

EUV光源にむけた超伝導空洞開発

2015年5月20日

ERL検討会

梅森健成、江木昌史、江並和宏、加古永治、
久保毅幸、許斐太郎、阪井寛志、篠江憲治、
古屋貴章、沢村勝(JAEA)太田智子(東芝)

目次

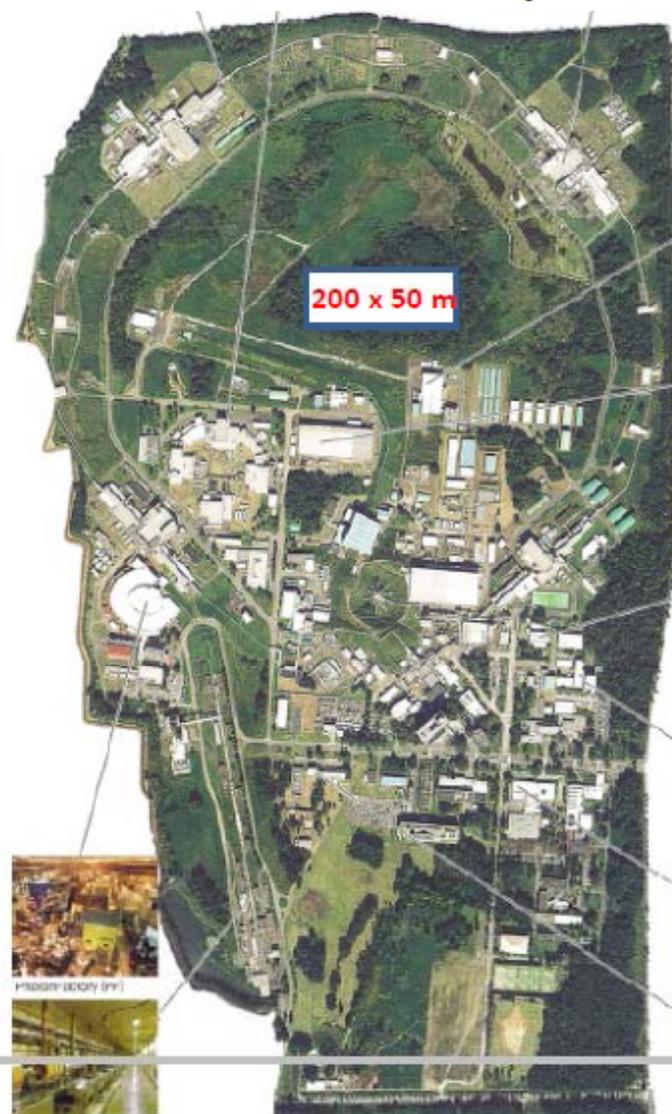
- 超伝導空洞のパラメーター
- 必要な開発要素
- 空洞開発
- HOMダンパー開発
- スケジュール案および検討項目

EUV光源での超伝導空洞のパラメーター

加古さんのスライド(2014年11月)より

ERL	Main LINAC
Beam Energy	800 MeV
ave. Current	8.125 mA
Accelerating Gradient	12.5 MV/m
No. of Cavity	64
No. of Cryomodule	16 (4 cav./module)
Linac Length	130 m (Pac. Fac. 50%)
RF Power per cavity	2 kW ($Q_{in} = 2 \times 10^7$)
Beam Dump Power	81 kW
Cavity Loss at 2K	1.0 kW ($Q_0 = 1 \times 10^{10}$)
Cryogenic Plant	7.0 kW (at 4K)

KEK Tsukuba Campus



要素開発

空洞	BBUはそれほど厳しくないはず(繰り返し依存は?) → 確認必要 モノポールによるダンパー部の発熱に要注意 フィールドエミッション対策は必須 ⇒ TESLA空洞をベースにしたModel-1空洞、もしくは、その改良型を用いる?
クライオモジュール	STFモジュールをベースにしたCWモジュールの開発 STFグループの経験があるので、何とかなるか?
モジュールアセンブリ	フィールドエミッション対策が必須 アセンブリ技術の早期確立が必要。
入力カップラー	設計は現在のものをベースにする。特に大きな問題は無し。 新材HA997での試作・性能評価 を早期に行う。
HOMダンパー	現在のフェライトダンパーは、クラックの発生によるゴミ混入のリスクがあり信頼度に欠ける。 ⇒ 新しい素材でのダンパーを大至急設計・試作・試験する必要あり HOMダンパーが一番問題(目途が立っていない)
周波数チューナー	現在の設計で特に問題無し

空洞開発

主加速部空洞の検討

- 加速勾配 $\sim 12.5\text{MV/m}$
 - 冷凍機、HOM、Field emissionなどから最適値を検討
- 空洞形状は要検討
 - 例えばModel-1形状(TESLA形状+large beam pipe)もしくは、その改良型が候補
- Dipole modeによるBBU (Beam breakup instability)
 - Model-1空洞において5GeV ERLにて100mAを達成できる計算。それより空洞台数が少なく、電流値の少なくて済むEUV光源では、楽になる方向だと思われる。
- Monopole modeの励振 \Rightarrow HOM damperでの発熱が最重要課題
 - Loss factor
 - ビーム繰り返し周波数(とHOMの共振周波数の関係)

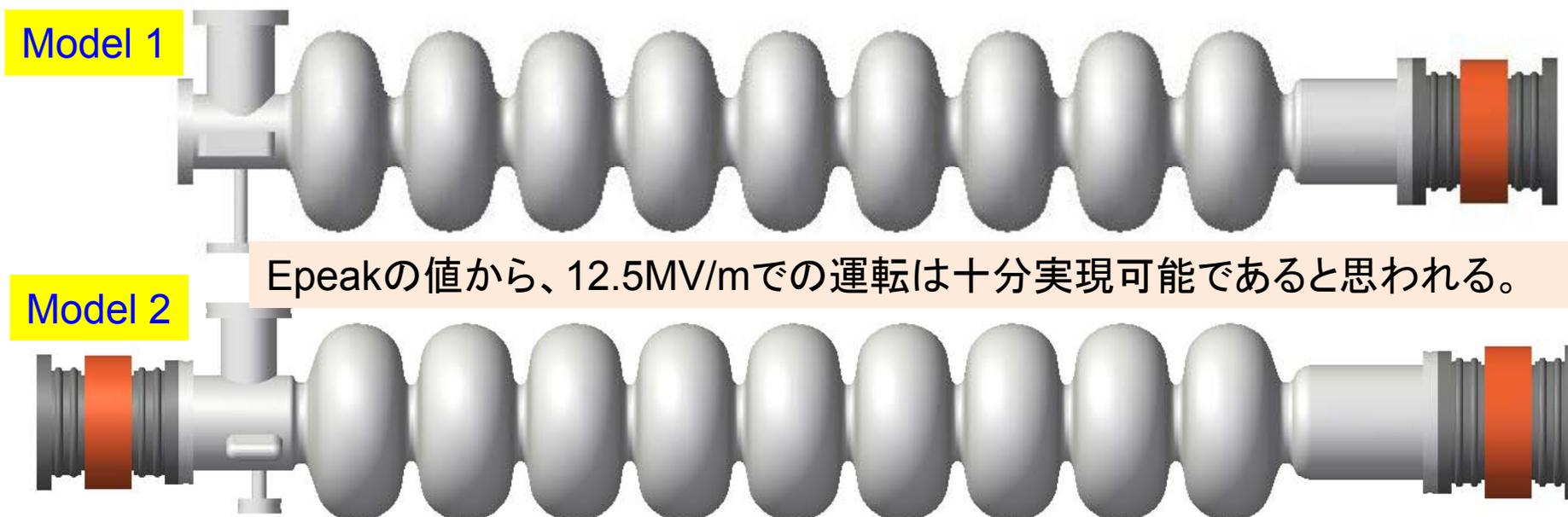
空洞設計の方針と現状

- Model-1空洞(TESLA形状+108φビームパイプ, 片側のみの)のパラメーターを用いて検討スタート
 - BBUやMonopoleによる発熱の検討を行っている
- 現在、久保・許斐がMW-studioを用いてのHOM計算を確立すべく奮闘中



