

## 小型トカマクHybtok-II を使った研究

核融合研、渡邊清政

**名大・大野研所有のHybtok-IIを、主として以下の様な  
利用計画を基にNIFS移転を行いたい**

- #  $\sim$ kHzのMHD現象等の共同実験プラットフォーム(特に、RMP研究、準2次元対称性配位への摂動3次元磁場のへの影響等)
- # 計測器の原理実証プラットフォーム(MHDスペクトロスコピー等)
- # 核融合クラウドを遠隔実験環境構築に拡張する際のテストスタンド
- # プラズマ実験、各種計測器利用、平衡制御等の教育用プラットフォーム

# 目次

1. Hybtok-IIの概要
2. Hybtok-IIの装置仕様と付帯計測器
3. これまでの研究課題や今後の利用提案一覧
4. 共同実験研究設備としての展開例
5. 核融合研ユニットとの関連
6. まとめ

# Hybtok-IIは名大・大野研所有の小型トカマク装置でこれまで、名大の大学院教育、核融合研究に利用され、以下のような特徴を持つ。

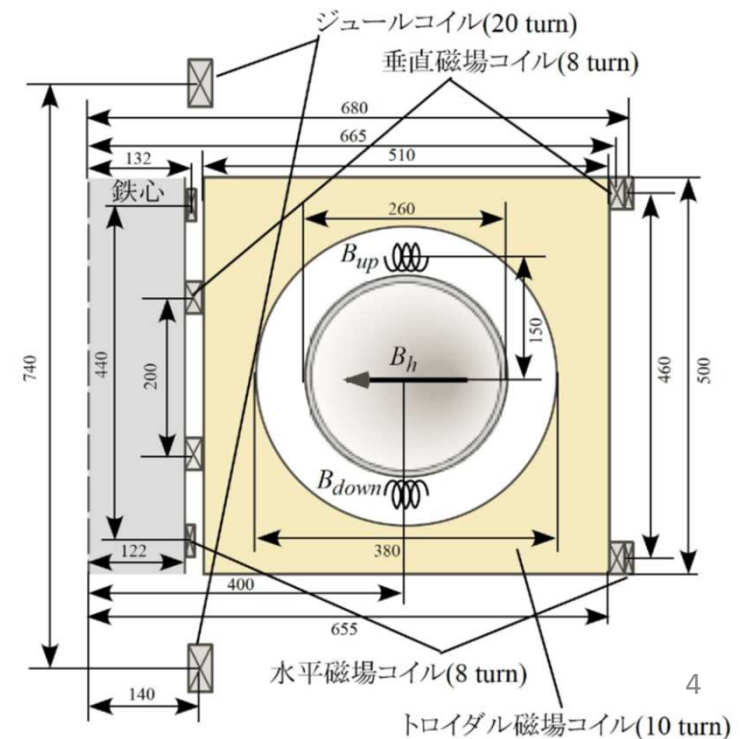
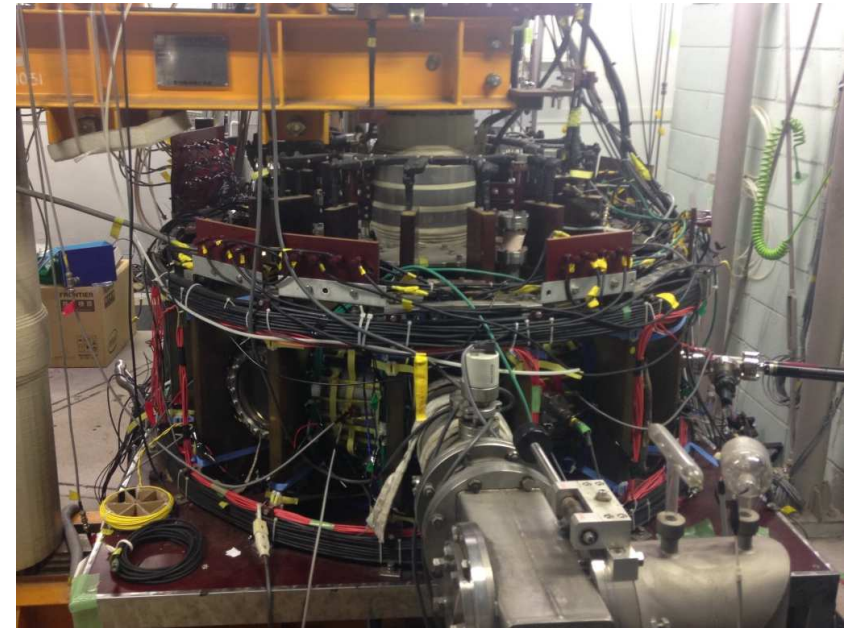
(大野研は今後、周辺プラズマ、PWI研究に注力を予定)

