

3.2 主線型加速器

3.2.1 Overview

1990年代の電子/陽電子衝突型蓄積リングにおける超伝導加速空洞の大規模応用の成功、トーマスジェファーソン研究所 (JLAB) における原子核物理用環流型超伝導電子線型加速器 (CEBAF) の成功は、超伝導空洞のその後の応用に多くの新分野を開拓した。KEKB のような大電流加速への応用、FEL のような新光源への応用、TESLA 計画への高電界加速空洞への道、SNS の超伝導陽子線型加速器 (リニアック) への応用が上げられる。本 ERL 計画の最重要技術である超伝導空洞によるエネルギー回収は、第二の道、つまり CEBAF のスピノフとして JLAB IR-FEL によって原理実証された [1]。一方、TESLA の開発は 1990 年代当時の加速電界 5 MV/m を 25 MV/m に向上させると同時に、超伝導リニアックの運転に至る多くの成果を生み出している [2]。この成果は、本 ERL 計画でも大いに活用できる。ここでは、この 10 年間の超伝導空洞の研究成果を概観し、本 ERL 計画への超伝導加速空洞の技術的展望を示す。

3.2.1.1 この 10 年の性能向上

図 3.27 は過去 10 年の 1300 MHz (L バンド) 単セルニオブ超伝導空洞で達成された高電界の歴史である。1994 年まで高純度ニオブ材の開発、1400 °C 高温真空熱処理技術の適用、高圧パルスエージング (コネル大学) 等の開発により、加速電界は次第に向上し 30 MV/m に接近した。CERN で原理実証 (1991 年) された超純水高圧洗浄法が 1995 年に KEK、JLAB で L バンド空洞に実用化され、30 MV/m から 40 MV/m への飛躍が起こった。そして、それ以後、加速電界は 40 MV/m 当たりに留まっている。ここに示す 40 MV/m のデータは一例 () を除いて KEK の電解研磨によって達成された結果である。以下の節では、本 ERL 計画の空洞製作で採用されるべき核心技術を紹介する。

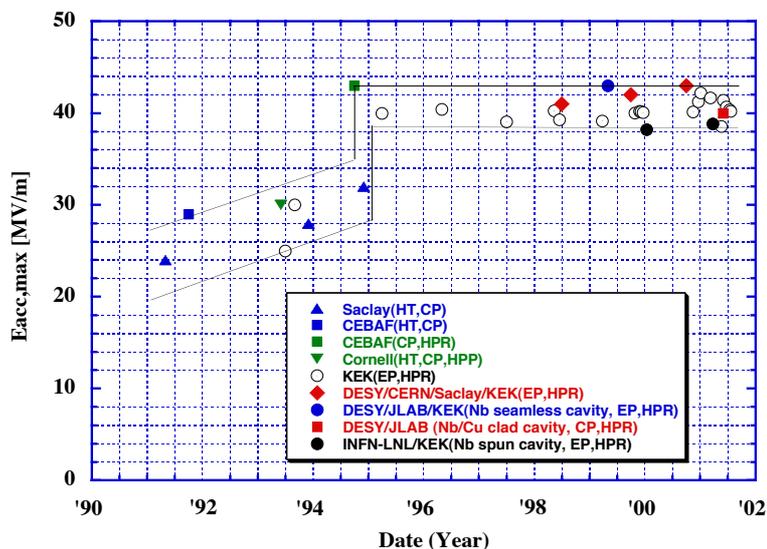


図 3.27: 過去 10 年に渡る超伝導空洞の高電界の向上。

3.2.1.2 清浄表面技術：超純水高圧洗浄

図 3.27 に見た様に、超純水高圧洗浄によって超伝導加速空洞の高電界性にステップ的飛躍がもたらされた。この技術は、図 3.28 に示すようにクラス 100 程度のクリーン環境下で、空洞内表面を $80 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ の水圧で、ジェット洗浄する方法である。この方法により、化学研磨や電解研磨後に空洞内表面に残留するゴミを高率的に除去することができ、清浄表面の製作が容易になった。そして、従来から問題であったフィールドエミッションの問題（主としてゴミが原因で発生する）が解決された。

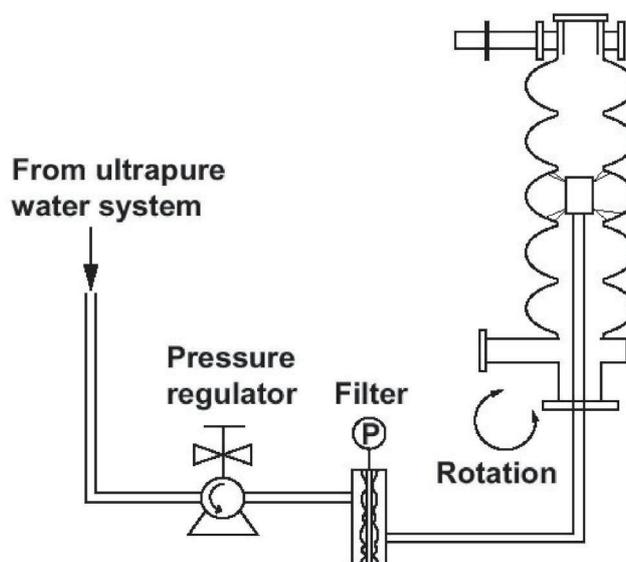


図 3.28: 超純水高圧洗浄技術。

3.2.1.3 電解研磨による高電界超伝導空洞

深絞り成形と電子ビーム溶接による従来法で製作したLバンド単セルニオブ超伝導空洞で、KEK は図 3.29 に示すように、電解研磨により世界に先駆けて多数の空洞で 40 MV/m の高電界を達成した。一方、化学研磨では 30 MV/m 以下の高電界しか期待できず、電解研磨が化学研磨よりも高電界性に優れることを明らかにした [3]。その背後には、各々の方法で仕上げられた表面の粗さよりはむしろ、空洞内表面の酸化膜の質が関係していると考えられる。1990 年代には、KEK 以外の研究所では電解研磨より処理法が簡単な化学研磨を採用してきたが、最近では DESY や JLAB でも電解研磨の採用を決め、その設備を建設している。

一方、また図 3.30 に示すように、コネル大学や KEK の研究によりこの 40 MV/m の加速電界は、ニオブ材料のスーパーヒーティング磁場 (H_{sh}) に由来する理論的限界であることが明らかになった。第二種超伝導体では、下部臨界磁場 (H_{c1}) より大きい外部磁場の下では、侵入深さ λ_L の範囲に磁場が侵入する。その侵入磁束は、常伝導と超伝導の混合状態系のエネルギーを最小になるように分布する。超伝導のその応答は、そのエネルギーバランスを決めるために必要な固有時間で決まり、およそマイクロ秒とされている。高周波超伝導空洞では、電磁場の変化がその固有時間に比べて速いので、エネルギーバランスが追い付かず、 H_{c1} よりも高い磁場（高周波磁場）

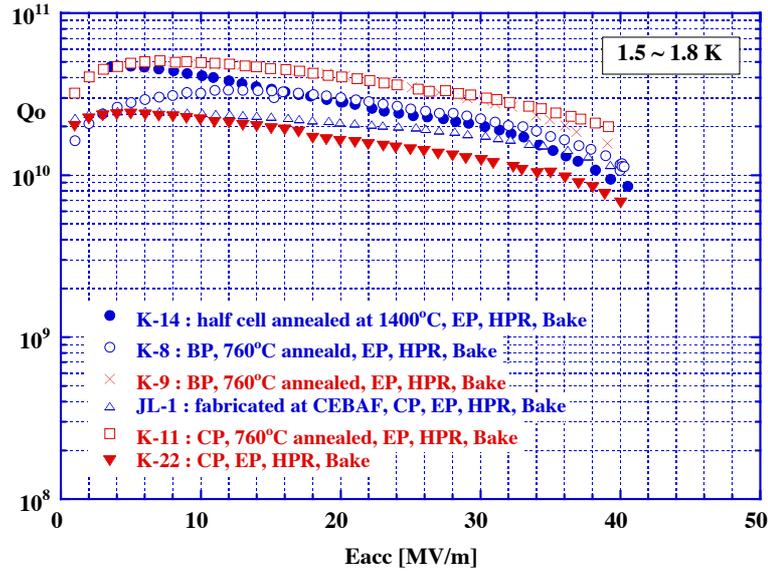


図 3.29: KEK の電解研磨法により達成された高電界 L バンド空洞の性能。

でクエンチすると考えられる [4]。予想される高周波クエンチ磁場の強さは、コヒーレント長 ξ の範囲に凝縮するクーパー対のエネルギーと λ_L の範囲の常伝導磁場のもたらすエネルギーのつり合いで決まり、以下の式で与えられる。ここで H_{sh} の前の $1/\sqrt{2}$ は、AC 磁場強さの実効値を考慮する結果である。

$$\frac{1}{2}\mu_0 \cdot \lambda_L(T) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}H_{sh}(T)\right)^2 - \frac{1}{2}\mu_0 \cdot \xi(T) \cdot H_c(T)^2 = 0, H_{sh}(T) = \sqrt{\frac{2\xi(T)}{\lambda_L(T)}} \cdot H_c(T) \quad (3.24)$$

$$H_c(T) = H_c(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \quad (3.25)$$

$$\lambda_L(T) = \frac{\lambda_{L0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}}, \xi(T) = \frac{\xi_0}{\sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}} \quad (3.26)$$

図 3.30 は、ニオブの H_{sh} の温度依存性と各温度でのニオブ超伝導空洞の臨界高周波磁場を比較したもので、臨界高周波磁場はスーパヒーティングモデルで良く説明されることが分かる [5]。超伝導空洞の表面最大磁場 H_p と高周波加速電界 E_{acc} の間には次の線形関係がある。

$$H_p[\text{Gauss}] = a \cdot E_{acc}[\text{MV/m}] \quad (3.27)$$

ここで、定数 a は空洞形状で決まり、KEK の L バンド空洞の場合、 $a = 43.8$ である。 $H_p = H_{sh}$ が超伝導空洞の理論的リミットである。図 3.30 から 2 K では $H_{sh}=1800$ Gauss である事から、

$$E_{acc,\max} = \frac{H_{sh}}{a} = \frac{1800}{43.8} \approx 41 \text{ MV/m} \quad (3.28)$$