- 今後は、TESLA形状+両側大口徑ビームパイプ(110φ+100φ?)の空洞設計およびHOM計算を行う。
- エンドセル形状のみ変更した空洞をいくつか設計し、HOMパラメーターを比較して、最終の空洞形状を決定する。

Model 1とModel 2空洞の比較



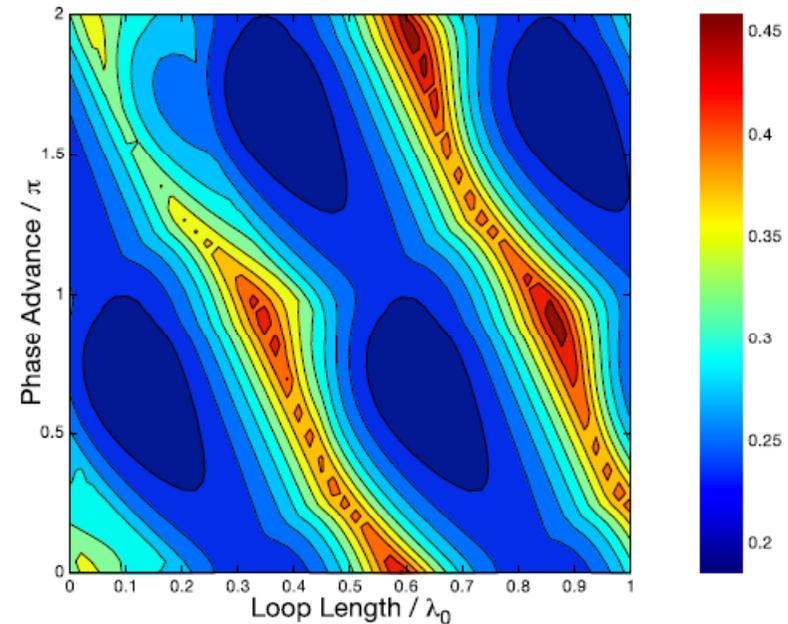
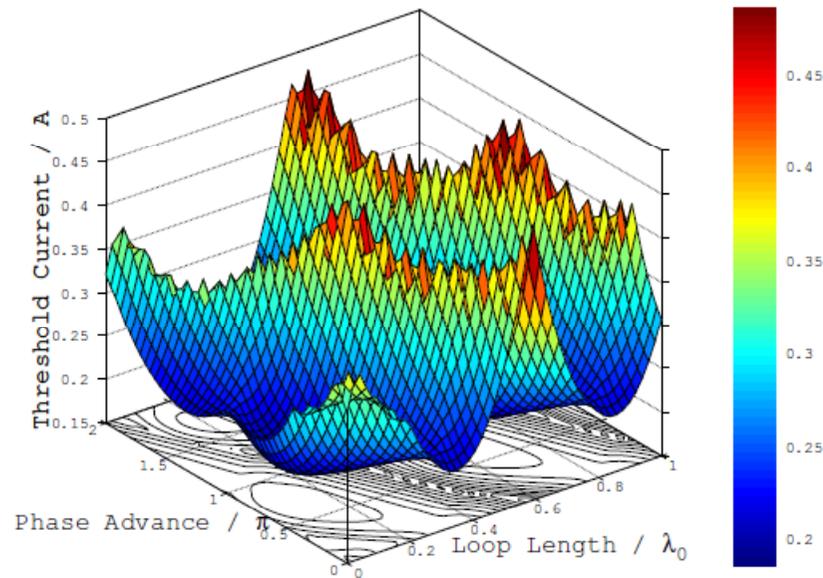
Epeakの値から、12.5MV/mでの運転は十分実現可能であると思われる。

加速モードのパラメータ

	Model 2	Model 1		Model 2	Model 1
Frequency	1300 MHz	1300 MHz	Iris diameter	80 mm	70 mm
Rsh/Q	897 Ω	1007 Ω	Qo × Rs	289 Ω	272 Ω
Ep/Eacc	3.0	2.0	Hp/Eacc	42.5 Oe/(MV/m)	42.0 Oe/(MV/m)
Coupling	3.78 %	1.87 %			

Preliminary BBU Simulation Results for EUV-ERL with KEK ERL model-1 cavity
by Chen Si

Scan over $\Delta\psi$ and Δl for 162.5MHz rept. rate



- $I_{th,max} \approx 485.78 mA$, at $\Delta\Psi \approx 1.918367\pi$ and $\Delta l \approx 0.612245\lambda_0$.
- $I_{th,min} \approx \underline{186.02 mA}$, at $\Delta\Psi \approx 0.693878\pi$ and $\Delta l \approx 0.122449\lambda_0$.
- Dark blue areas should be avoid for return loop lattice design.

Frequency spreadを考慮しないで200mA近くいく。十分なマージンあり。

HOM発熱に関して

- Monopoleモードが寄与する
- 重要なパラメータは
 - バンチ電荷
 - バンチ繰り返し
 - バンチ長
- HOM発熱を10～30Wとしたい。(短期間で現実的なHOM開発を目標とするため)
 - 100W級には別設計が必要
- 発熱量の評価としては
 - “loss factor”による見積り: 平均的な値を示す。
 - HOM周波数とビーム繰り返しとの関係: 共振的な振る舞いを調べる