1. <12msの放電が可能(kHzのMHD現象等の実験が可能)
2. 0.2~0.4Tのトロイダル磁場の実験が可能  
(=> $n_e \sim 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ,  $T_e < 100 \text{eV}$ のプラズマ生成が可能)
3.  $q_a > 2 @ 0.2 \text{T}$ の実験が可能(実質的には,  $q_a \sim 3$ でかなり不安定。オーミックプラズマながら多様なMHD不安定性実験が可能!?)
3. 磁場、電子密度・温度、ポテンシャル、プラズマ流速の探針計測が可能
4. RMP用の電源があり、多彩なRMP実験が可能

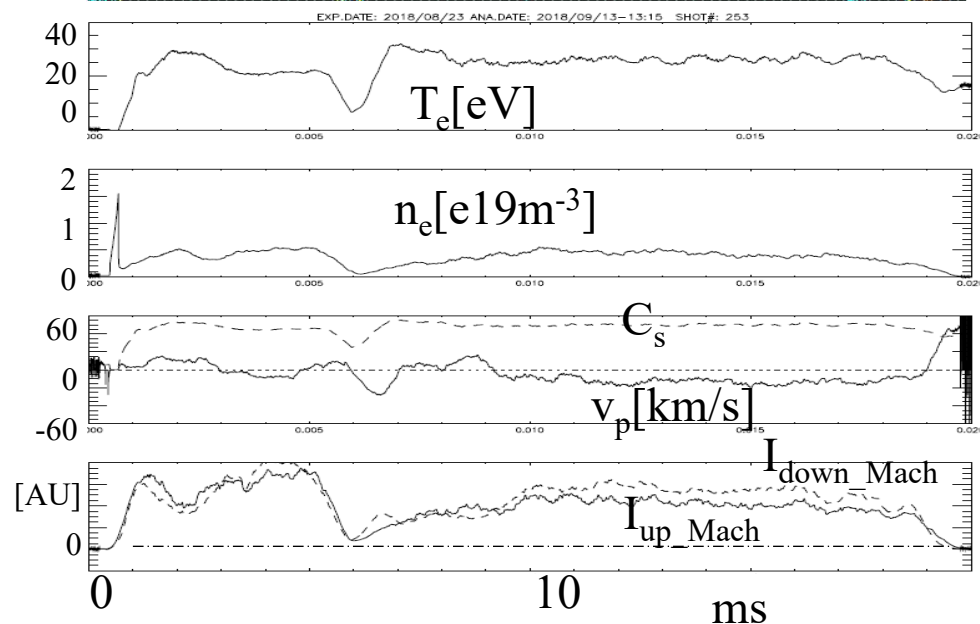
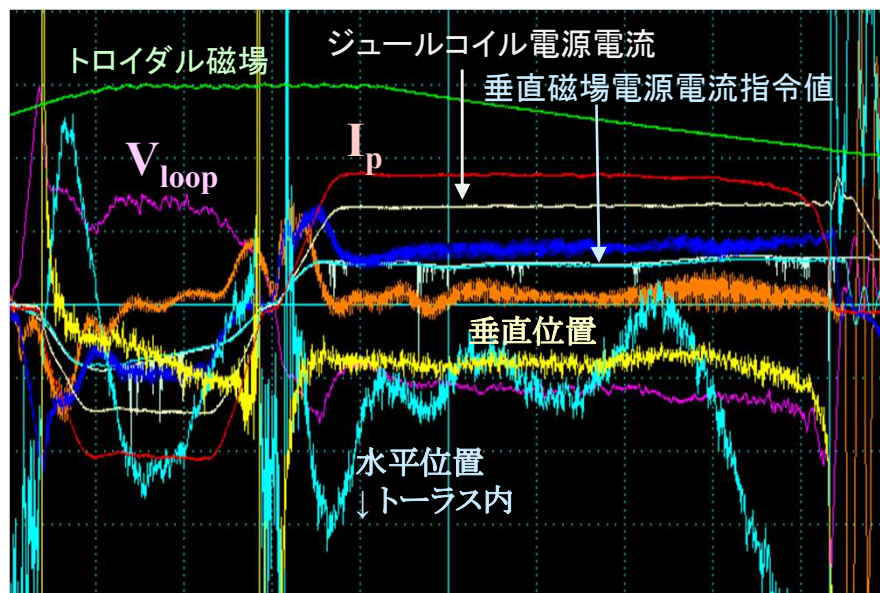
# 装置仕様

