

RT-1におけるマイクロ波によるプラズマ生成実験

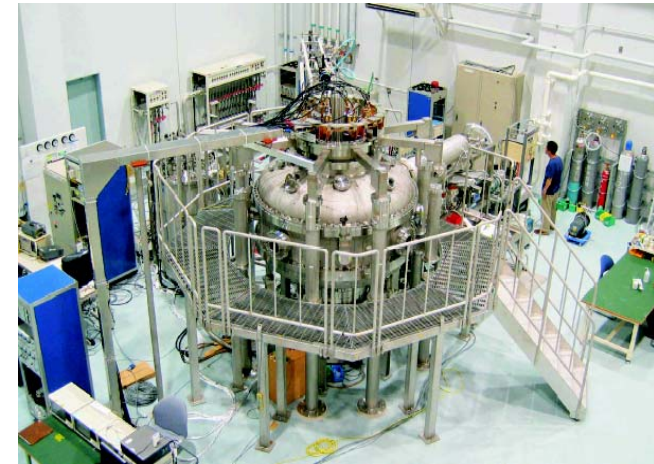
東大新領域、東大高温プラズマ研究センター
矢野善久, 齋藤晴彦, 吉田善章, 小川雄一, 森川惇二, 渡邊将, 鈴木順子, 林裕之
2008年3月 第11回若手科学者によるプラズマ研究会

磁気圏型プラズマ装置 RT-1

先進核融合を目指した磁気圏型装置

装置サイズは $R=1\text{m}$ で内部に超伝導コイル

($\text{Bi2223}, 112\text{kg}, r=0.25\text{m}, 250\text{kAt}$)を持ち上部の引き上げコイル($r=0.4\text{m}, 30\text{kAt}$)の電流を負帰還制御することで磁気浮上が可能



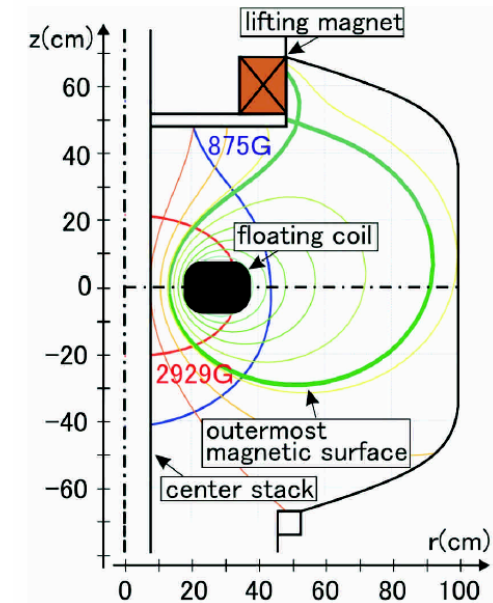
RT1装置の外観

マイクロ波によるプラズマ生成実験

8.2GHz ($25\text{kW}, 1\text{s}$, 共鳴面 2929G)のクライストロンと 2.45GHz ($20\text{kW}, 2\text{s}$, 共鳴面 875G)のマグネトロン

