

誘電体アシスト型加速管(1)

(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

【はじめに】

- 本講義では、誘電体アシスト型加速管に関連する内容を網羅的に紹介します。
- 本講義では、電子ビームのみを取り扱う。
- 本講義で、紹介しきれない前提知識や詳細な計算等に関しては、講義テキストにまとめていますので、ご興味がある方は読んでみてください。

【謝辞】

本講義で紹介する内容は、KEK 吉田先生、夏井先生、阿部先生、Nextef2関係者の皆様、東工大・林崎教授、三菱重工機械システム株式会社の皆様らからの多大なるご協力のもと得られた成果になります。

本研究は、JSPS科研費 13J08681、16H02134、19K20609、22H03882並びに、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204の助成を受けたものです。

【本講義の流れ】

誘電体アシスト型加速管(1)

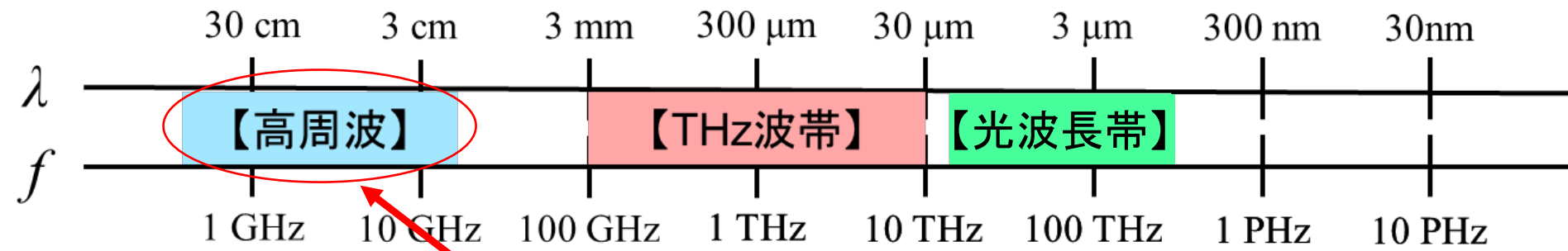
- 加速管の前提知識
- 誘電体加速管
- 誘電体アシスト型加速管の原理

誘電体アシスト型加速管(2)

- 誘電体アシスト型加速管の原理実証
- 高電界化に向けた取り組み

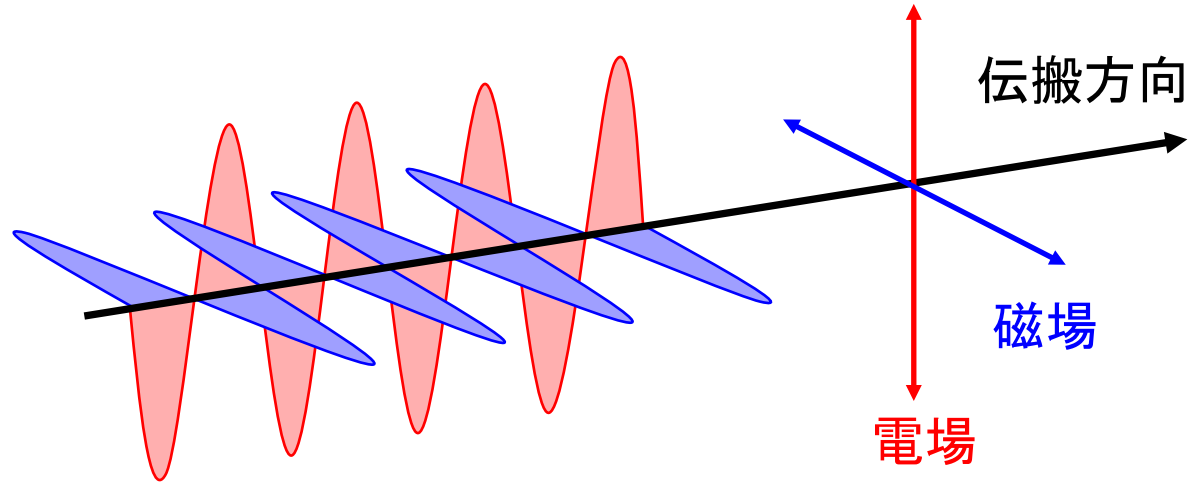
【電磁波】

周波数における分類



本講義

自由空間を伝搬する電磁波



電磁波の伝搬方向に
電場成分がない



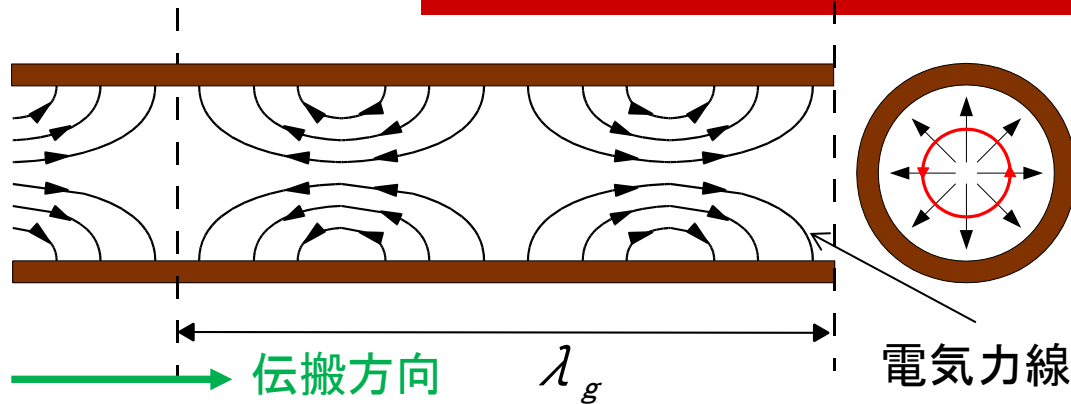
自由空間を伝搬する電磁波では
電子加速が困難*

*レーザー誘電体加速などの一部の例外を除く

【加速管の構造】

金属境界を設けることで進行方向に電場をもつ伝搬する状態(モード)が存在する→ TMモード

金属円形導波管

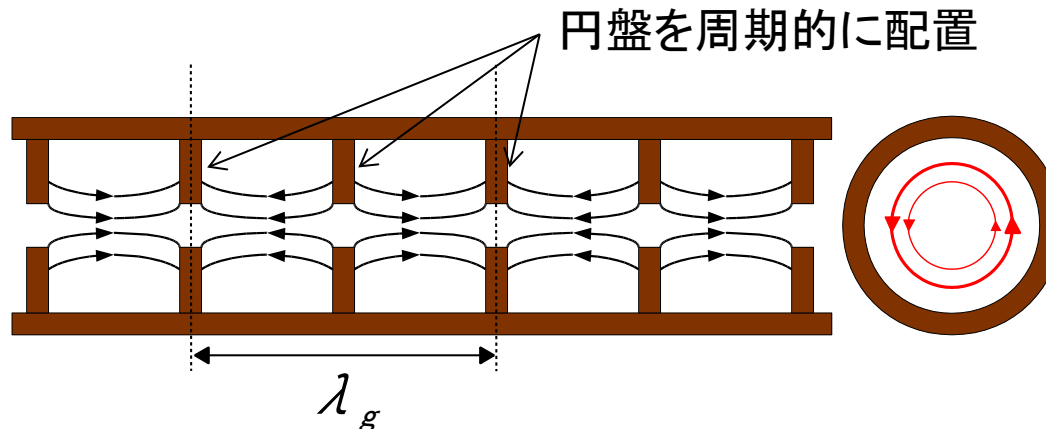


導波管内を伝搬する電磁波の位相速度 v_p

$$v_p = f \lambda_g > c$$

→ 位相のずれにより、**加速に不適**

円盤装荷型高周波加速管



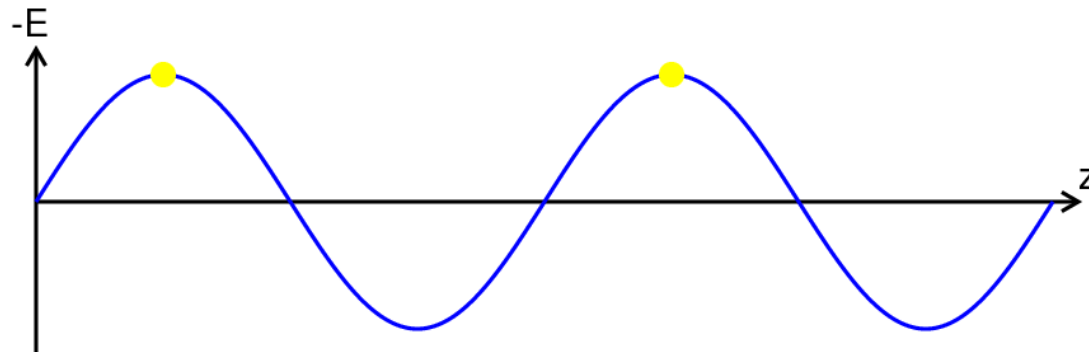
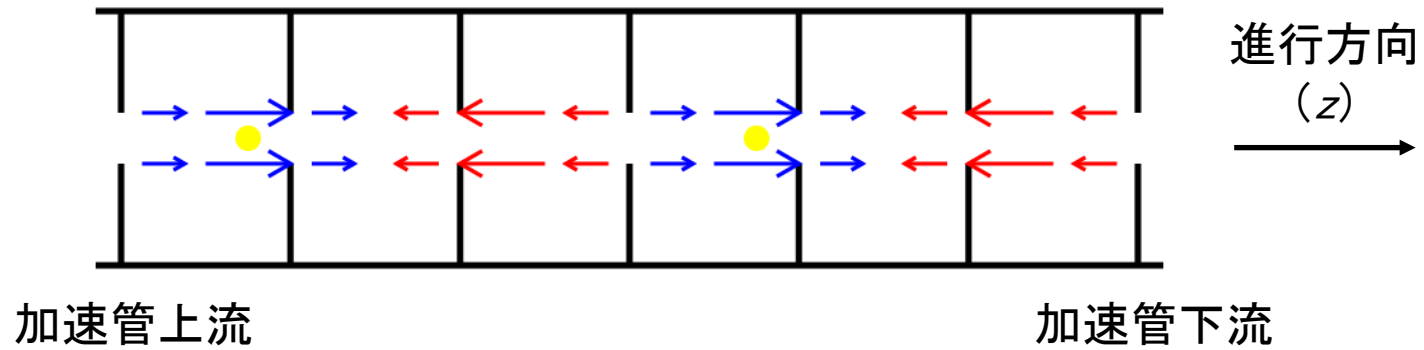
金属円盤を周期的に配置

$$v_p = v < c$$

電子加速に利用可能

【進行波型加速管】

電子の入射側から高周波を入力し、加速管下流に向かって伝搬する**進行波**の加速電場を用いて荷電粒子を加速する加速管

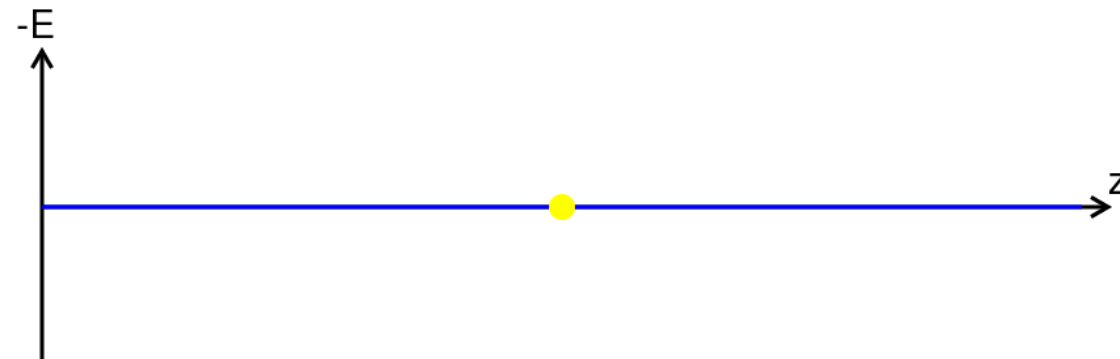
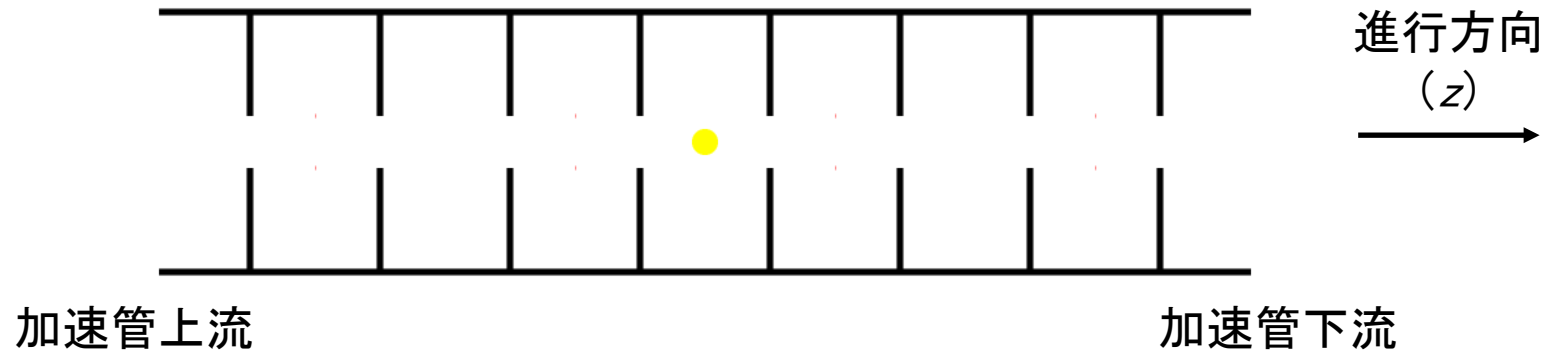


提供: 夏井 拓也 氏 (KEK)

【定在波型加速管】

電磁波をある金属筐体の中で共振させ、その内部に発生する定在波の加速電場を利用して電子を加速する加速管。

誘電体アシスト型加速管 (本講義)