## HYBTOK-II主要パラメータ

真空容器大半径 $R_0$	40 cm
小半径(円形断面) $a$	12.8 cm
厚さ(SUS304)/トロイダル方向2分割	2 mm
リミタ(Limitor)半径 $a$	0.11 m
プラズマ電流 $I_p$	< 15 kA
トロイダル磁場 $B_t$	< 0.5 T
トロイダルコイル	16個
$B_t, B_v$ , オーミック用 IGBT インバータ電源 鉄心あり(飽和100 V/msec)	
放電間隔	3 min



# Hybtok-IIの典型的な放電波形



$B_t \sim 0.25\text{T}$

$I_p \sim 8\text{kA} (q_a \sim 4.7)$

$[q_a > 2.5 @ 0.25\text{T}, q_a > 4 @ 0.4\text{T}]$

$V_{loop} \sim 7\text{V}$

放電時間  $\sim 20\text{ms} (6\text{ms} + 12\text{ms})$

排気装置 (TMP1 or 2基)  $< 10^{-6}\text{torr}$

ガス種  $\text{H}_2$  (ピエゾバルブ)

種プラズマ; フィラメント点火

$T_e \sim 30\text{eV}$

$n_e \sim 0.5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$

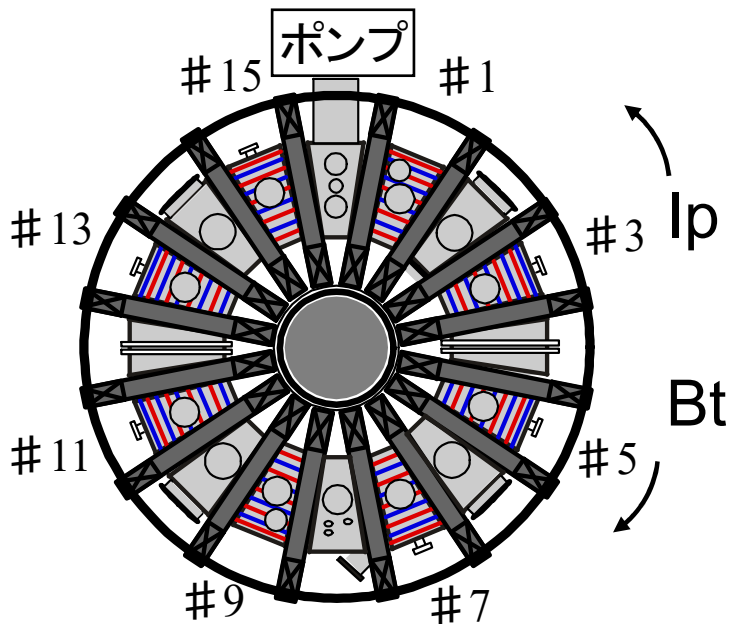
$V_p \sim 5\text{km/s} (< 10\text{kHz})$

計測位置  $r/a \sim 0.8$

$I_p \uparrow \Rightarrow q_a \downarrow, T_e \uparrow$   
 $\text{ガス} \uparrow \Rightarrow n_e \uparrow, T_e \downarrow$

