

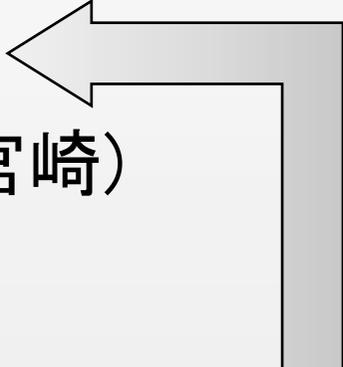
ポジトロニウム 超微細構造の精密測定I (全体と遷移RF) 13aSA-5

秋元銀河,石田明,佐々木雄一,宮崎彬,加藤康作,末原大幹^A,難波俊雄^A,浅井祥仁,
小林富雄^A,斎藤晴雄^B,吉田光宏^C,田中賢一^C,山本明^C,小川勇^D,漆崎裕一^D,
小林真一郎^D,出原敏孝^D,S.Sabchebski ^E

Thanks to : K.S. Khaw, 風間慎悟, 山口博史

東大理,東大素セ^A,東大総文^B,高工研^C,福井大遠赤セ^D,ブルガリア大科学アカデ
ミー^E

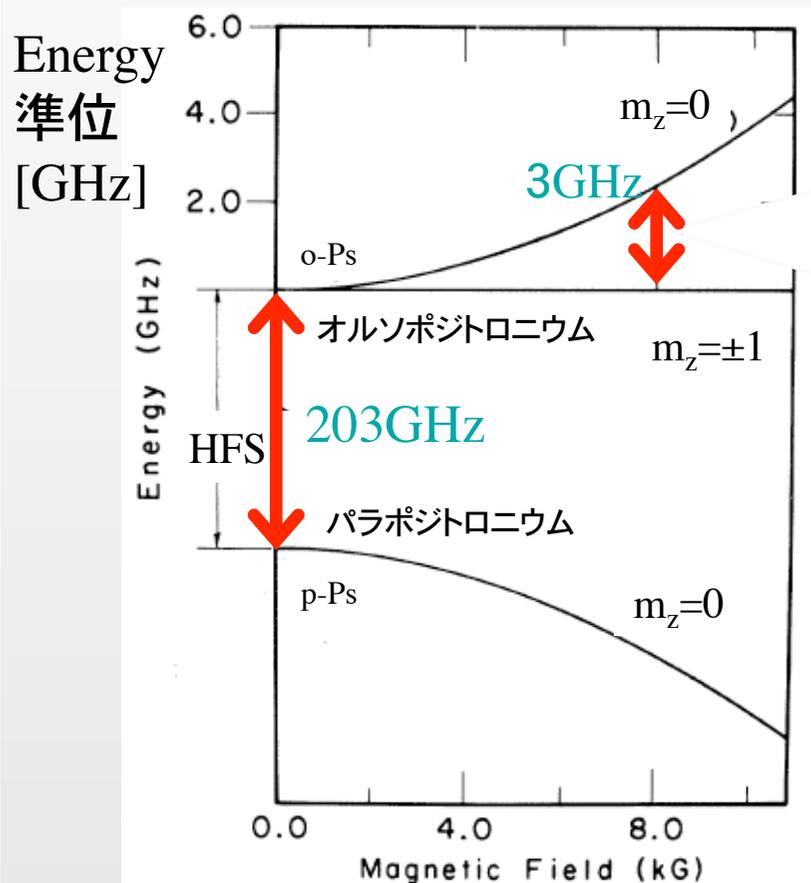
超微細構造(HFS)の測定方法

1. 量子振動 (spin rotation) (佐々木)
 2. Zeeman効果 (秋元+石田)
 3. 203GHz直接遷移 (末原+宮崎)
- 

この実験では、HFSの共鳴遷移($\Delta\nu=203\text{GHz}$)をZeeman効果を利用して間接的に測定している。
(現在、最も精度の高い方法)

実験の概要: Zeeman効果を用いてO(ppm)の精密測定

磁場の強さとエネルギー準位



静磁場 B[kG]

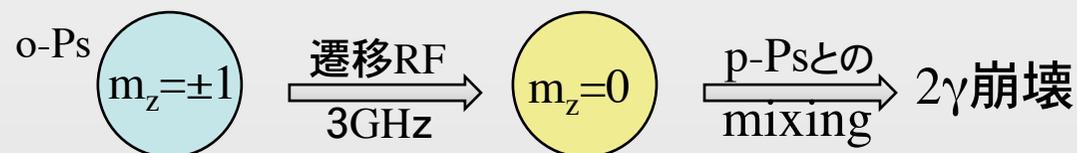
静磁場 H_0 の摂動により、o-Ps の $m_z=0$ と p-Ps ($m_z=0$) がミキシングして、準位がシフトする。

$$\Delta_{mix} = \frac{HFS}{2} \left(\sqrt{1+x^2} - 1 \right)$$

$$x = 2g\mu_0 B / HFS$$

9kG で $\Delta_{mix} = 3\text{GHz}$

Δ_{mix} に対応する RF で o-Ps を ($m_z=\pm 1$) から ($m_z=0$) へ励起させると、p-Ps とのミキシングにより 2 γ -decay のレートの増加する。



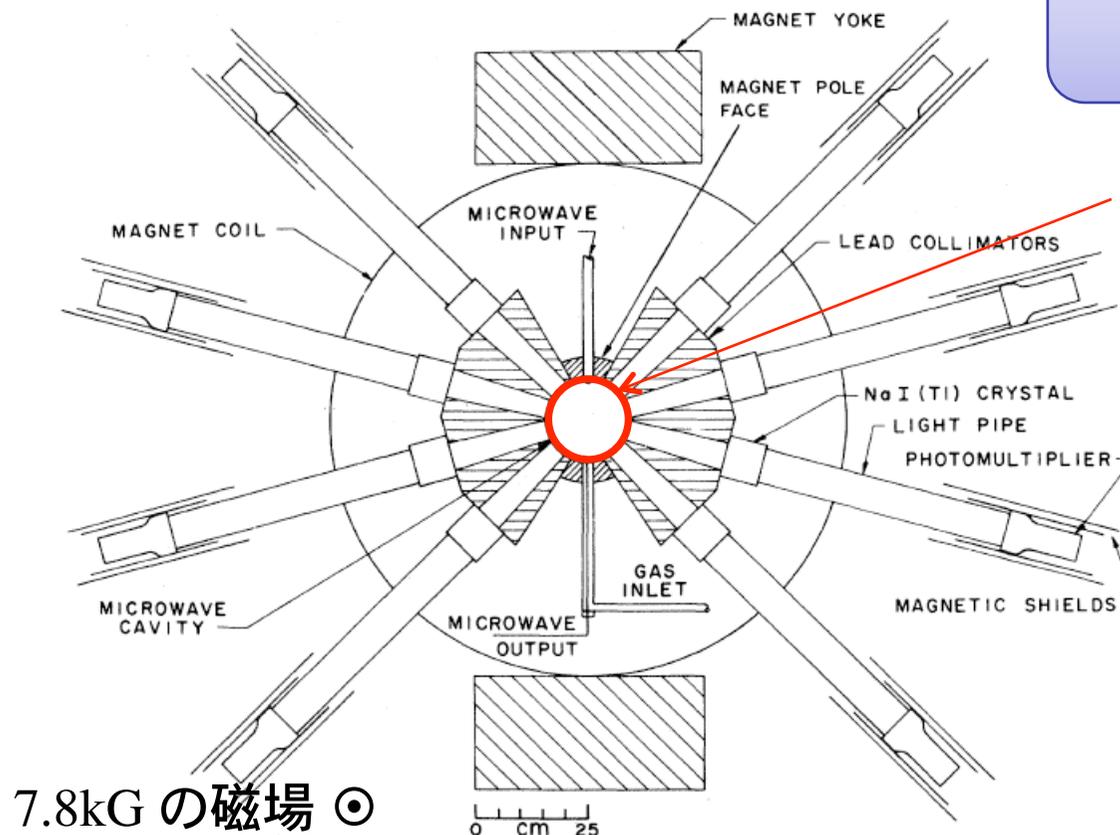
RF(3GHz) を固定して、磁場を変化させると B=9kG をピークに崩壊レートの resonance が生じる。共鳴ピークの磁場を周波数に焼き直すことで HFS 求める。

過去の実験のセットアップ

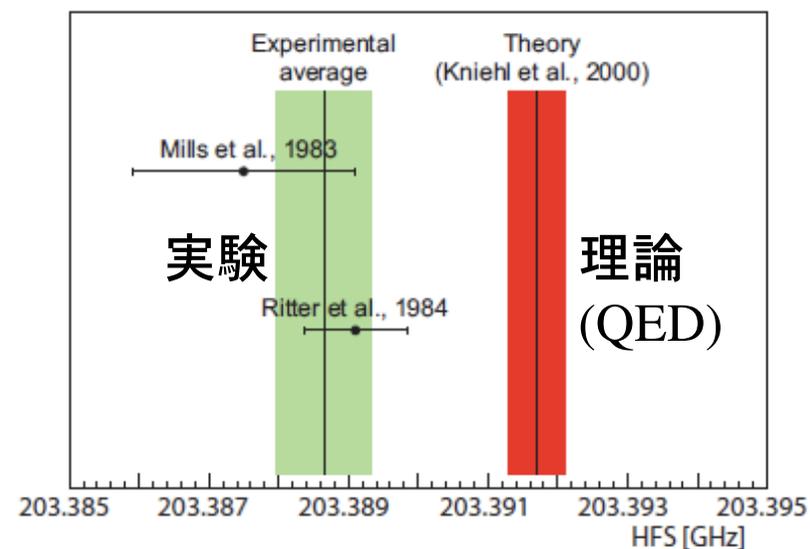
過去の高精度実験はすべて磁場 (Zeeman効果)を用いた間接測定

中心に ^{22}Na 線源とRF Cavity (2.3GHz) (Ps生成とmicrowave遷移)

