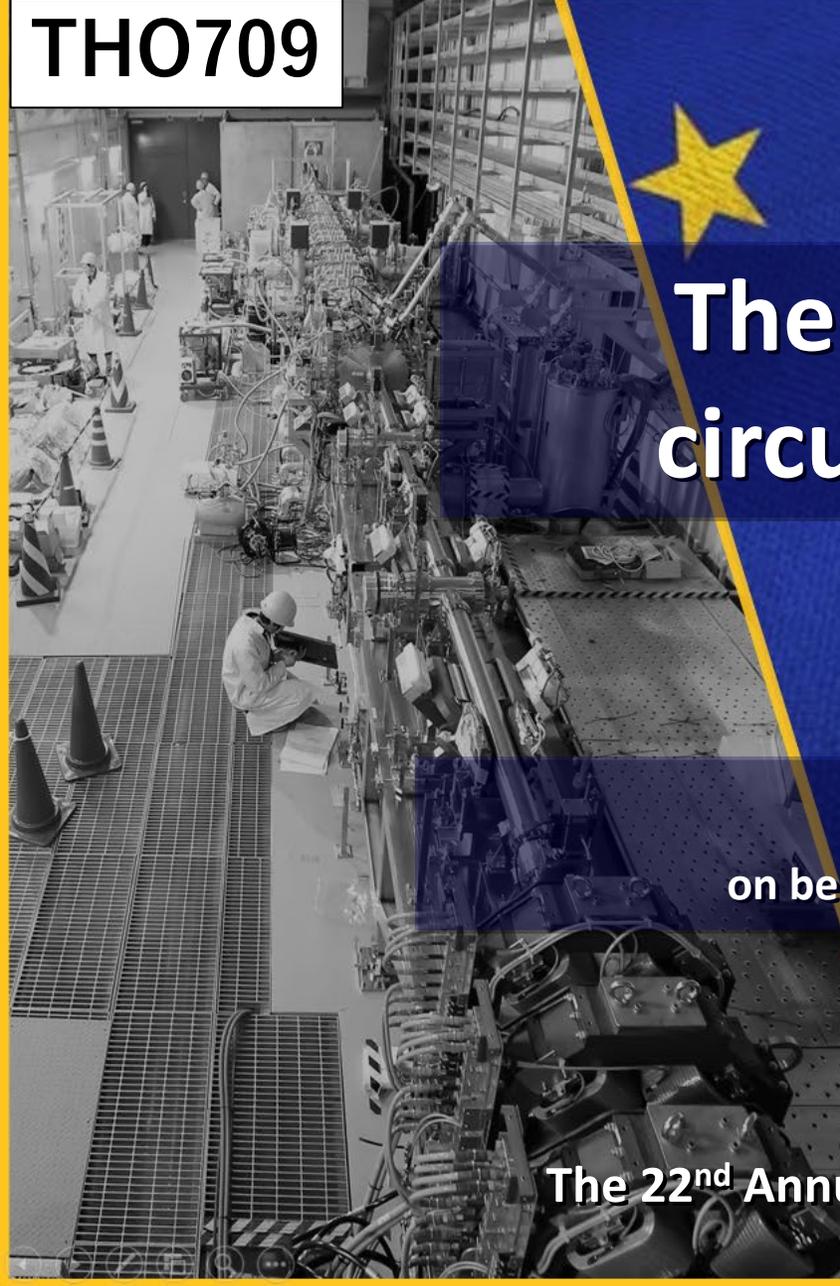


TH0709

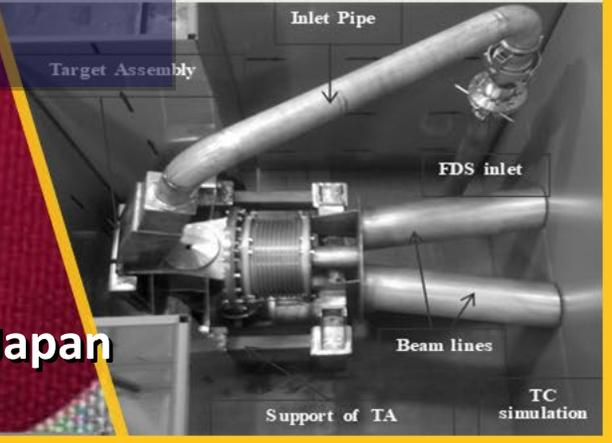


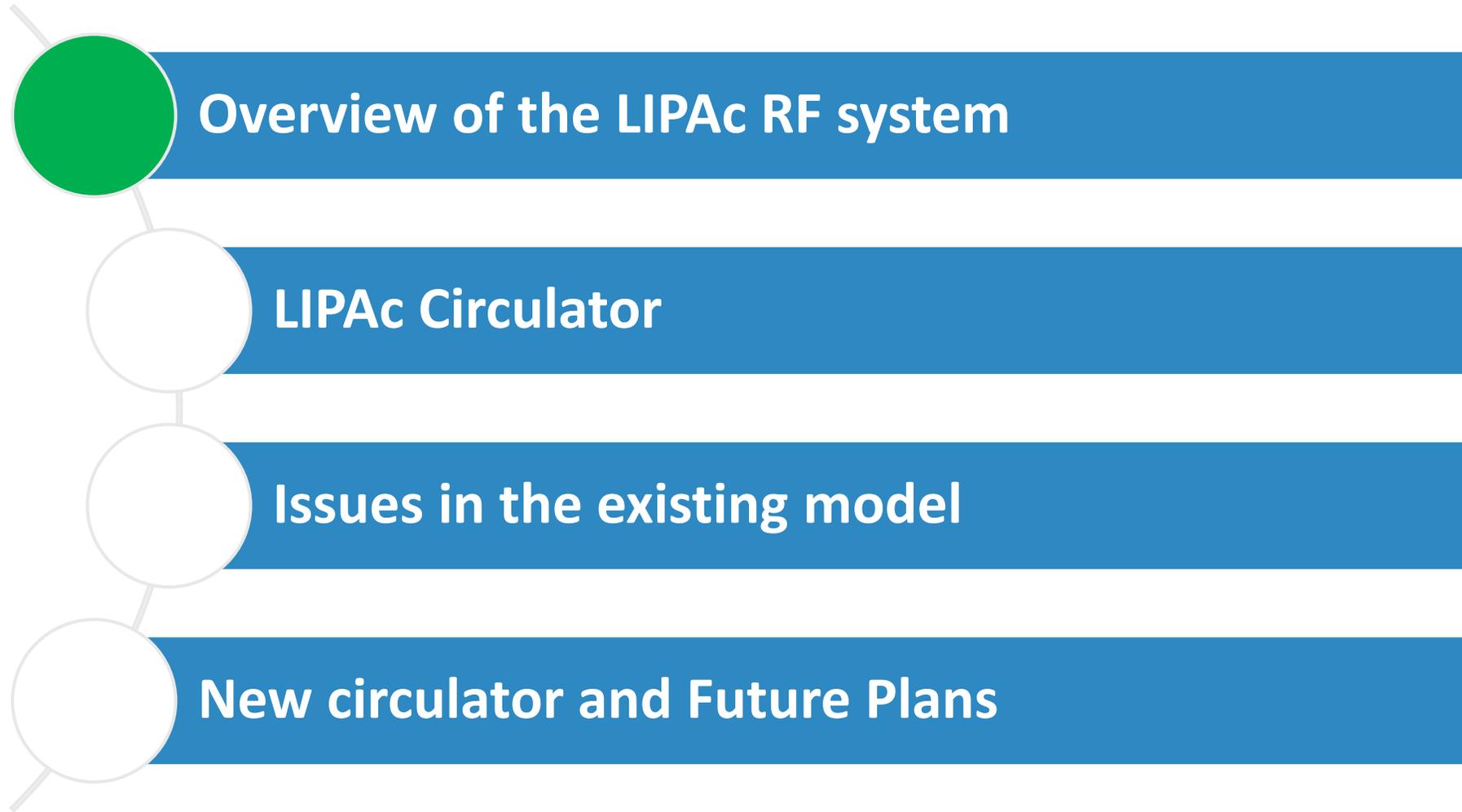
The Challenges of the LIPAc circulators toward high duty

Kouki Hirosawa

on behalf of the IFMIF/EVEDA integrated project team

The 22nd Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan







LIPAc Overview

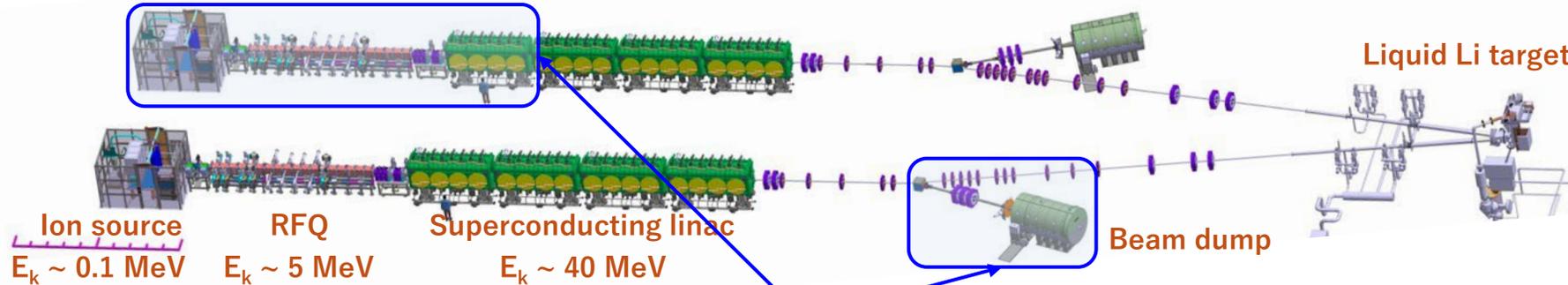
LIPAc (the **L**inear **IFMIF** **P**rototype **A**ccelerator)はIFMIF加速器の低エネルギー部を抽出したプロトタイプ

- 基本的な機器は全て含有 (ターゲットを除く)
- 空間電荷力が最もシビアな領域

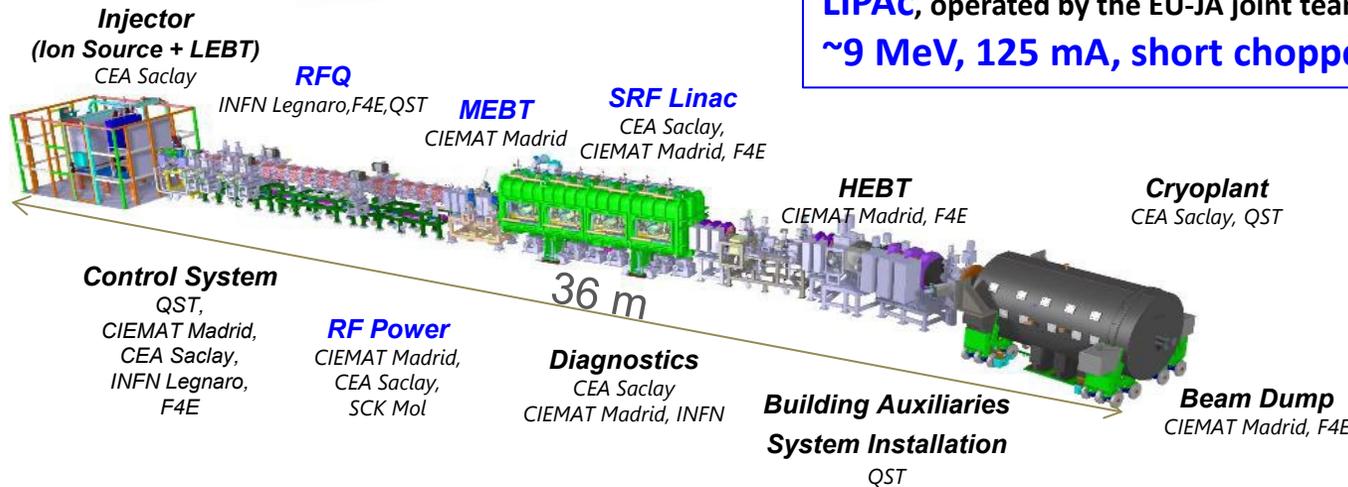
(全体の進捗 → WEPO703)

IFMIF accelerator

40 MeV, 125 mA, CW x 2 beamlines for Deuteron



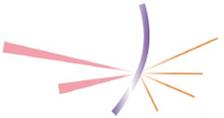
LIPAc, operated by the EU-JA joint team
~9 MeV, 125 mA, short chopped pulse – CW



Mission and challenges of LIPAc

High Current: 9 MeV, 125 mA, 重陽子

High Duty Cycle: – 100 % (CW)

