

MuSEUM実験に用いる磁場マッピング装置の開発

2022/11/17

Hiroki Tada (Nagoya University)

For MuSEUM collaboration

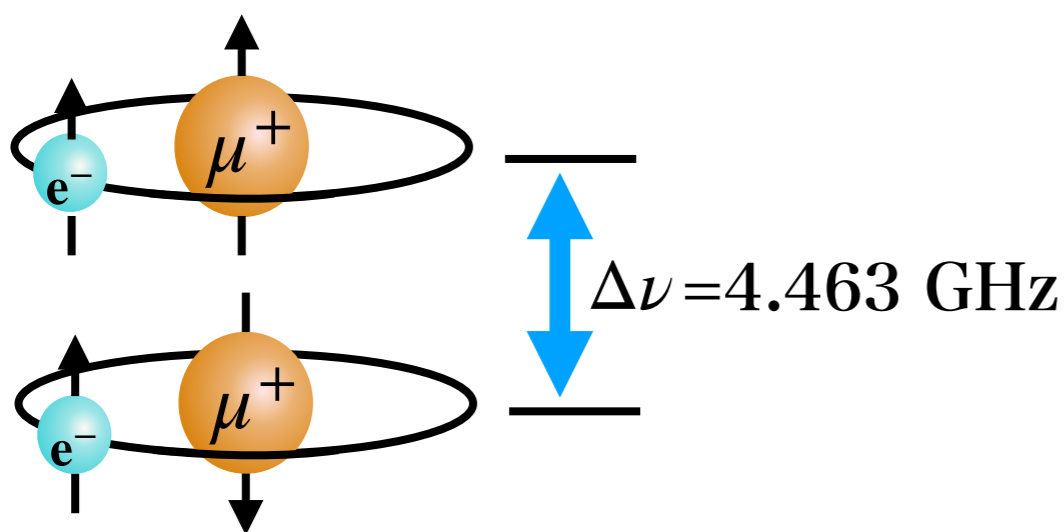
MuSEUM (Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave)

ミュオニウム(Mu)

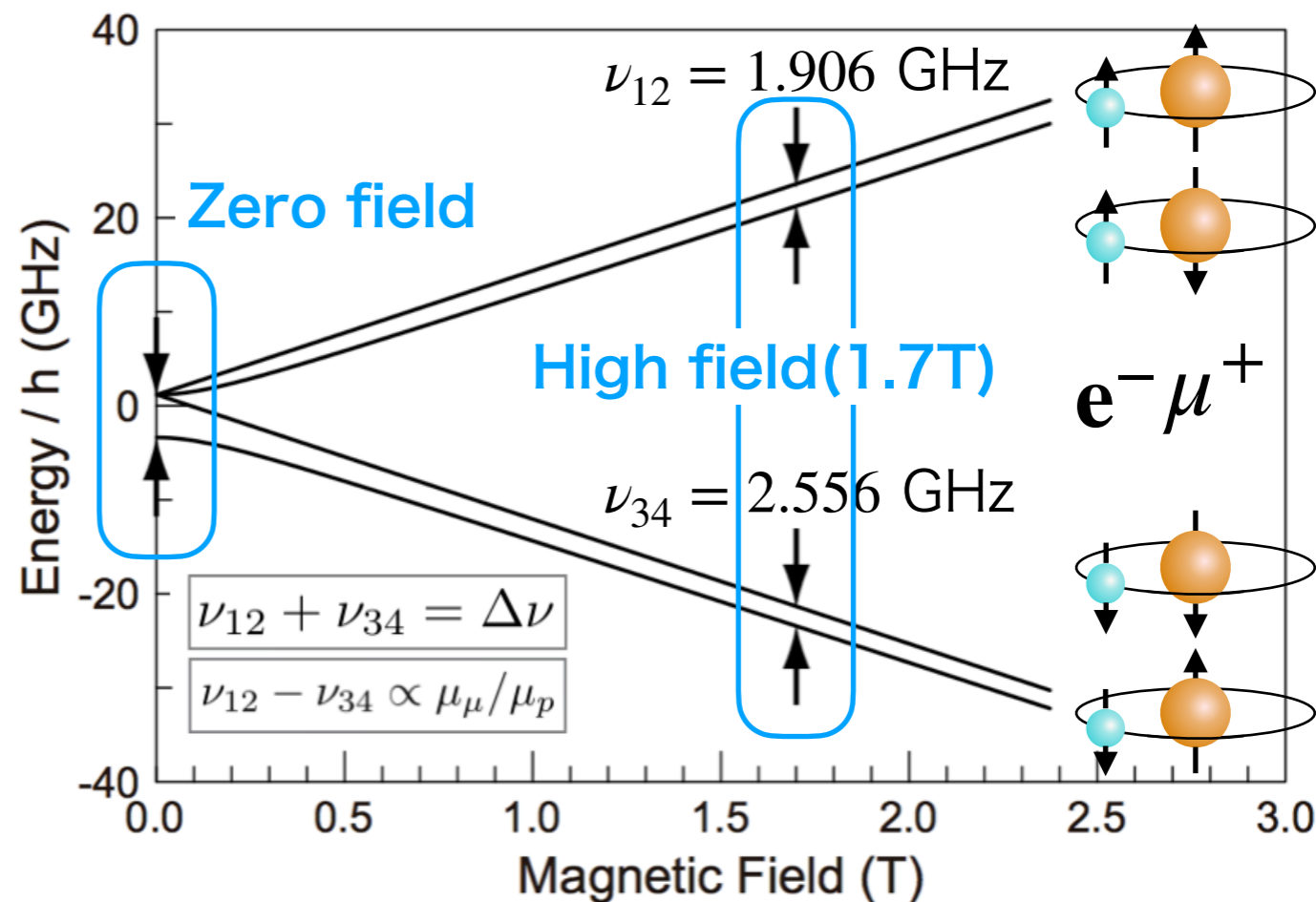
- 正ミュオンと電子によるレプトン二体系
- 陽子と異なり有限体積効果を持たない
- 比較的長寿命 ($2.2 \mu\text{s}$)



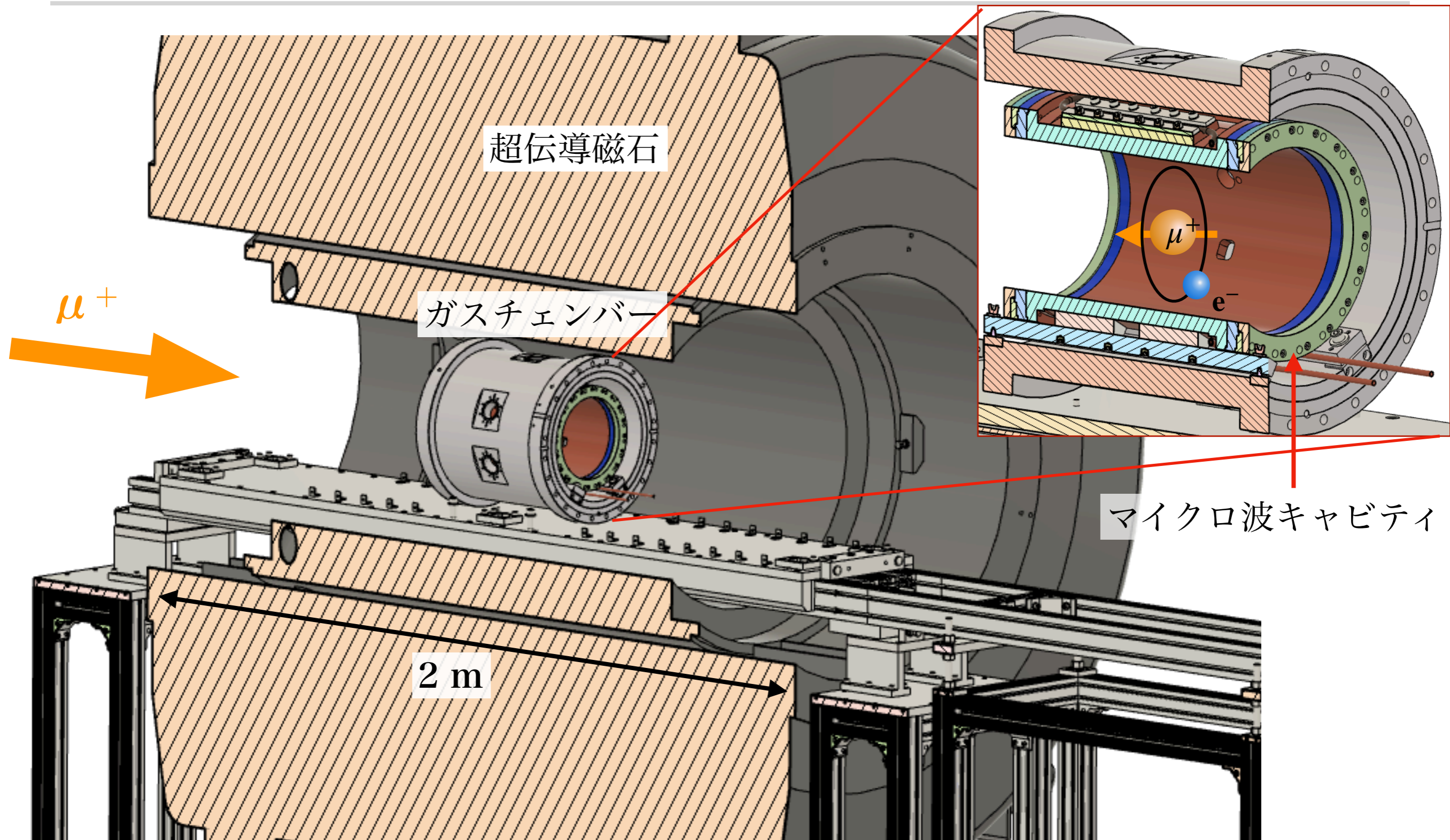
- 超微細構造 (MuHFS: $\Delta\nu$)



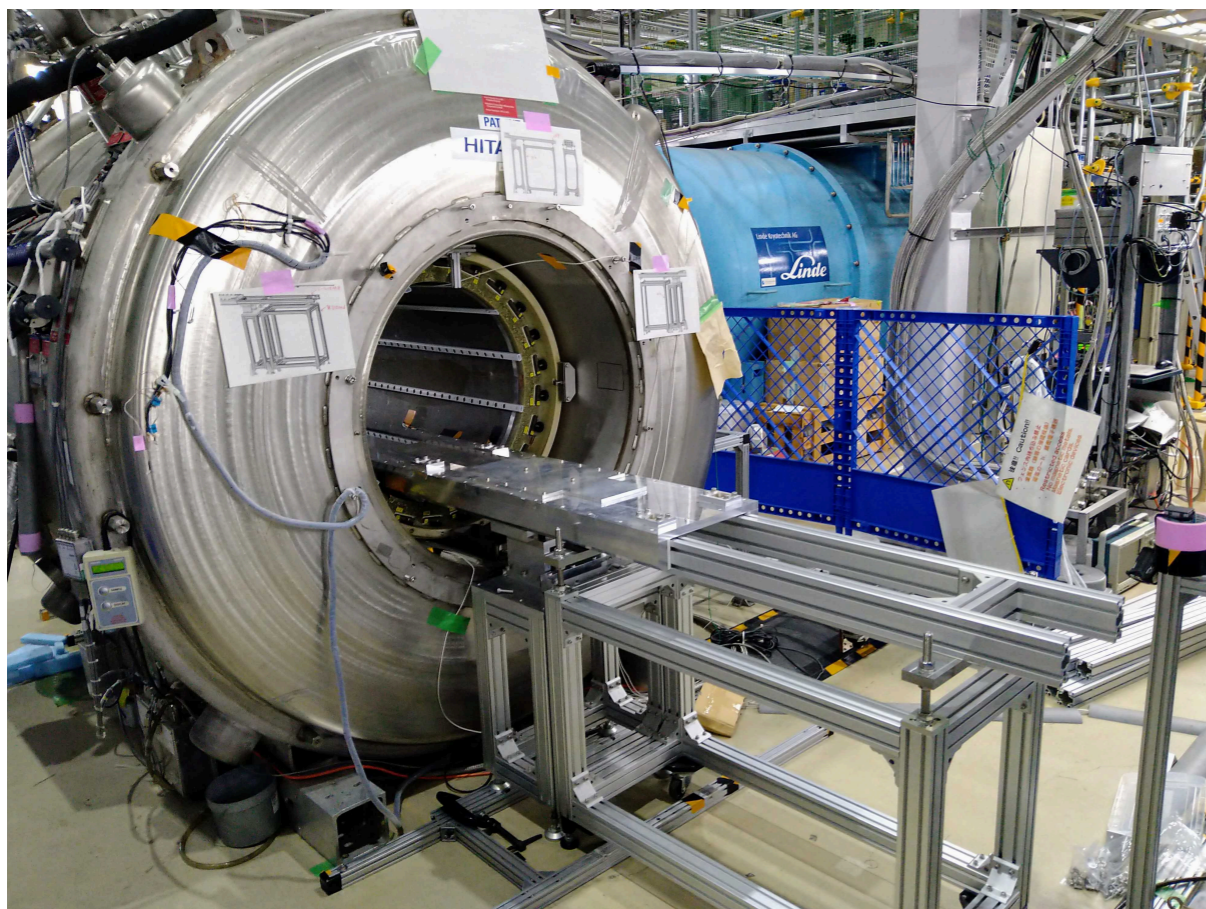
- 2種類の測定方法



実験セットアップ @J-PARC MLF H1 Line



超伝導磁石とシミング



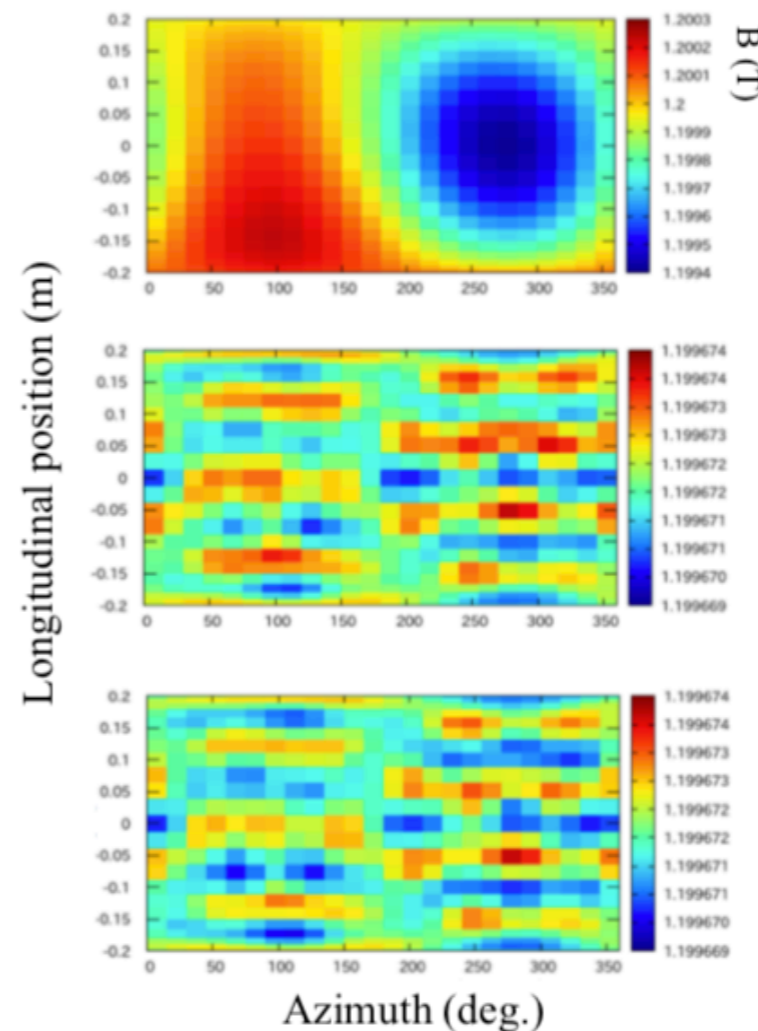
超伝導磁石による磁場：1.7 T

求められる領域磁場は

- 直径 200 mm、長さ 300 mm の回転楕円体の領域に対して 0.2 ppm (peak-to-peak) の均一度
- 実験中に ± 0.1 ppm の安定性