中村さん主催の「EUV全体設計打合せ(?)」にて、ビームパラメータとのすり合わせを行っている。

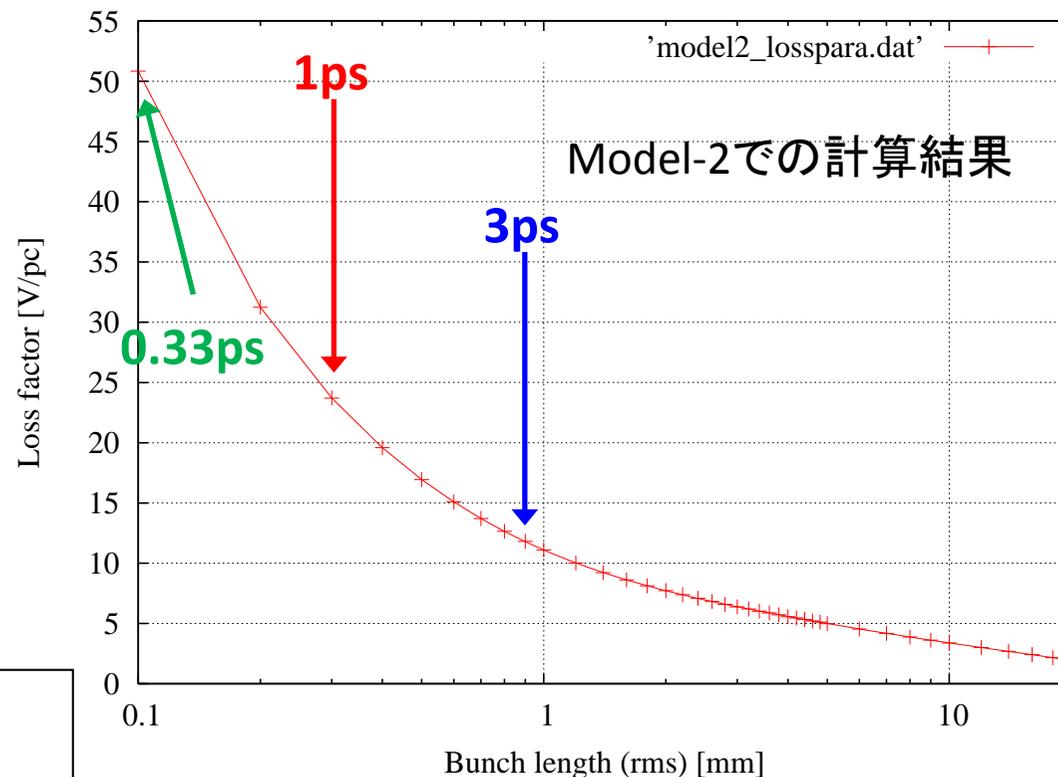
ロスファクター

- この計算結果は、加速モードのloss factor込みの値。
- 例えば3psの時は、加速モードの寄与 $\sim 2\text{V/pC}$ 。HOMによる寄与は $12-2=10\text{V/pC}$ 。
- 空洞形状からのロスのみ。RF吸収体自体のロスは含まず。
- バンチ長1psだと $\sim 20\text{V/pC}$ 、0.33psだと $\sim 40\text{V/pC}$

計算例

77pC x 130MHz = 10mA、3psecの場合
 $(10\text{V/pC} \times 77\text{pC}) \times (0.01\text{A} \times 2) = 15.4\text{W}$

[KEK-PF 伊澤氏より]



(下表)ダンパーで吸収される熱量

Bunch length @cavity	Loss factor from HOM	8mA x 2 100pC, 81.25MHz	8mA x 2 60pC, 135.4MHz	24mA x 2 (30kW仕様?) 60pC, 243.75MHz
3psec	$\sim 10\text{V/pC}$	16W	9.6W	28.8W
2psec	$\sim 15\text{V/pC}$	24W	14.4W	43.2W
1psec	$\sim 20\text{V/pC}$	32W	19.2W	57.6W

※ 60pCぐらいのバンチ電荷は悪くなさそう。バンチ長は長いのが望ましい。

ビーム繰り返しとHOM周波数

- 実際の超伝導空洞のHOMのQ値は高いため、ビーム繰り返しとHOM位相とが合ってしまう(=HOM周波数がビーム繰り返しの整数倍になった場合)と、ビームによりHOMが強く励振されてしまう。
- ビーム繰り返しとHOM周波数が完全にマッチした場合の発熱量は以下で表される。(注: 主空洞を通るビーム電流は、運転電流の2倍)

$$P_{\text{HOM}} = (R_{\text{sh}}/Q) \times Q_{\text{ext}} \times (2 \times \text{Current})^2$$

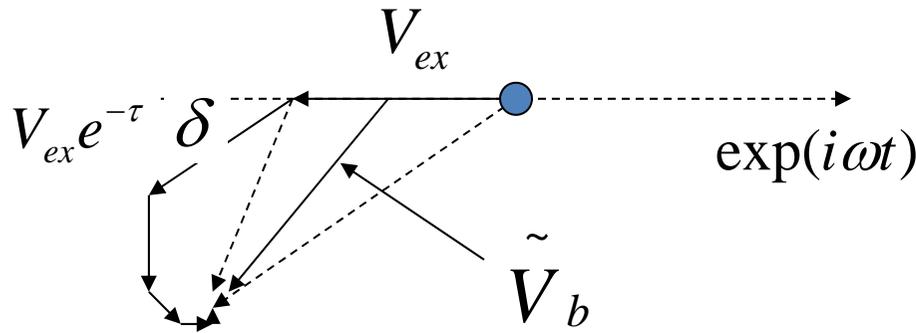
- ビーム繰り返し周波数が直撃した際にも、HOM damperでの吸収を10W以下にしようと思うと以下の条件になる
 - Current = 100mAの時、 $(R_{\text{sh}}/Q) \times Q_{\text{ext}} < 250 \sim 2e2$
 - Current = 33mAの時、 $(R_{\text{sh}}/Q) \times Q_{\text{ext}} < 2296 \sim 2e3$
 - Current = 8mAの時、 $(R_{\text{sh}}/Q) \times Q_{\text{ext}} < 39063 \sim 4e4$
- HOMインピーダンスを下げるるとともに、HOM周波数とビーム周波数の直撃を避けることが重要。
- 高い周波数のHOMの制御は困難であるが、少なくとも計算で追えるような周波数のHOMについては、ビーム周期を逃げておくべき。

個別のMonopole modeによる発熱

$$P = \frac{1}{2} \omega T_b \left(\frac{R}{Q} \right)_{HOM} I_0^2 \exp(-\omega^2 \sigma_z^2) \times \underline{F(T_b, \tau_{cav})}$$

ビームによってHOMがexciteした時のpower loss (deposit)

$$\tau = \frac{T_b}{\tau_{cav}}, \tau_{cav} = 2Q_L / \omega, \delta = T_b(\omega_0 - \omega) \quad \text{Re} \left[\frac{\tilde{V}_b}{(-V_{ex})} \right]$$



ω_0 : 空洞共振周波数
 ω : HOMの周波数

$$I_0 = q / T_b$$

$$\tilde{V}_b = -V_{ex} \left\{ (1 + e^{-\tau} e^{-i\delta} + (e^{-\tau} e^{-i\delta})^2 + \dots) - \frac{1}{2} \right\}$$

HOM周波数とビーム繰り返し(x2)との周波数の差[MHz]

Freq [MHz]	R/Q * Q [Ohm]	8mA直撃の場合 の発熱量 [W]	ビーム繰り返し [MHz]														
			650	325	260	163	135.4	130	100	81.25	65	52	50	40.63	32.5	26	25
2379	6777	2	221	221	221	104	58	39	21	59	39	13	21	23	26	13	21
2393	8081	2	207	207	207	118	44	53	7	45	53	1	7	37	12	1	7
2403	4002	1	197	197	197	128	34	63	3	35	63	11	3	35	2	11	3
2415	6914	2	185	185	185	140	22	75	15	23	55	23	15	23	10	23	15
2417	8060	2	183	183	183	142	20	77	17	21	53	25	17	21	12	25	17
2427	6259	2	173	173	173	152	10	87	27	11	43	35	27	11	22	17	23
2442	83138	21	158	158	158	158	5	102	42	5	28	50	42	5	28	2	8
2447	66933	17	153	153	153	153	10	107	47	10	23	49	47	10	23	3	3
2452	252675	65	148	148	148	148	15	112	52	15	18	44	48	15	18	8	2
2453	275540	71	147	147	147	147	16	113	53	16	17	43	47	16	17	9	3
2459	23944	6	141	141	141	141	22	119	59	22	11	37	41	22	11	15	9
2680	2817	1	80	80	80	80	28	80	80	80	50	24	20	1	15	24	20
3848	26967	7	52	52	208	52	57	52	48	52	52	0	48	29	13	0	2
3850	4032	1	50	50	210	50	59	50	50	50	50	2	50	31	15	2	0
3851	39546	10	49	49	211	49	60	49	51	49	49	3	49	32	16	3	1
3852	5398504	1382	48	48	212	48	61	48	52	48	48	4	48	33	17	4	2
3852	3623	1	48	48	212	48	61	48	52	48	48	4	48	33	17	4	2
3853	259325	66	47	47	213	47	62	47	53	47	47	5	47	34	18	5	3
3867	8794	2	33	33	227	33	76	33	67	33	33	19	33	33	32	19	17
4186	3935	1	286	286	26	39	124	26	14	39	26	26	14	39	26	26	14

