

[13P-12]

## Mechanical Characteristics of 972 MHz Superconducting Cavities for High Intensity Proton Linac

K. Mukugi<sup>\*)</sup>, N. Ouchi<sup>A)</sup>, H. Yoshikawa<sup>A)</sup>, K. Hasegawa<sup>A)</sup>, J. Kusano<sup>A)</sup>, M. Mizumoto<sup>A)</sup>  
E. Kako<sup>B)</sup>, K. Saito<sup>B)</sup> and S. Noguchi<sup>B)</sup>

Mitsubishi Electric Corporation (MELCO)

1-1-2, Wadasaki-cho, Hyogoku, Kobe-shi, Hyogo-ken, 652-8555, Japan

<sup>A)</sup>Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

### Abstract

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) are promoting the joint project integrating both the Neutron Science Project (NSP) of JAERI and the Japan Hadron Facility Project (JHF) of KEK. This project has been proposed with a superconducting proton linac. Because elliptical superconducting cavities for lower velocity have the flattered shape, mechanical properties against the vacuum load and the Lorentz force detuning are very important. In this paper, mechanical characteristics of 972 MHz superconducting cavities are studied by using structural and electromagnetic analysis.

### 大強度陽子線加速器用 972 MHz 超伝導空洞の機械的特性

#### 1. はじめに

KEK と原研では、JHF 計画と中性子科学研究計画との統合計画を進めている。本計画では、高エネルギーリニアック部に超伝導加速器の採用を計画している。本加速器に使用される空洞は扁平形状をしており、真空負荷に対して十分な強度が要求されること、およびパルス化した電磁力により超伝導空洞は加振されるため、空洞の機械的特性が重要な検討項目となる。これまでに、600MHz 超伝導空洞については、扁平度が大きい(低エネルギー領域)空洞の場合には真空負荷や電磁力に耐えるためにアイリス部を拘束したり、補強リングを付加することなどを提案してきた[1]。今回は、972 MHz 超伝導空洞の形状と機械的特性(電磁力デチューニング、真空荷重による応力など)について検討した結果を報告する。なお、本空洞モデルの電磁場特性詳細データについては本研究會、別報告[2]を参照願いたい

#### 2. 半セルモデル解析

##### 2.1 空洞形状パラメーターと代表的電磁場特性

加速周波数972MHz、 $\beta_g = 0.725$  (424 MeV) の超伝導空洞半セルをモデル化し、電磁場および構造解析を行った。電磁場解析にはSUPERFISH、構造解析にはABAQUSコードを用いた。空洞形状は、アイリス径  $a$ 、壁角度  $AL$  を基本パラメーターとし、

板厚、アイリス直線部長さ  $L1$  の影響などを加えて、空洞の機械的特性についてパラメータースタディを行った。

図1に半セルモデルの空洞形状パラメーターを、図2に形状パラメーターをアイリス径、壁角度とした場合の空洞形状の組み合わせ、および電気力線を示す。また、表1に各形状に対する代表的電磁場特性(Q値:  $Q$ 、最大表面電場:  $E_p/E_{acc}$ 、最大表面磁場:  $H_p/E_{acc}$ 、シャフトインペダンス:  $Z_{TT}$ 、結合係数:  $k$ )を示す。

