

## 第1章 超伝導加速器の概要

超伝導加速空洞を用いた加速器として、 $\beta$  (粒子の速度と光速の比) $=1$  の電子加速器及び  $\beta \ll 1$  の重イオン加速器については既に実用化されているが、中間  $\beta$  領域の陽子加速器については、本計画や米国 SNS 計画において世界初の実用化を目指して精力的に R&D が進められている。

大強度陽子加速器計画のリニアックでは 400MeV まで 50Hz の繰返しで常伝導加速器により加速された後、スイッチングマグネットにより 25Hz 分は 3GeV シンクロトロンに入射され、25Hz 分は超伝導加速器に入射される。超伝導加速部では 600MeV まで陽子ビーム加速し、ADS (Accelerator Driven System) 開発施設でターゲットの開発や炉物理実験等に用いられる。表 1-1 に超伝導加速器の仕様をまとめる。

超伝導加速器の技術的課題としては、(1) 超伝導加速空洞の特徴を生かして、高加速電界・短加速器長を実現すること、(2) パルス運転時に、安定な加速電界を実現することが挙げられる。

表 1-1 超伝導加速器仕様

入射エネルギー	400MeV
出射エネルギー	600MeV
周波数	972MHz
繰返し	25Hz
ビームパルス幅	500 $\mu$ s
ピーク電流	50mA
中間パルスデューティ	54%

## 第2章 超伝導空洞

超伝導加速部(400~600MeV)では、粒子の  $\beta$  は 0.713 から 0.792 まで増加し、クライオモジュールごとに空洞の形状を変化させること

を計画している。空洞の設計を進める上では、高周波特性、機械的特性について評価する必要がある。ここでは、超伝導空洞設計の代表例として、 $\beta=0.725$  の空洞について示す。

### 2. 1 ハーフセル形状の評価[1,2]

図 2-1 にハーフセル形状の模式図を示す。直線部傾斜角度  $\theta$  ( $=75, 80, 85^\circ$ ) 及びボア半径  $R_b$  ( $=40, 45, 50, 55\text{mm}$ ) を変化させた場合の加速モード高周波特性、高次モード高周波特性、機械的特性について検討を行った。

#### (1) 加速モード特性

空洞形状を変化させた場合の最大表面電界と加速電界の比 ( $E_{sp}/E_{acc}$ )、最大表面磁界と加速電界の比 ( $H_{sp}/E_{acc}$ )、シャントインピーダンスと  $Q$  値との比 ( $R/Q$ )、セル間結合係数を図 2-2 に示す。 $\theta=75^\circ$  では、 $H_{sp}/E_{acc}$  が高く、 $R/Q$  が低いので、他と比較して利点がない。また、 $E_{sp}/E_{acc} < 3$ 、 $H_{sp}/E_{acc} < 55 \text{ Oe}/(\text{MV}/\text{m})$  とするためには、 $R_b \leq 45\text{mm}$  となり、セル間結合係数  $> 2.5\%$  を実現するためには、 $R_b \geq 43\text{mm}$  となることがわかる。

#### (2) 高次モード高周波特性

通過するビームによって空洞の高次モードが励振されるが、超伝導空洞の場合には  $Q$  値が高いために高次モードのエネルギーを HOM カプラによって外部に取り出す必要がある。HOM カプラはビームパイプ部に取り付けられるために、中央セル部にエネルギーが集中するトラップモードでは HOM カプラとの結合が十分に得られない。し

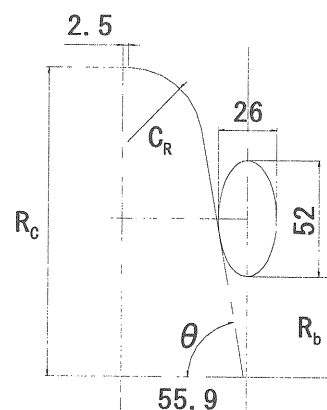


図 2-1 ハーフセル形状  
模式図

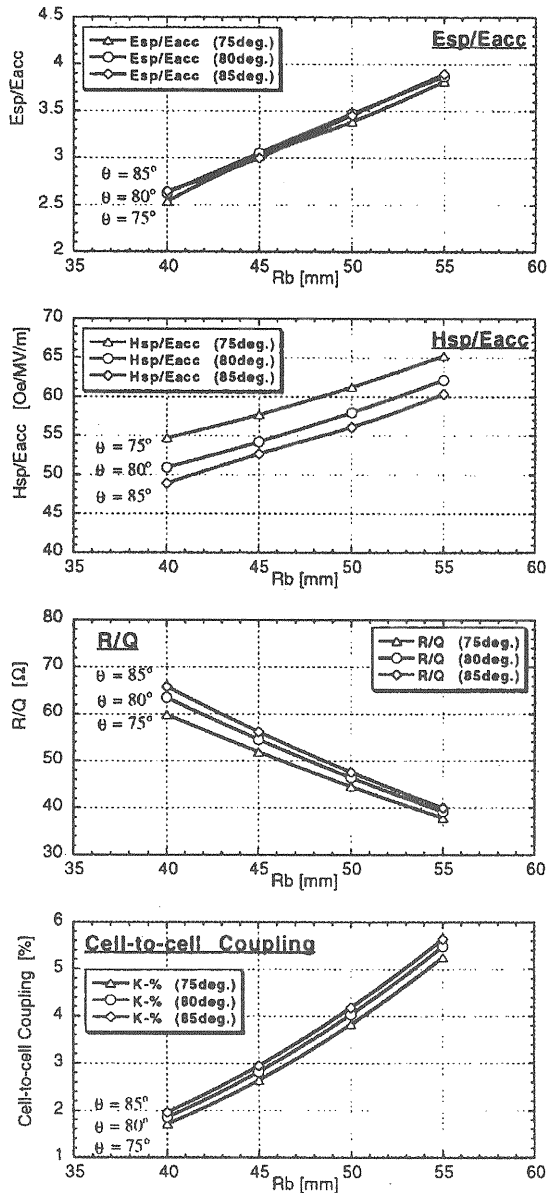


図 2-2 加速モード高周波特性  
 たがって、このようなモードが生じないような空洞形状としなければならない。トラップモードは高次モードの混成によりパスバンドが狭くなることにより生じる。図 2-3 に、 $\theta = 80^\circ$  で  $R_b$  を変化させた場合のモノポール及びダイポール高次モードの 0 及び  $\pi$  モード周波数とパスバンド(斜線部)を示す。図に示されるように、ダイポールモードでのモード混成を防ぐためには、 $R_b \leq 45\text{mm}$  となる。

