

1. はじめに

将来光源として期待されるエネルギー回収型リニアック(ERL)において、蓄積リング型放射光源では得られないような、高輝度・短パルス of 放射光の供給を実現するためには、電子銃・レーザーの開発とともに超伝導加速空洞の開発が重要な鍵を握っている。

超伝導加速空洞の代表例の一つとして、XFEL やリニアコライダーの実現に向けて、精力的に開発研究が進められている 1.3GHz、9 セル空洞の TESLA 空洞があげられる。放射光源 ERL においても当初は、TESLA 空洞を用いての検討が進められてきた。ところが、TESLA 空洞の場合には、空洞に励起される高次モードによって引き起こされるビーム不安定性が問題であり、その抑制が ERL 実現への大きな課題とされてきた。

この問題点に対応すべく、我々は ERL に最適化した新たな空洞設計を行うことにした。高次モードを減衰させやすい大口径ビームパイプを採用するとともに、空洞のセル形状も新たに設計を行った。この空洞を製作し、現在その性能評価を進めているところである。

1.3GHz 超伝導加速空洞に関しては、2 年前の OHO '06「超伝導リニアコライダー」[1]の中でも取り上げられている。高周波空洞の設計指針や空洞製作技術・表面処理方法については、その中で詳しく述べられている。これらの点は、リニアコライダーの場合と ERL の場合とで基本的には大きく変わることはないので、OHO '06 のテキストもぜひ参考にさせていただきたい。

今回は、この重複する部分の記述は最低限にとどめ、ERL 用の空洞を設計・製作に関することを中心にしなが、話を進めていこうと思う。

なお、ERL では電子銃から出射された電子ビームを 5~10MeV 程度まで加速する入射部にも超伝導加速空洞が用いられるが、本テキストではこれには触れず、エネルギー回収をしながら加減速を行う主加速部の超伝導加速空洞について述べることを断っておく。

2. ERL における超伝導加速空洞

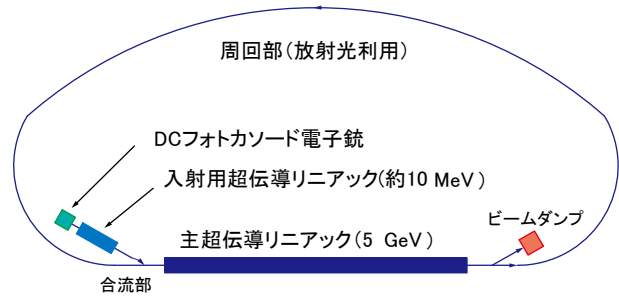


図 2-1 ERL の概要図

将来光源として一般的に考えられている 5GeV クラスの ERL の概要図を図 2-1 に示す。ERL では、ビームが何周も周回することなく、1 周 (もしくは数周) だけでダンプするのが特長である。電子銃から出射されたビームは、入射部の超伝導リニアックで 10MeV 程度まで加速された後、主リニアック部で 5GeV まで加速される。それからリングを 1 周して放射光利用に供された後、主リニアック部に戻ってきて、今度は 5GeV から 10MeV 程度まで減速される。減速されたビームはビームダンプへと打ち込まれる。

2.1. ERL で要求される空洞性能

まずは ERL において空洞に要求される性能の基本となる加速勾配であるが、もし高い加速勾配が実現できれば ERL 主リニアック部における空洞台数を少なくすることができるというメリットがあるが、その反面で、冷凍機への負荷は加速勾配の 2 乗で増加していくため、CW 運転を要求される ERL の場合には、冷凍機負荷が大きくなりすぎるという点がデメリットである。9 セル空洞 1 台は約 1m であり、加速モードの $R/Q=1000$, $Q_0=10^{10}$ とすると、10MV/m の場合だと、500 台の空洞が必要であり、この場合の冷凍機負荷は 5kW(2K)となる。20MV/m, 30MV/m の場合だと、それぞれ、空洞台数が 250 台、167 台に減らすことができるが、その代わり冷凍機負荷が 10kW, 15kW と増大することになる。これらのバランスを考慮すると、15~20MV/m あたりが ERL では適当な加速勾配だと考えられる。

