

Development of a local current diagnostic
using small Rogowski coil for a spherical tokamak TST-2

TST-2 球状トカマクにおける 小型ロゴスキーコイルを用いた局所電流計測の 開発

古井 宏和¹, 永島 芳彦², 高瀬 雄一¹,
江尻 晶¹, 角田 英俊¹, 曾根原 正晃¹,
大迫 琢也¹, 辻井 直人¹, 平塚 淳一¹, 今村 和宏¹,
稲田 拓真¹, 中西 綾香¹, 新屋 貴浩¹, 富樫 央¹,
山口 隆史¹, 若月 琢馬¹
東京大学¹, 九州大学²

謝辞

この研究は、科学研究費補助金
基盤研究 B (23360409) 及び、
基盤研究 S (21226021) の支援を受けました。

研究背景・目的

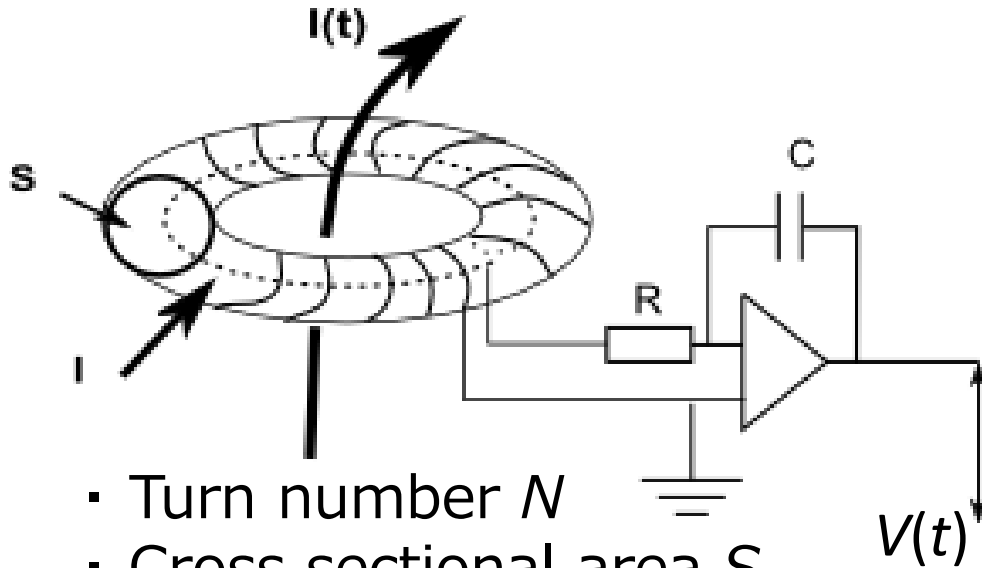
研究背景

- 球状トカマクTST-2では、小型ロゴスキーコイルを用いた**定常的な局所電流**の計測手法の開発を行っている。
- 局所電流計測では、期待される電流値が小さく、ロゴスキーコイルの信号強度が非常に小さいことから、低ノイズシステムの構築が必要である。
- TST-2 では、**外部磁場感度の小さい小型・多層巻ロゴスキーコイルの開発に成功した。**

研究目的

- ロゴスキーコイルを搭載した‘ロゴスキープローブ’を設計製作し、さらに、十分な積分定数(~ 400 ms)とゲイン(1000)をもつ積分回路を用いてOHプラズマによる初期実験結果を得る
- 特に、プラズマがコイル貫通穴(直径 9.2 mm)を通るか実験的に検証する。

ログスキーコイル



- Turn number N
- Cross sectional area S
- Core length l

$$V(t) = N \frac{\mu_0 S}{l} \frac{1}{RC} \int \frac{dI}{dt} dt$$

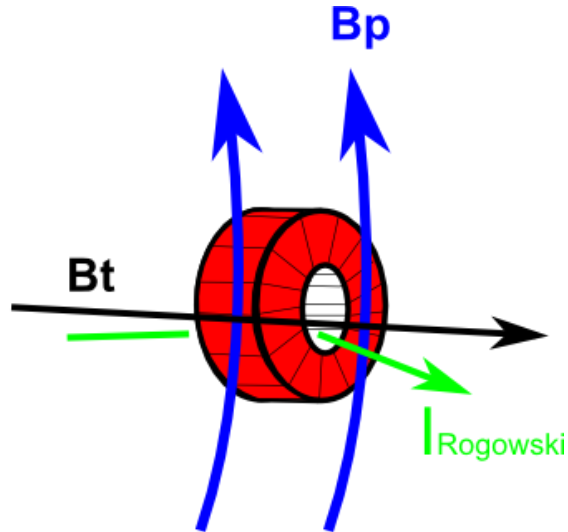
$$= \frac{K_A}{RC} I(t)$$

$$K_A = N \frac{\mu_0 S}{l}$$

ログスキーコイルの特徴

- **局所電流の直接計測**
- コストが小さく、小型装置にも取り付けが容易
- 特に、エッジの局所電流計測に向いている

トカマク放電におけるロゴスキーコイルの信号



Bt : Toroidal field
Bp : Poloidal field (I_p)
Bv : Vertical (PF coil)

