

超伝導加速空洞

1. 序

ビームを加速する加速空洞は加速器全体の心臓部である。ビーム加速を行うため、空洞内にはある一定の高周波が共鳴した電磁波のエネルギーを空洞内に貯える必要がある。但し、このエネルギーの数割は空洞を共鳴する金属壁で消費される。特に加速勾配の2乗で空洞壁のロスが増大する(詳細は第2章参照)ため、空洞壁でのロスが無い状態の加速空洞の実現が理想的である。超伝導材料はこのロスを限りなくゼロにする理想的な材料であり、このようなシンプルな理由から超伝導加速空洞の開発が始まった。[1]

超伝導の研究は1911年にKamerling-OnnesがHeの液化に成功し、水銀の抵抗が液体Heの4.2K以下で抵抗が消失することを発見したことから、始まった。1933年には超伝導には強い反磁性があるという超伝導のもう一つの特徴であるマイスナー効果が発見される。これら金属内で起きる超伝導現象を1957年にクーパー対を用いて量子論的に解明したのが、バーディーン、クーパー、シュリファアの3人であり、彼ら3人の頭文字を取り、BCS理論と呼ばれている。この後、高温超伝導体(YBCO(転移温度 $T_c=92K$))が現れる1986年に至るまで、BCS理論の枠内ではこの超伝導の転移温度も40Kを超えないと予想されていた。超伝導空洞の開発は、このBCS理論による理論的な解明後の1965年、米国スタンフォード大学が鉛を銅に鍍金した超伝導空洞を使って電子加速に成功する処から始まる[1]。すなわち超伝導の発見から50年以上経ち、ようやく超伝導が加速空洞に応用されたことになる。得てして、新しい科学的な発見の応用というものはこのように時間がかかるものであるが、この超伝導材料の加速空洞への応用が可能であるということで空洞壁ロスのない超伝導加速空洞という画期的なアイデアが実証されることになる。このロスなしの空洞が本講義のテーマであるエネルギー回収ライナック(Energy Recovery Linac(ERL))の原理の要であ

り、M. Tigner氏によって同年1965年にERLの原理について提案されることになった。[2]

ここから世界的に超伝導空洞の開発が進むが、その中で日本ではKEKが先駆的に超伝導空洞開発を行ってきた。具体的な開発経緯の詳細は過去のOHOにも度々述べられており、そちら[3,4,5,6]を参照していただきたい。1980年後半に、日本で初めての素粒子実験用の電子衝突型大型加速器であるTRISTANでの超伝導加速空洞の開発により、509MHz、5セルの超伝導空洞を32台作成し、常伝導では実現できなかった5MV/mの連続(CW)加速(ビーム電流は最大14mA)を実現。その後、1990年後半~2000年代にはbクオークを使ったCP非保存の探索に必要な大電流加速を行うための衝突型加速器KEKBにてTRISTANの反省を踏まえ、高勾配超伝導空洞に大電流対策を行った509MHzのシングルセルの超伝導空洞を8台作成し、5~8MV/m(1.2-2MV)の加速勾配にて、世界最大の1Aもの電流をCW加速する超伝導空洞を実現した。一方、2004年からは超伝導加速空洞をlinear colliderに採用することが決定し、高加速勾配をlong pulse(1.5ms, 5Hz)でビーム加速を行うスキームから、これらの超伝導空洞の高加速勾配の実現に向けた開発がさらに進んだ。具体的には1.3GHzの9セル空洞を31.5MV/m(duty 1%以下)で運転することがlinear colliderにとっての開発目標であり、空洞の材料の質の向上、加工技術、表面処理技術、組立技術の向上により、空洞性能評価試験にて、20~35MV/m近くを安定に出せるまでになってきていることがここ10年での超伝導空洞開発の驚くべき進歩であると言える。

このように常伝導空洞では空洞壁ロスにより低加速勾配(<1 MV/m程度)でのCW運転か、duty比が0.1%~最大数%程度でshort pulseでしか高加速勾配を実現できないのに対し、超伝導加速空洞は、銅空洞に比べ100万分の1程度の抵抗値を実現しており、連続(CW)加速(=duty100%)またはlong pulseビーム加速にて、高加速勾配での運転が原理的に実現可能であるということである。このように超伝導空洞開発の機運が高まってき

た中、2006年から ERL での次世代放射光源に向けた開発がようやく始まり、高勾配(>15 MV/m)かつ大電流(100mA)の CW ビーム加速を実現するために筆者も含め、ERL 用の超伝導開発が始まった。2008 年にはその開発の途中段階を OHO08 にて示している[7]が、具体的には、高加速勾配を実現すべく、linear collider 型に近い 1.3GHz の 9cell 空洞を大電流用に修正することから始め、KEKB で用いた大電流加速の技術を応用。今までの超伝導加速空洞の技術的な蓄積と我々の独自のデザインを集大成したものになっている(詳細は第3章参照)。その後、2009年から ERL の開発のために KEK にて、ERL 実証機としての Compact ERL(cERL)の建設を開始した。そして、2014 年からエネルギー回収を実現するためのビーム運転が始まり、現在に至っている(詳細は第4章参照)。

本文では、超伝導空洞の基礎から始めて、ERL と ERL における超伝導空洞の優位性、必要性を述べたあとに、筆者が今まで開発を一から行ってきた ERL 用主加速超伝導空洞の開発の経緯、特に 2009 年以降の cERL 建設が始まった以降、cERL でのビーム加速までの様々な開発経緯と cERL のビーム加速の経験を踏まえ、ビームを長期的に安定に加速するために何が重要なのかということ具体的に述べていく。最後に本超伝導加速空洞、特に CW (連続) ビーム加速に必要な今後の超伝導空洞の将来について時間の許す限り、述べていく。

2. 超伝導加速空洞の基礎

ここでは超伝導加速空洞に必要な様々な用語を計算と共に列挙する。2.1 節では超伝導加速空洞と周辺機器の説明をした後に空洞を用いたビーム加速の概要を述べる。2.2 節では常伝導、超伝導両方に共通する RF 高周波の基礎的な話を述べ、2.3 節で特に超伝導に関係する基礎的な用語と超伝導加速空洞に主に関係する特有の現象及び超伝導加速空洞の性能を決定する現象について説明を行う。

2.1. 超伝導加速空洞の概要

超伝導加速空洞を使ったビーム加速の概要を図1に載せる。

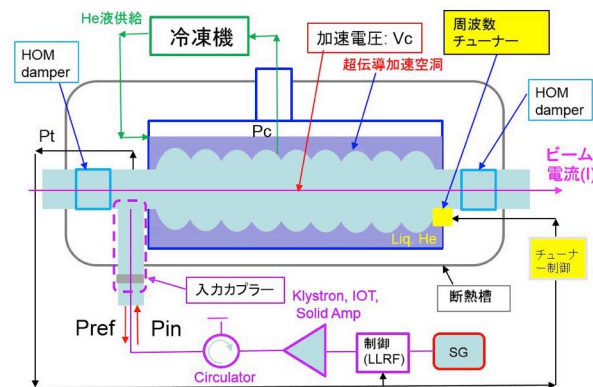


Fig. 1 超伝導加速空洞によるビーム加速の概要

超伝導加速空洞は超伝導状態を保つため、ビーム運転中、4.2 K 以下の液体ヘリウムを満たした容器に、内装(ジャケット化)される。また、容器の温度を極低温に保つため、ジャケット化された超伝導空洞への常温からの入熱を防ぐために大きな断熱槽によって覆われている。これらを称してクライオモジュールと呼んでいる。

クライオモジュールにはジャケット化された超伝導加速空洞の他に、大電力を導き空洞真空と大気部をセラミック窓で分ける入力カプラー、加速周波数以外の高周波を除去する HOM ダンパー、空洞の共振周波数を加速周波数に調整するための周波数チューナーも内包しており、これらが断熱槽内で囲まれている。これに対し、空洞の熱

負荷などを含め、液体 He をコントロールする冷凍機によって制御される。また、空洞に立てる加速電圧の大元は空洞にハイパワーを供給する高周波源(Klystron、IOT、Solid Amp)及び反射パワーが戻らないようにする Circulator からなるハイパワー系によって供給される。また、その高周波パワーを安定化する制御系(LLRF)及びチューナー制御系によって、安定なビーム加速を超伝導加速空洞にて実現する。クライオモジュールの冷凍機は[8]にて詳しく述べられており、そちらを参照していただきたい。また、高周波源及びその制御については本セミナーの[9]にて詳しく述べる。本文では空洞を用いたビーム加速の原理とその開発について詳しく述べていく。また、超伝導加速空洞以外の各コンポーネントやクライオモジュール全体についての詳細な設計、製作については第4章にて、実際の条件に合わせて、述べていくが、クライオモジュールの設計はこれらの複雑なコンポーネントの低温冷却時の機械的設計及び特に投入パワー時の発熱も踏まえた熱設計、また高周波源の必要な安定性や冷凍機の設計など様々なことを考慮した上で製作することが重要であることをここでは述べておく。

空洞のパワー収支に関してもう少し具体的に述べる。空洞を通じたパワー収支は以下の式(1)で書かれる。

$$P_{in} = P_{beam} + P_c + P_{ref} + P_t + P_{HOM} + P_{other}, \quad (1)$$

- P_{in} : 空洞への入力パワー
- P_{ref} : 空洞からの反射パワー
- P_c : 空洞壁ロス
- P_t : 空洞モニター及び制御用のパワー
現状では ($P_{in} \gg P_t$)
- P_{beam} : ビームに与えるパワー
- P_{HOM} : 高次モードとビームとの
相互作用によるパワーロス
- P_{other} : その他のパワーロス (放射光など)

図1にあるように P_{in} , P_{ref} はそれぞれ高周波源から空洞へ送る入力パワー、空洞からの反射パワーを示している。また P_t は空洞の一部をパワーとして取り出し、図1にあるように加速空洞のモニターおよび制御に用いる。ビームに与えるパワー P_{beam} は加速電圧 V_c 、ビーム電流 I とすると、 $P_{beam} = V_c \cdot I$ と書ける。これに対し、空洞壁ロス P_c は式(2)に示すように

$$P_c = \frac{V_c^2}{R_{sh}} = \frac{(E_{acc} \cdot L)^2}{(R/Q) \cdot Q_0} \quad (2)$$

と書かれる。 R_{sh} はシャントインピーダンスと呼ばれ、詳しくは空洞形状で決まる R/Q 値と空洞の材質などの物性値で決まる Q_0 値の積であらわされ、空洞壁ロスに対する加速電圧の2乗の割合を表している(2.2節参照)。 V_c は式(2)にあるように加速勾配 E_{acc} と加速空洞の長さ L の積である。我々はなるべく短い加速区間で高エネルギーの電子ビームを得たいと考えるが、ビームに対しては加速勾配に対し、比例したゲインしか得られないのに対し、空洞壁のロス P_c はその2乗で増大する。従って、ビームを加速するための加速勾配を上げれば上げるほど、空洞のロスが大きくなる。具体的には1mの常伝導加速空洞(銅製)では R/Q が1000程度で Q_0 値が $\sim 10^4$ 程度であるため、低い加速勾配1MV/mでも、 P_c は100kWものロスになり、CWでの運転はこの熱負荷の冷却が非常に困難である。さらにはビームを1mA程度の電流を加速するとした場合でさえも P_{beam} は $1\text{MV} \times 1\text{mA} = 1\text{kW}$ であり、 P_{beam} に対し、その100倍もの熱負荷が空洞ロスに持っていかれることになる。したがって、常伝導空洞では **duty** を下げ (<0.1~1%)、まず、熱負荷を下げ、それにより、パルス的にビームを加速することを主としている。それに対し、超伝導加速空洞(Nb製)の Q_0 値は $\sim 10^{10}$ を実現しており(詳細は2.3節参照)、 P_c は1MV/mでは高々0.1Wである。これを10倍の10MV/mにしても10W程度と空洞壁によるロスが圧倒的に小さいため、反射が無い状態 $P_{ref} \approx 0$ にマッチングを取り、HOMによるロス P_{HOM} など

を抑えれば、 $P_{in} \approx P_{beam} \gg P_c$ の理想的な条件が可能となり、CW ビームにて、高加速勾配で入力パワーをすべてビーム加速に投入可能な効率の良い加速が実現される。

これだけのメリットがあるのだが、一つだけパワーに関して重要な観点は冷凍機の実際の運転パワーである。超伝導空洞により P_c は格段に小さくなることがわかったが、あくまでこの負荷は 4K ~ 2K の液体ヘリウムに消費される。常温での必要な運転 AC パワーを P_{AC} とすると式(3)に示すように

$$P_c = \eta \cdot P_{AC}, \quad \eta = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

と書かれる。熱効率 η は具体的には常温 $T_1 = 300\text{K}$ と液体ヘリウム温度 $T_2 = 2\text{K}$ の間の一番効率のいいカルノーサイクルによる熱効率を表しており、 P_c が 2K で 10W であった場合でも常温では 1.5kW 程度の運転パワーが必要になることがわかる。実際には理想的にカルノー効率 η の 5 倍程度が冷凍機の効率になると思われるために 2K のときの約 1000 倍の熱交換の効率が常温にはかかることになる。それを考慮しても、常伝導に対し、常伝導の Q 値が 100 万倍ちがうことを考えれば、1000 分の 1 程度の運転効率のメリットが超伝導加速空洞では実現されることになる。これが超伝導加速空洞の最大のメリットである。

2.2. 高周波加速の基礎

本節では高周波加速の基本的な RF パラメータについて、Maxwell の方程式から出発し、理解を進める。具体的にはピルボックス空洞による RF 計算から加速に使われる高周波モード及び各 RF パラメータの説明を行い、高周波加速についての必要なパラメータの意味を説明する。(詳細な計算については参考文献[6]を参照されたし。)

2.2.1. 加速モード(TM₀₁₀モード)と高調波

高周波加速空洞の理解をするためにまずは図 2 のような円筒空洞を考え、この内部に立つ電磁場分布を計算する。(このような円筒空洞をピルボックスと呼んでいる。)

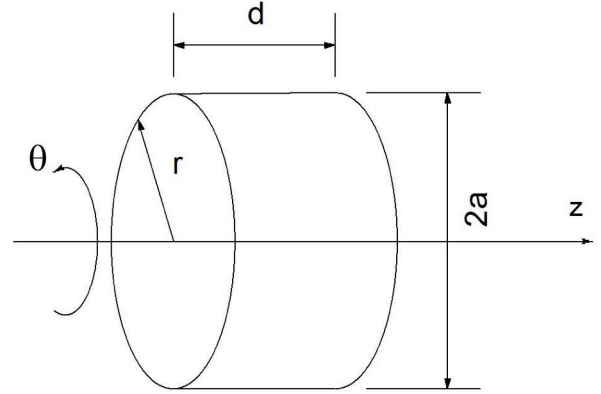


Fig. 2 円筒空洞 (ピルボックス)

自然界の電磁波は下記式(4)~(7)にある Maxwell 方程式によって記述される。

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

式(8)の ϵ, μ, σ はそれぞれ媒質の誘電率、透磁率、導電率を表す。また式(5)の ρ は媒質中にある電荷密度を表すが、ピルボックス内部の電場を考慮するため、真空中で媒質内に何も無い条件から始め、 $\rho = 0$ として計算を始める。式(6)及び式(7)の回転を取り、式(4),(5),(8)を代入し、変形することで下記、

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} &= \sigma \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{H} &= \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (9)$$

という式(9)の波動方程式が出てくる。図2の円筒空洞が完全導体で作られているとして、中が真空である場合($\sigma=0$)とする。円筒空洞内には $z=0$ と $z=d$ で z 軸方向で磁場が $0(H_z=0)$ である TM モード (Transverse Magnetic Mode) と電場が $0(E_z=0)$ である TE モード (Transverse Electric Mode) の2つの場合の解が得られる。

具体的にはここでは図2にあるように円柱座標 (r, θ, z) を用いて、 r, θ 成分と z 成分を以下のように分ける。

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_0(r, \theta) \exp(i\omega t - ik_z z) \\ \vec{H} &= \vec{H}_0(r, \theta) \exp(i\omega t - ik_z z)\end{aligned}\quad (10)$$

$$\nabla^2 = \nabla_r^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\quad (11)$$

とビームが進行する z 方向とそれ以外の transverse 方向に微分を分け、進行方向は電磁波は時間的に正弦波 $\exp(i\omega t)$ の時間成分を持っていると同時に $\exp(-ik_z z)$ で伝搬するものと仮定する。 ω は共振器内で立つ共振周波数となる。これから式(10)、(11)を式(9)に代入すると、

$$\begin{aligned}(\nabla_r^2 - k_z^2)\vec{E}_0(r, \theta) &= -\omega^2 \epsilon \mu \vec{E}_0(r, \theta), \\ (\nabla_r^2 - k_z^2)\vec{H}_0(r, \theta) &= -\omega^2 \epsilon \mu \vec{H}_0(r, \theta)\end{aligned}\quad (12)$$

となる。ここで、横方向でも共鳴条件があるため、横方向だけの微分を式(13)のように独立な波動方程式として、

$$\begin{aligned}\nabla_r^2 \vec{E}_0(r, \theta) &= -k_c^2 \vec{E}_0(r, \theta) \\ \nabla_r^2 \vec{H}_0(r, \theta) &= -k_c^2 \vec{H}_0(r, \theta)\end{aligned}\quad (13)$$

とみなし、計算することで、空洞内の電場の計算を行う。ここで、式(12)及び式(13)から

$$\omega^2 \epsilon \mu = k_c^2 + k_z^2\quad (14)$$

の関係式が成り立つことになる。

$$\begin{aligned}r=a \text{ で } E_\theta &= 0, \quad E_z = 0 \\ z=0, d \text{ で } E_r &= 0, \quad E_\theta = 0\end{aligned}$$

として、計算を行う。(10),(13)式から、時間成分を除いた形で書くと下記の式(15),(16),(17)となる。

・ TM mode

$H_z = 0$ とすると、TM_{mnp} モードの解は、

$$\begin{aligned}E_r &= -\left(\frac{p\pi}{k_c d}\right) E_{mnp} J_m'(k_c r) \cos(m\theta) \sin(k_z z), \\ E_\theta &= -\left(\frac{mp\pi}{k_c^2 r d}\right) E_{mnp} J_m(k_c r) \sin(m\theta) \sin(k_z z), \\ E_z &= E_{mnp} J_m(k_c r) \cos(m\theta) \cos(k_z z), \\ H_r &= -\left(\frac{i\omega \epsilon m}{k_c^2 r}\right) E_{mnp} J_m(k_c r) \sin(m\theta) \cos(k_z z), \\ H_\theta &= -\left(\frac{i\omega \epsilon}{k_c}\right) E_{mnp} J_m'(k_c r) \cos(m\theta) \cos(k_z z), \\ H_z &= 0\end{aligned}\quad (15)$$

・ TE mode

$E_z = 0$ とすると、TE_{mnp} モードの解は、同様に

$$\begin{aligned}E_r &= \left(\frac{i\omega \mu m}{k_c^2 r}\right) H_{mnp} J_m(k_c r) \sin(m\theta) \sin(k_z z), \\ E_\theta &= -\left(\frac{i\omega \mu}{k_c}\right) H_{mnp} J_m'(k_c r) \cos(m\theta) \sin(k_z z), \\ E_z &= 0, \\ H_r &= -\left(\frac{p\pi}{k_c d}\right) H_{mnp} J_m'(k_c r) \cos(m\theta) \cos(k_z z), \\ H_\theta &= -\left(\frac{mp\pi}{k_c^2 r d}\right) H_{mnp} J_m(k_c r) \sin(m\theta) \cos(k_z z), \\ H_z &= H_{mnp} J_m(k_c r) \cos(m\theta) \sin(k_z z),\end{aligned}\quad (16)$$

TM モード、TE モードの電磁場において式(15)中の m, n, p はそれぞれ θ, r, z 方向の定在波の節の数を表している。また、この境界条件から

$$(TM \text{モード}) \quad k_c = \frac{\rho_{mn}}{a}, \quad k_z = \frac{p\pi}{d}\quad (17)$$

$$(TE \text{モード}) \quad k_c = \frac{\rho'_{mn}}{a}, \quad k_z = \frac{p\pi}{d}$$

となる。ここで $J_m(x), J_m'(x)$ は m 次のベッセル関数とその微分であり、図3のような関数の形をしている。 ρ_{mn}, ρ'_{mn} は $J_m(x)=0, J_m'(x)=0$ の n 個目の解をそれぞれ示している。

「問1」：式(15),(16),(17)を導け。([6],[10]参照)

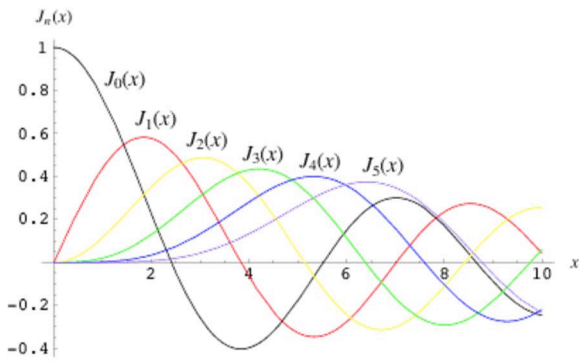


Fig. 3 Bessel 関数 [11]

空洞の各モードの共振周波数 f は式(14),(17)から TM モード, TE モードでそれぞれ

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\rho_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}, \quad f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\rho'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (18)$$

となる。

加速に使用するモードはここでは TM_{010} モードである。 $m=0, n=1, p=0$ とおくと、下記のように

$$\begin{aligned} E_r &= E_\theta = 0, \\ E_z &= E_0 J_0(k_c r), \\ H_r &= H_z = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

$$H_\theta = -\left(\frac{i\omega\epsilon}{k_c}\right) E_0 J_0'(k_c r),$$

となる。図 4 に TM_{010} モードの電場と磁場を HFSS[12][13]で計算した例を載せる。電場は $r=0$ で最大となるため、このモードが加速電場には最適なモードとなっている。また、磁場は電場に対し、90度の位相関係にあり、電場を取り囲む形で回転している。z軸上では0である。

共振周波数は空洞径 a のみに依存し、式(20)のように書ける。

$$f_0 = \frac{c\rho_{01}}{2\pi a} \quad (20)$$

ここで $\rho_{01} = 2.405$ である。

実際には空洞はビームを通すため、ビームパイプを z 方向の前後につける。このビームパイプの Cutoff 周波数 f_c はビームパイプ径 a_0 とすると

$$f_c = \frac{k_c}{2\pi} = \frac{\rho_{mn}}{2\pi a_0}, \quad f_c = \frac{k_c}{2\pi} = \frac{\rho'_{mn}}{2\pi a_0} \quad (21)$$

と TM モードと TE モードでなる。共振モードが f_c より低いときは空洞内で共鳴するが、 f_c より、共振周波数が高いときには、式(13)より、共振で

はなく、減衰解となり、共振周波数のモードはビームパイプへしみ出し、減衰することになる。加速モードのみを空洞内に閉じ込め、ビーム加速の邪魔になる高次モード（高調波）をビームパイプ外に取り出すように設計を行うのが、一つの味噌にである。

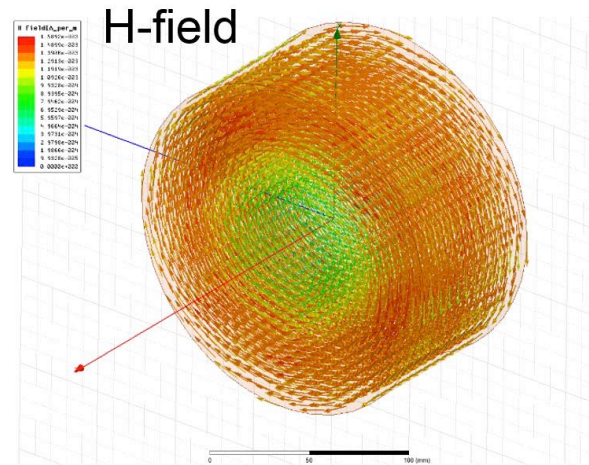
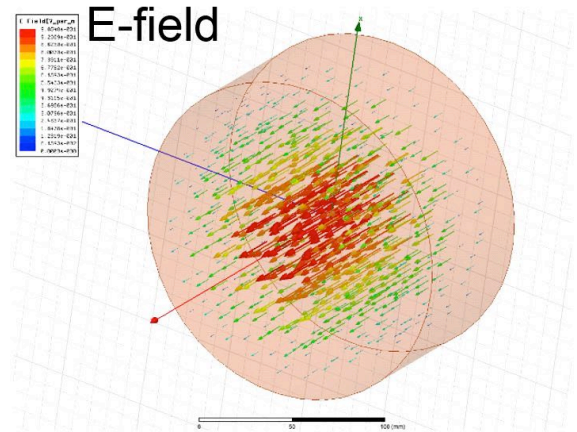


Fig. 4 加速モードである TM_{010} モードの電場分布 (上) 及び磁場分布 (下)

加速電圧 V_c は空洞内 ($z=0 \sim d$) をビームが通る間に与えられるものであるが、式(10)にあるように空洞内の電磁場は時間によって変化している。我々はそのため、ビームが空洞中心に達した時に電場が最大になるようにタイミングを合わせ、ビーム加速を行う。したがって、実際の加速電圧 V_c は式(22)に示される形となる。(ビームは相対論的には $\beta \approx 1$ で光速 c で空洞内を通過すると仮定している。)

$$V_c = \left| \int_0^d E_0 \exp(ikz) dz \right| \quad (22)$$

この実際の加速電圧と電場の比率として、T (Transit Time factor)を導入すると

$$T = \frac{\left| \int_0^d E_0 \exp(ikz) dz \right|}{\left| \int_0^d E_0 dz \right|} = \frac{V_c}{E_0 d} \quad (23)$$

と定義でき、実際の設計では最大電場の計算に gap d とさらにこの transit time factor を計算し、空洞の加速電圧を求めている。加速勾配 E_{acc} は

$$E_{acc} = \frac{V_c}{d} = E_0 T \quad (24)$$

となり、最大電場に transit time factor T をかけたものとなる。具体的に TM₀₁₀ モードでは

$$T = \frac{\sin(\pi/2)}{\pi/2} = 0.637 \quad (25)$$

が得られる。

2.2.2. シャントインピーダンスと Q 値

空洞内に貯えられるエネルギーを最大限加速電圧に与えることが空洞設計上重要である。特に式(2)に示すように加速電圧に対し、空洞ロスをいかに抑えるかが設計のポイントである。

空洞内では共振条件が成り立ち蓄積エネルギー U は投入パワーに対し、格段に増幅され、高い加速電圧を得ることが可能となっている。このような共鳴状態での蓄積エネルギー U と、空洞壁ロス P_c との関係は無負荷 Q 値(Unloaded Q)と呼ばれる式(26)の関係式

$$Q_o \equiv \omega \frac{U}{P_c} = \omega \frac{\mu \int_V H^2 dV}{R_s \int_S H^2 dS} = \frac{\Gamma}{R_s}, \quad (26)$$

$$\Gamma = \omega \mu \frac{\int_V H^2 dV}{\int_S H^2 dS} \quad (27)$$

のように定義される。 R_s は空洞壁での表面抵抗を示しており、表面では一様だと仮定している。その時には表面抵抗 R_s と Q 値との関係は式(27)に示す Γ によって記述される。 Γ は内部の磁

場分布の体積分に対する空洞壁面の表面磁場の積分の比率であり、空洞の材質や大きさ(周波数)に依らないものであり、形状因子(Geometrical factor)と呼ばれている。

TM₀₁₀ モードの Γ は式(17),(19),(27)から

$$\Gamma = \frac{\omega \pi \epsilon a^2 d E_0^2 J_1^2(\rho_{01})}{\mu / \epsilon 2 \pi E_0^2 a(a+d) J_1^2(\rho_{01})} = \frac{\rho_{01} \pi}{2(\rho_{01} + \pi)} Z_0 \quad (28)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{k_c}{\omega \epsilon} \quad (29)$$

$$d = \lambda/2 \quad (30)$$

となり、大きさに依らない形となっている。 Z_0 は真空中では 377Ω なので、TM₀₁₀ モードでは

$$\Gamma = 257 \Omega \quad (31)$$

となる。

シャントインピーダンスと Q 値との比 R/Q は式(2)と(26)より、

$$\frac{R}{Q} \equiv \frac{V_c^2}{\omega U} \quad (32)$$

と書けるが、これも空洞の材質に依存しない値である。具体的に TM₀₁₀ モードでは、

$$\frac{R}{Q} = \frac{E_0^2 T^2 d^2}{\frac{1}{2} \omega \pi \epsilon a^2 d E_0^2 J_1^2(\rho_{01})} = \frac{2 T^2 Z_0}{\rho_{01}^2 J_1^2(\rho_{01})} \quad (33)$$

となり、これも材質や形状によらないパラメータとなる。 $J_1(\rho_{01}) = 0.519$ と式(25)より、

$$\frac{R}{Q} = 197 \Omega \quad (34)$$

となる。シャントインピーダンス R_{sh} は式(2)を書き直した式(35)を示すが、式(27),(32)が空洞の設計を決める上で重要なパラメータとなる。

$$R_{sh} \equiv \left(\frac{R}{Q} \right) \cdot Q_0 = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (35)$$

表面抵抗 R_s は空洞材料に依存する。常伝導空洞では高周波が金属内面立つ場合、金属表面に垂直な $\sigma \gg \varepsilon$ のような良導体では導体の表面からの侵入方向を x とすると、電場は式(8)とより、

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} = \sigma\mu \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (36)$$

とかけると。この解は

$$E_x = E_0 \exp(i\omega t) \exp\left(-\left(\frac{1+i}{\delta}\right)x\right) \quad (37)$$

の減衰解となる。ここで δ は表皮厚み (skin depth) と呼ばれ、表面に流れる変位電流が流れる表皮の厚みを表したものであり、式(36)から

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (38)$$

であらわされる。表面抵抗 R_s は常伝導空洞の場合、

$$R_s = \frac{1}{\delta\sigma} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (39)$$

となる。具体的には常伝導空洞で Q 値は式(39)の逆数となるため、 $\omega^{-1/2}$ に比例する。そのため、シャントインピーダンス R_{sh} は式(35)から同様に $\omega^{-1/2}$ に比例することになる。但し、空洞周波数は空洞直径及び長さに反比例するため、単位長さあたりの R_{sh} は $\omega^{1/2}$ に比例することになる。空洞の周波数が高いほど、単位長さあたりのシャントインピーダンスが高くなるため、常伝導で加速する際にはより高い周波数の加速空洞の作成が望まれる。これが C バンド、X バンドなどのより高い周波数帯を用いた常伝導空洞 linear collider 計画の始まりである[14]。超伝導空洞ではこの表面抵抗 R_s の傾向が違う。常伝導空洞との違いを次の 2.3 節にて説明する。

2.3. 超伝導加速空洞の性能を決めるもの

さて、超伝導加速空洞に関しては第 1 章でその歴史を簡単に述べたが、ここでは超伝導の簡単な歴史とその基本的なパラメータについて述べた後、常伝導空洞と超伝導空洞での性能の違い、及び実際に空洞製作上、超伝導空洞の性能をリミットする現象について述べる。

2.3.1. 超伝導状態と超伝導材料

ここではまず超伝導の基本的なパラメータを述べる[17]。超伝導には 2 つの特徴がある。一つはある温度以下になると抵抗が 0 になる現象である。この温度を臨界温度 T_c と呼ぶ。もう一つは与えられた外部磁場に対し、超伝導材内では逆向きに同じ磁場 ($-M$) が発生し、外部磁場が超伝導内部に入らない完全反磁性が生じる現象である。この効果のことをマイスナー効果と呼び、超伝導が保持される外部磁場の最大値を臨界磁場 H_c と呼んでいる。特に H_c と T_c の間には

$$H_c(T) = H_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right) \quad (40)$$

の関係式がある。現在までの超伝導の発展の様子を図 5 に示す[15]。この $H_c(0)$ が高いものほど超伝導空洞の材料としては望ましいが、これらのうち、 $H_c(0)$ が一つである第一種超伝導体と $H_c(0)$ が 2 つある第二種超伝導体の大きく 2 つに分かれる。

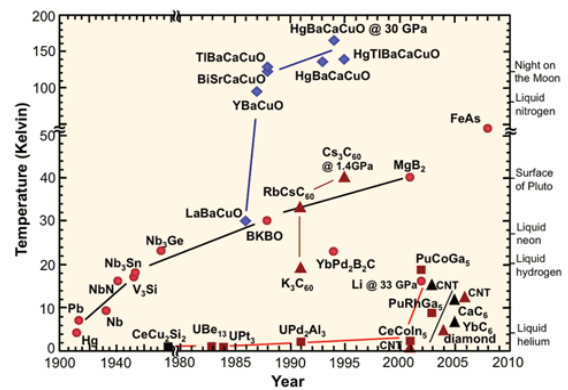


Fig. 5 超伝導の発展の様子 [15]

もう少し詳しく説明すると、超伝導体に外部から磁場がかかると、

$$B(x) = B_0 \exp(-x/\lambda_L) \quad (41)$$

だけ、超伝導内部に侵入する。この侵入長 λ_L をロンドン長といい材料ごとに異なっている。それに対し、超伝導の内ではクーパ対が形成されており、そのクーパ対の超伝導電子密度関数(秩序パラメータ) $\Psi(x)$ の変化を示した量が coherence length ξ と呼ばれ、BCS 理論より、

$$\xi = \frac{\hbar v_F}{\pi \Delta(0)} \quad (42)$$

とあらわされる。 $(\Delta(0))$ はギャップエネルギー、 v_F はフェルミ速度、 \hbar はプランク定数 h を 2π で割ったものを表す。)外部磁場 H_e は λ_L 程度超伝導体内に侵入するが、これで完全に磁場を排除するよりも、単位面積当たりで $(\mu_0/2)\lambda_L H_e^2$ だけ磁気エネルギーを得している。それに対し、表面では ξ の深さ分磁場の侵入を許し、常伝導になるため、単位面積あたり $(\mu_0/2)\xi H_e^2$ だけ蓄えたエネルギーを放出することになる。したがって、この表面でのエネルギー G_{sur} は

$$G_{sur} = \frac{\mu_0}{2} (\xi H_e^2 - \lambda_L H_e^2) \quad (43)$$

となり、界面近くでは外部磁場 H_e が内部磁場 H_c 程度になり、 $\xi > \lambda_L$ の時は界面の面積をなるべく小さくしようとして、磁場の侵入を表面程度 λ_L に留めようとする。但し、ある臨界磁場 $H_c(0)$ になると超伝導状態が全て壊れる。それに対し、 $\xi < \lambda_L$ の場合には磁場が侵入するが、それに対し、エネルギーとしては得をするので、 $H_c(0)$ に到達するまえに磁場が侵入する。したがって、最初に侵入を始める磁場 $H_{c1}(0)$ と完全に超伝導状態が壊れる臨界磁場 $H_{c2}(0)$ の2つが存在する。正確には $\lambda_L/\xi < 1/\sqrt{2}$ の時を第1種超伝導体、 $\lambda_L/\xi > 1/\sqrt{2}$ の時を第2種超伝導状態として定

義している[17]。このような2つある第2種超伝導体では $H_{c1}(0) < H < H_{c2}(0)$ の磁場では磁場の一部が超伝導に入っているが、超伝導状態が保たれている状態になる。この超伝導体に入る磁束は磁束の最少単位である

$$\phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} T \cdot m^2 \quad (44)$$

の量子磁束の形で超伝導体にトラップされる (h はプランク定数、 e は素電荷を表す)。この効果のことをピンニング効果とよび図6に示すように外部磁場が $H_{c2}(0)$ になるまでこの量子磁束の個数が増えていくことになる。(詳細[17]参照。)

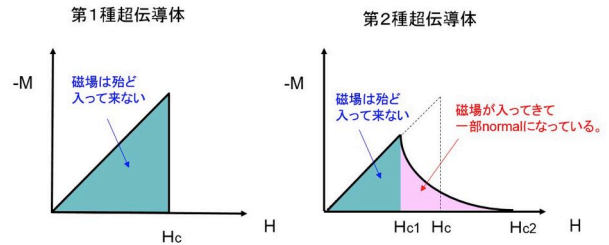


Fig. 6 第1種超伝導体と第2種超伝導体

第一種超伝導材は主に金属単体で Pb, In, Sn がその代表例であるが、 Nb は例外的に第2種超伝導体である。 ξ は物質内のフェルミ速度 v_F と関係しており、基本的に不純物が多いほど、邪魔者が多くなり ξ は小さくなるため、化合物で超伝導体となるものは殆どが第2種超伝導体である。表1は代表的な超伝導材料のパラメータである。

Table 1 代表的な超伝導体のパラメータ[18]

材料	Tc (K)	Hc(0) [Oe]	Hc1(0) [Oe]	Hc2(0) [Oe]	λ_L [nm]
Pb	7.2	800	--	--	48
Nb	9.2	2000	1700	2400	40
Nb ₃ Sn	18	5400	500	300000	85
NbN	16.2	2300	200	150000	200
MgB ₂	40	4300	300	35000	140
YBCO	93	14000	100	1000000	150

基本的に超伝導空洞の材料としては Nb (ニオブ)が使われている。その理由としては、他の材料に比べ、非常に高い $H_{c1}(0)$ を持っており、それに

より、高い加速勾配を高いQ値のまま、実現することによるものである。近年では図5にあるように1986年以降 T_c が非常に高い高温超伝導材、特にYBCOなどで液体窒素温度以上でも超伝導材になる材料が得られたが、表1に示すように $H_c(0)$ がある程度高いが $H_{c1}(0)$ が低く、さらに高い磁場に対し R_s が急速に大きくなったため、高い加速勾配ではそれによるQ値の低下を招きやすい。またYBCO系統は材質としては瀬戸物に近く割れやすいため、加工上も空洞製作や周波数調整など問題となった。現在では基本的に我々は純度の高いNbを用いて空洞の製作を行っている(Pbは加工性が悪い)。それ以外に表1のMgB₂やNb₃Snによる開発が進んでいるが、特に近年ではNb₃Snの開発の進展はみられている。これらに関する開発については(時間が許せば)第5章にて、説明を行う。

2.3.2. 超伝導加速空洞の表面抵抗

超伝導加速空洞の表面抵抗 R_s は式(45)

$$R_s = R_{BCS} + R_{res} \quad (45)$$

にあるようにBCS理論で決まる部分 R_{BCS} と残留抵抗で決まる部分 R_{res} に分けられる。このうち R_{BCS} は

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T}\right) \quad (46)$$

と与えられる。 k_B はボルツマン定数、 $\Delta(0)$ は $T=0K$ でのギャップエネルギーである。係数A及び $\Delta(0)$ は各物質によって決まり、Nbに関しては $T < T_c/2$ において式(47)に示す半実験式が使える[16][20]。

$$R_{BCS} = 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T} \left(\frac{f}{1.5}\right)^2 \exp\left(-\frac{17.67}{T}\right) \quad (47)$$

周波数 f はGHzが単位であり、温度はKが単位である。超伝導加速空洞ではBCS抵抗が支配的である時、Q値は式(39)の逆数となるため、 ω^{-2}

に比例する。そのため、シャントインピーダンス R_{sh} は式(35)から同様に ω^{-2} に比例することになる。但し、空洞周波数は空洞直径及び長さに反比例するため、単位長さあたりの R_{sh} は ω^{-1} に比例することになる。これは常伝導空洞と違い、周波数が低いほど、シャントインピーダンスが高くなることを示す。現在到達している R_{res} は10~20nΩ程度であることを考慮し、式(35)から周波数に対する単位長さあたりのシャントインピーダンスを計算した(図7)。