M. Abe, magn. reson. med. sci., vol. 16, no.4, Oct. Pp. 284-296, 2017.

K. Sasaki, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 10.1109/TASC.2022.3190803 (2022).



Iron shim plates
341 ppm (p-p)

Nickel films
0.28 ppm (p-p)

Magnetic putty.
0.17 ppm (p-p)

パッシブシミング法によるシミング過程
(1.2 T)

日立から借りた磁場測定器を使用

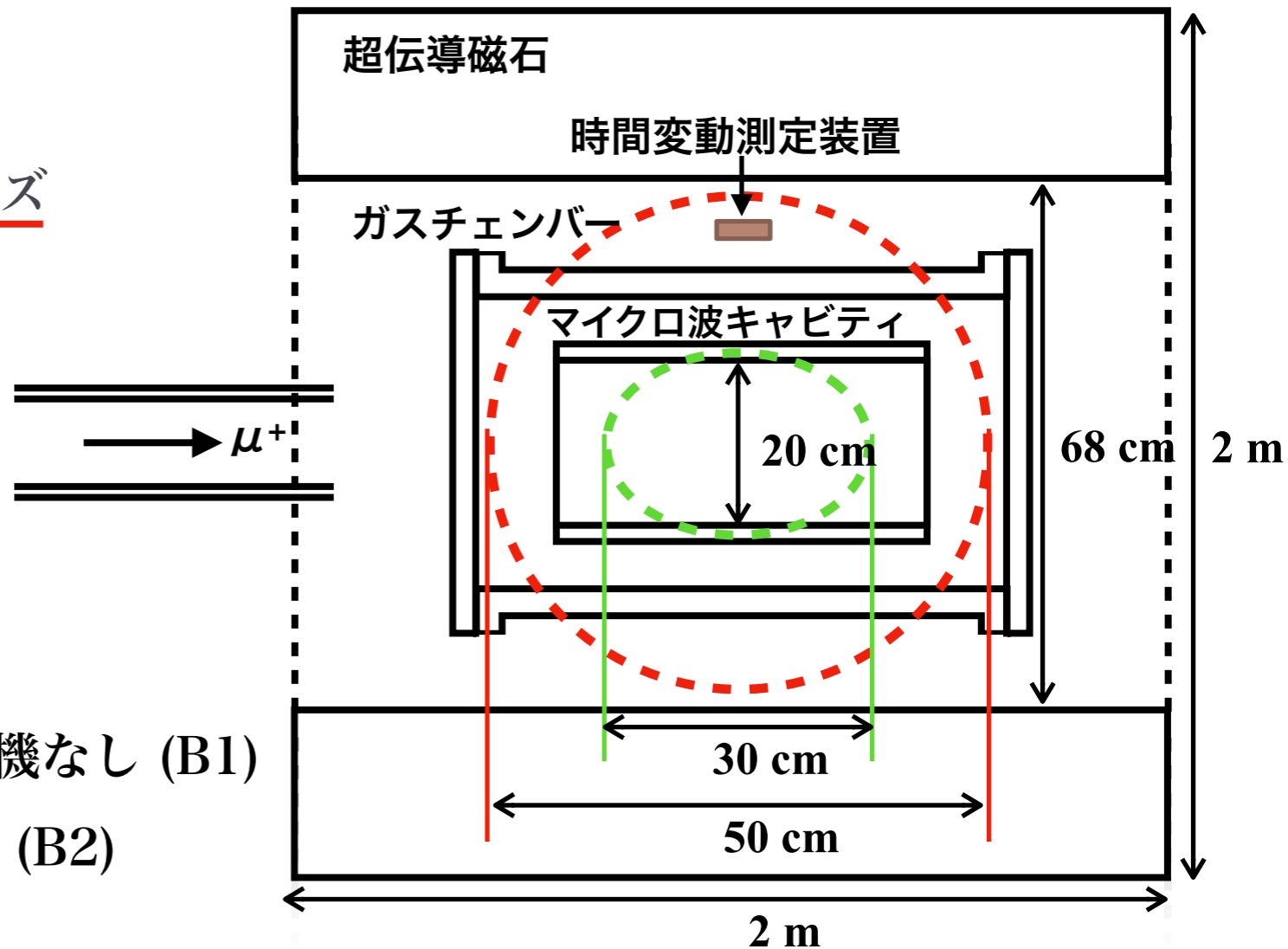
必要な磁場測定項目

プローブの種類

- A. 校正用標準プローブ
- B. 空間分布測定装置
 - B1. シミング (磁場調整) 用：大サイズ
 - B2. 領域確認用：小サイズ
- C. 時間変動測定装置

磁場測定項目

- 1. 絶対値校正用均一磁場調整 (B1)
- 2. 磁場測定器絶対値校正 (全て)
- 3. ビームライン上でのシミング：計測機なし (B1)
- 4. 領域磁場確認・微調整：計測機あり (B2)
- 5. ビーム実験中
 - ① 時間変動測定 (C)
 - ② 領域磁場確認 (B2)
 - ③ (絶対値校正) (A)



実験装置の概念図

NMR プローブ

3種類のプローブを開発

A) 校正用標準プローブ (Almost finished)

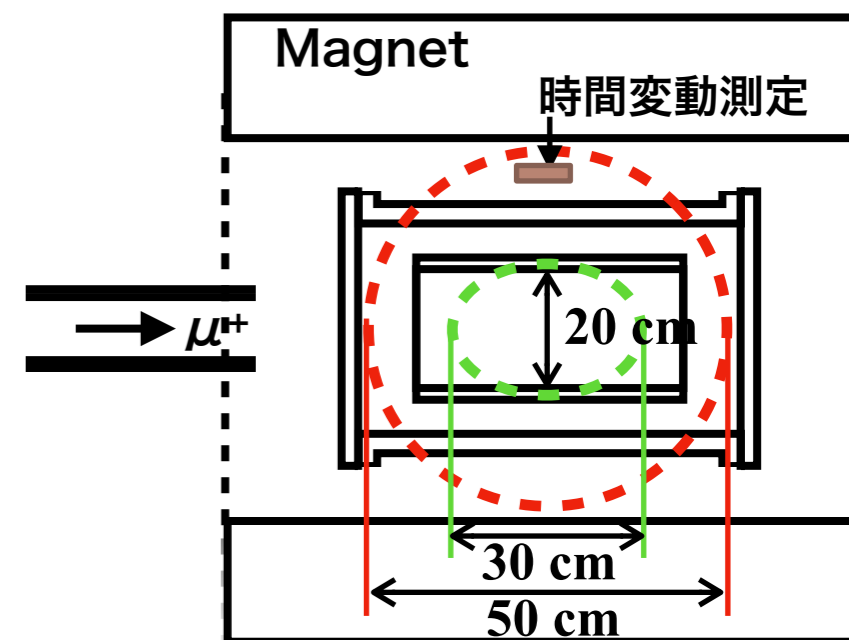
- 他を校正するための高精度NMRプローブ
- 15ppbの精度が達成されている
- 日本とアメリカの共同研究で、相互校正が行われている

B) 空間分布測定用装置

- 磁場をマッピングする多チャンネルの回転式NMRプローブ
- 大, 小サイズの2種類を開発
- シミングに使用
- 試作機のテストを終え
実機制作中

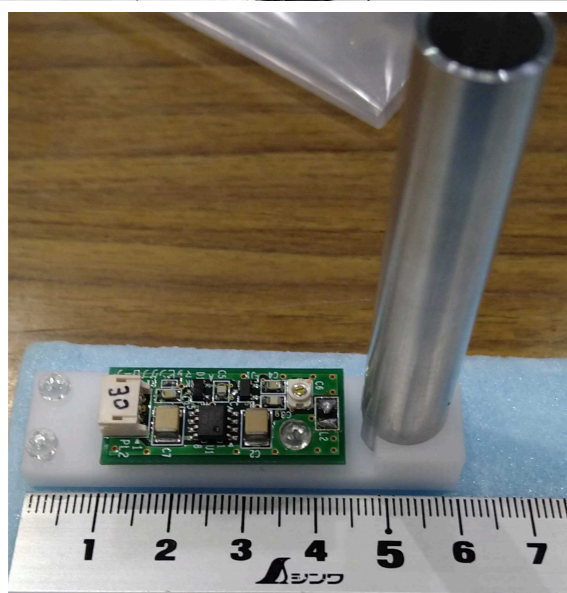
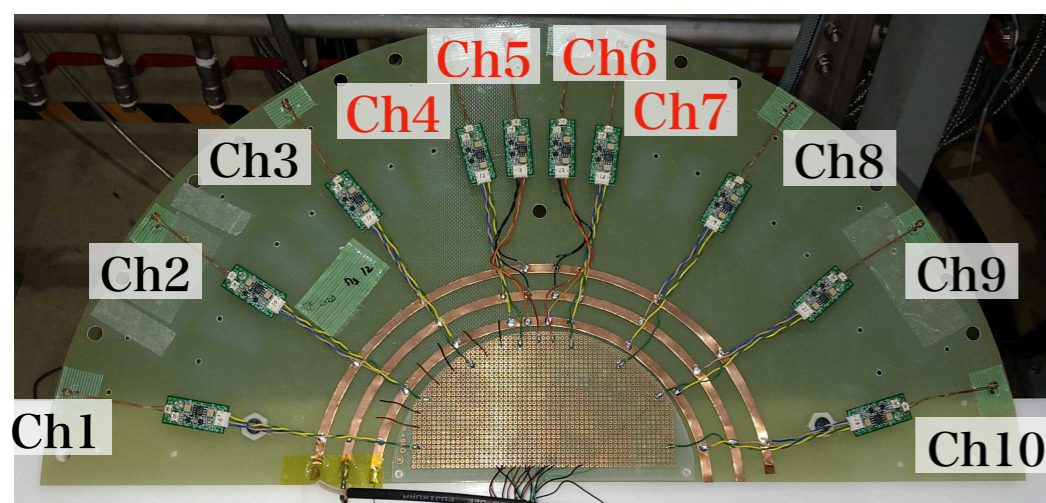
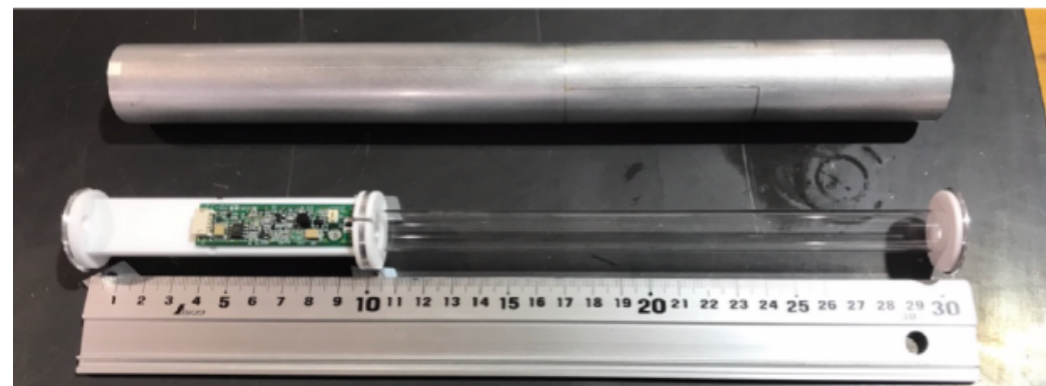
C) 時間変動測定用装置