【加速管の性能パラメータ：無負荷Q値】

無負荷Q値： Q_0

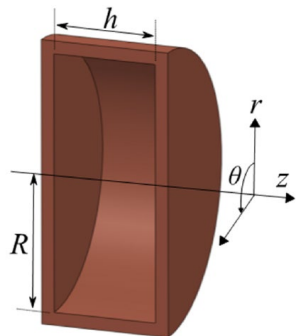
$$Q_0 = \frac{\omega U}{P_{loss}}$$

ω : 共振角周波数
 U : 蓄積エネルギー
 P_{loss} : 高周波損失

蓄積される高周波エネルギーと一周期のうちに散逸されるエネルギーの比

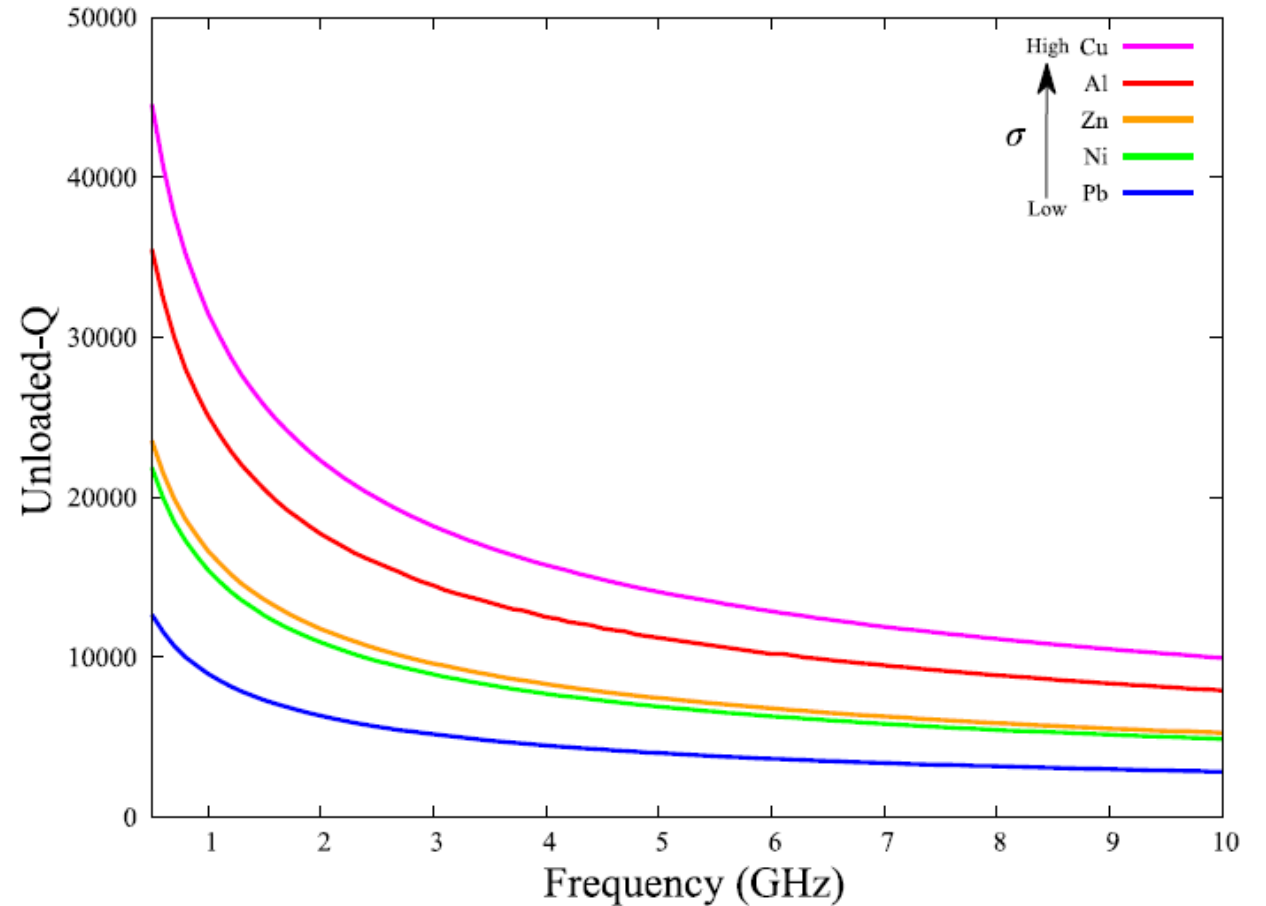
Q値が高い =

- 高周波エネルギーの蓄積能力が高い
- 加速管での電力損失が小さい



【pillボックス空洞】

【pillボックス空洞における Q_0 の材料並びに周波数依存性】



【高 Q_0 値条件】

- 加速管材：高電気伝導率：Cu
- 高周波：低周波数帯

【加速管の性能パラメータ：シャントインピーダンス】

シャントインピーダンス： Z_{sh}

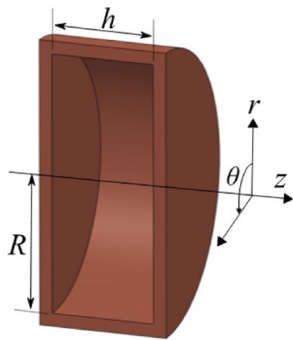
$$Z_{sh} = \frac{V_c^2}{P_{loss}}$$

V_c : 実効加速電圧
 P_{loss} : 高周波損失
 (=定常時の投入電力)

投入電力に対する加速電圧の発生割合
 = **加速管の電力効率**を表す指標

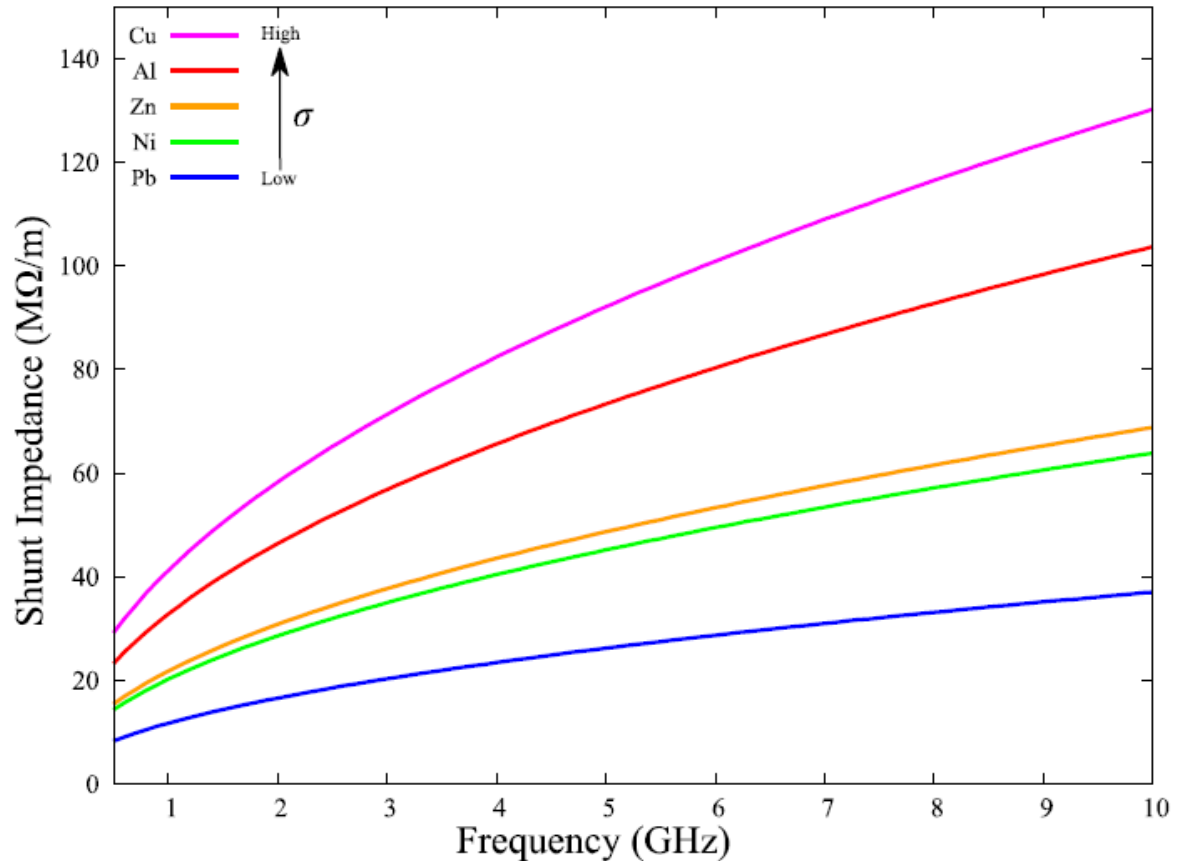
Z_{sh} が高い =

- **加速管の電力効率が高い**



【pillボックス空洞】

【pillボックス空洞における Z_{sh} の材料並びに周波数依存性】

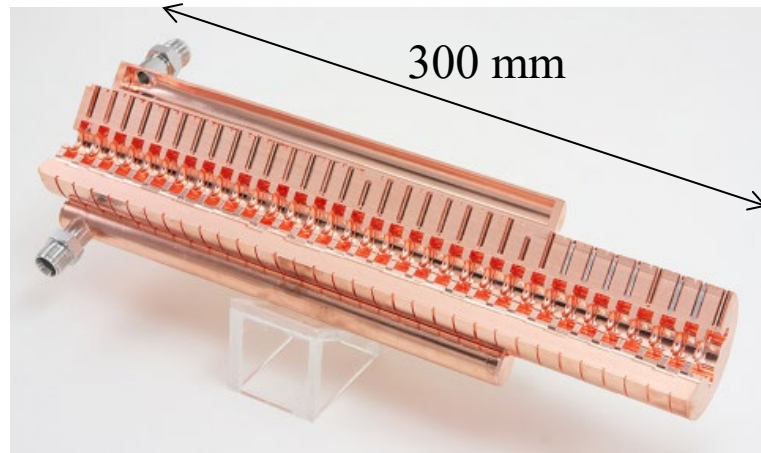


【高 Z_{sh} 値条件】

- 加速管材: 高電気伝導率 : Cu
- 高周波: 高周波数帯

【金属製加速管】

常伝導加速管



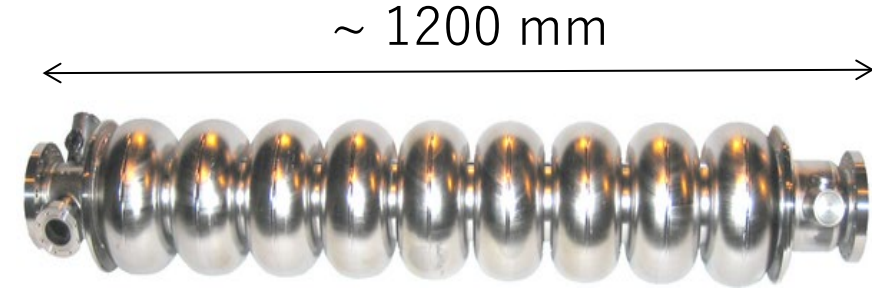
引用元：<http://ilc.kek.jp/photos/20080516Di/20080516Di-0025.php>

- 無酸素銅製
- 進行波型
- 周波数：X-band
(8 ~ 12 GHz / $\lambda_0 = 25 \sim 37$ mm)

高電界加速が可能

$$E_{z, ave} > 100 \text{ MV/m}$$

超伝導加速管



引用元：http://ksc.kek.jp/2nd_2008/gaiyou/sc08/

- 高純度ニオブ製
- 定在波型
- 周波数：L-band
(1.3 GHz / $\lambda_0 = 230$ mm)

電力効率が極めて高い

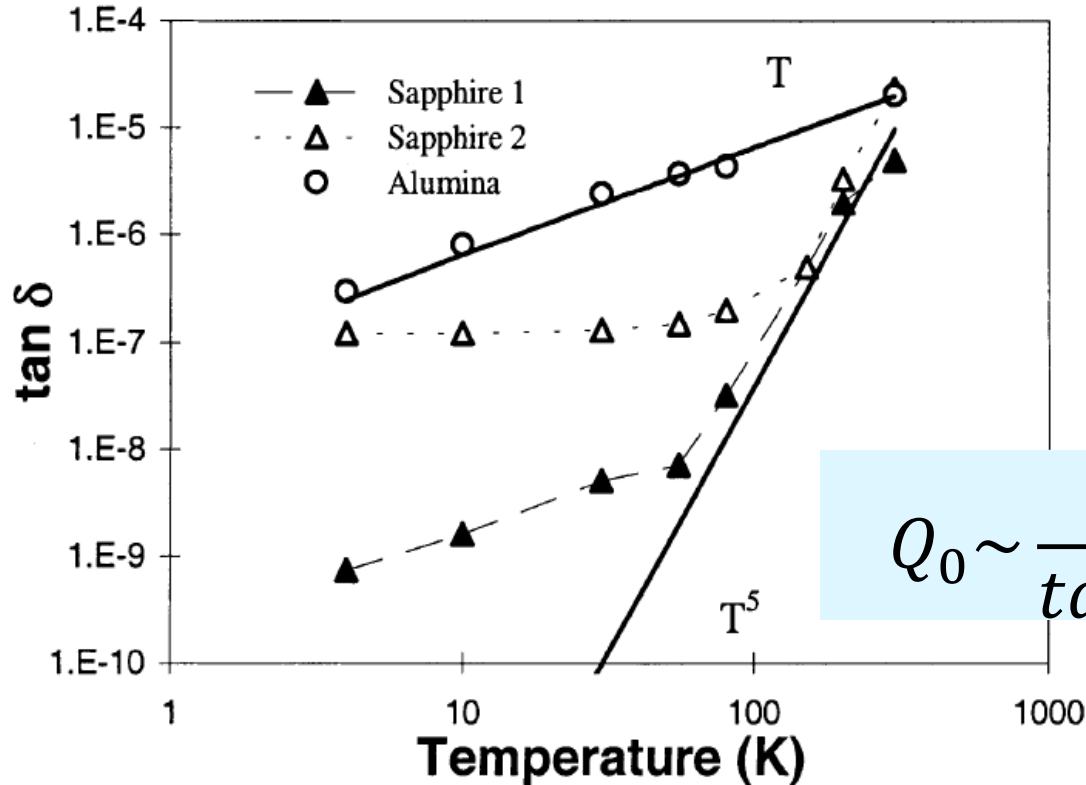
(常伝導の6桁以上。極低温必須)

→ 加速器の高繰り返し運転可能

【誘電体に着目した背景①】

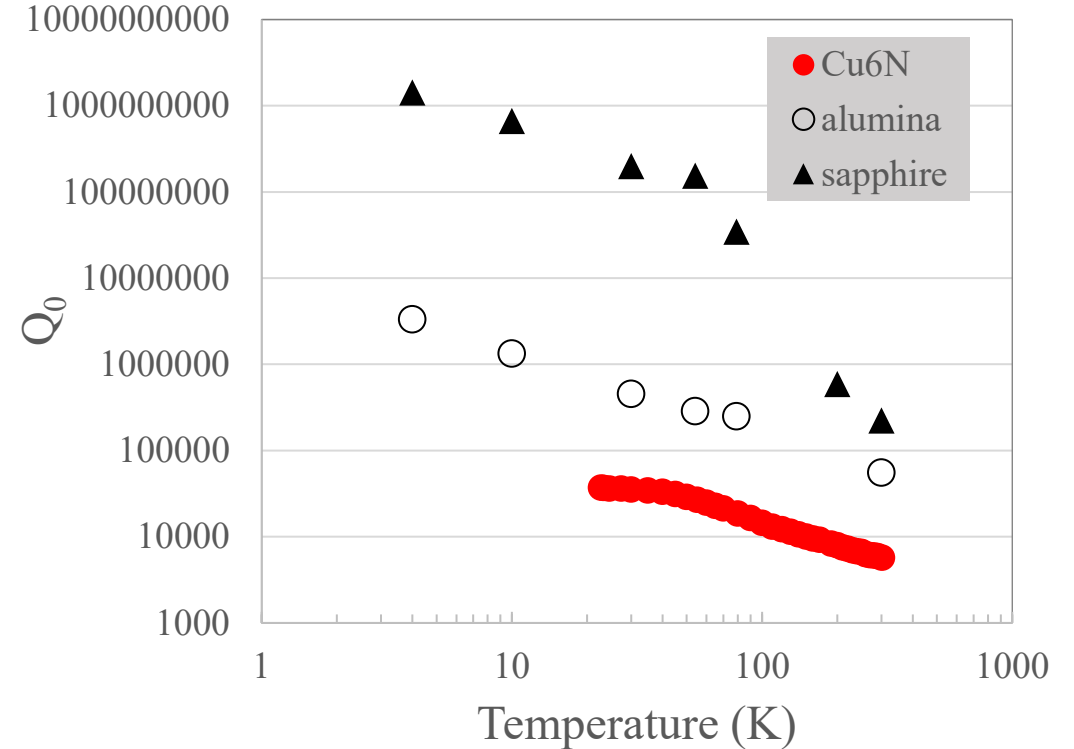
高周波損失が少ない

【Al₂O₃における誘電正接 (tan δ) の温度依存性】



引用元 : N. McN Alford, et al., J Eur. Ceram. Soc. 21, 2605 (2001)

【Q₀の温度依存性】



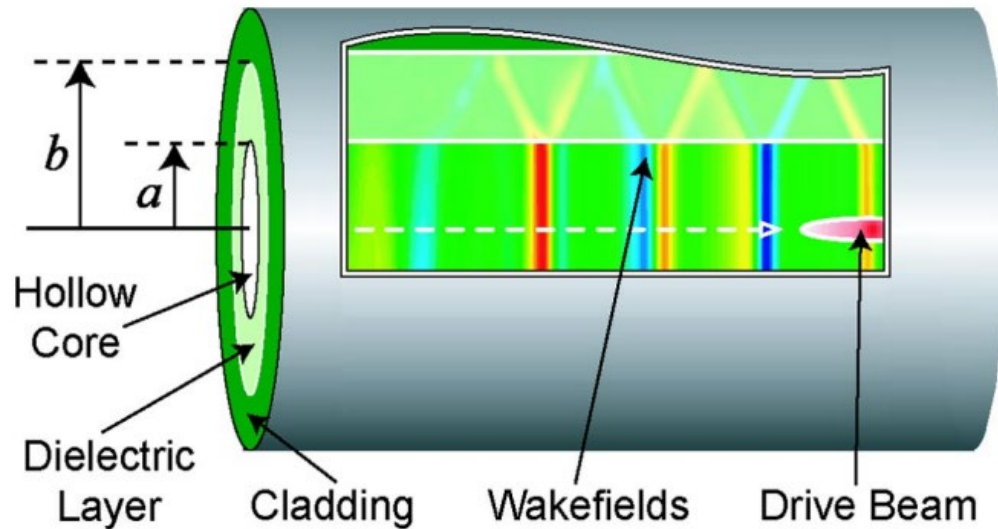
Cuより10倍以上高いQ値

tan δ: 誘電体内部での損失の小ささの指標

低損失誘電体を利用した高電力効率の加速管ができるのではないかと考えた。

【誘電体に着目した背景②】

高い耐電圧特性



[引用元*] M. C. Thompson, et al., PRL 100, 214801 (2008)