$q_a, n_e, T_e \text{ VS } v_p, v_t \text{ ???}$

# 計測器



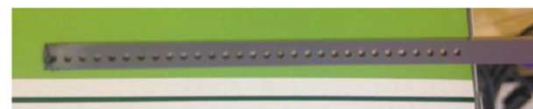
- #1下ポート: Brアレイ
- #7横/8上ポート: マツハ( $v_\theta, v_\phi$ )アレイ
- #7下ポート:  $B_\theta$ アレイ
- #12容器外:  $B_\theta$ アレイ(ポロイダル方向)
- #11上ポート:  $BrB_\theta$ プローブ
- #14外ポート: トリプルプローブ
- #15上ポート: トリプルアレイ

Brプローブアレイ



空間分解能: 3.8mm  
ch数: 12

マツハプローブアレイ



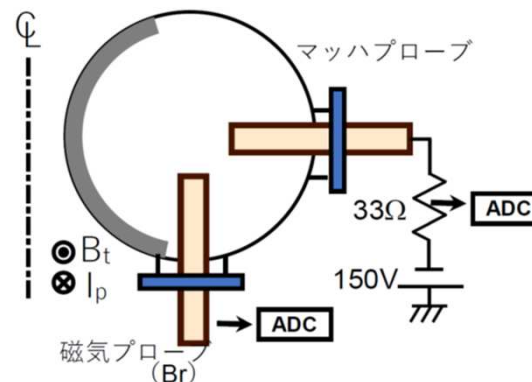
空間分解能(ch数)	2 mm (30 ch)
------------	--------------

