

## PRESSURE GRADIENT PROFILE OF fRC IN RIKEN RI BEAM FACTORY

Shigeru Yokouchi<sup>1</sup>, Nobuhisa Fukunishi, Akira Goto, Naohito Inabe  
Masayuki Kase, Hiromichi Ryuto, Naruhiko Sakamoto, Ysushige Yano  
RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science  
2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

### Abstract

Pressure gradient profile of the fixed-frequency Ring Cyclotron (fRC) in the RIKEN RI Beam Factory was investigated. In this report, the vacuum system of the fRC is presented, and also the calculation method of pressure gradient profile is briefly described. By using this method pressure gradient profiles are calculated and discussed. The calculation result certifies that the configuration of vacuum pumps in the fRC is proper.

## 理研RIビームファクトリーfRCの圧力分布計算

### 1. はじめに

リングサイクロトロンに要求される圧力はそのパラメータによって異なるが、一般に、 $1\mu\text{Pa}$ 前後の超高真空（非ベーク）である。リングサイクロトロンでは全体スペースの大部分を占める磁極箱（セクター電磁石部）に真空ポンプを設置することができないため、大きな排気速度を有するポンプを磁極箱間に分散設置し、集中排気することにより所要の圧力を達成せねばならない。しかしながら、磁極間隙が狭くコンダクタンスが小さいため、磁極箱内の圧力が平均圧力を押し上げることが懸念される。

放射光蓄積リングなどの長い管路に沿った圧力の計算手法として、諸元が一樣な要素ごとに管路を分割し要素境界間の関係から要素を記述する圧力式を定め圧力を求める方法がある<sup>[1]</sup>。今回、同様の手法をRIビームファクトリーの固定周波数リングサイクロトロン（fRC）<sup>[2]</sup>に適用して、平均半径周りのビーム方向に沿った圧力の計算をおこない、圧力分布の様子を調べた。

### 2. fRC真空系

fRCの平面配置図を図1に示す。真空容器は4基の磁極箱（セクター電磁石部）、2基の共振器および2基のバレー箱（うち1基はFT共振器付き）から構成される。fRC真空系では、 $^{238}\text{U}^{71+}$ のビーム通過効率を99%として、 $4\times 10^{-5}\text{Pa}$ の平均圧力が要求される。主排気ポンプとして口径500mmのクライオポンプが用いられている。共振器に各2台、バレー箱に各1台が設置され、真空容器全体の放出ガスを集中的に排気している。fRC真空排気システムの系統図を図2に示す。また、各真空容器の表面積と放出ガス量、および主排気ポンプの有効排気速度を表1に示す。

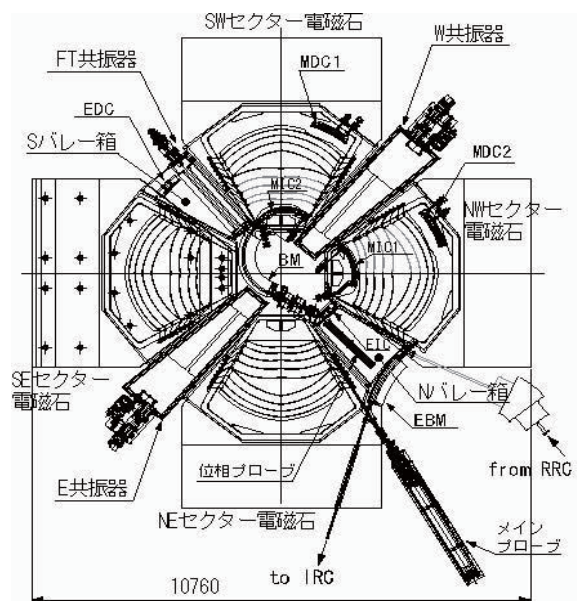


図1：fRC平面配置図

### 3. 圧力分布計算

#### 3.1 計算手法

図3(a)を参照して、要素の任意断面 $x\sim x+dx$ で流量の平衡と、流量と圧力差の関係を考えると、圧力 $p(x)$ の微分方程式は次式で表わされる。

$$C_u \times p'' - S_u \times p + Q_u = 0$$

ただし、 $C_u$ 、 $S_u$ 、 $Q_u$ は、それぞれ単位長さあたりのコンダクタンス、排気速度および放出ガス量で、すべて要素内で一定とする。fRCではすべての要素で $S_u=0$ だから、積分定数を $A$ 、 $B$ として圧力は、

