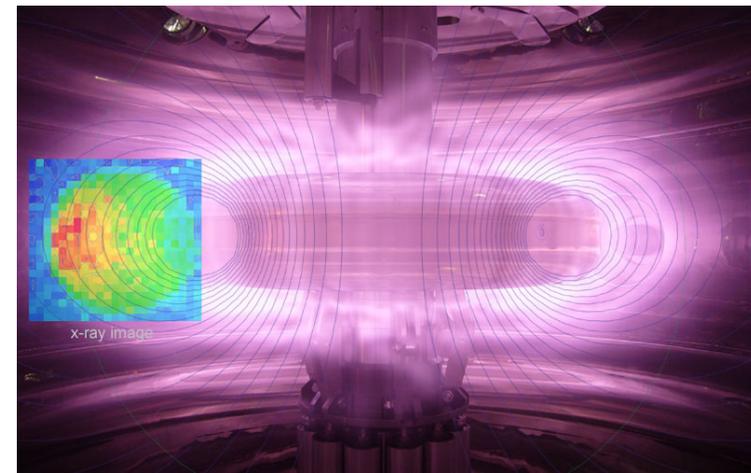
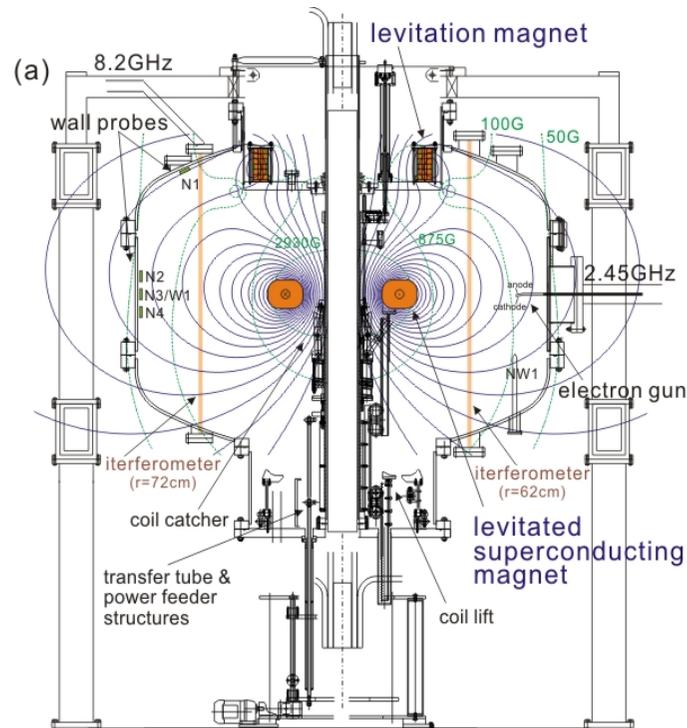


# 実験装置の概要： 東京大学 RT-1

東大新領域 プラズマ理工(梶田研)・核融合研(西浦研, 東大連携講座)  
報告者: 斎藤晴彦



磁気浮上超伝導コイルにより惑星磁気圏を模擬



2009 Ogawa, Yoshida, Morikawa+ PFR <-  
2013 Yoshida+ Plasma Phys. Cnt. Fusion  
2022 Kenmochi, Yokota, Nishiura+ NF  
2019 Nishiura, Kawazura, Yoshida+ NF

- 先進核融合に適した高 $\beta$ プラズマの自己組織化
- 反物質(電子・陽電子など)を含む非中性プラズマ

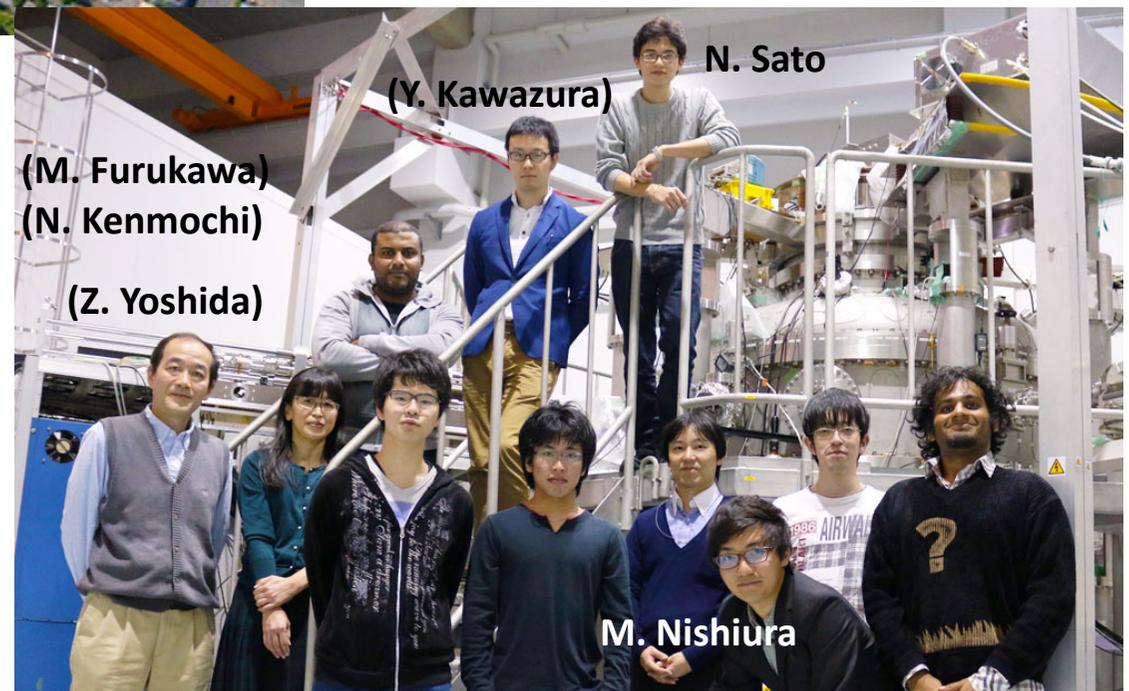
# I-0) 実験室の環境、インフラ

## RT-1@基盤科学実験棟



( ): former member

- 東京大学柏キャンパス  
(千葉県柏市)
- 新領域 実験棟  
(TST-2, UTSTと同じ建物)
- 東大・NIFS(西浦研)共同  
T. Mito, N. Yanagi, A. Fukuyama,  
H. Sugama, T. Watanabe,...



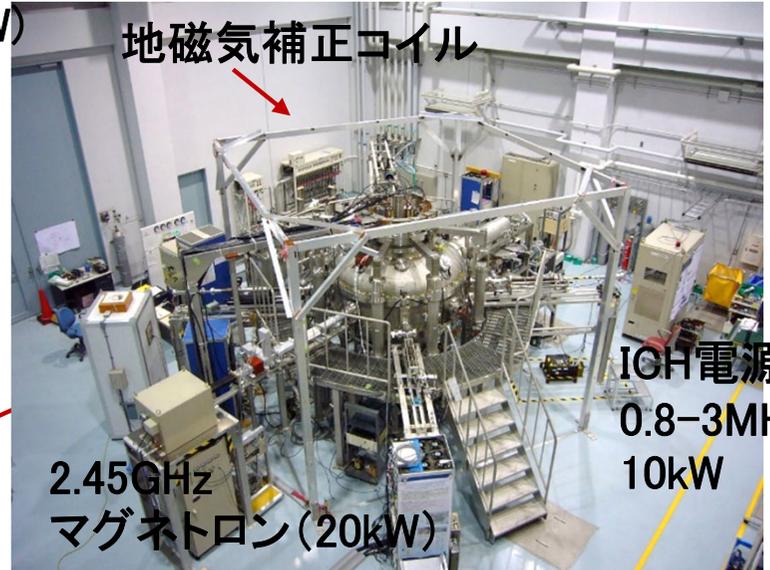
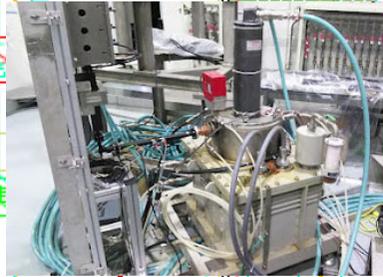
# I-0) 実験室の環境、インフラ (装置本体室)

RT-1装置本体



GM冷凍機本体  
コールドボックス  
励磁電源等

8.2GHzクライストロン(25→50kW)  
(発振管100kW)(休止中)



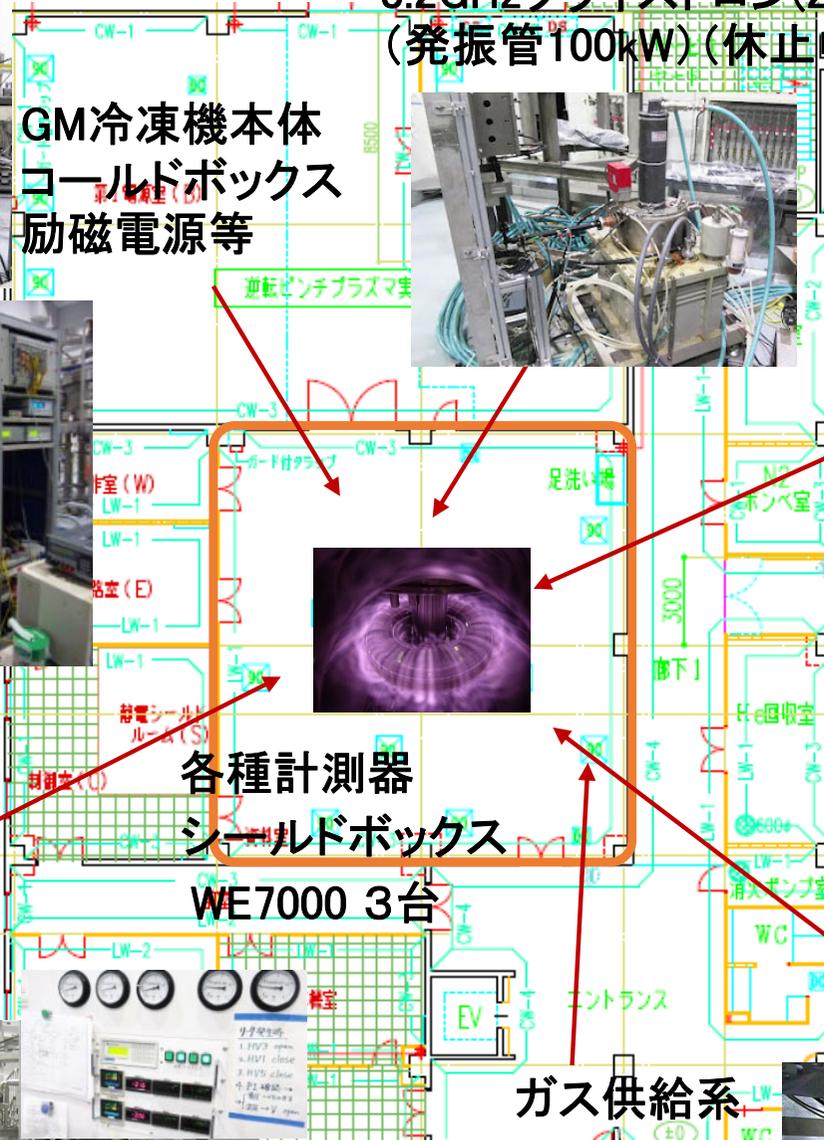
地磁気補正コイル

IGH電源  
0.8-3MHz  
10kW

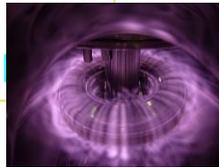
2.45GHz  
マグネトロン(20kW)



超伝導  
システム  
制御系



各種計測器  
シールドボックス  
WE7000 3台



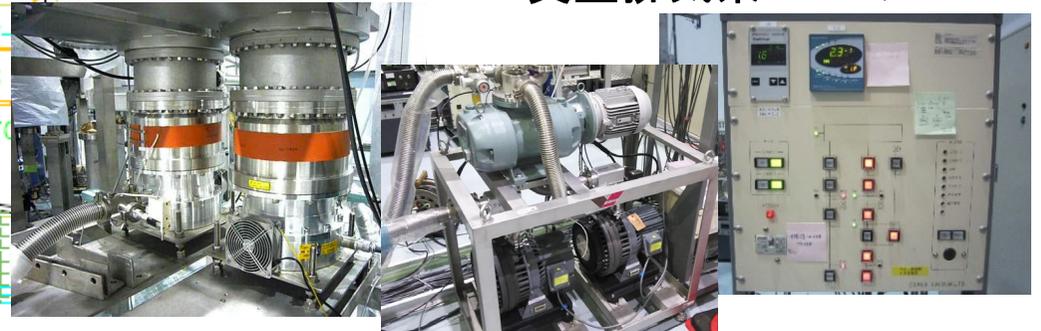
加熱系(電子及び  
イオンサイクロトロン  
共鳴加熱)



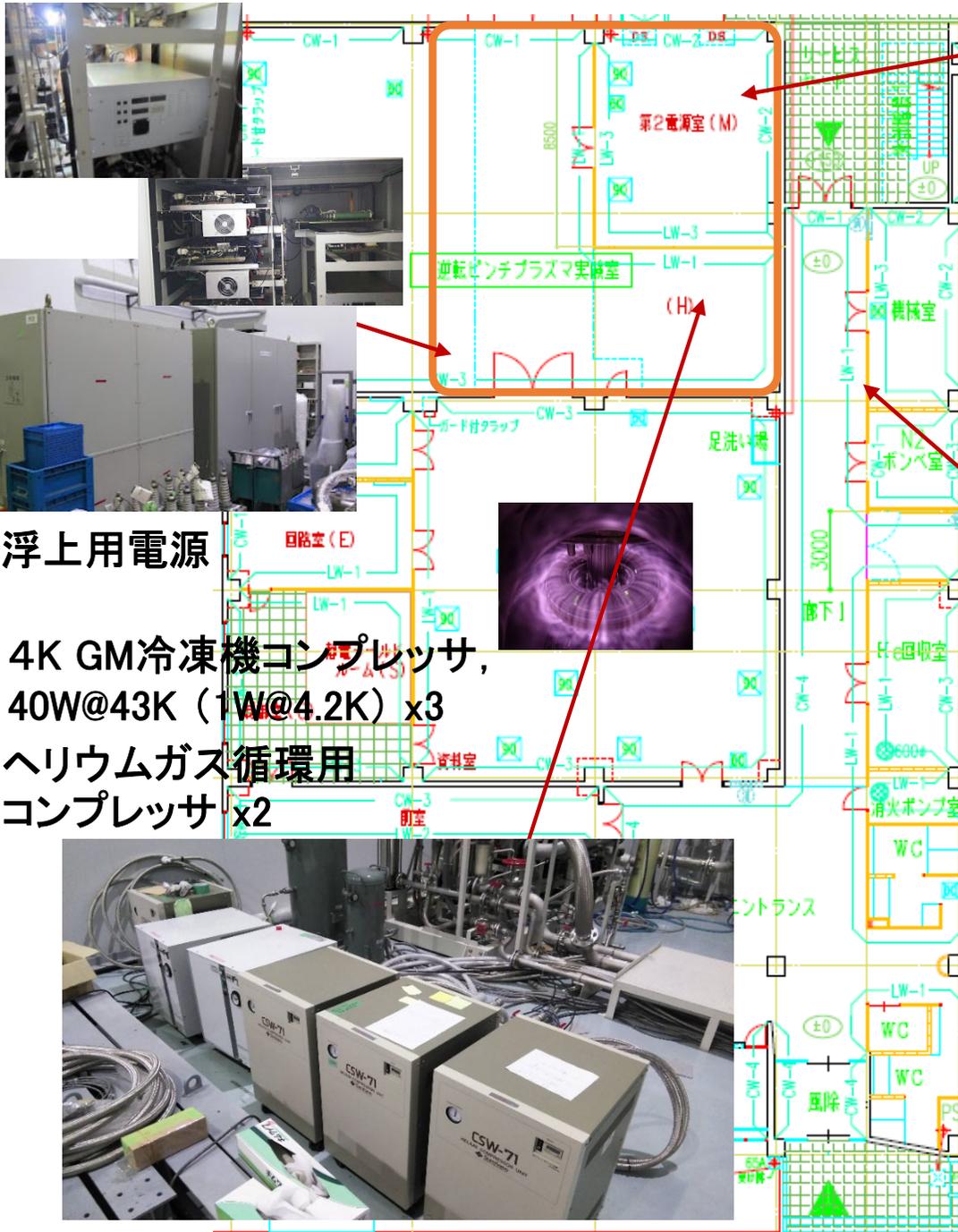
真空排気系5000L/s TMP



ガス供給系



# I-0) 実験室の環境、インフラ (「電源室」)



クライストロン高圧電源

冷却水系  
 400L/min, 500L/min (屋上に冷却塔)  
 20L/min



ブレーカ群は、コイル浮上系、  
クライストロンとマグネトロン電源等

浮上用電源

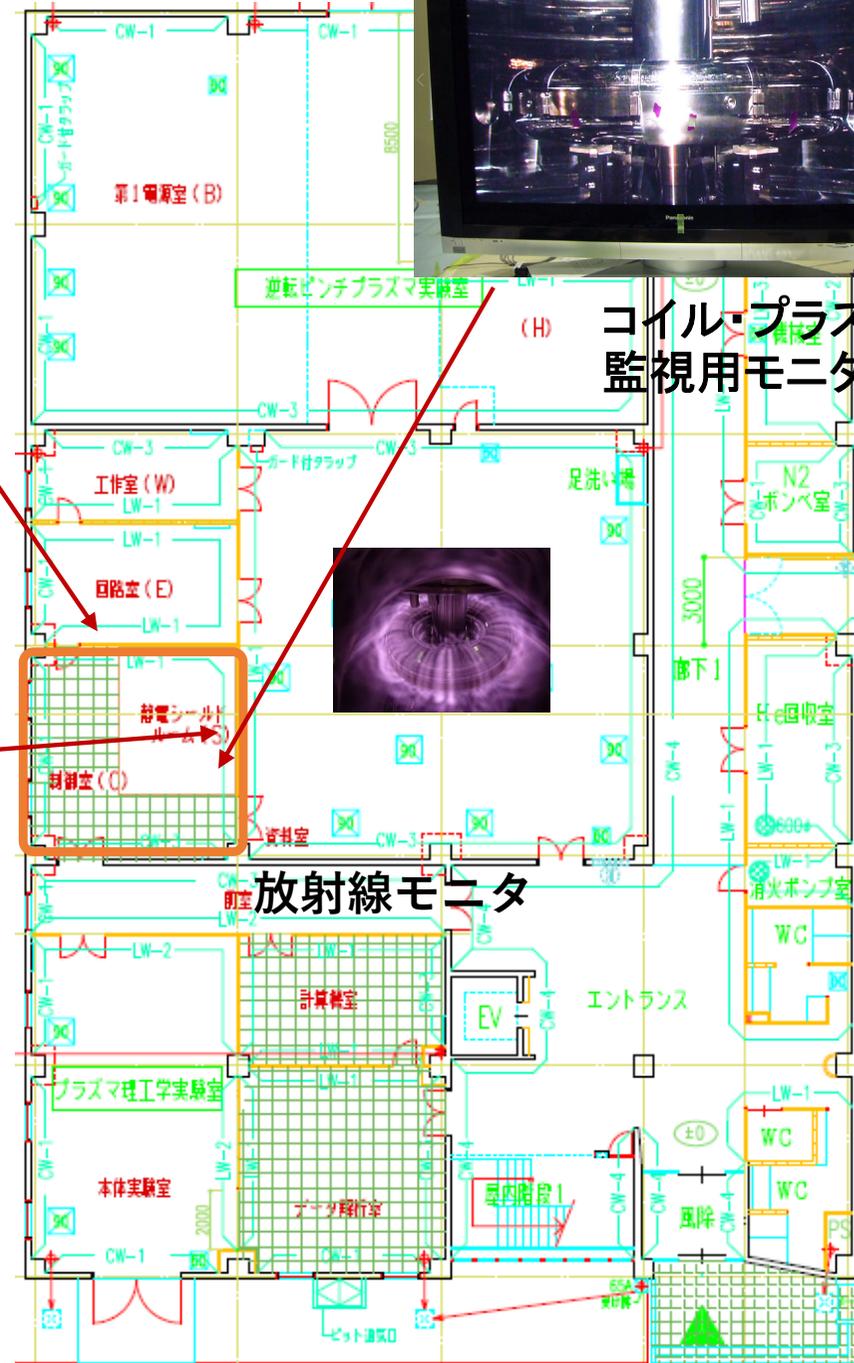
4K GM冷凍機コンプレッサ,  
 40W@43K (1W@4.2K) x3  
 ヘリウムガス循環用  
 コンプレッサ x2



