

磁気圏型プラズマ装置RT-1における 超伝導磁気浮上コイルの位置制御

東大新領域

矢野善久

渡邊将

2007年3月15日

日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所

研究背景

- RT-1装置とは

近年高速の流れを持つプラズマに注目が集まっておりProto-RT装置とMini-RT装置の知見を元に建設され、昨年1月より実験を開始した超伝導浮上コイルを用いた内部導体装置。

質量112kgで主半径0.25mの高温超伝導コイル(起磁力250kA)を引き上げコイルによる負帰還磁場により半径約1mの真空容器内に磁気浮上することが可能。

(吸引方式であるため重力方向に対して不安定)

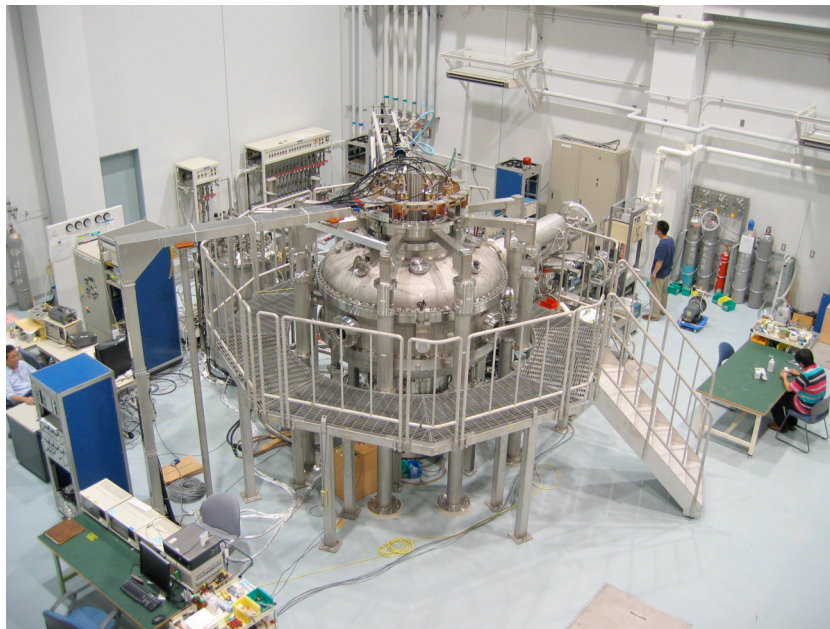


図.建設されたRT-1装置の写真

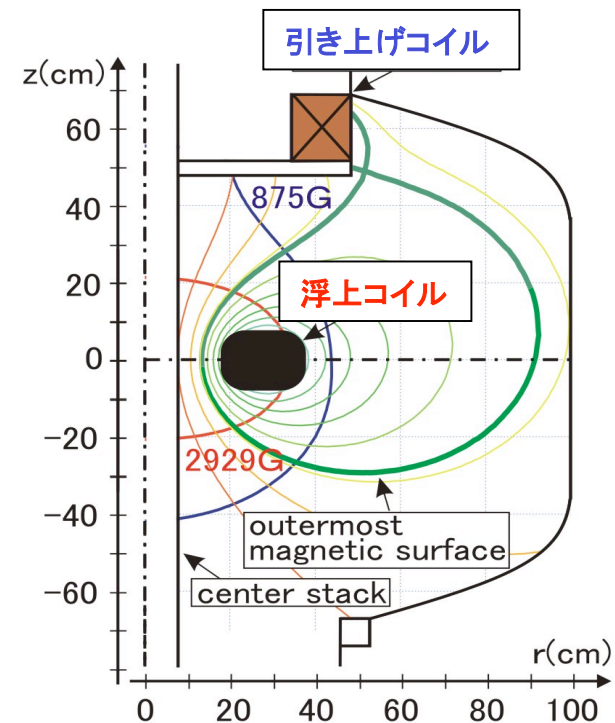
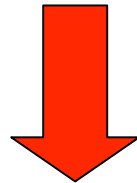


図.RT-1における典型的な磁場構造

研究目的

- RT-1浮上コイルの磁気浮上に関する2つの問題
 - 浮上コイルのz軸(重力方向)不安定性の制御。
 - 地磁気(~0.3G)などの誤差磁場とコイルに内在する質量偏差(重心のずれ)による傾きと回転。