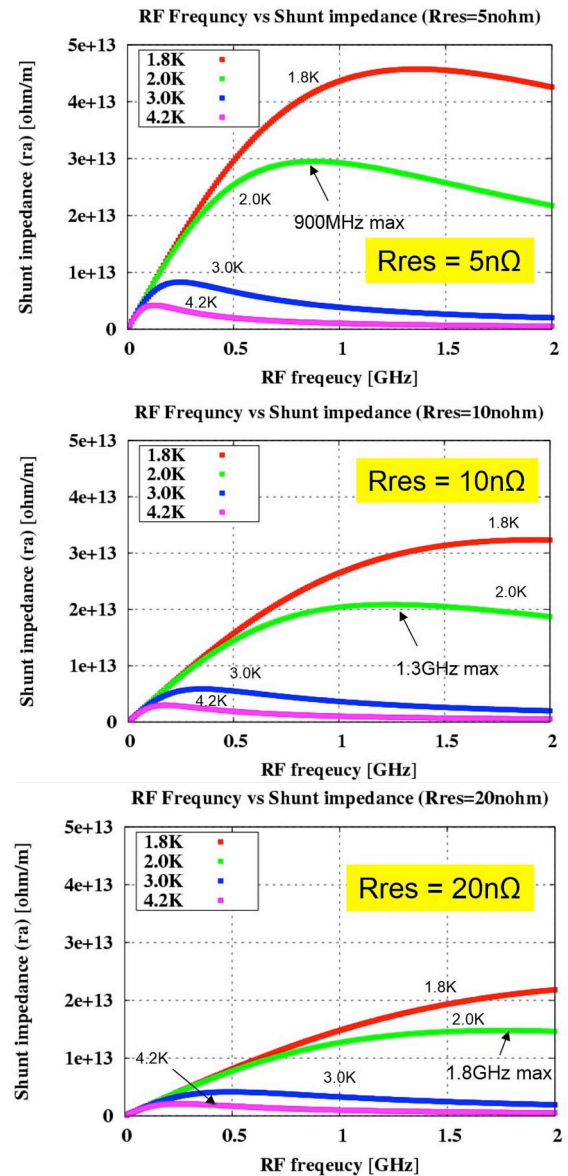


Fig. 7 $R_{res}=5n\Omega$ (上), $10n\Omega$ (中), $20n\Omega$ (下) に対するピルボックス超伝導加速空洞の単位長さあたりの R_{sh} の振る舞い。

オペレーション温度は 1.8 K, 2 K, 3 K, 4.2 K の場合を考慮し、式 (35),(45),(47) から $R_{res} = 5n\Omega, 10n\Omega, 20n\Omega$ の場合をプロットした。 R_{res} が下がれば下がるほど、そして温度が下がれば下がるほど、全体としてシャントインピーダンスが上がるのがわかるが、共振周波数に対するピーク値が R_{res} に対し、異なることがわかる。例えば 2K の場合、 $R_{res} = 5n\Omega$ では 900 MHz、 $R_{res} = 10n\Omega$ では 1.3 GHz、 $R_{res} = 20n\Omega$ では 1.8 GHz で単位長さあたりのシャントインピーダンスが一番大きいことがわかる。我々は $R_{res} = 10n\Omega$ と見積もり、1.3GHz を共振周波数とし、2K で運転することを選んでいる。図 8 は実際、我々の ERL 主加速器用 9 セル Nb 超伝導加速空洞の温度に対する表面抵抗 R_s の測定結果をプロットしたものである。

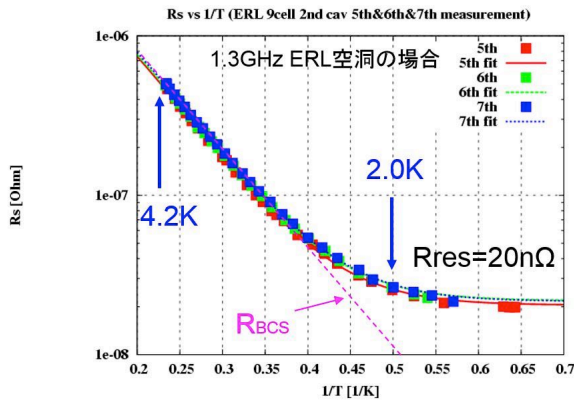


Fig. 8 ERL 主加速器超伝導空洞の表面抵抗と温度の関係。横軸は $1/T$ 、縦軸は R_s を表す。

4.2K では R_s が $400n\Omega$ で BCS 抵抗が支配的なのに対し、2K 近くまでくると BCS 抵抗は小さくなり、残留抵抗 R_{res} が支配的なのが見える。このように BCS 抵抗が支配的である 4.2K を冷凍機の運転温度と決めた際は、図 7 では周波数が低いほどシャントインピーダンスが大きい。 R_{res} は実際は $20n\Omega$ であったが、それでも Q 値で 1.5×10^{10} 程度の値であり、常伝導空洞に対し、 10^6 倍以上の非常に大きな Q 値が超伝導加速空洞では得られていることがわかる。

この残留抵抗 R_{res} は理想的には 0 であるべきなのだが、様々な理由で図 8 に示すように有限な値が残り、この値の選択が空洞設計、特に図 7 に示

すように空洞共振周波数、オペレーション温度に対し、大きな影響を与える。主な理由の一つは前節にて示した外部磁場の影響による残留磁場のピンニング効果によるトラップである。

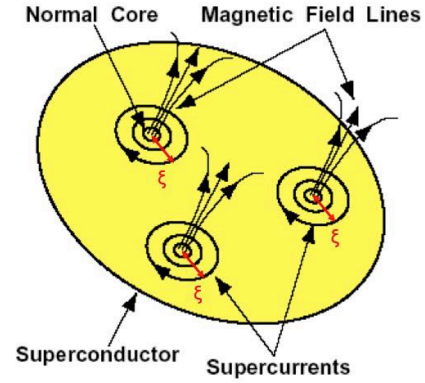


Fig. 9 ピニング効果による超伝導体の様子[16]

図 9 に空洞表面で磁場がトラップされた際の様子を示す。ピンニングにより、磁場がコヒーレント長の範囲 $\pi\xi^2$ にトラップされ、その部分が常伝導状態となっているのがわかる。面積 A の部分にトラップされた磁束は具体的には図 9 に示すように N 本の量子磁束 ϕ_0 の塊となり、

$$A\mu_0 H_{ext} = N\phi_0 \quad (48)$$

となる。常伝導状態の Nb の抵抗を R_n とすると、磁場トラップによる残留抵抗 R_{mag} は

$$R_{mag} = N \frac{\pi\xi^2}{A} R_n = \frac{H_{ext} \pi\xi^2 \mu_0 R_n}{A} \quad (49)$$

となる。第 2 種超伝導体では上部臨界磁場と量子磁束とコヒーレント長との関係は

$$H_{c2} = \frac{\phi_0}{2\pi\mu_0\xi^2} \quad (50)$$

の関係式があるため、

$$R_{mag} = \frac{H_{ext}}{2H_{c2}} R_n \quad (51)$$

の関係式が得られる。つまり、外部磁場に対し、残留抵抗 R_{mag} は比例する。Nb に関しては表 1 と $RRR = 300$ と仮定すると 1GHz で $R_n \approx 1.5m\Omega$ であることから、下記近似式

$$R_{mag} = 0.3(n\Omega)H_{ext}(mOe)\sqrt{f(GHz)} \quad (52)$$

が得られる。常伝導成分なので、式(39)と同様抵抗値は $\omega^{1/2}$ に比例する。ここで、 RRR (トリプルアール) は下記で定義される低温 $\rho(T_c)$ と常温 $\rho(300K)$ の常伝導時の抵抗率の比である。

$$RRR = \frac{\rho(300K)}{\rho(T_c)} \quad (53)$$

である。低温では常伝導の抵抗が低くなるが、高い RRR を得るためには不純物(Ta など)が無い状態の Nb を作成することが重要である[21]。

また、このトラップは常伝導から超伝導にかわる温度 T_c での DC 磁場がそのまま超伝導に変わる際にトラップされることになる。地磁気が 500mOe であることを考えると何も磁気シールドをしない状態では 1.3GHz の場合は $R_{mag} = 171ln\Omega$ となり、何もしないとこの値では $Q_0 \approx 10^9$ となる。 $Q_0 \approx 10^{10}$ 近い高い Q 値を得るためには 10mG 以下に抑えるような適切な磁気シールドの設計がクライオモジュールでは必要となる。なお、図 8 の測定の際はクライオスタット全体にわたって 10mG 以下に抑えた磁気シールドのもとで行っている。

2.3.3. 空洞性能のリミット

超伝導空洞の性能は理論的には、式(40)で示される臨界磁場によって決められるが、理論的な限界とは別に空洞の製作や表面処理、組立の不具合により、理論限界より下で空洞性能がリミットされる場合がほとんどである。図 10 は理想的な場合に対し、具体的にどのような現象でリミットされているかを示した模式的な図である。横軸に空洞の加速勾配、縦軸に Q 値をプロットしており、加速勾配が臨界磁場で決まる上限まで Q 値が変わらない状態が維持されるのが理想的である。加速勾配を高くするにつれ、Q 値の劣化が起こったり、加速勾配が臨界磁場まで到達しないことが見

られる。そのため、我々は事前に空洞単体の性能評価試験(縦測定)を行い、空洞性能をチェックするのであるが、この性能をリミットする原因として、①マルチパクティング(multipacting)、②熱的破壊(quench)、③電界放出(field emission)、④Q-disease の 4 つの現象が今まで主に見られている。実際の超伝導加速空洞における空洞性能を決める上記の物理的現象についてここでは述べていく。

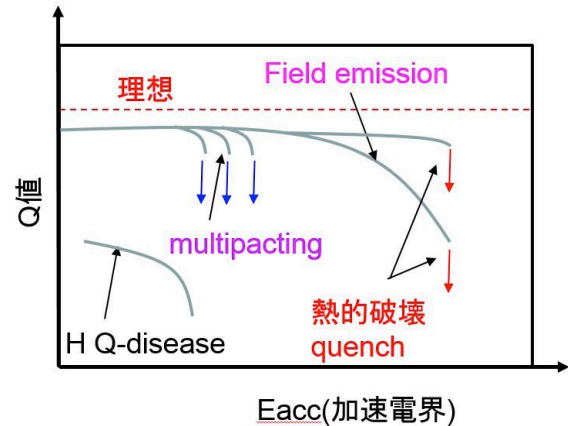


Fig. 10 空洞性能を決める様々な現象。
(測定の評価としての Q-E curve)

2.3.3.1. マルチパクティング(Multipacting)

空洞の性能を制限する現象にマルチパクティングがある。これは空洞表面の電場の強い場所で放出された電子が高周波中を運動し、同じ場所に戻り、2次電子を放出し、衝撃が大きい時、繰り返して起こることで局所的に電子が増幅し、超伝導状態の破壊が起こる現象である。

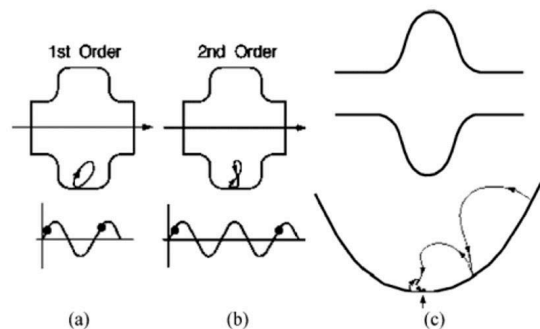


Fig. 11 ピルボックス内の 1 次(a)及び 2 次(b)の multipacting の様子[16]。楕円型空洞による multipacting の改善の効果 (c)。[22]

図 11(a),(b)は1次及び2次のマルチパクティングの現象を示したものである。図 11(a),(b)に示すように超伝導加速空洞の開発当初はピルボックスの形状で Nb の超伝導加速空洞の製作を行ってきたが、このマルチパクティングにより、空洞が2~3MV/m でリミットした。この改善として、図 11(c)に見られる楕円型の空洞が提案された[22]。高電場で放出された電子は同じ場所に戻らず、エネルギーを失いながら、やがて一番半径の大きい赤道部にトラップされるため、増幅が起こらないのが特徴である。現在のピルボックススペースの加速空洞はこのような楕円形状をした加速空洞になっており、multipacting による制限はほぼなくなった。但し、最近の陽子やイオン加速用の超伝導加速空洞ではより複雑な空洞形状になり、このマルチパクティングをいかに抑えるかが課題となっている。現在は HFSS[12],MW-studio[23]や fishpact[24]などで RF 計算と合わせ multipacting の詳細な simulation を行うことが可能である。

2.3.3.2. 熱的超伝導破壊(Thermal Breakdown)

超伝導加速空洞に一定の field を立てている時、空洞内のある1か所が常伝導に相転移するとその場所の抵抗が、 $R_{NC} / R_{SC} \approx 10^5$ 程度であることから、表面磁場によるロスが一気に 10^5 程度上昇し、空洞全体に発熱が広がり、超伝導破壊が起きる。発熱が起きる大きさがどれくらいで問題になるかを単純に理解するために図 12 のようなシンプルなモデルを考える。

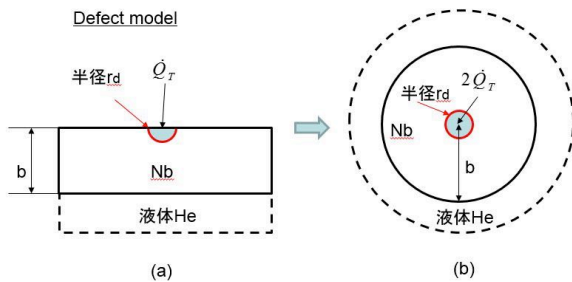


Fig. 12 半径 r_d 部が常伝導で発熱がある時。

半径 r_d 部が図 12(a)のように常伝導になり、発熱が磁場 H により、 \dot{Q}_T の発熱が起こるとすると

$$\dot{Q}_T = \frac{1}{2} R_n H^2 \pi r_d^2 \quad (54)$$

と書ける。これに対し、図 12 の(a)のように Nb の板厚を b として、その周りが液体 He 温度 T_b になっている場合これは図 12(b)のモデルと等価に考えることができる。Nb の熱伝導率を κ とすると、

$$2\dot{Q}_T = -4\pi r^2 \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \quad (55)$$

と書くことができる。これを $r=r_d$ から $r=b$ まで積分し、式(54)を代入し \dot{Q}_T を消し、中心温度を臨界温度の T_c としたときの、磁場の最大値 H_{\max} は式(56)のように書くことができる。

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{4\kappa(T_c - T_b)}{r_d R_n}} \quad (56)$$

「問2」: 式(56)を式(54),(55)から導出せよ。[4][16]

He 液温度 T_b が 2K であるとし、 r_d が $50 \mu\text{m}$ 、また常伝導部が大体 $R_n = 10\text{m}\Omega$ であるとするとき、 $RRR = 300$ の場合の Nb の熱伝導率 κ は $75\text{W}/(\text{mK})$ であるので、 $H_{\max} = 826\text{Oe}$ となり、臨界磁場 $H_c = 2000\text{Oe}$ の約 $2/5$ 程度の field しか到達しないことになる。磁場が一番強い赤道部にこのような不純物が混ざると特にこの熱的超伝導破壊によるクエンチが顕著であり、どう頑張っても、式(56)で決めた磁場でできる加速勾配以上には上がらない。このように常伝導材が $50 \mu\text{m}$ 程度混ざっていることだけで、熱的超伝導破壊のリミットが格段に小さくなるのがわかる。いかに不純物のない Nb 材を作成することが重要である。

もう一つの熱的破壊のモデルとしては、純粋に Nb 内面の磁場の大きい赤道部に凹みなど局所的なピットなどがあつた場合に熱的超伝導破壊が顕著に表れる。これは磁場がピットの形状に合わせて、本来あるべき磁場より局所的に増幅されて通常の臨界磁場に到達するまえに増幅された磁場によりリミットされるからである。図 13 に簡単にピットの形状を模擬して傾向を計算したものを示す[25]。

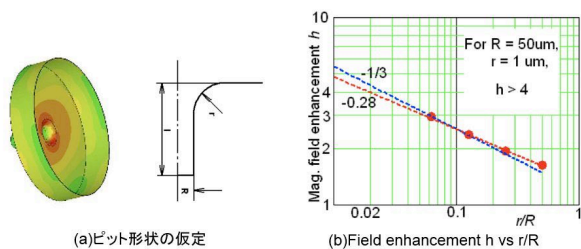


Fig. 13 ピット形状と磁場の増幅因子 h との関係を表した図。[25]

ピットの深さが深くその半径を R としてそれに対し、ピットの淵が図 13(a)のように半径 r でカーブを形成しているものとする。この形状に対し、磁場の増幅因子を h としたとき、 h と r/R のラフな関係の計算結果をしめしたものが図 13(b) があるが、磁場は半径 r の場所で一番増幅されるがその増幅因子 h は

$$h \approx \left(\frac{r}{R}\right)^{-1/3} \quad (57)$$

の傾向がある。ピットの大きさが大きいだけでなく、ピットのエッジがよりシャープである時に磁場が増幅される。例えば $R=50 \mu\text{m}$ に対し、エッジが $r=1 \mu\text{m}$ である場合には $h>4$ となり、この場合には臨界磁場の $1/4$ で熱的超伝導破壊が起きってしまう。この形状をより詳細に計算した結果は参考文献[26]に記載されているが、いずれにせよ、表面にマイクロな穴やピットがあるだけで、理想的な加速勾配には到達せず、はるか低い加速勾配でリミットされるというのが、このピットによる効果である。すなわち、熱的破壊は常伝導材のマイクロの異物の混入だけでなく、マイクロな形状変化に非常に敏感であり、空洞表面をなめらかに表面処理することがいかに重要であるかがわかる。これらに対する空洞製作や表面処理などは第 4 章にて述べる。

2.3.3.3. 電界放出(Field Emission)

電界放出は局所的に放出された電子が加速電場の増加にともなう、指数関数的に増幅し、それらが、空洞内を加速し、空洞からエネルギーを奪うと同時に電子による放射線を発生する現象である。特に加速された電子が空洞内面に衝突した場合は局所的に発熱し、それによるクエンチが起きる。Field emission 電流は Fowler-Nordheim の

関係式から計算可能である[27]。それを空洞内の表面電場 E_{surf} に対し、RF field の変化 $\sin(\theta)$ を考慮したものが式(58)になる。

$$J_0 = A_{FN} \frac{(\beta_{FN} E_{surf} \sin(\theta))^2}{\Phi} \exp\left(-\frac{B_{FN} \Phi^{1.5}}{\beta_{FN} E_{surf} \sin(\theta)}\right) \quad (58)$$

J_0 は field emission 電流密度を表し(A/m^2)の単位である。 Φ は Nb の仕事関数であり 4.36eV である。 $A_{FN}=1.54 \times 10^{-6}$ 、 $B_{FN}=6.83 \times 10^9$ である。 β_{FN} は電場の増幅因子である。

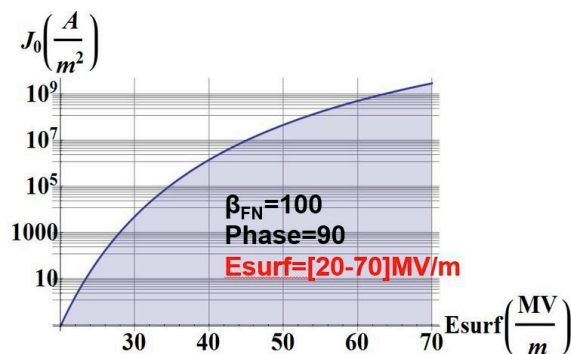


Fig. 14 E_{surf} vs field emission 電流密度[28]

図 14 に Nb の場合での計算結果を示す。 $\beta_{FN}=100$ とし、 $\theta=90$ 度の最大の場合を plot した。図 14 に示すように表面電場に対し、指数関数的に電流密度が増幅しているのがわかる。特に field emission 電流の各 phase と各 field emission 源の分布毎の詳細な電子ビームの軌道計算結果を図 15 に示す。

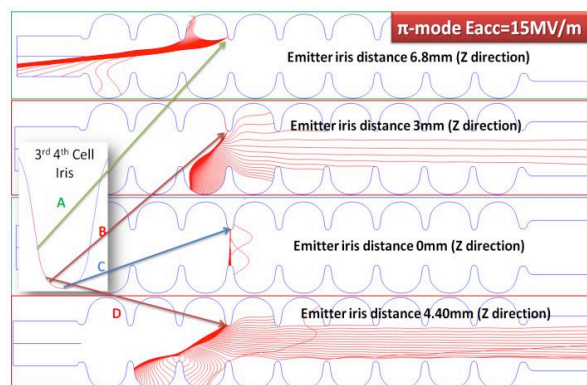


Fig. 15 ERL9 セル空洞にて field emission 源を iris 付近に置いた際の電子の軌道の様子。[28]

計算には我々の製作した ERL 9cell 空洞の形を使い、fishpact で field emission 源を図 15 の空洞の電場の高いくびれの部分 (iris 部) の各 A,B,C,D に置いた場合で電子がどのような trajectory を描くかを計算した。加速電場を 15MV/m としているが、我々の空洞の場合は $E_{surf}/E_{acc}=3$ と高く iris 部では $E_{surf}=45\text{MV/m}$ となっている。Iris 部の中央 C の場合では電子は対面にしかどの phase の場合でもビームパイプ方向に飛んでいかないのに対し、B,D の場合は field emission 源とは逆方向にまっすぐにビームパイプ方向に飛んでいくことがわかる。さらに A の場所では同じ方向に飛んでいくことがわかり、このように field emission 源のある局所的な場所に応じて、field emission の様相が非常に異なることがわかった。図 14 から field に対し、指数関数的にエネルギーが増大することから、一度 field emission が起きると、電子が軸上を加速し、エネルギーロスとなり、図 10 にあるように Q 値の劣化が起こると同時に増大な放射線が発生することになる。

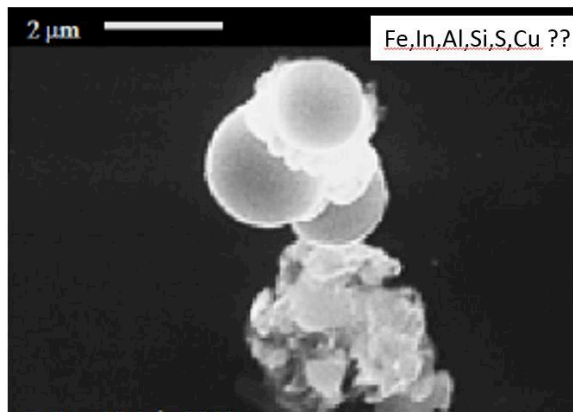


Fig. 16 空洞内面に付着した微小な埃(field emission 源)[16]

この field emission 源を増大させる β_{FN} は空洞表面の突起形状にもよるが、さらに図 16 に示すような外部からの微小な埃や汚れなどが、主な原因である。これら微小な埃を除去するために、空洞内の化学的な研磨処理の後に高圧超純水洗浄(HPR)や超音波洗浄を行うなど、空洞内面の徹底した埃除去を行う必要がある。さらにその後は半導体工場なみのクリーン度を保持したクリーンルーム内で埃を入れないような組立を行い、空洞の性能を評価する。特に埃1つが高い電界ではエネルギーを大きく奪っていくことになるので、最終的なクライオモジュールの組立まで周辺機器の組立や真空作業などすべてにおいてクリーン

な環境を保持しながら組立を行う必要があり、この作業が空洞性能を決める大きな要因となっている。

2.3.3.4. Q-disease

最後に Q-disease による性能劣化について述べておく。これは前節の磁場のトラップと同様、 R_{res} が増大する現象である。様々な表面処理を行った Nb の内部には水素が大量に結晶格子内に含有されており、冷却過程で Nb 内の水素が表面に移動し、ニオブの水素化合物を作成する。これが表面に生成され、残留表面抵抗を大きくすると考えられている。図 17 が Q-disease による Q 値劣化の典型的な実験例である。

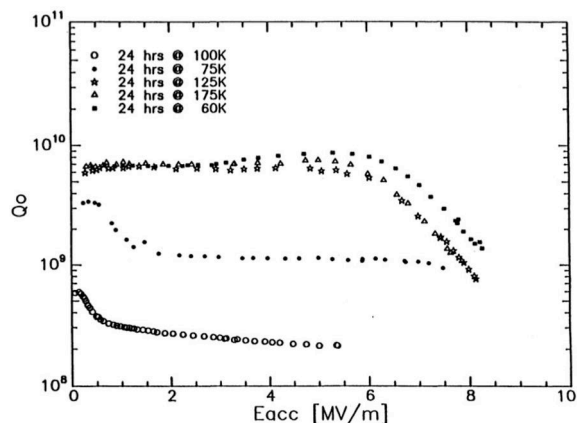


Fig. 17 DESY での Nb 空洞での Q-disease による Q 値劣化の例。[29]

それぞれの冷却中の温度で 24 時間置いた後に縦測定を行った際の、Q 値と Eacc の関係を測定した結果である。100K 及び、75K に 24 時間 keep した空洞の Q 値が低くなっているのがわかる。特に 100K では Q 値が 10^8 程度まで下がっている。175K や 60K では起きていないことから、100K 付近に長時間 keep せずにこの温度領域を急速に通過することで Q 値の劣化対策を行うと共に空洞を測定前の処理で 700 度程度までアニールすることで水素を Nb 内から除去するなどを行ってこの Q-disease 対策を現在行っている。

このように空洞性能を決める現象は具体的には空洞製作や空洞表面処理による不純物の無い空洞内面のきわめて滑らかな表面状態の確保、またクリーン環境での清浄な条件下での組立を保持したうえで初めて理想的な加速勾配や Q 値が達成されることをここでは理解して頂ければ幸いである。

3. ERL 用超伝導加速空洞設計

ここでは ERL と Compact ERL の簡単な概要を述べるとともに ERL に実現に必要な超伝導空洞の要求を述べる。また、大電流ビーム加速に必要なビームと空洞の相互作用の基礎を述べた後に、その大電流ビーム加速&回収実現に必要な空洞（主に今まで著者が設計製作に携わった主加速器超伝導加速空洞）の設計およびパラメータについて述べていく。

3.1. ERL の概要と Compact ERL (cERL)

KEK では放射光源の次期計画として今まで実現できない X 線領域での回折限界光の生成がエネルギー回収ライナックで実現可能であるとのことから、2006 年から ERL 計画のデザイン設計と開発が始まった。

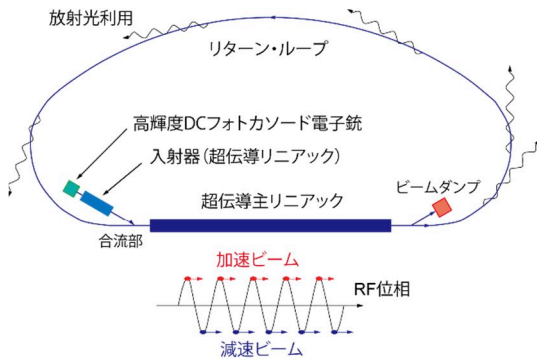


Fig. 18 ERL 光源概要 [30],[31]

図 18 は ERL の放射光源の概要である。ERL 放射光源では、高輝度電子銃で生成された超低エミッタンスビーム（規格化エミッタンスが 1-0.1 mm-mrad 程度、ビーム電流約 100 mA）[32,33] を 10 MeV のエネルギーまで前段加速した後、超伝導空洞で構成される主リニアック（主加速部）で 3 GeV のエネルギーまで加速する。ビーム周回部に設置する多数の挿入光源を用いてビームからの放射光を利用した後、再度主リニアックでビームのエネルギーを回収し、ビームを捨てる。加速された電子ビームを一度だけ周回させるため、放射光放出の際の量子ゆらぎによるエミッタンス増大を最小化でき、蓄積リングの限界を超え、X 線領域で回折限界光を実現できる[34]。特にエネルギー回収しない場合は $100\text{mA} \times 3\text{GeV}=300\text{MW}$ の電力が加速に必要でありかつこのエネルギーをすべてビームダンプに捨てることになる。このような大電力をつぎ込みビーム加速を継続することは非現実的である。エネルギー

回収を行うことで、回収ビームが次のビーム加速エネルギーとなり、ビームエネルギーとしては実質、入射部の $100\text{mA} \times 10\text{MeV}=1\text{MW}$ のみとなり、大電力を必要とせず、ビームダンプの負荷も激減する。これが画期的な ERL のアイデアであり[2]、第 2 章で述べたロスなしの超伝導空洞で 100% のエネルギー回収が実現可能であること、さらに近年、高輝度電子銃と超伝導加速空洞の急速な進歩により飛躍的に ERL の開発が進んできた。エネルギー回収リニアックが原理通り動作することは、米国トーマス・ジェファソン研究所(Jlab)の小規模な ERL などにより最大 9mA 程度まで 2000 年半ばに実証されているが、要求される大電流ビーム電流である 100mA もの、X 線を発生できる大規模な ERL 光源を実現するためには、多くの研究開発が必要である。そこで 2009 年から KEK 内の ERL 開発棟にて、大電流ビームかつ低エミッタンスビームの生成及びエネルギー回収の実現の可否を見極めることを目的とした Compact ERL(cERL)の建設を開始し、2014 年から本格的なビーム運転を開始した[35]。

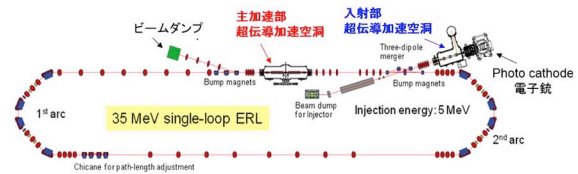


Fig. 19 Compact ERL 概要 [35]

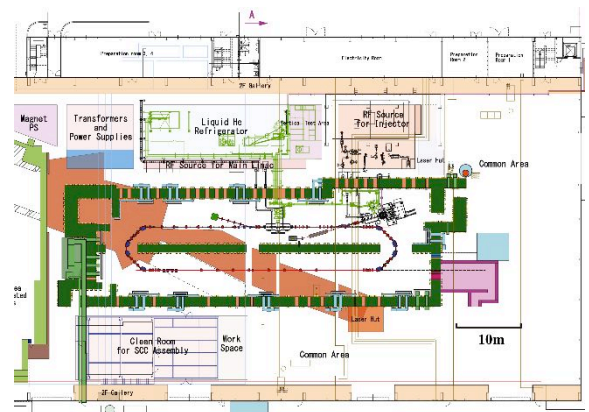


Fig. 20 ERL 開発棟全体と Compact ERL の鳥瞰図 [35]

cERL の概要を図 19 及び図 20 に示す。図 19 に示すように、電子銃にて低エミッタンスビームの生成を行い、入射器超伝導加速空洞で 5MeV まで加速し、合流部を通じ主加速部超伝導加速空洞で設計上 35MeV まで加速し、1 回周回後に主加

速部で減速し5MeVに減速されると同時に次に来るビームは減速ビームからエネルギーを受け取り、35MeVまで加速される。減速したビームはビームダンプに捨てられる。これらの加速器は100mAもの大電流によるビームロスなどが考えられるため、図20に示すようにコンクリートシールドに囲まれ設置されている。空洞のパワーはシールド外に入射部でのビームエネルギー供給に必要な300kWのklystronと高周波電源が置かれると同時に主空洞用に16kWと8kWのSolid state amp及びbuncher空洞用に8kWのSolid state ampが置かれている[9]。その横に4Kで500Wの冷凍機と3000LのHeデュワーが置かれている[8]。なお、超伝導加速空洞をクライオモジュールに組立てるために必要なクラス10(ISO class 4)のクリーンルーム(図20の下部)も用意され、ここで縦測定後にモジュールに組み込むためのアセンブリ作業が行われた。

3.2. ERL用超伝導加速空洞

3.2.1. 入射器超伝導空洞

入射器超伝導空洞については(筆者の力量と時間不足のため)、本講義では簡単に設計思想から現在までのビーム加速達成までを述べる。(詳細は参考文献[6][36][37]を参照されたし。)

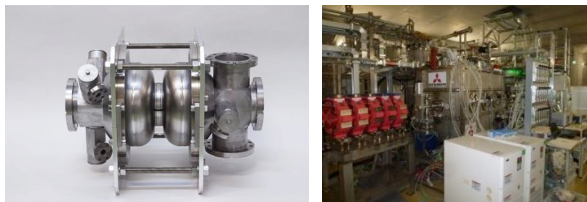
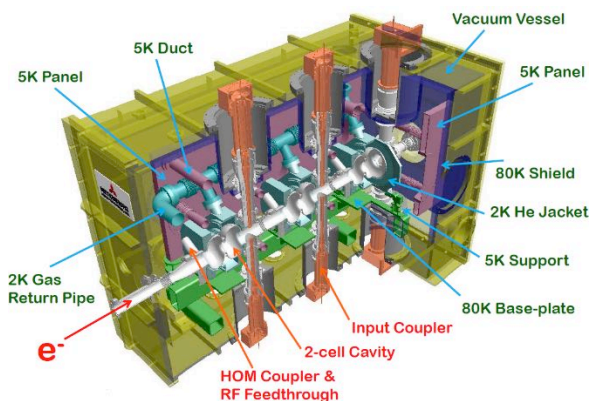


Fig. 21 cERL入射部超伝導加速空洞概要(上)。3台の2セル超伝導加速空洞がクライオモジュールに収められている(下)。[35]

入射器加速空洞は、電子銃からのビームを、その後の輸送がやりやすいエネルギーまで加速する役割である。低エネルギーでの輸送距離を短くするためにコンパクトにすることが、重要であるが、入射加速部だけは唯一エネルギーの回収が行われないために、大電力のCWのRFパワーをモジュールの機器への負担なく、空洞に送り込むことが、設計上重要となる。具体的には最終目標100mAを10MeVまで加速することを想定し、 $100\text{mA} \times 10\text{MV} = 1\text{MW}$ に相当する1.3GHzのCWのRFパワーをビーム加速として供給できるかが設計のポイントとなる。図21が入射器加速空洞部のクライオモジュールの具体的配置図と製作した空洞及びクライオモジュールである。1台のクライオモジュールにNb製の2セル空洞が3空洞配置され、1空洞あたりに加速勾配が15MV/mとなる配置を設計の一つの指針とし、モジュールの全長をコンパクトにしている。さらに各空洞には2つの入力カプラーでパワーを入力し、カプラーあたりの負荷を100mA、10MeV加速運転時に設計上170kWに抑え、入力カプラーへのRFパワーおよび熱負荷の負担を減らすと同時に電場の対称性を良くし、低エネルギービームがキックされないようにしている。また、空洞前後に5つの改良型HOMカプラーを配置し、モジュールをコンパクトにし、ビームから誘起する高調波を吸収する構造とした。(高調波とビームとの関係は次節にて説明するが、主空洞に比べ、高調波の制限は比較的緩い。)2012年に縦測定にて空洞は50MV/mの性能を達成[36]。その後、クライオモジュールとして組立て、2013年2月にビームラインに設置し、15MV/mの加速勾配が安定に確保できることを確認した[37]。その後、後述するようにcERLにてビーム加速が安定に行われている。大電流化に向けては現在、HOMカプラーおよび入力カプラーにて熱負荷による温度上昇が一つの課題である。その改良を行っているところであるが、cERLの初期目標値の10mAのビーム運転には十分な能力を有している。

3.2.2. 主加速器超伝導空洞

主加速部の超伝導加速空洞はエネルギー回収を行う本加速器の心臓部である。2012年夏から秋にかけて、クライオモジュールの組み立てを行い、加速器室に設置した(図22)。2台の1.3GHzのNb製の9セル超伝導空洞で構成され、高Q値

($>1 \times 10^{10}$) で15 MV/m の加速勾配で35 MeV まで加速することを想定している。

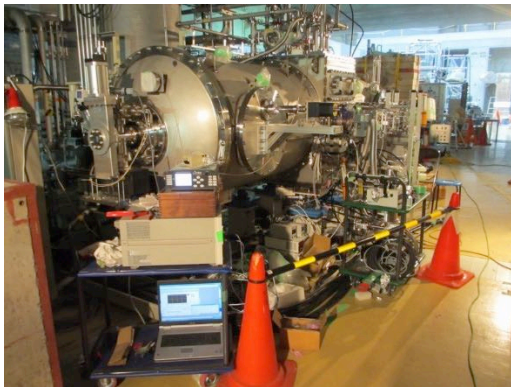
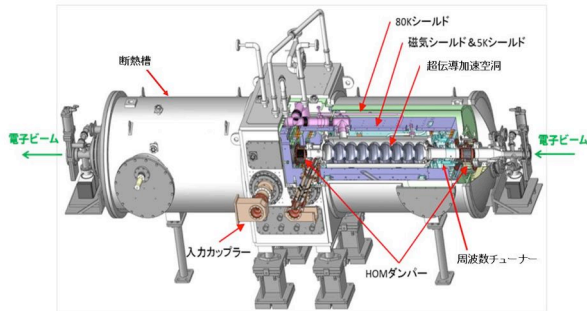


Fig. 22 cERL 主加速部超伝導加速空洞概要 (上)。 2 台の 9 セル超伝導加速空洞がクライオモジュールに収められている(下)。[35]

空洞設計の詳細は次節にて詳しく述べるが設計思想として、最終目標である100 mA もの大電流ビームを周回できるように、ERL 用に特化した改良設計を行った空洞を作成した。特徴は空洞のくびれ部分(iris部)の径および空洞両端のビームパイプ径が大きく、大電流運転時に有害な空洞内に立つ高調波すなわち高次の共振モード(Higher Order Mode(HOM))がすべて大きなビームパイプから外に出て空洞両脇のHOMダンパーと呼ばれるところに吸収する設計になっているところである。特に高次モードで空洞から出にくい四極モードも偏心フルートと呼ばれるビームパイプ(EFB)を用いて取り出す設計にしておき、大電流運転時に有害なHOMを大幅削減した形に改良し、最大600 mA までの大電流運転が可能な設計にした[7][38]。この設計をもとに製作したERL用9セル空洞の縦測定では、25 MV/m 以上の加速勾配を確認した。なおかつ15MV/mで $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ のERLの要求値を満たしたことを確認した後、2012年に入力カプラー、高次モード減衰器(HOM ダンパー)、周波数チューナー等の組込みを行い、クライオモジュールとしてビーム

ライン上に設置されて、2014年以降現在までcERLにてCWビーム加速及びエネルギー回収を実現している。

これら主加速器超伝導加速空洞およびクライオモジュールの設計や開発の詳細を以下に述べていく。

3.3. ERL 用大電流ビーム加速と回収に向けて

ビーム加速に必要なビームと空洞との相互作用の基礎的な説明を行うとともに、大電流ビーム加速&回収に必要な物理とERL用の主加速部空洞設計のポイントについて述べる。

3.3.1. ビームと空洞の相互作用

図23に示すように高周波源からパワー P_g が空洞に送ら得ている時にバンチ電荷 q のビームが T_b の間隔で通過しているとする。この場合の空洞とビームにより何が起こるか考える。

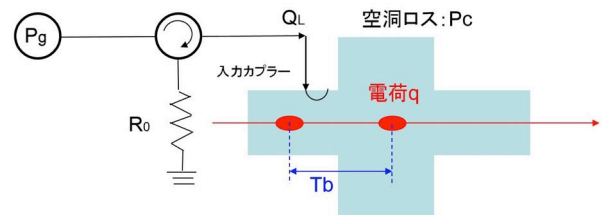


Fig. 23 空洞と beam と高周波源の関係図

3.3.1.1. 空洞にビームが無い場合の関係式[16]