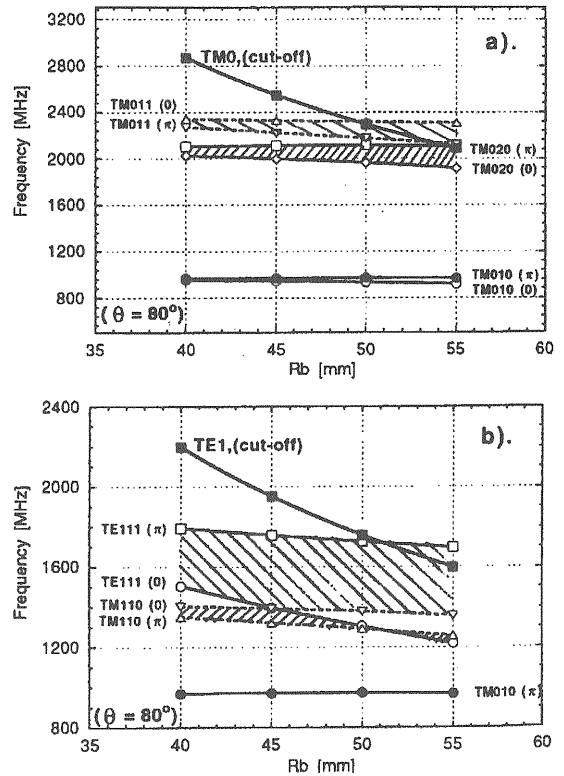


図 2-3 高次モード高周波パスバンド特性  
 a) モノポールモード, b) ダイポールモード

### (3) 機械的特性

空洞形状を変化させた場合の真空荷重に対する最大ミーゼス応力およびローレンツデチューニング定数( $-\Delta f/Eacc^2$ )を図 2-4 に示す。空洞肉厚は 3mm で、真空荷重の評価は拘束条件なしで行っている。

図に示されるように、機械的特性については  $R_b$  に対する依存性はさほど大きくなく、むしろ  $\theta$  に対する依存性が顕著である。真空荷重に対する応力の観点では  $\theta$  が小さいほど有利であるが、ローレンツデチューニングの観点では  $\theta$  が大きいほうがよい。両者のトレードオフから  $\theta = 80^\circ$  が適しているといえる。

真空荷重に対する最大ミーゼス応力とローレンツデチューニング定数及びチューニング荷重の空洞肉厚依存性を図 2-5 に示す。ここで、空洞形状は  $\theta = 80^\circ$ 、 $R_b = 45\text{mm}$  である。最大ミーゼス応力とローレンツデチューニング定数については、ほぼ肉厚の 2 乗に反比例

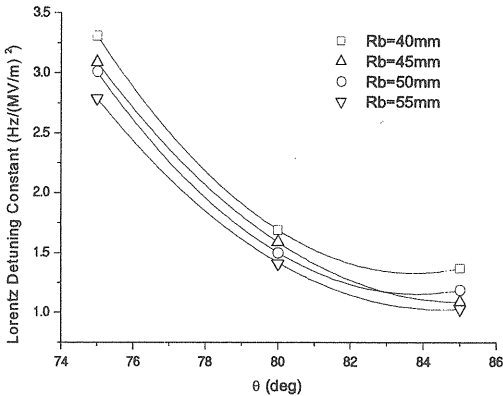
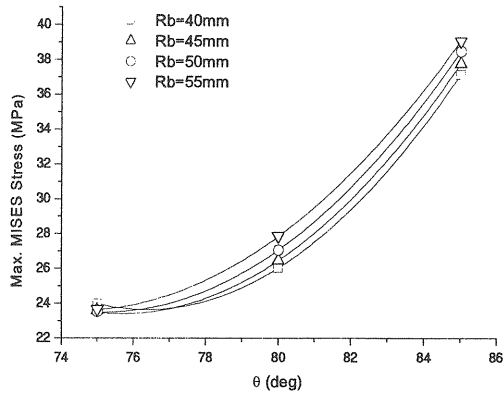


図 2-4 機械的特性の形状依存性

する。ニオブ材の 0.2%耐力を 45MPa 程度とすると、肉厚 2mm 以上で最大ミーゼス応力は耐力以下を満足する。しかしながら、ローレンツデチューニングの観点から、空洞の加速電界強度との兼ね合いで肉厚を評価する必要がある。また、チューニング荷重は肉厚とともに増加し、 $t=3\text{mm}$  のときに 1MHz 周波数変化させるのに必要な荷重は約 3000N となる。

以上、加速モード、高次モード高周波特性と機械的特性について空洞形状を最適化した結果、 $R_b=45\text{mm}$ 、 $\theta=80^\circ$  とした。この時の  $R_C$  及び  $C_R$  はそれぞれ 138.2、33.1mm であった。また、肉厚に関しては、 $E_{sp}$  を 30MV/m まで上げることを想定して 4mm 程度で計画している。

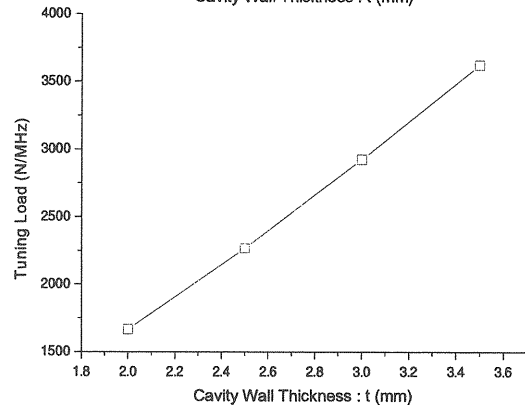
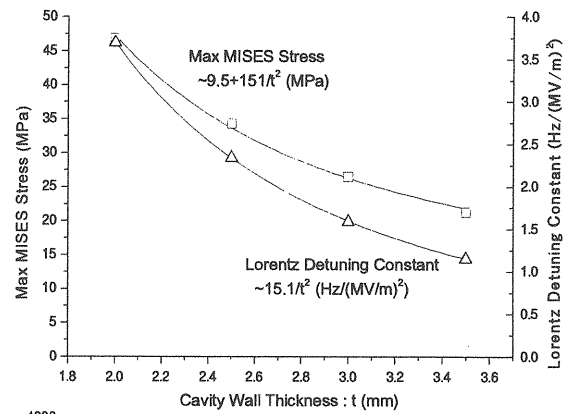