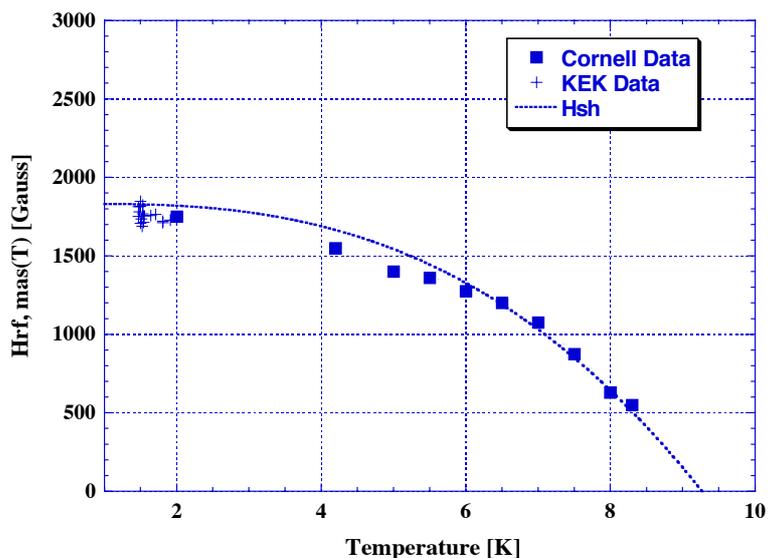


図 3.30: ニオブ超伝導空洞の高周波臨界磁場とス - パ - ヒ - ティング磁場 (H_{sh}) の比較。

つまり、40 MV/m はニオブ超伝導空洞の理論的リミットに近く、製作技術は限界に達成していることを示している。

一方、また電解研磨による高電界性は、多連セル空洞でも実証されている。最近の DESY/KEK の共同研究では、4 台の TTF 空洞で図 3.31 に示すように KEK で電解研磨したものは、DESY での化学研磨で得られている性能より明らかに良い結果を示した。本計画では最大 20 MV/m の CW 運転が計画されているが、そうした高電界超伝導空洞の製作技術自体からは大きな問題がないと思われる。

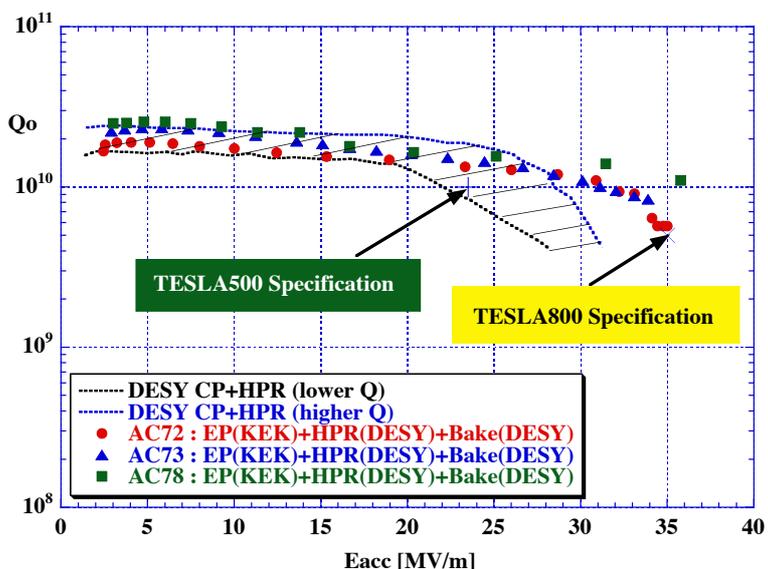


図 3.31: DESY の TTF 空洞を KEK で電解研磨すること達成された性能結果。斜線部が DESY の化学研磨によって得られた従来の TTF 空洞の性能である。

3.2.1.4 表面処理法のシンプル化

空洞性能が向上する一方で、複雑な表面処理を簡素化し、そのコスト削減を計る研究の成果が得られている。ニオブ空洞の化学的表面処理（化学研磨、電解研磨）ではその処理中にニオブが水素を吸蔵し、その結果、超伝導空洞が極低温で著しい Q 値の劣化を起こす問題（水素病と呼ばれる）がある [5]。従来技術では、その問題を避けるために、空洞に $700 \sim 800^\circ\text{C}$ の水素脱ガス真空熱処理を施している。また、DESY では、その他にチタンゲッタ - 作用によるニオブ材の高純度化を目的として 1400°C の高温真空熱処理を行っている。こうした真空熱処理は、表面汚染の熱拡散防止のために、予め表面をクリーニングしておく必要がある。従って、真空熱処理前に空洞表面処理が必要であり、また、工業炉を使うので真空熱処理自体でも表面汚染が発生する。その除去のためにさらに、仕上げ表面処理が必要になる。現状の表面処理法は高コストであると同時に長期の処理時間（数週間）を要す。また、トリスタンでは、電解研磨の前に半セルに機械研磨を施すことで空洞性能の品質管理に成功したが、その方法は時間がかかり結果的に高コストである。本計画では、3年以内に280台（30台は予備）に及ぶ空洞を製作し、横クライオモジュールに組込まなければならない。そのためには、空洞の表面処理コストの削減の他に処理時間の短縮化が重要課題となる。

我々は、現状の表面処理をシンプル化するために新しい効率的な遠心バレル研磨法（機械研磨）を開発すると同時に、それと化学研磨や電解研磨を組合わせて水素吸蔵のない表面処理法を開発することに成功した [6]。この方法は、表面欠陥を除去するのに非常に有効な機械研磨と電解研磨あるいは化学研磨の組合せ方法で、しかも真空熱処理を省くことができる。図 3.32 は、我々が開発したシンプルな表面処理法による結果で水素病が起きないことを示している。水素を吸蔵した空洞は、それを 100 K 前後の温度に数時間さらすとニオブハイドライドの形成による超伝導特性の劣化のために、著しい Q 値の劣化を生じる。図 3.32 にはその現象は見られない。この表面処理法により処理コストは現状の $1/2.5$ に、処理時間は $1/20$ に短縮される。

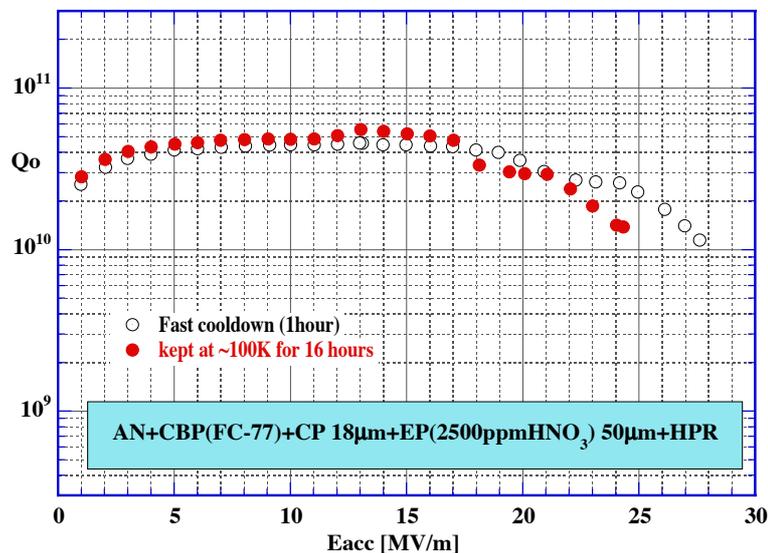


図 3.32: KEK で最近開発された水素病フリ - の表面処理法による空洞性能。この実験では、他の実験で何度も処理され、既に空洞に水素が吸蔵している可能性があるため、実験の最初にアニールしてニオブ空洞中の水素を脱ガスした。実際の空洞製作（新しい空洞）の場合、それを省くことができる。

3.2.1.5 最終組立法

上に述べたように空洞自体の性能は、本 ERL 計画の仕様を十分満足する域に到達しつつあるが、クライオモジュールへの組込み作業工程での表面汚染により、加速器の本来の性能が発揮できない事が考えられる。トリスタン超伝導空洞は実際にそれを経験した [7]。この問題について、Lバンド単セル空洞で研究した結果、図 3.33 に示すようにトリスタンでは縦精密性能試験の後、純窒素ガスを使って真空を破ってクライオモジュールの組立てを行ったことに問題があったと考えられる。実験結果から純窒素ガスの代わりにアルゴンを使えば空洞の性能劣化が起きないことが期待される。図 3.34 は、アルゴンガスに 10 日曝した結果で、むしろ曝す前よりも良い性能が得られた。他にもアルゴンガスに曝した場合の影響は色々な点から調べられたが、40 MV/m までの高電界性、 Q 値に対する悪影響がないことが分かった [8]。ただ、こうした試験を行う中でガスを導入する際に空洞内にゴミを入れないように注意深い操作が必要であるが、人の性格により性能劣化を起こしうることが分かった。作業者の教育の問題がある。

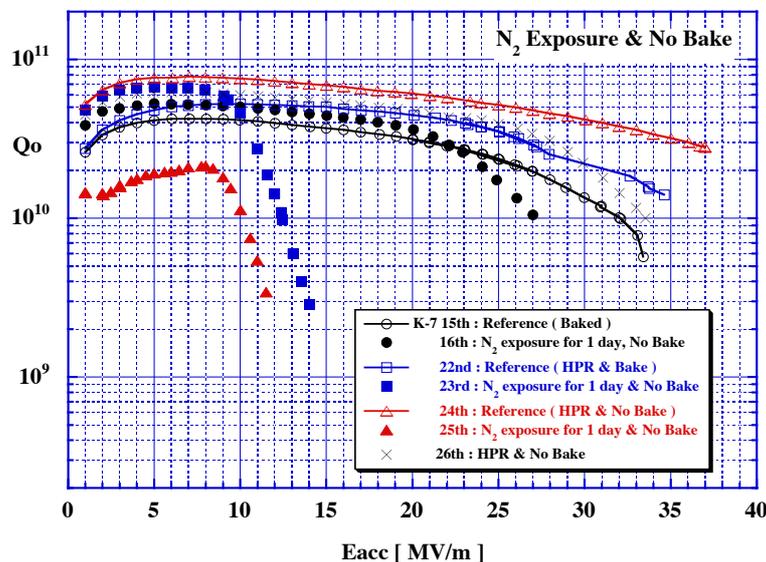


図 3.33: リファレンス性能とその性能測定後純窒素で空洞真空を破り、純窒素に曝した後再測定した空洞性能の比較。

3.2.1.6 製作コスト削減法の研究

超伝導空洞の製作コスト削減は大きな課題であり、本研究計画でも重要である。我々はその目的のために、薄肉ニオブパイプを厚肉銅パイプ内面に接合したニオブ/銅クラッド管を液圧成形して、空洞を一体成形する技術を開発している [8]。この方法は、