空洞と高周波源は空洞をLCR回路の共振器と考えると計算すると図24のような関係になる。

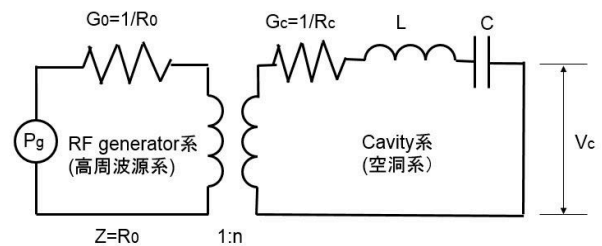


Fig. 24 空洞と高周波源の回路図的な関係

ここで、空洞の共振周波数を ω_0 とすると、

$$\omega_0 \equiv \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (59)$$

と置く。ここで図24の回路図としては考えた時に

$$U = \frac{CV_c^2}{2} \quad (60)$$

$$P_c = \frac{G_c V_c^2}{2} \quad (61)$$

ここでQ値は式(26)の定義と式(59)(60)(61)から、

$$Q_o \equiv \omega_0 \frac{U}{P_c} = \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{1}{G_c} \quad (62)$$

と書かれる。ここで G_c は空洞のアドミッタンスであり、空洞抵抗の逆数である。次に高周波源のロスであるが、空洞系から見た時にはその空洞から見た高周波源ロス P_e は間のコイルの比を n とすると、

$$P_e = \frac{G_0}{n^2} \frac{V_c^2}{2} \quad (63)$$

と書ける。ここでQ値の定義をもう少し広げるとQ値とは空洞内にたまったパワーに対するロスであるので、現在空洞からのロスは空洞壁ロスだけでなく、高周波側に逃げる P_e もその一つである。これらのトータルの空洞からのロスを P_{tot} とすると

$$P_{tot} = P_c + P_e \quad (64)$$

と書ける。(本来図1に示すpickupの P_l も入るのだが、ここでは議論を簡単にするために $P_l \ll P_c$ から無視した。)ここで

$$Q_L \equiv \omega \frac{U}{P_{tot}} \quad (65)$$

$$Q_e \equiv \omega \frac{U}{P_e} \quad (66)$$

と定義する。 Q_L は負荷Q値(Loaded Q)、 Q_e は外部Q値と呼ばれ、式(62)より ωU で割ることで、

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_e} \quad (67)$$

の関係式が成り立つ。さらに空洞のロス P_0 に対する高周波源へのロス P_e の比を β_e とすると

$$\beta_e = \frac{P_e}{P_0} = \frac{Q_0}{Q_e} \quad (68)$$

から、

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} (1 + \beta_e) \quad (69)$$

と書ける。 β_e は空洞に対する(入力カプラー側の)カップリングパラメータと呼ばれる。さて、上記 β_e は図24ベースに再度考えると式(63)から

$$Q_e = n^2 \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{1}{G_0} \quad (70)$$

となる。したがって、式(62)(68)(70)から、

$$\beta_e = \frac{G_0}{n^2 G_c} \quad (71)$$

と書くことができる。式(71)の意味はコイルを間に挟んだ回路で模擬すると、空洞側から見た負荷に対し、高周波源側の負荷は n^2 倍違うように見えるという意味である。

ここでもう少し、共振周波数からずれた周波数 ω に関して高周波側から見た場合を考える。空洞のアドミッタンスを Y'_c とするとLCRの共振回路の定義から、

$$Y'_c = n^2 \left(G_c + i \sqrt{\frac{C}{L}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right) \quad (72)$$

$$\therefore Y'_c = \frac{1}{\beta_e} + iQ_e \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (73)$$

と書ける。式(71)同様に高周波側から空洞を見た時のアドミッタンスは n^2 倍がかかる。高周波源から空洞を見た時はこれがマッチングの違いとして見られるため、高周波を伝送線で送る際の式と等価に考えることができる[39]。その空洞に対する高周波側からの反射率 Γ は定義より

$$\Gamma = \frac{1 - Y'_c / G_c}{1 + Y'_c / G_c} \quad (74)$$

である。ここで空洞に入るパワーを P_{in}^* とすると高周波源のパワー P_g との関係式は

$$P_{in}^* = P_g (1 - |\Gamma|^2) \quad (75)$$

[39]から、式(67),(68),(72),(74)より、

$$P_{in}^* = \frac{4\beta_e P_g}{(1 + \beta_e)^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right)} \quad (76)$$

「問3」：式(76)を式(75)から導出せよ。

空洞にビームが無い時は定常的には $P_{in}^* = P_c$ である。また共振周波数付近では

$$\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \approx \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{2\Delta f}{f_0} \quad (77)$$

なので、式(35)(76)(77)より、加速電圧に対し、必要な高周波源のパワー P_g は以下

$$P_g = \frac{(1 + \beta_e) V_c^2}{4\beta_e \left(\frac{R}{Q} \right) \cdot Q_L} \cdot \left(1 + 4Q_L^2 \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^2 \right) \quad (78)$$

の関係式で与えられることがわかる。 Δf は共振周波数 f_0 からのずれを表している。式(76)からわかるように

$$\Delta f = \pm \frac{f_0}{2Q_L} \quad (79)$$

で決まる場所は共振からのずれが空洞のパワーが半減するFWHM(full-width half maximum)の場所である。このように共振周波数の幅は外部Q値 Q_L によってきまる。共振幅を $Q_L \approx Q_0$ 近くまで持っていくことができるのが高周波源のパワーを減らすためには理想であるが、式(79)から分かるように1.3GHzの場合0.1Hz以内の周波数制御を行う必要があり、周波数制御が非現実的である。そのため、 $Q_L \ll Q_0$ の条件で運転制御をしているのが、現在のモジュールの運転である。この時 $\beta_e \gg 1$ となる。この状態のことをover couplingといい。式(78)は簡略的に、 β_e に依らない下記のような式(80)でかける。

$$P_g = \frac{V_c^2}{4 \left(\frac{R}{Q} \right) \cdot Q_L} \cdot \left(1 + 4Q_L^2 \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^2 \right) \quad (80)$$

なお、蓄積パワー U はパワーの投入が無い場合、下記のように

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{\tau_L} \quad (81)$$

で減衰定数 τ_L でdecayするが、この τ_L と Q_L の関係式は下記関係式

$$\tau_L = \frac{Q_L}{\omega_0} \quad (82)$$

の関係式がある。 Q_L の値は式(78)もしくは式(82)から半値幅やパワーの減衰を測定することで求めることが可能であることがわかる。

「問4」：式(82)を式(81)と(76)他から導出せよ。

3.3.1.2. パワーの無い空洞にビームが通る場合

次に高周波源からはパワーがなくビームが空洞を通過する場合を考える[40]。1つも電荷が無い場合、ビームの通過によって空洞内にはそれぞれ誘起するモード n で電圧 V_{bn} (beam-induced voltage)を残す。その電圧 V_{bn} とビームが誘起する電圧に対し感じる電圧 V_{en} は $V_{en} = V_{bn} / 2$ であり、ビームの進行方向と必ず逆向き感じることを(これをbeam loadingと言う。)をまず証明する。

電圧はあるモード n の周波数 ω_n に対し、必ず $\exp(i\omega_n t)$ で振動する。これを複素数空間である θ_0 を基準として $\theta = i\omega_n t + \theta_0$ として、

$$\tilde{V} = V e^{i\theta} \quad (83)$$

と電圧の変化を記述したものがphasorの概念であり、これを用いて、beam loadingを説明する。何もない空洞に電荷 q のバンチが通過した際に貯まるあるモード n の電圧 V_{bn} と蓄積エネルギー W_n の関係は

$$W_n = \alpha_n V_{bn}^2 \quad (84)$$

の関係がある。さてこの電圧 V_{bn} のうち、ビームにある割合 ρ だけ働いたとする。

$$V_{en} = \rho V_{bn} \quad (85)$$

この時ビームが感じる電圧 \tilde{V}_{en} はビームの運動の位相(reference phase)とは完全に180度反対方向に見ているものとするがビームが誘起する電圧 \tilde{V}_{bn} は \tilde{V}_{en} に対しでなく、 ε だけ角度をもって進んでいるとする。さて、次に同じ電荷 q のバンチが $\omega_n T_b = 2\pi m + \theta$ の位相の進みで空洞に入ってきたとする。

これをphasor diagramとして図示したものが図25である。電荷 q のバンチが1回目に通過したときに立つ電圧を $\tilde{V}_{bn}^{(1)}$ 、電荷 q のバンチが2回目に通過したときに立つ電圧を $\tilde{V}_{bn}^{(2)}$ とすると、空洞内に立つ電圧は $\tilde{V}_{bn}^{(1)} + \tilde{V}_{bn}^{(2)}$ となる。 $\tilde{V}_{bn}^{(1)}$ と $\tilde{V}_{bn}^{(2)}$ で

は θ の開きがあることになる。電荷 q による電圧の大きさは同じで $|\tilde{V}_{bn}^{(1)}| = |\tilde{V}_{bn}^{(2)}| = V_{bn}$ である。

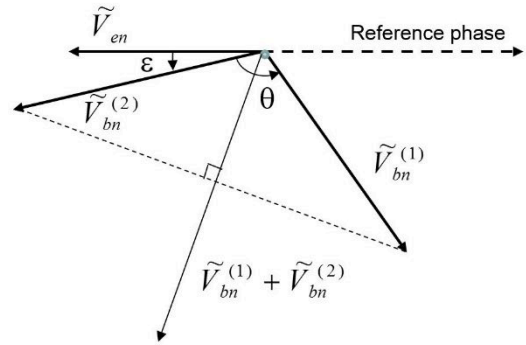


Fig. 25 空洞に誘起した2つの電圧とビームが感じる電場のphasor diagram

2個電荷が通過したのちの空洞内に蓄積されるエネルギーは式(84)より、

$$\begin{aligned} W_n &= \alpha_n (\tilde{V}_{bn}^{(1)} + \tilde{V}_{bn}^{(2)})^2 = \alpha_n \left(2V_{bn} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^2 \\ &= 2\alpha_n V_{bn}^2 (1 + \cos\theta) \quad (86) \end{aligned}$$

これに対しビームが空洞内で失うエネルギー ΔU は一番目の電荷が通る時の電圧を $\tilde{V}_{bn}^{[1]}$ 、2番目の電荷が通る時の電圧を $\tilde{V}_{bn}^{[2]}$ とすると

$$\tilde{V}_{bn}^{[1]} = \tilde{V}_{en} \quad (87)$$

$$\tilde{V}_{bn}^{[2]} = \tilde{V}_{en} + \tilde{V}_{bn}^{(1)} \quad (88)$$

より、これら式(87),(87)を使って、

$$\begin{aligned} \Delta U &= -q \operatorname{Re} \left\{ \tilde{V}_{bn}^{[1]} \right\} - q \operatorname{Re} \left\{ \tilde{V}_{bn}^{[2]} \right\} \\ &= 2qV_{en} + qV_{bn} \cos(\varepsilon + \theta) \quad (89) \end{aligned}$$

となる。エネルギー保存則より、

$$\Delta U = W_n \quad (90)$$

より、式(85),(86),(89)を式(90)に代入し、 θ に関して展開すると、

$$2(q\rho - \alpha_n V_{bn}) + (q \cos \varepsilon - 2\alpha_n V_{bn}) \cos \theta$$

$$-q \sin \varepsilon \sin \theta = 0 \quad (91)$$

が得られる。これが任意の θ に対して成り立つため、

$$\sin \varepsilon = 0 \Rightarrow \varepsilon = 0 \quad (92)$$

$$V_{bn} = \frac{q}{2\alpha_n} \quad (93)$$

$$\rho = \frac{\alpha_n V_{bn}}{q} = \frac{1}{2} \quad (94)$$

が得られた。したがって、ビームが誘起する電圧 \tilde{V}_{bn} は電荷 q の動きに対し、反対向きであり、そのビームの感じる電圧は $V_{en} = V_{bn} / 2$ であることが証明された。式(84)と式(93)から

$$W_n = \alpha_n V_{bn}^2 = \frac{q^2}{4\alpha_n} \equiv k_n q^2 \quad (95)$$

と書ける。ここで k_n は各空洞のモード n のロスパラメータ (loss parameter) と呼ばれ、空洞の共振モード n 毎に異なる値を持っている。式(84),(95)から

$$k_n = \frac{1}{4\alpha_n} = \frac{V_{bn}^2}{4W_n} \quad (96)$$

これは実は空洞の形状とモードによって決まる式(32)の関係と同じであり、式(32)を式(96)に代入すると

$$k_n = \frac{\omega_n}{4} \left(\frac{R}{Q} \right)_n \quad (97)$$

と書かれる。また、式(93)(96)(97)から、

$$V_{en} = \frac{V_{bn}}{2} = k_n q \quad (98)$$

となり、 k_n は各共振モードの形状で決まる値であり、 V_{bn} と電荷 q を関係付ける重要なパラメータである。

3.3.1.3. ビーム加速とエネルギー回収時の関係

3.3.1.1節と3.3.1.2節の両方を考える。今加速モードの共振周波数 ω_c のモードのみを考え、高周波源の周波数 ω_g が同じとする場合、ビームと高周波源と空洞の関係を考える。ビーム加速電圧 \tilde{V}_c は高周波源 \tilde{V}_g とビーム誘起電圧 \tilde{V}_b の足し合わせで

$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_g + \tilde{V}_b \quad (99)$$

の関係がなりたつ。図26にその関係を示す。

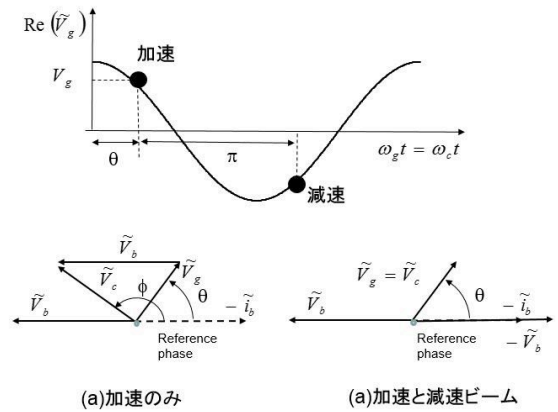


Fig. 26 ビーム加速(a)と加速+減速時(b)の加速電圧と高周波源とビーム誘起電圧の関係。

ビームが高周波に対し、 θ だけずれた位相で加速された場合図26の(a)のように

$$\text{Re}(\tilde{V}_c) = \text{Re}(\tilde{V}_g + \tilde{V}_b)$$

$$\therefore V_c \cos \phi = V_g \cos \theta - V_b \quad (100)$$

の関係となる。ここで100mAのビームを1空洞当たり $V_c = 10\text{MV}$ 加速する際にビーム誘起電圧 V_b はどうなるかを考える。蓄積リングでのビーム加速ではシンクロトロン位相安定性などでこのように位相を考慮したビーム加速が重要となる[40,41]が、今は線形加速であるため、シンプルにビーム加速を最大にするために $\theta = \phi = 0$ とすると、

$$V_c = V_g - V_b \quad (101)$$

$f_c = \omega_c / 2\pi = \omega_g / 2\pi = 1.3\text{GHz}$ とすると、電荷 $q = IT_b = I / f_c = 77\text{pC}$ である。ここで、 R/Q は9セル空洞では1000程度であるため、式(98)から、電荷1つ当たりの誘起電圧 V_q は

$$V_q = 2kq = \frac{\omega_c}{2} \left(\frac{R}{Q} \right) q = 314.5 \text{ V} \quad (102)$$

の電圧が電荷 $q = 77\text{pC}$ が1つ通過した際に誘起される。これが、式(82)より、空洞の電圧の減衰定数 $T_d = 2Q_L / \omega_c$ で減衰する効果と $T_b = 1 / f_c$ で電荷 q が来る効果を考慮し計算すると V_b は。

$$V_b = V_q \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-n \frac{T_b}{T_d}\right) = \frac{V_q}{1 - \exp\left(-\frac{T_b}{T_d}\right)} \quad (103)$$

となる。 $Q_L \approx 1 \times 10^7$ で $T_d = 2.44\text{ms} \gg T_b = 0.77\text{ns}$ なので、ビームが感じる電圧も考慮し、

$$V_b \approx V_q \frac{T_d}{T_b} = 314.5\text{V} \times \frac{2.44\text{ms}}{0.77\text{ns}} \approx \underline{1 \text{ GV}} \quad (104)$$

もの電圧がもし100mAのビームを空洞内に定常的に加速するなら、誘起されることになる。この分を $V_g = V_c + V_b$ 10MV+1GV=1.01GVだけ投入する必要がある、 $V_c \ll V_b$ より投入するパワーのほとんどがビームの加速に使用される。すなわち、式(1)の $P_b = P_{in} (= P_g)$ が成り立つことになる。

それに対し、図26の(b)のように加速ビームと逆位相で完全に π だけずれた減速ビームが空洞内に来たとする。その時の

$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_g + \tilde{V}_b - \tilde{V}_b = \tilde{V}_g \quad (105)$$

であるため、空洞電圧は高周波源からくる電圧のみで賄うことが可能である。つまり、エネルギー回収のポイントは空洞とビームの相互作用が大きく(1GV程度)であるがそれが減速ビームでキャンセルできていることである。これは高周波源の向きがビームの向きと違っていても関係な

いのは式(105)より、明らかである。シンプルにビーム加速を最大にするために $\theta = \phi = 0$ とすると、式(101)同様、

$$V_c = V_g \quad (106)$$

であり、空洞内ではビーム電圧 $+\tilde{V}_b$ と $-\tilde{V}_b$ が常時やりとりしている。従って、エネルギーの収支は空洞内で $+qV_b - qV_b = 0$ となり、エネルギー回収を行っている。理想的には $P_c = P_g$ であるが、共振幅を確保する関係で、式(80)がエネルギー回収時の投入パワー P_g を表す式となる。ここで、減速ビームが $\Delta\theta$ だけずれた場合を考える。

$$\Delta V_b = V_b - V_b \cos(\Delta\theta) \approx V_b \left(\frac{(\Delta\theta)^2}{2} \right) \quad (107)$$

$\Delta\theta = 1^\circ$ としたときに $\Delta V_b = 0.15\text{MV}$ であり、 $V_c = 10\text{MV}$ とするとに1%程度の減少効果が見られる。パワーでは $I\Delta V_b = 100\text{mA} \times 0.15\text{MV} = 15\text{kW}$ 分が追加で必要になる。 0.1° 程度で周回の安定性が確保されていることが理想である。

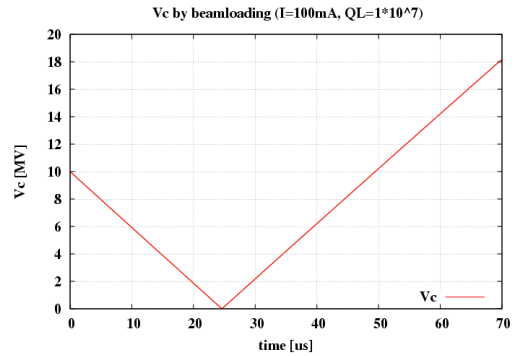


Fig. 27 減速ビームが無くなってからの空洞電圧 V_c (絶対値) の変化。

最後に減速ビームが突然来ない場合の状況を図27に示す。 $-\tilde{V}_b$ が無くなってから、 $24 \mu\text{s}$ 程度で空洞内の電圧が0になり、 $50 \mu\text{s}$ 以上で逆向きに電圧が生じ、10MV以上の電圧がかかることになる。このようにエネルギー回収が成り立たなくなると空洞内に大きなbeam loadingの電圧がかかり、今までの電圧以上の空洞電圧が生じる。recoveryが成り立たない時は数 $10 \mu\text{s}$ 以下でビームを止めに行くことが必要となることがわかる。

3.3.2. 高次モード（高調波）とビームの関係

高次モード(HOM)とビームとの関係をここでは計算する。第2章で計算した通り、加速モード以外に空洞には高次モードが発生する。大電流のビーム運転ではこの高次モードが運転の問題となる。図28がHOMの代表例である。

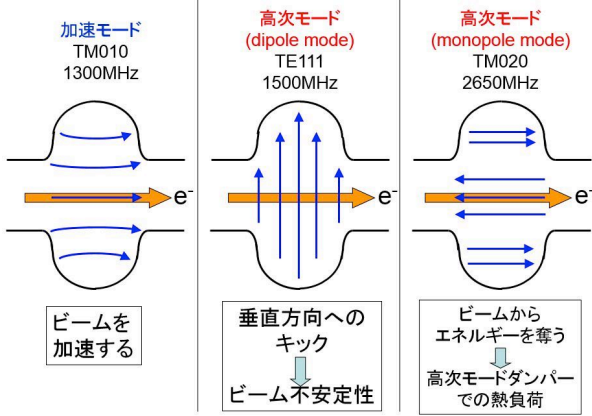


Fig. 28 加速モードと高次モード[7]

高次のモノポールモードはビームと同じ方向に電場が立つため、ビームの加減速を生じさせ、ビームエネルギーを奪う可能性がある。また、高次のダイポールモードはビームと垂直に電場、磁場が立つため、ビームを蹴りビーム不安定性を起こすことになる。以下それぞれの場合のビームとの関係を説明する。

3.3.2.1. 高次モノポールモードとビーム

空洞とビームの相互作用から空洞内に誘起する電圧は式(98)で書けることがわかった。

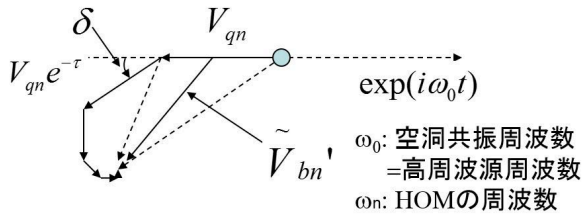


Fig. 29 高次モードが誘起する電圧[40]

これを位相も込みでHOMが誘起する電圧を \tilde{V}_{bn} とすると、HOMの共振周波数 ω_n 、空洞(=高周波)の周波数を ω_0 とすると図29から、

$$\tilde{V}_{bn} = V_{qn} \sum_{n=0}^{\infty} \exp(i\omega_n T_b) \exp\left(-\frac{T_b}{T_{dn}}\right) \quad (108)$$

$$= \frac{V_{qn}}{1 - \exp(i\delta_n) \exp(-\tau_n)}$$

となる。ここで T_{dn} はnモードのHOMの減衰定数 $T_{dn} = 2Q_{Ln} / \omega_n$ であり、

$$\delta_n = T_b(\omega_0 - \omega_n) \quad (109)$$

$$\tau_n = \frac{T_b}{T_{dn}} \quad (110)$$

である。これのビームが感じる電圧 \tilde{V}_{bn}' は

$$\tilde{V}_{bn}' = \tilde{V}_{bn} - V_{qn} / 2$$

$$= \frac{V_{qn}}{1 - \exp(i\delta_n) \exp(-\tau_n)} - \frac{V_{qn}}{2} \quad (111)$$

$$= V_{qn}(F_r + iF_i)$$

ここで、

$$F_r = \frac{1 - \exp(-2\tau)}{2(1 - 2\exp(-\tau)\cos\delta + \exp(-2\tau))} \quad (112)$$

$$F_i = \frac{\exp(-\tau)\cos(\delta)}{(1 - 2\exp(-\tau)\cos\delta + \exp(-2\tau))} \quad (113)$$

である。あるHOMのモードnに対するパワーロス P_{bn} は

$$P_{bn} = I \cdot \text{Re}(\tilde{V}_{bn}') = 2T_b k_n I^2 F_r$$

$$= \frac{1}{2} \omega_n T_b \left(\frac{R}{Q}\right)_n I^2 F_r \quad (114)$$

となる。ここで今までパンチ長の効果を考えてこなかったが、パンチ長 σ_z とすると、

$$k_n(\sigma_z) = k_n \exp(-\omega_n^2 \sigma_z^2 / c^2) \quad (115)$$

となるので、式(114)を用いて P_{bn} は

$$P_{bn} = \frac{1}{2} \omega_n T_b \left(\frac{R}{Q} \right)_n I^2 F_r \exp(-\omega_n^2 \sigma_z^2 / c^2) \quad (116)$$

となる。

「問5」: バunch長 σ_z のときの式(115)を導出せよ。

R/Q = 200, $Q_L = 2000$, $q = 77\text{pC}$ で計算。

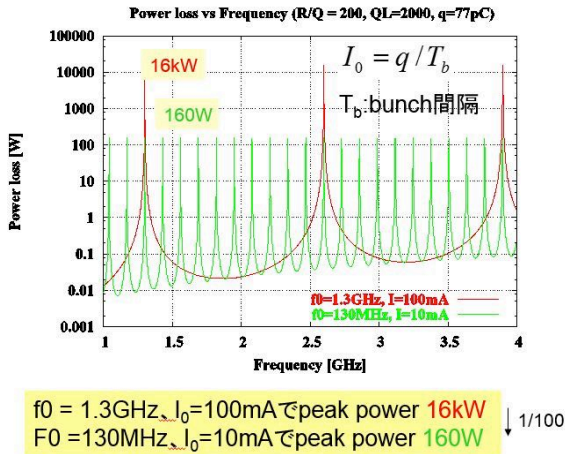


Fig. 30 高次モードによるパワーロス計算 1

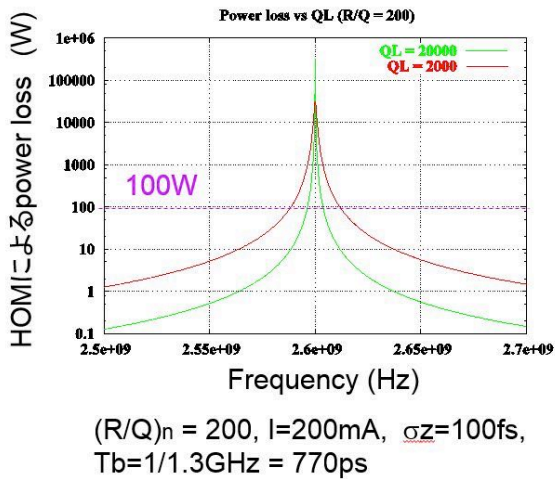


Fig. 31 高次モードによるパワーロス計算 2

式(116)がどのような様相を呈するかをいくつか図示してみる。図30がHOMの $Q_L = 2000$, $R/Q = 200$ としたときの $I = 100\text{mA}$ で $\omega_0 / 2\pi = 1.3\text{GHz}$ のビーム繰り返し周波数と、 $I = 10\text{mA}$ で $\omega_0 / 2\pi = 130\text{MHz}$ のビーム繰り返し周波数とを変えた際

にHOMの周波数を横軸に取った時の式(116)のパワーロスをプロットしたものである。ここでわかることはHOMの周波数がビームの繰り返しに同期すると圧倒的にパワーロスが増えることである。特に100mAの時は1.3GHzごとにピークの値が16kWとなる。それに対し、同じ電荷77pCを保持しビームの繰り返しを1/10にしたものではビームの繰り返し毎にピークの数が増えているがピークの値は I^2 に比例し、減少しているのがわかる。基本的にはHOMの共振周波数がビームの繰り返しに当たらないときは発熱が100mAで運転しても1W以下でおさまっているのがわかる。

図31はさらに周回ビームも足して同じ電流100mA+100mA($\omega_0 / 2\pi = 1.3\text{GHz}$)でHOMの Q_L を10倍したときの2.6GHz近くでの図である。 Q_L を上げるとピーク値が10倍になるが、周波数幅が狭くなるのがわかる。HOMの Q_L は10000~1000くらいに落とし、危険なHOMの周波数をビームの加速減速両方のビームが重なった周波数の2.6GHzの整数倍に当たらないように空洞設計を行えばよいことがわかる。その周波数は2.6GHzの整数倍から多くみても図31から±40MHzも離しておけば数W程度のHOMで抑えられると予想される。

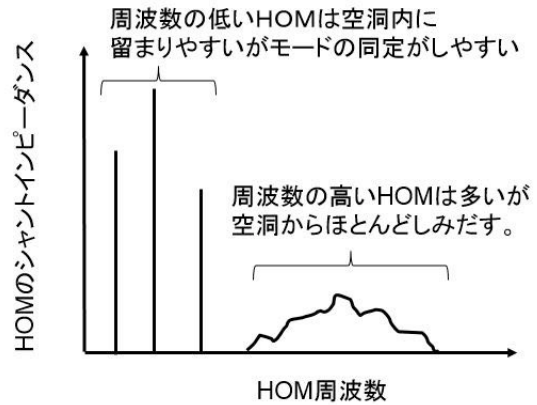


Fig. 32 HOMの空洞内の分布[40]

最終的にはHOMによるTotalのロスはいずれもモードのロスの足し算であり、

$$P_{total} = \sum_{n=1}^{\infty} P_{bn} \quad (117)$$

である。わりとHOMで低い TM_{020} modeなどはこのように計算で一つ一つロスを計算できる。特にそれらは図32にあるように空洞内に残りやす

いため、ある程度計算でHOMの Q_L や R/Q を抑えておかないと、図30に示すようにビーム繰り返し周波数と同期したときに致命傷になる。それに対し、より高い10GHz以上のモードなどはモードを同定しながらの計算は非常に困難になる。但し、これらの10GHz以上の高いモードは図32に示すようにほとんどがビームパイプのcut off周波数よりはるかに高くほとんどがビームパイプに伝搬して外部にロスし Q_L が低い状態になる。この場合は $Q_L=1$ に近いものとみなし、空洞の形状を実際にsimulationにて、PC上でビーム走らせて、航行場(wake field)を計算することで、トータルのロスを見積もることを最終的には行う。

3.3.2.2. 高次ダイポールモードとビーム

次にダイポールモードとビームの関係を考える。TE111モードやTM110モードなどは軸中心から近傍では横方向(x方向)に線形な電場及び磁場の分布をしている。このようなモードがあるときにビームが中心からずれると横方向にビームが蹴られることになる。これがビームと空洞のけりが積み重なり、ビームが不安定になる現象があり、Beam Break UP (BBU)と呼んでいる。この現象はERLで大電流を扱う場合は顕著であり、2005年頃から詳細が調べられるようになった[42]。図33はその模式図である。

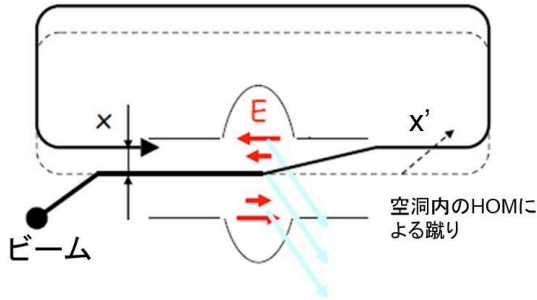


Fig. 33 ERLでの dipole モードの kick[42]

1ターン目により空洞内の $r=a$ の場所でz方向に電場(本当は磁場でも構わないが簡略化のため、電場のみで計算する。)があるとすると、空洞によるビームキック x' はRFによる横方向の電場を決めるPanofsky-Wenzel theorem[43]より、

$$x' = \frac{V_{\perp}}{V_b} = -\frac{cV_a}{\omega_n a V_b} \sin(\varphi) \quad (118)$$

とかける。ここで空洞の $r=a$ でのz方向の電場は

$V(r=a) = V_a \cos(\varphi)$ の形である phase φ でのHOMの空洞電圧である。ここでビームは周回opticsによって、 $x = m_{12} x'$ で空洞に再度回ってくるとして、2ターン目では空洞でビームがロスする量 ΔU は1次の近似では

$$\Delta U = -qV_a \cos(\varphi + \omega_n T_r) \frac{x}{a} \quad (119)$$

となる。これがあらゆる φ の場合の平均で $\langle \Delta U \rangle$ を考えるとHOMの周波数に対し、空洞のロス \dot{U}_{cav} は

$$\dot{U}_{cav} = \langle \Delta U \rangle / T_b - P_c \quad (120)$$

で書ける。この時 P_c はモードnのダイポールによるHOMのロスで

$$P_c = \frac{V_a^2}{(\omega_n / c)^2 a^2 \left(\frac{R}{Q}\right)_n} Q_{Ln} \quad (121)$$

と書ける。これで式(120)に式(121)を代入すると

$$\dot{U}_{cav} = -\frac{V_a^2}{a^2} \left(I \frac{m_{12}}{V_b} \frac{c}{\omega_n} \frac{\sin(\omega_n T_r)}{2} + \frac{1}{(\omega_n / c)^2 \left(\frac{R}{Q}\right)_n} Q_{Ln} \right) \quad (122)$$

となる。 $\dot{U}_{cav} < 0$ が安定条件であるので、

$$I_{th} = -\frac{2V_b}{(\omega_n / c) \left(\frac{R}{Q}\right)_n} Q_{Ln} m_{12} \sin(\omega_n T_r) \quad (123)$$

がダイポールHOMによるBBUの閾値となる。この導出方法は文献[42]を参考にしたが、その他に微妙に形を変えて、[44]などで導出されている。いずれの場合も、重要なのは空洞が少ない場合は $m_{12} \sin(\omega T_r)$ などでコントロールすればBBUを回避可能であるのだが、3GeV程度のERL

のように空洞が200個程度ある場合、opticsでコントロールはほぼ不可能であるということである。

すなわち、空洞の高次モードの $\left(\frac{R}{Q}\right)_n Q_{Ln}$ を

小さくする設計が大電流のERLには必要になっている。このlimitのため、Jlab ERLは9mA以上いかなかった。(Jlabでは通常2~3mAですすでにHOM-BBUのlimitに達していたが、dipole modeのxyが違うモードのけりを混ぜるoptics制御を行い、Ithを上げて、9mAを何とか実現しているのが現状である。) この改善がERLの大電流化には必須の課題である。

3.4. ERL 主加速超伝導空洞の設計

cERLにインストールした現在の空洞(KEK-ERL model-2空洞)に至った設計の経緯を示す。この詳細は前回のERLに関するOHO08の参考文献[7]や[38]に詳しく述べられているが、再度ここでは重要なパラメータとグラフを載せておく。

3.4.1. 設計方針と ERL 主加速用空洞形状

ここまで色々述べてきたが、100mAもの大電流用に対策すべきはHOM対策であることがわかるであろう。我々の開発は2006年からスタートしたが、HOMに対する要求が前述したように2005年ころから詳細に調べられるようになった。特にHOM-BBUに対する閾値に対する要求がコーネル大[45]により出されており、ダイポールモードに関して100mA運転の閾値の要求は

$$\left(\frac{R}{Q}\right)_{HOM} \frac{Q_{L,HOM}}{f} < 2.8 \times 10^5 \left[\frac{\Omega}{cm^2 \cdot GHz} \right] \quad (124)$$

と出されている。我々は最初の設計方針として高い加速勾配(>15MV/m)も欲しいところであるため、まずは形状を1.3 GHzの9セルのTELSA空洞[46]で100mA ERLの実現ができないかを検討したが、式(124)の要求は満たせず、後に示すが、20mAが最大の閾値であることがわかった。また、モノポールのHOMの要求としては100mAによるHOMの発熱を100W程度に抑えることを念頭において設計を行った。TESLA空洞ではHOM couplerを用いて、HOMの減衰かつ吸収を行う設計であるが、開発当初からHOM couplerではフィードスルーでクエンチし発熱が

起こることがわかっていた[47]。1.3GHzの加速モードのHOM couplerへのしみ出しが問題であることがわかったため、cERLの入射部の2セル超伝導空洞ではHOM couplerの1.3GHzへのfilter構造をさらに改良した対策を行ったHOM couplerを1空洞あたり、5つもつけて大電流対策を行っている[36]。主加速部ではより高い加速電圧で9セルもの多数のHOMに対応することを考慮し、空洞のビームパイプ径のcut off周波数(式(21)より)を加速モード以外の全てのHOM周波数に対し、下げるためにビームパイプ径を大きくし、ビームパイプ外部にHOM吸収体(HOM damper)を置く設計を採用した。このHOM吸収体は色々検討可能であるが、KEKBの大電流運転で実績のあるフェライト吸収体を用いたビームラインのビームパイプ型HOMダンパーを修正することから開発をスタートした。

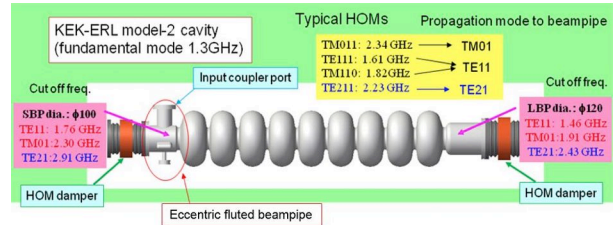


Fig. 34 KEK-ERL model-2 空洞概念設計図

図34は我々の100mA対応のために設計を行ったKEK-ERL model-2空洞の概念設計図である。この1つ前にTESLA空洞の形状を維持したまま、ビームパイプを一番低次のTE111の周波数(1.6-1.8GHzあたり)がビームパイプからしみ出すようにTESLA空洞のビームパイプ径φ78からφ108に片側のビームパイプを大きくしたmodel-1型の設計を検討していた。次節で述べるがこの形を採用することでHOM-BBUの閾値が100mA程度になることがわかった。

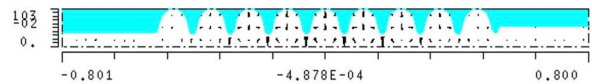


Fig. 35 TE-iris mode (電場分布)

この閾値を制限しているのがマルチセル特有のTE-iris mode(図35)と呼ばれるモードであり、これが1.3GHzの整数倍の2.6GHzの近くの2.575GHzとして存在しており、R/Qが非常に高くなっている。我々は100mAギリギリの閾値

では設計上のマージンを見ると問題であると判断し、このTE-irisモードの効果を落とすために、最終的に空洞セルの形状まで手を入れ空洞設計を行った結果が図34のKEK-ERL model-2空洞である。表2にTESLA空洞とKEK-ERL model-2空洞のパラメータを載せる。

Table 2 KEK-ERL model-2 空洞及び TESLA 空洞の加速モードの設計パラメータ[48]

	KEK-ERL model-2	TESLA A
加速周波数 [MHz]	1300	1300
アイリス径[mm]	80	70
空洞赤道直径[mm]	206.6	206.6
ビームパイプ径[mm]	100/120	78
R/Q [Ω]	897	1030
$\Gamma = R_s \times Q_0$ [Ω]	289	270
E_{pk} / E_{acc}	3.0	2.0
H_{pk} / E_{acc} [Oe/(MV/m)]	42.5	42.6
Cell-to-cell coupling [%]	3.8	1.9

セルの細かい形状を最終的には変更しているが、大きな特徴はアイリス径を大きくして空洞内にトラップしているHOMをビームパイプに導きやすくしていることである。これによりまずcell-to-cell couplingが1.9%から3.8%に増加している。この径をどれくらい大きくできるかを考慮したが、 $\phi 80$ 以上に大きくした際にR/Qが大きく減少する効果があったため $\phi 80$ とした。R/QはTESLA空洞に対し、1割の減少にとどまっている。 H_{pk} / E_{acc} は大きな違いはないが、 E_{pk} / E_{acc} がTESLA空洞に対し、1.5倍大きくなった。これが大きくなることで、同じ加速勾配でもfield emissionが出やすくなると思われるが、設計当初はlinear colliderで30MV/m以上の結果が縦測定で得られており、この2/3の20MV/mでも設計値の15MV/mに対して十分マージンがあることから $E_{pk} / E_{acc} = 3$ の値で問題ないと判断し、空洞開発を始めた。ちなみにピルボックスでは $H_{pk} / E_{acc} = 30.5$ [Oe/(MV/m)]、 $E_{pk} / E_{acc} = 1.57$ であることから、これらの値が大きな値であることがわかるであろう。

