

1 はじめに

超伝導を加速空洞に応用しようという研究は1960年代に始まり、1965年にはすでにSLACで鉛メッキ空洞を使つての電子加速の実験に成功している(1)。以降、CWで運転できる高い電圧をより高いエネルギー効率で実現するという超伝導空洞の特徴を活かすべく世界各地で研究開発が行なわれ、その応用範囲も電子加速のためのhigh β 構造から、粒子選別器(RFセパレーター)、あるいは陽子や重イオンなどのためのlow β 構造のリニアックへと広がった。

1980年代に入ると、大型化した電子(陽電子)ストレージリングの加速空洞として超伝導空洞の特性が注目され、精力的な開発が行われた結果、大規模な超伝導空洞システムが実現した。KEKでは、1988年から世界最初の本格的な超伝導空洞システムとして508MHz、5セル構造のNb製加速空洞をトリスタン主リングに投入し現在も32台の空洞が稼働中であるが、超伝導空洞の威力を証明してみせた。CERNではLEPのグレードアップをめざして(LEP II)CuにNbを蒸着して作る352MHz、4セル構造の加速空洞192台の建設を進めている。また1.5GHz、5セル構造338台を用いたCEBAFの電子リサイクロトロンも運転開始が近い。これらは5MV/mの加速電圧を設計値としたものであるが、各国の協力のもとにTeV領域を目標として30MV/m以上の電場を有する超伝導加速管を使つたリニアコライダー計画(TESLA)の準備研究も進められており、high β 構造の超伝導空洞を使つた本格的なシステムが次々と登場してきている。

これらはいずれも多連結構造の空洞を使つた60mA以下の加速器であるが、90年代になって大電流ビームへの応用が考えられるようになった。コーネル大学は、CESRのグレードアップとBファクトリーへの転用のために500mA x 2の貯蔵をめざして大電流超伝導空洞の開発を開始しており、試作機によるビームテストが今秋予定されている。KEKでも92年からBファクトリー用空洞の開発研究が始まった。さらにCERNのLHCでも超伝導空洞の利用が検討されている。

超伝導高周波空洞はもちろん超伝導体の高周波表面抵抗が極めて小さいことを利用するのであるが、それだけに常伝導空洞では無視し得た些細な表面欠陥が性能に著しく影響する。そのため材料から表面処理、組立て工程に至るまでの徹底した管理が要求される。これが超伝導空洞を難しくしていると同時に開発研究の対象でもある。

本稿ではこれらの基礎技術には触れないのでこれについては、これまでに行われたOHOシリーズの87年と92年に扱われた超伝導空洞編を参照されたい。超伝導空洞の基礎や種々の方面への応用例は87年の野口氏が、また92年にはトリスタン主リング用空洞を中心としたテーマで光延氏が講義を行っている。

2 超伝導加速空洞の特徴

大電流の蓄積では、ビーム不安定性の要因となる高調波モード(HOM)のインピーダンスを極力小さくする必要がある。このインピーダンスの主なる発生源は加速空洞であり、空洞のHOMインピーダンスを下げ、空洞台数を減らすことが本質的である。超伝導空洞の特徴は高い電圧でCW運転ができることであり、空洞の数が減らせるという点で大きな効果が期待できる。

空洞の重要なパラメーターにシャントインピーダンスがあり

$$R_{sh} = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (1)$$

と定義される。ここで V_c は空洞内をバンチが通り抜ける間に得ることのできる最大電圧であり、単なる空洞内の電場分布の軸方向の積分ではなく、いわゆるtransit time factorが含まれていることに注意すること。 P_c は空洞自体の損失電力であり、主因は壁でのジュール損失である。 R_{sh} は空洞の形状と材質が与えられると決まる量であり、 P_c は V_c の2乗に比例して大きくなる。そのため V_c を高くすると加速に使える電力効率が下がるだけでなく、熱歪による周波数の

変動や冷却能力の制限などの問題が発生する。常伝導空洞をCW運転するときの電場1~1.5 MV/mはこの制限による。このためRshは大きくする必要はある。

RshはR/Qと形状因子G、空洞材質の高周波表面抵抗Rsurとで

$$\begin{aligned} Rsh &= (R/Q) Q_0 \\ &= (R/Q) \frac{G}{Rsur} \quad (2) \end{aligned}$$

と表され、空洞形状のみで決まる(R/Q)Gと材質によるRsurとに分けられる。常伝導空洞のRsurは材質(主にCu)の抵抗で決まってしまうため、Rshを大きくするには形状に工夫が要するが、その結果HOMのインピーダンスも高くなってしまふ。そこでHOMを吸収してそのQ値を下げるためのHOMカプラーをいく種類も複雑に組み合わせる必要がある。

超伝導空洞の全ての特徴は空洞材質に超伝導体を使用することで表面の高周波抵抗を極端に小さくできることに起因する。周波数と運転温度、超伝導体の種類にもよるが、Nb空洞を500MHz、4.2Kで運転すると数十nΩでありCu空洞に比べて~1/10⁵となるため、Rshはその逆数で大きくなる。このように超伝導空洞ではRshを形状で持ち上げる必要がなく、事実超伝導空洞の形状決定には加工のし易さや表面処理のやりやすさ、あるいは高電界下での放電の抑制などが優先されている。そのため一般的には超伝導空洞のR/Qは常伝導のそれに比べて1/2程度になっているものの、加速電場としては実用機レベルでもCu空洞の3~5倍が得られている。

形状の選択に余裕があることのもう一つの利点はビームダクトを大きくできることである。ビームダクト径を大きくするとR/Qは下がるが、一方でそのカットオフ周波数が低くなるためHOMをビームダクト側へ取り出すことが可能になる。取り出されたHOMはダクトに取り付けられた吸収体で減衰させればよい。その結果超伝導空洞では空洞本体とその両端にHOM