コリメーターとNaシンチで Back-to-Backの γ を検出



Phys. Rev. A 15(1977)241 Carlson, et al



実験の精度は3.3ppmで、一様にズレている(15ppm)

実験と理論のズレ(3.9 σ)の原因

1. 考慮されていない**系統誤差**が存在する
2. 何らかの**new physics**が存在する。
3. QEDの**計算**に問題がある

まず、我々は**系統誤差**を再評価することでこの問題に取り組む

実験の概要 // 過去の測定の課題と改善方法

我々の考えている系統誤差

1. **物質の効果**を正しく評価していない
2. **磁場の非一様性**が測定値に影響を与える

A1. 物質の効果を正しく評価する

Ps生成からの時間情報(過去の実験では測られていない)を用いて、物質の効果の評価。同時にprompt γ を落とすことでS/Nを改善出来る。

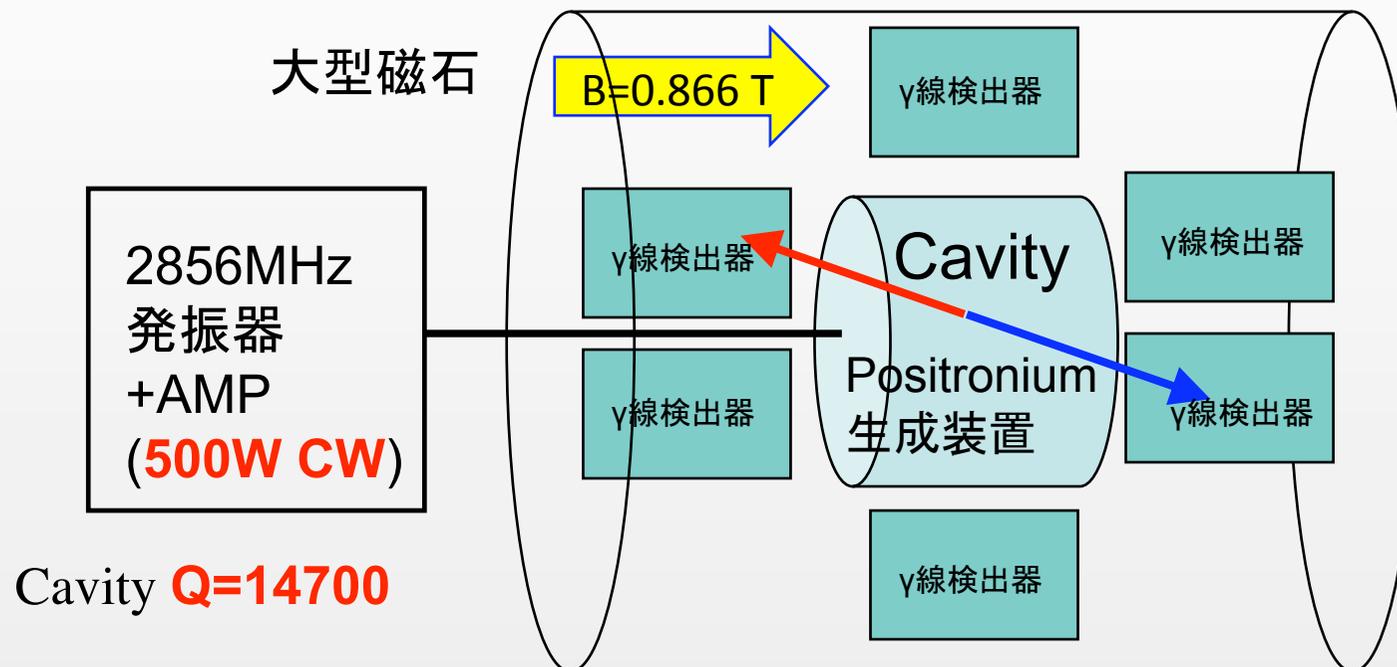
A2. 磁場をコントロールする

KEK低温センターの大型超伝導磁石の永久電流を用いて、安定で一様な磁場を用意する。

A3. γ 線検出器を改良

LaBr₃を用いて、 2γ をtagする新しい手法を開発。高統計

実験の概要 // 全体のSETUP



2009年6月から
測定を開始、
現在もRUN中

1. 中心部にRFCavityが存在する。中には N_2 gasと ^{22}Na 線源が入れられておりPsが生成されている。500Wの大強度RFを外から導入することで遷移を行う。
2. 周囲を LaBr_3 シンチレーターで囲み、back-to-backの γ を検出する。
3. 各検出器とCavityは大型電磁石の中に納められており、一様な静磁場($\sim 0.86\text{T}$)が掛かっている。