図 2-5 機械的特性の肉厚依存性

## 2. 2 マルチセル空洞[3]

前項で示したハーフセル形状の検討をベースに、マルチセル空洞の設計を進めた。マルチセル空洞においては、エンドセル部の RF 境界条件が他のセルと異なるので、共振周波数の調整及び加速電界を平坦化するために、エンドセル部の調整が必要となる。また、RF 入力カプラはビームパイプ部に取り付けられるために、空洞とカプラの結合も考慮する必要がある。ここでは、 $\beta=0.725$ 、7 セル空洞の検討結果について示す。

### (1) 加速モード特性

RF 入力カプラの結合を強くするために、カプラ側エンドセルのボア半径を 60mm とした(センターセルは 45mm)。反対側のエンドセルは、赤道直線部の長さのみを調整して軸上加速電界がフラットになるようにした(センターセルで 2.5mm に対して、エンドセル

0.75mm：図7参照)。したがって、空洞は非対称の形状となる。図2-6に、センターセルとカプラ側エンドセルの形状を比較して示す。図2-7に、7セル空洞形状をMAFIAによる電界計算結果とともに示す。MAFIAによる加速モードの空洞特性パラメータを表2-1に示す。

表2-1 加速モード高周波パラメータ

Esp/Eacc	3.09
Hsp/Eacc	56.1 Oe/(MV/m)
R/Q	376.4 Ω
Geometrical Factor	196.8 Ω
Cell to Cell Coupling	2.73 %
Field Flatness	97.9 %

(2) 高次モード特性

MAFIAによって得られたモノポール及びダイポール高次モードの周波数とR/Q、Rt/Qを図2-8、9に示す。ダイポールモードのRt/Q値は、ビーム軸から20mmの位置で計算した。カプラ側(R側)ビームパイプ半径60mmの遮断周波数以下となるモードは、TM110のみであり、その他のモードは伝播可能である。図に示されるように、モノポールモードでR/Q値が高いものはTM011、ダイポールモードでRt/Q値が高いものは

TM110モードである。

HOMカプラを空洞両側のビームパイプにそれぞれ1個ずつ設置することを仮定して、高次モードの $Q_{ext}$ を以下の式により算出した。

$$Q_{ext,n} = \frac{\omega_n U_n}{P_n} = \frac{2U_n}{\omega_n \epsilon_0^2 S^2 E_n^2 R}$$

ここで、 $\omega_n$ 、 $U_n$ 、 $P_n$ 、 $E_n$ はn番目のモードの角周波数、蓄積エネルギー、HOMカプラより取り出されるパワー、HOMカプラ先端での電場強度であり、 $\epsilon_0$ 、 $S$ 、 $R$ は真空中の誘電率、カプラ先端断面積、高周波電力終端部の抵抗負荷である。評価の結果、R/Q、Rt/Q値が大きなモードの $Q_{ext}$ 値は $10^4$ 程度で、最大でも $2 \times 10^5$ 程度であり、HOMカプラとの十分な結合が得られることが確認された。中央セル部に電界が集中するモード及び端セル部に電界が集中するモードの例を図2-10、11に示すが、空洞の両端にHOMカプラを設置することにより $Q_{ext}$ を十分下げることが可能となった。