# I-0) 実験室の環境、インフラ（制御室）



コイル・プラズマ  
監視用モニタ

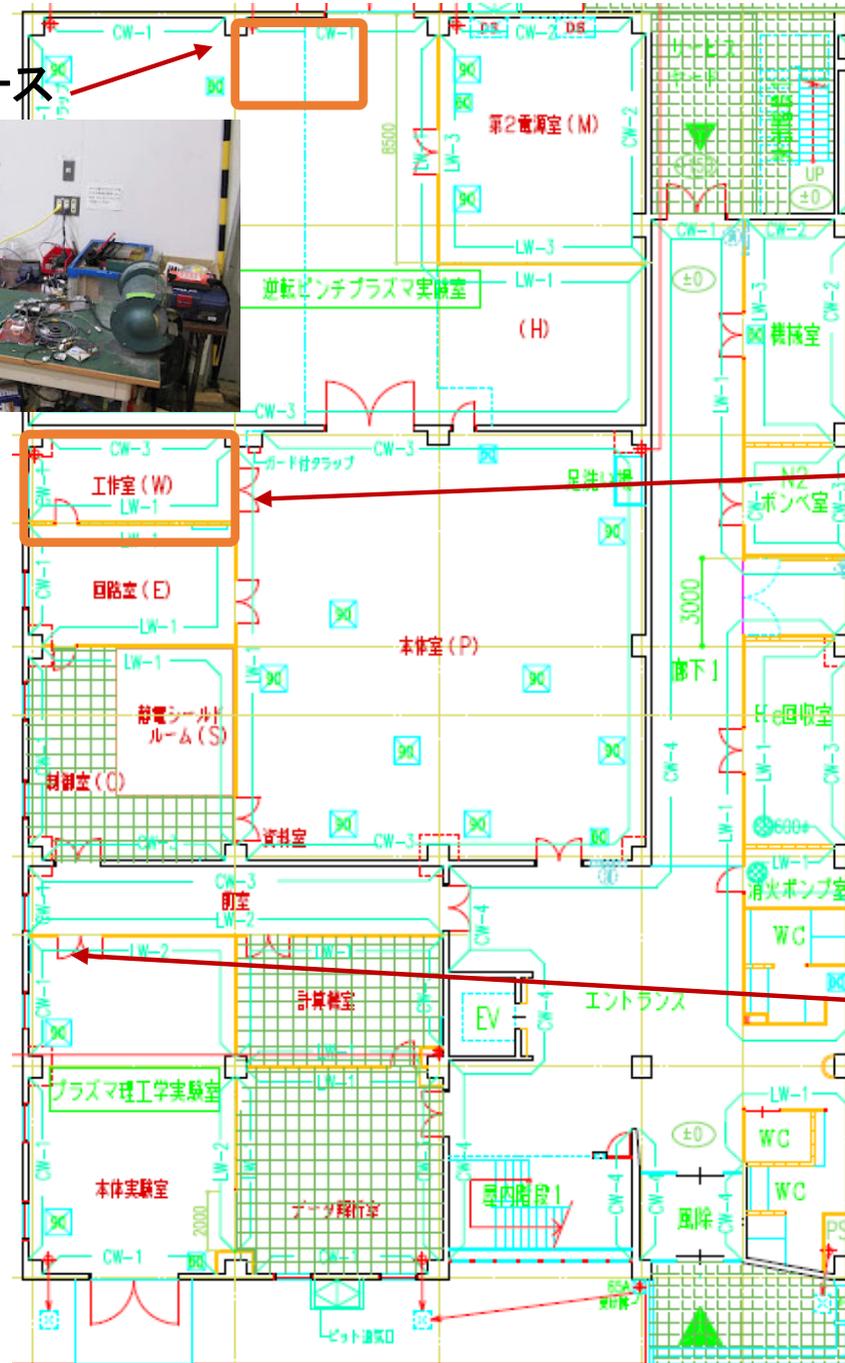


浮上制御システム  
(フィードバック制御回路,  
レーザーコントローラ)



# I-0) 実験室の環境、インフラ (その他)

作業スペース



冷却塔(屋上)380kW



回路室

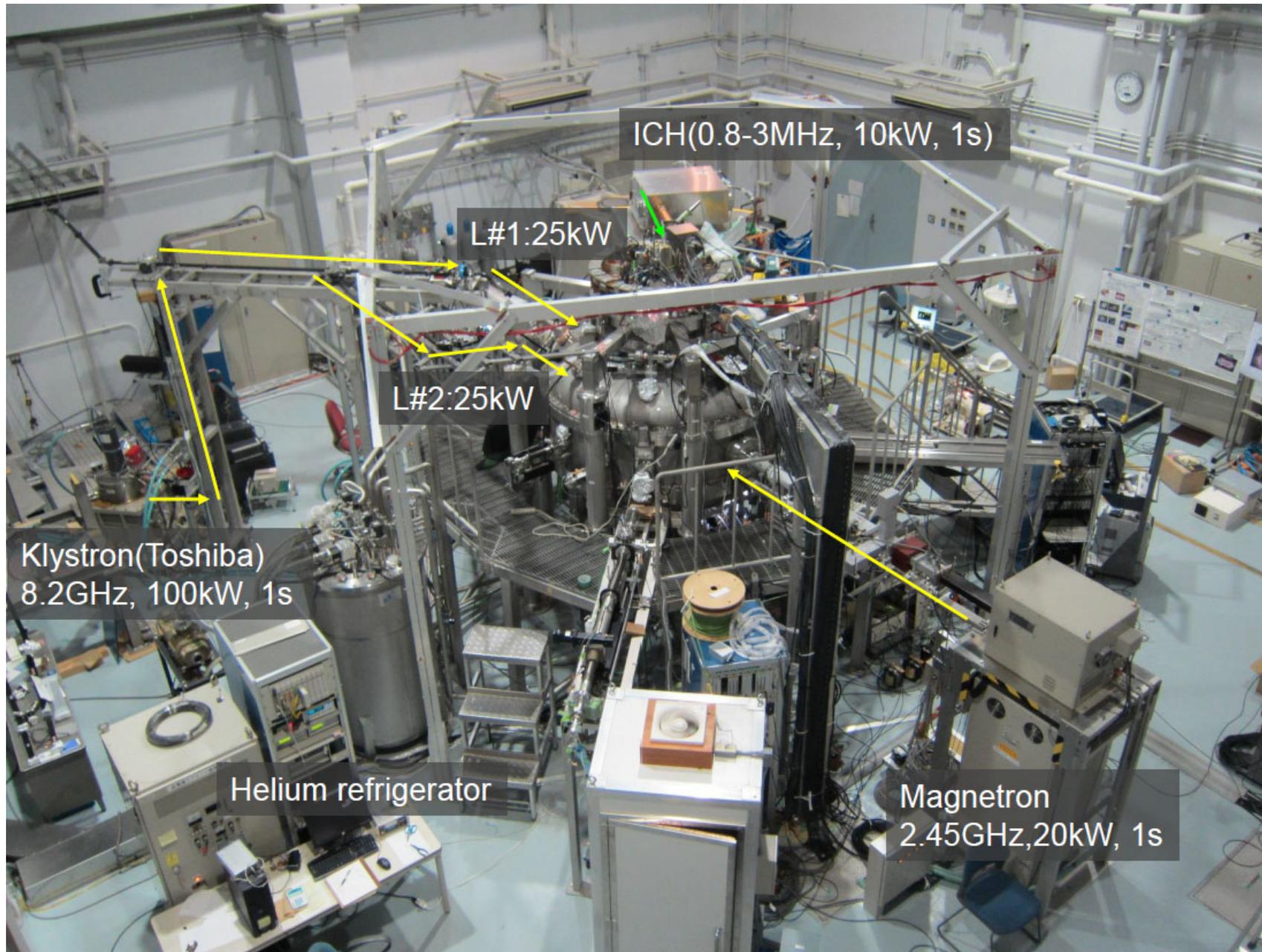


可視分光器など

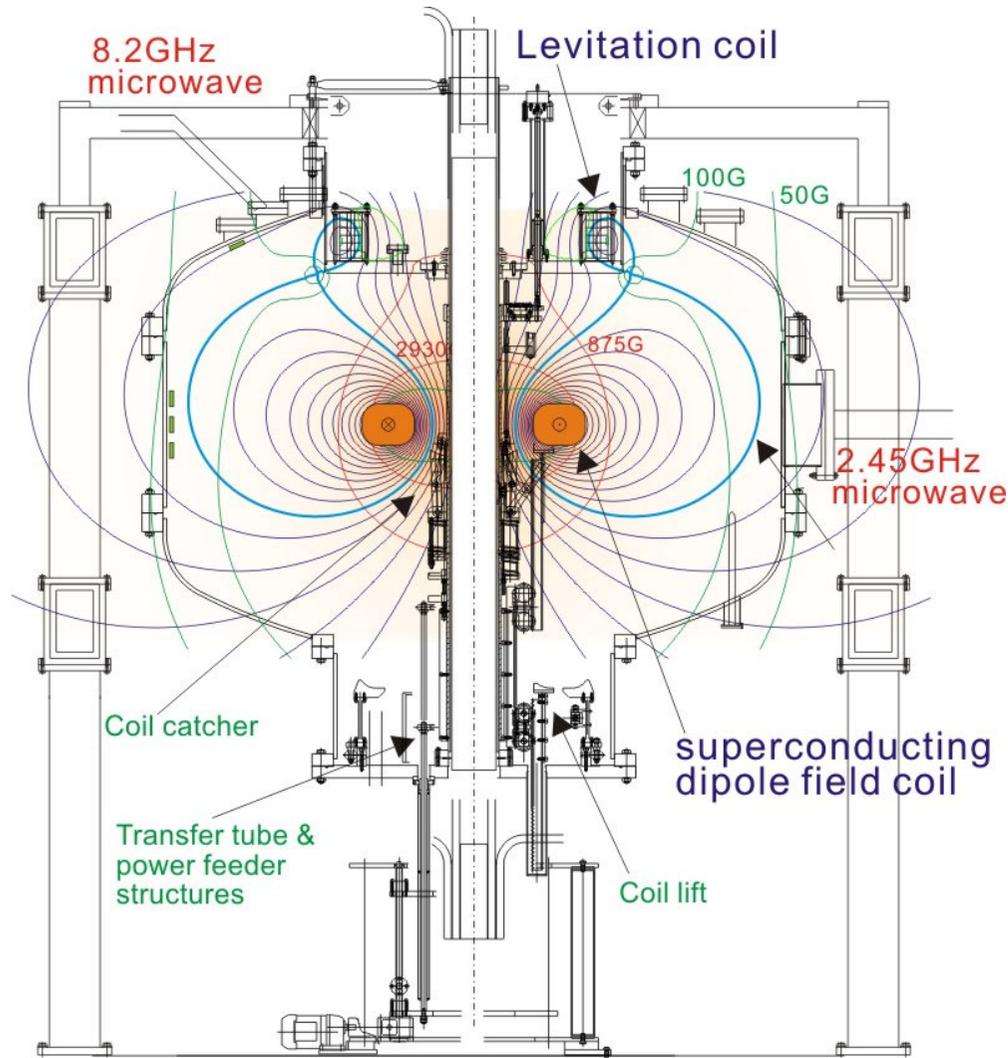


# I-0) 実験室の環境、インフラ(装置全体まとめ)

M. Nishiura

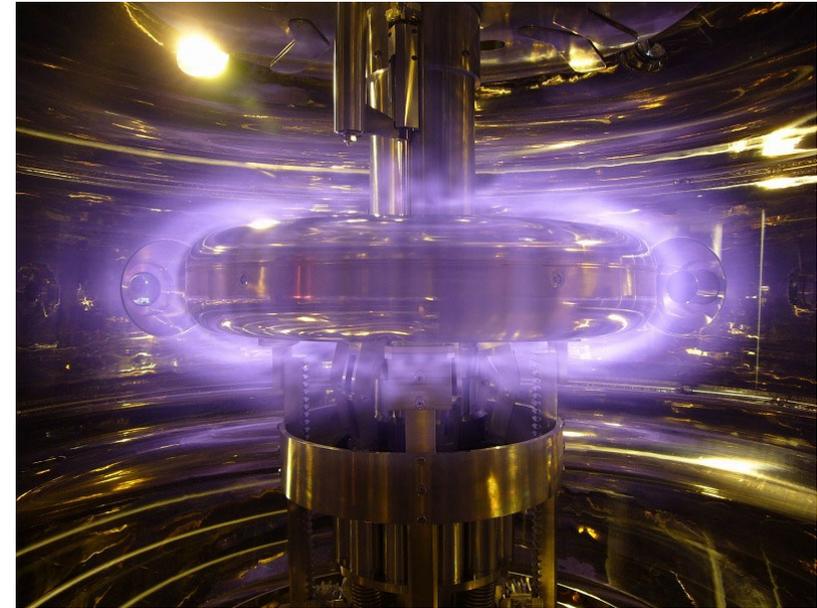


# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順

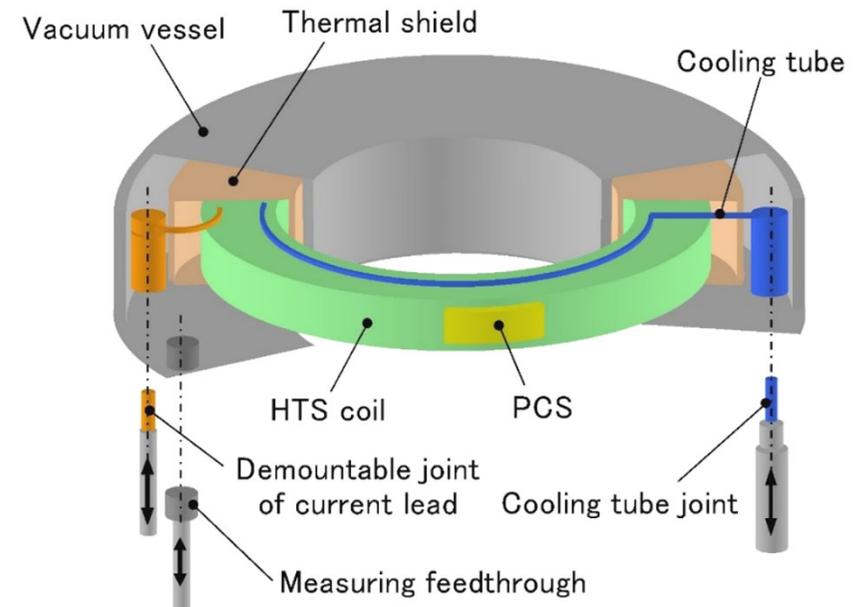


## RT-1装置の断面図と計測器等の配置

測定系: 1m可視分光器, 反磁性ループ, 磁気プローブ, 75GHz干渉計, 軟X線検出器 (SiLi及びCdTe), 可視光カメラ, 軟X線カメラ, エッジ静電プローブ