- 実験中の磁場の安定性を確認するための小型プローブ



H. Yamaguchi, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 9000904

H. Tada et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 10.1109/TASC.2022.3190264 (2022).



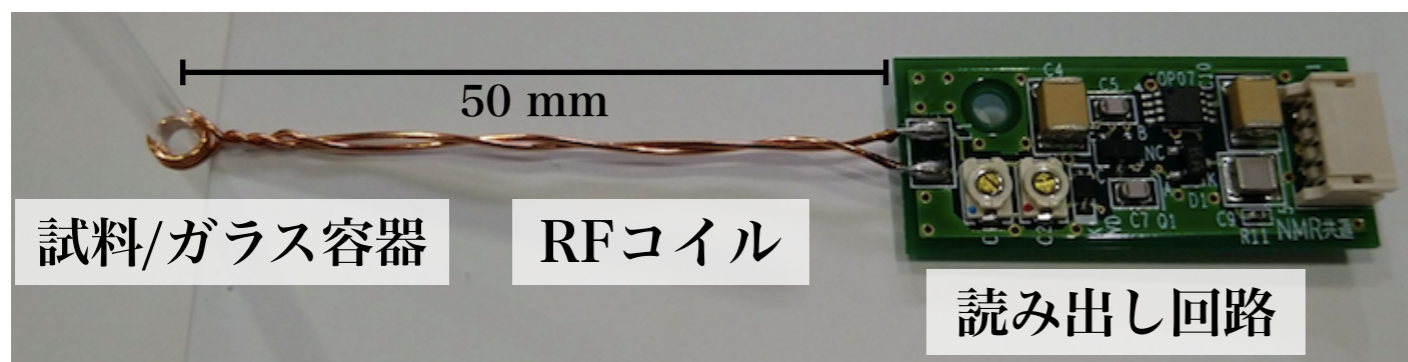
NMR プローブ

- 空間分布測定用装置
- 時間変動測定用装置

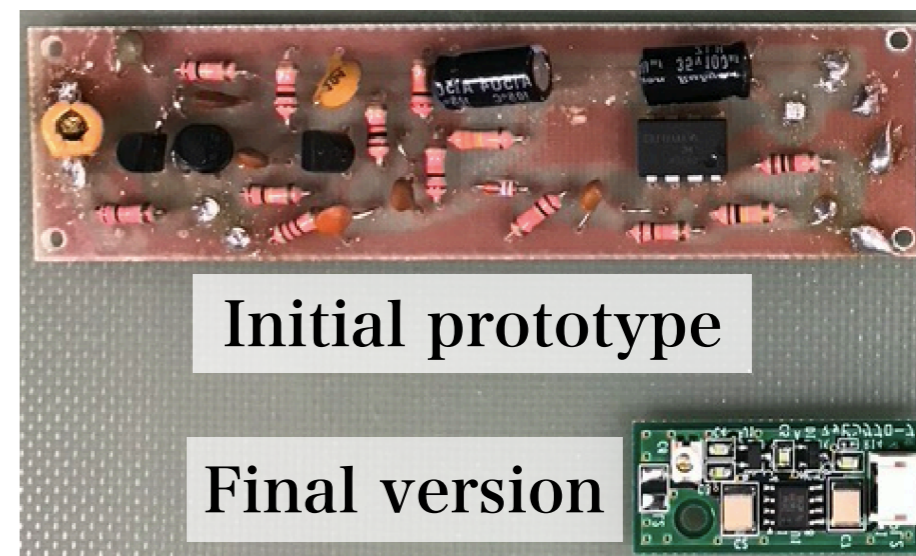
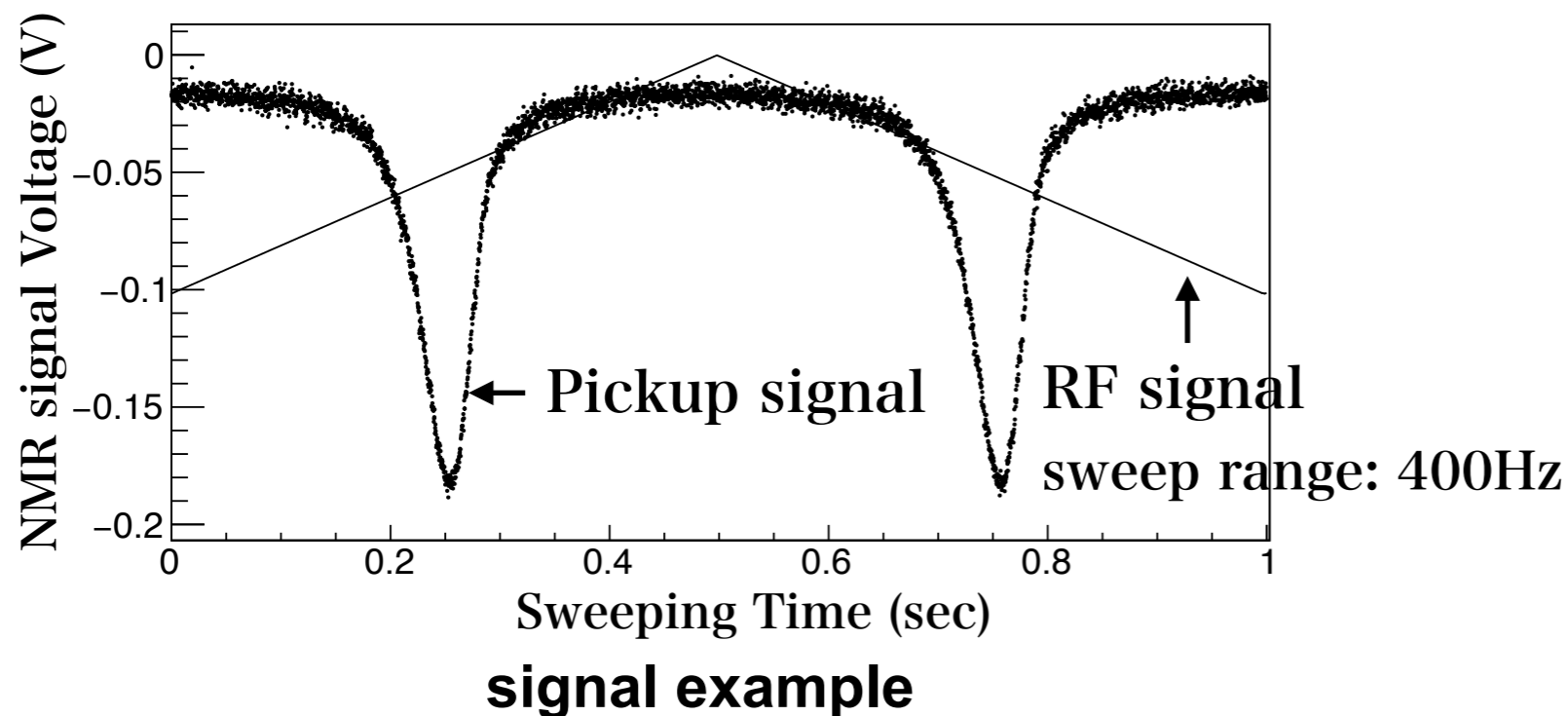
使用するプローブの基本設計は共通

周波数変調のCW-NMRを使用

→変調コイルがいらないため小型化が可能



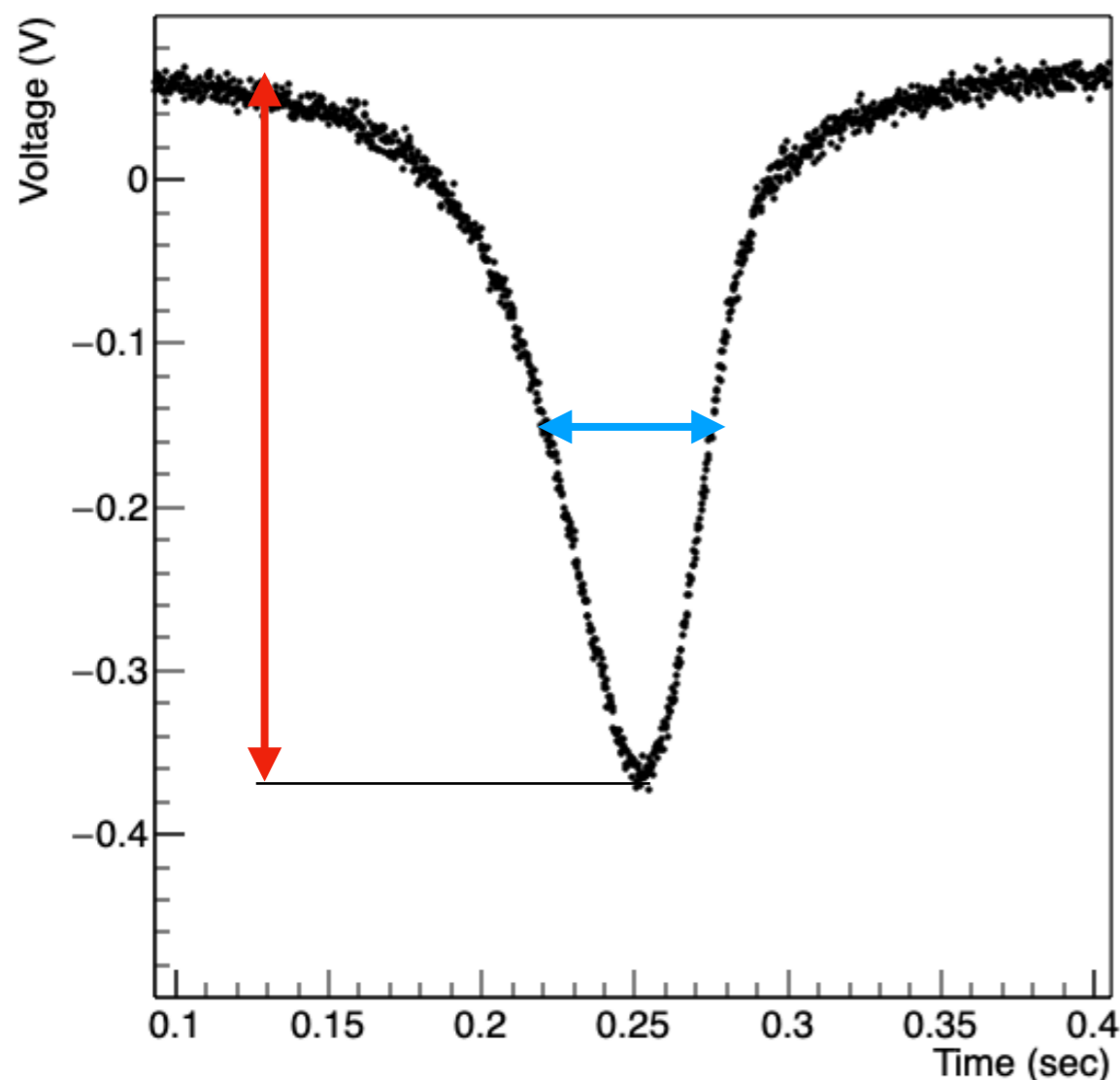
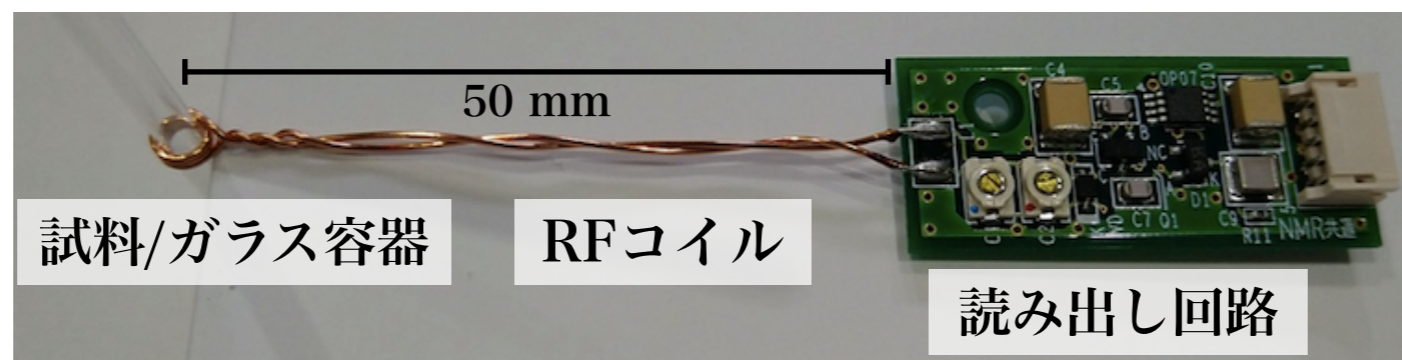
1 ch NMR probe



読出し回路の影響

- Initial prototype: 96 ppb @ 100mm
- Final version: 23 ppb @ 20mm

NMRプローブ 開発パラメータ



信号形状に影響を与えるパラメータ

- ▶ 試料 : 信号幅, 構造
- ▶ ガラス容器径 : 信号レベル
- ▶ RFコイル(材質, コイル径, ワイヤ径) : 幅, 構造, レベル

各パラメータを検討し、綺麗な信号形状、中心地の決定精度が高いものを選別

NMRプローブ 開発パラメータ

開発パラメータ

- 試料

- ▶ 純水：緩和時間長い、信号幅狭い、変な磁場分布があるとピークが複数出る
- ▶ 他（ MnCl_2 溶液、ワセリン）：緩和時間短い、ケミカルシフト、信号幅広い、多少の磁場分布は見えなくなる

- ガラス容器 (試験管型)

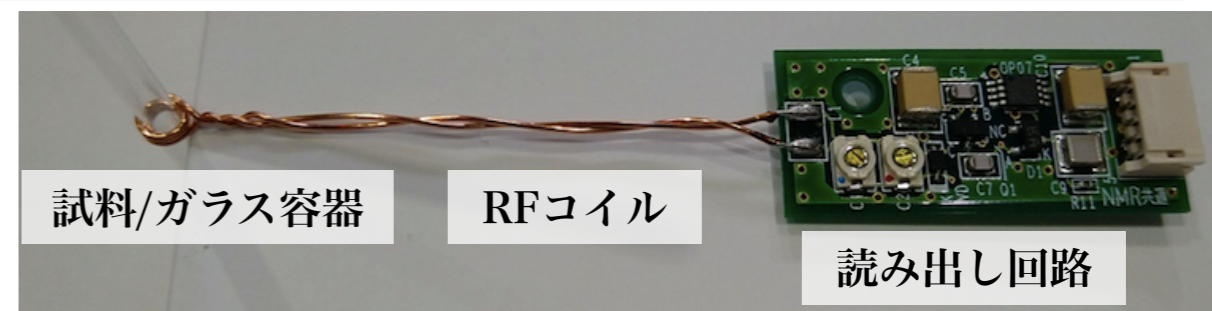
- ▶ 太さ ->信号レベル、磁場不均一の影響
- ▶ 長さ：端部効果により波形が歪む可能性

- RFコイル

- ▶ 材質：Cu or 非磁性
- ▶ ワイヤ径：細い方が磁性は低い、Q値も落ちる
- ▶ コイル直径：磁性の影響、プローブ寸法
- ▶ 回路との距離：磁性的に離したい(延長部Cの共振周波数へ影響)

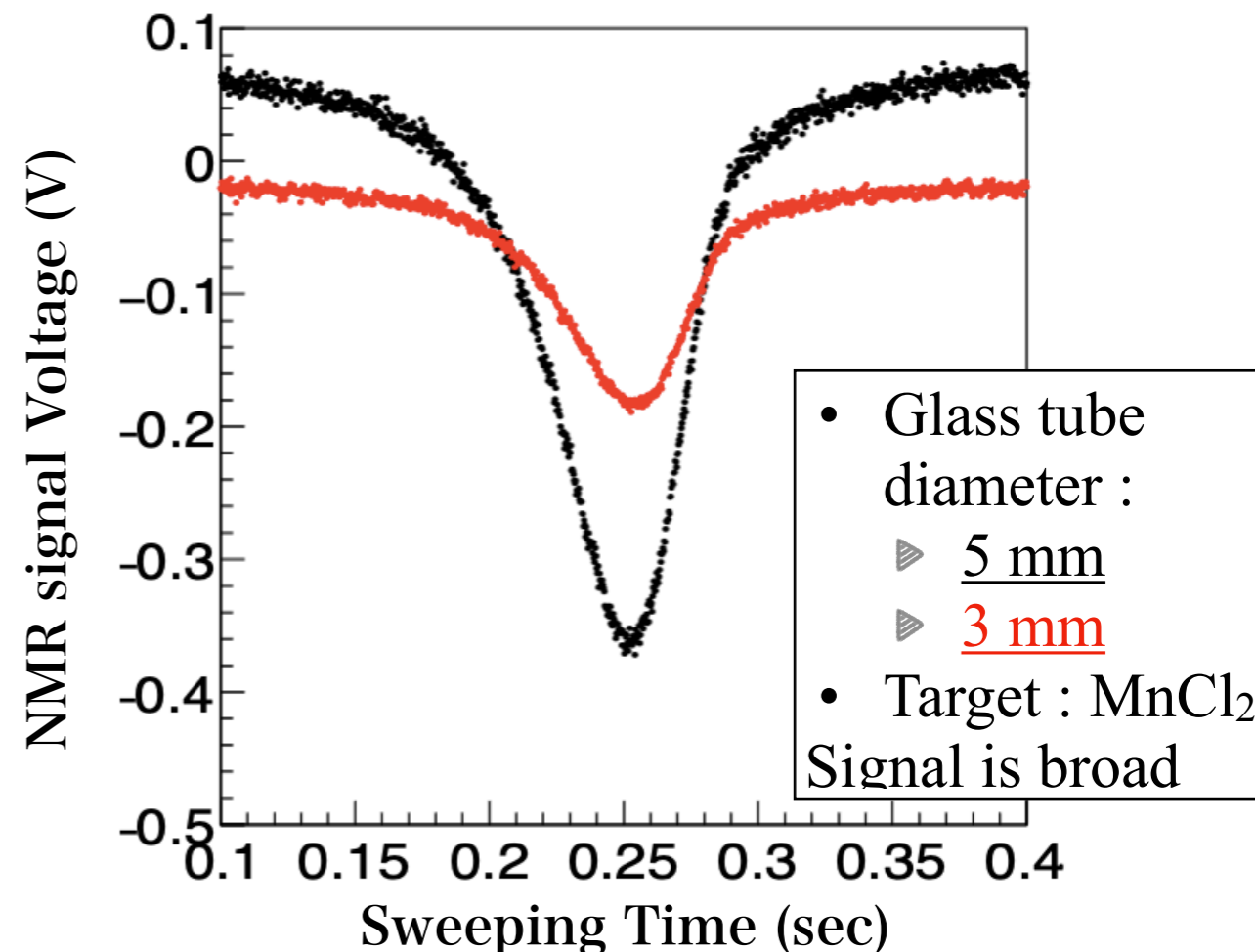
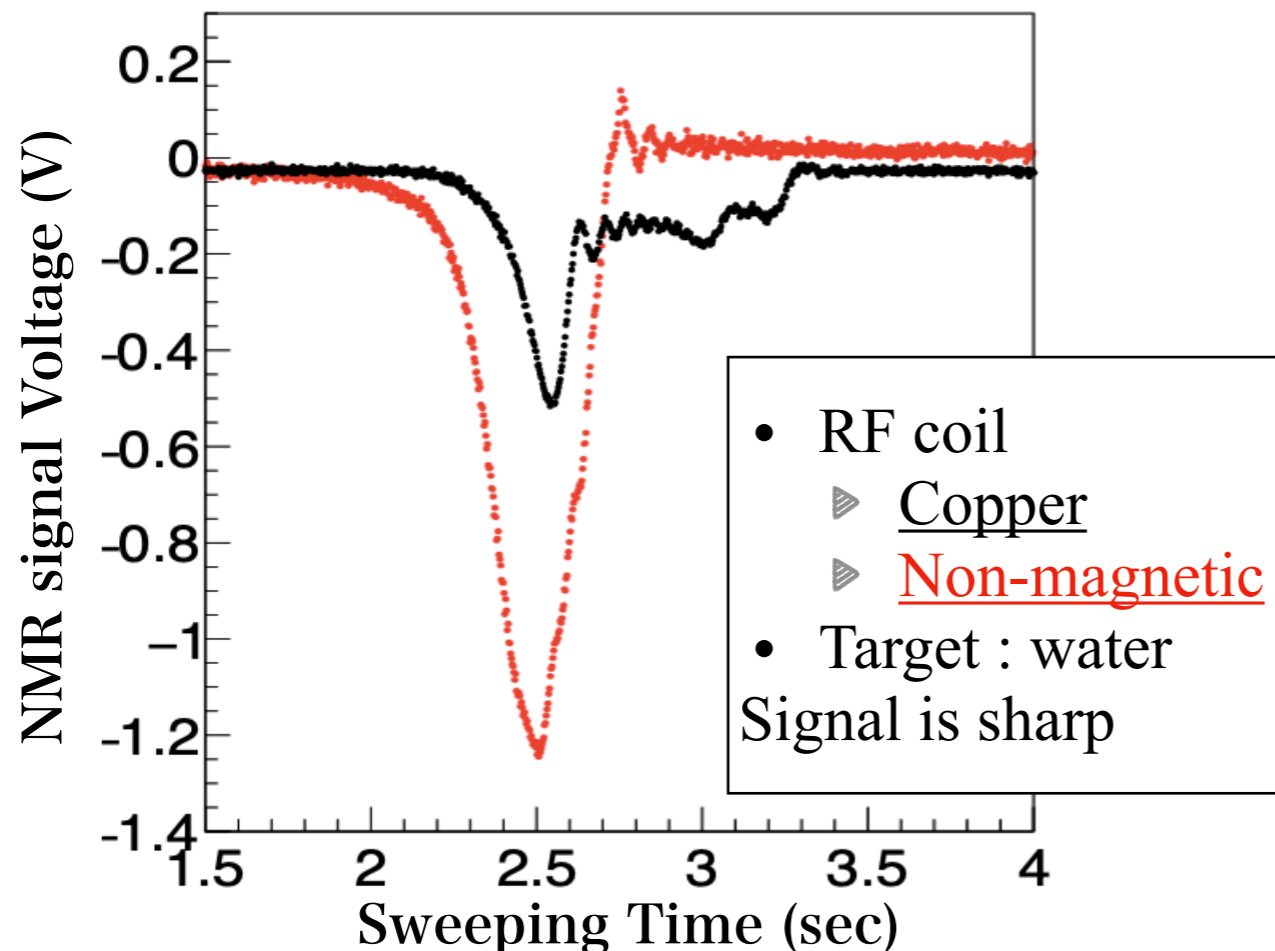
- 読出回路基板構成

