

# Heat-structure analysis of a 432 MHz RFQ Linac

Kazuo YOSHINO, Akira UENO and Yoshishige YAMAZAKI

National Laboratory for High Energy Physics, KEK

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

## ABSTRACT

A radio-frequency quadrupole (RFQ) linac is being developed as the preinjector of a 1-GeV proton linac for the Japanese Hadron Project (JHP). Since the rf duty of the RFQ is rather high (3%), the appropriate cooling of the cavity is essential for stable operation. On the other hand, there are many technical restrictions on manufacturing the water-cooling channels, since the cavity is long (about 2.7 m). In order to optimize the cooling method of the cavity, heat-structure analysis using the computer code ISAS2 was performed. The results of the two dimensional analysis are described in this paper. The maximum shift of the resonant frequency due to the rf power was less than 100 kHz.

## 432 MHz RFQリニアックの熱-構造解析

### 1. はじめに

現在、大型ハドロン計画 (JHP) の入射器である 1-GeV 陽子リニアックの研究開発が、KEK を中心に行われている。我々のグループでは、その初段加速器である 432 MHz RFQ リニアックの開発を進めている。

本 RFQ は、高周波電力のデューティが 3% と高く、空洞の長さが 2.7 m<sup>[1]</sup> と長いので、安定に運転するためには冷却も適切に行わなければならない。

空洞の組み立て方式としては、長手方向に 4 分割した空洞をボルトで組み合わせている。

そこで、ビーム軸方向に水路を設けることにし、発熱部にできるだけ近づけて冷却を効率的に行えるように考えた。この場合、ビーム軸方向の水温の変化による歪や周波数の変化も考慮しなければならない。

以上の問題点を踏まえ、種々の熱・構造解析を行った。本稿では、2次元熱・構造解析の結果を基に行った、冷却水路の位置及び大きさの最適化方法について述べる。

### 2. 冷却水路の熱-構造解析例

#### 2.1 解析条件

解析は総合構造解析コード ISAS2 (Integrated Structure Analysis System 2) を使って行った。

各水路の熱伝達係数  $\alpha$  は、次に示す Dittus-Boelter の実験式<sup>[2]</sup> を使って算出した。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

ここで、 $Re$  はレイノルズ数、 $Nu$  はヌセルト数、及び

$Pr$  はプラントル数である。

流速を早くすれば、冷却効率が高まるが、侵食作用も増大する。そこで流速は、侵食作用が問題とされないと考えられる 2 m/s を採用した。また、水路断面積は、管内流が乱流になる条件 ( $Re \geq 2300$ ) を考慮して決定した。

解析に際しては、流れは定常で線形・圧力降下は無視・物性値は一定、と仮定し、汚れ係数は含めなかった。解析モデルは対称性を利用して 1/4 空洞とした。

発熱量及び発熱分布は SUPERFISH<sup>[4]</sup> の解析結果を基に  $Q$  値の劣化を 40% と仮定して算出した。この計算では、平均発熱量は 19.7 kW である。水路は発熱の大きい部を中心に設定し、冷却水入口温度は 25.0 °C とした。

#### 2.2 熱解析結果

水路の半径  $R$ 、本数 (1/4 空洞当たり 1 または 2 水路)、位置 (中心軸から  $X$  方向の距離) の異なる以下の 6 モデルについて解析を行った (表 1 及び図 1 参照)。なお 2 水路については水は同方向に流すことにする。

冷却水がビーム軸方向に 2.7 m 進むまでの水温の上昇による影響を求めるため、各モデルにおいて、ビーム軸方向に 3 点 (2 分割) の断面を設定した。

また 2 水路モデルにおいて、冷却水温の変化を求めるために、空洞を多分割して考えた。ここでは、モデル 3 を 8 分割して、まず入口温度 25 °C で解析した結

表1 解析する6モデルの水路構成

	流量 [Liter /min]
モテ' #1(1本:X=60,R5)	9.42
モテ' #2(1本:X=85,R10)	37.68
モテ' #3(2本:X=46.8,R6:X=85,R10)	51.24 (13.56+37.68)
モテ' #4(2本:X=46.8,R6:X=107,R9)	44.08 (13.56+30.52)
モテ' #5(2本:X=58,R8:X=106.5,R8.5)	51.34 (24.12+27.22)
モテ' #6(2本:X=46.8,R6:X=117,R9)	44.08 (13.56+30.52)

果から、水路に流れ込む単位面積あたりの熱流束値を算出し、1区分当たりの水量から水の温度上昇分を求め、次の断面も同じ計算を繰り返して出口温度まで求めていった。

図2に解析と計算から求めたビーム軸方向への水温の上昇をのせた。8分割のモデル3が直線的に推移していたので、以後の2水路のモデルは2分割解析とした。図2において、モデル1は流量が特に少ないので、水温の上昇も特に急になっているが、その他のモデルは、ほぼ3℃以下に押さえられている。