超伝導加速部システム設計の最適化により、空洞セル数が7セルから9セルに変更となっ

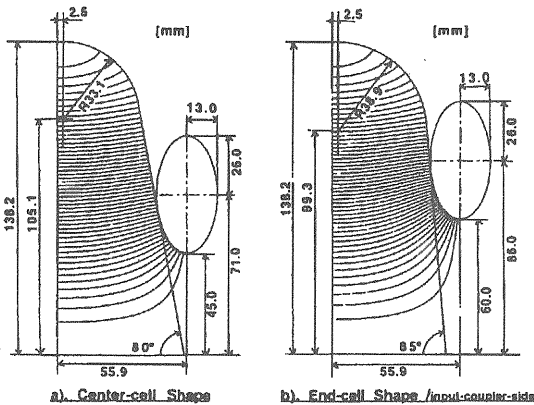


図2-6 センターセル形状とRF入力カプラ側エンドセル形状

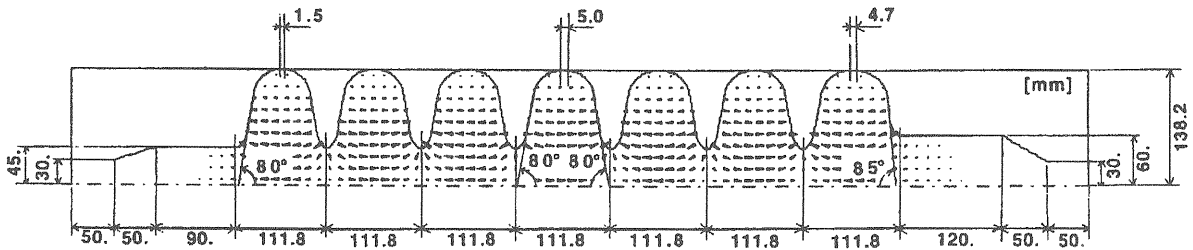


図2-7  $\beta=0.725$ 、7セル空洞とMAFIAによる電界計算結果

た。それに伴って、7セル空洞の設計をベースに9セル空洞の設計を進めている。

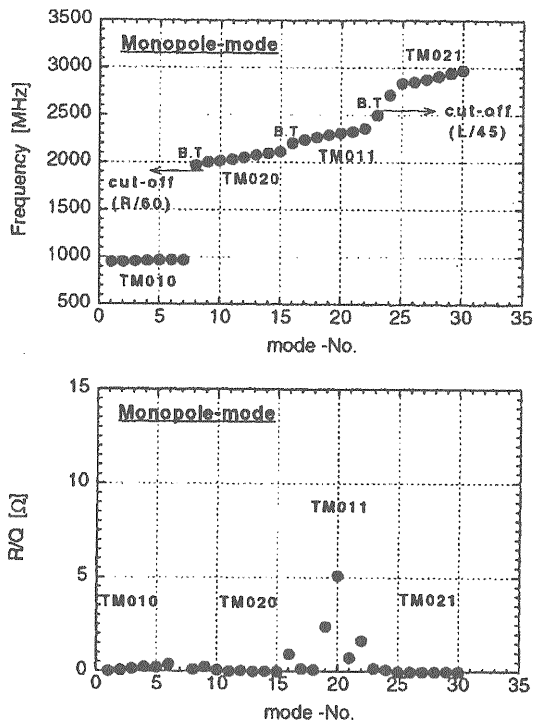


図2-8モノポールモード周波数とR/Q値

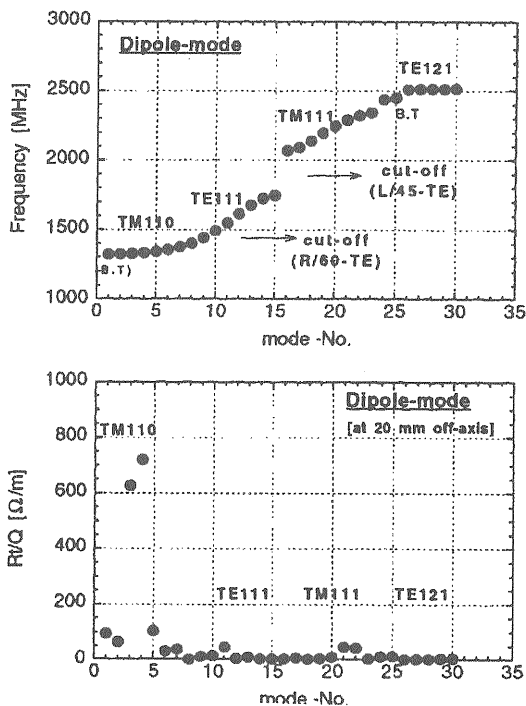


図2-9ダイポールモード周波数とR/Q値

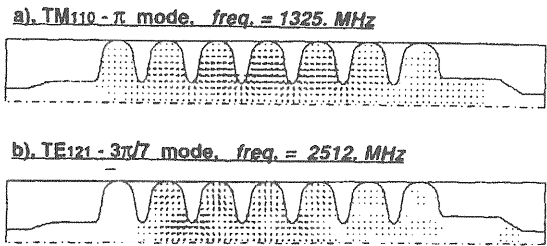


図2-10中心セルに電界が集中するモード

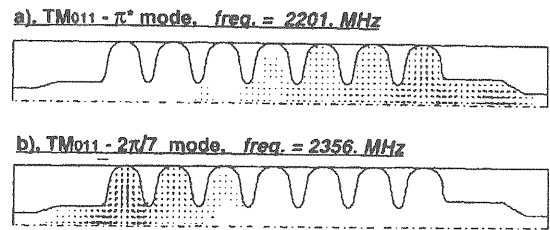


図2-11端セル部に電場が集中するモード

### 第3章 ローレンツデチューニング[4]

超伝導空洞は内部の電磁界が強く、空洞が薄肉構造となっているために、自分自身の電磁力によって空洞が変形し、それに伴って周波数が変化する。これをローレンツデチューニングと呼ぶ。ローレンツ圧力Pは次式により与えられる[5]。

$$P = \frac{1}{4} [\mu_0 H^2 - \epsilon_0 E^2]$$

ここで、 $\mu_0$ は真空中の透磁率、H、Eはそれぞれ空洞内表面における磁界、電界の強さであり、磁界は空洞を膨らませる方向に、電界は空洞を潰す方向に圧力がかかる。ローレン

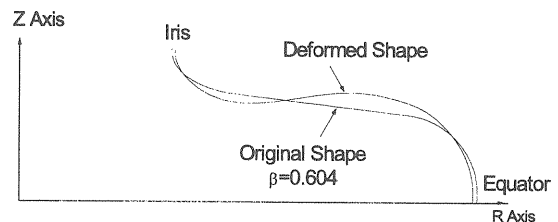


図3-1半セル体系でのローレンツ力による空洞変形

ツ圧力が空洞の電磁界の 2 乗に比例するので、変位量、すなわちデチューン量も電磁界の 2 乗に比例する。その際の比例定数が 2.1 (3)項で示したローレンツデチューニング定数である。(  $\Delta f = -k \cdot E_{acc}^2$ ,  $k$ : Lorentz Detuning Constant)

図 3-1 に半セル体系でのローレンツ力による空洞の変形を示す。赤道部付近では、磁界により空洞が膨らみ、アイリス部付近では電界により空洞が潰れていることがわかる。何れも空洞周波数を下げる方向に作用する。

### 3. 1 ダイナミックローレンツデチューニングのモデル化

超伝導空洞をパルス運転する場合には、パルス状のローレンツ力が空洞に作用するために、空洞の加速電界を評価するためにはダイナミックなローレンツデチューニングを評価する必要がある。ダイナミックローレンツデチューニングは以下のコンセプトによりモデル化される。

- (1) 空洞のダイナミックな変形を機械的振動モードに展開する。
- (2) 空洞変形は微小であるために、変位量とデチューン量は比例すると仮定し、各機械的モードによるデチューン量を評価する。
- (3) 全デチューン量は各モードのデチューン量の和により算出する。

