

プラズマ合体実験における 高精細2次元計測システム開発

小野靖 研究室
修士2年 47-176088
秋光 萌

2018年7月26日

目次

1.背景

- 1.1)磁気リコネクションとは
- 1.2)プラズマ合体実験装置(TS-3)

2.研究内容

- 2.1) 本研究の目的
- 2.2) 磁場計測について
- 2.3) PCBを用いた高精細二次元磁場計測システムの開発
- 2.4) 結果

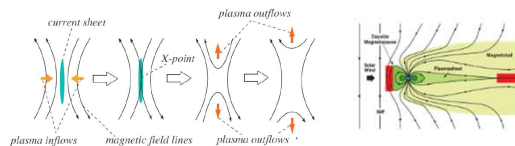
3.今後の予定

- 3.1) 装置アップデート TS-6
- 3.2) 今後の予定

4.まとめ

研究背景

基盤物理現象 ～磁気リコネクションとは～



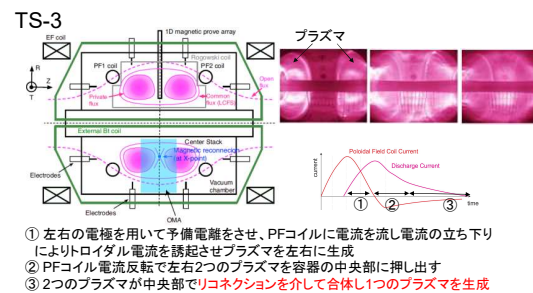
- 高伝導率のプラズマ中で、反平行な磁力線がX状に交わり凍結条件を破ってつなぎ変わる磁化プラズマの共通物理現象
- 局所の磁場構造の変化により巨大な磁気エネルギーが熱・運動エネルギーに急速に変換される

磁気リコネクション現象の機構解明は、フレアなどの太陽物理や宇宙の解明から磁場閉じ込め式核融合への応用まで広い意味を持つ

合体プラズマ生成装置TS-3

リコネクションによるエネルギー変換をプラズマ加熱に応用！

・磁気リコネクションにより短時間に大きな加熱を得られることから磁場閉じ込めプラズマの合体実験が行われている。

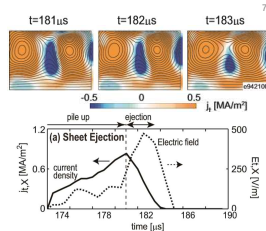


研究内容

本研究の目的

・高出力加熱は高速のアウトフローが下流で熱化して得られるため、高速リコネクションがキー

・高速化の原因として考えられる機構
①イオンラモア半径 (6~10cm) で特徴づけられるイオンメアンダーリング運動などの運動論効果
②プラズモイド (閉じた磁気面で囲まれたプラズマのかたまり) の形成・放出による非定常効果



先行研究では電流シート放出が観測されたが、それがプラズモイド放出によるものかはわかっていない

目的：従来よりも高精細な二次元磁気プローブを開発し、リコネクション高速化機構について検証する。

磁場計測方法

ファラデーの法則によりピックアップコイルに生じる誘導起電力を計測し、プラズマ合体実験中の磁束密度変化を計測する。

$$V_{coil} = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}$$

V_{coil} : ピックアップコイル出力電圧 Φ : 磁束
 N : コイル巻き数 S : コイル断面積 B : 磁束密度

RC積分増幅回路によって積分し、磁束密度を得る。

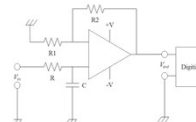
$$V_{out} = A \times \frac{1}{C} \int_0^t I dt = \frac{A}{RC} \int_0^t V_{coil} dt = -\frac{ANS}{RC} B$$

$$B = -\frac{RC}{ANS} V_{out}$$

V_{out} : デジタル出力電圧 RC : 積分器時定数 A : 増幅器倍率

$$V = -d\Phi/dt$$

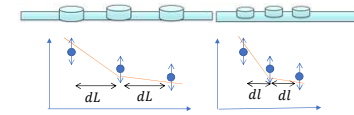
n [turn], S [m^2]