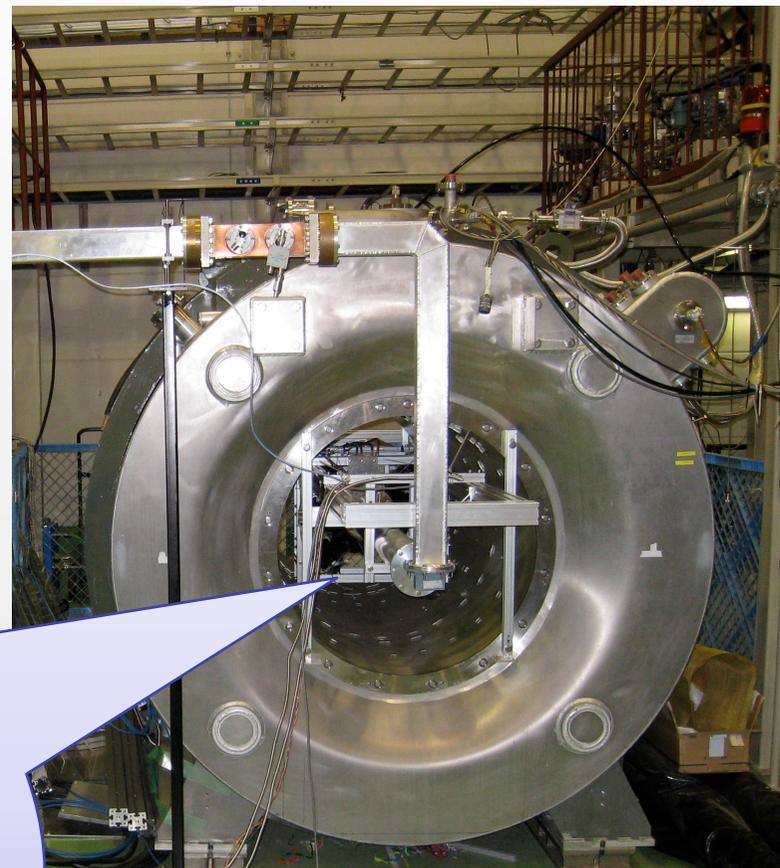
検出器および磁場と測定結果は次の石田が話します。

実験の概要 // HFS測定の様子



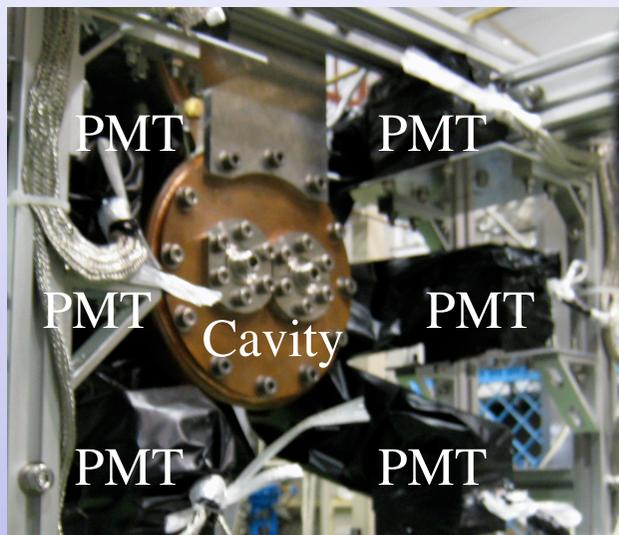
発振器+アンプ

導波管
500W RF



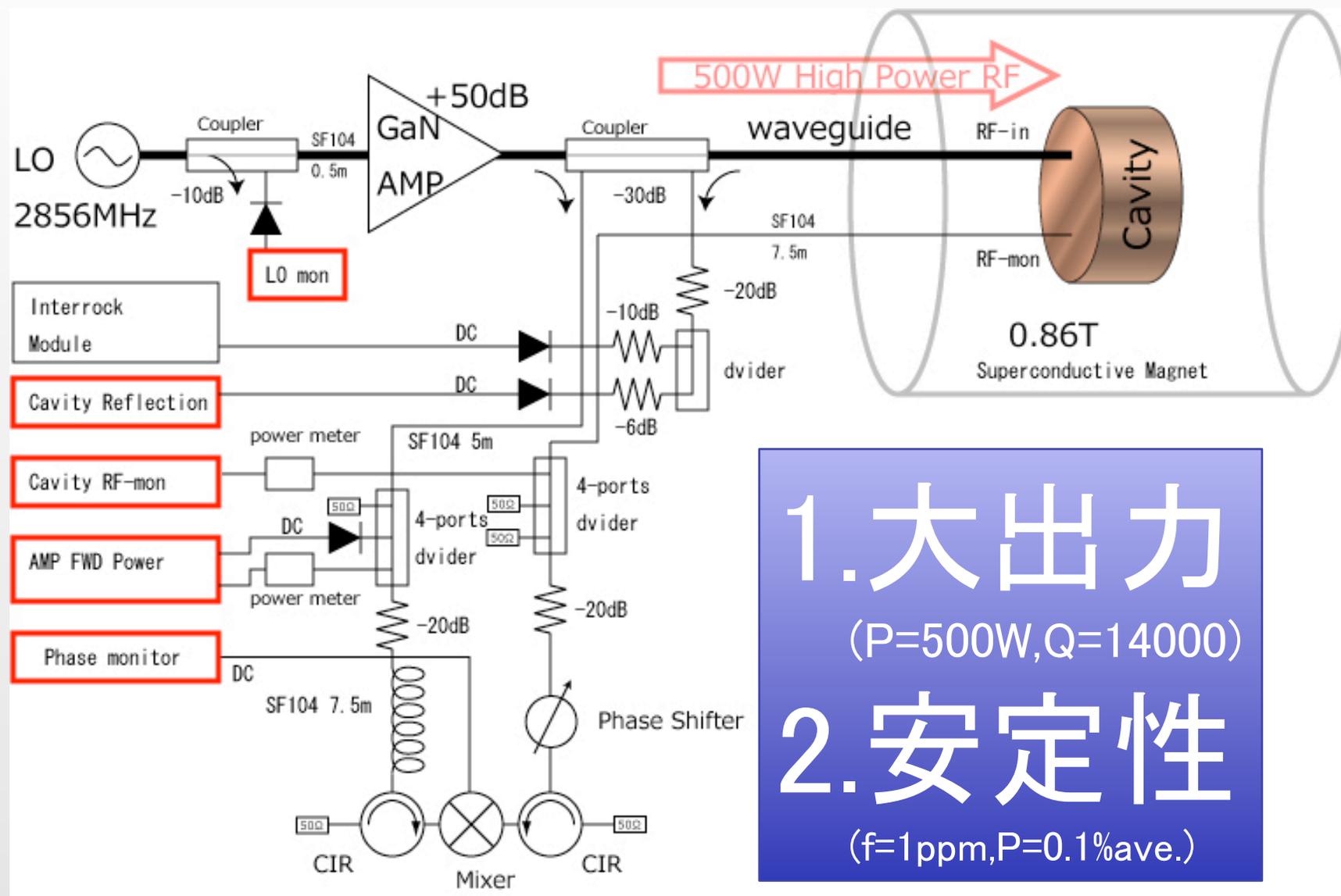
大型超伝導磁石 @ KEK

私の発表ではRFシステムについて述べます



Magnet内部

RF回路の全体像

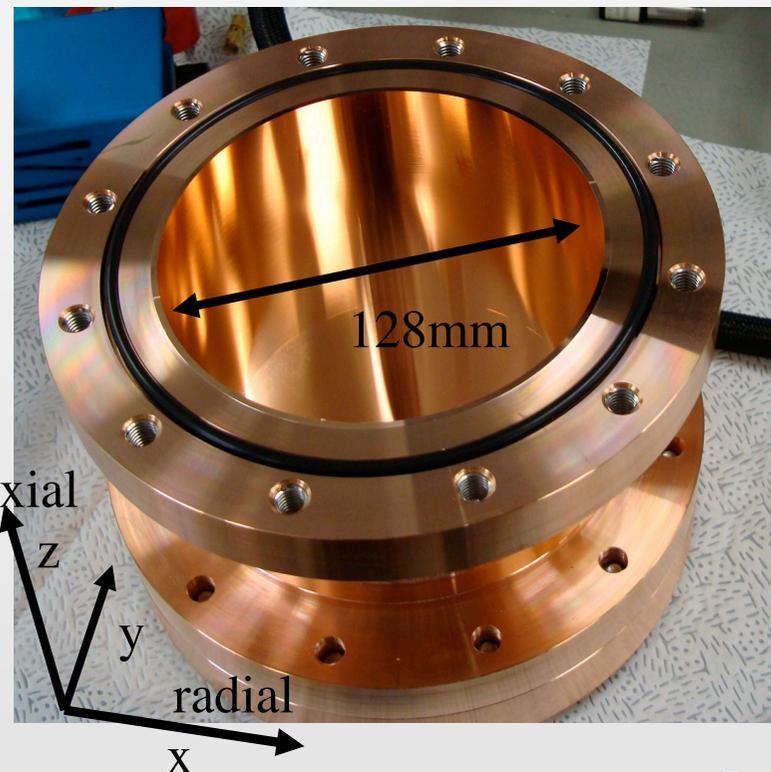
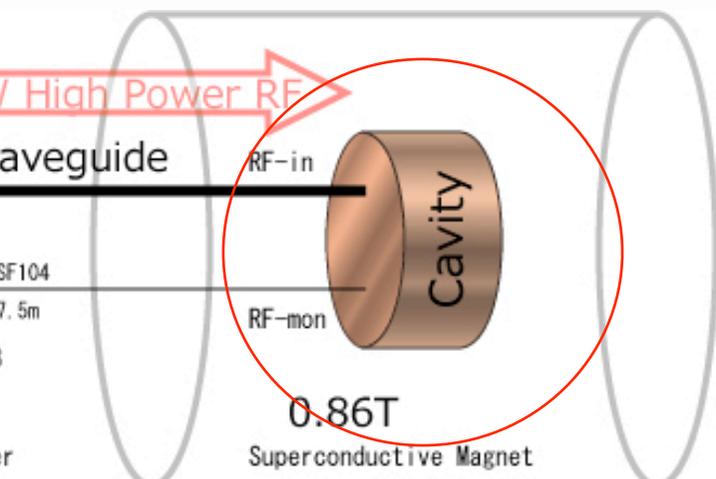
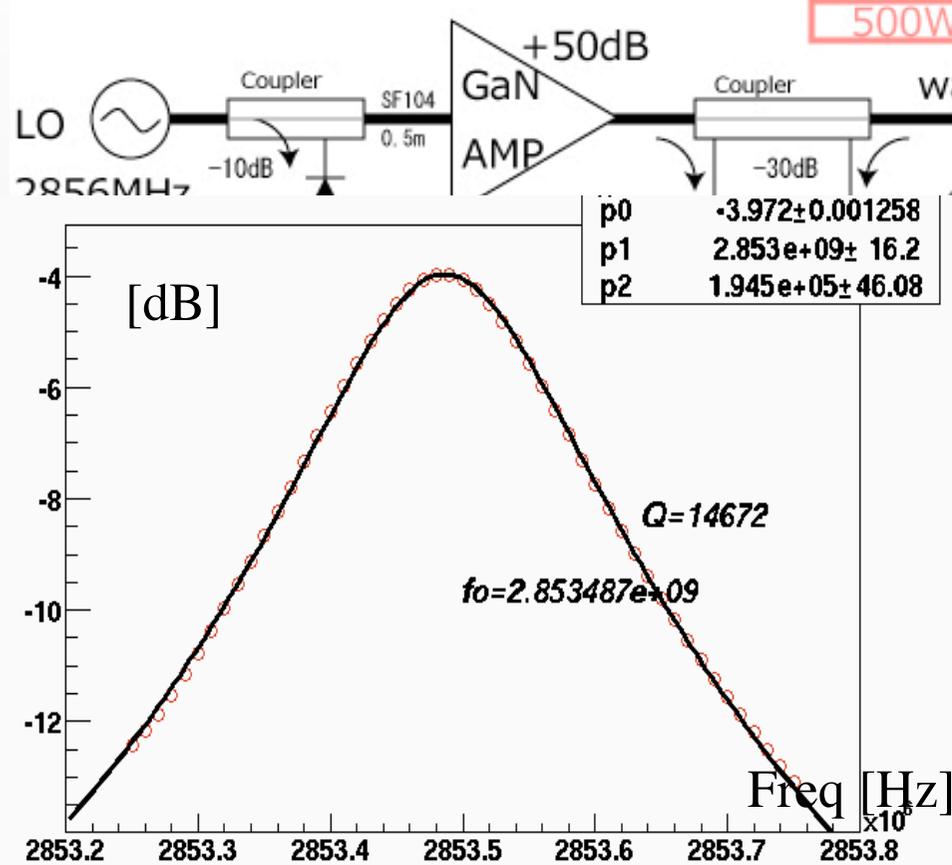


1.大出力
($P=500\text{W}$, $Q=14000$)