次式は、このモデルを定式化したものである。

$$\frac{d^2 \Delta f_k}{dt^2} + \frac{\omega_{mk}}{Q_{mk}} \frac{d \Delta f_k}{dt} + \omega_{mk}^2 \Delta f_k = K_k \left( \frac{V_c}{V_0} \right)^2,$$

$$K_k = \frac{1}{m_k} \left\{ \left( \frac{d\vec{f}}{du} \right) \cdot (\vec{a}_k) \right\} \left\{ (\vec{F}_0) \cdot (\vec{a}_k) \right\},$$

$$\Delta f = \sum_k \Delta f_k,$$

ここで、

$V_0$  : 空洞電圧

$\Delta f_k$  :  $k$  番目の機械的モードによるデチューン量

$\Delta f$  : 全デチューン量

$\omega_{mk}$  :  $k$  番目の機械的モードの角周波数

$Q_{mk}$  :  $k$  番目の機械的モードの Q 値

$m_k$  :  $k$  番目の機械的モードの一般化質量

$F_0$  : 空洞電圧  $V_0$  の時のローレンツ圧力ベクトル

$a_k$  :  $k$  番目の機械的モードの固有ベクトル

$df/du$  : 空洞変位に対する周波数感度

$u$  : 空洞変位量

である。式中の内積  $(df/du) \cdot (a_k)$  は  $k$  番目のモードがどれだけ周波数を変化させるかを表し、 $(F_0) \cdot (a_k)$  はローレンツ力により  $k$  番目のモードがどれだけ励振されるかを表している。これらのパラメータのうち、 $\omega_{mk}$ 、 $m_k$ 、 $a_k$  は構造解析コードにより求められ、 $F_0$ 、 $df/du$  は電磁場解析コード(SUPERFISH)により導出される。

### 3. 2 マルチセル空洞の機械的振動モード

ABAQUS(構造解析コード)によって求められた、 $\beta=0.725$ 、7 セル空洞のローレンツ力による静的な変形と主な機械的振動モードを図 3-2 に示す。ここで、空洞の肉厚は 3mm である。エンドセルの形状は 2-2 節で示したものと異なり、ボア半径がセンターセルと同じ形状となっている。また、空洞の左端は固定されているが、右端はチューナーで拘束されており、チューナーのバネ剛性を 60,000N/mm と仮定した。

図に示されるように、ローレンツ力による静的変形は各セルが変形するとともに、全体が縮み、チューナーが引き寄せられていることがわかる。

機械的振動モードは 3 種類に大別される。周波数の低いモードはマルチセルモードと呼ばれ、各セルはあまり変形しないがセルの位置が変化する。チューナー&ビームパイプモ

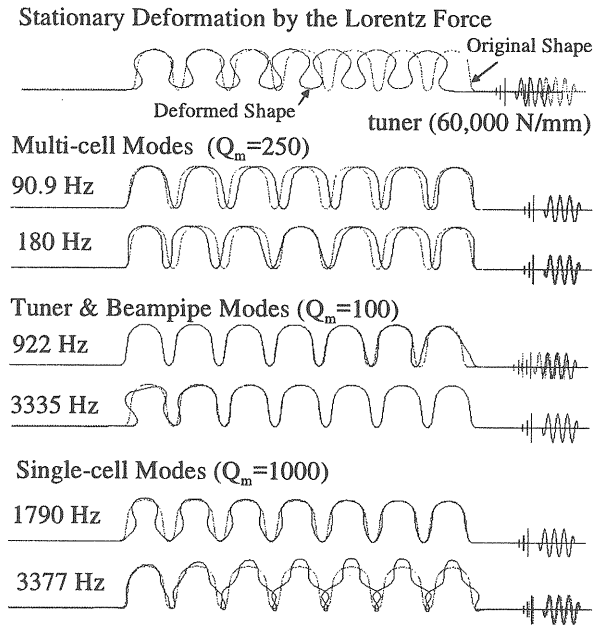


図 3-2 7セル空洞のローレンツ力による静的変形と機械的振動モード

ードはエンドセルとチューナーもしくはビームパイプのみが変形するモードである。周波数が高いモードはシングルセルモードと呼ばれ、セルの位置は変化しないがセルの形状が大きく変形するモードである。マルチセルモードは、 $(df/du) \cdot (a_k)$ 、 $(F_0) \cdot (a_k)$ ともにはさほど大きくはないが、周波数が低いためにパルス運転の繰返し周期と同期すると大きく励振される場合がある。一方、シングルセルモードには $(df/du) \cdot (a_k)$ 、 $(F_0) \cdot (a_k)$ が大きなものがあり、これらがダイナミックローレンツデチューニングの主役となる。

機械的振動モードの Q 値( $Q_{mk}$ )は計算によって評価することはできない。実験的に、マルチセルモード、チューナー&ビームパイプモード、シングルセルモードについてそれぞれ 250、100、1000 と見積もった。

### 3. 3 ダイナミックローレンツデチューニングのシミュレーション

ABAQUS コードにより 150 個の機械的モードを算出し、その中から寄与の大きなモー

ド、すなわち $\{(df/du) \cdot (a_k)\} \{ (F_0) \cdot (a_k) \} / (m_k \omega_k)$ の大きなモードを 21 個抽出し、ダイナミックローレンツデチューニングのシミュレーションを行った。

#### (1) 一般的方法による空洞の励振

空洞の一般的なパルス励振方法は、矩形波入力により指数関数的に電界を立ち上げ、立ち下げる。この方式により空洞を 20 パルス励振した場合のローレンツデチューニングを図 3-3 に示す。図に示されるように、この方式ではパルスのフラットトップ及びパルス後に周波数の高い振動モード(シングルセルモード)が励起されている。パルス後の振動は次のパルスにも影響を及ぼしている。また、ビームを加速するフラットトップ領域での周波数の揺らぎは約 80Hz であり、安定な加速電界(1°、1%以下)を実現するための許容値 50Hz を上回っている。これは、立ち上がり始め、立ち下がり始めでの急激な電界の変化により高次の振動モードが誘起されているためである。

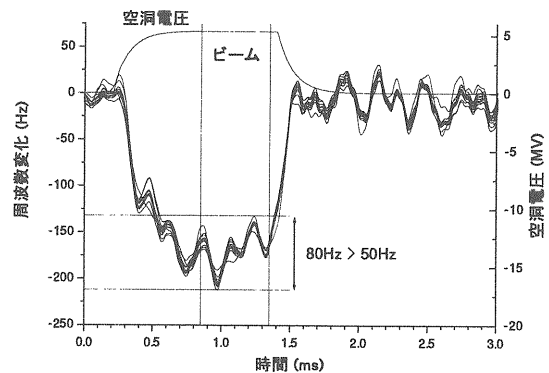


図 3-3 一般的な励振方法でのダイナミックローレンツデチューニング

## (2) 滑らかな空洞の励振

空洞の励振パターンを滑らかにすることにより、高次の振動モードを抑制することが可能となる。その一例として、コサイン形状で励振した場合のダイナミックローレンツデチューニングのシミュレーションを図 3-4 に示す。図 3-3 と比較すると、シングルセルモードに起因する高次の振動モードがフラットトップ領域及びパルス後でかなり低減していることがわかる。ここでは、ビームを加速するフラットトップ領域での周波数の揺らぎは 36Hz であり、安定な加速電界を得るための許容値 50Hz 以内に入っている。