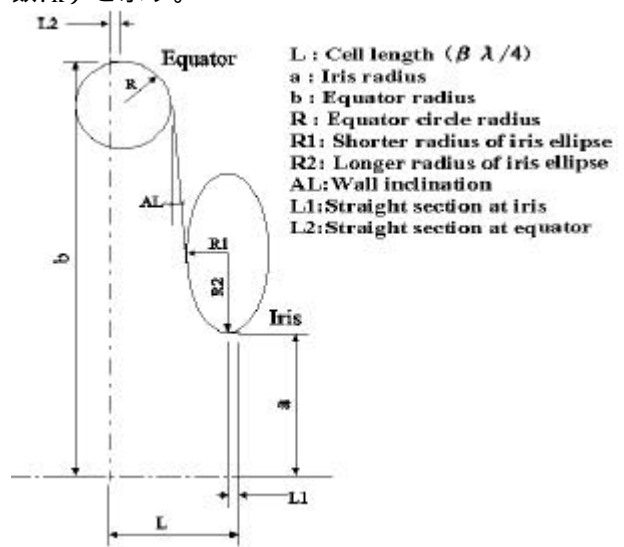


図1 空洞形状パラメーター

<sup>\*)</sup> K. Mukugi, 029-282-5461, mukugi@linac.tokai.jaeri.go.jp

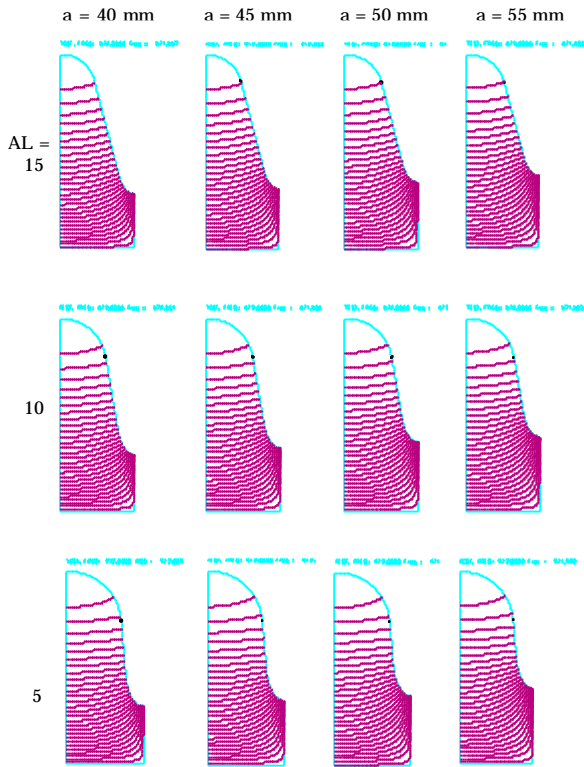


図2 代表的半セル空洞形状と電気力線  
(972MHz、 $\beta_g = 0.725$  (424 MeV))

表1 代表的電磁場特性

a	AL	Q	Ep/Eacc	Hp/Eacc	ZTT/Q	K
cm	deg.			0e/(MV/m)	/cell	%
4.0	15	23276	2.56	54.62	59.94	1.70
4.0	10	25141	2.59	50.90	63.59	1.85
4.0	5	26093	2.73	48.84	65.94	1.94
4.5	15	23862	2.97	57.62	51.96	2.63
4.5	10	25491	3.00	54.16	54.65	2.81
4.5	5	26317	3.00	52.23	56.33	2.93
5.0	15	24395	3.37	61.15	44.55	3.81
5.0	10	25822	3.46	57.91	46.50	4.02
5.0	5	26541	3.58	56.05	47.68	4.16
5.5	15	24879	3.83	65.22	37.88	5.23
5.5	10	26136	3.86	62.10	39.27	5.47
5.5	5	26763	3.85	60.32	40.10	5.62

## 2.2 機械的特性 (最大応力、デチューニングなど)

表2にアイリス径 $a$ 、壁角度ALをパラメータとして、最大ミーゼス応力(max. Mises)、加速電場に対するローレンツカデチューニング感度(Hz/(MV/m)<sup>2</sup>)、最低次固有振動数(Lowest f)、空洞のばね剛性(Stiffness)、チューニング感度(Tuning sen)を示す。空洞板厚は何れも3mmである。機械的特性は、空洞壁の傾斜角により非常に大きな影響を受け、壁角度を大きくするほど構造的に強くなるが、デチューニングに関しては厳しい状況となり、トレードオフ的な最適化が要求される。図3に最大応力と空洞壁角度、図4および図5にデチューニングと壁角度の関係を示す。

表2 機械的特性、デチューニング

a	AL	max Mises	Detune/Facc <sup>2</sup>	Lowest f	Stiffness	Tuning sen
cm	deg.	MPa	Hz/(MV/m) <sup>2</sup>	Hz	kN/mm	MHz/mm
4.0	15	23.97	-3.31	1579	26.3	4.54
4.0	10	26.06	-1.69	1704	15.9	5.25
4.0	5	37.14	-1.37	1828	8.9	5.44
4.5	15	23.61	-3.09	1634	26.0	4.89
4.5	10	26.48	-1.59	1776	16.0	5.47
4.5	5	37.77	-1.09	1912	9.5	5.62
5.0	15	23.55	-3.01	1690	25.6	5.22
5.0	10	27.07	-1.50	1849	16.1	5.70
5.0	5	38.48	-1.19	1987	10.1	5.81
5.5	15	23.66	-2.79	1750	25.0	5.55
5.5	10	27.88	-1.41	1915	16.1	5.92
5.5	5	39.07	-1.03	2061	10.6	6.01