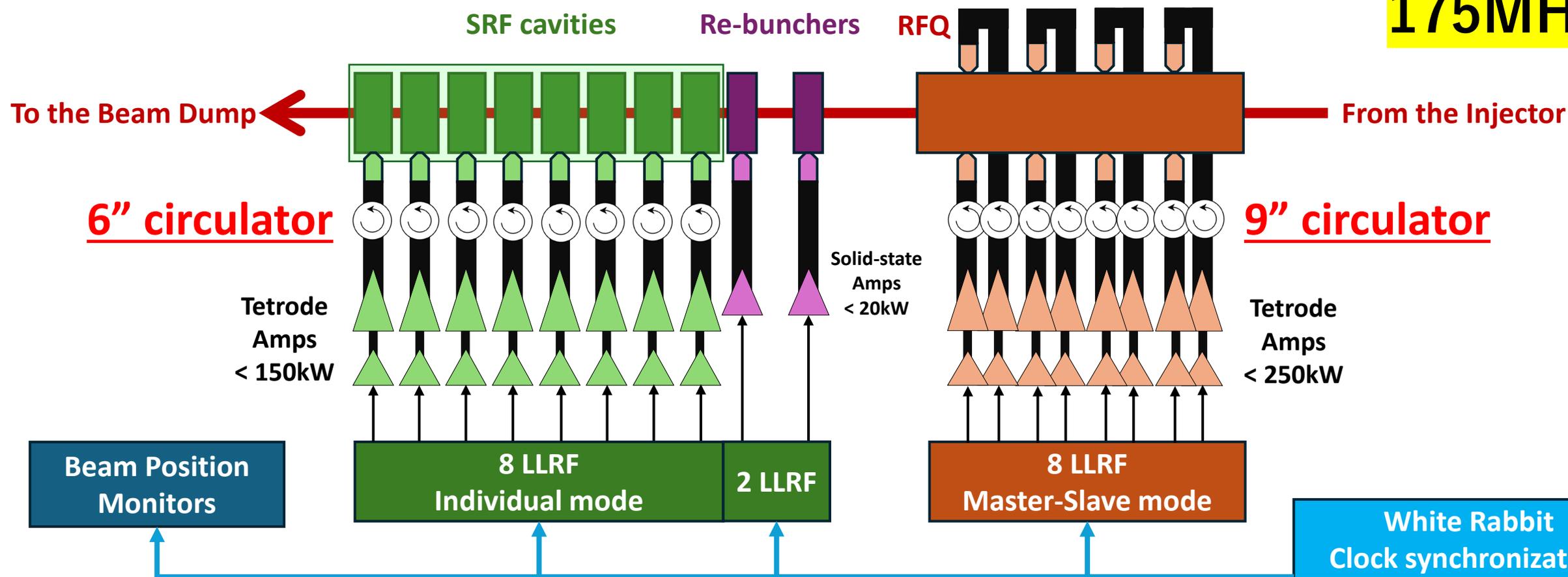


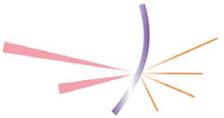
Overview of the LIPAc RF system

LIPAcのRFシステムは、

- 9.8m-long RFQ、8系統同期入力で1つの共振器を駆動、四極管アンプシステム
- 5-gap IH resonator、バンチャー空洞2台、半導体アンプシステム
- Superconducting half-wave resonator、8台が1つのクライオモジュール内に

175MHz



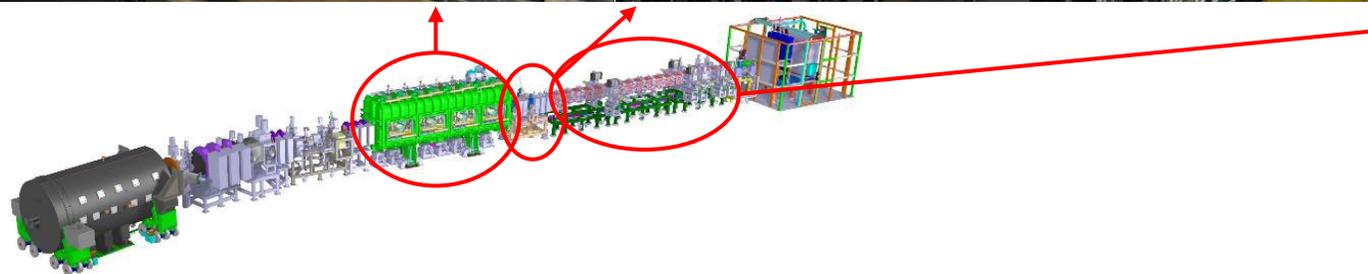
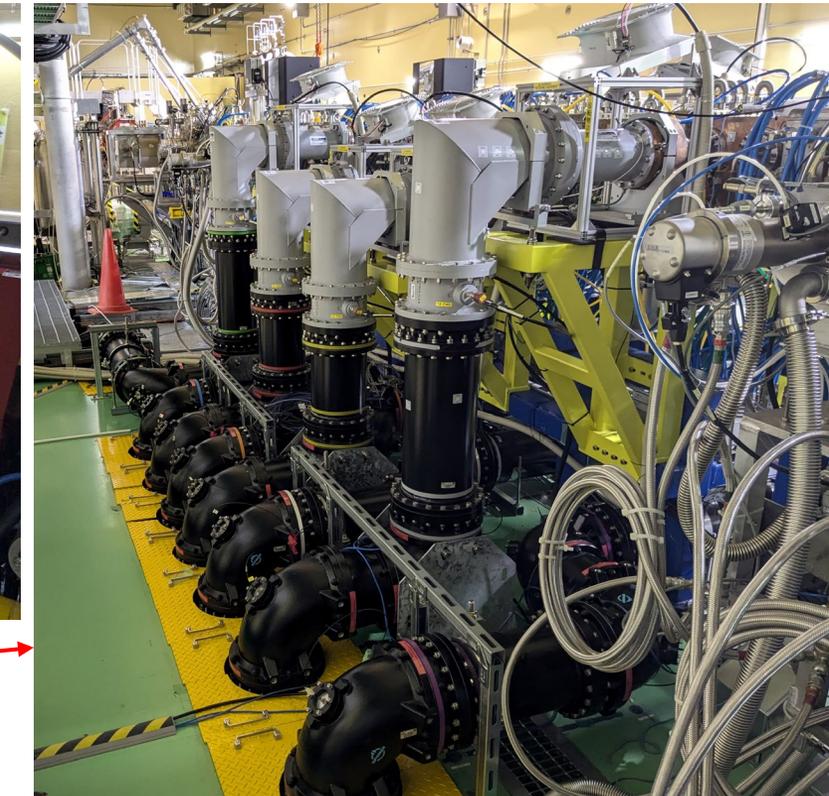
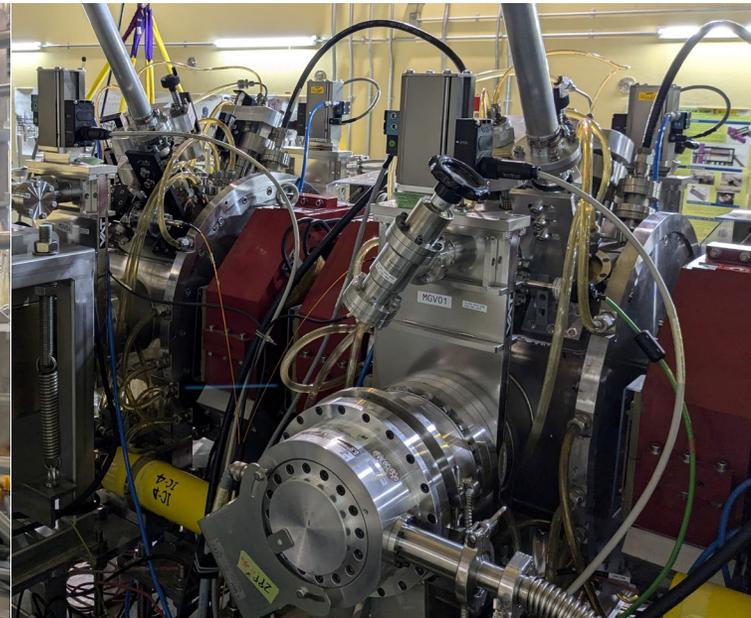
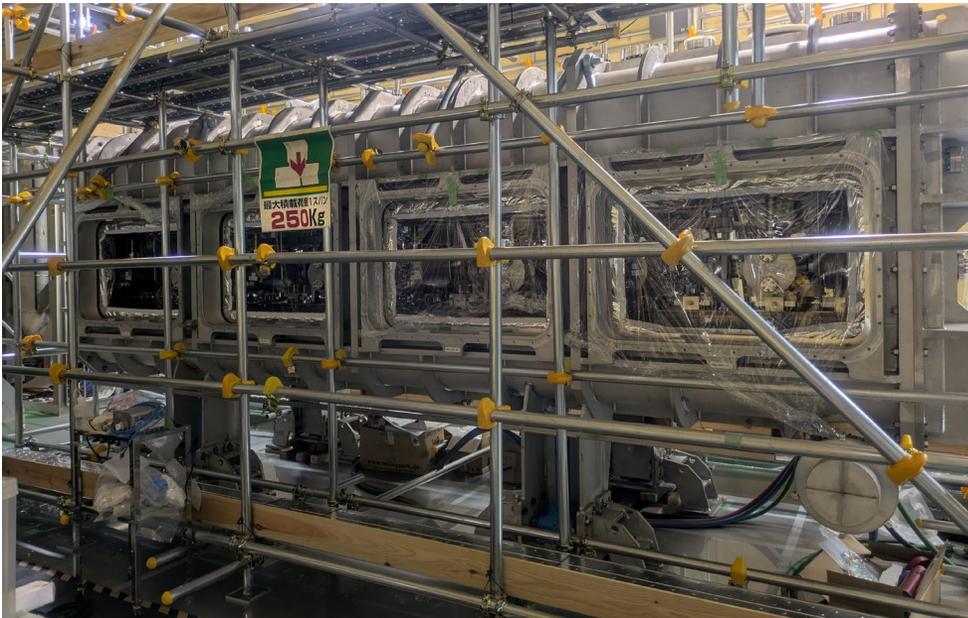


加速器室内のコンポーネント写真 (SRFはインストール中)

SRF cavities

Re-bunchers

RFQ



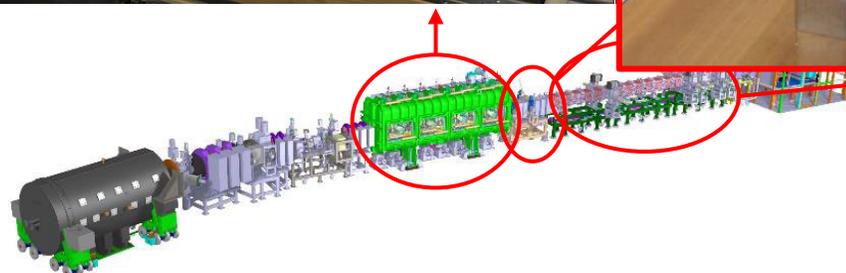
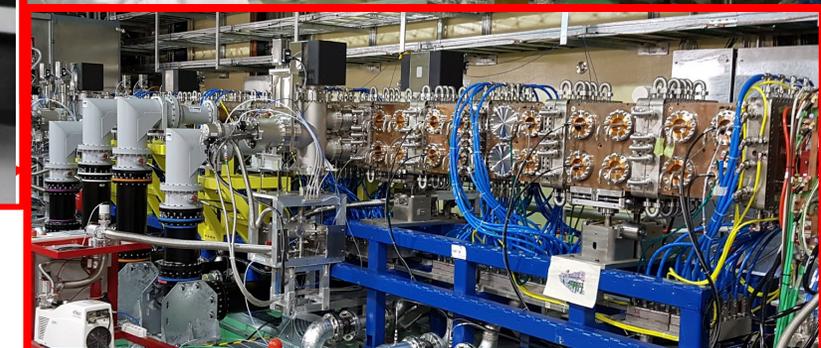
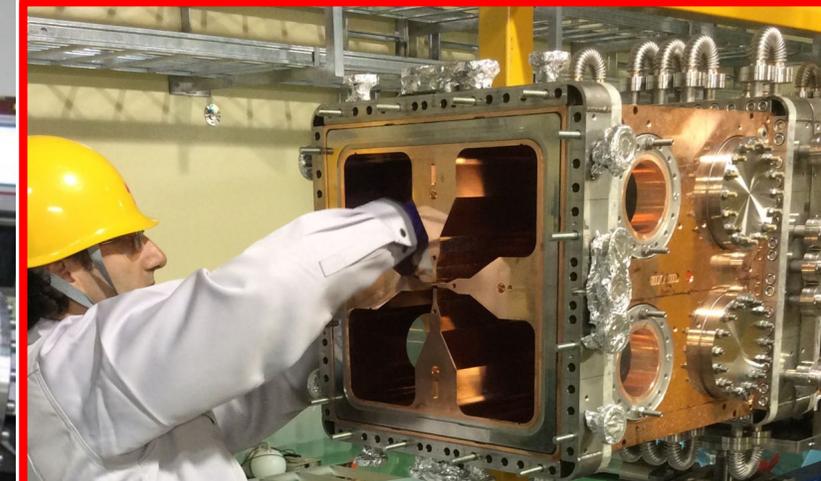
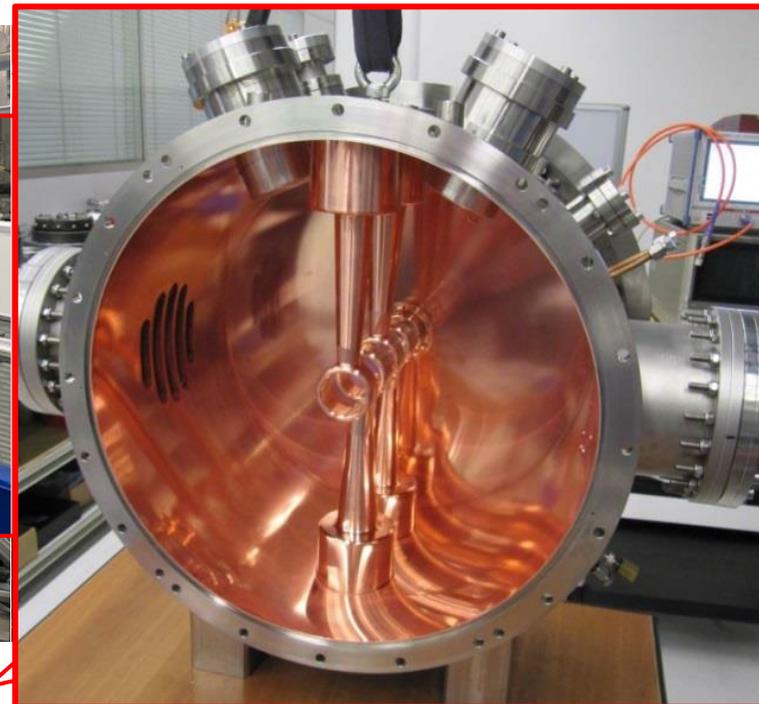