<sup>1</sup> E-mail: yokouchi@riken.jp

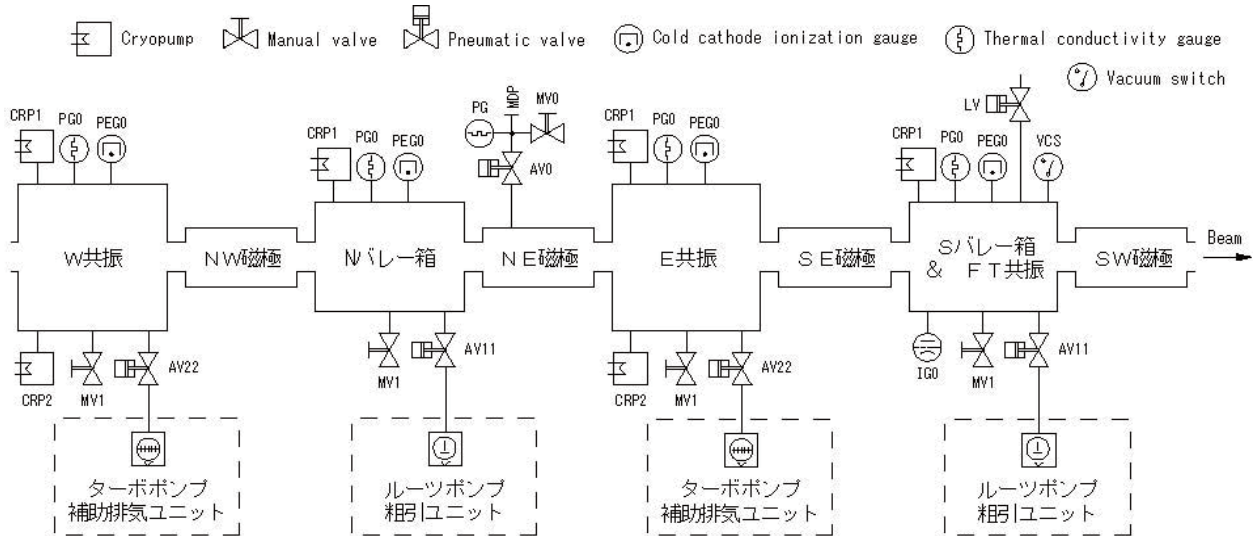


図2：fRC真空排気システム系統図

真空容器	表面積 [m <sup>2</sup> ]	放出ガス量*1 [Pa·m <sup>3</sup> /s]	有効排気 速度*2 [m <sup>3</sup> /s]
E共振器	95.1	8.0E-05	13.4
SE磁極箱	31.8	2.5E-05	
Sバレー箱	6.1	2.2E-05	11.4
FT共振器	21.0	2.6E-05	
SW磁極箱	33.1	2.8E-05	
W共振器	95.1	8.0E-05	13.4
NW磁極箱	32.6	2.8E-05	
Nバレー箱	17.3	2.7E-05	9.2
NE磁極箱	34.7	2.6E-05	
計	366.7	3.4E-04	47.5

\*1 放出ガス量は排気後100時間の値を想定

\*2 有効排気速度は空室ガスに対する値

表1：fRC真空諸元

$$p(x) = -Q_u/2 C_u \times x^2 + A \times x + B$$

また、流量 $Q(x)$ は次式となる。

$$Q(x) = -Q_u \times x + A \times C_u$$

要素数を $n$ として、前式を用いると要素の境界で次式が成り立つ (図3 (b))。

$$p_i(L_i) = p_{i+1}(0), Q_i(L_i) = Q_{i+1}(0) \quad (i=1,2,\dots,n-1)$$

$$p_n(L_n) = p_1(0), Q_n(L_n) = Q_1(0)$$

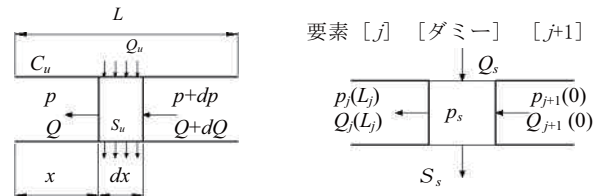
上の式は $A_i$ 、 $B_i$ を未知数 ( $2n$ ヶ) とする連立一次方程式を与えるので、これを解けばすべての要素の圧力の式 $p_i(x)$ が定まる。