- ▶ 磁性の小さい素子の使用、チューンの容易さ



Material effects

- 試料、ガラス容器、RFコイルのパラメータが信号に与える影響の検証



- コイルの持つ磁性の影響
→純銅ワイヤでは信号の分裂が激しい
- サンプル→信号幅に大きな影響を与える
MnCl₂溶液は幅広いがきれいなピークを持つ
(測定時間が短い)

- 陽子ターゲット量が信号レベルに影響
→3 mmでも十分な信号を確認

非磁性ワイヤーとガラス管3mmの組み合わせを採用

Material effects

銅ワイヤー 0.5mm

信号が細かい

信号が幅広い

ガラス管 / コイル	水	MnCl ₂ 溶液
5 mm / 5 mm	分裂 ×	非対称 △
3 mm / 3 mm	分裂 ×	非対称 △

銅ワイヤー 0.3mm

ガラス管 / コイル	水	MnCl ₂ 溶液
5 mm / 5 mm	分裂 ×	○
3 mm / 3 mm	分裂 ×	○

非磁性ワイヤー 0.5mm

ガラス管 / コイル	水	MnCl ₂ 溶液
5 mm / 5 mm	内部構造 △	○
3 mm / 3 mm	内部構造 △	○

コイル磁性の
影響：小

Ch間でのクロス
トークの影響から
コイル径は小さい
方が望ましい

水とMnCl₂溶液はシミング精度に応じて使い分けが必要

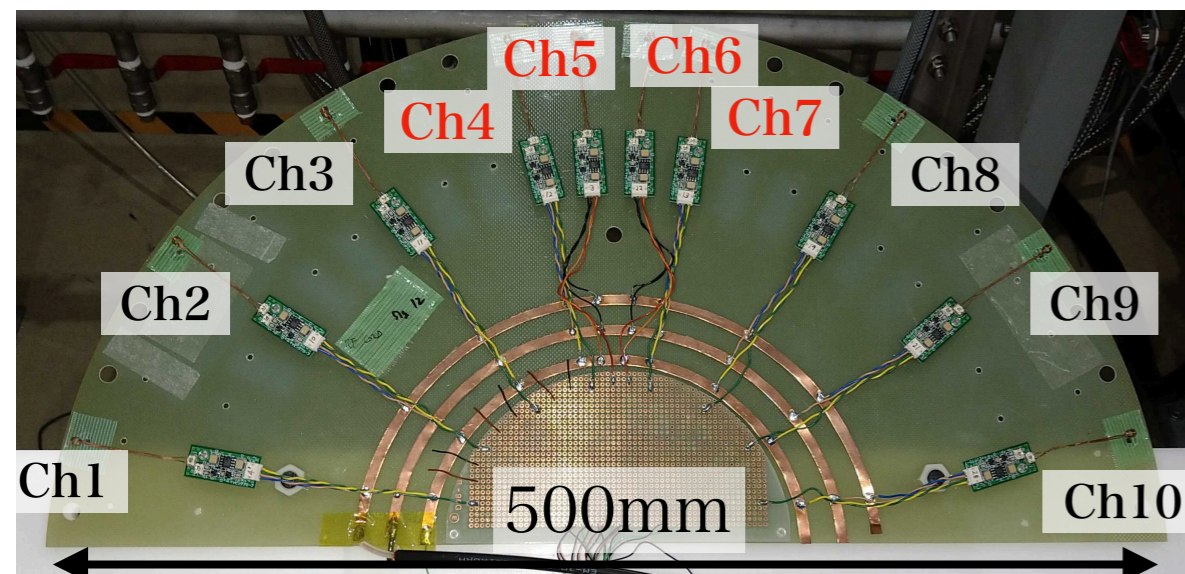
NMR プローブ

3種類のプローブを開発



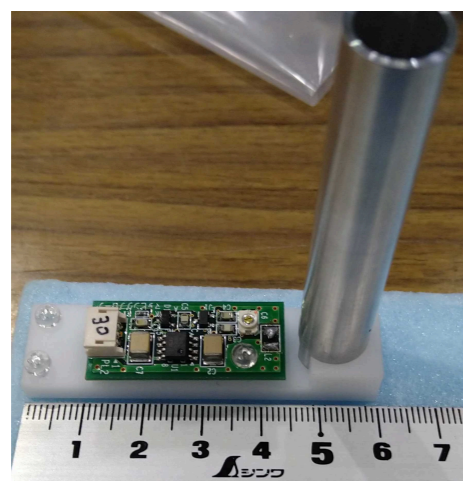
A) 校正用標準プローブ (Almost finished)

- 他を校正するための高精度NMRプローブ
- 15ppbの精度が達成されている
- 日本とアメリカの共同研究で、相互校正が行われている



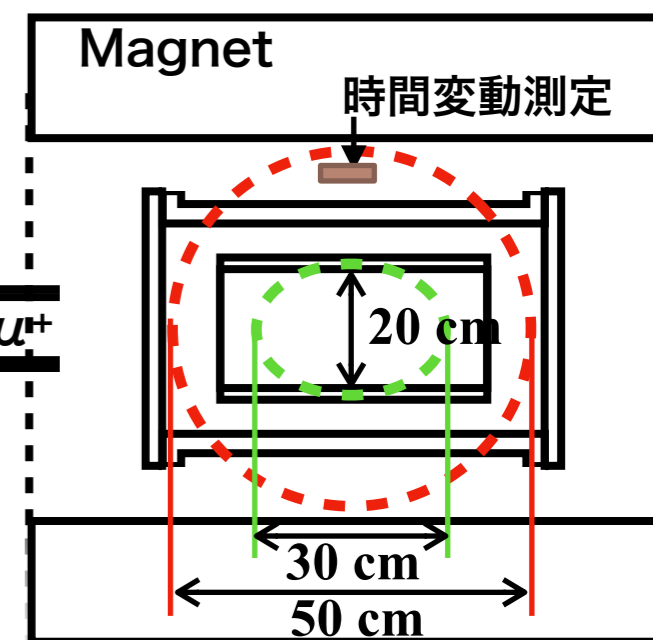
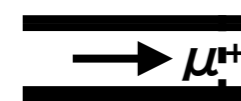
B) 空間分布測定用装置

- 磁場をマッピングする多チャンネルの回転式NMRプローブ
- 大, 小サイズの2種類を開発
- シミングに使用
- 試作機のテストを終え、実機制作中



C) 時間変動測定用装置

- 実験中の磁場の安定性を確認するための小型プローブ

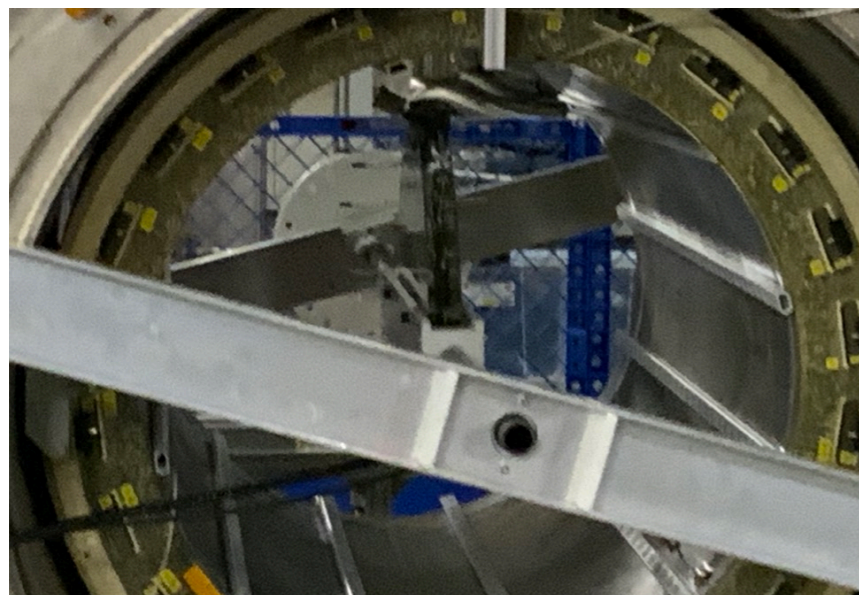


H. Yamaguchi, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 9000904

H. Tada et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 10.1109/TASC.2022.3190264 (2022).

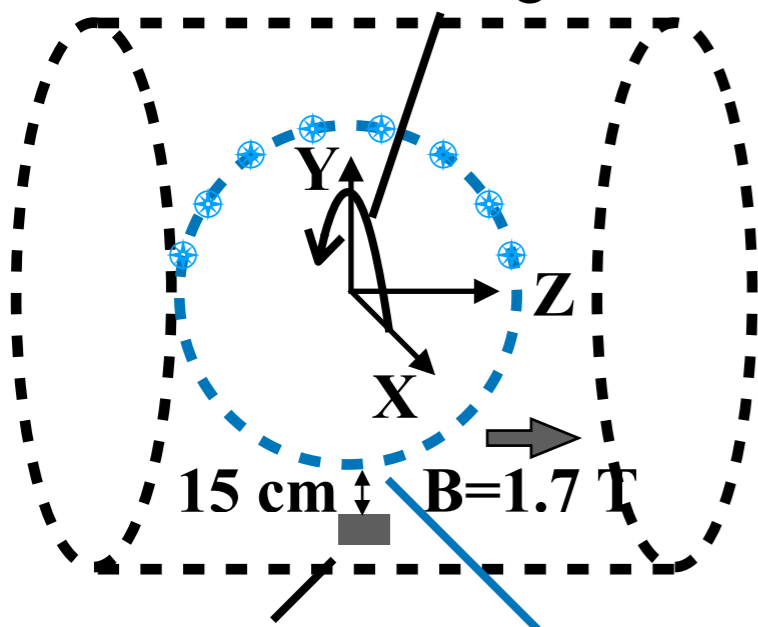
空間分布測定用装置の8 ch システムテスト

鉄シムによる磁場の変動をスキャンする動作テスト

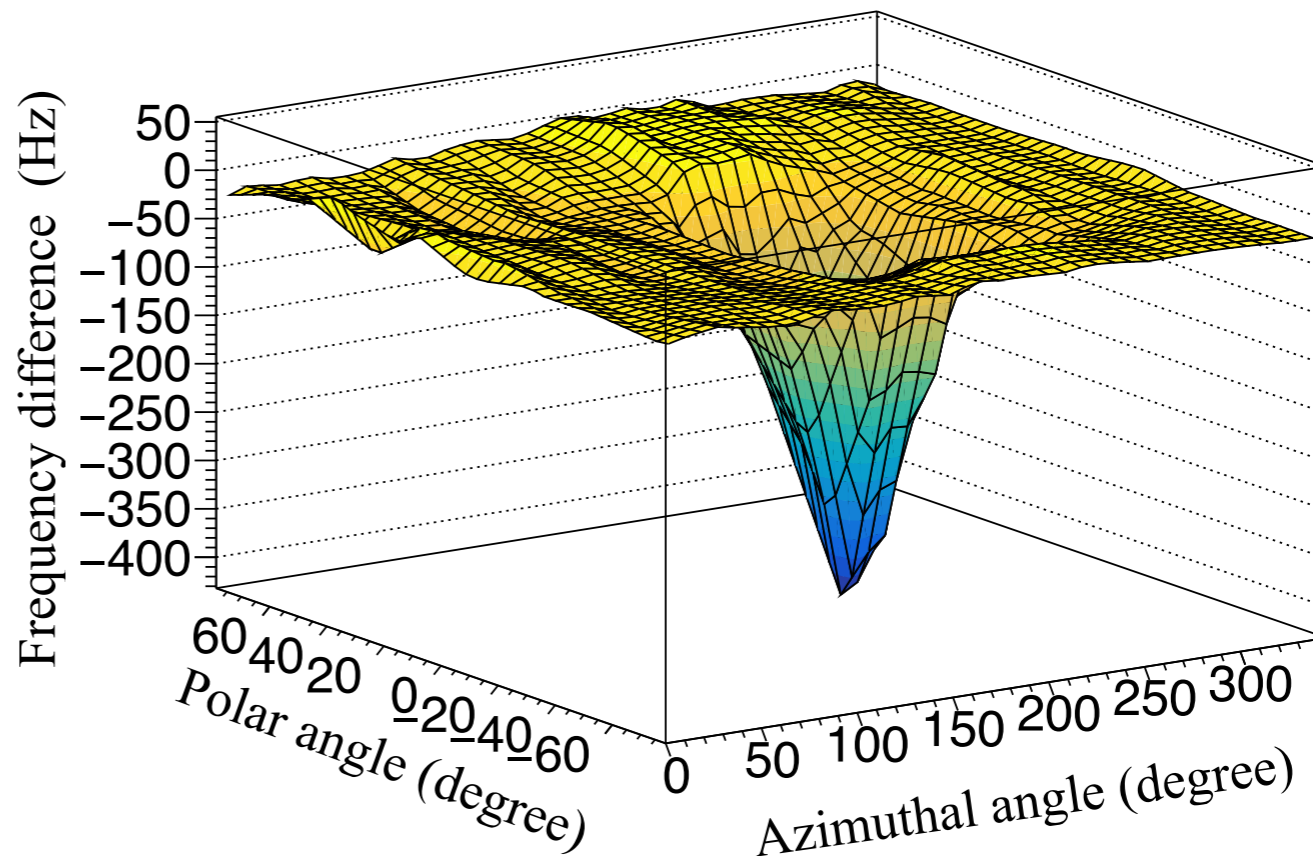


スキャンテストの様子

Azimuthal angle



Additional iron shim (0.3 cc, 0.51 Am²) measurement surface (50 cmΦ)