加速勾配とともに重要なのが空洞の Q 値で、これも冷凍機負荷に直結する。ERL での超伝導加速

空洞は上記の 15~20MV/m の運転電圧において $Q_0 > 10^{10}$ が要求される。空洞 Q 値を劣化させる最たるものはフィールドエミッションである。フィールドエミッションは空洞表面からの電子放出現象であるが、 Q 値の劣化のみならず、放出電子が空洞電圧で加速された後、加速器内のどこかでロスをすると放射線の問題を引き起こす可能性がある。CW で運転される ERL では、フィールドエミッションの無い空洞の実現が望まれる。

2.2. 加減速とエネルギー回収

1 パスで 5GeV まで加速するだけであれば、エネルギー回収をしない通常のライナックでも可能ではある。ところが 100mA の CW ビームを生成するためには、 $5\text{GeV} \times 0.1\text{A} = 500\text{MW}$ というとてもない電力が必要であり、現実的な話でない。そこでエネルギー回収というアイデアが出てきた。

空洞内に V という電圧が立っていて、ある位相 θ の時に電荷 q が空洞を通ると $V \cos \theta$ だけ加速される。この時に、空洞に蓄えられているエネルギーのうち $qV \cos \theta$ のエネルギーがビームに渡されることになる。ここでは、単に”加速”と言ったが、位相 θ によって $\cos \theta$ の符号が変わるので、それに応じてビームは加速または減速されることになる。減速の際には、ビームが減速された分のエネルギーがビームから空洞へ渡される。

ERL での最も単純なフラットトップ ($\theta = 0, 180$ 度)での加減速の場合を考えてみる。加速される電荷が通った際には、空洞から qV のエネルギーが奪われるが、逆に減速される電荷が通った際には、 qV のエネルギーが空洞に渡される。つまり、加速と減速の後には、エネルギーの受け渡しが相殺され、全体ではゼロとなる。このように減速ビームのエネルギーを用いて次のビームを加速するのが ERL であり、この場合、通常のライナックで必要になる 500MW をまるまる節約することができる。

2.3. 加速空洞の高次モード

ERL における加速空洞で、最も問題になると考えられているのが、空洞を通るビームにより空洞内に励起される高次モード(HOM)によるビーム不安定性の問題である。

このビーム不安定性は、Beam Breakup 不安定性(BBU)と呼ばれる。

ERL で 100mA 運転を可能にするための、ダイポールモードの HOM に対する条件がコーネル大学 ERL グループにより以下のように計算されている[2]。空洞設計の際の指標として用いることができる。HOM インピーダンスを周波数で割ったものが、閾値電流値とスケールしていることがわかる。

$$\left(\frac{R}{Q}\right) \frac{Q}{f} < 2.8 \times 10^5 \left[\frac{\Omega}{\text{cm}^2 \text{GHz}} \right] \quad (2-1)$$

ちなみに TESLA 空洞の場合は、BBU 閾値は 10mA 程度である。

また、あまり詳しい計算結果はまだ示されていないが、ダイポールモードと同様に quadrupole モードでも、quadrupole BBU と呼ぶビーム不安定性が起こることが示唆されており、こちらもコーネル大学 ERL グループにより以下のように見積もられている。

$$\left(\frac{R}{Q}\right) \frac{Q}{f} < 8 \times 10^6 \left[\frac{\Omega}{\text{cm}^4 \text{GHz}} \right] \quad (2-2)$$

ERL では、quadrupole モードの減衰も重要な課題である。

ERL 用の空洞では、これらのビーム不安定性を起こさないよう、大口径ビームパイプに RF 吸収体を設置したビームパイプ型 HOM ダンパーを採用するが、ここで CW 運転を行う ERL で問題になるのは、モノポールモードによる HOM ダンパーでの熱負荷である。HOM ダンパーは 70~80K の部分に設置されるが、熱負荷は 100W 程度に抑える必要がある。ERL の場合は、加速ビームと減速ビームとで 2.6GHz の整数倍のビームスペクトルを持つ。そのため、モノポールモードによる熱負荷の問題を避けるためには、2.6GHz の整数倍付近に高次モードを持たないということが重要になる。