集中排気部 (要素 $[j]$ と $[j+1]$ の間にある) については、ダミー要素を要素間におくことにより (図3 (c)) 次式が得られるので、この部分の方程式を入れ換えればよい。

$$p_j(L_j) = p_s = p_{j+1}(0)$$

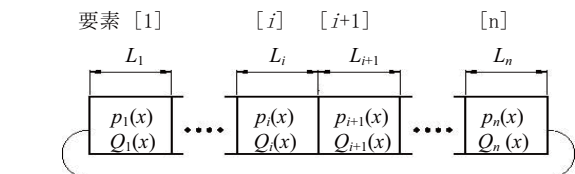
$$Q_j(L_j) + S_s \times p_s = Q_{j+1}(0) + Q_s$$

ただし、 $p_s$ 、 $S_s$ 、 $Q_s$ は、それぞれ集中排気部における圧力 (一様とする)、排気速度および放出ガス量である。なお、fRCではFT共振器にポンプがないので、集中排気部の関係式で $S_s=0$ として処理した。



(a) 要素のモデル

(c) ダミー要素のモデル



両端がつながっている

(b) 要素結合のモデル

図3：圧力分布計算モデル図

### 3.2 計算結果

fRCの圧力分布を図4に示す。要素数は30ヶで、要素はすべて矩形導管として近似した。ダミー要素数は5ヶ (うち1ヶは $S_s=0$ ) である。放出ガス量は排気後100時間の値を想定した。

平均圧力は $p_{av}=8.3 \times 10^{-6}$  [Pa]、最大圧力はSW磁極箱 (管路長 $x=5.32$  [m]) において $p_{max}=1.1 \times 10^{-5}$  [Pa] である。また、集中排気部での圧力はE共振器で $p_{RE}=7.6 \times 10^{-6}$ 、Sバレー箱 $p_{VS}=6.3 \times 10^{-6}$ 、W共振器 $p_{RW}=8.3 \times 10^{-6}$ 、Nバレー箱 $p_{VN}=6.3 \times 10^{-6}$  [Pa] である。

結果から、磁極箱の圧力が平均圧力におよぼす影響は軽微であり、本システムの分散集中排気構造は妥当と判断できる。

### 3.3 その他計算例

集中排気部での圧力について、計算値と実測値を比較した。ただし、絶対値での比較は難しいので、E共振器の圧力に対する比をとって比較した。図5に示すように、Sバレー箱で大きな不一致がみられる。試しにSバレー箱のガス放出量に10倍程度のガ

ス量を付加して計算すると、似た傾向のグラフが得られた。不一致の原因はいくつか考えられるが、一つにはリークの可能性もあり、その解明が今後の課題である。

Sバレー箱とFT共振器の圧力差が小さくなるように、FT共振器にも排気速度を与えて圧力分布を求めた(図6)。ただし、Sバレー箱、FT共振器の排気速度はそれぞれ5.2、6.3 [m<sup>3</sup>/s]とし、トータルの値がもとのSバレー箱の排気速度と同じになるようにした。圧力差は小さくなったが、トータルの排気速度が変わっていないので平均圧力は $8.1 \times 10^{-6}$  [Pa]とあまり改善されていない。

#### 4. まとめ

fRCの圧力分布計算をおこない、次の結果を得た。

- 1) 真空ポンプを設置できない磁極部の圧力が平均圧力におよぼす影響は小さく、fRCの分散集中排気構造の妥当性が確認された。
- 2) 実測値との相対比較をしたが、不一致がみられた。原因解明は今後の課題である。

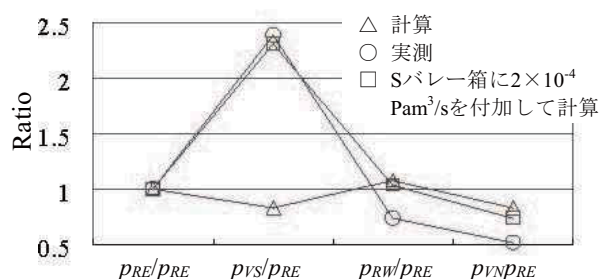


図5：計算と実測の比較

3) FT共振器に排気速度を与えて隣接するSバレー箱との圧力差を小さくしても、トータルの排気速度を変えなければ平均圧力をさげる効果は小さい。

#### 参考文献

- [1] H. Sakamoto et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 22 (1988) 288
- [2] N. Inabe et al., "Fixed-Frequency Ring Cyclotron (fRC) in RIBF", 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, October 2004, p. 200.

