

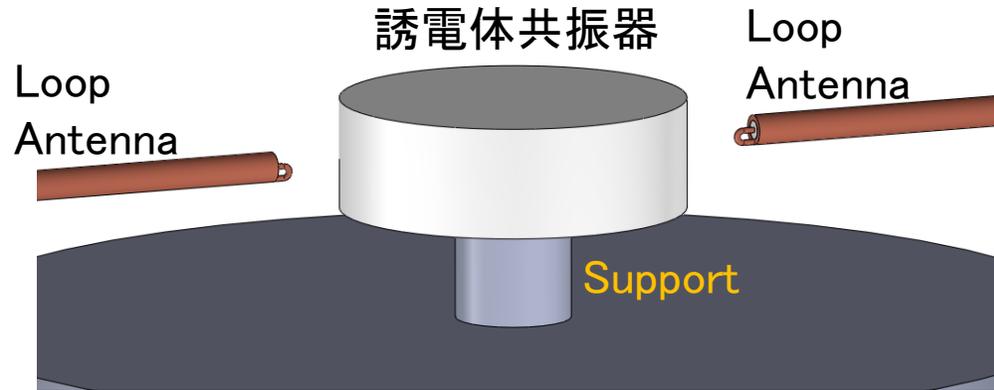
誘電体アシスト型加速管(2)

(国研)産業技術総合研究所
分析計測標準研究部門
佐藤 大輔

【誘電体材料の複素誘電率 (ϵ_r , $\tan\delta$) 測定】

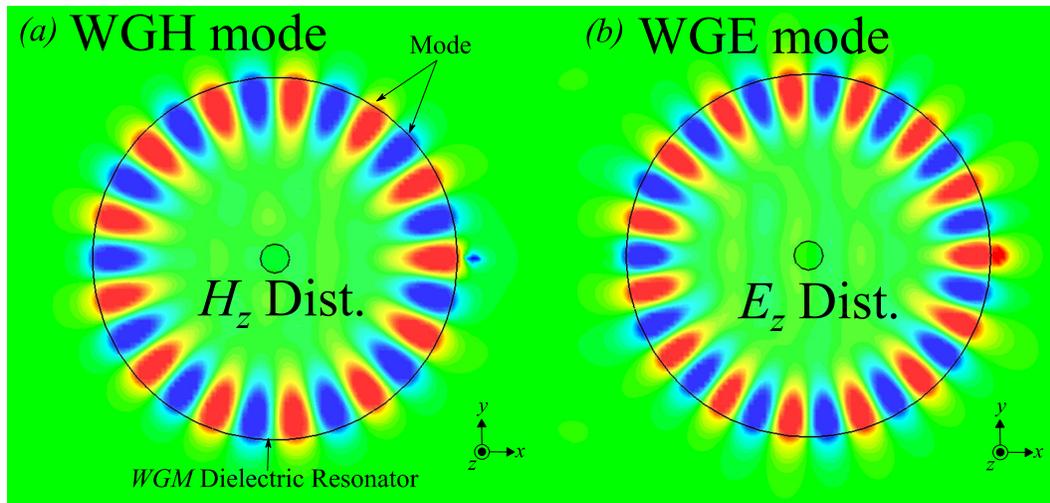
Whispering Gallery Mode共振器法

【測定概念図】



Whispering Gallery Mode (WGM) という、円柱状の誘電体共振器の周方向に高次の共振モードを測定し、その共振周波数やQ値から共振器を構成する誘電体材料の比誘電率 ϵ_r と $\tan\delta$ を算出する。

【WGMのモード図】



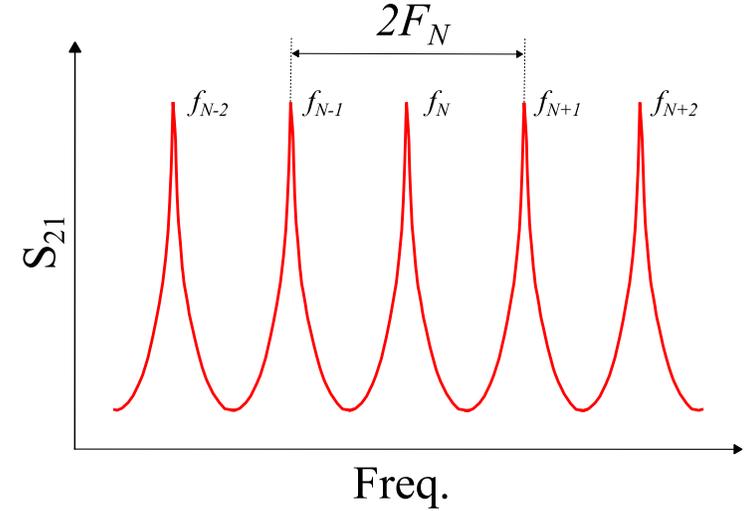
ループの角度でモードを変更することができる

【特徴】

- 低損失誘電体でも測定可
- シールドレス測定可能
→ 導体損の見積無。
- 広帯域での測定可能
- 一軸異方性誘電体の測定可能。

【誘電体材料の比誘電率(ϵ_r)測定】

【図1：WGM共振器の共振特性イメージ】



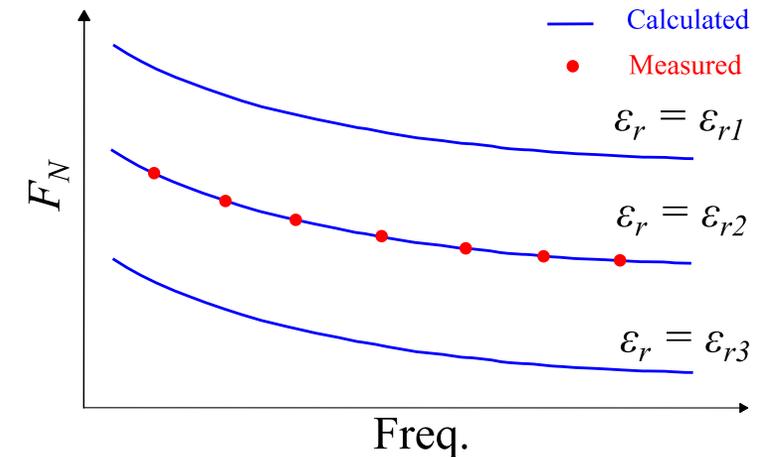
【測定法】

- WGM共振器法では、多数の高次モードが検出(図1)。
- ある周方向の次数 N のモードについて、その前後の共振の共振周波数を f_{N-1} 、 f_{N+1} を用いて以下を計算

$$F_N = \frac{f_{N+1} - f_{N-1}}{2}$$

- 各 N のモードについて F_N を計算すると、図2のようになる
- 様々な ϵ_r の値について計算を行い、この共振周波数間隔 F_N の測定値と実験値が一致する時の ϵ_r の値を比誘電率の測定結果とする。

【図2：解析結果イメージ】



【誘電体材料の誘電正接 (tanδ) の測定】

$$\tan \delta = \frac{1}{Q_d} \frac{1}{W} = \left(\frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_r} \right) \frac{1}{W}$$

$$= \frac{1}{Q_0} \frac{1}{W} \frac{1}{1 + Q_d/Q_r}$$

Q_0 : 本Q値測定で得られる値

Q_d : 誘電損失に寄与するQ値

Q_r : 放射損失に寄与するQ値

$$W = \frac{W_d}{W_d + W_s} = \frac{(-\Delta f_0 / \Delta \epsilon_0) \cdot 2 \epsilon_r}{f_0}$$

W : 誘電体内への蓄積エネルギー集中度
蓄積エネルギーのうち、誘電体内に占める割合

摂動法を利用して電磁場シミュレーションより算出。

$$Q_d / Q_r \ll 1$$

誘電体共振器の設計により、 $Q_r = 10^8$ ($N=16$)

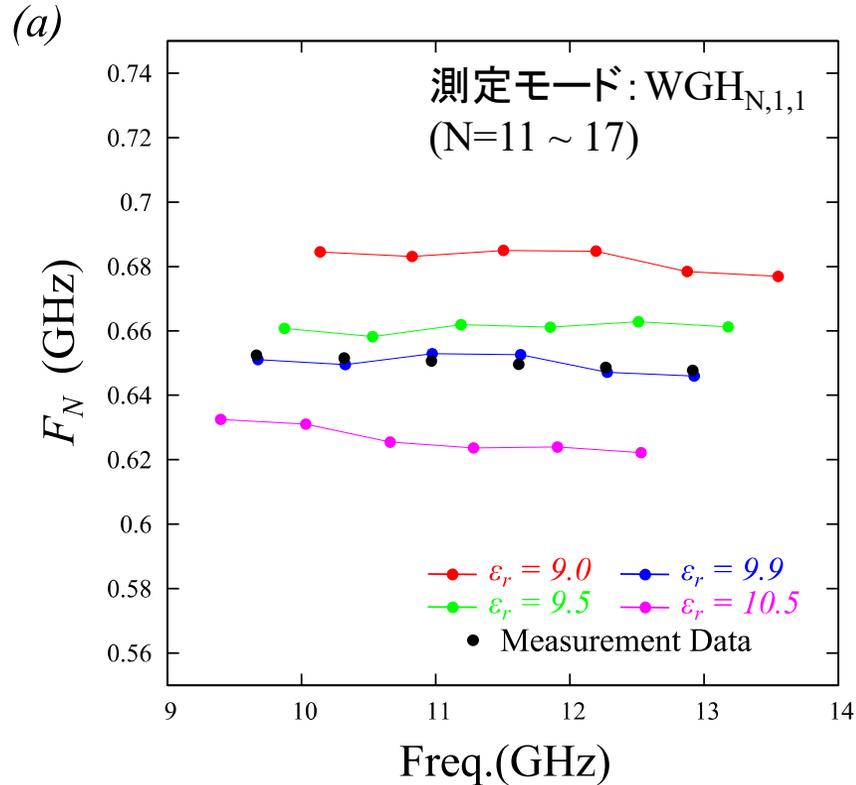
* 誘電体共振器の半径を大きくすると放射損失は小さくなる

$$\tan \delta = \frac{1}{Q_0} \frac{1}{W}$$

測定したWGM誘電体共振器の無負荷Q値と、
計算によって求めたWを用いてtanδを算出できる。

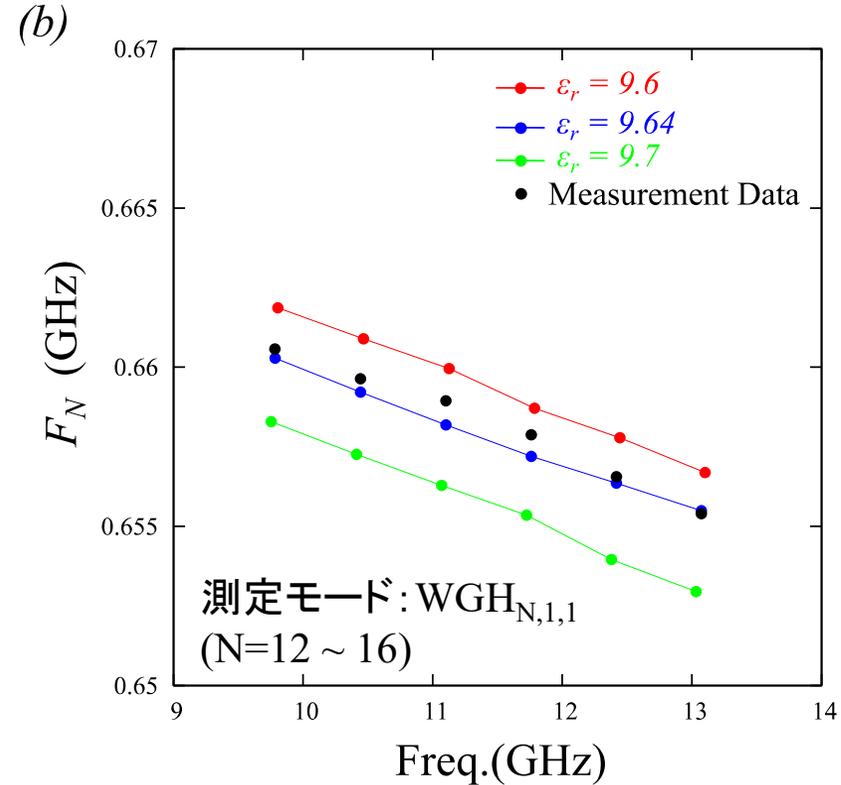
【比誘電率 (ϵ_r) 測定結果】

【測定試料: アルミナ】



$\epsilon_r = 9.9$ @10GHz
(参考値: $\epsilon_r = 10.0$ @9 GHz)

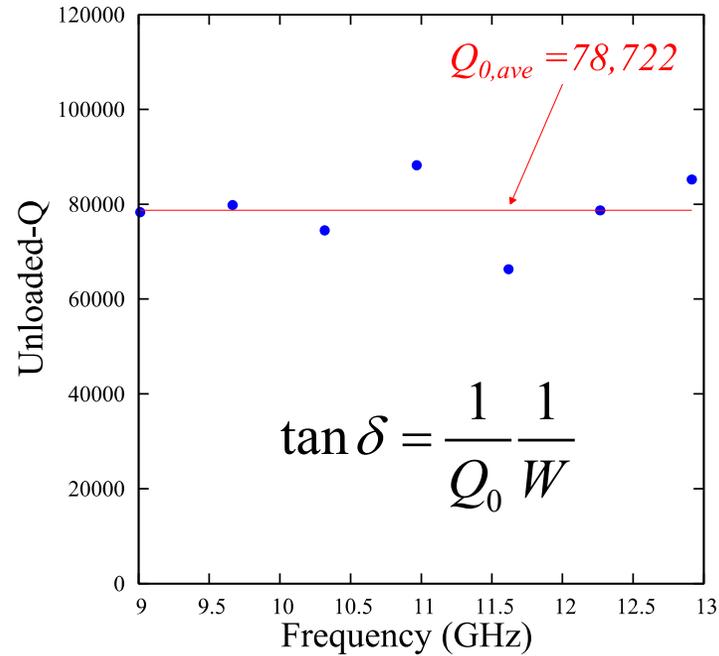
【測定試料: マグネシア】



$\epsilon_r = 9.64$ @10GHz
(参考値: $\epsilon_r = 9.0$ @9 GHz)

【誘電正接 ($\tan\delta$) の測定結果】

【測定試料: アルミナ】

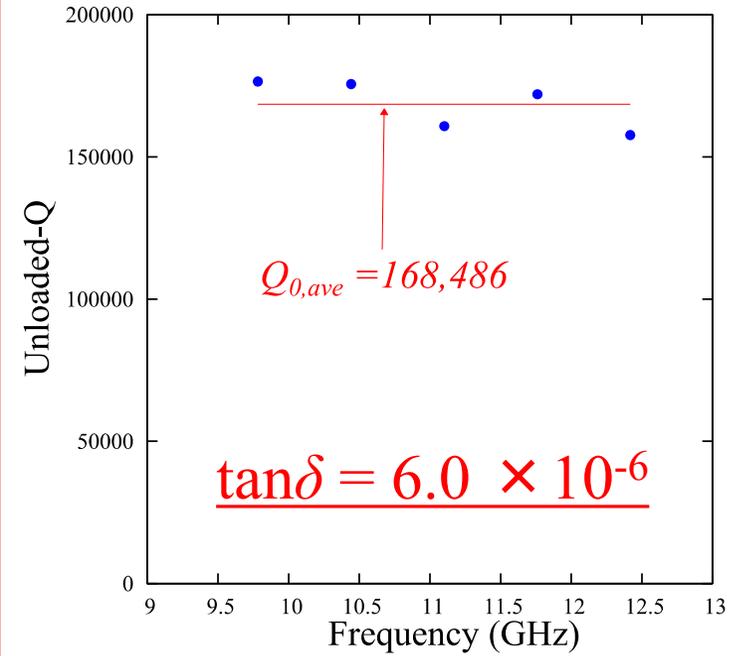


N	$f_0(\text{GHz})$	Q_0	$\tan\delta$
11	9.01195431	78322	1.29×10^{-5}
12	9.66486931	79824	1.26×10^{-5}
13	10.316876	74476	1.37×10^{-5}
14	10.9679956	88219	1.16×10^{-5}
15	11.6181898	66307	1.59×10^{-5}
16	12.2672882	78697	1.36×10^{-5}
17	12.9155655	85205	1.21×10^{-5}

(参考値: $\tan\delta = 1.2 \times 10^{-5}$ @9 GHz)

【測定試料: マグネシア】

採用

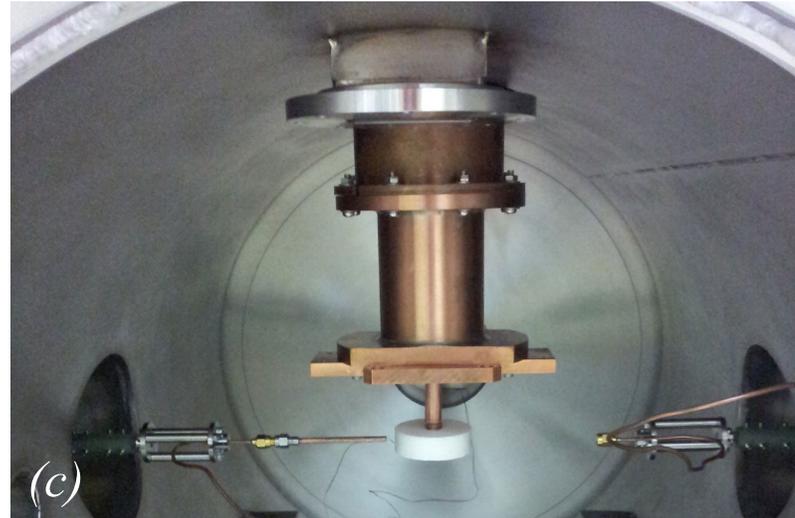
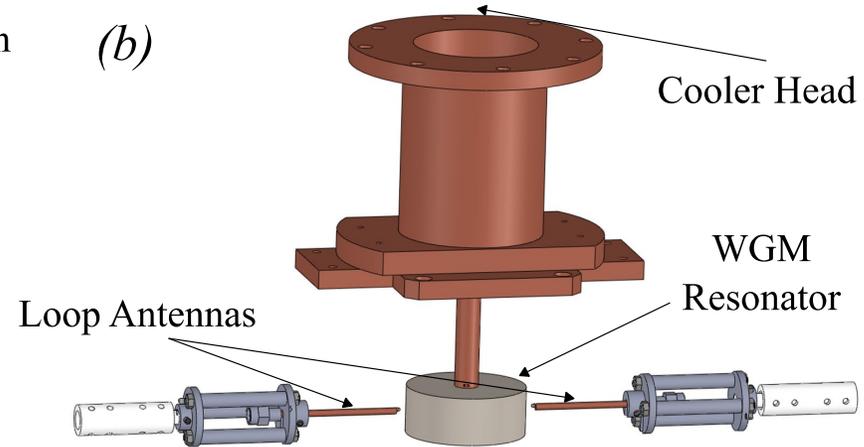