各断面における空洞の最高温度はヴェイン先端に現われ、次に空洞内周が高くなっており、水路をヴェイン先端の近くにすると、ヴェインが冷やされて、2箇所温度差が少なくなり、温度分布が均一になる。

### 2.3 熱変形による共振周波数の変化

変形による共振周波数の変化の式は、SUPERFISHを使って、ベーン先端間の最短距離地点の変化量 $\Delta G$  [ $\mu$ m]と空洞内径の変化量 $\Delta R$  [ $\mu$ m]から(図3)、

$$\Delta f = (df/dR)\Delta R + (df/dG)\Delta G$$

$$= -7.5745\Delta R + 34.079\Delta G \quad \text{KHz}$$

と表される<sup>[4]</sup>。

以上の事を踏まえて、熱-構造解析の結果から、空洞の軸方向の位置に対するギャップの変化 $\Delta G$ を図4に、空洞内径の変化 $\Delta R$ を図5に示し、上式を使って算出した共振周波数の変化を図6に示す。

水路1本の場合、

モデル1は流量が少ないため、冷却不足が生じ、変形量も最も大きく、軸方向の傾きも大きい。従って軸方向の周波数変化が最も大きく現われており、現実的ではない。

モデル2では断面積を大きくとったため、全体(R方向)の変形が少なくなった。また、水路をベーン先端より遠ざけたので、相対的にベーン自身の膨張が大

きくなり、ギャップが狭まった。そのため $\Delta G$ の部分も周波数が下がる方向になったため、周波数変化の絶対値が大きくなったが、変形の傾きが小さいため軸方向の周波数変化は少なくなっている。

水路2本の場合、

モデル3は、ヴェイン先端に最も近づけた水路を追加して、できるだけヴェイン部分の変形を押さえる事を狙ったモデルである。従ってギャップの増減も少なくなり、流量が増えたことで全体の変形も押さえられている。また、変形に関しても絶対値や傾きが押さえられており、かなり有効な結果となった。

モデル4及び6は、モデル3において内側の水路だけで十分にヴェイン部は冷却されていると思われたので、外側の水路をより外に配置して、変形や周波数変化を押さえられるかどうか確かめたモデルである。水路を遠ざけるに従って、ギャップは僅かに狭まり、同じように周波数の変化も僅かに大きくなっている。しかし、R方向の変形はほとんどかわらず軸方向の傾きもほとんど同じ程度である。

モデル5はモデル4において、外側の水路はほぼ同じで、内側の水路を少し外よりに配置して、その影響を確かめたモデルである。外に遠ざけても断面積を大きくして補うようにした。しかし結果は、R方向が最も変形が押さえられたが、ヴェイン間のギャップが、更に開くようになり、周波数も下がった。従って、モデル5はモデル4に比べ利点はない。

### 3. まとめ

6モデルの熱解析の結果、モデル3が最も良好であるが、モデル1、2以外もいずれも軸方向の周波数の変化が少なく、100 kHz程度に押さえられていて遜色は少ない。ここでは、工作のしやすさや、組み立て用ボルト等との兼ね合いで、モデル6を採用することとなった。従って今後は、RFQハイパワーモデル用に3次元解析を行って、詳細な結果を求めていく方針である。

### 参考文献

- [1] A.Ueno et al.,1990 lin.Accel>Conf.Proc., LA-12004-C(1991)329
- [2] JHP-14, KEK Internal 90-16,27 (1990)
- [3] Dittus, F.W. and Boelter, L.M.K.,Univ. Calif. Publes. Eng., 2(1930),443
- [4] K.Halbach et al.,Part.Accel. 7,213 (1976)