理想的なロゴスキーコイルは

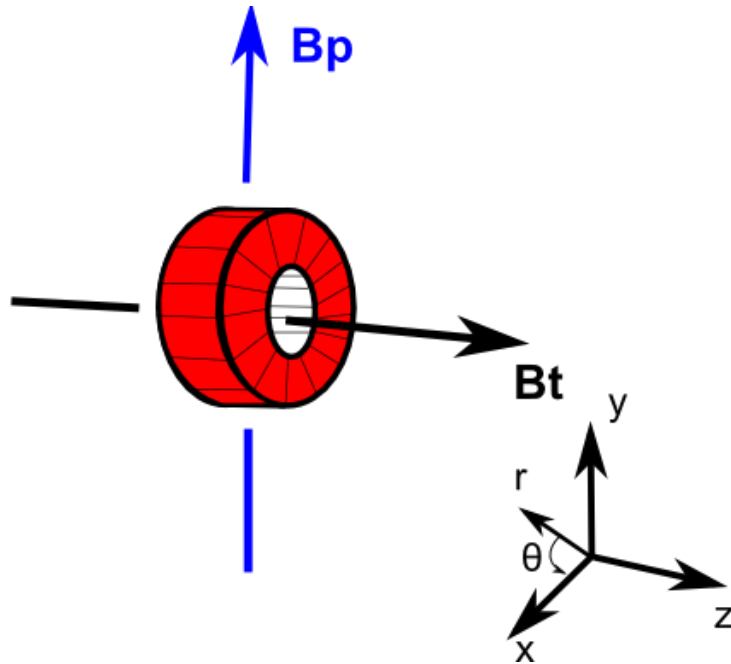
- ・ループ断面積が均一
- ・巻き線密度が一定

非理想的なロゴスキーコイルは、
Bt と Bp の時間変化に感度を持つ

$$V(t) = V_{I_{Rogowski}} + V_{B_t} + V_{B_p}$$

ロゴスキーコイルは中心を通った電流信号と外部磁場によるノイズ信号に感度を持つ

外部磁場感度の定義



$$V_{B_t}(t) = K_{B_t} \frac{\partial B_t}{\partial t}$$

$$V_{B_p}(t) = K_{B_p} \frac{\partial B_p}{\partial t}$$

- $K_{B_t} \cdot K_{B_p}$: 外部磁場感度
- それぞれ、 x - y 平面と x - z 平面の投影断面積に対応する。
単位は m^2
- $K_{B_t} \cdot K_{B_p}$ はそれぞれ、ヘルムホルツコイルを用いて校正可能