吸収体を配置するという単純な構成をとることができる。

Vcを高くR/Qを低くとると、大電流を蓄積する際に必要な空洞周波数のdetune量を小さくすることができる。RF源の電力を最小にするためにはビーム電流に応じて空洞の周波数をdetuneしなければならないがその量は、

$$\frac{\Delta f a}{f a} = \frac{I_0}{2 V c} (R/Q) \sin \phi_s \quad (3)$$

と与えられる。ここでI₀はビーム電流、φ_sはシンクロナス位相である。すなわちビーム電流が増加するにつれて空洞の共振周波数を徐々に下げなければならない。大きい周長を有するリングではrevolution frequency f₀が小さくなるが、このdetuneがf₀の整数倍を越えるときに加速モードによるマルチバンチ不安定性を起こすことになる。超伝導空洞が低いR/Qと、高いVcを有することはこの点でも有利である。

また、電子リングではイオントラッピングによるビーム損失を避けるためにバンチギャップをつくることが考えられているが、それによってVcの位相が振動する。バンチギャップの長さを時間で表してTgとするとその振動位相角Δφは

$$\begin{aligned} &\frac{\sin \Delta \phi}{\sin (\phi_s - \Delta \phi)} \\ &= \frac{\pi f a}{V c} (R/Q) I_0 T g \quad (4) \end{aligned}$$

となる。従って、高いVcと低いR/Qはバンチギャップによる振動に対しても有効である。

一方、高いVcを発生するとその分だけビームへ与える電力も大きくなる。このため入力結合器の許容電力が電流を制限する要因の一つになる。また、クライオスタットやヘリウム冷凍機、トランスファーラインなどの周辺装置が必要であり、それらの建設費用を考慮しなければならない。

3 開発の現状

3-1 空洞

3-1-1 空洞形状

基本的には1983年にT.Weilandが提案した構造(2)の超伝導化であり、ビームダクト径を大きくしてHOMをビーム軸側へ取り出すのであるが、 R/Q が低いため常伝導空洞には向かない形状であった。

入力結合器への電力の軽減と大きな結合度、さらにHOMのモード数を減らすために空洞は単セル構造となる。その結果空間占有率は犠牲になる。

超伝導空洞の形状は球形の空洞とビームパイプとをなめらかにつないだ形にするのが普通である。マルチパクタリング放電対策と加工や表面処理のしやすさなどが理由である。形状のパラメーターとしては R/Q 以外に表面電場や表面磁場を小さくすることが必要である。

決めるべきパラメーターは空洞直径、アイリス径、ギャップ長、テーパ角、球形空洞の円弧半径であり、それらを変えて加速モードの R/Q をあまり落とさずに、HOMの周波数が高くなる形状をSUPERFISHやURMELを用いて探す。

このような操作でも取り出せない加速モードのすぐ上のTE₁₁₁とTM₁₁₀への対策として、コーネル大学では影山が考案した”flutedビーム

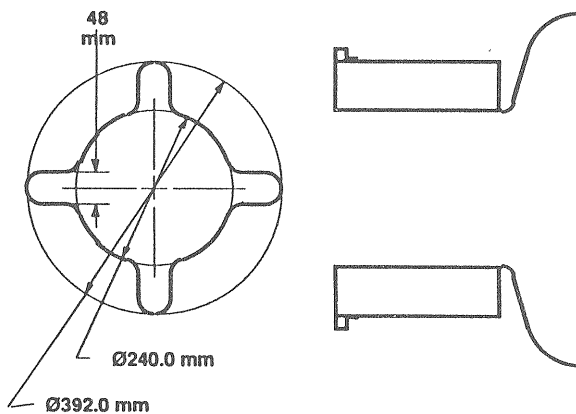


図1 fluted beam pipe形状(4)

パイプ”(3)を採用している。これは円筒型ビームパイプにカットオフ周波数が低い矩形導波管を組み合わせた構造であり、図1のような形状である。KEKでは製作の容易さから、口径の大きな円筒型ビームダクト(LBP)を取り付けることを考えている。反対側(SBP)は入力結合器のために残してある。

ビームパイプへ流れ出たHOMがパイプに取り付けられた吸収体で完全に吸収されたとすると、そのモードのQ値は空洞とダクトとの結合度 Q_{ext} に一致する。この結合度を評価するには同調カーブ法が用いられる。

このようにして求められた空洞形状の主な空洞パラメーターを表1にまとめておく。

表1 KEK-B空洞の形状パラメーター

周波数	508.6	MHz
空洞ギャップ長	243	mm
アイリス直径	220	mm
LBP口径	300	mm
R/Q	93	Ω
E_{sp}/V_c	7.6	V/m/V
H_{sp}/V_c	167	Gauss/MV
形状因子(G)	251	Ω

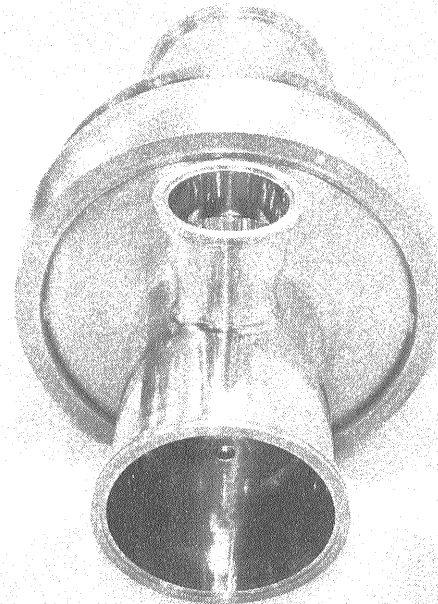


図2 KEK-B用超伝導空洞

3-1-2 空洞性能

図2はKEKの試作空洞である。材質にはトリスタン超伝導空洞で実績のあるNbを採用している。2.5mmの板材からスピニング成形された半割りセルを電子ビーム溶接で一体化して作られた。溶接後の空洞に与えられた最初の表面処理工程を表2にまとめる。図3は縦型クライオスタットでの低温試験のセットアップであり、空洞外面にはカーボン抵抗25個とPINダイオード19個が配列されたセンサーが取り付けられており、測定中にこのセンサーを外面に沿って回転させて発熱分布やX線分布を計測する。

表2 表面処理工程

電解研磨	90 μm
真空脱ガス	700°C x 90分
電解研磨	15 μm
洗浄	1次純水 40分
	2次純水 30分
	H ₂ O ₂ リンス 60分
	3次純水 120分
	4次超純水 30分

