

[F17p30]

STRUCTURAL ANALYSIS AND SIMULATION OF SUPERCONDUCTING CAVITIES FOR HIGH INTENSITY PROTON LINAC

K. Mukugi*, C. Tsukishima*, N. Ouchi, E. Chishiro, J. Kusano, and M. Mizumoto

Japan Atomic Energy Research Institute. *Mitsubishi Electric Corporation.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

Abstract

The Neutron Science Project has been proposed with the superconducting proton linac for the energy range from 100MeV to 1.5GeV. The structural analysis and simulation of the superconducting cavities are performed. Lorentz Force detunings of the stiffened and un-stiffened $\beta=0.453$ cavity structures are calculated and evaluated in comparison with the acceptable detuning.

大強度陽子加速器用超伝導空洞の構造解析とシミュレーション

1. はじめに

原研では、基礎研究や消滅処理研究を行うための中性子科学研究計画を推進しており、その大強度陽子加速器の高エネルギー加速部には超伝導加速を採用することを第1のオプションとしている[1]。本加速器に使用される超伝導空洞は扁平、多連化するため、真空圧力やローレンツ力による変形を考慮した設計が必要である。これまでに、単空洞モデルの静解析では、扁平度が大きい(低エネルギー側)空洞についてはアイリス部を拘束し、補強リングを付加することにより真空圧力やローレンツ力に耐えるようになること、また5連空洞3次元モデルの動解析では、機械的な固有振動数がパルス運転時の繰り返し周波数に近く、機械的共振を引き起こす可能性があり、補強リングの付加が空洞の固有振動数を上昇させるのに効果的であることを報告してきた[2]。

今回の報告では、単空洞モデルについてはパルス励振時のローレンツ力による空洞の機械的変形、振動をモデル化し、加速電圧、位相の挙動について定式化を行い、代表的なケースに対して解析した。また、5連空洞モデルについてはローレンツ力による静的影響を調べるため、電磁場、構造解析を行なった。

2. 単空洞内加速電界の時間変化

図1に例えば $\beta (=v/c)=0.67$ の空洞単セルのローレンツ力による静的な変形と 1.7kHz の固有振動での変形を示した。図から分るように両者の変形は非常に類似しており、msec 幅の RF パルスによりこの振動が励振される恐れがある。ここで、空洞の壁面の変形は空洞の共振周波数の変化をもた

らし、これは空洞内部の電磁界の変動をもたらす。従って、加速電界の時間変化を知るには空洞の変形と内部の電磁界を両立して扱う必要がある。

以下、この解析モデルを説明する。

加速電圧および位相の時間変化は以下の1階微分方程式で表される。

$$\tau \dot{A} = A_g \cos(\phi - \phi_g) - A_b \cos(\phi - \phi_b) - A \quad (1)$$

$$\tau \dot{\phi} = -\frac{A_g}{A} \sin(\phi - \phi_g) + \frac{A_b}{A} \sin(\phi - \phi_b) - y \quad (2)$$

$$\tilde{V}_c = A e^{i\phi}, \tilde{V}_g = A_g e^{i\phi_g}, \tilde{V}_b = A_b e^{i\phi_b} \quad (3)$$

(加速空洞) (電源) (ビーム)

ここで、 V_c は加速電圧であり、電源 $V_g = R_s I_g / (1 + \beta)$ 及びビーム $V_b = R_s I_b / (1 + \beta)$ により励振される。 A 、 ϕ は加速電圧の振幅及び位相、 y は空洞の位相角、 τ は空洞の Filling Time、 R_s 、 β は空洞のシャント抵抗及びカップリング係数である。

図2に空洞の等価回路を示した。固有振動モード ω_m に対する機械系の運動方程式は

$$\ddot{x} + \frac{\omega_m}{Q_m} \dot{x} + \omega_m^2 x = \frac{\omega_m^2 C}{2k_m l} A^2 \quad (4)$$