2.安定性
($f=1\text{ppm}$, $P=0.1\%\text{ave.}$)

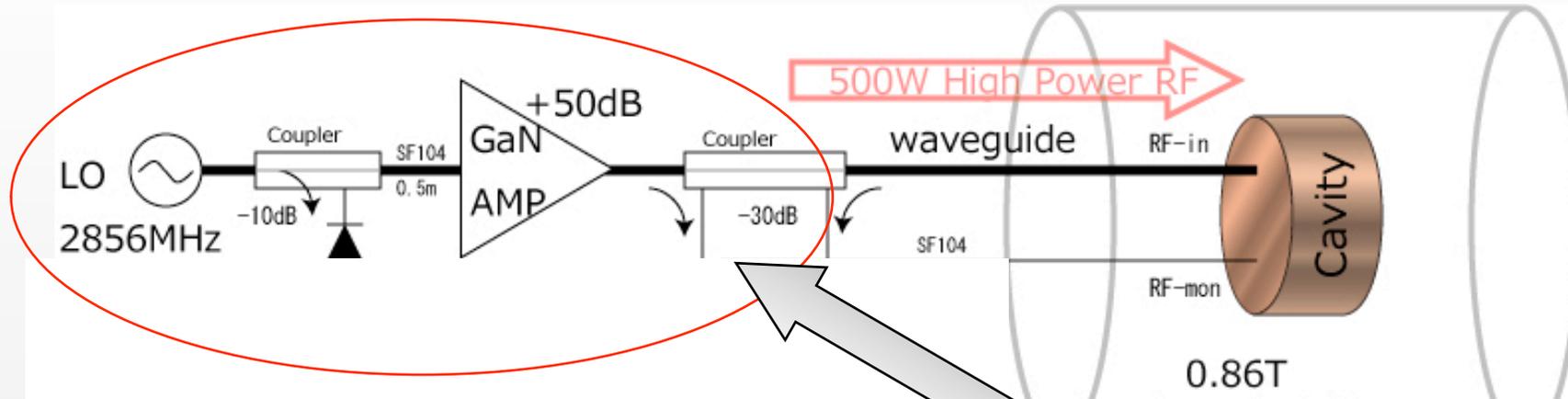
HFS測定のために次のようなRF回路を組んだ。詳細は次項から

遷移RFの強度 // RF Cavity



1. 共振周波数: 2856MHz
2. 共振モード: TM_{110}
3. RF耐圧: 500W [CW]
4. 側面厚(Cu): 2.0 mm
5. **Q=14700**

遷移RFの強度 // Cavity印加 Power



Signal Generatorで2856MHzのRFをGaN AMP
で+50dBの増幅

異なる2カ所で(場所は後述)でCavityに入る
遷移RFのPowerをモニター

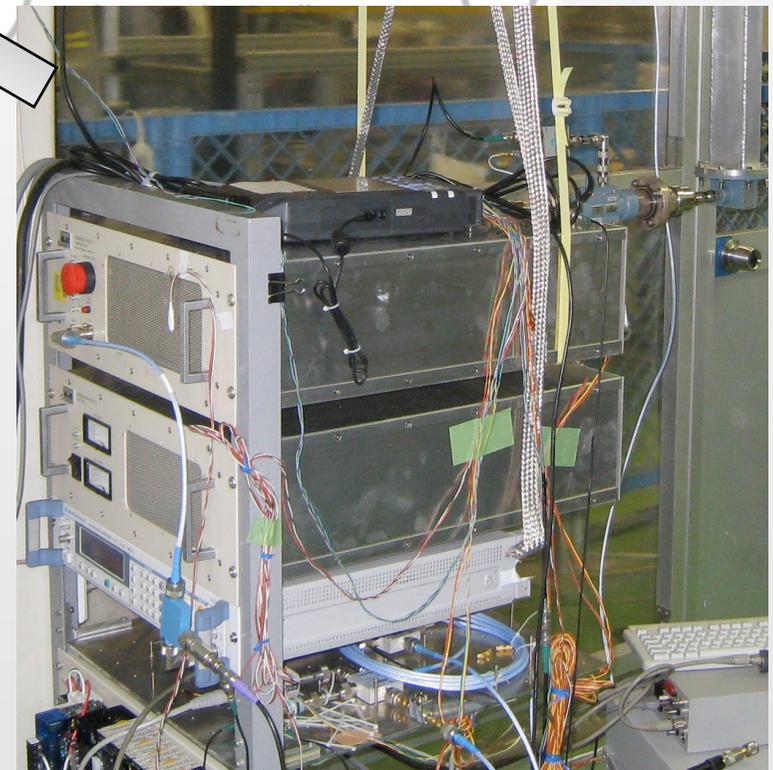
56.15dBm (412 W) @AMP 直後

56.09dBm (406 W) @Cavity 透過

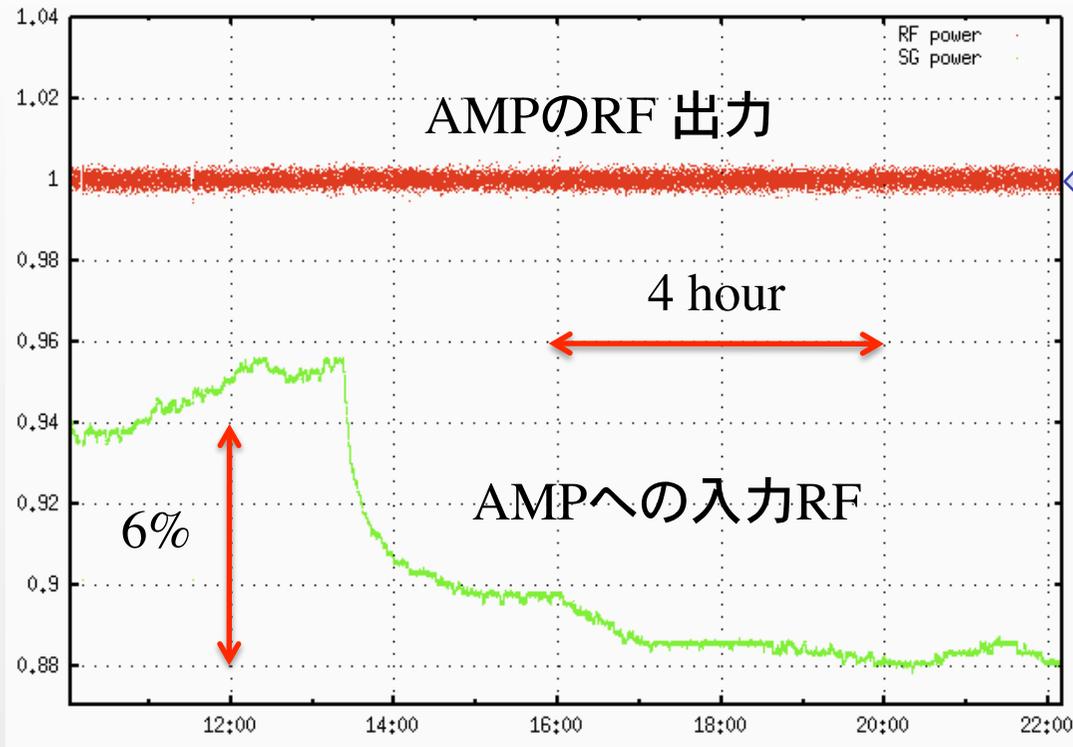
両者の値は1.5%(6W)でconsistent。

Power : 409W (1.5%)

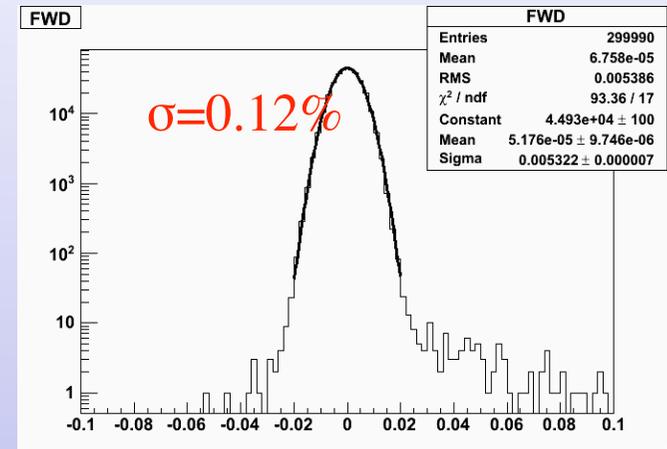
HFSの測定では長時間平均が相対的に
安定していればいい。



遷移RFの安定化 //Power Feedback



AMP直後のPower Meter [dB]