3.4.2. HOM の計算結果の詳細と BBU 閾値

設計はsimulation codeとして主にsuperfish[49]とMAFIA[50] (現在のMW-Studioの前version)を用いた。

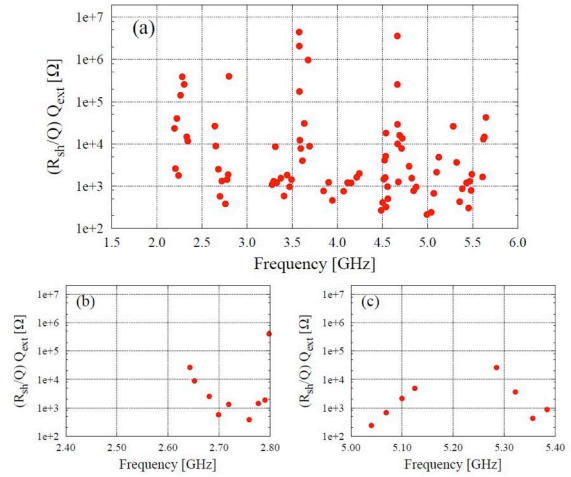


Fig. 36 KEK-ERL model-2 空洞のモノポールモードのシャントインピーダンス。(a)全体、(b)2.6GHz付近、(c)5.2GHz付近。

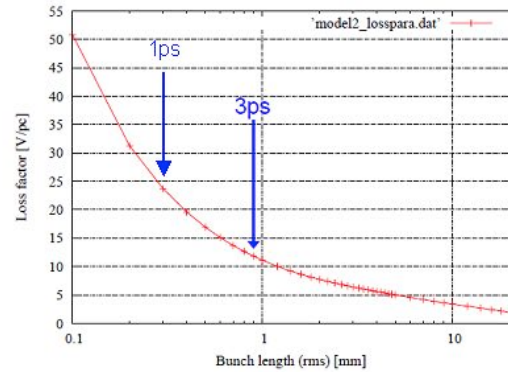


Fig. 37 KEK-ERL model-2 空洞の Loss factor [52]

まず、図36が5.5GHzまでのモノポールモードの計算結果である。ビームパイプにしみ出したHOMは100%吸収するものと仮定し、そこから計算した $Q_{ext}(=Q_L)$ をMAFIAで計算したR/QにかけてHOMのシャントインピーダンスRshを出している。Rsh=2000程度が共鳴ピークに当たった時に100W程度のロスとなる値であるが、基本的に高いRshのHOMが見られた。但し、図36(b),(c)に見られるように空洞形状を変えて2.6GHz及び5.2GHzあたりのHOMの周波数は ± 40 MHz以上で存在しないような設計を行っている。これにより、HOMの共鳴によるビーム

での大きな発熱が無い状態が確保された設計とした。さらに高次の計算を含めた計算はwake fieldを計算するABCIコード[51]を用い、計算を行った。図37は計算したHOM全体の寄与を含めたloss parameterの計算結果である[52]。Loss parameter k はbunch長3psで12V/pC、1psで倍の24V/pCとなっている。Loss factorはバンチ長が短いほどロスが増えることがわかる。Loss factorの中には加速モードの寄与が入っており、その値は

$$k_0 = \frac{\omega_0}{4} \left(\frac{R}{Q} \right)_0 = \frac{2\pi \times 1.3\text{GHz}}{4} \cdot 900\Omega = 1.8\text{V/pC} \quad (125)$$

程度であるので、HOMによるloss parameter k_{HOM} はバンチ長3psの時、

$$k_{HOM} = k - k_0 \approx (12 - 2) \text{ V/pC} = 10 \text{ V/pC} \quad (126)$$

となる。今ビーム電流を加速と減速の両方を検討して200mAとするとHOMによる発熱 P_{HOM} は

$$P_{HOM} = k_{HOM} q I = 10\text{V/pC} \times 77\text{pC} \times 200\text{mA} = 154\text{W} \quad (127)$$

となる。大体100W程度であり、このHOMを吸収できるHOMダンパーを開発できればビーム加速を安定にできることになる。KEKBのHOM吸収体ではkW程度の吸収が可能であるので、現実的な値であるが、本クライオモジュールの設計では空洞を2個以上入れた形で組み、空洞間の温度が常温にならない。そこで、HOMダンパーの部分80Kの液体窒素温度にして、なるだけ空洞そのもの入熱を減らすようにしている。この80KでHOM damperが100W程度の吸収に耐えうるかがこのモジュールの開発課題である。

次にダイポールモードの計算を行った。図38がダイポールモードを4.5GHzまで計算を行ったものであり、それぞれTESLA空洞、model-1、model-2の場合の計算結果を示す。TESLAで問題になっていた2.575GHzの高いシャントインピーダンスがmodel-1でもある程度低くなっているが、model-2空洞で周波数も変えて、全体として、100mAのthreshold levelからどのモードも

十分小さなシャントインピーダンスが実現されているのがわかる。

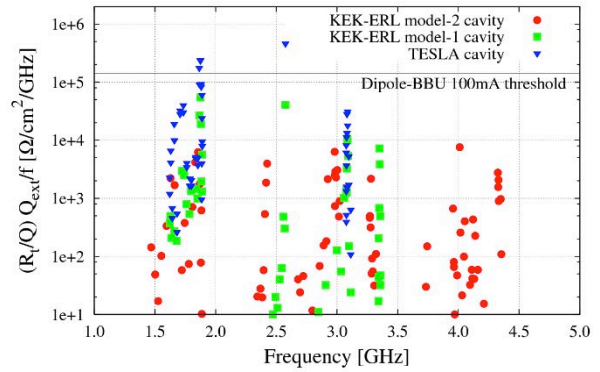


Fig. 38 KEK-ERL model-2 空洞のダイポールモードのシャントインピーダンス。

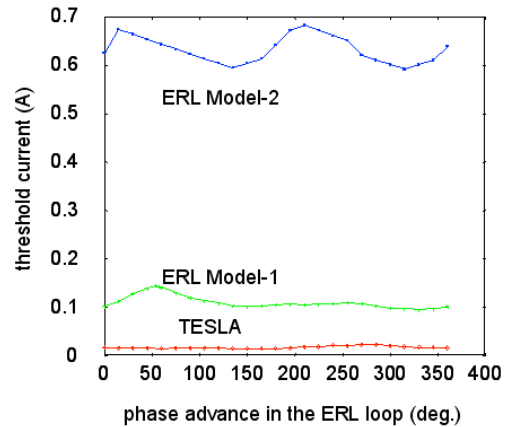


Fig.39 各空洞設計での BBU 閾値電流。横軸は ERL 1 周の phase advance を表す。[54]

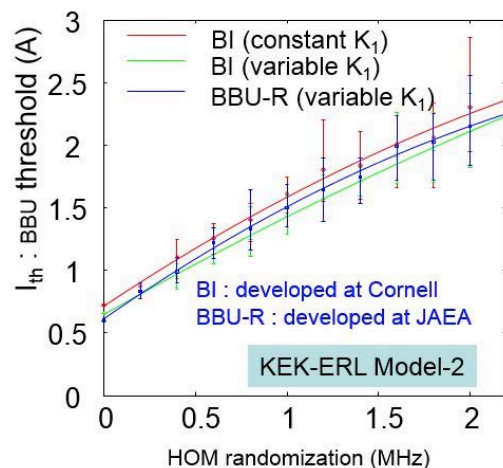


Fig.40 BBU閾値電流のHOM randomizationの効果。[54]

図39、40にHOM-BBUのsimulation計算結果を示す。SimulationはCornellで開発されてBi-code[53]またはJAEAで開発されてBBU-R code[54]を用いて行った。10MeVの入射ビームが加速勾配が20MV/mで5GeVまで加速し、1周して戻ってくる場合の計算であり、一周当たりの式(123)の $\omega_n T_r$ が図39のphase advanceに対応する。この場合では空洞のシャントインピーダンスが下がったおかげでBBU閾値電流がTESLA空洞では20mA程度でしか周回できなかったものが、600mAまでKEK-ERL model-2空洞では上がったことがわかった[48]。図40ではHOMがどの空洞も同じでなく、各空洞毎に σ_f 程度の分布でばらつき(HOM randomization)がある場合の計算結果である。周波数のばらつきが0.5MHz程度で分布しているとよりBBUの効果が分散し、ビーム電流閾値があがることになる。これを利用してCornellのERL計画ではTESLA空洞のセル形状で設計を行っているが我々は安全を見て空洞のセルを変え、BBU閾値を上げるのに成功している。この空洞が実際のビーム運転に耐える要求性能を満たすのが開発の課題である。

最後に参考文献[45]では高次の4極モードに対してもBBUに対する閾値が見積もられており、その対策のために我々は図34に見られるようなinput portの近くに新たなアイデアとして、Eccentric-fluted beam pipe(EFB)という形状を施してある。

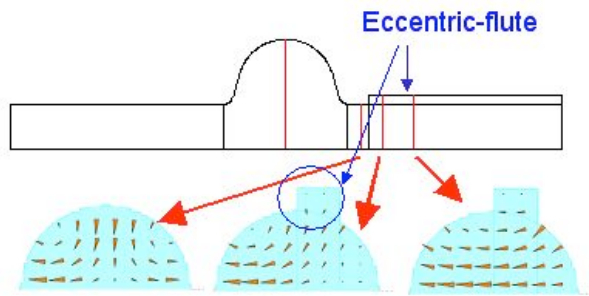


Fig. 41 EFBの原理

図41はそのEFBの原理である。通常空洞に立つ低次の四極モードはTE211モードであるが、このモードはビームパイプ径をかなり大きくしないとTE21のcut off周波数まで届かない。そこで、ビームパイプの形状をmodel-2の形状を維持し、一部に出っ張りを図41のようにつけることで、空洞内部の4極モードをビームパイプ側では2極に変換可能となるような設計を施した。これ

により、TE211モードもビームパイプにしみ出し、 Q_L を下げるのが可能である。

図42が我々の空洞に施したEFBの設計図面である。Low modelでの測定結果を含めた詳細な結果は参考文献[55]及び[48]でこのEFBの有効性をのせているが、この設計により100mAのBBUに対して、4極HOMも取り出せ、安定に運転できる設計とした。このEFBが空洞の高勾配に影響しないかが課題であった。

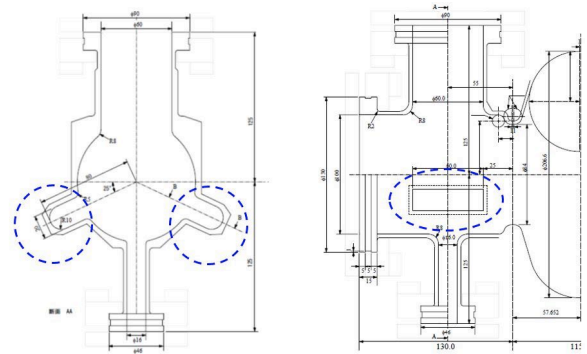


Fig. 42 KEK-ERL model-2のEFBの設計。

このように空洞の設計上は100mAでの運転が問題無いようなKEK-ERL model-2空洞の設計を行い、これを製作し、性能を確保することをERL開発の課題とした。

3.4.3. 高周波源と入力カップラー、冷凍機への要求

最後にビーム運転での高周波源のパワー P_g はビーム負荷がエネルギー回収によりキャンセルするために基本的には式(80)でかかれることがわかった。そのため、理想的に周波数の離調がない $\Delta f = 0$ の場合には式(80)から

$$P_g = \frac{P_0 Q_0}{4Q_L} \quad (128)$$

になる。 Q_L が大きいほど必要なパワー P_g が小さくなるのがわかる。これは $V_c = 20\text{MV}$ としたときに $P_c = 44\text{W}$ であるとして $Q_0 = 1 \times 10^{10}$ そして $Q_L = 1 \times 10^7$ としたとしても、

$$P_g = 4.4\text{kW} \quad (129)$$

で十分であることがわかる。このようにエネルギー回収により、投入パワーをkW程度に非常

に小さくできるのが主加速器空洞の高周波源の大きな特徴であるが、ここで周波数離調の効果 Δf がどれくらいあった場合に P_g がどれくらい必要かを見積もっておくことが重要である。他の加速器に比べ高い Q_L に対し、 P_g の Δf による変化を見積もったグラフが図43である。

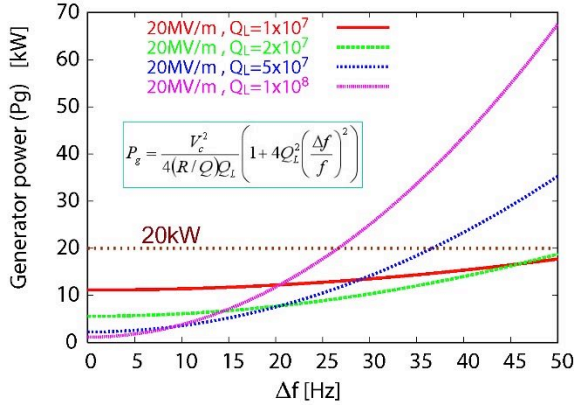


Fig. 43 各 Q_L による P_g vs Δf

縦軸、横軸をそれぞれ P_g 、 Δf にとり、各 Q_L に対し、式(80)をもとにplotしたものである。 Δf が生じる主な理由は空洞に対する外乱であり、この効果をmicrophonicsと呼ぶ。この外乱の大きさは設置するまわりの環境やクライオモジュールの構造に大きく依存するものであるが、TESLAの場合は大きくみて Δf_{pk-pk} が40Hz程度あると予想されていた。そこで安全を見て我々は Δf が50Hzがマージンだとしてそこでも安全に運転可能な Q_L とそれに対する P_g として、空洞のエージングも含めて15MVに対して20MV(L~1mなので $E_{acc} \sim 20\text{MV/m}$)までのマージンを持つものとし、図43より、 $P_g = 20\text{kW}$ の高周波源、及び $Q_L = (1-2) \times 10^7$ がERL主空洞用に必要とした。但し、 Δf が予想より小さい場合には Q_L をさらに大きくした方が得策であるので $Q_L = (1-4) \times 10^7$ を我々の設計の要求値とした。また冷凍機の負荷としては15MV 2台の運転を安定に行えるものとし $Q_0 = 1 \times 10^{10}$ で式(2)より、 $2P_c = 2 \times 22.5W = 45W$ が2Kで吸収できる冷凍機を考える。入射器をいれると最低2Kで80Wは必要となる。これらのインフラを整えながら、空洞開発を行っていった。

4. ERL 用主加速器超伝導加速空洞の開発

ここまでは空洞のRF特性、特に超伝導を最大限に生かした超伝導空洞のメリットと課題、そして大電流に必要な空洞とビームの相互作用の基礎を通じて、ERLの空洞の設計の方針を説明した。ここでは実際にERL主加速器超伝導空洞をどのように製作し性能評価したか、そしてクライオモジュールに組み込んで、最終的にビーム加速そしてエネルギー回収を実現したかを一通りの開発経緯の流れの中で説明する。

ERL用の超伝導空洞の開発はまずはKEK-ERL model-2空洞のセンターセルとエンドセルを形成したNb製の1セル空洞を用いて表面処理とセル形状の問題点が無いか確認した。ここまでの経緯は前回のOHO08の参考文献[7]にて詳細が示されている。ここではまずそれ以降の実際に9セル超伝導空洞(図44)を用いた空洞製作、表面処理と性能評価試験結果について述べる。



Fig. 44 KEK-ERL model-2 タイプのNb製9セル超伝導空洞(1号機)。

4.1. ERL 主加速超伝導空洞の性能評価試験

基本的には空洞製作、表面処理はKEKではlinear collider用の1.3GHzの超伝導空洞用に近年は主に行ってきた。この製作や表面処理技術の蓄積により、第2.3章で述べた超伝導空洞の性能リミットの寄与を下げ、加速勾配の上限を上げること成功し、近年では、30MV/m近くで $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ 近くを達成するようになってきた。空洞製作および表面処理の詳細は参考文献[21]や昨年OHO14の参考文献[56][57]に詳細が述べられているので参考にさせていただきたい。我々の空洞はlinear collider計画のTESLA(-like)空洞に比べ E_{pk} / E_{acc} が1.5倍程度高いものであるが、

この空洞製作工程、及び表面処理、組立をまず踏襲することによって15MV/m～20MV/mで $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ は達成を可能であろうと想定し、ほぼ同工程での製作、表面処理を行った。

4.1.1. 空洞製作と表面処理

まず空洞製作であるが、事前に不純物がないRRRの高い(>250)東京電解社製のNbの板材を使用し、プレス成型を行い、溶接部のトリム加工を行った後に、アイリス部を電子ビーム溶接(EBW)により、まずはダンベル型の形を作成する。図45は製作途中のパーツの様子である。



Fig. 45 KEK-ERL model-2 タイプのNb製9セル超伝導空洞製作の様子(3号機)。ダンベルが7つ(本当は8つある)と両エンドビームパイプもNbで作成されている。

プレス成型で3次元測定を行い、さらに電子ビーム溶接によりこのダンベル型に形どり、溶接縮みなどが全長や空洞の3次元形状に極端に影響ないかを確認する。またこの段階で、プレスによる内面の傷やアイリス部の溶接欠陥などが無いかを確認している。図46は図45の段階で拡大カメラなどを用いて表面を細かくチェックした様子である。色々製作上、表面に傷がつかないように心掛けているのではあるが、やはり、図46のように擦り傷などが存在する。これらを除去し、最終的に赤道部の電子ビームの溶接を行って完成したのが、図44の空洞である。なお、赤道部の溶接は図45の下にサンプルがあるように事前にNb板による溶接のビードの出来をトータルで何100回行い、最終的にビードの出来を確認して、9セル空洞を作成している。なお、これらの一連のプレス成型から、電子ビーム溶接による空洞製作は長年の実績のある

(株)三菱重工社によって行われたものである。このうち、KEKにて、第2.3章に示す現象の除去のため、内面処理を徹底的に行う。



Fig. 46 製作上の内面のすり傷。この部分はその後、バフ研磨によって滑らかにした。

空洞をKEKに受け入れて表面処理を行う前に溶接を行った9セルの内面を事前に検査することは重要である。但し、9セル形状になった空洞内面を直接目で見ることは難しい。近年はそのため、精度のいい内面検査カメラが開発され、このカメラを用い、内面のピットや突起の有無を確認している[58]。図47がその内面検査カメラによる検査の様子である。空洞の中に高精度のCCDカメラが付いた図47の右にある黒いバーを挿入し、空洞を前後及び回転させながら、空洞内面360°方向の細かい表面状態を測定する。特に光の当て方で形状の凹凸を判断し、これにより、事前にクエンチが起きそうなピットや突起などを局所研磨にて除去することが可能となった。局所研磨装置も図48に示すようなこのような複雑な形状に合わせたものが開発され、空洞内面の局所研磨が可能となった[59]。ここまでの空洞製作と受け入れ検査である。

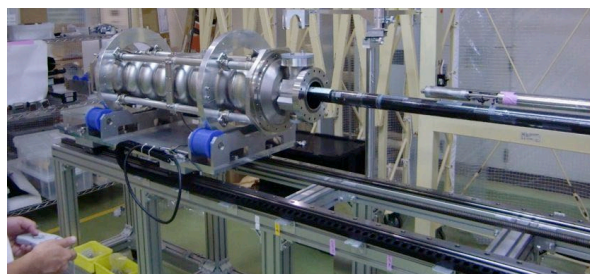


Fig. 47 空洞内面検査カメラ[58]

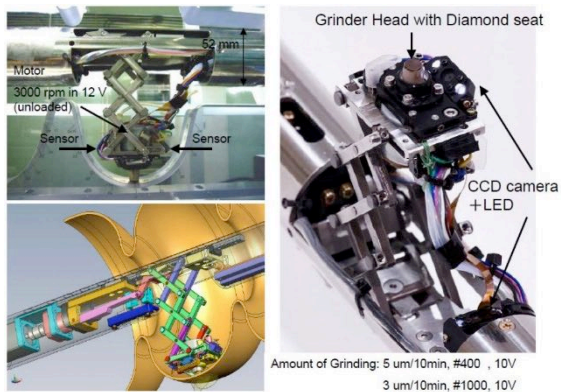


Fig. 48 空洞内面局所研磨装置[59]



Fig. 49 電解研磨(EP1)後の空洞内面

次に性能評価前に必要な表面処理工程について述べる。以下の工程を行っている。

1. 事前電解研磨(Pre-EP) (厚み $5\ \mu\text{m}$ 除去)
2. 電解研磨(EP1)(厚み $100\ \mu\text{m}$ 除去)
3. 1次水洗浄、超音波洗浄(50°C)
4. 超純水高圧洗浄(HPR)(8MPa)
5. アニール(Anneal) (750°C)
6. 空洞内面検査&局所研磨 (前述)
7. プリチューニング
8. 仕上げ電解研磨(EP2)(厚み $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 除去)
9. 1次水洗浄、超音波洗浄(50°C)
10. 超純水高圧洗浄(HPR)(8MPa)
11. Class 10でのクリーンルーム空洞組立
12. リークチェック、ベーキング($>120^\circ\text{C}$, 48h)
13. 縦測定 (空洞性能評価試験)

となる。これらについての詳細は参考文献[56]に非常に詳しく載せられているが、それぞれの工程の重要性だけ簡単に述べておく。まず電解研磨では HF と H_2SO_4 が $10:1$ の体積比で混ざった電解研磨液を使用し、空洞中心のアルミの棒をカソードとして設け、液を空洞内に浸し横向きにして空洞を回転させることで空洞内面の研磨を行う。空洞表面のバフ研磨などによる不純物層の除去が目的である、さらに化学研磨(CP)に比べ、空洞表面が非常に滑らかになり、空洞内面を滑らかにすることも電解研磨により、行うことが可能である。図49がEP1後の空洞内面の様子である。きれいな金属の光沢面が得られていることがわかる。ちなみに我々の空洞特有のEFBの部分もEP後に滑らかになっている様子が図49からもわかる。



Fig. 50 高圧超純水洗浄(HPR)の様子

その後1次水洗浄と超音波洗浄により、EP液を徹底的に除去する。特に超音波洗浄ではFM20という洗剤をいれて、電解研磨時に残る硫黄などの除去を行い、高圧超純水洗浄(HPR)で残りの液などを物理的に除去する。HPRは特にクリーンルーム作業前に非常に重要な工程である。化学的に空洞内面に付着したものは電解研磨で表面ごと除去するが、その残りの微小物の埃やゴミなどは図50に示すように 8MPa の水圧の超純水($>18\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$)を空洞中心のノズルから徹底的に4方8方に噴射し、空洞を回転させながら、6時間~9時間程度上下させ、ゴミを除去する。最初の頃は(株)野村鍍金にて行っていたが、STFが整備されて、クリーンルームとHPRシステムが一体化し、現在はSTFにてHPRを行っている。

1次研磨を行った空洞は一度アニールを行う。この目的はEP1での100 μ mもの厚みの電解研磨後のNb材の残留応力除去を行うとともにNb内部の水素除去を目的としており、2.3節に示したQ-diseaseの回避を行っている。750 $^{\circ}$ C、3時間程度真空炉にいれ、チタン箱に空洞をいれチタンのゲッター効果を使い、水素除去を行っている。

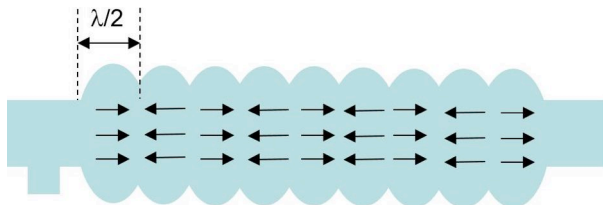


Fig. 51 TM₀₁₀ π -mode の電場分布

空洞を100 μ mも削ると空洞内面の形状変化も大きくなる。EP1後の内面検査+局所研磨の後、問題無ければ、プリチューニングを行う。我々の9セル空洞はTM₀₁₀ modeの π -modeと呼ばれるモードにて加速を行っている。この π -modeは空洞がセルごとに180度phaseが異なるモードである。但し、1cellが $\lambda/2$ の長さであるため、空洞を通過するビームは半波長進む間に次のセルは同じ向きのfieldをうけることになり、空洞9セルともすべて同じ加速fieldを受けられることができる。但し、この同じ加速fieldをセルごとに立てるためには空洞形状が9セルすべてにわたって同じである必要がある。その分布の均一化を行うのがプリチューニング(pre-tuning)である。空洞のセルをパッドで挟み込み、強制的にセルごとに伸び縮みさせて空洞の電場分布を均一化すると共に2Kで1.3GHzにあうように周波数調整する重要な工程である。2Kで1.3GHzに合わせるために、常温では冷却時の縮みを考慮して共振周波数を1297.5MHz程度に周波数調整を行っていく。図52はアニール後のpre-tuning前後のビーズ測定の様子である。空洞内部にビーズによる摂動からセルごとの電場分布の測定を行う[16]。Field flatnessの割合だけ実行加速勾配が減少するため、目標は95%以上のfield flatnessであるが、pre-tuning前はfield flatnessが86.0%であったのに対し、調整後では98.9%まで改善できた。また共振周波数も規定の値の1297.5MHzに合わせこんである。

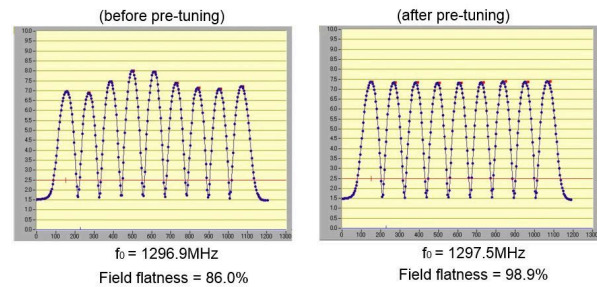


Fig. 52 pre-tuning 前後の field flatness の分布と空洞共振周波数の結果(3号機)



Fig. 53 class 10 クリーンルーム内空洞アセンブリ作業。(1号機)

この後、再度電解研磨(EP2)を行い、1次純水洗浄、超音波洗浄、HPRで徹底的に最終表面をきれいにして、class10のクリーンルーム内で縦測定のためのパーツのアセンブリ作業を行う。図53がクリーンルーム内の作業の様子である。測定に必要なinput port、pick up probe及び真空ひき用のゲートバルブつきのポートを取り付ける作業なのであるが、空洞内にいかにゴミを入れないように作業をするかがポイントである。パーツはすべて非磁性のSUS316L材を用いている。フランジやネジは事前にクリーンルーム内で超音波洗浄して、作業前に一晚class10で乾燥させておく。また、シール材にはスズ鍍金のヘリコフレックスを用いているが、これらを取り付ける前はパーツをすべてイオンガンにてパー

ティクルカウンターにて $0.3\mu\text{m}$ レベルが0になるまで徹底的にブローする。人間が一番の発塵源であるため、手袋もゴミの出ないものを用意し、取り付け作業の前に手袋もイオンガンでブローする。その後、パーツを装着するなど、ゴミに対して、徹底的に管理を行い、その後、class1000の部屋にてリークチェックを行い、スタンドに取り付けたあとに120度のベーキングを48時間行い、図54のようにクライオスタットに空洞を入れ、縦測定（性能評価試験）を行う。



Fig. 54 クライオスタットに空洞をいれて縦測定を行う。(KEK-STF)

4.1.2. 空洞性能評価試験結果

性能評価試験はKEKのSTFにて行った。性能評価を行う際のsetupや各パラメータについては第3.3.1.1節同様空洞とパワーソースとの関係から定義できる。その関係式や測定方法については参考文献[16][56]で説明されておりそちらを参照して頂きたいが、基本的には図10で示したように横軸をEacc(加速勾配)としてその際の無負荷Q値(Q_0)を測定する。表3にKEK-ERL model-2空洞に必要な要求値を書いておく。

Table 3 KEK-ERL model-2 空洞要求値

	KEK-ERL model-2要求値
加速勾配	15MV/m (最大 25MV/m)
無負荷Q値 Q_0	1×10^{10} @15MV/m

実際には第2.3.3節で述べた空洞性能を決めるリミットにより、KEK-ERL model-2空洞の1号機の初期の測定では中々ERLに必要な表3の要求値に到達しなかった。この時に具体的に何が起きているか、それを縦測定中にどのように判断したかを述べるとともに、どのように克服し、結果として、KEK-ERL model-2空洞が表3に示される要求を満たしていったかを述べる。

4.1.2.1. 1号機による縦測定結果[60][61]

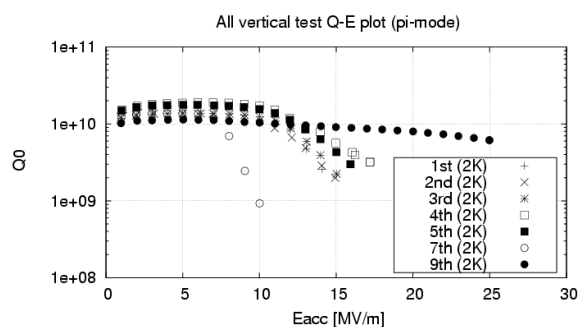


Fig. 55 KEK-ERL mode1-2 の1号機による測定結果。(6と8回目はleakによりなし。)

図55は図44で示した1号機を用いた縦測定結果である。その測定の詳細履歴を示したのが表4である。1号機に関しては合計9回行いようやく

性能が出た。その経緯を各測定履歴に合わせて、説明を行っていく。

Table 4 KEK-ERL model-2 1号機の測定履歴

測定回数	表面処理	最大加速勾配 (MV/m)	コメント (主なlimit 要因)
before	EP(130 μm), Annealing, EP2(20 μm), HPR, Baking	--	--
1st	--	15	Field emission (FE)
2nd	Baking	15	FE
3rd	HPR, Baking	15	FE
4th	EP2(50 μm), HPR, Baking	17	FE
5th	Nothing	16	FE (same spot of 4th)
6th	Local grind, EP2(50 μm), HPR, Baking	No data	Vacuum leak
7th	EP2(30 μm), HPR, Baking	10	Sudden burst
8th	EP2(20 μm), HPR, Baking	No data	Vacuum leak
9th	EP2(20 μm), HPR, Baking	25	Administration limit

4.1.2.1.1. 1号機 1～3 回目の縦測定結果

1号機の1～3回目の測定では図55にみられるように10MV/mからQ値の劣化が始まり15MV/mでクエンチが起り、空洞性能がリミットされた。図56に3回目縦測定時のQ値の劣化と上下につけたPIN diodeのradiationの様子を示す。Q値の劣化に伴い、radiationの上昇が指数関数的に増加しているのがわかる。この原因は主としてfield emissionによるものであり、field emission電流が最終的に空洞の内面にheat lossを生じ、15MV/m程度でクエンチが起こったものと想定される。1回目→2回目ではbakingを行い、ガスの冷却時の問題を疑った。また2回目から3回目の間には再度HPRだけやり直し、ゴミ付着の問題を疑ったが、1～3回目の測定ではあまり違いはなかった。またfield emission源の

同定のために空洞の各セルに90度毎に4つ合計36個の炭素温度系とPIN diodeを設置し、クエンチ時の温度とradiationの様子を測定していたが、分布の詳細が分からず、field emission源の同定に至らなかった。

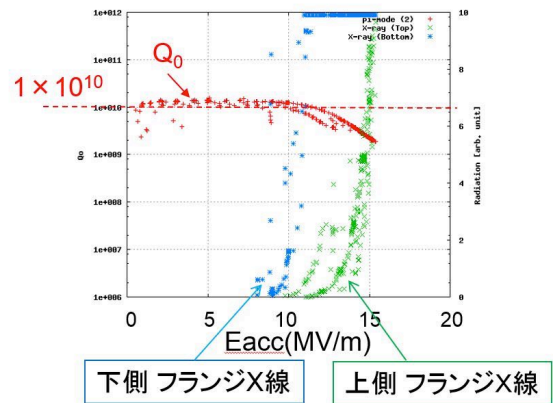


Fig. 56 1号機 3 回目の測定結果 10MV/m から Q 値の劣化が見られる。

4.1.2.1.2. 1号機 4～5 回目の縦測定結果

そこで4回目以降には新たに空洞診断システムを開発し、それを取り付けて縦測定を行った。

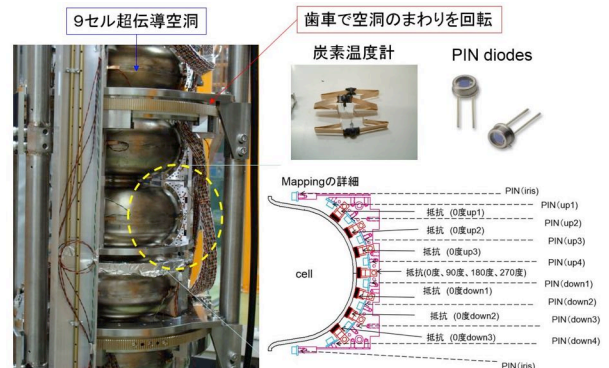


Fig. 57 回転式空洞診断装置 (X線 & 温度 mapping が可能)

図57が新たに設置した回転式空洞診断装置である[62]。3セル毎に1つのmapping装置が歯車付きで配置されている。それが3つあり、9セルのmappingを行うというものである。セル毎に8つのPIN diode(HAMAMATSU, S5821-02)と各iris部にPIN diodeが1つの角度に合計82個並んでおり、これらが、それぞれの歯車を介し、各モーターを通じ、空洞の周りを1回転することで9セル全てのX線のmappingを行う。炭

素温度計(Allen-Bradrey, 50Ω)は合計93個設置されているのと同時に、回転装置に固定されており、PIN diode同様、空洞の周りを回転する。空洞との接触を保つため、図57に示すように、パンタグラフタイプのリン青銅のバネにより、炭素温度計と空洞が緊密にくっついたまま、回転する。このように3セル毎に分けた理由は9セル空洞のkinkや全長の伸びに回転マッピング装置の設置を柔軟に対応すること、また各モーター毎の炭素温度計の回転摩擦の軽減を目的としており、2K低温下での回転動作を確実にすることを意図している。それぞれのデータはAC noise削減のため、0.5sでデータ収集を行う。炭素温度計は2K冷却中にSi温度計にて校正される。固定型に比べ、センサー数の軽減と同時に回転角度0.5°の分解能で空洞分布の詳細測定が可能となるため、局所の発熱やradiation分布測定が可能となった。

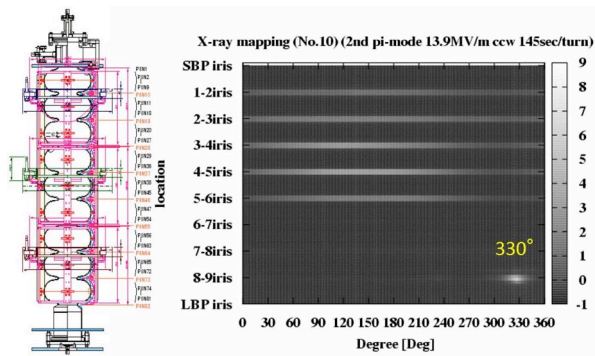


Fig. 58 1号機4回目の縦測定時の x-ray mappingの様子($E_{acc}=13.9\text{MV/m}$, $Q_0=6 \times 10^9$)

第1~3回目の縦測定では field emission が激しく第4回目の測定の前に $50\mu\text{m}$ の電解研磨の表面処理を行い、4回目の測定を行った。またその再現性を見るために、昇温した後に表面処理は何も行わず再度縦測定を実施したのが5回目の測定である。図55に見られるように4回目、5回目とも 10MV/m から Q 値の劣化が始まり、 $16\text{--}17\text{MV/m}$ が最大加速勾配となっている。その Q 値の劣化に伴い、radiation モニターの値が増えていることから field emission が同2回の測定では起こったものとされる。そこで回転マッピング装置を用いて X 線の mapping を行った。図58が4回目縦測定時の π -mode(加速モード)で加速勾配 13.9MV/m の時の X 線マッピングの測定結果である。8-9iris に 330° (FWHM 10°) の位置で急峻な X 線の peak が見られると同時に 1-6 の各 iris 部で 150° と中心とした広範な X 線分布が見られて

いる。これ以外のパスバンド測定では $8/9\pi$, $7/9\pi$, $6/9\pi$ -mode でも 8-9 iris の 330° に急峻な peak が見られた。但し、このパスバンドではその他の広範な X 線分布は見られなかった。5回目の縦測定においても π -mode にて全く同じ分布を再現したことから、この 8-9iris 部が X 線発生場所だと疑い、空洞を開け、内面検査システムにて空洞内面の観察を行った[58]。

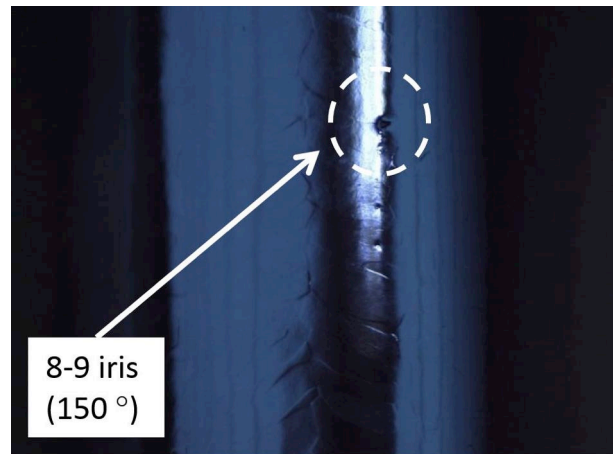


Fig. 59 5回目縦測定後の1号機の内面検査の様子。

図59が内面検査時の 8-9iris の 150° 部での測定結果である。高さ数 $10\mu\text{m}$ の幅数 $100\mu\text{m}$ の突起が見られた。特にこの場所は X 線マッピングでの 330° のピークの対面でありなおかつ加速モードの広範な分布のピークの角度でもあり、この突起が X 線発生源の疑いが高い。

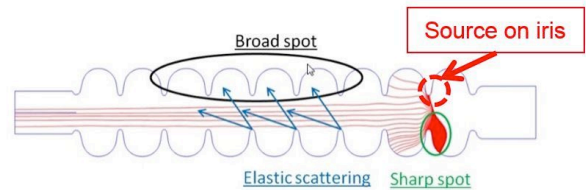


Fig. 60 1号機4回目の縦測定時の x-ray 分布の計算の様子($E_{acc}=13.9\text{MV/m}$, $Q_0=6 \times 10^9$)

そこで図15同様この場所に field emission 源 ($\beta_{FN} \sim 100$) を仮定して、field emission の simulation をしたものが図60である[63]。対面の peak の特に9セル側が radiation の分布が局所的に高いことがこれにより説明できる。また broad な分布は空洞と radiation の相互作用を EGS5[64]に入れて simulation を行うことで field emission 源と同じ角度で broad な radiation 分布を形成することがわかった。これは縦測定でのパ

スバンド測定では field emission 源が加速せずに対面の 330° だけに局所 peak を作成する事実とも見事に一致する。そのため、この突起が field emission 源だと思い、次の縦測定前に局所研磨にてこの突起を取り除いた。

4.1.2.1.3. 1号機 7～9 回目の縦測定結果

第 7 回目の縦測定結果の詳細を載せる。(6 回目は真空 leak が起こり、測定中止)