3. ERLに向けた超伝導加速空洞の設計

3.1. 設計方針

ERL に向けての空洞設計の方針は、とにかく 100mA の CW 運転に向けて、高次モードを強力に減衰した空洞を設計するということである。(2.1), (2.2)式のダイポールモード、quadrupole モードへのインピーダンスの条件を満たすとともに、モノポールモードによる熱負荷の問題をクリアできるように高次モードの周波数を選ぶ必要がある。これらの条件を満たすことは必須である。

それとともに、加速モードに対しても、できるだけ高性能を維持することが求められる。

3.2. 空洞形状

最初に TESLA 空洞から ERL の検討を始めたが、100mA の CW 運転を行うことは困難であることがわかった。また、TESLA 空洞で用いられている HOM カップラーは CW 運転を行った場合には発熱の問題があることが知られている[3]。

そのため、ERL 用には新たな空洞の検討が必須であった。まず始めに、中央セルの形状はそのまま、片側のビームパイプ径を TESLA 空洞の 78mm から 108mm まで広げて、ビームパイプ型 HOM ダンパーを用いたモデルを検討した。ビームパイプ径の 108mm は TESLA 空洞の一番周波数が低い高次モードである TE111 をビームパイプに伝搬させることができるサイズとして選んだ。このモデルを、以下 KEK-ERL model-1 空洞と呼ぶ。後で述べるようにこの空洞だと計算上 100mA は何とかクリアできそうだが、空洞製作・運転するに於けるマージンがほとんど持たないため、さらに ERL 向けに高次モードを減衰させた空洞を設計することを決意した。

次の空洞設計を行うにあたって、空洞セル数を減らしてインピーダンスを抑制することも検討した。例えば 9セルから 7セルにセル数を減らした場合でも、HOM インピーダンスは半分程度にしかならず、劇的な変化は期待できないことがわかった。

そのため、最終的にはセル形状を TESLA 空洞のセル形状とは異なる独自の形状を設計することとした。

色々なセル形状を模索した結果、アイリス径を大きくすることが効果的であることがわかった。アイリス径を大きくすることにより、高次モードがセルとセルの間を行き来しやすくして、最終的にはビームパイプへ漏れやすくしてやるのである。ところが、加速モードに対しても同様の効果があり、アイリス径を大きくしていくと、それに伴って加速モードの R/Q が下がっていく。加速モードと高次モードとは、アイリス径に関して、トレードオフの関係にある。最終的に 80mm のアイリス直径を採用することにした。

アイリス直径を大きくした場合に、TESLA 空洞のように赤道部に円形を用いると、周波数 1.3GHz にするためには、空洞直径を大きくする必要がある。すると TM020 というモノポールモードのパスバンドが 2.6GHz をまたぐ形になってしまうので、前に述べたように HOM ダンパーでの熱負荷が深刻な問題となってしまう。この問題をクリアするために、赤道部には楕円形状を採用して、空洞直径は TESLA 空洞と同様の 206.6mm とした。今回の設計においては、製作誤差等も考慮して十分マージンを持たせて、TM020 モードの周波数が 2.6GHz より 40MHz 以上離れた周波数になるように設計を行った。

HOM を強力に減衰させるために、ビームパイプ直径は 120mm と 100mm とし、100mm 側に入力カップラーを設置するデザインとした。HOM ダンパーはビームパイプの両端に設置される。120mm というビーム直径は、この空洞設計において最も周波数の低い TE111 モードを伝搬させるサイズとして選んである。

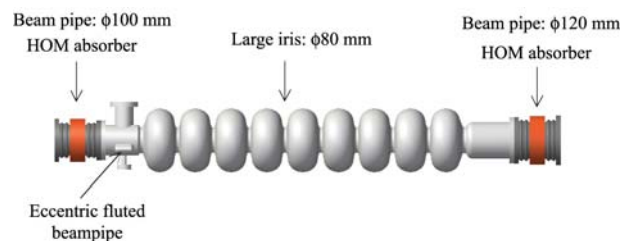


図 3-1 KEK-ERL model-2 空洞の概念図

この新たに設計した空洞を KEK-ERL model-2 空洞と呼ぶ。この空洞の概念図を図 3-1 に、設計寸法を図 3-2 に示す。[4]