1. 従来の電子ビーム溶接がいないシームレス空洞であるためにコスト削減が可能であると同時に溶接欠陥がないので信頼性に優れる。
2. 高価なニオブ材の消費量を低減することで大きなコスト削減が可能になる。
3. 空洞自体は、ニオブバルク性を保っているため、上に述べた従来表面処理技術が適用でき、空洞の高性能が保証される等、

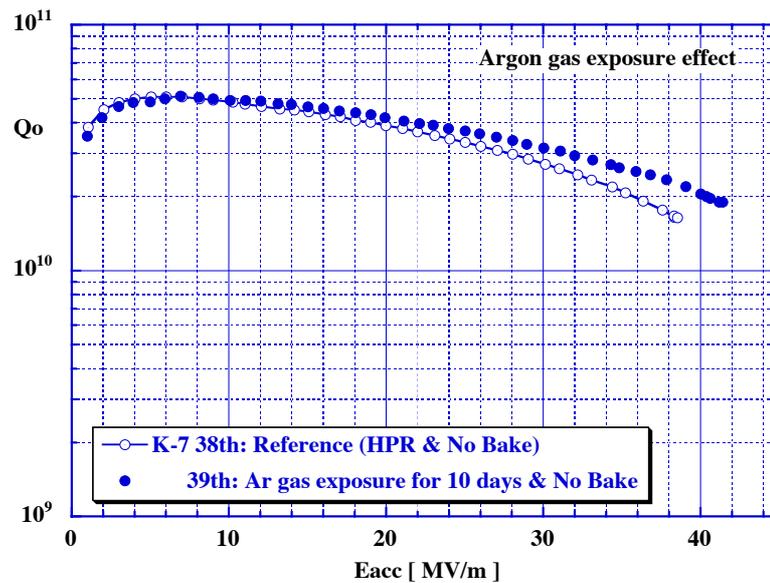


図 3.34: リファレンス性能とその性能測定後アルゴンガスで空洞真空を破り、アルゴンガスに 10 日間曝した後再測定した空洞性能の比較。

多くのメリットがある。KEK/DESY/INFN-LNL/JLAB との 4 研究機関による国際共同研究により、このニオブ・銅クラッドシームレス超伝導空洞で 30~40 MV/m の加速電界が達成され、この製作法の原理実証試験が完了している（図 3.36）。図 3.35 は、KEK で成形した 1300 MHz のニオブ / 銅クラッド・シームレス空洞である。我々の試算では、この方法により従来の製作コストを 1/3~1/2 までにコスト削減できる。この方法の多連化を開発すれば、本 ERL 計画でのコスト削減につながると期待される。

3.2.2 空洞の選択

さて、本 ERL 計画で採用する超伝導加速空洞の選択について議論する。ここでは、空洞の周波数、空洞冷却運転温度、加速方式について検討する。これらの検討は、

1. ビームダイナミクス上の観点、
2. 建設・運転コスト、
3. 超伝導空洞の技術開発、

の現状からなされなければならない。1)、2) については、TESLA で十分検討されている。ただ、TESLA と ERL ではパルス運転と連続 (CW) 運転の大きな違いがある。これは冷凍負荷に大きな影響をもたらす。

3.2.2.1 周波数の選択

高電界性から

ERL 主ラナックでは加速電界 10~20 MV/m での連続運転が想定されるので、高電界性と冷凍機容量が周波数の選択に決定的である。表面欠陥無しの理想的な場合でも、液体ヘリウムの冷却効率により超伝導空洞の高電界は、超伝導材特性による理論的制限より低い値に制限される。4.2 K



図 3.35: KEK で開発に成功した 1300 MHz のニオブ / 銅クラッド・シームレス単セル空洞。

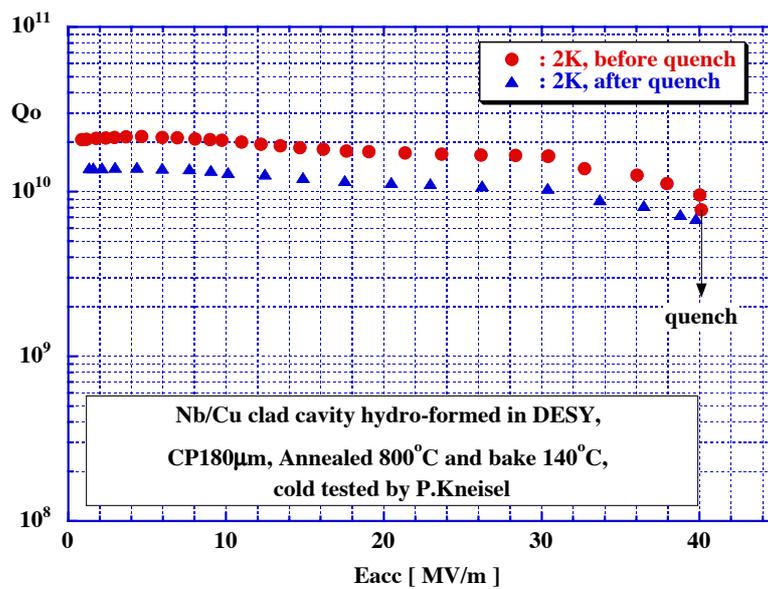


図 3.36: ニオブ / 銅クラッドシームレス空洞の性能 (Lバンド単セル空洞)。

運転では、臨界熱流束以上の発熱 (BCS 表面抵抗による発熱) は、空洞外表面にヘリウムの泡を発生 (核沸騰) させ、冷却効率が低下し空洞がクエンチする。この現象は、おおよそ 20 MV/m に電界を制限する。一方、液体ヘリウム温度を 2.17 K 以下に下げて超流動ヘリウム (He-II) にした場合、液体ヘリウムの熱伝導率が著しく改善されると同時に核沸騰現象がなくなる。そのために高電界性は著しく改善され、40 MV/m さえ可能となる。将来の 5 GeV へのエネルギー増強を重視するならば、He-II での運転は不可欠である。He-II では、生成効率は、He-I に比べて 3 倍悪くなるが、BCS 表面抵抗が一桁以上小さくなるので電力的にも有利である。また、高い周波数の選択が可能になり、このことは空洞製作コスト削減に繋がる。問題は、He-II は粘性が極めて小さいために極小さな穴でも容易にリーク (スーパーリーク) を起こす。そのようなリークは常温では検出できない。このスーパーリーク対策が重要である。

冷凍負荷から

超伝導空洞といえども、高電界での連続運転では大きな熱負荷を与える。超伝導空洞の表面抵抗 (R_s) は次の様に BCS 表面抵抗 (R_{BCS}) と残留表面抵抗 (R_{res}) の和で与えられる。

$$\begin{aligned} R_s &= R_{BCS} + R_{res} \\ &= A \cdot \frac{f^2}{T} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right) + R_{res} \end{aligned} \quad (3.29)$$

ここで、 f は高周波の周波数、 T は空洞の冷却温度、 $\Delta(2\Delta)$ はバンドギャップ、 k_B はボルツマン定数である。 R_{res} は表面状態、クライオスタット内の残留磁場 (H_{res}) 等により発生し、温度に因らない一定の値を持つ。 $H_{res} < 10$ mG 以下の場合、現状技術では $R_{res} \sim 5$ n Ω である。一方、 R_{BCS} は 500 MHz では 100 n Ω (4.3 K) であり、TRISTAN 5-セル空洞の場合、発熱量は 67 W/m (10 MV/m) であった。この場合、10 MV/m で 2.5 GeV 運転の場合、ダイナミックロスだけでも 16.8 kW (4.3 K) の冷凍機が必要になる。その必要電力は、300 倍の 5 MW である。一方、1300 MHz では 4.3 K では 240 W/m で問題外である。この場合、BCS 表面抵抗を小さくするために 2 K 程度の He-II での運転が有利である。この時発熱量は 10 W/m (10 MV/m @ $Q_0 = 1.0 \times 10^{10}$) あるいは、40 W/m (20 MV/m @ $Q_0 = 1.0 \times 10^{10}$) である。2 K 運転ではその冷凍効率は 4.3 K の場合の約 1/3 に低下するので、4.3 K 換算すると 10 MV/m 運転で 30 W/m 相当であり、250 台の超伝導空洞で 7.5 kW (4.3 k, 必要電力 2.3 MW) のダイナミックロスとなる。また、20 MV/m の運転では、その 4 倍の 30 kW (必要電力 9 MW) のダイナミックロスとなる。このように冷凍負荷の面からも He-II 運転が有利である。

コストから

現状技術では、超伝導空洞は高価なニオブ平板 (銀よりも高価) からプレス成型、トリム加工、電子ビーム溶接で製作される。ニオブ材の材料費は周波数に反比例する。また、電子ビーム溶接量は周波数に比例する。こうして空洞の製作コストは周波数に反比例する。一方、He-II 下での運転の場合、空洞の表面抵抗を考えると周波数の上限は S バンド程度である。S バンドではボア直径が 30 mm 程度と小さくなると同時にセル数が増え、HOM の問題が厳しい。また、クライオスタットのコストは周波数の二乗に逆比例するが、断面が小さくなると He-II への熱侵入が増え、得策とは言えない。クライオスタットのコスト面からも必ずしも S バンドが得策とは言えない。

空洞周波数

以上の検討から空洞の周波数は L バンドが適していると思われる。L バンド帯の中でも 1300 MHz

と 1500 MHz の選択の余地がある。しかし、TESLA の精力的な開発成果を有効に使うことを考えれば、1300 MHz の選択が懸命と言える。

3.2.2.2 Two-in-One か One-in-One か

1 台のクライオモジュールの中に二列の超伝導空洞を挿入する方法を Two-in-One と呼ぶ。また、従来通り 1 台のクライオモジュールの中に一列の超伝導空洞を挿入する方法を One-in-One と呼ぶ。Two-in-One 方式では、エネルギー回収ビームと加速ビームがそれぞれ別の加速管を通過するので、ビーム輸送系を独立にでき、ビームコントロール、RF コントロールが容易である。一方、回収された高周波を加速ビームに供給するための大電力結合器（最大 2 MW）の開発が必要である。また、必要空洞台数は One-in-One の 2 倍になる。二セットの空洞列を挿入するためにクライオスタットが大型になりコストがかさむ。Two-in-One はビーム運転の信頼性が高いと思われるが、建設コストが高くなる。