で表される。右辺がローレンツ力を示している。

図3の様に壁面の変位 x が L 及び C を形成する箇所では起こる (L では伸び、 C では縮む方向) と仮定すると共振周波数変化は変位の1次関数となる。従って、壁面の変化に対応する空洞位相角として、

$$y = -\tan \Psi = -\tan \Psi_0 + \tau \omega \frac{x}{l} = y_0 + \tau \omega \frac{x}{l} \quad (5)$$

を得る。実際の空洞では図3に示された変形よりも、部分的な変形となるので、 x を κx ($\kappa=0.7$: 変形補正係数)で補正する。

上記(1)~(5)式を連立し、 $\beta (=V/C)=0.7$ の空洞を想定した数値解析を行った。機械系のバネ定数は静的変形の解析結果から $k_m=15/0.045 \text{ N}/\mu\text{m}$ を与え、機械共振の Q_m 値は1000とした。結果を図4、図5に示す。計算に用いた他の空洞パラメータについては図中に記載した。

図中、 A 、 ϕ は機械振動を含めない場合の加速電圧振幅および位相である。時刻 $t=0$ で電源 A_g を投入し、加速電圧が1.5MVに達した $t=0.28\text{ms}$ 後にビーム A_b を入射する。電圧が立ち上がる期間では加速電圧位相が30度を保つように電源の位相をコントロールしている。一方、 A' 、 ϕ' は1.7kHzの機械振動系をカップリングさせた結果である。立ち上がり後に加速電圧の振幅がドロップし、位相も大幅に振動していることが判る。この状態では正常な加速は得られないため、外部からこの変化に応じた空洞の電圧と位相を帰還制御することによって振動を減じることが可能と考えられる。

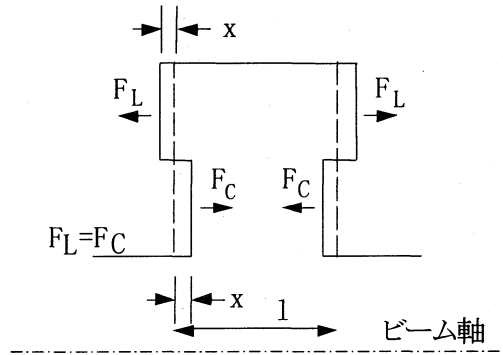


図3 空洞の変形モデル

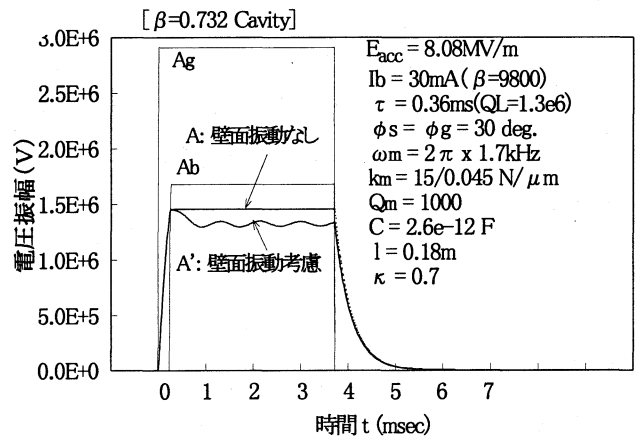


図4 加速電圧振幅の時間変化

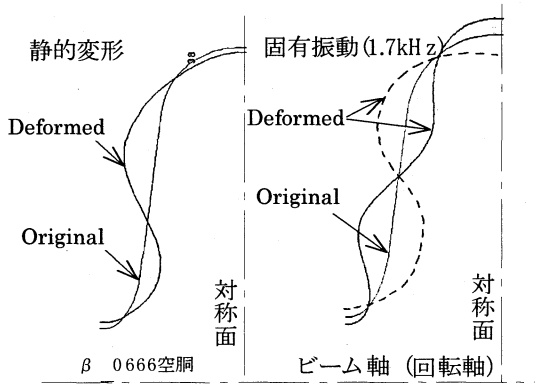


図1 ローレンツ力による単セルの静的変形と固有振動モードの変形(1.7kHz)