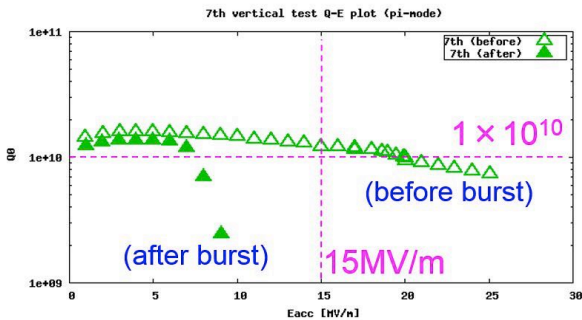


Fig. 61 1号機 7 回目の縦測定結果。

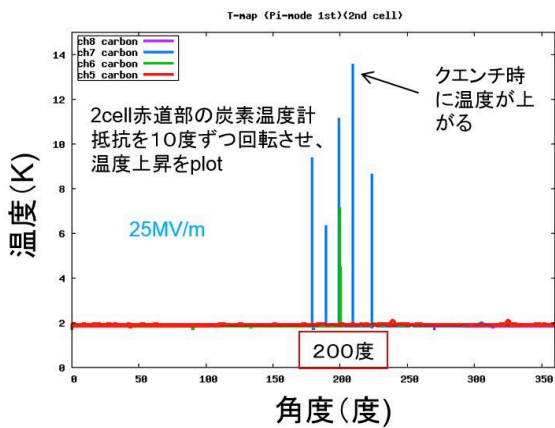


Fig. 62 バースト前の 25MV/m でのクエンチ時の 2 セル目の発熱の様子。縦軸は炭素温度計の温度上昇。横軸は mapping の回転角度。

局所研磨の結果、第 7 回目の結果では図 61 に見られるように 25MV/m の加速勾配まで空洞性能が改善した。特に 20MV/m までは放射線が見られず、field emission の改善が顕著に見られた。図 62 に見られるように 2cell の 180-240° の赤道部に炭素温度計による温度上昇が 25MV/m でのクエンチの際に見られ、内面欠損による発熱が 25MV/m の加速勾配を制限していることがわかった。その他のセルの加速勾配の制限を見るために、特に 2セルに field が立たない 6/9 π -mode の

測定を行い、36MV/m の勾配まで達することがわかったが、その加速勾配にて突然、バーストが起こり、その後は図 61 の(after burst)の測定に見られるように π -mode では 10MV/m の加速勾配までしか行かないようになった。

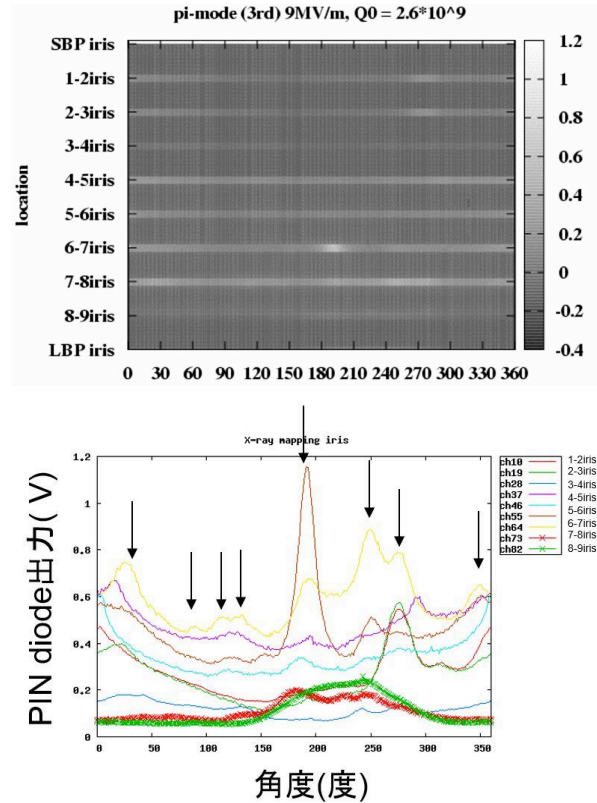


Fig. 63 バースト後の x-ray mapping の様子 (Eacc=9.0MV/m, Q₀=2.6x10⁹)。 (上) X-ray mapping 全体の様子。 (下) 各 iris 部の PIN diode を横軸角度にして plot したものの。

図 63 がパスバンド測定後の 9MV/m の加速勾配での π -mode での X 線マッピングの結果である。図 63 の特に (下) に見られるようにバースト前には見られなかった多数の X 線トレース(図 63 下の矢印)が見られおり、バースト後に多数の小さな X 線発生に参与する微細粒子がまき散らされ、性能劣化になったものと予測される。7 回目測定後に再度内面検査を行った所、図 64 に見られるように 25MV/m のクエンチ時に発熱が見られた 2セル 200 度付近にて、深さ 10 μ m、幅 200 μ m 程度のピットが見つかっており、これがバースト前の加速勾配の空洞性能をリミットしていると予想される。残念ながら、多数見られた X 線マッピングでのトレースの候補となる角度には内面検査でははっきりとした X 線発生源は今回は確認

されず、微小な埃などを除去するため、そのまま再度表面処理(EP2)を行う事となった。

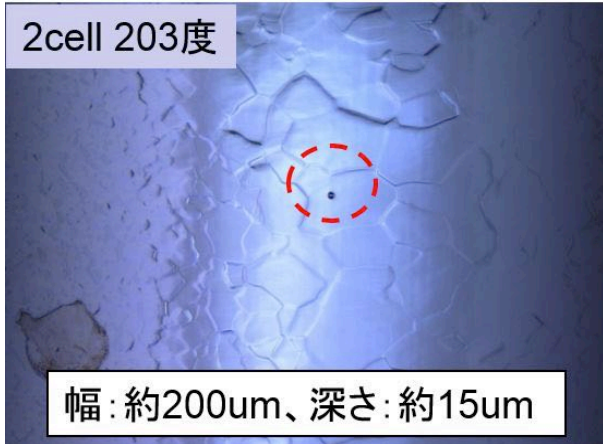


Fig. 64 7回目縦測定後の空洞内面のピット

表面処理後、図 55 に示されるように 9 回目の測定にて、25MV/m まで達成することが確認された(8 回目の測定は真空 leak のため、測定中止)。特に 15MV/m で $Q_0 \sim 1 \times 10^{10}$ を達成していることも判明した。Field emission は 15MV/m から発生したが、7 回目とは異なり、X 線の発生場所は 15MV/m 以上で数か所のみであった。25MV/m 以上の電圧も可能であったが、前回のバーストを恐れ 25MV/m 以上は上げず、測定を終了した。

これにより KEK-ERL model-2 空洞が ERL の要求値を満たす空洞であることが性能評価試験から判断できた。最初の測定時は空洞の劣化原因がわからず、性能の改善に向けた解決策が中々出なかった。その後、回転式空洞診断システムの導入による空洞劣化原因を同定。またこれを修復する局所研磨装置と内面検査システムの充実(縦測定の 5 回目くらいから導入が可能になった。)のため、問題点の可視化が行われ、空洞の表面処理(EPによるシミ問題の解決)や組立(イオンガンの導入により繊細な埃対策による組立が可能(7 回目測定以降))の問題点に feedback をかけながら、最終的に空洞の性能が出たことがこの 2008 年~2010 年頃の大きな進歩であり、最初の空洞の大きな意義であった。特に独自に開発した世界初の回転式 X-ray mapping によって、field emission がどのように起こるかが縦測定でこの profile を見ることで理解できたことが大きく、それに対する simulation によって field emission 源を同定可能となったことが、ここで得られた大きな経験である。

4.1.2.2. cERL モジュール用 3,4 号機縦測定結果

1 号機が無事に ERL の仕様を満たすことが判明した。1 号機は RF 設計が ERL 用に問題ないかを確認するものであったが、次に実際に高圧ガス申請での強度計算、クライオモジュール組込みを想定したモジュール組込み用のプロトタイプである KEK-ERL model-2 空洞の 2 号機の作成を行った。具体的にはフランジの内輪が NbTi、外が SUS でシールに Sn 鍍金のヘリコを使用。エンドセルは 3.5mm 厚の Nb を使用、またアイリス部に強め輪を入れ、高圧ガス対応の強度を確保している。最後に空洞縦測定が終わったのちにジャケットの溶接が可能であるように両端に NbTi の端板がついている設計である。なお、1 号機での HOM 測定結果を考慮して $\phi 120$ の Large Beam pipe(LBP)サイドを一番低い HOM をきっちり取り出せるように $\phi 123$ に変更した。Small Beam Pipe(SBP)サイドは $\phi 100$ で変わらず。

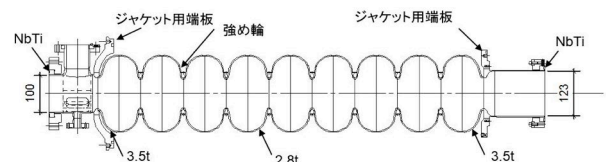


Fig. 65 KEK-ERL model-2 2号機製作図
(3号機、4号機も同様の図)



Fig. 66 KEK-ERL model-2 3号機、4号機

2 号機の縦測定結果については詳細は参考文献[61]に載せるが、ヘリコを用いても問題ないかなどを調べ、結果 1 号機同様 25MV/m まで到達し、特に 15MV/m で $Q_0 \sim 1 \times 10^{10}$ を達成していることも判明した。この 2 号機の測定で特に 2K 空洞共振周波数が空洞製作時の電子ビーム溶接縮

みを入れて設計通り 2K で 1.3GHz にほぼ合うかが問題であったが、測定結果として、2K で 1299.6MHz 程度であり、tuner の駆動範囲以内であることが、わかった。そこで cERL 用のクライオモジュール用の空洞の製作を行った。図 66 が cERL 用の空洞 2 台(3 号機、4 号機)の写真である。写真では LBP サイドにつくチューナー駆動用のベローズも載せてある。

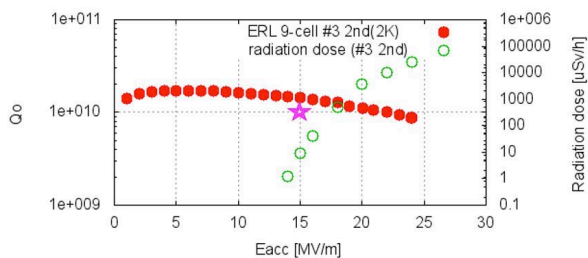


Fig. 67 KEK-ERL model-2 3号機縦測定結果

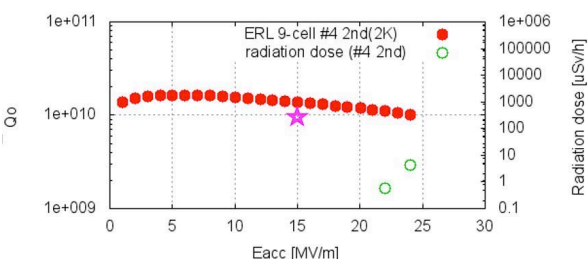


Fig. 68 KEK-ERL model-2 4号機縦測定結果

図 67 及び 68 がそれぞれ cERL クライオモジュール組み込み用の KEK-ERL model-2 タイプの 3 号機及び 4 号機の縦測定結果である[65]。最終的に両空洞とも 25MV/m まで到達し、特に 15MV/m で $Q_0 \sim 1 \times 10^{10}$ を達成していることも判明した。(図 67,68 中の星マークは ERL の要求値でありそこを測定結果が上回っているのがわかる。) 図 68,69 には縦測定の上板につけた radiation モニターの値も plot した。3 号機に関しては 14MV/m から radiation が始まり、20MV/m 以上で少し Q 値の劣化が始まっている。それに対し、4 号機は 22MV/m でようやく radiation が始まり、25MV/m までも Q 値の劣化が存在しなかった。このように両空洞とも 15MV/m で Q 値の劣化もなく、Field emission も問題ないことがわかった。

1 号機での様々な経験のもと縦測定では問題なく空洞性能を確保する技術が付いたことが大きく、この結果を受けて、3 号機、4 号機は無事に次のクライオモジュール組み込みに向けた準備を行うことになる。

4.2. ERL 主空洞用周辺機器の性能評価試験

ERL 用の超伝導空洞の性能は性能評価試験(縦測定)で無事に確保された。次に cERL 用のクライオモジュールの設計を行い、ビーム試験に向けてクライオモジュールの組立を行っていくが、クライオモジュールに組み込む入力カップラー、HOM ダンパー、周波数チューナーなどの重要な周辺コンポーネントも大きな開発要素である。これら重要コンポーネントは空洞同様に組み込み前に性能評価試験を行い、モジュールに組込可能かを確認することが必要である。ここではまず周辺機器の性能評価を行い、必要とされる ERL の要求を満たしているかを確認する。

4.2.1. 入力カップラー

表 5 に入力カップラーの要求値を示す。エネルギー回収が成り立つため、パワーと Q_L の関係は図 43 から決まる。microphonics の程度が $\Delta f = 50\text{Hz}$ と仮定するため、表 5 が ERL に必要なカップラーの要求値となる。

Table 5 cERL 主加速空洞の入力カップラー要求値

	要求値
周波数	1.3 GHz
加速勾配	15~20MV/m
入力電力	最大20kW (定在波)
負荷Q値(Q_L)	$(1\sim4) \times 10^7$

4.2.1.1. 基本設計

1.3GHz にて CW で 20kW ものパワーの供給を安定に行うための入力カップラーは重要な開発要素の一つである。そのため、重要となるのは入力カップラーの RF 設計と同時に 2K の空洞への熱侵入を 20kW もの RF パワー投入時に減らす熱設計であった。また、大量の空洞に対して、超伝導空洞の性能を確保するためにセラミック窓の割れや組立によるゴミ混入によるリスクをいかに減らすかということである。

図 69 に我々の入力カップラーの設計図を示す。基本設計は 1.3GHz にてパルス運転で 1MW(パルス幅 1.5ms, 5Hz)までの high power 試験の実績のある STF-BL 空洞の input coupler から始めた[66]。特にセラミック窓には 500MHz で運転していた TRISTAN や KEKB にて実績のあるチョーク構造を用いたトリスタンタイプの同軸型窓が採用されており、これを 1.3GHz 用に拡張されて

いる点が ERL 空洞への採用を決めた理由の一つである。但し、STF と違い、ERL では CW の 20kW の power 供給が必須であるため、熱負荷の影響が大きく、いくつかの設計の改良を行った。

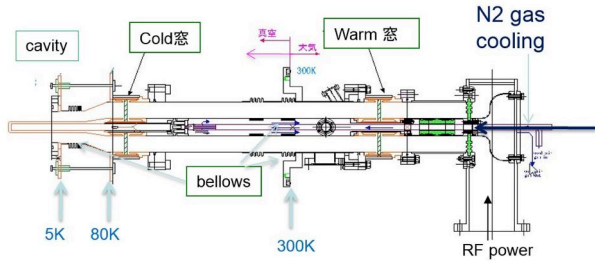


Fig. 69 ERL 主空洞用入力カプラー設計図

主な変更点として、同軸部のインピーダンスを 50Ω から 60Ω にし、内導体の電力損失の軽減を行った。また、セラミック窓の材質も誘電損失の少ない 99.7% 純度のアルミナセラミックス (HA997) を窓材に採用した。大気中から真空中に RF を導入するセラミック窓は空洞への粉塵混入を避けるため低温部 (Cold 窓) と高温部 (Warm 窓) の 2 つを設け、特に製作の簡便性から 2 つを同一寸法とした。

Table 6 入力カプラーに 20kW (定在波) が投入された時の dynamic loss

	各場所での熱量	
内導体発熱	29.4W (Total) (80K で吸収)	
外導体発熱	2.5W (80K)	1.55W (5K)
セラミック窓発熱	1W (一枚当たり) (HA997 使用)	

表 6 は 20kW power 投入時の dynamic loss である。内、外導体は低温部への熱侵入を減らすため、1mm の SUS (316L) に Cold 窓から warm 窓の間は $10\mu\text{m}$ の銅鍍金を施した。それとは別に warm 窓から大気まではベローズと warm 窓の間は 1mm の SUS に $30\mu\text{m}$ の銅鍍金をそしてベローズから大気までは 20kW による発熱を大気で吸収するために $150\mu\text{m}$ もの銅鍍金を設けている。STF の場合と比べ、RF 投入時の dynamic loss が圧倒的に大きく 60Ω のインピーダンスにしても外導体の発熱 4W に対し、内導体の発熱で 29.4W になっている。セラミック窓の発熱は HA997 の使用によって一枚あたり 1W 程度と小さい。これらの冷却のために、低温側の内導体の熱負荷は cold 窓 80K の温度定点をセラミック窓に設け、そこで吸収することにした。さらに低温側に 5K の温度

定点を設けることで、2K の超伝導空洞への熱侵入を軽減することにした。この場合、Static loss は $300\text{K} \rightarrow 80\text{K}$ で 15.5W、 $80\text{K} \rightarrow 5\text{K}$ で 1.6W 程度、 $5\text{K} \rightarrow 2\text{K}$ で 0.3W 程度と見積られる。また、常温側は内軸内部にロッドを挿入し、窒素ガスにより強制空冷により冷却する構造を設けている。このロッドはカプラーの先端を動かす駆動機構も兼ねており、これで Q_L を $(1 \sim 4) \times 10^7$ に可変にすることとしている。これは後で示すが $\pm 5\text{mm}$ の稼働範囲が必要になる。

4.2.1.2. 1号機カプラーハイパワー試験[67]

我々は RF 設計や熱設計が正しく設計通り、製作されているか確認するために、試作機としてカプラー 1 号機を作成した。

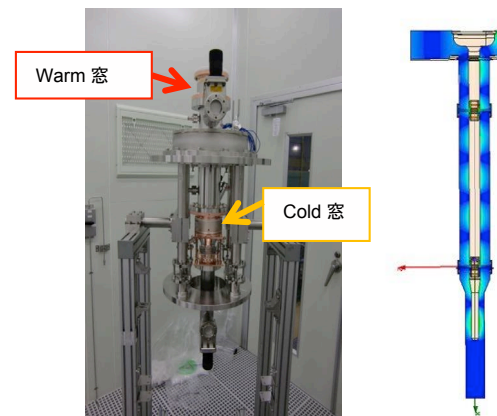


Fig. 70 ERL 主空洞用入力カプラー 1号機 (左) とその時の RF 場(磁場)分布(右)。

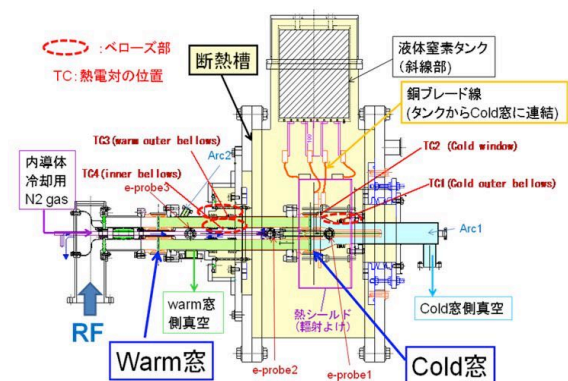


Fig. 71 入力カプラー 1号機ハイパワーテスト setup

特に 1号機の開発に関しては、通常のカプラーテストとは別に 80K の液体窒素温度による特殊な測定を行い、入力カプラーの設計が十分か判断

した経緯があるため、今後の参考になればと思います、その測定の様子を載せたいと思う。まず、図 70 がカプラー 1 号機とその (HFSS による) RF 計算の磁場分布の様子である。カプラーの RF 設計のポイントは常温と低温で空洞とカプラーのカップリングが **under** から **over** に変わるため、常温エージングの時と 2K 冷却時ではカプラー内の定在波の位置が変わる。その定在波が 180 度ずれてもセラミック窓上ではどちらも電場分布が変わらないように RF field の 90 度の位置にセラミック窓を配置することである。まずは 1 号機単体で図 71 に示すようなハイパワーテストを行った。この目的は RF でベローズやセラミックなどが 20kW までに放電などが起こり、以上な発熱などが起こらないか、また温度上昇が設計通りであるかなどが重要な測定項目である。特に Cold 窓部は実際の冷却を模擬し、断熱槽により囲み、パワー投入前に液体窒素により 80K の温度程度に冷却することを可能とした。

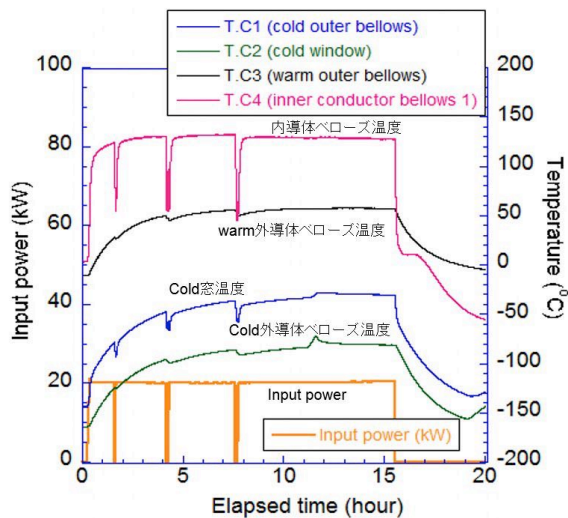


Fig. 72 パワー履歴と温度上昇のグラフ。

図 72 がパワー測定結果である。まず 25kW まで pulse でエージングを行い、真空など放電が問題ないかを確認し、図 72 のように 20kW の定在波をいれた。まずベローズの温度上昇であるが、内導体ベローズは窒素ガスでの空冷により、120 度の温度上昇に抑えられ、真空は warm 側は最高で 4×10^{-6} Pa まで上がった後、下がっていく傾向が見られた。Cold 部の外導体のベローズの温度上昇が最も激しく、 $\Delta T=113^{\circ}\text{C}$ であったが、温度としては -30°C であった。特にこの部分はモジュール組み込み時には 80K と 5K のアンカーの間に設置される部分であり、より冷却が強化されるため、

Cold 外導体ベローズ部の発熱による温度上昇は特に問題ないことが分かった。Warm 窓近くの外導体のベローズは、温度上昇が 50°C 程度で抑えられており、断熱真空槽内でも問題なく発熱を抑えられていることが分かった。特に設計時の計算から、ベローズ内面に $150\mu\text{m}$ の銅メッキを施したことが、今回のこの温度上昇の抑制に効果的であったものであり、2,3 号機のカプラーの設計に反映させることにした。次に Cold 窓の温度上昇であるが、Cold 窓は窒素冷却時では -165°C であったが、Cold 窓で $\Delta T=83^{\circ}\text{C}$ の温度上昇見られた。窒素温度の冷却により温度では -82 度で安定であった。これらより、パワー試験では放電による問題や熱設計上問題ないことがわかった。

これが 1 号機での開発の経緯である。Cornell 大の ERL 入力カプラーのハイパワーテストでは同じく液体窒素を用いたテストスタンドにて、最初に熱設計の確認を行っている [68]。我々の方でも低温下での入力カプラーの熱設計がテストスタンドを用いて、20kW 投入時でも十分であることがわかったことが 1 号機のテストの大きな意義であった。

4.2.1.3. 2,3 号機入力カプラーハイパワー試験

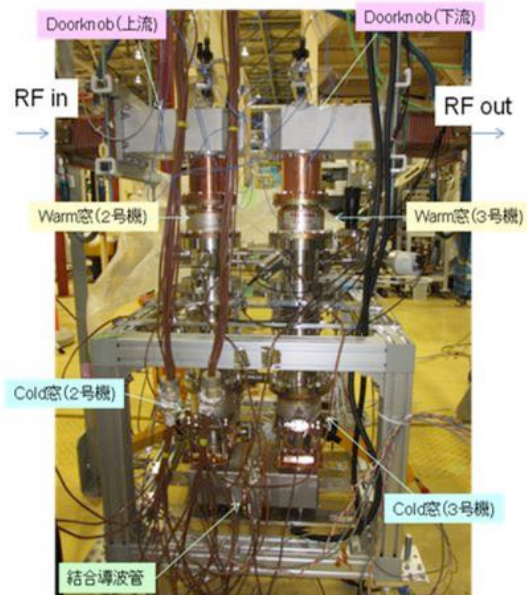


Fig. 73 ERL 主空洞用入力カプラー 2 号機、3 号機を用いたテストスタンドの setup。

1 号機による空洞に対しての Q_L 測定も行い(後述)、カプラー長の修正を行った後に、cERL 用の 2 号機及び 3 号機の製作を行い、ハイパワーテ

ストを行った[69]。図 73 が cERL に入れるための入力カプラー2,3 号機の写真とそのテストスタンドの様子である。1 号機では定在波での試験しか行えず主に熱設計で問題無いかメインであったが、2,3 号機では cERL モジュールインストールに向けたカプラーのハイパワーでのエージング(processing)が大きな目的となる。そこでカプラーが2つ以上ある場合は通常、図 73 に示すように2つのカプラーを組んでそこにパワーソースから進行波を送りエージングを行う。図 70 の場合では定在波が高い所しかエージングが進まないのに対し、図 73 の2つの組み合わせでは進行波によりカプラー内全面に高い電場が触れるのでカプラー内面の全面をエージングすることが可能である。但し、定在波に対して同じ電場を立てるためにパワーソースが定在波の4倍のパワーを必要とする。ここでは入射器用に用いる300kWのクライストロンを用いて、パワーテストを行い、80kW以上で1s以上のlong pulseで熱負荷が20kWの定在波と同じ duty 50%以上でエージングすることを目標とした。

まず、カプラーは後に空洞とつなぐため、すべて class 10 のクリーンルーム内で warm 窓と Cold 窓と結合導波管を組んだ後に外に出して、ドアノブとセンサー類を取り付ける。そこで、RF 設計が計算通りであるかどうかを測定するために上部ドアノブ部を通じて、片方の導波管(port1)から、もう片方の導波管(port2)までの透過と反射の測定を行い、設計目標である $S_{11} < -25\text{dB}$ に調整されてカプラースタンドが製作されているのがわかった。特にベローズ込みで行った RF の simulation の計算結果が実測と非常に合致することが分かった。

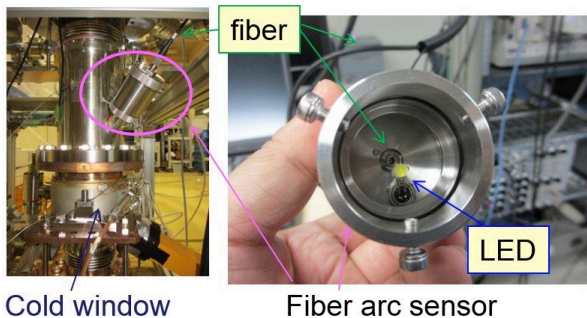


Fig. 74 fiber を使ったアークセンサー

ハイパワーテストでのもう一つの目的はモジュールでの窓の放電時に放電が増大しないように早く検知するシステムを試験しておくことで

ある。そのため、図 74 に示すファイバーのアークセンサーを warm 窓、Cold 窓に向けてカプラーに対して各3つずつ図 74 の左のように設置した[70]。受け取った信号は PMT にて増幅し、ある一定の信号が来た時に power に対して、interlock がかかるようにした。なお、LED は取り付けただけで test で信号の確認ができるように設けたものである。その他、パワーや真空に対して interlock を設け、パワーテストを行った。

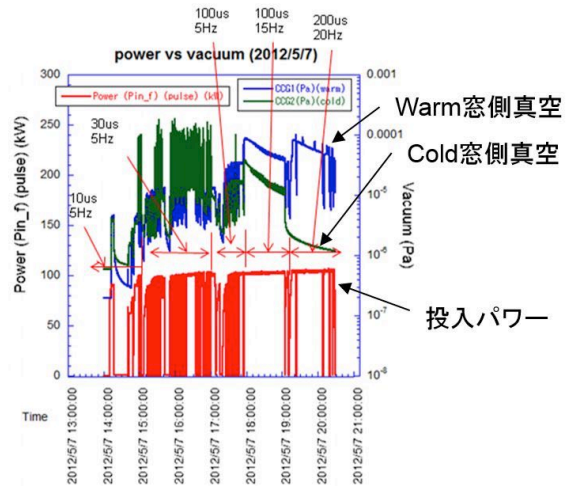


Fig. 75 pulse エージング時パワー投入履歴。

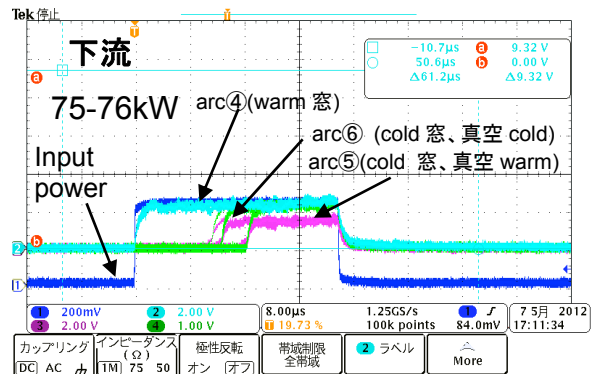


Fig. 76 30 μs 5Hz pulse エージング中の放電時のアークセンサーの信号

図 75 がエージング途中のパワー履歴である。パワーを最初から CW で 80kW 以上入れるのは非常に危険であるために、最初は $10\mu\text{s}$ のパルス幅でピークパワーを 100kW になるまでエージングを行い、そこから徐々にパルス幅を伸ばして、図 75 に示すようにエージングを進めて行く pulse 幅を広げることで process の power level が少し下がり、再度 process が必要であった。たとえば、図 75 の $30\mu\text{s}, 5\text{Hz}$ での power 投入時では $10\mu\text{s}$ です

に process が終わっていた 70kW level で Cold 窓及び warm 窓が 2 次電子の成長により、 1×10^{-4} Pa まで悪化し、そこから 100kW までは再度 process が必要であった。その際の arc sensor の信号を図 76 に示す。図 76 に見られるようにアークセンサーの信号の一部は power 投入から $10 \mu s$ では反応が見られず、その後遅れて arc の信号が見られた。特にこの反応は徐々に後退していき、process が進んでいる様子が見られた。最終的にはこの信号がパワー投入時も無くなっていき、真空も良くなる様子が見られた。最終的に $200 \mu s, 20Hz$ の pulse process を行い、105kW の peak パワーに到達した。その際にはアークセンサーからの全ての信号は無くなり、真空も良いレベルで落ち着いた。最終的に $1s, 0.5Hz$ のパワー投入を行い、85kW で 1 時間以上安定に keep できたため、Duty 50% 1s もの long pulse で 80kW 以上のパワー投入が可能であり、ERL の要求が満たされたと判断し、エージングを終了した。この後念のため、CW で 40kW の進行波を投入し、4 時間以上 keep できることを確認した。その際の内導体の温度上昇も窒素ガスを 120l/min 流すことで $\Delta T=60$ 度程度で熱的にも問題ないことを確認した。

モジュールに入れる前のエージングも十分行い ERL 用のカプラーは熱設計、RF 設計問題ないことを確認した。このようなエージングは超伝導空洞に入れる入力カプラーでは必ず行いモジュールに組込まれるがこのプロセスの時間の短縮をいかに行うかが量産化の今後の課題である。ちなみに今回の process 時間はトータルで 34 時間かかっている。なお、Fiber を用いたアークセンサーはセンサーモジュールを色々改良して結果的に、効果的に interlock として働いた。特に反応速度は $1 \mu s$ 程度であり、cERL での運転に十分な仕様であり、今後の安定運転のため非常に重要なセンサーになっている。(後述)

パワーテスト後もセラミック窓の割れは見受けられず、cERL 用の主空洞の cryomodule にインストールの準備のためにクリーンルーム内に保管された。なお、この入力カプラーは (株) 東芝電子管デバイス社によって作成されたものである。

4.2.1.4. 入力カプラー設計製作上の注意点

この入力カプラーに関しては上述したようにスムーズに開発が進んだかのように話しているが、実は筆者が主に開発していた部分で最初は

色々なトラブルに見舞われた。特に窓の破損が何回も起こった。具体的には

1. セラミック窓の RF 設計変更により、dipole mode の予期せぬ共振モードが 1.3GHz に立ち、窓内の熱負荷が上昇し、窓が割れる [71]。
2. Cold 窓では液体窒素温度と室温の熱サイクルを繰り返すことで窓が割れる [67]。

の主に上記 2 つである。(時間の関係上)ここでは詳しく述べないが、1 に関してはセラミック窓の厚みを変えることで dipole mode の共振周波数を変更し、発熱を回避することに成功している(この回避については詳しくは参考文献 [71] を参考されたし)。また 2 に関しては STF の Cold 窓でも問題になっていた。問題の本質は内導体とセラミック窓のろう付け部分に 80K の温度では高い応力集中が起きるということであった。この回避のために、内導体の銅のスリーブの厚みを薄くするなどを行い、応力を下げ、今まで 5 回の熱サイクルで割れていた Cold 窓を 10 回以上(それより多い)の熱サイクルで割れない結果が得られた [67]。これらの改善により、現在、致命的な窓の割れを回避している。

その他問題になるであろう課題は我々の入力カプラーでは今のところ見られていないが他の常伝導空洞なども含めた空洞用のカプラーで見られている課題として、

3. セラミック窓の TiN コーティングのろう付け後の変遷。(窓の発熱の温床) [72]
4. 銅鍍金の不良 [73]。(鍍金の剥がれ)
5. カプラー内のマルチパッキング

である。3 に関しては TiN コーティングを行ったセラミック窓をろう付けするときの温度上昇で $TiNO_x$ の表面の状態が変遷するというものであり [72]、温度上昇をできるだけ経験させないような加工方法により改善を検討可能であろうと予想される。4 に関しては我々(日本)の方では問題ないのだが、近年、海外の入力カプラーで鍍金の剥がれなどの不具合が多数出ているとの報告が多く [73]、近年入力カプラーの海外での打ち合わせなどで大きく取り上げられている。幸い、日本では鍍金の成分など細かく打ち合わせながら行ってカプラーの設計を行っているのだが、よくよく聞くと海外では鍍金液の成分を研究者が知ら

ずに発注し、それでうまくいかないからどうしたらいいかという議論が多く、まずそこを細かく study して、改善しないと始まらないのではないと思われる。5.のカプラーのマルチパッキングは KEKB では表面を groove すること [74] や内導体にバイアスを書けることでエージング上コントロールしながら、ハイパワーに到達している [75]。

最後に設計製作上の注意点として、 Q_L ($\sim Q_{ext}$) の設計と実測について述べておく。まず、図 77 に示すように空洞とカプラーポートに位置関係からカプラーの挿入長を変えた時にポートのしみ出しパワーから Q_{ext} を simulation(HFSS)から計算している (図 77) [6]。当初は $Q_L=5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ の範囲を動かすことを想定し、計算していた。結果、図 78 に示すように $\pm 5\text{mm}$ 動かせばこの Q_L を達成できるとしてカプラーの製作を進めた。

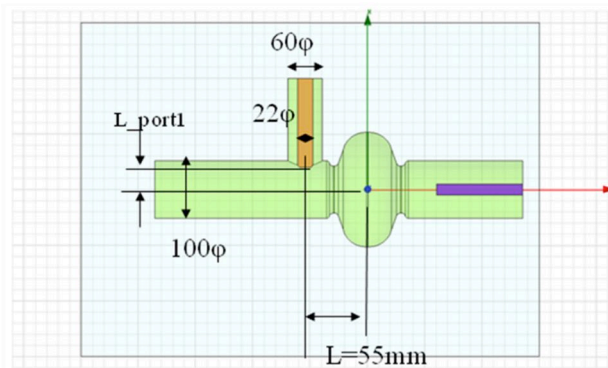


Fig. 77 入力カプラーの Q_L の計算の様子

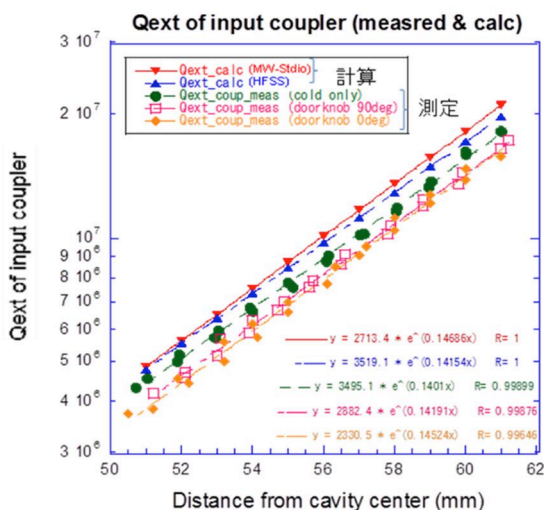


Fig. 78 入力カプラーの Q_L の測定の様子。

その後、我々は1号機を使って実際に超伝導空洞の1号機と合わせて Q_L の測定を図 78 のように行った。駆動は実際のロッドをつけて動かし、まずロッドによる駆動が可能であることを確認した。実測 (ドアノブつき) と計算結果では図 78 右に示すグラフから、傾きはほぼ計算通りの結果となったが、 Q_L にして 1.3 倍の違い、空洞からの距離のずれに換算すると約 2mm 近い違いがあることがわかる。計算がアンテナのみでドアノブを含んでいないため、ずれが生じている。cold 窓だけの測定結果と計算とを図 78 から比較すると、cold 窓単体と計算ではやや違いがあるものの、0.7mm 程度のずれに収まる。カプラー1号機の実測値で特にドアノブの影響も検討し、設計値からまずは 2mm 小さくすることを条件とし、さらに $Q_L=1 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$ と最終目標としたことから、実験結果と設計の見直しにより、実機 (2、3号機) に対しては1号機から 2mm+5mm=7mm 減少させたアンテナ長を採用することにした。

Q_L の設計の際には、一度試作機を作成し、我々のように Q_L に修正を加えることができれば幸いであるが、それが無理なら、セラミック窓+ドアノブまで含めた full simulation を行って計算を行わないと、2mm 程度のずれが生じ、正確にあわなかったことはここではコメントしておきたい。どこまで設計を追い込むかを最初にイメージしておくことが重要である。

4.2.2. HOM ダンパー

HOM ダンパーは大電流運転に向けて非常に重要な開発要素である。初期の開発段階では HOM coupler では 150W の熱負荷に持たないと分かったため、我々は真っ先に図 22 に示すように HOM ダンパーを空洞の両端におき、ビームパイプから出た HOM をすべて吸収するビームパイプ型のダンパーを開発することにした。



Fig. 79 HOM ダンパー概念図(左)、80K 部の櫛歯に加工された銅に HIP された吸収体(右)

ERL で必要とする HOM ダンパーは多数の空洞を一つのクライオモジュールに入れることを想定しており、空洞間にも図 22 に示すように HOM ダンパーが置かれることを想定する。この場合、問題となるのが、空洞の温度が 2K に対し、100mA 運転で出てくる HOM の 100W 以上の熱(式(123)参照)を 2K の空洞に影響ないように設計する必要がある。図 79 は HOM ダンパーの概念図と実際製作された吸収体部の写真である。100W 以上の吸収熱はまず 80K の温度領域におかれた Ferrite の吸収体で吸収される。Ferrite は KEKB でも用いられている IB004 を用いて銅に HIP(Hot Isostatic Pressing)する構造としている[76]。HIP にしている理由はコーネル大では ferrite などを内側にロウ付けした構造にしているが、これが冷却中にロウ付けした ferrite が剥がれることが起きているためであり、cERL には実績のある HIP bonding を採用した。但し、これが 80K 低温時に持つかどうかは開発課題であった。80K の温度領域と空洞部は HOM ダンパーにも 5K の温度領域を設け、まず 5K と 80K の部分をベローズで機械的にも熱的にも分ける構造とした。80K 部には銅のブレードで 80K の液体窒素ラインと接続し、吸収する。また、100mA ものビームからベローズ構造が見えないように楕歯構造に加工し、100mA に対し、loss factor を軽減する構造とした[77]。5K のフランジと 2K の空洞のビームパイプが接続され、80K から見たときに 2K へ入熱はほぼ内容な設計である。このように基本設計までは一応、問題ないと思われるが、これに対し、様々な開発要素が多いのが ERL の HOM ダンパーの課題である。ここで確認すべき課題は

1. 吸収体の 80K での低温特性
2. HOM ダンパーの楕歯部の機械、熱設計
3. ダンパーが熱サイクルで持つか？
4. ERL 空洞につけて HOM が十分吸収されるのだろうか？

である。この 4 項目についての開発経緯を以下述べていく。

4.2.2.1. 吸収体の低温特性

素材について、セラミック、SiC、フェライトなど色々な素材の吸収体の低温特性を測定した。特に ferrite に関して様々な種類の低温測定をした。詳しくは参考文献[78]を参照して頂きたい。図 80