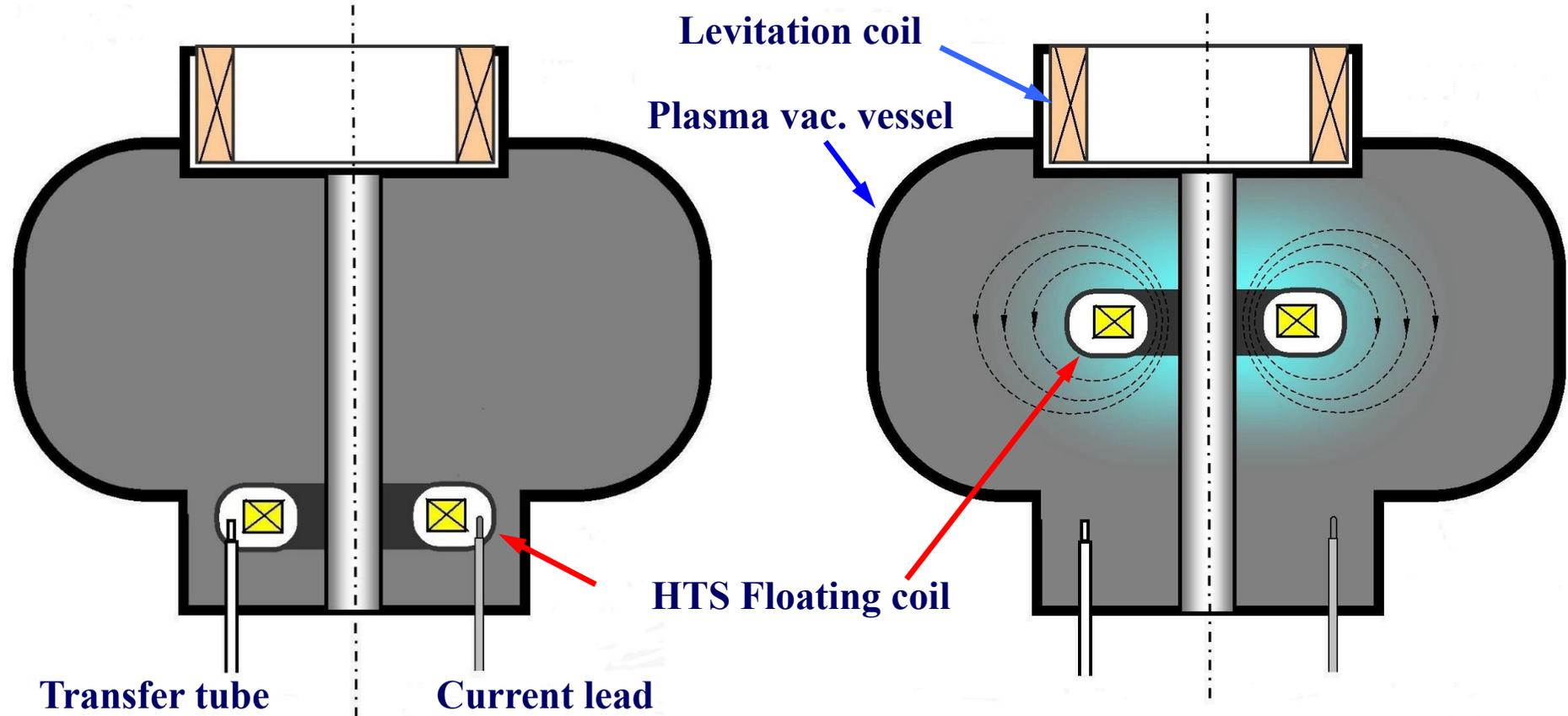


## 2.45GHzマイクロ波によるECHプラズマ



## RT-1の高温超伝導 (Bi-2223) 巻線

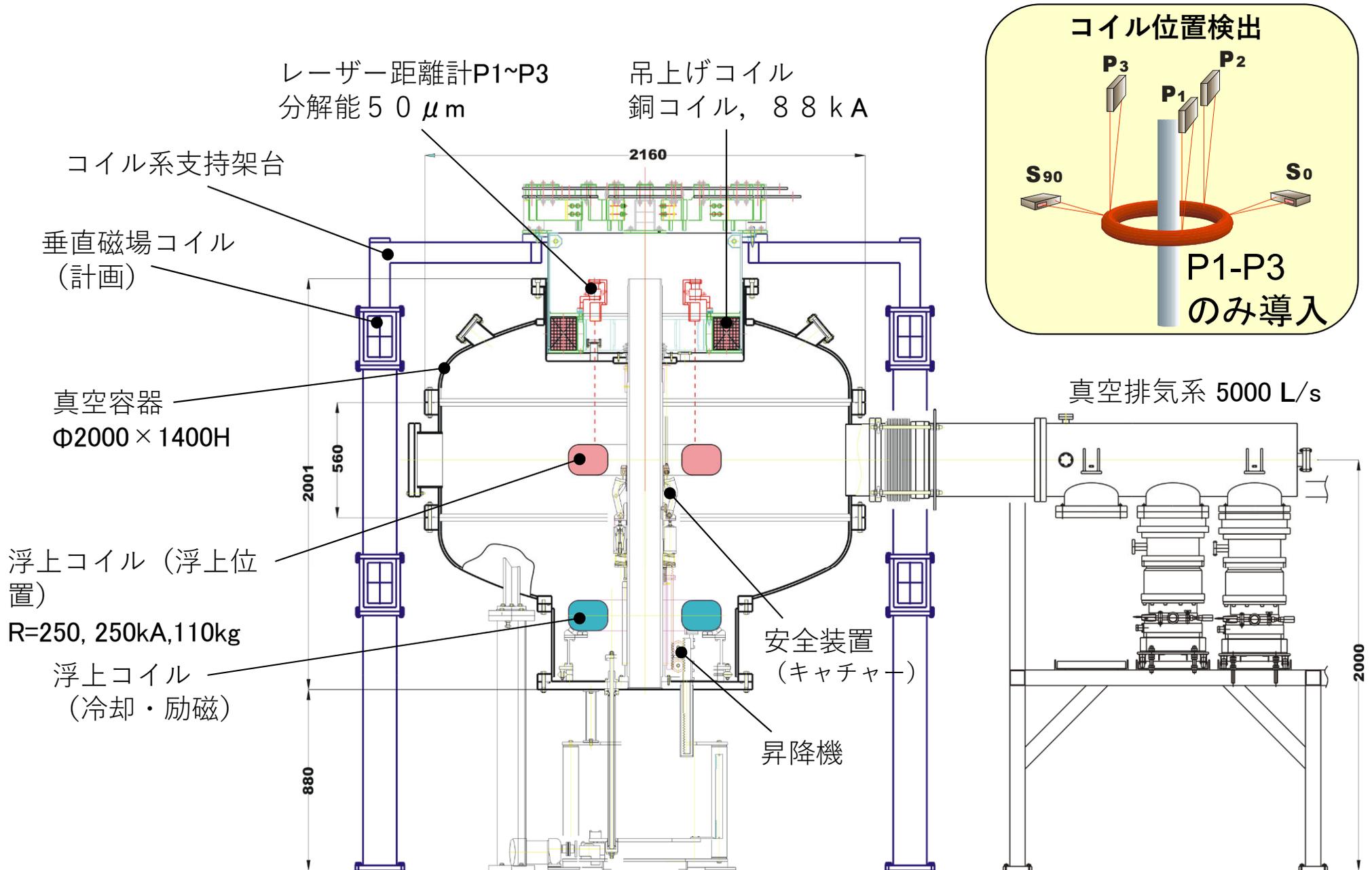
# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順 コイル運転の流れ



(a) The HTS floating coil is cooled down to 20K and charged up to the nominal current, 116A after connecting current leads at the maintenance position.

(b) During the plasma experiment, the HTS floating coil is magnetically levitated at the floating position by using levitation coil after mechanically lifting up to the floating position .

# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順 全体構造図

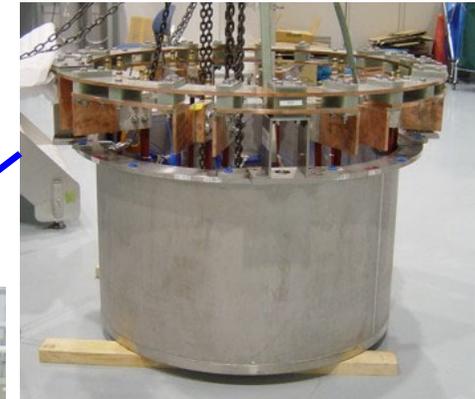


# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順 浮上用機器構成

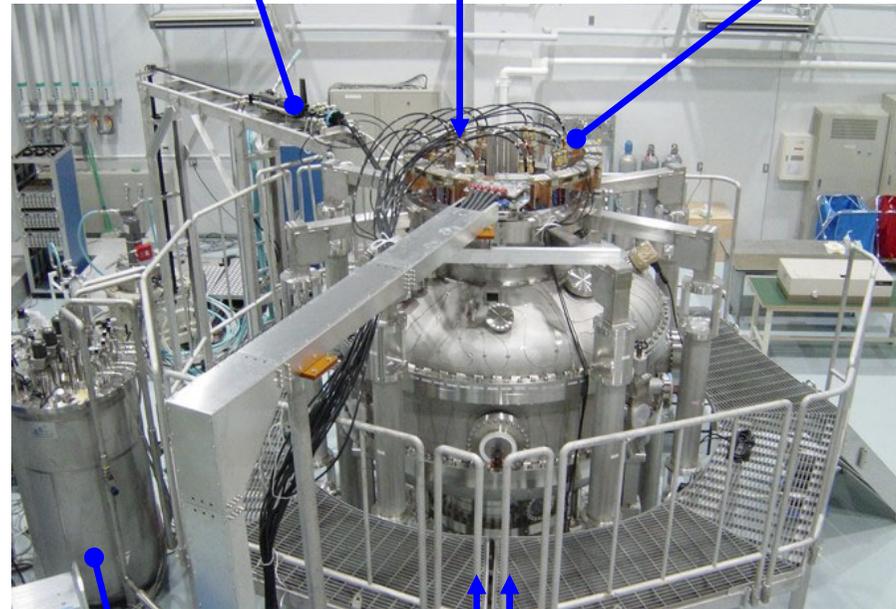
プラズマ生成・加熱用  
マイクロ波(8.2GHz, 100kW, 1秒)



レーザー距離計



吊上げコイル  
(88kA, 600kg)



冷凍機  
50W at 20K

浮上コイル  
R=250, 250kA, 110kg



キャチャー  
動作時間0.1秒以下



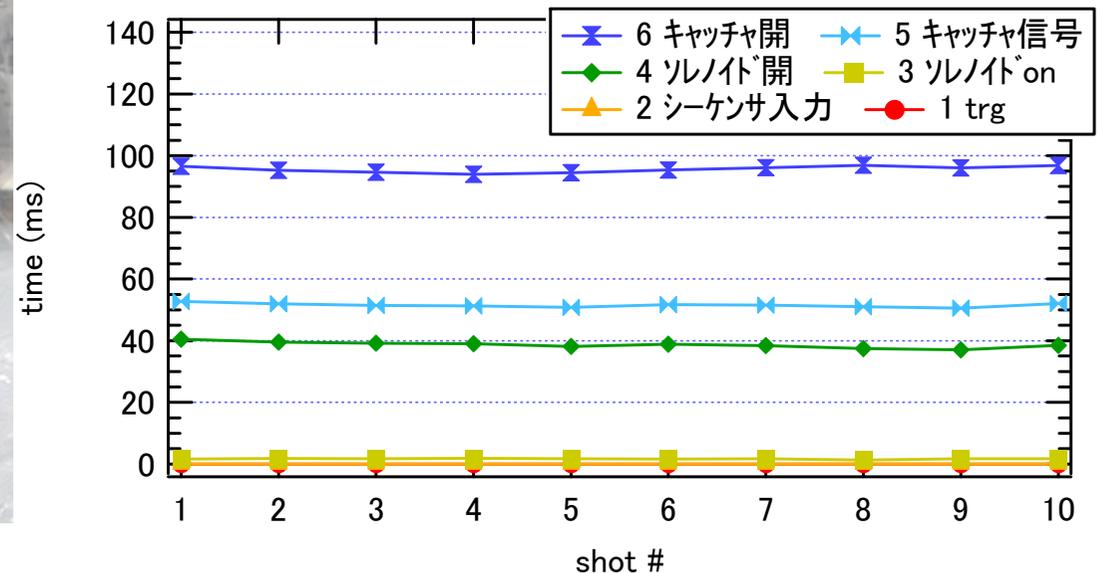
昇降機  
ストローク860mm

# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順 コイルキャッチャ補足



- ・ 浮上運転中の電源異常/停電による超電導コイルの落下対策の安全装置.
- ・ 異常発生時, コイル落下時間 (~100ms) よりも高速にコイルキャッチャを展開し, 大落下によるコイル破損を防止する.

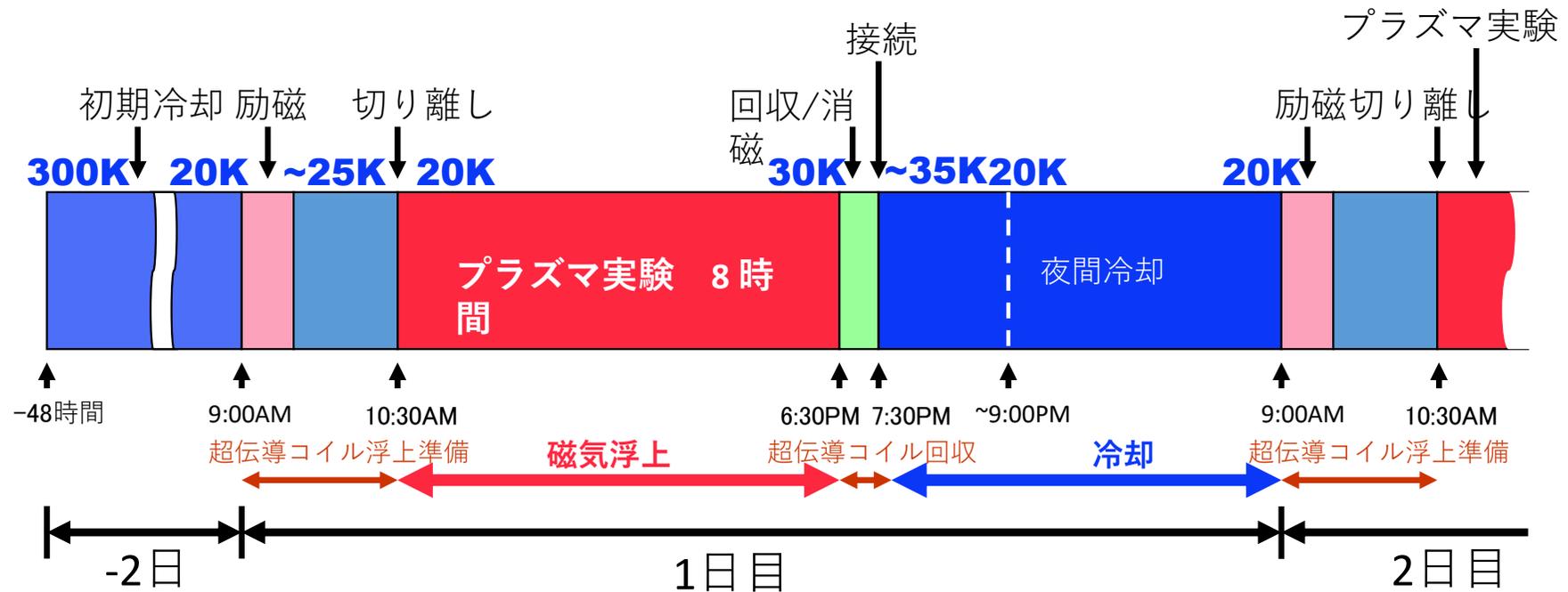
⇒ キャッチャの支持構造の見直しにより, 真空中でも高速動作を実現



収納時 (上) と事故検出による展開時 (下)

キャッチャー動作時間 (各stepの動作)

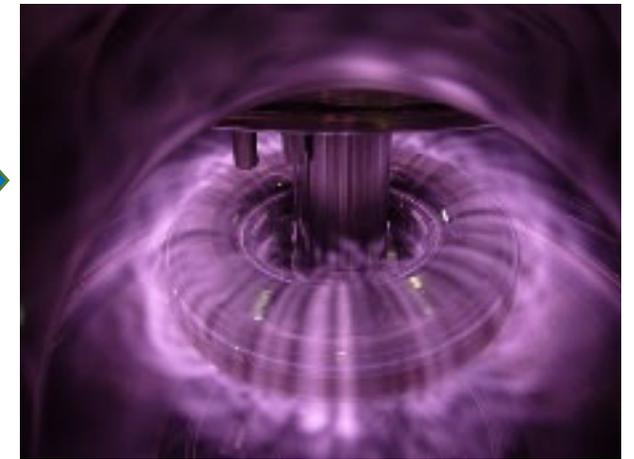
# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順 運転サイクル



コイル冷却/再冷却/昇温

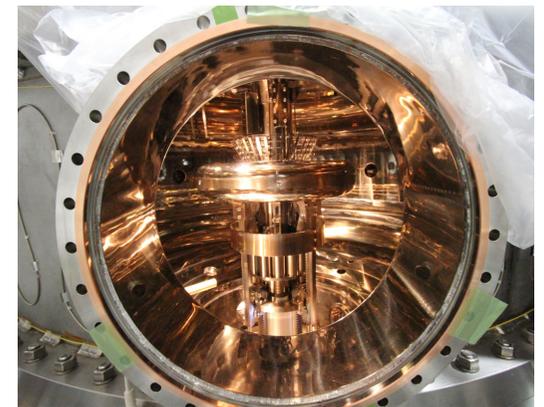
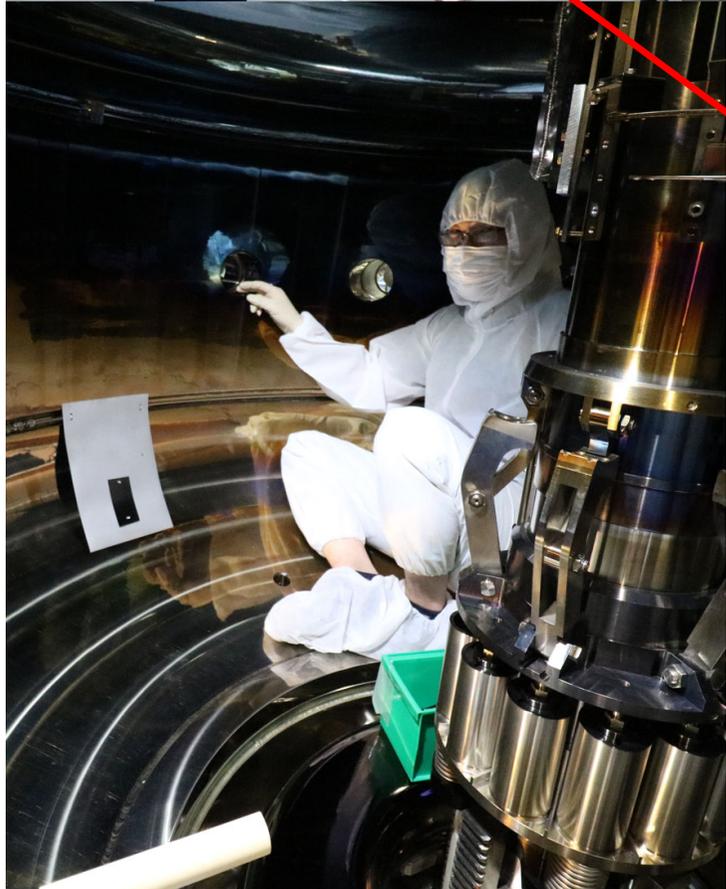
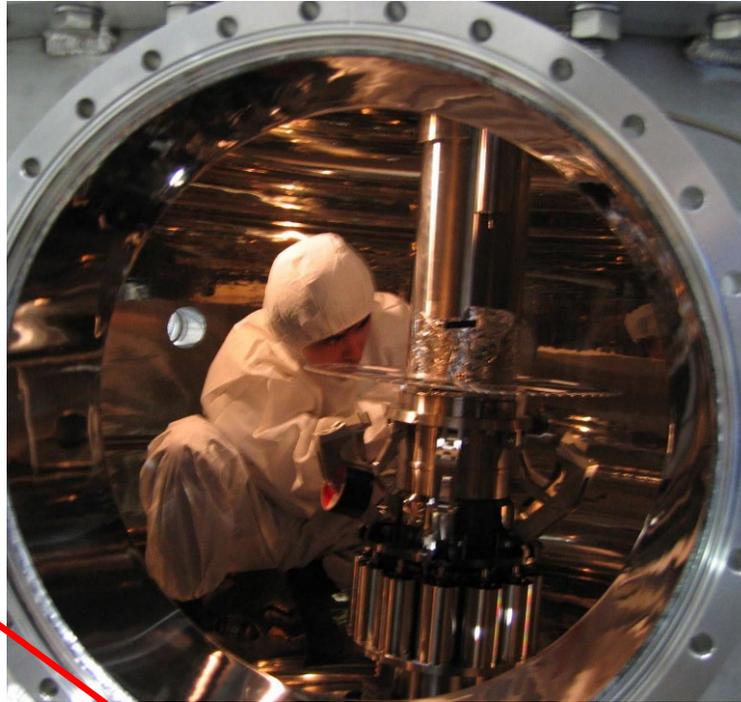


コイル切り離し/回収



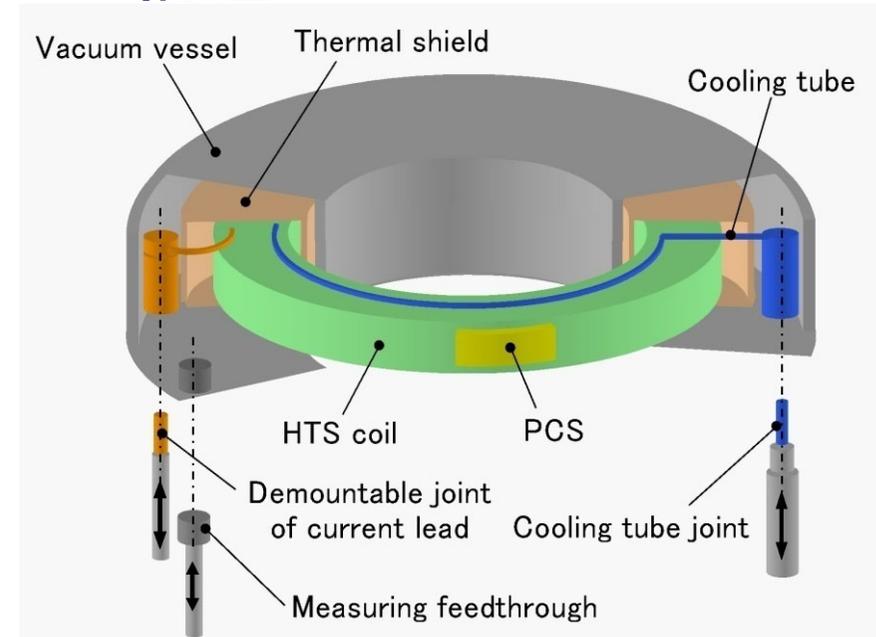
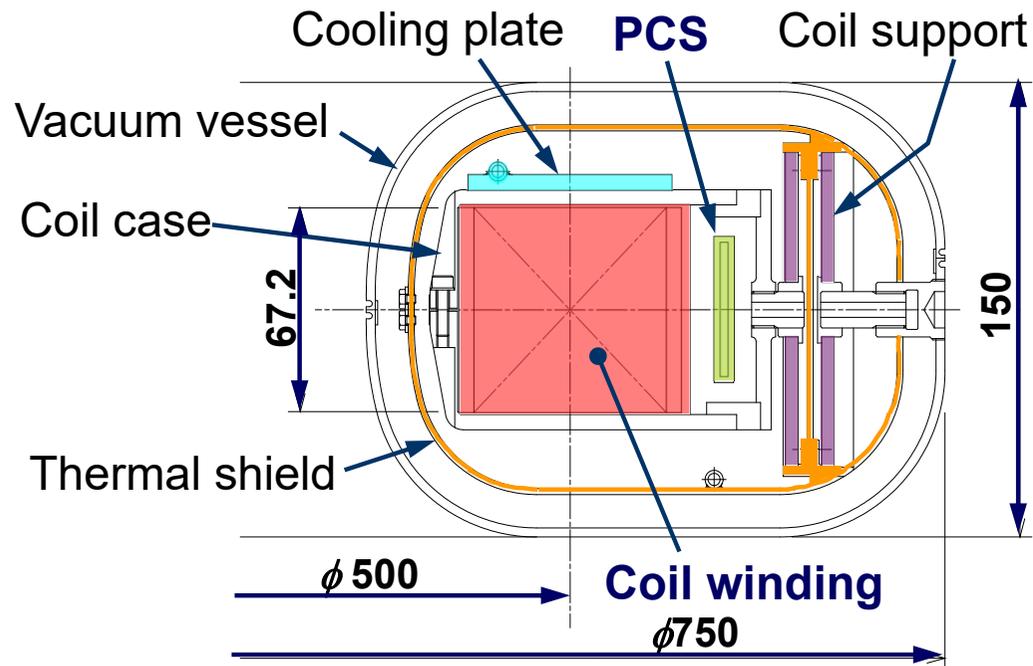
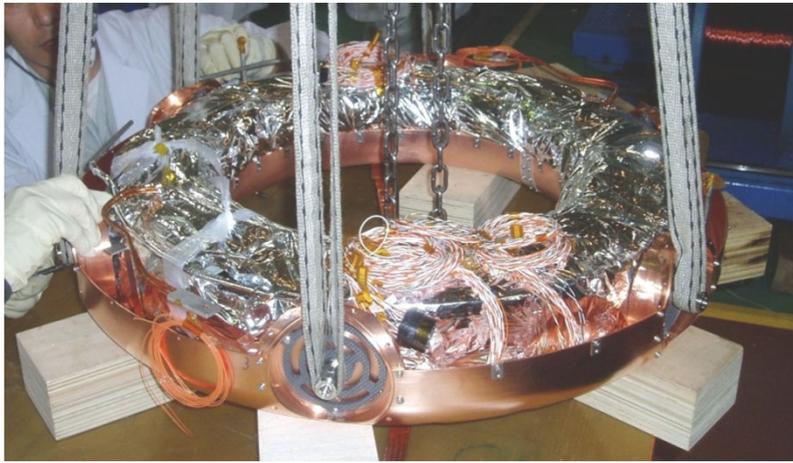
コイル浮上/プラズマ実験