- ・HOMに直撃せず運転する条件は探せそう。ビーム繰り返し100MHz以上の方が良さそう。
- ・Model-1空洞から形状が変わると、また条件は変わるので、その点は要注意
- ・もっと高い周波数のHOMもいるので、最終的にはビーム運転をしながら最適なビーム繰り返しを探すことになる

HOMダンパー開発

	長所	短所	使用例	コメント
HOM coupler (with large beam pipe)	<ul style="list-style-type: none"> ・製造実績あり ・組立時の清浄化 	<ul style="list-style-type: none"> ・偏向に対する角度依存 ・ストップバンド ・コネクタの周波数特性 ・コネクタの発熱？ 	<ul style="list-style-type: none"> ・TESLA空洞 ・STFその他 	<ul style="list-style-type: none"> ・cERLなら10mA運転でも対応可か？ ・EUVの場合もOKかもしれない ・計算でフォローできない周波数帯がやや不安 ・短期では最も可能性あり
Beamline damper	<ul style="list-style-type: none"> ・場所への依存性がない ・周波数特性が良い ・強い減衰が期待できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・製造時、使用時のクラック ・組立時の清浄化が困難な場合あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・KEKB ・cERL ・Cornell ・Euro-XFEL 	<ul style="list-style-type: none"> ・うまく行けば最も理想的 ・うまく行くかどうかはやってみないとわからない。 ・中長期向き？ ・Euro-XFELを真似てつくるのが、最も可能性あり？
Waveguide damper	<ul style="list-style-type: none"> ・強い減衰が期待 ・周波数特性も良いはず 	<ul style="list-style-type: none"> ・KEKでの実績なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・J-lab 	<ul style="list-style-type: none"> KEK単独での短期開発は現実的でない

HOMダンパー開発の案

- 試作モジュール(4空洞)用の短期のダンパー開発と、EUV試験機(64空洞)用の中期のダンパー開発とを考えることにする。
- 試作モジュール用には、1年を目途に、信頼性のあるHOM damper/ couplerを実現することを最低限の目標と考える
 - EUV、もしくはcERLでの10～30mA程度の運転を想定。
 - BBU(Beam breakup instability)をクリアすること
 - Monopole modeの発熱に対応できること(最大10～30W程度をターゲットにする)
- モジュール設計の観点からも、早めにHOM周りのデザインを固めたい。

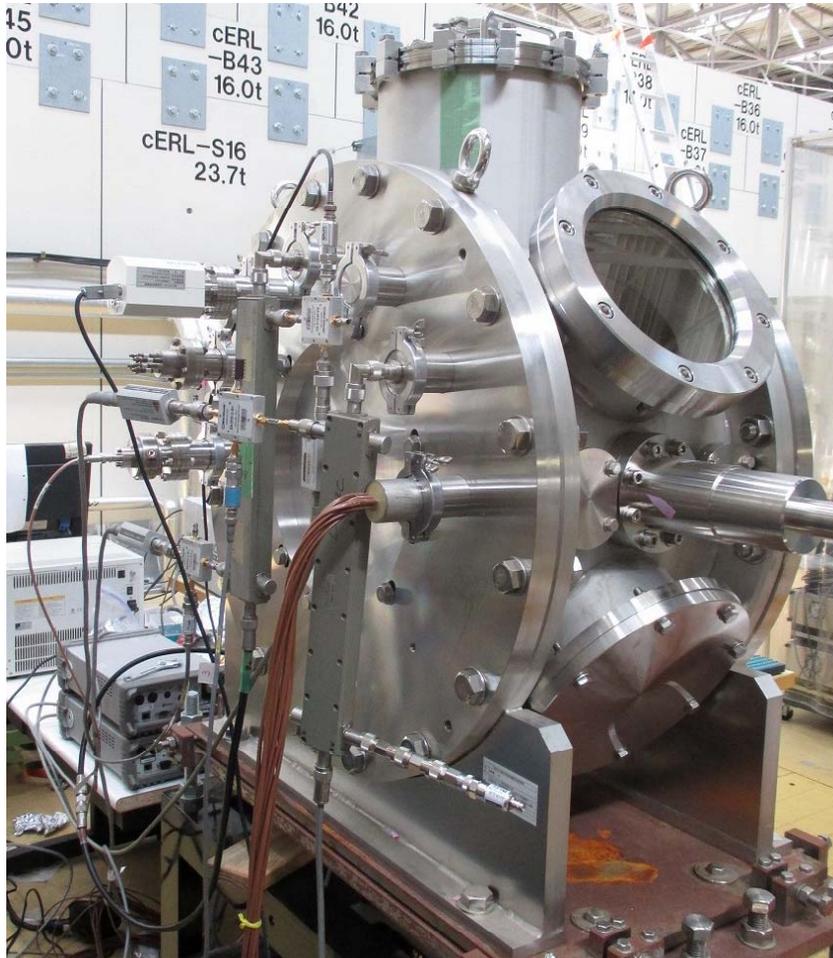
HOMダンパー開発の案(続き)

- 実現可能性および信頼度を勘案して、アンテナ型HOM couplerをベースにしたものを選択
- ただしいくつか気になる点がある
 - 高い周波数帯(10GHz以上への対応)
 - ストップバンド
 - 偏向
- この対策として、比較的簡単な吸収体を設けてサポートする
 - 幅は狭くてよい(メインは高い周波数帯)
 - リングでも、短冊でも、タイルでも何でも良い
 - 接合方法もちゃんとして、ヒートサイクルにもてば何でも良い
- 空洞あたり数W~10Wの熱に持てば良いとする

アンテナ型HOMカップラー + 1年間で開発した吸収体を用いて、試作モジュール用のHOMダンパーとする



[HOM study]真空中でのパワー投入

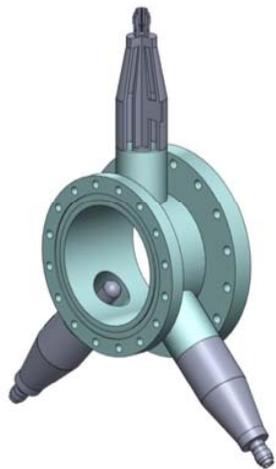


- 断熱真空層中でケーブルのコネクタを接続して、大電力投入の試験を行っている。(沢村さん)
 - 通常のN-ケーブル&N-コネクタを使用
 - 50~100W投入して試験。温度上昇は見られるが、コネクタでの放電のような現象は見られていない。
- ↓
- 断熱真空層内に設置のアンテナ型のcouplerでも、10W程度(マージン込み)を取り出すことが可能か？