超伝導コイルの浮上実験において 10^{-3} の磁場精度を目標に、
RT-1磁気浮上制御システムの開発および評価と
浮上コイル周囲の誤差磁場と質量偏差の補正。

RT-1の浮上制御システム

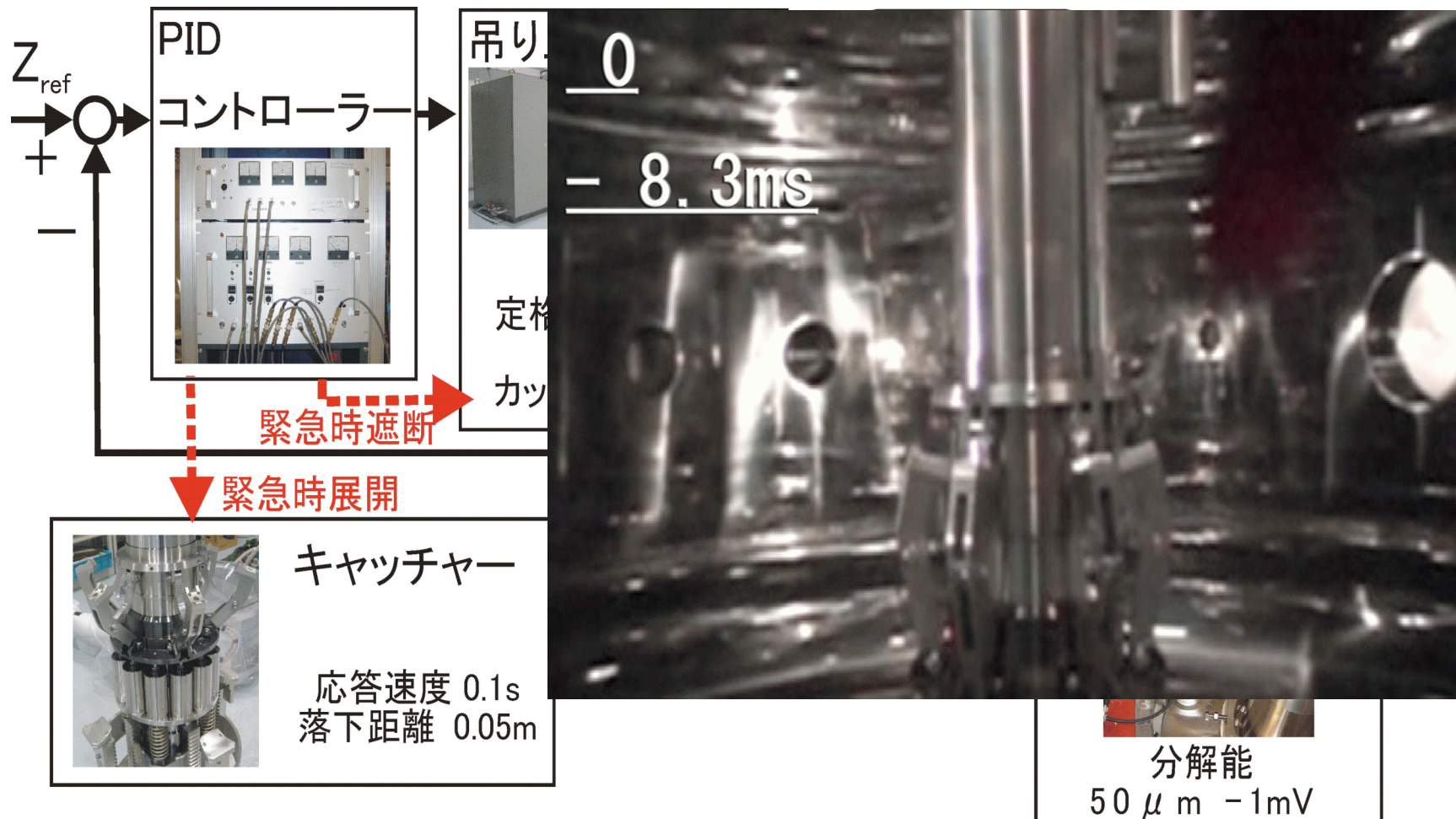


図. RT-1装置の磁気浮上制御系を構成する要素系はPIDフィードバック制御によって安定化されている。

制御システムの個々の伝達関数の評価

- レーザーセンサ(3本) $50\mu\text{m} \rightarrow 1\text{mV}$ $\therefore 20 \text{ V/m}$
- PIDコントローラ $P=5.2$ $I=20/(20s+1)$ $D=0.32s$ $\therefore 5.2(1+0.06s)$
- 引き上げコイル系 $\omega=150$ にカットオフ $\therefore 150/(s/150+1) \text{ A/V}$
- 真空容器の渦電流 $\omega=80$ にカットオフ $\therefore 1/(s/80+1)$
- 浮上コイル 運動方程式から線形近似によって導出
 $s = 2\sqrt{10}$ の不安定な極を持つ。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = 2\pi R I_F B_r - mg$$

$$B_r = B_{r0}(1 + \alpha z)(1 + y) \quad 2\pi R I_F B_{r0} = mg$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg(\alpha z + y + \alpha zy)$$

(yは電流の変化分を表す)

$$\approx g(\alpha z + y)$$

$$G(s) = \frac{g}{s^2 - \alpha g} \quad (g = 10 \quad \alpha = 4)$$

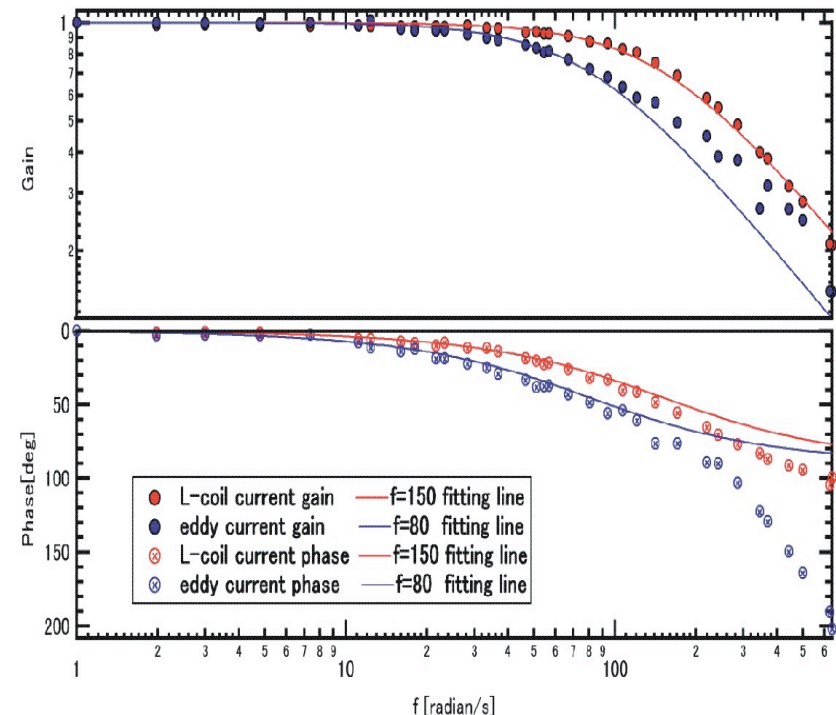


図.引き上げコイル系および渦電流の効果の周波数応答

RT-1超伝導コイルの浮上実験

- ステップ応答を測定 伝達関数モデルの計算結果とほぼ一致
- 周波数応答の推定 ステップ応答よりFFTにより変換、計算結果と一致

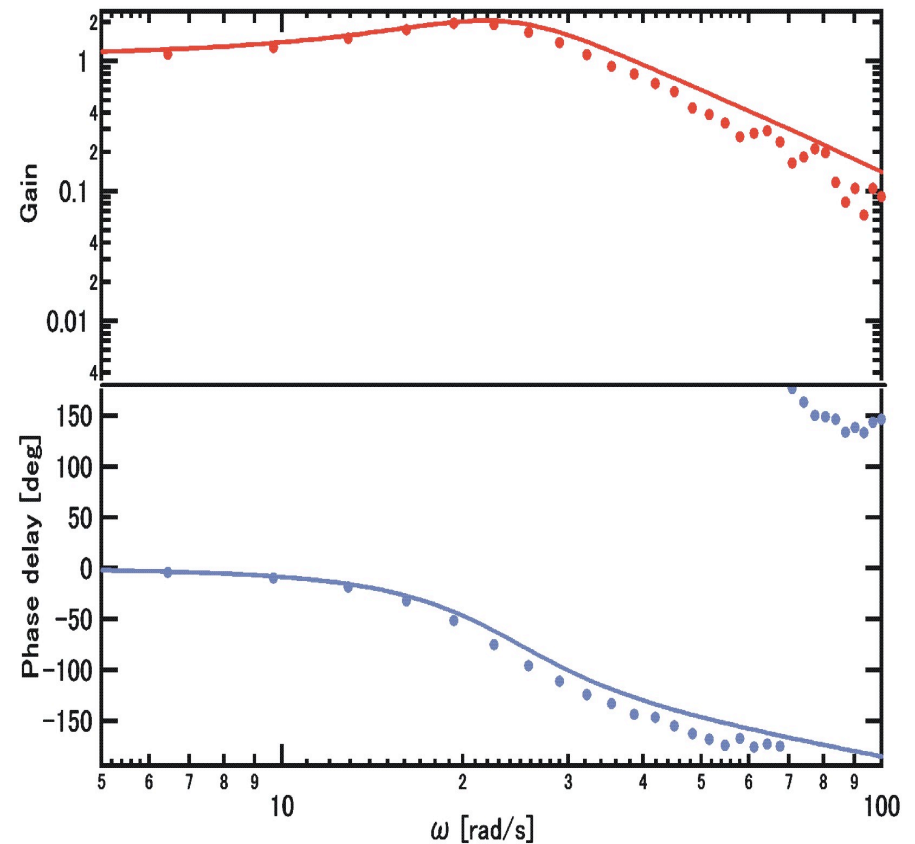
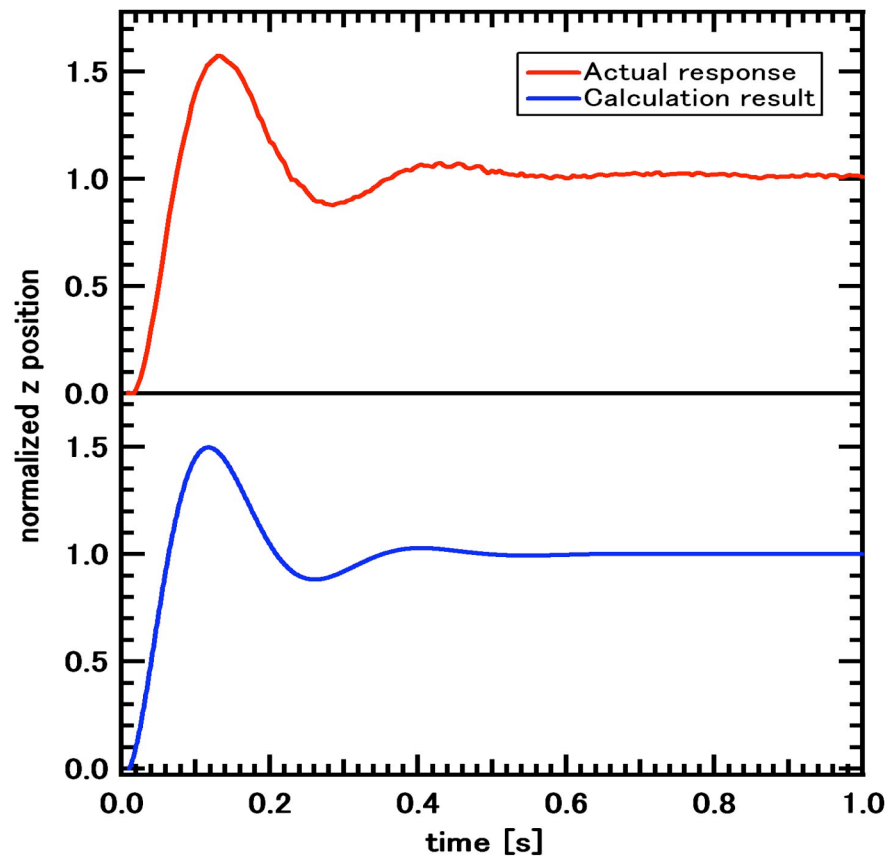