分解能向上には精度が必要

電流シートの電流密度は磁場の位置微分で求める。

$$J_t = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times B = -\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB_z}{dr} - \frac{dB_r}{dz} \right)$$



コイル間に感度ばらつきがあるとき、コイル間距離が狭いほど傾きの誤差は大きい！

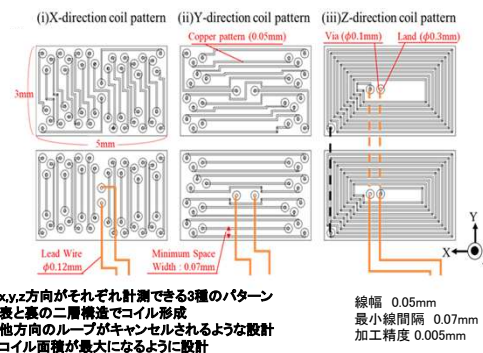
・より細かな磁場構造を計測するために高密度にコイルを配置する場合、同時にコイル間のばらつきを減らし精度をよくしなければならない。
・人の手によって配置される場合、コイルを並べるときの角度の違いによる誤差も起きやすい。

プリント基板(PCB)を用いると

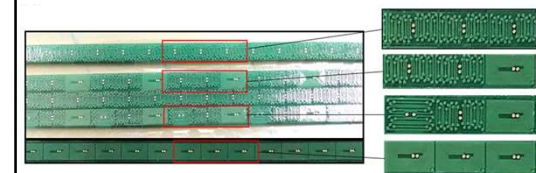
- ・基板上にコイルを高密度に配置可能
- ・コイル間の精度ばらつきを低減できる
- ・一度にコイル列を大量生産できる

PCBを用いた高精細二次元磁場計測システムの開発

コイルパターンの設計



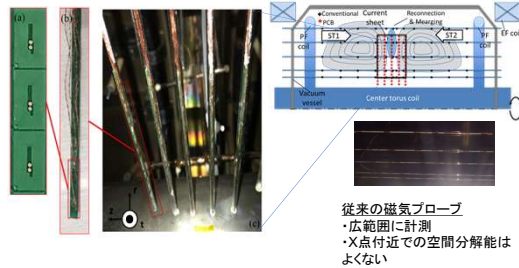
プローブ用基板の製作



①幅120mm×長さ300mmの基板上にコイルパターンを印刷。
②幅3mmづつにカットし、1本につき60個のコイルパターンを持った3mm×300mmの細いコイルパターン列を35本作成

○1方向成分のみ、2方向成分、3方向成分をもつものができるようにコイルパターンを組み合わせる配置
○簡単に大量のコイルアレイを制作可能

R方向高分解能磁場計測システム

<PCB型二次元 $B_{z,t}$ 計測システム開発>

一方方向のパターンのみがプリントされたPCBコイルアレイを使い、X点付近でのr方向空間分解能が $1\text{cm} \times 15\text{ch}$ の二次元磁場計測システムを構成

計測結果

PCBプローブの性能比較

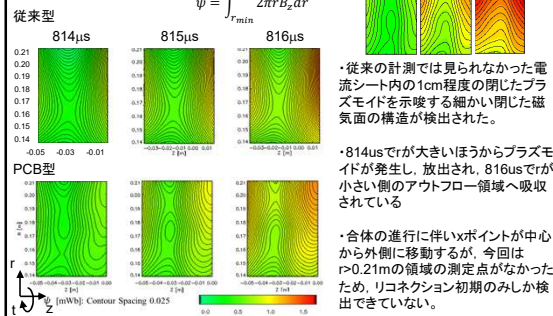
ヘルムホルツコイルを用いて、従来型とPCB型プローブそれぞれの10kHzにおけるNS値の計測を行った。