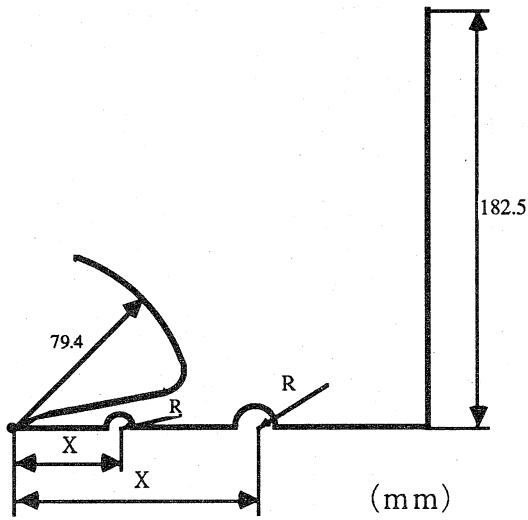


図1 解析モデルの水路位置

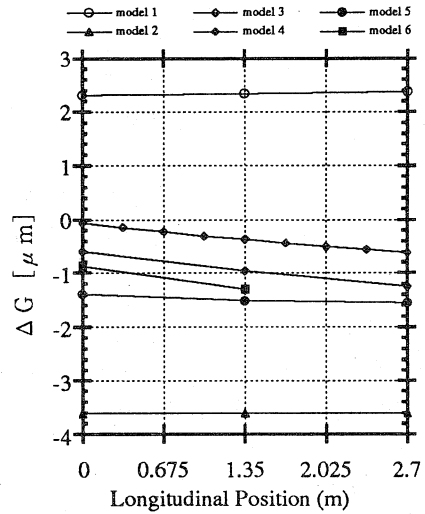


図4 各モデルにおけるビーム軸方向の位置とギャップの変化量 ( $\Delta G$ ) の関係

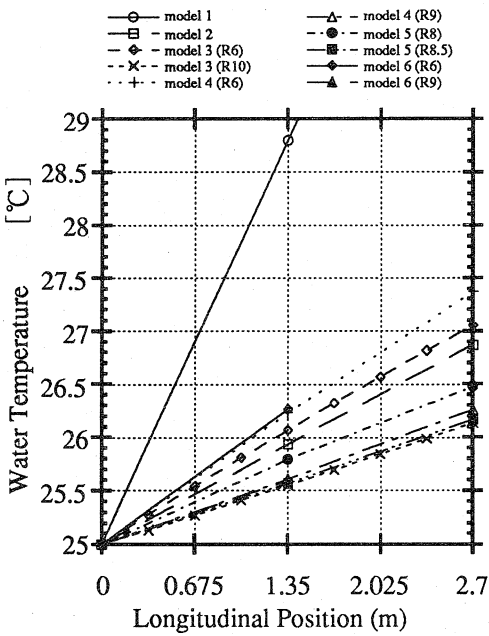


図2 各冷却水路におけるビーム軸方向の位置と水温の関係

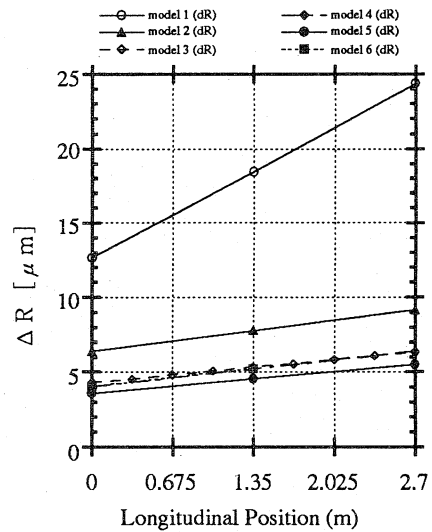


図5 各モデルにおけるビーム軸方向の位置と空洞内半径の変化量 ( $\Delta R$ ) の関係

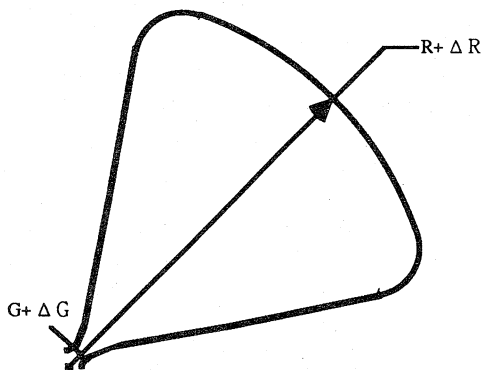


図3 共振周波数を求める為に使用した変形量  $\Delta G$ 、 $\Delta R$

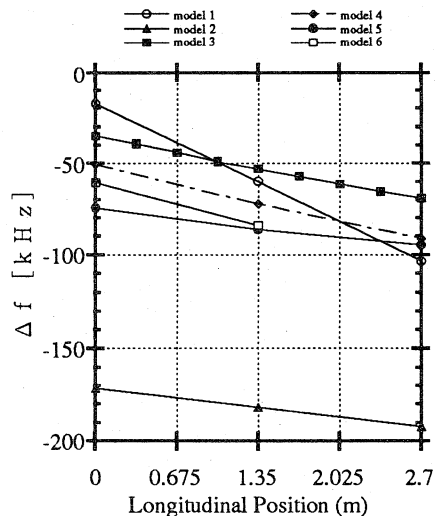


図6 各モデルにおけるビーム軸方向の位置と共振周波数の変化量 ( $\Delta f$ ) の関係