N	$f_0(\text{GHz})$	Q_0	$\tan\delta$
12	9.7825	176456	5.96×10^{-6}
13	10.4427	175540	6.00×10^{-6}
14	11.1018	160767	5.99×10^{-6}
15	11.7605	171983	6.04×10^{-6}
16	12.4175	157684	6.05×10^{-6}

(参考値: $\tan\delta = 2.0 \times 10^{-5}$ @9 GHz)

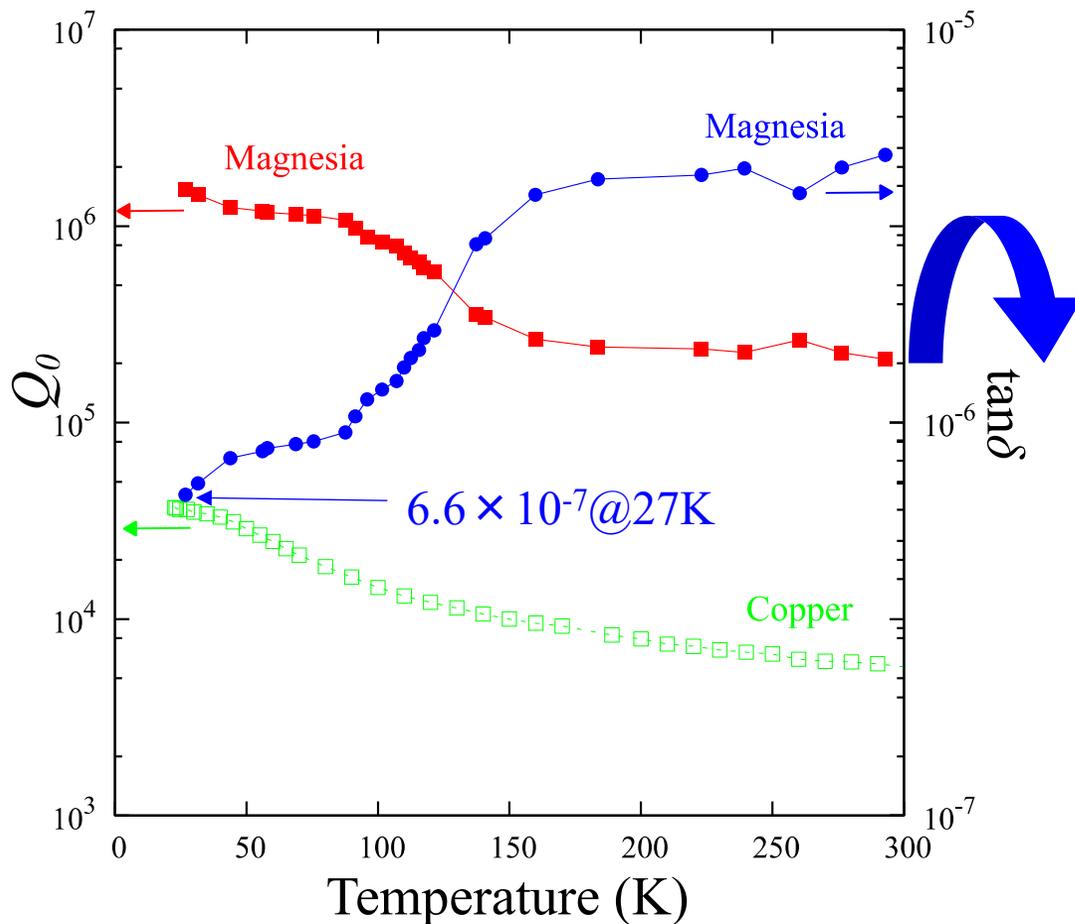
【+α: 低温での複素誘電率測定システムの開発】

GM冷凍機でWGM誘電体共振器を室温から20Kまで温度を変えながら、複素誘電率測定が行える測定システムを開発



【+α: 誘電正接の温度依存性とDAA管の性能向上】

共振器特性の温度依存性



低温動作時のDAA管原理実証機の加速管性能

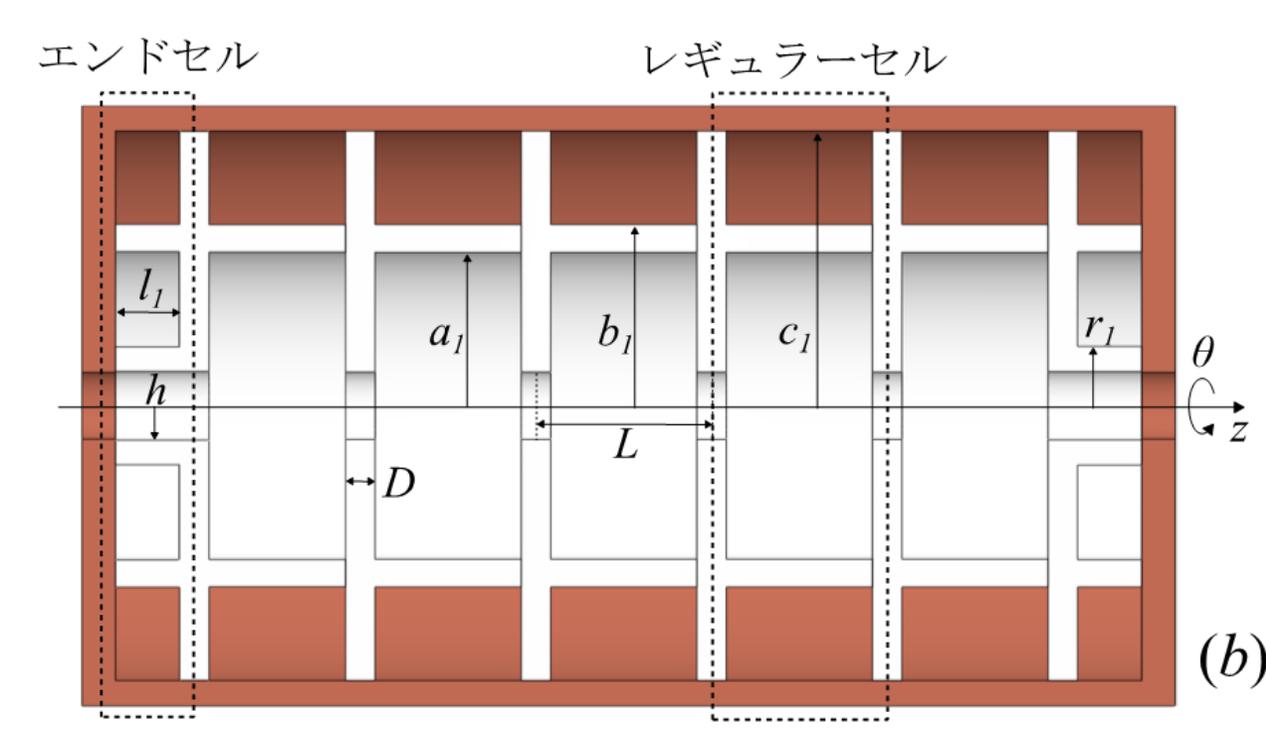
Parameters	MgO
ϵ_r	9.64
$\tan\delta$ @27K	6.6×10^{-7}
Acc. type	Standing wave type
Acc. Mode	TM ₀₂ - π mode
Num. of Acc. cells	5
Frequency	5.712 GHz
Temperature	27 Kelvin
Q_0	7.65×10^6
Z_{sh}	$3.8 \text{ G}\Omega/\text{m}$

D. Satoh et al., NIM:B 459, 15, 148 (2019).

DAA管を20 K程度の低温で動作させることで、室温動作に比べて Z_{sh} が約6倍(一般的な金属加速管の25倍以上)まで向上する可能性がある

【原理実証機の高周波設計】

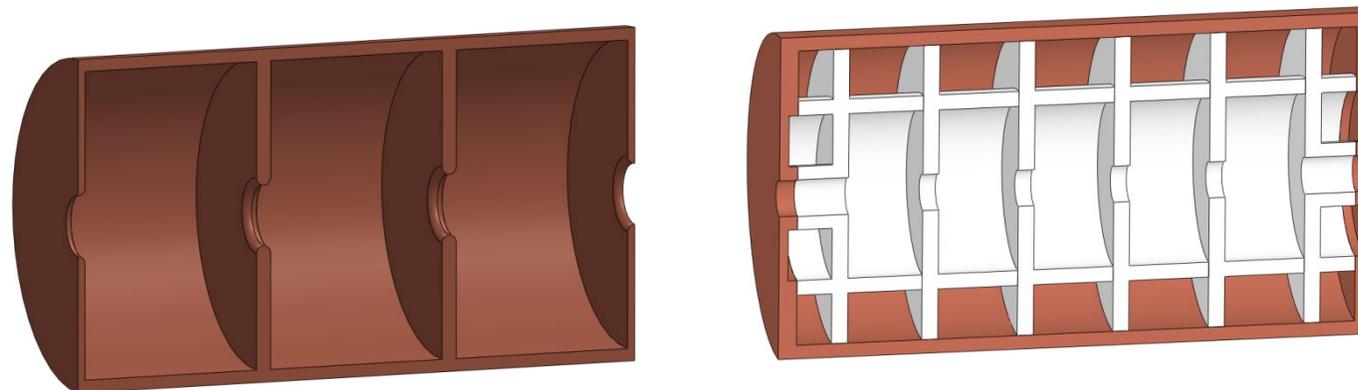
【原理実証機空洞の半断面図】



【設計方法】

- ・セラミック材料: マグネシア ($\epsilon_r = 9.64 / \tan\delta = 6.0 \times 10^{-6}$)
- ・5加速セル構造
- ・レギュラーセルの形状は統一
- ・運転周波数は、C-band (5.712 GHz)
- ・滑降シンプレックス法で Z_{sh} が最大となるように形状パラメータ (l_1, r_1, a_1, c_1) の最適化*
- * b_1 は、共振周波数が運転周波数になるように調整

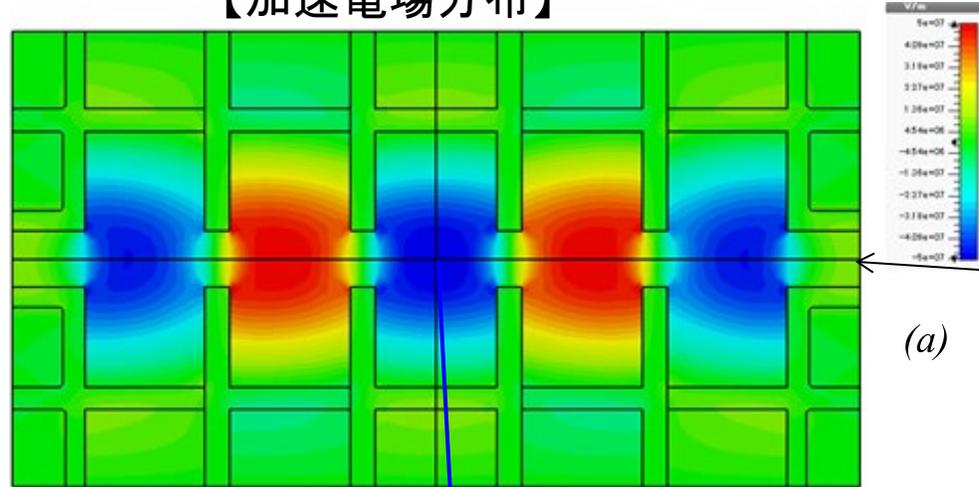
【原理実証機の加速管パラメータ】



Parameter	C-band copper cavity		5 cell DAA Structure
Dielectric Material	—		Magnesia
ϵ_r	—		9.64
Loss tangent	—		6.0×10^{-6}
Accelerator type	standing wave type		standing wave type
Accelerating Mode	TM ₀₁ - π mode		TM ₀₂ - π mode
Operation Frequency	5.712 GHz		5.712 GHz
unloaded - Q	12,674	$\xrightarrow{\times 10}$	126,426
Shunt impedance	142 M Ω /m	$\xrightarrow{\times 4.4}$	629 M Ω /m

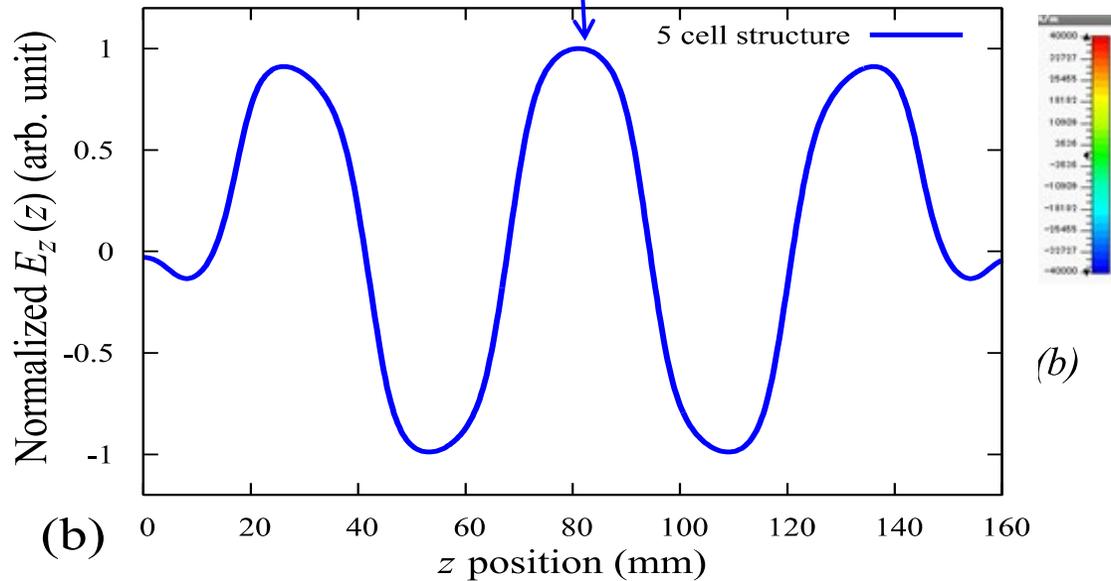
【原理実証機内に励振される加速モードの電磁場分布】

【加速電場分布】



隣り合う加速セルの位相差が 180°
 π モードの加速電場が励振

ビーム軸



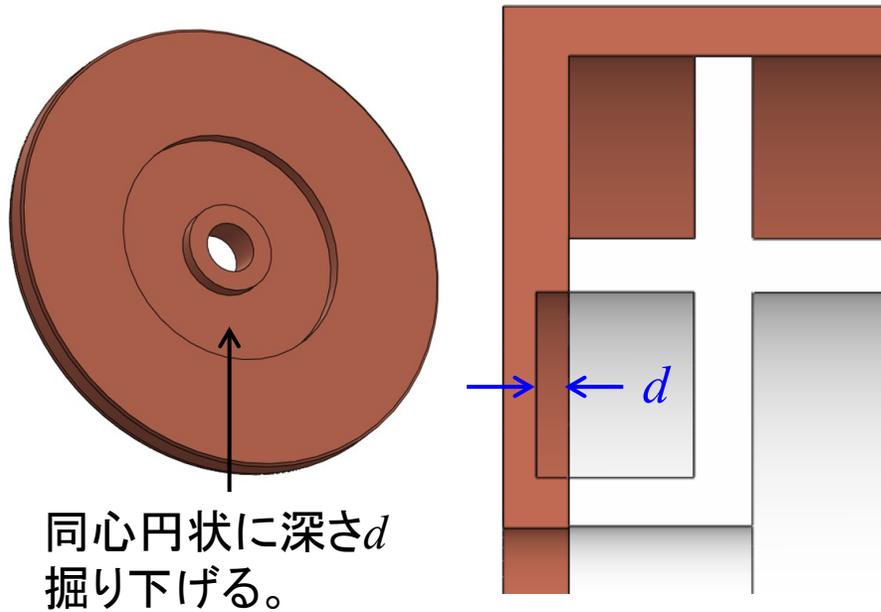
各セルの加速電場のピーク値
平坦度: 91%

【ビーム軸上加速電場分布】

【周波数調整機構の検討】

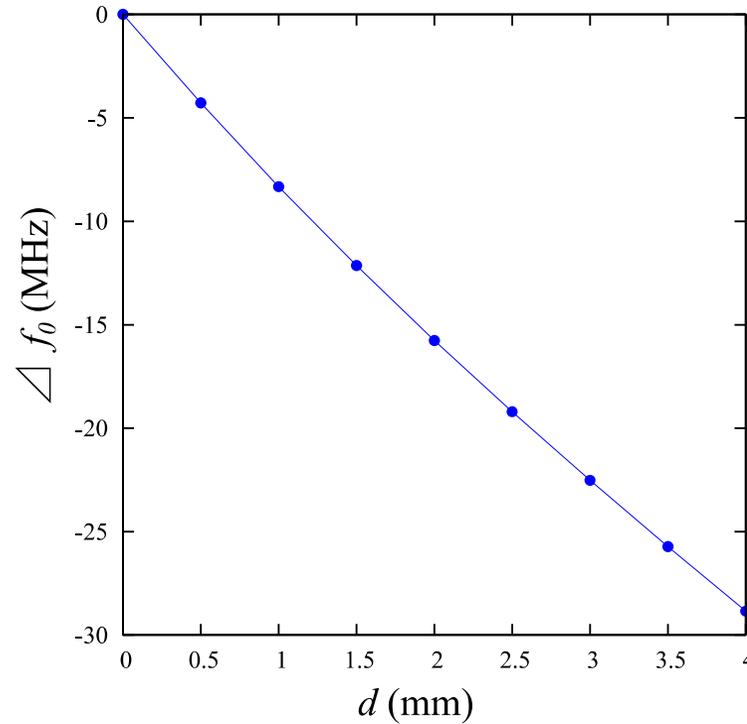
DAA管は、金属端板上を同心円状に深さ d だけ掘り下げることで、共振周波数が掘り下げ深さ d にほぼ比例して低周波数側にシフトさせることができる