以上のことから、超伝導空洞のパルス運転において安定な加速電界を得るためには、空洞電界の励振パターンを制御してデチューニングの揺らぎを低減することが必要であることがわかる。

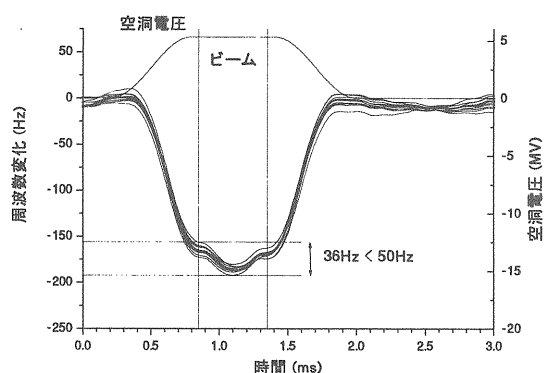


図 3-4 コサイン形状で空洞を励振した場合のダイナミックローレンツデチューニング

## 第4章 クライオモジュール

現在、クライオモジュールの詳細設計を進めている段階であるが、ここでは、その基本的概念について述べる。

図 4-1 にクライオモジュール概念図を示す。基本的な構成は、1 台のクライオモジュールに 2 個の空洞が組み込まれ、中央部に RF 入

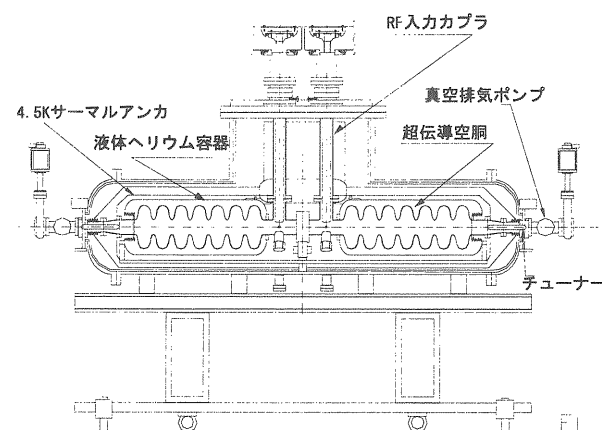


図 4-1 クライオモジュール概念図

力カプラ、左右にチューナー及び真空排気ポンプとなっている。本クライオモジュールの特徴として以下の項目が挙げられる。

- (1) 高加速電界を実現するために、超流動ヘリウム(2K)により空洞を冷却する。
- (2) ヘリウムインベントリを低減するとともにスーパリークを防止するために、液体ヘリウム容器は空洞と一体化したジャケット構造となっている。
- (3) 2Kヘリウムへの熱侵入を低減するために、4Kヘリウムサーマルアンカを設けている。
- (4) ビームパイプ部からの熱侵入を低減するために、ビームパイプ断熱領域にベローズを設けている。
- (5) 組立時に空洞内へのゴミの侵入を防止するために、空洞開封作業はすべてクリーンルーム内で行える構造となっている。
- (6) ローレンツデチューニングを抑制するために、チューナーの剛性を強化するとともに、チューニング荷重はチューナーとヘリウムジャケット内で閉じる構造とし、チューナー動作時のもう一方の空洞への影響を低減している。

## 第5章 R&Dの現状

これまでに、陽子加速器用 600MHz 超伝導空洞、クライオモジュールの開発、972MHz



超伝導空洞の開発を進めてきた。ここでは、開発の現状について述べる。

### 5. 1 600MHz 超伝導空洞の開発[6,7,8]

600MHz 超伝導空洞の開発は、原研・中性子科学研究計画をベースに進められたものである。空洞開発の第 1 ステップとして、 $\beta = 0.5$ 、 $0.886$  の単セル空洞の試作、試験を行った。空洞形状及び RF パラメータを図 5-1 に示す。空洞の表面処理として、バレル研磨[9]、電解研磨[10]、真空熱処理、高圧水洗浄を行った。単セル空洞の 2K における縦測定結果を図 5-2 に示す。 $\beta = 0.5$ 、 $0.886$  空洞について、それぞれ  $E_{sp} = 44$ 、 $51 \text{ MV/m}$  の性能を得た。これらの性能は目標性能  $16 \text{ MV/m}$  の 2 倍以上を実現している。

陽子加速器用超伝導空洞開発の次のステップとして、 $\beta = 0.5$ 、 $0.886$  の 5 セル空洞の試作、試験を行った。図 5-3 に 5 セル空洞形状と RF パラメータを示す。5 セル空洞については、単セル空洞と同様の表面処理とともにプリチューニングを行った。プリチューニングにおいては、98%以上の Field Flatness を得た。図 5-2 に 5 セル空洞の 2K における縦測定結果を

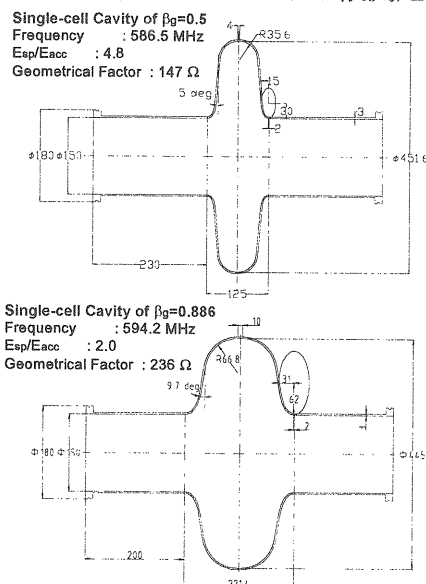


図 5-1 600MHz 単セル空洞形状

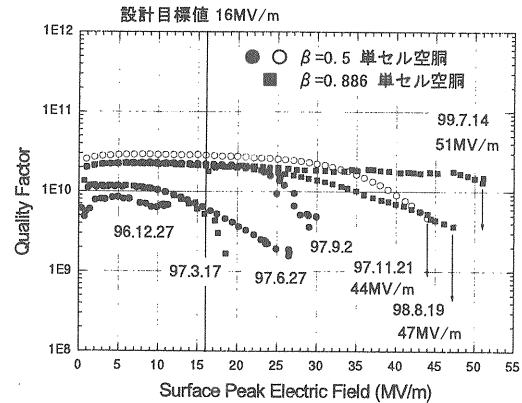


図 5-2 600MHz 単セル空洞縦測定結果(2K)