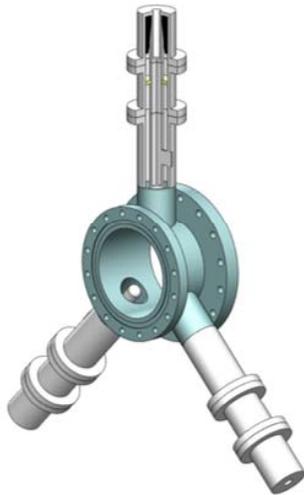
提案～中期の開発～

- EUV試験機および実機に向けては、さらに開発を進める
- “アンテナ型HOM coupler + 吸収体”の形式をブラッシュアップ
- または、吸収体単体でのHOM damperの開発、およびアンテナ型HOM coupler単体での開発を進める（実機に向けて、それぞれの完成度を上げていく）
- 目標は、10~30mA(?)対応で量産できること（それなりの歩留まりと信頼度）

cERL mini-Workshop
 「主空洞HOMダンパー開発 現状と今後」 沢村勝

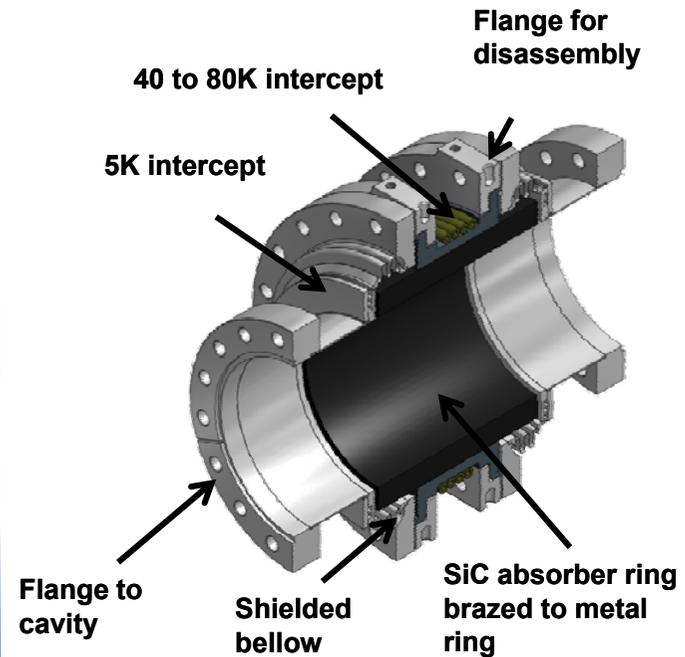


- ケーブルで外に取り出す
- 開発
 - コネクター
 - 周波数帯域
 - 真空中で数10W取り出せるか



- 真空槽内で終端
- 開発
 - 同軸窓
 - ターミネータ

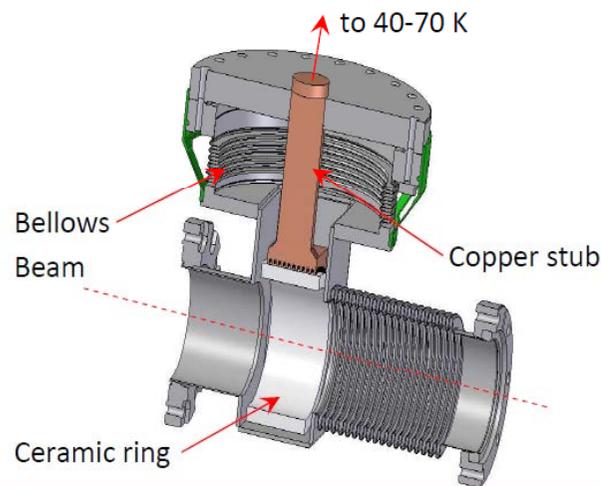
Cornell-type
 吸収体材質: SiC



Absorbing ceramic ring



Chamber housing absorbing ring



XFEL-type(DESYS)
 吸収体材質: AlN

TTC topical meeting on
 CW SRF(2013)
 D. Kostin, DESY

スケジュール案と検討項目

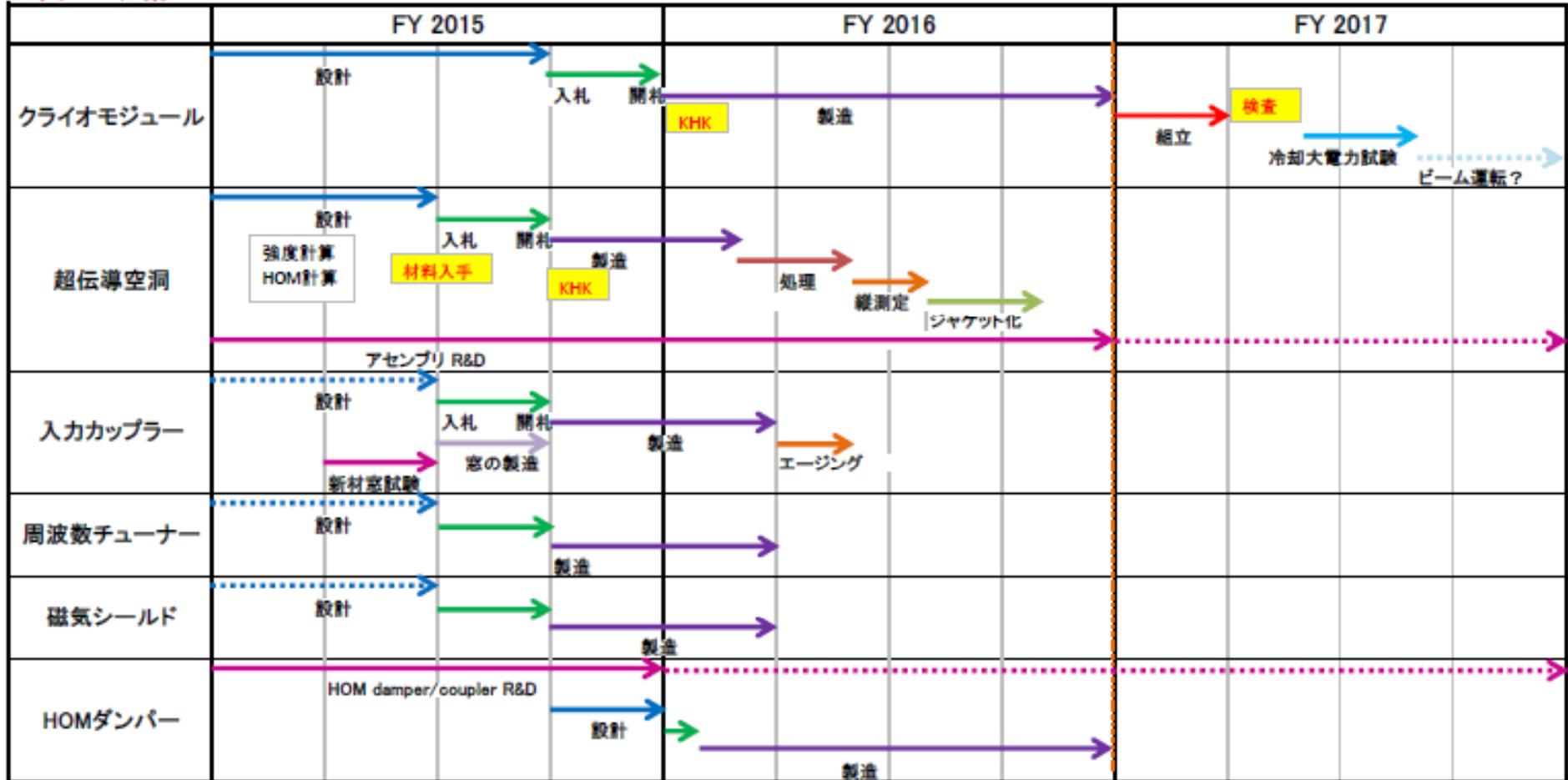
スケジューリング検討のための境界条件

- 2年程度で、4空洞入りモジュールを設計・製作し、冷凍機に接続した後、冷却・大電力試験およびビーム試験(cERL?)を行うのが目標
- 2015年9月頃に、入札が行えるように、空洞およびモジュールの設計・検討を進めておきたい。
 - モジュールの入札は、11月とか12月でも可
 - 空洞およびモジュールは高圧ガス対応

