

[13P-15]

Cell-shape Design of 972MHz Superconducting Cavity for High Intensity Proton LINAC

Eiji Kako

KEK ; 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 JAPAN

Abstract

In the JAERI/KEK joint project for high intensity proton accelerators, a superconducting linac is used at the beam energy from 400 MeV to 600 MeV. Design of a 972 MHz, $\beta=0.725$, 7-cell niobium cavity was carried out by using electromagnetic codes, SUPERFISH and MAFIA. Main cavity parameters like E_{sp}/E_{acc} , H_{sp}/E_{acc} , R/Q and Cell-to-cell coupling were calculated as a function of the cell-shape. Elimination of harmful trapped modes in HOMs was carefully taken into consideration. The optimum center cell-shape was proposed from the result of these calculations.

大強度陽子線形加速器用 972MHz 超伝導空洞の形状設計

1、はじめに

大強度陽子加速器計画が、日本原子力研究所 (JAERI)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)との共同により推進されている。この陽子線形加速器の高エネルギー部の 400MeV から 600MeV において、972MHz の超伝導加速空洞が用いられる。この超伝導空洞のセル形状の設計にあたり、加速モードの空洞特性の形状依存性を調べることに同時に、ビームの不安定性に寄与する高調波モード(HOM)におけるトラップモード[1,2]に対する考慮も重要である。ここでは、空洞内における高周波電磁界解析コード、SUPERFISH および MAFIA を用いて行った計算結果に基づいて、適切なセル形状の検討を行った。これまでの空洞設計の経験によりアイリス半径とセル直線部傾斜角度がセル形状を決定する要因として最も重要であるという認識から、この2点を重点パラメータと考えて計算を行った。本報告において、高周波特性について最適となる 972MHz, $\beta=0.725$, 7セル超伝導空洞を提案する。

2、空洞特性のセル形状依存性

超伝導空洞の基本セル形状を図1に示す。ここで、空洞セル長(L_c)は陽子速度($\beta=0.725$)によって決定され 972MHz では 55.9mm となる。赤道平坦部(L_f)は、多連空洞における端セルの周波数調整用として溶接ビードの半幅程度の 2.5mm とした。アイリス部の楕円は、セル間の結合をより強くするために平坦部を無くし且つやや小さめの形状を選択し、短径(E_a)を 13mm、長径(E_b)を 26 mm とした。赤道半径(R_c)を調整して、共振周波数を 972MHz に一致させることにより、円弧

の半径(C_R)が与えられる。空洞特性に対して大きな影響を与えるアイリス半径(R_b)およびセル直線部の傾斜角度(θ)を変数パラメータとして、空洞特性の形状依存性を調べた。

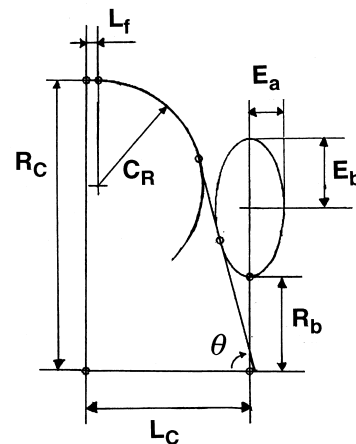


図1、超伝導空洞の基本セル形状

2-1. 加速モード

アイリス半径(R_b)を 40,45,50,55mm、およびセルの傾斜角度(θ)を $75^\circ, 80^\circ, 85^\circ$ とした場合について、SUPERFISH で計算された加速モードの主要な空洞特性の形状依存性が図2に示される。ここで、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 値の比(R/Q)、セル間結合係数などが超伝導空洞の設計において重要な要因となる。どの図においても、 R_b について著しい依存性を示しており、アイリス半径に対する適切な設定が重要である。