トリプルプローブアレイ



性能試験中

空間分解能; 3.6mm, Ch数; 10

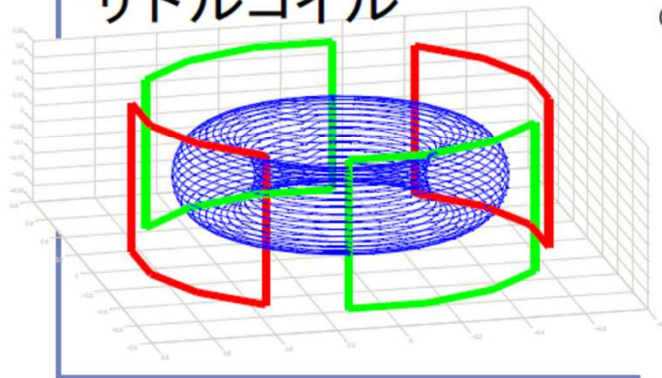


プローブ  
計測器が  
豊富

# 共鳴摂動磁場 (RMP) コイルシステム

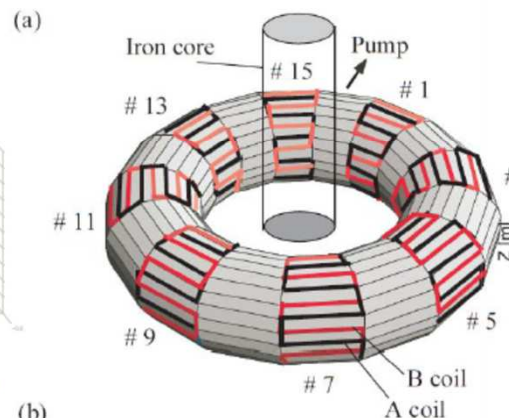
摂動磁場コイル

サドルコイル



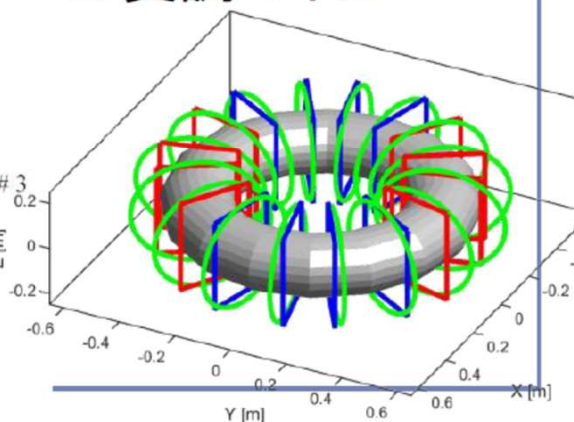
$$m=1, n=1,2, f_{RMP} > 1\text{kHz}$$

ヘリカルコイル



$$m=6, n=1,2, f_{RMP} > 1\text{kHz}$$

TF変調コイル



$$m=0, n=2,3, f_{RMP}=0$$

RMPコイル電源

定格電流	150 A
定格電圧	600 V
周波数	1~30 kHz
通電時間	7 ms

# これまでHybtokの研究課題や提案中課題

- # MHD安定放電におけるRMPの応答 (浸透、遮蔽)
  - # RMPを使ったディスラプション制御 (ディスラプション時のRMP印加の応答)
  - # ディスラプション時のプラズマ電流減衰時間評価
  - # He原子発光線の強度比を用いた電子温度・電子密度・プラズマ回転の計測
  - # 高周波電子加熱
  - # 3次元コイルを使った垂直位置不安定抑制の予備研究 (東工大)
  - # トリプルプローブアレイの開発と性能評価 (石川高専、核融合研)
  - # テアリングモードに対する外部RMPの効果
  - # 外部RMPの伝搬研究
  - # オーミットカマクのポロイダル、トロイダル流計測
  - # トロイダル磁場リップルを用いた、RMP制御 (名大、QST)
  - # MHDスペクトロスコーピー (石川高専、QST)
  - # 真空容器挿入型のコンパクトな2次元磁気プローブアレイの開発と性能評価
  - # 水平磁気軸位置制御システム開発 (東工大)
- 提案中課題 (NIFSから)
- # ミリ波反射計、干渉計を用いた磁場揺動の径方向分布計測手法の開発
  - # プラズマ画像を用いたトカマクの平衡制御手法の開発

緑: 計測器開発、水色: 加熱・運転制御



# 共同研究への展開

---

## 物理研究プラットフォーム

(これまで、NIFSネットワーク型共同研究やLHD計画共同研究のプラットフォームとして利用されてきた)

- # RMP研究、MHDスペクトロスコピー、準2次元対称性配位への摂動3次元磁場のへの影響(3次元コイルを使った垂直位置不安定抑制の研究、3次元新古典粘性流の評価)

## 新型計測器開発プラットフォーム

- # トリプルプローブアレイの開発と性能評価
- # MHDスペクトロスコピー法の開発
- # ミリ波反射計、干渉計を用いた磁場揺動の径方向分布計測手法の開発
- # プラズマ画像を用いたトカマクの平衡制御手法の開発

# 外部RMPの伝搬研究 (MHD安定放電) I

ITER等でもプラズマ立ち上げ時には、テアリングモードが発生し、誤差磁場との相互作用でロックモード、ディスラプションが発生する可能性がある。

⇒ ロックモードが起こらない運転条件の同定が重要。

⇒ テアリングモードがロックする条件を誤差磁場(外部RMP浸透)の閾値として、複数装置で外部RMPの浸透閾値実験則を作成。

## A penetration threshold scaling based on Multi tokamak-devices (Ohmic)

$$B_{\text{pen}}/B_t \propto (n_e [10^{19} m^{-3}])^{1.4 \pm 0.13} (B_t [T])^{-1.8 \pm 0.16} (R [m])^{0.81 \pm 0.24} (\beta_N)^{-0.86 \pm 0.14}$$

[Y.Gribov; Meeting of ITPA MHD TG, Oct.2017]

名大・大野研の小型トカマクHybtokでは、プラズマ中の $\tilde{b}_r$ 分布、プラズマ回転周波数の直接計測が可能。

⇒ 外部RMPの回転周波数やプラズマ抵抗を変更して、Fitzpatrickモデル等(共鳴有理面での $\Psi$ の回転周波数、抵抗依存性)の理論モデルを検証可能。