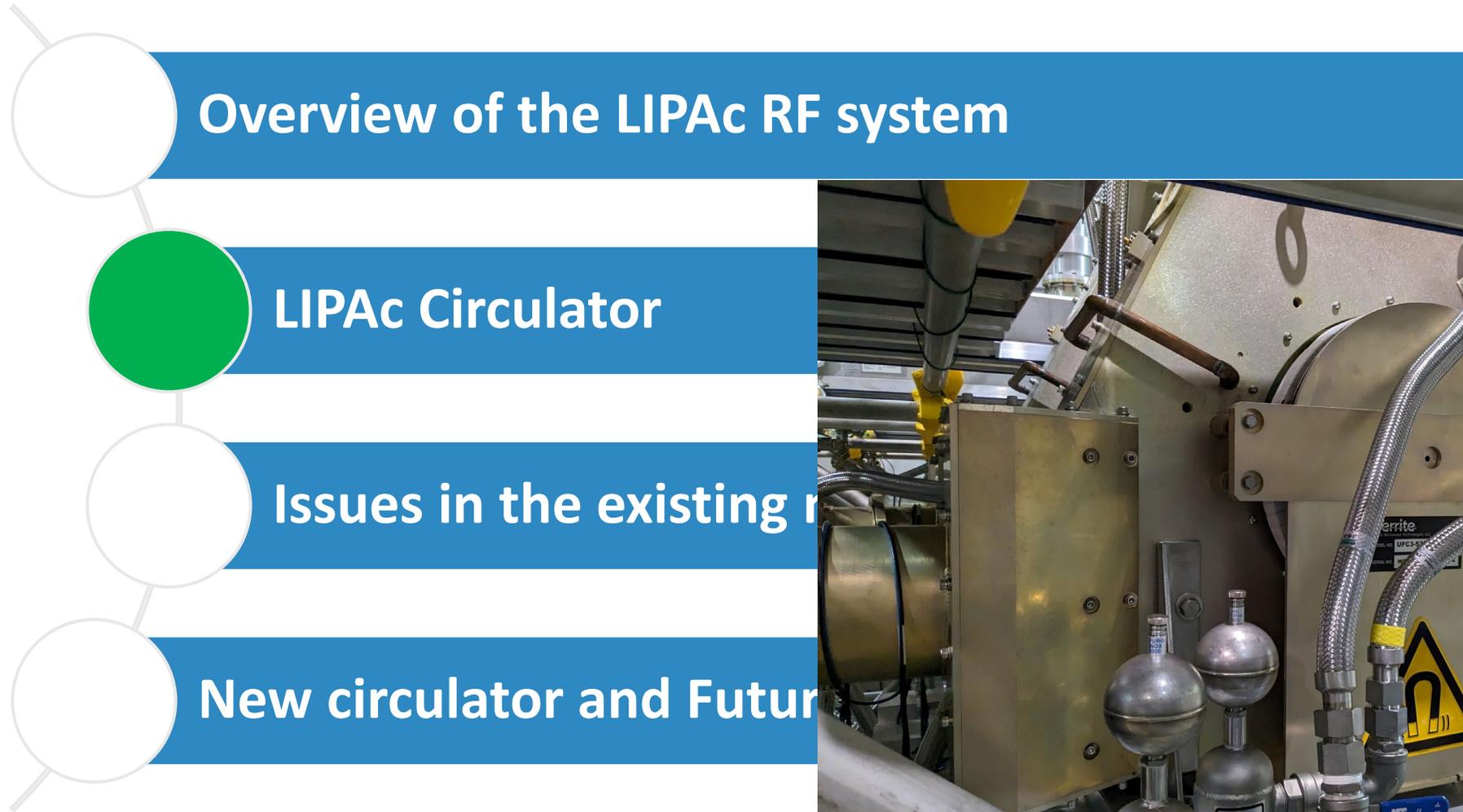
加速器室内のコンポーネント写真 (SRFはインストール中)

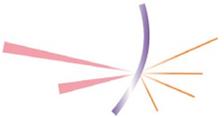
SRF cavities

Re-bunchers

RFQ





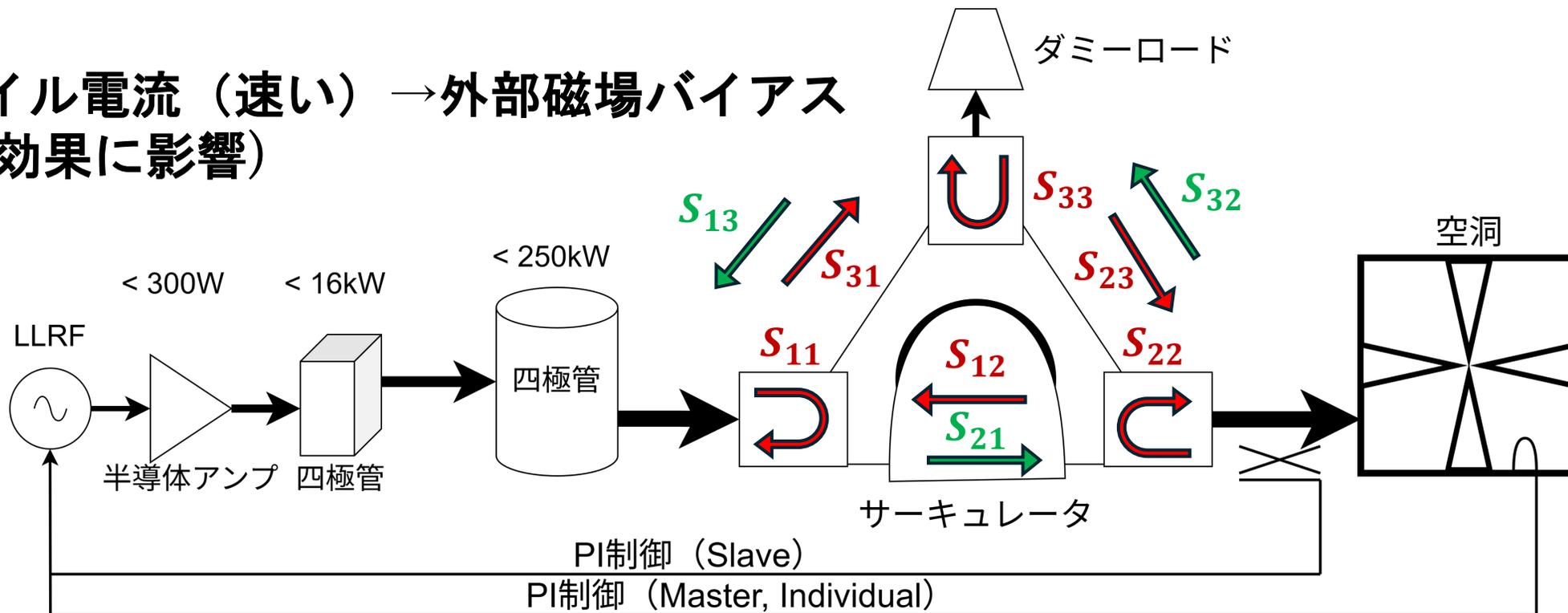


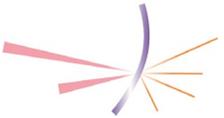
アンプ保護のため、反射電力を最小化

調整可能な要素:

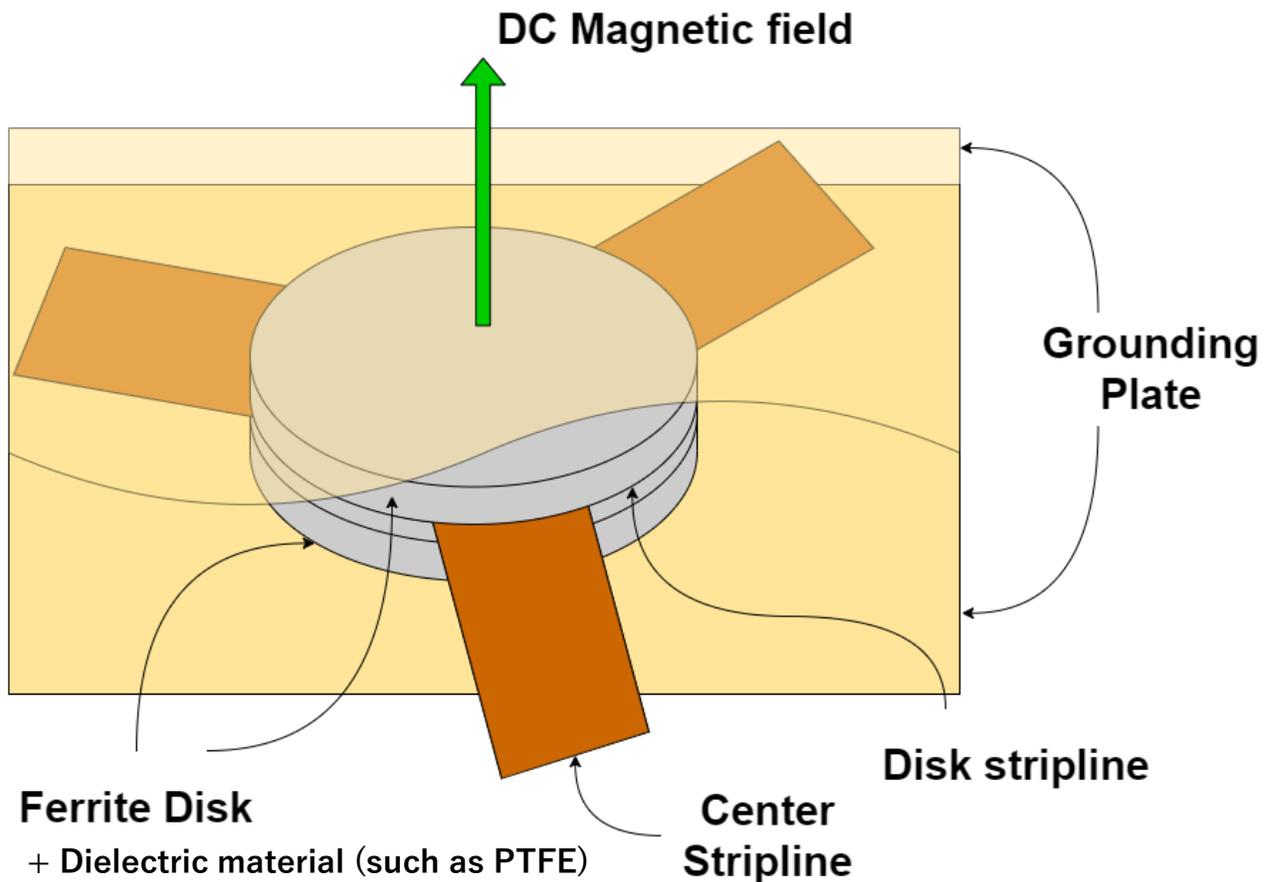
- 冷却水（遅い） → フェライトディスクの温度（磁化に影響）
- 補償コイル電流（速い） → 外部磁場バイアス（磁気回転効果に影響）