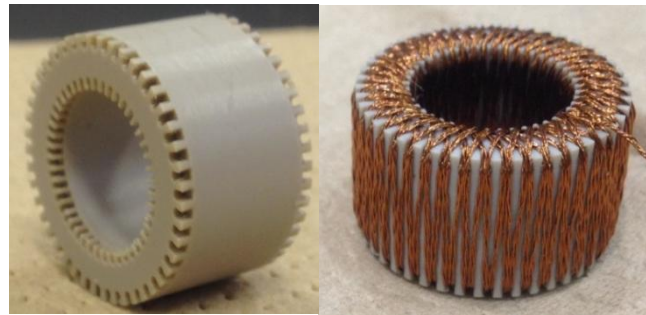
多層巻小型ロゴスキーコイル

A



- ・スリットなしのコア
- ・巻線には単線を使用

B

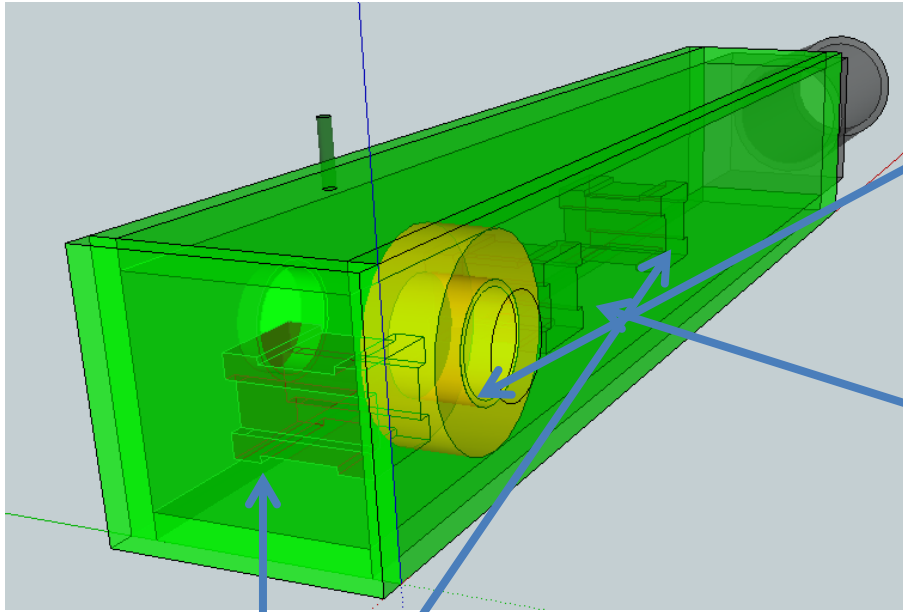


- ・スリットありのコア
- ・巻線には撚り線を使用

	A	B
巻き方	リターンあり	多層巻(8層)、リターン無
巻き数	310	360
外径・内径	20 mm, 9 mm	20 mm, 12 mm
製作時間	1 週間	3 時間
$K_{Bt} \cdot K_{Bp} [m^2]$	$1.0 \times 10^{-4}, 4.0 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-6}, 5.4 \times 10^{-6}$

- ・外部磁場感度を 100 倍改善
- ・製作時間・耐久性を大幅に改善
- ・小型化・巻き数の増加に成功

ロゴスキープローブ



Rogowski coil



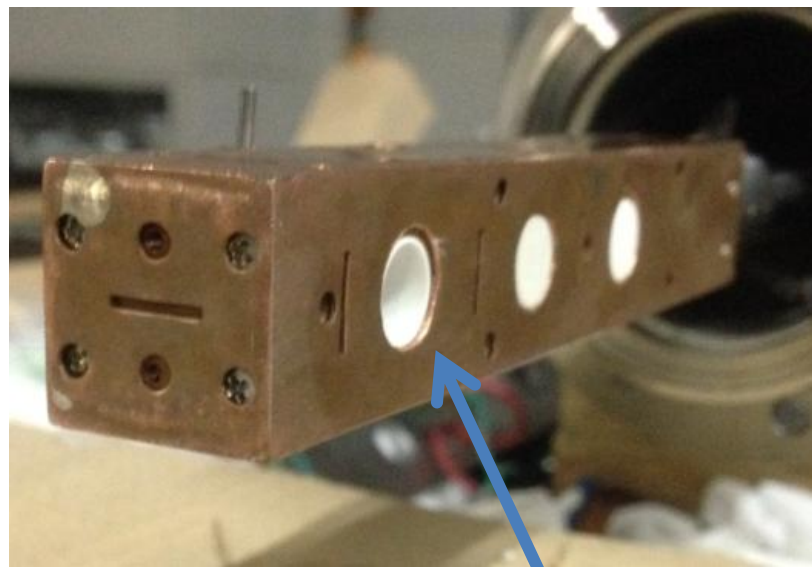
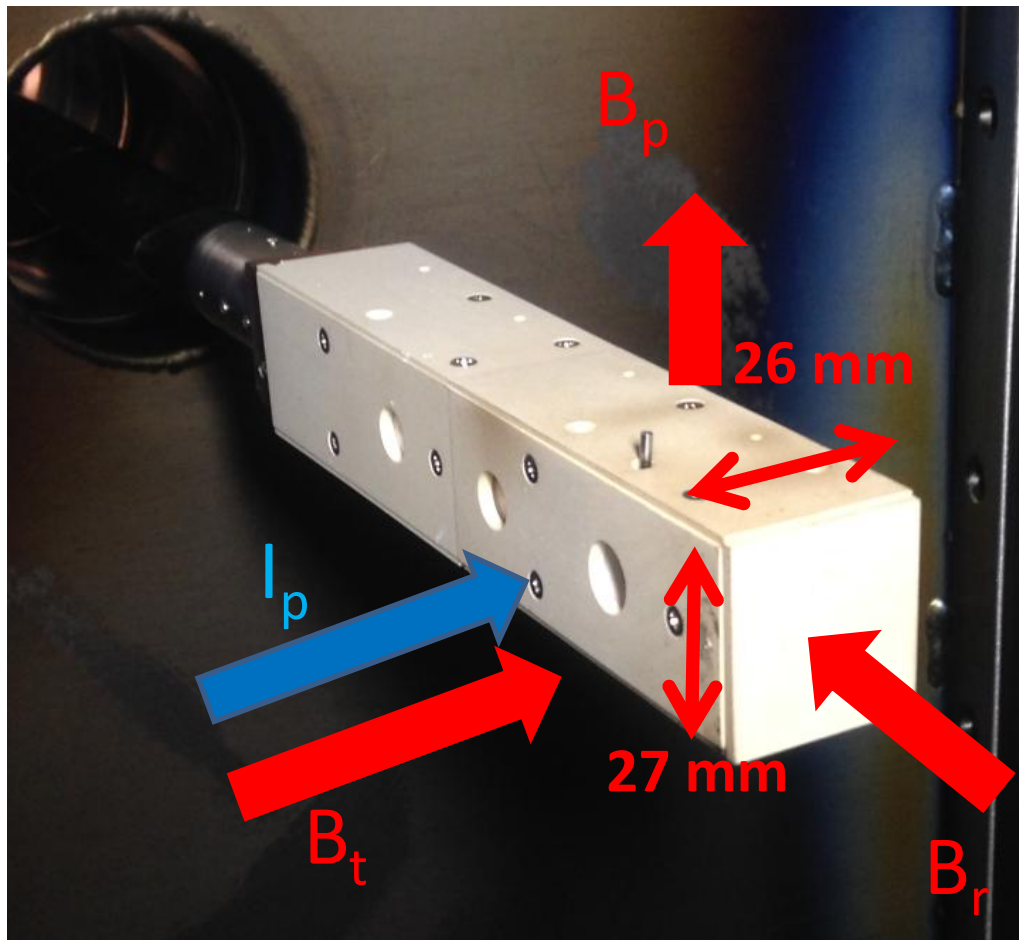
3 dimensional pick up coil