図.規格化したステップ応答の様子。(上)実機(下)計算結果

図.周波数応答の様子。(上)ゲイン (下)位相
(点線)測定結果 (実線)計算結果。

RT-1超伝導コイルの安定性の評価

- 以上の結果より、伝達関数のモデルでよく表現できていると考えられる。
- RT-1浮上制御系により不安定な極は安定な領域に移動した。
- RT-1制御系のゲイン余裕および位相余裕は $g_M=16.5\text{dB}$ $\phi_M=29.5\text{deg}$
(定置制御系として十分な余裕)

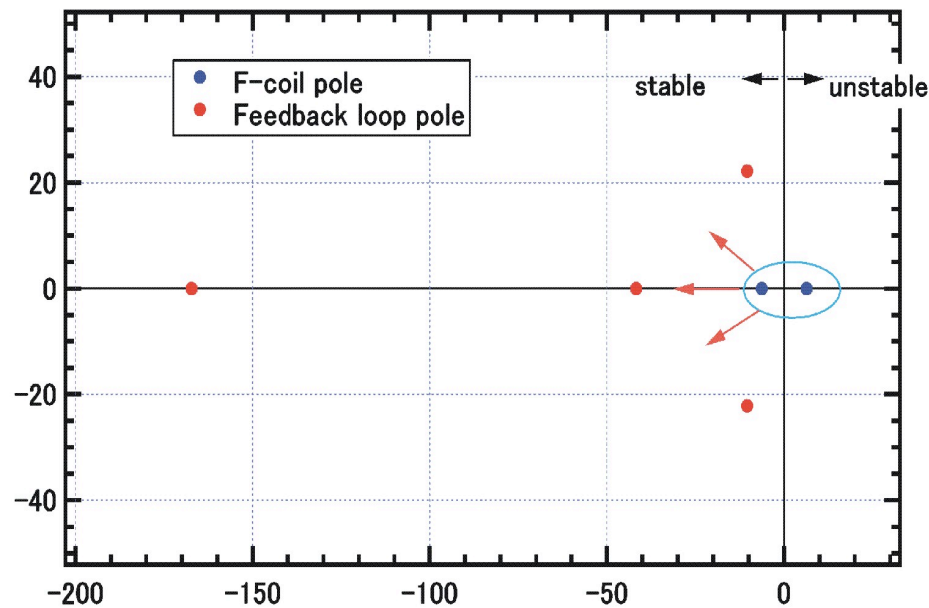


図.RT-1制御系の極の配置

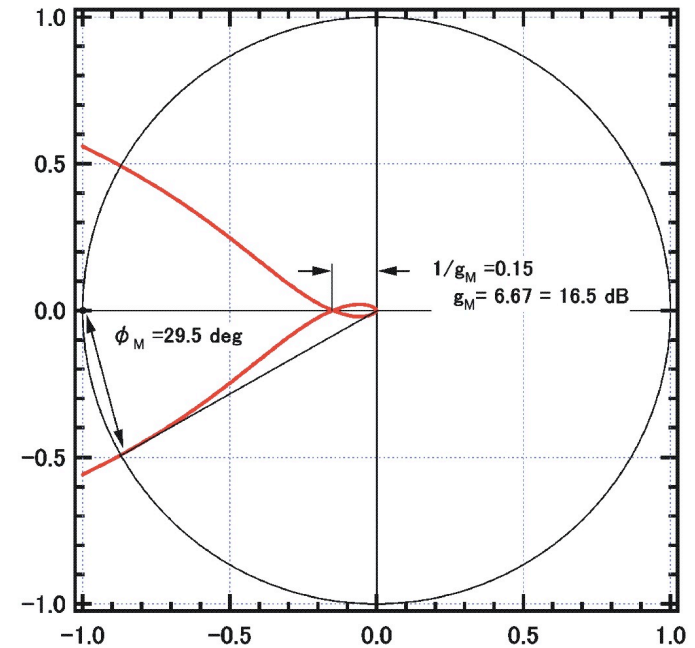
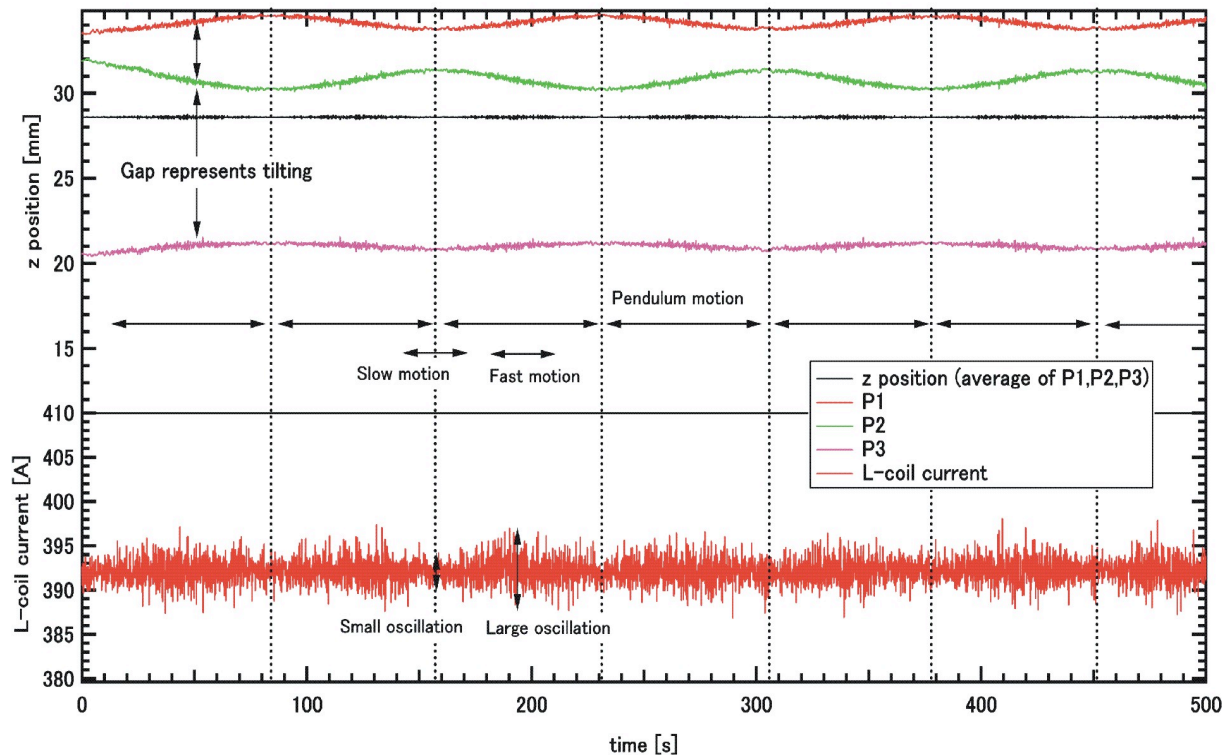