【実験内容】

SiO₂チューブ(内径100 μm)に、30-330フェムト秒の電子バンチを入射し、チューブ内で発生するWakefieldによる絶縁破壊特性を測定

高い耐電圧特性[*]

$$E_{surface} \sim 27 \text{ GV/m@SiO}_2$$

誘電体の高い耐電圧特性を利用することで、金属製加速管を越える
高い加速電界を実現できるのではないかと考えた

【誘電体を用いた加速管①】

【誘電体装荷型加速管 (Dielectric Loaded Accelerating structure, DLA)】

金属管内に誘電体円筒を装荷した誘電体装荷型加速管 (DLA) が主流

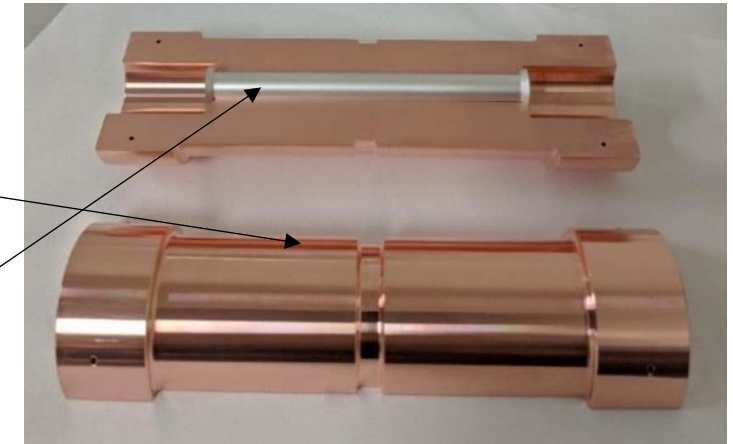
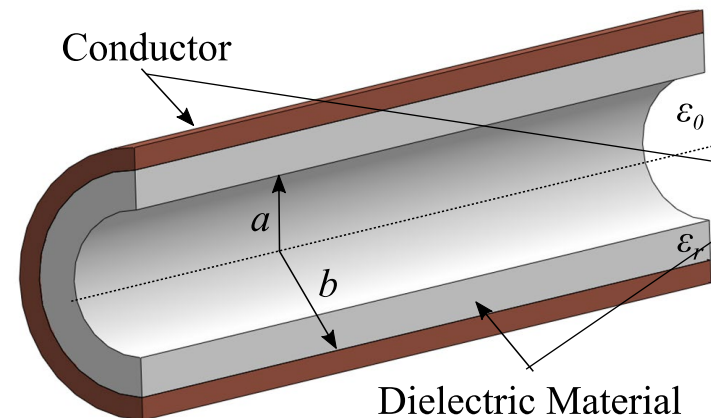
- ・無酸素銅製 / alumina, SiO_2 , MgTiO_3 , etc...
- ・進行波型加速管
- ・運転周波数: X-band (8 ~ 12 GHz / $\lambda_0 = 25 \sim 37$ mm)

利点

- ・構造が非常にシンプル
→ 高周波数帯でも製作が容易
- ・低コストで製作可能

課題

- ・マルチパクタリング現象
(誘電体表面での2次電子放出の増大現象)
- ・金属-誘電体管のマイクロギャップ放電
- ・電力効率が低い ($Z_{sh} \sim 66 \text{ M}\Omega/\text{m}@\text{SiO}_2$, X-band)
- ・加速電界が低い (8 MV/m@X-band)



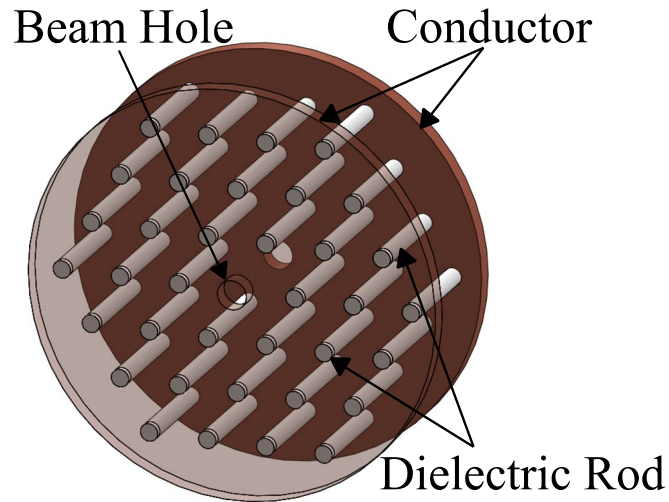
引用元: Y. Wei, 20th GSI Accelerator Seminar(2021)

実用には至っていない

【誘電体を用いた加速管②】

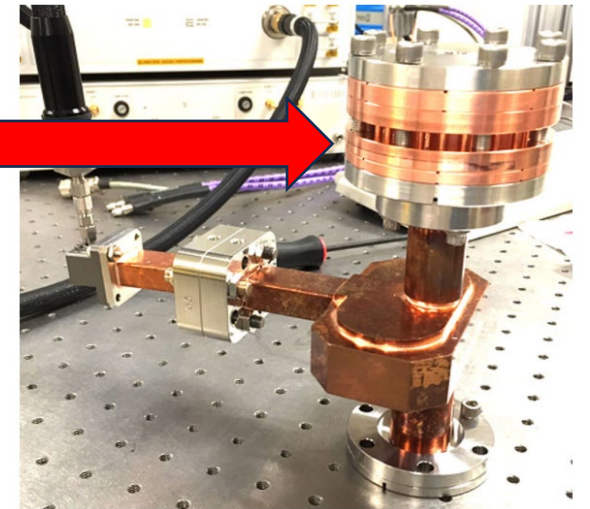
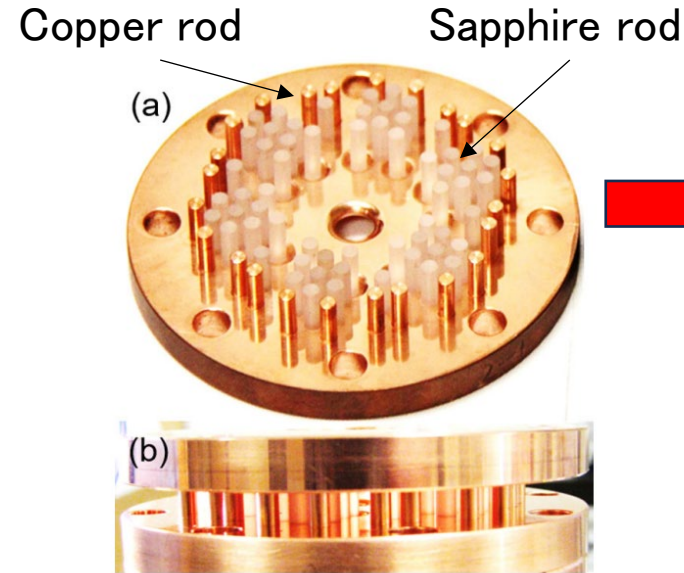
フォトニックバンドギャップ加速管 (Photonic Band Gap Accelerating structure, PBGA)

【概要】



- 誘電体ロッドの2次元周期構造によって生じる電磁波の伝搬できない周波数領域 (PBG) によってRFを閉じ込める。
- 高次高調波の抑制が可能
- 高周波数帯加速管に適用可能

【開発現状】



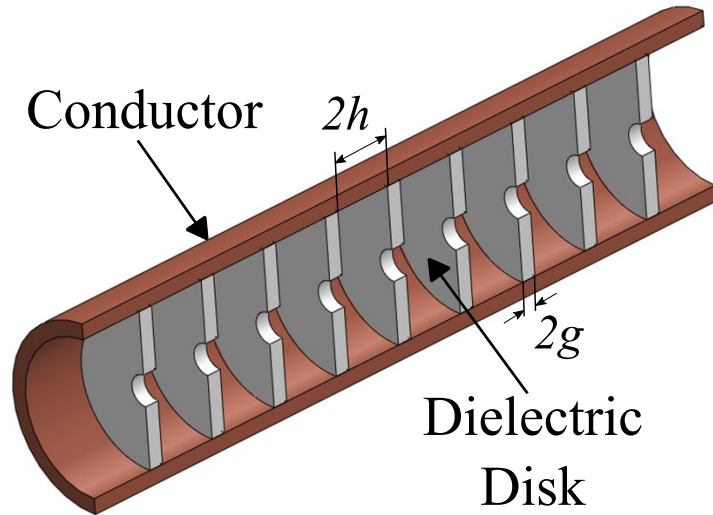
引用元: J. ZHANG, et.al, PHYS. REV. ACCEL. BEAMS 19, 081304 (2016)

加速電界: $E_{acc} = 19 \text{ MV/m @ } 17.14 \text{ GHz}$
 表面電界: $E_{surf} < 78 \text{ MV/m @ sapphire}$
 ビーム加速: 未 (Cu rod typeはあり)

【誘電体を用いた加速管③】

誘電体円板装荷型加速管 (Dielectric Disc Accelerating Structure, DDA)

【概要】



- 1940年代に提案
- 群速度が高い
→ 短パルスのRFが使用可
- Z_{sh} が高い
- ビーム加速の実績あり

【開発現状】

最先端の高誘電率・低損失セラミックス技術
X
ビーム駆動大電力RF発生技術 (X-band, $\sim 320\text{MW}$, $\sim 20\text{ns}$)

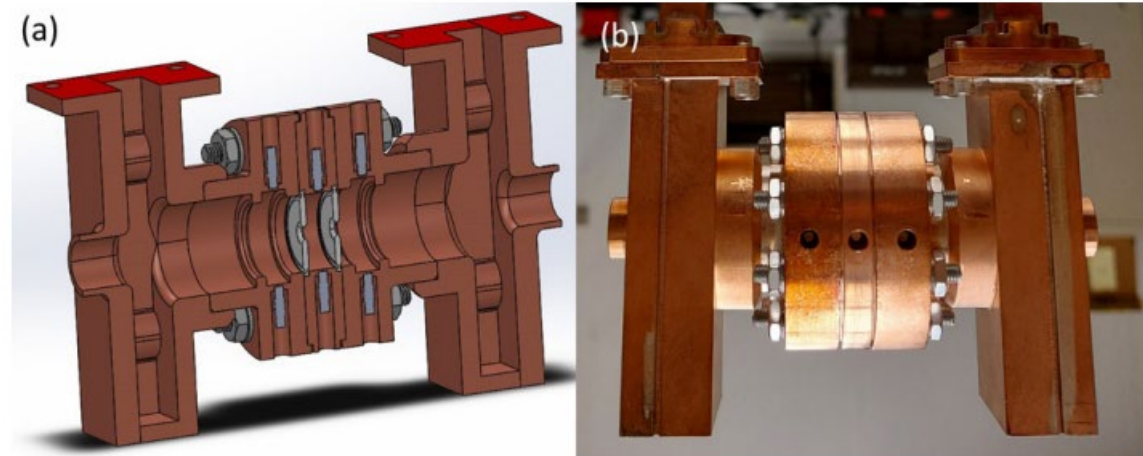


TABLE IV. Simulated rf parameters of the clamped DDA prototype.

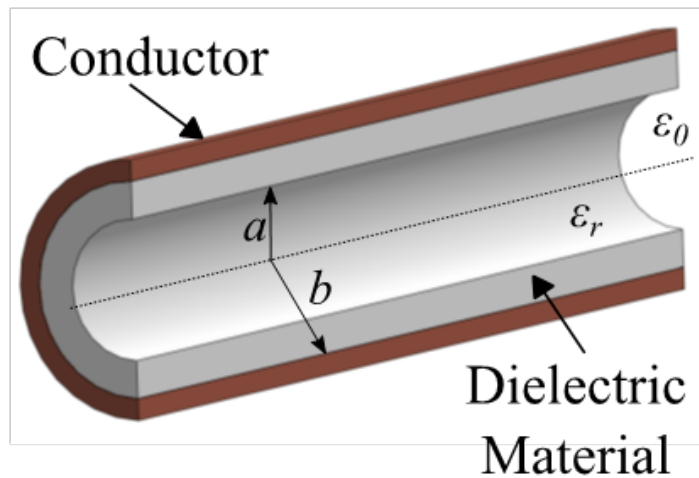
Parameter	Value	Unit
Dielectric constant	47.7	
Loss tangent	3.44×10^{-4}	
Quality factor	8500	
Shunt impedance per unit length	174	M Ω /m
Group velocity/c	0.270	
Phase advance (multicell design)	$2\pi/3$	
$E_{\text{surface,max}}/E_{\text{acc}}$	1.44	

RF充填型の誘電体加速管として、
初めて**100 MV/m**以上に到達

【誘電体加速管の課題】

同軸誘電体装荷型加速管は、加速管のシャントインピーダンス(電力効率)が一般的な銅製常伝導加速管よりも低い。

【誘電体加速管】

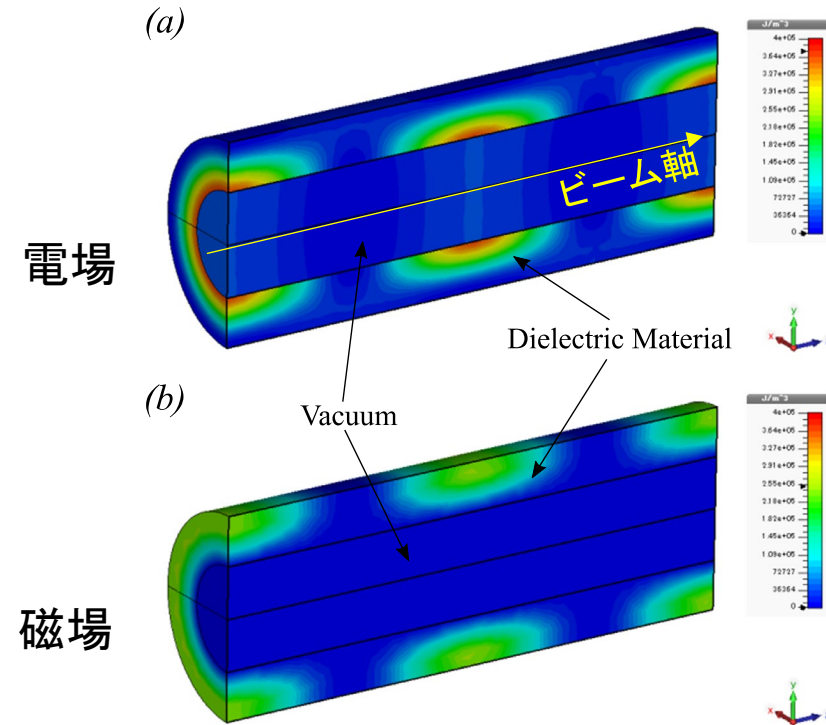


- ビーム加速にエバネッセント波(誘電体内部を伝搬するRFがその境界から漏洩した表面波モード)を利用
- 高周波電力の大部分は誘電体内部を伝搬し、僅かに真空領域へ浸みだしたごく一部の高周波電力を加速に利用

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} < c$$



【加速管内のエネルギー密度分布】

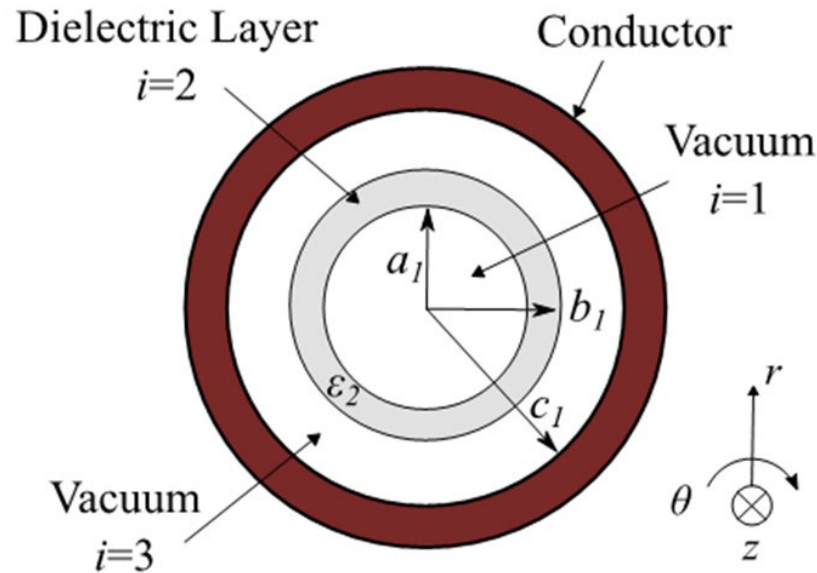


投入したRF電力をビーム加速に有効に利用できず、加速効率(Z_{sh})を原理上向上させることが困難。

【高電力効率加速管の検討】

高効率誘電体加速管に向けて同軸誘電体装荷型構造の2次元モデル計算に着手

【同軸誘電体装荷構造の2次元モデル】



【前提条件】

- 真空領域 ($i = 1, 3$) においても真空中の光速 c よりも大きい位相速度で伝搬する電磁界モードのみを考える。

$$k'_i \equiv \sqrt{\omega^2 \varepsilon_i \mu_0 - \beta^2} > 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad \dots \quad (4.2)$$