1 dimensional pickup coil

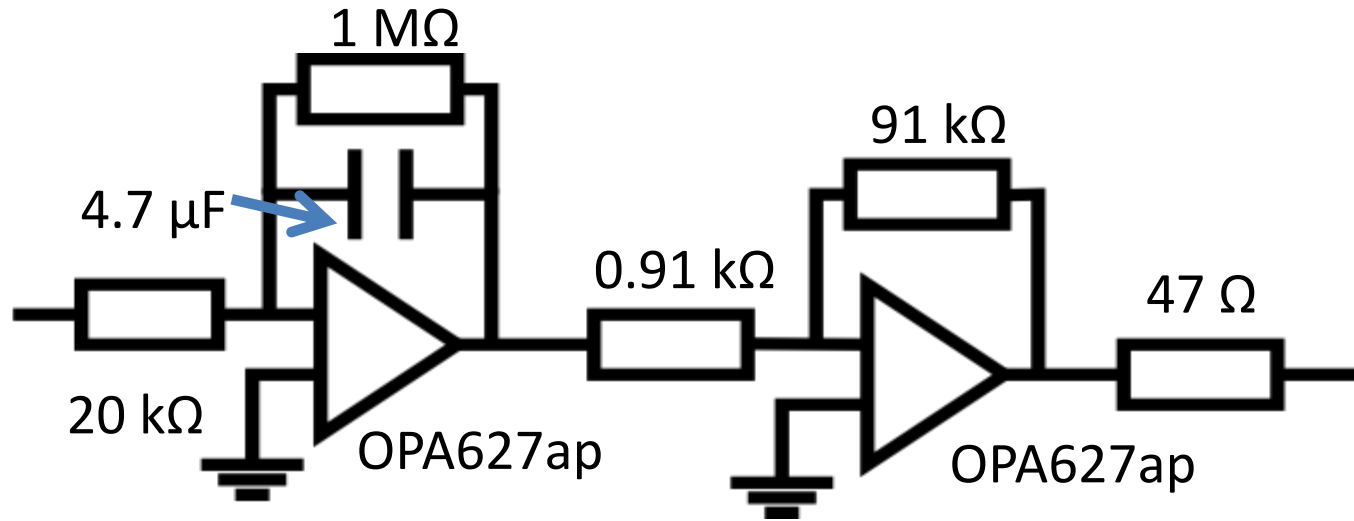
- ・径方向移動可能
- ・軸方向回転可能

ロゴスキープローブ写真



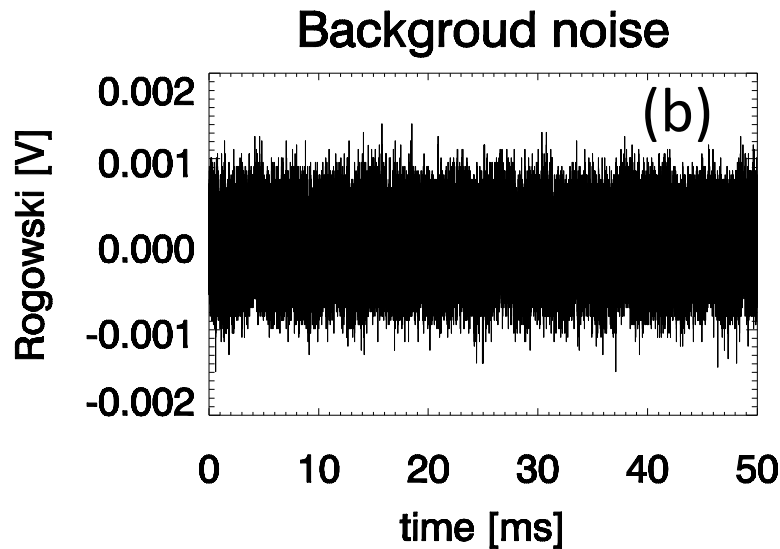
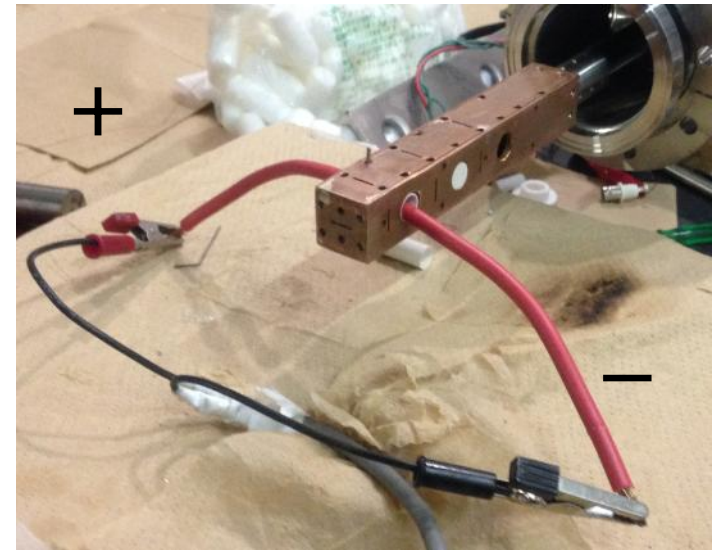
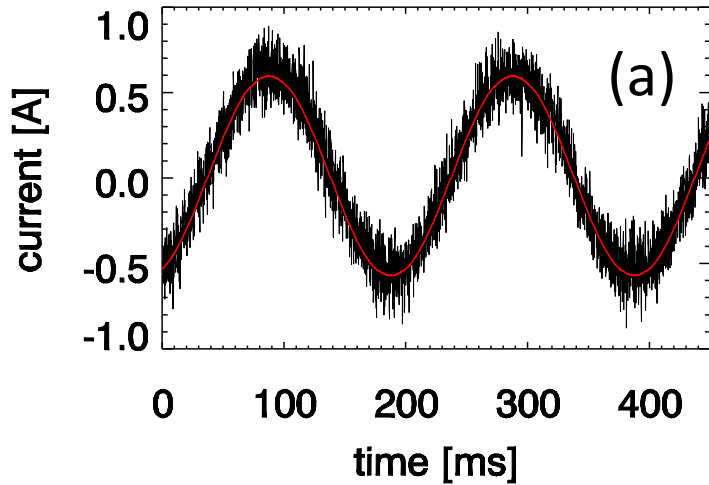
プローブ全体が、銅シールドで覆われている

微小電流・長時間放電の計測を行うために要求される積分回路の性能



- ・ 十分な積分定数を持つ一方で大きなゲイン(1000倍)
→ オペアンプを2つ使用する必要がある
- ・ 小さなバックグラウンドノイズとオフセット電圧の調整
→ 使用するオペアンプの組み合わせに依るところが大きい
OPA627ap を2つ使用することが経験的にいい