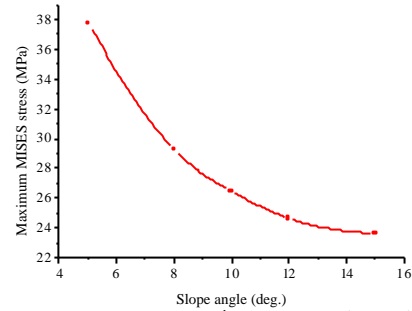


図3 最大ミーゼス応力と空洞壁角度

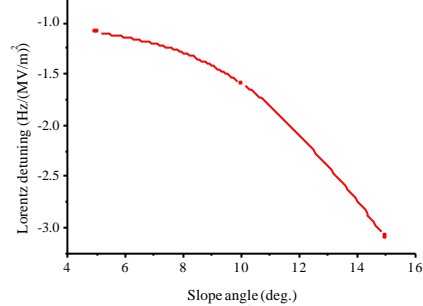


図4 ローレンツカデチューニングと壁角度

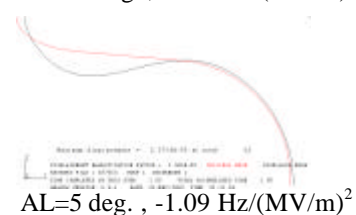
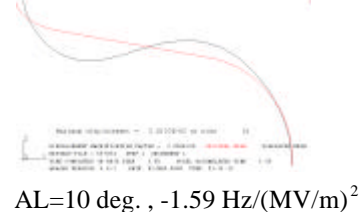
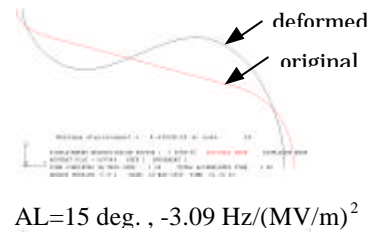


図5 ローレンツカによる変形 (壁角度変化, a=4.5cm)

### 2.3 板厚の影響 ( $a=4.5\text{cm}$ , $AL=10\text{deg.}$ )

表3に板厚を2mm~3.5mmの間で変化させた場合の最大応力、デチューニングなどの機械的特性を示す。板厚3mmでは最大ミーゼス応力は26.5MPaとニオブ材料の室温耐力43MPaと比べて十分に余裕があり、板厚2.5mmでも、34.3MPaであり、まだ余裕がある。ローレンツカデチューニングに関しては、板厚増に伴いデチューニングはかなり軽減される。

表3 板厚と最大応力、デチューニングなどとの関係

Thickness mm	max.Mises MPa	Detune/Eacc <sup>2</sup> Hz/(MV/m) <sup>2</sup>	Lowest f Hz	Stiffness kN/mm	Tuning sen MHz/mm
2.0	46.85	-3.70	1504	9.5	5.68
2.5	34.33	-2.34	1644	12.6	5.57
3.0	26.48	-1.59	1776	16.0	5.47
3.5	21.26	-1.15	1901	19.5	5.37

### 2.4 アイリス直線部長さの影響 ( $a=4.5\text{cm}$ , $AL=10\text{deg.}$ )

表4にアイリス直線部長さL1と最大応力、ローレンツカデチューニングなどとの関係を、表5にアイリス直線部長さと主要な電磁場特性を示す。

直線部を長くしていくと、最大表面電場  $E_p/E_{acc}$  はかなり緩和されるが、デチューニングは逆に厳しい状況となる。デチューニングは  $L1=0\text{mm}$  では  $-1.59\text{Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$ 、 $L1=2\text{mm}$  では  $-1.77\text{Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$  と11.3%増となる。

表4 アイリス直線部長さと最大応力、デチューニングなどとの関係

L1 mm	max.Mises MPa	Detune/Eacc <sup>2</sup> Hz/(MV/m) <sup>2</sup>	Lowest f Hz	Stiffness kN/mm	Tuning sen MHz/mm
0	26.48	-1.59	1776	16.0	5.47
1	27.10	-1.65	1759	16.4	5.46
2	27.70	-1.77	1737	16.5	5.40
3	28.40	-1.94	1717	16.5	5.36