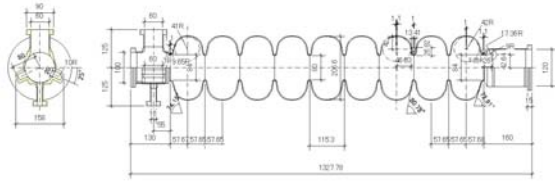


図 3-2 KEK-ERL model-2 空洞の設計寸法

3.3. 加速モード

KEK-ERL model-2 空洞の加速モードのパラメータを表 3-1 に示す。

周波数	1300 MHz
アイリス直径	80 mm
赤道部直径	206.6 mm
ビームパイプ直径	120 mm / 100 mm
R/Q	897 Ω
Geometrical factor	289 Ω
Ep/Eacc	3.0
Hp/Eacc	42.5 Oe/(MV/m)
Cell-to-cell coupling	3.8 %

表 3-1 KEK-ERL model-2 空洞の加速モードパラメータ

アイリス直径を大きくしたため、加速モードの R/Q はやや小さくなっているが、TESLA 空洞と比較して約 10%減に抑えた。逆にアイリス直径を大きくしたメリットとしては、セル間の結合度が 3.8%と TESLA 空洞の約 2 倍の値になっている。そのため、ERL model-2 空洞内の加速モードの電磁場は、摂動による変動に対して比較的強い。

赤道半径を変えずに、アイリス直径を大きくしたため、アイリス部分の電場集中が大きくなり、Ep/Eacc の値が TESLA 空洞の 2.0 から 50%増しになった。Ep/Eacc が大きいとフィールドエミッションを起こしやすくなるので、その点デメリットであるが、ERL 空洞の場合には、運転で想定される加速勾配が 15~20MV/m とリニアコライダーの場合と比べて低めであるので、なんとか対応可能な範囲かと考えている。

3.4. 高次モード

ERL 用空洞の最大のターゲットであった高次モードがどのようなようになったかを見てみよう。

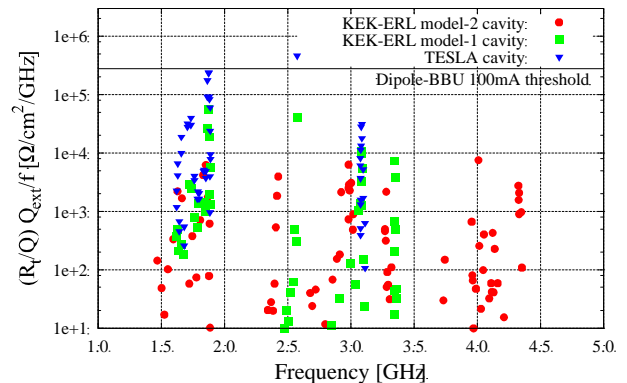


図 3-3 ダイポールモードのインピーダンス

図 3-3 にダイポールモードの HOM スペクトルを示す。TESLA 空洞の場合、KEK-ERL model-1 空洞の場合、KEK-ERL model-2 空洞の場合の 3 通りについて示してある。TESLA 空洞では 100mA 運転のための高次モードに対する要求をクリアできなかったのに対して、大口径ビームパイプを採用した model-1 空洞ではそれより約 1 桁 HOM のインピーダンスを下げる事ができていて、大口径ビームパイプの有用性を示している。さらに model-2 空洞では 1 桁近く HOM インピーダンスを抑制することに成功しており、アイリス径を大きくしたセル形状を採用した効果が表れている。

計算によれば、KEK-ERL model-2 空洞を用いれば、BBU 閾値が 600mA まで引き上げられることが示されている[5]。RF 吸収体の不完全性や製作誤差等と考慮しても 100mA 運転に対しては十分なマージンを持つことができた。

次に図 3-4 にモノポールモードの HOM スペクトルを示す。2.6GHz 付近とその 2 倍の 5.2GHz 付近を拡大したスペクトルも一緒に示す。ビームの持つ周波数成分である 2.6GHz の整数倍のところに HOM が存在しない設計となっている。

このように 1.3GHz で運転する限りはモノポールモードによる熱負荷の問題は回避できると思われるが、電子ビームを間引いて、もっと低いビーム繰り返しで運転するような場合（例えば 130MHz とか）には、2.6GHz の整数倍以外のモ