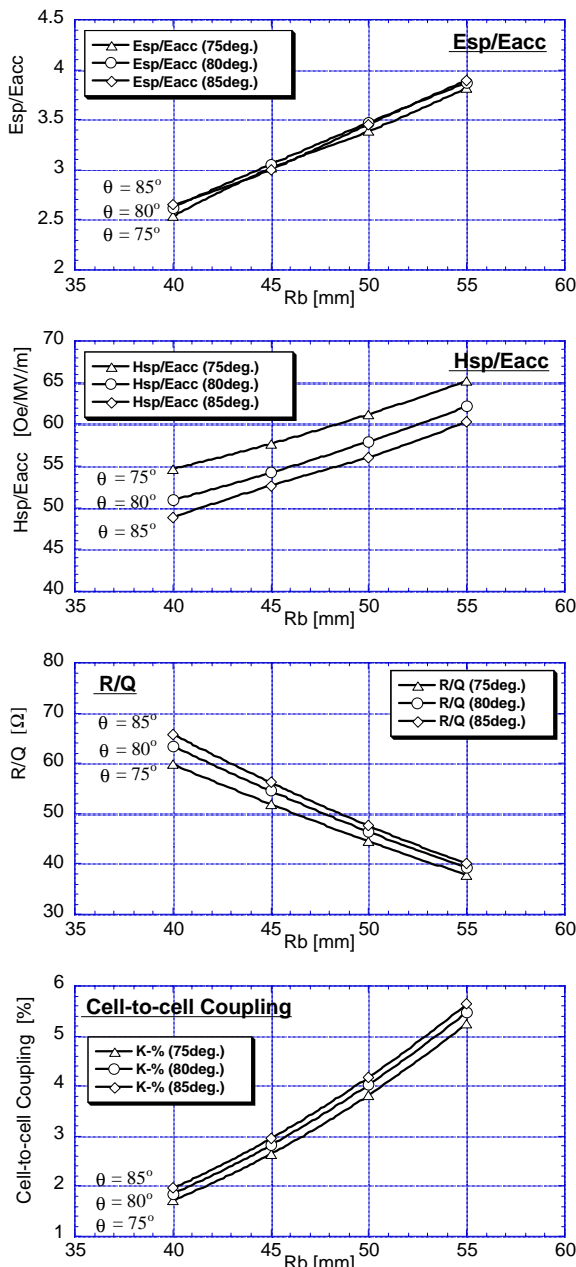


図2、主要な空洞特性の形状依存性

2-2. 高調波モード

空洞内を通過する粒子ビームにより誘起される高調波のエネルギーを外部へ取り出すために、高調波結合器が超伝導空洞のビームチューブ部分に取り付けられる。特に多連空洞においては、高調波のエネルギーが中央セル附近に集中するトラップモード(図5参照)が存在すると、高調波結合器との良好な結合が得られない。超伝導では、空洞壁での高周波損失は小さく、高調波のエネルギーはしだいに蓄積され増大し、ビーム不安定性の原因となる。トラップモードは、高調波モードの混成(mode-mixing)によりパスバンドの周波数差が小さくなり、エネルギーの流れである群速度

(Vg)が減少することにより発生する(すなわち、 $\Delta f \rightarrow 0$ のとき、 $Vg = d\omega/d\beta \rightarrow 0$ となる)。したがって図3に示すように、単セルでの高調波モードのパスバンドの周波数特性(図中の斜線部分)を0モードと π モードについて調べることで、トラップモードの発生を予想することができる。ここでは、少なくともビームチューブでの遮断周波数以下にあるトラップモードを避けることが重要である。a) Monopole では TM020 と TM011 とが、どの

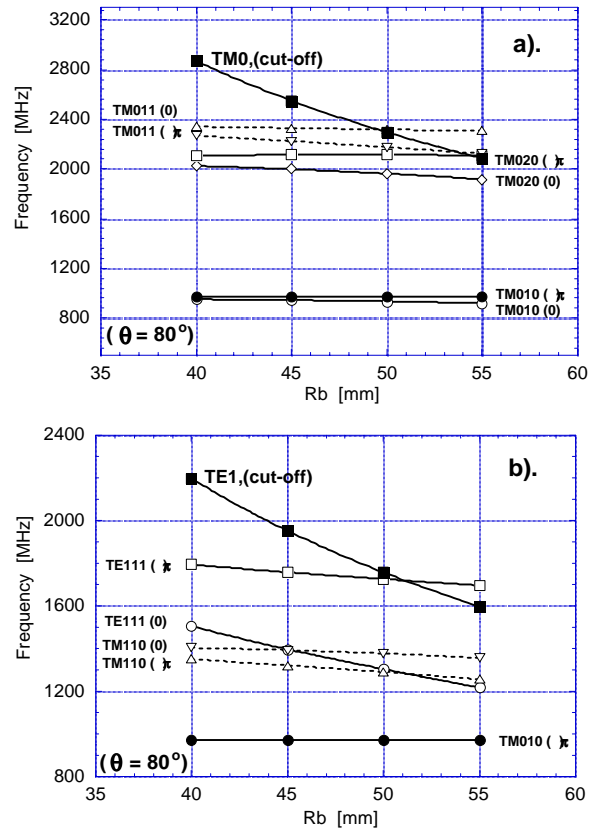


図3、高調波モードのパスバンドの周波数特性

a) Monopole-modes, b) Dipole-modes.