により水素プラズマを生成することが出来る


最近の実験結果より、磁気面の変形によりプラズマとともに浮上コイルが動くような現象が確認されており高 β プラズマであることが期待される



RT1装置のポロイダル断面

RT-1プラズマ生成部・主な計測器の配置

Soft X-ray



- ・Si(Li) detector with Be window
- ・PHA system

可視分光

トロイダル流速,
イオン温度等

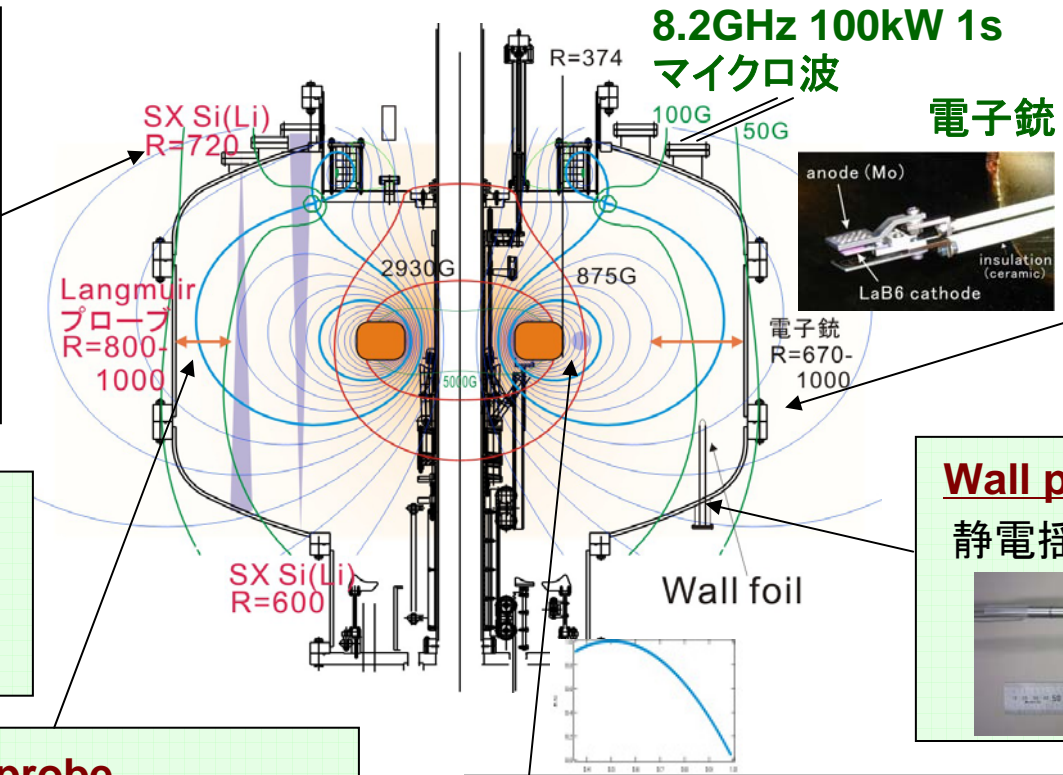
Edge Langmuir probe

- ・double probe for Te, Ne profile measurements
- ・純電子プラズマ空間電位の概算:

$$\Phi_H = \Phi_S - \frac{k_B T_e}{e} \ln \left(\frac{I_{es}}{I_{em} + I_c} \right)$$

electron saturation current
emission current current collected by probe

※ emissive probeを準備中



Diamag loop



磁気ループ (4箇所)

Wall probe (絶縁金属板)

静電揺動の非接触測定



マイクロ波干渉計 75GHz heterodyne

R方向密度分布を仮定


$$N_e = N_{peak} \times (1 - (2 \times (r - 0.5))^2)$$

↓

線積分密度とピーク密度は

$$N_{peak} = 2 \int_{0.45}^1 N_e \times r \times (r^2 - 0.45^2)^{-0.5} r dr$$

この関係式をピーク電子密度の見積りに使用.



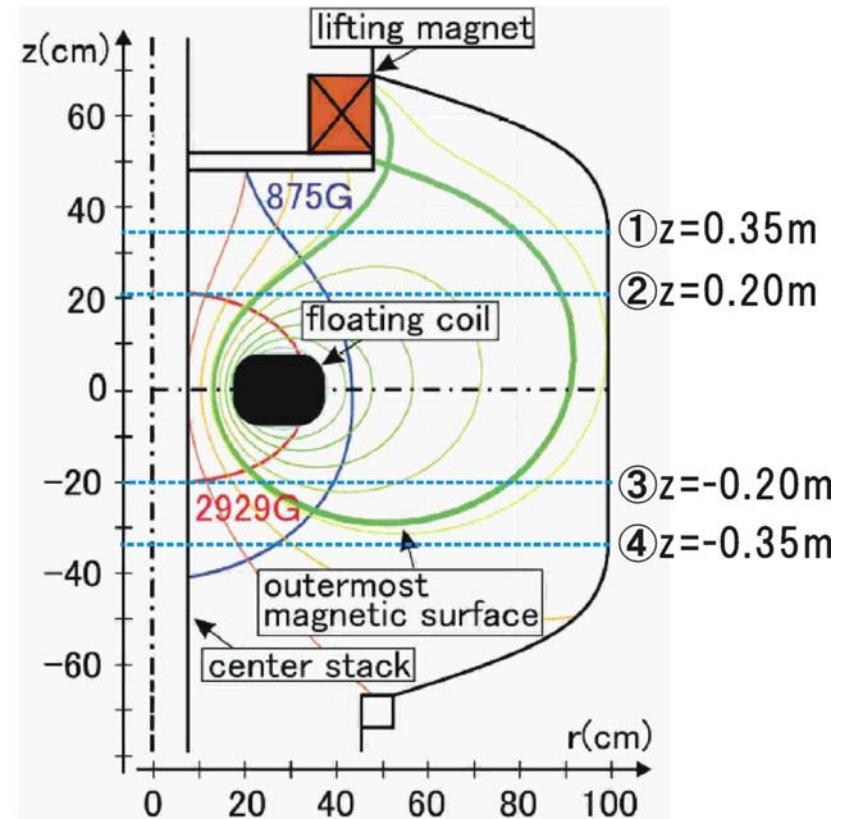
反磁性ループによる反磁性計測

- **反磁性計測**

高圧力のプラズマ中を流れる反磁性電流(diamagnetic current)を計測することにより、プラズマ中の圧力、電流、 β 値などの分布を推定することが出来る。