$S_{11, 22, 33}$: 反射損失
 $S_{21, 32, 13}$: 挿入損失
 $S_{12, 23, 31}$: アイソレーション





Y-stripline サーキュレータの基本構成



磁場がz方向にかけられているように座標系を取ると、フェライト内部の比透磁率 μ_r は、

$$\mu_r = \begin{pmatrix} \mu & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\omega_m \omega_i}{-\omega^2 + \omega_i^2} & -i \frac{\omega_m \omega}{-\omega^2 + \omega_i^2} & 0 \\ i \frac{\omega_m \omega}{-\omega^2 + \omega_i^2} & \frac{\omega_m \omega_i}{-\omega^2 + \omega_i^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

この時、交流磁場の角振動数: ω について、

$$\begin{cases} \omega_m = \gamma M_0, \\ \omega_i = \gamma(H_0 - N_z M_0). \end{cases}$$

M_0 : 飽和磁化 (温度依存)

γ : 磁気回転比

ω : 角振動数

μ_0 : 真空の透磁率

H_0 : 外部磁場強度

N_z : z 方向の消磁

この構造は、
測定困難な温度変化を伴う系に不利

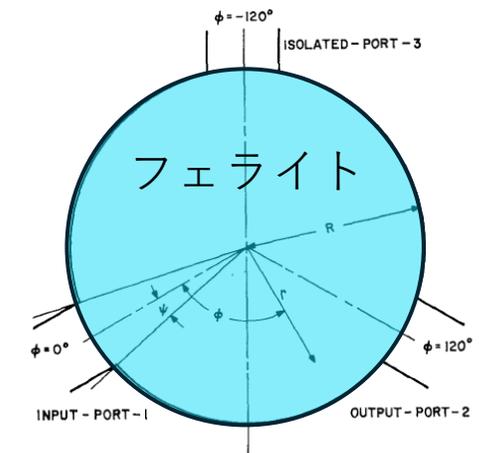


Fig. 4. Schematic diagram of strip-line circulator.

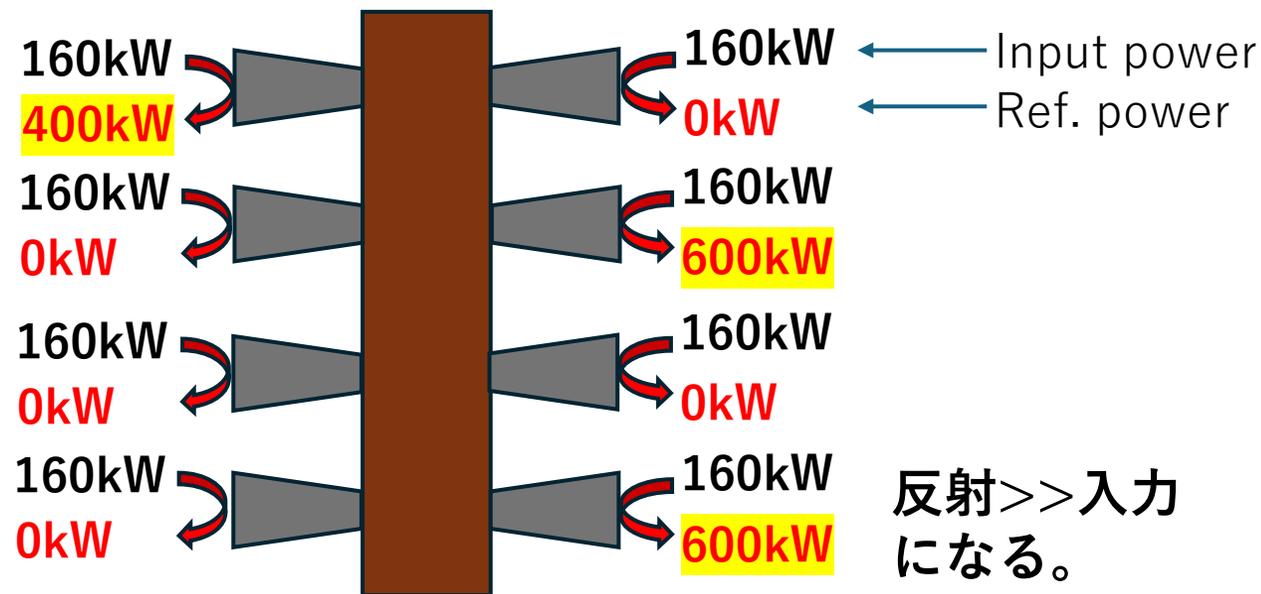
CE. FAY and RL. Comstock, "Operation of the Ferrite Junction Circulator"



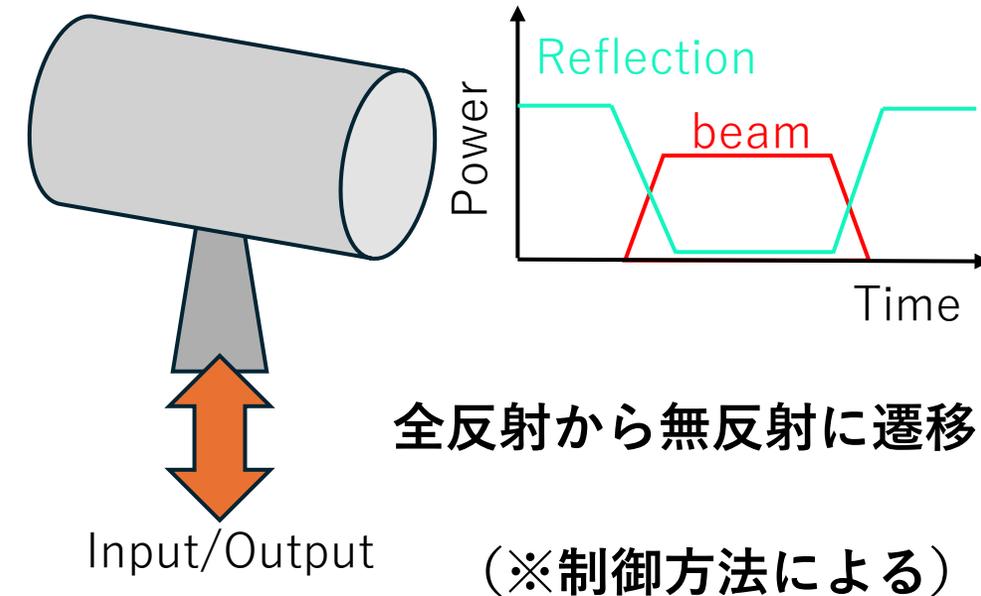
システムが満たすべきチャレンジングな点

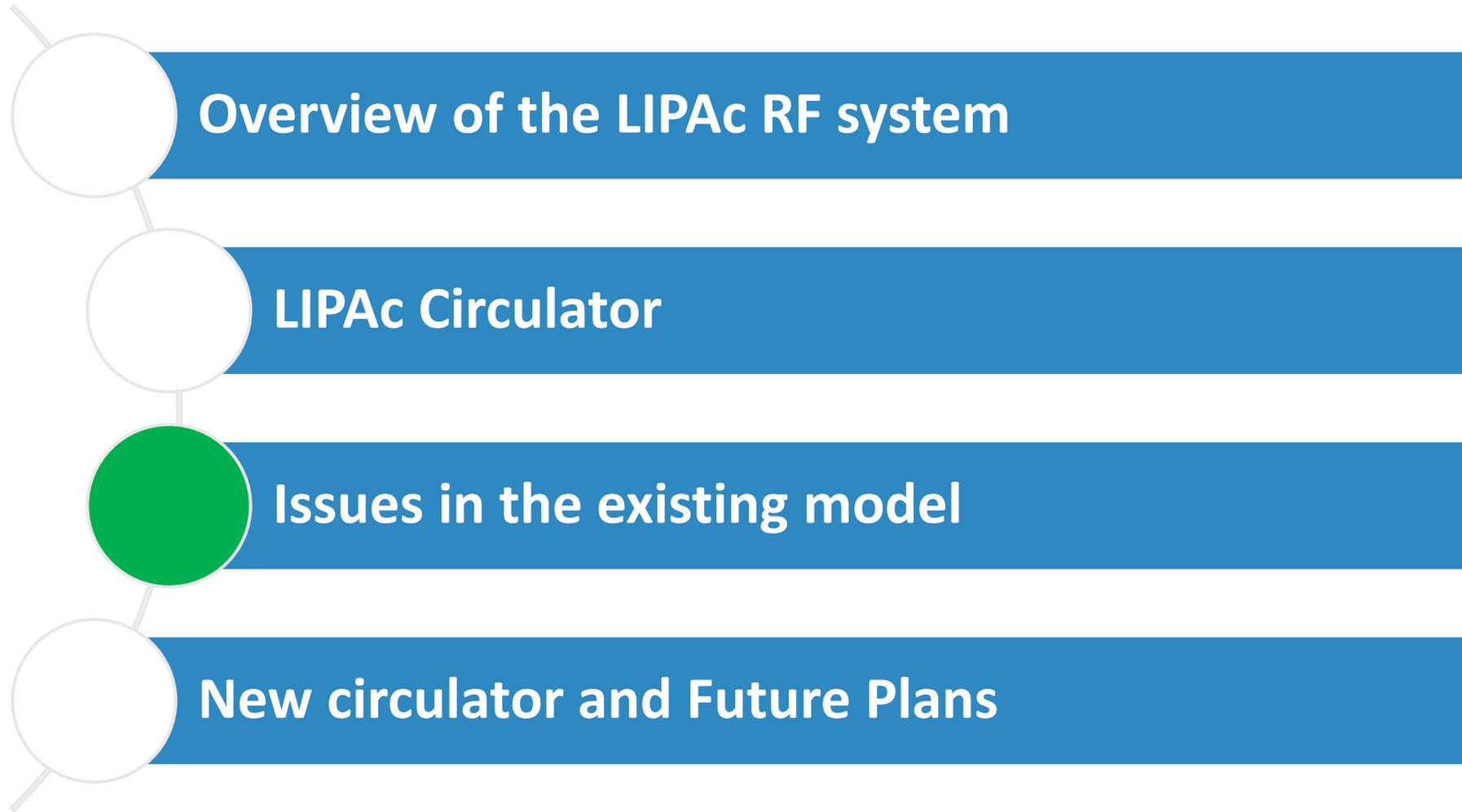
- RFQシステム → 入力より遥かに大きい電力が反射 (8入力による)
- SRFシステム → ビームが無い場合は全反射
- 任意の電流値で、任意のDuty Cycleで運転可能とする (CWに至るまで)

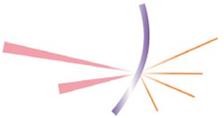
RFQ用RFシステムがトリップした時



SRFのビーム運転時 (来年以降)

