

RCNP リングサイクロトロンフラットトップ空洞電場解析と密同調システム改良

ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD AND IMPROVEMENT OF THE FINE TUNER FOR FT CAVITY IN THE RING CYCLOTRON IN RCNP

安田裕介[#], 畑中吉治, 福田光宏, 依田哲彦, 植田浩史, 斎藤高峯, 森信俊平, 田村仁志
Yusuke Yasuda[#], Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroshi Ueda,
Shunpei Morinobu, Hitoshi Tamura
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

Flat-Top(FT) cavity in the ring cyclotron at RCNP was improved in March, 2014. The fine tuning system was changed from the system with a cylindrical block (compensator) to the one with the shorting panels. Its purpose was to make it easy to modify the frequency and to decrease the influence on the electric field and the impedance of the cavity when the fine tuning works. The shorting panels not only change the resonant frequency but also modulate the frequency and keep an impedance phase. The cylindrical block was also improved to be used in modifying the accelerating electric field. The electric field in FT cavity was studied to design the improvement plan by the simulation before this work. The new fine tuning system worked for a time but it is necessary to be optimized. The examination of the electric field by the modified cylindrical block is in the planning stage.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では、AVF サイクロトロンとリングサイクロトロンが稼働しており、陽子ではAVFサイクロトロンの単独運転で 65MeV、さらにリングサイクロトロンの運転で 400MeV までビームを加速し、実験、照射を行っている。

リングサイクロトロンには3台の加速空洞の他にフラットトップ (FT) 空洞が設置され(Fig. 1)、加速空洞の3倍波を用いた加速エネルギー補正を行っており、 $\Delta E/E \sim 0.01\%$ のエネルギー幅を実現している。

RCNP では2014年1月から3月にかけて老朽化箇所の改修とビームの高強度化、高品質化に向けた加速器と入出射系の改良およびビームラインの新設工事などを行った^[1,2]。この際、FT 空洞をより安定かつ効率的な運転ができるように改良を行った。以下では、FT 空洞の概要、これまで FT 空洞が抱えていた問題と FT 空洞の電場解析の結果、今回の工事での改良点、改良後の性能を示す。

2. FT 空洞概要

FT 空洞の主な仕様を Table 1 に、概略図を Fig. 2 に示す。FT 空洞は単純には箱型の構造をしており、 $H_{101}=TE_{110}$ モードで周波数 90-155MHz、約 50kV の高周波電場を印加し、粒子のエネルギー補正を行っている。共振周波数の変更(粗同調)は主に共振器上下のショート板パネルを上下して行い、それとは別に円筒型ブロック(コンペンセータ)を空洞内に出し入れすることで補助調整(密同調)

を行ってきた。導入管から加速空洞への結合は L 結合(Inductive coupling)である。



Figure 1: A whole view of the ring cyclotron at RCNP. FT cavity, its power feeder, and the amplifier cabinets are seen from the center to the lower right in the picture.

Table 1: Specification of FT Cavity

Type	Single gap resonator
Operating frequency	90 – 156 MHz
Frequency tuning system	Shorting panels
Max. output power	45kW
Max. gap voltage	70kV

[#] yuusuke@rcnp.osaka-u.ac.jp

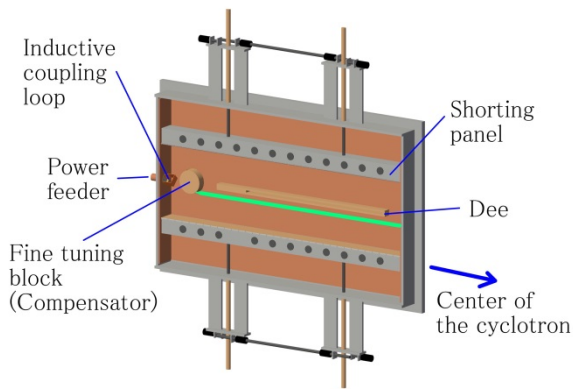


Figure 2: Schematic view of FT cavity in the ring cyclotron at RCNP.

