

ANALYSIS OF ACCELERATED ORBIT IN THE RCNP AVF CYCLOTRON

Noriaki Hamatani*, Hiroshi Ueda, Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita,
Mitsuru Kibayashi, Yuusuke Yasuda, Keita Kamakura
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

Abstract

The isochronous magnetic field of the RCNP AVF cyclotron was evaluated by calculating the equilibrium orbits with magnetic field data which was measured when the AVF cyclotron was constructed. However the number of the excitation levels was limited and the accuracy of interpolation was not sufficient, so we could not analyze the accelerated orbit in the cyclotron precisely. Recently we have been able to calculate three dimensional magnetic fields in detail by using finite element method. Then, we have started to re-analyze accelerated orbit from injection to ejection in the calculated fields.

We have approximately been able to obtain currents of the main coil and 16 trim coils to generate the isochronous field for 65MeV protons. Now we are analyzing the accelerated orbits for non-central particles. We are also analyzing the extraction orbits through channels and are investigating the optimum conditions to extract high quality beams in high efficiency.

RCNP AVF サイクロトロンにおける粒子加速軌道の解析

1. 概要

大阪大学核物理研究センター(RCNP)には AVF サイクロトロンと Ring サイクロトロンの 2 種類の粒子加速器がある。粒子を高エネルギーまで加速する際にはこの AVF サイクロトロンを Ring サイクロトロンの入射器として用いる一方、比較的エネルギーの低いビームが必要である場合には AVF サイクロトロンのみで粒子を加速する。したがって AVF サイクロトロンは、RCNP でのビームの生成において非常に重要な役割を果たしており、AVF サイクロトロンにより生成されるビームの高品質化は不可欠である。

これまで、AVF サイクロトロンの等時性磁場は建設時に測定された磁場データを用いた平衡軌道の計算から求められていた。しかし、測定の励磁点数が限られており内挿の精度が十分ではなく、加速軌道の解析を詳細に行えなかった。最近、有限要素法(FEM)により AVF サイクロトロン磁場の三次元解析が可能となった。計算で得られた磁場を用いて、Runge-Kutta-Gill 法により入射から取出しまでの加速軌道の詳細な検討を始めている。

これまでの解析により、65MeV 陽子を最外周まで導く等時性磁場を作成するための主コイルと 16 本のトリムコイルの電流値をおおよそ確定することができた。現在は中心軌道の周りの粒子のベータatron 振動及びビーム取出し軌道についての解析を進めており、高品質ビームの高効率取り出し条件を探索している。



図 1 : RCNP の AVF サイクロトロン (左) と Ring サイクロトロン (右)。

2. 等時性磁場

2.1 等時性磁場の生成

等時性磁場を以下の手順で生成した。電磁場中における荷電粒子の運動を記述する微分方程式を Runge-Kutta-Gill 法を用いて数値的に解く。その際、主コイルとトリムコイルの電流値をある初期値に設定し、加速周波数の設定値を微調整しながら加速軌道計算を行う。その計算結果をもとに各コイルの電流値を微調整し、FEM で計算された磁場を用いて再び軌道計算を行う。このプロセスを繰り返すことにより、65MeV 陽子を加速する条件を探索した。

図 2 に AVF サイクロトロンの断面図および軌道計算の座標基準をしめす。陽子がディー電極からダミーディー電極の方向に加速間隙を通過する際の、間隙中心における位相の軌道半径依存性を図 3 に示す。

2.2 磁場計算モデル

AVF サイクロトロンの磁場の三次元解析には、有限要素法計算プログラム TOSCA を用いている。

* hamatani@rcnp.osaka-u.ac.jp

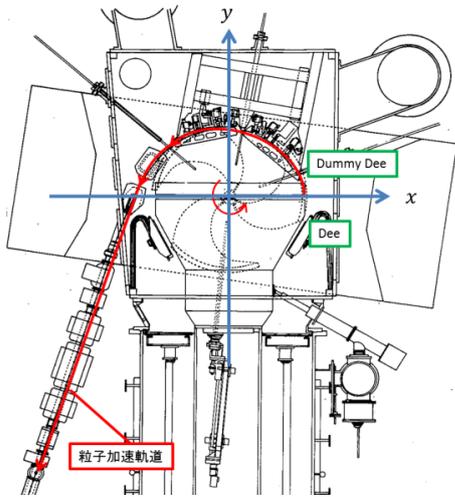


図 2 : AVF サイクロトロン の 断面 図。

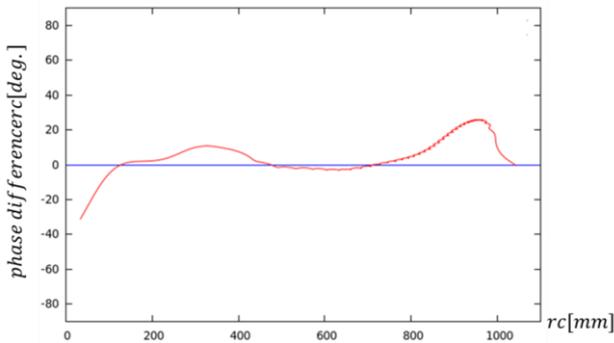


図 3 : 陽子 が ディー電極 から ダミーディー電極 の 方向 に 加速 間 隙 を 通 過 す る 際 の、 間 隙 中 心 に お け る 位 相 の 軌 道 半 径 依 存 性。