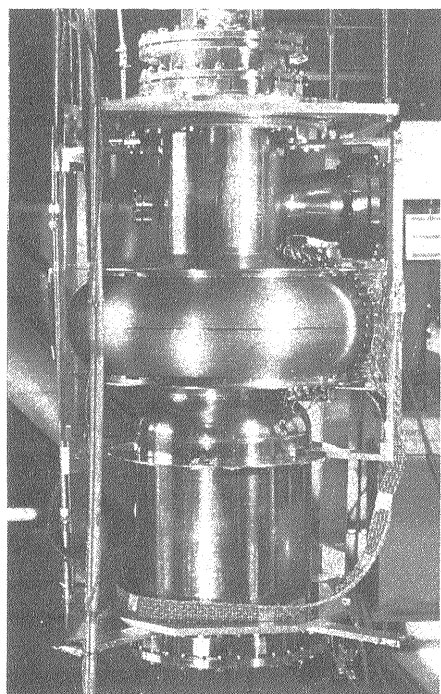


図3 縦測定の設定アップ

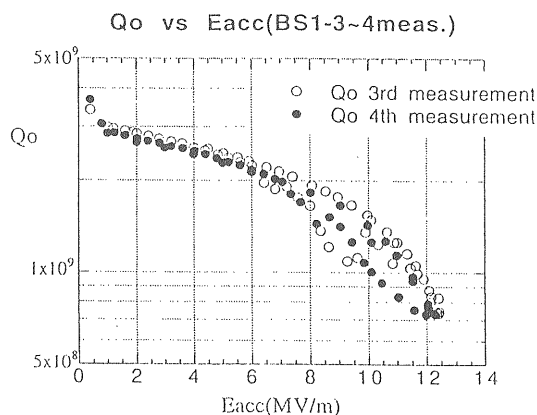


図4 4.2KでのQ-E特性

図4は4.2Kでの Q_0 値の測定結果を横軸を加速電場としてプロットしたものである。空洞電圧 (V_c) は加速電場にギャップ長0.24mを掛けることによって得られる。最大電場12.4MV/mは空洞電圧では3MVに相当する。このときの Q_0 は 8×10^8 であった。7MV/m以上ではある程度のエージングが必要であるが、一旦エージングされるとその効果は昇温や空洞をN₂ガスにさらしても保持されるものの、空気にさらすと Q_0 や最大電場の劣化が見られる。X線の分布をみるとこの付近から急激にX線が増加しているのも、この劣化が放出電子によるものであることが判る(図5)。現在はこの電子放出源の実態の解明と、清浄な保護酸化膜を作るためのオゾン水を使った表面洗浄法の研究をしている。

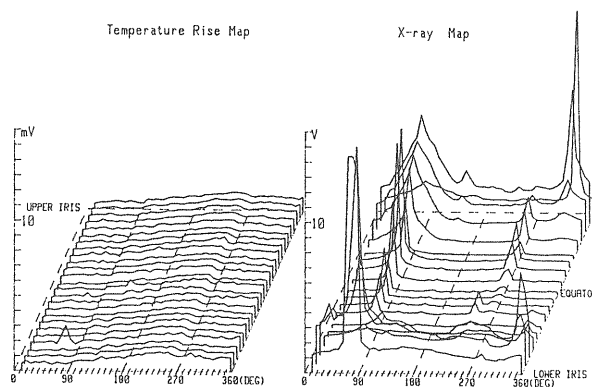


図5 12.2MV/mでの温度(左)とX線(右)の分布

3-2 HOM吸収体

3-2-1 吸収体形状

ビームパイプへ流れ出たHOMを吸収するための吸収体には特にHOMの周波数域である1GHz付近での優れた吸収特性が必要である。また発熱に伴う吸収特性の変化や熱伝導度、放出ガス量なども重要な要素である。コーネル大学ではFerrite50やTT2-111Vを(5,6)、またKEKでは入手が容易な市販品という利点からTDK社IB-004というフェライトを使って研究を進めている。図6に測定されたIB-004の $\epsilon \mu$ 特性を示す。

図7に吸収体の空洞からの位置を変えたときのTM011モードのQ値を示した。このように吸収体の位置や形状、厚さなどがQ値に大きく影響する。吸収体を含んだ系の計算コードとしては摂動的な取扱いができるものだけであり、モデル空洞による実測が必要である。TM0mnについてはSEAFISHが使える。図8はこのようにして

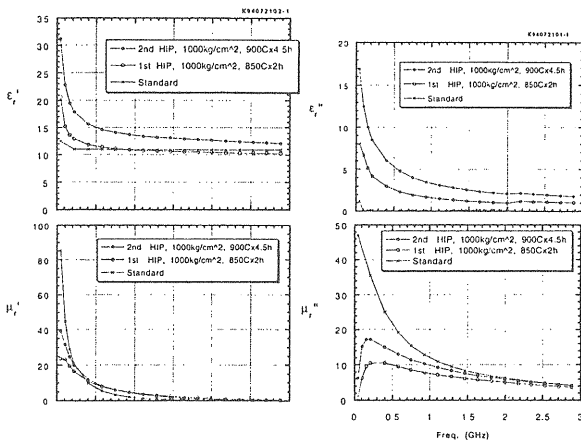


図6 IB-004の $\epsilon \mu$ 特性

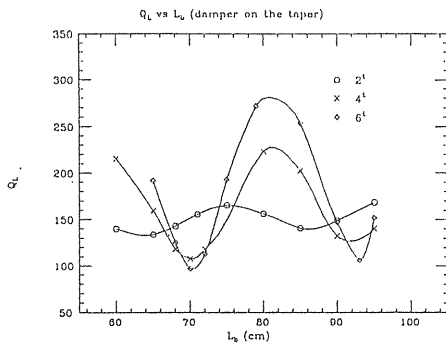


図7 吸収体の位置とQ値の関係

得られた吸収体の最適位置であり、図9にみられるように各モードはQ値が ~ 100 に減衰されている。図8にはテーパ部に吸収体を取り付けた場合の形状も示されている。テーパ部に取り付けた場合はQ値を損なわずに全長が短くできる利点があるが、製法あるいは短バンチに対する高調波インピーダンスへの影響などの検討が要る。