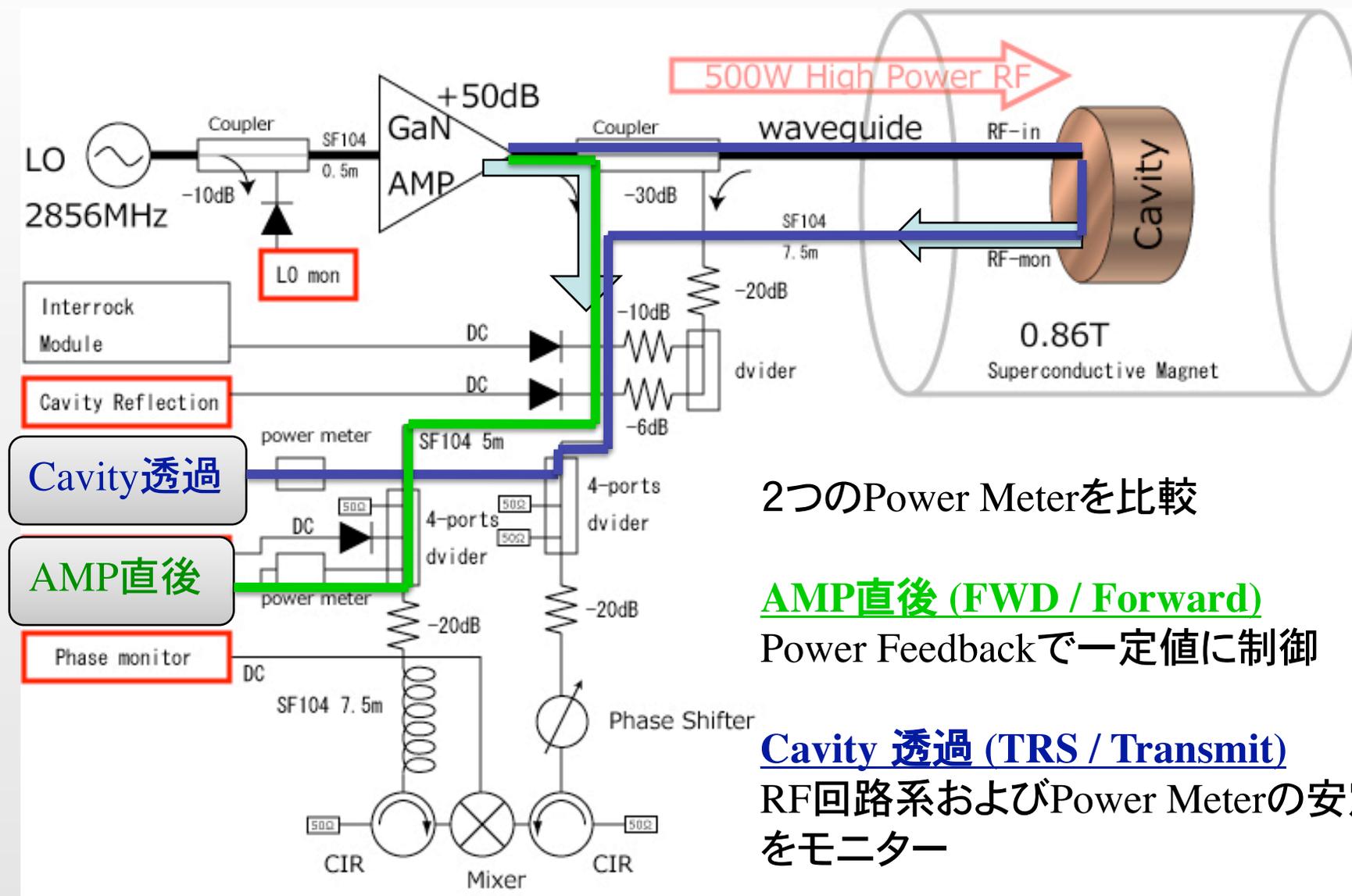


6/30～7/27の約1ヶ月のデータ、
Gauss関数でFit

AMPのGainは室温の変化に伴って大きく変動する。遷移RFのPowerが不安定になるとHFSの測定精度が低下する。出力FeedbackでリアルタイムでAMPに入れるRFの量を調整することでAMP出力を一定に保つ。

AMPは1ヶ月の長期にわたって、安定したPowerを維持した。瞬間値のばらつきは0.12%であり、1時間平均は0.02%以下のばらつきに収まっている。(正常に機能)

遷移RFの安定化 // 遷移RFのモニターと安定性



2つのPower Meterを比較

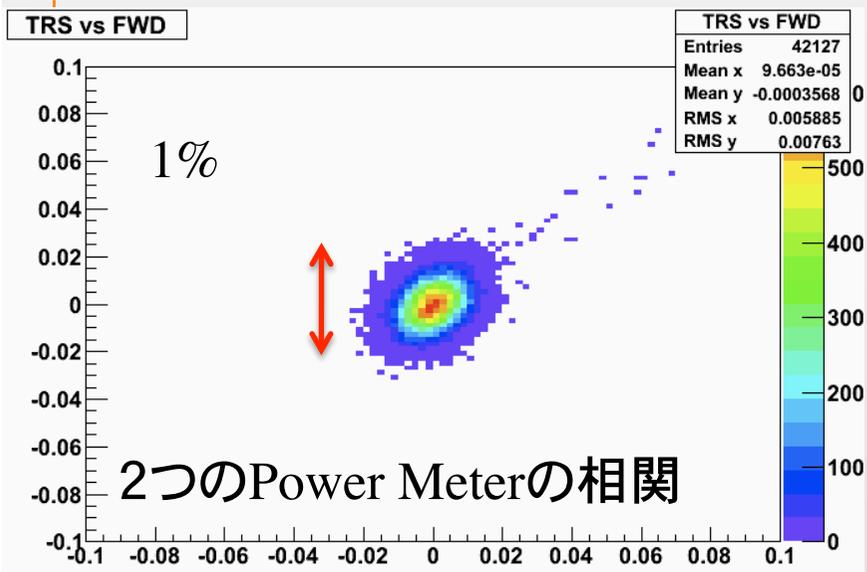
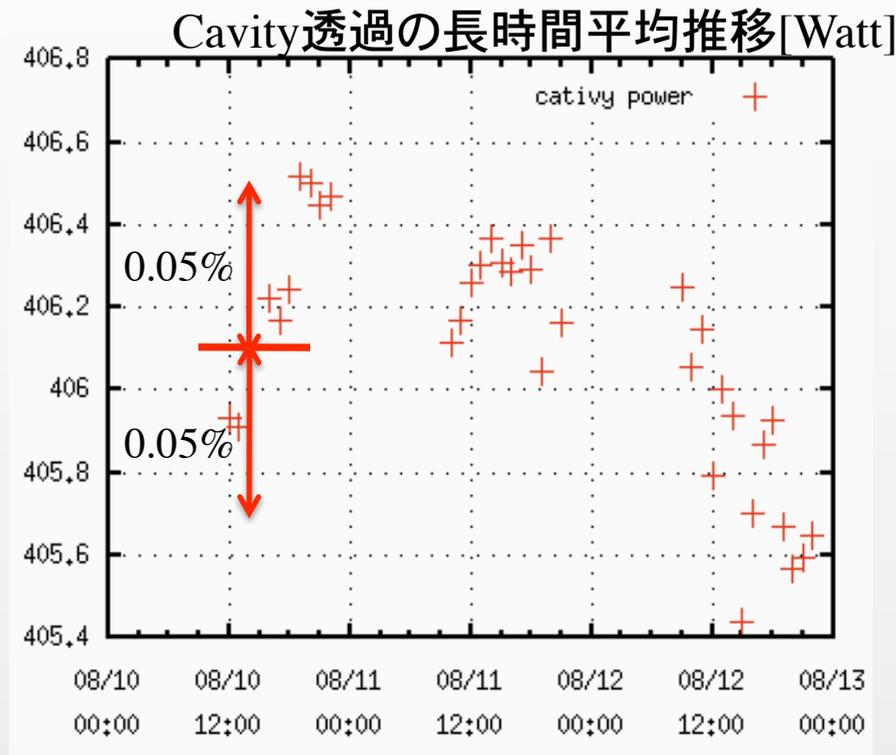
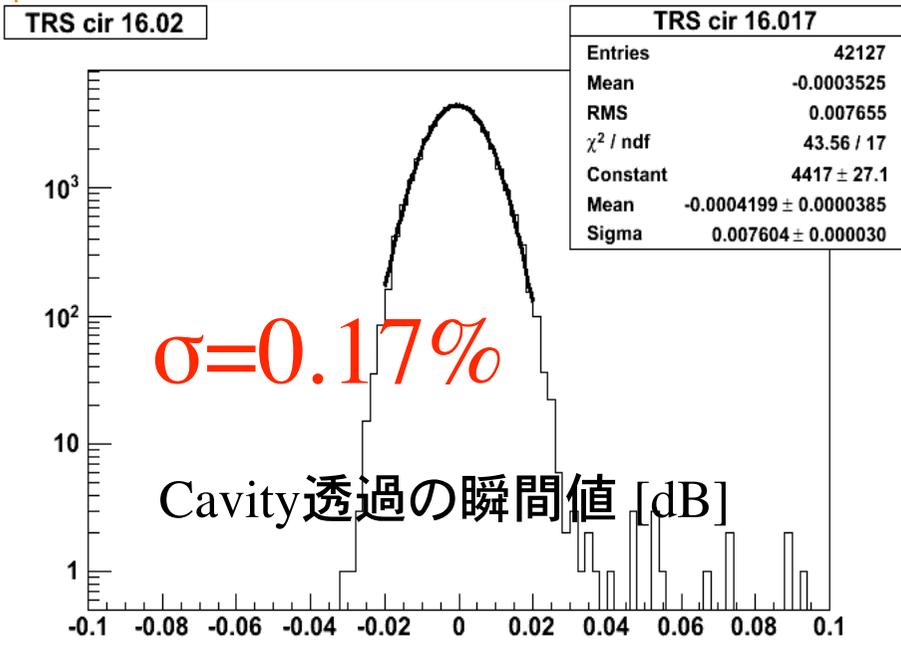
AMP直後 (FWD / Forward)