# I-1) 装置の構造, 運転メンテナンス手順 メンテナンス



- 本体メンテナンスは軽微なものはポートから,  
アンテナ設置などは内部で人が作業

## I-2) 磁場コイルと電源 超伝導コイルの構造

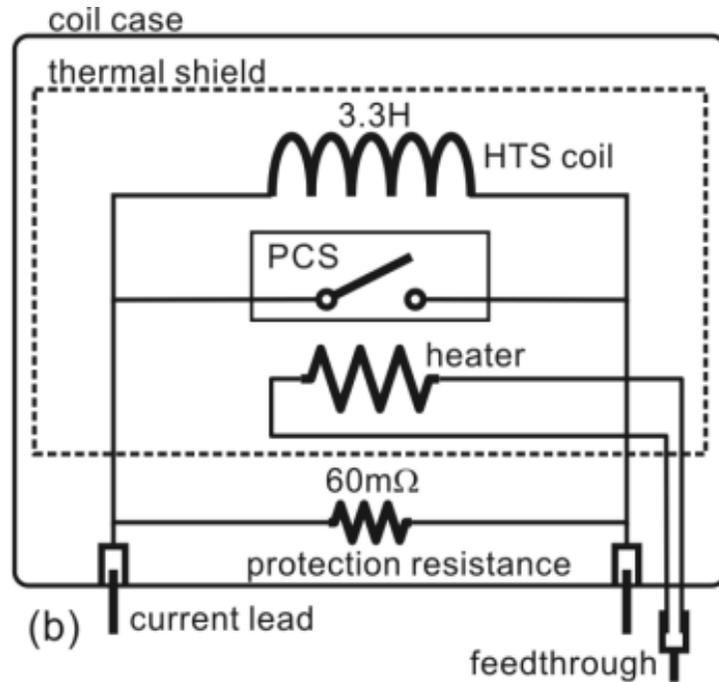


### Main Parameters of the Floating HTS Coil

Winding method	Single pancake
Stack number of pancakes	12
Dimension Major diameter	$\phi 500$ mm
Height	67.2 mm
Operating temperature	20~30 K
Magnetomotive force	250 kA
Operating current	115.6 A
Inductance	3.3 H
Stored energy	22 kJ

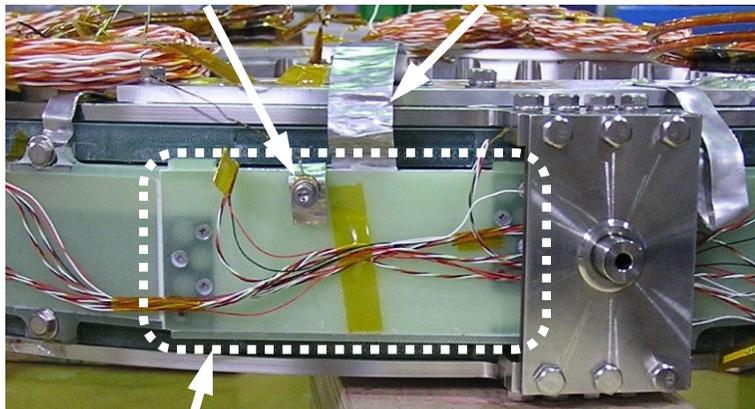
- Bi-2223高温超伝導線材 (PCSはYBCO) を使用した, 重量約120kgのdipole磁場コイル.
- GM冷凍機による冷却, 励磁後, 制御磁気浮上を行い, 8時間の無冷却運転が可能.

# I-2) 磁場コイルと電源 超伝導コイルの構造(内部回路と外観)



**Fig. 1** (a) Cross-section of the RT-1 including the coil magnets, vacuum chamber, and magnetic surfaces. (b) Circuit diagram of the superconducting coil and PCS in the RT-1 device.

Temperature sensor Thermal switch

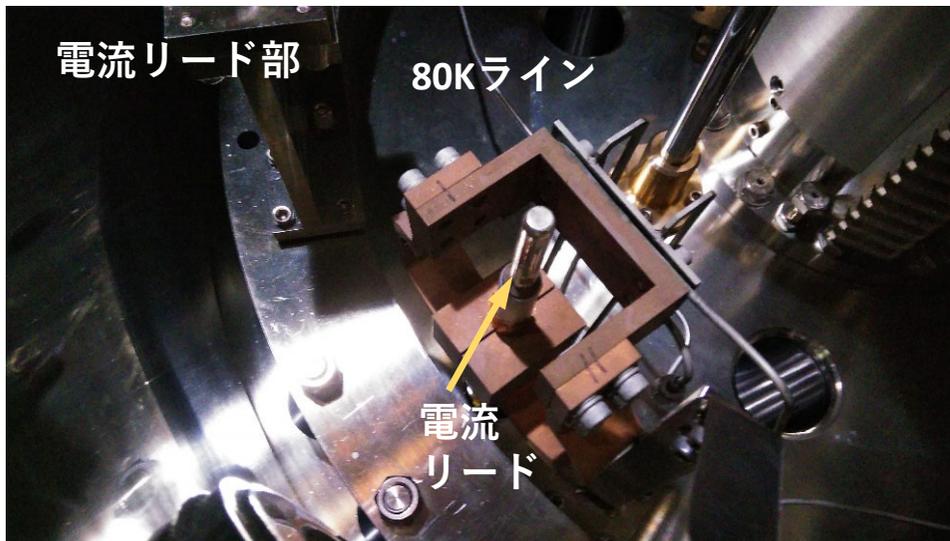
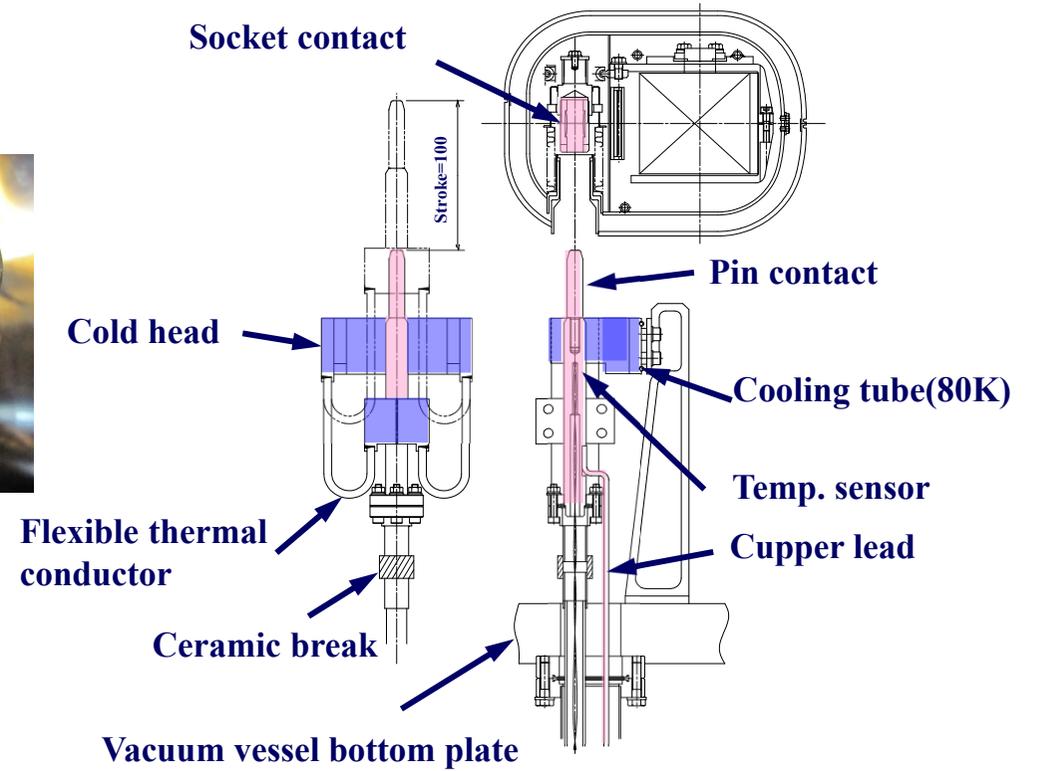
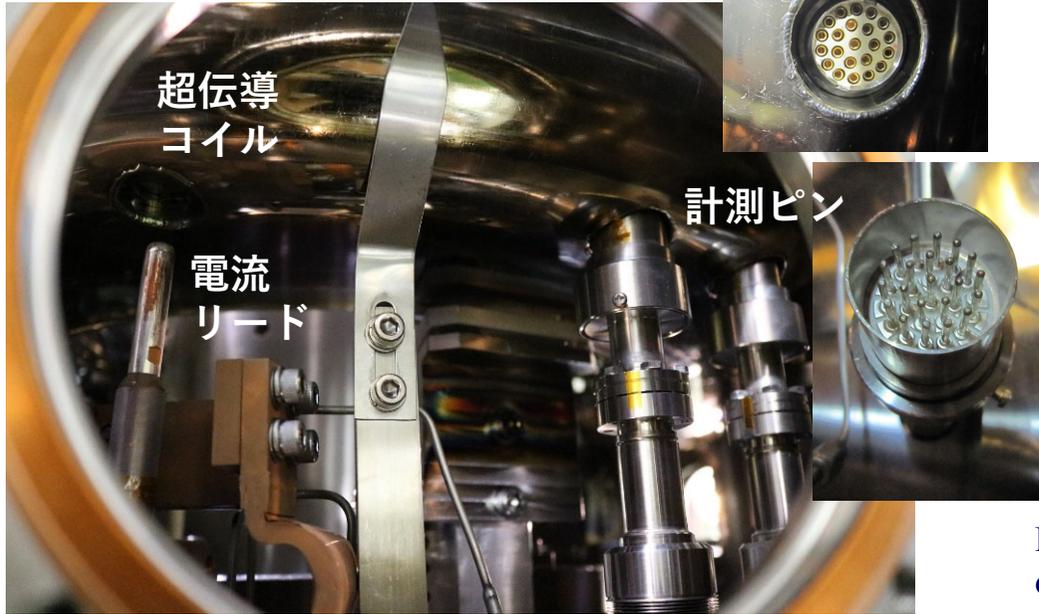


PCS



# I-2) 磁場コイルと電源 超伝導コイル(電流リード・計測ピン)

真空容器内で着脱式な構造



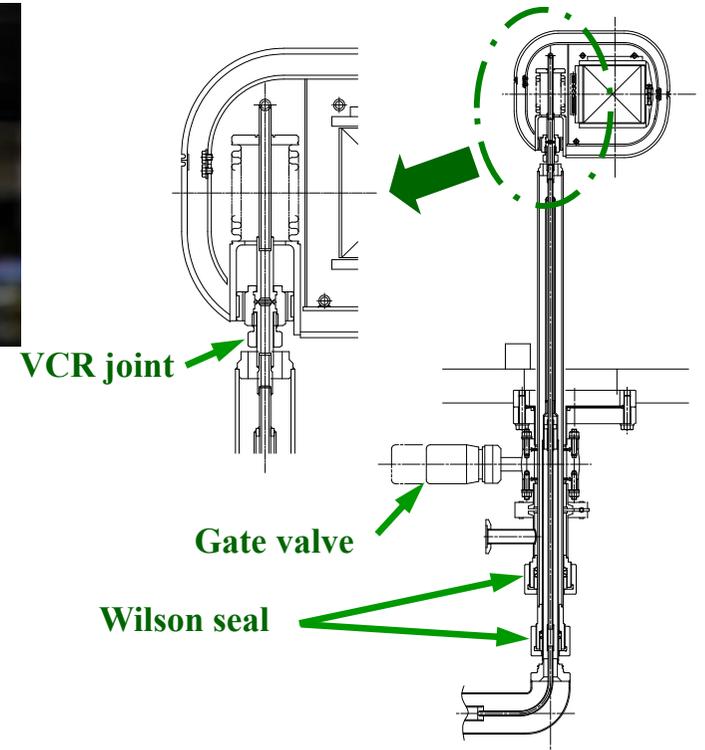
# I-2) 磁場コイルと電源 超伝導コイル(冷却方式と作業方法)



VCRガスケット  
による封止

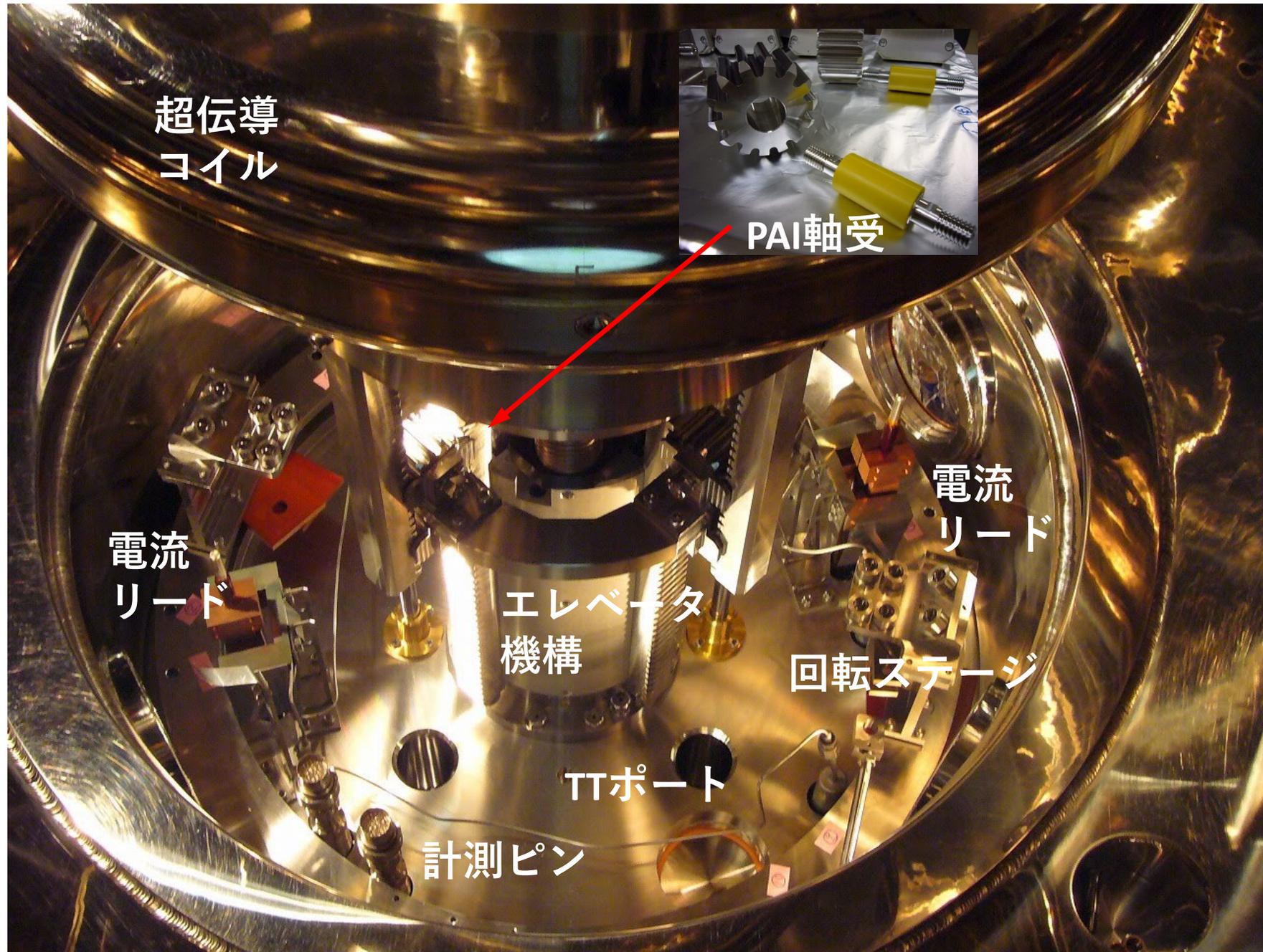


VCRオス  
スプリットナット  
(銀メッキ)  
->交換可能

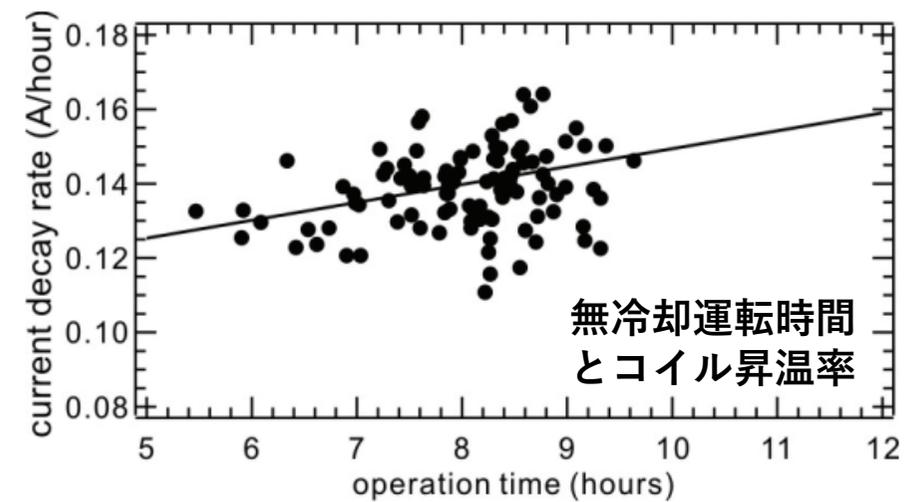
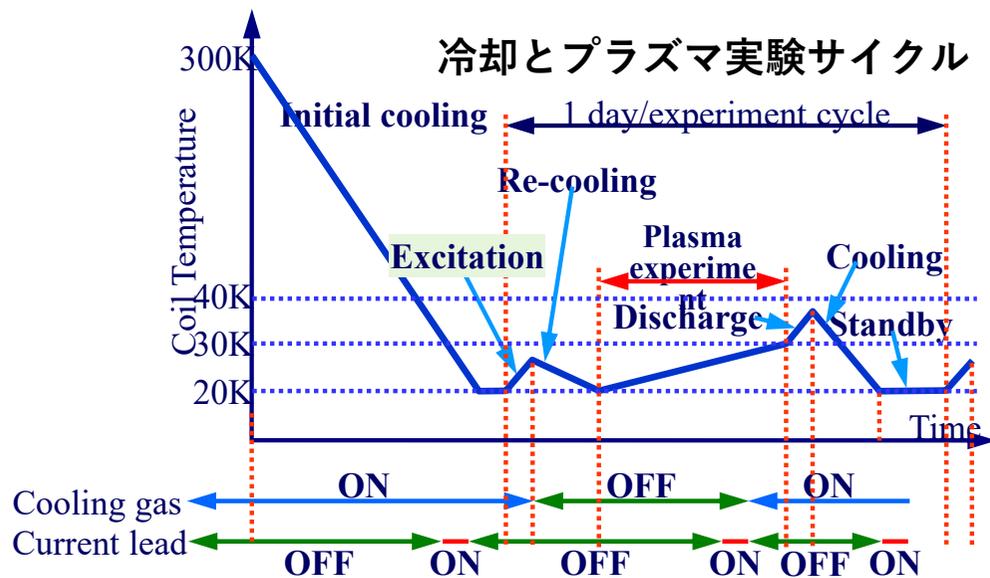