一方、One-in-One では、一つの軌道上を加速ビームと回収ビームのエネルギーの異なる二種類のビームが走るため、ビーム輸送系が複雑になる。特に、収束コイルの強さをリニアック入口側では次第に強く、出口側では次第に弱くする“へ”の字分布が想定されるが、これは加速ビーム電流の制限理由の一つとなる。その欠点を補うために超伝導空洞を使ったビーム収束法 (RFQ) が有効である [9]。これは、サブハーモニクス超伝導空洞を超伝導加速空洞列の片端に挿入する方式であり、新しく空洞を開発する必要がある。こうした空洞が開発できれば、One-in-One でもビーム輸送系の問題が大きく改善される [9]。結論としてはコスト面から考えて One-in-One を選択すべきであろう。One-in-One では、超伝導 RFQ 空洞等の新しいビーム収束の技術開発が大きな課題である。

3.2.3 リニアックの RF パラメーター

3.2.3.1 必要な電圧と RF 源

主リニアックはエネルギー回収型といえども高周波電力を供給する必要がある。ビーム入射前に加速空洞内に加速電圧をつくるための電力が必要であり、これは、その後の入射や蓄積時にも供給し続ける必要がある。次に、入射中は加速ビーム電流の方が回収ビーム電流よりも大きくなるため、その差によるビーム負荷を保証しなければならない。また、蓄積中に回収ビームがロスした場合もその差分を保証する必要がある。さらに加速空洞の共振周波数がずれたり、回収ビームの戻るタイミングが 180° からずれた場合は加速電圧が変動するので、この動きが速い場合には、供給電力を制御して加速電圧を補正する必要がある。

3.2.3.2 電圧をつくるための電力（加速管損失分）

TESLA 型の 1.3 GHz 9 セル超伝導加速空洞を例として、加速電圧をつくるのに必要な電力を考える。超伝導とはいえ空洞には高周波損失があり、それはヘリウム冷凍機への負荷となる。

加速空洞 1 台のシャントインピーダンス R_a は無負荷 Q 値: Q_0 を 10^{10} 、 (R/Q) を 1000 として、

$$R_a = \left(\frac{R}{Q} \right) \cdot Q_0 = 10^{13} \quad [\text{Ohm}] \quad (3.30)$$

加速空洞1台当たりの加速電圧を V_c 、加速空洞壁損失を P_c とすれば、シャントインピーダンスの定義から、

$$P_c = \frac{V_c^2}{R_a} \quad (3.31)$$

10 MV/m で 10 W、20 MV/m で 40 W となる。加速空洞の有効長が 1 m、総和を 250 m とすれば、10 MV/m の加速電場で 2.5 GeV とするには 2.5 kW (2 K)、20 MV/m で 5 GeV を作るには 10 kW (2 K) あればよいことになる。この 2.5 kW、10 kW が冷凍機への負荷となるが、Two-in-One 方式では2本の加速空洞に共にこの電圧をつくることになるため負荷は単純に2倍となる。つまり、Two-in-One 方式では One-in-One の2倍の冷凍能力が必要である。このことから One-in-One の方がコスト的に有利と言える。ちなみに KEKB で現在稼働中の超伝導加速空洞用冷凍機は 4.2 K で 8 kW の冷凍能力を持っている。

3.2.3.3 入射中のビーム負荷

加速器周長 L を 1253 m とすると、どの加速空洞にも回収ビームの到着は加速ビームに対し常に $T = L/c = 4.2 \mu\text{s}$ だけ遅れる。入射中は徐々に電流値を増加させるとして、途中のビーム損失がなければどの加速空洞にも加速ビームと $4.2 \mu\text{s}$ 前に通過した加速ビームが回収ビームとして逆位相で入射する。そこで入射レート α (A/s) が一定であれば、各加速空洞には αT の電流を加速するために必要な電力を供給しなければならない。仮に 100 mA まで 20 秒で入射すると、ビーム負荷は 21 nA となり、主リニアックに要する電力は 5 GeV の場合でも全体で 105 W にしかならず、加速空洞損失 (10 kW) に比べて十分に小さい。留意すべき点として、回収をしないモードでの最大加速電流はこの値に制限されることになる。回収なしで 1 mA を加速するためには、2.5 GeV なら空洞1台当りに必要な電力は 10 kW (10 MV/m)、5 GeV であれば 20 kW (20 MV/m) が必要となる。

3.2.3.4 ビーム損失

回収ビームの途中での損失は放射線の問題とともに、高周波供給電力にも直接影響する。最大電流が 100 mA のとき、損失を 10^{-3} とすれば 100 μA 、 10^{-4} としても 10 μA であり、加速器全体としての損失は 5 GeV ではそれぞれ 500 kW、50 kW となり、入射時の負荷よりもはるかに大きくなる。

3.2.3.5 加速空洞の共振周波数変動

超伝導空洞本体は 3 mm 程度のニオブ薄板で作られる。このためヘリウム槽の圧力変動や外的な振動などにより容易にその共振周波数が変動し、運転周波数からずれる。その結果、各加速空洞の加速電圧も変動する。そのため各加速空洞には周波数チューナーが取り付けられ、空洞を機械的に変形させることによって周波数を自動追尾する。その応答速度は 100 Hz 程度である。それ以上の速い変動に対しては入力電力を加減することで一定電圧を保つことになる。

ここで共振周波数がずれた場合でも加速電圧を一定に保つために必要な高周波電力を考える。超伝導空洞では入力結合器を含めた系全体の Q 値 (Q_L) が非常に大きい、これは共振の幅が狭いことを意味する。従ってわずかな周波数のずれでも空洞電圧は大きく減少し、それを補うためには余分な電力が必要となり、その量は Q_L に依存する。

超伝導空洞自体の壁損失は小さく、従って無負荷 Q 値 (Q_0) は非常に高い。ここでは 10^{10} を想定している。これに対して入力結合器の Q 値を Q_{ext} とすると Q_L は、

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta} \quad (3.32)$$

ここで β は結合定数であり、

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} \quad (3.33)$$

周波数のずれを δf とするとチューニングアングル ψ は、

$$\tan \psi = -2Q_L \frac{\delta f}{f} \quad (3.34)$$

であり、これらを用いると高周波源電力 P_g は式 3.36 で与えられる。

$$P_g = \frac{(1 + \beta)^2}{4\beta} \frac{1}{(R/Q)Q_0} (1 + \tan^2 \psi) V_c^2 \quad (3.35)$$

図 3.37 に加速電圧がそれぞれ 10 MV、20 MV の時の加速空洞 1 台あたりに必要な高周波電力を、 Q_0 を 10^{10} として幾つかの Q_L について示した。 Q_{ext} が高いと共振時の電力は小さいが、周波数がずれると必要な電力は急激に上昇することが判る。 Q_{ext} が 10^6 になると周波数のずれに伴う必要電力の変化は小さくなるが、共振時でも 10 MV なら 25 kW、20 MV のときは 100 kW が必要になる。これでは全体として 25 MW が必要となり、もはや ERL とは言いがたい。高周波電力を全体で 5 MW、加速空洞 1 台あたり 20 kW の電力が可能とすると、 Q_{ext} を 1×10^7 にしてもなお 1.3 GHz に対する周波数変動を 100 Hz 程度に押え込む必要がある。なお、ビームが励起する電圧については、加速ビームと回収ビームとが逆位相を保っている限り絶えず打ち消し合うため考慮する必要はない。両者の位相がずれた場合は次節で考える。

3.2.3.6 回収ビームの位相がずれたとき

回収ビームと加速ビームの位相が逆位相からずれると空洞内にはビームによる誘起電圧が発生し、高周波源がつくる加速電圧の振幅と位相を変える。これを打ち消すために、周波数チューナーは共振周波数をずらして位相を戻し、高周波源は出力を増して振幅を保証することになる。

実際の加速での入射位相 ϕ は 5° 程度となるが、ここでは on crest ($\phi = 0$) で入射する場合を考える。加速ビームが 1 本の加速空洞内につくる電圧 V_b^+ はビーム入射位相を基準とするとその逆位相となるため、

$$V_b^+ = V_{br} e^{-j\pi} \quad (3.36)$$

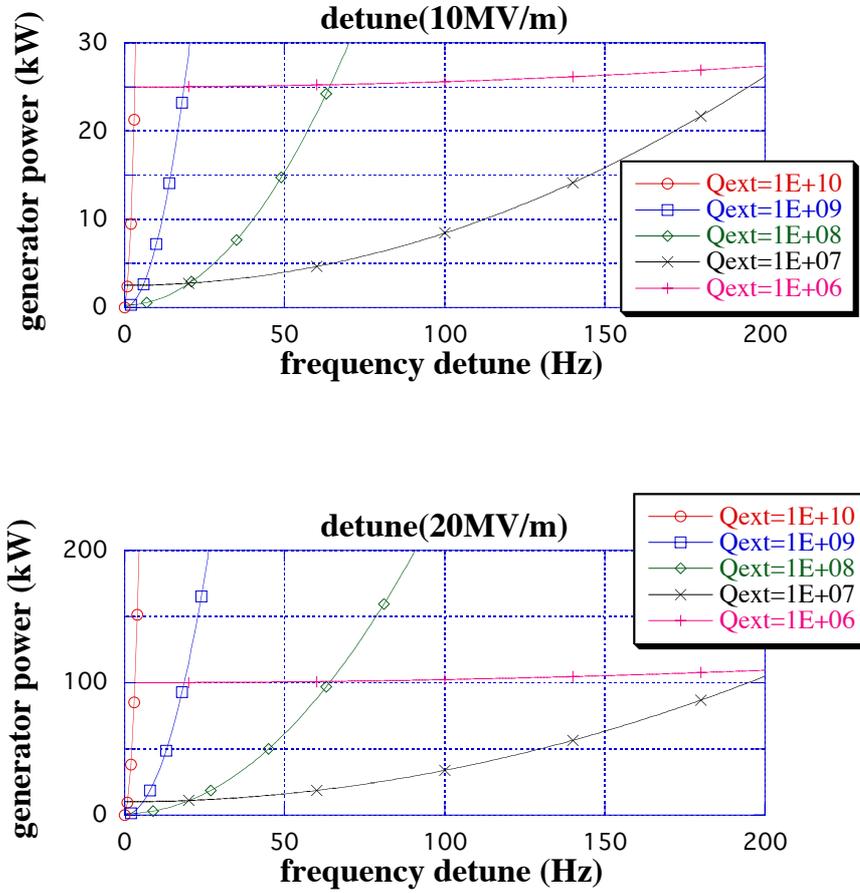


図 3.37: Q_{ext} を変えたときの必要電力 (上: 10 MV、下: 20 MV)。

である。一方、回収ビームがつくる電圧を V_b^- は、位相のずれを $\delta\phi$ として、

$$V_b^- = V_{br} e^{j\delta\phi} \quad (3.37)$$

となり、これらが空洞内で重なり合う。ここで V_{br} はビームが励起する最大電圧であり

$$V_{br} = I_0 \cdot \left(\frac{R}{Q} \right) \cdot Q_L \quad (3.38)$$

を用いると、100 mA では Q_L を 1×10^7 としても、加速ビームが作る 1 GV と回収ビームが作る 1 GV が相殺していることになる。このため少しの位相のずれでも加速電圧への影響は大きい。