ードも熱負荷の要因になるので、その場合には、HOM スペクトルを考慮しながら、熱負荷の問題を避けられるよう注意深くビーム繰り返し周波数を選ぶ必要がある。

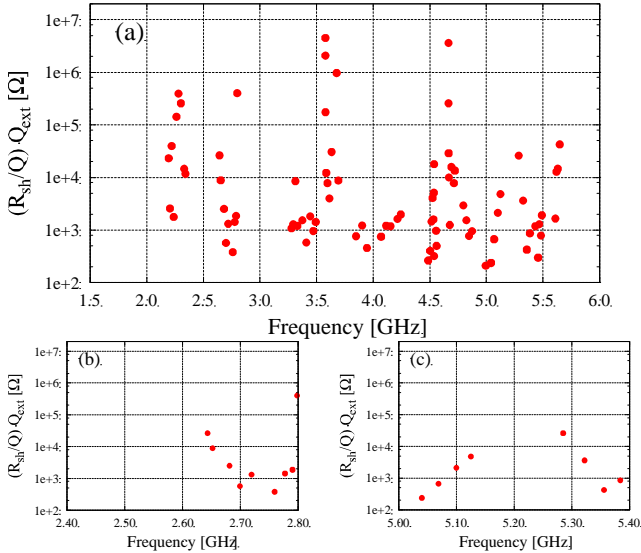


図 3-4 モノポールモードのインピーダンス (a) 全体のスペクトル (b) 2.6GHz 付近の拡大 (c) 5.2GHz 付近の拡大

3.5. 偏心フルート型ビームパイプ

ERL では、加速空洞に励起される quadrupole モードもビーム不安定性を引き起こして、電流制限の要因となる可能性がある」と指摘されている。ただし、一般に quadrupole mode は遮断周波数が高いために、大口径ビームパイプを用いても、なかなかダイポールモードやモノポールモードのように HOM インピーダンスを下げるのが困難である。

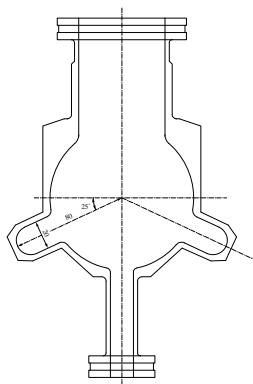


図 3-5 偏心フルート型ビームパイプ断面図
そこで新たに考案したのが、図 3-5 に示す偏心フルート型ビームパイプというアイデアである

[6]。左右斜め下に突き出した長さ 5cm 程度の突起が”偏心フルート”である。この構造は、quadrupole モードから見ると非対称であるために、空洞からしみ出してきた quadrupole モードの電磁場がこの構造体に到達すると、一部がダイポール成分へと変換される。ダイポールモードになってしまえば、同じ直径のビームパイプでも遮断周波数が十分低いために、その後は HOM ダンパーのところまで伝搬して行くことができる。そのようにして、元々は quadrupole モードであった電磁場の一部を吸収体で吸収することにより、HOM の Q 値を下げるものである。

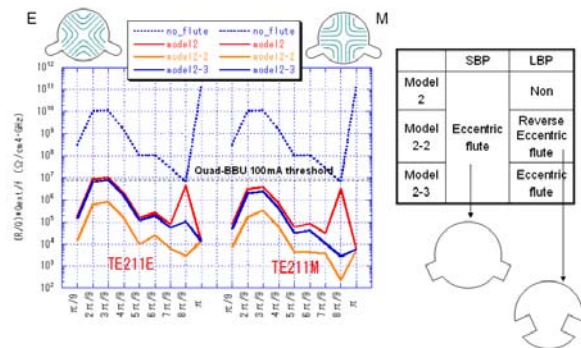


図 3-6 偏心フルート型ビームパイプを用いた TE211 モードの減衰

図 3-6 に偏心フルート型ビームパイプを用いた場合にどこまで HOM のインピーダンスを下げる事ができるのか、TE211 モードの計算結果を示す。偏心フルート型ビームパイプが quadrupole モードを減衰することができるということを示しているとともに、ERL での 100mA 運転に必要な quadrupole モードの HOM への要求をクリアしていることを示している。このアイデアにより、quadrupole BBU に対しての目処も立った。