### Fitzpatrickモデル[NF, 1993]

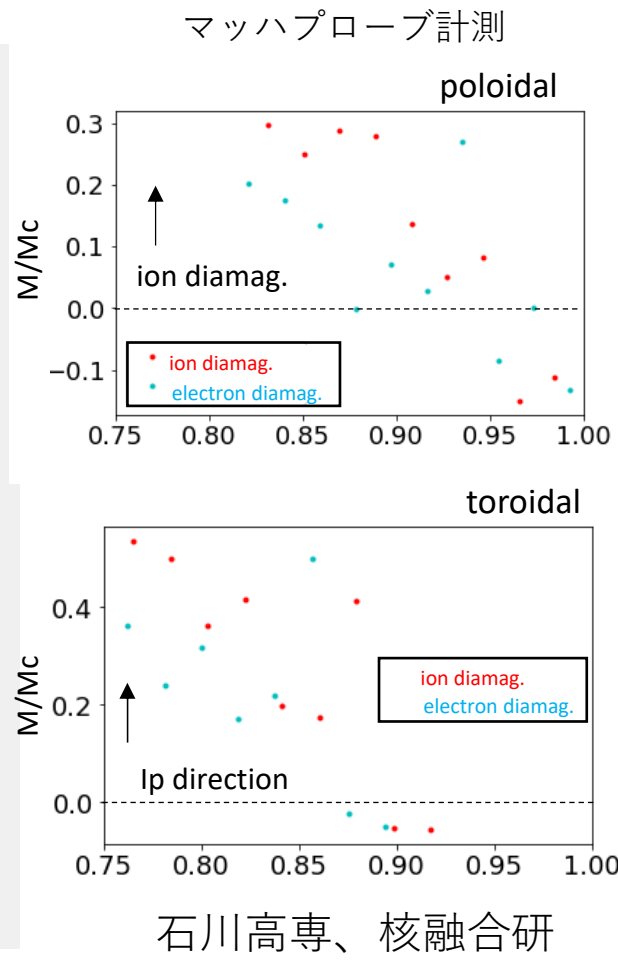
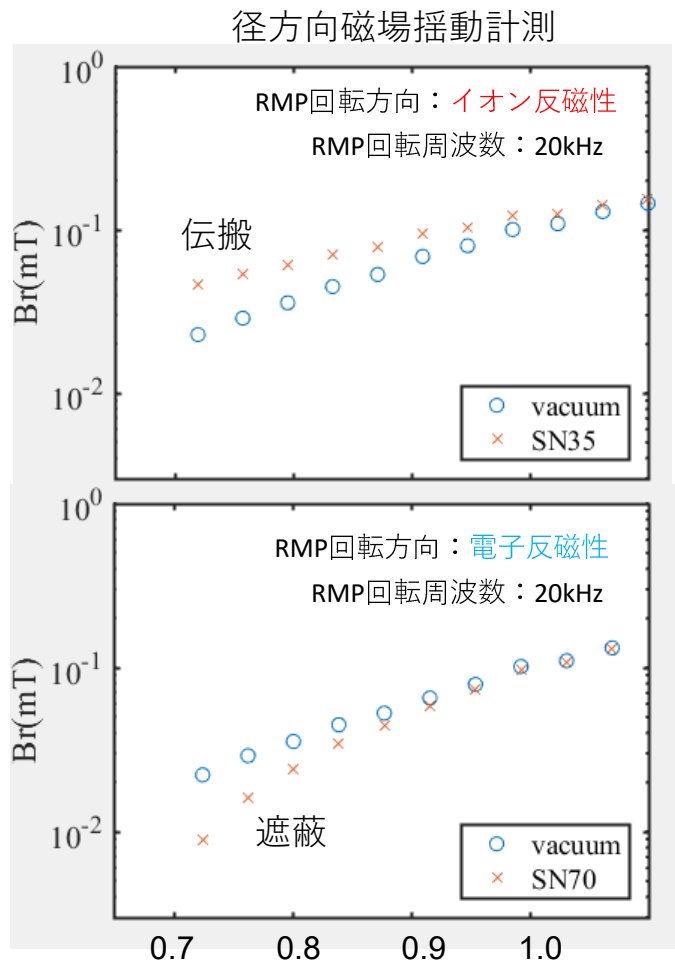
$\Psi_{\text{full}}$ : 真空時の外部RMPによる共鳴有理面でのRMP磁束 $\Psi$  ( $\propto \Psi_{\text{vac}}$ )

$$\left| \frac{\Psi}{\Psi_{\text{full}}} \right| = \frac{1}{(1 + 3\hat{\omega}^2)^{1/2}} \quad \hat{\omega} = \omega'_0 \tau_{\text{rec}} / \sqrt{3}$$