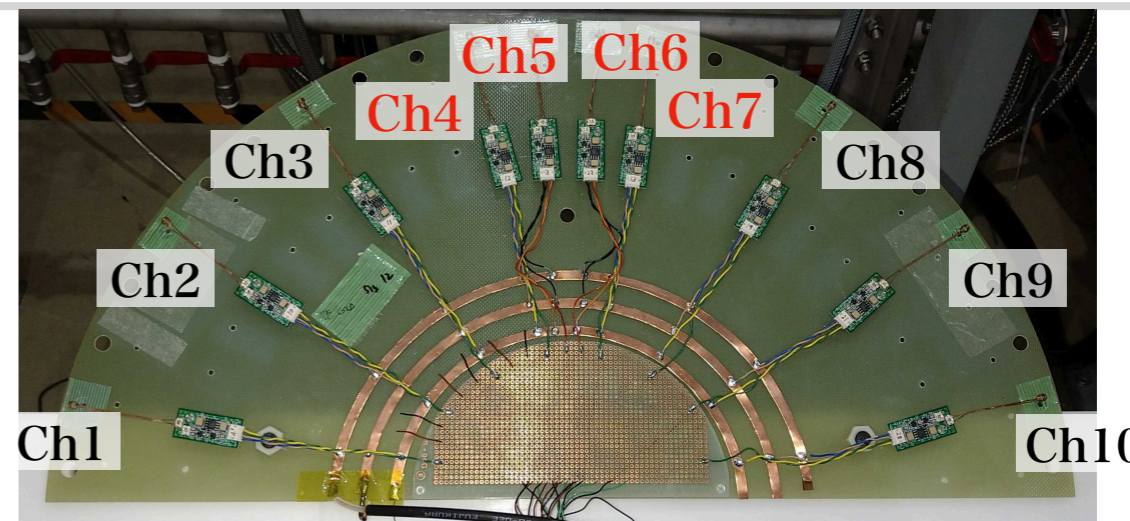
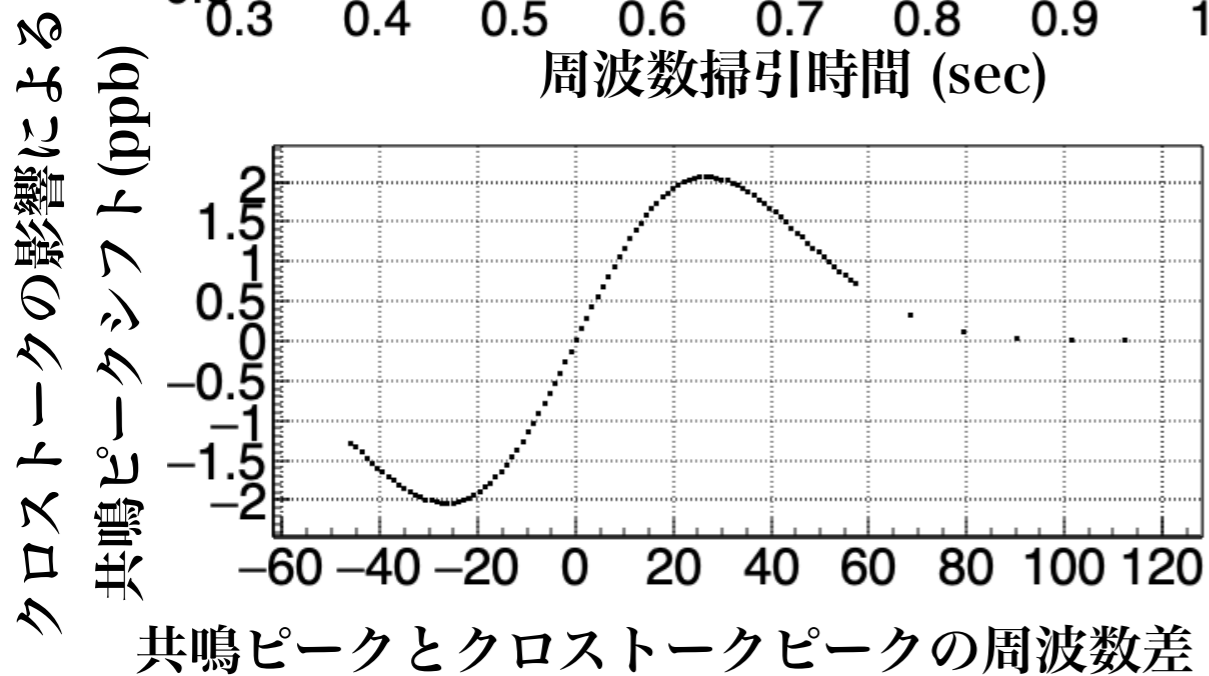
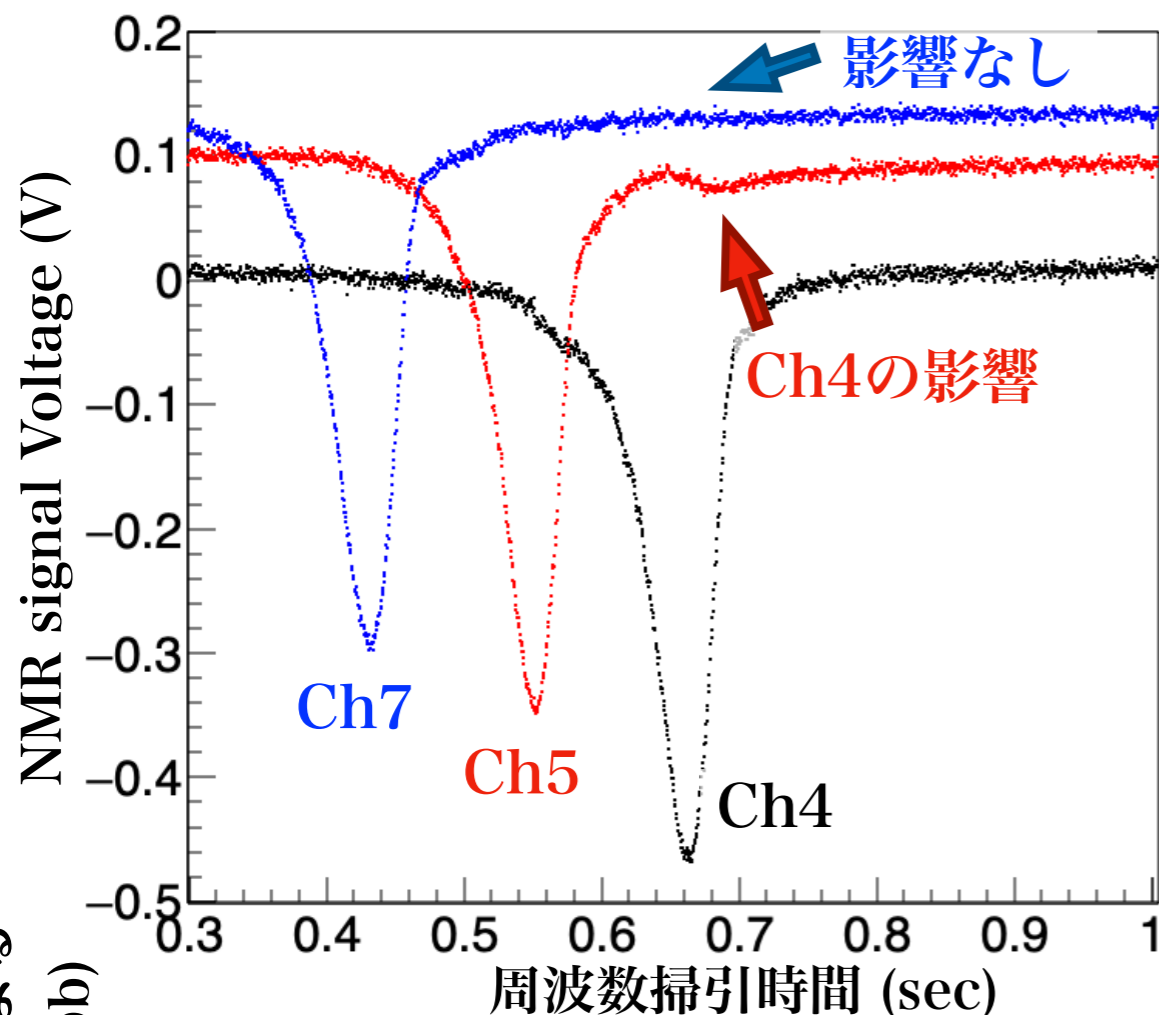


追加鉄シムによる影響(配置する前後での差分)

鉄シム	測定値	推定値
0.3 cc	-430±1 Hz	-467 Hz

- 多チャンネルシステムの読み出しに成功
- 鉄シムから十分離れた領域で -20 ± 10 Hz の変動
→測定位置の再現性が問題

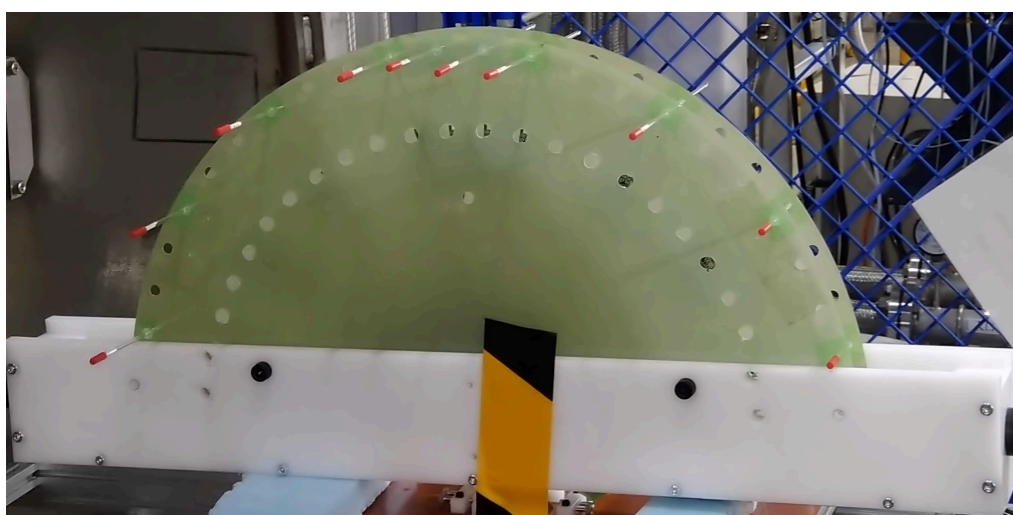
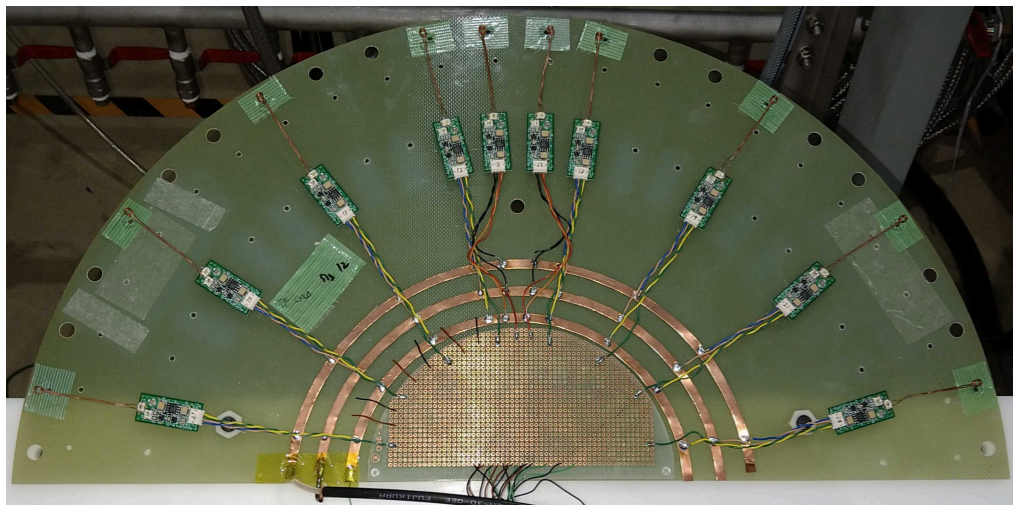
クロストークの検証



- Ch 4-7 を使ってクロストークの検証
 - ▶ 近傍のチャンネルでクロストークを確認
 - ▶ 磁場均一度が高い場合、近傍チャンネルの共鳴信号と被り不確かさの原因となる
 - ▶ クロストークの影響は最大で2 ppb 程度と見積もられる
- 実機に向けてアルミシールドを検討