図.ナイキスト線図とゲイン余裕、位相余裕。

浮上コイルの傾き、回転



•(浮上コイルの運動はローレンツ力と重力の2つだけで記述される。)

•**誤差磁場**(引き上げコイル以外による磁場)と**質量偏差**(重心のずれ)が存在すると、コイルが傾く。

•するとコイルは磁場的なポテンシャルの谷に対して**振り子**のような反復回転運動を行なうことが考えられる。

図. 浮上信号の様子。コイルの傾き、回転の様子がわかる。このときの角度は約1.8deg。

- コイルの傾きによってコイルの軸対象性が崩れ、磁場精度に大きく影響してくる。磁場精度 10^{-3} を目標とする → 誤差磁場を0にする補正磁場を作る補正コイル(後述)に流す**補正電流量**の推定質量偏差による傾きを**0.057deg** 以下を目標

補正実験の方法

- 傾きの測定 120度おきの3本の位置センサにより特定することが可能。
- 誤差磁場の補正
東西(20巻, I_{EW})南北(30巻, I_{NS})に2組のヘルムホルツコイルに電流を流すことで誤差磁場を変化させることができる。
- 質量偏差の補正
バランスやおもりによるバランス補正を段階的に実施。

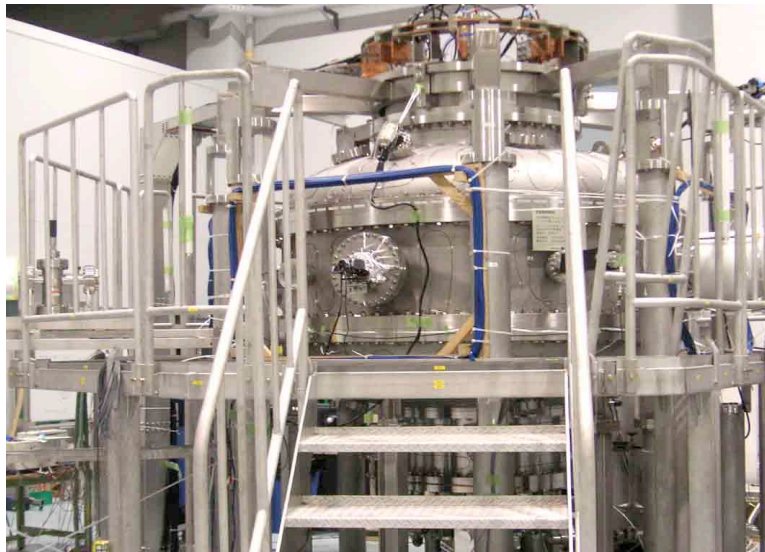


図.補正コイルが取付けてある様子。(青のコードがコイル)

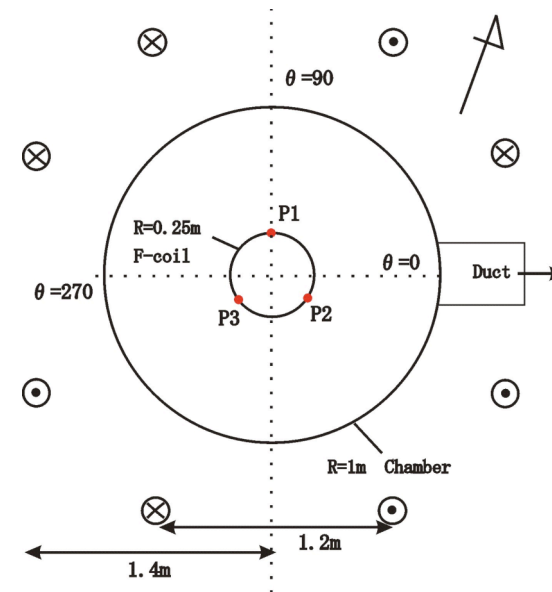


図:補正コイル位置センサの配置

誤差磁場と質量偏差の補正

段階的にバランス補正を行ない。0.88deg存在した質量偏差による傾きが0.36deg、0.06degとなり最終的には測定の限界である0.05deg以下になった。