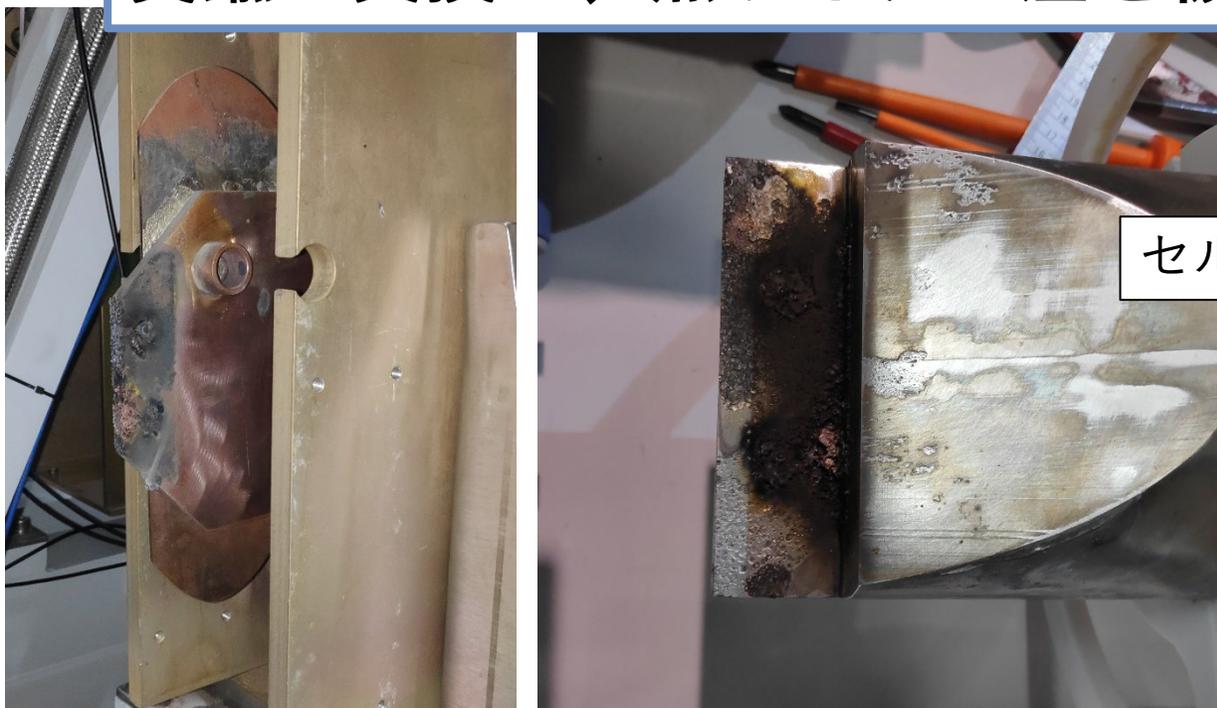




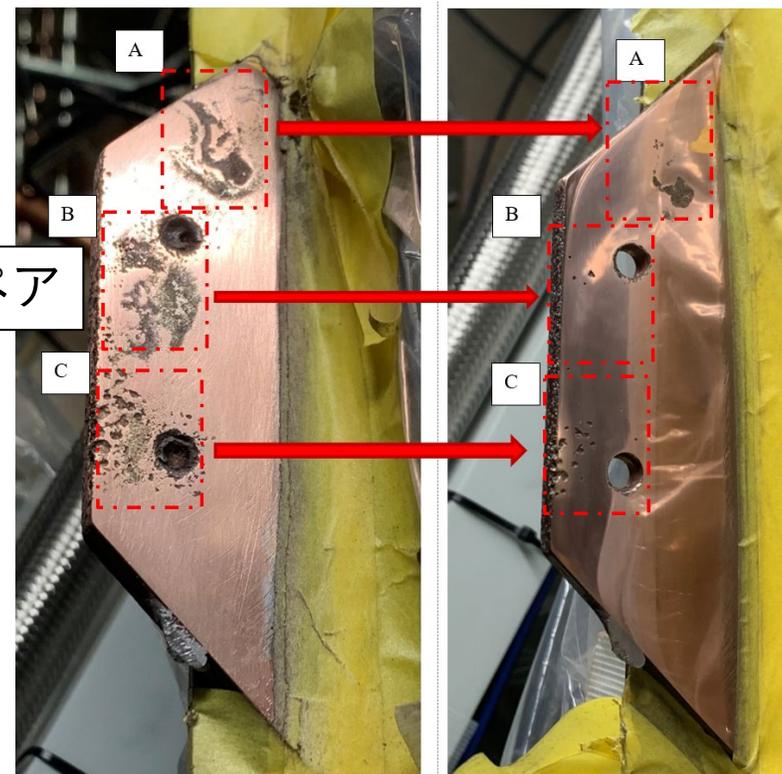


同軸（アルミ円筒）とストリップライン（銅板）を接続する部分が放電
ステンレスのボルト2本で固定 → RFによる発熱で緩み？

真鍮に交換し、熱サイクル差を緩和



セルフリペア

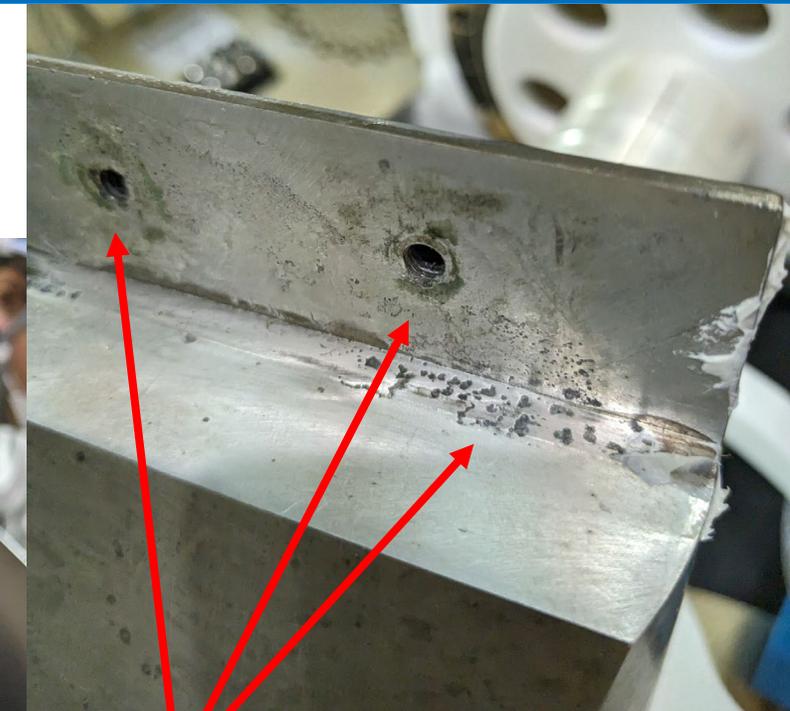


燃えてしまうまで、何度かアークセンサはついていたが、
グラウンド経由のノイズと見分けがつかず、本物を見逃してしまった



別のサーキュレータでは、

焼け焦げていなくても、小さな放電痕が



Holes

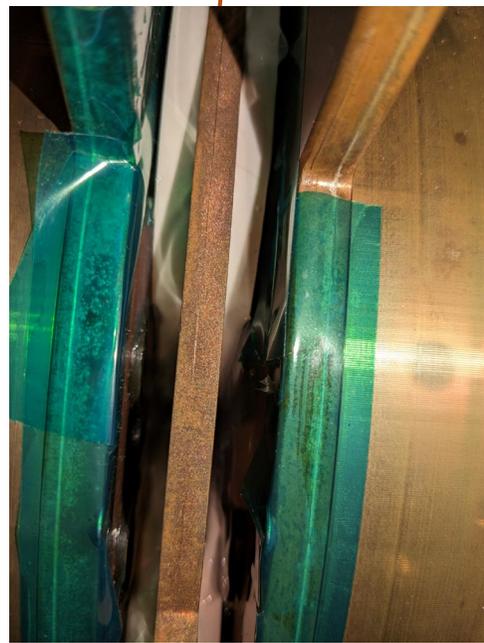
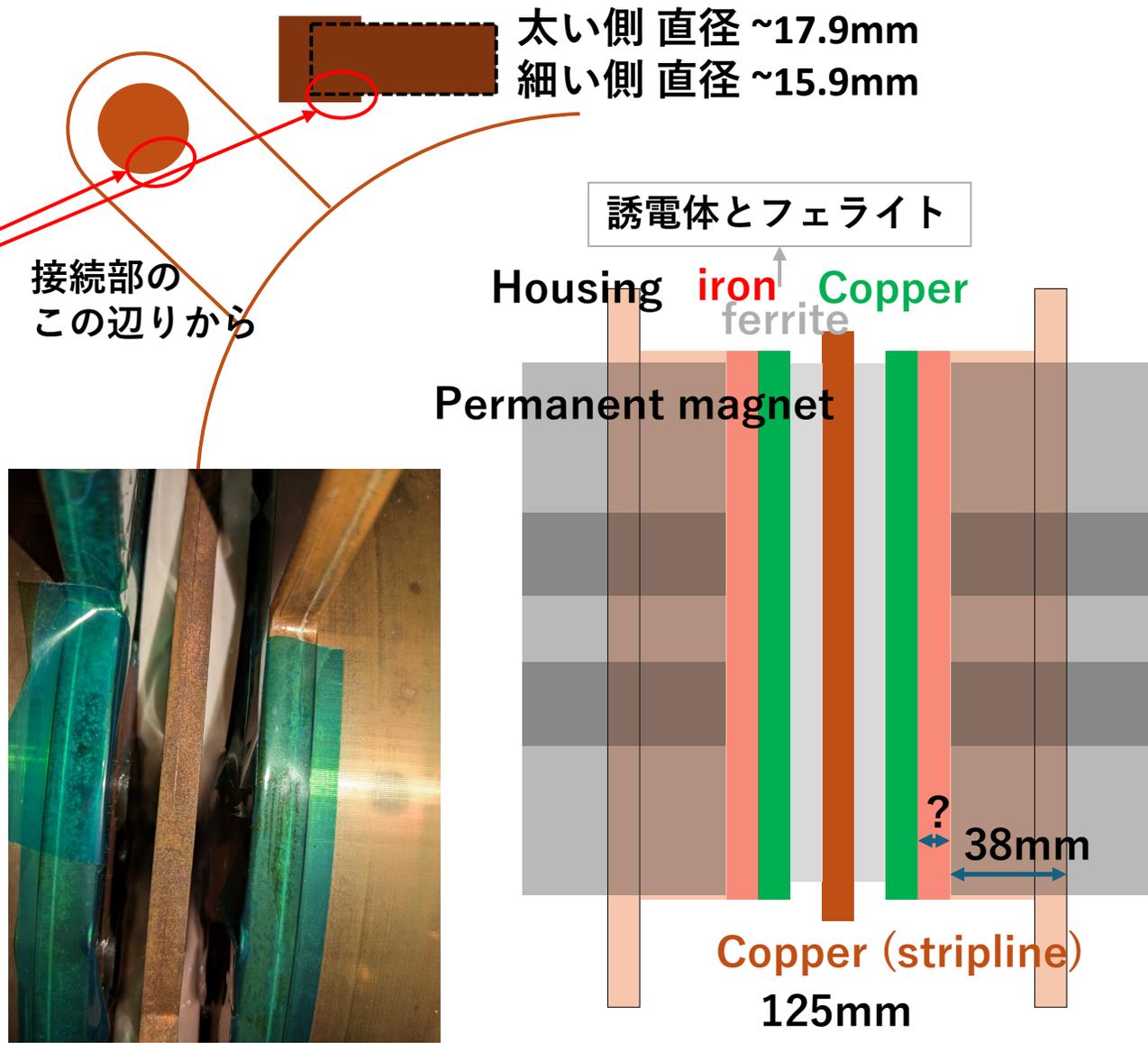
Dirty but no hole