図面をもとに AVF サイクロトロン の FEM モデル を 作 成 し た。 図 4、 5 に 作 成 し た モデル と メッシュ を 示 す。 サイクロトロン の 磁 極 や ヨーク に は SS400、 S10C な の の 磁 性 体 が 用 い ら れ て い る。 こ れ ら の B-H 曲 線 を 図 6 に 示 す。 磁 場 解 析 に は こ れ ら の データ を 用 い た。



図 4 : AVF サイクロトロン の FEM モデル。

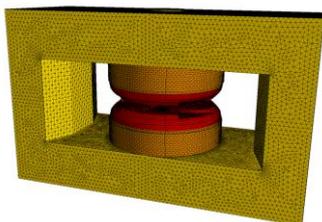


図 5 : EFM メッシュ。

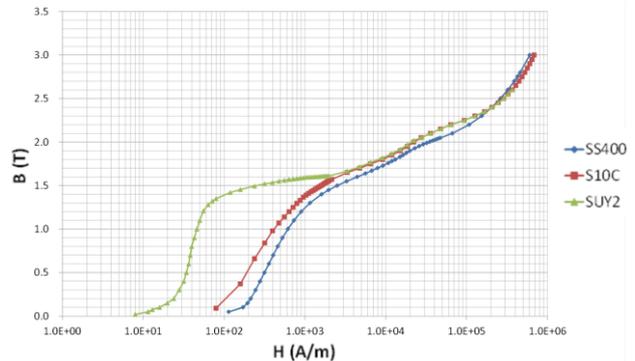


図 6 : 磁 性 体 の B-H 曲 線。

2.3 計算結果と測定磁場との比較

前 述 し た プロセ ス で 求 め た 等 時 性 磁 場 の 方 位 角 度 平 均 を 図 7 に 示 す。 測 定 データ を 用 い た 平 衡 軌 道 の 計 算 を も と に 求 め ら れ た 等 時 性 磁 場 を あ わ せ て 示 し て あ る。 両 者 の 差 を 図 8 に 示 す。

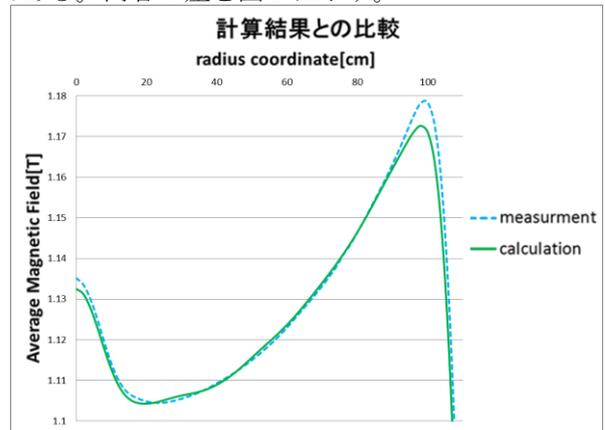


図 7 : FEM 計 算 結 果 (実 線) と 測 定 データ から 求 め ら れ た 磁 場 (点 線)。

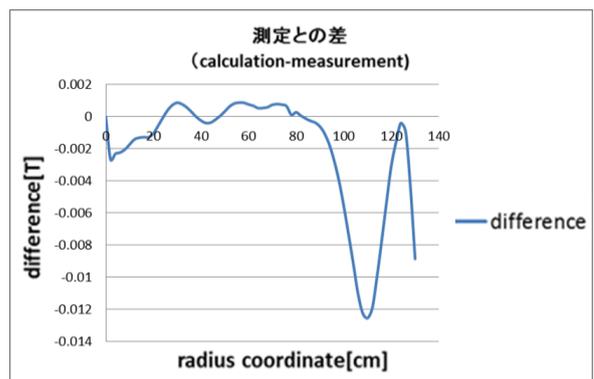


図 8 : 測 定 値 と 計 算 結 果 の 差。

3. 粒子軌道解析

3.1 加速軌道計算

RCNP の AVF サイクロトロン に お け る 荷 電 粒 子 の 加 速 軌 道 を、 Runge-Kutta-Gill 法 と Lagrange 4 点 補 間 法 を 用 い て 計 算 す る シミュレーション プログラム

を作成した。プログラム言語は Fortran を使用した。このプログラムは、まず磁場解析により得られたデータを読み込み、Lagrange 4 点補間法によって内挿を行う^[1]。その結果をもちいて電磁場中における 3 次元運動方程式を Runge-Kutta-Gill 法を用いて数值的に解く形になっている。図 9 に軌道計算結果の一例を示す。