3. 問題点

共振周波数の密同調装置である円筒型ブロック（以下コンペンセータ）は直径 310mm で、加速器中心から見て Dee 電極の外側でリングサイクロトロン Median plane 上に位置している。さらにその外側の壁面にはパワーフィーダーからの入力結合がある (Fig.2 参照)。自動同調時には、周波数を一定にし、入力インピーダンスを 50 Ω に保つように、空洞内ピックアップからの信号、パワーフィーダーへの反射信号を基にパルスモーターによってコンペンセータが出し入れされていた。

以前から、変調周波数幅が狭いこと、コンペンセータの位置によってインピーダンス変化の特性（L性およびC性）が変わってしまうことが指摘されており、周波数によって自動同調時の応答方向（L性、C性）を切り替えて運転していた。これについて 3次元電磁場解析ソフト SOPRANO/EV(Opera-3d)を用いてコンペンセータの位置と周波数の変化を計算した (Fig. 3)。コンペンセータの駆動範囲は先端位置が空洞壁面から 65mm ~ 165mm (0mm が壁面に一致し空洞内に全く入っていない状態)の 100mm であったが、その間で、周波数の変わり方の向きが変わっていることが Fig. 3 から分かる。このため、改良前はコンペンセータを先端 90mm 付近で駆動範囲を約 10mm 程度(変調幅約 6kHz)にして運転していた。また、さらなる補正のために、側板に流す冷却水の温度を調整して周波数補正を行っていた。

実機の測定では、コンペンセータの位置と入力インピーダンスには相関があり、同調をとるためにコンペンセータが動くと整合が取れなくなることが確かめられている。また、Median Plane 上にあるコンペンセータを動かすことにより、電場分布が変わり、ビームに影響することが考えられた。

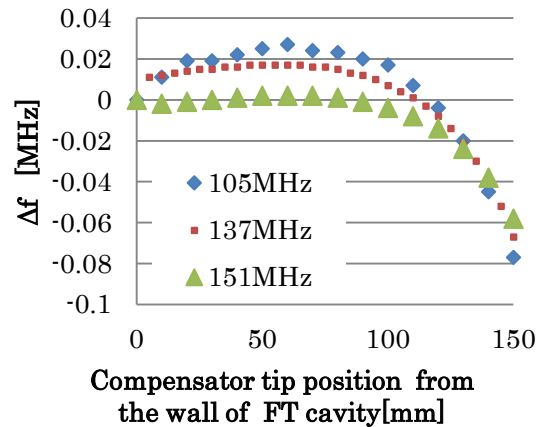


Figure 3: Frequency variations by the fine tuning block (compensator) at three resonant frequencies by the simulation. It is noticeable that frequencies don't vary in the one direction when the fine tuning block goes into the cavity.

4. 改良内容

4.1 密同調装置の変更

密同調装置をこれまでのコンペンセータから別の方式に変更することが今回の改良で最も大きな課題であった。これまでの装置の問題点から、①周波数の変調の向きが動作の向きと一定の関係であること、②これまでより周波数の変調範囲を広くとること (200-300kHz)、③密同調装置を動かしても電場分布への影響が小さいこと、を念頭に検討を行った。

検討中の電場計算の結果からは、空洞内で小さなものを動かすと周波数の変化が小さい反面電場分布への影響が大きいことが分かった。そこで、上下のショート板パネルを微動させることにより自動同調時に密同調装置として使用することが提案された。以前のコンペンセータと新たに採用したショート板パネルによる周波数補正の性能について電磁場計算を行い比較した結果を Fig. 4 と Table 2 に示す。Figure 4 では、基準となる状態 (空洞高さ 600mm、コンペンセータ先端位置 135mm) に対して、①コンペンセータを 50mm 引き出した場合(青線)、②上下ショート板を 1mm ずつ内側に動かした場合 (赤線)に、基準の状態から電場分布が何%変わったかを加速ギャップの中央を通る空洞の中心 (Fig. 2 緑線) にそって示した。空洞内半径側が 0mm である。このとき、①は 0.03MHz、②は 0.4MHz 変調し、電場分布はそれぞれ加速領域内の最大で①0.7%、②0.5% 変動している。位相を ±1° で制御する場合それぞれ① ±5 × 10⁻³ %、② ±3 × 10⁻⁴ % の変動となり、新方式では電場への影響を約 1桁小さくすることができると分かった (Q=1 × 10⁴ を仮定)。機械的にはモーターを交換し、さらに減速機を取り付けることで、上下ショート板パネルの移動分解能を 1 μm 以下にすることが可能との意見を受け、この方式を採用することとなった。