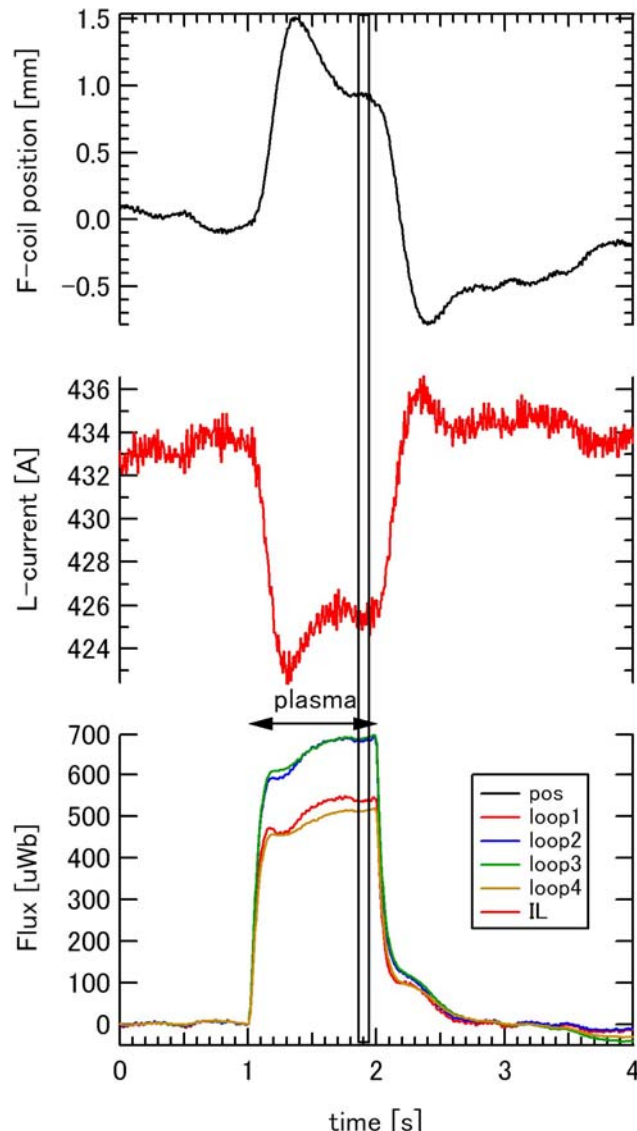
- **RT-1における反磁性計測**

反磁性ループの垂直分布を計測するために図のように4箇所それぞれ3回巻きのループを巻いている。ループに出てくる信号は反磁性信号の微分値として検出される。信号は計算機上でオフセット処理をした上で積分を行なうことで得られる。



反磁性ループの設置図。垂直分布を計測できるように4環のループで計測している。

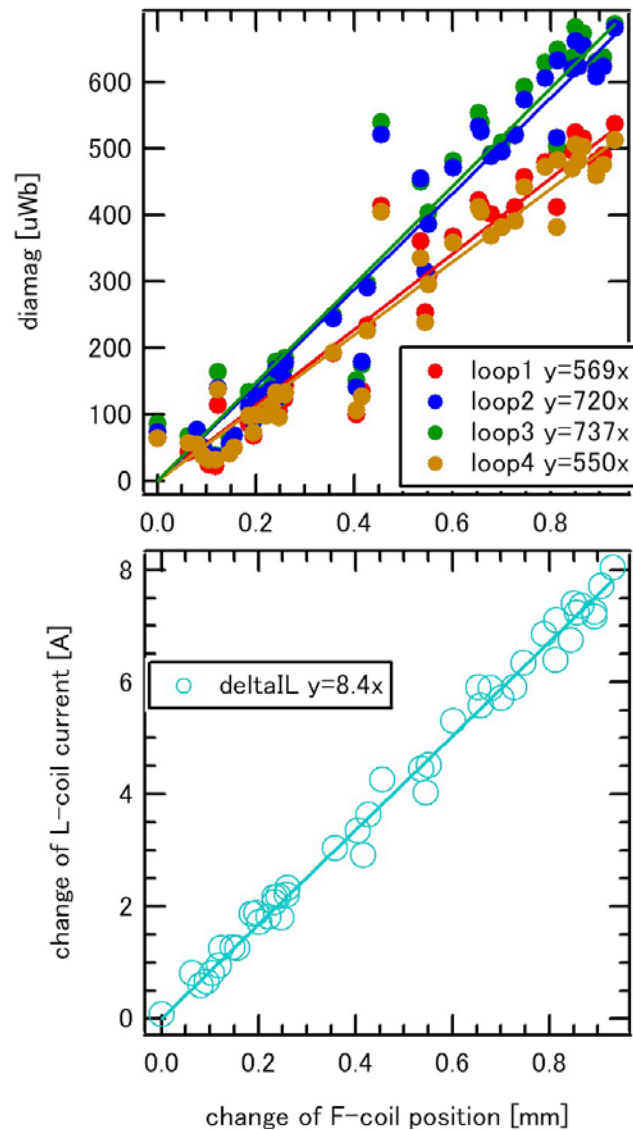
実験結果(反磁性信号とコイルの変動: 8.2GHzの場合)



8.2GHz放電における典型的な波形

- 浮上コイルの位置は3本のレーザーセンサによりモニターしており、その平均値をコイルの位置としている。
- 浮上コイル位置をPIDフィードバックすることによって浮上コイルの位置は安定に保たれており、プラズマが付くことにより内部の磁場構造が変わりフィードバックゲインが変わるために浮上位置や引き上げコイル電流が変化している。
- 反磁性信号は上下にほぼ対称となっている。