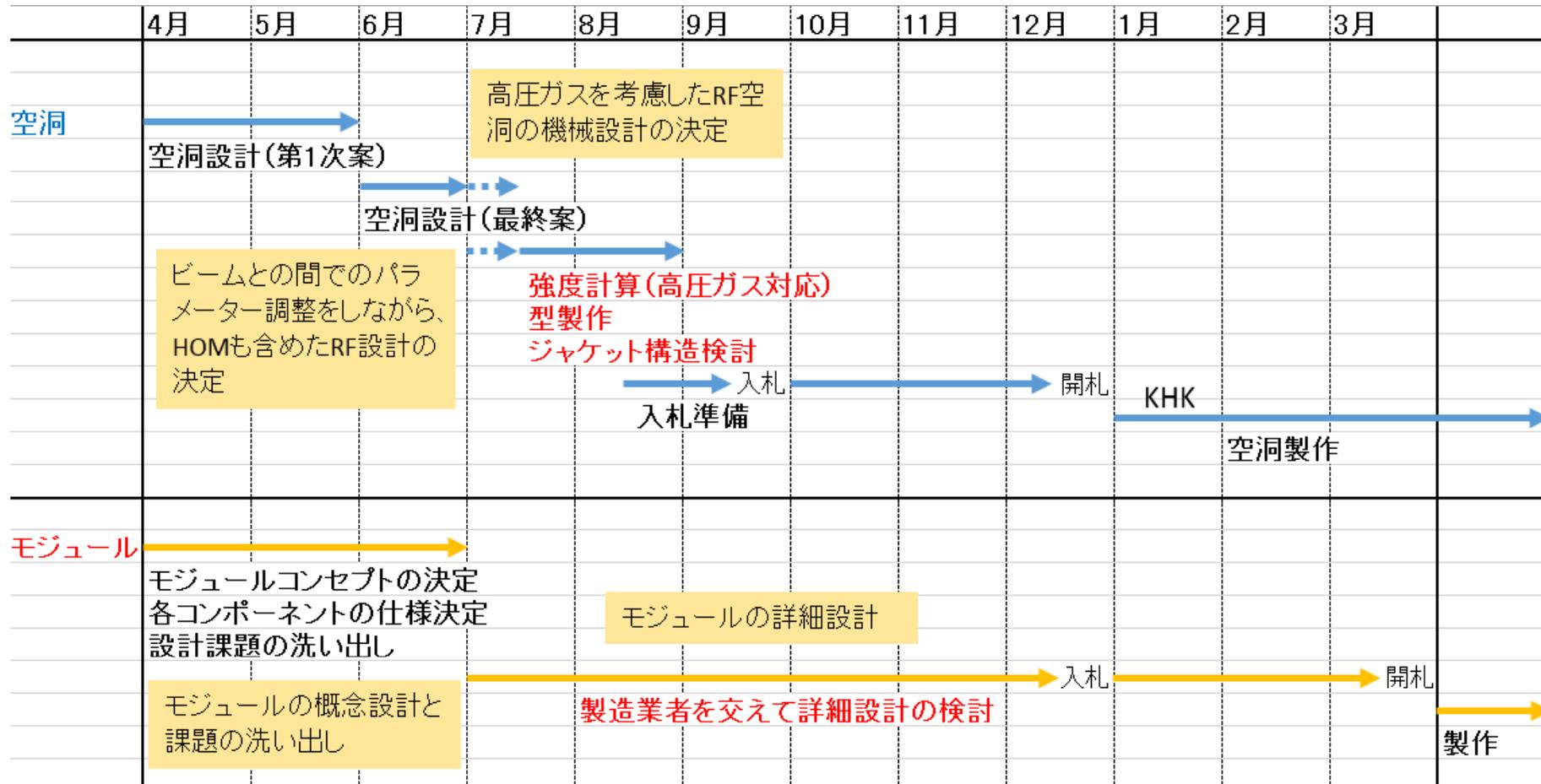
2016年度製造完了、2017年度組立→秋に試験を目指した案

-- HOMの開発・製造に多少時間を取った

スケジュール案 2



空洞・モジュール製作のスケジュール案



検討課題① 設置場所の検討、作業内容の合意

- 2年後にモジュール完成、その後できるだけ早く性能評価を行うために、cERLにインストールすることを想定している。
- 新たな予算がつかず、最低限度で執行するとして、現在の2空洞入りモジュールと入れ替える(冷凍機、コールドボックスの増設は無いものとする)案で検討
- それでも、予算・人手の必要な項目、ならびにERLグループ全体での調整が必要な項目が存在する。例えば...
 - ラティスの改造、ダンプ位置の検討
 - 冷凍機およびコールドボックスの改造
 - 2空洞入りモジュールの処遇(取り外しただけでは廃棄処分扱い)
 - 高圧ガス対応
 - ローレベル系、パワーソースの増強(増える台数分)
 - 作業期間中のビーム運転の休止
 - エネルギー増強による放射線対応
- みなさんが、試験まで含めた方針を理解していただいて、予算・人手も含めて、ご協力いただけるよう、グループ間の調整・議論をお願いいたします。

検討課題② 企業間の協力体制

- T社の目的は、自社で空洞製作・モジュール製作ができるようになること？
- そのためには、設計検討段階から議論に加わるのが望ましい(必須！)
 - 空洞設計はあと2か月程度で完結させる予定
- 例えば、今後他社と詳細設計を詰めるとして、T社の前で、詳細図面を公開しながら議論を進めていくことができるのか？
 - 企業間の壁が無く、自由に議論できないと、進められない。
 - これが認められないうちは、KEKと製造業者の間で議論をして、完成品のみをT社に支給、とならざるを得ない??
 - これでは、T社にとってやる意味ある??
- 企業間の協力体制が整い、スムーズに開発が進められるよう体制作りをお願いいたします。