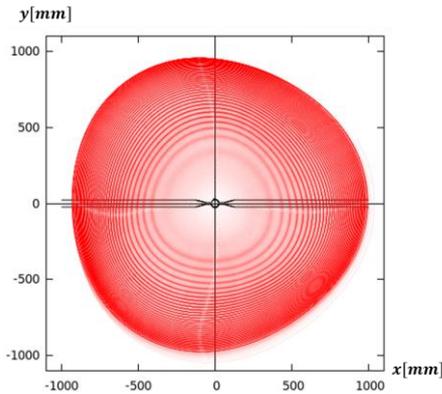


図 9 : RCNP AVF サイクロトロンにおける 65MeV 陽子の軌道計算の結果。

3.2 中心軌道の周りの軌道の解析

実際の荷電粒子の加速においては、粒子が加速器へ入射する位置や方向は中心粒子の周りに分布しており、ベータトロン振動する。特に、入射及び取り出し半径付近での振動の振幅はビームのロスの評価の上で重要である。

現在、AVF サイクロトロンへの入射位置をスパイラルインフレクターの中心軌道から少し外れた位置に設定し、ベータトロン振動及びビーム取出し軌道について解析を進めている。図 1 0 に図 1 1 で用いている初期変位“da”の定義を示す。

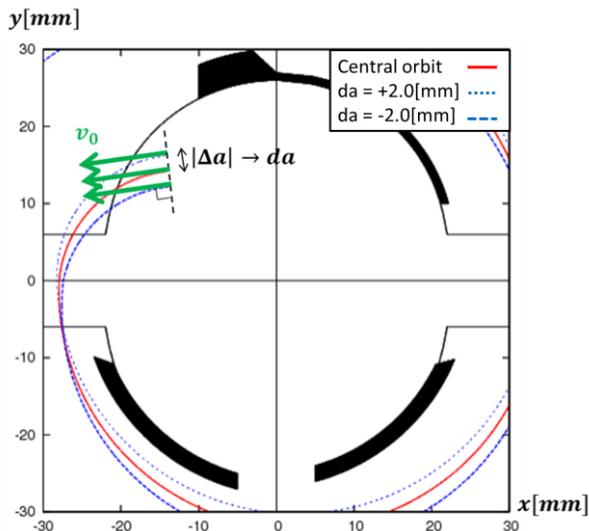


図 1 0 : 図 1 1 で用いている初期変位“da”の定義。中心領域より外側の場合を $da > 0$ としている。

$da = \pm 2.0[\text{mm}]$ として軌道計算を行った。その時の中心領域の計算結果を以下の図 1 1 に示す。赤色で示した中心軌道の周りを、 $da = \pm 2.0[\text{mm}]$ とした軌道が振動していることが分かる。

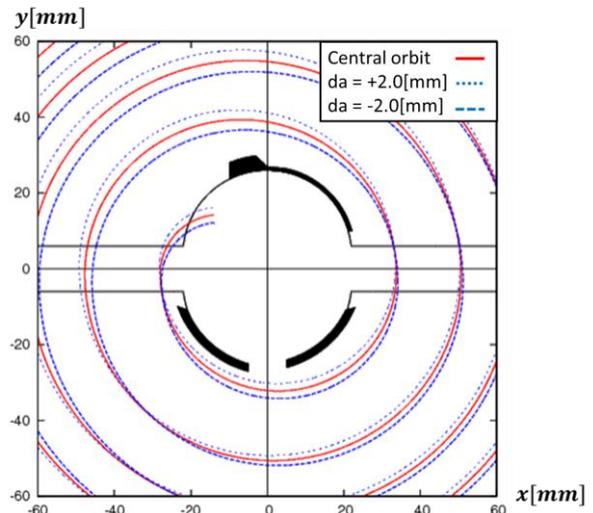


図 1 1 : $da = \pm 2.0[\text{mm}]$ としたときの中心領域の軌道計算の結果。黒色部はダミーディーインサート（上）とディーインサート（下）の電極。

4. 課題と今後の予定

現在行っている解析では、AVF サイクロトロンへの入射位置（スパイラルインフレクター出口）を初期条件としている。今後はインフレクターの上流まで遡って解析を進めていく予定である。AVF サイクロトロンのアクセプタンスをシミュレーションから求め、測定結果と比較する。

また、今年度中に AVF サイクロトロンの加速箱出口位置に、横方向の収束を与えるためのグラディエントコレクターを導入する予定である。ビーム取出し半径付近の解析と併せて、グラディエントコレクターを導入した際の軌道についても解析を行っていく。

参考文献

- [1] John Livingood, “Principle of Cyclic Particle Accelerators”
- [2] 理化学研究所, “「加速器におけるビーム物理」講義録”
- [3] http://akitanc.jp/yamamoto/lecture/2003/5E/lecture_5E/Lagrange_Spline/node2.html#SECTION000210000000000000