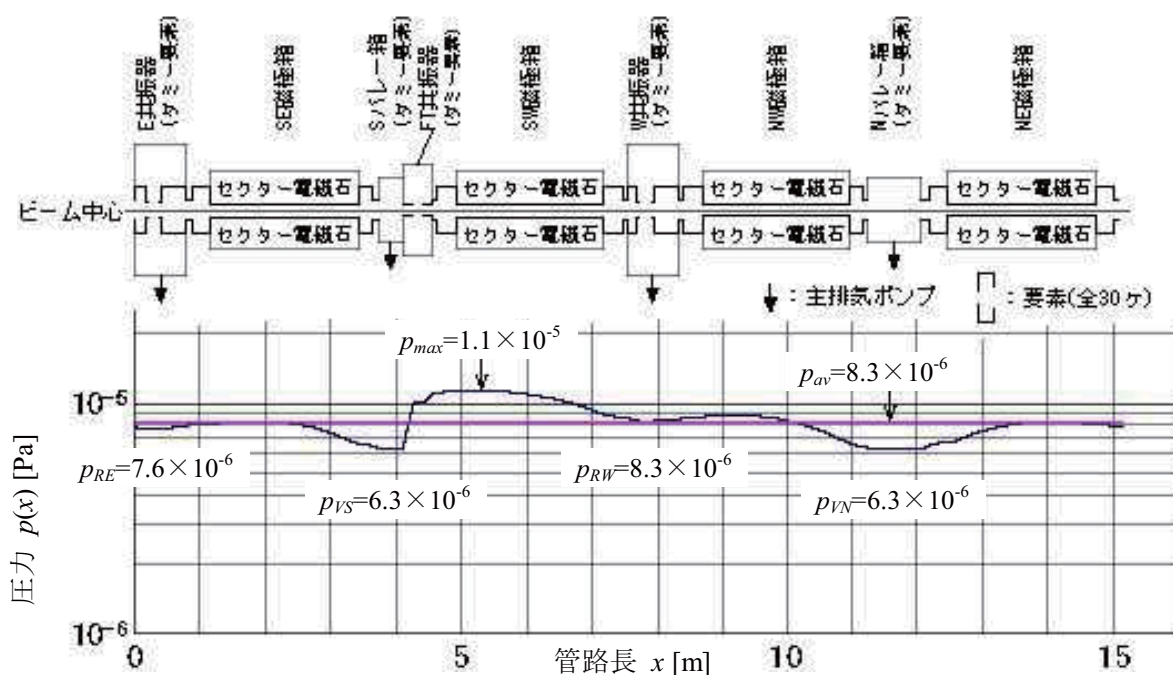


図4：fRC圧力分布

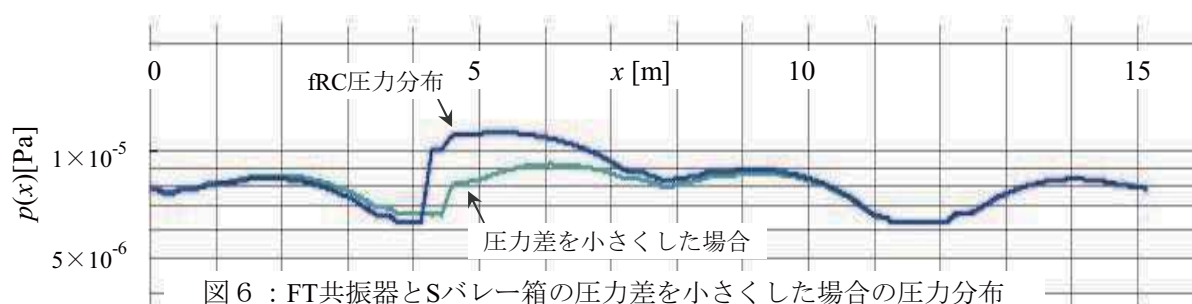


図6：FT共振器とSバレー箱の圧力差を小さくした場合の圧力分布