(補足) DLAの場合は、真空領域において真空中の光速 c よりも小さい位相速度で伝搬する電磁界モードを取り扱う。

- 位相速度を光速 c 以下にする誘電体構造 (周期的な誘電体円盤装荷等) は、ここでは議論しない。

円筒座標系 (r, θ, z) における電磁波の波動方程式

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + k_i'^2 E_z = 0 \quad \dots \quad (4.1)$$

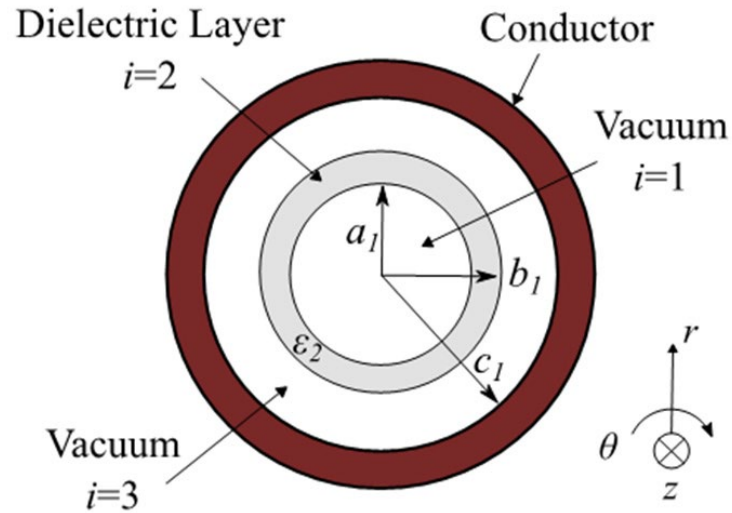


上記の条件のもと、(4.1)式を解析的に解き、同構造内での高周波損失について解析を行った。

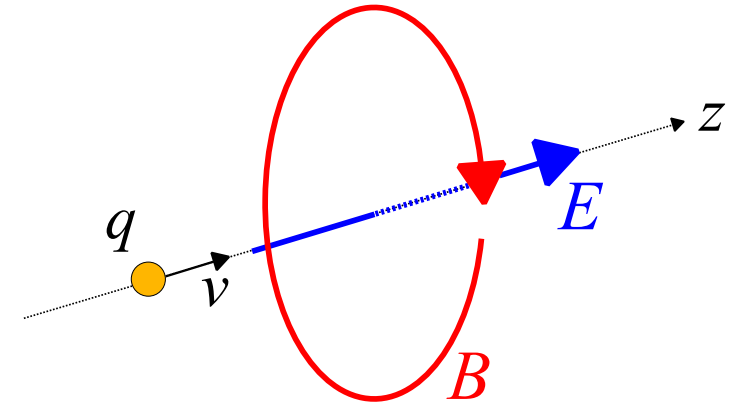
* 詳細な導出に関してはテキスト4.3参照

【伝搬モード】

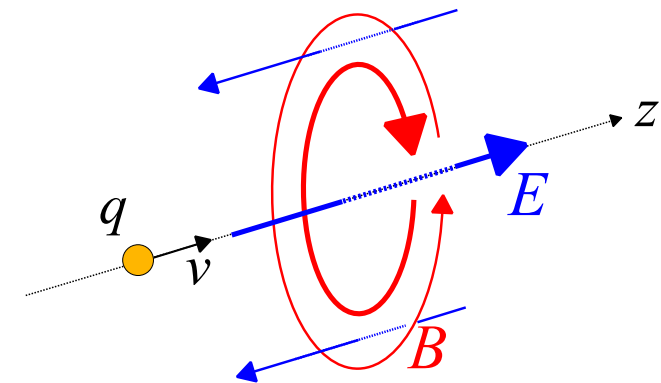
【同軸誘電体装荷構造の2次元モデル】



【TM₀₁ モード】



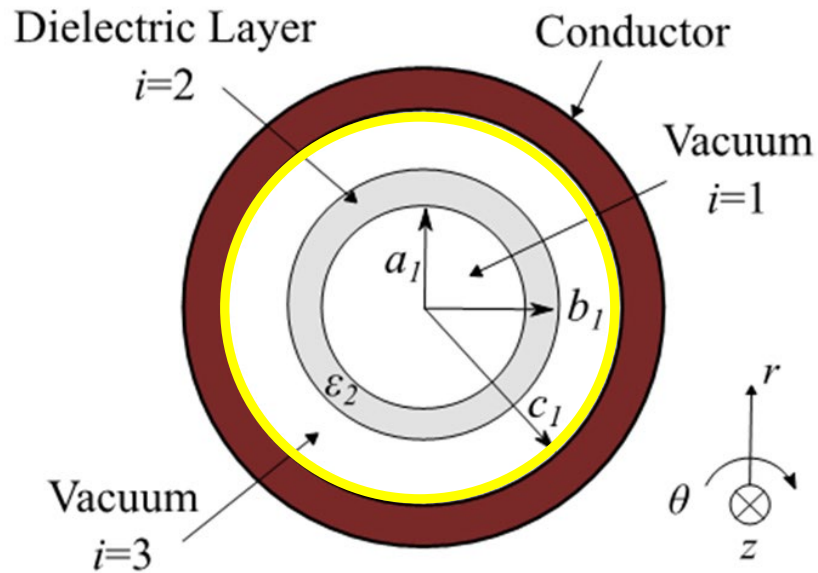
【TM₀₂ モード】



- 本講義では、電子加速に向けた検討のため、TMモード(軸方向に電場を持つモード)のみを取り扱う
- 真空-誘電体境界(1) $r = a_1$, (2) $r = b_1$ における E_z , H_θ の連続性と(3) $r = c_1$ の金属境界条件 $E_z = 0$ より、導出される方程式を解くことで TM_{0n} モードの電磁場分布が得られる。
- 整数 n は、径方向の節(モード)の数を意味しており、(3)を満たす c_1 の内、 n 番目に小さい値の TMモードの解と対応

【導体損失】

【同軸誘電体装荷構造の2次元モデル】



金属表面での半波長あたりの導体損失 P_{wall}

$$P_{wall} = \frac{R_S}{2} \int_S |H_\theta^{i=3}|^2 dS$$

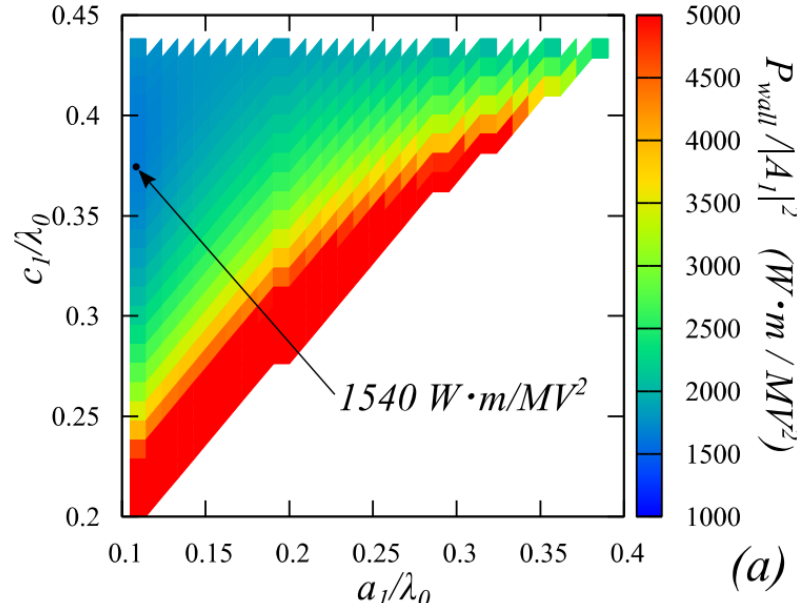
$$= \frac{\pi}{2} R_S c_1 \frac{\omega^2 \epsilon_3^2}{k_3^2} \times \{A_3 J_1(k_3 c_1) + B_3 Y_1(k_3 c_1)\}^2 \quad \dots \quad (4.15)$$

R_S : 金属管の表面抵抗

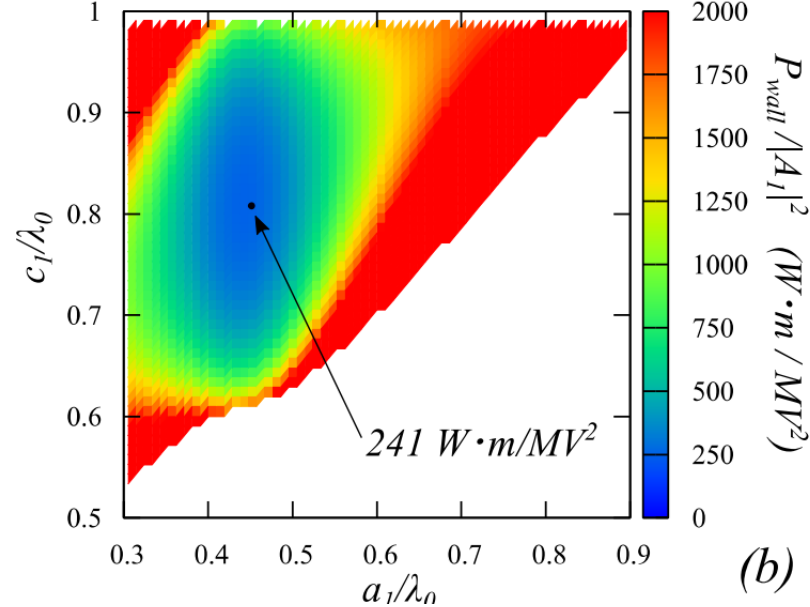
導体損は、金属表面での回転磁場の2乗に比例

【導体損失】

【TM₀₁ モード】



【TM₀₂ モード】

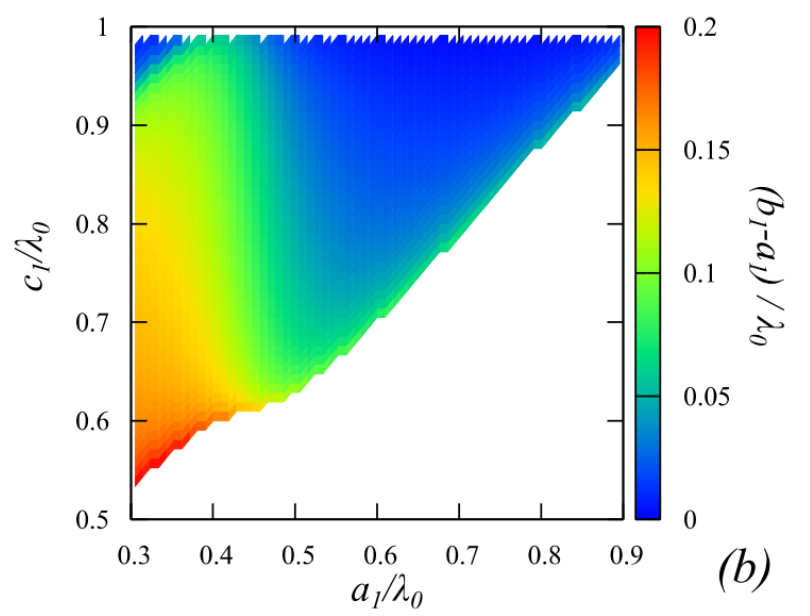
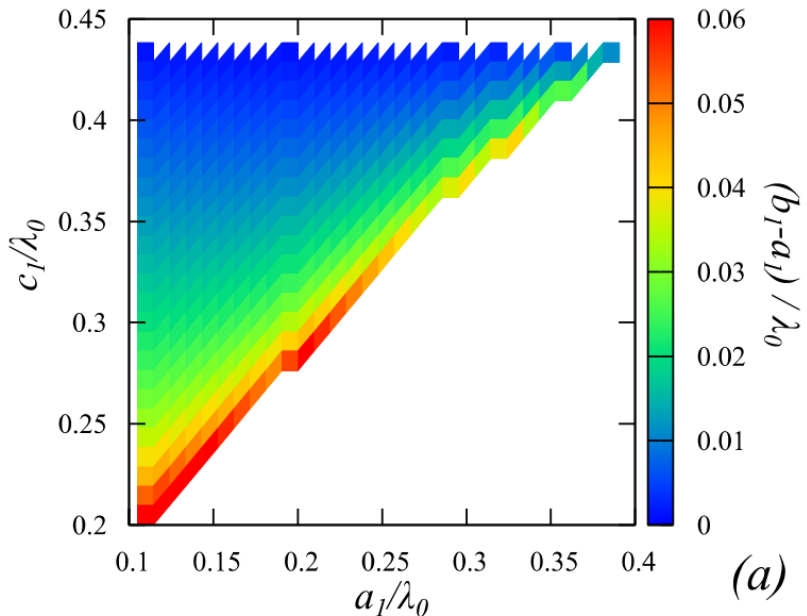


【計算条件】

- $f = 5.712 \text{ GHz}$
- $\epsilon_r = 10.0$
- Conductor : Cu

*Pillbox cavity (Cu)

$$P_{wall}/|A_1|^2 = 1169 \text{ W}\cdot\text{m}/\text{MV}^2$$



TM₀₁モード

- Pillboxより導体損が大きい
- 誘電体同軸構造が非常に薄くする必要がある。

TM₀₂モード

- Pillboxより導体損の1/4以下
- 誘電体同軸構造の厚みもリーズナブル

* ϵ_r 大きく依存するので注意

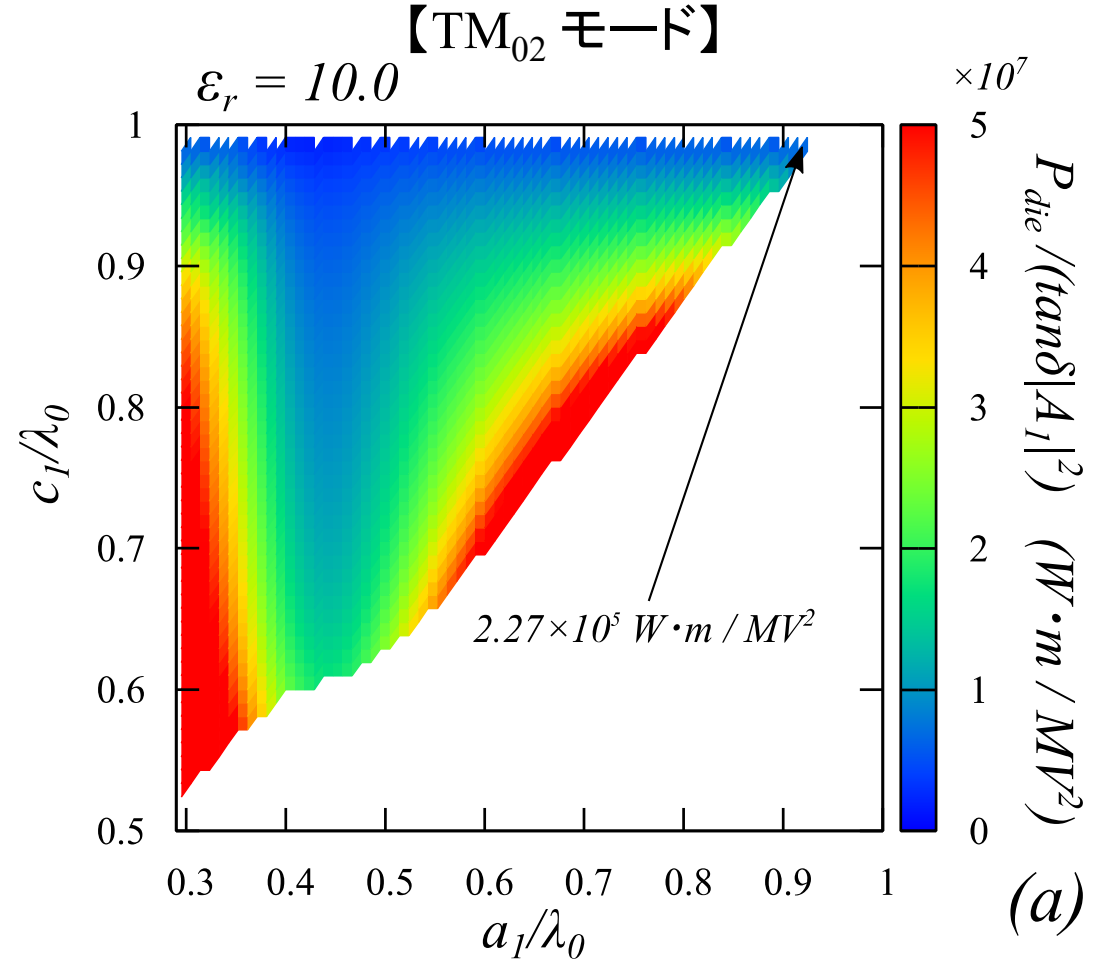
【誘電損失】

領域Vにおける誘電損失 P_d

$$P_d = \frac{\omega}{2} \epsilon'_r \epsilon_0 \tan \delta \int_V |E|^2 dV \quad \dots (4.18)$$