示す。 $\beta = 0.5$  空洞では  $E_{sp} = 23 \text{ MV/m}$ 、 $\beta = 0.886$  空洞では  $E_{sp} = 31 \text{ MV/m}$  を得た。単セル空洞ほどの性能は得ていないが、目標性能を十分上回る性能を得た。

### 5. 2 600MHz クライオモジュールの試作

クライオモジュールとしての総合的な性能の実証とパルス運転時の安定な加速電界の実現を目的として、600MHz クライオモジュールの試作を行った。現在、第 1 回目の横測定として、4K での試験を行ったところである。

図 5-5 にクライオモジュール試作器の概略を示す。クライオモジュールのコンセプトと

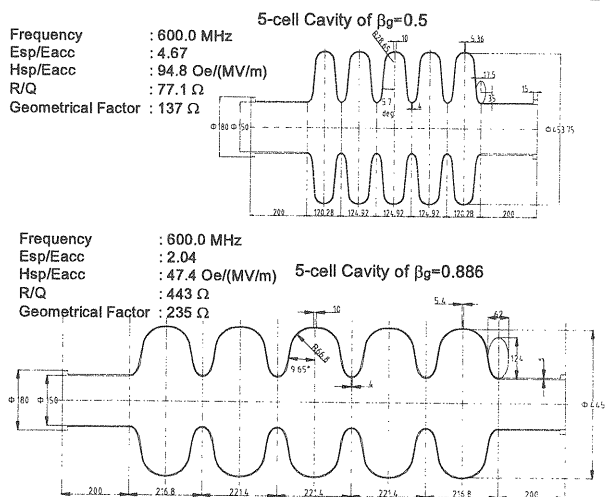


図 5-3 600MHz 5セル空洞形状

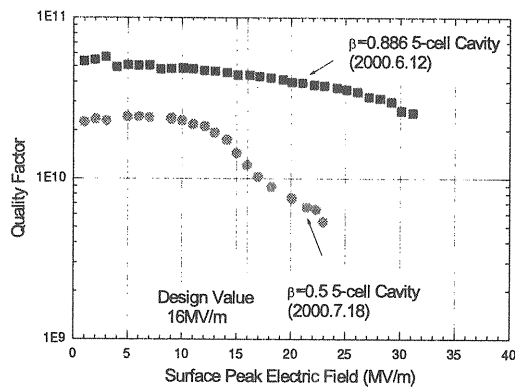


図 5-4 600MHz、5セル空洞縦測定結果(2K)

しては、4章で述べたのと同様である。ここでは、 $\beta=0.6$ 、5セル空洞が2個実装されている。

図 5-6 に、空洞形状を示す。空洞の表面処理、プリチューニング、縦測定を行った後に、空洞内部にクリーンルーム内の清浄な空気を封入した状態でヘリウムジャケットの溶接を行った。その後、クリーンルーム内でクライオモジュールへの組み込み、RF 入力カップラ取付等を行い、横測定を実施した。

クライオモジュール用空洞(2個: J6001、J6002)の2Kでの縦測定結果を図 5-7 に示す。それぞれ、 $E_{sp}=31$ 、 $40\text{MV/m}$  を達成し、目標性能  $16\text{MV/m}$  を上回る性能を得た。

予備的な試験として、4Kでの横測定を行

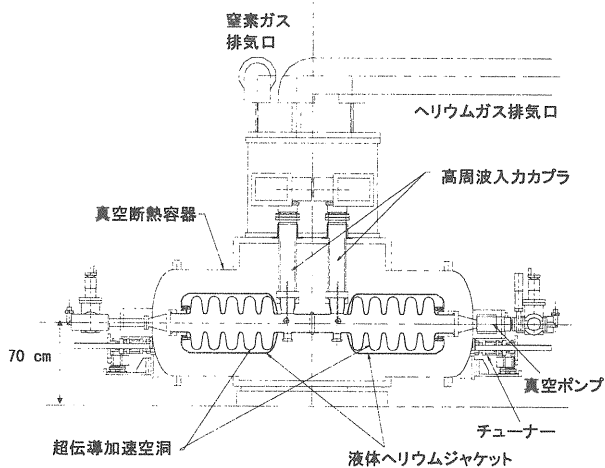
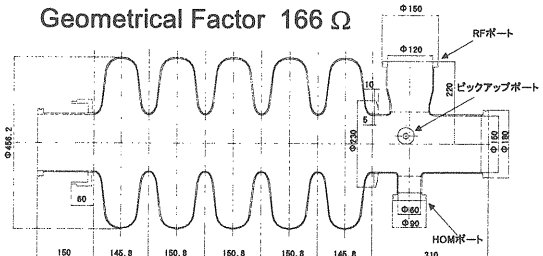


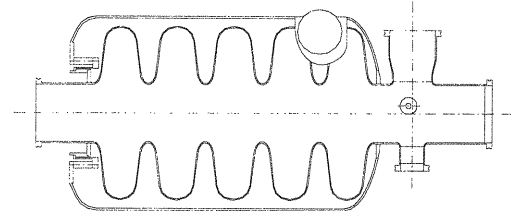
図 5-5 クライオモジュール試作器概略図

った結果、CW 運転で  $10\text{MV/m}$ 、パルス運転 ( $50\text{Hz}$ ) で  $16\text{MV/m}$  を得ている。

Frequency 600.0 MHz  
 $E_{sp}/E_{acc}$  3.45  
 $H_{sp}/E_{acc}$  72.28 Oe/(MV/m)  
 $R/Q$  154  $\Omega$   
 Geometrical Factor 166  $\Omega$