ヘリウムトランス  
ファーチューブ(TT)  
の着脱作業

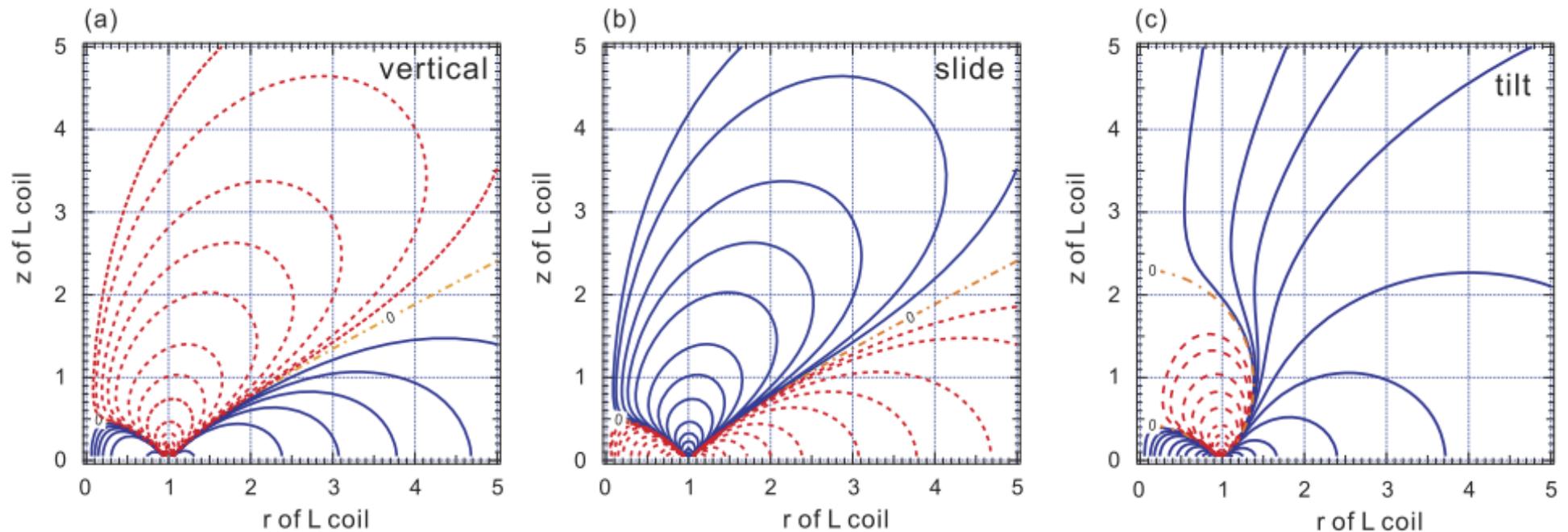
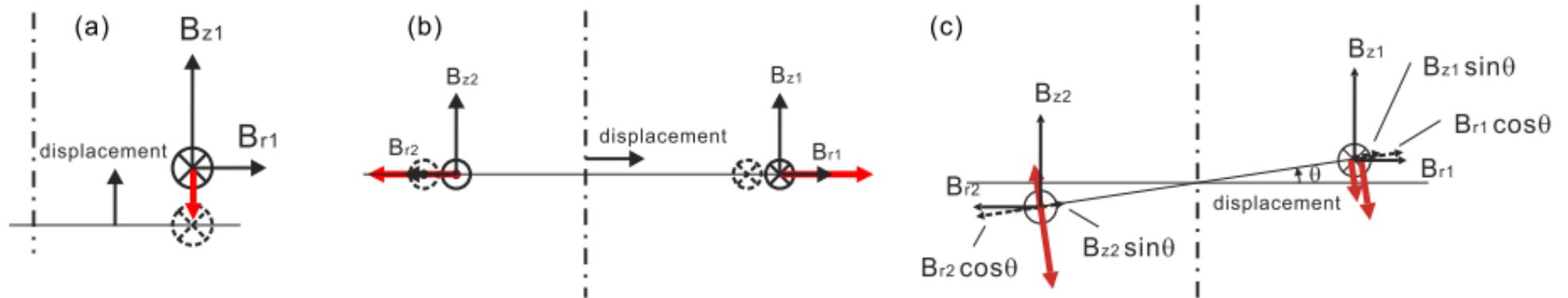
# I-2) 磁場コイルと電源 超伝導コイル(コイル周辺機器全景)



# I-2) 磁場コイルと電源 超伝導コイル運転サイクル

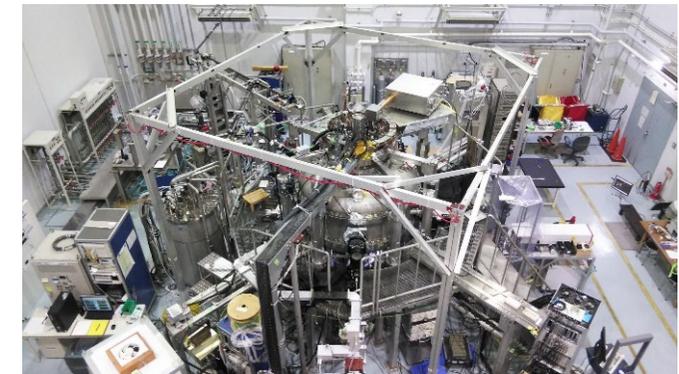
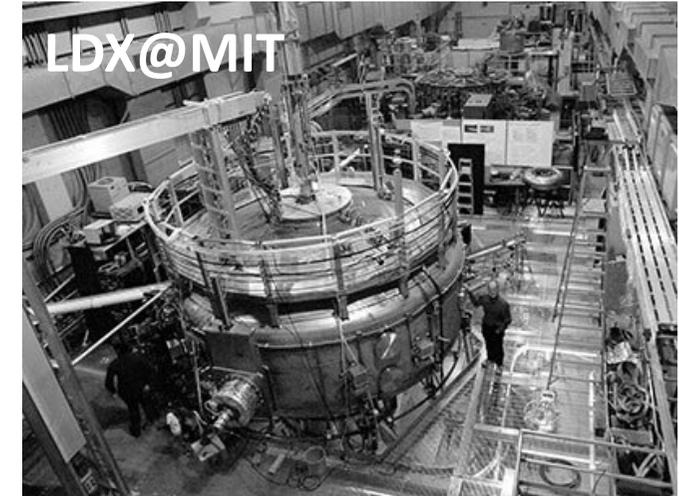
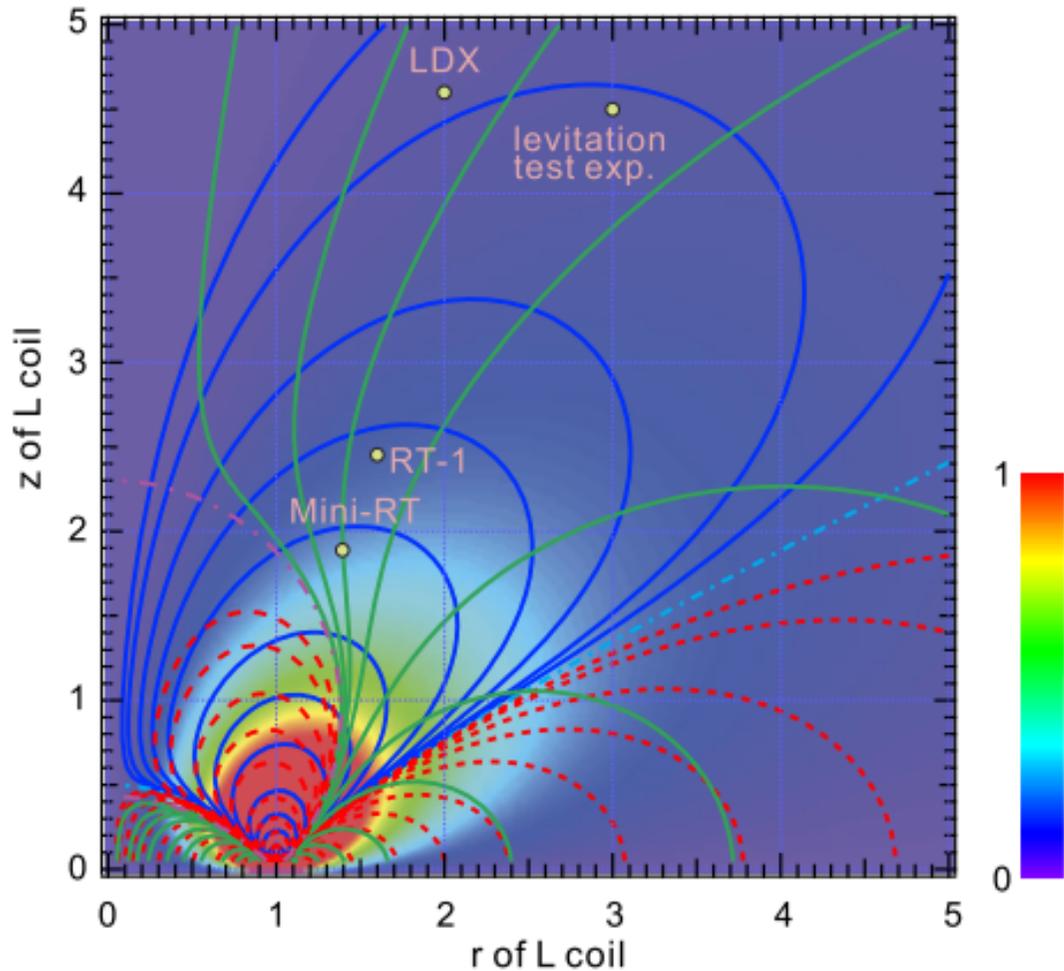


# I-2) 磁場コイルと電源 引き上げコイルによる浮上の安定性



規格化した超伝導コイル位置(1,0)に対して、引き上げコイルを座標上の各位置に配置したとき、上下、スライド、チルトに対して安定(実線)か不安定(破線)かを示す。

# I-2) 磁場コイルと電源 引き上げコイルによる浮上の安定性



**FIG. 4.** Color contours show the radial magnetic field  $B_r$  at the F coil position of  $(r, z) = (1, 0)$  generated by the L coil located at various positions. The field strength is normalized to the value at  $(r, z) = (1, 0.5)$ . Lines show stable (solid lines) and unstable (dashed lines) regions for slide and tilt motions of the F coil for various L coil positions and the F coil fixed at  $(r, z) = (1, 0)$ .

いずれの実験も、1次元の上下運動のみが不安定となる吊り上げコイル位置を選択している

# I-2) 磁場コイルと電源 引き上げコイルの電流制御系

## 引き上げコイルと制御系

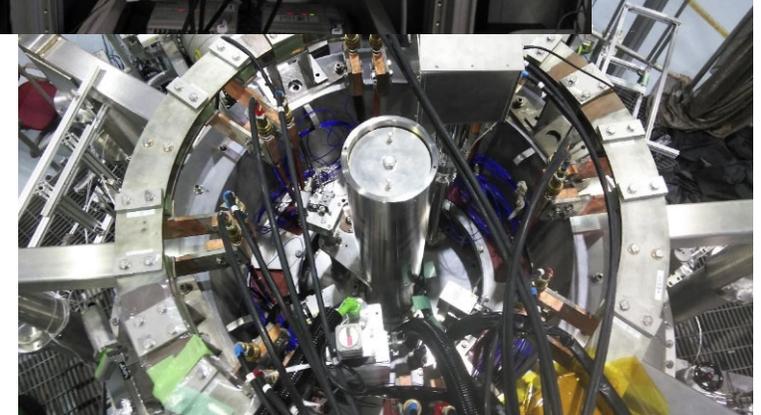
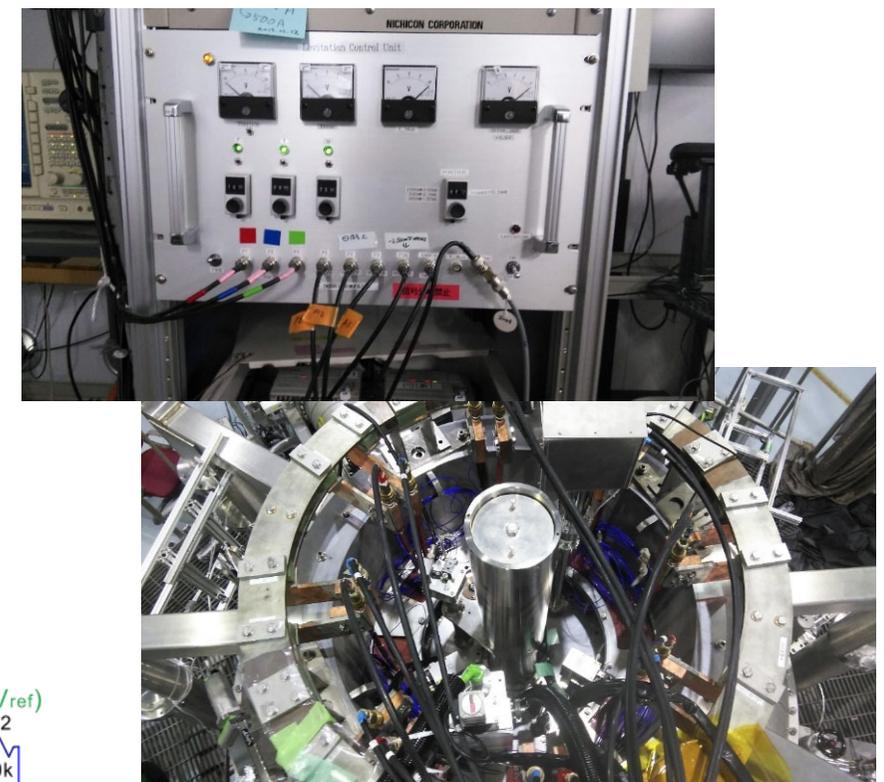
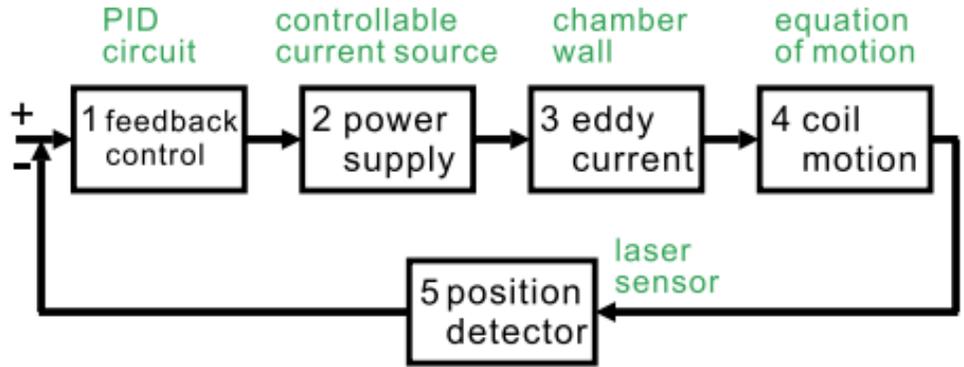


FIG. 5. Flow chart for the levitation system of a levitated dipole experiment.