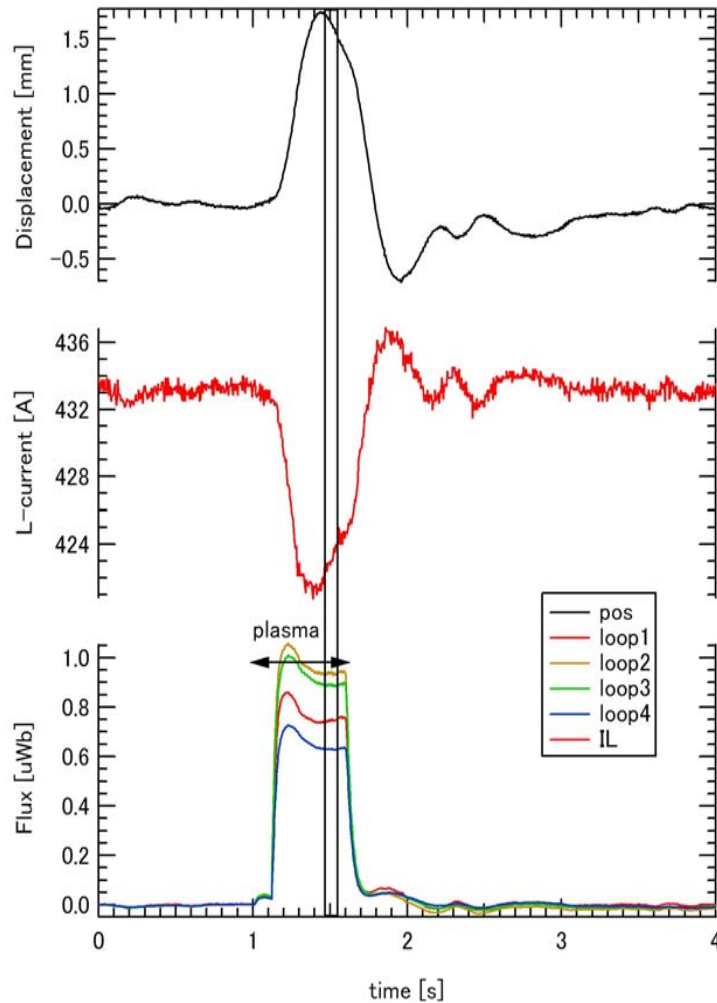
実験結果(反磁性信号とコイルの変動: 8.2GHzの場合)



- 8GHzマイクロ波を用いた放電における各信号の関係を図に示している。各信号は(0.85s,0.95s)の時間平均で表している
- 反磁性信号と浮上コイルの応答との関係はほぼ線形的な関係にあり、反磁性信号は垂直方向にほぼ対称である。その係数は $z=\pm 0.35$ の位置で550uWb/mmであり、 $z=\pm 0.20$ の位置で730uWb/mmである。
- 引き上げコイル電流の変化もコイルの位置変化とほぼ比例しており、その係数は 8.4A/mm である。

8.2GHz放電における反磁性信号と引き上げ電流変化の浮上コイル位置の変化にたいする関係

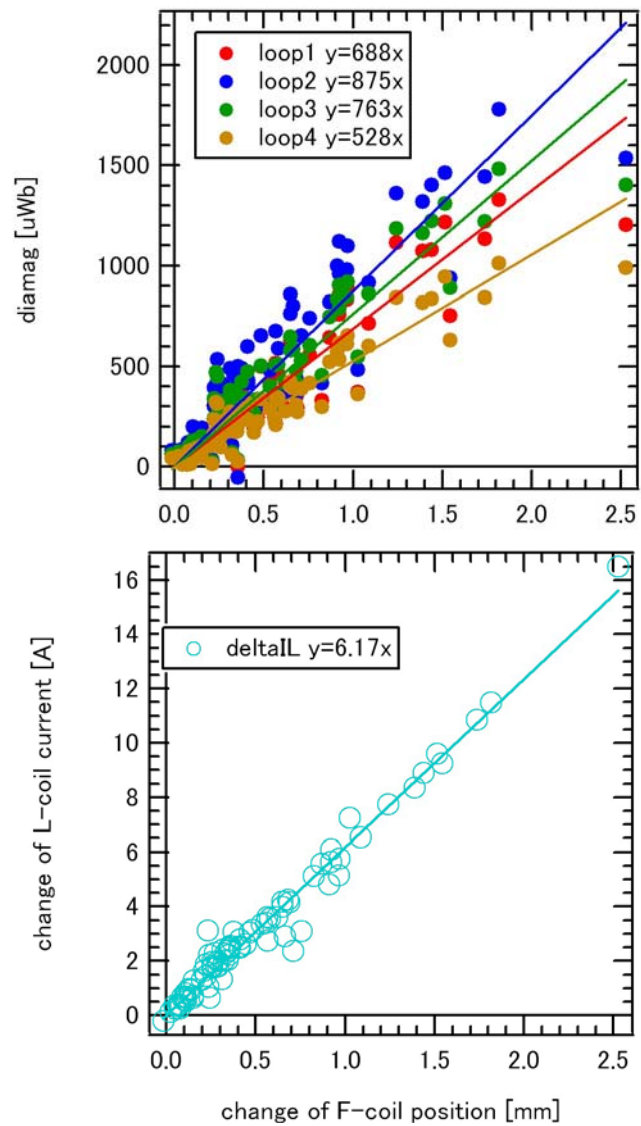
実験結果(反磁性信号とコイルの変動:2.45GHzの場合)