ロゴスキープローブ校正試験とバックグラウンドノイズ



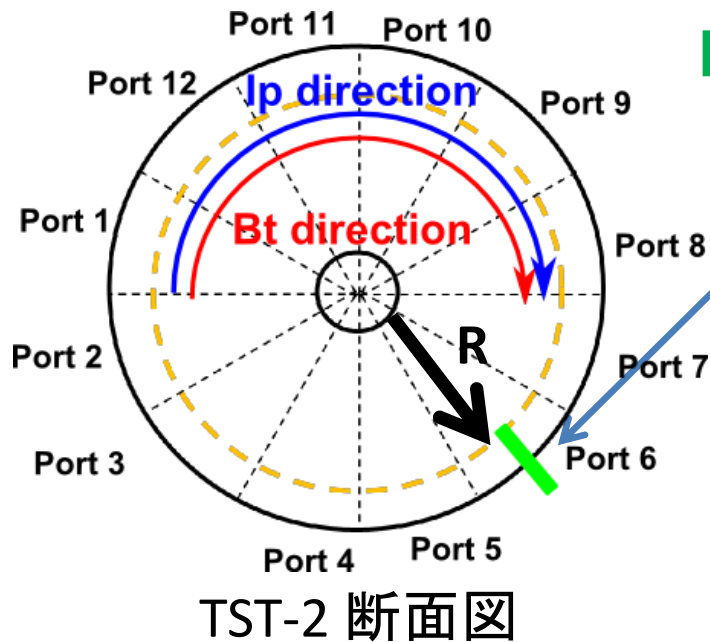
▪ (a) 校正試験結果

5 Hz 0.6 A の低周波な微小電流が検出できることを確認

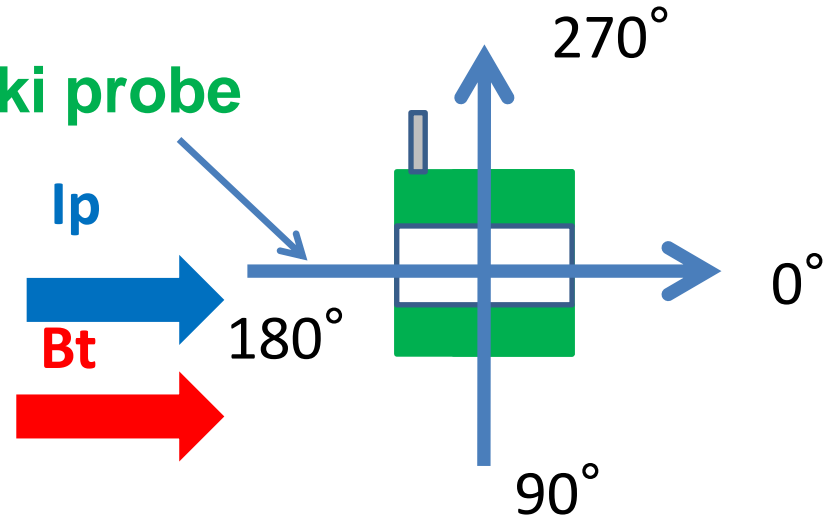
▪ (b) 入力信号無、ロゴスキーコイルを積分回路につなげた

1100 倍のゲインで、バックグラウンドノイズが ± 1 mV

実験概要



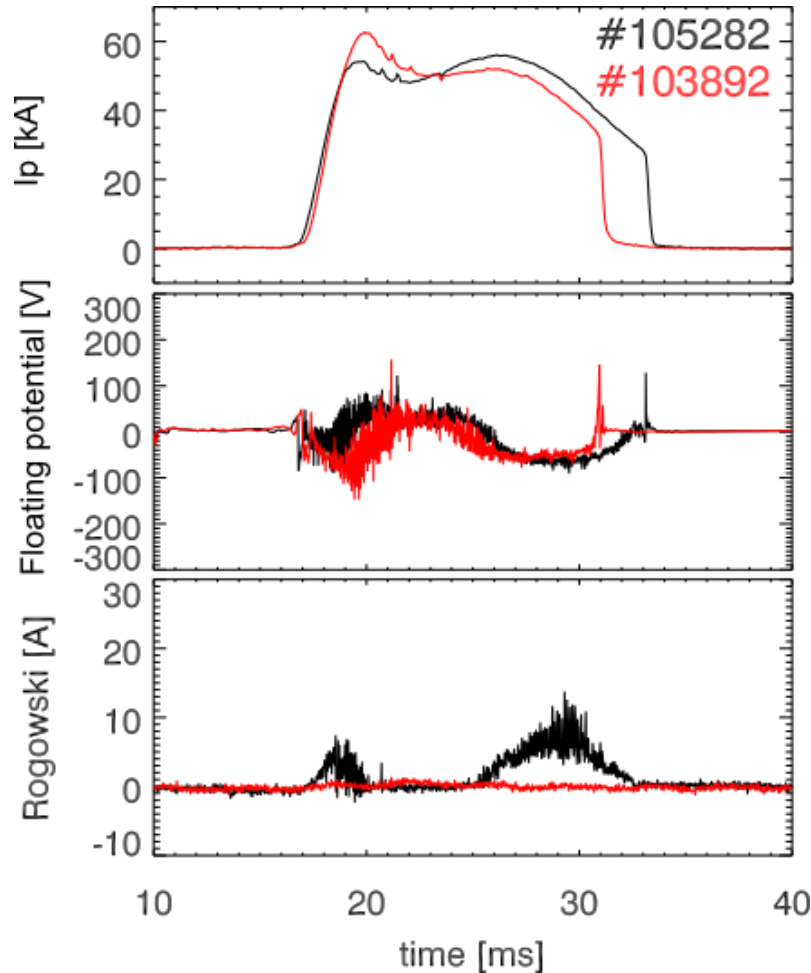
Rogowski probe



センタースタックから見た
プローブと Bt , Ip の関係

- ・OHプラズマによる実験
- ・貫通穴をプラズマが通るか検証する
 - ① ロゴスキーコイルの穴をあけた場合と閉じた場合の信号の比較
 - ② ロゴスキーコイルの貫通穴の向きを電流に対して 0° と 180° の場合を比較して、信号が反転するか確認

穴をあけた場合と穴を塞いだ場合の比較



黒: 穴あり

赤: 穴を閉じた場合

- ・ ログスキー位置 = 551 [mm]
- ・ 電極位置 = 551 [mm]
- ・ 浮遊電位の波形から、プローブが十分に浸っていることが確認できる
- ・ 穴ありと穴なしで明らかな信号の違いが出た