【周波数調整機構概念図】

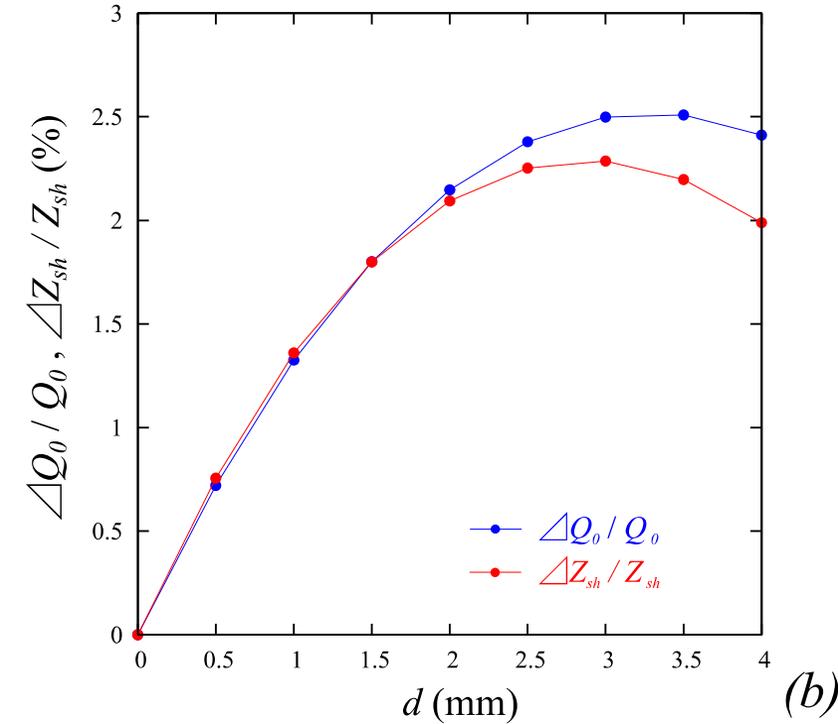


同心円状に深さ d 掘り下げる。

【深さ d と共振周波数変化 Δf_0 の関係】



【深さ d と ΔQ_0 及び ΔZ_{sh} の関係】



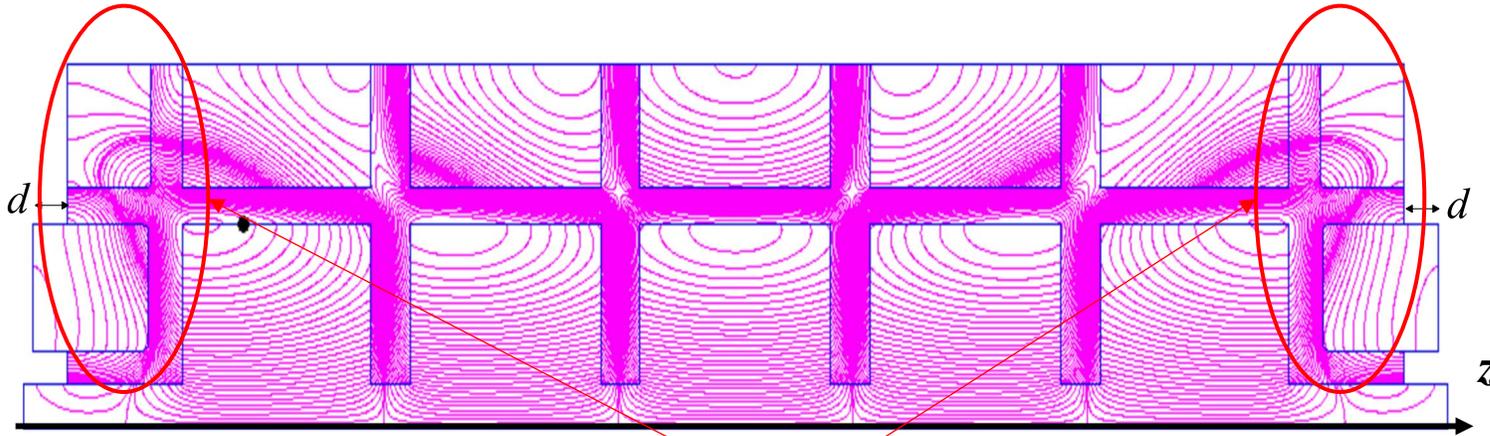
- 本手法により、30MHz程度の調整が可能
- 高い電力効率は維持することができる

【セラミックセルの製作】

・ $f_0 > 5712$ GHzとなるよう寸法公差

【周波数調整機構の検討】

【深さ $d=4.0\text{mm}$ での加速伝番分布】

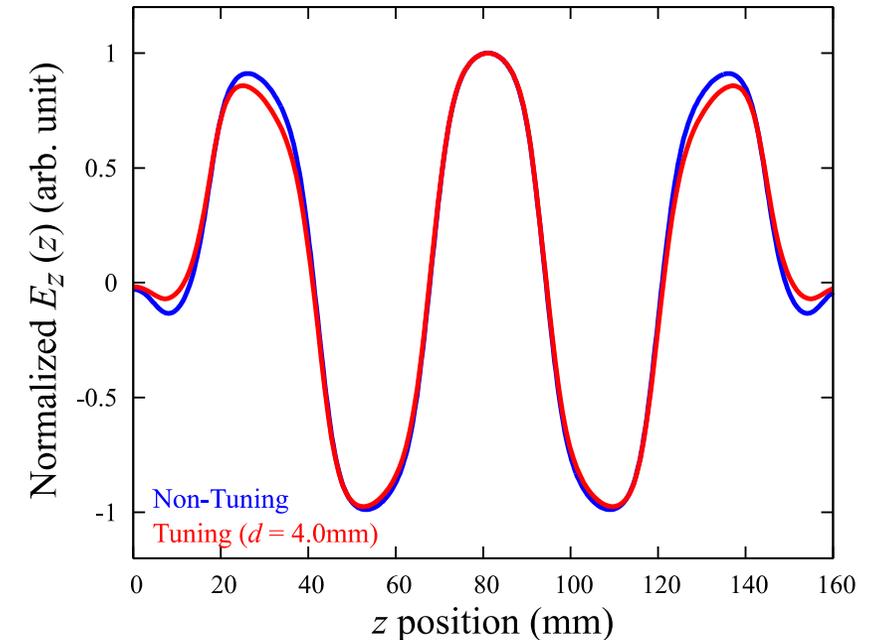


エンドセルでの電磁場分布に変化がみられるが、
ビーム軸近傍には影響が少ない

- 本手法により、30MHz程度の調整が可能
- 高い電力効率を維持することができる
- **ビーム軸上の加速電場への影響も少ない**



【周波数調整の前後での軸上加速電場 $E_z(z)$ 】



【セラミックセルの製作】

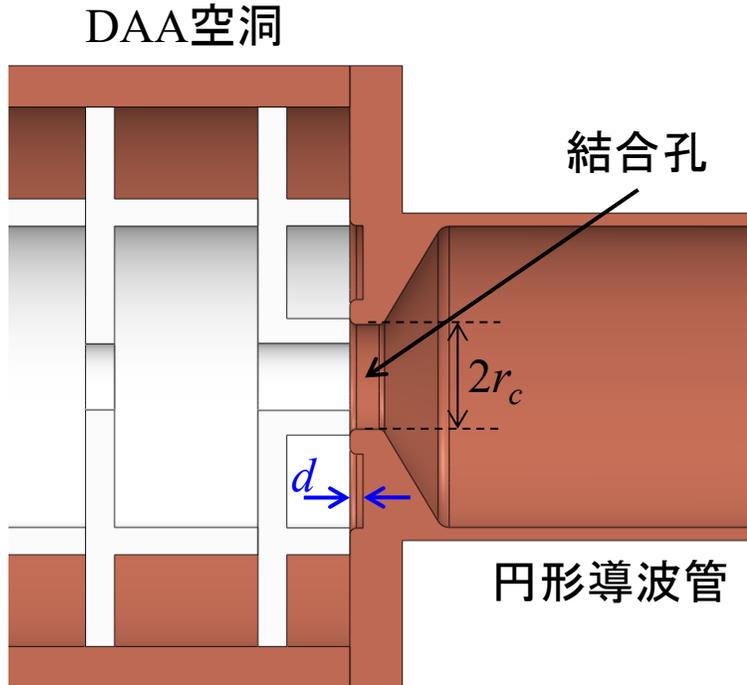
• $f_0 > 5712 \text{ GHz}$ となるよう寸法公差

【入力結合器の高周波設計】

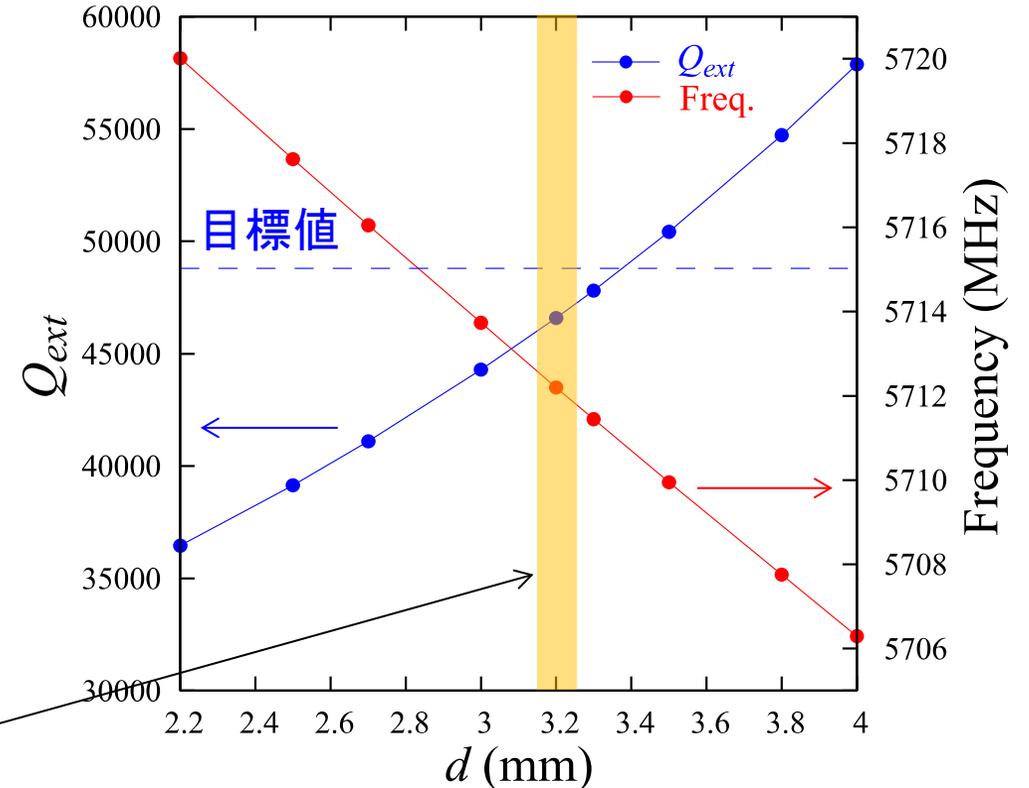
- DAA管は、側面領域(誘電体同軸構造と金属管の間)の電磁場強度が低いため、軸結合の入力結合器を検討
- DAA管の充填時間(T_f)を短くするために、外部Q値 $Q_{ext} = 48,800$ 、結合度 $\beta = 2.5$ 程度となるように設計。

$$T_f \propto Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta}, \quad \beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}}$$

【入力カプラーの基本構造】



【計算結果($2r_c = 9.8 \text{ mm}$)】

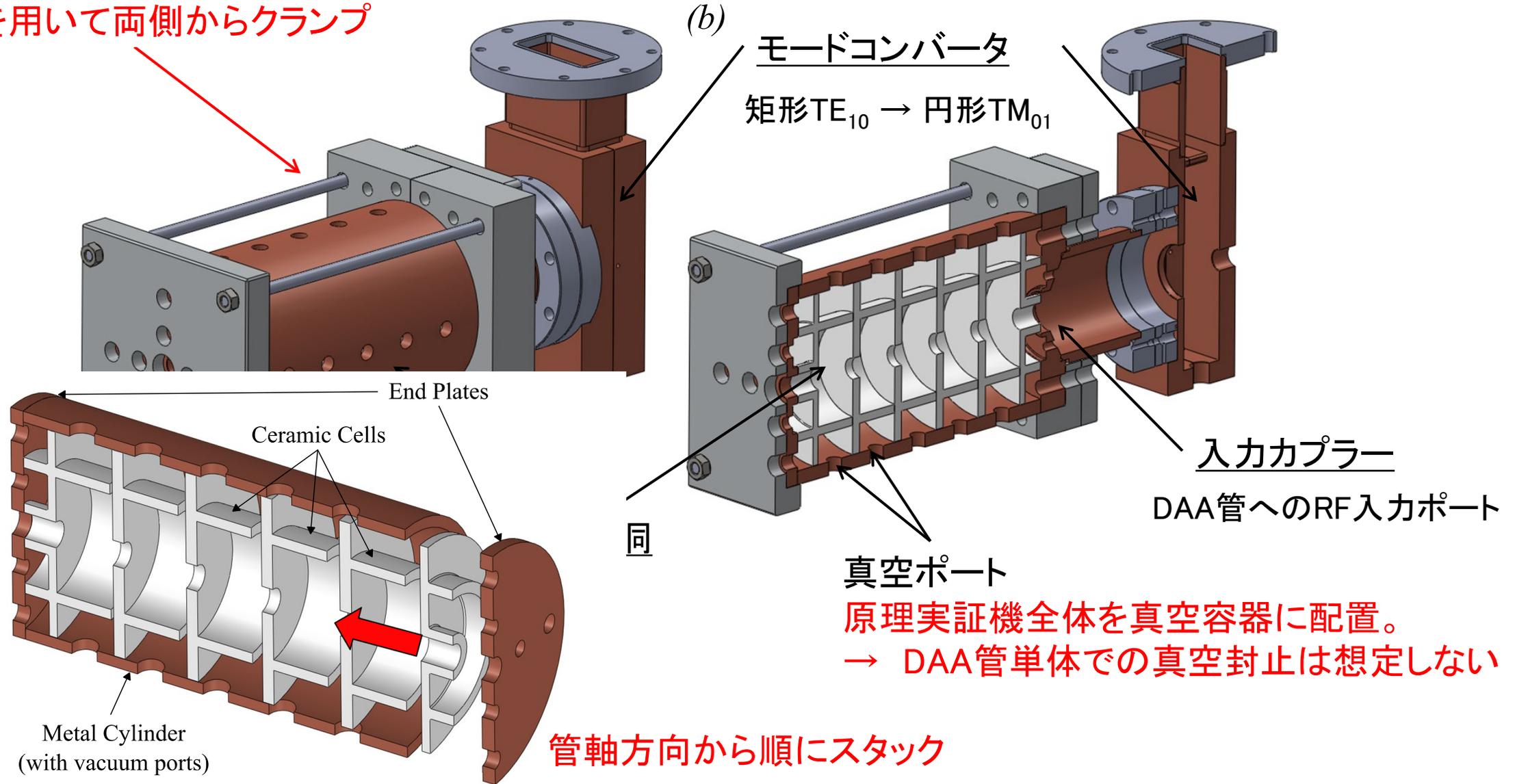


【設計値】

結合孔直径 $2r_c = 9.8 \text{ mm}$, $d = 3.2 \text{ mm}$

【原理実証機の全体構造】

ボルトを用いて両側からクランプ



原理実証機全体を真空容器に配置。
→ DAA管単体での真空封止は想定しない

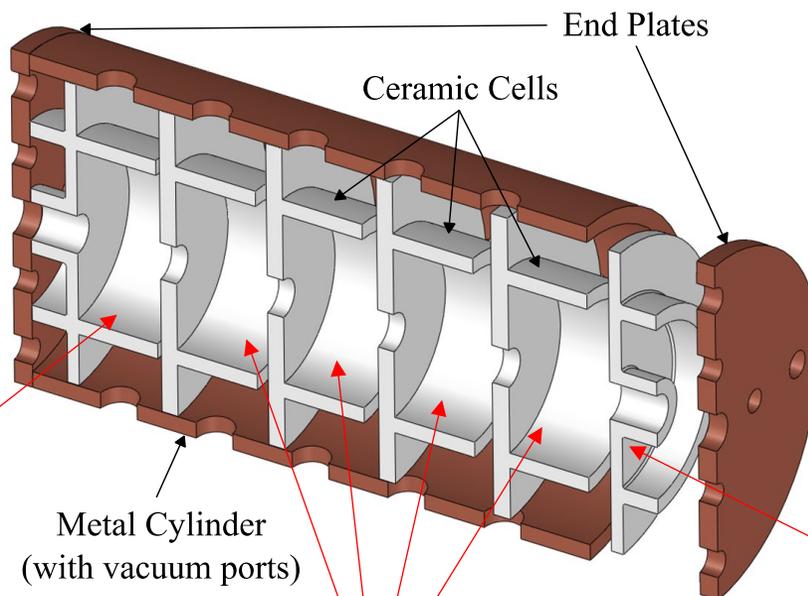
【加速管アセンブリ】

管軸方向から順にスタック
*金属管のロウ付けは実施せず

【誘電体セルの製作】

【製作プロセス】

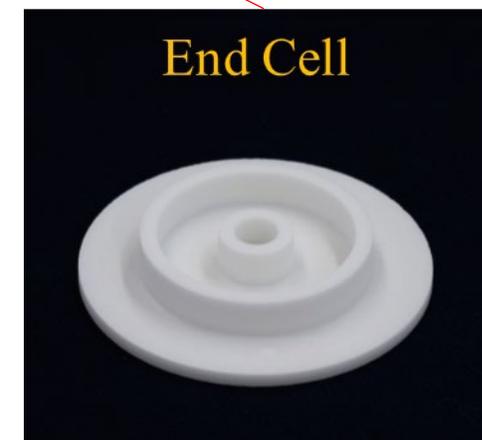
- ①金型プレス成形
- ②冷間等方圧加工法(CIP)
- ③粗加工
- ④焼結
- ⑤仕上げ加工(超精密無)