Power Feedbackで一定値に制御

Cavity 透過 (TRS / Transmit)

RF回路系およびPower Meterの安定性をモニター

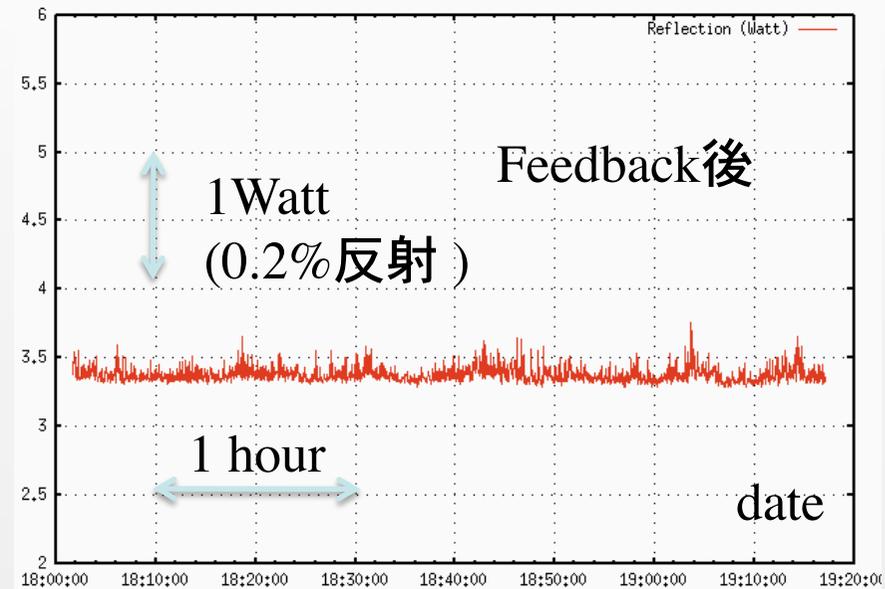
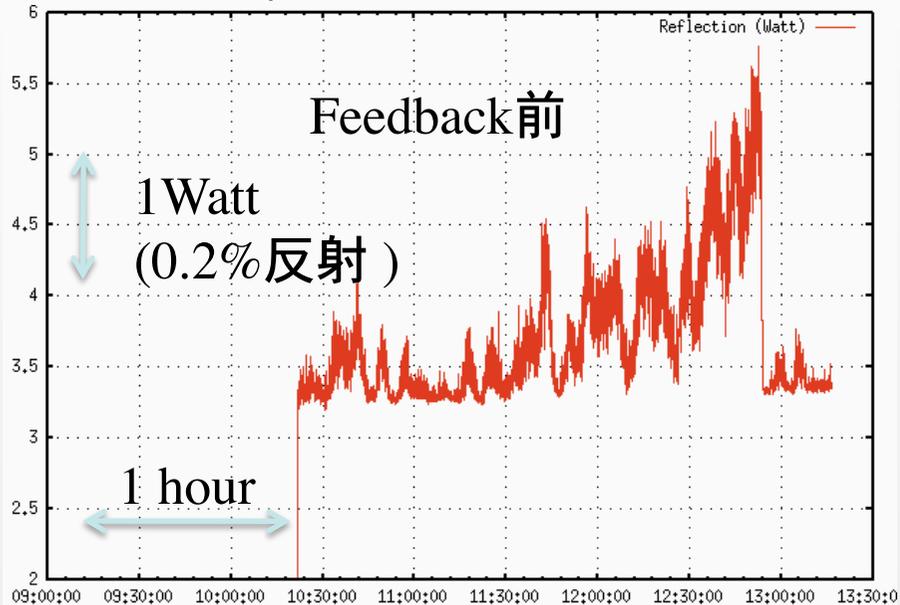
遷移RFのモニター精度と長期安定性



システムの安定性とモニター精度は、AMP直後と Cavity透過のPower meterを比較することで評価している。Cavity透過量もGaussian で分布しており、瞬間値のばらつきは0.17%である。
RUN毎のRF Powerは必要な精度(長時間平均0.1%以下を要請)で制御できている。

周波数フィードバックの安定性

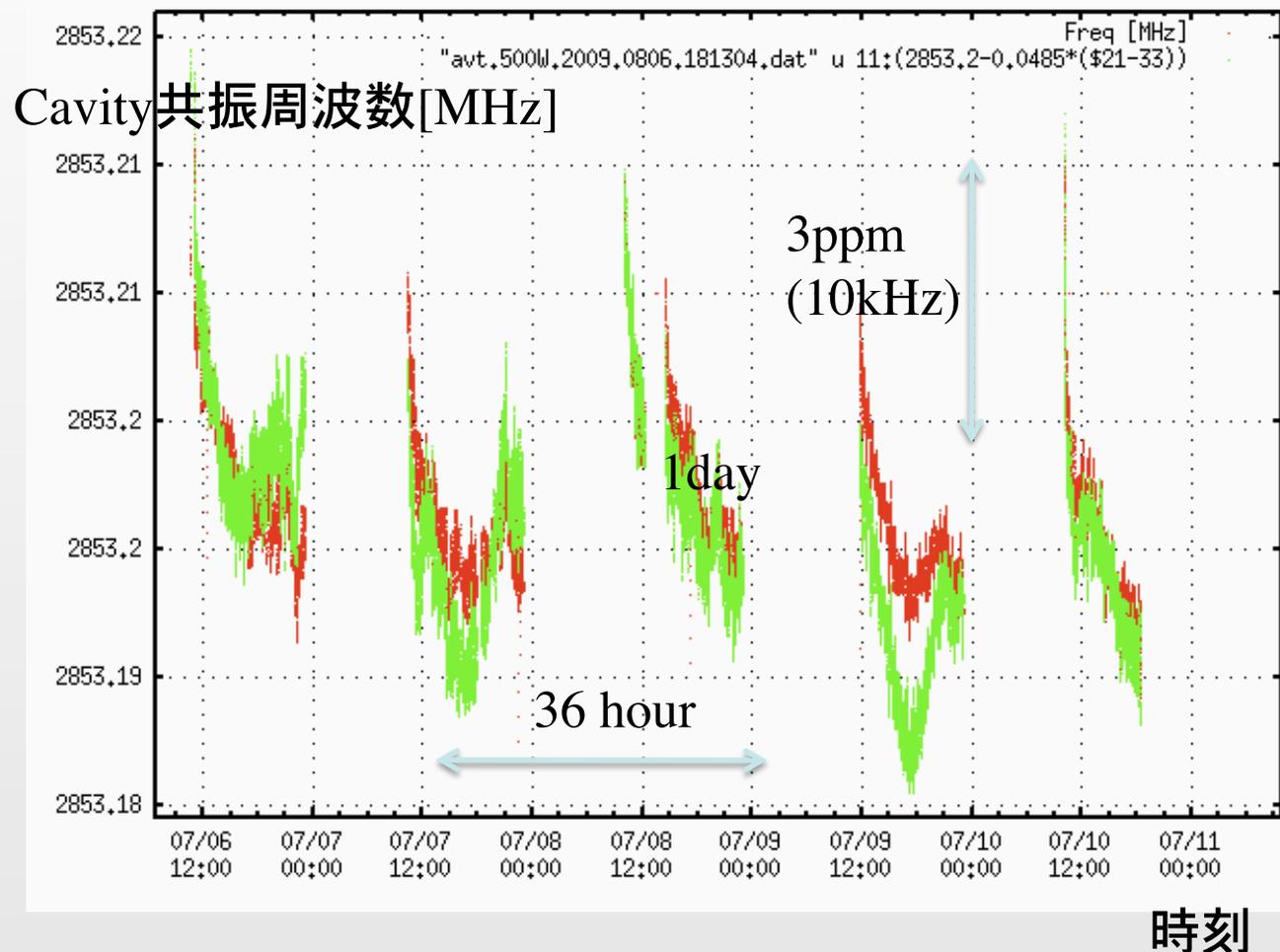
Cavity反射量 [1div=0.5W]



1. HFSの測定は印加磁場と遷移周波数の対応関係を測定するため、Cavityに印加する周波数は本来うごかすべきではない。
2. Cavityの共振周波数は時々刻々と変化するため、インピーダンスのミスマッチによりRFがCavityに入らず反射されるようになる。(RFが不安定化)
3. Cavity内に入るRFの強度が不安定になり、また、大強度(500W)のRFが逆流すると測定回路やAMPを破壊する恐れがあるため、周波数Feedbackを行った。

Cavity 共振周波数の長期変動

共振周波数のドリフトを以下に示す。6ppmのドリフトが存在する



赤：
共振周波数[MHz]