空間分布測定装置のアップグレード

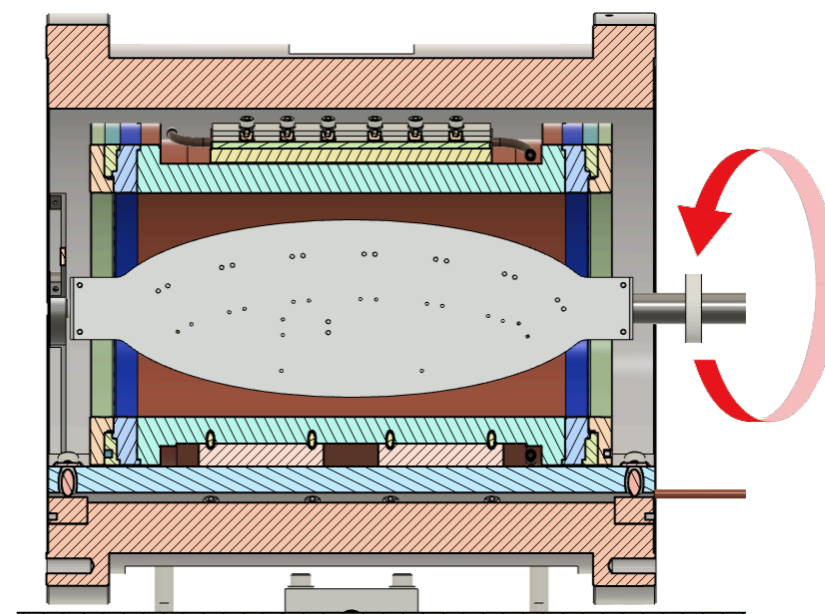
実機の作成に向けた改善点



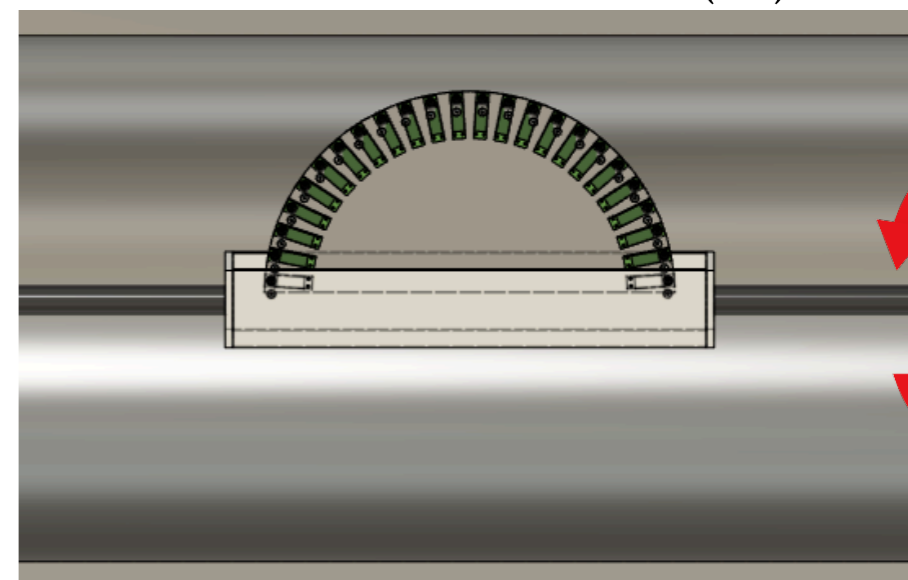
Prototype



ユニット



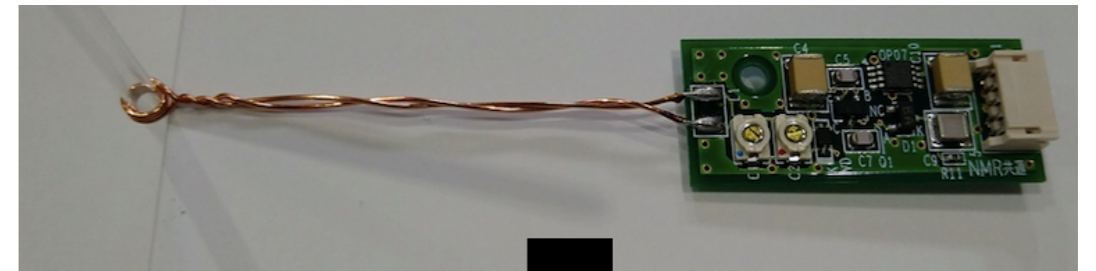
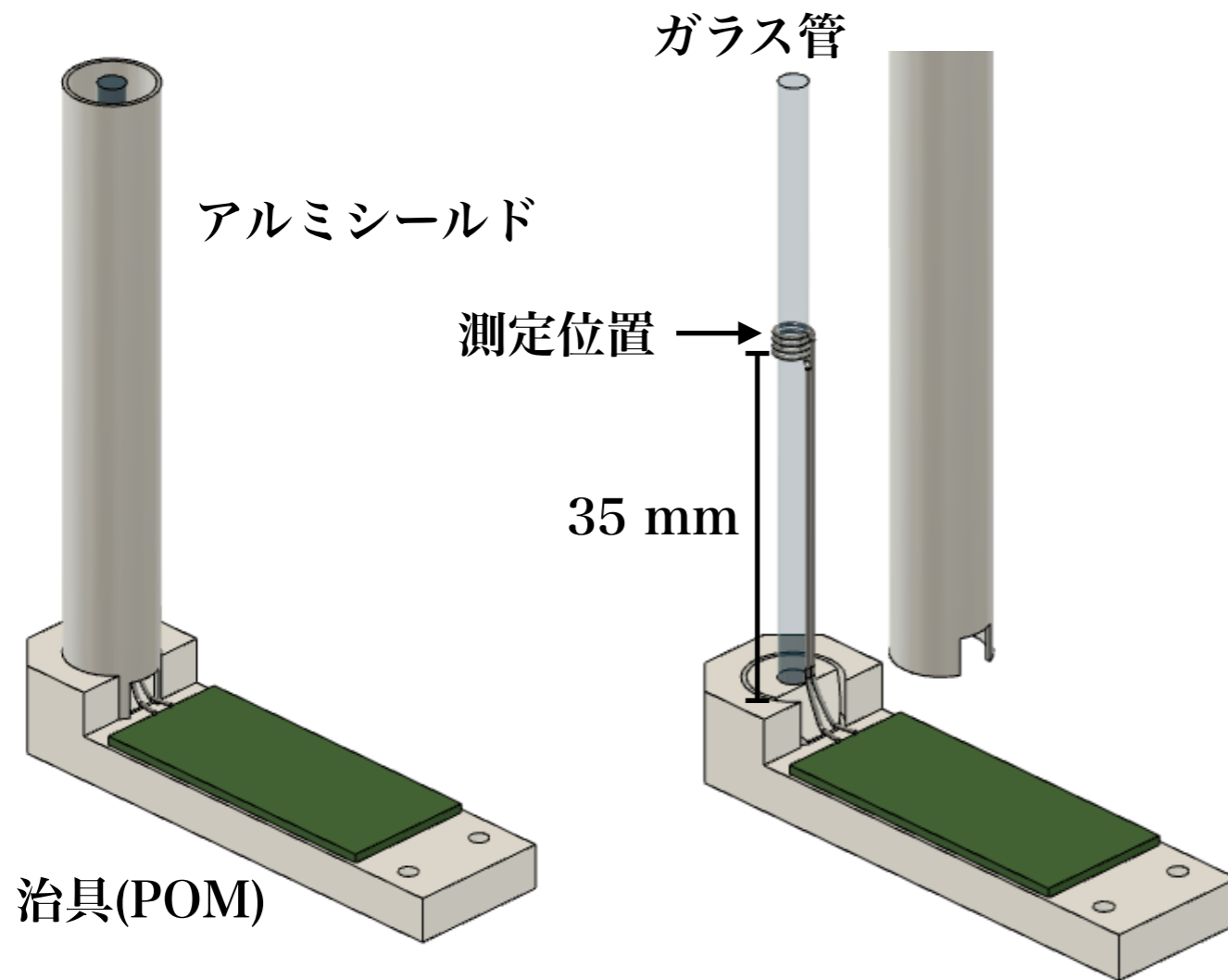
空間分布測定用装置 (小)



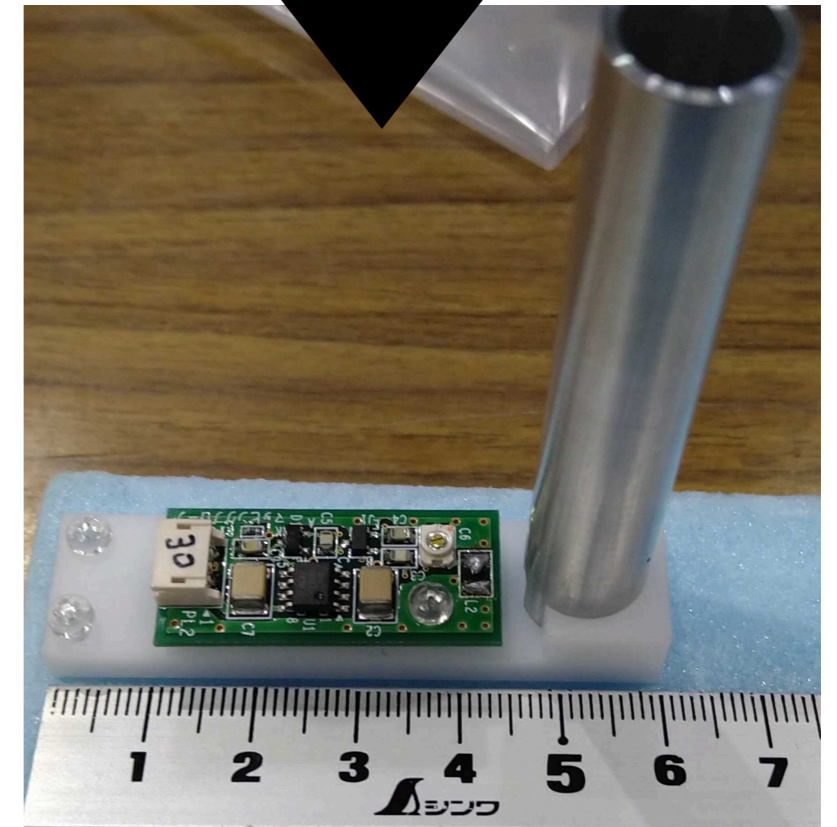
空間分布測定用装置 (大)

- アルミシールドで各チャンネルをカバーし、クロストークを削減
- 各チャンネルをガラス管, アルミシールド, 読出し回路を組み立てユニット化
- ユニットの高剛性かつ非磁性の回転板に取り付ける

ユニット化



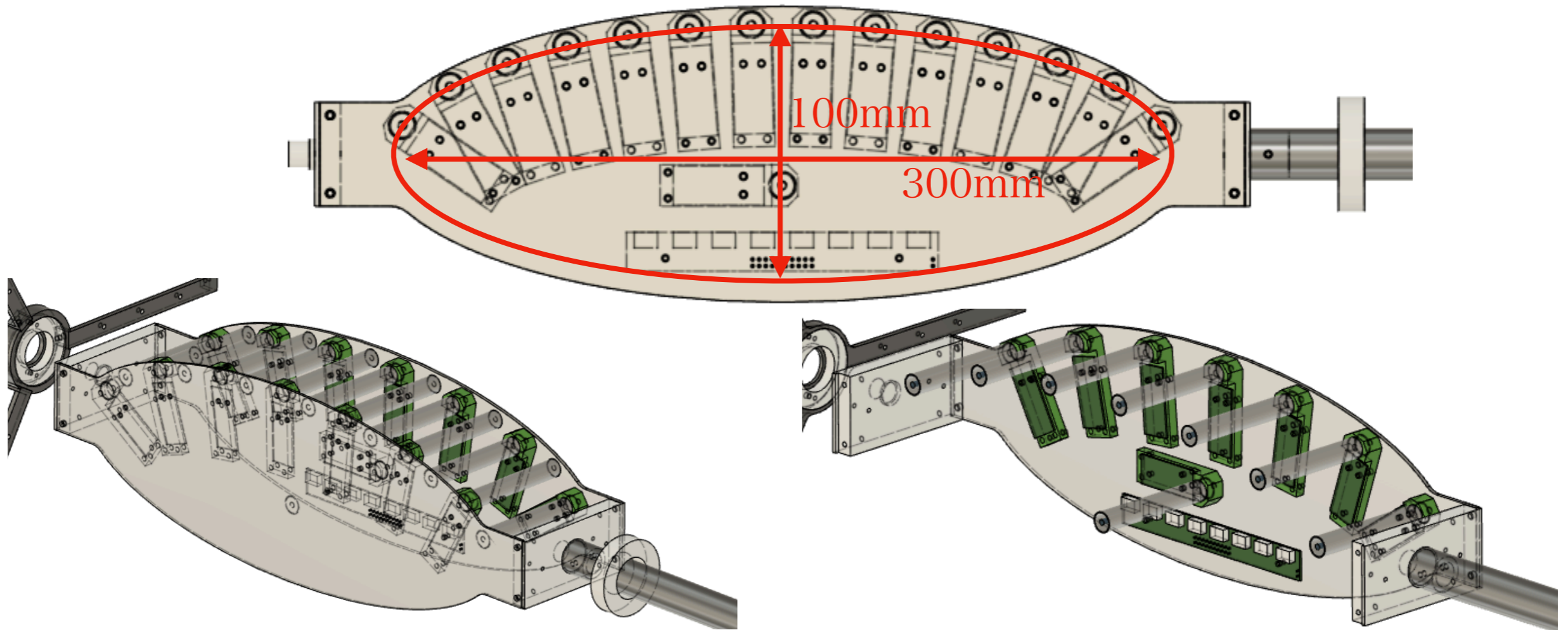
測定位置を変更



- ガラス管, アルミシールドを固定するための治具を作成し、測定位置再現性の向上を図る
- 取り付け場所が狭いため、測定位置を読出し回路の平面上から垂直方向に変更
- 極力磁場を乱さない設計

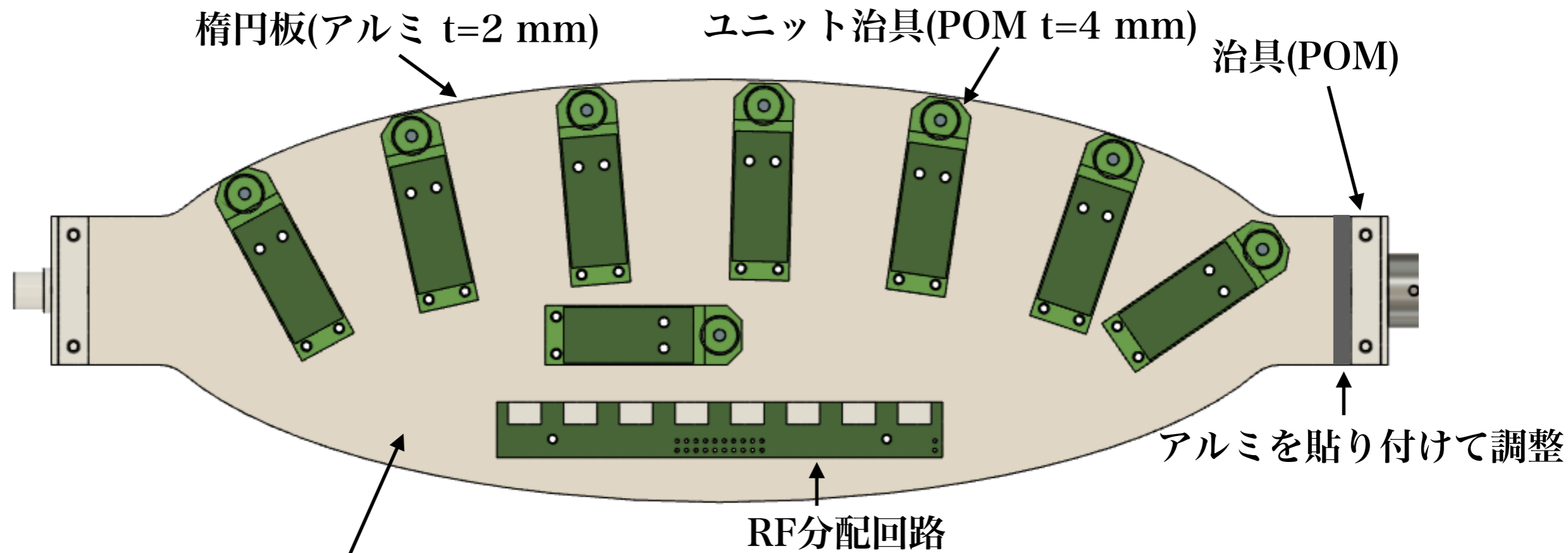
空間分布測定装置(小)の実機設計

ガラス管の中心が直径100mm, 長さ300mmの楕円上となるように、
ユニットを14個+測定面内の確認用1個を配置



- 目標とするシミング精度達成には14ヶ所の測定点が必要
- 一つの面に14ユニット配置できないため、両面に配置
- 磁性を打ち消し合い、極力磁場を乱さない設計
- 現在は設計が終了し、納入待ち