さて吸収体への入熱を考える。電荷 q を持った短いバンチが空洞を通過するときそのバンチはある共振モード n に関してはそのロスパラメーターを k_n として

$$W_n = k_n q^2 \quad (5)$$

のエネルギーと

$$Vb_0 = 2 k_n q \quad (6)$$

の電圧を残す。ここで k_n は

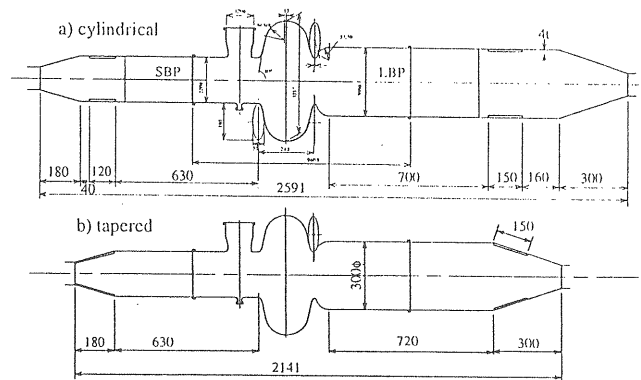


図8 吸収体位置の最適化

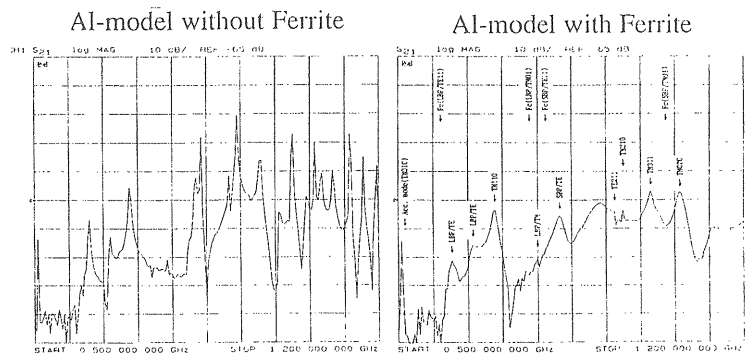


図9 吸収体を付けたときの共振モード

$$k_n = \frac{\omega_n}{4} (R/Q)_n \quad (7)$$

である。そのモードのQ値が十分に小さいとき ($Q \ll \omega_n T_b / 2$ 、 T_b はバンチ間隔)、バンチが残したエネルギーは次のバンチが到達する前に減衰してしまうため、吸収体への電力としては単位時間に飛び込むバンチの数 (I_0/q) 倍となる。

$$P_n = k_n q I_0 = k_n I_0^2 T_b \quad (8)$$

しかしQ値が大きくなると、前のバンチが残した電磁場が消えないうちに次のバンチが飛び込むため、空洞内に残る電磁場はこれらの重ね合わせとなる。Q~100でのエネルギーの減衰時間 ($Q = \omega_n \tau$) は1GHz帯では~20ns秒となり、その間に入ったバンチの電圧は全て重ね合わされる。そのためこれらのバンチが作る電磁場とHOM周波数の位相との関係が重要になる。全てが足される場合もあれば、キャンセルして空洞には何も残らない場合もある。

このような重ね合わせを考えた場合に空洞に残る電圧Vbは $T_f = 2Q/\omega_n$ (フィリングタイム) として

$$\tau = \frac{T_b}{T_f}, \quad \delta = T_b (\omega_n - \omega)$$

を使って

$$\hat{V}_b = V_{b0} (1 + \exp(-\tau + j\delta) + \exp(-2\tau + j2\delta) + \dots) \quad (9)$$

$$= \frac{V_{b0}}{1 - \exp(-\tau + j\delta)} \quad (10)$$

となる。これから吸収体への入熱は

$$P_n = \frac{|\hat{V}_b - V_{b0}/2|^2}{(R/Q)Q} \quad (11)$$

で求められる。なおこの(9)式からバンチギ

ャップに対する位相の振幅を概算できる。バンチギャップによる効果を逆符号のチャージが同位相で飛び込むと考え、(9)式をギャップのバンチ数分だけ足し合わせるとギャップが作る電圧Vgapが逆位相で求まる。このベクトル和がVcの振動である。

表3は前述の吸収体を配置したときの低次モードの周波数、R/Q、QおよびLERにおける吸収体への電力を示す。HERでは電力はこのほぼ1/5になる。

表3 K E K - B 空洞の高調波モード

モード	周波数 [MHz]	R/Q [Ω]	Q	吸収電力 [Watts]
(mono-pole mode)				
LBP/TM	783.4	0.12	120	-
LBP/TM	835.5	0.34	99	-
TM011	1011.1	6.6	101	1826
TM020	1023.4	6.4	95	1755
(di-pole mode) R/Q' [Ω]				
LBP/TE	609.8	0.15	96	
LBP/TE	648.2	2.9	120	
LBP/TE	687.5	11.8	155	
TM110	704.9	15.4	95	
SBP/TE	827.5	0.36	60	
SBP/TE	888.3	0.20	97	

$$* R/Q' = (R/Q)_{r_0} / (k*r_0)^2 \quad (r_0=5cm)$$

3-2-2 製作

現在15kWの入力に耐えることを目標に開発中であるが、円筒ビームパイプへのフェライトの接着が吸収体を製作する上での重要なポイントであり、接着力はもちろんのこと、良好な熱接触や高真空にさらされるため脱ガスが少ないことなどの条件に合うことが必要である。また壁との間に隙間があるとそこで放電してフェライトが脱落したり破損したりする原因になる。

接着には超音波ハンダ、銀ロー付けなどの試

験をしたが、大きなフェライト板は熱歪みにより破損したりはがれたりするなどの理由で、接着するフェライトの大きさに制限がある。そこでKEKでは円筒フェライトの焼結と接着を兼ねた工程としてHIP (Hot Isostatic Pressing)の試験をしている。フェライトの粉末とCuパイプを1つの容器に詰めて真空排気した上、容器ごと高温高圧をかけて焼結と接合を同時に行ない、その後機械仕上げをする。図10は実機サイズの試作品であり、220φのCuパイプ内面に4mmのフェライトが焼結されている。HIP工程によって作られたフェライトの特性と通常の工程によるものとの差はほとんどないようである(図6)。2.45GHzの縮小モデルでの試験がすでに行われており、2.5kWの吸収(10W/cm²)でも割れや脱落は生じていない。室温でのガス放出量は10⁻¹¹Torr·l·sec⁻¹cm⁻²であるが、温度が上がると桁上がりするため、冷却や真空排気系などの検討が必要となろう。