緑：
Cavity温度をオフ
セット+スケール

Cavity温度はチラー
で33°Cに制御

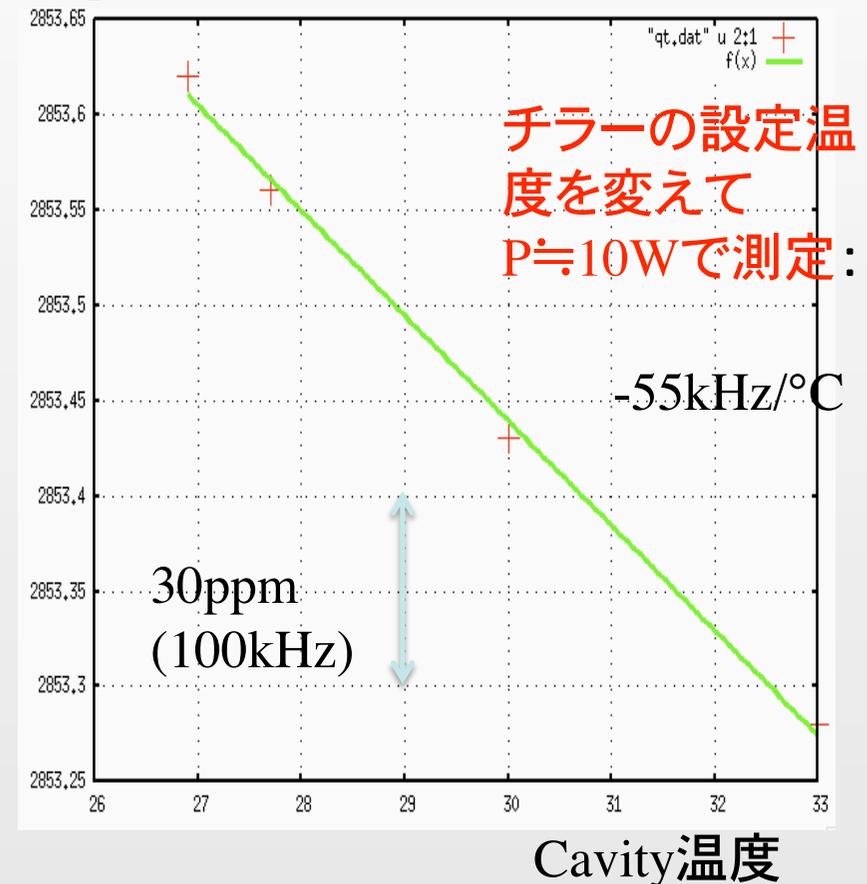
磁場点1つのRun (2.5日)での共振周波数のドリフトは20kHz (6ppm)

共振周波数の長期変動 // 改善

共振周波数のドリフトと制御

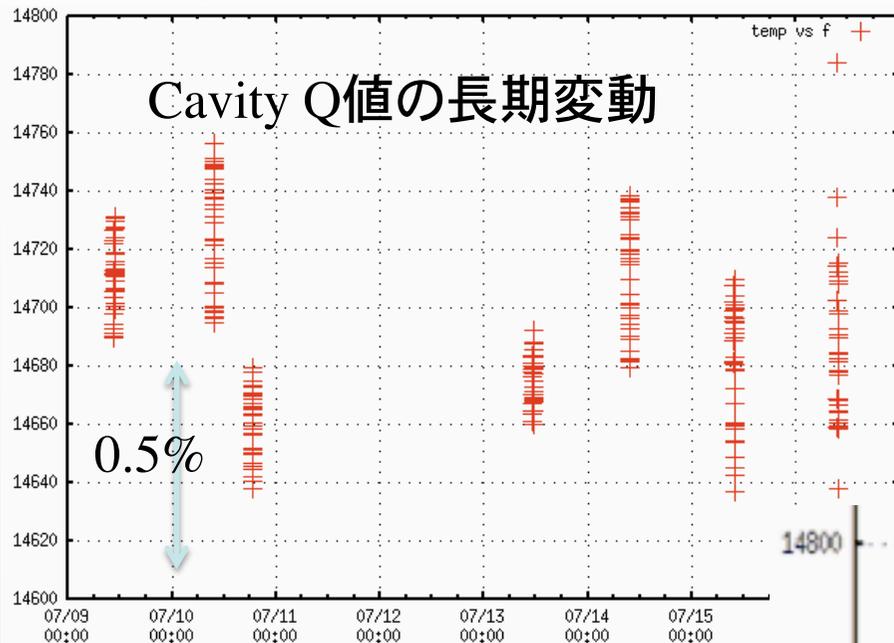
1. 現在のドリフト量は6ppmであり、「ppmで安定」の要請を満たしていない。
2. 共振周波数のドリフトはCavity温度の変化によって説明される(右図)。
3. Cavity温度はMagnet内の気温に依存するため、**熱接触を減らす**ことでドリフトを抑えることができる。
4. 現在、昼間だけの測定Runを繰り返している。これを**24^h連続RUN**にすることで、開始時の大ドリフトを抑えることができる。

共振周波数 [MHz]



以上の改善により、遷移RFの共振周波数をppmの精度で安定させることは可能である。

Cavity Q値の長期安定性



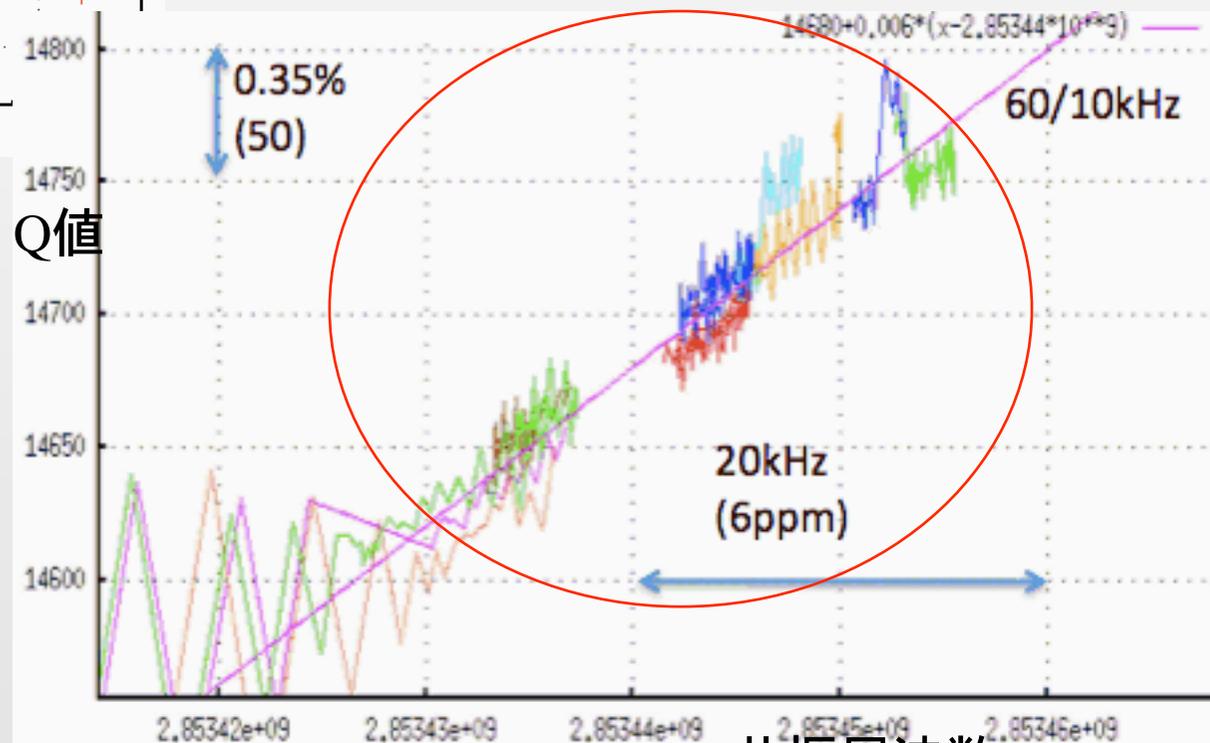
[日付] 1div=1day

Q値ドリフトの原因は調査中だが、Cavity温度や共振周波数と関係している。

特に共振周波数と強く関係しており $\delta Q \sim \pm 0.2\%$ 。共振周波数をppmで安定化させることでQ値のふらつきを抑えることが期待

o-Psの遷移量はCavity Q値と入力Powerの積に比例するため、0.1%で安定であるか、リアルタイムでモニターできることを要請。

Qの測定値は長期変動で1%程度のドリフトが存在(現在のQの精度)