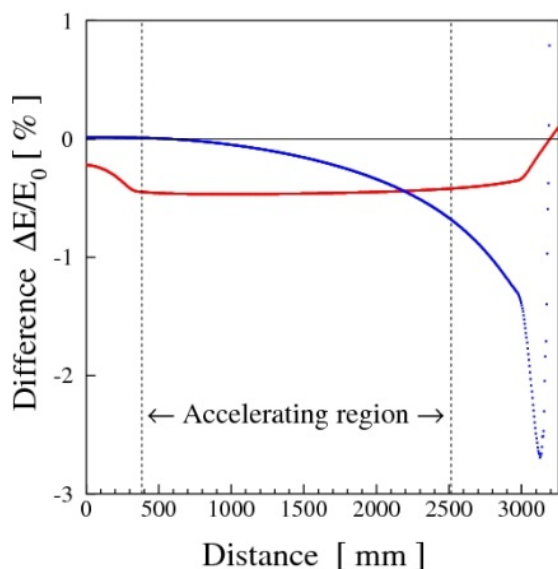


Figure 4: Differences of the electric field from a standard one obtained by simulations when the old or new fine tuning system works. The horizontal axis shows the distance from the inner wall on the center line of the cavity (the green line in Fig. 2). When the old system (tuning block, blue line) moves 50mm, it varies 0.03MHz in the frequency and modifies the electric field at 0.7% at the maximum in the accelerating region. When the new fine tuning system (shorting plates, red line) moves 2mm, it varies 0.4MHz and modifies the electric field at 0.5% at the maximum.

Table 2: Comparison between the Old and New Fine Tuning Systems at around 150MHz by the Simulation

	Old Compensator system	New fine tuning system
Tuner action	135mm→85mm (tip position)	U/D panels move 1mm toward the center
Δf	0.03 MHz	0.4 MHz
$\Delta E(\max)$	0.7 %	0.5 %
$\Delta f/\text{mm}$	0.5 kHz	0.3 MHz
Required mechanical resolution for 0.2kHz (1deg. in the impedance)	300 μ m	0.5 μ m

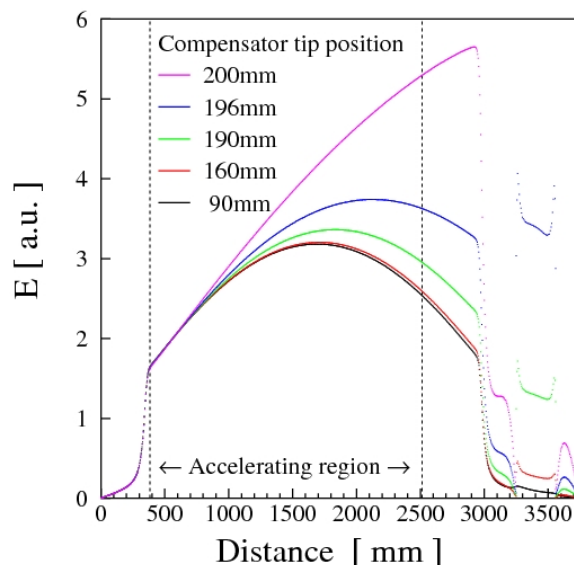


Figure 5: Simulated electric fields when the compensator block enters the cavity at about 150MHz. The tip positions of the block are 90mm(black), 160mm(red), 190mm(green), 196mm(blue), and 200mm(purple). The electric field begins to vary extremely when the tip of the block gets over 190mm.