まとめ

- EUV光源の実現に向けて超伝導空洞の設計をスタートさせている。
- 重要な検討課題としては、空洞、HOM damper、CW型モジュール
- 空洞はTESLA形状をベースにしたHOM減衰型の空洞を想定して、ビームとのすり合わせも行っている。
- HOM damperは、アンテナ型カップラーを基本として、高い周波数帯などをRF吸収体でサポートする事を考えている。
- 今後のスケジュールについて示した。2年での試作モジュール完成を目指して動いている。
- 試作モジュール完成後の冷却試験 & ビーム試験、および企業間の協力体制について、検討をお願いしたい。

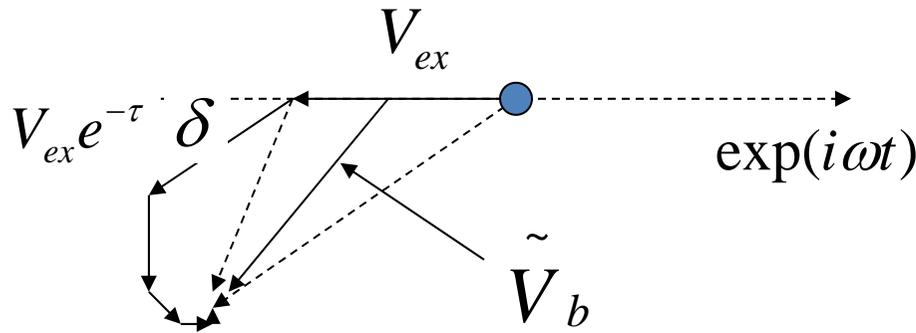
Backup slide

個別のMonopole modeによる発熱

$$P = \frac{1}{2} \omega T_b \left(\frac{R}{Q} \right)_{HOM} I_0^2 \exp(-\omega^2 \sigma_z^2) \times \underline{F(T_b, \tau_{cav})}$$

↑
 ビームによってHOMがexciteした時のpower loss (deposit)

$$\tau = \frac{T_b}{\tau_{cav}}, \tau_{cav} = 2Q_L / \omega, \delta = T_b(\omega_0 - \omega) \quad \text{Re} \left[\frac{\tilde{V}_b}{(-V_{ex})} \right]$$



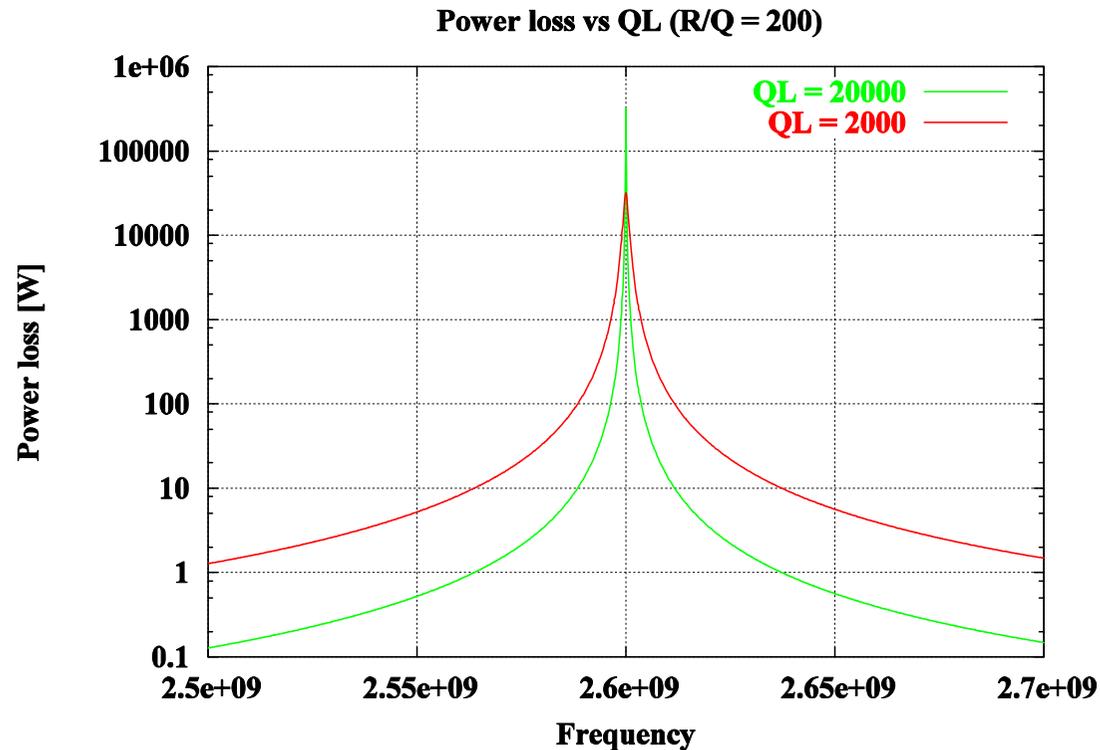
ω_0 : 空洞共振周波数
 ω : HOMの周波数

$$I_0 = q / T_b$$

$$\tilde{V}_b = -V_{ex} \left\{ (1 + e^{-\tau} e^{-i\delta} + (e^{-\tau} e^{-i\delta})^2 + \dots) - \frac{1}{2} \right\}$$

