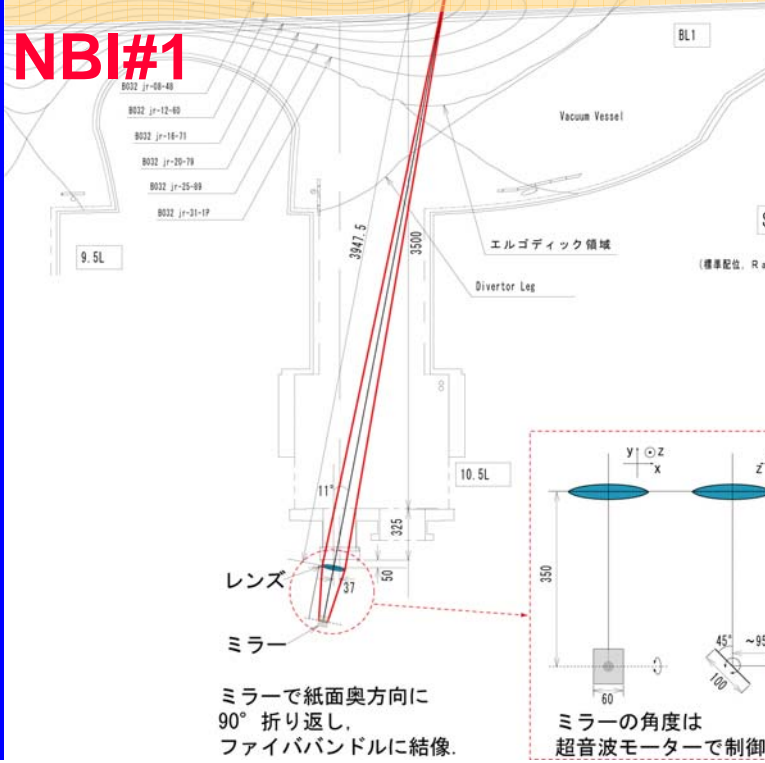
上面図



側面図



NBI#1



- 13chファイバアレイ (コアφ800μm, クラッドφ1000μm)
- f=400mm, f=160mmレンズ, 倍率9.17倍→Δx=9.17mm
⇒ナイキスト波数 $k_N=2\pi/(2\Delta x)=3.4[\text{rad cm}^{-1}]$
⇒Te=1keV, B=1.5Tのとき $\rho_s=(2m_i T_e/e)^{1/2}/B=3.05[\text{mm}]$
⇒ $k\rho_s < 1.04$ を計測可能. k_r を計測.

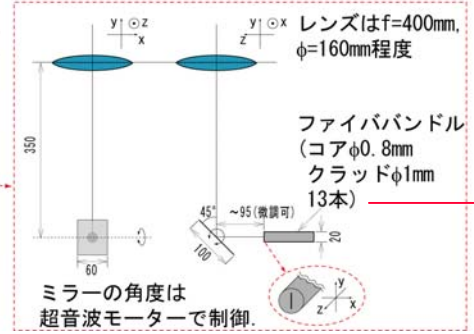
ADC (<500kHz, ただしS/N向上のため<40kHzのフィルタを使用)