回収ビーム位相が $\delta\phi$ だけずれると、加速空洞内には高周波源が作る電圧 $V_g = V_{gr}$ と合わせて、

$$V_g + V_b^+ + V_b^- = V_{gr} - V_{br} (1 - \cos \delta\phi) + jV_{br} \sin \delta\phi \quad (3.39)$$

の電圧が励起されていることになる。

ここで周波数離調 δf を考える。これによりビームが励起する電圧はそれぞれ、

$$V_b^+ = V_{br} \cos \psi e^{-j(\pi-\psi)} \quad (3.40)$$

$$V_b^- = V_{br} \cos \psi e^{j(\delta\phi+\psi)} \quad (3.41)$$

$$V_g = V_{gr} \cos \psi e^{j\psi} \quad (3.42)$$

ここで ψ はチューニングアングルであり、式 3.35 で与えられる。これらの重ね合わせから空洞内の電圧は、

$$Real = \cos \psi \{V_{gr} \cos \psi + V_{br} \cos(\psi - \pi) + V_{br} \cos(\psi + \delta\phi)\} \quad (3.43)$$

$$Imag = \cos \psi \{V_{gr} \sin \psi + V_{br} \sin(\psi - \pi) + V_{br} \sin(\psi + \delta\phi)\} \quad (3.44)$$

となり、必要な δf は $Real = V_c$ 、 $Imag = 0$ と置くことによって得られる。これらから回収ビーム位相のずれを相殺するために必要な周波数離調は、

$$\tan \theta = \frac{V_{br} \sin \delta\phi}{V_g - V_{br} (1 - \cos \delta\phi)} = -2Q_L \cdot \frac{\delta f}{f} \quad (3.45)$$

また、電圧 V_c を保つためには、

$$V_{gr} = \frac{V_c}{\cos^2 \psi} + V_{br} \left(1 - \frac{\cos(\psi + \delta\phi)}{\cos \psi}\right) \quad (3.46)$$

の高周波源電圧が必要であり、そのための投入電力 P_g は、

$$P_g = \frac{1 + \beta}{4\beta} \frac{V_{gr}^2}{(R/Q) \cdot Q_L} \quad (3.47)$$

で与えられる。

表 3.6 には Q_L を 1×10^7 としたときの空洞 1 台当たりの投入電力を、加速電圧が 10 MV と 20 MV について示した。電力の増加は、回収ビーム位相のずれが 1° 程度までは目立たないが、それ以上では増大する。ここで 1° は 1.3 GHz では 0.64 mm に相当する。

3.2.3.7 まとめ

超伝導空洞は無負荷 Q 値 (Q_0) が極めて大きく 1×10^{10} である。このため入射レートを小さくすれば、ビーム負荷のみからは空洞 1 台当たり 100 W 程度の入力電力で済むことになる。このとき入力結合器を含めた系全体の Q 値 (Q_L) も大きくなり、共振の幅が狭くなる。その結果、わず

表 3.6: 回収ビーム位相のずれと電力。

回収ビーム位相 $\delta\phi$ [deg.]	電力 [kW] @10 MV	電力 [kW] @20 MV
0°	2.5	10.0
0.1°	2.5	10.0
0.5°	2.5	10.1
1.0°	2.6	10.2
2.0°	2.8	10.6
5.0°	4.8	14.2

<備考> Q_L を 1×10^7 、電流は 100 mA とした。

かな周波数変化でも共振から大きく外れるため、加速電圧を一定に保つために必要な電力は急激に増大する。これが必要電力を決める第一の要因であり、電力と Q_L 値は周波数の安定度から決めなくてはならない。 Q_L を 1×10^7 とすると共振状態での必要電力は 2.5 kW(10 MV/m 運転時)、10 kW(20 MV/m) であるが、電力を 20 kW に制限すると、1.3 GHz に対する周波数の安定度は、20 MV/m で 170 Hz、20 MV/m であれば 50 Hz 以内に抑えることが必要である。コネル大学のレポート [10] では 25 Hz rms を仮定している。

また、これと同等な必要電力として、回収しないモードでの電流値を検討する必要がある。回収なしで 1 mA の平均電流を加速するためには、2.5 GeV なら空洞 1 台当りに必要な電力は 10 kW(10 MV/m)、5 GeV であれば 20 kW(20 MV/m) が上記に加わることになる。この電流値はシステム設計に大きく影響する。100~200 μA であれば影響は小さい。

3.2.4 超伝導高周波数加速空洞

3.2.4.1 空洞形状とそのパラメーター

本 ERL 計画に最適化した超伝導空洞の設計は、これから検討する予定である。本報告では TESLA 空洞をベースにする。TESLA 空洞の形状 [11] を図 3.38 に、その概観を図 3.39 に示す。また、空洞パラメーターを表 3.7 に示す。本 ERL では、連続運転であるのでローレンツデチューニングの影響はそれほど深刻ではない。TESLA 空洞の外面に電子ビーム溶接付けされている補強リングは製作コストを押さえる点からも不要であろう。

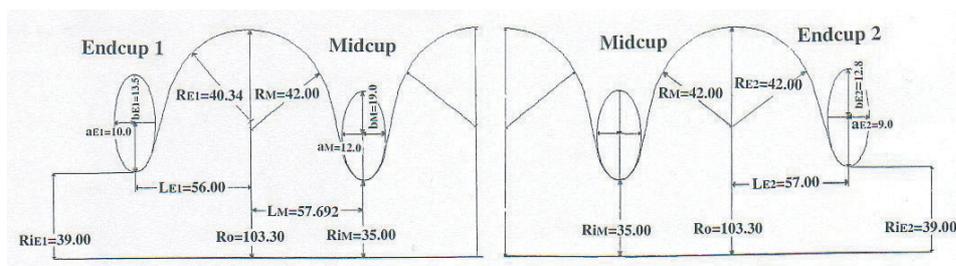


図 3.38: TESLA1300MHz 超伝導加速空洞形状の詳細。

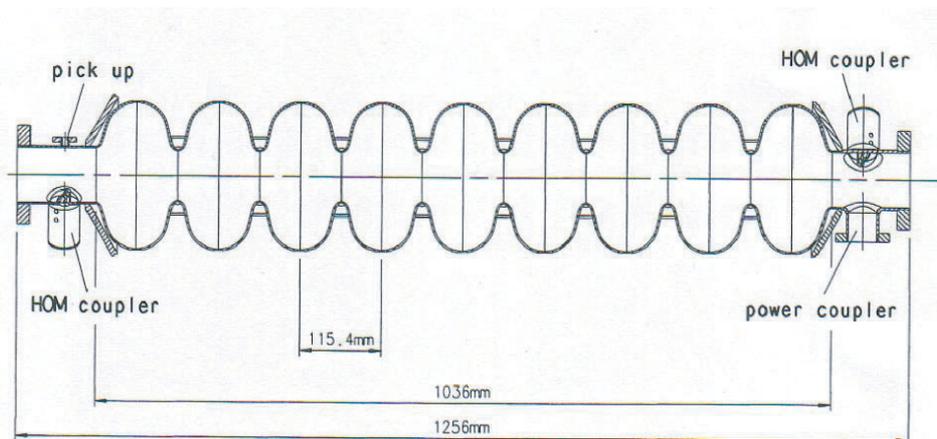


図 3.39: TESLA 空洞の概観形状。

3.2.4.2 高周波 (HOM)

本 ERL 計画では主リニアックの臨界電流を上げるために、超伝導空洞に誘起される高調波の Q_{ext} を 10^4 台に下げることが極めて重要である [9]。また、10 MHz 程度の周波数幅内で高調波の周波数が主リニアック全体でガウス分布となるように、高周波の周波数を各空洞で調整できるかが重要である [9]。今後の空洞設計では、これらの事が中心的な課題である。ここでは今後の参考のために、助長を恐れずに TESLA 空洞におけるダイポール、モノポールの高周波の周波数とその (R/Q) を文献 [12] から与える。

3.2.4.3 空洞製作技術

3.2.1 で示したように、超伝導空洞の製作技術はこの 10 年の研究により大きな進歩があった。しかし、その成果は、高電界性を除いて単セル空洞での結果である。本 ERL でその成果を十分に生かすためには、9-セル空洞での十分な実証が必要である。特に、ニオブ/銅クラッド・シムレス空洞はコスト、空洞の機械強度面（銅の肉厚を厚くすることで大きなコストアップなしに空洞の機械強度を上げられる）での魅力があり、9-セル化の開発が必要である。また、加速空洞以外にもビーム収束用 RFQ 超伝導空洞の開発、あるいはコンパクトな超伝導 Q マグネットの開発が重要である。

3.2.5 クライオモジュール

超伝導空洞の場合、常温部からビームパイプを通して液体ヘリウムへの熱侵入が起こる。それを減らすために、クライオスタットに挿入された空洞列の両側には断熱エリアが必要である。これはスペーシングファクターを減らす原因である。それを上げるためには、TESLA で設計されているような長いクライオスタット内に多数の空洞列を挿入する方式を採用しなければならない。この方式は、まだ日本では採用されたことがなく、幾つかの開発が必要となる。

3.2.5.1 クライオスタット

1 台のクライオスタット内により多くの空洞を挿入する方が、スペーシングファクターが上がる。しかし、1 台のクライオスタットに挿入する空洞の数は、クライオスタット真空槽に使う長

表 3.7: TESLA 空洞をベースにした ERL 空洞のパラメータ

Type of accelerating structure	Standing Wave
Accelerating mode	TM010, π -mode
Fundamental frequency	1300 MHz
Operation gradient	10-20 MV/m
Unloaded quality factor Q_0	1.5×10^{10}
Active length L	1.036 m
Cell-to-cell coupling k_{cc}	1.87%
Iris diameter	70 mm
(R/Q)	1036 Ω
E_p/E_{acc}	2.0
H_p/E_{acc}	42.6 Gauss/(MV/m)
Tuning range	± 315 kHz
$\Delta f/\Delta L$	315 kHz/mm
Q_{ext} of input coupler	1×10^7
Cavity bandwidth at $Q_{ext} = 1 \times 10^7$	130 Hz (FWHM)
Dynamical heat loss of the cavity at 10 MV/m	7.4W/cavity at 2K
at 20 MV/m	29.6W/cavity at 2K