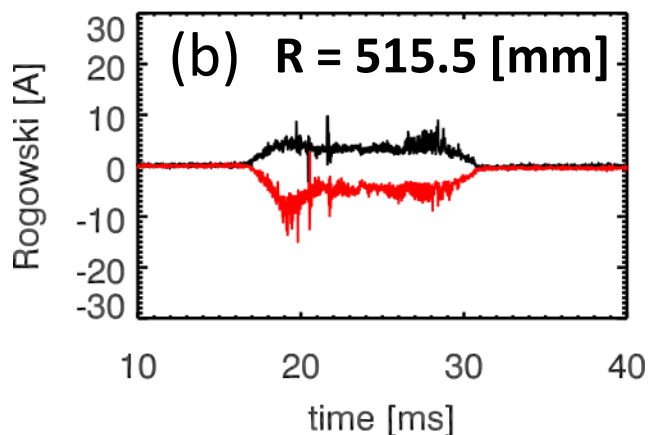
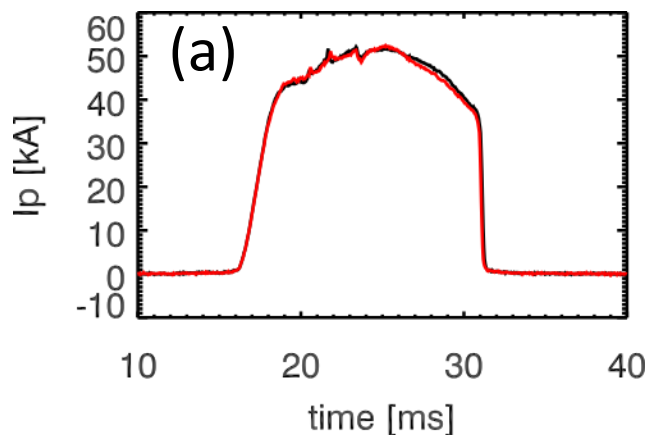