この円筒3つだけで、サーキュレータ内部を全部支えている



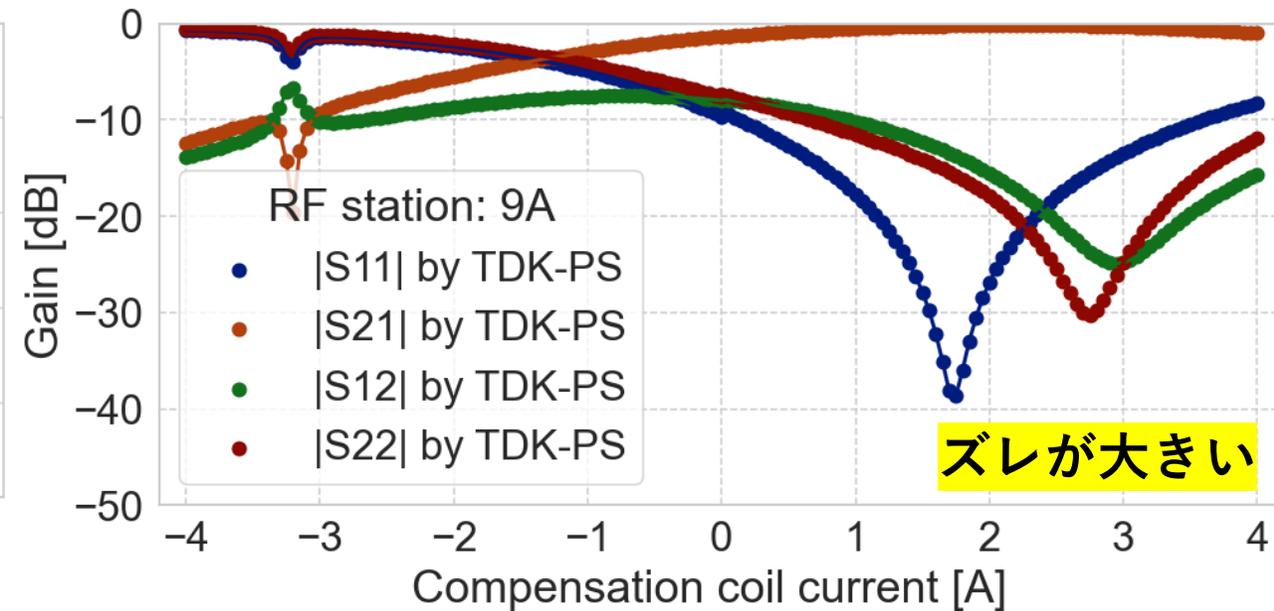
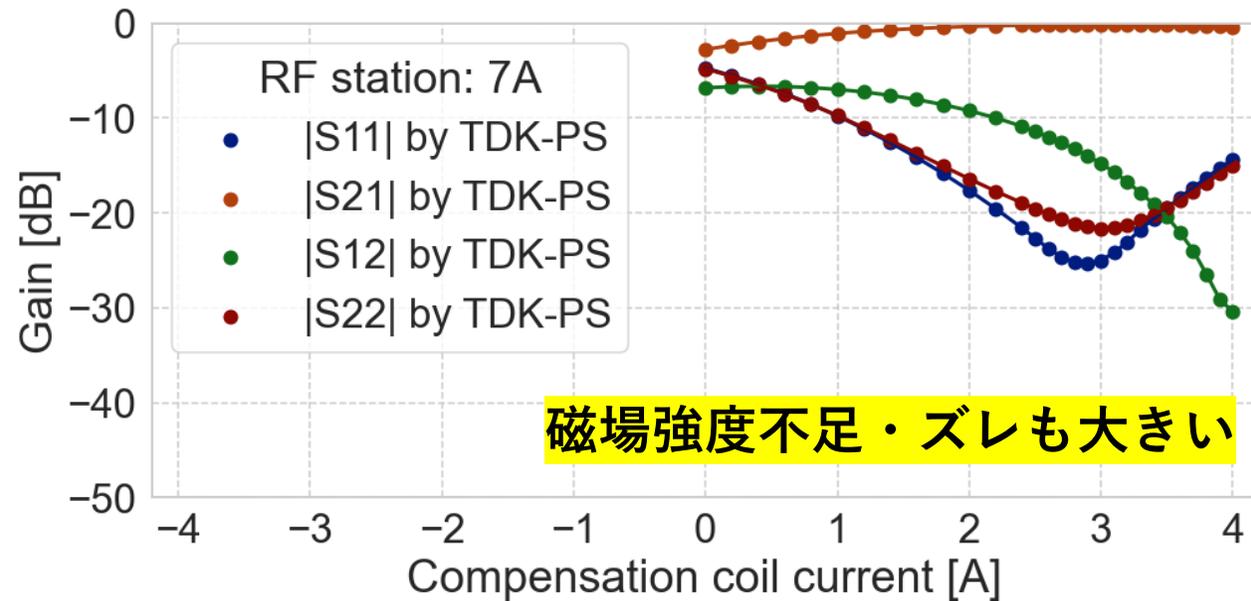
Water leak inside the circulator



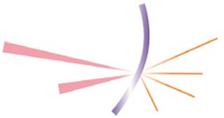
サーキュレータ内水冷配管から漏水
エポキシレジンとシリコンテープで止水
→3回リトライしたので、非常に不安



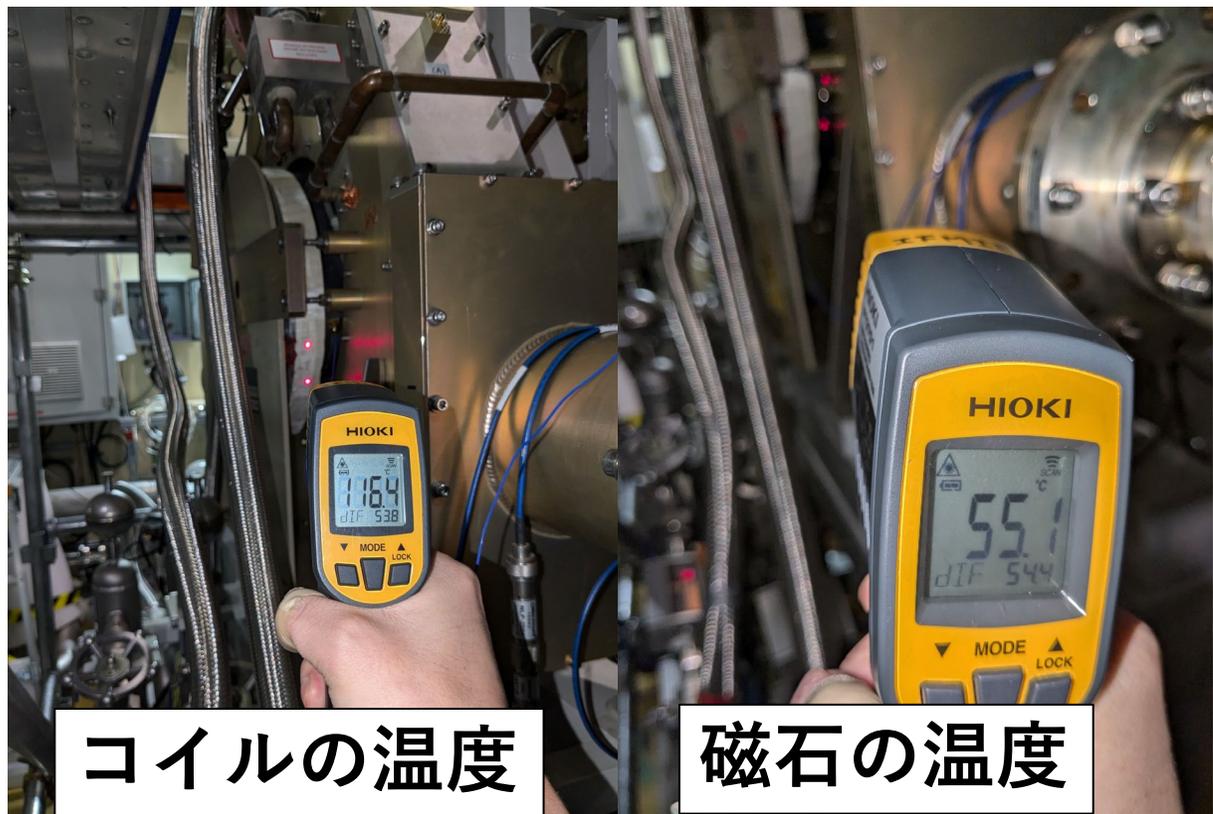
共振特性は、理想的には全て同じ周波数・コイル電流依存性であるべき
175MHzに対する現サーキュレータのSパラメータ測定結果



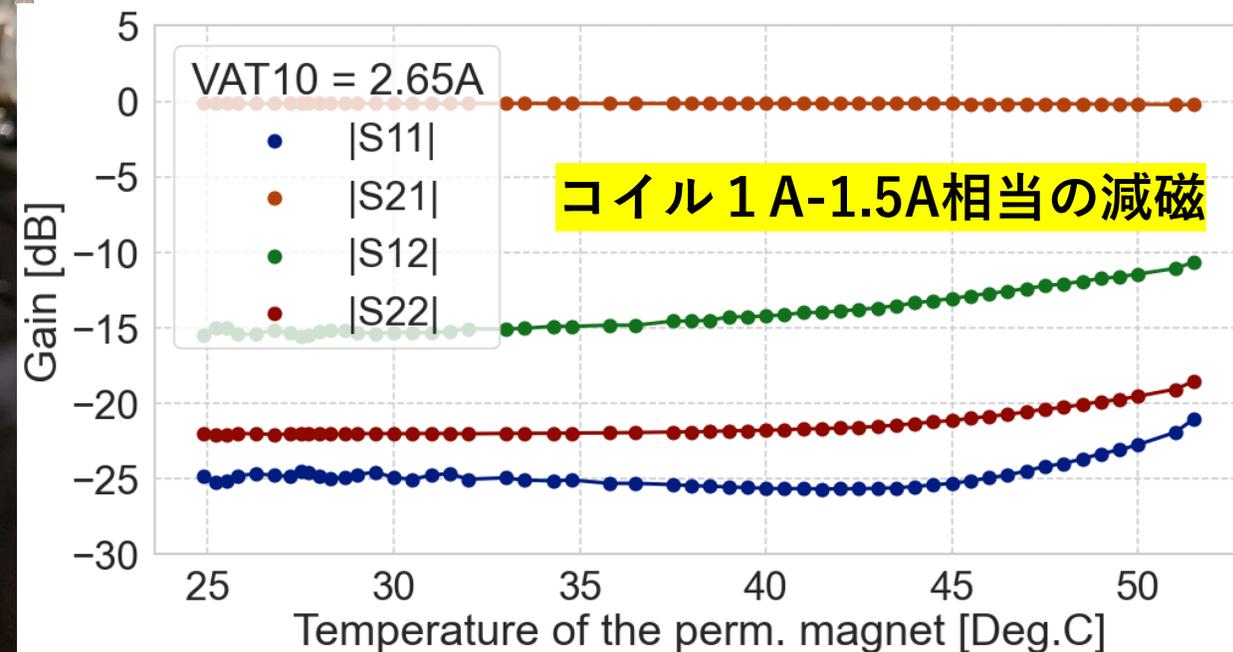
ズレが大きすぎて、最適なコイル電流の特定が困難
最適値が共振点から離れており、自動制御も困難
→この特性が更に高負荷で変化する



コイルの発熱により、固定磁場バイアス用磁石が減磁
約2時間、運転ポイントに合わせて、表面温度が100度以上に
コイルに直接永久磁石が接触しているのが原因
(RF損失による発熱も寄与)