アイリス径についても混成せず分離しており問題はない。一方、b) Dipole では、アイリス径が 45mm 以上で TM110 と TE111 との間にモードの混成が起こり、50mm 附近では0モードと π モードの周波数差がなくなりトラップモードの形成が予想される。したがってこの場合、アイリス径を 45mm 以下に設定することが望ましい。

3、セル形状の最適化

前節での計算結果に基づいて、以下の検討を行った。

- $\theta = 75^\circ$ では、Hsp/Eacc が高いうえ、R/Q が低く、他と比較して利点がない。
- $E_{sp}/E_{acc} < 3.0$ では、 $R_b < 45 \text{ mm}$
- $H_{sp}/E_{acc} < 55 \text{ Oe/MV/m}$ では、 $R_b < 46 \text{ mm}$

- セル間結合係数 $> 2.5\%$ では、 $R_b > 43 \text{ mm}$
- 高調波モードの混成によるトラップモードを避けるためには、 $R_b < 45 \text{ mm}$
- 機械強度については、定性的に $\theta=80^\circ$ のほうが $\theta=85^\circ$ より強い。

以上を総合的に判断することにより、最適セル形状を $\theta=80^\circ$ および $R_b=45\text{mm}$ とする。この中央セル形状をもつ 7 セル超伝導空洞の寸法および加速モードの電気力線の分布を図4に示す。また、その空洞特性パラメータを表1に示す。ここで提案された 7 セル超伝導空洞について行われた機械的特性の評価[3]およびビーム力学関係の計算[4]において特に大きな問題がないことが確認された。

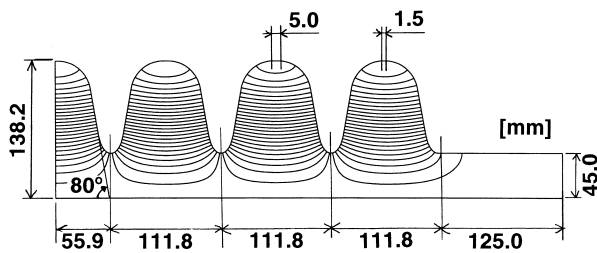


図4、972MHz, $\beta=0.725$, 7-cell 超伝導空洞

表1、空洞特性パラメータ

	Center-cell	7-cell
Esp/Eacc	3.05	3.09
Hsp/Eacc	54.2 Oe/MV/m	55.5 Oe/MV/m
R/Q	54.7 Ω	382.5 Ω
geometrical factor	209.2 Ω	206.1 Ω
cell/cell coupling	2.82 %	---
transit time factor	0.775	0.716
field flatness	---	98.5 %

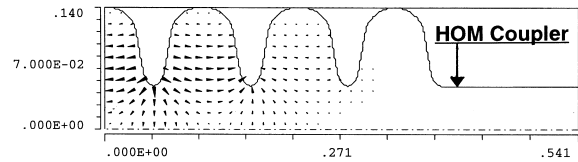
(1/2モデルでの SUPERFISH による計算値)

4、高調波トラップモード

MAFIA で計算した高調波モードの電磁界分布の例を図5に示す。a)の場合においては、電磁界強度が端セルで著しく弱く、中央部分に集中したトラップモードになっている。アイリス半径を 45mm にすると b)に示されるように、端セルでの電磁界強度が増加し、高調波結合器との効率の良い結合が得られる。この場合、高調波エネルギーと高調波結合器の位置での平均電

界強度から計算される外部 Q 値(Q_{ext})として、2桁の改善が見積られる。ここに図3における検討の確認がされた。

a) $R_b = 50. \text{ mm}$, Freq. = 1288.5 MHz, $Q_{\text{ext}} = \sim 10^8$.



b) $R_b = 45. \text{ mm}$, Freq. = 1321.8 MHz, $Q_{\text{ext}} = \sim 10^6$.

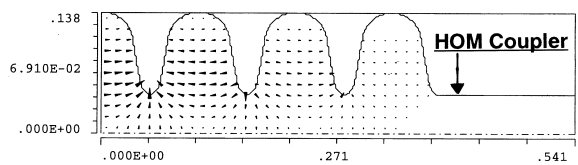


図5、トラップモードの改善 (TM110- π mode)

a)アイリス半径 50mm, b)アイリス半径 45mm.

5、まとめ

大強度陽子線形加速器用 972MHz, $\beta=0.725$, 7 セル超伝導空洞について、加速モードおよび高調波モードの高周波特性に基づいて、適切な中央セル形状の検討を行った。高調波トラップモードを考慮し、空洞特性パラメータを総合的に判断した結果、アイリス半径(R_b)を 45mm 、セルの傾斜角度(θ)を 80° とする中央セル形状が、最適な 7 セル超伝導空洞の1つとして提案された。

参考文献

- [1] A. Mosnier, "The Trapped Modes in a Multi-cell SC Cavity", Proc. of 1st TESLA Workshop, Cornell University, Ithaca, NY, USA (1990) p501-519.
- [2] E. Kako, et al, "Initial Tests of L-band Niobium Superconducting Cavities for Linear Collider Application", Proc. of 5th SRF Workshop, DESY, Hamburg, Germany (1991) p751-757.
- [3] K. Mukugi, et.al, "Mechanical Characteristics of 972 MHz Superconducting Cavities for High Intensity Proton LINAC", in this conference.
- [4] K. Hasegawa, private communication.