プラズマが、ログスキーコイル貫通穴を通過したことを示唆する結果

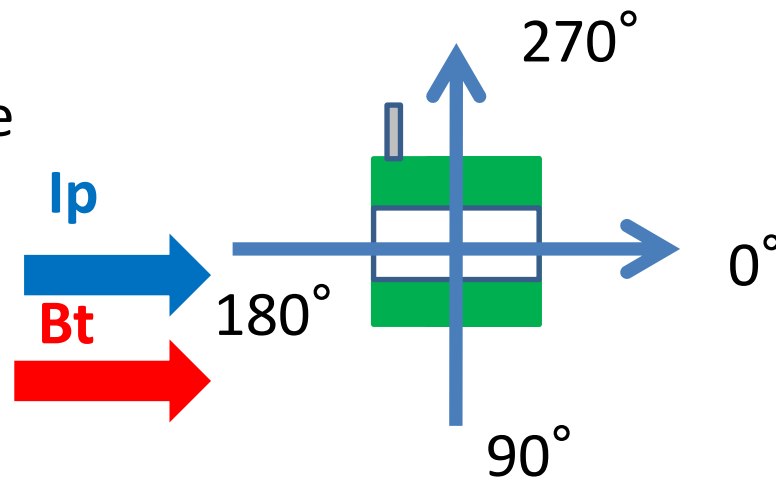
電流信号に対するコイル信号の極性

#102421

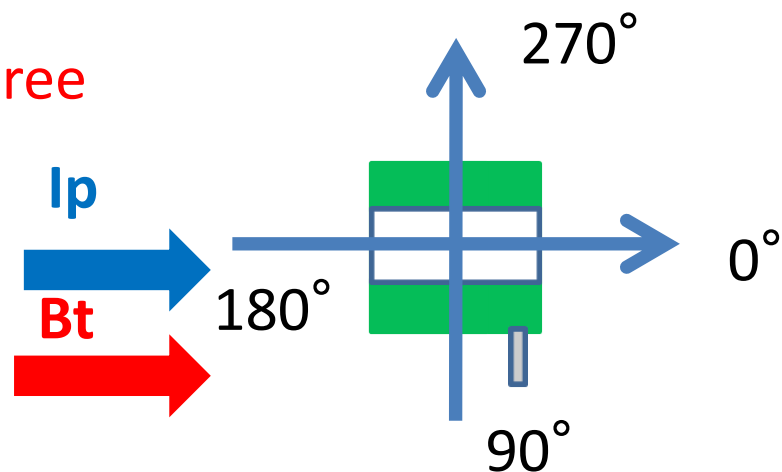
#102439



0 degree



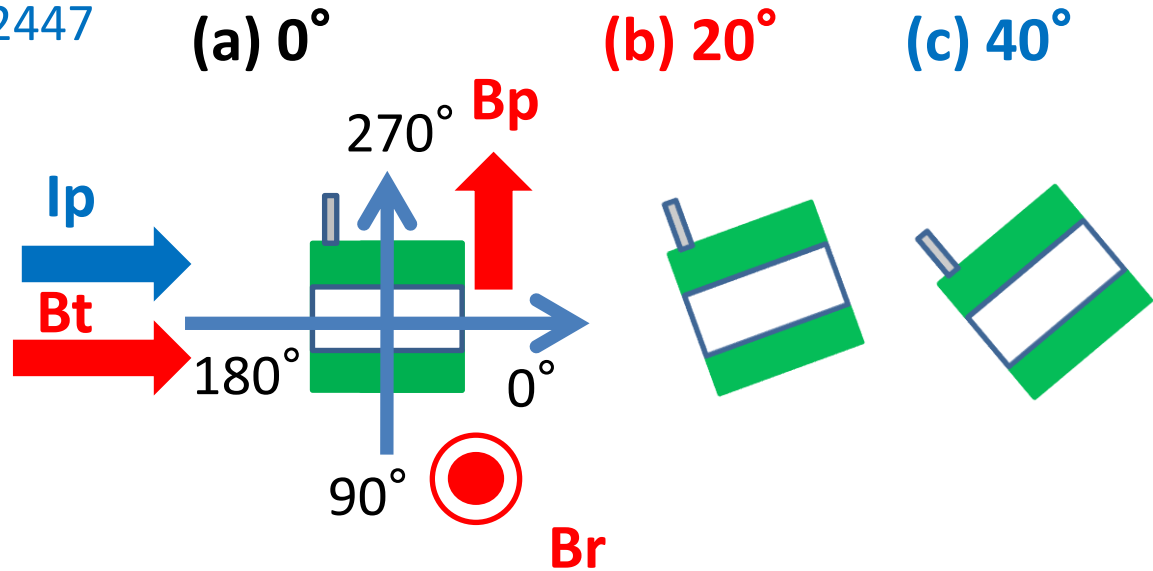
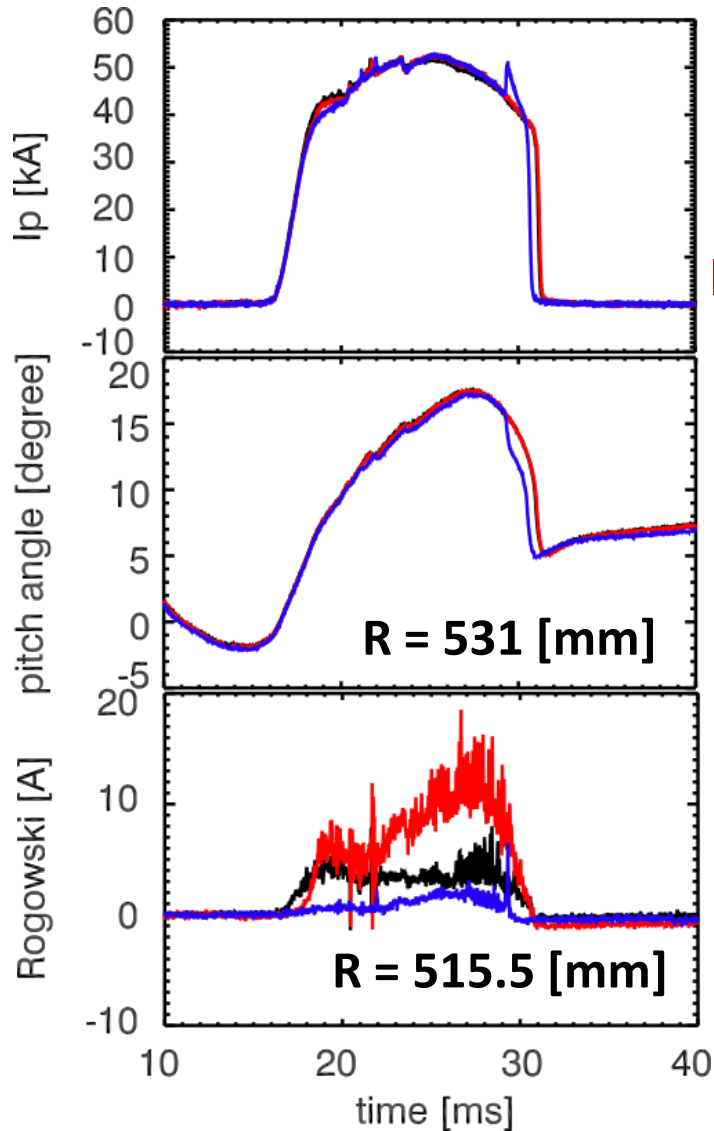
180 degree



- ・コイル信号は、極性を持つ
- ・信号の極性が反対になった→電流信号をとらえていることと矛盾しない

磁場のピッチ角と局所電流の角度依存性

(a) 102421, (b) 102445, (c) 102447



- ・ピッチ角は、放電後半で最大値を持つ
- ・放電初期では、トロイダル電流が支配的
- ・ 20° 傾けた時は、ピッチ角の増加とともに電流が大きくなる
- ・これらの実験結果は、局所電流が磁場に対して有限のピッチ角を持って流れているという、物理的な現象と矛盾しない

結論

- 外部磁場の混入が小さい小型多層巻ロゴスキーコイルを用いた局所電流計測手法の開発を行った
- ロゴスキーコイル、ピックアップコイル、静電プローブを搭載したロゴスキープローブの設計製作に成功した。
- 低ノイズ・高ゲインな積分回路を設計製作し、0.6 A 5 Hz の長時間・微小電流の検出に成功した。
- ロゴスキーコイルの穴ありと穴なしの実験、電流に対する貫通穴の向きを反転した実験から、局所電流が貫通穴を通っていることと矛盾しない結果を得た。
- 特に、コイル近傍のピッチ角と比較することによって局所電流がピッチ角の増加とともに有限なピッチを持って流れているという物理的な結果を得た。