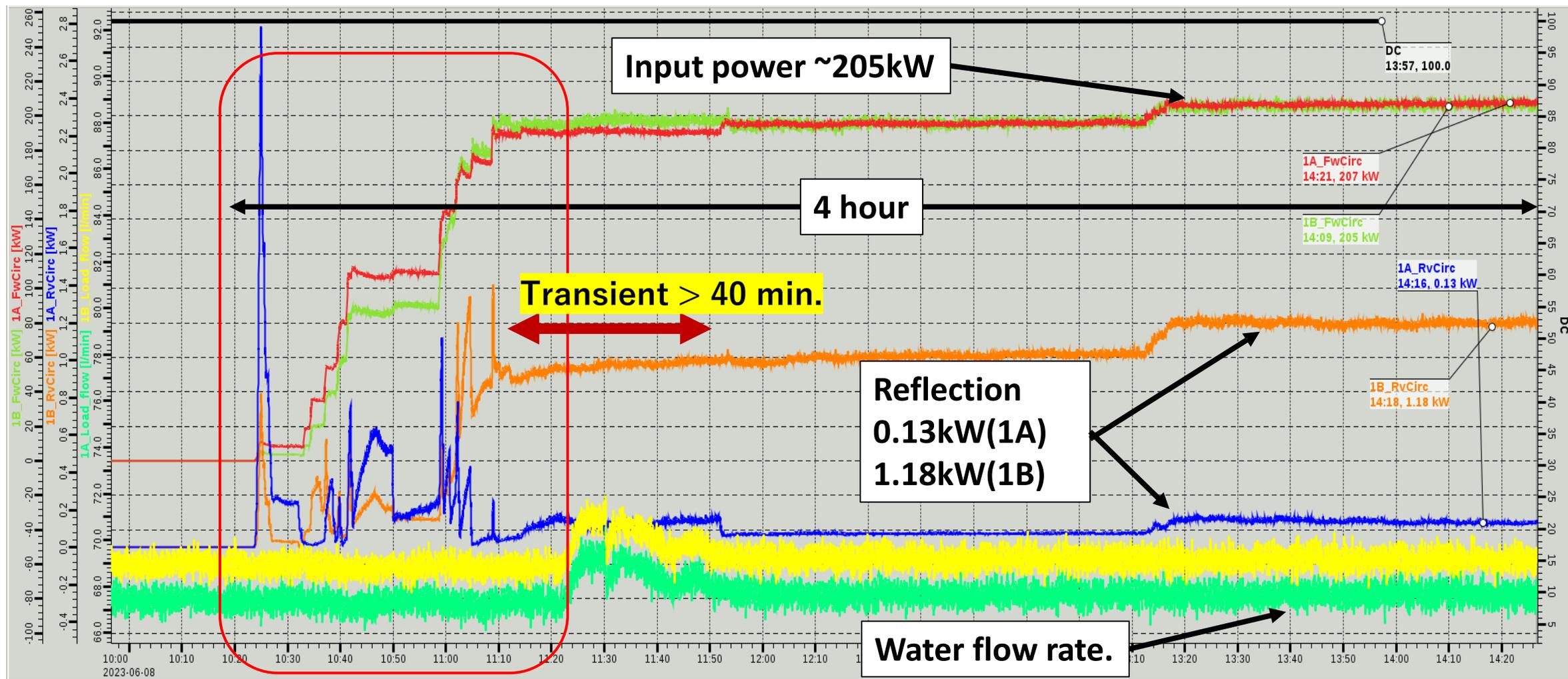


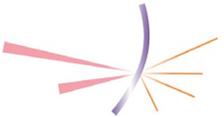
2時間駆動した時の温度変化と応答





High Power特性、および熱過渡を追いかけるために必要な時間について試験
DC = CW、Forward power = 0-205kWで段階的に引き上げ

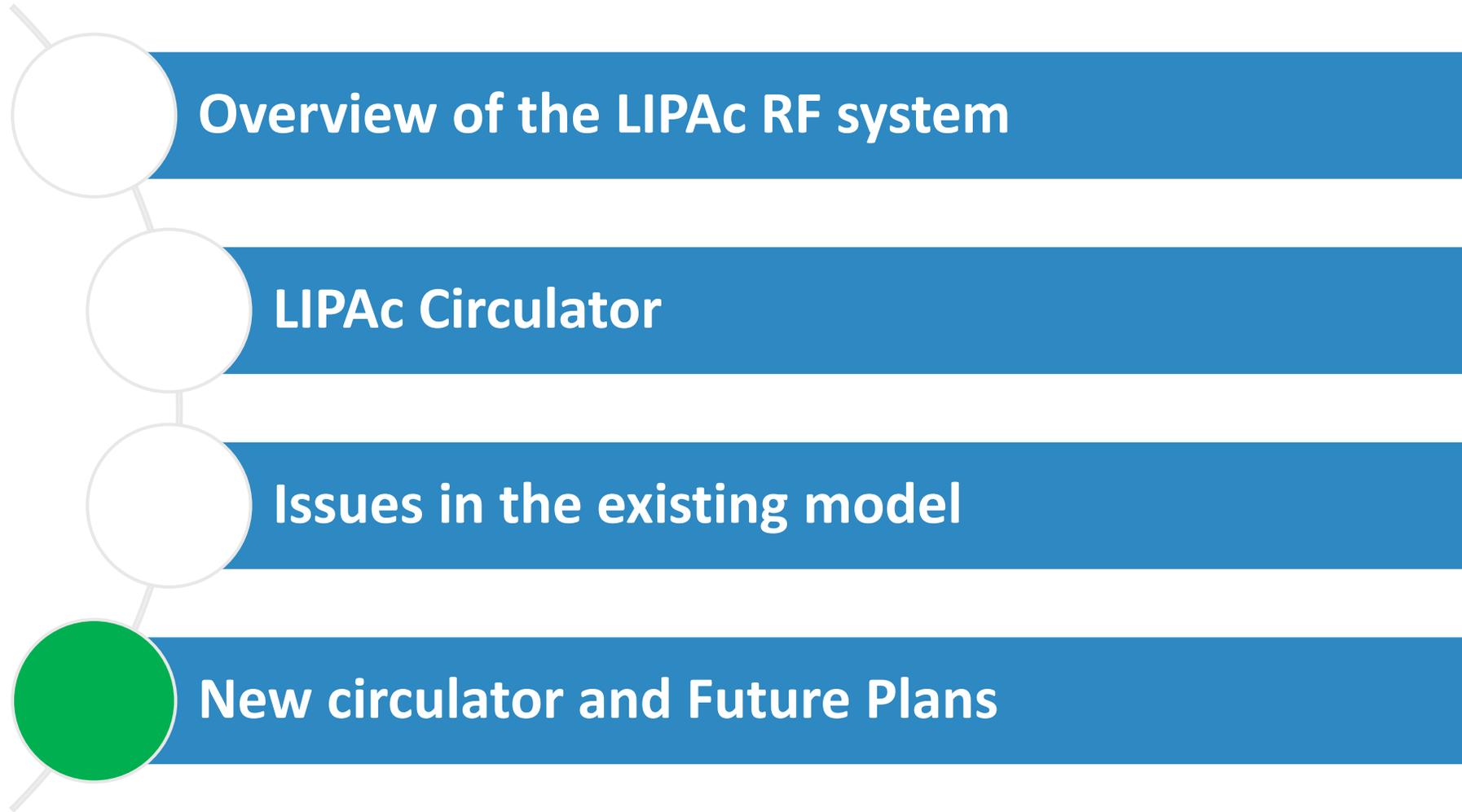


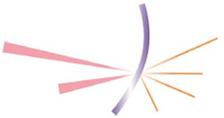


既存のサーキュレータに関する問題点

- 同軸導波管とストリップラインの接続部で放電の懸念
- 水冷配管が劣化する一方、水漏れの修理が困難
- 水冷配管用の筐体穴から電磁場が有意に漏洩
- 磁場が磁性体によって固定されず、ペアで大きな相互作用
- 各Sパラメータの共振点に大きくズレがある
- コイル電流が大きいほど、発熱により永久磁石が減磁
- 熱ドリフトが落ち着くまでの時間が長い
- コイル励磁用の電源が不安定
- コイルの抵抗値が大きく、通常仕様でも表面温度が160度以上に達する
- Duty Cycleを上げると、明らかに入出力バランスが変化

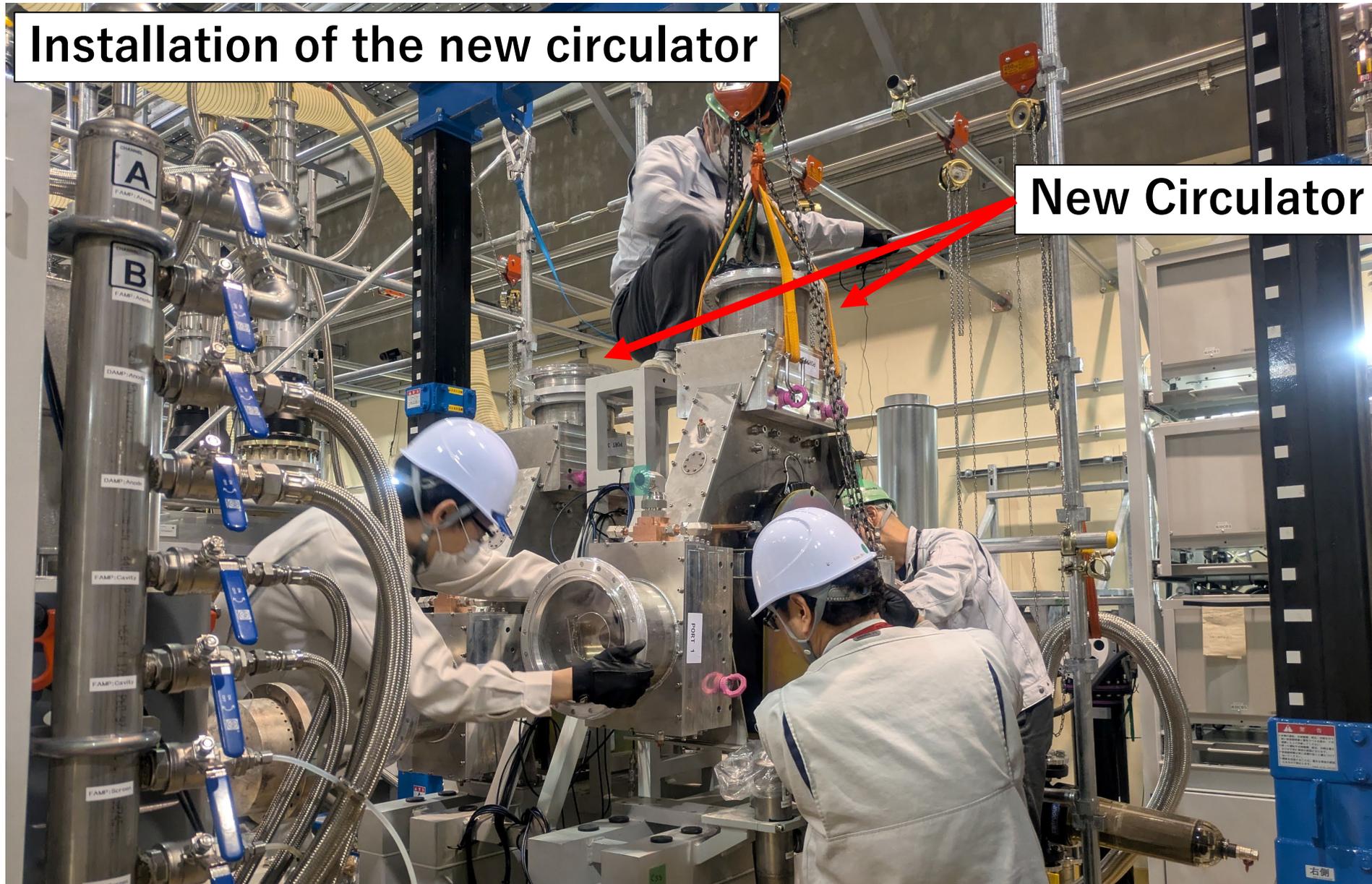
→新たなサーキュレータを製作





New circulator

Installation of the new circulator



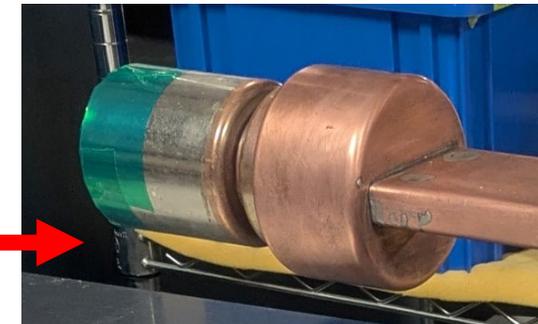


RF特性に関する主な改善項目：

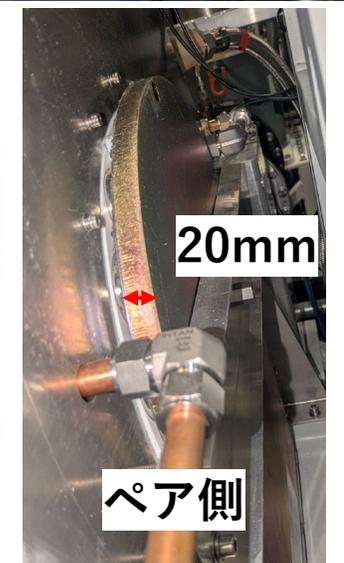
- 長い熱過渡時間の問題
 - グルー等の熱伝導率を向上
 - 180kW→200kW: $\tau > 40\text{min} \rightarrow \tau < 5\text{min}$
- コイル熱による永久磁石の減磁
 - コイルをアルミの放熱台座上に配置
- 接触不良による放電を抑制
 - 同軸内導体との接手部分を溶接
- サーキュレータ同士のカップリング
 - 厚い鉄鋼板で磁場リターンパスを作成
 - ペア側のコイルを除去
- 補償コイルの高温問題
 - 抵抗値を大きく下げ、発熱を抑制
- 経年劣化による内部漏水
 - ロウ付け部分を除去→Swagelok