なお、偏心フルートにより加速モードが影響を受けることも考えられるが、偏心フルートの設置場所、深さなどを適切に選べば十分影響を小さくすることはできて、現在の設計においてもその影響は無視できる程度である。

4. 超伝導加速空洞の開発状況

以上で述べてきたように ERL 用のスペックを満たした新たな空洞設計をすることができた。次の

ステップは、実際に空洞を製作して、計算通りの性能を出せるかどうかを確認することである。

そのために3種類の空洞を製作した。1つはセンターセル型の単セル空洞、もう一つはビームパイプの構造を全て模したエンドセル型の単セル空洞、そして9セル空洞である。これらの空洞の表面処理を行い、縦測定による性能評価を進めているところである[7]。

4.1. 単セル空洞

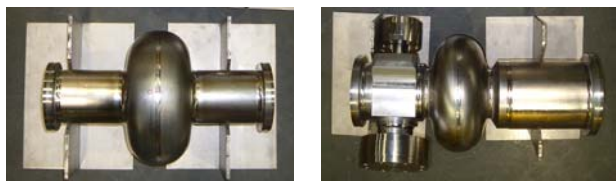


図 4-1 (左)センターセル型単セル空洞、(右)エンドセル型単セル空洞

図 4-1 に示すように2種類の単セル空洞を製作した。センターセル型空洞は、新たに設計した空洞形状で高電界が得られるかを検証するのが主な目的である。他に、空洞製作方法・表面処理方法が適切かどうかを確認する目的もある。もう一つのエンドセル型空洞は、偏心フルート型ビームパイプやインポートポート、ピックアップポートなどをそのまま製作したものである。これらの構造物に起因する問題がないかを検証するのが主な目的である。

これらの空洞には、バレル研磨、電解研磨、アニール、仕上げ電解研磨、温水超音波洗浄、高圧純水洗浄、ベーキングなどの一連の表面処理をしたのち、KEKのD10電源棟のクライオスタットにて縦測定を行い性能評価を行った。

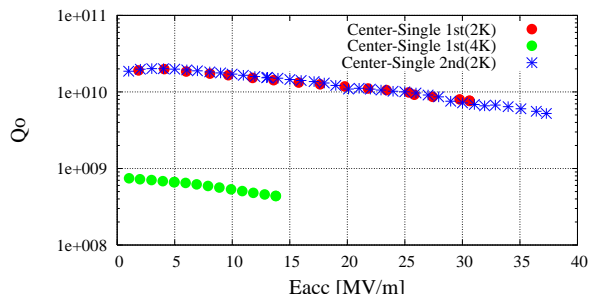


図 4-2 センターセル型単セル空洞の縦測定結果

まずは、図 4-2 にセンターセル型空洞の縦測定結果を示す。35MV/m 以上の高電界に到達するこ

とができ、空洞形状に特に問題が無いことが検証された。20MV/m の加速勾配の時に $Q_0 > 10^{10}$ の要求を満たしている。なお、この空洞の電界制限は He を減圧する排気システムの容量不足によるものである。

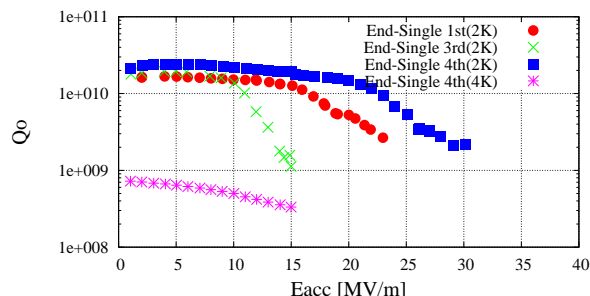


図 4-3 エンドセル型単セル空洞の縦測定結果

次に図 4-3 にエンドセル型空洞の縦測定結果を示す。何度か縦測定を行っているが、2 回目の仕上げ電界研磨の後で 30MV/m の加速勾配に到達することができた。この空洞も 20MV/m における $Q_0 > 10^{10}$ の要求を満たしている。30MV/m の限界制限はフィールドエミッションによるクエンチによるものである。なお、縦測定の際に空洞の診断を行うため、空洞外面での温度マッピングや X 線マッピングのデータを取っているが、偏心フルートなどの構造物が原因での性能劣化は引き起こされていないことが確認できた。