【DAA管単体の仕上がり】

$$f_0 = 5.72638 \text{ GHz}$$

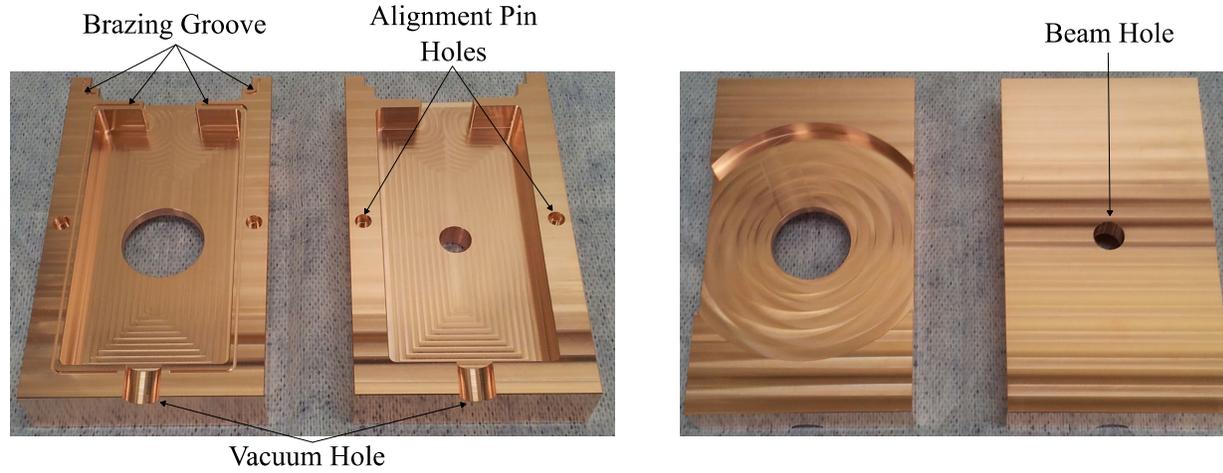
$$(\Delta f_0 = +14 \text{ MHz})$$



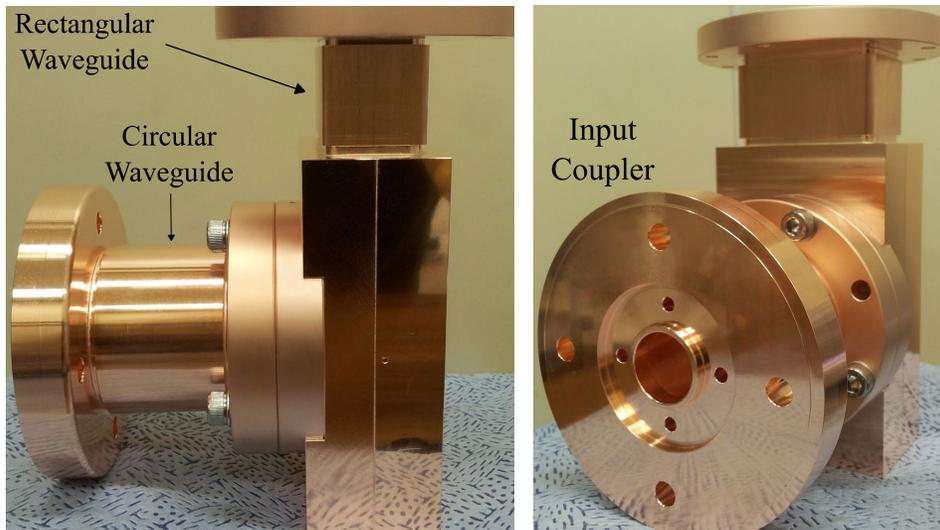
【製作した3種類の誘電体セル】

【原理実証機の製作・アセンブリ】

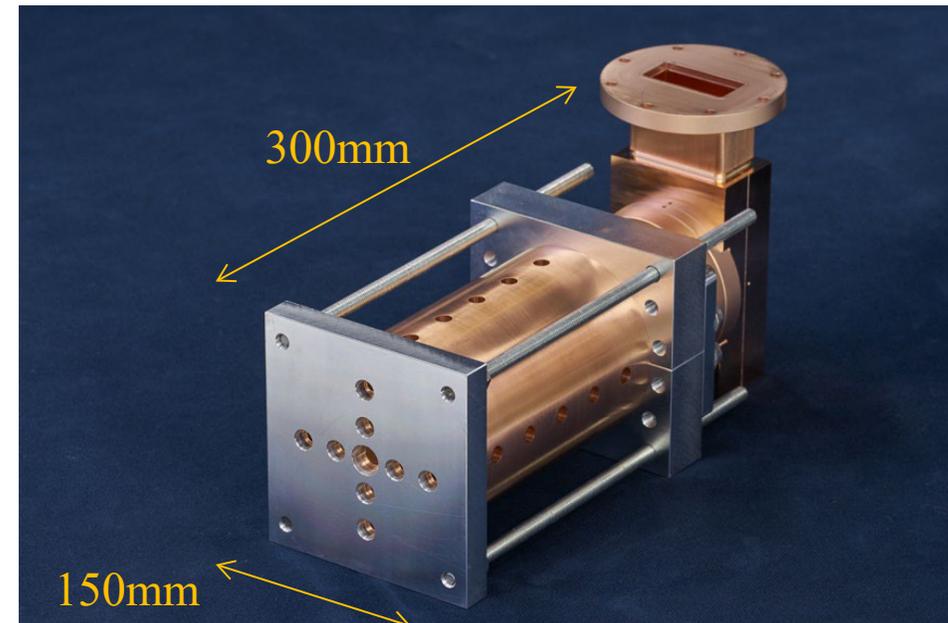
【ロウ付け前のモードコンバータ】



【入力結合器・モードコンバータ】

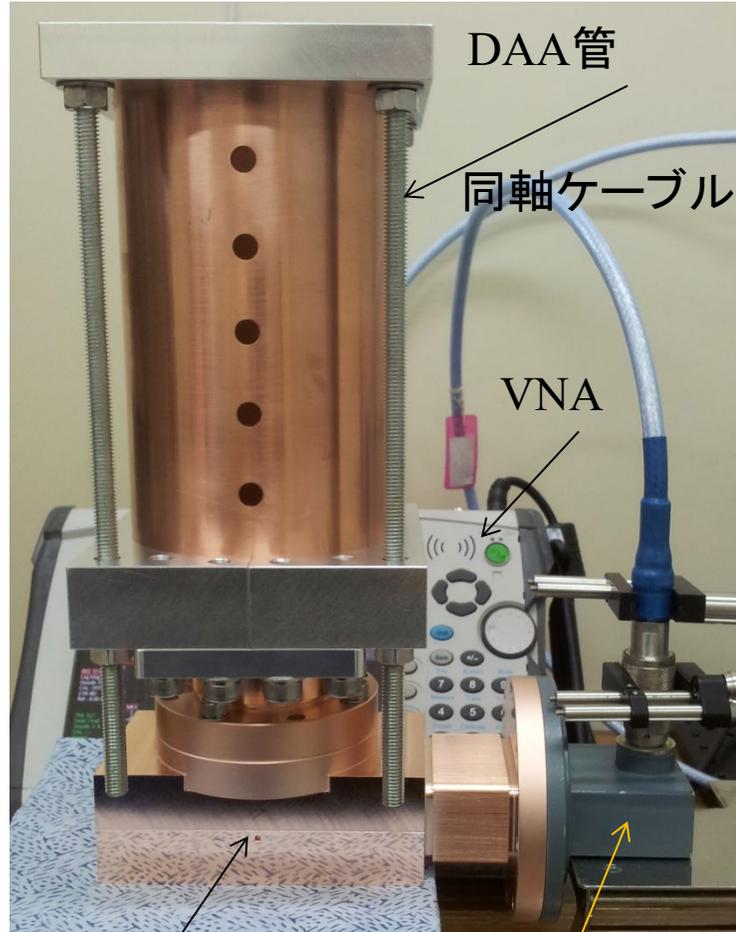


【アセンブリしたDAA管原理実証機】



【原理実証機の低電力試験】

【測定セットアップ】

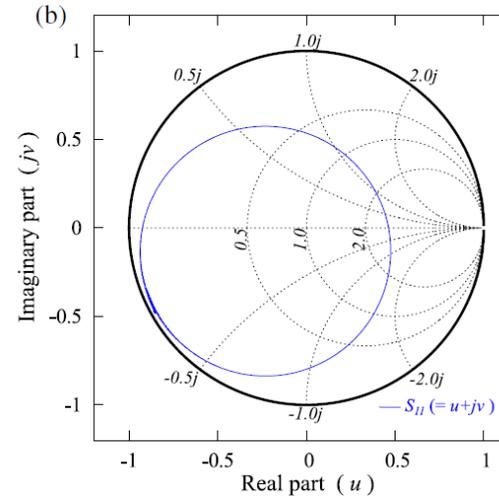


モードコンバータ

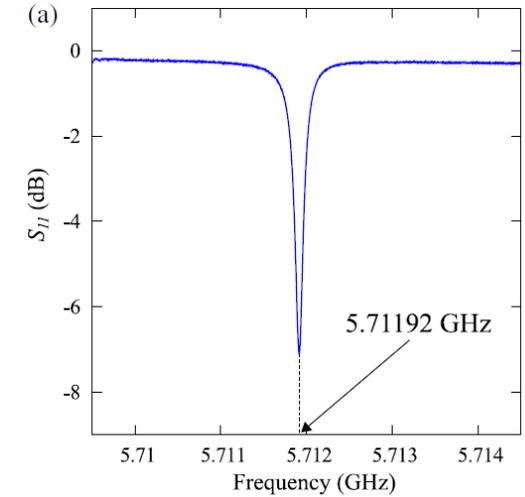
同軸導波管変換

【測定結果】

【スミスチャート】



【S11】



Parameters	設計値	測定値
d (mm)	3.2	4.20
f_0 (GHz)	5.712	5.71192
Q_0	126,426	119,316
Q_{ext}	48,800*	48,771
Q_L	35,209	34,620
β	2.59	2.45

【軸上加速電場分布測定】

【ビードプル摂動法】

空洞内に摂動体(金属、誘電体等)を挿入すると、共振周波数が変化

$$f^2 = f_0^2 \left(1 + \frac{\mu_0 \int_{\Delta V} \vec{H}_0 \cdot \vec{M} dV - \int_{\Delta V} \vec{E}_0 \cdot \vec{P} dV}{\frac{1}{2} \int_V (\epsilon_0 |\vec{E}_0|^2 + \mu_0 |\vec{H}_0|^2) dV} \right)$$