↑ 共鳴有理面での表皮時間

プラズマと外部RMPの回転速度差があると共鳴有理面でのRMP磁束 $\Psi$ が減少

# 外部RMPの伝搬研究 (MHD安定放電) II

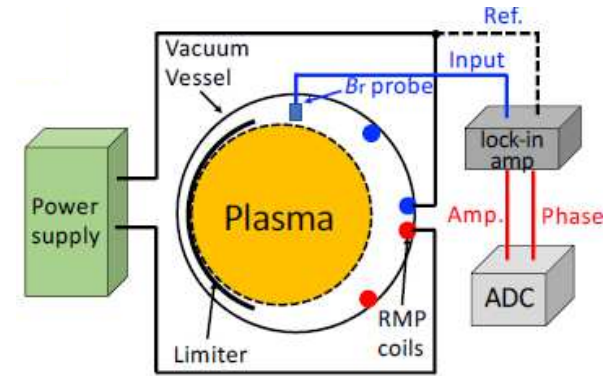
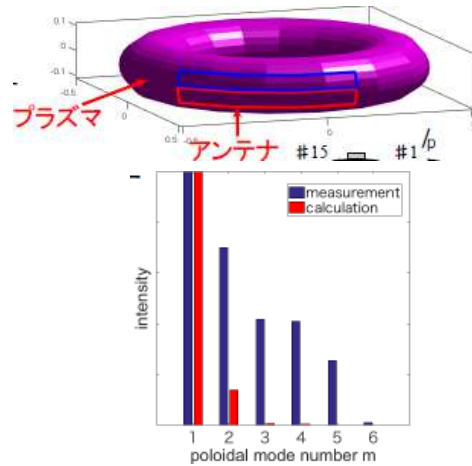
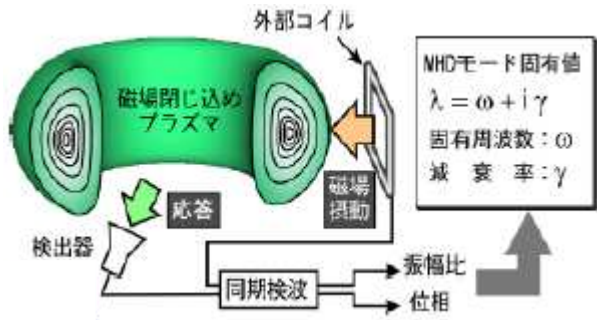


m/n = 6/1 RMPコイル  
回転RMPを印加

今後  
周波数、RMPのモード数を変えて、外部RMPの伝搬特性を定量的に調査し、Fizpatrickモデルを検証。

プラズマがイオン反磁性方向に回転している時、外部RMPの回転の向きがイオン反磁性方向(回転速度差小)の場合、RMPは伝搬(浸透)する。定性的にはFizpatrickモデルを再現。

# MHDスペクトロスコピー (柴田・岐阜高専)



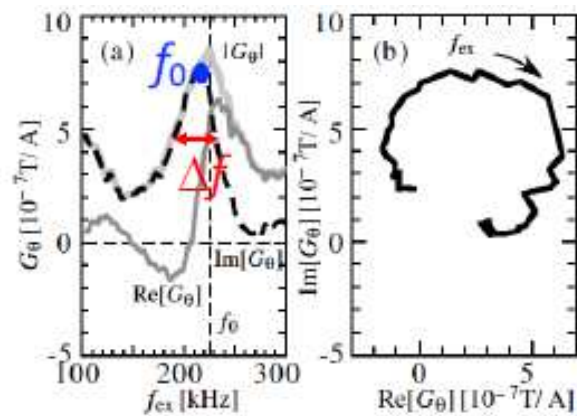
入力波と高相関の磁場揺動強度の  $q_a(I_p)$  依存性をロックインアンプで取得