空間分布測定装置(小)の実機設計

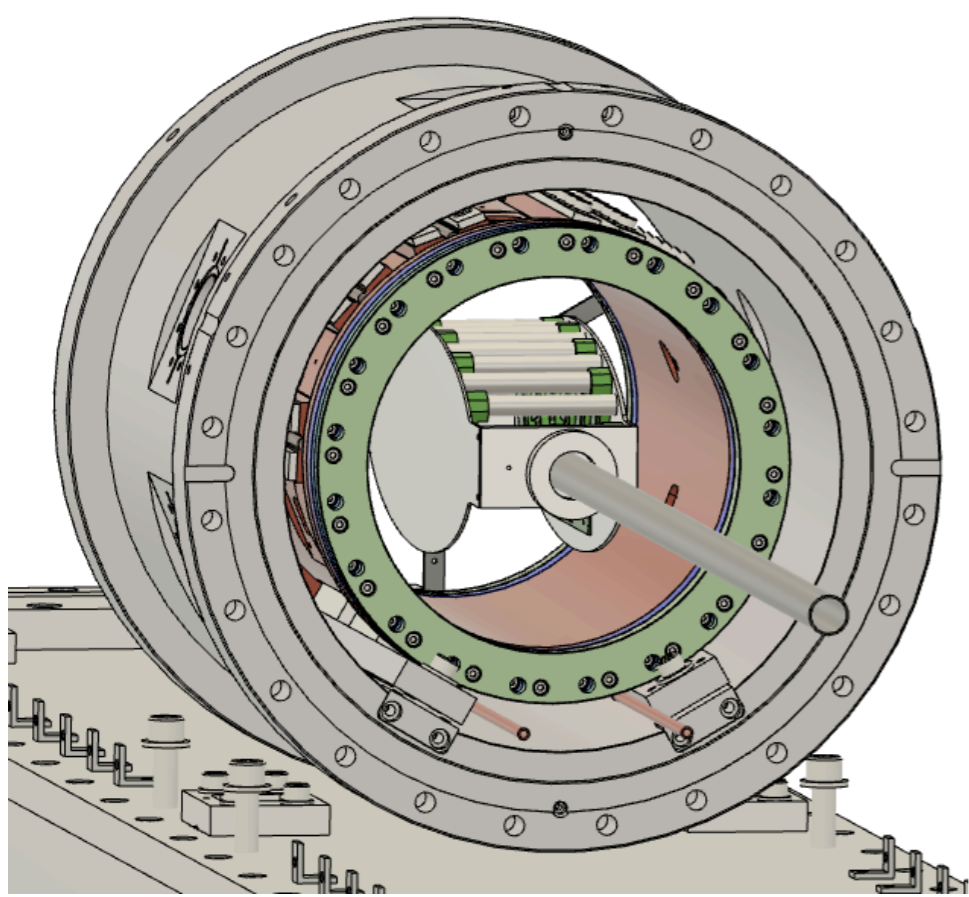


ユニットが配置されていない場所は、後からPOMなどを貼り付けて調整

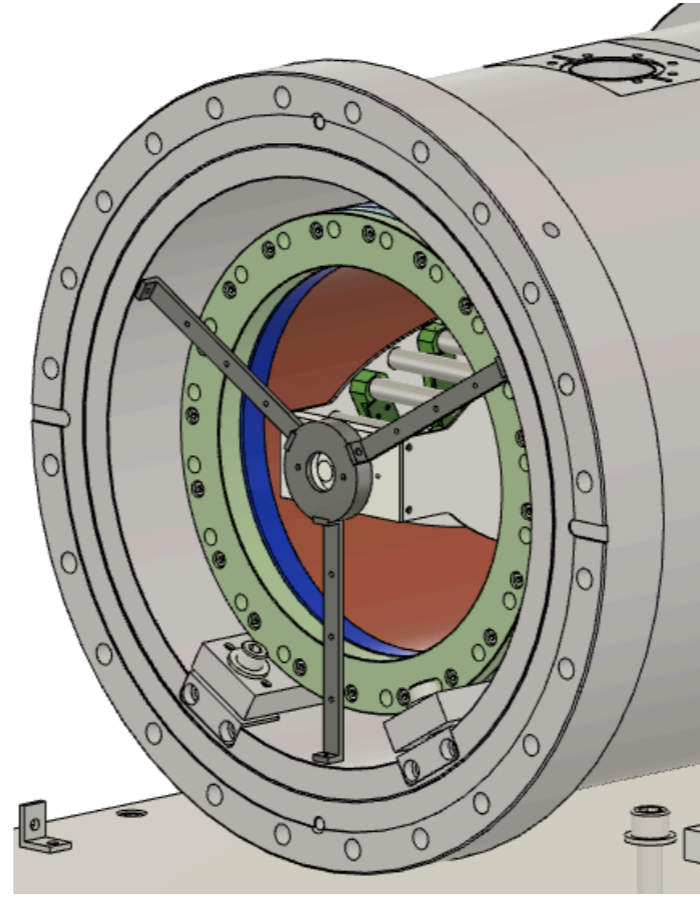
- アルミとPOMは逆磁性で透磁率の比は約 2 : 1
- 出来る限りのパーツを逆磁性体で打ち消し非磁性化する

空間分布測定装置(小)の実機設計

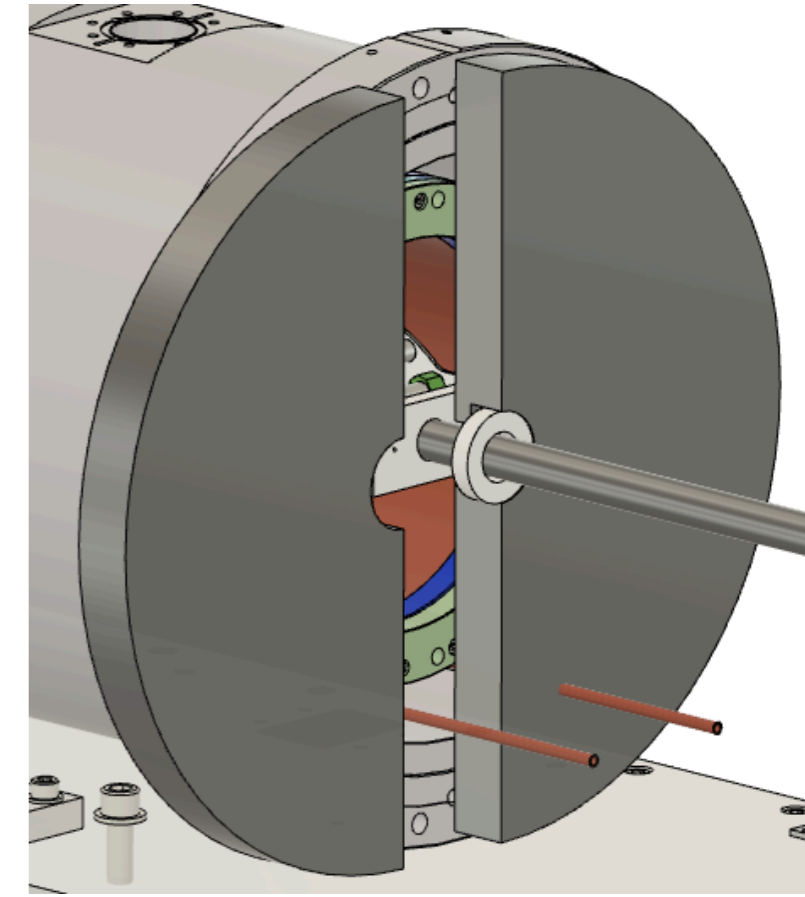
取り付け予想図



全体図



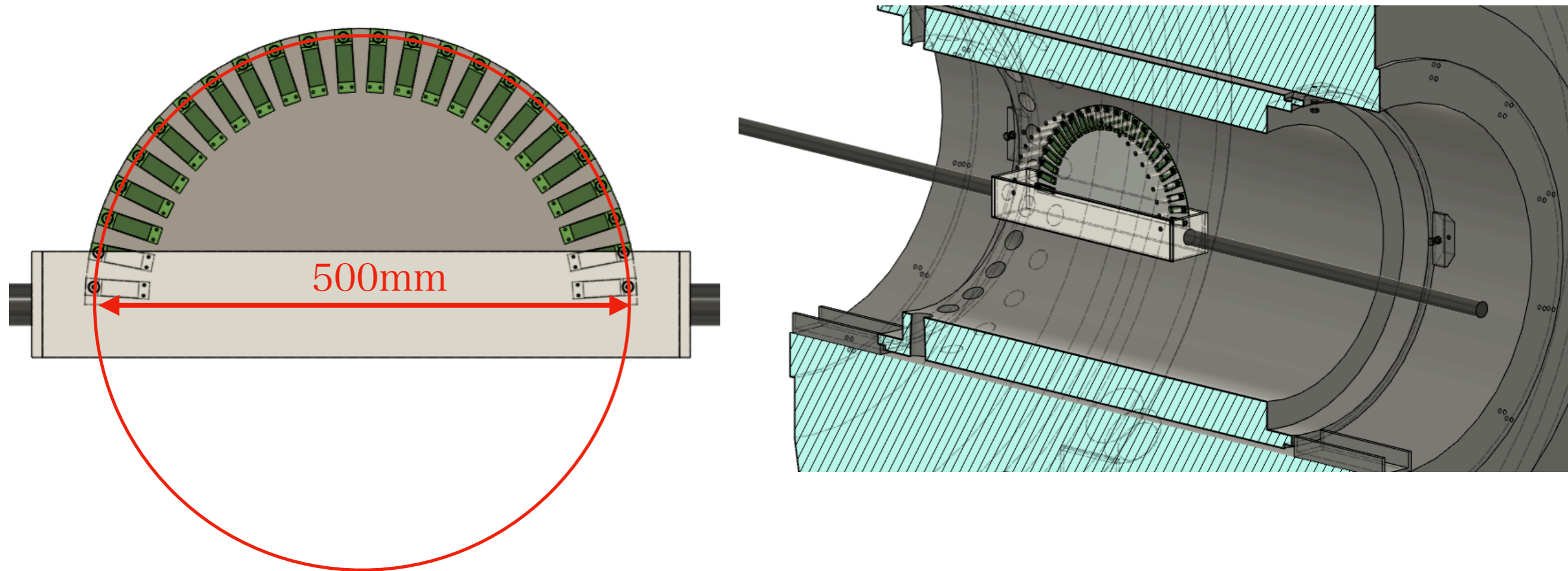
上流側



下流側

- 上流下流共に回転軸受け部分には樹脂ベアリングを採用
- 上流側回転軸受けもアルミ+POMで磁性を打ち消す
- 下流側にはダミーフランジを用意

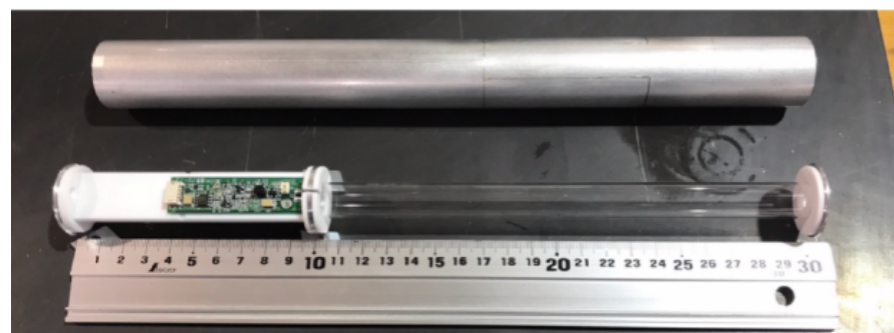
空間分布測定装置(大)の実機設計



- 空間分布測定装置(小)に比べるとスペースに余裕があるため、ユニットの配置は容易
- 直径500 mmの半円上に24個のユニットを配置
- 空間分布測定装置(小)と同様に装置自体の磁性を打ち消す

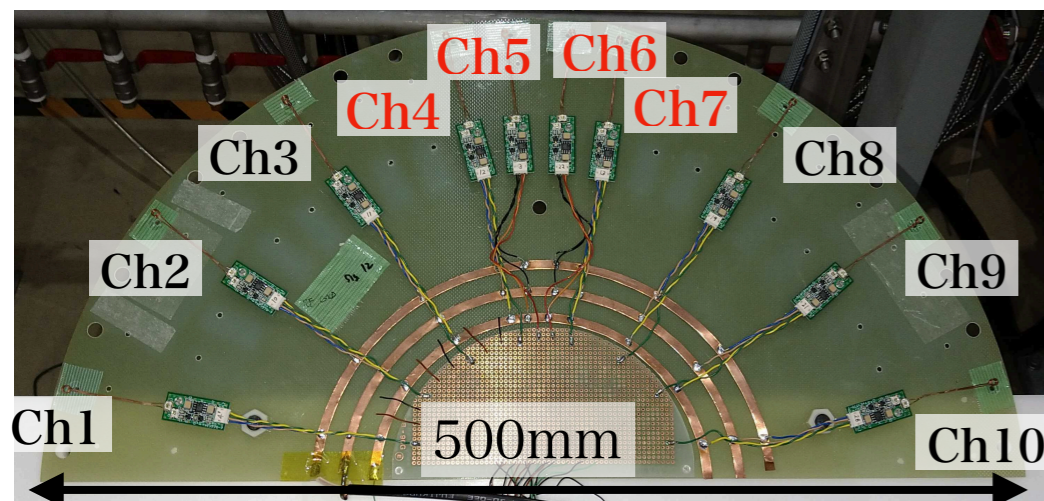
NMR プローブ

3種類のプローブを開発



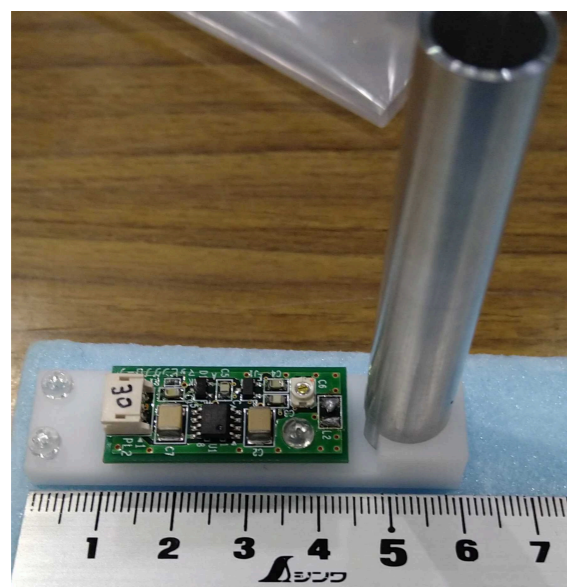
A) 校正用標準プローブ (Almost finished)