現在はようやく実機モデルが完成したところであり、製作方法が確立されつつある段階である。電力試験や放出ガス測定あるいは空洞やテーパー部も含めた高調波ロスパラメーターに対する検討など、今後の研究課題は多い。

3-3 入力結合器

入力結合器の重要な因子は扱える電力と結合係数βである。入力電力を最小にするとき(反射がゼロ)ビームに与える電力をP_bとするとβは、空洞壁での損失(P_c)と無負荷Q(Q₀)とを使って

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{in}} = \frac{P_c + P_b}{P_c} \quad (12)$$

と表せる。超伝導空洞ではP_cが極めて小さいためβが非常に大きくなる(～10⁴)。そのため負荷Q(Q_L)は

$$Q_L = \frac{Q_0}{(1 + \beta)} \sim Q_{in} \quad (13)$$

となり、超伝導空洞の場合は、Q_Lは入力結合器のQ_{in}で決まる。P_cを50W、P_bを500kWとするとQ₀が1×10⁹のときには1×10⁵のQ_{in}が必要である。

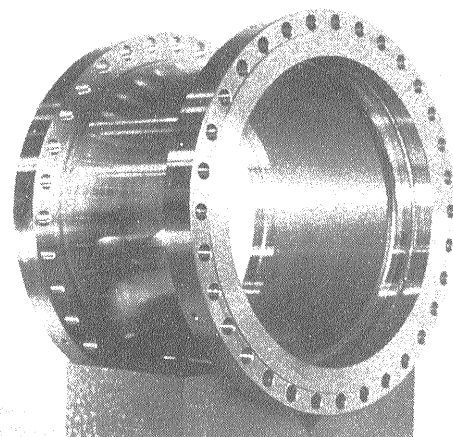


図10 220φ吸収体実機モデル

Bファクトリーでは数百kWの高周波電力を扱わなければならない。これまでの超伝導空洞に使われているのは数十kWまでであり、大電力結合器を開発する必要がある。

超伝導空洞の入力結合器は室温と極低温とをつなぐものであるため、入力結合器の発熱だけでなく常温部からの熱侵入を小さくするための構造が要求される。これまでに使われている形状にはCERN、DESY、KEKなどの同軸アンテナ型とCEBAF、コーネル大学のような導波管型とがあり、前者は扱う電力に応じてサイズが選べる、内導体の長さを変えればQ_{in}が変えられる、内導体の冷却が必要などの特徴がある。後者には内導体はないが、低い周波数領域ではサイズが大きくなるため扱いにくいと同時に熱侵入が大きくなる。

現在はトリスタンの超伝導空洞で使われている同軸型の大電力試験を進めているが、この入力結合器は1MWのクライストロン出力窓としても使われている152φの同軸窓を使った120φの同軸アンテナ型であり、200kWの実績がある。Cu製の内導体は水冷される。

400kWの目標に対して、ダミーロードの制限からduty factorを下げての試験ではあるが、450kWが確認された。Q_{in}は5×10⁴以上が得られる。

コーネル大学では図11のような500kW導波管型を開発中である。空洞とはビームパイプにつけたスロットで結合させる。ヘリウムに浸される部分は超伝導体(Nb)で作られ、導波管部での発熱を防いでいる。窓には図12に示すようなBeOをコーティングしたセラミックを使用する。250kWの電力透過試験および125kWの全反射試験は終えている(7)。結合度としては 2×10^5 のQinが確認された。小さなスロット部の発熱とそこが原因で生ずる超伝導破壊が懸念されるが、高調波ロスパラメータの点では有利かも知れない。

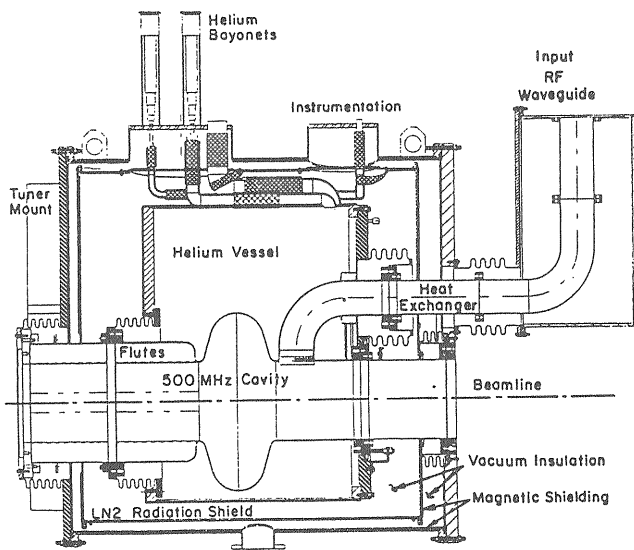


図11 コーネル大学のクライオスタット(7)

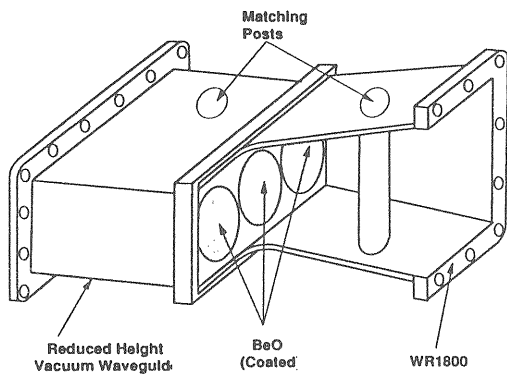


図12 導波管型のセラミック窓(4)

3-4 クライオスタット

クライオスタットには断熱性能などの一般的

な事項以外に、超伝導空洞では20m Gauss程度の磁気シールドや空洞の組立易さなどが重要な要素になっている。残留磁気はQ値の劣化を招き、また表面のゴミなどは放電の原因となるために、クリーンルームなどの清浄な環境での速やかな組み立てが望まれるためである。