表5 アイリス直線部長さと主要な電磁場特性

L1 mm	Q	$E_p/E_{acc}$	$H_p/E_{acc}$	ZTT/Q	$\kappa$
			$O_e/(\text{MV}/\text{m})$	/cell	%
0	25491	3.00	54.16	54.65	2.81
1	25006	2.74	54.65	55.26	2.57
2	24518	2.65	55.20	55.72	2.36
3	24012	2.61	55.85	56.06	2.16

### 3. 多連セル空洞の固有振動

これまで検討した半セルモデル群の中から、アイリス半径  $a=4.5\text{cm}$ 、壁角度  $AL=10\text{deg.}$  を中央セルとし、7連セル空洞に多連化してビームパイプを付加し、機械的固有振動数を2次元軸対称モデルにより、解析した。空洞およびビームパイプの板厚は3mmである。図6にビームパイプ端固定モデルの下から3番目までの機械的固有振動数および変形モードを示す。また、図7にチューナー剛性が60000N/mm、30000N/mmの場合を含めた固有振動数の計算結果を示す。得られた固有振動数はビーム運転時パルス繰り返し周波数50Hzの高次モード100Hz、200Hz、300Hzと非常に接近している。

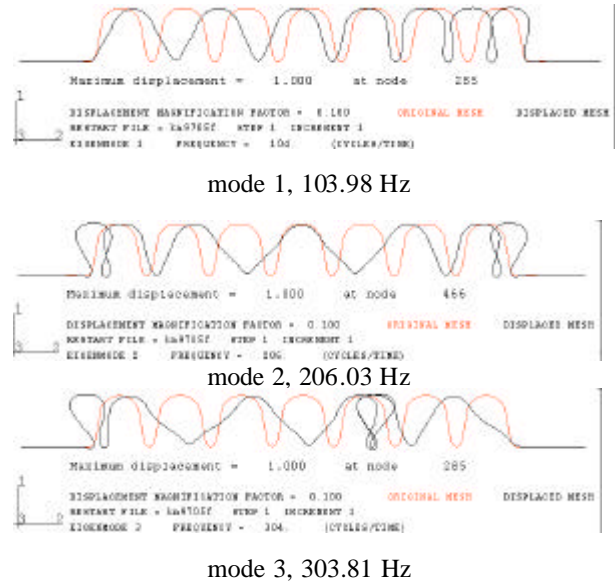


図6 固有振動モード（両端固定）

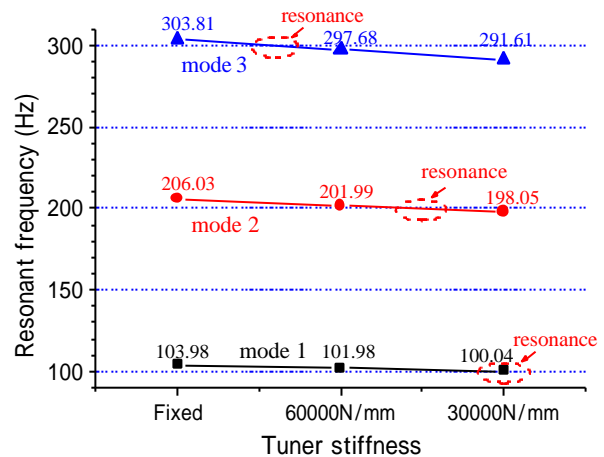


図7 固有振動数とチューナー剛性

### 4. まとめ

1) 空洞の機械的特性については、空洞壁の傾斜角により非常に大きな影響を受け、壁角度を大きくするほど構造的に強くなるが、ローレンツカデチューニングに関しては厳しい状況となり、トレードオフ的な最適化が要求される。

2) 多連セル空洞の固有振動については、固有振動数はビームのパルス運転時の50Hzの高次モード100Hz、200Hz、300Hzと非常に接近しており、何らかの方策により固有振動数をずらすなどの対策が必要と考えられる。

#### 参考文献

- [1] N. Ouchi et al., "Proton Linac Activities in JAERI", Proc. of the 8th Workshop on RF Superconductivity, Italy, p12 (1997).
- [2] E. Kako, "Cell Shape Design of 972 MHz Superconducting Cavities for High Intensity Proton Linac", these proceedings.