- 他を校正するための高精度NMRプローブ
- 15ppbの精度が達成されている
- 日本とアメリカの共同研究で、相互校正が行われている



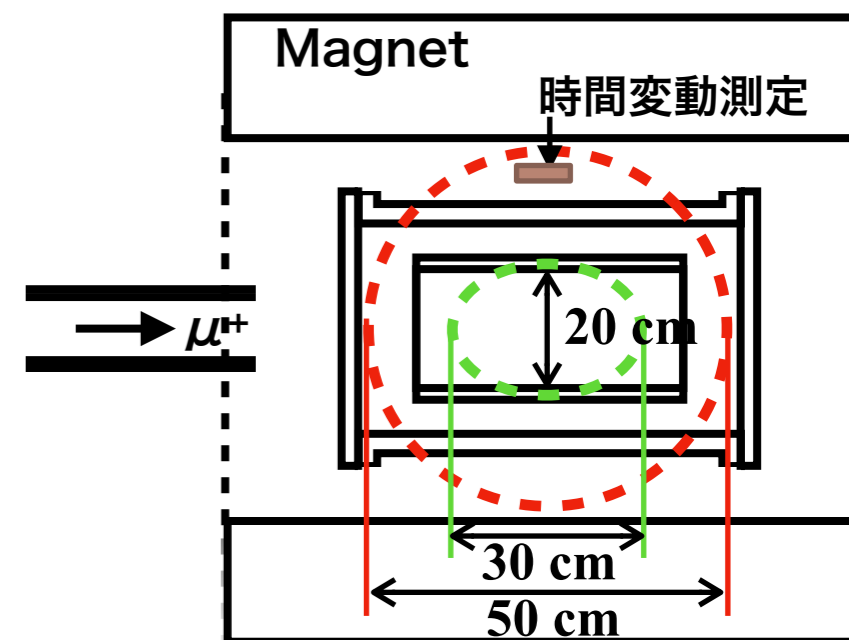
B) 空間分布測定用装置

- 磁場をマッピングする多チャンネルの回転式NMRプローブ
- 大, 小サイズの2種類を開発
- シミングに使用
- 試作機のテストを終え
実機制作中



C) 時間変動測定用装置

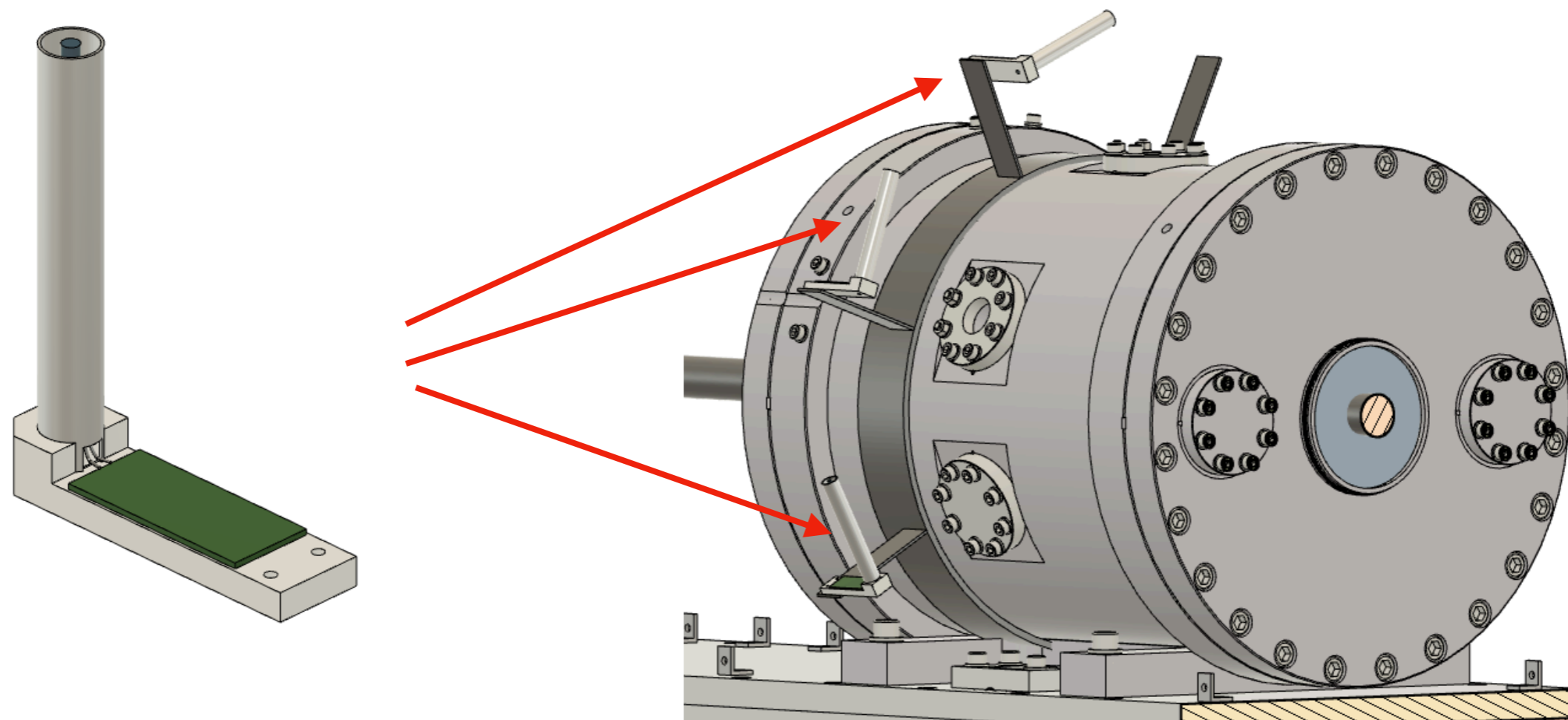
- 実験中の磁場の安定性を確認するための小型プローブ



H. Yamaguchi, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 29, no. 5, Aug. 2019, Art. no. 9000904

H. Tada et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 10.1109/TASC.2022.3190264 (2022).

時間変動測定装置



- 数ユニットを同心円状に配置する
- 測定点はガスチェンバーと磁石内壁の中間点
→ビーム軸から半径25 cmの点を検討(フィールドカメラ大で測定する面)
- 空間分布測定装置と同じユニットを利用

Summary

- 高磁場MuHFS測定の前準備が進行中
- 高磁場測定の要は均一磁場と、そのための磁場測定器
目標精度はラグビーボール状の空間で0.2 ppmの均一度
- 空間分布測定器の試作機を開発し、動作テストを行った
- 試作機での結果を受けて実機を開発中
- キャリブレーション方法が課題

MuSEUM collaboration



Muonium Spectroscopy Experiment Using Microwave

• Collaborators



M. Abe, Y. Fukao, Y. Ikedo, T. Ito, R. Kadono, N. Kawamura, A. Koda, N. Kurosawa, T. Mibe, Y. Miyake, K. Nagamine, S. Nishimura, T. Ogitsu, N. Saito, K. Sasaki, Y. Sato, K. Shimomura, P. Strasser, M. Sugano, A. Toyoda, K. Ueno, H. Yamaguchi, S. Kanda, A. Yamamoto, T. Yamazaki, M. Yoshida



M. Aoki,
D. Tomono



M. K. Kubo



K. M. Kojima



Y. Matsuda, S. Seo, T. Tanaka,
H. A. Torii, H. Yamauchi, H. Yasuda
F. Yoshizu, S. Oyama



E. Torikai



K. Kawagoe, J. Tojo, T.
Yamanaka, T. Yoshioka



H. Iinuma



K. Ishida, M. Iwasaki, O. Kamigaito,
Y. Ueno



S. Choi,
C. Park



S. Fukumura,
M. Kitaguchi,
H. Tada



K. S. Tanaka



D. Kowall

Back up

Significance of MuHFS measurements

- Theoretical value

$$\Delta\nu_{HFS}^{th} = 4\,463\,302\,872(515) \text{ Hz (115 ppb)} \quad \text{M.I. Eides, Phys. Lett. B 795, 113(2019).}$$

$$\Delta\nu_{HFS}^{th} = \frac{16}{3} Z^4 \alpha^2 c R_\infty \frac{m_e}{m_\mu} \left(1 + \frac{m_e}{m_\mu}\right)^{-3} + \Delta\nu_{QED} + \Delta\nu_{QCD} + \Delta\nu_{weak}$$

237 Hz 65 Hz

- Experimental value @LAMPF

$$\Delta\nu(\text{ZF}) = 4.463\,302\,2(14) \text{ GHz (300 ppb)}$$

D. E. Casperson, et al., Phys. Lett. 59B 397 (1975).

$$\Delta\nu(\text{HF}) = 4.463\,302\,765(51)(17) \text{ GHz (12 ppb)} \quad \leftarrow \text{Statistical error dominates}$$

Stat. Syst.(Hz)

Major system error sources are
gas pressure and
microwave power uncertainty

$$\mu_\mu/\mu_p = 3.183\,345\,13(39) \text{ (120 ppb)}$$

W. Liu, et al., Phys. Rev. Lett. 82 711 (1999).



High Intensity Beams at J-PARC and New Development Elements
(Proton detectors, magnetic field detectors, etc)

- **MuSEUM's Goal : 10 times more accurate**

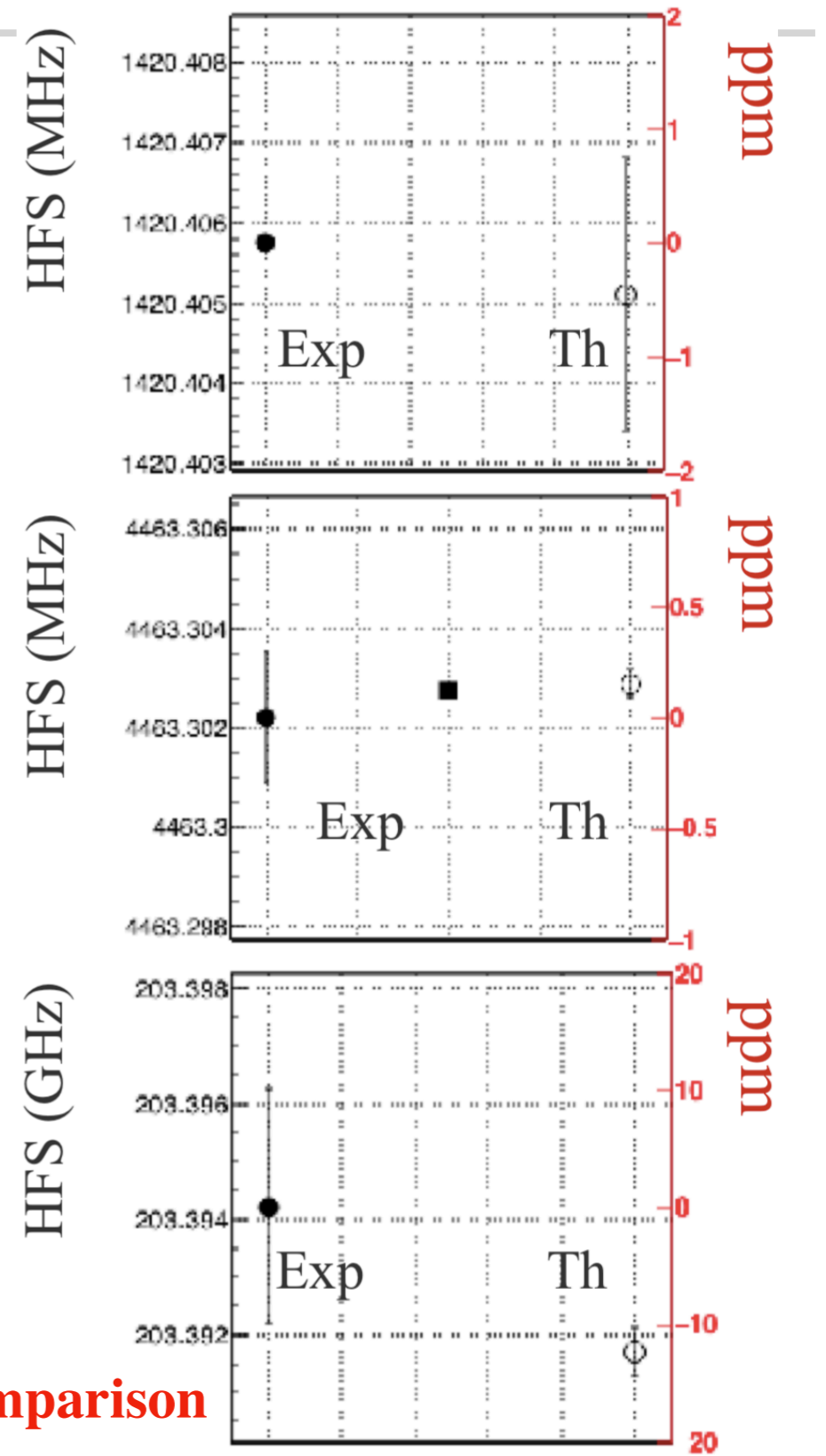
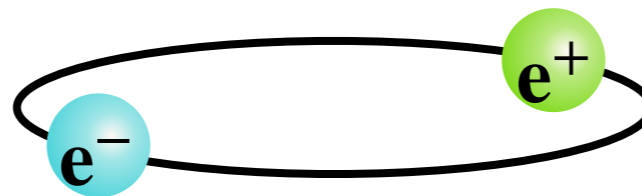
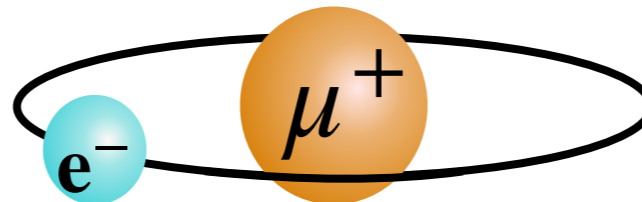
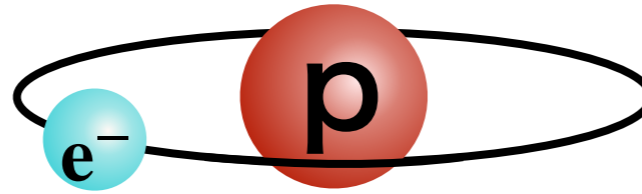
10X improvement in accuracy provides precise validation of standard models

HFS of Hydrogen-like Atoms

- Hydrogen
- 1420 MHz
- Atomic hydrogen maser

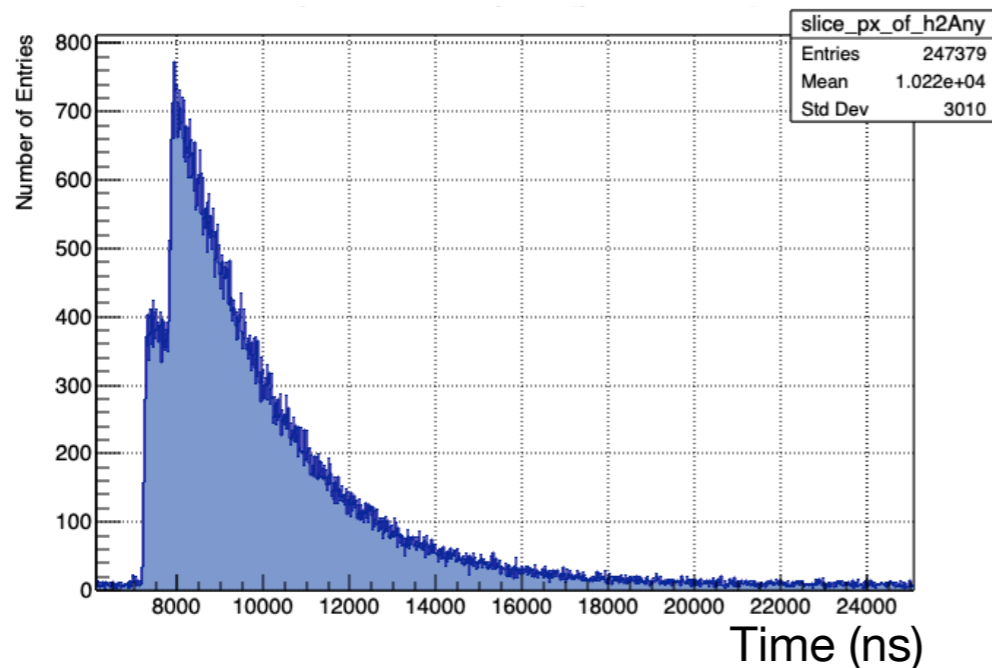
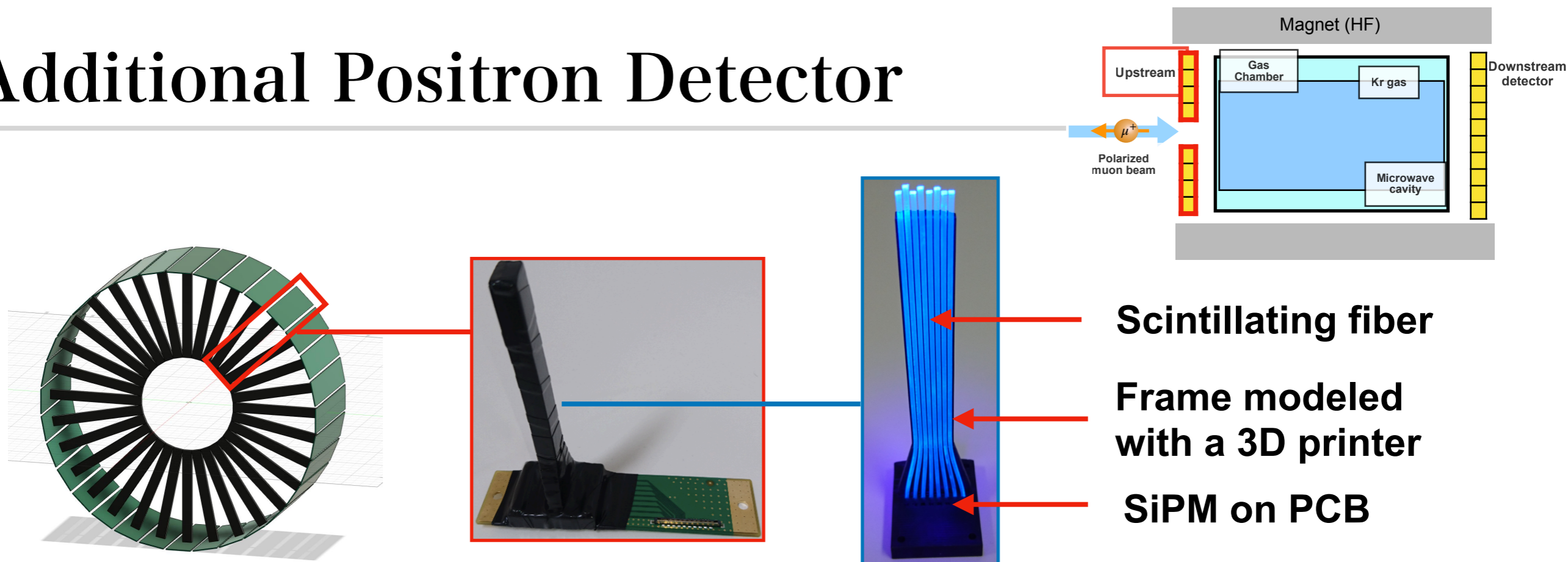
- Muonium
- 4464 MHz
- Decay positron asymmetry

- Positronium
- 203 GHz
- Annihilation gamma rays



► Muonium provides the most precise theory/experiment comparison

Additional Positron Detector



- Upstream Detector (Additional positron counter)
- Increase of statistics and measurement of forward/backward asymmetry to study systematic uncertainties.
- Development and testing Prototype
- Improved and scheduled for mass production