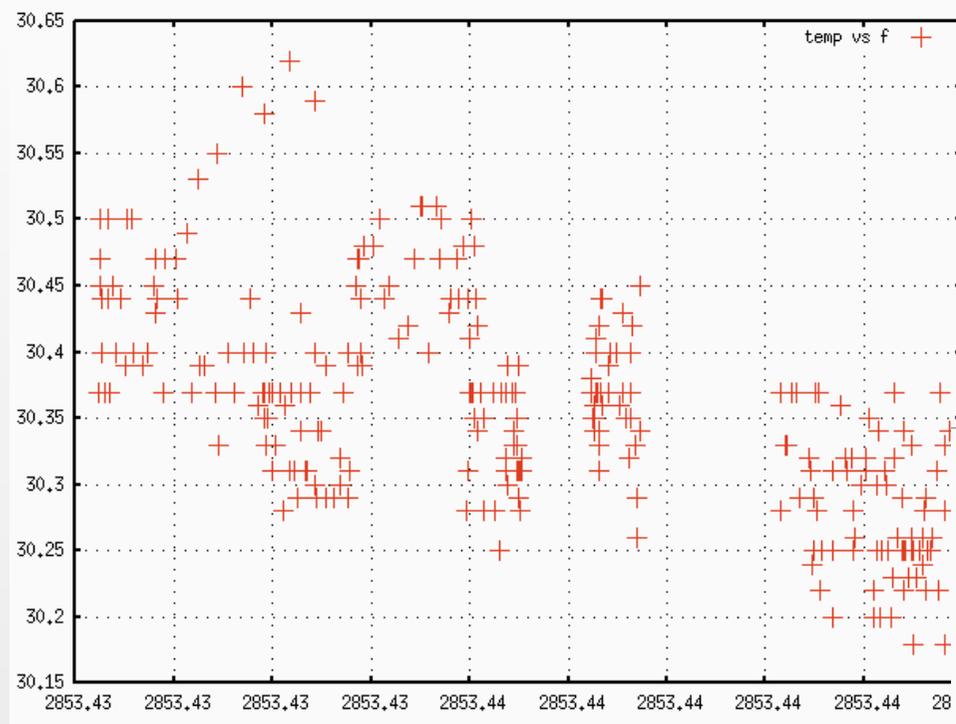


まとめ

1. 2009年6月からKEK低温センターでHFSの第一回測定RUNを開始し、現在も測定を続けている。
2. 遷移RFをモニターおよびコントロールする回路をデザインし、作成した。遷移RFシステムは正常に稼働しており、RF出力の長期安定性は必要な0.1%を達成した。周波数ドリフトは6ppm存在するが改善によりppmの精度は可能である。Cavity Q値のモニター量は1%の幅でドリフトしている。原因は調査中だが周波数ドリフトを抑えることで、Q値のふらつきは抑えられる推定される。
3. 測定の結果については次の石田が話します。

Back Up

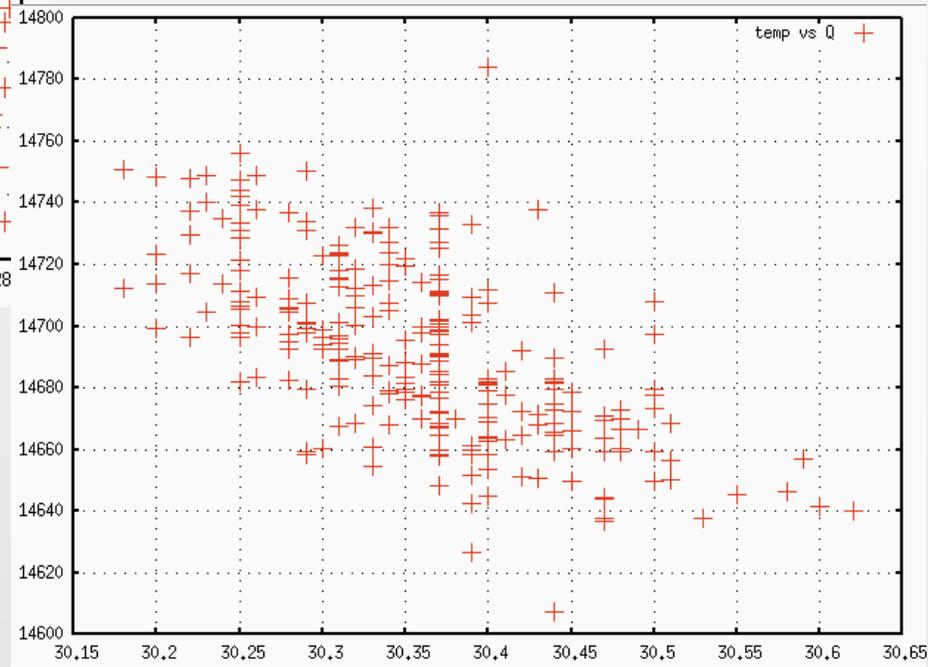
温度との相関



共振周波数

温度の精度が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

Q値



実験の概要 // RFシステムと機能

RFシステムの構成:3つの機能

ポジトロニウムのHFSをppmで実験で必要な統計と精度は以下のようなになる。

項目	仕様
遷移RFの強度	十分な量(~10%)の遷移を行うには、RF Cavityに 500W の大強度RFを安定して供給する必要がある。
周波数管理と Feedback	Cavity共振周波数のRFを正確に入れるとともに、 +/-1ppm (3kHz) で安定化させる必要がある。
遷移RFのモニター精度	HFSのppm精度での測定のためにはRFが長時間積分で 0.1% でモニターで/コントロールきる必要がある。

共振周波数の長期変動

共振周波数の安定性の目標

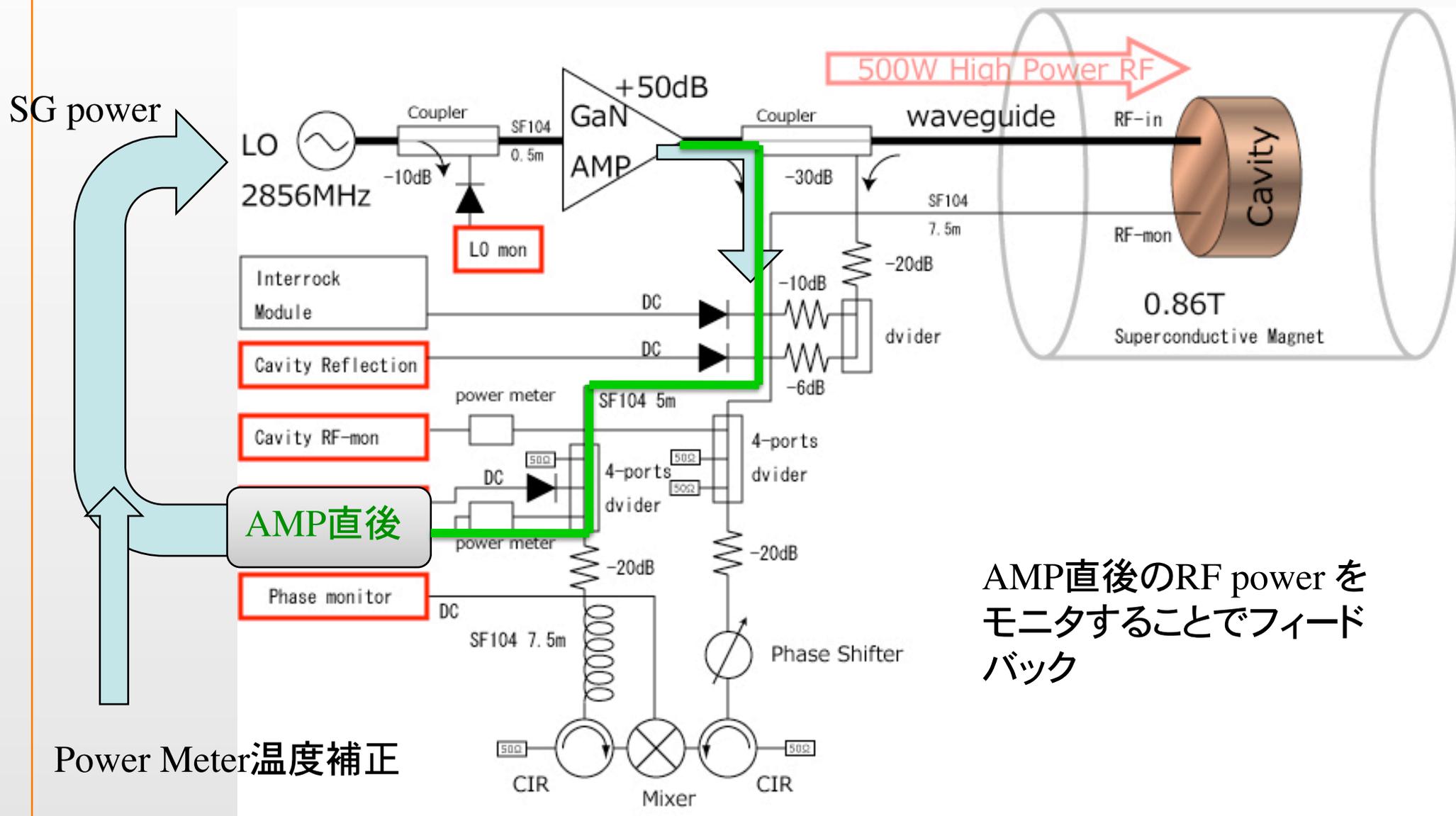
1. ある磁場の値で1点測定するのに**2.5日のRun**が必要である。
2. その間に ± 1 ppm 全幅(2ppm/6kHz)以内で共振周波数が収まっていることが望ましい。

現在、1つの磁場点を測定する間に共振周波数がドリフトする量

～**6ppm**～**20kHz** (2.5day run)

1. 共振周波数のドリフトは**20kHz/day**
(最初の1~2hをCutすれば～**10kHz/day** (3ppm))
2. 長期ドリフト成分は**20kHz/mon** (6ppm) 程度

Power Feedback System //



AMP直後のRF power を
モニタすることでフィード
バック

AMP直後 vs Cavity透過(拡大図)