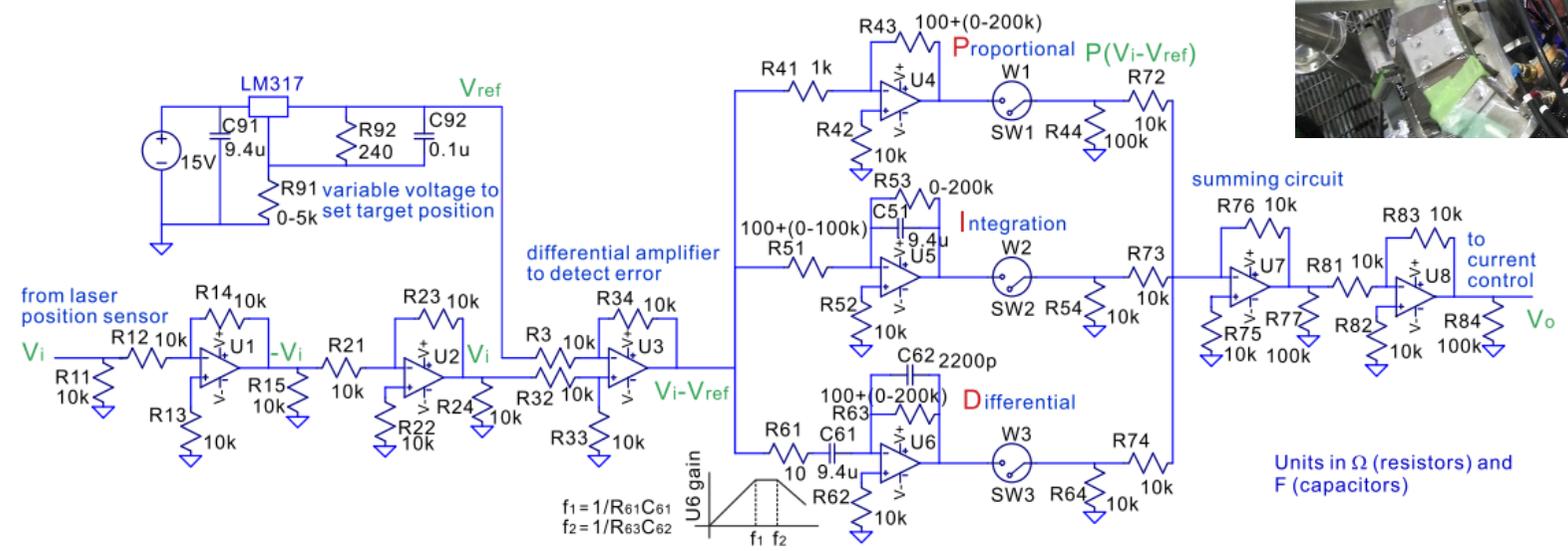
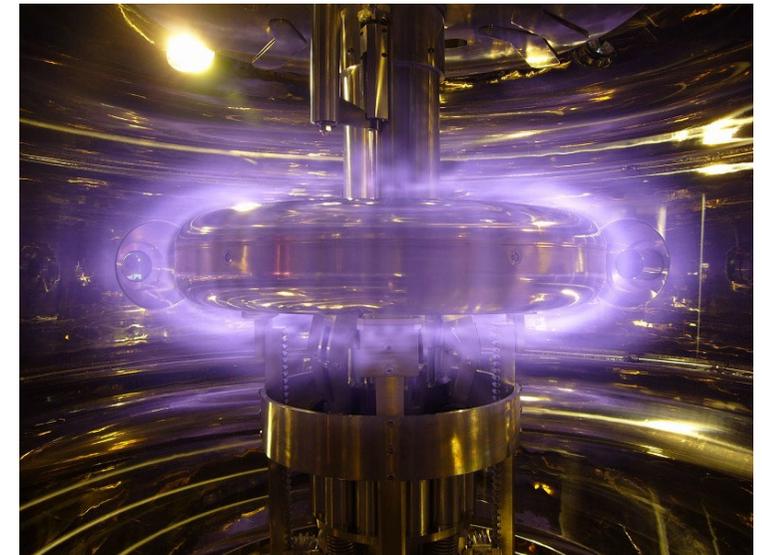
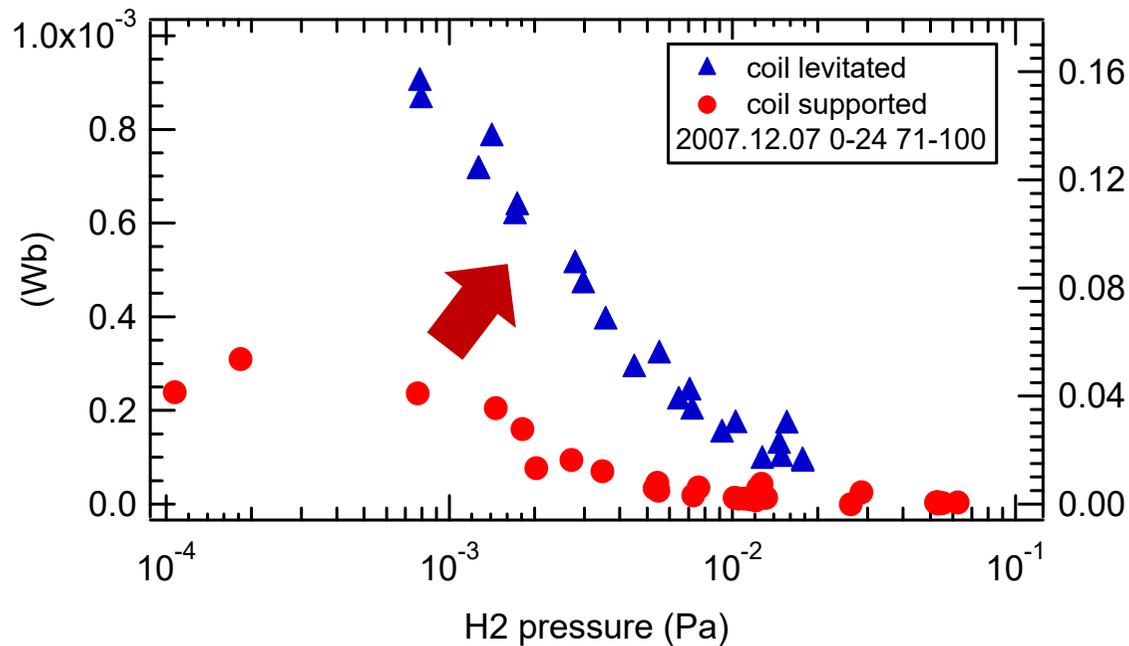
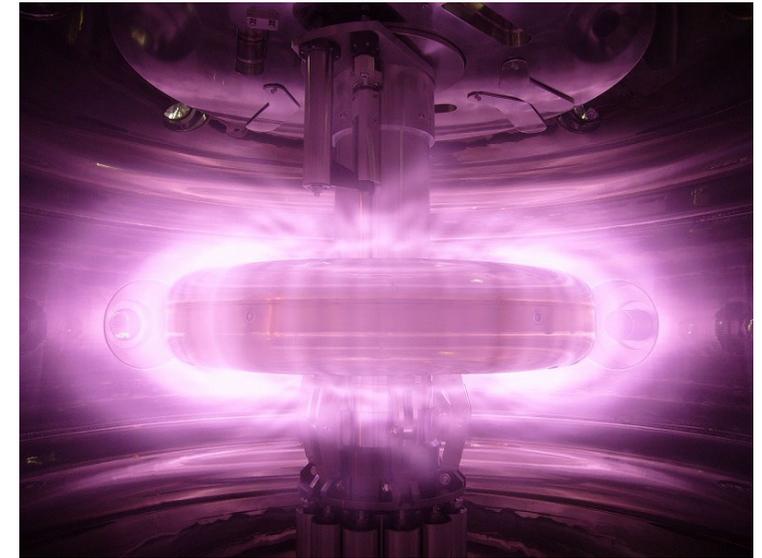
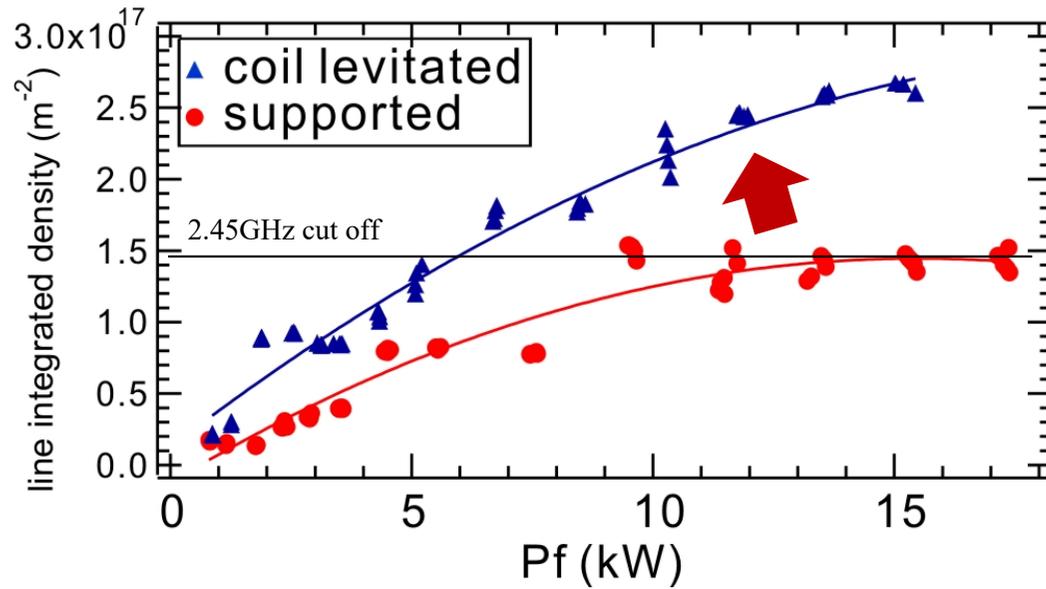


FIG. 7. A PID control system realized by conventional analog components to feedback-control the L coil current for the F coil and magnet levitation using the signal from a laser positioning sensor. U1-8 are Analog Devices OP97 with 0.1  $\mu$ F bypass capacitors at each power supply pins. DC voltages of  $\pm 15$  V were supplied by a series-regulated power supply.

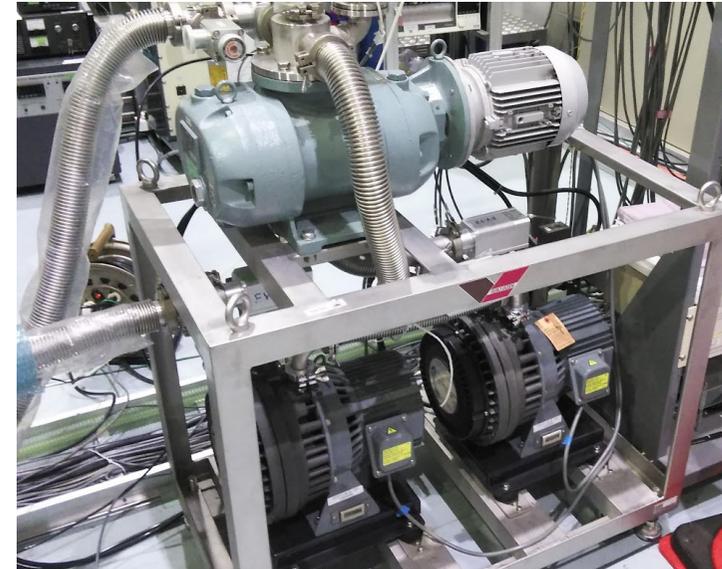
# I-2) 磁場コイルと電源 コイル磁気浮上の効果



# I-3) 真空排気装置、壁調整方法

## 真空容器

寸法 (直管部)	R = 1,000mm, Z = 560mm
体積	3.7 m <sup>3</sup>
到達真空度(ベーキング後)	7 × 10 <sup>-6</sup> Pa (5 × 10 <sup>-8</sup> Torr)
重量(全体)	3 ton
重量(鏡板)	700 kg × 2
磁場しみ込みカットオフ周波数	f = 10 Hz

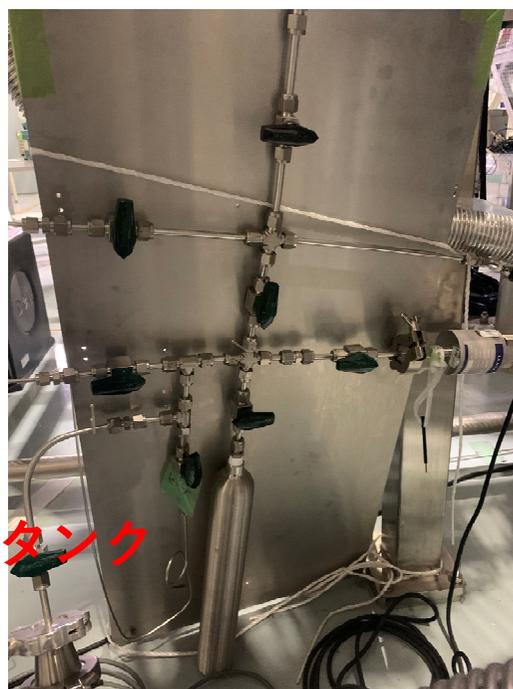
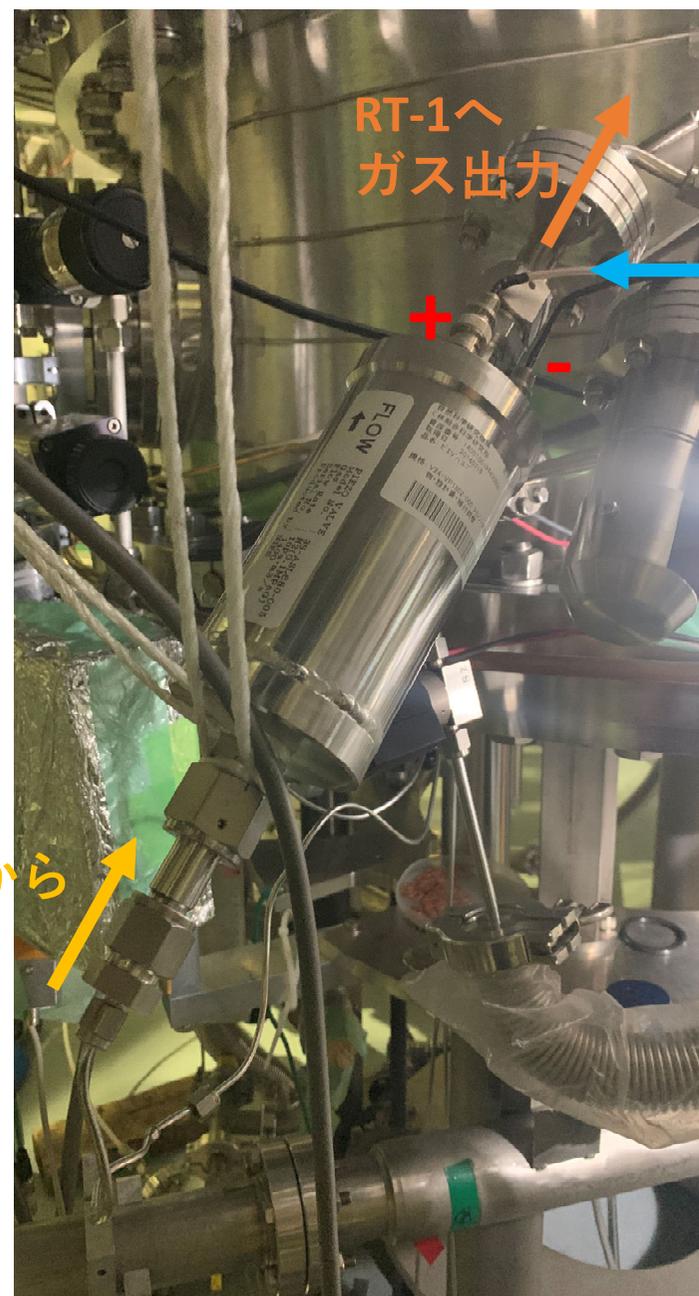


2400 L/s TMP x2

500 L/min スクロールポンプ 2台

4200L/min メカニカルブースタポンプ 1台

# I-4) 使用する粒子種(ガス種)、粒子供給方法



リザーバータンク

ガスボンベから  
ガス入力

RT-1へ  
ガス出力

アンプから  
入力  
(0-120V)

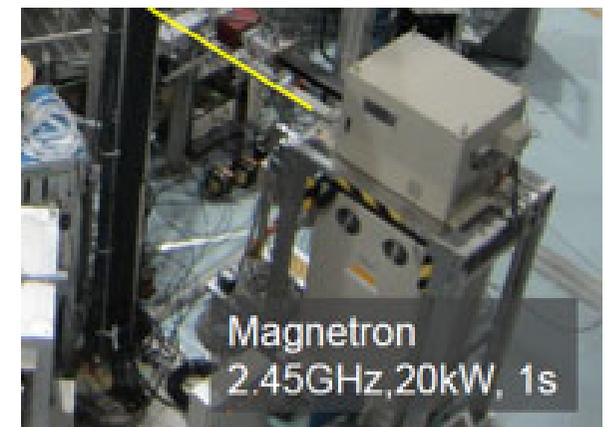
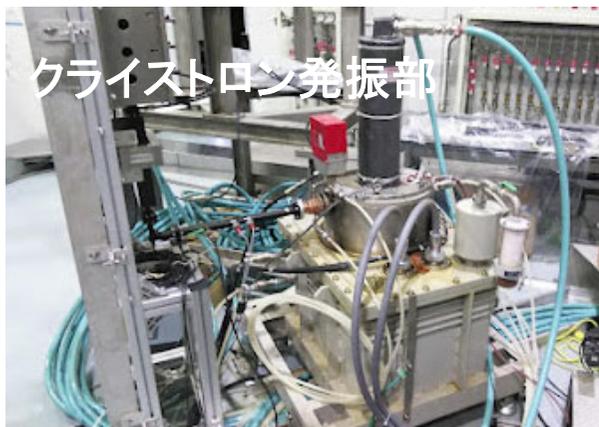
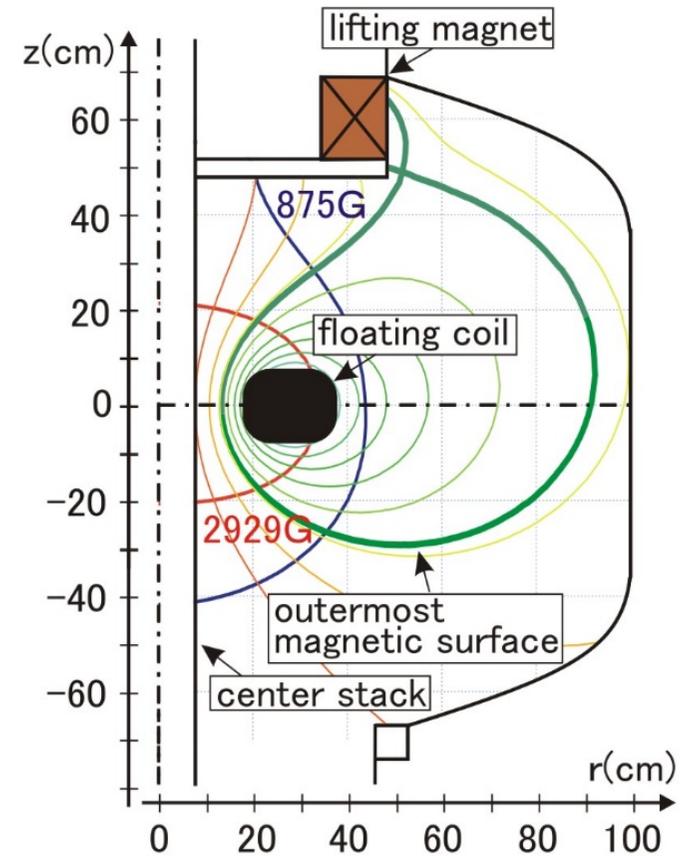
# I-5) 加熱方法 電子加熱