空洞のビームパイプが大きくなるとクライオスタットの構造へ様々な影響を与える。1つは熱侵入の増加である。KEKではトリストンで現在使用中の6.5kW冷凍機が使えるため冷凍機の容量としては十分である。一方、クライオスタット1基への供給は150W程度が実績であり、これが目安となる。しかし緊急時や昇温、冷却工程などの運用面を考えると侵入熱は極力小さくしておくべきである。2つめは磁気シールドの効果である。開口部が大きくなって空洞部への磁場の侵入が大きくなるため、シールドの構造は難しくなる。さらにビームパイプが大きくなると、真空排気したときなどに空洞へ掛かる力が大きくなる。従って空洞がクライオスタットに装着され運転にいたるまでの工程全てにわたって空洞に掛かる力を分析し、空洞が受ける力による周波数のずれや空洞の機械強度との整合性などを詳細に検討する必要がある。

図11はコーネル大学のクライオスタットであり、導波管型の入力結合器を採用しているためその部分の熱侵入が大きくなるポイントになるため詳細な検討がなされている(8)。またセラミック窓との整合器が必要なため全体として大が

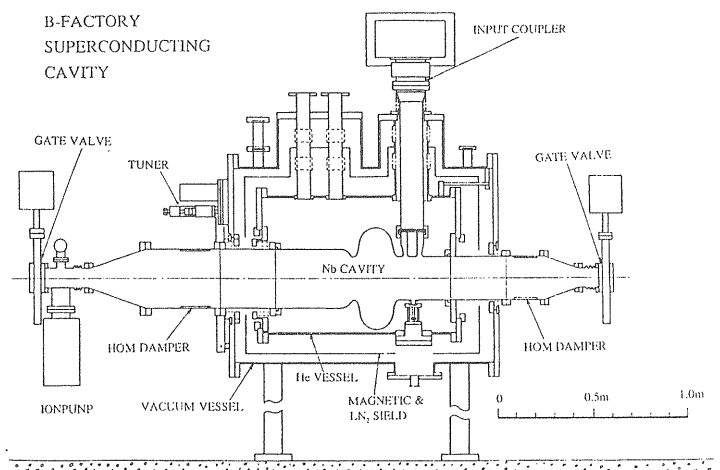


図13 A.R.試験用クライオスタット

りになっている。図13はKEKのARビーム試験に向けたクライオスタットであり、現在設計が進行中である。入力結合器の外導体は熱侵入を防ぐ目的でステンレスパイプの内面にCuをメッキして使う。500kW投入時に50W程度の外導体発熱が見込まれるがこれを蒸発ヘリウムガスで冷却する予定でいる。この冷却が現在の入力結合器の入力制限の要因の1つになると思われ、外導体の径を大きくするなどの対応を考える必要がある。

4 Bファクトリーへの適用

前節でみた現在開発中の超伝導空洞をトリスタンIIのパラメーターに適用してみる。空洞としては、 R/Q を 93Ω 、 V_c を $2\sim 2.5\text{MV}$ ／空洞、印加電力の最大を 400kW とする。リングのパラメーターとしては表1を使う。

表4 トリスタンIIのパラメーター

	LER	HER
beam energy	3.5 GeV	8 GeV
RF voltage V_c/tot	8 MV	18 MV
beam power P_b/tot	2.5 MW	4.8 MW
	5.0 MW*	
beam current I_0	2.6 A	1.1 A
acc. voltage V_a/tot	0.96MV	4.4 MV

* 5MWはwigglerがある場合

4-1 HER

超伝導空洞が最も効率良く運転できるのは、 400kW の投入電力が全てビームに与えられるときであり、空洞電圧 V_c を 2MV ／空洞、無負荷 Q (Q_0) が 1×10^9 とすると、(2) (12)式から

$$P_c = 43\text{W}$$

$$Q_{in} = 1 \times 10^5$$

となる。しかし必要空洞台数が入力結合器の許

容電力で制限されるため、 4.8MW のビーム電力時には12台の空洞で 24MV を作り出すのが最適となる。ここで電圧を下げた運転をするとうなるか？

空洞内に作られる空洞電圧 V_c はRF源が作る電圧とビームが励起する電圧との位相を含めた重ね合わせであり、さらに V_c の位相はビームの入射位相に対して ϕ_s だけずれている。RF源が作る電圧は、空洞の共振周波数 f_a とRF源の周波数 f_g が一致しているときに最大となり、それを V_{gr} とすれば入力電力(P_g)との関係は

$$P_g = \frac{1 + \beta}{4\beta} \frac{V_{gr}^2}{R}$$

$$= \frac{1}{4} \frac{V_{gr}^2}{R} \quad (\beta \gg 1) \quad (14)$$

ここで R は

$$R = (R/Q) Q_L$$

である。一方、ビームの入射周期と f_a とが一致しているときのビームが励起する電圧 V_{br} は

$$V_{br} = I_0 R \quad (15)$$

である。ここで共振周波数を Δf_a だけずらすと

$$\tan \psi = -2QL \frac{\Delta f_a}{f_a} \quad (16)$$

で表せる量(ψ : tuning angle)だけ位相がずれると同時にその絶対値もそれぞれ $\cos \psi$ だけ小さくなる。

$$V_g = V_{gr} \cos \psi, \quad V_b = V_{br} \cos \psi \quad (17)$$

このときの空洞内の電圧 V_c は V_g 、 V_b の重ね合わせであり、

$$V_c = \frac{V_g \cos \phi_s + V_b \cos \psi}{\cos(\theta + \psi)} \quad (18)$$

と書ける。ここで θ はビームの入射位相を基準としたときのRF源の位相である。なおここで $\theta + \psi > 0$ がRobinsonの安定条件といわれるものでコヒーレントなバンチの振動に対しその復原力を与える条件である。これは

$$V_c \sin \phi_s + V_b \sin \psi > 0 \quad (19)$$

とも書ける。以上から必要な空洞電圧 V_c を得るために必要なdetune量、 Q_L (超伝導空洞の場合には入力結合器の結合度 Q_{in} のこと)、必要な高周波入力 P_g が求められる。