2.45GHz放電における典型的な放電波形

- 2.45GHzのマイクロ波では8.2GHzに比して大きい反磁性信号が計測されているだけでなく、反磁性信号の垂直分布にも違いが見られる。
- 反磁性信号は対称とはなっておらず、上側に位置するループの信号ほど大きい。引き上げコイルによりプラズマの形が変化している影響をより受けていると考えられる。

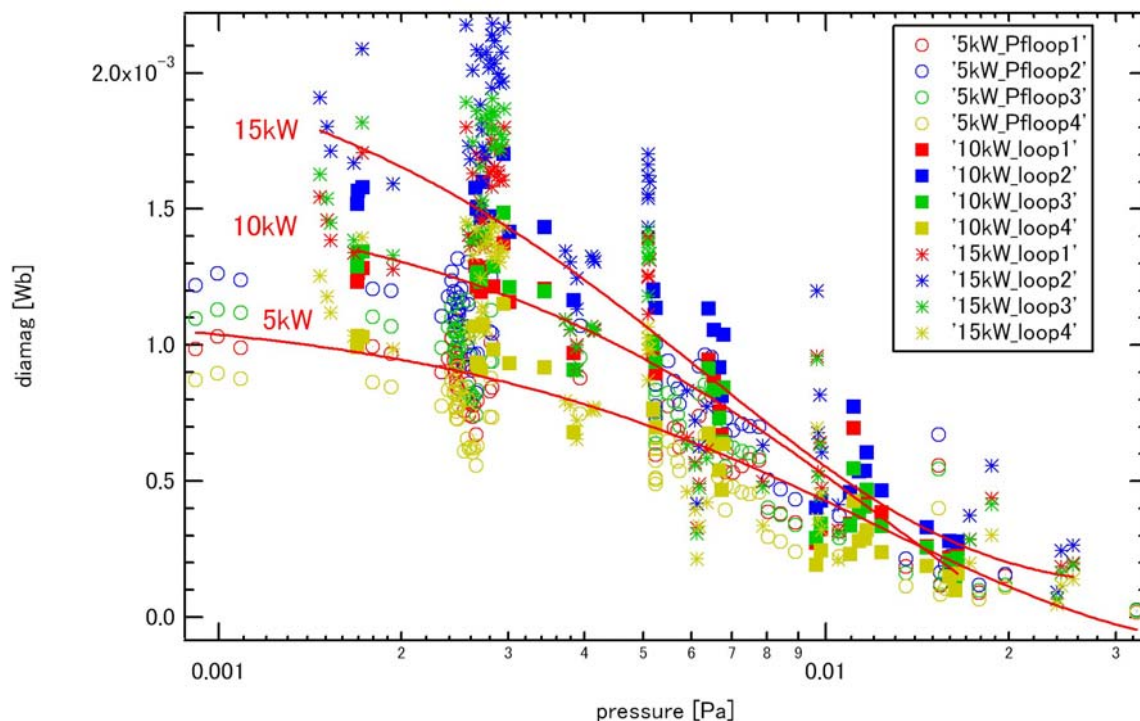
実験結果(反磁性信号とコイルの変動:2.45GHzの場合)



- 2.45GHzマイクロ波を用いた放電における各信号の関係を図に示している。各信号は(0.51s,0.57s)の時間平均で表している
- 反磁性信号と浮上コイルの応答との関係はほぼ線形的な関係にあり、反磁性信号は垂直方向に非対称である。バラつきは大きいとその係数は
 $z=+0.35$ の位置で690uWb/mmであり、
 $z=+0.20$ の位置で880uWb/mmであり、
 $z=-0.35$ の位置で760uWb/mmであり、
 $z=-0.20$ の位置で530uWb/mmである。
- 引き上げコイル電流の変化もコイルの位置変化とほぼ比例しており、その係数は6.2A/mm である。