誤差磁場の補正も同時に行なったときの浮上の様子を下図に示す。

$I_{EW}=5.22A$ 、 $I_{NS}=6.97A$ の補正電流を流しおり、約10度の角度の振り子運動を行っている。

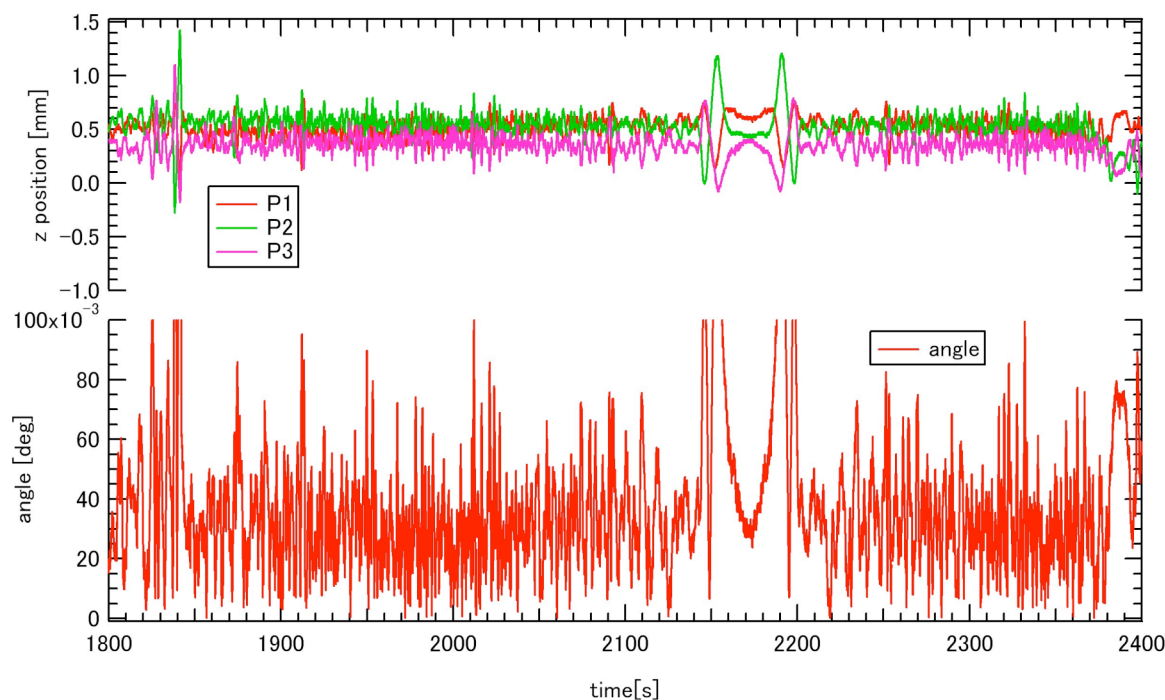


図:浮上信号の様子。(上)位置センサの出力(下)傾き。傾きがほぼ0.05deg以下にある。

結論

- RT-1における超伝導コイルのz軸不安定性の制御
 - 実機での浮上よりステップ応答を測定し、コイルの応答が伝達関数モデルによる計算結果と一致することを確認しモデルが妥当であることを確認した。
 - モデルによれば、制御系の持つ極は $s = -167, -42, -10 \pm j22$ でありゲイン余裕および位相余裕は $g_M = 16.5$ $\phi_M = 29.5 \text{ deg}$ でありRT-1浮上システムは十分に安定であると言える。
- 誤差磁場、質量偏差によるコイルの傾きの補正
 - コイルの傾き、回転の原因とである誤差磁場と質量偏差による傾きの成分を実際にコイルの浮上中の回転を測定することで分離した。
 - 段階的なバランス補正を経てコイルバランスによる傾きを目標である 0.057 deg 以下に低減することができ、補正コイルを用いた誤差磁場の補正も行なうことでコイルの傾きをほぼ水平($< 0.057 \text{ deg}$)にすることが出来た。

これからの課題

- 浮上コイルのz軸方向の位置制御

PID要素の最適化

・・・システムが伝達関数の線形モデルによって確立していると考えられるため、線形モデルによるシミュレーションを以ってPID要素の最適化を行なう。

- 浮上コイルの持つ傾きと回転

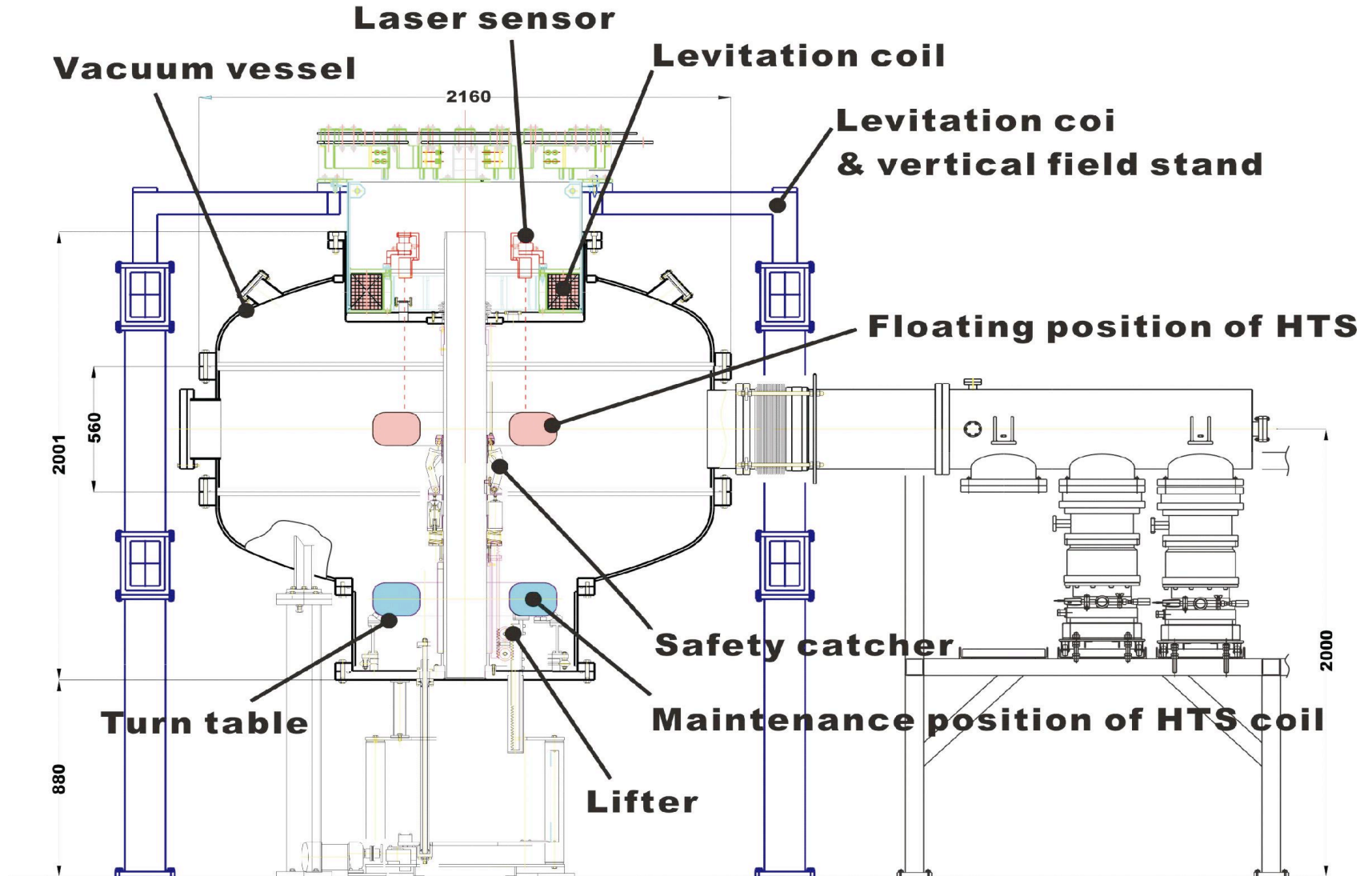
補正電流コントロールの自動化

・・・現在は経験的に手動で補正電流をコントロールしているが、傾きを常にゼロにするようなコントローラを開発することで実験時間の短縮や振り子運動の最小化を狙う。

補正コイルのグレードアップ

・・・一時的に真空容器の近傍($r=1.4\text{m}$)に配置してある現在の補正コイルを遠方に配置するのと同時にグレードアップを行なう。

RT-1装置全体図



超伝導コイルの磁気浮上

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = 2\pi R I_F B_r - mg$$

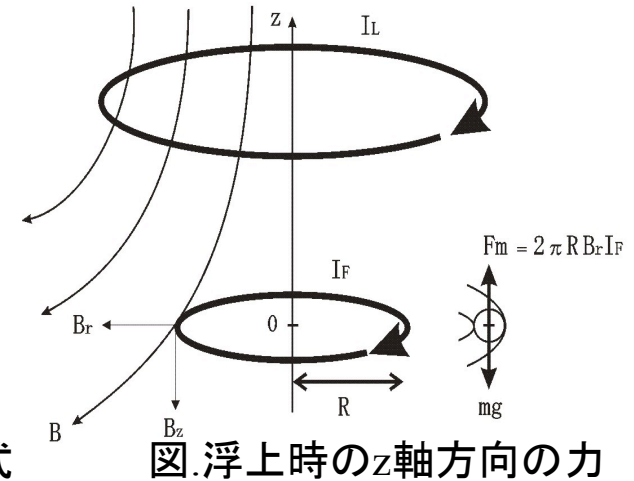
浮上コイルの運動方程式

$$\frac{d}{dt} (I_F L_F + I_L M) = 0$$

超伝導コイルの磁束保存式

$$\frac{d}{dt} (I_L L_L + I_F M) + R_L L_L = e$$

引き上げコイルの回路方程式



m: 浮上コイル(Fコイル)質量 z:Fコイルのz位置 R:Fコイル半径 g:重力加速度 I_F, I_L :Fコイル,Lコイルの電流
 B_r : 引き上げコイル(Lコイル)による半径方向の磁場 L_F, L_L :Fコイル,Lコイルの自己インダクタンス
 M: LコイルとFコイルの相互インダクタンス R_L :Lコイルの電気抵抗 e:Lコイル端にかかる電圧