PC

APDでの揺動測定

グレーティング
分光器

CCDカメラでの
波長スペクトル計測

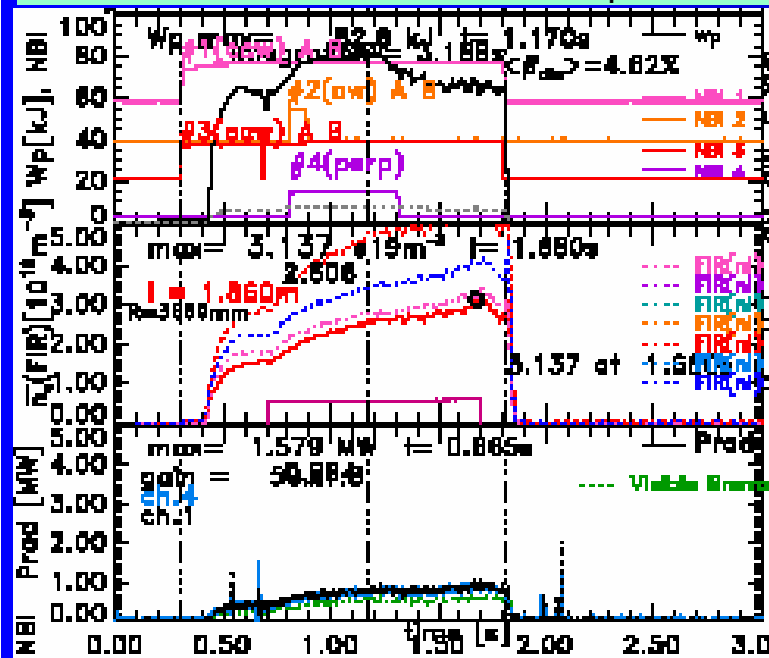


揺動計測例(2) - 高β実験における周辺部MHDモード -

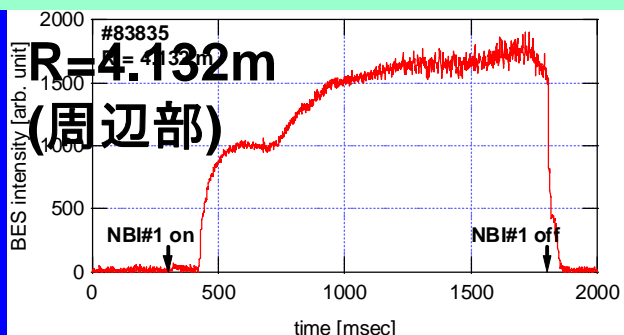
BESは光量改善後のポートで計測

放電波形 (2008/2/6高β)

($B=0.425\text{T}$, $R_{ax}=3.6\text{m}$, $\gamma=1.197$, $B_q=100\%$)

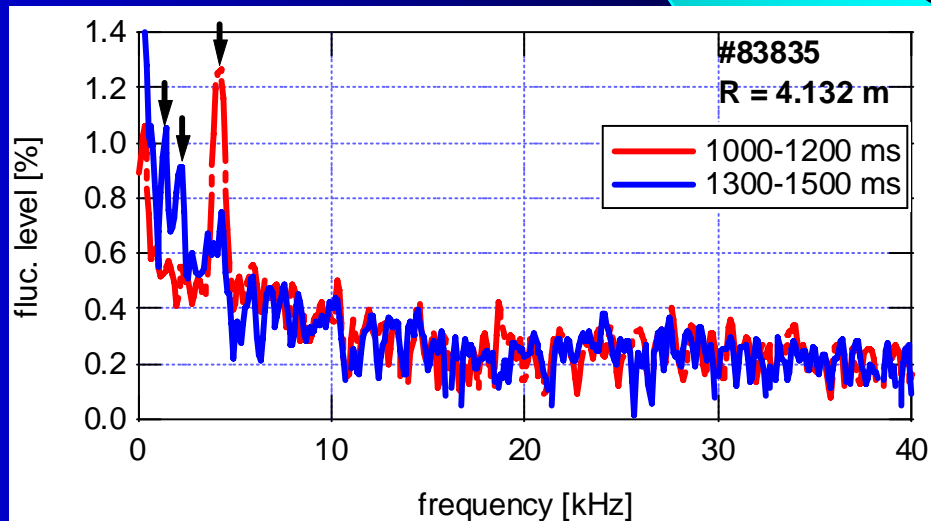
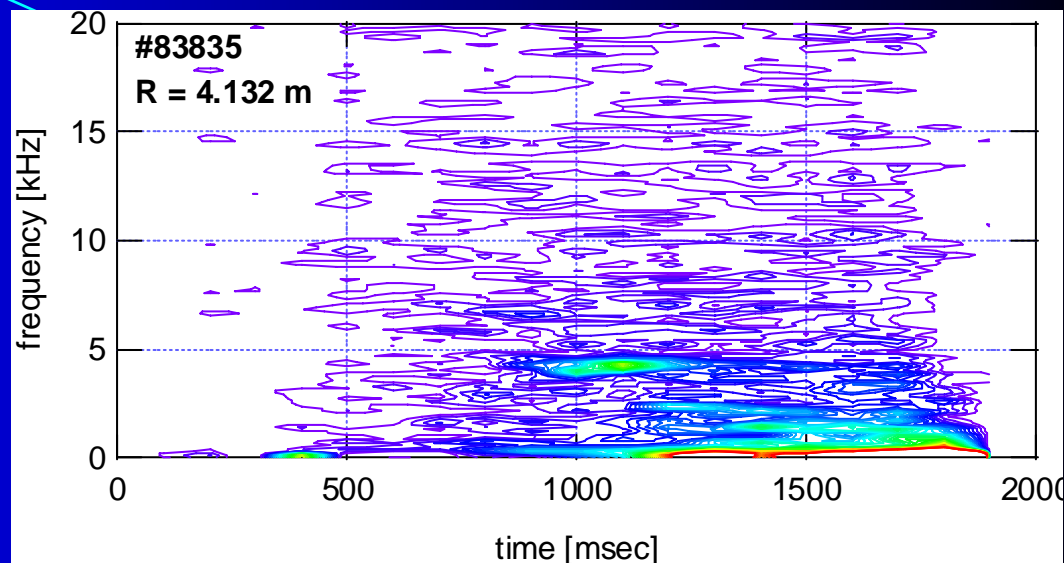