摂動効果

【共振周波数変化 Δf と空洞内電場 $E_0(z)$ の関係】

$$\frac{\Delta f(z)}{f_0} \approx -F_E \frac{\epsilon_0 |\vec{E}_0(z)|^2}{U}$$

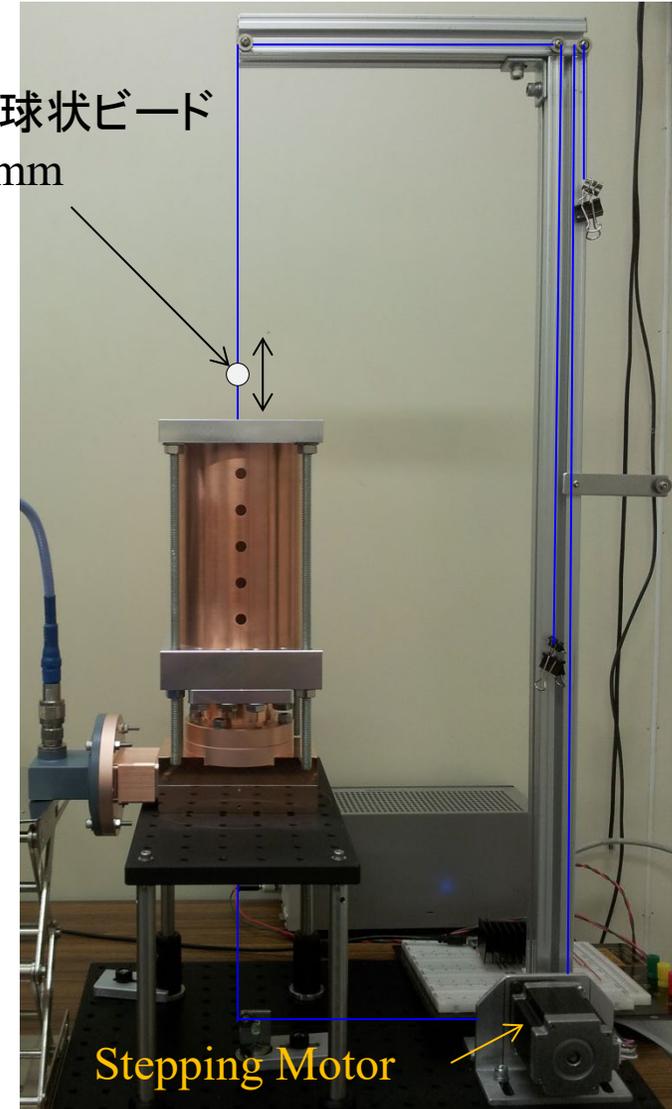
F_E : 形状ファクター
 U : 蓄積エネルギー

【測定方法】

DAA管のビーム軸上に摂動体を挿入し、各挿入位置で非摂動時からの共振周波数変化を測定することで加速電場分布を間接的に測定する。

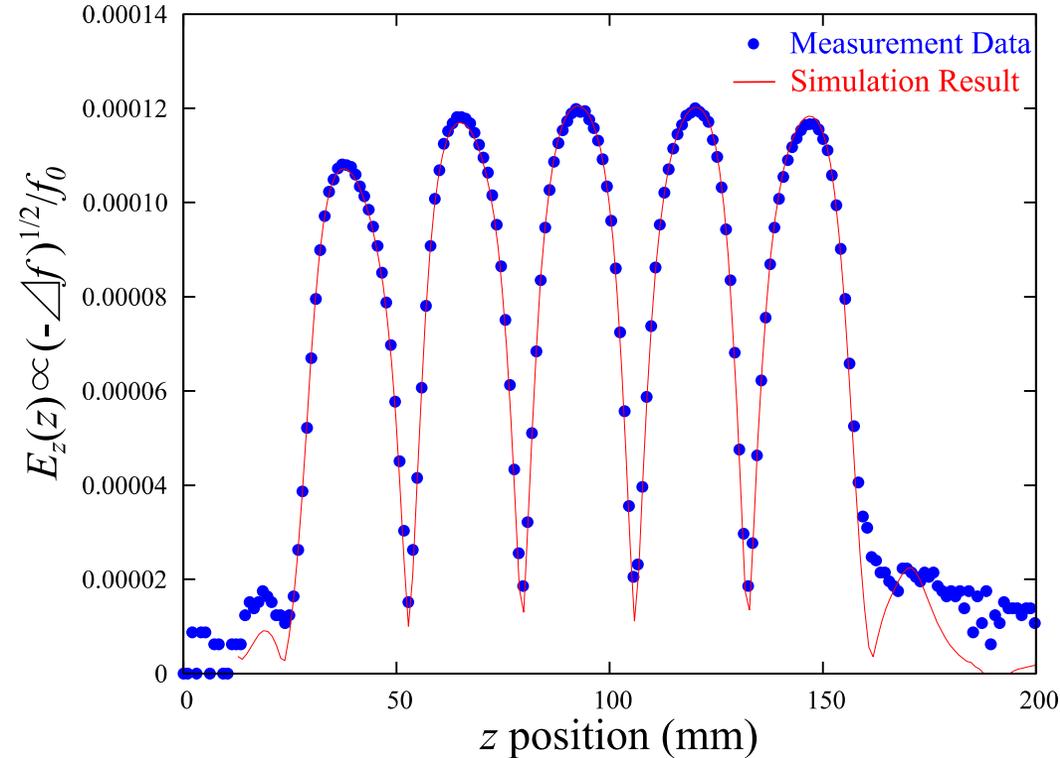
【ビード測定装置】

A1製球状ビード
φ2.0mm

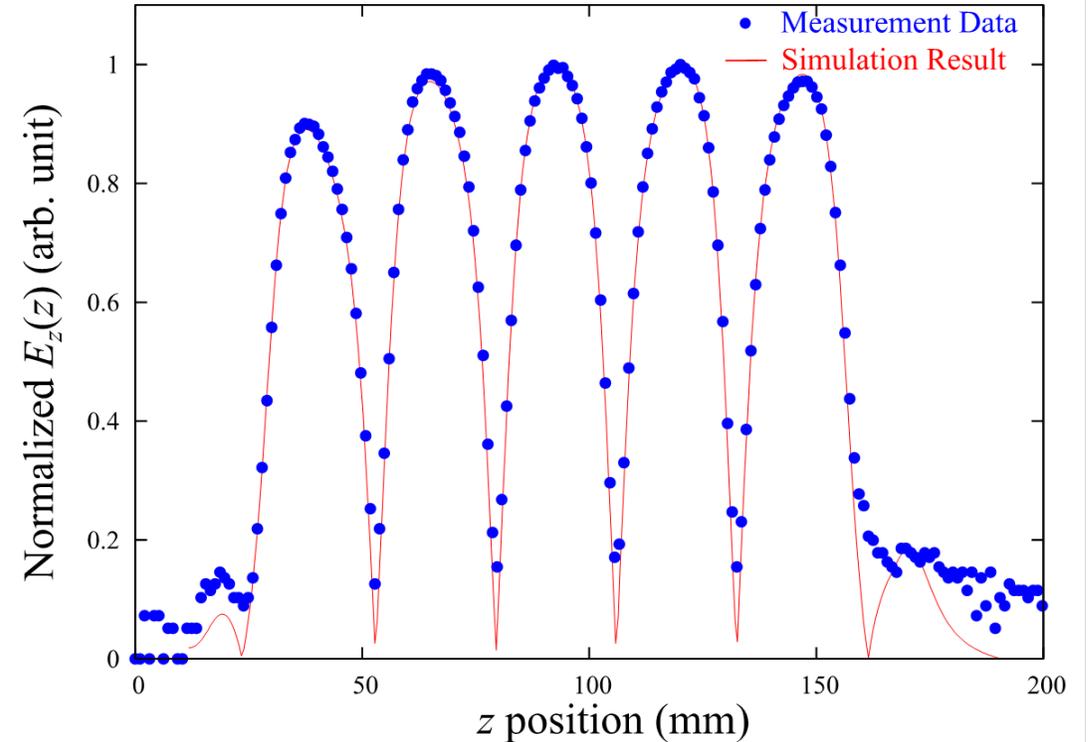


【ビード測定結果】

【摂動による共振周波数変化の比較】



【軸上電界との比較】

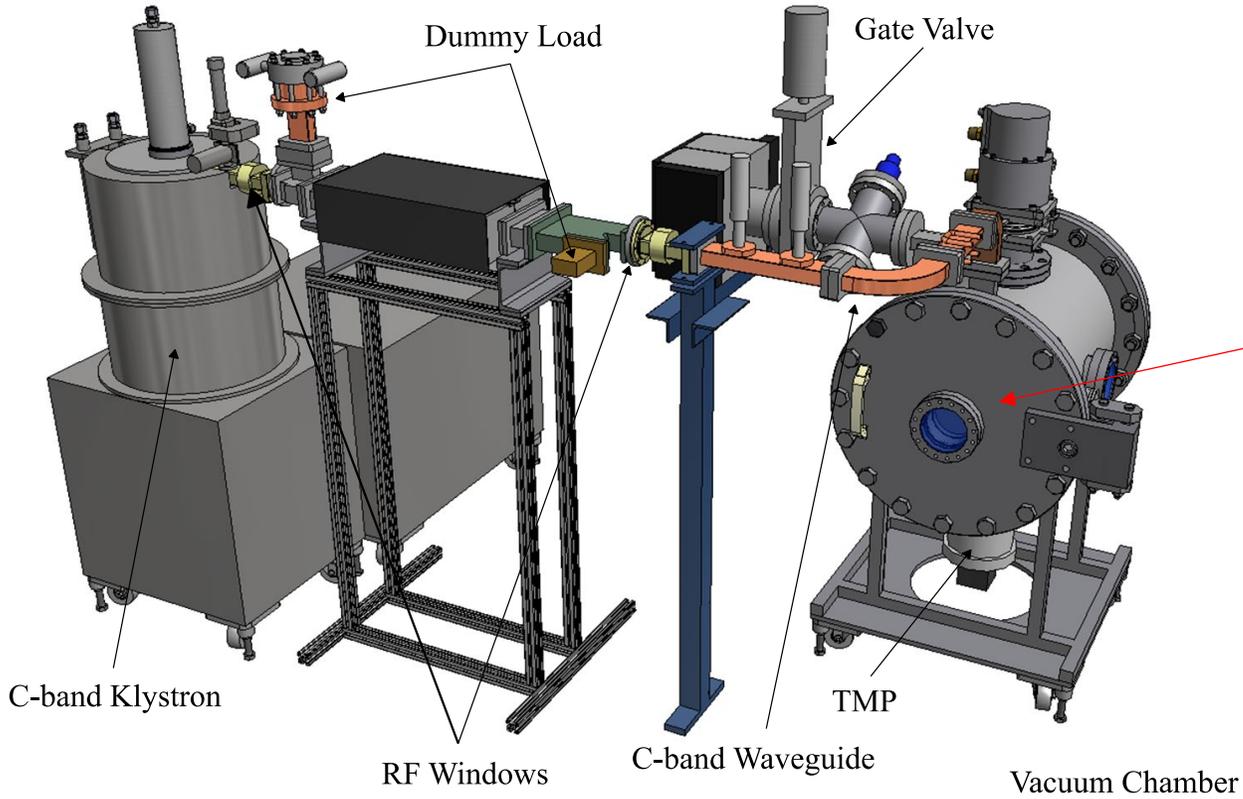


- 測定値と計算値がよく一致
- 一連の測定モードが、加速モードである
- 加速電場の平坦度は90%以上達成



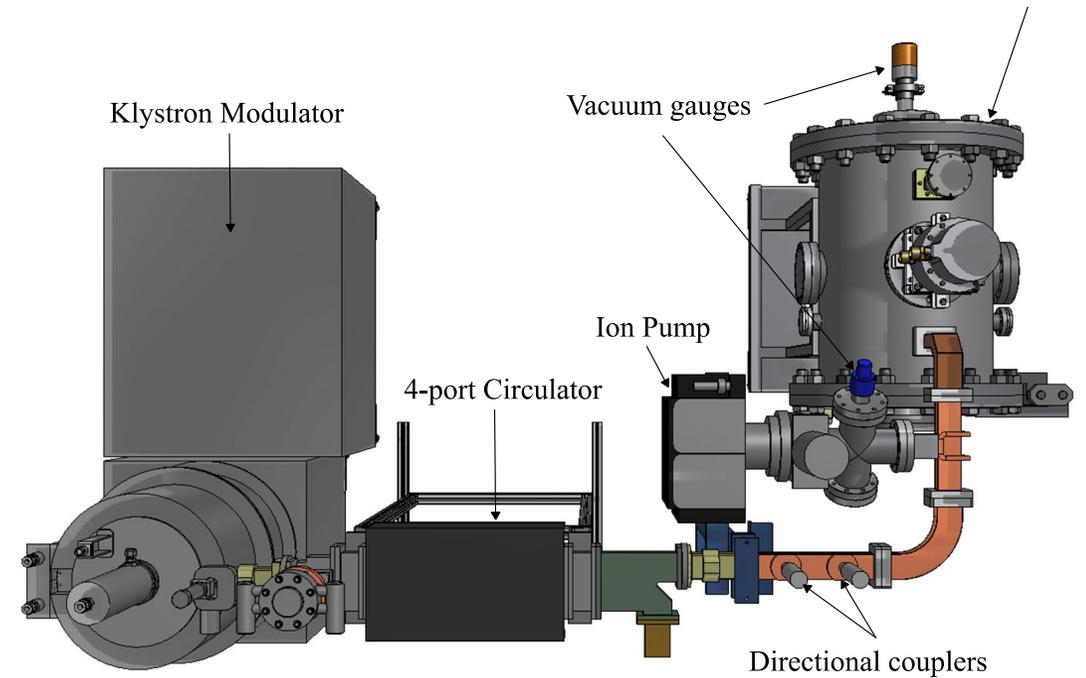
単位長さあたりのシャントインピーダンス $Z_{sh} = 617 \text{ M}\Omega/\text{m}$

【高電界試験装置：概念図】

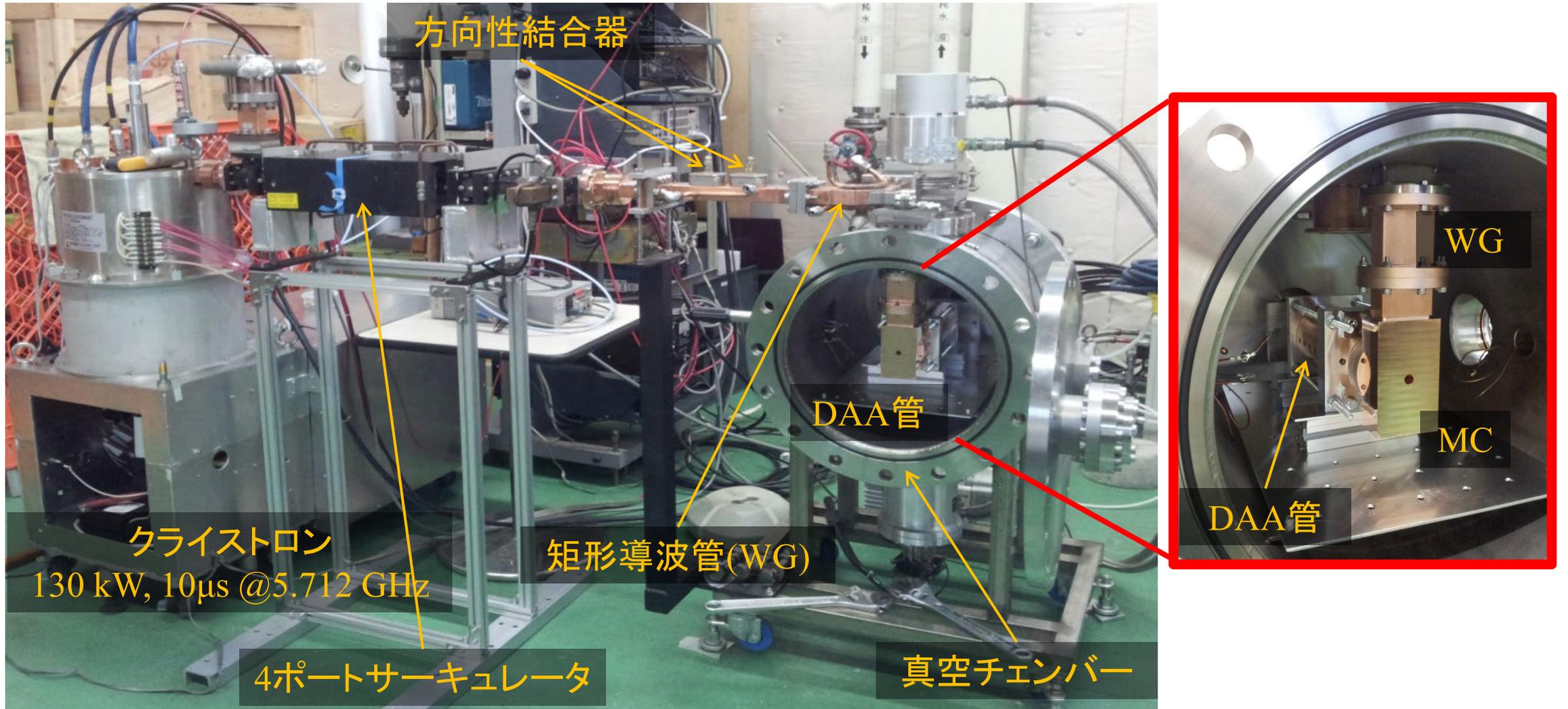


DAA管は真空チェンバー内に配置

C-band klystron
130 kW, 10 μ s @5.712 GHz

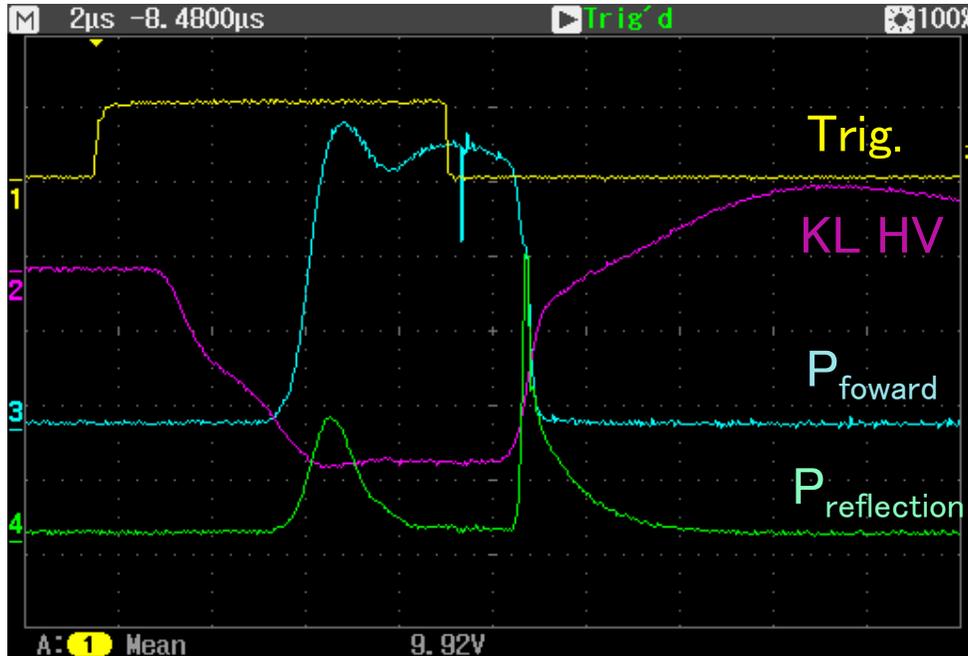


【高電界試験装置@KEK, Yoshida Lab.】

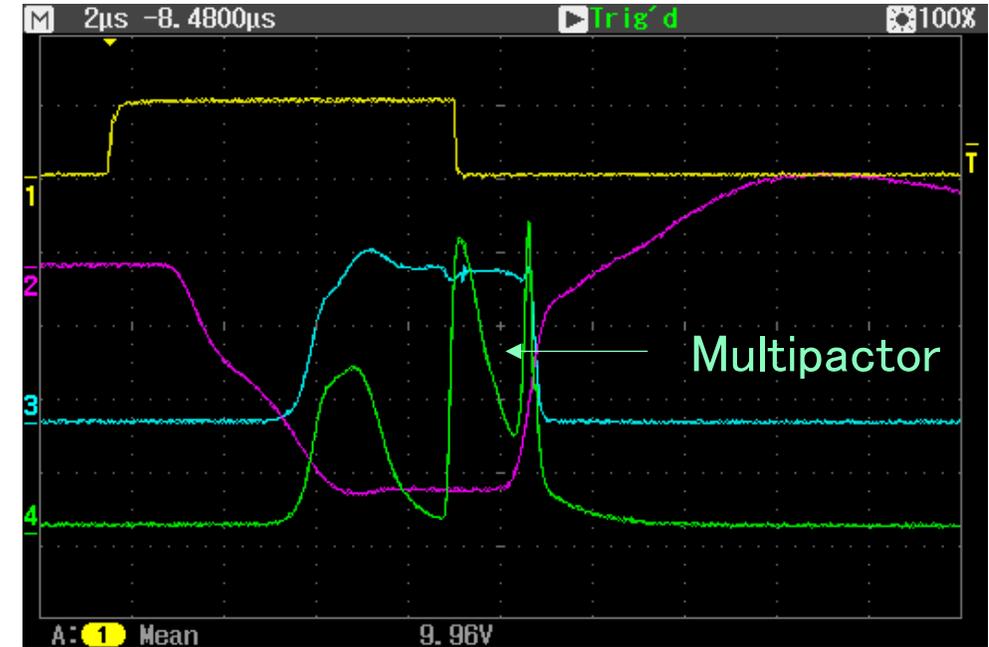


【原理実証機の高電界試験結果】

【正常波形】



【異常波形】



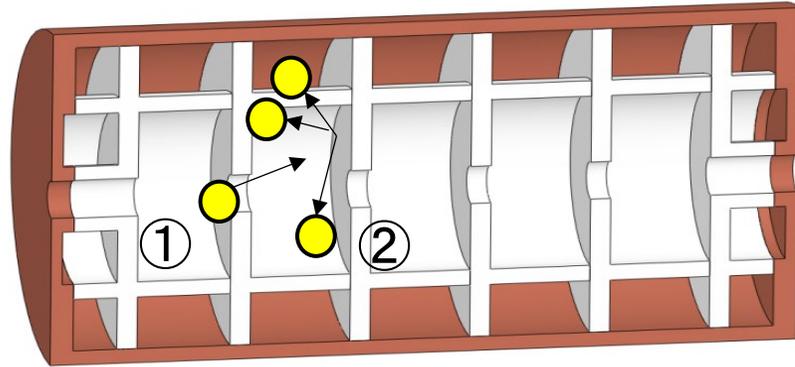
【結果のまとめ】

- DAA管でもRFコンディショニング効果あり。(徐々に加速電界が向上)
- 軸上加速電界は、 $E_{acc,max} = 2 \text{ MV/m}$ (@ $T_p = 2 \mu\text{s}$) まで到達。
- パルス幅を伸ばしていくと、到達加速電界が低い。
- RFパワーを上げていくと、常にマルチパクタ(異常波形)が見られた。
* 真空ポートからわずかな発光が見られた。