不安定性の指標 α

– z軸方向の電磁力の成長率より導出

$$\alpha(z) = \frac{\partial(I_F B_r)}{\partial z} / (I_F B_r) \approx \frac{\partial B_r}{\partial z} / B_r = 4.05 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

第1式のみで近似して解いた場合。z=0の位置における不安定性。
 R=0.25m 引き上げコイルの半径 0.4m 各コイル9点で形状近似

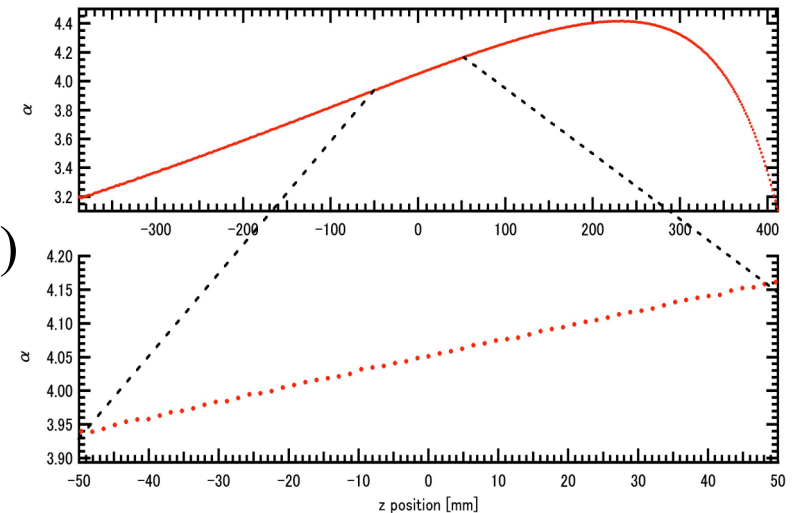
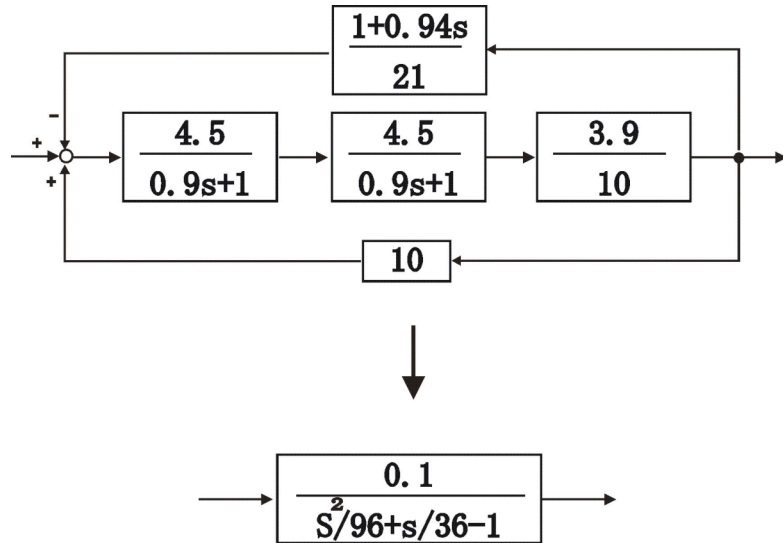


図. α のz軸依存性

モックアップによる浮上実証試験



- 実機と同じような伝達関数を持ち、実機よりさらに不安定な極 ($s=8.55$)を持つモックアップ電気回路で試験。
- 単体では不安定な回路がRT-1の制御系によって安定化することを確認。

→浮上実証

図.(上)モックアップ回路の構成のブロック図。(下)結合後。

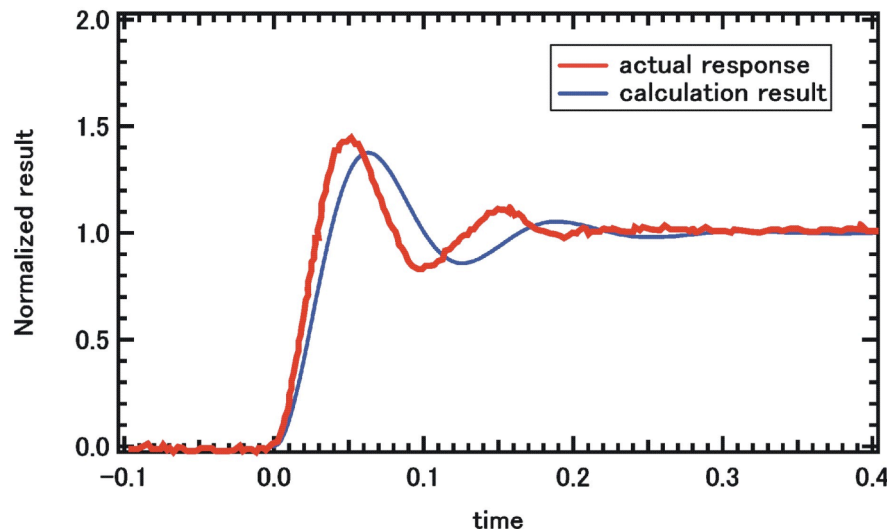
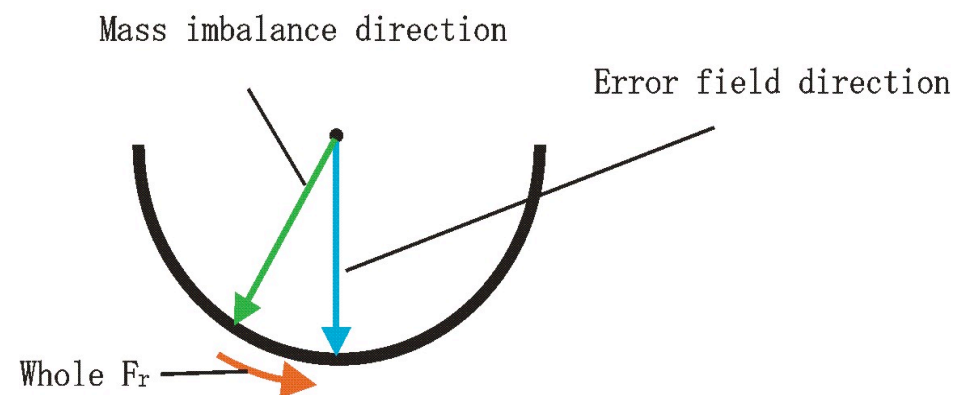
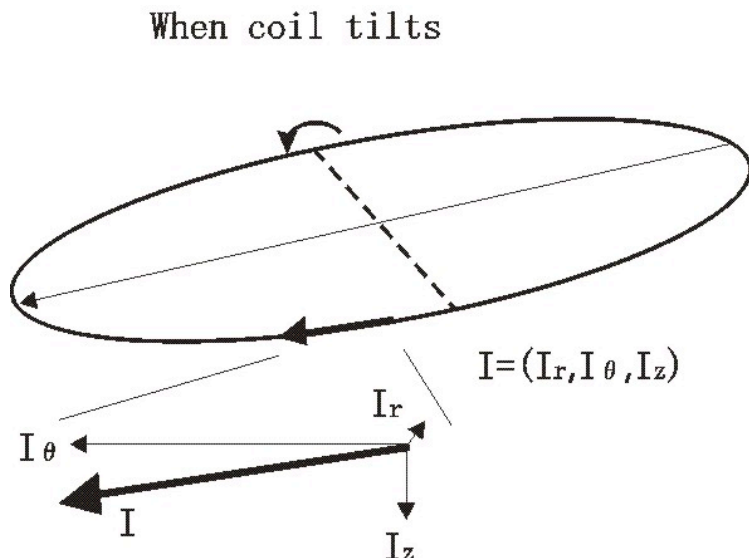