尺パイプの規格や空洞への高周波電力分配方式、あるいは、加速器への搬入環境によって決まる。TESLA では、パイプの規格から 17 m が最大長と言われている。一方、電力分配方式として KEK では、従来 T 型デバイダーを使ってきた。その方法では空洞数は 2 の指数倍になることが望まれ、規格パイプのことを考慮して 8 台との結論になる。しかし、この方法では、導波管分布が複雑で必要スペースが大きくなる。我々は、それに代わる方法として DESY-TTF で採用されている方向性結合器による分配方式を提案する。

これは後の節 (図 3.42) に示すようにメイン導波管から方向性結合器で 20 kW のパワーを取り出す方式である。この方式では、クライオスタット 1 台当たりの空洞数は 10 台まで可能となる。

一方、多数の空洞を 1 台のクライオスタットに挿入する方式では、ヘリウム貯槽量を減らすために空洞にヘリウム槽を溶接したジャケット方式にする必要がある。そのベッセルの材質として TESLA ではニオブと溶接性、膨張率の相性の良いチタンを採用している。日本ではチタンは一般高圧ガス則で、特認材料である。従って、ステンレスを採用すべきであろう。ステンレスとニオブの溶接性は悪いが、我々はニオブとステンレスの間に銅を挟んだ HIP 接合法を既に開発しており、原研 600 MHz 超伝導空洞でそれを使った実績がある。図 3.40 に 10 台の空洞を配置したクライオスタットを示す。また、図 3.41 にその断面図を示す。10 台の空洞はヘリウム回収パイプに吊り下げられる。クライオモジュール長さ (両端のゲートバルブ端面間の距離) は 16 m である。25 台のクライオモジュールを並べるためには、それだけで 600 m の長さが必要である。現状の TTF 空洞形状では、それ以下にすることは困難であり、より短くするためにはスーパーストラクチャー [13] の開発を検討する必要がある。しかし、その場合でも全体で 16 m しか短くできない。

また、空洞が巨大なクライオポンプとなるために、超伝導空洞の運転の安定性を考えると常温部からのガス吸着を避けるべきである。すなわち、主リニアックでの常温部の部分を極力減らした

表 3.8: TESLA 空洞におけるダイポールモードの周波数と (R/Q)

Mode	Frequency [MHz]	(R/Q) [Ω/cm^2]	Q_{ext} by 2 welded HOM couplers on asymmetric cavity [1.0×10^3]
TE111 1	1622.2	0.01	193
2	1622.3	0.01	366
3	1629.8	0.14	48
4	1629.9	0.14	77
5	1642.2	0.03	25
6	1642.3	0.03	37
7	1659.1	0.75	42
8	1660.3	0.75	22
9	1681.2	0.04	11
10	1682.2	0.04	23
11	1707.7	10	4.8
12	1707.8	10	5.5
13	1734.0	15.4	3.4
14	1734.3	15.4	4.5
15	1762.1	2.23	2.7
16	1762.2	2.23	3.2
17	1786.5	1.4	2.1
18	1789.4	1.4	2.8
TM110 1	1799.9	0.71	5.2
2	1800.9	0.71	4.2
3	1835.7	0.45	19.8
4	1837.0	0.45	18.9
5	1852.7	0.33	27.7
6	1853.2	0.33	20.9
7	1865.3	6.47	50.6
8	1865.5	6.47	26.5
9	1874.4	8.75	50.2
10	1874.8	8.75	51.1
11	1880.8	1.83	95.1
12	1881.2	1.83	85.5
13	1885.2	0.1	18.1
14	1885.4	0.1	75.2
15	1887.4	0.18	633
16	1887.8	0.18	251
17	1889.1	0.01	1800
18	1889.4	0.01	1500

TE121	1	3075.7	0.11	171
	2	3076.0	0.11	229
	3	3076.5	0.01	408
	4	3076.7	0.01	121
	5	3077.5	0.02	569
	6	3077.6	0.02	79.5
	7	3079.0	0.14	248
	8	3079.1	0.14	35
	9	3081.9	0.92	94.3
	10	3082.1	0.92	44.5
	11	3087.4	1.27	43.7
	12	3087.7	1.27	75.9
	13	3097.0	0.16	33
	14	3097.2	0.16	102
	15	3113.3	0.02	16.8
	16	3113.5	0.02	98.9

表 3.9: TESLA 空洞におけるモノポールモードの周波数と (R/Q)

Mode	Frequency [MHz]	(R/Q) [Ω/cm^2]	Q_{ext} by 2 welded HOM couplers on asymmetric cavity [1.0×10^3]	
TM011	1	2379.6	0.00	350.0
	2	2384.4	0.17	72.4
	3	2392.3	0.65	49.5
	4	2402.0	0.65	84.0
	5	2414.4	2.05	32.0
	6	2427.1	2.93	29.1
	7	2438.7	6.93	20.4
	8	2448.4	67.04	27.4
	9	2454.1	79.50	58.6
TM012	1	3720.0	1.26	3.0
	2	3768.9	0.07	5.1
	3	3792.2	0.75	5.2
	4	3811.7	1.43	3.9
	5	3817.5	0.18	15.2
	6	3829.2	2.33	11.3
	7	3839.8	0.77	40.0
	8	3845.3	22.04	240.0
	9	3857.3	6.85	6.1

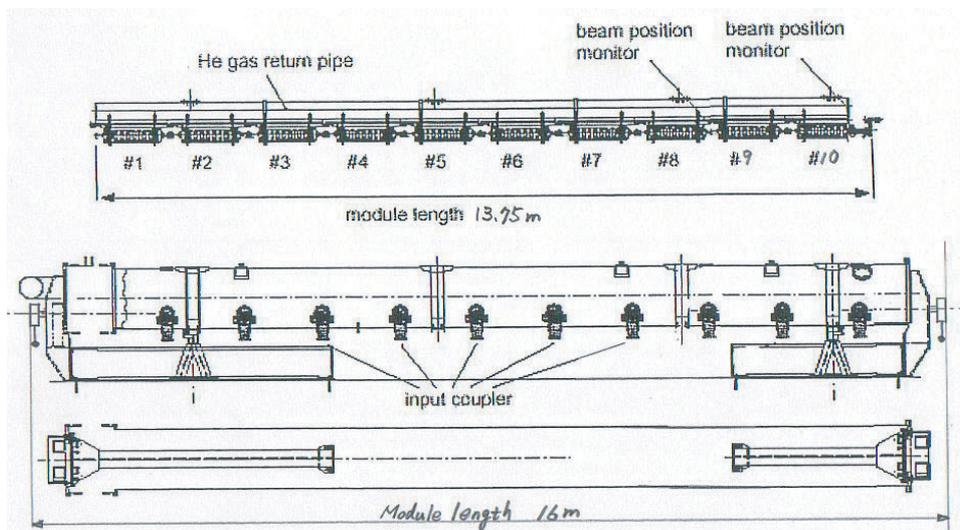


図 3.40: ERL 用クライオモジュール (TESLA からの修正バージョン)。

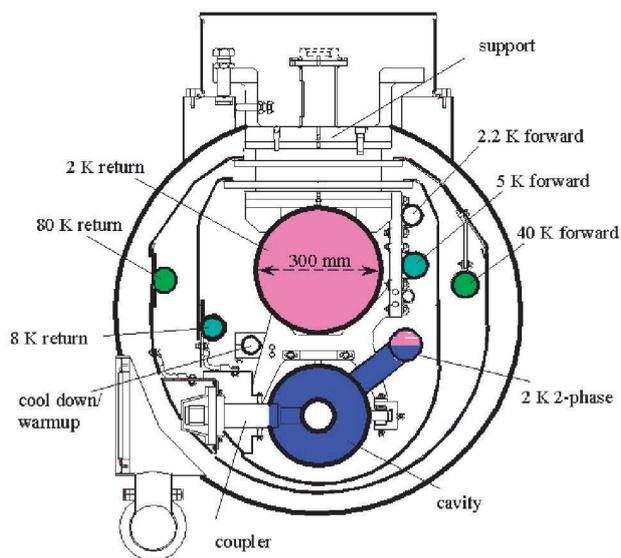


図 3.41: クライオモジュールの断面 (TESLA TDR より転載)。

方が良い。そのためには、常伝導収束マグネットの代わりに超伝導 RFQ、あるいは、超伝導 Q マグネットの検討をする必要がある。また、超伝導空洞の製作コスト削減とは裏腹に、クライオスタットのコスト削減の研究は不十分であり、今後、その方面の研究が急務である。

3.2.5.2 入力カップラー

本計画ではビーム強度は 100 mA である。加速電界 20 MV/m で運転する場合、エネルギー回収なしでは入力カップラーは 2 MW (CW) の大電力を供給しなければならない。本計画ではエネルギー回収の御利益で、入力カップラーのハンドリングパワーは、空洞のマイクロフォニクスによるデチューニングから発生する余分な電力、ビームロスによる非回収分、位相誤差による分全体で 15 kW 相当と推定される。20 kW 対応のカップラーが良い。一方、加速ビームがトリップして加速空洞にエネルギー - 回収ビームのみが残る場合、それが誘起した電力 (2 MW/cavity) が入力カップラーを通して外に出てくる。しかし、その時間は、ビームが加速器長を一周する時間 $4.2\mu\text{s}$ であり、エネルギーとしては 8.4 ジュールであり、20 kW カップラーが破壊されるようなことはない。入力カップラーに対しては、KEK はトリスタンや KEKB での大電力カップラーの実績があるので技術的問題はないが、コスト削減のための開発が必要であろう。

また、本計画ではパルスモードでの FEL 試験の可能性を考える必要がある。このとき、ビームローディングが大きく異なるので、その対応のために可動インプットカップラーの開発が必要と思われる。

3.2.5.3 HOM カップラー

既に述べたように、HOM の Q_{ext} を 1×10^{-4} 程度に下げることが必要である。そのためには TESLA タイプの HOM カップラーでは不十分であり、吸収体 HOM カップラーを超伝導空洞間に挿入しなければならない。また、ビームパイプ上に設置する HOM カップラー自体も新たに検討し、開発する必要がある。