2.45GHz放電における反磁性信号と引き上げ電流
変化の浮上コイル位置の変化に対する関係

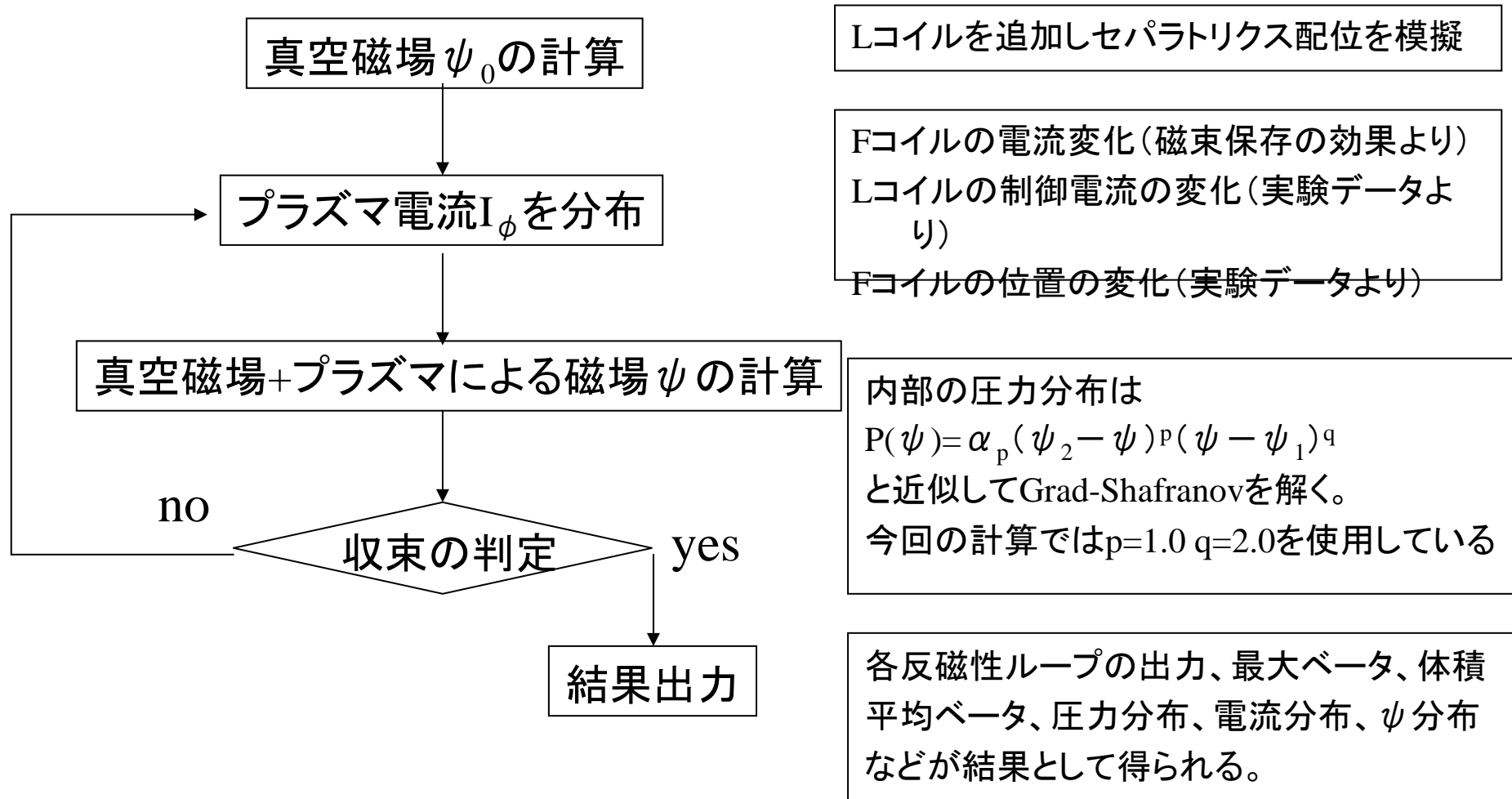
実験結果(RFパワー、中性ガス圧依存性)



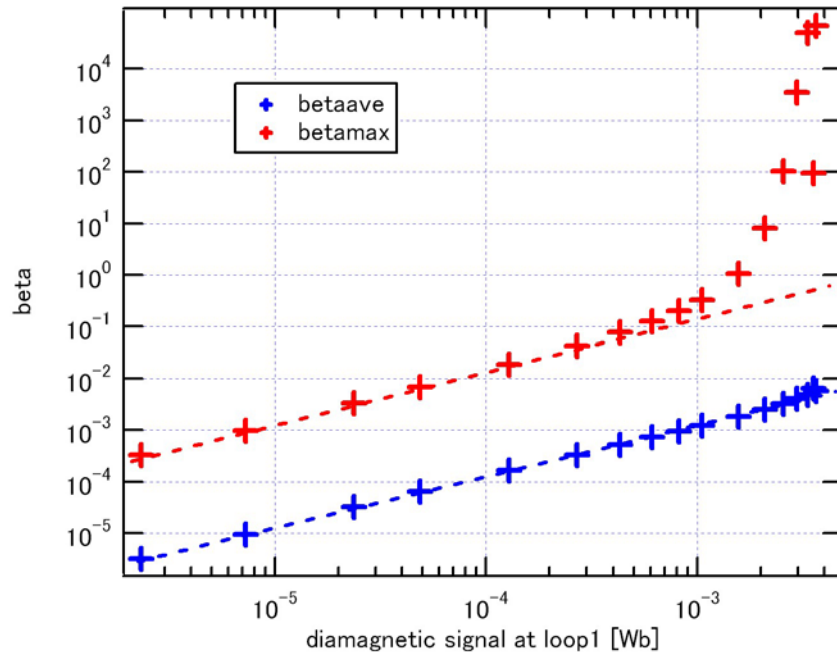
反磁性信号の中性ガス圧依存性
(2.45GHzマイクロ波)
赤実線はloop1によるフィッティングライン