図.モックアップのステップ応答、ホール素子の出力を見ている。(赤)モックアップ実機 (青) 計算結果

誤差磁場と質量偏差によるコイルの傾き

- 誤差磁場(引き上げコイル以外の磁場)と質量偏差(重心のずれ)が存在した場合・・・
- 両方の効果が合成された方向 θ に、角度 φ だけコイルが傾く。
- 傾きにより新たに生じる浮上コイル電流のz成分やr成分により局所的に θ 成分の力が発生する。
- さらに磁場的な傾きの方向と実際の傾きが平行でない場合にその方向を同じにするような方向に全体として力がかかり回転する。(振り子のような往復運動)



計算方法

- 傾いている方向 θ と角度 φ の測定
3本のセンサの出力を z_1, z_2, z_3 とすると
右式より導出される。

$$\begin{cases} z_1 = -R \tan \varphi \cos(\pi/2 - \theta) \\ z_2 = -R \tan \varphi \cos(-\pi/6 - \theta) \\ z_3 = -R \tan \varphi \cos(7\pi/6 - \theta) \end{cases}$$

- 誤差磁場と質量偏差の分離
 φ - θ 図を取ると正弦的な波形となることを利用。
 φ - θ 図の正弦波の中心の値が質量偏差による成分 φ_m で
振幅が誤差磁場による成分 φ_B として分離。

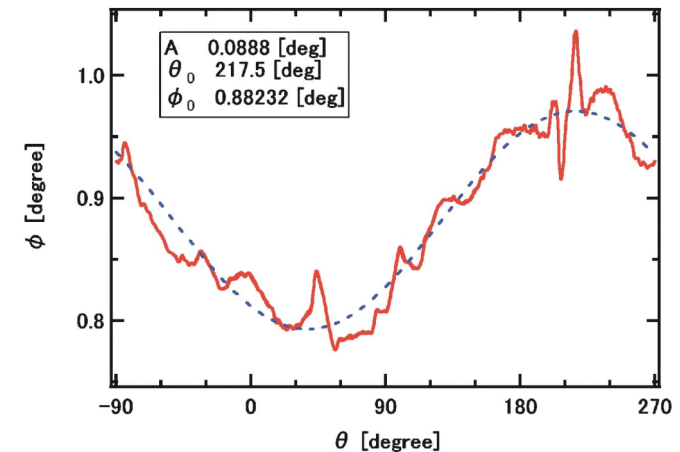
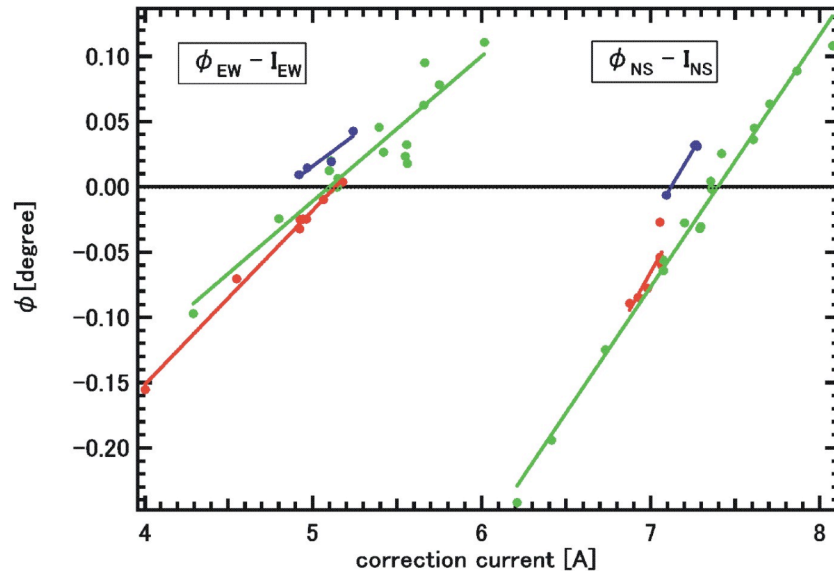


図: φ - θ 図の例。

$z=0\text{mm.}, I_{NS}=7.05[\text{A}], I_{WE}=4.55[\text{A}]$

- 補正電流量の推定
→補正に必要な電流は南北への傾き φ_{NS} と東西への傾き φ_{EW} のそれぞれ I_{NS}, I_{EW} に対する依存性からゼロ交差電流を取ることのできる。
- 質量偏差の補正
→内在する質量偏差の反対側に同じトルクを持つバランスを配置する。
質量偏差の同定には2回以上の浮上結果があれば同定できる。

誤差磁場と質量偏差の補正



- 左のグラフから見ると補正電流値はおおよそ $I_{NS}=7.2\text{A}$, $I_{EW}=5.0\text{A}$ である。

図:補正電流 I_{NS} , I_{EW} と各向(NS,EW)への傾きの関係

- 段階的に補正することで $z=0\text{mm}$ で浮上したとき、 0.88deg 存在した傾きが 0.36deg 、 0.06deg と減少し、最終的には 0.05deg 以下(測定の限界以下)になった。
- バランスを除いたコイルの内在トルクは約 $74400[\text{mm}\cdot\text{g}]$ 存在していた。