	従来型	PCB型 (n成分)
コイル個数	60個	75個
コイル密度 $[\text{cm}^{-2}]$	0.103個	0.670個
コイル巻き数N	200	19
NS平均値 $[\text{mm}^2]$	6.61×10^2	1.15×10^2
NS標準誤差率	0.32%(n=58)	0.095%(n=69)

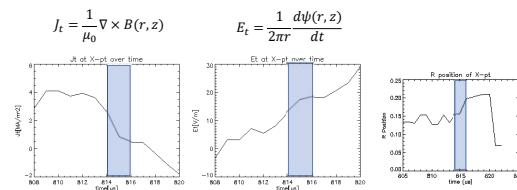
- コイル密度はPCBアレイが6.7倍程度高い
- コイル巻き数は従来型のほうが10倍程度高く、NS値も6倍程度高いため感度は従来型のもののほうが良い
- ONSの標準誤差率はPCB型のほうが3分の1程度になっており、コイル間のばらつきが抑えられている

高精細リコネクション磁場計測結果

軸対称性を仮定してポロイダル磁束 ψ を B_z の径方向積分により求めた。 $\psi = \int_{r_{\min}}^r 2\pi r B_z dr$



二次元磁束分布からリコネクション電場・電流密度の算出・解析



・ J_t は減少し、 E_t は上昇しているが、その他の時刻と比べあまり大きな変化は見られない。
⇒X点を追跡できていない可能性がある。

・より多くのショットを解析し共通する傾向を確かめる必要があるが、後述する装置アップデートに伴うシャットダウン期間があり、検証に十分なショット数が得られていない。

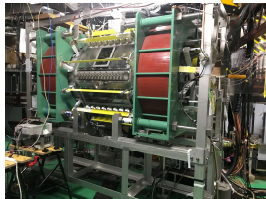
・今後は新装置でのさらなる実験により高速リコネクション機構の検証を行う。

装置アップデート

プラズマ合体装置アップデート TS-6¹⁹



---TS-3装置アップグレード---
TS-3⇒TS-6



- 2017年10月: TS-3シャットダウン
- 2017年11月: TS-6装置新容器納品
(軸方向拡張, 大観測窓)
- 2017年12月-2018年2月: 旧TS-3コイル系移設, ガス配管系新設, 電源系配線TFリターン結線, 制御系新構築, etc...
- 2018年3月: ファーストプラズマ
- 2018年4-7月: 低パワー合体実験(基本計測系テスト)

今後の予定

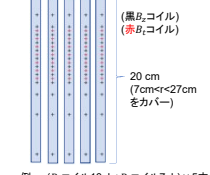
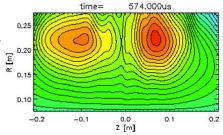
2方向磁場成分計測²¹

・デジタルのチャンネル数制限から、75chしか計測できず7cm<r<21cmの狭い範囲でしか計測できていない。X点がr=20cmくらいにできるため全範囲をカバーするにはより長いプローブを作る必要がある。
⇒新たにデジタル192ch×3台をセットアップ済。

↓
チャンネルを増やし、リコネクション領域をカバー

・実際のリコネクションは3次元的に起こっているため、 B_z のみでなく B_r を同時計測する必要がある。

↓
設計したコイルパターンのうち二方向成分を持つPCBコイルアレイを使って磁気プローブを作成



例: (B_z コイル13ch+ B_r コイル7ch)×5本

まとめ²²

・プリント回路基板を用いた手法により、コイルの位置精度が高く(加工精度0.005mm)、最大空間分解能 5mmの高精細なPCB型磁気プローブ用コイルアレイを開発した。

・PCBプローブにおけるNSの標準誤差率は0.095%(n=69)となり、従来型の0.32%(n=59)と比べコイル間の感度のばらつきが3分の1程度であった。

・PCBプローブによる高精細計測で従来の空間分解能ではとらえられなかったリコネクション部分での微細な磁場構造が検出可能になり、プッシュモードの合体カマクラプラズマで観測された電流シートとしては初めて電流シート内にプラズモイド形成・放出を示唆する閉じた磁気面を検出することに成功した。