4.2 コンペンセータブロックの改良

自動同調による周波数補正を上下ショート板パネルに行わせることとし、コンペンセータの円柱ブロックはブロックを延長して電場分布の補正に使用することとした。これは、FT 空洞の電場分布をメインの加速空洞の分布に近づけることで、ビーム加速の調整をしやすくすることが目的である。メイン加速空洞は加速ギャップの範囲で半径が大きくなるにつれて単調に高周波電場の強度が増加するのに対し、FT 空洞では途中で極大になり半径が大きい部分で電場強度が下がっていた。コンペンセータブロックの先端位置を変えて計算して得られた電場分布 Fig. 5 に示す。

Figure 5 から、コンペンセータブロックを FT 空洞内部に入れていくと半径が大きい側の電場強度が上がり、加速ギャップ範囲内で単調増加の形を作ることができることが分かる。検討の結果、コンペンセータブロックの先端を 135mm～235mm の範囲で動かせるように改良した。円柱ブロックの位置は加速周波数ごとに固定して使用する。

4.3 制御系の PLC 化

制御系については、これまでコンペンセータの手動制御は手作り回路でパルスモーターを駆動しており、全体の制御系に含まれておらず、操作がしづらかった。また、今回、上下ショート板パネルの駆動モーターを変更し、さらに自動同調に対応する必要があったため、FT の全駆動と自動同調のシーケンス部分を PLC に行わせることにし、全体の制御系下

に置いた。

4.4 コンタクトフィンガーの向きの変更

上下ショート板パネルのコンタクトフィンガーの向きを変更した(Fig. 6)。これは、コンタクトフィンガーと空洞壁面の隙間で起こると考えられるマルチパクタリングを防ぐためである。

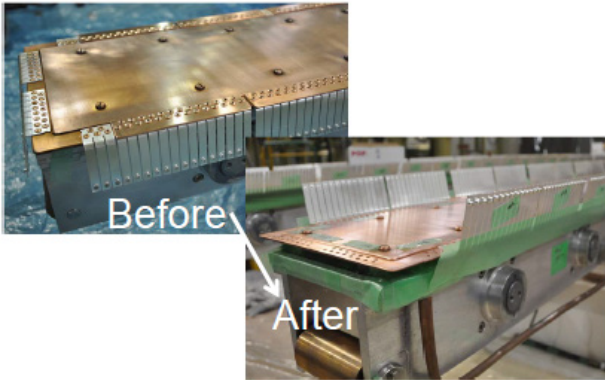


Figure 6: Photographs of contact fingers on the shorting panel before and after the work.

5. 改良後の性能とまとめ

上下ショート板による周波数補正については、自動同調の運転条件の最適化を目指して R&D を続けながら約 2 か月半運転を行った。これまでの結果、入力インピーダンス位相への応答は約 $2 \mu \text{ m/deg}$ である。Table 2 にある予想値の $0.6 \mu \text{ m/deg}$ と比べて数倍の違いがある。新しい自動同調によって安定して運転できたこともあったが、PLC の自動同調システムのトラブルもあり、安定した運転にはパラメータの最適化等さらなる R&D が必要である。

改良したコンペンセータによる電場分布の補正はこの 2 か月半の運転期間には試験することができず、コンペンセータは内部から最も引き出した状態で運転を行った。運転期間終了後、陽子 392MeV の運転条件(152MHz)で試験した際には、コンペンセータは目標の位置まで入れることができなかった。これは、コンペンセータを大幅にいれた位置では入力カップラーを振っても入力インピーダンス 50Ω の条件を探し出せなかったからである。FT 空洞の改良工事の直後、ネットワークアナライザーにより FT 空洞の 50Ω 整合する条件を調べ、コンペンセータをある程度空洞内にいれた場合でも 50Ω 整合をとることができることを確認していたが、この運転条件では測定を行っていなかった。今後は運転周波数ごとのローレベル測定を行い、それをもとに運転状態での空洞で電場分布を改善する条件を探すことが必要である。

参考文献

- [1] K. Hatanaka, *et al.*, Proceedings of this conference.
- [2] T. Yorita, *et al.*, Proceedings of this conference.