## 高周波加熱1 クライストロン

発振周波数 (f)	8.2 GHz
定格出力 (P)	100 kW, 1sec
カットオフ密度	$8.3 \times 10^{17}$

## 高周波加熱2 マグネトロン

発振周波数 (f)	2.45 GHz
定格出力 (P)	20 kW, 2 sec
カットオフ密度	$7.4 \times 10^{16}$



# I-5) 加熱方法 電子加熱: 高温電子プラズマの生成

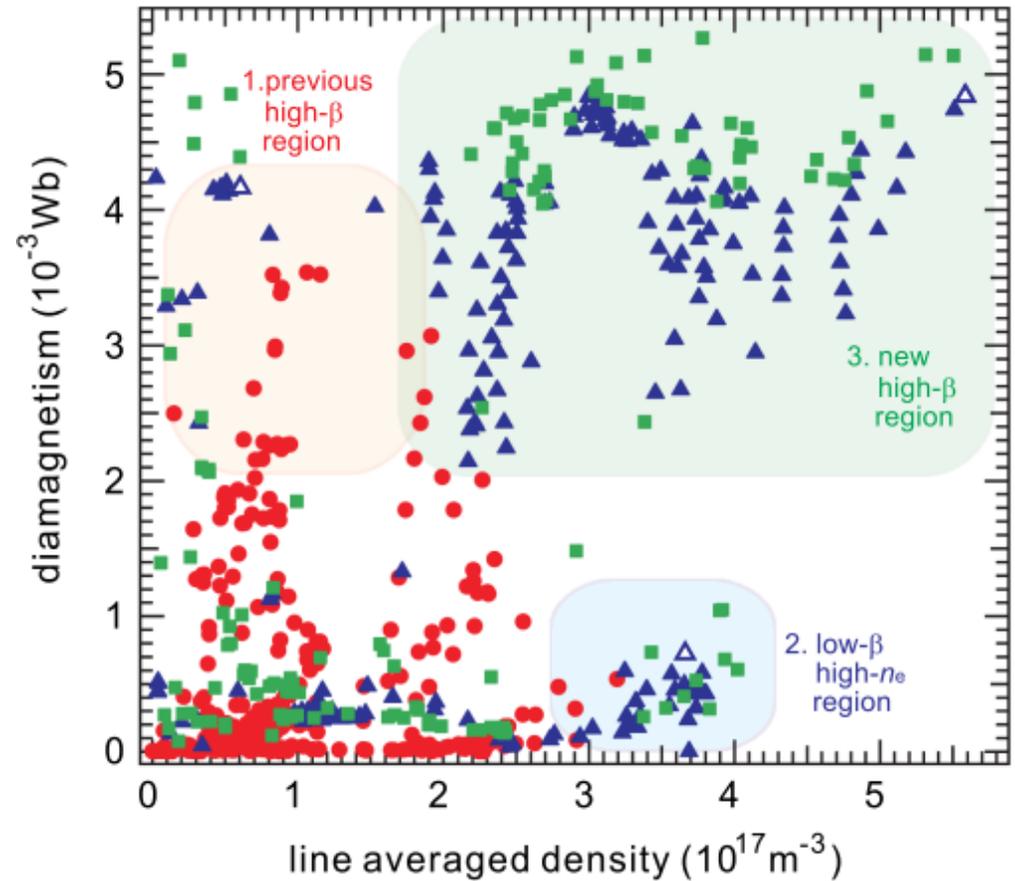
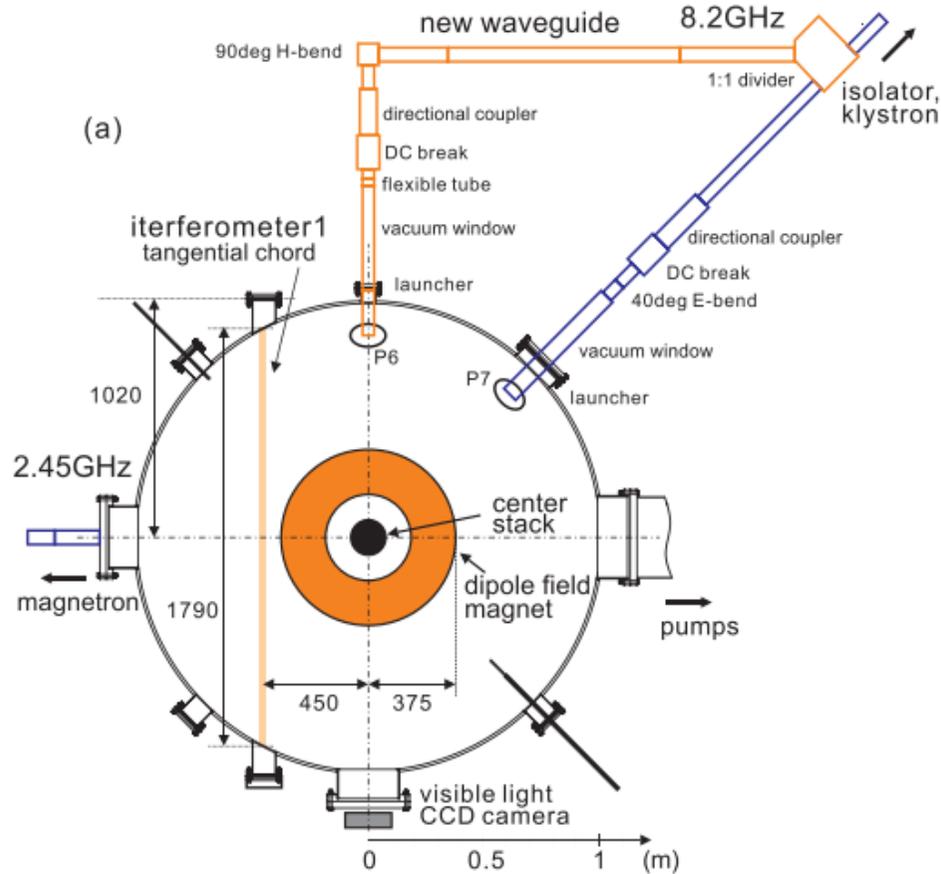
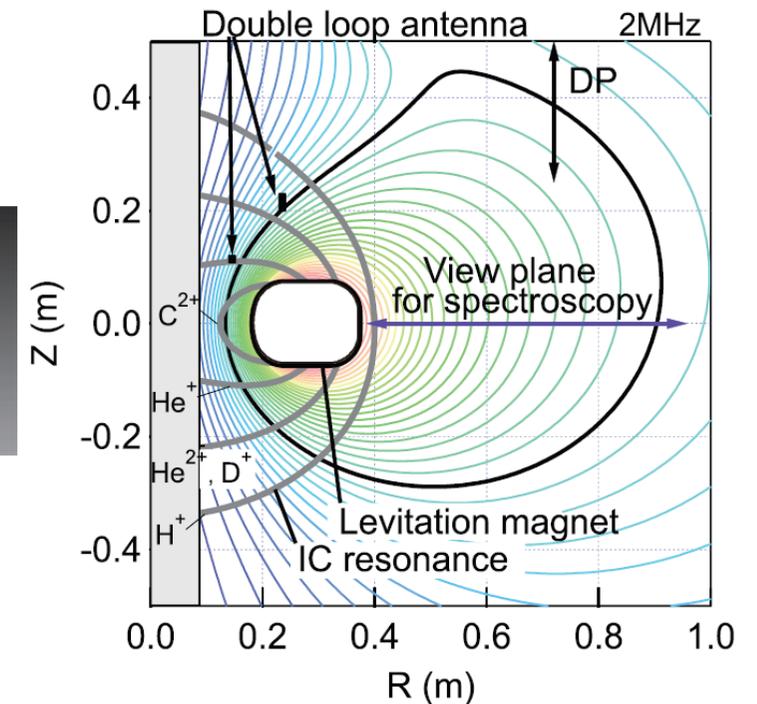
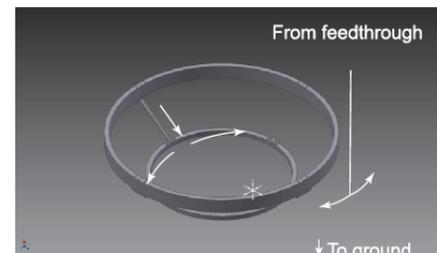
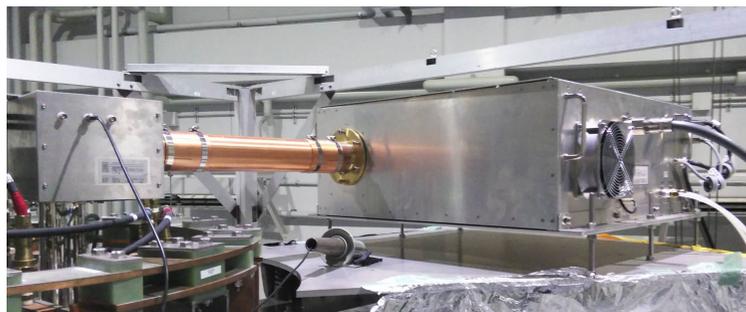
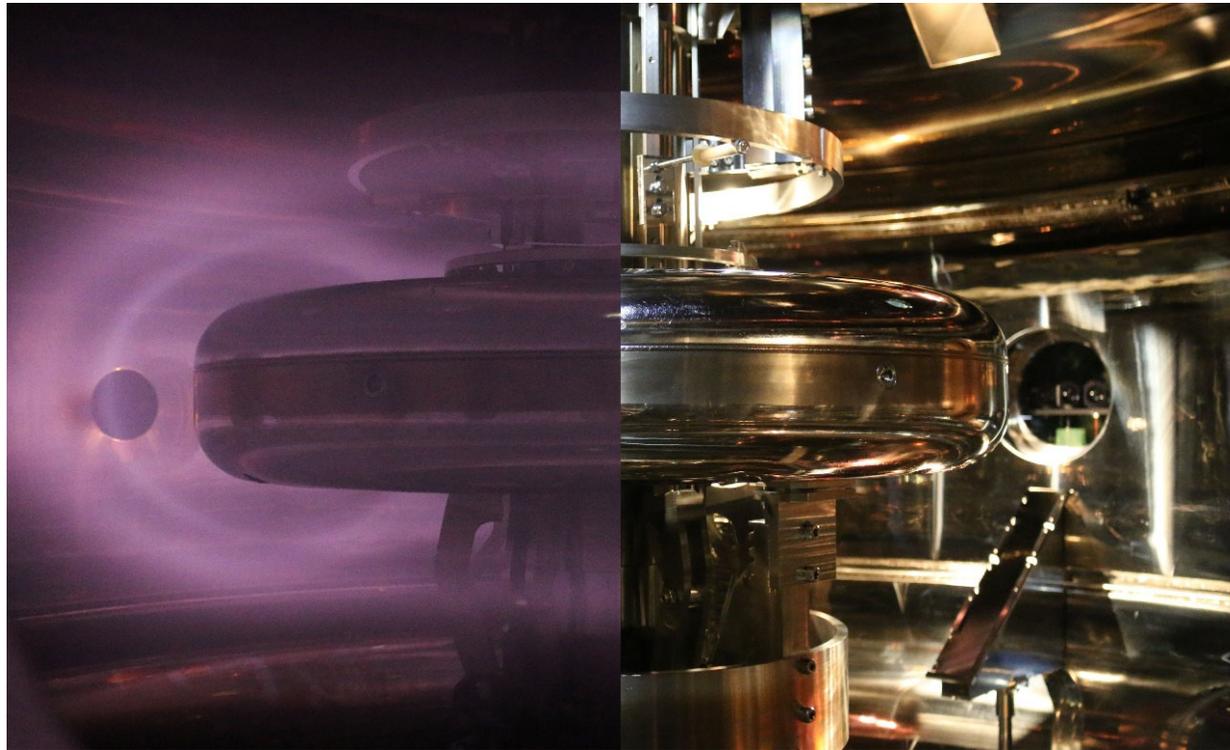


FIG. 6. Line averaged electron density measured at chord 1,  $n_{a1}$ , and a diamagnetic loop signal  $\Delta\Psi$  when 8.2 GHz microwave power was  $P_f < 25 \text{ kW}$  (circles) and when  $25 \text{ kW} < P_f$  (triangles). Open triangles show data sets analyzed in Table I. Data for two-frequency heating at 8.2 and 2.45 GHz ( $25 \text{ kW} < P_f$ ) are also plotted (squares).

# I-5) 加熱方法 イオン加熱の成功

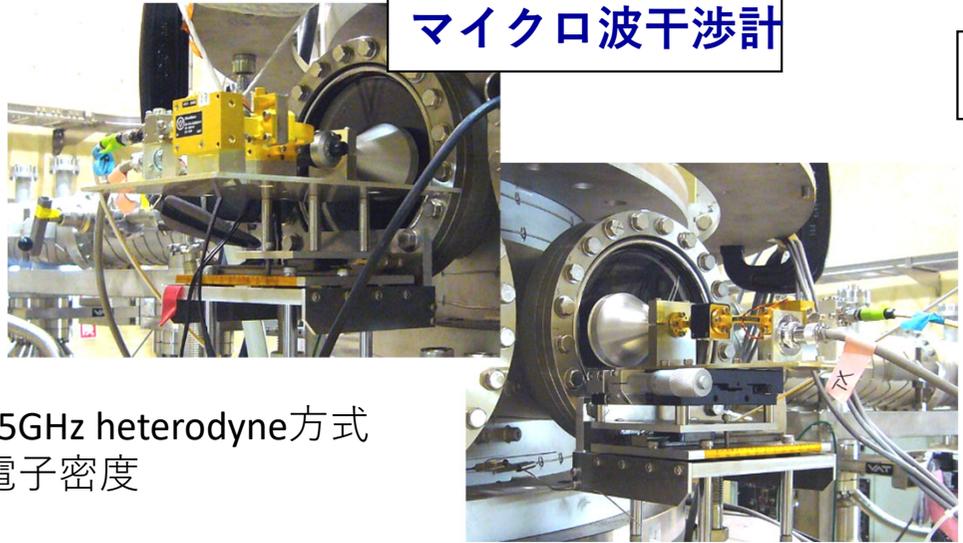
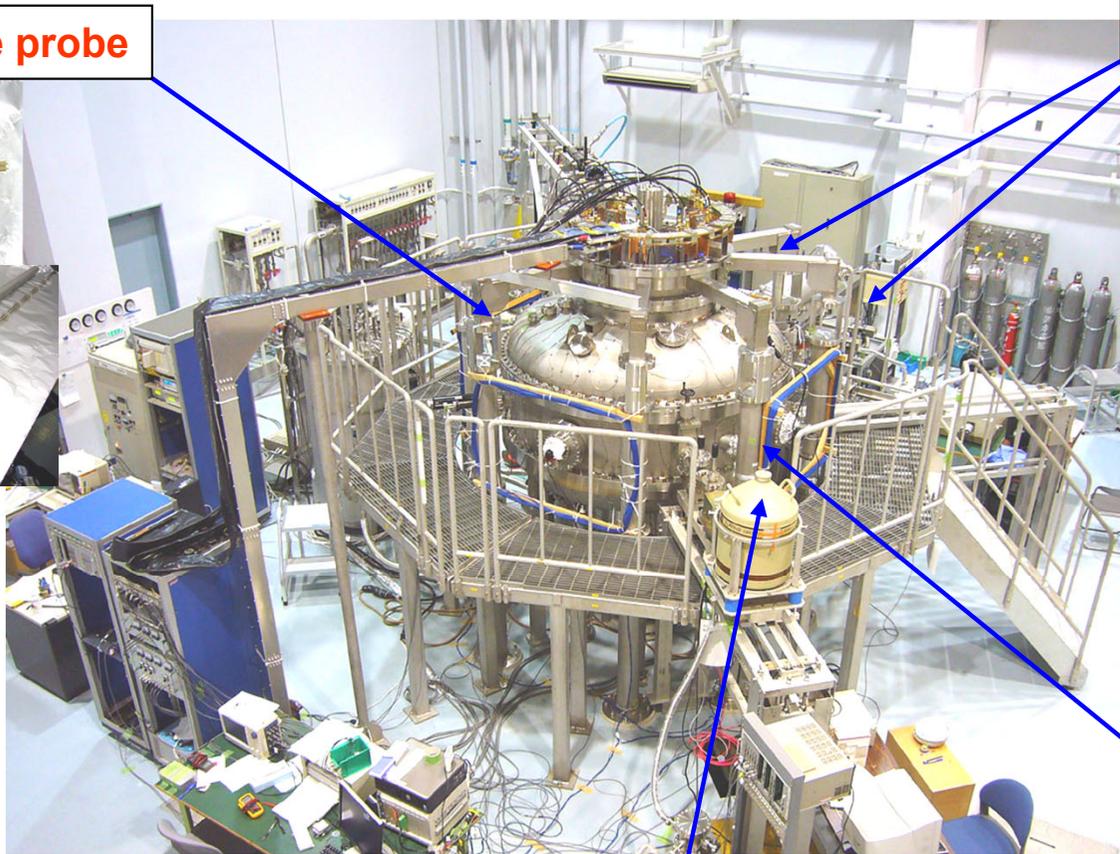
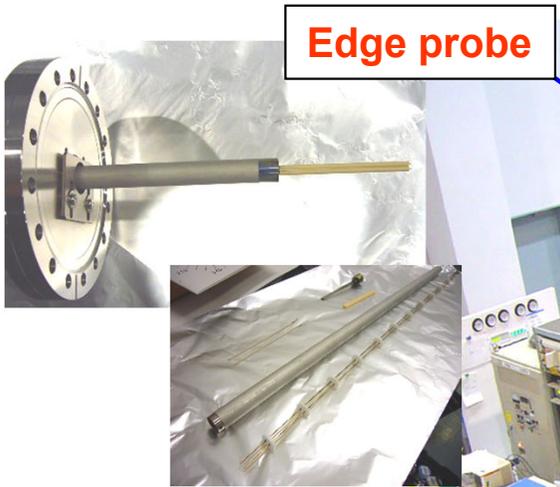
2017 Nishiura+ NF

ICHアンテナによる  
pole領域からの  
slow wave励起

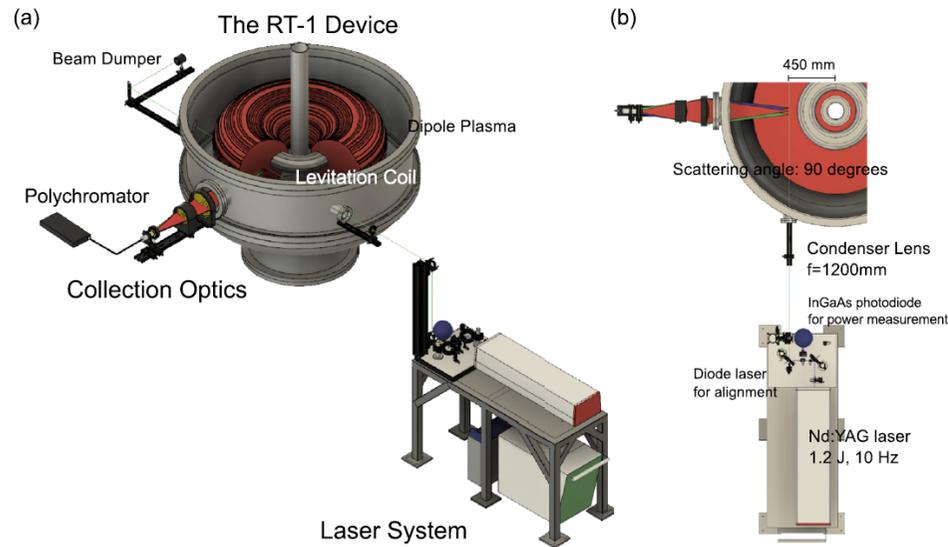


0.8-3MHz, 10kWを導入->数十eVの温度上昇

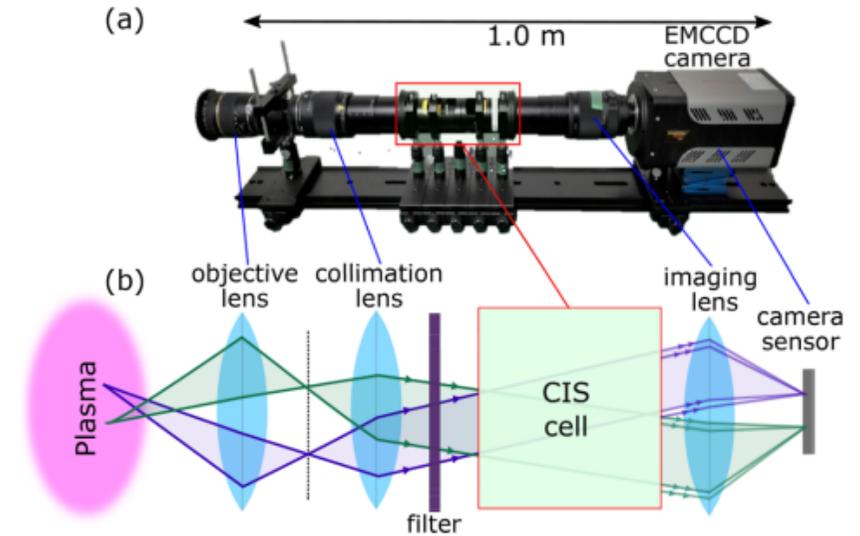
# II-6) 運転に必要な計測器(比較的初期から導入しているもの)



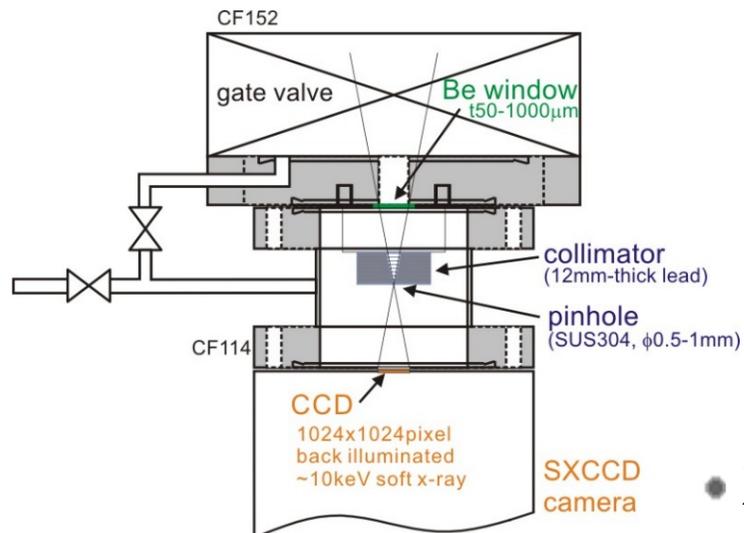
## II-7) 運転に必要な計測器：最近の計測器導入例



- Nd:YAGレーザーによるトムソン散乱計測  
2018 Kenmochi+ Rev. Sci. Instrum.