一方、加速モードにかかわるマルチバンチ不安定性は1番目のモードであり、そのgrowth rate (τ) は

$$\tau^{-1} = \frac{\alpha f_0 I_0}{2 (E/e) v_s} h (R^+ - R^-) \quad (20)$$

で与えられる。 α : momentum compaction因子、 f_0 : revolution frequency、 E : ビームエネルギー、 v_s : シンクロトロンチューン、 h : ハーモニク数である。ここで R^+ 、 R^- は

$$R^+ = \frac{1}{2} \frac{R N_{cav}}{1 + 4 Q_L \delta^2}$$

$$R^- = \frac{1}{2} \frac{R N_{cav}}{1 + 4 Q_L \delta^{-2}}$$

$$\delta_{\pm} = \frac{1}{h} \left(1 - v_s \mp \frac{\Delta f a}{f_0} \right) \quad (N_{cav} : \text{空洞台数}) \quad (21)$$

である。ここへ先に求めた Q_L 、 $\Delta f a$ を持ち込むとgrowth rateが計算できる。

さて、 V_c/tot を18MVとした場合に空洞数をパラメータにして、1台当たりに必要な V_c 、入力電力 P_g 、growth rate、を見ると図14-16のようになる。2MVで運転しようとする9台の空洞で足り、そのときのgrowth rateは100m秒が期待できるものの入力結合器への負担は600kWとなることが判る。入力を400kWとするには、結合度 Q_{in} を5x

10^4 として12台を1.5MVで運転するとその時のgrowth rateは40m秒となる。

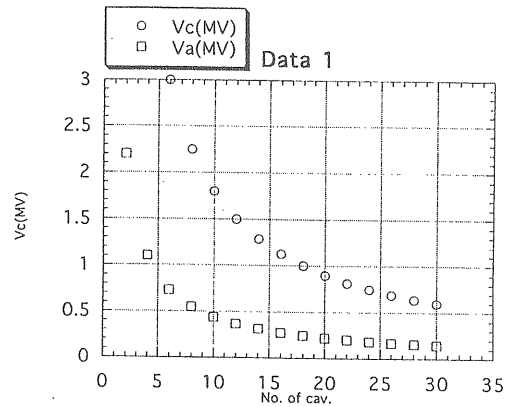


図14 HER=18MVとしたときの空洞数vs V_c

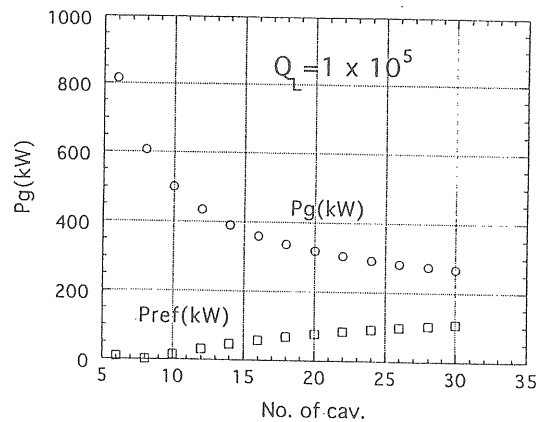


図15 HER=18MVとしたときの空洞数vs入力電力

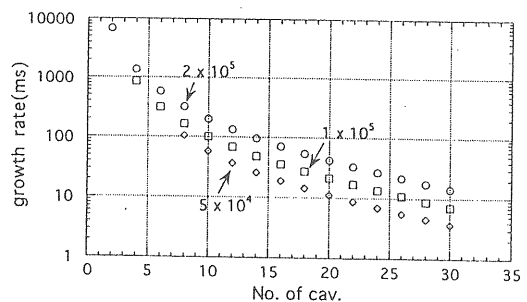


図16 HER=18MVとしたときの空洞数 vs growth rate

このように必要な空洞台数が12~16台であることが判るが、これを並べたときの運転可能なビーム電流と空洞電圧を入力結合器への電力をパラメータにしてプロットすると図17になる。ビーム電流一定で空洞電圧を上げると

投入電力がかえって減るのが判る。これは V_c を高くした結果detune量 ψ が減り、そのために投入電力も減少するためである(17式)。これから超伝導空洞は空洞電圧が高い方に余裕があるシステムになることが判る。

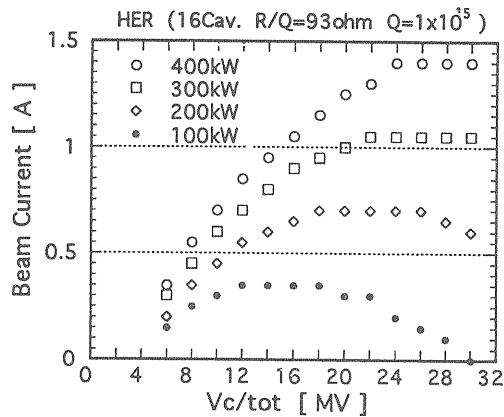


図17 HERでの可能なビーム電流

4-2 LER

LERの場合はHERに比べてビーム電流が高いと同時に必要とされる空洞電圧が低いため、事態は深刻な方へ向かう。wigglerがない場合でも V_c は入力制限から6台程度の空洞が必要となり、growth rateは3 m秒程度になってしまう。全空洞電圧 V_c/tot が12 MVであれば、wigglerがないとすると、6台の空洞で Q_{in} が 1.2×10^5 でき、14 m秒のgrowth rateが確保できる。

また4台の空洞を2 MV、400 kWで運転すると、1.7アンペア(wigglerありでは0.8アンペア)の運転が可能であることになる。このときのgrowth rateは30 m秒である。

4-3 low R/Q 構造

前述のように超伝導空洞は高い空洞電圧が必要な場面では効果的であるが、電圧を制限された場合は適用範囲が狭くなる。結合係数 B が大きくなりすぎて Q_{in} (従って Q_L)が小さくなることからgrowth rateも小さくなるためである。現状では空洞1台あたりの電圧が2~2.5 MV、

許容電力が400 kW、 Q_{in} が 1×10^5 が超伝導空洞にとっては妥当なところといえる。入力結合器の電力向上は1つの方法であるが、これも結果的には Q_{in} が下がることになり、マルチバンチ不安定性の面からの制限を受けるため限界がある。