空洞単体(縦測定時形状)



ジャケット取付後

図 5-6 クライオモジュール試作器用空洞

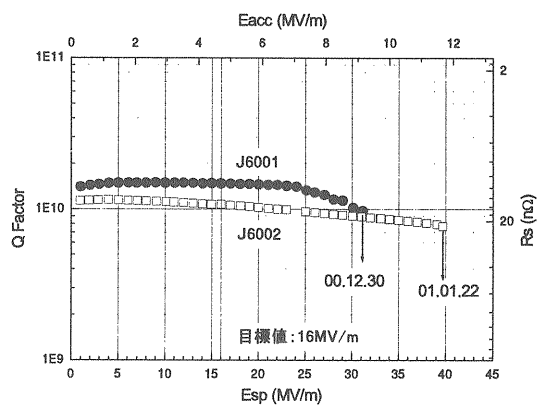


図 5-7 クライオモジュール試作器用空洞縦測定結果(2K)

### 5. 3 972MHz 超伝導空洞の開発

現在、2章で述べた空洞設計をベースに、 $\beta=0.725$ 、単セル空洞及び9セル空洞の試作、試験を進めている。図 5-8 に、空洞形状及び RF パラメータを示す。

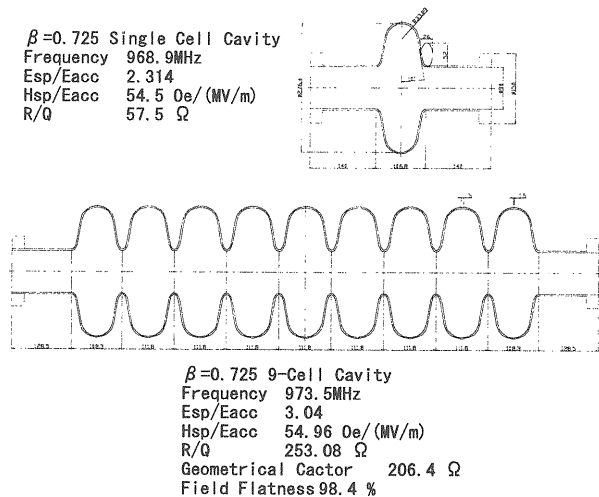


図 5-8 972MHz 単セル、9セル空洞

## 第6章 ヘリウム冷凍機

400~600MeV 超伝導加速部は、バンチャーモジュール 1 台、加速モジュール 11 台の計 12 台で構成される。また、液体ヘリウムトランスファーラインは、地上部冷凍機室からトンネルまでの主トランスファーライン(約 30m)とトンネル内のヘッダーライン(約 80m)により構成される。冷却システムとしては、2K、4.5K、80K ラインの 3 種類で、主トランスファーライン、ヘッダーライン、ジョイントボックス(12 台)、クライオモジュール(12 台)、地上部の各部での熱負荷を概算した。表 6-1 に、冷凍負荷の概算をまとめる。

2K の飽和液体ヘリウムを生成するためには、液体ヘリウムを 30bar 程度まで減圧する必要がある。2K 冷凍システムには、低温部に減圧ポンプ(コールドコンプレッサ)を置くものと、室温部に減圧ポンプを置くもの、そして両者のコンビネーションによりシステムを構成するものの 3 種類がある。低温部にポンプを配置したほうが、排気速度が小さくて済むので有利であるが、流量が小さい場合(10g/s 以下)にはコールドコンプレッサで大気圧以上まで圧力を上昇させるのは困難である。表 6-1 に示す 2K の負荷 450W は、質量流量

約 20g/s に相当するので、ここではコールドコンプレッサにより大気圧まで圧力を上昇させることが可能である。

2K、4.5K の冷媒はヘリウムであるが、トンネル内での中性子によりトリチウムが生成されるので、注意が必要である。また、80K 系統の冷媒としては、ヘリウムガス、液体窒素が候補としてあげられるが、こちらも中性子による放射化を評価する必要がある。

表 6-1 冷凍負荷の概算評価

	2K	4.5K	80K
Main Tr. Line	36.5	79.3	741
Header Line	13.6	99.7	1298
Joint Box	130.5	130.5	132
Cryomodule			
Static	40	260	650
RF	45		
地上部	28.5	25.5	22
計	294.1	595	2843
マージン ( $\times 1.5$ )	450	900	4300

### <参考文献>

- [1] E. Kako, "Cell-shape Design of 972MHz Superconducting Cavity for High Intensity Proton LINAC", Proc. of 25<sup>th</sup> LINAC Meeting in Japan, Spring-8, Himeji, Japan (2000), p323-325.
- [2] K. Mukugi et al., "Mechanical Characteristics of 972 MHz Superconducting Cavities for High Intensity Proton Linac", *ibid.*, p314-316.
- [3] E. Kako and S. Noguchi, "Higher Order Mode Analysis of a 972MHz Superconducting Cavity for High Intensity Proton LINAC", Proc. of 3<sup>rd</sup> Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, Tsukuba, Japan (2000), KEK Proceedings 2000-23, p47-49.

- [4] N. Ouchi et al., "Pulsed SC Proton Linac", Proc. of XX Int. Linac. Conf., Monterey, USA (2000), WE205.
- [5] D. A. Edwards ed., "TESLA TEST FACILITY LINAC—Design Report", TESLA 95-01 (1995).
- [6] N. Ouchi et al., "Development of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Accelerator at JAERI", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, p1030-1035 (1999).
- [7] N. Ouchi et al., "Superconducting Cavity Development for High Intensity Proton Linac in JAERI", Proc. of 9<sup>th</sup> Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, USA (1999), p450-458.
- [8] M. Mizumoto et al., "Development of Superconducting Linac for the KEK/JAERI Joint Project Proc. of XX Int. Linac. Conf., Monterey, USA (2000), TUD09.
- [9] T. Higuchi et al., "Investigation on Barrel Polishing for Superconducting Niobium Cavities", Proc. of 8<sup>th</sup> Workshop on RF Superconductivity, Gif sur Yvette, France (1995) p723-727.
- [10] K. Saito et al., "R&D of Superconducting Cavities at KEK", Proc. of 4<sup>th</sup> Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan (1989) p635-694.