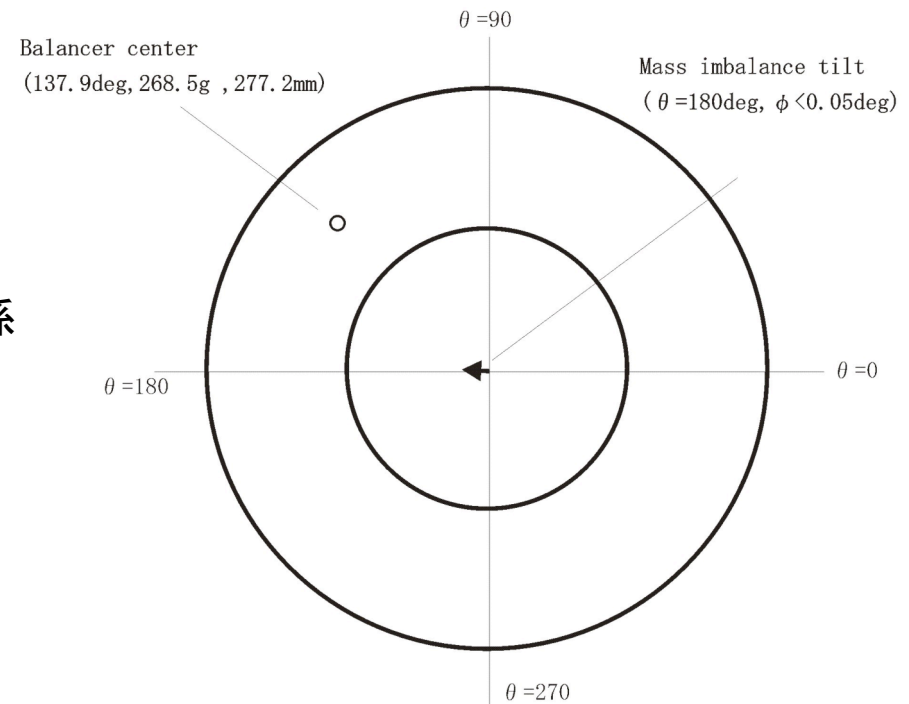
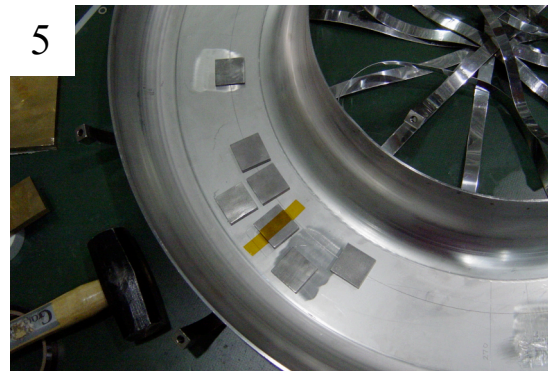
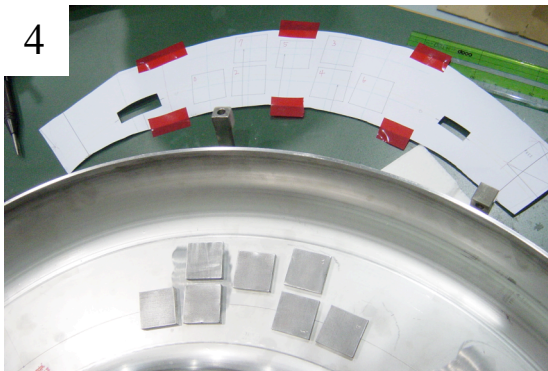
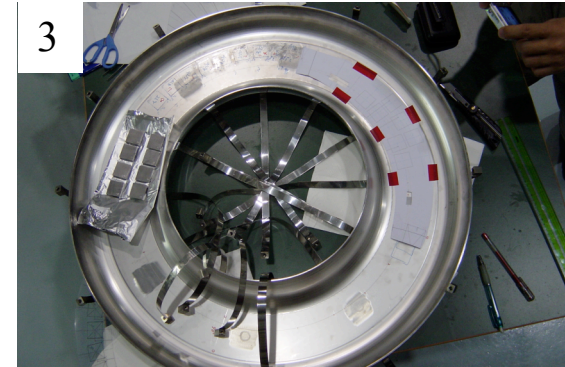
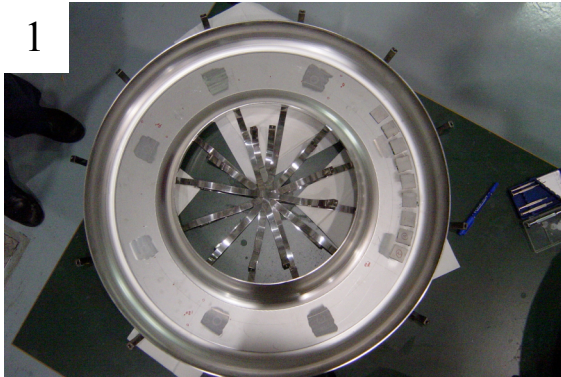


図:最終的なバランスの配置

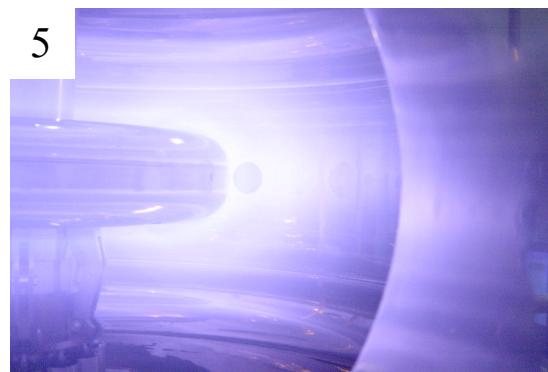
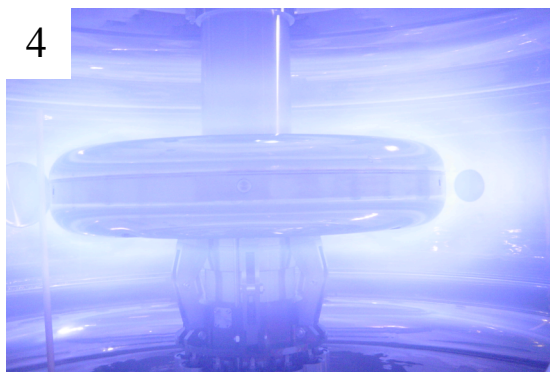
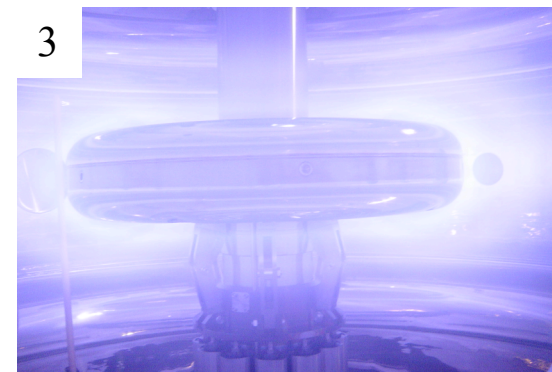
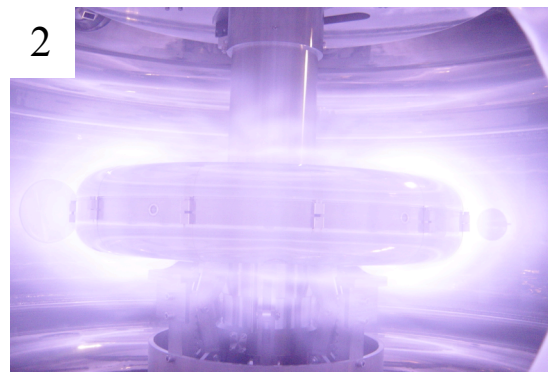
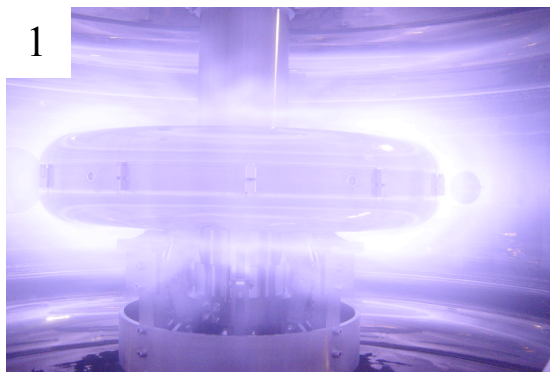
(写真) バランサーの配置



1,2 : 補正前のバランサー
3,4 : 補正2回目の様子
5 : 最終的なバランサーの配置

- バランサーは上部コイルケースの内側に接着する。
- バランサーは推測される質量偏差のトルクに相当するバランサーをトルクの反対側に配置する。
- バランスの補正はコイル外面に置いたおもりでの補正も含めて3回行ない、質量偏差による傾きが $0.88\text{deg} \rightarrow 0.36\text{deg} \rightarrow 0.06\text{deg} \rightarrow 0.05\text{deg}$ 以下のように減少した。

(写真) 浮上プラズマの様子



- 浮上プラズマをデジタルカメラで撮影した様子。(色の違いはカメラによる)
- 1, 2は実験開始当初の浮上プラズマ。万が一に備えサポートをコイルのすぐ下に待機させてある。また約2deg傾いている様子も分かる。
- 3~6は最新の実験における浮上プラズマの様子でサポートを完全に下ろしている。完全浮上(デタッチメント)プラズマ。コイルの傾きは0.05deg以下である。