内部



ハウジングで放熱



20mm

ペア側

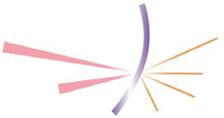


Original

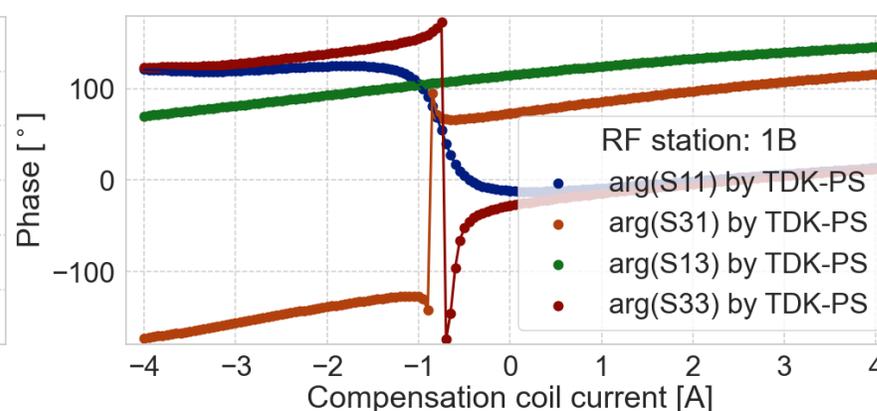
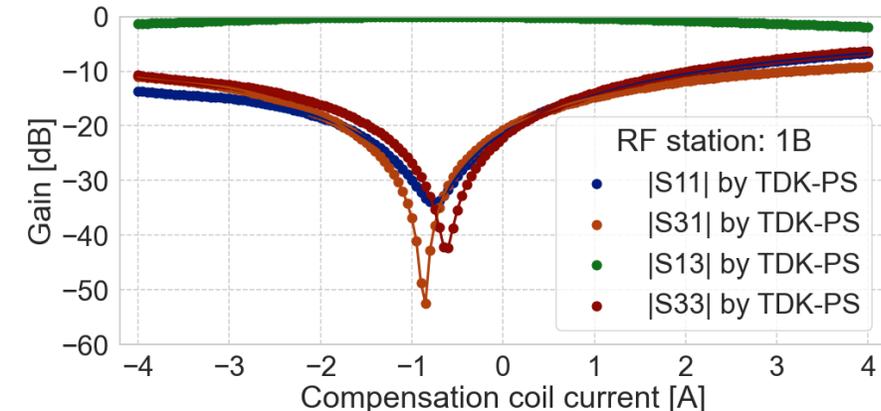
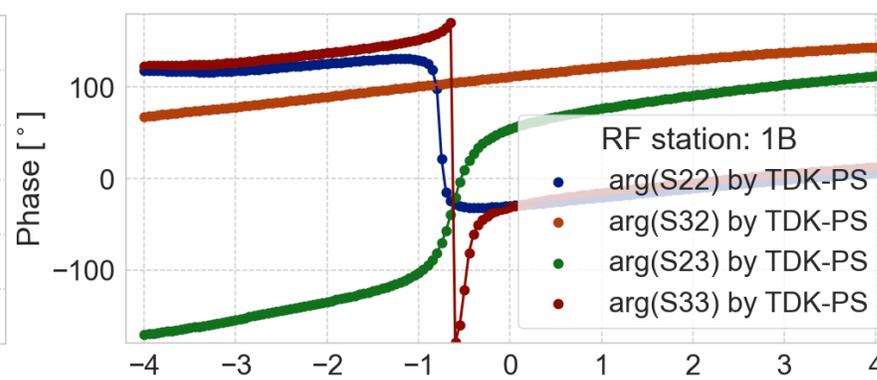
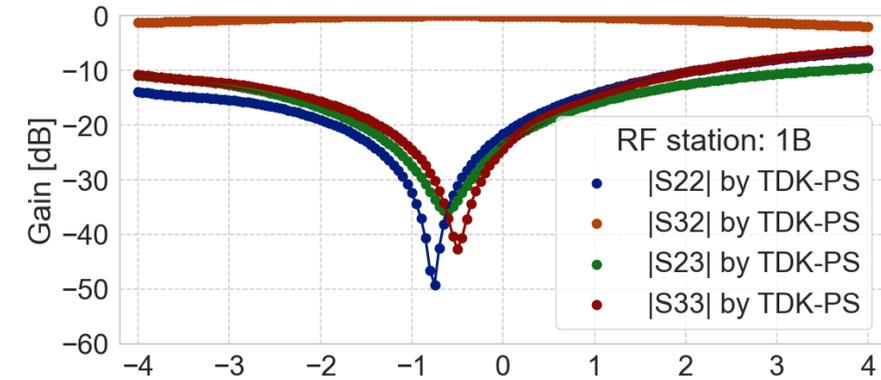
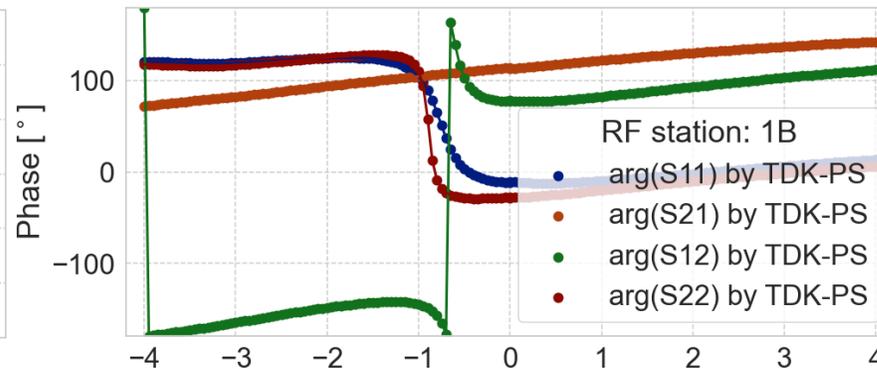
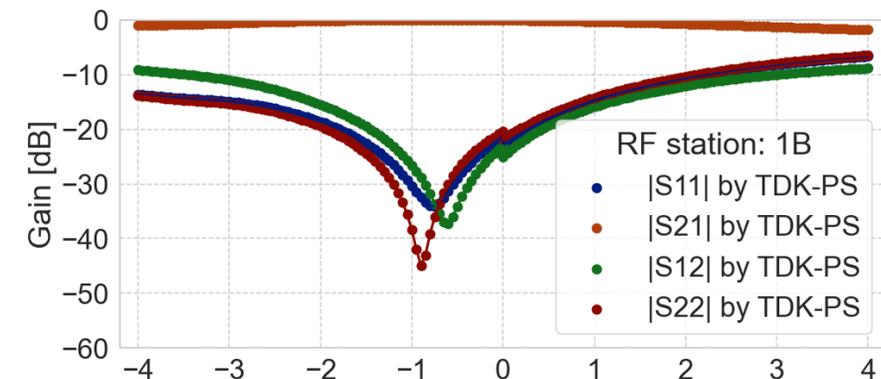


New

コイル改良



Circulator current dependency



Res. @26degC: -0.7A
Depth: -35dB

共振点が一致

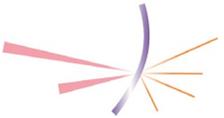
- 最適点 = 共振点
- 自動調整が可能に

【次なる課題】

ノイズ問題の顕在化

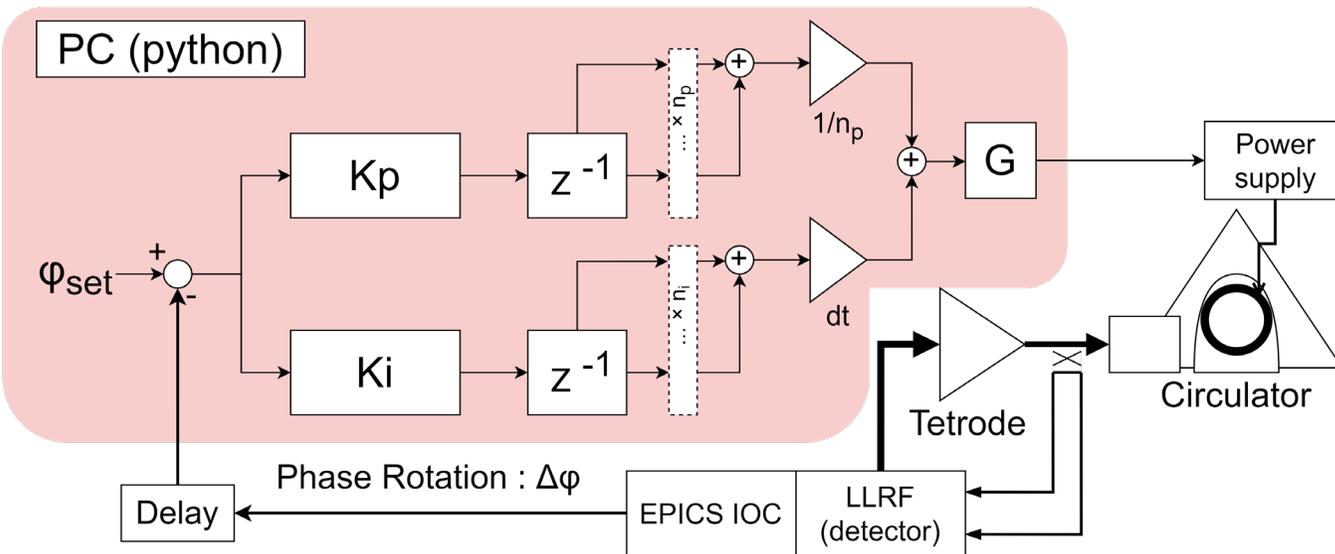
- 共振点近傍で、 $P_{in} < 30kW$ の領域で反射位相が検出不可

➡ 要ノイズ対策



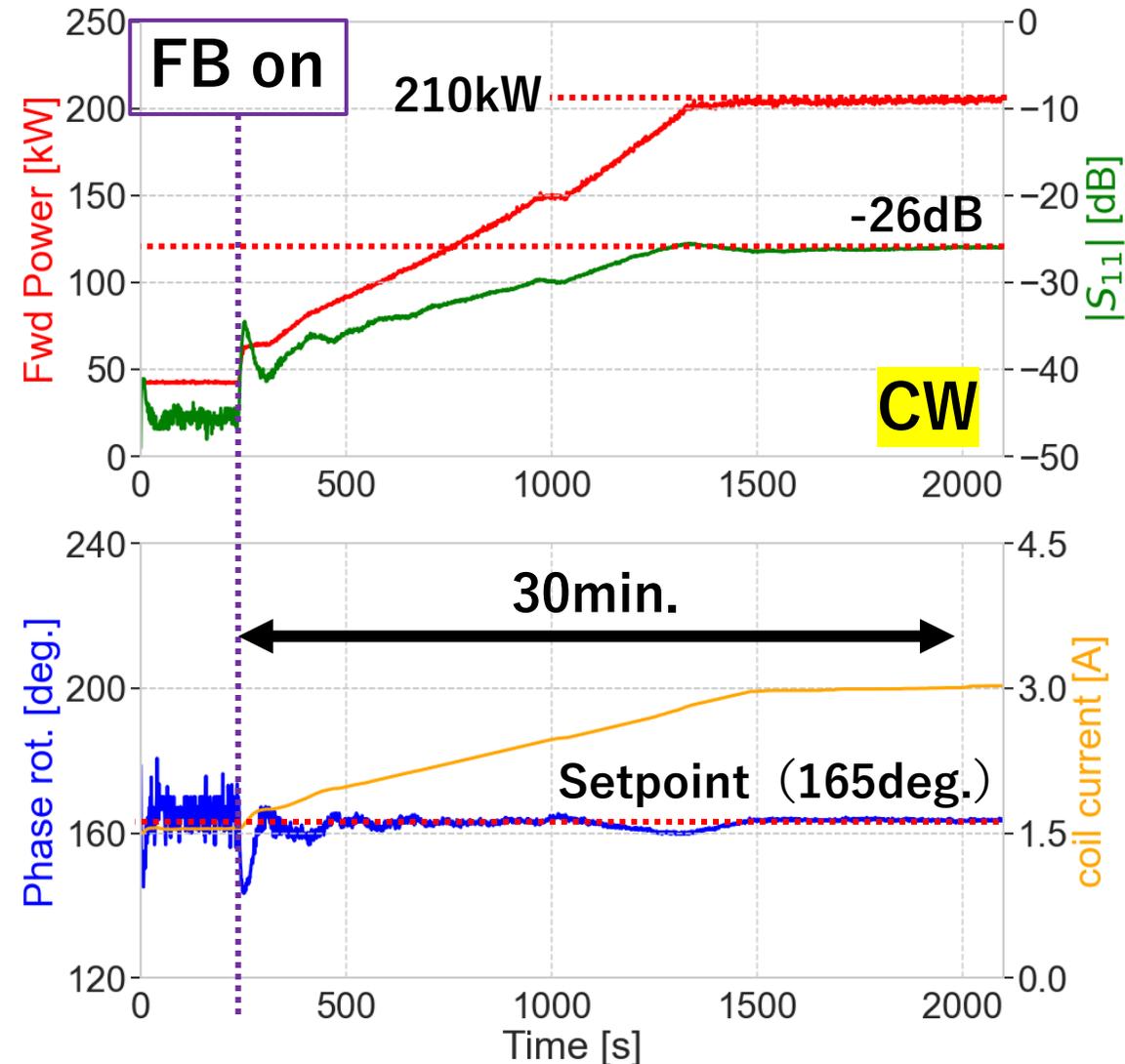
Duty cycleの変化に対応するため、補償コイルの自動制御を作成

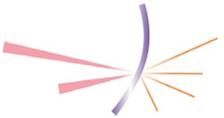
制御対象がゲイン → 最小値探索が必要
制御対象が位相 → 単調なのでPI制御



※ EPICS PV経由で、PC上に実装

自動制御はひとまず上手く動いている
→ これを元にLLRFに組み込む計画





LIPAcのサーキュレータにはハードウェア、ソフトウェアに多くの問題
特に

- 発熱による減磁
- 共振点の著しいずれ
- 内部水冷管等の劣化

Y - Striplineの構造上改修が困難

→機能を向上した**新たなモデルを製作**

- 熱応答が向上したことにより、リモート制御が容易に

→125mA-CWまでを実現するサーキュレータ制御を自動化（現状はEPICS経由）

【次の計画】

→他モジュールのサーキュレータも新モデルに入れ替え（計14台）

→自動制御をパルスと完全に同期させるため、LLRFに統合

【次の目標】

散逸条件が変化するとサーキュレータ（方結込み）の特性が変化

→ダイナミクスを明らかにして、RFQ/SRFのスタディに注力したい



Thank you for your attention!