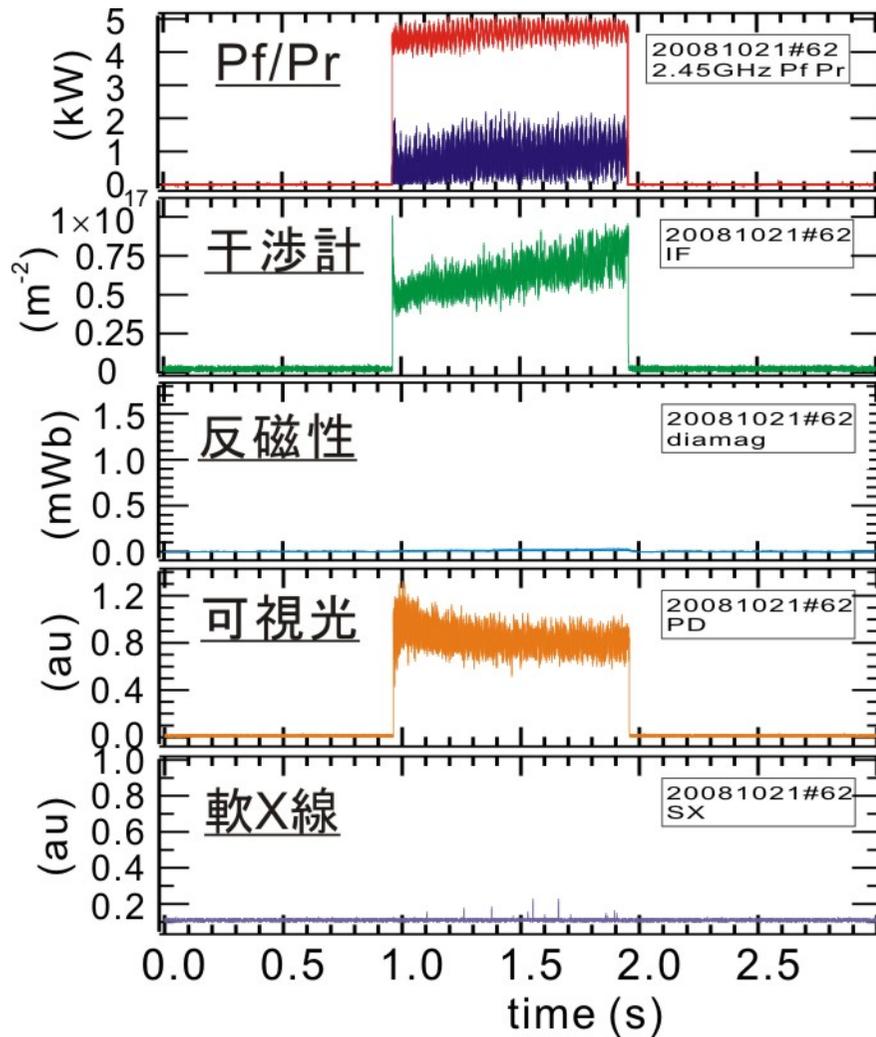
- コヒーレンスイメージングによる分光法,  
イオン温度と流速の二次元同時計測  
2021 Ueda+ Rev. Sci. Instrum.



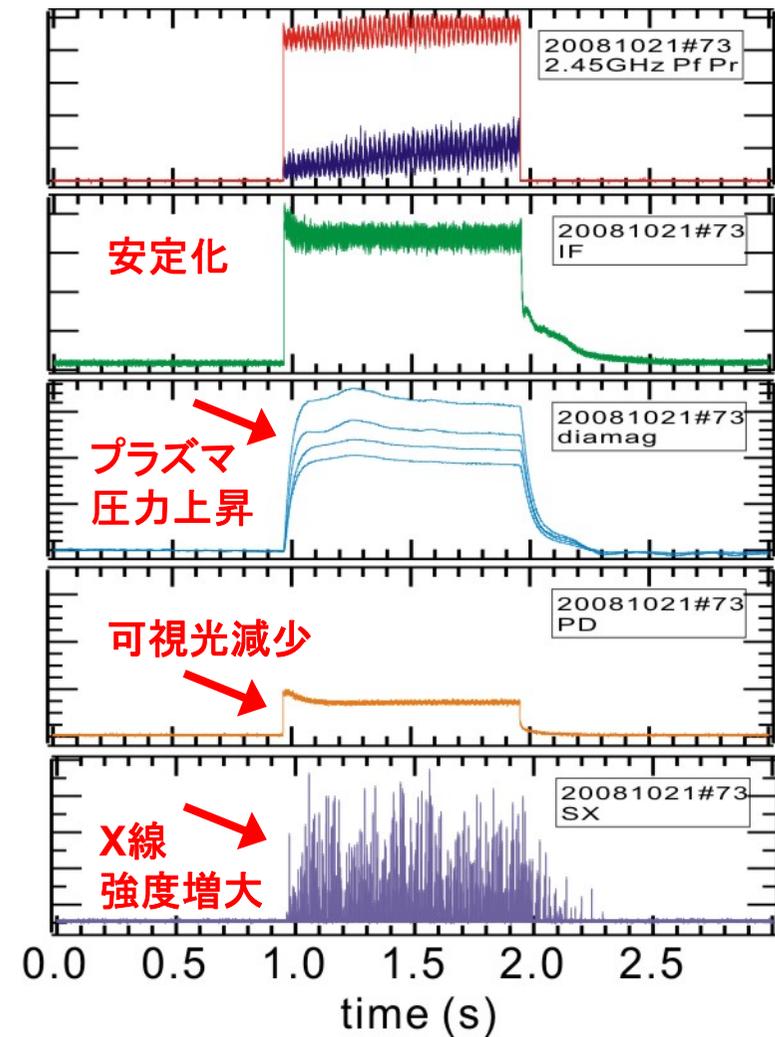
- X線CCDカメラ

- ポッケルスセンサによる電場計測  
2017 Nishiura+ Rev. Sci. Instrum.
- 静電プローブアレイによる揺動計測  
2022 Kenmochi, Yokota, Nishiura+ NF

## II-7) プラズマ立ち上げと典型波形



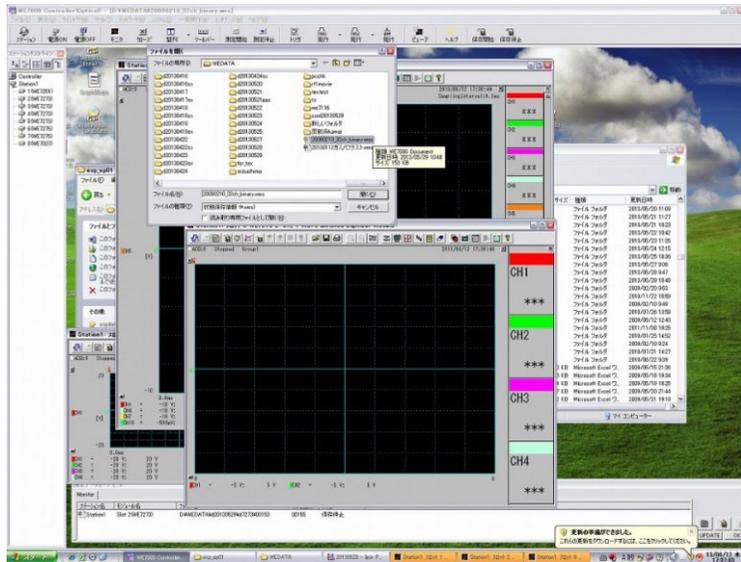
(a) 高ガス圧  $P_{H_2} = 4.5 \times 10^{-2} \text{Pa}$



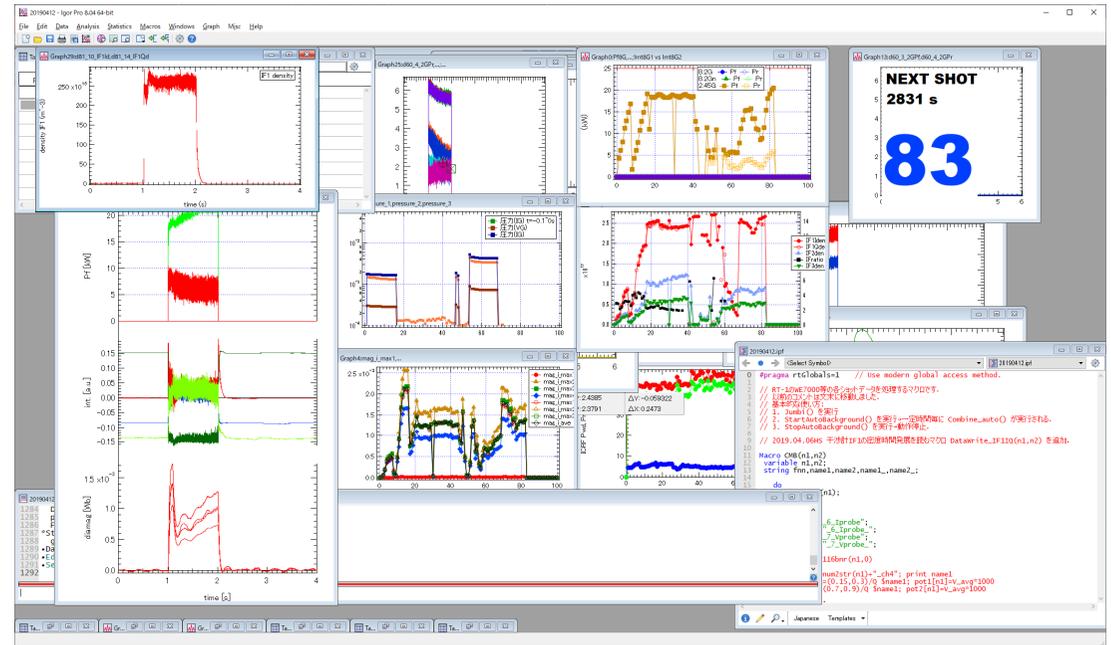
(b) 低ガス圧  $P_{H_2} = 1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$

RT-1における2.45GHz ECHプラズマの典型波形. (a)高ガス圧の場合と(b)低ガス圧の場合.

## II-7) 実験条件の設定、データ収集、データ管理、実験日誌など



WE7000 x3 (PXIに移行中)  
1MS/s 32ch, 20MS/s 16ch など

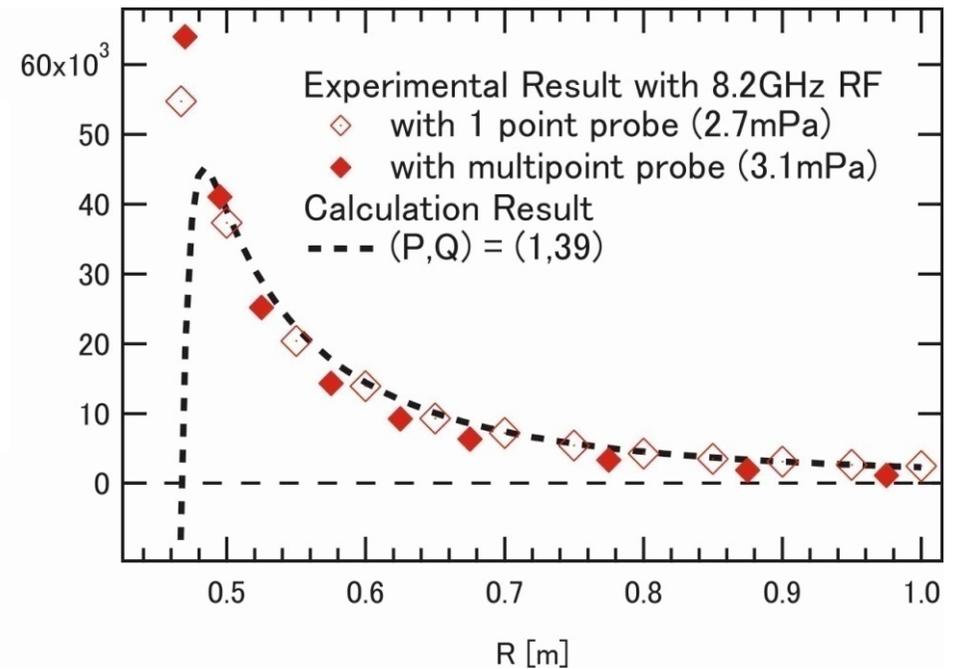
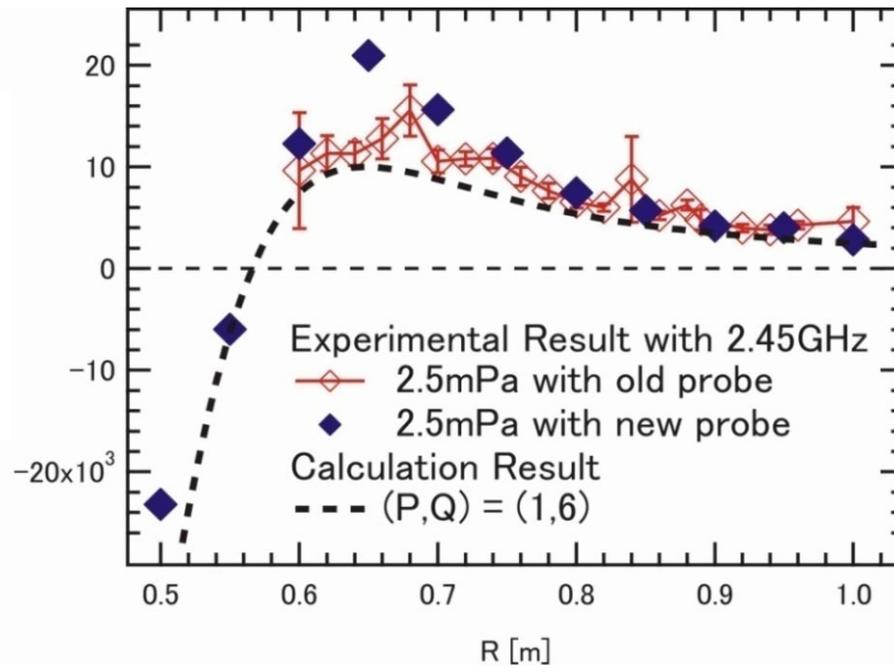
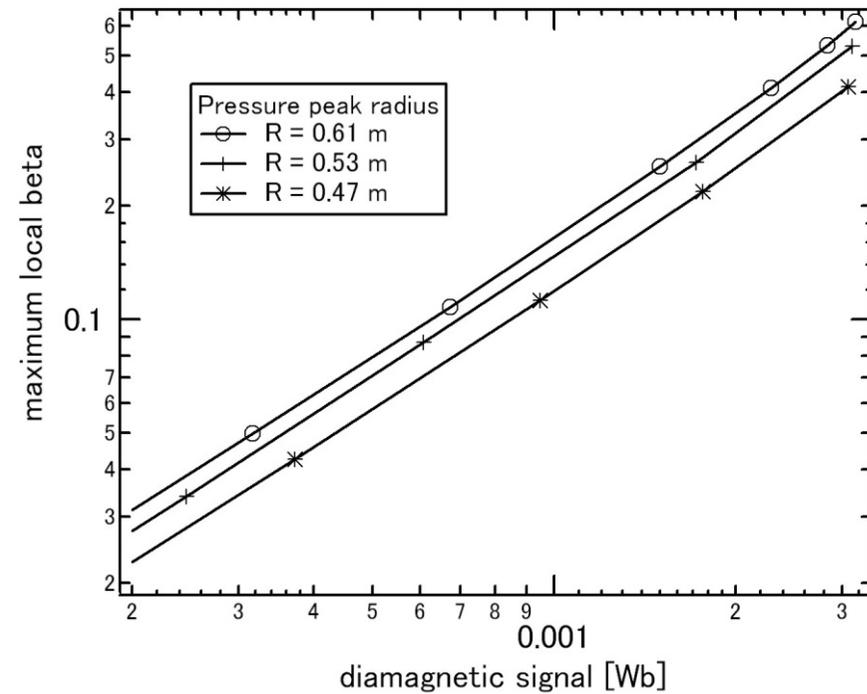
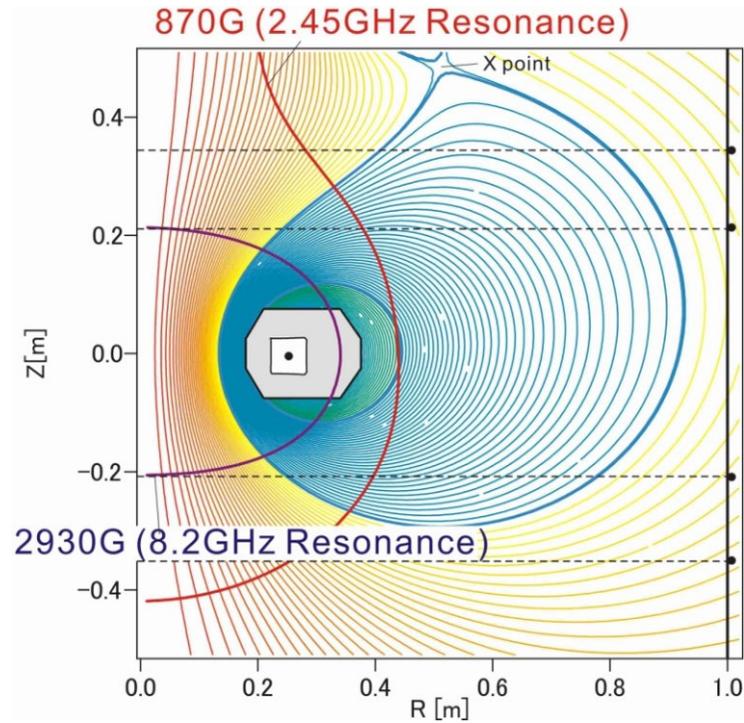


最新ショットと本日のショット履歴の基本的  
解析と表示 (PythonとIgor Pro)

- 帯域やワード数が特殊なデータはPXIモジュールやオシロ(多くはLabVIEW)使用
- 実験者は各PCからネットワークを介してデータにアクセス, 共通と個人のデータ解析
- 実験日誌は紙ベースのノート + ショット番号とタイムスタンプの電子データを保存
- 元データは研究室内のNASに保存(学外からもアクセス可能)

# II-9) 基本的な解析ツール 平衡解析例

M. Furukawa, Y. Yano



## II-10) 安全対策、学生への教育

### (研究室レベル)

- 本体室への立ち入りについての制限と管理, プラズマ生成前のカウントダウン時に音で注意喚起.
- 実験中のX線モニタ, 実験開始/終了時とショット毎のアラーム管理.
- 高圧部のパトライト(クライストロン).
- 事故発生時の復旧と反省作業に学生参加.  
(事故例: 真空事故, 励磁消磁失敗, コイル落下, プローブ破損など)
- 作業スペースでは保護メガネ着用, 単独作業禁止など.

### (専攻などでの安全教育)

- 学生は安全講習(高圧ガス, 寒剤, 放射線, 工作室)と倫理講習(いずれも研究科が実施)を受講してから実験に参加する内規.
- 「実験棟ツアー」「環境安全講習」(いずれも専攻や研究科等の企画)を通じて近隣研究室の安全管理の様子を把握する機会が設定されている.

## まとめ

- RT-1磁気浮上ダイポールの装置レビューとして、プラズマ生成のための装置構成や運転条件を中心に説明した。
- 無冷却状態での永久電流保持とコイル磁気浮上を、高温プラズマ生成と両立する必要がある、多くの技術が投入されて開発された。
- 2006年の建設以来、コイル性能の目立った低下などは発生しておらず、安定磁気浮上によるプラズマ実験を継続して実施している。
- ダイポールは天体磁気圏と共通の遍在する磁場配位であり、プラズマの一般的な性質としての構造形成や輸送など、核融合プラズマと共通する現象の総合的な理解への展開が期待される。
- 先進核融合を実現するための高温プラズマを目指して、加熱や計測には共通の課題が多く、他装置の知見を取り入れて研究を進めていきたい。

2009 Ogawa, Yoshida, Morikawa+ PFR <-

2013 Yoshida+ Plasma Phys. Cnt. Fusion

2022 Kenmochi, Yokota, Nishiura+ NF

2019 Nishiura, Kawazura, Yoshida+ NF