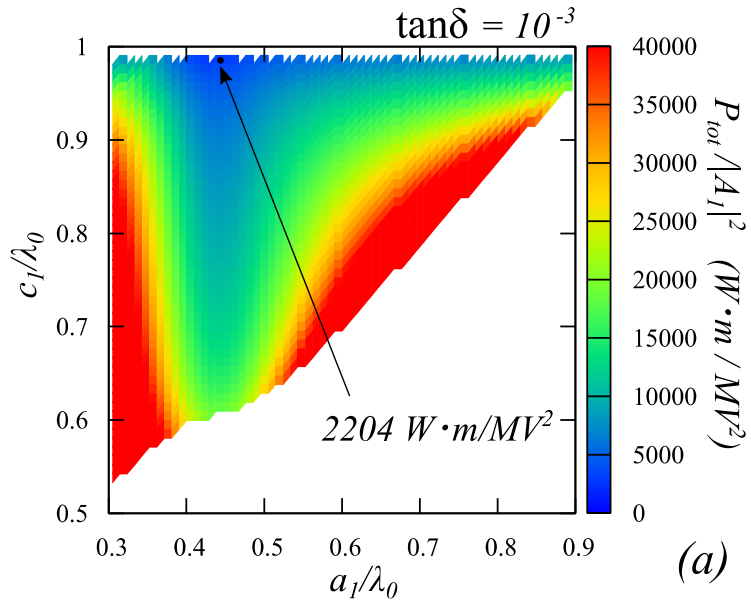
2次元モデル内の半波長当たりの誘電損失 P_d

$$\begin{aligned} P_{die} &= \frac{\omega}{2} \epsilon_2 \tan \delta \\ &\times \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\lambda}{2}} dz \int_{a_1}^{b_1} |E^{i=2}|^2 r dr / (\lambda_0/2) \\ &= \frac{\pi}{2} \omega \epsilon_2 \tan \delta \\ &\times \int_{a_1}^{b_1} \left[\{A_2 J_0(k_2 r) + B_2 Y_0(k_2 r)\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\beta^2}{k_2^2} \{A_2 J_1(k_2 r) + B_2 Y_1(k_2 r)\}^2 \right] r dr \quad \dots (4.19) \end{aligned}$$

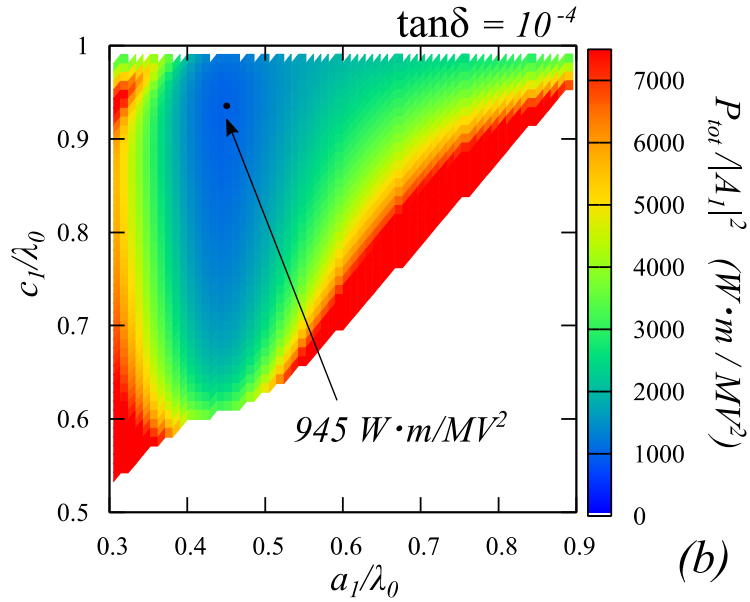


- $\tan \delta \sim 10^{-5}$ であれば、誘電損失は非常に小さい
- 誘電損失が比較的小さくなる形状と導体損失が最小になる形状はほぼ一致

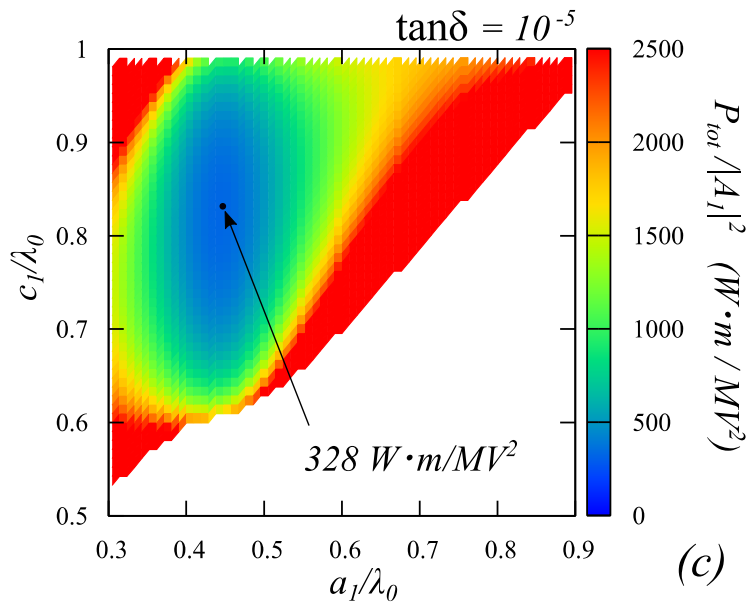
【TM₀₂モードの全電力損失】



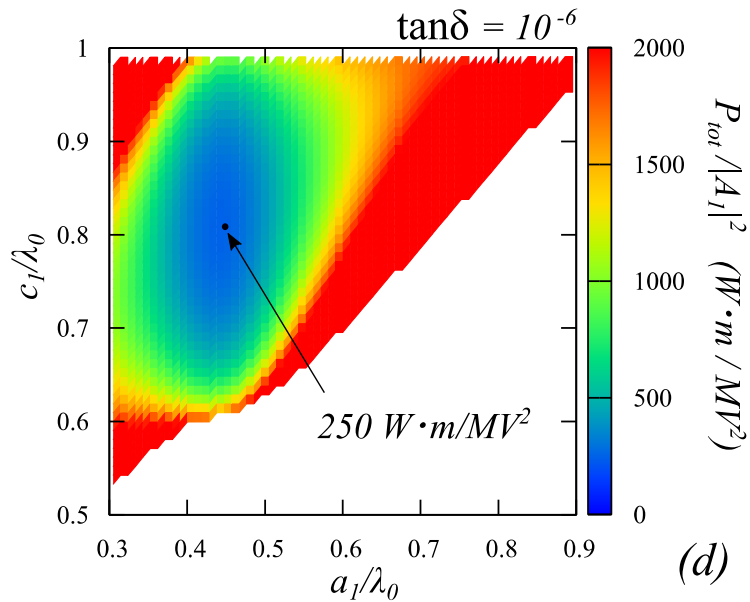
(a)



(b)



(c)



(d)

【計算条件】

- $f = 5.712$ GHz
- $\epsilon_r = 10.0$
- Conductor : Cu

*Pillbox cavity (Cu)

$$P_{wall}/|A_1|^2 = 1169 W \cdot m / MV^2$$

- $\tan\delta \sim 10^{-5}$ となると全電力損失でもPillboxでの導体損失の1/3以下
- $\epsilon_r = 10.0$, $\tan\delta \sim 10^{-5}$ はアルミナセラミックスの物性値



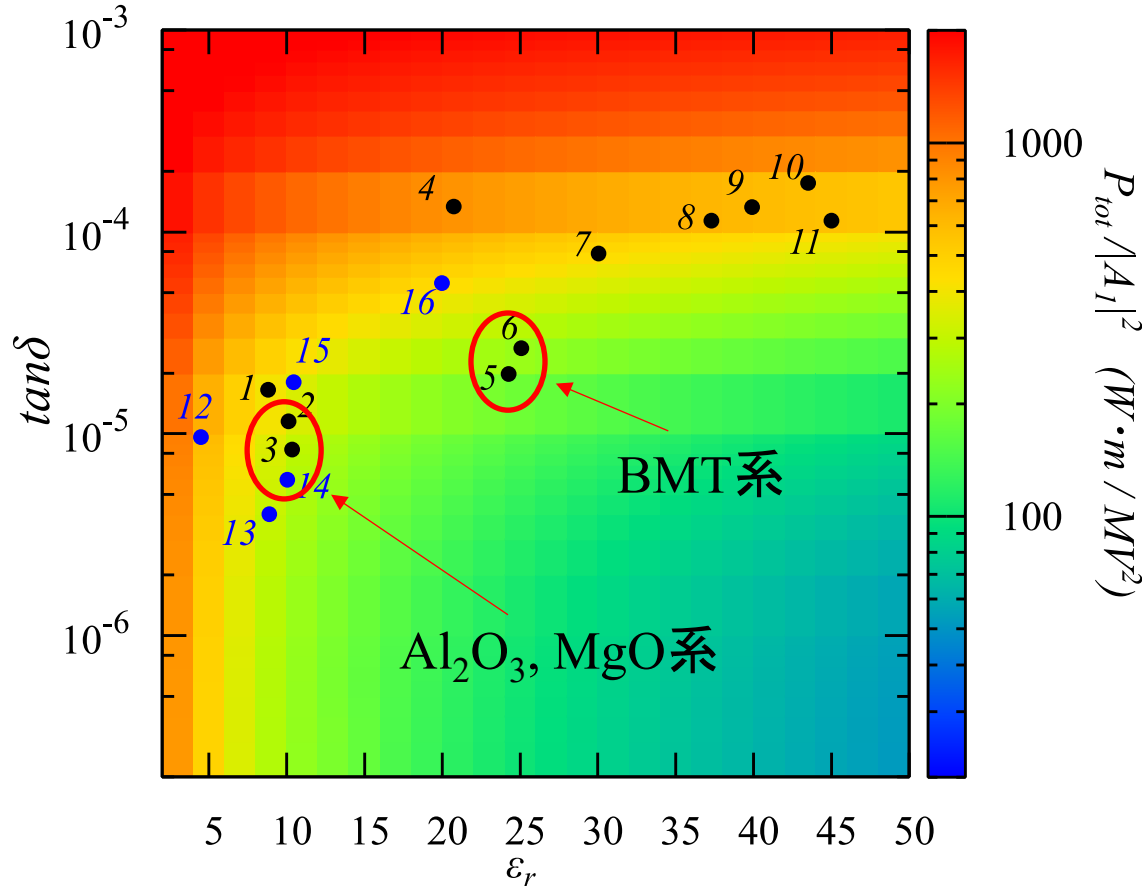
商用のセラミックスを用いて低損失のTMモードの伝送が可能



このモードを加速管へ応用

【全電力損失と誘電特性の関係】

【全電力損失の $\epsilon_r, \tan\delta$ 依存性】



カラーマップ上の各ボックスの値は、その誘電特性で全電力損失が最小になる構造の値を示す
(条件: $f = 5.712$ GHz, Conductor : Cu)

【各誘電体の誘電特性】

No.	Material	ϵ_r	$\tan\delta$	f (GHz)
1	MgO	9	2×10^{-5}	9
2	Alumina	10	1.2×10^{-5}	9
3	TiO ₂ -doped Alumina	10.15	7.25×10^{-6}	8.95557
4	MgTiO ₃ -CaTiO ₃	21	1.25×10^{-4}	7
5	Ba(Mg _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ -Ba(Mg _{1/2} W _{1/2})O ₃	24.2	2.5×10^{-5}	10
6	Ba(Mg, Ta)O ₃	25	2.86×10^{-5}	10
7	Ba(Zn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃	30	7.14×10^{-5}	12
8	BaO-TiO ₂ -WO ₃	37	1.13×10^{-4}	6
9	Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	39.8	1.25×10^{-4}	4
10	Sr(Zn, Nb)O ₃ -SrTiO ₃	43	2×10^{-4}	5
11	Pb _{0.6} Ca _{0.4} La _{0.5} (Mg _{1/2} Nb _{1/2})O ₃	45	1.09×10^{-4}	10

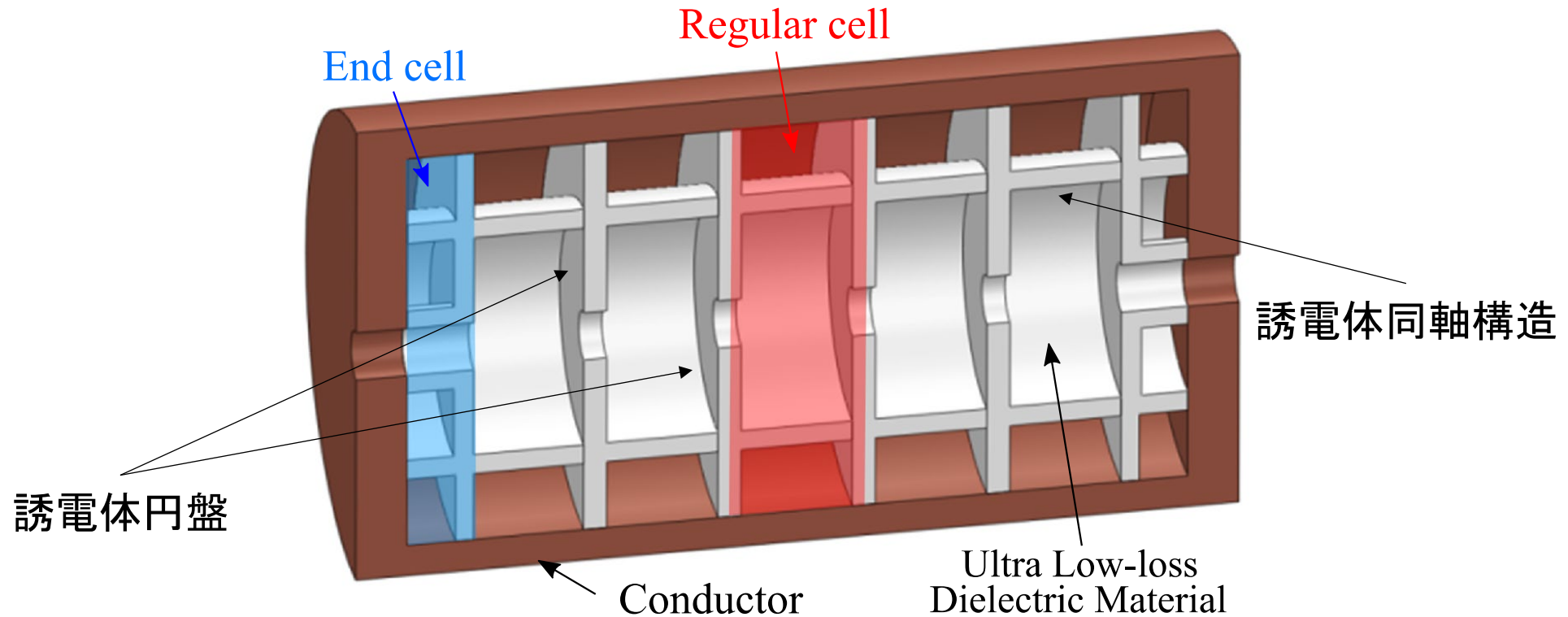
No.	Material	$\epsilon_{\parallel} / \epsilon_{\perp}$	$\tan\delta_{\parallel} / \tan\delta_{\perp}$ @300K	f (GHz)
12	Quartz	4.427 / 4.644	$1 \times 10^{-5} / 8 \times 10^{-6}$ *	16.9, 17.2
13	MgO	9	4×10^{-6}	7.5
14	Sapphire	9.4 / 11.587	$6 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-5}$	21.4, 21.7
15	YAG	10.6	2×10^{-5}	20.2
16	SrLa _{1.03} Al _{0.97} O ₄	19.8 / 16.85	$6 \times 10^{-5} / 2 \times 10^{-5}$	11.8, 12.1