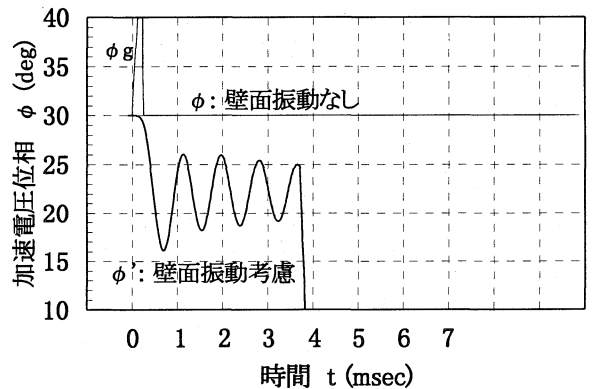


図5 加速電圧位相の時間変化

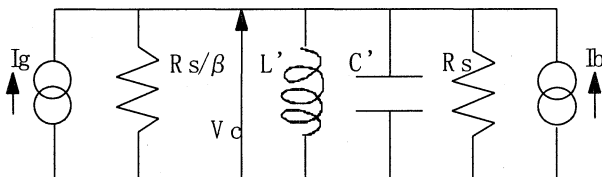


図2 空洞の等価回路

3. 多連空洞モデルの静的構造解析と補強策

超伝導空洞が多連化すると、電磁場分布、空洞形状(製作誤差、重力変形)などのアンバランス要因により単空洞モデルとは異なる変形状況を呈すると考えられる。本検討では、5連空洞(2.5セル軸対称モデル)の電磁場圧力の分布を電磁場計算コード SuperFishにより計算した後、構造解析コード ABAQUSにより空洞変形を計算し、静的な周波数変化を求めた。

図6に $\beta = 0.453$ 空胴の電磁場圧力分布を示す。ここで、正圧力の場合には磁場により空胴赤道部が膨らむような力が、負圧力の場合にはアイリスギャップ間で互いに引き寄せられるような力が働くことを示す。

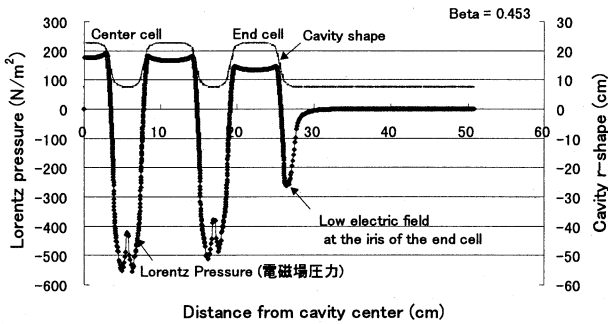


図6 空胴内表面電磁場による圧力分布 ($\beta=0.453$)

この圧力分布による空胴変形の状況を図7に示す。なお、空胴板厚は 3mm であり、以降のモデルも同様である。端部セルの表面圧力(電場)が低いため、端部セルアイリスが大きく開口した変形(最大変位 約 1 μm)となる。この時の周波数変化は-517 Hz と非常に大きい。

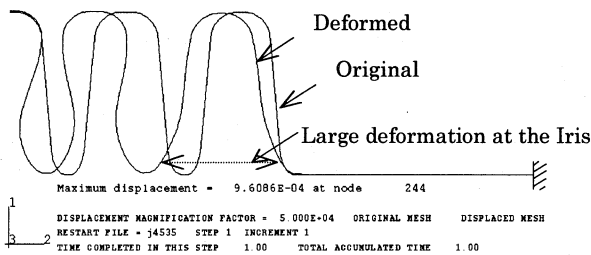


図7 電磁場圧力による変形状況 ($\beta=0.453$)