3.2.5.4 周波数チューナー

超伝導空洞の運転では、外乱機械振動による空洞周波数の変化をキャンセルして空洞の周波数を一定に保つための周波数チューナーが必要である。KEK では、これまで 1 台のクライオスタットに 2 台の空洞が入るクライオモジュールを使って来たので、クライオスタット端板常温部にメカニカルチューナー、ピエゾチューナーを取付け、ビームパイプを介して空洞に変形を与えている。本計画では 1 台のクライオスタットに 10 台の空洞を挿入するので、空洞に直接変形を加える新しい周波数チューナーを開発する必要がある。DESY-TTF ですでにそのようなチューナーを実用化している。それらの技術を参考にしながら我々のクライオモジュールに適したチューナーを開発する必要がある。周波数チューナーは、 Q_L を 1×10^7 と想定するとバンド幅は 130 Hz であり、10 Hz 程度のコントロール精度が必要である。

3.2.6 RF システム

3.2.6.1 RF パワーの分配方式

クライストロンから超伝導空洞への高周波供給システムとして、空洞をコントロールする上で最も良いのは、1 空洞 1 クライストロン方式である。20 kW-CW クライストロン 250 台を配置して空洞 1 台毎に位相と電力を制御する。CEBAF ではこの方式を採用している。この方法の問題点は、高コストであろう。

次に 200 kW-CW クライストロン 1 台から 10 台の空洞、つまり 1 クライモジュールに電力を供給方式が考えられる。その方式を図 3.42 に示す。この場合、空洞の個々の位相調整はサーキュレーターと入力カップラーの間に設置した 3-スタブチューナー（図には示されていない）で行われるであろう。この方式では、25 台のクライストロンが必要である。

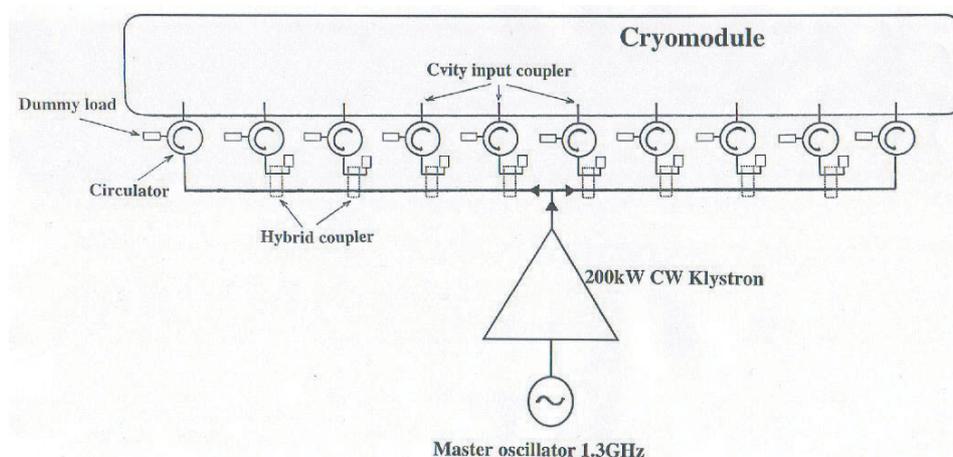


図 3.42: クライストロンから空洞への RF パワーの供給方式の一例。

クライストロンの数を劇的に減らす方法としては、CW-1 MW クライストロン 1 台で 50 台の超伝導空洞にパワーを供給する方式が考えられる。この方法では 5 台のクライストロンで済む。実際、TESLA では 36 台の空洞にパワーを供給する方式が取られている。しかし、こうした方法で ERL に必要な高精度の RF 制御が可能かどうかは疑問である。いずれにしても、RF パワーの分配方式は、低レベル RF 制御とも絡んでいるので、コストと同時に総合的判断が必要であり、検討課題である。

3.2.6.2 RF 低レベル制御

超伝導空洞の RF 低レベル制御は KEK ではトリスタン、KEKB と優れた経験・実績を持っている。また、図 3.43 に示すように、DESY-TTF では、KEK がトリスタンで開発した Vector-Sum 法とデジタルフィードバックを結合したコントロール法を開発している [14]。ERL は CW 運転をするので、TTF や TESLA のパルス運転と比べ、ローレンツデチューニングのコントロールは厳しくない。しかし、主リニアックを FEL 試験に使うことが本計画に中に含まれる場合、パルス運転の必要性も発生するであろう。RF 低レベル制御は、これらの計画全体に適した方法が検討されなければならない。

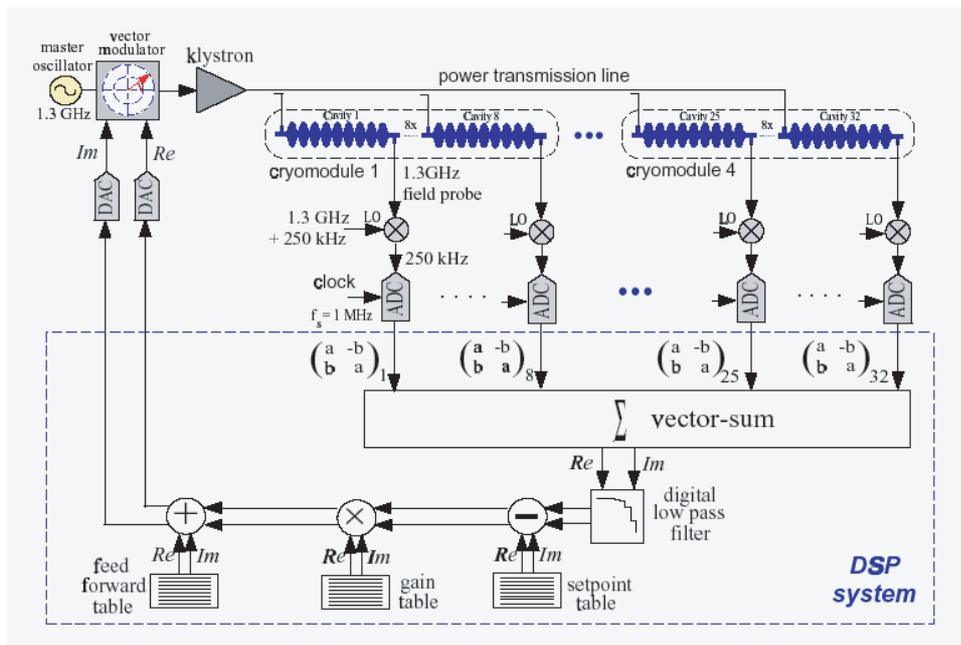


図 3.43: TESLA のデジタルフィードバック方式による RF 低レベル制御システム (TESLATDR からの転載)。

3.2.7 冷凍システム

TESLA 空洞とそのクライオモジュールを参考に 10 台の 1300 MHz 9-セル空洞を挿入するクライオモジュールについて、1 台当たりの熱負荷 (4.3 K 換算)、25 台のモジュールに対する冷凍機の必要容量を評価した。結果を表 3.10 に示す。表では常伝導 Q マグネットの代わりに超伝導 RFQ 空洞を入れた場合を含めた。これらの評価から本 ERL 計画では、2.5 GeV の第一期計画で、4.3 K 換算で約 10 kW の冷凍機 1 台が必要である。トリスタン超伝導空洞用の冷凍機は公称 6.3 kW、実際の最大能力は 8 kW である。また、CEBAF では 4.8 kW (2 K)、4.3 K 換算で 12 kW 相当の冷凍機が運転されており、既存技術で実現できる。一方、5 GeV の第二期計画では、加速電界が 2 倍になり、空洞の発熱量が 4 倍になる結果、10 kW 級の冷凍機をさらに 3 台追加する必要がある。

CEBAF の 4.8 kW (2 K) 冷凍機システムの構成を参考に、本 ERL 用の冷凍機概念図を図 3.44 に示す。冷凍システムの補足説明のために図 3.45 にシステムの温度 - 圧力特性を示す。図中の数字は、図 3.44 での場所に対応する。2K の超流動ヘリウムの生成法を簡単に説明すると以下ようになる。ガス貯槽から 20 気圧に圧縮されたヘリウムガスは、液体窒素で冷却された後、4 段の膨張タービンで自ら仕事を行い、内部エネルギーを消費して温度を下げる。例えば、場所 14 では 5.5 K (3 気圧) のヘリウムガスとなっている。そのガスはさらに液体ヘリウムとの熱交換により、場所 16 で超臨界ヘリウムとなり、クライオモジュール内に設置した JT バルブでジュールトムソン効果により 2 K の超流動液体ヘリウム (23 トール) になる。空洞負荷により蒸発したヘリウムガスは 5 段の低温圧縮機により 23 トールから 25 K (1 気圧) に戻され、さらに行きのヘリウムガスと熱交換しながら最終的に常温になり、貯槽に戻る。

日本では、KEK の 4.3 K-6.3 kW ヘリウム冷凍機など 4.3 K のヘリウム冷凍機には、多くの実績と多年に渡る運転経験がある。しかし、超流動ヘリウムの大型冷凍機システムの実績が皆無である。既に実績のある JLAB、DESY、CERN などの研究所との情報交換や共同研究により、信頼性ある冷凍システムを検討する必要がある。概して、冷凍機は高価である。CERN では、これまで

表 3.10: 本 ERL 計画に必要な冷凍機の容量評価

	Phase-I 2.5 GeV	Phase-II 5 GeV
Gradient	10 MV/m	20 MV/m
Dynamical loss/10 cavity	7.4 W $\times 10 = 74$ W at 2 K, $Q_0 = 1.5 \times 10^{10}$ 、 74 $\times 3 = 222$ W (4.3K 換算)	29.6 $\times 10 = 296$ W at 2 K, $Q_0 = 1.50 \times 10^{10}$ 、 296 $\times 3 = 888$ W (4.3K 換算)
RF-Q cavity loss/module	10 W at 2 K 30 W (4.3K 換算)	40 W at 2 K 120W (4.3K 換算)
Safety factor for Q-value	1.3	1.5
Heat leaks at 2 K shield/module	18 W (4.3 K 換算)	18 W (4.3K 換算)
Heat leaks at 4.5 K shield/module	20 W	20 W
Heat leaks at 80 K shield/module	180W $\times 1/18 = 10$ W/module (4.3K 換算)	180W $\times 1/18 = 10$ W/module (4.3K 換算)
Total heat load/module (No RFQ)	222 $\times 1.3 + 18 + 20 + 10 = 336.6$ W (4.3K 換算)	888 $\times 1.5 + 18 + 20 + 10 = 1380$ W (4.3K 換算)
Total heat load/module (with RFQ)	(222+30) $\times 1.3 + 18 + 20 + 10$ =375.6 W	(888+120) $\times 1.5 + 18 + 20 + 10$ =1560 W
Transfer loss 1km	0.5 $\times 1000 = 500$ W (4.5K 換算)	
冷凍パワー (25 modules) (No RFQ)	0.3366 $\times 25 + 0.5 = 8.915$ kW (4.3K 換算)	1.38 $\times 25 + 0.5 = 35$ kW (4.3K 換算)
冷凍パワー (25 modules) (With RFQ)	0.3756 $\times 25 + 0.5 = 9.98$ kW (4.3K 換算)	1.56 $\times 25 + 0.5 = 39.5$ kW (4.3K 換算)