4.2. 9セル空洞



図 4-4 KEK-ERL model-2 ニオブ製 9セル空洞
そして、いよいよ 9セル空洞である。9セル空洞は昨年度末に完成した。空洞を図 4-4 に示す。この後、電界研磨、アニール、プリチューニング、仕上げ電界研磨、温水超音波洗浄、高圧純水洗浄、ベーキングなどを行い、現在、KEKのSTF棟縦測定テストスタンドにて、測定を待っている。9月中には最初の縦測定が行われ、何らかの結果が出ているはずである。

5. 周辺コンポーネント

ERL でビームを加速するための高周波加速システムを作り上げるためには、空洞だけでなく、入力カップラー、HOM ダンパー、周波数チューナーなどの周辺コンポーネントも開発して、これら全体としてクライオモジュールを完成させなければならない。

ERL 主リニアックでのこれらの検討は、まだあまり進んでいない部分も多いが、今後クライオモジュール設計に向け、検討を進めていくことになる。

5.1. 入力カップラー

ERL 主リニアックでは、エネルギー回収のおかげでビームへ渡すエネルギーが非常に小さくて済む。入力カップラーとしては、20kW 程度のパワーを通せれば良い。Qext は 10^7 程度が一般的である。

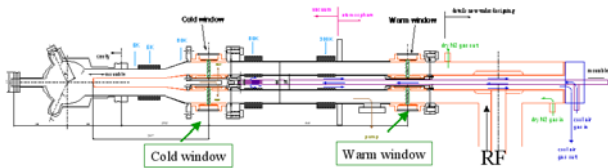


図 5-1 ERL 主リニアック用入力カップラーの概念図

図 5-1 に ERL 主リニアック用に検討が進められている入力カップラーの概念図を示す[8]。空洞への粉塵混入を避けるため 2 枚にセラミックを用いた構造になっている。セラミックは誘電損失の少ない HA997 を採用する予定である。ベローズを用いて、 $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ の範囲で Qext 可変の設計になっている。

5.2. その他コンポーネント

その他のコンポーネントのうち最も重要なのが HOM ダンパーである。ERL 主リニアックでは 70 ~ 80K の低温部に RF 吸収体を設置する予定である。これまで、常温部でのビームパイプ型 HOM ダンパーは実績があるが、低温で使用されるダンパーは例が無い。まずは、低温で良好な吸収特性を示す吸収体探しから始まり、その加工方法、ヒ

ートサイクルの問題、熱負荷に対する冷却方法などを解決して行かねばならない。

周波数チューナーは、粗調整用のメカニカル・チューナーと微調整用のピエゾ・チューナーの併用になると思われる。ビーム運転時は、メカニカル・チューナーは固定した状態で、主にピエゾ・チューナーで周波数制御を行うことになると思われる。

これらの空洞と周辺コンポーネントを統括して、ERL のビーム加速システムとして安定に動作するクライオモジュールを設計することになる。マイクロフォニクスと呼ばれる振動による空洞のデチューニングを極力減らす設計が望まれる。また、高圧ガス対策も適切に検討して、それを反映されたデザインにする必要がある。

6. おわりに

OHO において、ERL における超伝導加速空洞についてのテキストを書くという、せっかくの機会を与えていただいたものの、筆者の力不足と準備不足のために、テキストというには程遠い内容しか書くことができませんでした。最後にこの場を借りてお詫びいたします。

参考文献

- [1] OHO '06 「超伝導リニアコライダー」 古屋貴章氏、加古永治氏、佐伯学行氏
- [2] M. Liepe, Proc. Of the 11th Workshop on RF-Superconductivity (SRF2003), Travemünde /Lübeck, Germany, 2003.
- [3] P. Kneisel et al., PAC'05, p.4012
- [4] K.Umemori et. al.,APAC207, p.570
- [5] R.Hajima et. al., ERL2007
- [6] M.Sawamura et. al., PAC'07, p.1022
- [7] K.Umemori et. al., EPAC'08
- [8] H.Sakai et. al., Proc. ERL2007