は本 cERL 用に使用した ferrite(KEKB の時と少し今の IB004 は中の材料比が違う))の 280K と 80K のときの透磁率の虚数成分の測定データである。GM 冷凍機内に測定サンプルを置き、GM 冷凍機 80K まで冷却しながら、RF ケーブルでサンプル前後の S-Parameter を測定する。SiC などは低温時に超伝導になり、急に吸収成分が無くなるのが知られているが、IB004 では 10 GHz まで常温と同じかそれ以上の吸収特性があることがわかったので、この材料で HOM ダンパーを製作することを進めた。

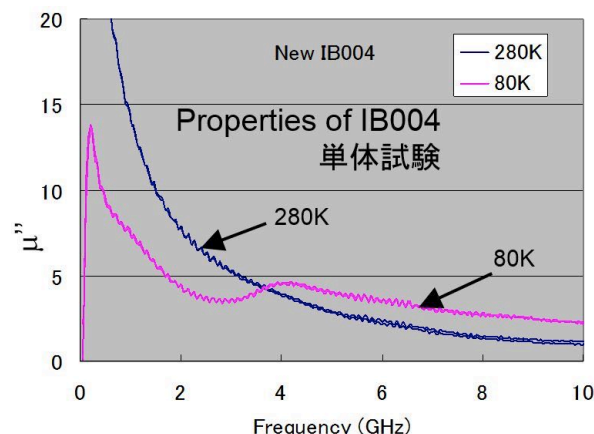


Fig. 80 IB004 フェライトの 280K と 80K の吸収特性。縦軸は透磁率の虚数成分。

4.2.2.2. 楕歯の構造による熱抵抗測定

熱抵抗測定の結果と cERL 実機に向けた改良について述べる[79]。80K と 5K の熱抵抗が実際に十分満足できる値であるか調べるために図 81 に示すように楕歯型のフェライトの無い試作機を製作した。図 71 に示したカップラータスト用に使用した断熱槽内で 80K 部に 100W ヒーターで熱を与え、80K と 5K 部の温度差から熱抵抗値を測定した。楕歯はお互い接触していない時は熱抵抗は 37(K/W)と高く、80K-5K 間では 2W 程度の入熱に抑えることができることが可能であったが、一旦、楕歯が傾いたり、図 81 の右図のように長さが短くなり、くっついたりすると熱抵抗が 5(K/W)まで大きく下がり、5K への入熱が 15W と非常に大きくなることがわかった。80K と 5K 部がお互い図 81(右)のように面接触することが熱抵抗を下げる原因であることがわかったため、cERL 用の実機では図 82 に示すように一部を浅い溝にし、ナイフエッジにカットし、さらに半径方向は放射状カットと平行カットで接触を減ら

す工夫をして熱侵入の軽減化を行っている。なお、このベローズで前後には±5mm、また横方向には±1mmの動きは確保できる。

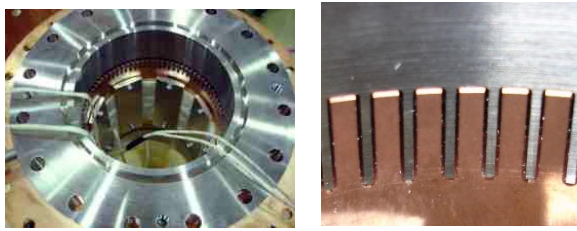


Fig. 81 80K と 5K の間の熱抵抗を測定するために 80K 部の銅にヒーターを挿入 (左) 櫛歯が完全にくっついた場合の様子(右)。

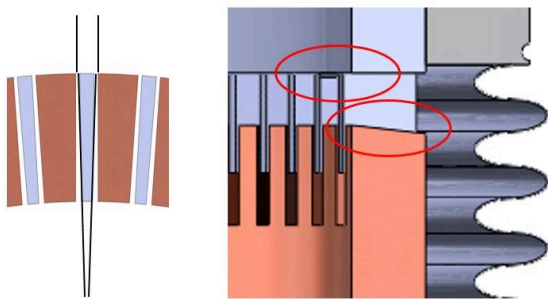


Fig. 82 cERL 実機に向けた櫛歯の改良。

4.2.2.3. ダンパーの熱サイクル試験

次にセラミック窓同様、80K に冷却されたフェライトが熱サイクルによってフェライトが飛び散らないかなどの熱サイクル試験を行った[79]。

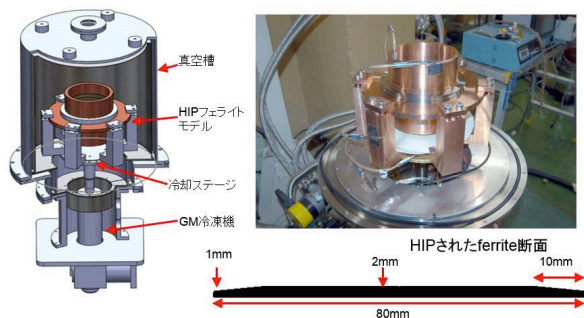


Fig. 83 HIP された HOM ダンパープロトタイプ熱サイクル試験の setup と HIP フェライトの断面寸法。

図 83 が熱サイクル試験の setup である。HIP をしたフェライトの HOM ダンパーモデルを作成し、それを上記に使用した GM 冷凍機に入れて、ゆっくりと 3K/h で冷却し、80K で 1 日おき、再

度 3K/h で昇温していく。その際にフェライトが割れないかどうかを調べた。図 84 が HIP されたフェライトの内面を拡大カメラで見たものである。1 回の熱サイクルでフェライトにクラックが入っているのがわかった。大きくフェライトが HOM ダンパーから剥がれることはないが、主にテーパ部でこのフェライトのクラックが見られることから図 85 に見られるようにテーパ部を厚くするとともに、全体を厚くして、cERL 用の実機の HOM ダンパーに改良を施した。この割れは HOM ダンパーの大きな問題であるが、今のところモジュールの運転には致命的に大きな影響は与えていないと思われる。

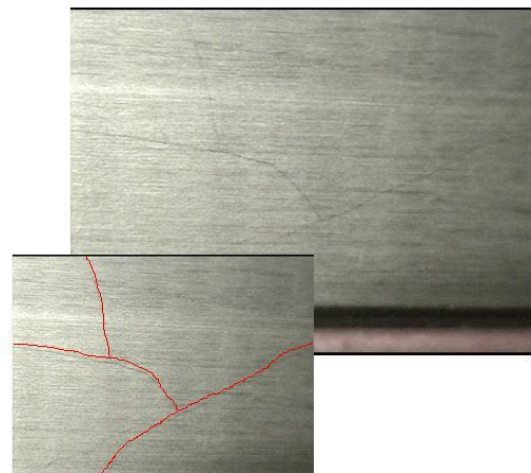


Fig. 84 熱サイクル試験で見られた HIP フェライトのクラックの様子。

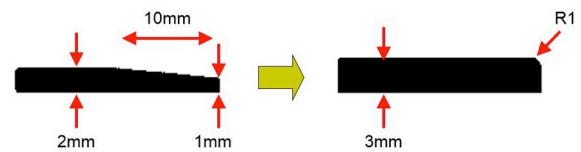


Fig. 85 cERL 用の HIP フェライトの改良。

4.2.2.4. 空洞を用いた HOM 吸収測定

低温と常温では 4.2.2.1 節で特性は大きくは変わらないことがわかった。そこでモジュールに組み込む前に HOM の減衰能力が十分にあるかを図 86 に示す setup で測定を行った。前述した HIP つきのフェライトのプロトタイプを KEK-ERL model-2 空洞 (#2 号機) の片方に取り付けてその際の HOM の Q_L を Network Analyzer で測定する。図 87 が HIP した HOM ダンパーをつけないうちとつけた時の各 HOM の Q_L の測定結果であ

る。各 mode をある程度 assign して、5GHz までの HOM の測定を行った[79]。フェライトなしでは $Q_L=10^4\sim 10^3$ 程度であったものが、 $Q_L=10^3\sim 10^2$ にまで減衰していることがわかった。低温時でもフェライトの効果が保たれているとすると、非常に低い Q_L をこの HOM ダンパーで実現可能であることがわかる。これらの測定により、大電流運転に向けた準備が整ったことになる。

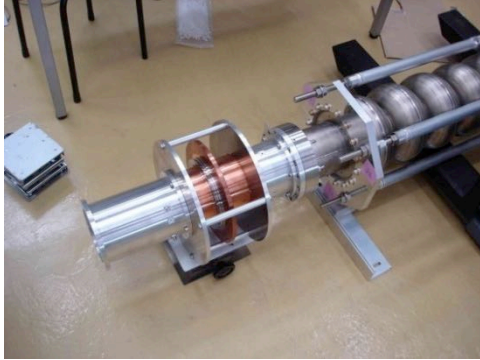


Fig. 86 KEK-ERL model-2 空洞に IB004 を HIP した HOM ダンパーを繋いだ様子。

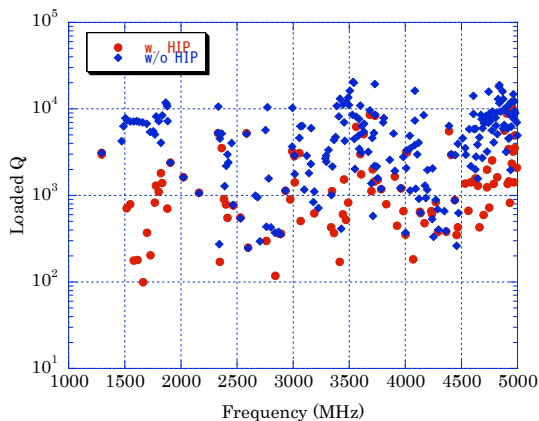


Fig. 87 HOM ダンパーがあるとき (丸) と無い時 (ダイヤモンド) の HOM の Q_L の測定結果。

4.2.2.5. HOM ダンパーの現状と世界の開発状況

cERL 用に上記改良を加え、現在 LBP 側に 2 台、SBP 側に 1 台の合計 3 台の HOM ダンパーが cERL のクライオモジュールにインストールされている ((株) 金属技研社製)。開発での問題点の一つであったサーマルサイクルの問題点は今後モジュールを再度開けてみないとわからないが、まだ致命的に空洞にダメージを与えてはいないと思われる。またモジュール内で 30W のヒーターを SBP の HOM ダンパーに意図的に与えた

が、5K 部や空洞に大きな温度上昇が起きることがなかった。今後は大電流で HOM ダンパーが問題無いかを確かめることが、cERL の重要な課題となる。

さて、HOM ダンパーは大電流運転に向けて世界各国で開発が行われているが、中々、我々も含めて、これといったものが出てきていないのが現状である。その一つには HOM ダンパーの場合、①材料の選定から始まり、次にそれが実機に向けた②材料と母材の接合試験が必要で、さらにその後の③熱サイクルなどで十分な仕様を満たすかというこの 3 段階程度のプロセスを経ないといけないからだと思われる。我々は③の段階でクラックが入るという問題があり、その部分の改良が必要であろうというのが現状である。

材料に関しては現在の候補は窒化アルミ (AlN)、もしくはグラファイト入りの SiC があげられる。AlN は Jlab の CEBAF 加速器[80]で使用されており、この材料とほぼ同じものを現在は EURO-XFEL 計画の HOM ダンパー (HOM coupler ではない) に使用している[81]。HOM ダンパーの構造も円筒型の材料に一箇所だけロウ付けし、異材の熱収縮による割れを防ぐ構造になっている。次の HOM ダンパーの大きな候補ではないかと思われる。これとは別にグラファイト入りの SiC はコーネル大で開発されており[82]、現在、コーネル大の ERL injector ビームラインを使って 40mA (パンチ長は 2.7ps) のビーム試験で HOM ダンパーとして使用できることまでが確認されている。但し、我々同様クラックの問題や真空中の脱ガスが大きいなどの問題が残っており、長期的に使用可能かは今後の課題である。

ここまでは HOM ダンパーとしての開発状況であるが、Jlab の CEBAF はもともと waveguide により、HOM を吸収する方法を取っている[80]。この方法で HOM を導波管に沿って外まで取り出す方法が現在大電流化のもう一つの有力な候補であると考えられている。HOM coupler も我々の空洞のように HOM を十分取り出せる大きなビームパイプ構造になっていれば、空洞のすぐ近くに置く必要がなく、fitler 構造は必要ない。このようなところに十分 HOM を減衰する HOM coupler を置き、減衰する考えも現在では 100mA 程度を実現することを考えれば多くの HOM coupler を装備するならできないこともないかもしれない。現在、いくつかの HOM coupler の候補[36,81,83]があるが、これを取り出す。フィードスルーが熱

負荷に持つかが問題である。この改良も最近でも進んでおり [84,85]、今後 HOM coupler による大電流化ももしかしたら、進んでいくのではないかと少しは期待しているところである。

4.2.3. 周波数チューナー

周波数チューナーは共振周波数 f_0 に常時合わせることが役目である。その際、ある Q_L で決められた半値幅 $2\Delta f$ より小さな範囲で微調整が可能であり、ビーム運転中も常に feedback がかけられること、また製作精度で決められた空洞周波数に対し、ターゲットの f_0 に合わせることができること、この2点が周波数チューナーに必要な要求機能である。式(79)から ERL の michrophonics が 50Hz 程度と見込み、 $Q_L = (1-4) \times 10^7$ と設定したが、例えば $Q_L = 2 \times 10^7$ に対して、 $f_0 = 1.3\text{GHz}$ の時、 Δf は 65Hz となる。超伝導空洞の場合、常伝導空洞と違い、周波数チューナーを空洞の横に穴をあけることはジャケット設計や組立のゴミ混入の観点からほぼ不可能であり、空洞の周波数調整には空洞に対し、ジャケットを固定端として、伸縮させることで実際に周波数を調整している。空洞の周波数変化が 1mm で約 270kHz の変化であることを考慮すると、 $Q_L = 2 \times 10^7$ による Δf の変化分は 200nm の変化に相当する。したがって、より微調整を行うには周波数チューナーはピエゾを用いて行う必要がある。但し、ピエゾのストロークには限りがあるため、これとは別に粗調整のための機械的な周波数チューナーを設ける必要がある。これらの周波数チューナーの具体的な要求値をまとめると表 7 になる。

Table 7 ERL 用チューナーの要求仕様

	粗調整チューナー	微調整 (ピエゾ) チューナー
ストローク	3mm(=800kHz程度) (空洞の弾性変形内)	・ 80 μm (常温) ・ 4 μm (2K)
分解能	・ 一方向で 50nm 程度 ・ バックラッシュ込みで 1 μm 以下 (ピエゾのストローク以下)	10nm 以下 ($Q_L = 2 \times 10^7$ を仮定)
荷重	最大 1ton	1ton/ピエゾの数

非常に細かい動きが 2K に冷やした際に要求される一方荷重 1t 程度に耐えるチューナーが必要になる。この要求を満たすチューナーは世界でカンチレバー式(Saclay tuner)、ブレード方式などいくつかある [6] が、剛性と STF でのチューナーの開発状況を鑑み、我々は図 88 に示す slide-jack 型のチューナー [86] を用い、図 89 及び図 94 に示すように ERL 用に改良を施した [87]。

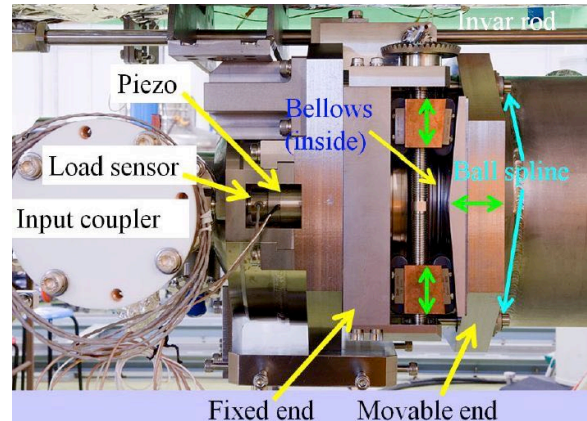


Fig. 88 slide-jack 型チューナー@STF

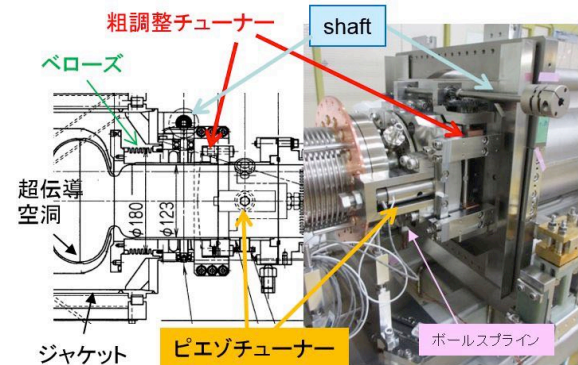


Fig. 89 cERL 主加速器空洞に組み込まれた slide-jack 型チューナー

Slide-jack 型チューナーは図 88 に示すようにスライドジャッキ機構によりキャタピラの動きに対し、垂直に一定のテーパーで空洞方向に動きが伝えられる。キャタピラはシャフトとカサ歯車を介し、クライオモジュール外のステッピングモーターと連動して動く。空洞方向はキャタピラが荷重を支えているが、その間にさらにピエゾを直列に挟みピエゾでも空洞方向に直接動かすことが可能な設計となっている。図 90 に模式的に詳細を図示している。スライドジャッキは空洞全体を伸ばすのに対し、ピエゾは片持ちで空洞を引っ張っているのがわかる。ピエゾはそのため、空洞

の稼働範囲に対し、2倍のストロークがこの設計では必要となる。cERLのチューナーの組込みの際はストロークを稼ぐことと、ピエゾが運転中に壊れることを危惧し、2個のピエゾをチューナーに取り付けた。このため、ピエゾ一個あたりの荷重の軽減になっている。ちなみに2K冷却時ではピエゾの特性は1/10程度になるとされ、そのため、表7に示すように80 μ m程度の常温でのストロークがピエゾに必要となる。

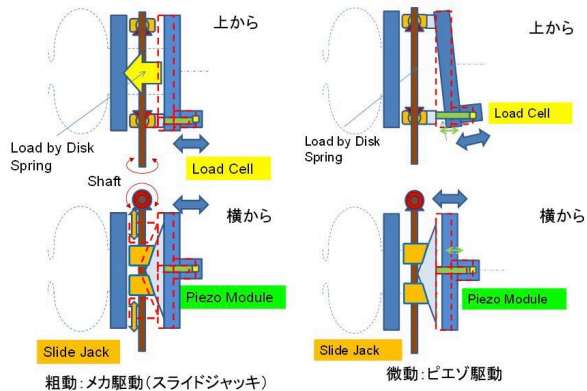


Fig. 90 スライドジャッキ駆動とピエゾ駆動の動きを描いた模式図。

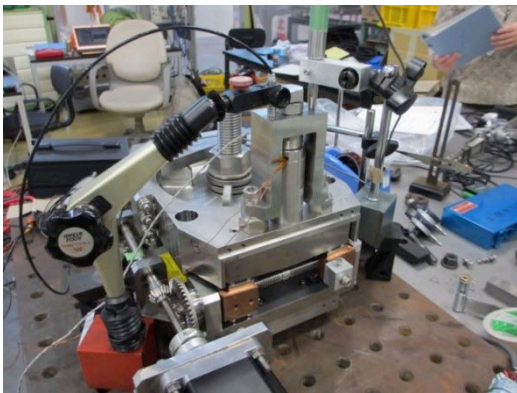


Fig. 91 チューナー試作1号機による荷重をかけた時の動作試験の様子。

チューナーに関しても試作1号機を設け、荷重をかけた時のチューナーの動きが表7の要求を満たすかどうかの確認を行った。図91がチューナー試作1号機での動作試験の様子である。真ん中にばねによりチューナーに荷重がかかるようにしてその荷重に対し、ピエゾ及びチューナーの駆動の様子を数nmの分解能で測定可能な静電容量センサーを用いて動きを測定した。図92がスライドジャッキの動作試験結果。図93がピエゾの動作試験結果である。ストロークは3mmまで

動作は問題なかったがこの時に荷重がテストでは450kgfであった。この荷重に対し、モーターを微小に動かしたときは荷重の無い時はヒステリシスがほとんどなかったが、450kgfの際はヒステリシスが0.5 μ m程度現れた。これはカサ歯車によるバックラッシュであると判明したが、動作の許容範囲であった。ピエゾに0-1000Vの電圧をかけたのが図93の結果である。最大で70 μ mでピエゾが動き、それに対し空洞中心部もその半分で、共に10nm以下で滑らかに動いた。ヒステリシスも再現性が非常に良かった。また、荷重は500kgfまでかけたが、荷重によるピエゾの大きな振幅の変化もなかった。なお、100Hz程度の早い周波数でピエゾを動かしても振幅は殆ど変化ないことも確認した。それぞれの駆動のストロークとヒステリシスは問題ないことがわかった。

ストロークOK (3mm)

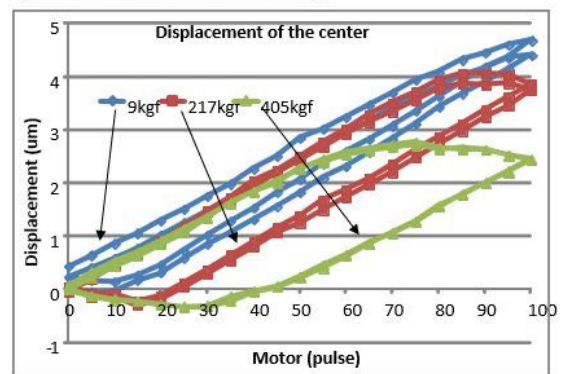


Fig. 92 試作1号機でのスライドジャッキ機構での動作の様子。

ストロークOK (70um)

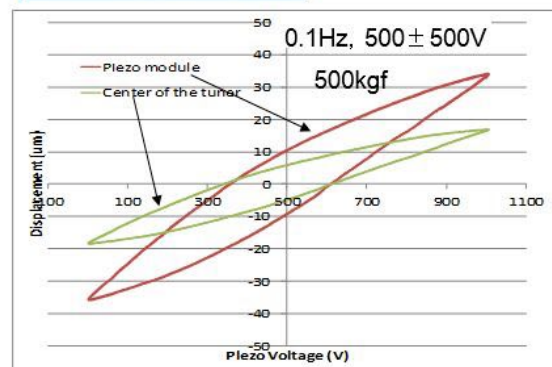


Fig. 93 試作1号機でのピエゾ駆動機構での動作の様子。

試作1号機で問題だったのが、チューナーを一度ばらし、再度組直すたびにチューナーを動かすトルクが変化し、モーターが動いたり、動かなかったりしたことであった。チューナーのキャタピラの位置関係が再現できず、しっかりアラインメントしていないと出てくる問題であり、この精度を試作機では出せなかったことが問題であった。この問題はちょうど STF のクライオモジュール試験時にも低温冷却時にトルクが大きくなり、チューナーが動かなくなる致命的な問題があった。このアラインメント不具合によるトルク増大問題を解決すべく cERL のモジュール組込み時には改良を施した。(現在は STF のモジュールでもシムの調整によるアラインメントをしっかりと行うことでこの問題はほぼ解決している。) 具体的には図 94 に示すように今まではモジュールにチューナーを組み込む際はキャタピラなどのパーツを一度全部外して組んでいたが、架台の上で一度、しっかりアラインメントを行い、トルクの少ない状態を確認したら、その状態を keep できるように半割の構造にしてそのまま、空洞とジャケットに装着できるような構造にした。シャフトを $\phi 8$ から $\phi 10$ の強化も行い、トルクの軽減を実現し、後で示すようにチューナーの致命的な動作不良が回避できている。

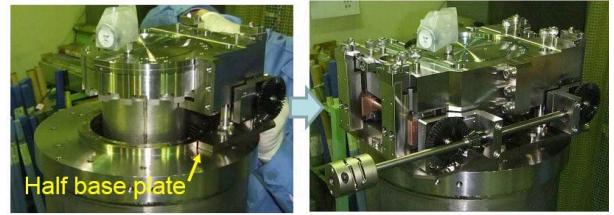


Fig. 94 cERL 用の空洞にチューナー半割でジャケットに装着する様子 (左)。チューナーをジャケットと空洞に装着した後の様子 (右)。

4.3. cERL 主加速器クライオモジュールの性能評価試験

各重要コンポーネントの性能評価試験が終わり、次に、それらをアセンブリして、ビームテスト前にクライオモジュールを用いた空洞性能評価試験を行うことになる。ここではビーム加速に必要なクライオモジュールの設計と次に空洞を含めた各コンポーネントのアセンブリの様子、そして、2K 冷却時の冷却後のクライオモジュールの性能評価を行うと共にビームラインに設置したクライオモジュールのハイパワーテストについて述べていく。

4.3.1. cERL 主加速器クライオモジュール設計

cERL 主加速器超伝導空洞のクライオモジュールの設計断面図を図 95 に示す。(図 22 の全体像と併用して見てください。)

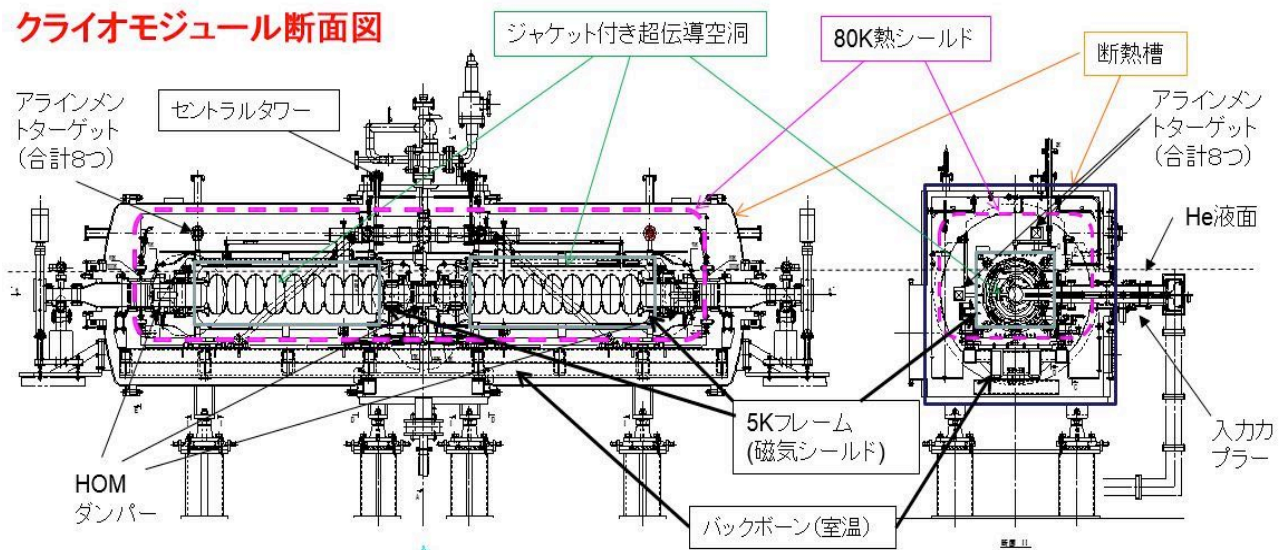


Fig. 95 cERL 用の主加速器クライオモジュール設計断面図。

空洞は縦測定後に 2K の液体 He を溜めるために Ti ジャケットの溶接を空洞外側に行う。ジャケット部に 2K の液体 He 配管を接続し、液体 He がジャケットに満たされることになる。EUROXFEL や STF などの pulse 運転と違い、常時空洞に 15MV/m の加速勾配を立てる CW 運転では、空洞 1 台あたり $P_c=25W$ もの熱負荷(EUROXFEL の場合の 100 倍)をいかに排気するかが問題であった。我々はジャケットを 300φ にし、He 液面をジャケット内に保持し液面面積を増やすことで、He ガス排気の効率を上げ、25W の熱負荷に対しても、2K に保つ設計とした。He 液面は空洞中心から 120mm 上に保持している。但し、ジャケット径を 300φ に大きくしたため、高圧ガス保安法でいう PV 値が 0.004 を超える設計となり、高圧ガス保安法特定設備に該当することになった。この基準に合わせて検査に合格している [88]。図 96 が Ti ジャケットを溶接したのちの空洞 3 号機、4 号機の様子である。He は空洞下から供給され、上の 70φ のポートから蒸発 He が排気され 2K に減圧される。減圧ポートとは別に予冷のためのポートもジャケット上部に設けた。



Fig. 96 Ti ジャケットを装着した cERL 用空洞 (KEK-ERL model-2 3 号機、4 号機)

ジャケットつき空洞のすぐ外側には He ガスを流した 5K フレームと呼ばれるチタンのフレームを設け、2K への入熱を防ぐと同時に、ジャケット付きの超伝導空洞をフレームに精度良く置くことで、アラインメント基準の確保ができるような設計を行った。最後に 80K の熱シールドを断熱槽のすぐ内側に設け、室温からの輻射による入熱を抑える設計を行った。この 80K の熱シールドには HOM 吸収体や Cold 窓と同様に液体窒素を流し、80K の温度を保持することを可能としている。5K フレームは各空洞に 4 つの 5K フレームサポートを介し、機械的に堅牢なバックボーンと呼

ばれる室温部の架台上に配置される。バックボーンはクライオモジュール断熱槽のセントラルタワー部に接続されることとなる。空洞とビームラインとの位置関係はセントラルタワーが基準となるため、セントラルタワーの上部にアライメントターゲット (Cat's eye) を置く台座が設けられ、空洞とビームラインとの関係が保たれることになる。

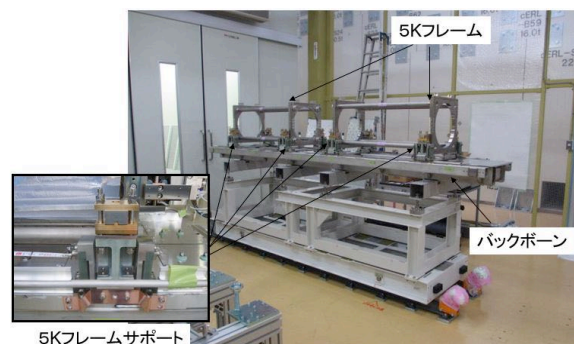


Fig. 97 5K フレームとバックボーンとそれをつなぐ 5K フレームサポート。

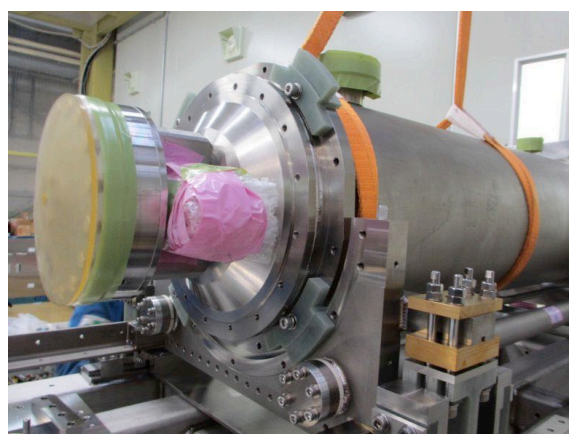


Fig. 98 ジャケットつき空洞と 5K フレームの関係。

図 97 はクリーンルームで string assembly (空洞の接続) する前に KEK クリーンルームに入れるための架台の上で cERL クライオモジュールを仮組した様子である。バックボーンがクリーンルームに繋がるレールの上に置かれた架台の上で水平出しをしてその上に 5K フレームサポートを介して、5K フレームが置かれている。5K フレームの上にアラインメント基準がおかれ、3次元レーザートラッカーでフレームの位置出しをクリーンルームのアセンブリ作業前に行っている。位置調整は 5K フレームサポートで行うがこの部分の入熱を防ぐために、5K フレームサポートは 80K

の温度アンカーを設けており、室温と 5K を分ける構造になっている。特に各温度領域を繋ぐサポートは FRP(G10)でできており、入熱を極力抑える設計となっている。また、冷却時にはそれぞれの熱収縮がキャンセルし、全体が 0.5mm 以内で伸縮が収まる設計にしている。図 98 は 5K フレームに 2K のジャケットつき空洞を設置したときの状況である。5K フレームは半割できる構造にしており、そこに空洞をのせるが、空洞と 5K フレームは入熱をさけるべく、FRP(G10)を間に介しておかれている。SBP に近い場所で 5K フレームとジャケットは FRP にネジ止めされて固定されているが、LBP 側はジャケットつき空洞がフレームに載せた状態で熱収縮に対してフリーにしている。なお 5K フレーム同士は連結棒で一体にして剛性を保つ。断熱槽に対する 5K フレームの熱収縮の固定端は上流空洞の入力カプラーポート近くにあるフレームサポートとしてインプットポートに対し熱収縮時にも空洞は殆ど動かない構造になっている。

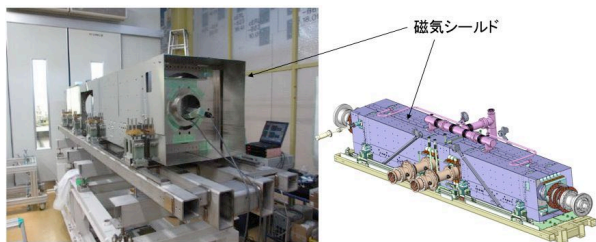


Fig. 99 磁気シールド設計 (右)、空洞組込み前の磁気シールド内の磁場測定の様子 (左)。

磁気シールドはジャケット内部には設置できず、5K フレームのすぐ外側を覆った。図 99 が磁気シールドの設計 (右) 図と磁場測定の様子 (左) である。詳細な設計は参考文献[89]にて、詳しく述べられているので、簡単に紹介する。1.6mm の Cryophy(Aperam Alloy 社)でできている。問題は入力カプラーや 2K 排気部は空洞から見ると外部に対して磁気シールドに大きな穴が必要であるということであった。そのため、その部分には磁場の侵入を減らすために、カラーを設け、空洞に地磁気などの影響がない設計としている[89]。図 99 での測定ではほぼ 10mG 以下を保持することがわかった。

4.3.2. クライオモジュールのアセンブリ

空洞の接続は KEK ERL 開発棟にある class 10 の clean room 内で行われた。縦測定の空洞性能

を保持するために、空洞接続前にイオンガンによるゴミ埃除去を行い、まず、図 100 に見られるように空洞前後の HOM ダンパーを接続し、その後、入力カプラーの cold 窓の接続を行った。これらの工程はすべて空洞内に直接関与する工程であり、全てこの clean room 内にて行い、空洞内面にゴミ埃の侵入が起こらないよう慎重に組立を行った。またこの段階で空洞のアライメントが既に揃うよう、前述したバックボーンに堅牢な架台を clean room 内に最初から並べ、5K フレームを伴った空洞一式をバックボーン上に設置する。機械的に一意に決まる基準とレールをバックボーン上に設け、空洞間の接続を迅速に行うと同時にアライメントが簡便に精度良く接続が行えるような工夫を施した。最後に真空引き後リークチェックを行い、図 101 に示されるように clean room 内の空洞接続は完成した。全てのコンポーネントがバックボーン上に並べられている。



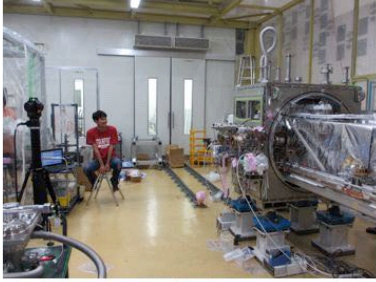
Fig. 100 空洞と HOM ダンパーとの接続。



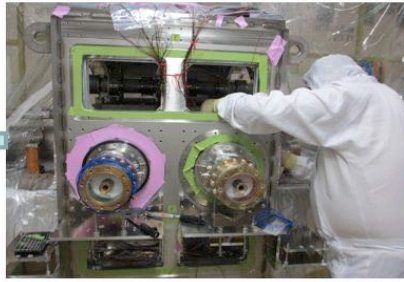
Fig. 101 class 10 のクリーンルーム内での空洞接続完了。

次にバックボーン一式をクリーンルームから出し、断熱槽のセントラルタワー部への接続を行った。その後、周波数チューナーの取り付け、He 配管、磁気シールド、熱シールド、アライメントターゲットの接続、センサー一式の設置を行い、最後に断熱槽円筒部をセットする。

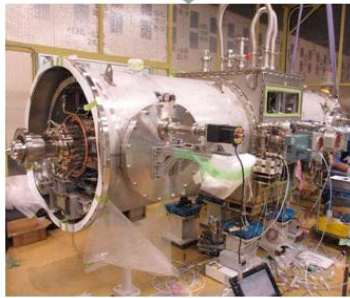
③He配管のleak checkと空洞の基準をタワーに移すアラインメント作業(3次元レーザートラッカー)



②簡易クリーンブースを用いて、カプラーWarm窓のとりはずし、その後、ベーキング。



①クリーンルームから出し、Heライン、磁気シールド、チューナー、センサー、熱シールドなどを装着。



④断熱槽をかぶせ、チューナーの動作確認。



⑤クリーンブースを設け、ゲートバルブを取付、リークcheckを行い、アセンブリ完成。



⑥クレーンでシールド内設置後、アラインメントを行い、冷凍機側のCold Boxと接続。高圧ガス検査合格

Fig. 102 クリーンルーム内の空洞接続作業後のcERL主加速器クライオモジュールアセンブリ作業。

但し、warm 窓とゲートバルブの接続はクリーンブースを用いて行い、クリーンルーム作業同様、埃、ゴミが入らないように慎重に接続作業を行った。一連の空洞アセンブリ作業の様子を図102に示しておく。最終的に図22に示すようにビームライン上にcERL主加速器クライオモジュールが設置された。

4.3.3. クライオモジュールの2K冷却試験

2K への冷却は下記の条件下で行われた。すなわち、(1)HOM ダンパーのフェライトの割れを防ぐために温度勾配が3K/hより急にならないこと。(2)大きな熱収縮が起きないように2K,5K,80K配管ごとにモジュール全体で50K以上の温度差がつかないこと。(3)Q-diseaseを起ささないように空洞は150Kから急冷すること。これらの条件を守り、2週間かけてクライオモジュールを図103にも示すように無事に2Kまで冷却した。但し、80Kラインの冷却がない状態では入熱が激しいため、その後のlow levelテスト及び、ハイパワーテストの3週間は無停止で80Kラインの冷却を行った。2K,5Kラインは日中のみ冷却を行い、深夜と週末は冷却を行わない運転を行った。

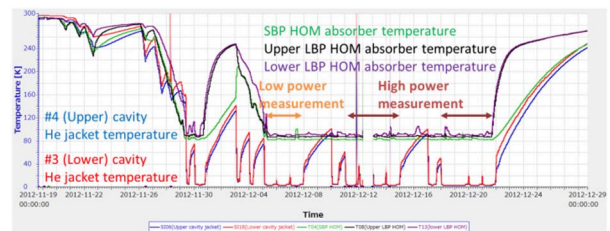


Fig. 103 最初のcERL主加速器クライオモジュールの冷却の履歴。HOMダンパーは80Kに到達。また#3(下流)空洞、#4(上流)空洞は無事に2Kに到達。

4.3.3.1. 2K冷却中の空洞変位測定

冷却中及びパワーテスト中のモジュールの変位は図95に示したように断熱槽内の5Kフレームに設置した光学ターゲットにて常時測定した[90]。測定のターゲットの詳細な場所と測定の様子を図104に示す。クライオモジュールの外からアラインメントテレスコープ(テーラーホブソン社)によって、モジュール前後にある常温部の基準ターゲットに対し、図104の右下に示された5Kフレームの上部と側面部に設置された合計8か所の石英ガラスにけがかれたターゲット中心の