同構造で全電力損失を最小とするには、BMT系やAl₂O₃, MgO系の誘電体材料が適している

【誘電体アシスト型加速管】

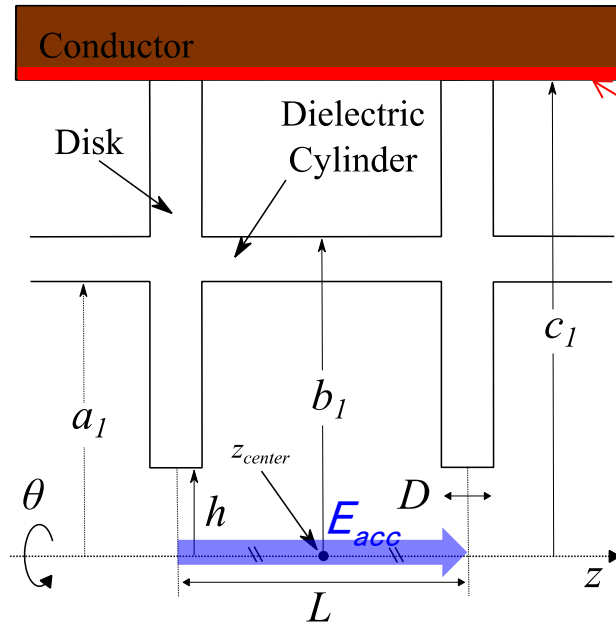
(Dielectric Assist Accelerating structure, DAA)

1. 誘電体製円板を周期的に配置することで位相速度を制御
2. 電磁場分布を制御し、**導体損失を抑える**ために同軸構造を利用
3. 加速に**高次共振モード**(TM_{02n} mode)を利用した定在波加速管(5.712 GHz)



【DAA管の基本構造】

【Regular Cell】

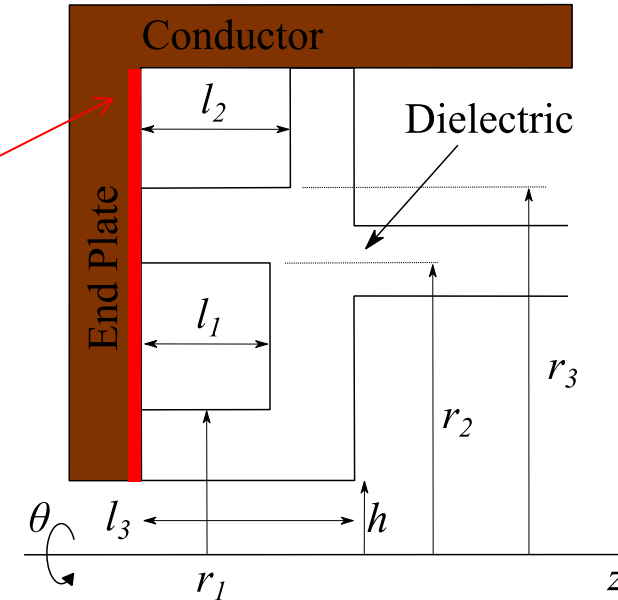


形状パラメータ：6つ (a_1, b_1, c_1, h, D, L)

【Regular Cellの役割】

- ビーム加速に寄与する加速セル
- 金属円筒部での導体損失を低減化

【End Cell】



導体損失を
低減化

形状パラメータ：7つ ($r_1, r_2, r_3, l_1, l_2, l_3, h$)

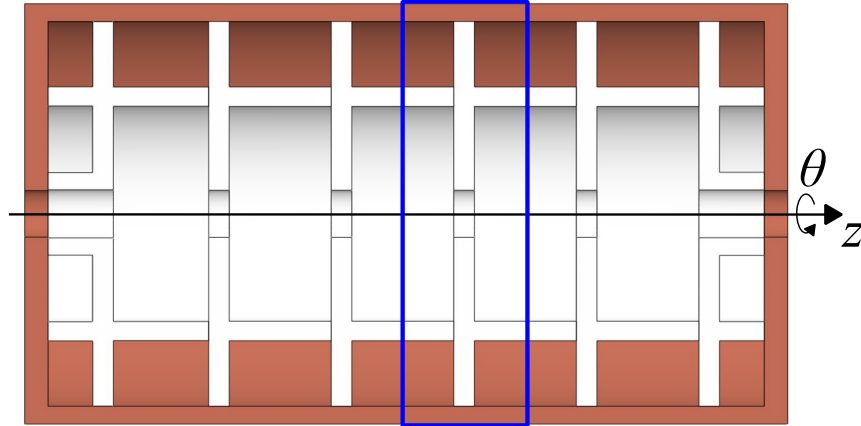
【End Cellの役割】

- ビーム加速を想定しない。
- 金属端板表面での導体損失を低減化

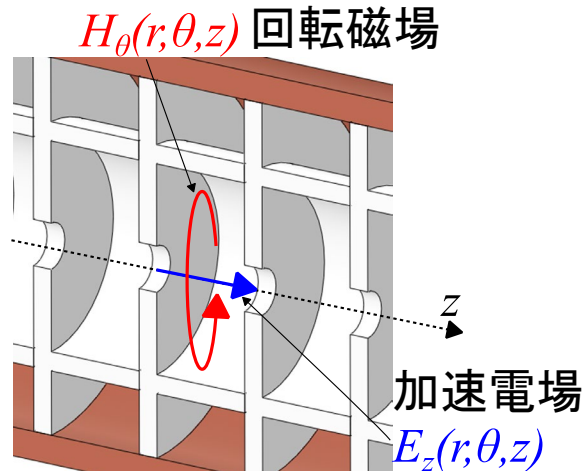
【加速モードの電磁場分布】

【解析体系】

解析領域 (Neumann 境界条件)



【電磁場分布の解説】

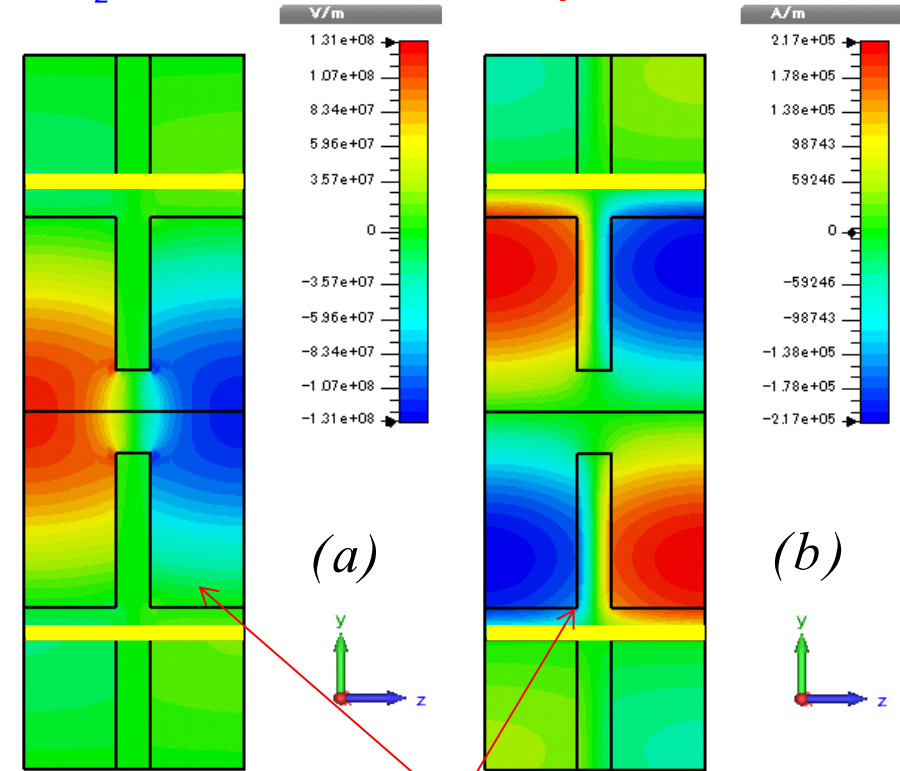


【解析結果】

(a) 加速電場分布 (b) 回転磁場分布

$$E_z(r, \theta, z)$$

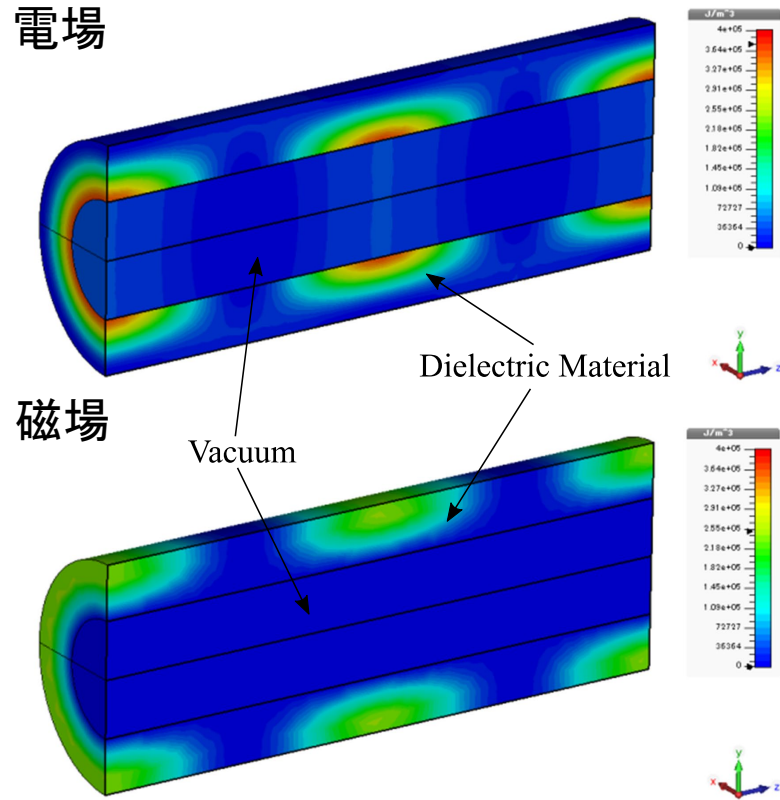
$$H_\theta(r, \theta, z)$$



最内殻の真空領域に π モードの電磁場分布が励振

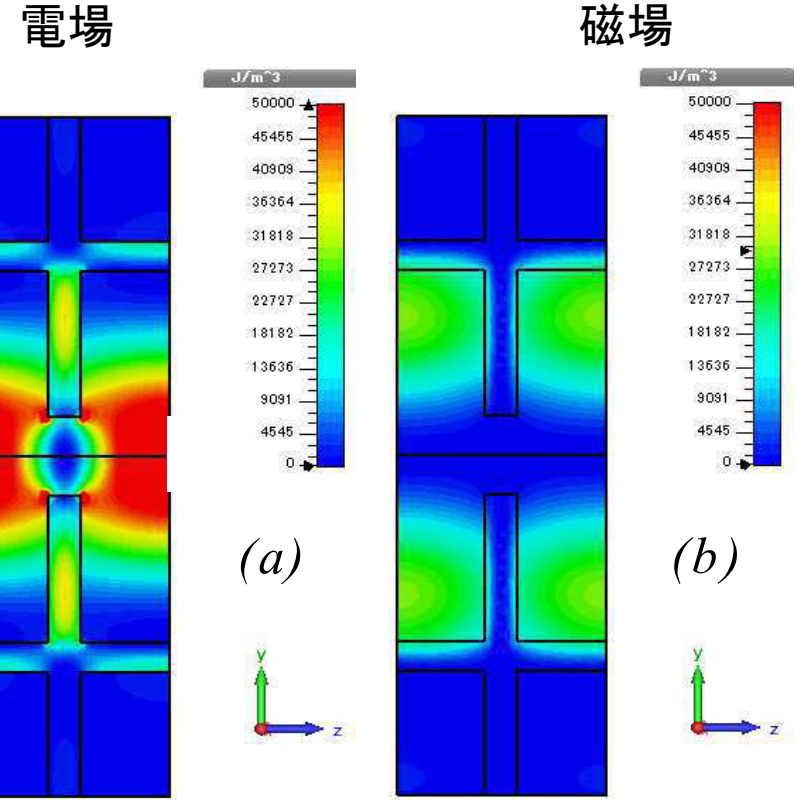
【DAA管内でのエネルギー密度分布】

【DLA構造】



加速モード(TM_{01} モード)のエネルギー密度

【DAA構造】

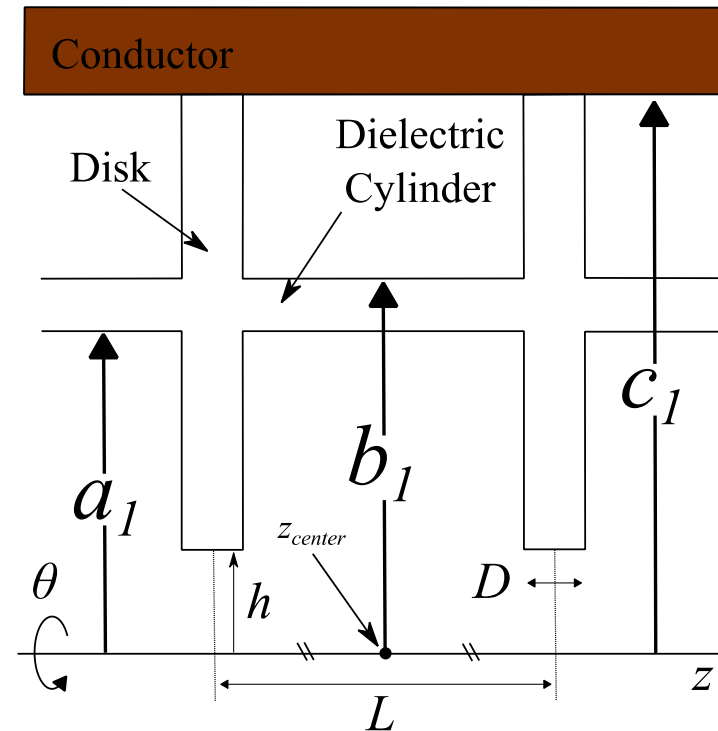


加速モード(TM_{02} モード)のエネルギー密度分布

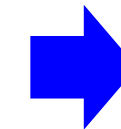
DAA構造は、ビーム加速領域に大部分の高周波エネルギーを蓄積できる

【Regular cellの形状最適化】

計算条件



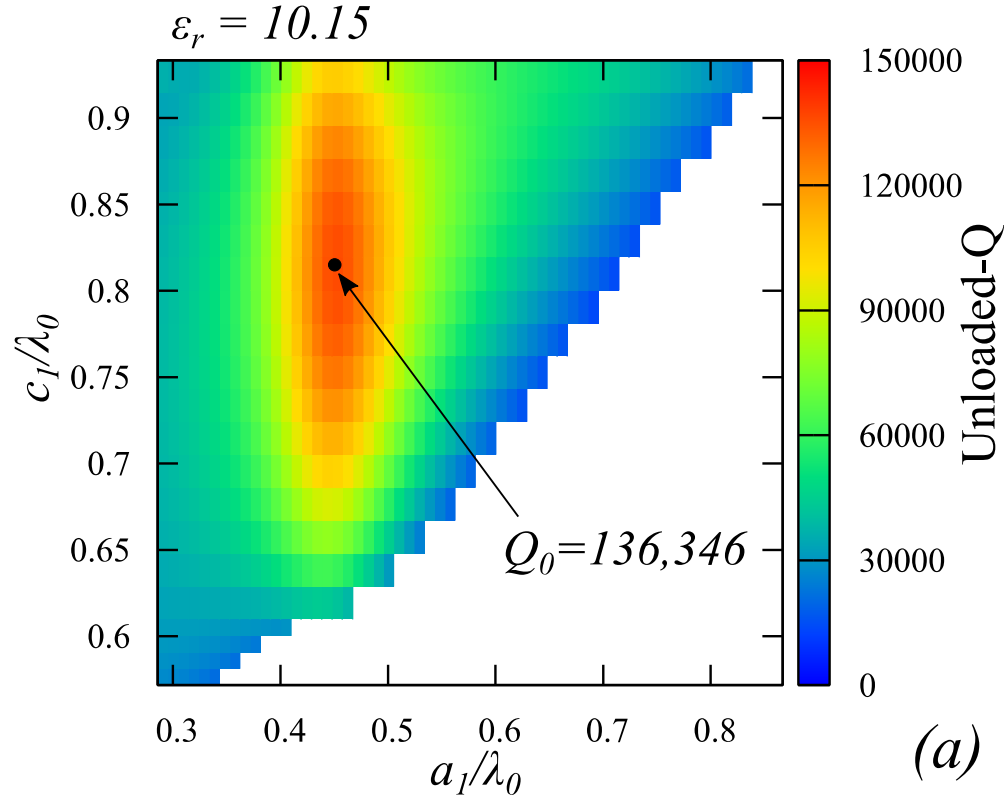
- ビーム軸方向に無限に周期構造が続いていると仮定。
- 加速管の共振周波数は**5.712 GHz**(C-band)。
- 誘電体はアルミナ ($\epsilon_r = 10.15$, $\tan\delta = 7.25 \times 10^{-6}$)を使用。
- 各(a_1, c_1)の組み合わせで b_1 を共振周波数に調整する。目的の共振周波数になる b_1 がなければ解なし。