の冷凍機プラントの購入の経験から、4.5 K 換算での冷凍能力とコストの関係式を与えている [2]。

$$\text{Cost[MCHF]} = 2.2[\text{MCHF}] \cdot (\text{cooling capacity[kW]})^{0.6}$$

ここで MCHF は 100 万スイスフランである。10 kW 冷凍プラントの値段は、現在の交換レートで約 20 億円と見積もられる。第二期計画では、冷凍機の増強のみであるので冷凍機をどうコストダウンできるかが重要である。

3.2.8 インフラストラクチャ

3.2.8.1 表面処理設備の老朽化対策

超伝導空洞の開発で、今後、特に問題になるのは、既存表面設備の老朽化である。トリスタン以後 17 年使用しており、著しい酸腐食が進行している。また、現状では外注作業であり、高電界と高い Q 値を高信頼度で確保するための一貫した処理が困難である。早期に KEK 内に表面処理、空洞組立、性能評価が一貫して行える設備の建設が必要である。また、超伝導空洞技術を担う若い研究者の育成が急務である。

3.2.8.2 空洞組立用大型クリーンルーム・横性能試験設備

表面処理設備以外にもクラオモジュールへの空洞組立用大型クリーンルーム設備、空洞がクライオモジュールに組込まれた後にその性能を確認するための横型性能試験設備が必要である。この横型試験では、2 k-350 W 冷凍機を直結し、さらには 300 kW クライストロンが必要である。

齋藤健治、古屋貴章 (KEK・加速器)

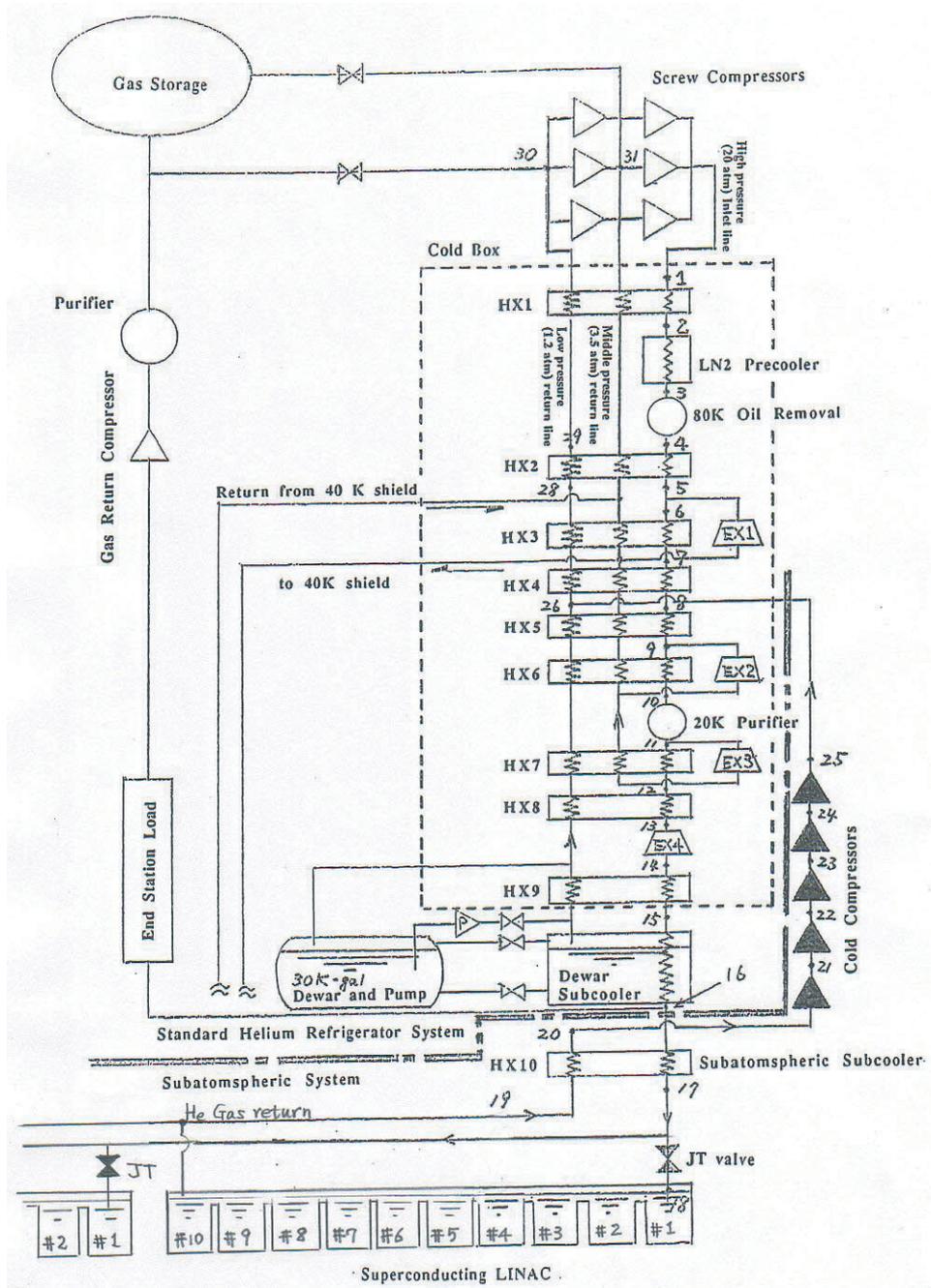


図 3.44: CEBAF4.8 K (2 K) 冷凍器を参考にした場合の ERL 冷凍システム。

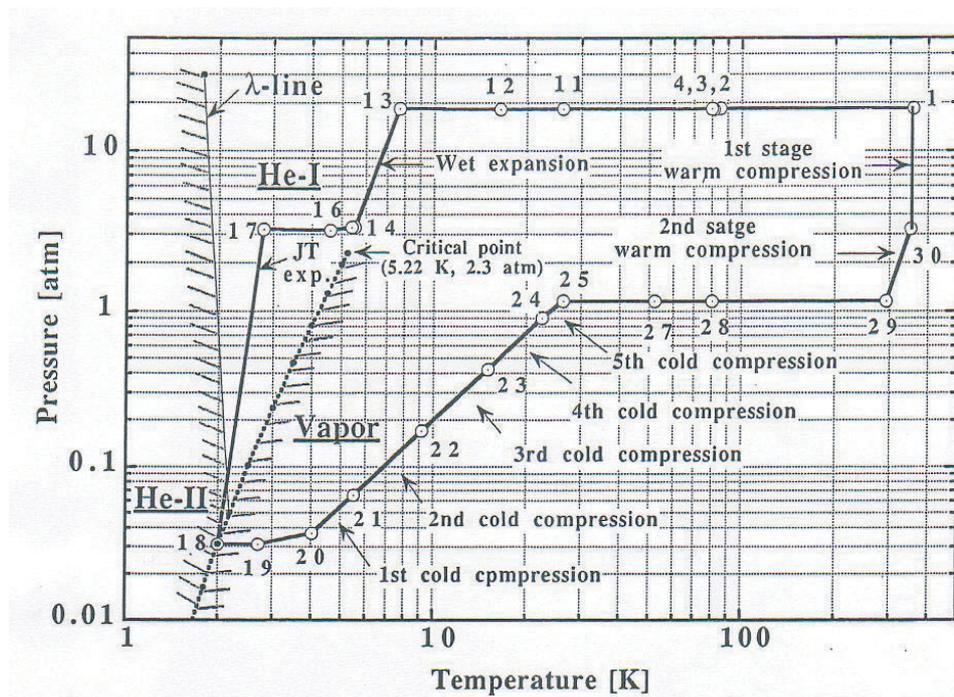


図 3.45: 冷凍システムでの温度 - 圧力特性。

参考文献

- [1] G.R. Niel *et al.*, "Sustained Kilowatt Lasing in a Free-Electron Laser with Same-Cell Energy Recovery", *Phys. Rev. Lett.* 84(4) 662.
- [2] in TESLA TDR, March 2001.
- [3] K. Saito *et al.*, "Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients", *Proc of the 8th Workshop on RF Superconductivity*, Abano Terme, Italy, Oct. 6-10, 1997, pp.795-813.
- [4] G. Muller, "Superconducting Niobium in High RF Magnetic Fields", *Proc. of the 3rd Workshop on Superconductivity*, Argonne, Chicago, September 1987.
- [5] K. Saito, "Techniques of SC Cavity Preparation for High Gradient", *Proc. of the XXI International LINAC Conference*, Gyeongju, Korea, August 19-23, 2002, <http://linac2002.postech.ac.kr>.
- [6] T. Higuchi and K. Saito, "Hydrogen Absorption in Electropolishing of Niobium", *Hydrogen Workshop*, Newport News, Virginia, USA, Nov. 11-13, 2002 to be published.
- [7] K. Saito, "Basic Study for Degradation Free Final Horizontal Cavity Assembly with High Gradient Niobium SC Cavities", *Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity*, Sep. 6-11, 2001, Tsukuba, Japan, <http://conference.kek.jp/SRF2001>.
- [8] T. Fujino, "ニオブ・銅クラッドシムレス超伝導高周波加速空洞の研究", 博士論文 (2003), to be published.
- [9] 第 4.1.2 節参照.

- [10] Sol M. Gruner and Maury Tigner eds., Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac (ERL) Synchrotron Light Source at Cornell University, Cornell University Ithaca, NY 14853-2501, July 4 2001.
- [11] D. Proch, "The TESLA Cavity: Design Considerations and RF properties", Proc. of the 6th Workshop on RF Superconductivity, Newport News, Virginia, USA, Oct. 4-8, 1993, pp.382-397.
- [12] J. Sekutowicz, "Higher Order Mode Coupler for TESLA", Proc. of the 6th Workshop on RF Superconductivity, Newport News, Virginia, USA, Oct. 4-8, 1993, pp.426-439.
- [13] J. Sekutowicz *et al.*, "Superconducting Sutructure for the TESLA Collider: A concept", Phys. Rev. ST Accelerators and Beams 2:2062001, 1999.
- [14] S.N. Simrock et al., in TESLA TDR.