今後の予定

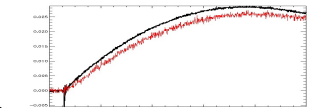
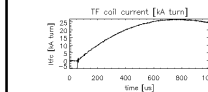
・新装置においてPCB型磁気プローブによる高精細磁場計測を行う。これまでは1方向成分のみであったが、多方向成分を持つプローブを作成し、より詳細な磁場計測を行い電流シート内部構造を明らかにする。

・計測結果よりリコネクション電界・電流シートの内部抵抗の時間変化などを解析し、その他電子・イオン温度や密度計測の結果と合わせ高速リコネクション加熱機構を検証する。

ご清聴ありがとうございました

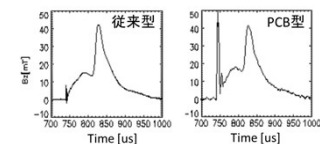
PCBプローブによる磁場計測結果²⁴

はじめに、真空状態でTFコイルの磁場を計測可能であることを確かめた。



<従来型との合体時Bz信号比較>

・近い位置にあるコイル同士と比較 (r_z = 従来型[] PCB型[])
⇒おおむね一致しており計測の信頼性が確かめられた。



・NSが小さく信号が小さいためノイズが大きくなる
⇒回路を改良、抵抗を小さくしRCを小さく(10ms→1ms)して信号の増加を図る。

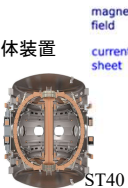
プラズマ合体加熱

～CSを用いないプラズマ立ち上げとしてのプラズマ合体法～

プラズマ合体装置



TS-3



ST40



X-point

・磁気リコネクションにより短時間に大きな加熱を得られることから磁場閉じ込めプラズマの合体実験が行われている。

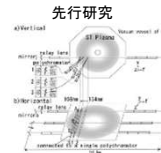
・近年では球状トカマク(ST)合体は核融合ベンチャーTokamak Energyにより早期に経済的な核融合炉を実現する手軽な加熱法として採用されている

・合体により5 μ sでイオン温度が10eVから70eV程度まで上昇することが確認されている。この温度上昇は3～5MWの加熱に相当

往復反射と飛行時間差を利用した高分解能二次元トムソン散乱計測システムの設計

・磁場、イオン温度・流速などの高精細二次元計測は開発され計測できるようになったが、電子に関する情報が不足している。

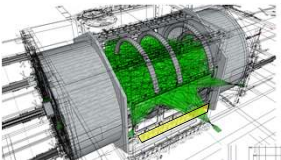
・往復反射と飛行時間差を利用したトムソン散乱計測が開発されたが、今回新たな容器に代わって広く二次元計測するための大きな観測窓が設けられ、高分解能化が可能となる



・具体的な往復反射方式、光学設計についての検討を行う。
・使用するミラーなどの部品の選定と発注を行う。

	従来型	PCB型(μ 成分)
コイル個数	60個	75個
コイル密度(/cm ²)	0.103個	0.670個
コイル巻き数N	200	19
NS平均値[mm ²]	6.61×10^2	1.15×10^2
NS標準偏差[mm ²]	16.1	0.9075
NS標準誤差	2.1152	0.10925
NS標準誤差率	0.32%(n=58)	0.095%(n=69)

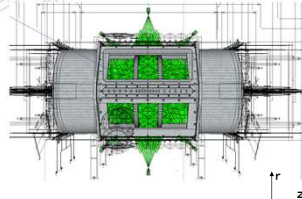
新容器による計測範囲の拡大



装置の真空窓の大きさ
(Z方向)

TS-3 : 120mm

TS-6 : 640mm



・ポートの数増設によりプローブ計測がより容易になる
⇒PCB型磁気プローブの計測範囲拡大

・観測窓拡大により広範囲の光学計測が可能になる
⇒往復反射と飛行時間差を利用したトムソン散乱計測電子温度の二次元分布が計測可能になる