【課題と今後の改善に向けて】

【マルチパクタ】

二次電子の指数関数的増加による高周波電力の損失や放電の誘発



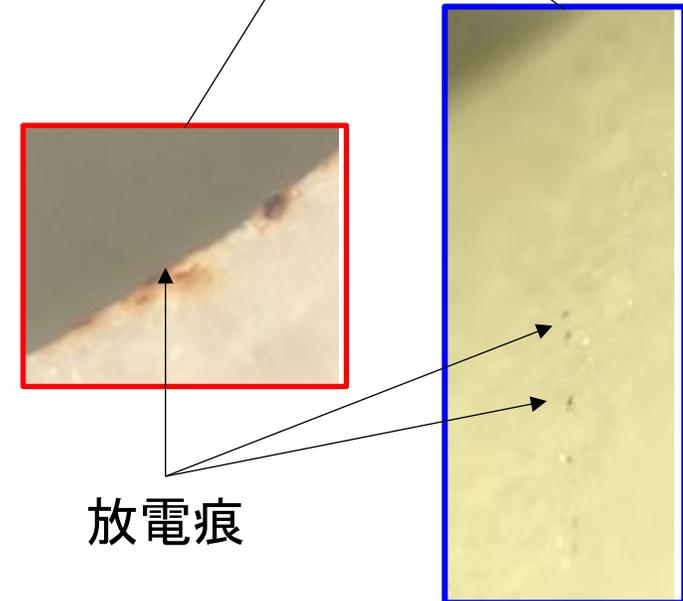
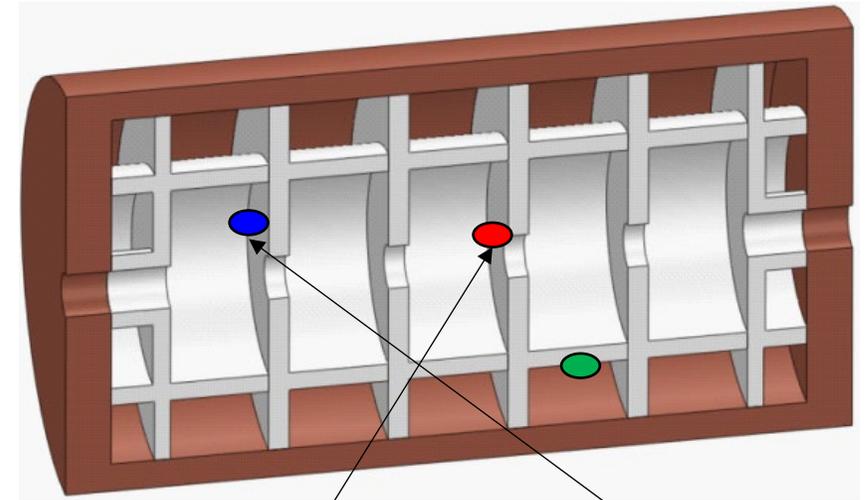
- ①セラミックに電子が衝突
- ②二次電子生成・加速、衝突の連鎖
→ 高周波電力を大きく消費

二次電子放出係数： η

- 無酸素銅： $\eta \sim 1.5$
- マグネシア： $\eta \sim 4$

誘電体表面の二次電子放出係数の低減が必要

【高電界試験後の誘電体セル】



放電痕

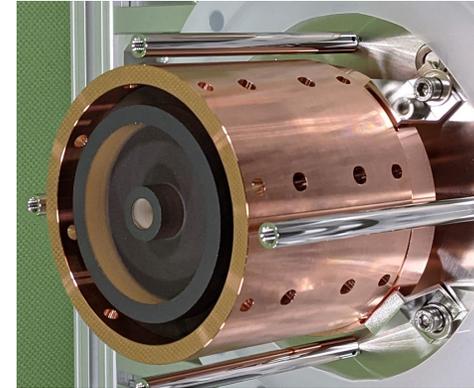
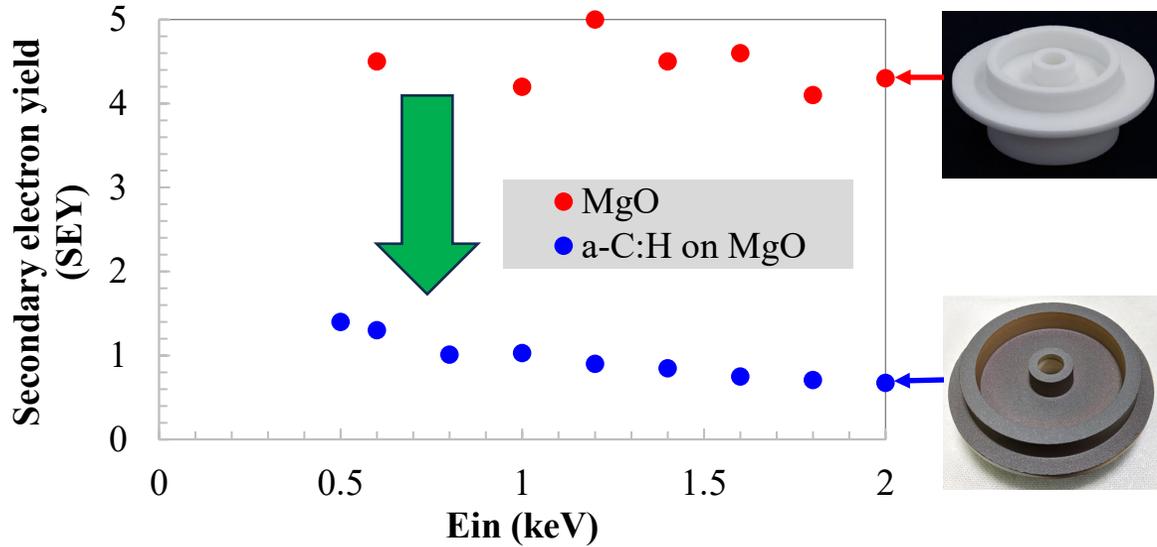
【ダイヤモンドライクカーボン膜付きDAA管の開発】

DLC膜は、高周波損失を増やすことなく二次電子放出係数を低減できる

H. Xu et al., PRAB 22, 021002 (2019).

【二次電子放出係数(SEY)の測定結果】

【DLC coated dielectric cell & DAA structure】



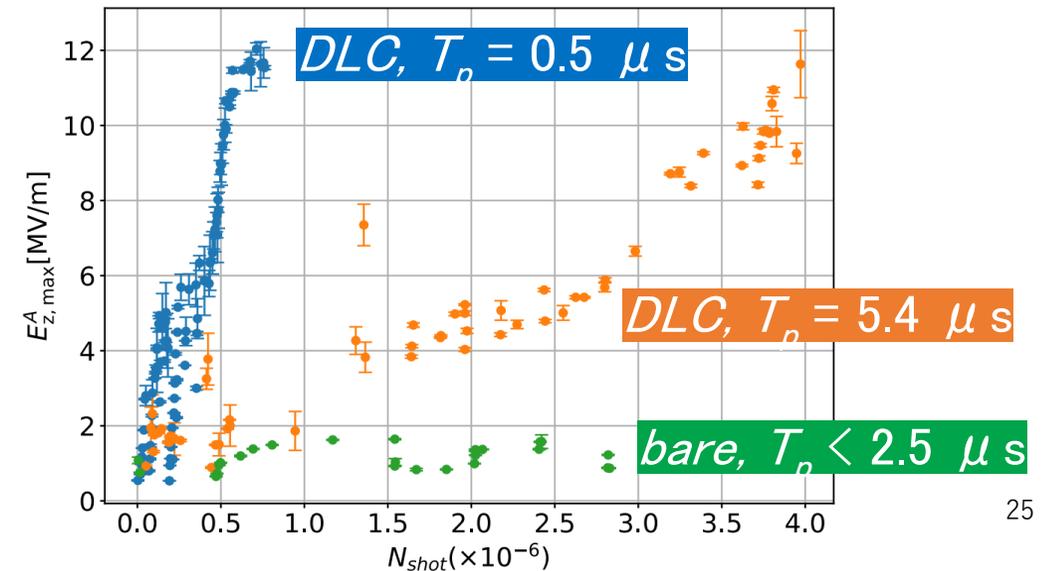
【低電力試験^[3]】
 Q_0 -uncoated : 112,000
 Q_0 -DLC(a-C:H) : 113,000

Maintaining a high Q_0 value !

マグネシア表面のSEYを大幅に低減化

- $E_{acc,max} = 11 \text{ MV/m}$ (@ $T_p = 5.4 \mu\text{s}$)を達成^[3]
 → 産業用加速器としては実用水準
- 大きな放電が発生し、不可逆的な変化が生じ、最大到達電圧まで回復しない

【High power test of DLC-DAA structures^[3]】



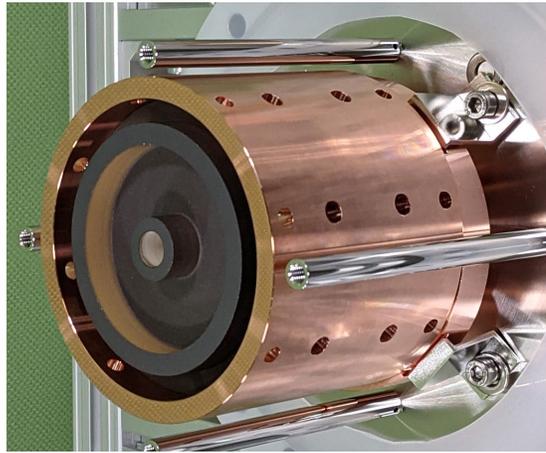
[3] S. Mori, M. Yoshida, D. Satoh, PRAB 24, 022001 (2021)

【誘電体加速技術の課題と改善への糸口】

加速電界に着目すると…

C-band DAA管

RF駆動



真空放電等により
加速電界が制限

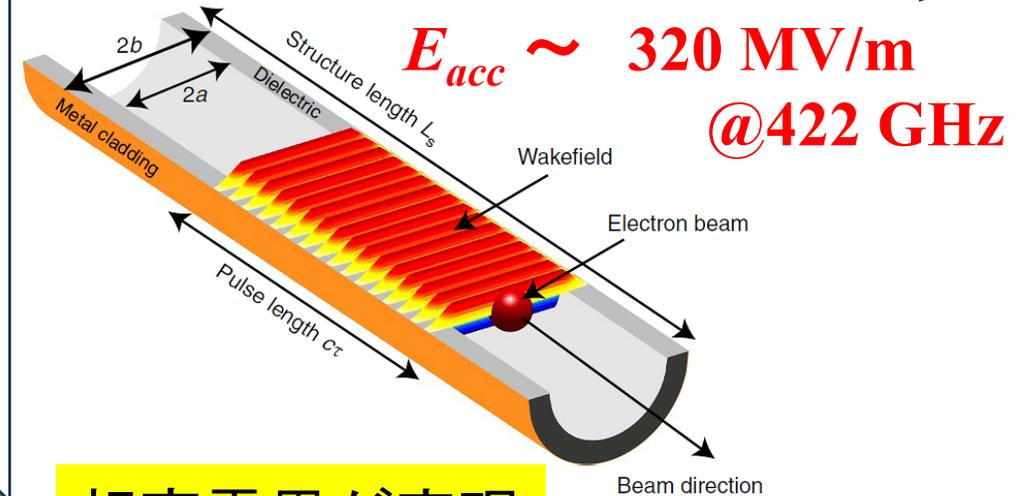
$E_{acc} \sim 12 \text{ MV/m}$

純金属常伝導加速管に比べて劣る

S. Mori et. al., Phys. Rev. Accel. Beams 24, 022001(2021)

誘電体航跡場加速

ビーム
駆動



超高電界が実現

引用元 : B.D. O'Shea et al., Nat. Comm. 7, 12763 (2016).

両者の性能の大きな乖離の要因は何か？

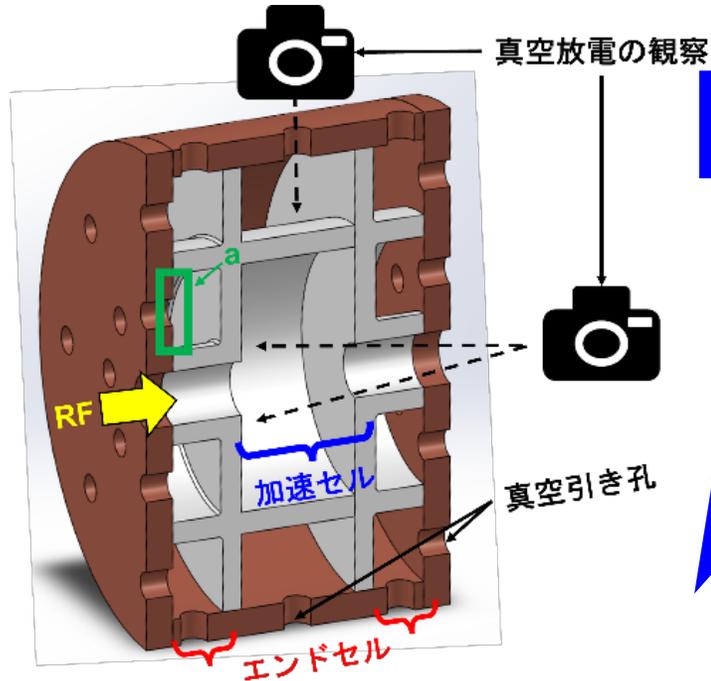
加速管を励振する電磁波の**周波数**、**パルス幅**が大きく寄与している可能性！

➡ DAA管を高周波数帯で短パルス励振によって高電界化できるのではないかと着想

【X-band DAA管の開発と高電界化の検証@KEK, Nextef2】

① X-band 単セルDAA管の開発

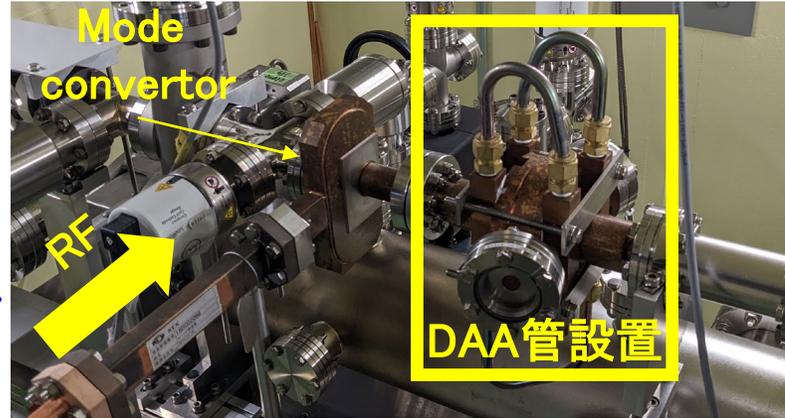
X-band DAA管を製作



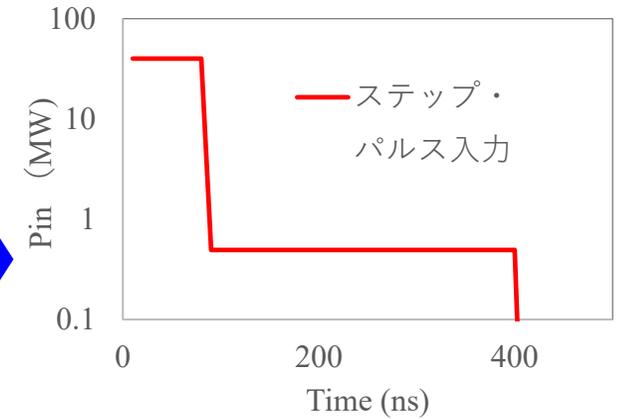
- DAA管内での放電箇所の特定
- DAA管の構造や形状を改善

→ 高加速電界へ

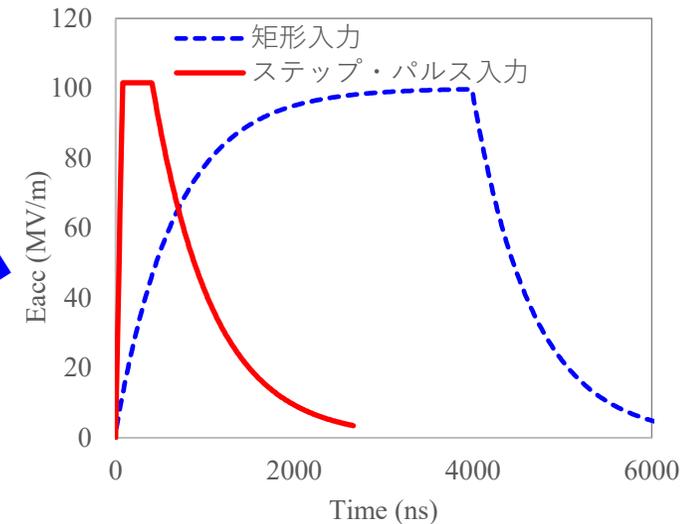
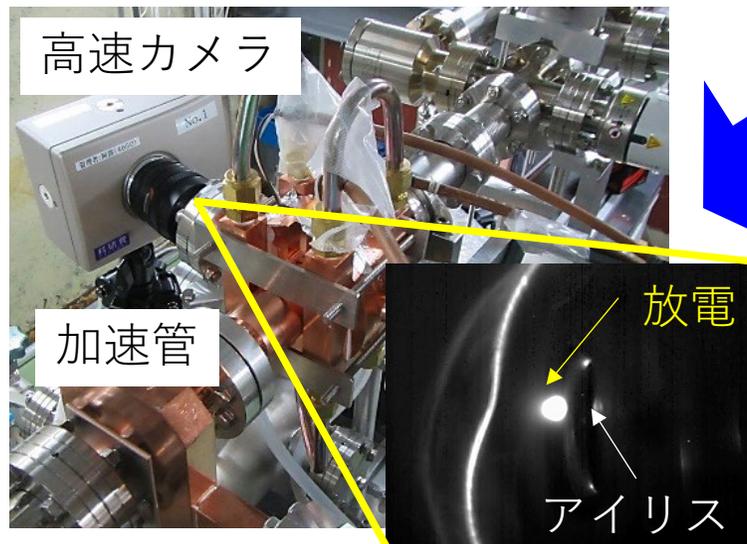
② Nextef2にて高電界試験