BES信号の経時変化



- 信号強度は改善前の2倍程度.

周波数スペクトル

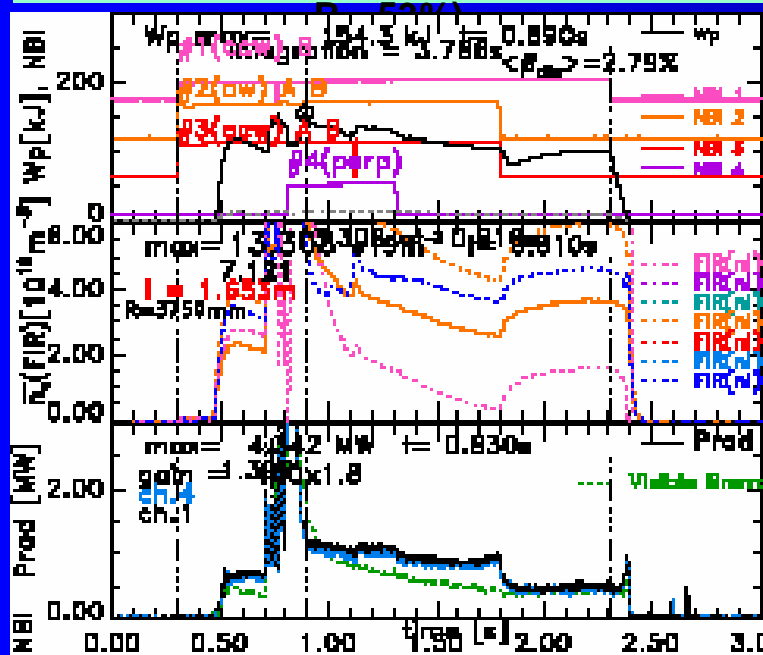


- 数kHzのコヒーレントなピーク
→ 今後、磁気プローブとの比較、空間構造の評価
- 10kHz以下にブロードな乱流揺動

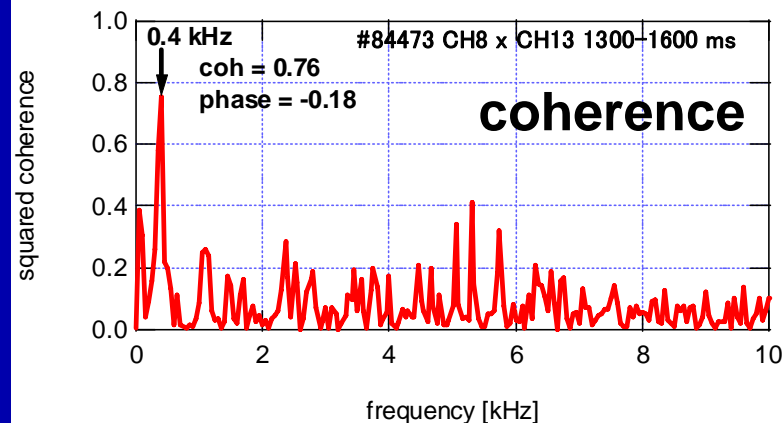
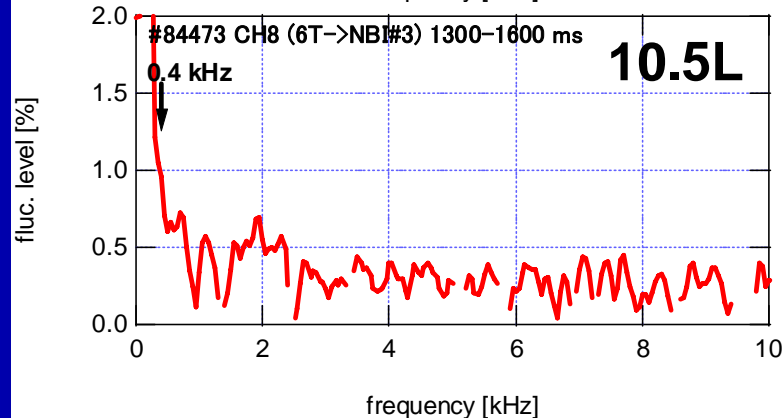
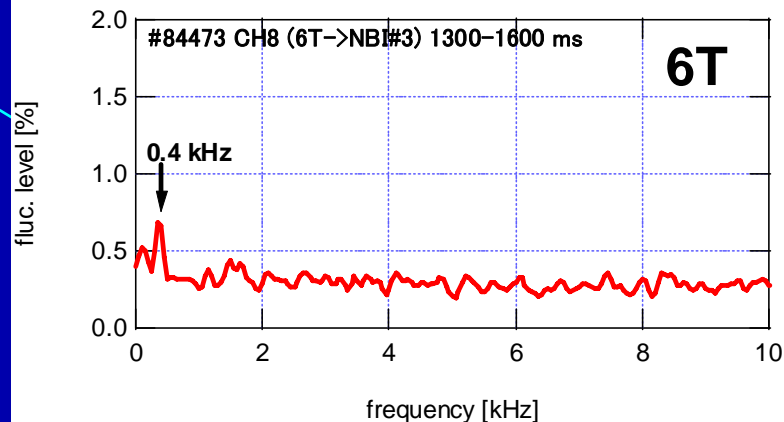
揺動計測例(3) - トロイダル方向に異なる2点での同時計測 -

BESは光量改善後と
改善前のポートで同時計測
(トロイダル角の差 $\Delta\phi \sim 150^\circ$)

放電波形 (2008/2/13高 β)
($B=0.650T$, $R_{ax}=3.750m$, $\gamma=1.254$,



周波数スペクトル (1300~1600 ms)



- 6Tでは0.4kHzにピーク
- 10.5Lでは, 0.4kHz 付近はノイズが大きい.
- コヒーレンスには, 0.4kHzに明らかなピーク
→2つの視線で同じモードを観測できた
- 今後, 位相差からモード数の評価

まとめ

LHDにおいて、BESによる密度揺動計測システムを構築した。

- ファーストデータとして、プラズマ周辺部のMHDモードが観測された。
- 光学系を改善した計測ポートを増設し、10kHz以下で乱流揺動も観測された。
- トロイダル方向に離れた複数のポートでの同時計測を開始した。

直近の課題

- 計測地点と平均小半径との対応。
- 計測された揺動の空間構造、および磁気プローブとの対応。
- 線積分効果による空間分解能低下の評価。
- S/N比の向上。光学系の高効率化。

発展の可能性

現状：MHD振動($\tilde{n}/n \sim$ 数%)
が観測できている。

乱流計測($\tilde{n}/n \sim 0.$ 数%)

- 乱流のイメージ計測
- 閉じ込め改善時の揺動強度・波数の変化

MHD研究への応用

- MHD振動の空間構造の直接計測
- ∇n と \tilde{n} の同時計測、それらの相関