Power loss と frequency, QL の関係

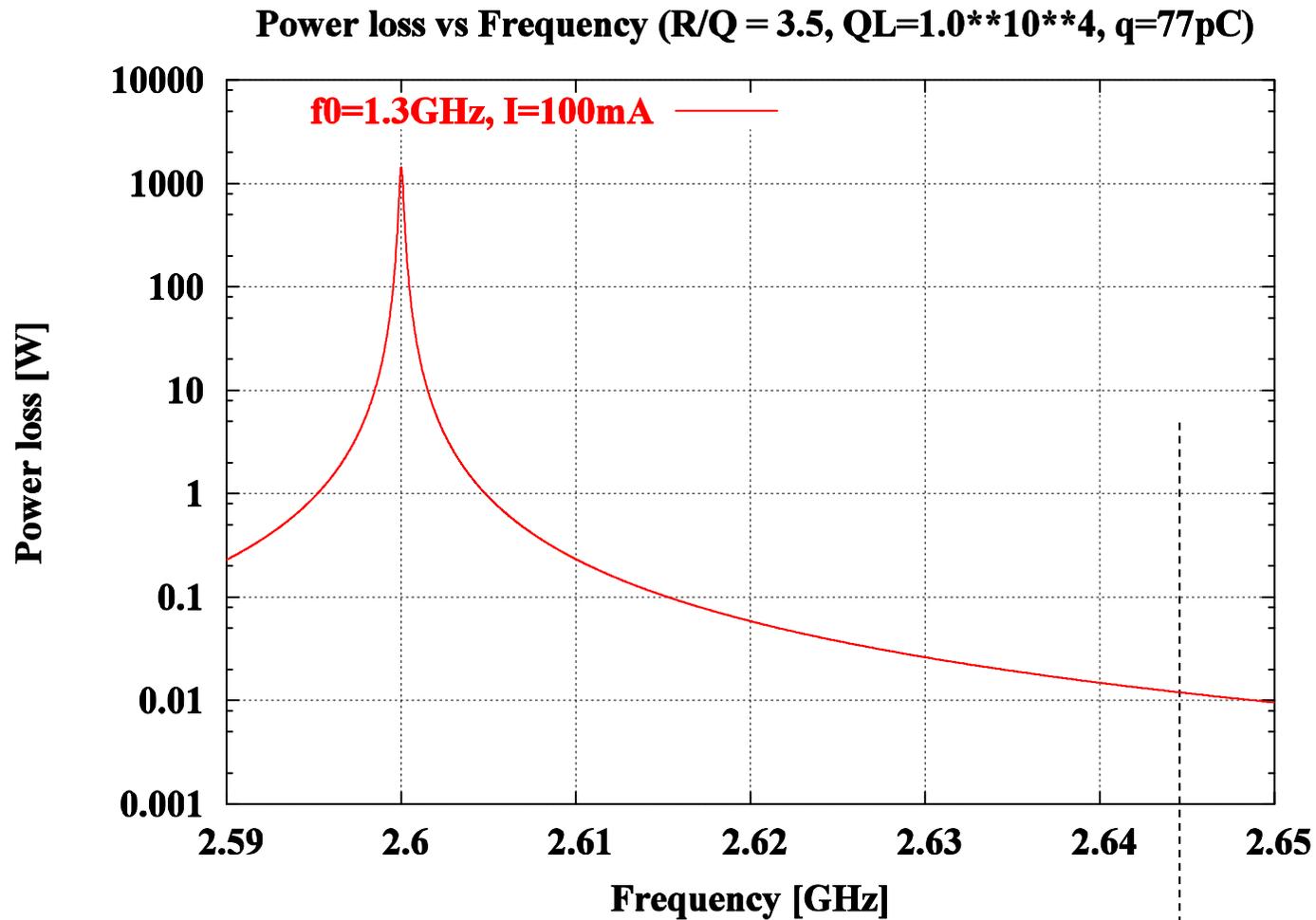
QL = 20000, 2000 の場合。



$R/Q = 200$, $I=200\text{mA}$, $\sigma_z=100\text{fs}$, $T_b=1/1.3\text{GHz} = 770\text{ps}$

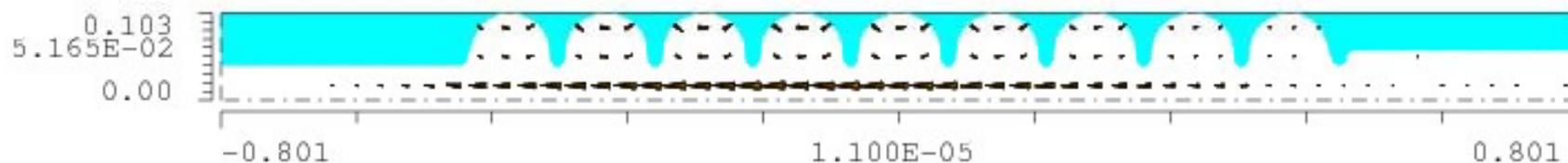
QLが大きくなると共鳴場所ではpeakが大きくなり非常に危険であるが、共鳴幅は小さくなる。

モノポールモードの具体例2.645GHz (TM020 $\pi/9$)



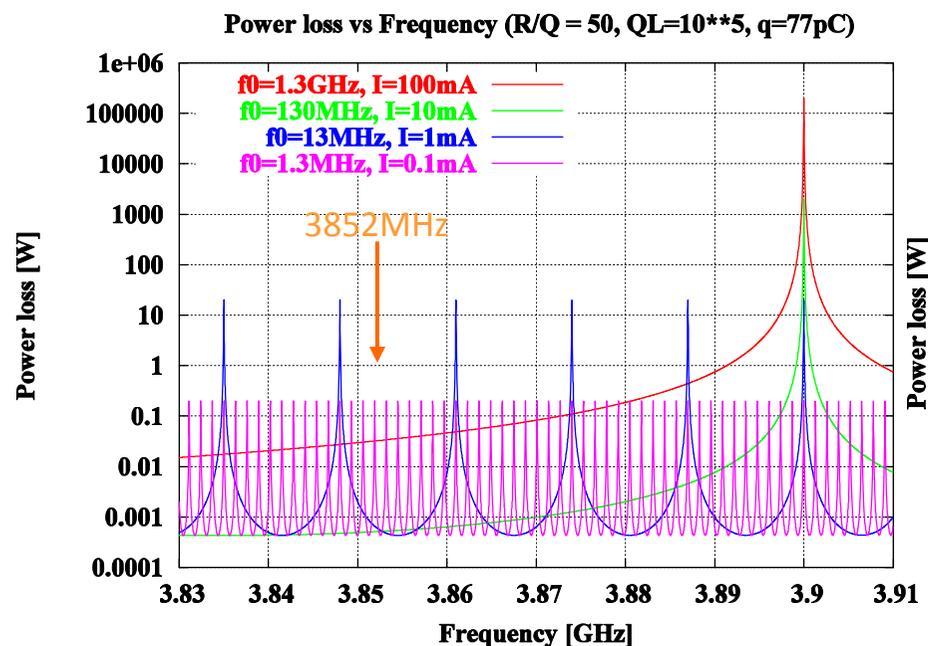
$R/Q = 3.5$,
 $Q_L = 1.0 \times 10^4$,
 $q = 77\text{pC}$ で計算。

$P = 0.011\text{W}$ at
2.645 GHz

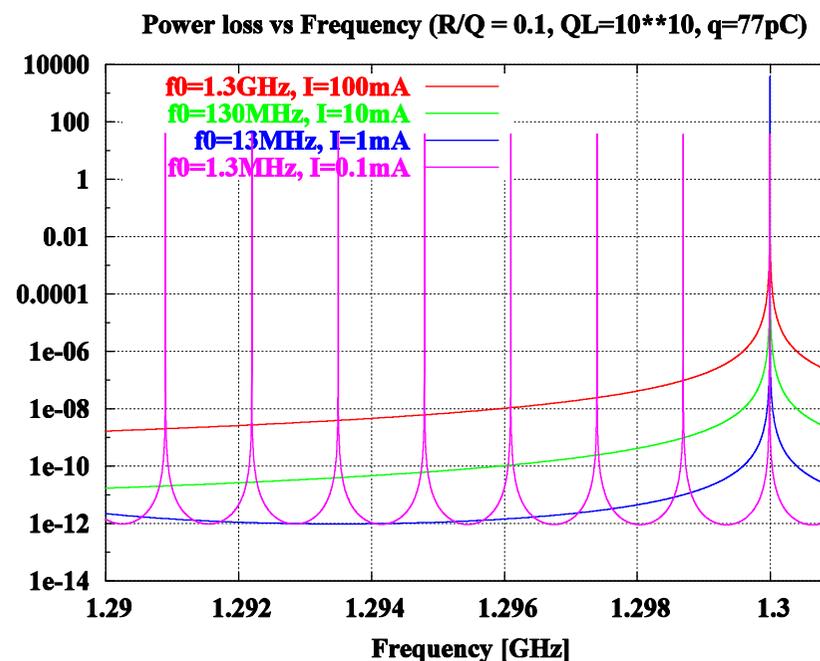


運転周波数とHOM発熱量の関係

TE012(3852MHz)周辺



TM010-passband付近



- ・ 1.3GHz以外の周波数で運転する場合には、HOMの周波数に要注意
- ・ 1MHz運転の場合には、TM010-passbandも問題になる
- ・ 特にバンチチャージを増やす場合にはさらに熱負荷が厳しくなる
- ・ 運転周波数とビーム電流制限値との関係は今後検討していく