③ ステップ・パルス入力による短パルス励振

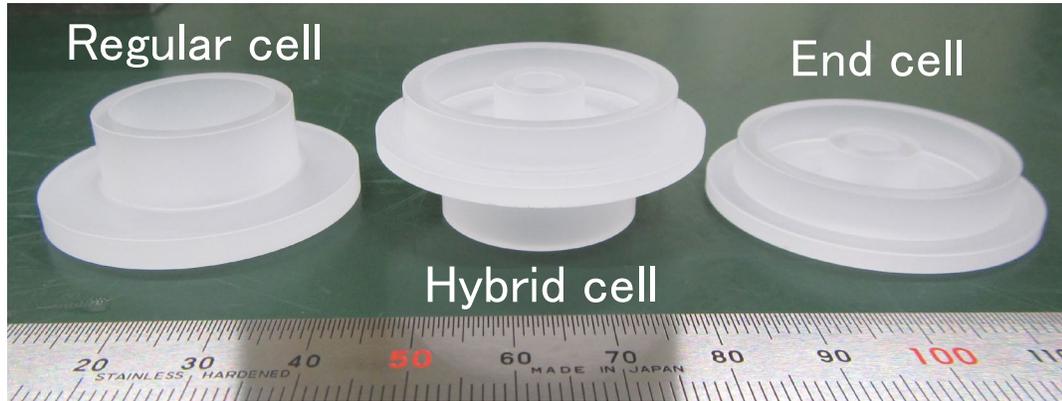


④ DAA管内での真空放電の観察

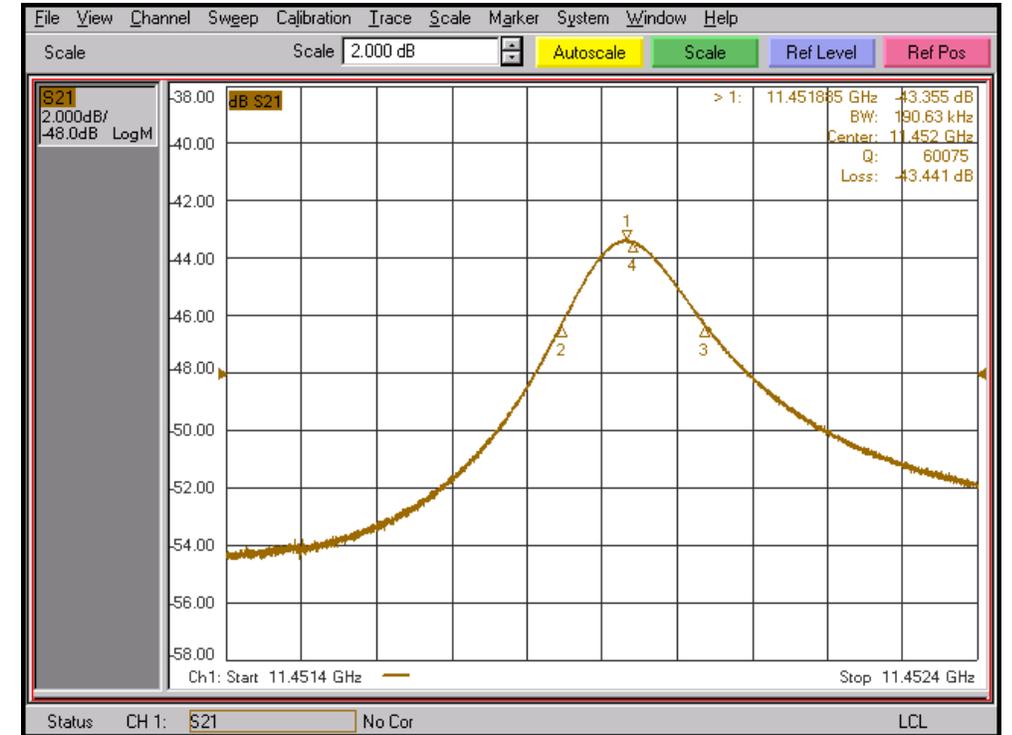


【 X-band DAA管の製作と低電力試験】

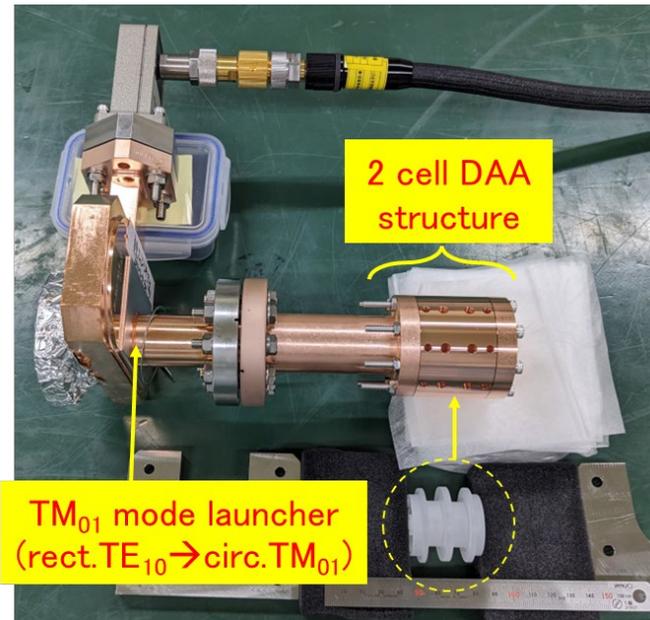
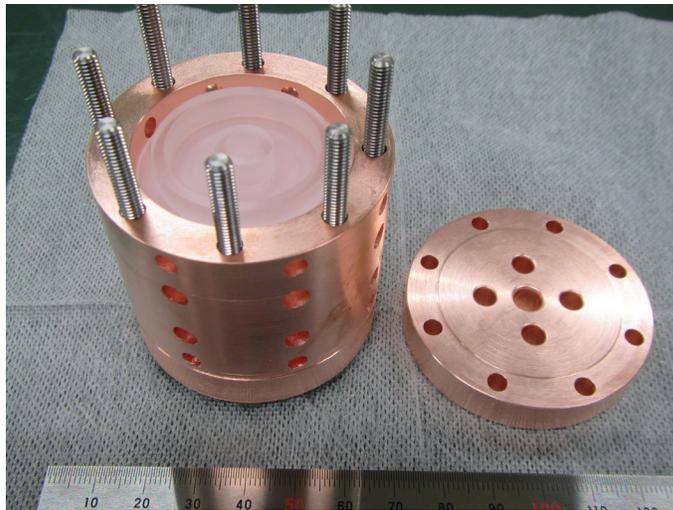
【製作したサファイヤセル】



【低電力試験結果@ DAA#X1】



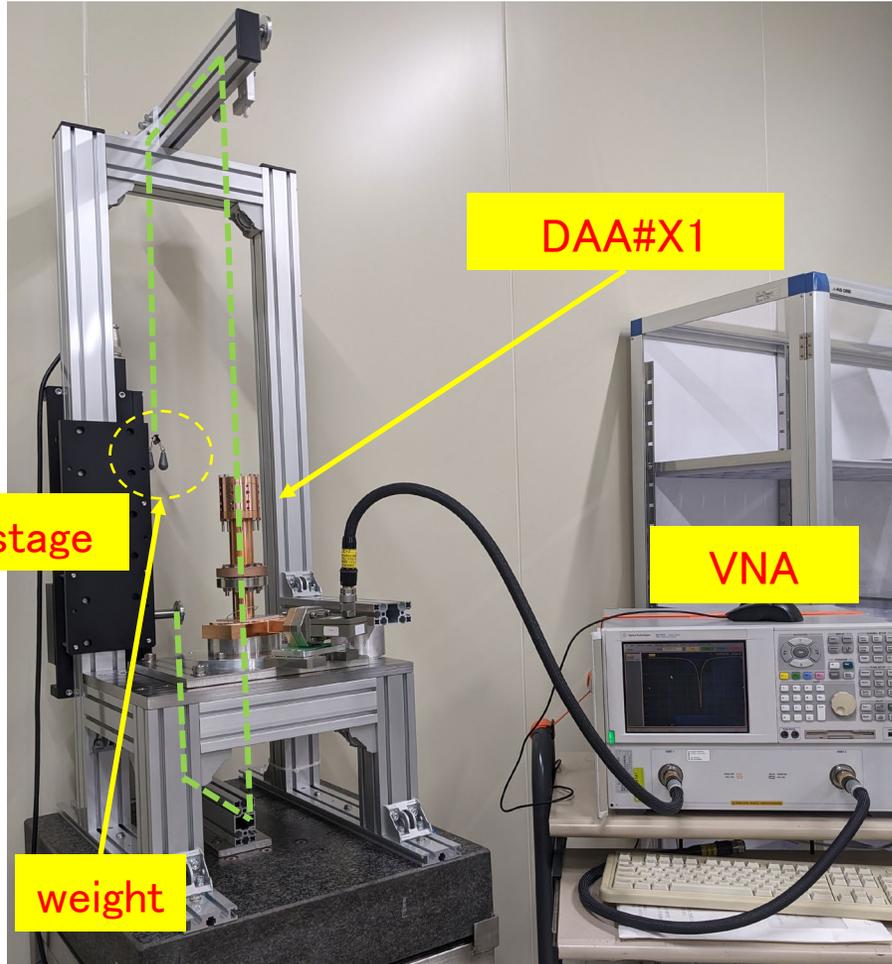
【アセンブリした DAA#X1】



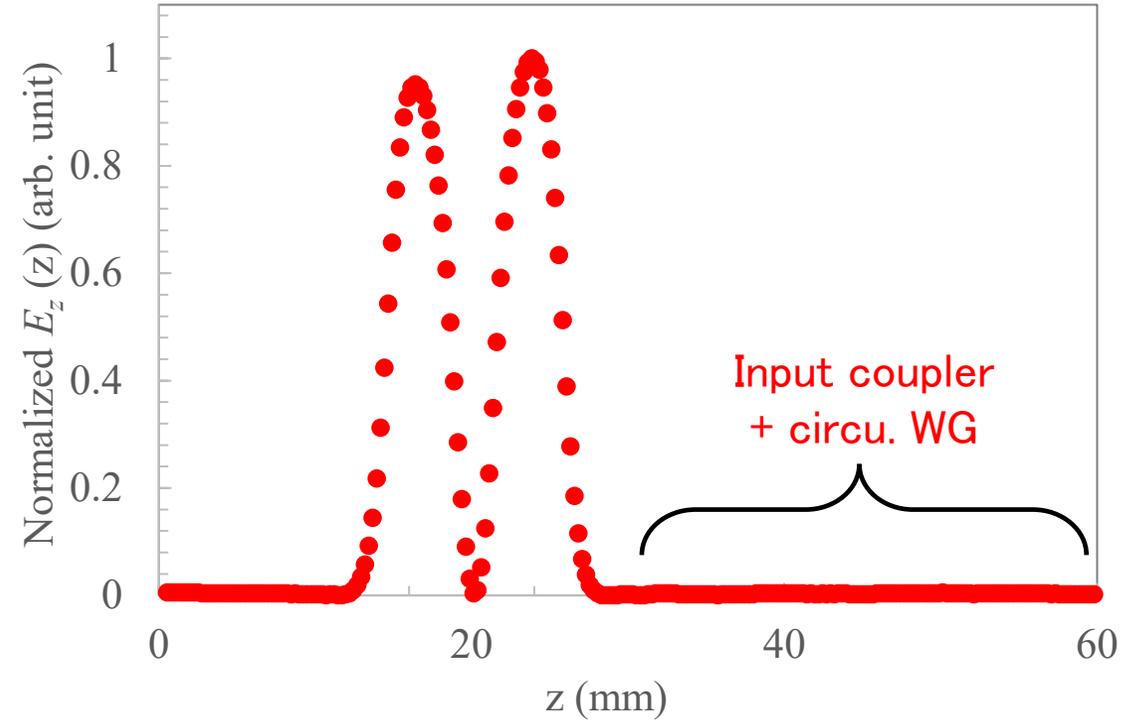
Parameters	Simulation Results	Measured Results
f_0	11.4526 GHz	11.4519 GHz
Q_0	59,000	60,000

【ビード測定結果@DAA#X1】

【ビード測定装置@KEK】



【軸上加速電界分布】

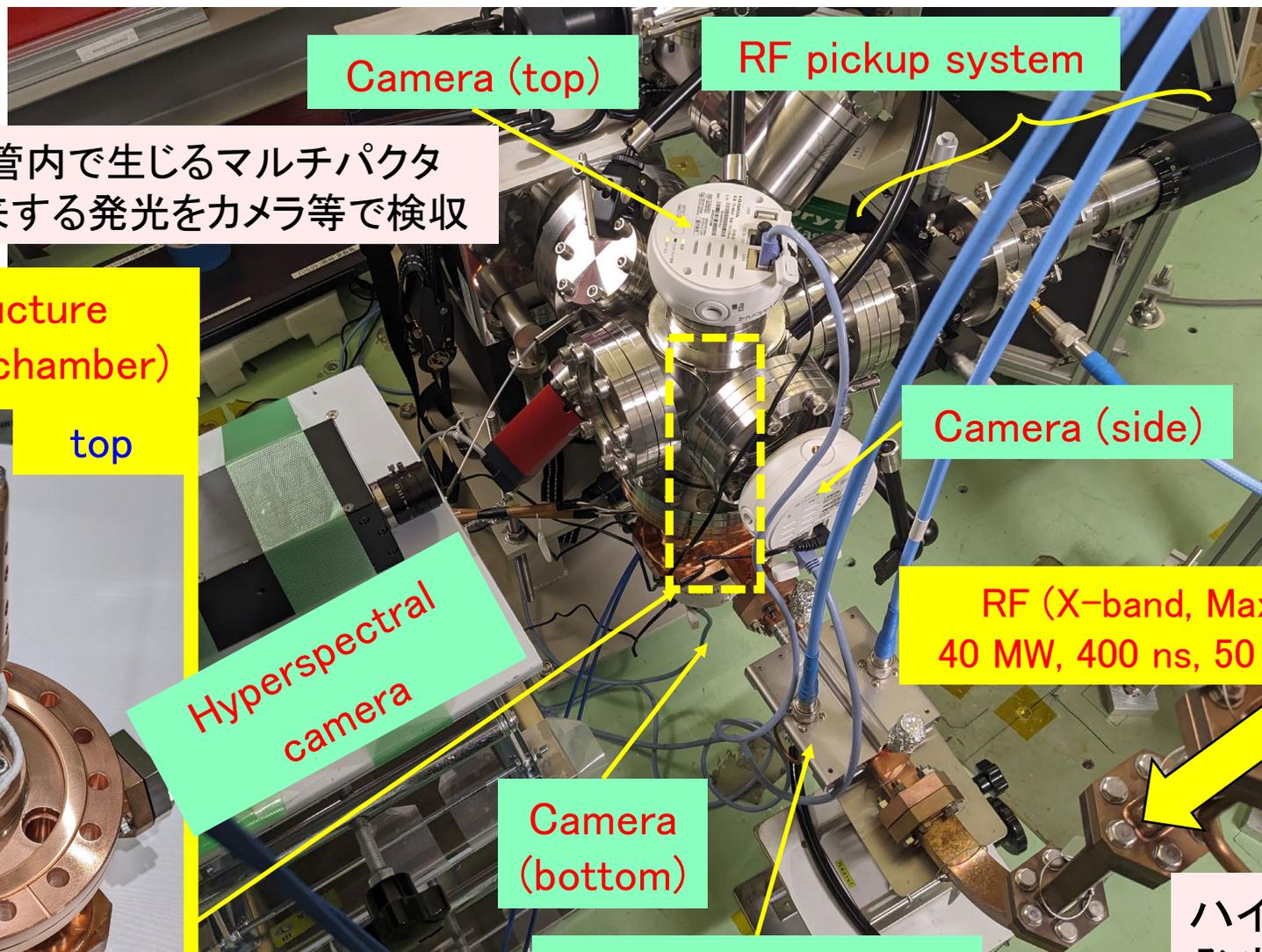


目的とする加速モードであることを確認

【 X-band 高電界試験設備@KEK, Nextef2/Shield-B 】

【 Setup in Nextef2/Shield-B 】

【 RF pickup system 】

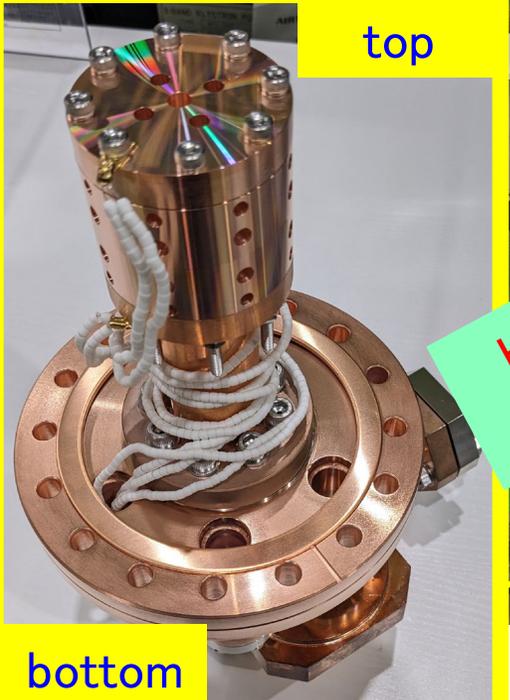


Camera (top)

RF pickup system

X-band DAA管内で生じるマルチパクタ
や放電に由来する発光をカメラ等で検収

DAA structure
(in vacuum chamber)



top

bottom

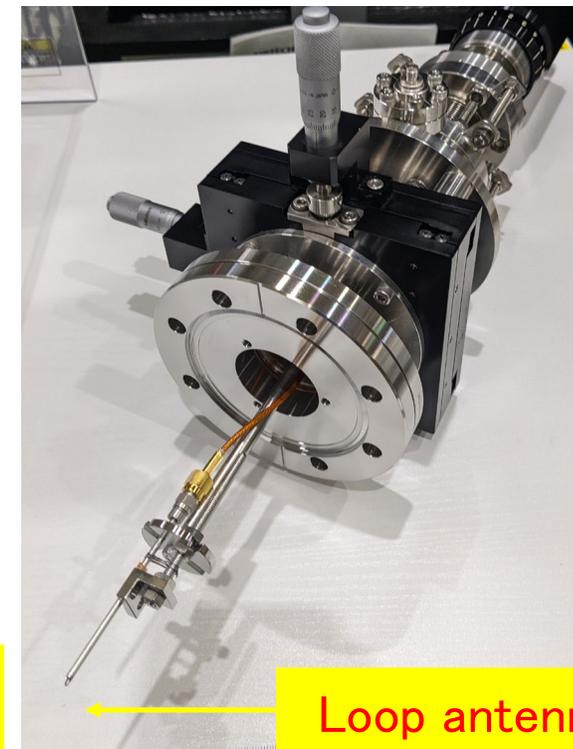
Hyperspectral
camera

Camera
(bottom)