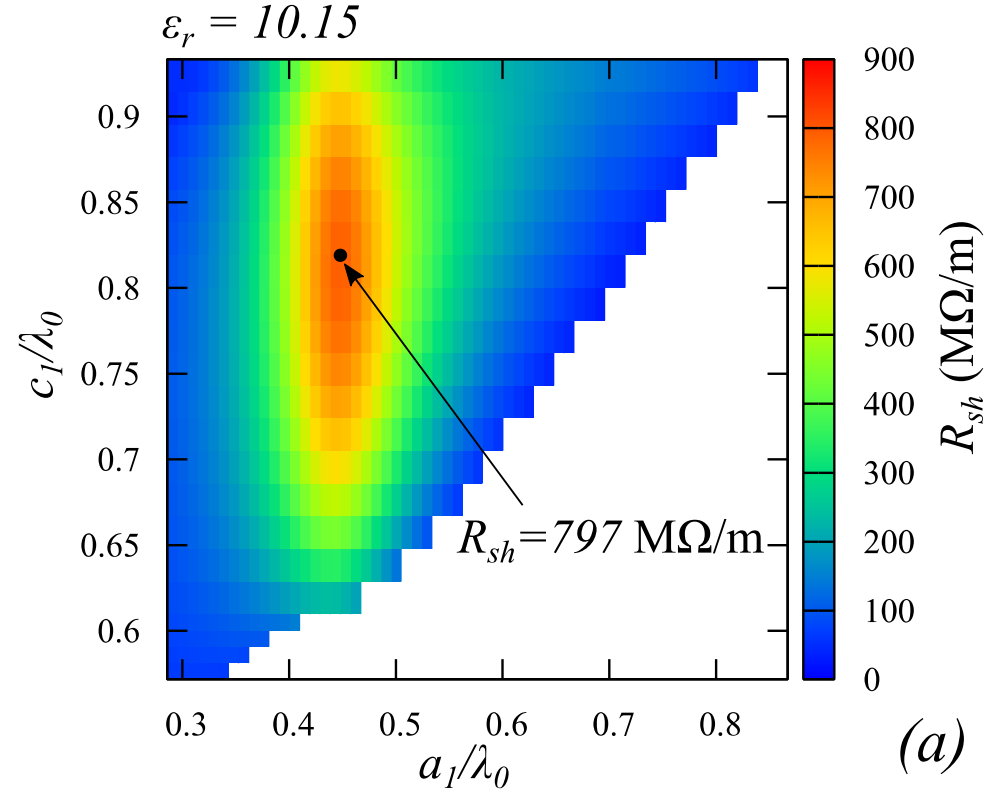
Z_{sh} が最大になる(a, b, c)の組み合わせを計算

【DAA管の無負荷Q値とシャントインピーダンス】

【無負荷Q値： Q_0 】



【シャントインピーダンス： Z_{sh} 】



【参考： π モード銅製定在波加速管】

$$f_0 = 5.712 \text{ GHz}$$

$$Q_0 = 12,674$$

$$Z_{sh} = 142 \text{ M}\Omega/\text{m}$$

【DAA管の加速管性能】

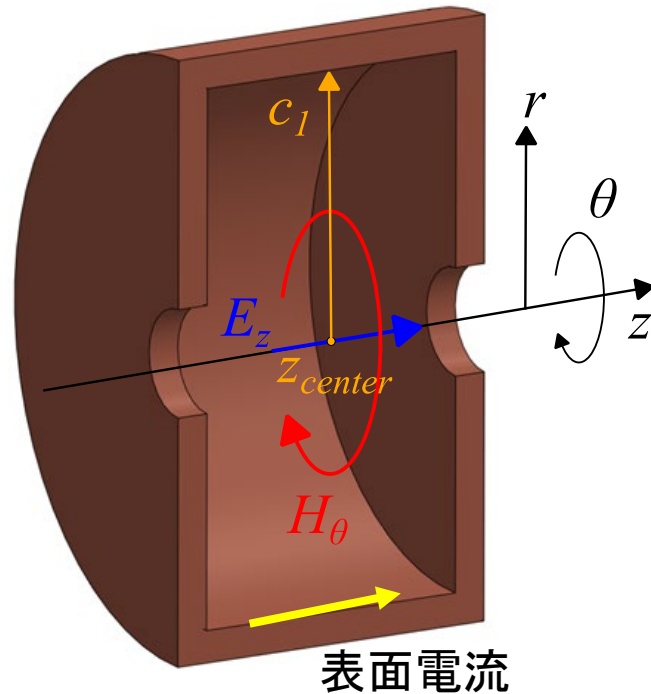
- Q_0 は、10倍以上
 - Z_{sh} は、5倍以上
- 非常に高電力効率な加速管が実現可能。

【DAA管が高電力効率となる要因】

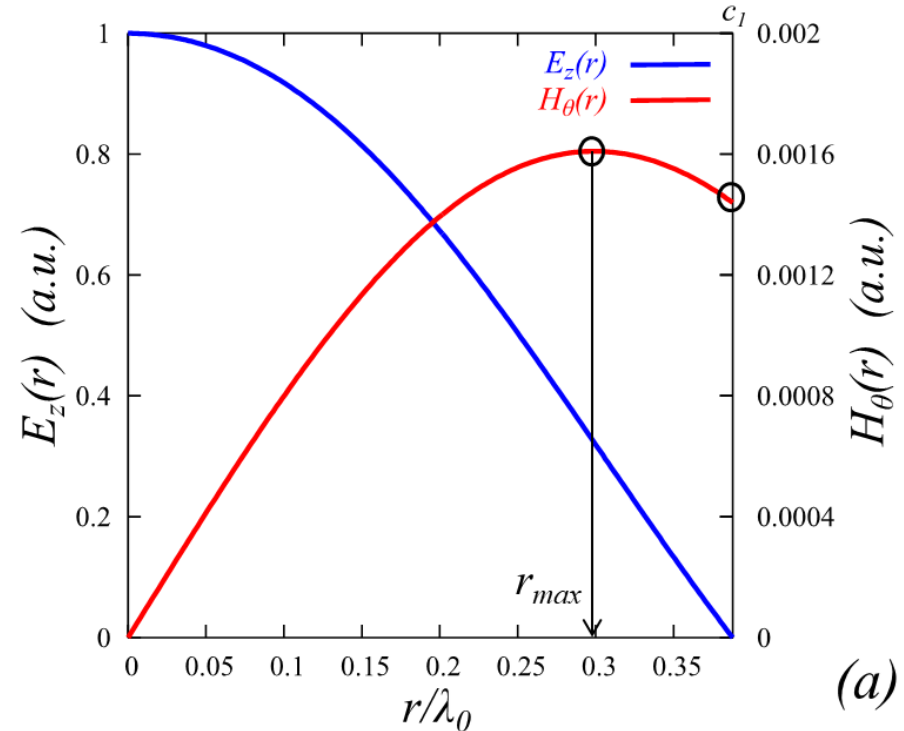
無酸素銅製加速管内での高周波損失

金属円筒表面での導体損失

$$P_{wall} \propto c_1, |H_\theta(c_1, z_{center})|^2$$



【電磁場分布のr方向依存性】



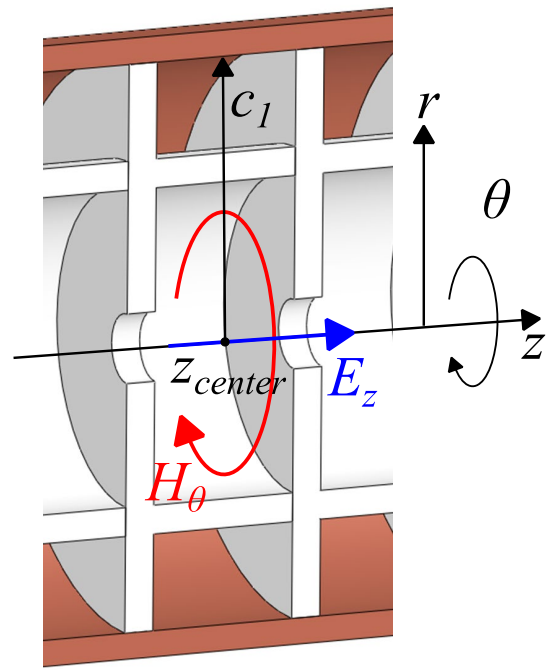
$$|H_\theta(c_1, z_{center})| / |H_\theta(r_{max}, z_{center})| = 0.89$$

- 回転磁場のピークが円筒表面近傍
- f_0 は、 c_1 でほぼ決まるため電磁場分布を調整できない

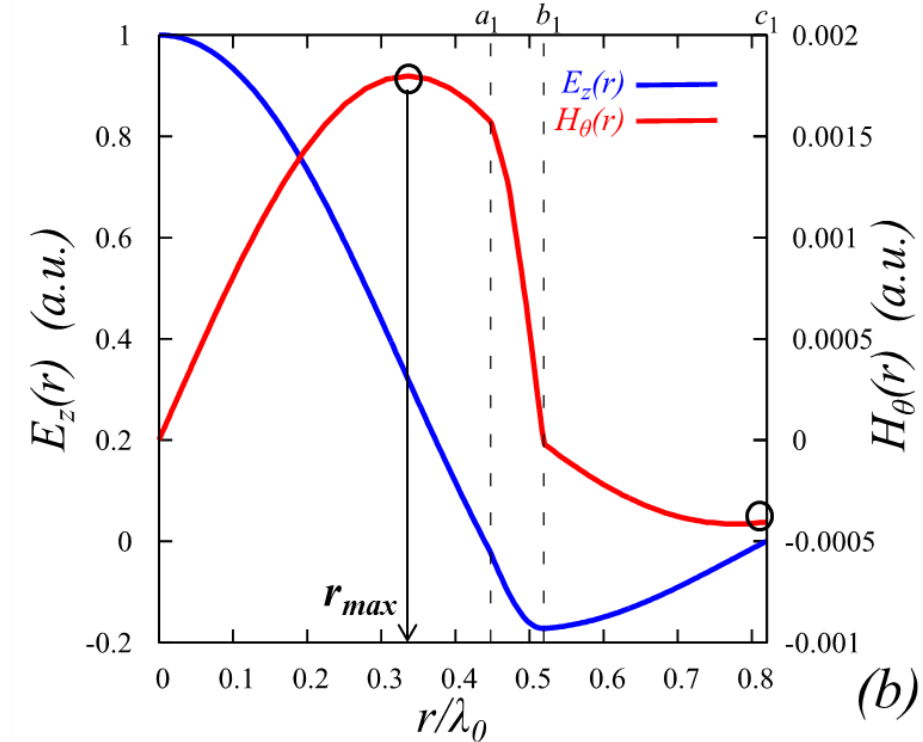
【DAA管が高電力効率となる要因】

DAA管内での高周波損失

金属円筒表面での導体損失

$$P_{wall} \propto c_1, |H_\theta(c_1, z_{center})|^2$$


【電磁場分布のr方向依存性】



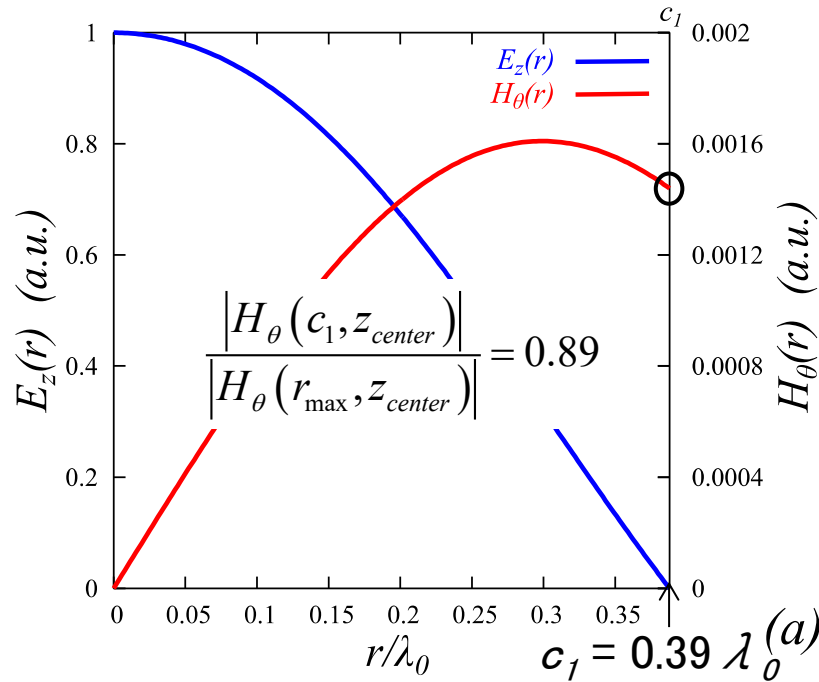
- $|H_\theta(c_1, z_{center})| / |H_\theta(r_{max}, z_{center})| = 0.23$
- f_0 は、 (a_1, b_1, c_1) の組み合わせで決まる
→ 電磁場分布の大幅な調整が可能。
 - 円筒表面近傍の回転磁場強度が小さくなる解が存在