## CHSでのAEs励起実験※

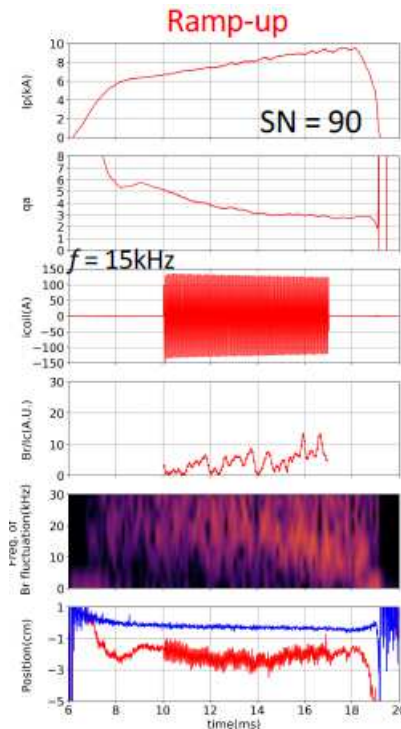
伝達関数  $G_\theta = \frac{b_\theta}{I}$   $I$ : 外部摂動磁場電流  
 $b_\theta$ : ポロイダル磁場

減衰率  $\frac{\gamma}{\omega_0} \propto \frac{\Delta f}{f_0}$  ← 伝達関数のピークの周波数と幅から評価

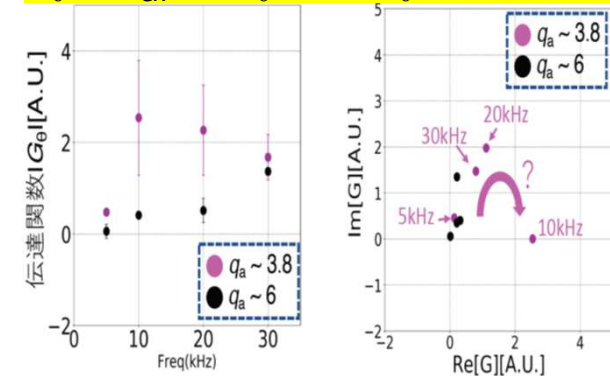
実験的に固有振動数、減衰率を評価



G. Matsunaga, et. al., PRL, 94 225005 (2005).



## $G_\theta$ vs $F_{ex}$ , $ReG_\theta$ vs $ImG_\theta$ の初期結果



- $ReG_\theta$  vs  $ImG_\theta$  のダイアグラムの回転方向がCHSのAEと反対
- 減衰率の評価はこれから ( $q_a(3.8$ は減衰率が評価できそう => より不安定か?)

# ユニットとの関係

---

1. 波動粒子相互作用、モジュライ(対称性・群の構造)  
#  $\sim$ kHzのMHD現象等の共同実験プラットフォーム(特に、外部RMPとMHD不安定性の相互作用、MHDスペクトロスコピー、外部RMPのプラズマ伝搬研究等)
2. 革新的計測・解析・表現システム  
# 計測器の原理実証プラットフォーム(MHDスペクトロスコピー、ミリ波反射計、干渉計を用いた磁場揺動計測等)  
# 核融合クラウドを遠隔実験環境構築に拡張する際のテストスタンド(コイル電源のオンオフと放射線の安全確認、装置のメンテナンス以外は共同研究者が放電、データ収集を遠隔から実施できるか、実施には何が必要かの検証を行う)

# まとめ

Hybtokは名大・大野研所有の小型トカマク装置でこれまで、名大の大学院教育、核融合研究に利用され、以下のような特徴を持つ。

- # <12msの放電が可能(kHzのMHD現象等の実験が可能)
- # 0.2~0.4Tのトロイダル磁場の実験が可能  
(=> $n_e \sim 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ ,  $T_e < 100 \text{eV}$ のプラズマ生成が可能)
- #  $q_a > 2$ @0.2Tの実験が可能(実質的には,  $q_a \sim 3$ でかなり不安定。オーミックプラズマながら多様なMHD不安定性実験が可能??)
- # 磁場、電子密度・温度、ポテンシャル、プラズマ流速の探針計測が可能
- # RMP用の電源があり、多彩なRMP実験が可能

最近の装置使用者、実験課題提案者は、大野研OB(石川高専、岐阜高専、兵庫県立大)、名大学生、核融合研、東工大、QST等

**(以下の様な共同利用計画を基にNIFS移転を行いたい)**

- # ~kHzのMHD現象等の実験プラットフォーム(含むRMP実験)
- # 計測器の原理実証プラットフォーム
- # 核融合クラウドを遠隔実験環境構築に拡張する際のテストスタンド
- # プラズマ実験、各種計測器利用、平衡制御等の教育プラットフォーム