- 反磁性信号は最大で $2 \mu\text{Wb}$ を超える大きな信号が得られている。
- 中性ガス圧に大きく依存しており、低ガス圧域ではRFパワーにも依存している。
- 同条件のショットでバラつきが大きく見える、これは放電を繰り返すたびにプラズマが改善されていっているためである。
→ディスチャージクリーニング等の真空容器内の不純物低減に対するプラズマ性能向上への期待大

RT-1プラズマの平衡計算コードの開発



計算結果(反磁性信号と β の関係)



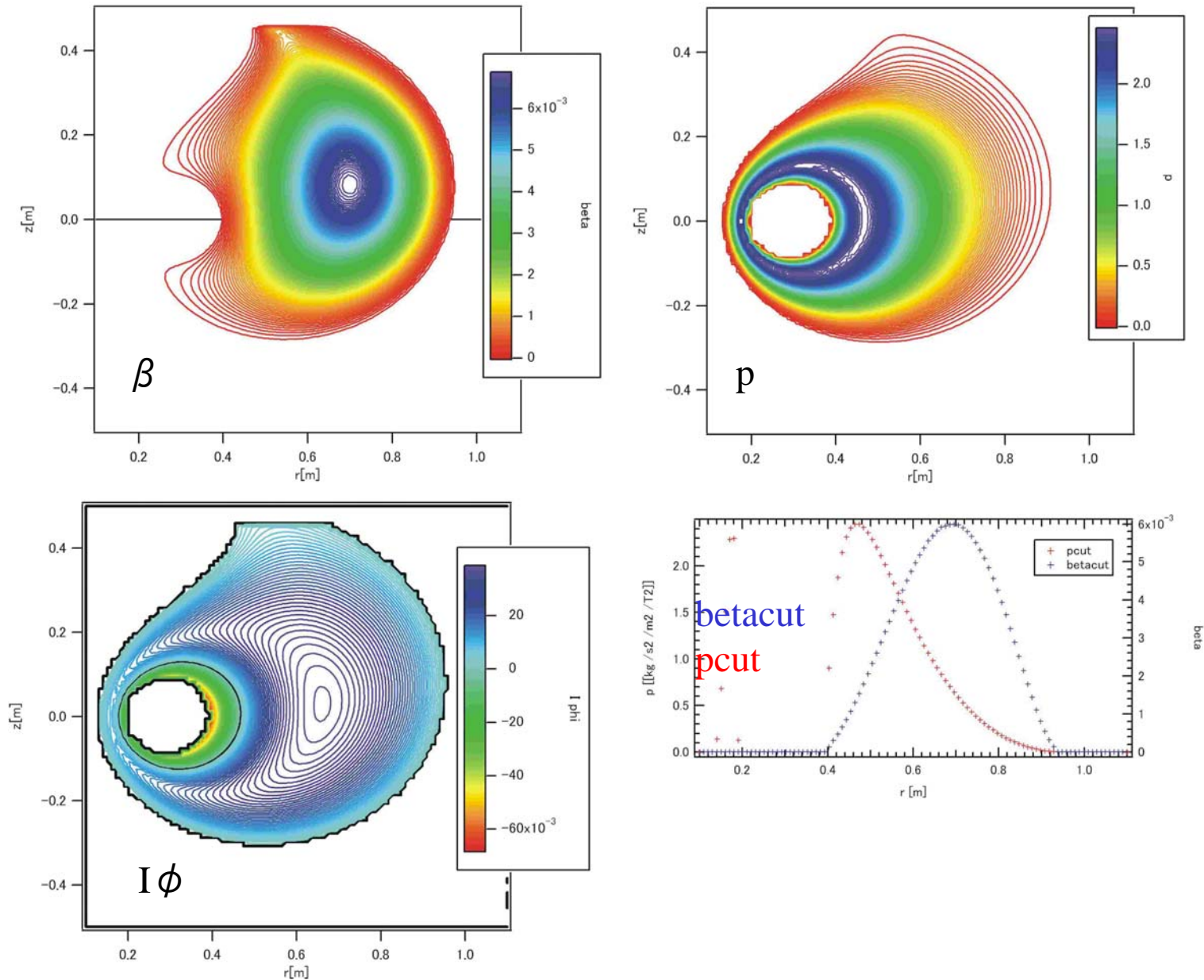
反磁性信号(横軸、loop1の場合)と β 値との関係

betamaxは局所的な β の最大値

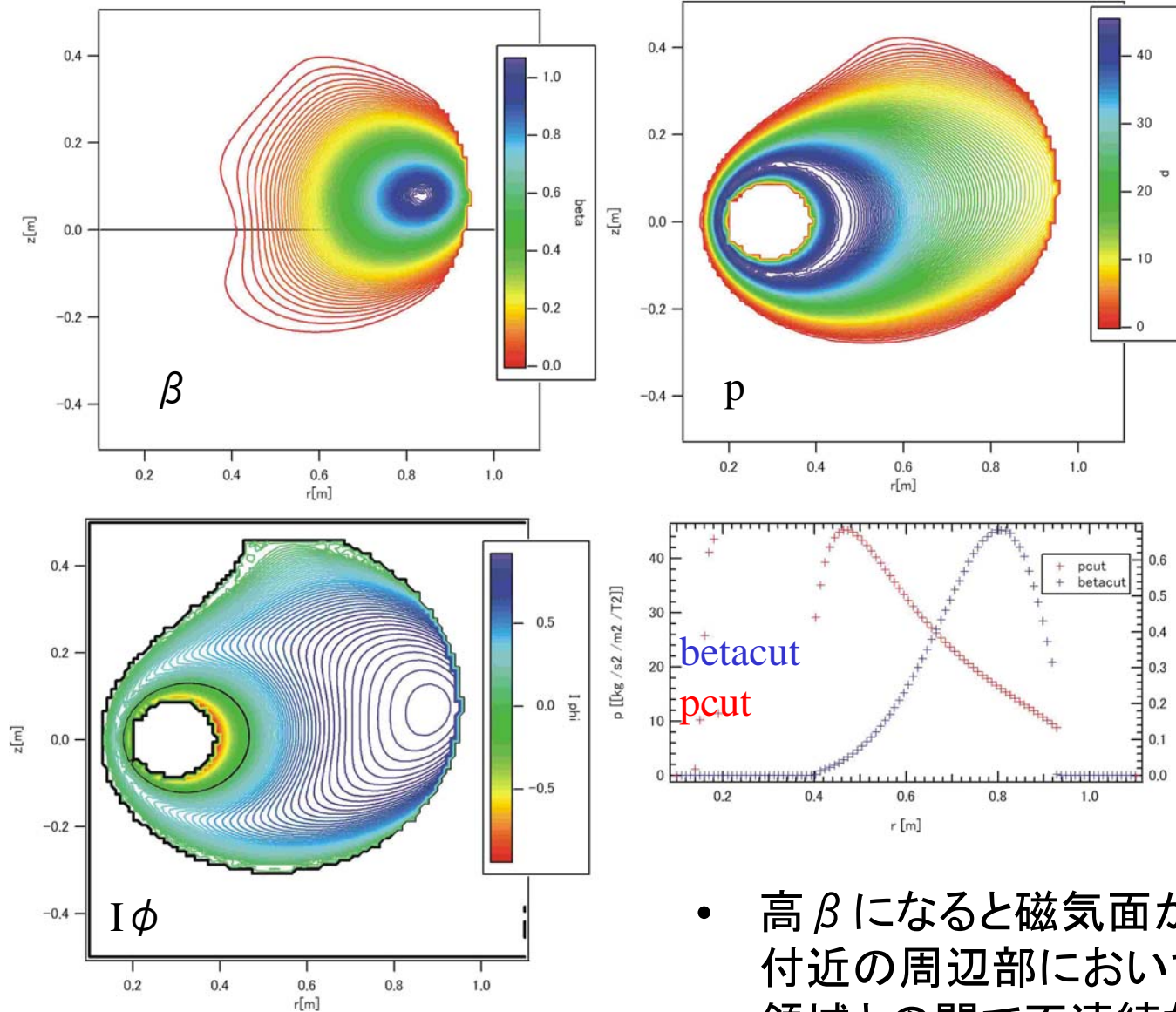
betaaveはプラズマ体積で平均した β 値

- 低 β 域では反磁性信号と β maxの関係はほぼ線形であるが、1%を越えた辺りで徐々に剥離してくる。
- β aveは全領域でほぼ線形である。
- 計算コードによるとRT-1で得られている2uWbを越えるような反磁性信号の場合 β maxは8を越え、 β aveで0.2%を越える。
- β maxについてのコードの信頼性は今後の課題であるが、赤の点線から見て少なくとも30%を越えていると考えられる。

計算結果(プラズマ内部の分布: $\beta_{\max} \sim 0.7\%$ の場合)



計算結果(プラズマ内部の分布: $\beta_{\max} \sim 1$ の場合)



- 高 β になると磁気面が変形し、特に赤道面付近の周辺部においてプラズマ領域と真空領域との間で不連続な分布になる。

結論

- RT-1装置における水素プラズマ生成実験について、導入している測定器の紹介をした。
- 最近の実験において浮上コイルが変動するような高 β のプラズマ生成に成功していることを報告し、 β を推定するための反磁性ループの計測実験を行った。
- 反磁性信号は特にガス圧に依存しており、RFパワーにも依存している。また、コイルの上下動と反磁性信号の関係はほぼ比例しておりプラズマ中の反磁性電流がコイルに影響を与えていると考えられる。
- 反磁性計測においては最大で $2.5 \mu \text{Wb}$ を越えるような信号が得られており、開発した平衡計算コードによると局所的なベータが少なくとも30%を超えており、1を越えることも期待されるが以後の検討課題である。

今後の課題

- 現在はプラズマの圧力分布を簡単な式で近似しているが、実際にプラズマ内部の磁場等の分布計測を行ない圧力分布を実験的に推定したい。