【DAA管が高電力効率となる要因】

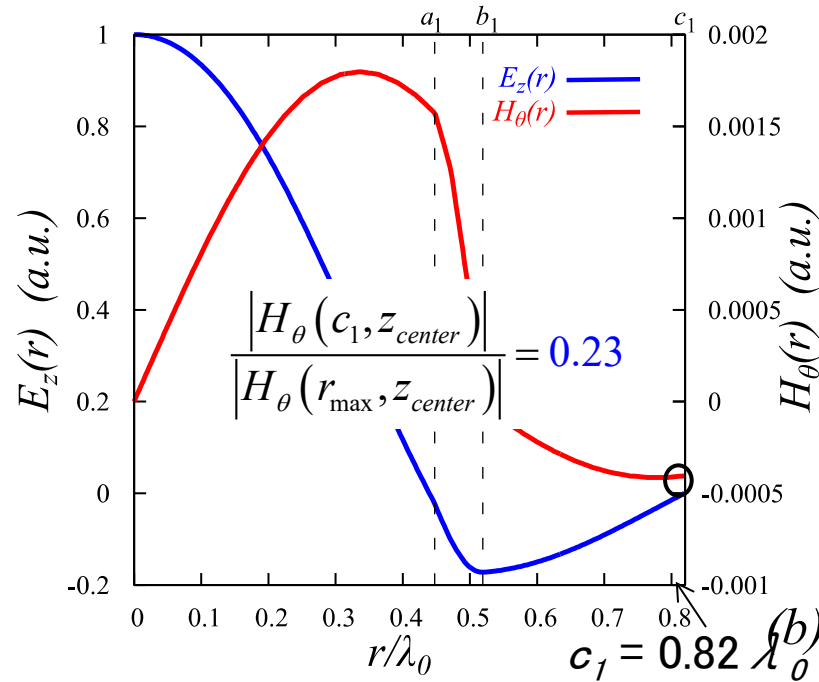
金属円筒表面での導体損失

$$P_{wall} \propto c_1, |H_\theta(c_1, z_{center})|^2$$

無酸素銅製加速管



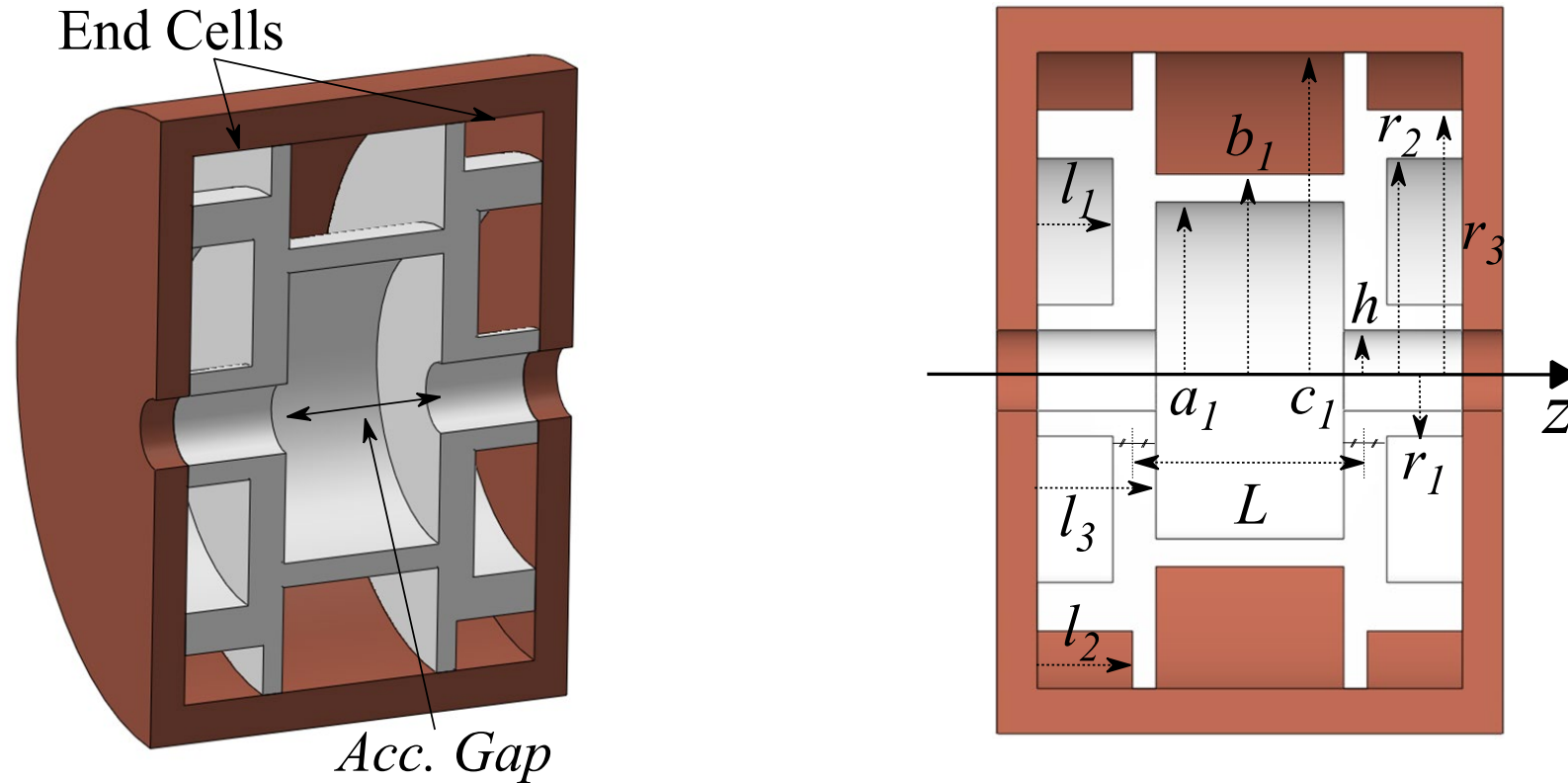
DAA管



DAA管の場合、管内半径は2倍となるが、導体表面での回転磁場が1/4になるため、導体表面での導体損失は、銅製加速管の約1/8に低減化。→ 高電力効率化

【End cell の効果の検証】

【DAA 単セル空洞の設計】



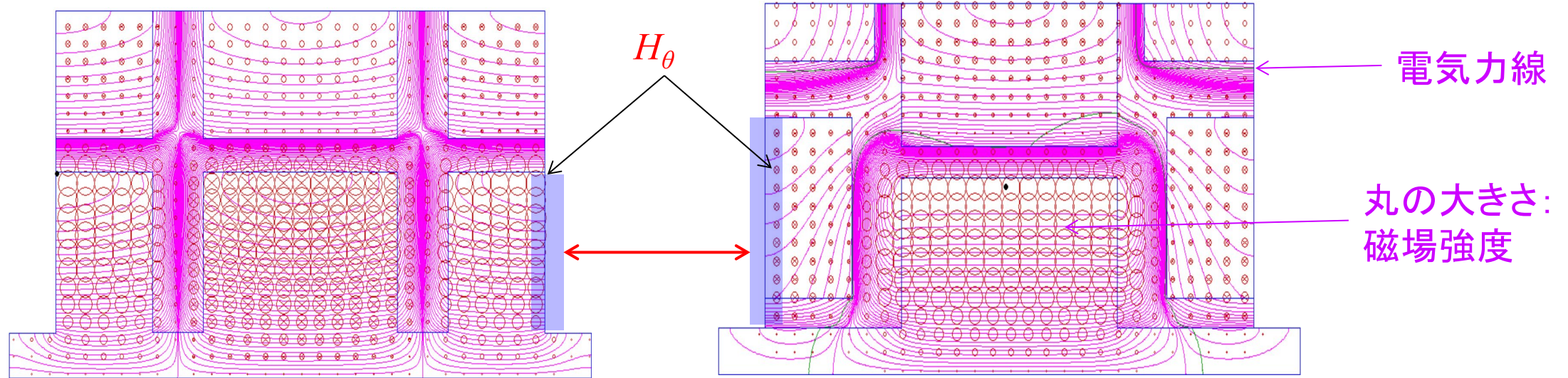
【設計方法】

不確定である9つの形状パラメータ($a_1, b_1, c_1, r_1, r_2, r_3, l_1, l_2, l_3$)を滑降シンプレックス法を用いてDAA管のシャントインピーダンスが最大となる組み合わせを探索。

【エンドセルの有無による加速管性能の違い】

【Non-End Cell type DAA】

【 End Cell type DAA 】



Parameter	Non-End Cell type DAA	End Cell type DAA
ϵ_r	10.15	10.15
Loss tangent	7.516×10^{-6}	7.516×10^{-6}
Operation Frequency	5.712 GHz	5.712 GHz
unloaded - Q	31487	81956
Shunt impedance	155 M Ω /m	377 M Ω /m

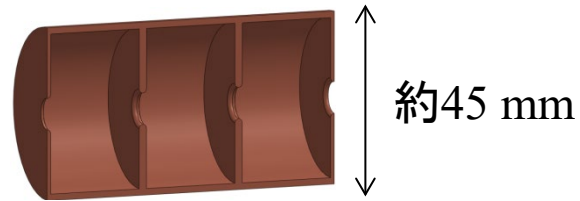
D. SATOH, et. al., Phys. Rev. Accel. Beams 19, 011302 (2016)

【End cellの効果】

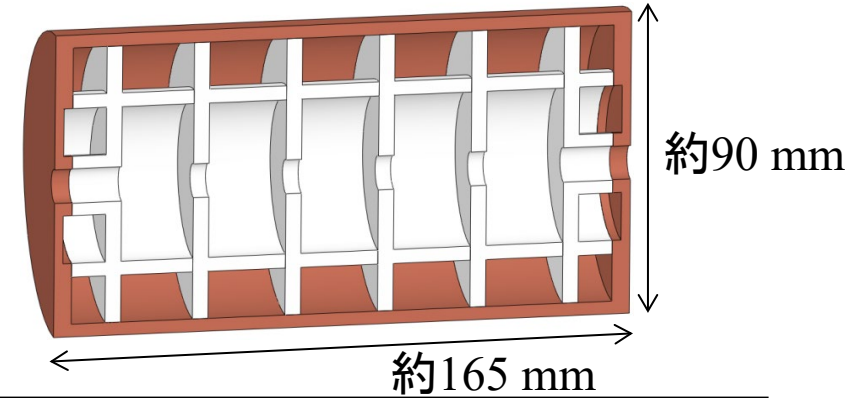
金属端板表面上の回転磁場強度が小さくなるため、エンドセルを有する方が加速管性能が向上する。

【商用セラミックスを用いたDAA管の加速管性能】

無酸素銅製加速管

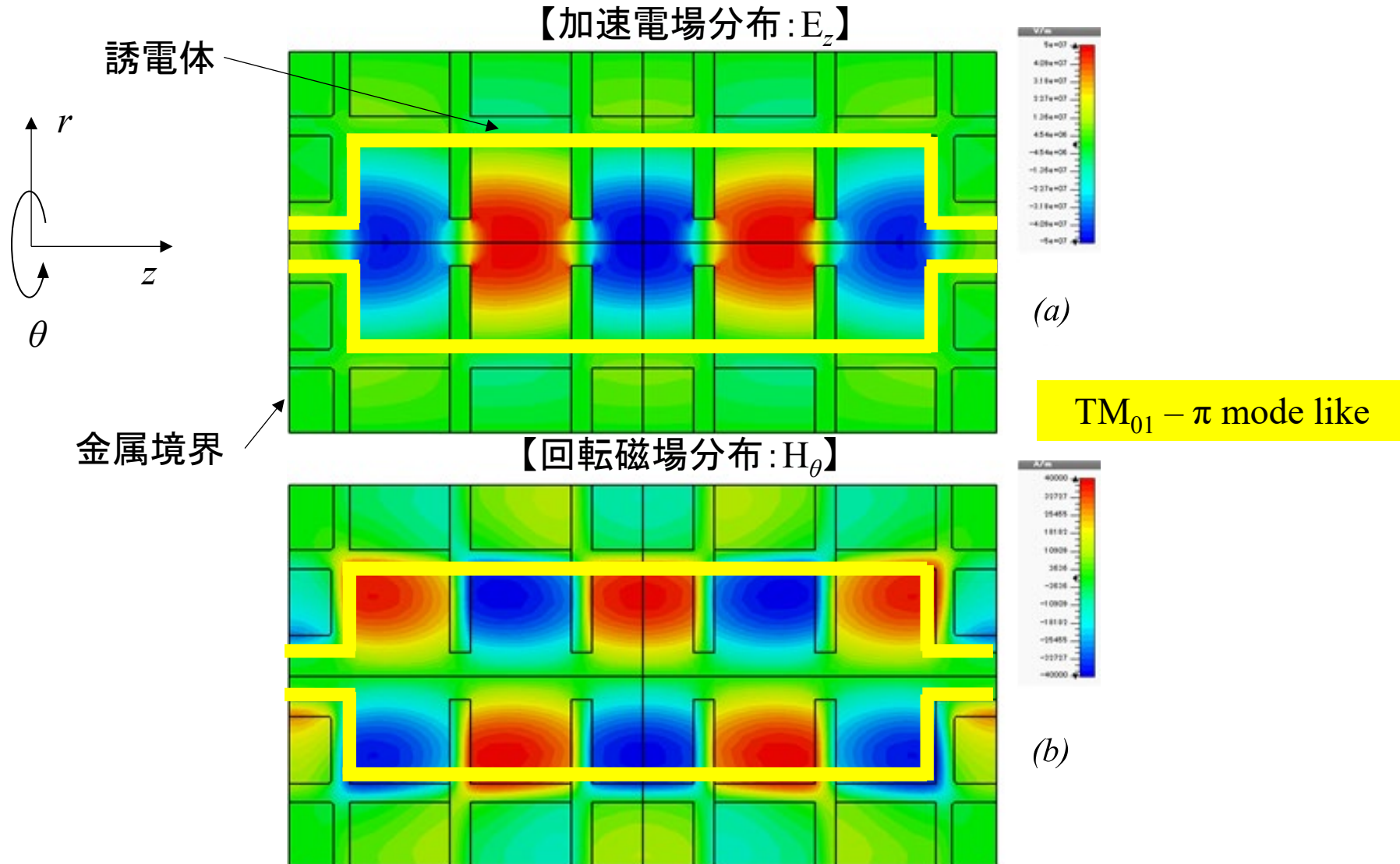


5セルDAA管



Parameter	C-band copper cavity		5 cell DAA Structure
Dielectric Material	—		TiO ₂ -doped Alumina
ϵ_r	—		10.15
Loss tangent	—		7.516×10^{-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	$\xrightarrow{\times 10}$	122,000
Shunt impedance	142 M Ω /m	$\xrightarrow{\times 4.4}$	656 M Ω /m

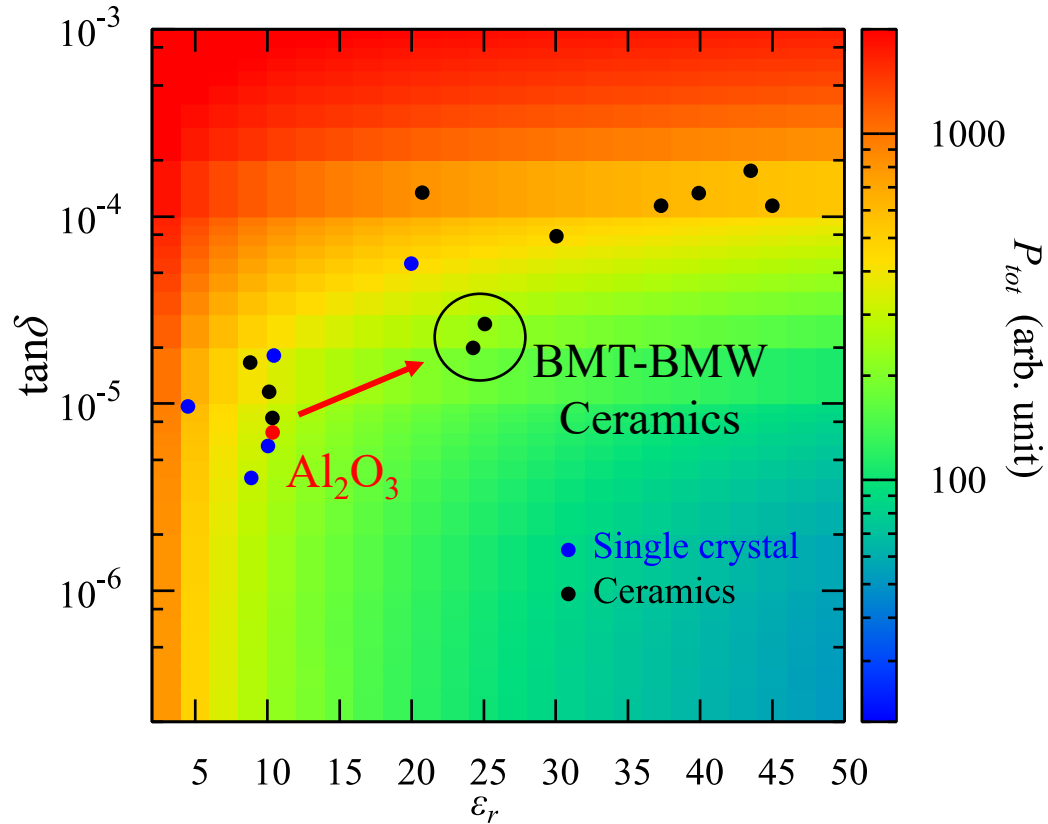
【加速モードの電磁場分布】



引用元: D. Satoh, et. al., PRAB 20, 091302 (2017)

【電力効率向上に向けた検討：高誘電率誘電体】

【DAA管内での高周波損失と代表的な誘電体材料】



DAA管内での電力損失の小ささという点で
BMT-BMWセラミックスが最適

BMT-BMWセラミックスを用いた DAA管の加速管性能

Parameters	Mat. : BMT-BMW
ϵ_r	24.2
$\tan\delta$	2.5×10^{-5}
Acc. type	Standing wave type
Acc. Mode	TM ₀₂ - π mode
Num. of Acc. cells	5
Frequency	5.712 GHz
Temperature	20 °C
Q ₀	121,200
Z_{sh}	870 MΩ/m

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

- BMT-BMWセラミックスモデルはAl₂O₃のモデルより、**Z_{sh}の30%以上向上**が期待
- BMT系セラミックスは、**難焼結性セラミックス**であり、材料調達自体に課題があり。