冷却中の動きを追うことで 5K フレームの動きと熱収縮が測定できる。ここから、空洞中心の常温から 2K の動きを測定することが可能である。

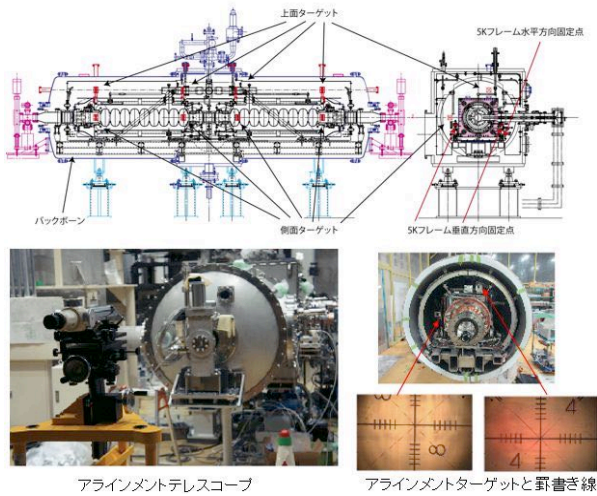


Fig. 104 モジュールに設置された 8 個のターゲットと変位測定の様子。

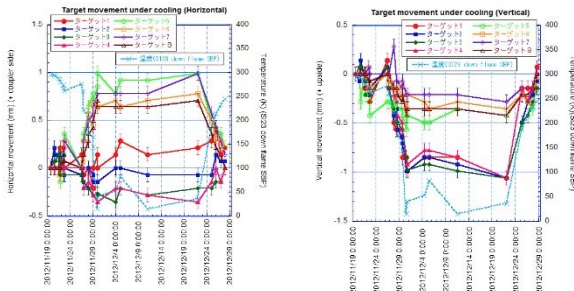


Fig. 105 冷却中のモジュール内空洞 5K フレームの変位測定結果。(左) 水平方向の変位量測定結果。(右) 垂直方向の変位量測定結果。

Table 8 cERL クライオモジュール 2K 冷却中のターゲットと空洞の変位量測定結果

・ 上部ターゲット	水平方向変位	垂直方向変位
計算値	0.23mm	1.10mm
測定値	0.2mm	0.9mm
・ 側部ターゲット	水平方向変位	垂直方向変位
計算値	1.15mm	0.28mm
測定値	1.0mm	0.3mm
・ 空洞中心変位量	<u>0.37mm</u> (カプラー側)	<u>0.26mm</u> (下方向)

図 105 が冷却期間中の光学ターゲットの変位を水平、垂直それぞれプロットしたものである。ターゲット 1-4 が 5K フレーム上部に、ターゲット 5-8 が 5K フレームのサイドに設置された光学ターゲットであり、それぞれ # 3、# 4 空洞の前後に設置されている。上部 1-4 とサイド 5-8 は冷却に合わせて同じ動きをしているのがわかり、フレーム全体が均等に冷却に合わせて動いている様子が測定された。これらの結果を統合し、熱収縮の計算と比較したものが表 8 である。ほぼ計算通りに動いていることがわかる。ここから空洞中心の動きに評価したところ、常温から 2K 冷却までで水平、及び垂直方向ともに多く見て 0.4mm 以内の変位で納まっているのが分かった。我々の要求は 1mm 以内のアライメント精度 [91] であり、空洞の設置精度の $\pm 0.5\text{mm}$ をいれても、これを十分満たすクライオモジュールの設計であることが分かった。

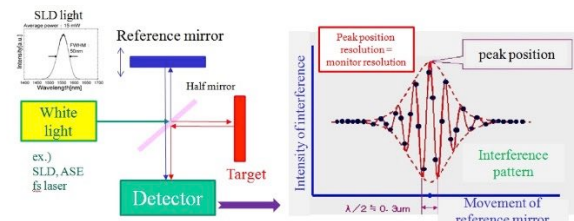


Fig. 106 白色干渉による位置測定の原理。

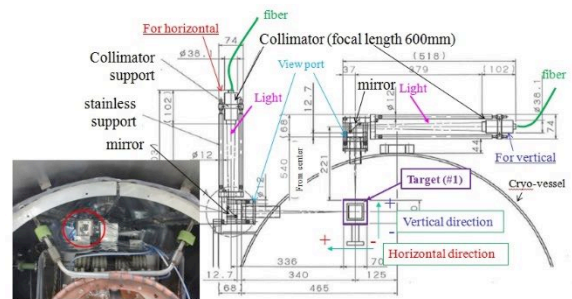


Fig. 107 クライオモジュール内ターゲットと実機白色干渉モニターの配置。

これで 2K 冷却中に空洞の中心がビームの要求精度以内に設置されていることがわかったが、この空洞の変位を運転中も常時しかもビームの動きの精度に合わせてできれば $10\ \mu\text{m}$ 程度で精度よく相対的な空洞変位を測定することが重要である。今まで冷却中の空洞の変位測定として検討されていたモニターは 1)ワイヤーポジションモニター [92] と 2)三角測量型レーザー変位計 [93] の 2 つであった。1)に関しては STF で開発が進めら

れていたが、ワイヤーの収縮により、ワイヤーが冷却中に切れるなどの問題が多発した[94]。また2)に関しては距離が長くなるほど精度がでないこと、また外からの測定には大きなビューポートが必要で熱輻射による問題があった。そのために常時空洞の変位を精度良く測定するために我々は新たに白色干渉の原理による空洞変位計を開発した[95]。白色周波数安定化レーザー（光コムモードロックレーザー）のようなスペクトルが広くコヒーレント長の短い白色光源を図 106 に示すように2つに分けて、測定対象物に対し、参照光路長を変化させると反射された光に強度の干渉が見られる。この干渉縞信号は測定対象物と参照面からの光の光路差がコヒーレンス長以内の時に現れ、光路差が0で最大となる。参照面側の光路をリニアガイドにて調整し、強度のピークをモニターし、リニアガイドの位置の変化を迫りかけることで測定対象物の位置変化を常時測定可能となる。分解能はリニアガイドと光の波長からきまるので、原理的には $1\mu\text{m}$ 程度の分解能を有することがわかる。

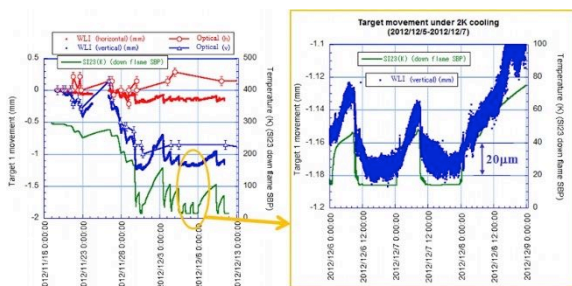


Fig. 108 (左図)モジュール内ターゲットの冷却時の水平方向(青)と垂直方向(赤)の変化。丸はターゲットを望遠鏡で覗いた結果であり、線が白色干渉位置測定装置による測定結果である。(右図)左図一部拡大図。

図 107 に示すように白色干渉モニターを製作し、クライオモジュールを用いた 2K 冷却中の位置測定を行った。ターゲットの側面(表面粗さ $Ra\ 1.6\mu\text{m}$)を白色干渉モニターにて、位置測定することで、冷却中の変位を干渉計と望遠鏡(測定精度は 0.1mm 程度)の両方で測定可能な設計とした。まず、最初は空洞の1か所(図 105 のターゲット#1)のみの垂直、水平の2方向の測定に絞り測定を行ったのが図 108 の測定結果である。アライメントテレスコープの動きとほぼ同じ動きを追随していることもわかり、とくに $\pm 10\mu\text{m}$ 程度の分解能で 2K 冷却時も位置測定ができていることがわかった。現在この白色干渉モニターは改良を加え

常時空洞位置モニターとして安定に $\pm 5\mu\text{m}$ の精度で空洞の冷却中および運転中の変位を常時測定できるようになっている[96]。特にビーム運転中の高い放射線下でも問題なく動いており、毎 300K と 2K の冷却サイクルの空洞の中心の再現性は 2K 冷却時では $20\sim 30\mu\text{m}$ 程度で再現していることがこの白色干渉モニターを使うことで確認できている。このモニターは東京精密(株)と共同で開発したものである。

4.3.3.2. 2K 冷却中の low level 測定

2K に冷却後まず、各コンポーネントが正しく動くか確認するために、冷却下でチューナー、HOM 吸収体、入力カプラーの性能評価を行った。

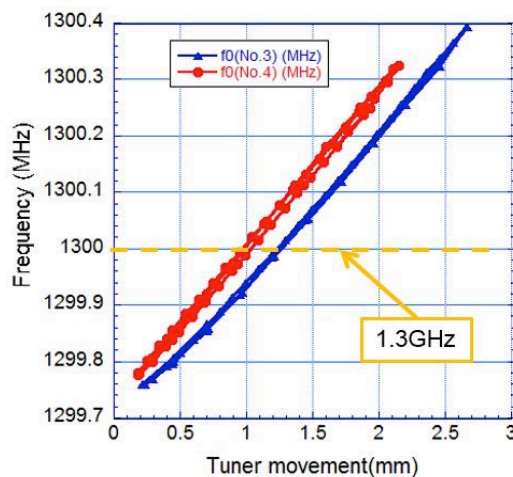


Fig. 109 2K 冷却時の粗調整チューナーの動きに対する空洞共振周波数の測定結果。

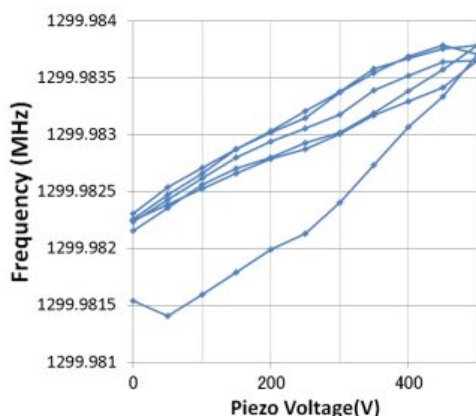


Fig. 110 2K 冷却時のピエゾチューナーの動きに対する空洞共振周波数の測定結果。

図 109,110 はチューナーの性能評価試験結果である。図 109 は各空洞の粗調整チューナーの動きである。モーターを通じ 2K 温度下におかれた粗調整チューナーを動かすことで空洞周波数を調整するが、特に冷却環境下でもモーターのトルクの負荷が大きくなることもなく、各空洞でそれぞれ 2-2.5mm の動きで 270kHz/mm でスムーズに 1.3GHz の周波数に調整が可能であることが分かった。さらに微調整を行うために 2K 環境下に置かれたピエゾに高電圧をかけて周波数変化を測定した所、図 110 に示すように 500V の電圧で 1kHz 強の調整が可能であることがわかった。特に、高い $Q_L (=2 \times 10^7)$ で必要とされる数 Hz 程度の調整が極低温下でも調整可能であることが分かった[87]。

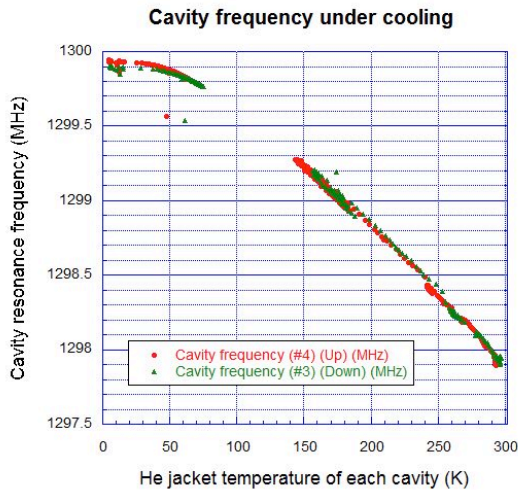


Fig. 111 室温から 2K 冷却までの空洞共振周波数の変化。(チューナーで 0.5mm 引っ張った状態で冷却。)

ちなみに図 111 にクライオモジュールの室温から 2K 冷却時の空洞共振周波数の変化を示しておく。これは空洞+ジャケットの熱膨張の変化分がこの共振周波数の変化になり $\Delta f=2\text{MHz}$ もあることがわかる。チューナーの周波数変化が大きくても 800kHz しか取れないことを考えると、1.3GHz の共振周波数にチューナーの範囲に合わせこむには冷却時の周波数変化は前もって縦測定で確認することが重要である。特に縦測定でチタンの柱をサポートにし、空洞の変化分を模擬して最初に常温で周波数を 100kHz 以下でターゲット周波数に合わせて調整をしておくことが、重要であることがわかるであろう。

入力カップラーは $Q_L = (1 - 4) \times 10^7$ として、 Q_L が可変になるように設計されているが、この値が設計通りであるか 2K 環境下で low level 測定を行った。空洞 4 号機 (上流側) のカップラーで $Q_L = (1.3 - 5.3) \times 10^7$ 、空洞 3 号機 (下流側) のカップラーで $Q_L = 8.7 \times 10^6 - 3.3 \times 10^7$ とほぼ設計通りの値であることが分かった。

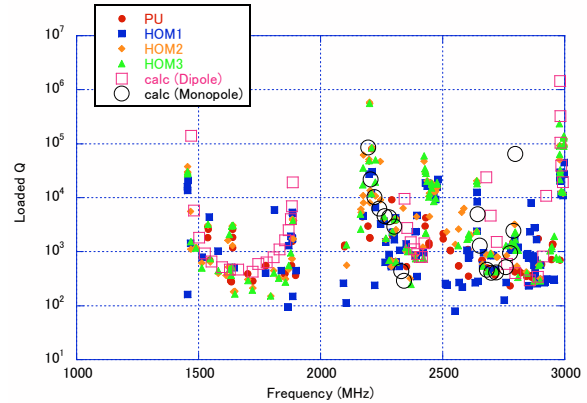


Fig. 112 3号機のクライオモジュール 2K 冷却中の HOM のそれぞれの port からの Q_L の測定結果。白抜き四角と丸は HOM の計算結果を表す。

2K 冷却下で HOM ダンパーによる HOM の吸収が設計通り行われているかは、本実験の重要な試験項目の一つである。これらの HOM 測定を入力カップラーサイドにある pickup probe ともう一方のチューナーサイドに置かれた HOM ダンパー近くに用意した 3つの pickup probe の合計 4つを用いて HOM の測定を行った。HOM 周波数とそれらに対する Q_L の測定結果 (空洞 # 3) を図 112 に示す。測定時間の関係で 3GHz までの HOM の測定までを集中的に行ったが、測定結果は各 HOM の Q_{ext} の計算結果とおよそ合致しており、十分減衰していることがわかった (# 4 も同様な結果であった)。従って、80K に置かれたフェライトの吸収体は HOM の吸収に関しては設計通りに働いていることが判明した

4.3.4. クライオモジュールハイパワー試験

低温試験で一通り、各コンポーネントの特性を確認した後、各空洞に 1.3GHz 30kW IOT を用いたハイパワーテストを行った[97]。図 113 がハイパワーテスト時のセットアップである。チューナーで 1.3GHz に周波数を調整後に、パワーを入力カップラーから投入し、パワーテストを行った。 Q_L は上流空洞 (4号機) は $Q_L = 1.54 \times 10^7$ 、下流空洞

(3号機)は $Q_L = 1.15 \times 10^7$ に合わせて行った。パワー投入に対する Field emission の測定を行うためにモジュールのビーム軸の前後に radiation monitor(エリアモニター)を設置した。

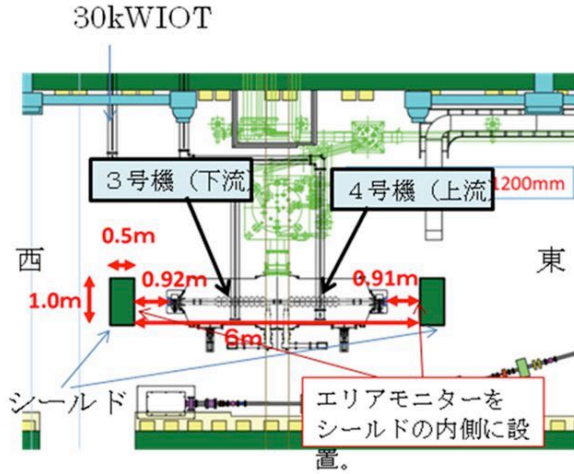


Fig. 113 ハイパワーテスト時の setup.

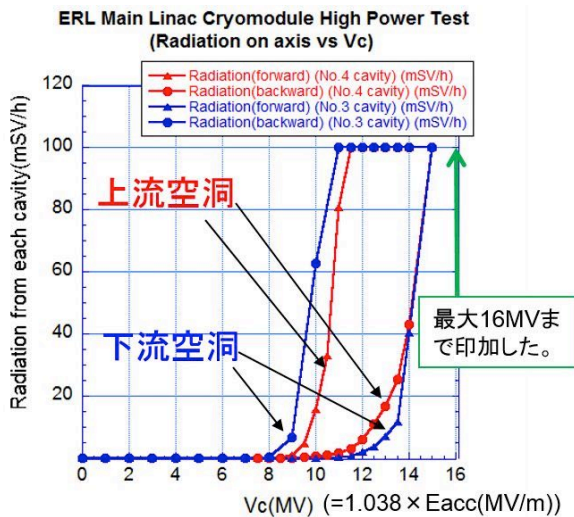


Fig. 114 各空洞の加速電圧 V_c と radiation の測定結果。

図 114 がハイパワーテストの結果である。最大加速勾配としては両空洞とも 16MV まで印加可能であったが、KEK-ERL model-2 空洞では $V_c(\text{MV}) = 1.038(\text{m}) \times E_{\text{acc}}(\text{MV}/\text{m})$ の関係から、 E_{acc} で 15.5MV/m が印加可能であった。(加速勾配 E_{acc} と V_c はこれよりほぼ同じ数字と見積もってもらえればよい。) 強い field emission に見舞われることになった。最大加速勾配も field emission によるクエンチで limit した。特に両空洞とも図 113 に見られるように 8-9MV から radiation が軸上のエリアモニターにより測定さ

れた。性能劣化がどのように起きているかを調べるために Q 値測定を行った。図 115,116 が各空洞の加速電圧(V_c)と Q 値の plot である。

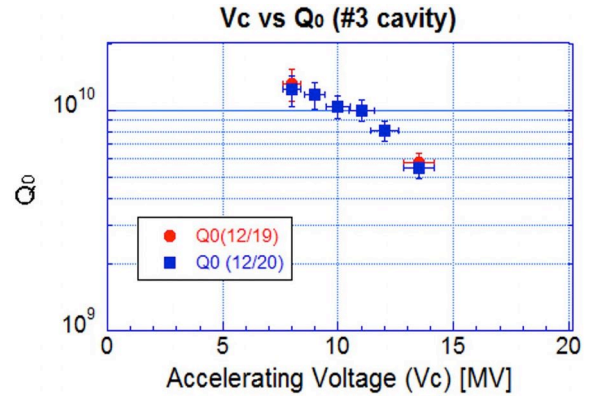


Fig. 115 下流3号機の Q 値測定結果。

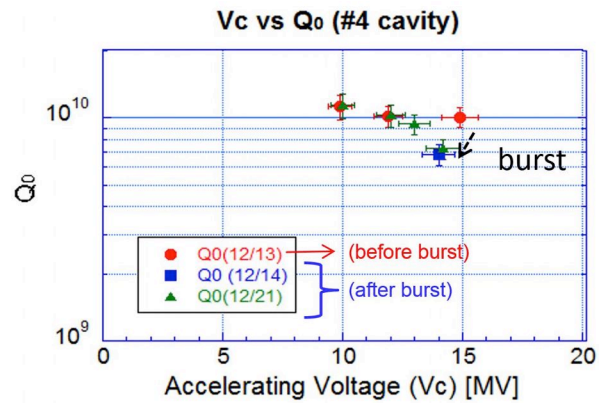


Fig. 116 上流4号機の Q 値測定結果。

パワー投入時の空洞を冷やしている 2K の He の蒸発量からパワーを投入しない時の static loss (11W) を引き、空洞の熱負荷 P_0 を求め、式(2)から Q_0 の測定を行った。図 115,116 で見られるように縦測定時には劣化が見られなかった 2 空洞が両空洞とも最終的に 10MV 以上で Q_0 値の劣化が起きているのが分かった。その劣化に合わせて図 114 のように放射線の上昇が見られている。

特に発生した radiation が縦測定時とどうか変わったのかを調べるのはこの原因究明のポイントの一つである。それを確認すべく我々は radiation の profile 測定を行い、発生源の比較を行った。図 117 (左) はその radiation の profile を測定するために設置した PIN diodes である。16 個の PIN diode を cryomodule 両端のビーム軸周りに設置し、特に field emission に誘起されて出て、軸上で加速される電子やそれによる放射線の分布を測定しようというものである [28]。# 4 空洞のハ

イパワーテスト時の PIN diode の放射線測定結果を図 117 (右) に示す。測定結果として、まず縦測定時の radiation の分布と(両空洞とも)違っているのが分かった。cryomodule 組込までに空洞内に field emission を起こす埃やゴミの混入があったと予想され、それによる空洞劣化が起こったものと考えられる。また、# 4 空洞は最初のハイパワーテストでは、radiation は少なく、図 116 に見られるように 15MV で $Q_0=1 \times 10^{10}$ を達成していたが、その後、14.5MV に保持していた所、図 118 に見られるように突然、burst 現象が起こり、Q 値の劣化が起こると同時に図 117(右下)に見られるように radiation 分布が変化した。Burst により、radiation 源が変化したものと考えられる。

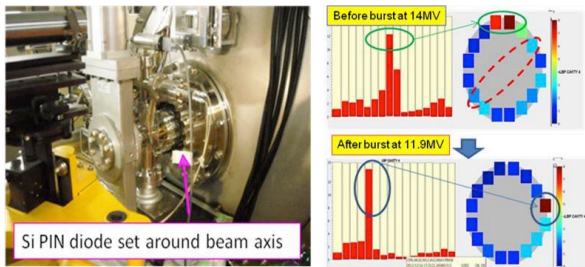


Fig. 117 (左) radiation 分布測定用 PIN diode 配置。(右) # 4 空洞測定時の PIN diode の分布 burst 前の上の分布は 14MV の時、burst 後の下の分布は 11.9MV の時の profile を示す。上の点線で囲んだ場所は縦測定時に見られた radiation の分布。

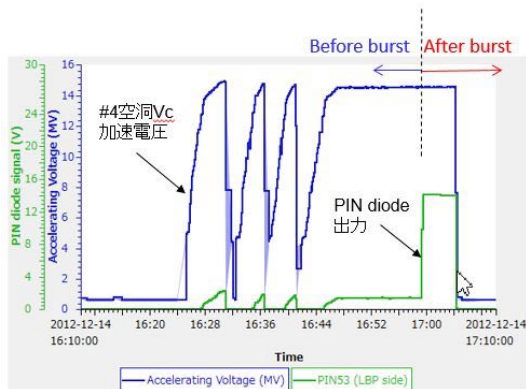


Fig. 118 # 4 空洞のパワー測定と radiation の履歴 (burst 前後)。

このようにモジュールテストでは field emission による Q 値の劣化が見られたが、最終的には、# 3 空洞は 13.5MV で # 4 空洞は 14.2MV で 1 時間以上電圧の保持が可能であった。最終測定結果を図 118 に示しておく。縦測定では表 3 で

示した 15MV/m で $Q_0=1 \times 10^{10}$ を示していた空洞性能が 2 台とも field emission により Q 値の劣化が見られることになった。特に 8~9MV から field emission による radiation を見られることになった。ビーム運転では安全を見て、2 空洞とも最初は field emission がほとんど出ない 8.6MV での運転で total 20MeV のトータルの周回エネルギーからスタートすることになった。

ここで強調しておきたいことは低い field では 1×10^{10} 以上の Q_0 が確保されていることである。これは磁気シールドが設計通りであったこと、及び Q-disease の影響がなかったことにより、高い Q_0 値を確保できたことによるものである。またダンパーや入力カプラーから予期せぬ熱負荷もなく空洞に影響していないことが大きく、field emission の問題がクリアできれば、定格の Q 値 ($>1 \times 10^{10}$) に到達するクライオモジュールであることが確認された。

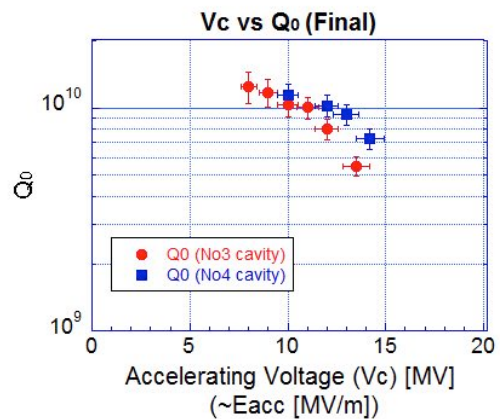


Fig. 119 クライオモジュールでの各空洞の最終的な空洞性能結果。

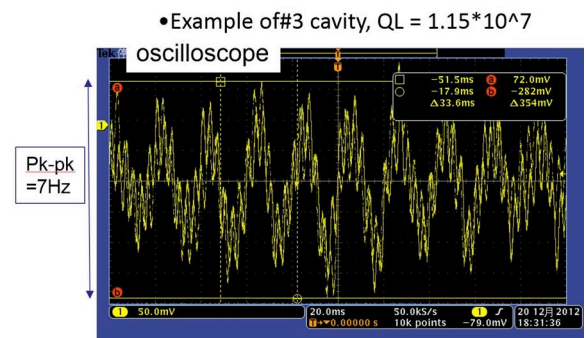


図 120: microphonics 測定結果。

最後に、空洞測定時には LLRF にてシグナルジェネレータに feedback loop をかけていたが、ビーム運転に向けて高い $Q_L (=2 \times 10^7)$ にてチューナ

ーによる周波数コントロールが可能かを調べるべく、open loopにて空洞の入出力の位相差を測定することで空洞が外乱(microphonics)によりどれくらい離調を受けているかを測定した。図120がその位相差の測定結果である。およそ50Hzで振動しているがその離調はpk-pkで7Hz程度に納まっていることがわかり、microphonicsを50Hzと仮定していたが、それより十分小さいことがわかった。チューナーによるfeedbackが十分可能であろうと予想される。この振動源をサーチしたところ、主にモジュール下に置いてある断熱槽のrotary pumpから50Hzで来ていることが現在わかっている[98]。

4.4. cERL 主空洞クライオモジュールによるビーム加速とエネルギー回収

前節ではcERL主加速器クライオモジュールとしてfield emissionの問題があり、加速電圧を8.57MVにする必要が出てきたが、それ以外でアライメントは0.5mm以内でかつ、周波数1.3GHzでmicrophonicsの影響もなく安定に加速電圧をかけることができることがわかった。そこで、2013年12月に周回部の建設後に主加速部で8.57MV+8.57MV=17.1MVの加速。そして、入射部で2.9MeVの加速を行いトータルエネルギー20MeVのビームとしてビーム加速およびエネルギー回収を行うことにした。

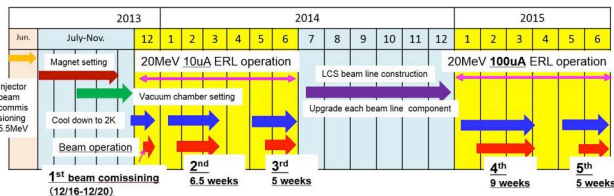


Fig. 121 cERL 周回部エネルギー回収の2013年12月～2015年6月までのビーム運転の履歴。

図121は周回部建設後のエネルギー回収運転の2015年6月までの運転の履歴である。前述の2012年12月のクライオモジュール試験後に2013年夏に周回部を建設。超伝導空洞前後の真空を良くするため、モジュール前後に図122に示すようにNEGコーティングのパイプを接続[99]。但し、接続の際は埃、ゴミ混入をきらい、モジュール作業同様、簡易クリーンブースを用いて、イオンガンによるゴミ除去のもとで作業を行っている。その後周回部建設後、2013年11月から冷却を再開。図123は最初のビーム運転中の冷却の履歴である。冷却は3K/hを同じくkeepし、モジュールテ

ストの経験から、空洞の温度変化によるビーム運転時間の確保を主として、日中を2K運転し、夜中、週末を80Kだけでなく空洞を4Kにkeepすることにした。2014年に2回(2nd,3rd phase)の冷却サイクルを繰り返し、CW 10μAでのビーム運転を行った。さらに2015年には同じく2回の冷却サイクル(4th,5th phase)で100μAの電流増強によるビーム運転が行われた。

超伝導空洞



Fig. 122 cERL 主空洞クライオモジュール前後のNEGコーティングチェンバー接続の様子。

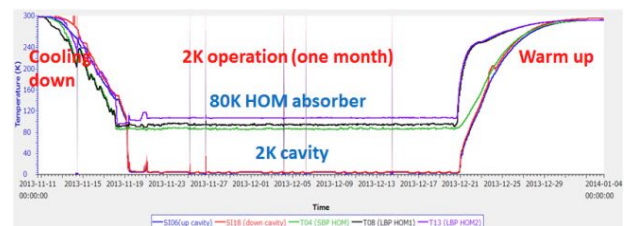


Fig. 123 周回ビーム運転中の空洞冷却履歴。

2013年12月から約1年半経過した2015年6月までのビーム運転による空洞の性能の様子、性能を保持するための工夫、およびビームのエネルギー回収の実現についてここで紹介する。

4.4.1. ビーム加速及びエネルギー回収の実現

20MeVのビーム加速の確認はまず主空洞を過ぎた図19で示すcERLの第1アーク部のスクリーンモニターで確認した[100]。特に最大加速はスクリーンモニターの横の位置がエネルギーに比例するので、図124(右)に示すようにエネルギーが最大かつ20MeVになるように調整を行う。その後詳細なビーム調整を行った後に周回ビームがダンプに届くことを確認した[101]。ここでエネルギー回収を確認するために、エネルギー回収をビ

ーム負荷から直接的に証明するための試験を行った(図 125)。

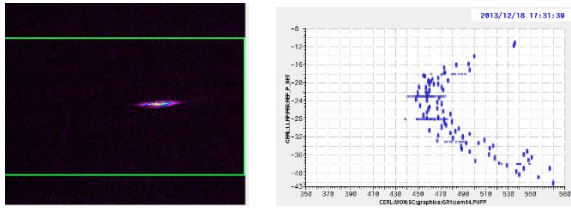


Fig. 124 加速後の第一アークでのビームプロファイル(左)と位相調整の様子 (右)。

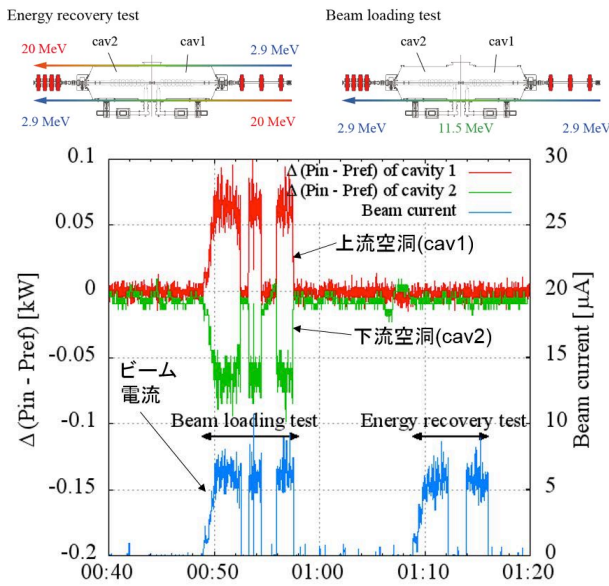


Fig. 125 (上)"エネルギー回収運転(Energy recovery test)", "ビーム負荷運転(beam loading test)". (下) 主空洞の入力 RF パワーと反射 RF パワーの差の変化量 $\Delta (Pin - Pref)$ 。

“ビーム負荷運転(beam loading test)”は、2 つある主加速空洞のうち、上流空洞で加速し下流空洞で減速するスキームで、ビームを周回せずにビームダンプへ導く。つまり、それぞれの空洞についてエネルギー回収無しの運転時の空洞の振る舞いを示している。図の縦軸は空洞への入力 RF パワー($P_{in} = P_g$)と反射 RF パワー($P_{ref} = |\Gamma|^2 P_g$)の差の変化量 $\Delta (Pin - Pref)$ である。ビーム負荷運転では、ビーム加速を行う上流空洞ではビームに RF パワーを与えるため $\Delta (Pin - Pref)$ が正に、ビームを減速する下流空洞ではビームから RF パワーをもらうため $\Delta (Pin - Pref)$ が負になる。一方で“エネルギー回収運転”では、ビーム有り/無しにかかわらず、 $\Delta (Pin - Pref)$ に変化が見られない。このことから、エネルギー

回収がうまく行っていることが確認できた [102]。2015 年 6 月現在までに CW $90 \mu A$ のビームのエネルギー回収が主加速器超伝導クライオモジュールで達成されている。

4.4.2. 長期安定ビーム加速を実現するには

さて、このようなビーム運転を安定に行うために LLRF の安定化がまず不可欠である。本テキストの“RF source[9]”で詳細な Digital feedback system(FPGA)を用いた LLRF の安定度の実現について説明があるので、ここでは詳細を省く。現在はその FPGA による LLRF 制御にて主空洞の振幅安定度 $<0.01\%$ 、位相安定度 $<0.01^\circ$ と非常に安定なビーム加速を実現している [103]。

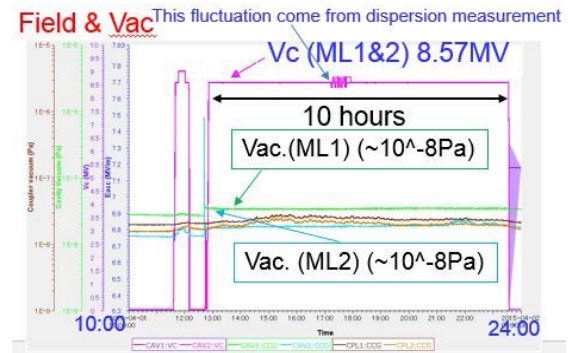


Fig. 126 ビーム運転中の field 制御と真空

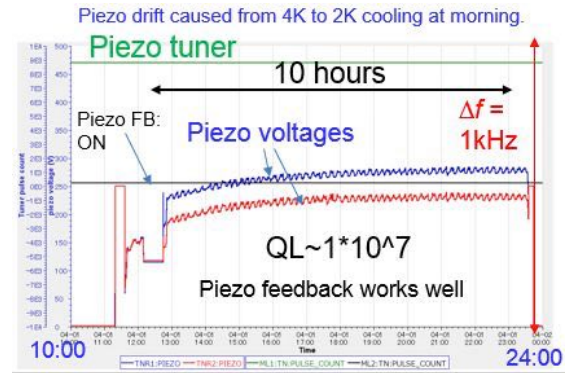


Fig. 127 ビーム運転中のチューナー制御。

ここではその安定な空洞運転の 1 日の履歴のみを紹介する。図 126 は 1 日の field と真空の履歴である。Microphonics の影響をなるべく抑えるために上流空洞(ML1)は $Q_L = 1.3 \times 10^7$ 、下流空洞は $Q_L = 1.0 \times 10^7$ とどちらもカプラーの稼働範囲の Q_L が小さい値に設定して運転した。約 10 時間空洞 2 台(ML1 上流、ML2 下流)とも microphonics の影響を抑えて 8.57MV に安定に

加速されているのがわかる。ML2 が途中動いているのはビーム調整のために分散関数測定のため、エネルギーを動かしたからである。この安定加速電圧を実現するため、チューナーにより 1.3GHz の周波数安定化も同時に行っている。図 127 がチューナーによる周波数制御の追従の様子である。Piezo 電圧が周波数を 1.3GHz に keep するために drift している様子が見られる。この原因は毎日 4K から 2K に減圧する際、減圧によりピエゾへの負荷が増えるためだと思われる。2K を常時 keep した運転も行ったが、その際は piezo 電圧は一定であった。LLRF による安定化とチューナー制御で安定な field を確保している。

空洞周波数変動は He 圧力変動にも効いてくるのだが、冷凍機の安定な制御のおかげで $3\text{kPa} \pm 10\text{Pa}$ (2K) の安定な制御が行われている。これは周波数変化では数 Hz の変動で現在の microphonics である $P_k \cdot P_k = 7\text{Hz}$ 以下であった。

Sensor	ITL level	ITL response	ITL use
RF input(Pin)/refraction(Pref)	5 kW	1-10 μs	RF OFF ITL
加速電圧(P)	9.2 MV(8.6 MV運転時)	1-10 μs	RF OFF ITL
ARC sensor	Sensitive	1-10 μs	RF OFF ITL
Vacuum	$1.0\text{E-}5\text{Pa}$ (Cavity & Coupler)	100-500 ms	RF OFF ITL/GV CLOSE
He	3.05 kPa	100-500 ms	RF OFF ITL
Potentiometer	-	-	Only for measuring
Load cell	-	-	Only for measuring
Temperature	-	-	Only for measuring

Fig. 128 主加速器クライオモジュールのセンサーと interlock(ITL)のリスト。

この安定加速のためにもう一つ重要なのが、異常時に即座に真空の GV の閉止、RF 源およびビームを止めに行く入念なインターロックシステム(ITL)の整備である。図 128 にモジュールに設置したセンサーとその信号によるインターロックの概要を示している。空洞への入力(Pin)と反射(Pref)のパワーはカプラー手前の方向性結合器でモニターしている。入力カプラーは $V_c = 8.57\text{MV}$ では常時($P_{in} \sim P_{pref}$) 2kW 程度であるが、カプラーのエイジングは運転前に 8kW 程度までおこなっており、現在は 5kW に P_{in} と P_{pref} に interlock をかけている。また、Pt からの加速電圧 V_c を求めるが、 V_c の上限を 9.2MV として、それ以上になると ITL がかかるようにすると同時に急にクエンチが起きた時に空洞のパワーが減少し、field が下がることを考慮して、 V_c が 5MV 以下になるとクエンチとみなし、interlock がかかるようにした。反応速度は $1\mu\text{s}$ 以下である。

図 129 は主加速器クライオモジュールの真空システムの概要である。IP、GV はそれぞれ、ion pump と gate valve を表す。 10^{-5}Pa 以上に真空が

上昇すると RF&ビームを止めに行くと同時に GV を閉めに行く。とくに超伝導空洞にとって、空洞内への異物混入は空洞性能劣化に直接つながる。そのため真空悪化が空洞以外の要因である場合には即外部から遮断する必要があり、GV を閉めるような interlock をかけている。とくに真空に関しては同じ理由で他のビームライン上の全ての CCG が 10^{-5}Pa を超えた場合に真空制御系から ITL 信号をもらい、空洞両脇の GV を閉めに行くことを運転上遵守している。

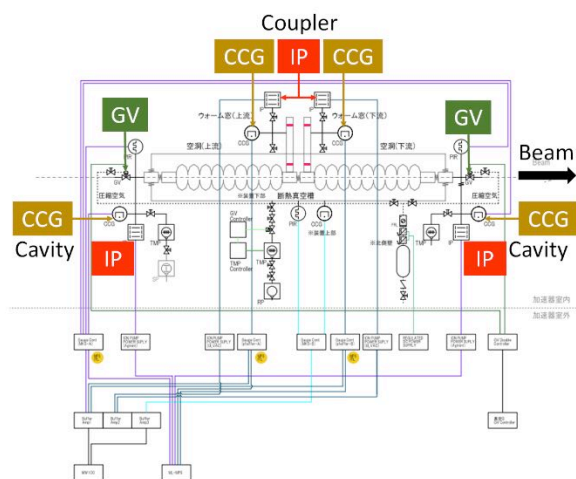


Fig. 129 主加速器クライオモジュールの真空システムの概要。

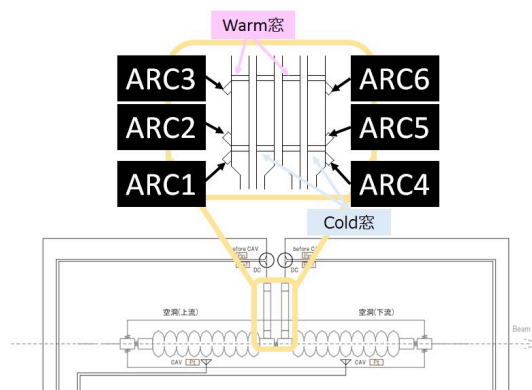


Fig. 130 アークセンサーの配置。

冷凍機に対してはメインでは He 圧力が 3kPa が 3.05kPa に上昇したときに空洞内にクエンチやその他の原因 (ビームが空洞にあたるなど) で発熱が急増し、異常と判断し、RF+ビームを止めに行く ITL をかけている。