高 β 加速部の8種類の空胴について、上記方法により周波数変化を計算した結果を図8に示す。なお、図中には単空胴モデルを用いて計算した結果、及び RF 電力の反射が 20%、87%となる周波数変化を併せて示す。5連空胴のローレンツ力による周波数変化は単空胴と比べて約 50Hz 増となる。

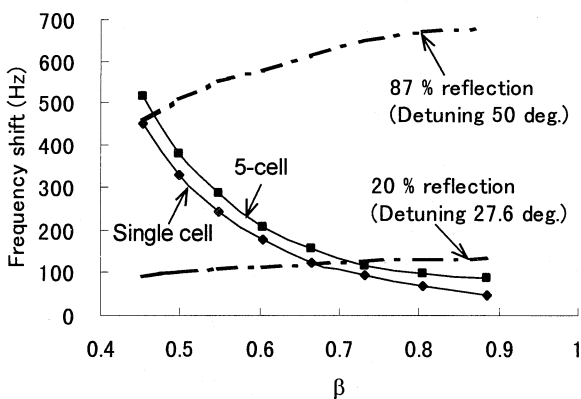


図8 各 β セクション空胴の周波数変化

補強リングを、Equator 側、Wall center、Iris 側の各位置に、および2重のリングを入れた場合の周波数変化、最大変位を表1に、代表的変形例を図9、図10に示す。RF電力の反射を 20%程度に抑えるには2重の補強リングが必要であることを示している。

表1 補強リングによる対策検討 ($\beta=0.453$)

| Stiffener | Freq. Shift (Hz) | Max. disp. (μm) |
|-----------------|------------------|------------------------------|
| 1. Equator | -444 | 0.43 |
| 2. Wall center | -362 | 0.64 |
| 3. Iris | -227 | 0.68 |
| 4. Eq. + Iris | -124 | 0.26 |
| 4. Un-stiffened | -517 | 0.96 |

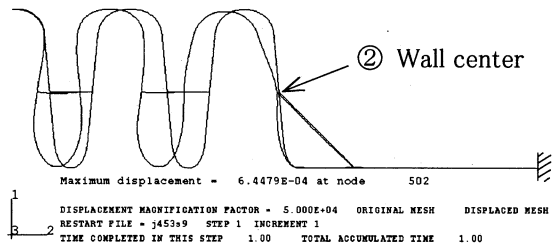


図9 変形状況 ($\beta=0.453$ 、Wall center 補強)

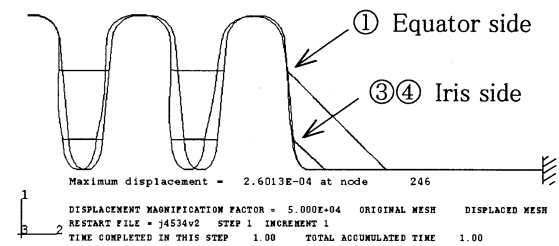


図10 変形状況 ($\beta=0.453$ 、Eq. + Iris 補強)

4. まとめ

単空胴モデルの動的解析では、加速電圧振幅と位相はローレンツ力による空胴の機械的振動とカップリングして大きく変動するため、帰還制御が必要と考えられた。5連空胴モデルによる静的解析では、ローレンツ力による多連空胴の周波数変化は単空胴と比べ 50Hz 増であることがわかった。また、 $\beta=0.453$ 空胴の解析では、多連空胴特有の大変形のため、反射電力を20%程度に抑えるには2重補強リングが必要であることがわかった。今後、実機空胴に近い多連化空胴をモデル化し、動的解析を試みていく予定である。

参考文献

- [1] M. Mizumoto, et al., "A High Intensity Proton Linac Development for Neutron Science Research Program", Proc. of the 1996 International Linac Conference, Geneva, Switzerland, (1996)
- [2] N. Ouchi et al., "Proton Linac Activities in JAERI", Proc. of the 8th Workshop on RF Superconductivity, Italy, 1997, to be published.