ここでさらに R/Q を下げてdetune量 $\Delta f a$ を小さくすることを考える。この効果は大きく、 R/Q を 30Ω にするとLERでもwigglerなしでは7台で40 m秒、またwigglerがあっても14台の空洞で8 m秒のgrowth rateが得られるようになる。他方、必要な Q_{in} の確保やTE111モードの周波数が下がるなどの新たな問題が発生する。図16は $R/Q = 30 \Omega$ の空洞の1例である。空洞直径491.6 mm、アイリス径240 mm、ギャップ長485 mmの空洞に390φの円筒ビームパイプが付いている。詳細は未検討であるが、 R/Q を下げる方向にはまだ解があるように思われる。

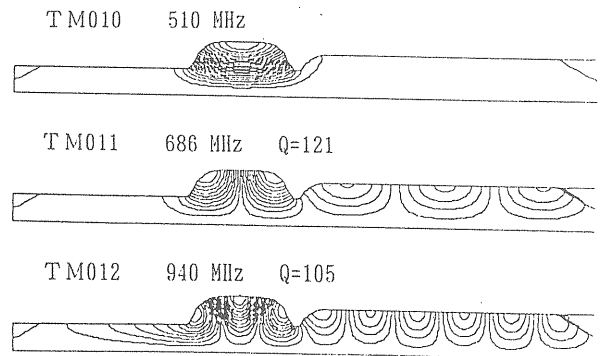


図18 R/Q=30Ωの空洞形状例

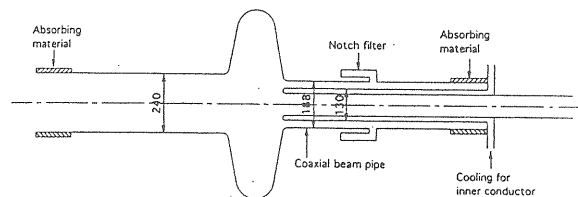


図19 Crab空洞の概念図(8)

4-4 CRAB空洞

有限角衝突のルミノシティを改善する方法としてCrab空洞が考えられている。これは

バンチの向きを変えるだけで電力の負担が小さいことと高いキック電圧が必要という理由から超伝導空洞を使うメリットは大きい。図19はその概略であり、コーネル大学との協力のもとにすでに1.5 GHzの縮小モデルの低温試験が行われている(8)。技術的には加速空洞と共通する点が多い。

5 むすび

これまでの超伝導空洞の応用はより高い加速電圧の実現を目的とした方向が主であったが、Bファクトリーのように大電流の蓄積でもメリットは大きく、超伝導空洞の応用範囲を広げる意味でも楽しみな対象である。現在はその問題点の把握と今後の開発方向を探している段階であるが、空洞形状をはじめとして各部品に検討事項、開発要素が山積している。

さてここで見たように、現在試作中のARテスト機は高電圧型ともいべき空洞であって、これをそのままHERへ持ち込むと12~16台の投入で運転が可能である。しかし電圧に余裕があるため、HOM吸収体の負荷軽減の意味でも(HOMの周波数をずらす)R/Qを幾分下げた形状にするのが望ましい。またLERへは、30Ω程度にまで下げる必要がある。ビーム電力が大きいため、 Q_{in} (従って Q_L)が小さくなりその結果マルチバンチ不安定性からの制限を受けるからである。

超伝導空洞では電圧に余裕があるため空洞数を増やすことなく電圧を上げることができる。これはバンチ長を短くする手段としても有効である。

ここでは空洞本体に関わることを扱ったが、高周波制御系や大電力回路系、真空、冷凍機など実際の運転に必要な部分の検討課題も多い。現在運転中のトリスタン超伝導空洞の経験を基礎に考えているが、1996年に予定されているARでのビームテストで確認すべきところは多い。

現在はコーネル大学がCESRのグレードアップを目指して急ピッチで試作1号機の試験を展開しており、今秋には最初のビームテストが行われる予定になっている。目標は150 mA

の蓄積であり、ここでの貴重な情報が期待される。

謝辞

本文中では超伝導空洞開発に関わる多数の方々の貴重な資料や研究成果を多数引用させて頂いた。ここに深く感謝します。

参考書および引用文献

1) 超伝導空洞の開発研究を行っている研究者は世界で150人程度おり、ほぼ2年に1回の割合でWorkshop on RF Superconductivityという会議を開いている。これまで6回開催され毎回論文集が発行されている。これらが超伝導空洞技術を知る上で強力な参考書となる。

1st: M.Kuntze edit., KfK 3019, Karlsruhe, July 2-4, 1980

2nd H.Lengeler edit., CERN, July 23-27, 1984

3rd K.Shepard edit., ANL-PHY-88-1, ANL, September 14-18, 1987

4th Y.Kojima edit., KEK Report 89-21, August 14-18, 1989

5th D.Proch edit., DESY, August 19-24, 1991

6th R.Sundelin edit., CEBAF, October 4-8, 1993, to be published

2) OHOシリーズで扱われた超伝導空洞

野口修一 "超伝導空洞"、1987年

光延信二 "超伝導空洞"、1992年

3) その他の教科書

H.Piel and H.Lengeler

"Superconducting Cavities (Part 1-4)" for CERN Acc. School, 1988

W.Weingarten, "Superconducting Cavities", for CERN Acc. School, 1991

4) beam cavity interactionの教科書
M.Sands, "Beam-Cavity interaction I,II"
P.B.Wilson, "High Energy Electron Linacs:
Applications to Storage Ring RF Systems
and Linear Colliders",SLAC-PUB-2884,1982

5) 引用文献

- 1) H.Schwettman et al.,Proc. 5th Int. Conf.
on High Energy Acc.,Frascati,1965
- 2) T.Weiland, DESY 83-073, 1983
- 3) T.Kageyama, Proc. of the 15th Linear
Acc. Meeting in Japan, 1990
- 4) H.Padamsee et al.,Proc. of the 5th work
shop on RF-SC,DESY,1991,pp138-161
- 5) D.Moffat et al.,CLNS 93/1214,1993
- 6) D.Moffat et al.,CLNS 93/1233,1993
- 7) J.Kirchgessner et al.,CLNS 93/1248,1993
- 8) H.Padamsee et al.,KEK Proceedings 93-7,
1993,p133