カプラーテスト時に使用したアークセンサーは ITL に取って重要なセンサーである。図 130 のように窓の放電が持続しないように窓に向かって 6

つのアークセンサーを用意している。図 131 に warm 窓のアークセンサーが反応したときに高速オシロスコープ(DL850 横河社)でその反応をモニターした様子を示す。Warm 窓で arc 6 の信号が上昇し、 $10\mu\text{s}$ 後に ITL 信号により RF を off したがその後 $30\mu\text{s}$ 程度放電が持続している。またその 100ms 後によりややく warm 窓のつけている CCG の値が大きくなり、ようやく CCG が 10^{-5}Pa をこえて ITL がかかった。このように放電が成長する場合、真空の信号で ITL をかけた場合は成長から 100ms もたってからようやく放電をとめに行くため、窓が割れる可能性を否定できない。アークセンサーにより、放電の成長を瞬時にとめ、致命的な窓の割れを抑えている。なお、アークセンサーのインターロックは $10\mu\text{s}$ 以下で RF とビームの両方を止めに行くように設定している。

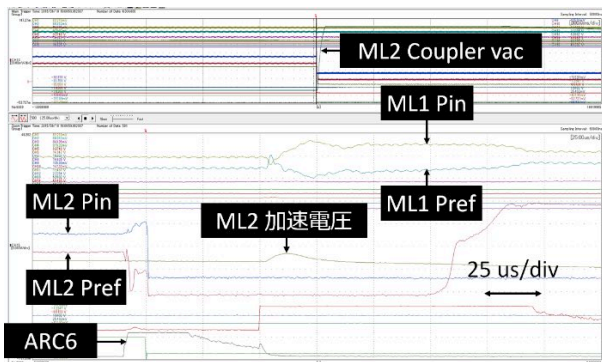


Fig. 131 warm 窓のアークセンサーにより ITL がかかり RF off 時の高速オシロスコープの信号の様子。

その他、カップラーの内導体が 80°C 以上または窒素ガスが 30l/min 以下になった時に RF を止めに行くようになっている。

チューナーにはメカチューナーには暴走しないようにある範囲でとまるソフトリミットをつけていると同時にハードリミットも用意している。ピエゾは本来は 1000V までかけれるのだが、ピエゾの放電がおこり壊れ運転が止まることをおそれ、安全範囲の $0\text{-}500\text{V}$ で運転している。図 126 はその範囲での運転であり、特に制御上問題になっていることはない。

4.4.3. 長期運転での空洞性能変移

さて、このようなビーム運転中に空洞性能が劣化しないかが我々の懸念事項であった。特に field emission による空洞性能劣化が一番の懸念事項であったため、運転中はクライオモジュール前後にハイパワーテスト同様に radaition monitor と PIN diode profile monitor を設置し、運転中の履歴を測定した。図 132 は運転が始まった 2014 年 1 月～3 月の 2nd phase 時の 3 週間の空洞前後に置いた radiation monitor の履歴である。途中までは放射線量が安定していたが、2014 年 2 月 14 日に急に放射線の上昇が見られた。このような傾向があり、2 月末と 3 月半ばに空洞の Q 値を測定したのが図 133 の結果である。図 133 には前節で述べたクライオモジュールハイパワー試験での結果も載せてあるが、その時に対しても Q 値の劣化の度合いが大きくなっているのがわかった。

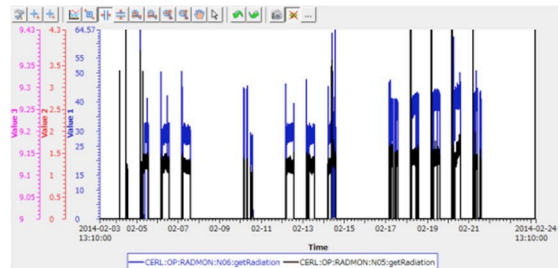


Fig. 132 2nd phase の 3 週間の放射線の履歴。スパイクは運転前 RF エージングによるもの。

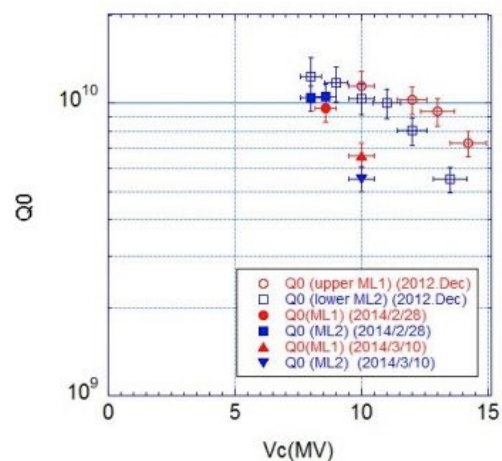


Fig. 133 中塗りの丸、四角、三角はビーム運転が始まってからの測定 Q 値。白抜き丸と四角は 2012 年のハイパワー試験時の Q 値。

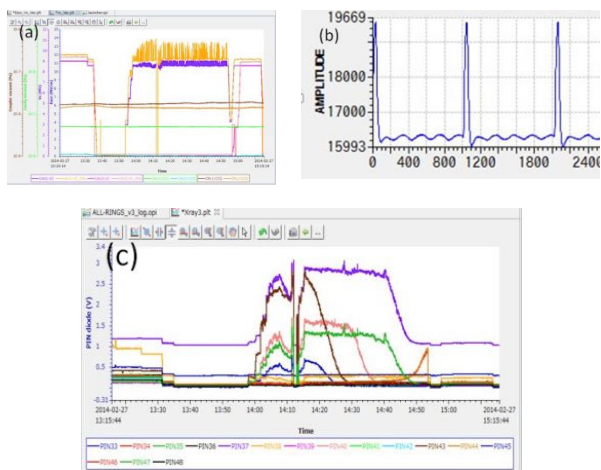


Fig. 134 (a)パルスエージング中の加速電圧、(b)(a)の拡大図、(c)パルスエージング中の PIN diode の信号の減少の様子。

この劣化も放射線の上昇を考慮するに field emission による劣化であろう。ビーム運転中にビームの影響などで空洞外部のビームパイプや HOM ダンパーや入力カプラーなどから空洞に微小なゴミや埃が入ったのかもしれない。本来なら、空洞を開けて HPR を施して、ゴミや埃を除去したいところであるが、ビームラインを解体して一度、シールドの外に持ち出すことになる。その前にできる回復方法の一つとして、パルスエージングという手法がある[16]。これは現在運転している電圧 8.57MV にある程度の短いパルス幅の高い電圧を付加し、より高い電圧のエネルギーを空洞内面に与え、放電により空洞内のゴミや埃を砕く方法である。CW ではその放電により空洞内にむしろダメージを与える可能性があるため、カプラーエージング同様、パルスで与えることがコツである。図 134 は 8.57MV に 1ms 幅の 2.5MV のパルス付加して、1 時間パルスエージングしたときの様子である。パルスエージングをしばらく続けることで PIN diode の信号が徐々に減少しているのがわかる。これにより、図 132 で増加した放射線が半分にまで減少して、field emission の増大を抑制することができた。現在はこの手法で field emission の抑制を行っているが、field emission をすべて無くすところまではできていない。

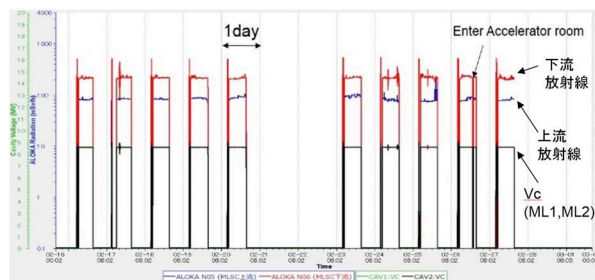


Fig. 135 2015 年 2 月の 2 週間の Vc と放射線の履歴。

このまま、2015 年 6 月現在まで運転してきたが、4th phase の 2015 年 1 月～3 月は Q 値の劣化が下げ止まった。図 135 が 2 週間の 2 空洞の Vc と放射線の履歴である。4th phase は 9.5 週あったがその間に放射線も特に増加している様子もなく、安定である。特に空洞も LLRF の最適化を直前に先行し、ITL にかかる回数も激減し、1.5 か月間 2 空洞とも ITL による trip(RF ダウン)が起きなかった。そのため、5th phase では ML1 だけ 10MV にして運転を行ったが、2 週間の 10MV 運転では trip は 1 回しか起きなかった。Field emission は、Q 値の劣化は起こすが、空洞の trip(RF down)を起こす原因にはなっていないことが、この運転経験からわかったことである。

図 136 が 2015 年 6 月現在まで運転してきたが Q 値の履歴である。ビーム運転が始まり、しばらく Q 値が劣化して、パルスエージングを適宜行い、しばらく安定になってきた。但し、2015 年以降はパルスエージングを行っておらず、5th phase でさらに劣化が見られている。まだ 8.57MV での運転では致命的な劣化にはなっていないが、パルスエージングを行い、空洞性能を今後 keep していく予定である。

また、これより強力な方法として、He processing というプロセス方法が In site でできることが提案されており、Jlab で試された[104]。先ほどの高い電圧により埃やゴミを壊すかわりに He ion を埃やゴミにぶつけて砕く方法であり、パルスエージングより強力なエージング方法であると予想させる。本空洞にも回復方法として試す価値はありそうである。

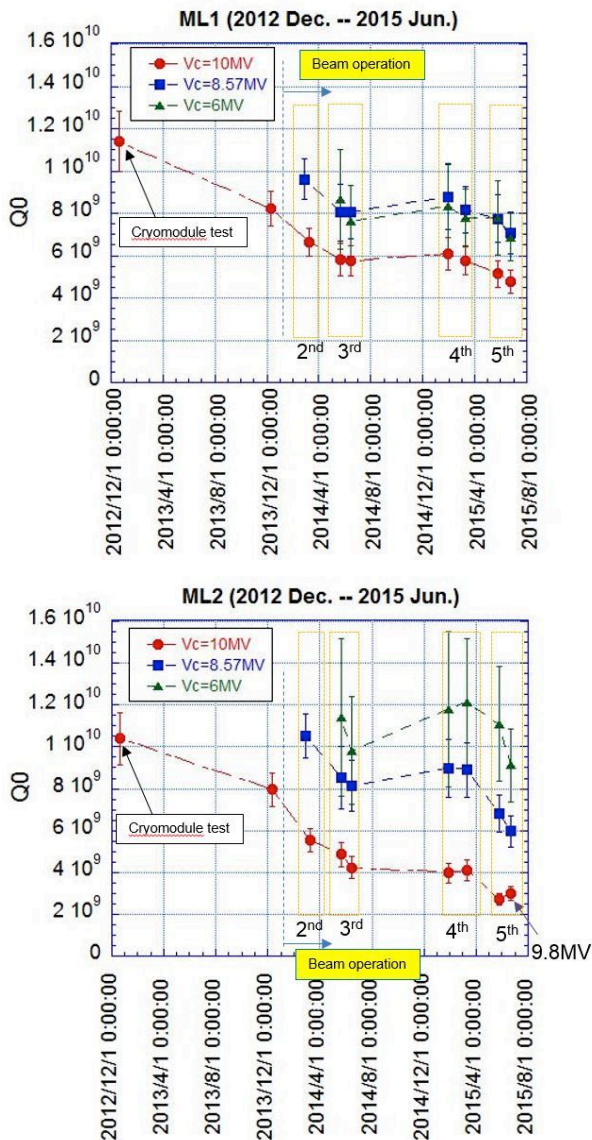


Fig. 136 2012 年の 12 月のクライオモジュールテストから 2015 年 6 月までのビーム運転上流空洞(ML1)の Q 値の履歴 (上)。下流空洞 (ML2)の Q 値の履歴 (下)。

4.5. ビーム加速、回収までの開発を振り返って

ここまで、空洞設計、製作、試験、周辺機器開発、クライオモジュール設計、製作、組立、試験、ビーム試験と超伝導加速空洞によるビーム加速に必要な流れを一通り紹介した。そこで超伝導加速空洞開発で何が重要であったかを私の経験のもとでもう一度まとめてみる。

4.5.1. 超伝導空洞設計のポイントまとめ

まず、設計の大前提は当たり前だが、ビームに対する要求を満たすことである。ここを間違えてはいけない。特に我々の場合は 100mA もの大電流を加速するというのが開発課題であったので、HOM 対策を重視した。そこが設計に反映されている。また CW ビームとパルスビームでも運転の形式が変わってくる。LLRF の制御はビームの最終的な安定精度を要求するために設計される。CW ビームでの LLRF の安定化では Feedback 回路をメインで働かせればいいが、パルスビームではビーム負荷によるパワー変動を調整するためにビームありなしで field の調整を行う。その際に空洞の Lorentz force を調整するために piezo に Feedforward であらかじめ電圧を立てる必要が出てくる[86]。これらに合わせてチューナーの設計も行う必要がある。

CW ビームとパルスビームでは熱負荷もかなり違ってくるので、クライオモジュールの設計が異なると同時に冷凍機の負荷も大きく変わってくる。CW の場合 1 空洞で数 10W もの熱を 2K 及び 4K の He に吸収できる設計にする必要がある。またそれに対する冷凍機の設計が必要である。それに対し、パルスビームでは static loss 対策がメインになるため、static loss を抑えるクライオモジュールの設計がメインになる。

さて、空洞に対してはどれくらいの加速勾配が必要かということであるが、設計で R/Q をどれくらい高くできるか、それに対して、これもビームと相談し、HOM が問題無ければ高い加速勾配を設定すればいい。また上記と同じく、He の熱負荷に対しては、モジュールの設計もさることながら、必要な Q₀ 値がどれくらいなのかを設定し、R_BC_S でまず達成できる Q₀ なのかを確認したのち、それが現在の表面処理やレベルで問題無い範囲の R_{res} であるかを確認して、それで十分な Q₀ 値を達成できるかを考える必要がある。最後にそれらの (R/Q)*Q₀ は共振周波数に依存するので、周波数を変えた方が得策なら、必要に応じて変えて設計を見直すことにある。また、温度依存性もあるので、2K がいいか 4.2K がいいかまたもっと低い温度がいいか設計の段階で程度決めておくべきである。それはもちろん冷凍機の設計と密接に関係する。最後今回得た経験は長期運転での Q₀ の劣化である。このような劣化は実際 KEKB の長期ビーム運転中の超伝導空洞[105]や Jlab の長期ビーム運転中の CEBAF 加速器の超伝導空洞

[106]でも見られており、この劣化はある程度見込んで空洞の Q 値、及び冷凍機のマージンに入れることを私からは勧める。

入力パワーもビームの関数である。エネルギー回収がなく、超伝導空洞のような空洞ロスがほとんどない場合、大電流ビームの加速に要するパワーのほとんどが高周波源のパワーに要求されるパワーとなる。ERLの入射部ではそれにより、必要なパワーが決まってきているが、それと同時に入力カプラーに通すパワーもこれで決まる。現在の達成されている入力カプラーのパワーレベルが技術的にどのレベルかを判断し、パワーソースと空洞の台数を決める必要がある。入射部では空洞を2セル空洞3台としてカプラー1つに1.3GHzで170kWのパワーを通すことを想定しているが、これが技術的につらいなら、空洞の台数を5台にして100kWまで下げるなどのマージンを見る必要があることはコメントしておきたい。また、周波数に応じて高周波源も効率のいいものがあるため、空洞で決めた周波数が高周波源で達成できるレベルかを確認する必要がある。空洞の共振周波数は加速勾配と同時に高周波源からも決める必要がある。主加速部の入力カプラーはERLが成り立つという特殊な条件であり、入力パワーは十分小さな値でいい。これがERLのメリットである。但し、QL及び高周波源のパワーは現在はmicrophonicsにより決まるので、モジュールの堅牢な設計、および外乱を予想して、十分なマージンを見る必要がある。実際Daresburyで設計していたERL用のCWのクライオモジュールはモジュールが堅牢でなく、冷凍機のロータリーポンプが近くにあったために、microphonics($\Delta f_{pk-pk}=300\text{Hz}$ 程度)が大きく、長年かけてせっかく作成したクライオモジュールにパワーが投入できなかつたという悲惨なことが起きている[107]。これが我々のハイパワー試験でも一番恐れていたことであつたが、問題なくビーム加速までもっていったのはある程度マージンのある設計を行ったからである。

HOMダンパーに関しては色々な選択肢がある。大電流を見て、本当に安全策を検討するなら、実績のある室温部にHOMダンパーをおくべきだが、これはモジュールのパッキングファクターを圧倒的に減らすことになる。どれくらいの加速領域を超伝導空洞モジュールが取れるかから逆算すべきであろう。現在では必要なビームから、開発を行なっていければという感じであろうか？

クライオモジュール設計はこれら上記の要求をひっくるめて成り立てばいいが、さらに重要なことは入熱を減らす設計はさることながら、磁気シールドのための十分な領域が確保されているか。また冷えた際にビームに対してアラインメントが十分であり、かつ空洞の変位が見失わないか？という考慮がされていることを確認する必要がある。また、Heラインに必ず冷却制御に必要な温度センサーを十分確保することである。

最後にビーム運転で重要なことはやはり、空洞性能を確保できるように常時監視する目である。特に今回顕著だったのが、放射線増加に伴うfield emissionの増大である。これをビームモニターとは別に逐次空洞用にモニターすることが重要であると思われる。また、空洞に何か異変が起こった時に瞬時に空洞RFだけでなくビームを止めに行く早いinterlockはERLにとってはbeam loadingによるパワー増大を防ぐためには重要であると、同時に空洞の性能劣化を防ぐために重要である。interlockがかかった時にビームモニターの信号と同期するように最後は持っていくべきである。最後に空洞の位置の再現性を再冷却で再現されているかはビームの軌道にとっても重要であるため、それを精度良くモニターできるシステムも必要であると思われる。

設計のポイントを思うがままに書いていったが、ざっとこんなものであろうか？

4.5.2. 現状の技術的課題

空洞の表面処理の向上で内面のピットなどによる熱的クエンチでのリミットは35MV/m以上にまで向上した。これは空洞診断装置と内面検査カメラ、局所研磨装置による影響が大きい。ピットの大きさとかクエンチfieldとの相関もあるように思われる[108]。またHPRにより、物理的な埃は落とせているようだ。その後の組立でいかに埃を入れないかが現在の課題である。縦測定までは25MV/m程度までは問題無い組立方法がようやく確立できたが、そこからクライオモジュールに再組立てを行う際に性能劣化が見られる。これは我々のクライオモジュールに限った問題ではなく、最近EURO-XFELなどの空洞の量産体制でも顕著に見られている。すなわち、400台の空洞の縦測定で得られた空洞性能のうち、56台の空洞をクライオモジュールで試験しているが、少なくとも20%以上がクライオモジュール試験で性能劣化が見られている[109]。劣化を起こさないク

ライオモジュールでの空洞アセンブリ技術の開発が我々含めて、世界中の大きな課題である。これは一つ一つの組立工程を細かく check していきしかない。

また、運転中の性能劣化をどのように解消するかが今後問題である。これも主たる原因は field emission によるものであると予想される。He processing など効果的な process 方法を考えることやモジュールの状態での HPR[110]を行い、ビームラインからモジュールをアンインストールしないような性能回復方法などを確立することが今後の課題である。

HOM ダンパーも技術的課題が多いがこれは前述の HOM ダンパーのセッションで説明したように大電流化に向けてはまだまだ開発課題が多く、今後色々検討が必要であることをここでは述べておく。

クライオモジュールは我々のモジュールでは一応、ビーム運転まではうまく持っていったようであるが、今後の量産化などに対応するにはやはり EURO-XFEL のような形[111]は大きな候補である。実際に次世代光源の候補である CW-XFEL が LCLS-II project[112]としてアメリカで建設がスタートした。この LCLS-II では 1.3GHz の CW 運転を 16 MV/m で運転することを検討しており、EURO-XFEL ではパルス運転だったものを CW 運転対応可能にするような設計を検討中である。また、近年では ERL での EUV-FEL 光源の計画[113]もあり、我々も量産に向けてはこのような 4、8 空洞入りで CW 運転でも問題無いクライオモジュールを設計することが次の課題であろう。これは十分検討すれば問題ない課題であるが、設計には多少時間を要すると思われる。

5. 超伝導加速空洞の最近の開発事情

最後に最近の超伝導加速空洞の開発のトピックについて、軽く述べておく。(時間がないので軽く述べるにとどめる。)

High-Q は冷凍機負荷を抑えるために重要な開発課題である。5～10年ほど前は Large grain 空洞により、high-Q 空洞ができないかという開発が大きなトレンドであったが、ここ2年でさらに high-Q の開発が飛躍的に進んできている。一つが N2-dope と呼ばれる方法でこれはアニール中の真空炉に N2 を数分入れることで RBCS が下がるといふものであり、2013年に偶然なのだが、発見された[114]。現在この処理により前述した LCLS-II

用の 9セル 1.3GHz の空洞で 2K で $Q_0 > 2.7 \times 10^{10}$ と今までのスペックの 3 倍高い値が得られている。これにより冷凍機のコストが 1/3 に減少することが可能である。cooling 方法と密接に関係しているようであり、この方法を世界中で再現を確認しているところである。

材料開発では Nb₃Sn の開発が進んだのがこの数年である。Nb₃Sn は 4.2K で $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ のポテンシャルのある非常に魅力的な素材である。1996年に Wuppertal 大学で Nb₃Sn の空洞開発が主に進められていたが、5MV/m まで Q 値が $1 \times 10^{10}@4.2K$ を keep していたが、それより先は Q 値が劣化していき、これ以上の performance が得られなかった[115]。近年コーネル大で Nb に Nb₃Sn を蒸着した空洞を用いて、測定を行ったところ、その Q 値が 12MV/m まで $1 \times 10^{10}@4.2K$ を keep した結果が得られている[116]。これは蒸着後再度 1100°C でアニールして Nb₃Sn のグレインを大きくした効果が効き、Nb₃Sn の本来の performance が出たものだと考えられている。表面処理技術などの向上も大きく、今後は Nb₃Sn などを使った材料開発なども進んでいくものと思われる。

その他、多層膜を使った高加速勾配への挑戦などが新たに提案もされているが、本講義の範疇を超えるので、ここでは述べない。

いずれにせよ、このような超伝導素材の本来の性能を引き出せるようになってきたのは長年の製作技術、表面処理技術、組立技術、測定技術の飛躍的な向上が大きく今後、このような開発がすすんでいくことが大きく期待される。

6. 最後に

長々と(本当に長々と)超伝導加速空洞の基礎から設計、開発経緯、そしてビーム加速とエネルギー回収まで本文で書かせて頂いた。私のしつこい性格も災いしてかなりくどく書いてしまったと反省はしているが、今までの OHO で超伝導加速空洞の講義は非常にたくさんあるものの、最後のビーム加速まで一貫して書いているものがないのが現状であり、そこが少し不満な部分でもあった。そのため、ビームとの相互作用の観点と、特に後半のモジュール組立上の問題点及びビーム加速や安定加速するために超伝導加速空洞に対して、何が重要かという観点を、この機会に述べさせてもらったのがくどく書かせてもらった理由である。私が超伝導加速空洞開発を始めたの

が 2006 年であり、それまでは私はビームモニター開発[117]や真空、ビーム運転や加速器の設計を行っており、超伝導加速空洞と全く無縁であった。そこから一貫して空洞開発、周辺機器開発、モジュールの設計開発、ビーム加速まで急ピッチで経験させてもらった。この貴重な体験を書ければと思います、筆をとった次第である。今回の OHO も書きながら、非常に勉強させてもらった。

Linear collider が 2004 年超伝導空洞を採用して以降、今まで超伝導空洞に携わる人数は飛躍的に増えてきている。特に近年は陽子加速器、イオン加速器での超伝導加速空洞への応用が非常に多くなっており、今後はそちらへの応用が多くなるのではないかと予想される。(LINAC2014 の会議の半分が超伝導空洞関係の発表で占められているのが最近の現状であり、これは非常に驚いた次第である)。その反面、加速器開発で特に超伝導空洞開発では空洞開発だけで開発が終わる(閉じてしまう)場合(方々)も多くなってきているような気がする。多くの方々が超伝導空洞開発に携わっていただけるようになればと思う反面、やはり、加速器として、必要なビームに合わせて、製作する超伝導加速空洞で「ビームをいかに加速するか」その観点を忘れずに超伝導空洞開発に携われるように、「加速器」セミナーであるこの本文の講義内容が参考になれば幸いである。

謝辞

このような執筆の機会を頂きました小林幸則校長、および河田洋氏に感謝いたします。また、この開発をともに行ってきた ERL 主加速器超伝導空洞 Grp. (古屋貴章氏、梅森健成氏、沢村勝氏、篠江憲治氏、江並和宏氏、江木(旧姓佐藤)昌史氏、Enrico Cenni 氏)の皆様には多大なる感謝を示したいと思います。皆様の長時間の議論と実験の末にエネルギー回収ができたこと感謝いたします。また、超伝導空洞開発を共に行ってきた野口修一氏、加古永治氏、宍戸寿郎氏、山本康史氏、渡辺謙氏、早野仁司氏には開発経緯で様々な助言を頂き、また実験を手伝って頂きました。感謝いたします。最後に、空洞開発や cERL の建設中にモジュール試験、ビーム運転に至るまでにお世話になったスタッフの方々、企業の方々、この紙面ではおさまらない多くの多くの方々にお世話になり、この本文に書かれている開発が進んだこと感謝いたします。最後に、夏休み中、執筆活動をサポートしてくれた家族に感謝します。

参考文献

- [1] H. A. Schwettmann, et. al.; "Measurements at High Electric Field Strengths on Superconducting Accelerator Cavities", Proc. Of 5th Int. Conf. on High Energy Accel. Frascati p.690 (1965)
- [2] M. Tigner, "A Possible Apparatus for Electron Clashing-Beam Experiments", II Nuovo Cimento 37, 1228-1231 (1965)
- [3] 光延信二 OHO92
- [4] 古屋貴章 OHO06
- [5] 野口修二 OHO11
- [6] 加古永治 OHO14
- [7] 梅森健成 OHO08
- [8] 仲井浩考 OHO08
- [9] Feng Qiu OHO15
- [10] J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics"; 2nd ed. (1975)
- [11] By Mathematica, <http://mathworld.wolfram.com/>
- [12] 高周波 3 次元電磁界解析ソフトウェア <http://www.ansys.jp/products/electromagnetics/hfss/>
- [13] 吉田光宏 OHO08
- [14] JLC Design Study Group, "JLC Design Study"; KEK-Report, 97-1, (1997).
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sc_history.gif
- [16] H.Padamsee, J.Knobloch, T.Hays, "RF Superconductivity for Accelerators"; (1998)
- [17] M. Tinkham, "Introduction to Superconductivity"; 2nd ed. (1996)
- [18] T. Tajima, SRF2011 Tutorial
- [19] A. Gurevich, SRF Material Workshop, FNAL (2007)
- [20] D.C Mattis and J.Bardeen, Phys Rev., 111:412 (1958)
- [21] 佐伯学行 OHO06
- [22] U.Klein and D.Proch, Proc. of Future Possibilities for Electron Accelerators, Charlottesville, N1 (1979)
- [23] 3 次元電磁界解析ソフトウェア CST http://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php
- [24] Wu, G., FishPact. <http://code.google.com/p/fishpact/>.
- [25] V. Shemelin, H. Padamsee, TTC Report SRF080903-04 (2008)

- [26] T. Kubo, T. Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 073G01 (2015).
- [27] R. V. Latham, "High Voltage Vacuum Insulation"; Academic Press, (1995)
- [28] E. Cenni *et al.*, "Field emission simulation for KEK-ERL 9-cell Superconducting cavity" Proc of IPAC2012, New Orleans, USA p295 (2012)
- [29] J. Halbritter, *et al.*, "Additional Losses in High Purity Niobium Cavities Related to Slow cooldown and Hydrogen Segregation" Proc of SRF1993, p617 Newport News USA (1993)
- [30] 平野肇一 OHO08
- [31] 中村典雄 OHO15
- [32] 山本将博 OHO15
- [33] 本田洋介 OHO15
- [34] 原田健太郎 OHO08
- [35] 羽島良一、中村典雄、坂中章悟、小林幸則、「コンパクト ERL の設計研究」 (2008)
- [36] K. Watanabe *et al.*, "Development of the superconducting rf 2-cell cavity for cERL injector at KEK", Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A, Vol. 714 p.67 (2013).
- [37] E. Kako *et al.*, "Construction of Injector Cryomodule for cERL at KEK" Proc. IPAC12, New Orleans, USA, p2239 (2012).
- [38] K. Umemori *et al.*, "Design of L-band superconducting cavity for the energy recovery linacs", APAC'07, Indore, India, p.570 (2007)
- [39] R.E. Collin, "Foundations for Microwave Engineering"; 2nd ed. (1992).
- [40] P.B. Wilson, "High Energy Electron LINACS: Applications to Storage Ring RF System and Linear Colliders", SLAC-PUB-2884, Nov. (1991).
- [41] 阿部哲郎 OHO04
- [42] E. Pozdeyev *et al.*, ERL2005 (2005)
- [43] W.H. Panofsky and W. A. Wenzel, Rev. Sci. Instrum. 27, 967 (1956)
- [44] G.H. Hoffstaetter and I.V. Bazarov, PRST-AB 7, 054401 (2004)
- [45] M. Liepe, Proc of the 11th Workshop on RF-Superconductivity (SRF2003), Lubeck, Germany (2003)
- [46] TESLA Technical Design Report, edited by R. Brinkmann *et al.*, DESY, (2001).
- [47] K. Watanabe *et al.*, "Higher Order Mode studies of superconducting cavities for ILC", 第4回加速器学会プロシーディングス, p457-459, 和光 (2007).
- [48] H. Sakai *et al.*, "Development of a 1.3GHz 9-cell superconducting cavity for the Energy Recovery Linac", Proc. of 41st Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL07), (Warrington, U. K.) p57-61 (2007).
- [49] <http://laacg1.lanl.gov/>
- [50] 赤坂展昌 OHO99
- [51] 陳榮浩 OHO99
- [52] M Izawa, Private communication.
- [53] <http://www.lepp.cornell.edu/~ib38/bbucode/>
- [54] R. Hajima, R. Nagai, Private communication
- [55] M. Sawamura *et al.*, "Eccentric-fluted beam pipes to damp quadrupole higher-order modes", PRST-AB, Vol.13, p022003-1 – 022003-9 (2010)
- [56] 宍戸寿郎 OHO14
- [57] 沢辺元明 OHO14
- [58] Y. Iwashita *et al.*, PRST-AB 11, 093501 (2008)
- [59] K. Watanabe *et al.*, "Repair Techniques of Superconducting Cavity for Improvement cavity Performance at KEK-STF", Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan, p2965 (2010).
- [60] K. Umemori *et al.*, "Results of Vertical Tests for KEK-ERL 9-cell Superconducting Cavity", Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan, p2956 (2010).
- [61] E. Cenni *et al.*, "Vertical Test Results on KEK-ERL 9-cell L-Band Superconducting Cavity", Proc. of SRF2011, Chicago, USA, p789 (2011).
- [62] H. Sakai *et al.*, "Cavity Diagnostics using Rotating Mapping System for 1.3 GHz ERL 9-cell Superconducting Cavity", Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan, p2950 (2010).
- [63] E. Cenni, Doctor thesis, 総研大 (2013).
- [64] <http://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>.
- [65] K. Umemori *et al.*, "Vertical Test Results for ERL 9-cell Cavities for Compact ERL project" Proc of IPAC2012, New Orleans, USA p2227 (2012)
- [66] 加古永治, 他: 「STF ベースライン超伝導空洞用大電力高周波入力結合器」, 第3回加速器学会プロシーディングス, p136-138 (2006)
- [67] H. Sakai *et al.*, "High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac under Liquid Nitrogen Condition", proc of SRF2011. Chicago, USA, p356 (2011)
- [68] M. Liepe *et al.*, "Status of the Cornell ERL injector SCRF Cryomodule", Proceedings of LINAC2010,

- Tsukuba, (2010) and V. Veshcherevich, private communication.
- [69] 篠江憲治,他 : 「ERL 主ライナックのためのカプラー開発 --カプラー実機によるエージング試験」,第 9 回加速器学会プロシーディングス, p1026-1030 (2012)
- [70] 矢野喜治,他 : 「cERL 用アークディテクターの開発」,第 6 回加速器学会プロシーディングス, 東海,, p323-138 (2009).
- [71] K.Umemori et. al., “Observation of Resonance mode in Coaxial-Type input coupler”, Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan, p2959 (2010).
- [72] 影山達也,他 : 「SuperKEKB におけるアレス空洞入力結合器」,第 11 回加速器学会プロシーディングス, 青森,, p590-594 (2014).
- [73] C. Adolphsen et. al. “SLAC/FNAL TTF3 Coupler Assembly and Processing Experience”, Proc of SRF2011, Chicago, USA, p476 (2011)
- [74] T.Abe et. al., “Multipactoring suppression by fine grooving of conductor surfaces of coaxial-line input coupler for high beam current storage rings”, PRST-AB, Vol.13, p102001 (2010)
- [75] T.Kijima et. al., “Conditioning of Input Couplers for KEKB Superconducting cavities”, Proc of SRF2001, Tsukuba, Japan, p565 (2001)
- [76] T.Tajima et. al., “Beam Test Results on HOM Absorber of Superconducting Cavity for KEKB”, Proc of PAC97, Vancouver, Canada, p3090 (1997).
- [77] Y.Suetsugu et. al., “Conceptual Design of Vacuum System for Super KEKB” Proc. of PAC03, Portland, USA, p806 (2003).
- [78] M.Sawamura et. al., “ERL HOM Absorber Development”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany, p698 (2009).
- [79] M.Sawamura et. al., “Cooling Properties of HOM absorber model for cERL in Japan” Proc of SRF2011, Chicago, USA, p350 (2011).
- [80] F. Marhauser et. al., “Investigations on Absorber Materials at Cryogenic Temperatures”, Proc. of PAC09, Vancouver, Canada, p2799 (2009).
- [81] D. Kostin, “XFEL beamline loads and HOM coupler for CW”, TTC topical meeting on CW SRF., Ithaca, USA June 12-14, (2013) and J. Sekutowicz private communication.
- [82] G.R. Eichhorn et. al., “Cornell’s Beam line Higher Order Mode Absorbers”, Proc. of SRF2013, Paris, France, p1027 (2013).
- [83] M.Sawamura et. al., “New Design of HOM coupler using coaxial-like Rounded Waveguide”, Proc. of SRF2013, Paris, France, p1081 (2013).
- [84] C.E.Reece et. al., “High Thermal conductivity cryogenic RF feedthroughs for higher order mode couplers”, Proc. of PAC05, Knoxville, USA, p4108 (2005).
- [85] J. Sekutowicz, “Improved Heat Conduction Feedthroughs for HOM couplers at DESY” Proc. of ERL2011, p102 (2011).
- [86] Y. Yamamoto et. al., “Experimental Results of Lorentz Detuning in STF Phase-1 at KEK-STF”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany, p188 (2009).
- [87] 江並和宏,他 : 「ERL Main Linac 実機用チューナーの低温特性試験」,第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, p602-604 (2013).
- [88] 原博史,他 : 「KEK cERL 用超伝導加速空洞モジュールにおける MHI の取り組み」,第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, p963-965 (2013).
- [89] 増澤美佳 OHO14
- [90] 篠江憲治 他, “cERL 主空洞冷却モジュールにおける冷却時の空洞位置変位測定”, 第 10 回加速器学会プロシーディングス, 名古屋, p950-952 (2013).
- [91] N.Nakamura et. al., “Effect of alignment error of main superconducting cavities on ERLs and their correction”, Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan, p2314 (2010).
- [92] D. Giove *et al.*, “A wire position monitor (WPM) system to control the cold mass movements inside the TTF cryomodule,” Proceedings of PAC1997 (PAC97), pp.3657-3659
- [93] LK-2000 series; Keyence K.K., Higasiyodogawaku, Osaka, 533-8555, Japan.
- [94] Edited by N.Toge *et al.*, “S1-Grobal Report”, KEK Report 2013-3 (2013)
- [95] H.Sakai et. al., ”Precise Measurement of Superconducting Cavity Movement in Cryomodule by the Position Monitor using White Light Interferometer”, Proc. of SRF2013, Paris, France, p288 (2013).
- [96] H. Sakai et. al., ”Improvement of the Position Monitor using White Light Interferometer for Measuring Precise Movement of Compact ERL Superconducting Cavities in Cryomodule”, Proc. of IPAC14, Dresden, Germany, p1787 (2014).
- [97] H. Sakai et. al., ”High Power CW Tests of cERL Main-Linac Cryomodule”, Proc. of SRF2013, Paris, France, p849 (2013).

- [98] M. Satoh et. al., “Mechanical Vibration Search of Compact ERL Main Linac Superconducting Cavities in Cryomodule” Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, p2531 (2014).
- [99] 谷本育律 OHO15
- [100] 高井良太 OHO15
- [101] 宮島司 OHO15
- [102] K. Umemori *et al.*, “Operational Status of Compact ERL Main Linac Cryomodule”, IPAC’14, Dresden, Germany, p. 2537 (2014).
- [103] T. Miura *et al.*, “Performance of RF system for Compact-ERL Main Linac at KEK”, IPAC’14, Dresden, Germany, p. 2452 (2014).
- [104] C. E. Reece *et al.*, “Improvement of the Operational Performance of SRF Cavities via *in situ* Helium Processing and Waveguide Vacuum Processing”, PAC97, Vancouver, Canada (1997).
- [105] S. Mitsunobu et. al., “Status of KEKB Superconducting Cavities”, Proc. of SRF2007, Beijing, China, p170 (2007)
- [106] R.L. Geng et. al., “Pursuing the Origin and Remediation of Low Q_0 Observed in the Original CEBAF Cryomodules” Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, p2828 (2014).
- [107] A.E.Wheelhouse et. al., “Commissioning of the ERL Cryomodule on ALICE at Daresbury Laboratory” Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, p2583 (2014).
- [108] Y. Yamamoto et. al., “Achieving high gradient performance of 9-cell cavities at KEK for the international linear collider”, Nucl. Instru. and Meth. A, 729 (2013) p589-595.
- [109] J. Swierblewski, “Large Scale Testing of SRF Cavities an Modules”, Proc. of LINAC2014, Geneva, Switzerland, p426 (2014).
- [110] Y. Morita et. al., “Horizontal High Pressure Water Rinsing for Performance Recovery”, Proc. of SRF2013, Paris, France, p527 (2013).
- [111] 大内徳人 OHO06.
- [112] J.N. Galayda, “The New LCLS-II Project: Status and Challenges”, Proc. of LINAC2014, Geneva, Switzerland, p404 (2014).
- [113] Y.Socol et. al., “13.5-nm Free-Electron Laser for EUV Lithography”, Proc. of FEL2010, Malmo, Sweden, p250 (2010).
- [114] A. Grassellino et. al., 2013 Supercond. Sci. Technol. 26 102001 (Rapid Communication).
- [115] G. Muller et. al., “Nb3Sn Layers on High-Purity Nb Cavities with Very High Quality Factors and Accelerating Gradients”, Proc. of EPAC96 (1996).
- [116] S. Posen, et. al., “Nb3Sn – Present Status and Potential as an Alternative SRF Material”, Proc. of LINAC2014, Geneva, Switzerland, p431 (2014).
- [117] 阪井寛志 OHO02.