Camera (side)

RF (X-band, Max.
40 MW, 400 ns, 50 Hz)

Directional couplers



Loop antenna

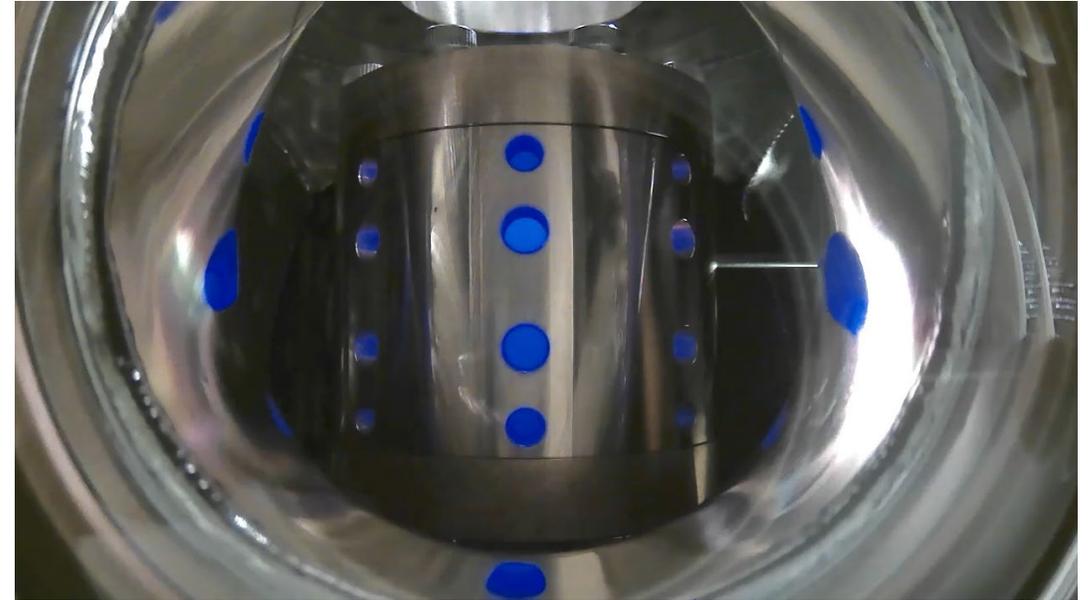
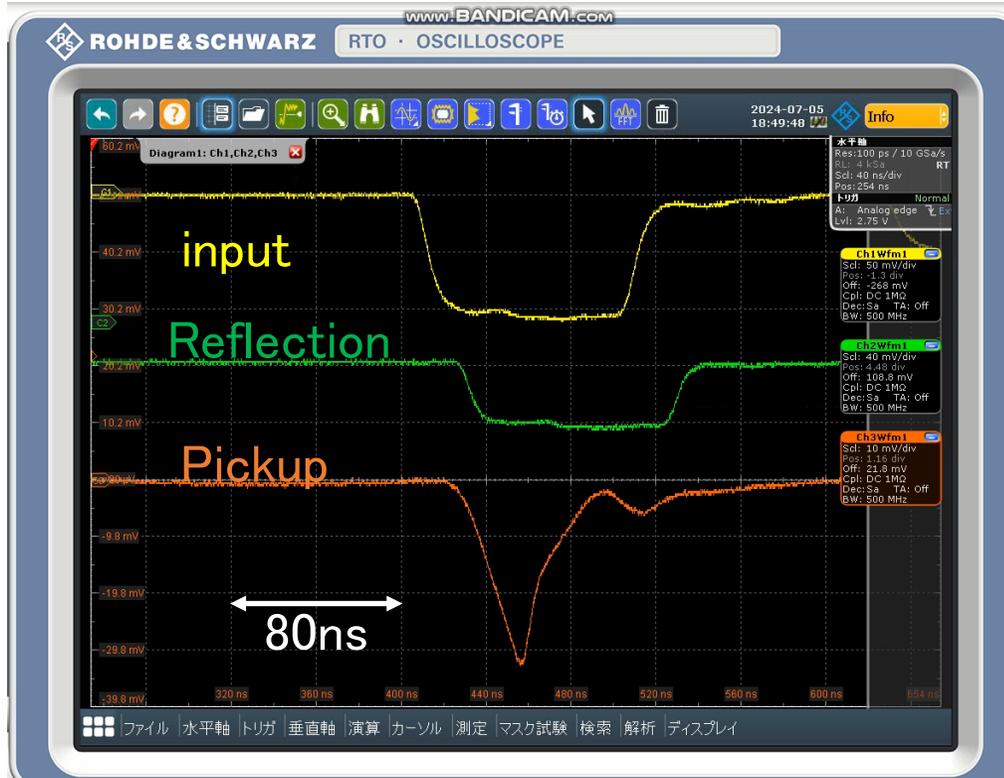
DAA管の側面からループアンテナを挿入し、加速管内の加速電圧を測定

ハイパースペクトルカメラを用いて
発光のスペクトルの取得

【高電界試験@Nextef2】

【Result : Pin = 90 kW, 100 ns, 5 Hz】

【Side view of DAA#X1】

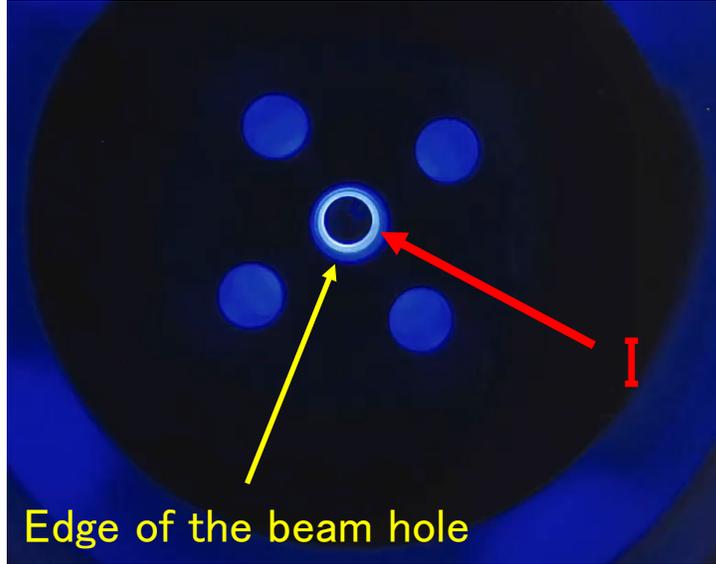


The color CMOS cameras detected blue luminescence.

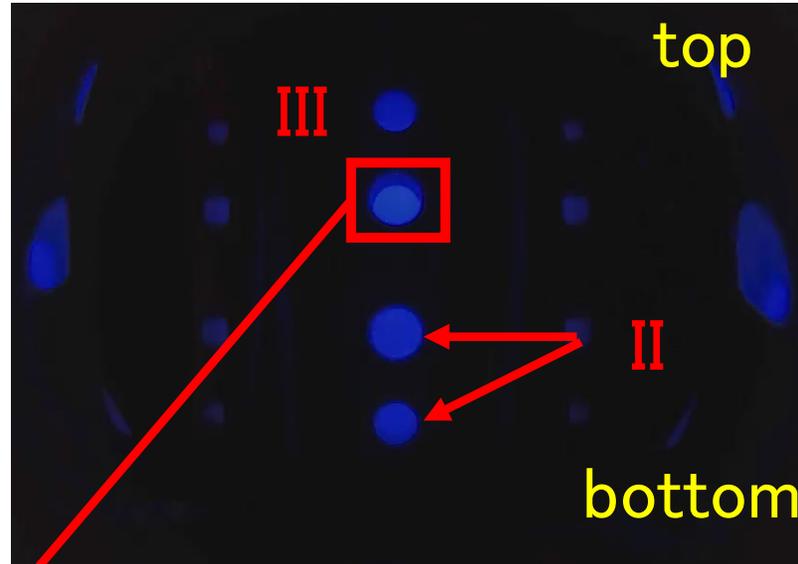
- The E_{acc} in DAA#X1 was unstable even with input power of a few kW.
- The time constant for E_{acc} buildup and decay are much shorter than the filling time of DAA#X1.
→ multipactor or discharge may be occurring in the DAA#X1.
- The E_{acc} is still limited at about a few MV/m (2024/07/07).
* This trend is similar to the results for the prototype of DAA@C-band without DLC coating.

【X-band DAA管の発光: 0.6 MW, 200 ns, 50 Hz】

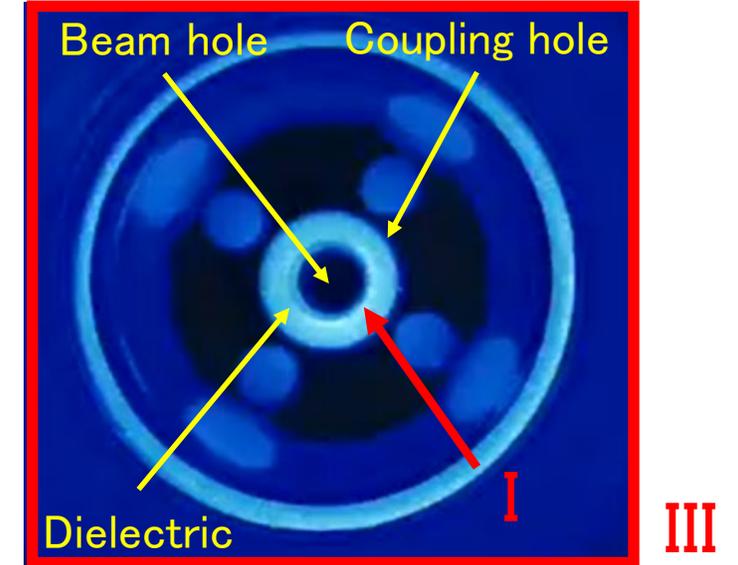
【top】



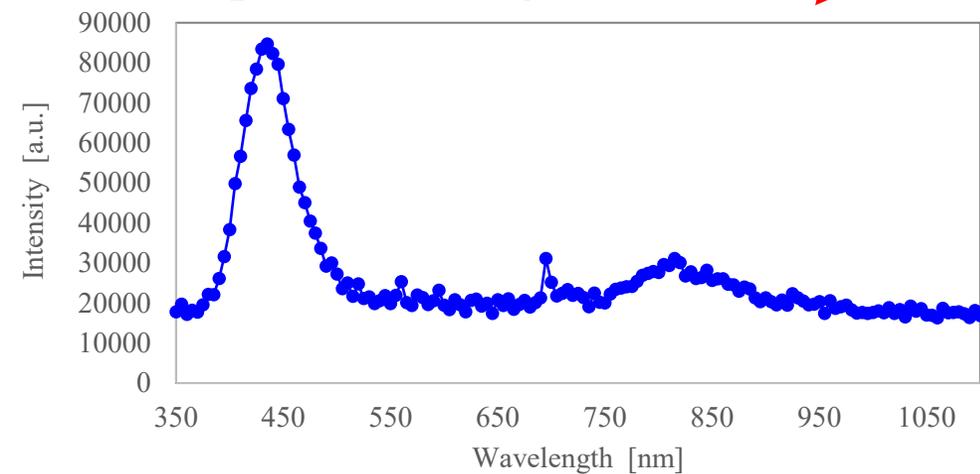
【side】



【bottom : coupler】



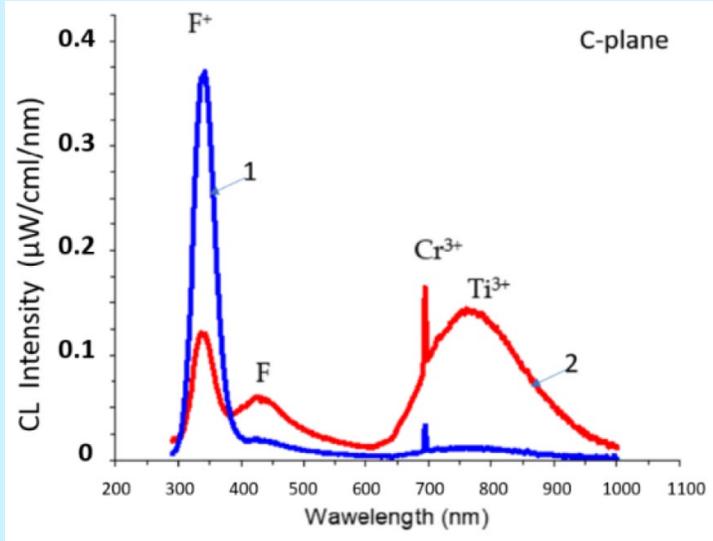
Spectrum (integrated in III)



- I. 投入パワーを上げていくと**ビームホールよりわずかに内側が最も発光する。**
- II. 側面からの発光強度は、中央近傍の発光に比べてかなり低い
- III. ハイパースペクトルカメラで中央部、側面からの発光スペクトルを測定→主ピークは**435 nmの発光。**

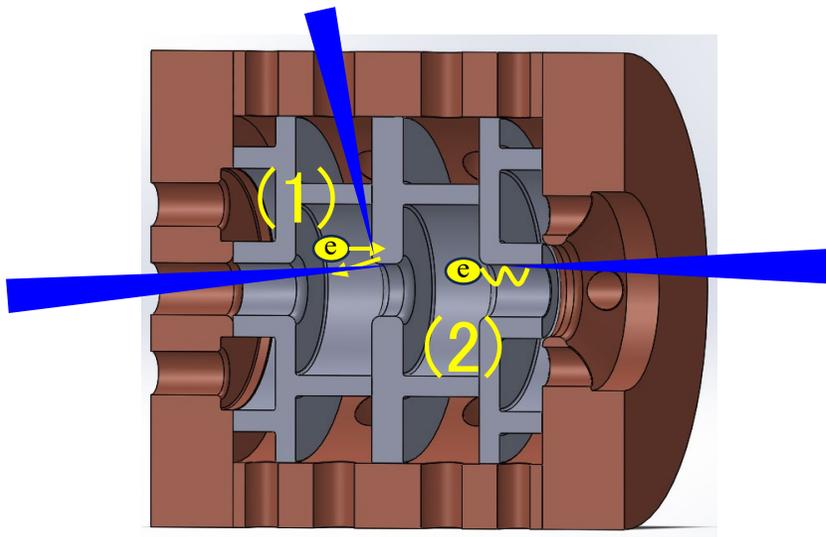
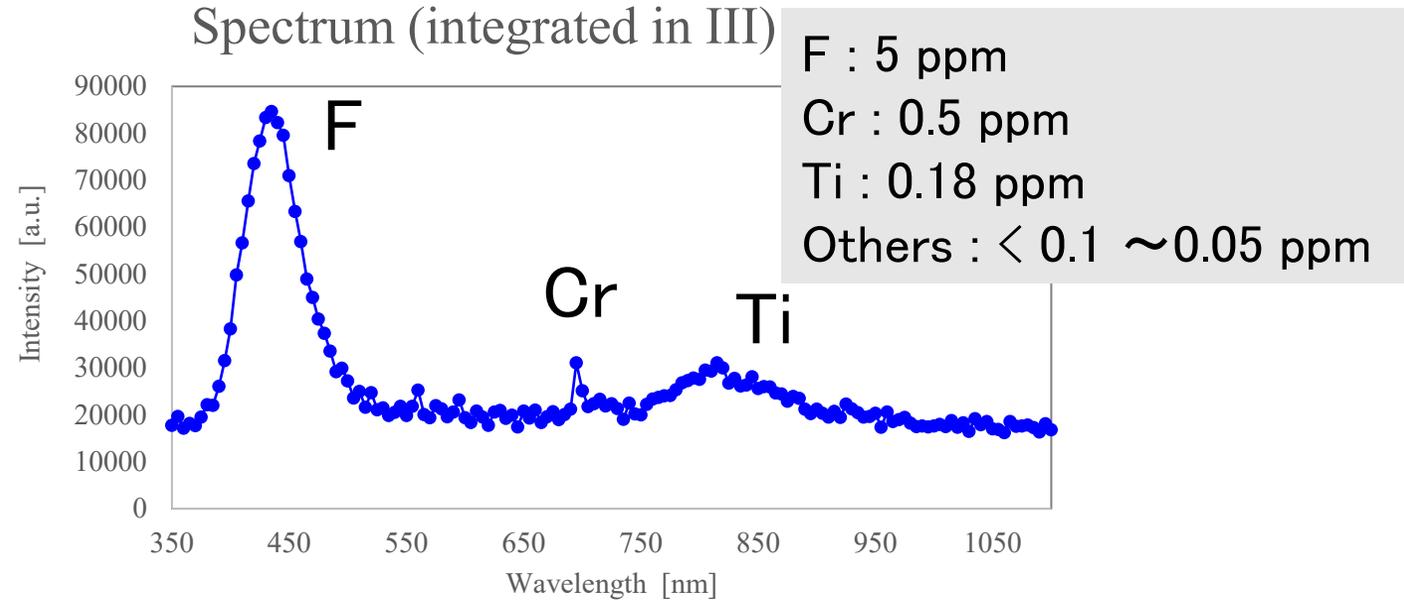
【X-band DAA管内の発光に関する考察】

Cathodoluminescence spectrum of sapphire



[4] A. Muslimov and V. Kanevsky, Materials 2022, 15, 1332

Impurities of DAA#X1 sapphire



- 主な3つのピーク波長は、サファイヤのカソードルミネッセンススペクトルと一致。
- マルチパクタが発生し、DAA管内で電子衝撃によりサファイヤ中の不純物原子から発光が生じていると考えられる。
- 詳細な観察により、入力コプラ側のエンドセルの内側の誘電体同軸構造表面で最も発光していることが明らかとなった。