

RCNP AVF サイクロトロン新 RF 共振器立ち上げの現状

STATUS OF THE NEW RF CAVITY FOR THE AVF CYCLOTRON IN RCNP

安田裕介[#], 福田光宏, 畑中吉治, 関亮一, 森信俊平, 齋藤高嶺, 依田哲彦, 神田浩樹, 友野 大, 田村仁志, 永山啓一, Koay HuiWen, 森田泰之, 武田佳次朗, 原隆文, 荘浚謙, Zhao Hang, 橋高正樹, 松井昇大朗
Yusuke Yasuda[#], Mitsuhiko Fukuda, Kichiji Hatanaka, Ryoichi Seki, Shunpei Morinobu, Takane Saito, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Dai Tomono, Hitoshi Tamura, Keiichi Nagayama, HuiWen Koay, Yasuyuki Morita, Keijiro Takeda, Takafumi Hara, TsunHim Chong, Hang Zhao, Masaki Kittaka, Shotaro Matsui
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

In RCNP, the new RF cavities and power amplifiers were installed in the AVF cyclotron. The upgraded AVF cyclotron has two cavities with 90 degrees dee electrodes instead of the previous cavity with 180 degrees dee electrode. The new RF system utilizes frequencies ranging from 17 to 37 MHz. The commissioning of the new RF system was started around the end of 2021, and that of particle acceleration by the AVF cyclotron was also started in March 2022. The RF system has faced some problems in the process of making the dee voltages up and the dee voltage of 50 kV was achieved at only one RF frequency. Some undesirable resonances around the power amplifiers have been observed. The examination into the resonances and the treatment for avoiding them will be discussed.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、2019 年度から AVF サイクロトロンの高機能化工事を実施し、2022 年 3 月からビーム加速を再開した[1]。

高機能化工事の中で AVF サイクロトロン RF 加速部分は、1 ターンあたりのエネルギーゲインを上げるため、これまでの 180 度ディー共振器 1 台を廃し、新たに 90 度ディー共振器 2 台を導入した。これまでは、励振周波数 6~18 MHz で、主にハーモニクス 1 での加速を行っていたが、新しい 2 台の共振器では、17~37 MHz の励振周波数で、主にハーモニクス 2、3 での加速を行う。

新しい RF アンプと共振器の組み合わせで、Dee 電圧 50 kV 以上を目指して調整を続けているが、目標到達は一部周波数にとどまっている。

励振周波数によっては、RF アンプから共振器との間で 2 倍波、3 倍波が大きくなる状況となり、アンプ内部での放電、出力同調用の真空可変コンデンサや電力伝送同軸管で焼損トラブルが発生した。加速箱内部では、放電痕が広範囲で確認でき、RF パワーが Dee 電極の電圧以外に損失していることが予想された。

2. 加速箱内の改修

AVF サイクロトロンの高機能化工事の中で、マグネット上ヨークをリフトアップするリフターを復活させた。これによって、加速箱天板が上ヨークとともに上昇するので、我々は加速箱内部に容易にアクセスできるようになった。

2021 年 12 月から本格的に励振を始め、励振後に加速箱内部を確認すると、ディー電極から見て、ダミーディーの裏側の領域に放電痕が広範囲に広がっていた。また、加速箱内部からビーム電流を読み出すための

フィードスルーが多数あるが、そこに取り付けたターミネーターや信号読み出し用に取り付けたローパスフィルターの素子が焼損するなどした。これらの状況から、RF がダミーディーの裏側、さらにはフィードスルーを通して加速箱の外へ漏れ出していることが分かった。また、マルチパクタリングが疑われる箇所も見られたことから、加速箱内部では、あらためて Dee 電極の回りを見直し、コンペンセータ電極の作り直しやダミーディーを延長した位置への RF シールドの設置、コンペンセータやグラディエントコレクタの機器駆動部に RF シールドを追加した。



Figure 1: Inside of the AVF cyclotron chamber. Two dee electrodes can be seen.

3. アンプから共振器

Figure 2 に RF メインアンプから共振器までの概略図を示す。共振器にパワーを入れるのは、真空管 Eimac 4CW100,000E を用いたメインアンプで、ここでワイドバンドアンプからの RF 信号を増幅し、C カプラーを介して共振器にパワーを入れている。アンプから共振器へは同軸管でパワーを送っている。アンプ内部については、ピック

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

アップを介してプレート信号をモニターし、アンプから共振器の間では、方向性結合器によって入力および反射の RF 信号をモニターしている。

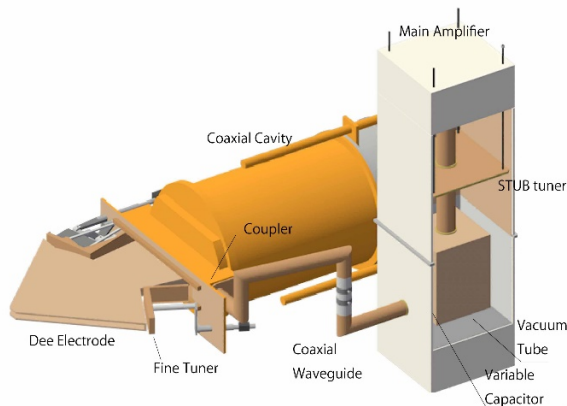


Figure 2: Schematic view of the cavity with new 90 degrees dee electrode and the power amplifier for AVF cyclotron in RCNP.

コンディショニングを進める中で、励振周波数 36.09MHz での励振では、アンプ内の出力同調用真空コンデンサや同軸管内部で放電や焼損トラブルに見舞われた。36.09 MHz では、プレートピックアップ信号において、2 倍波が大きくなるのが観測されていた。

また、励振周波数 33.69 MHz では、プレートインピーダンスを大きくしてアンプの出力を上げようとすると、カップラー部での同調がとれず、パワーが入れられなかった。このとき、プレートピックアップ信号においては特に 3 倍波が大きくなっていた。

3.1 インピーダンス測定

プレートピックアップ信号で 2 倍波、3 倍波が大きく観測されたことから、アンプからカップラーの間で、基本波以外の共振点の存在を調べるため、アンプでプレートインピーダンスの測定を行った。測定は、ベクトルインピーダンスメーター (Hewlett Packard 4193A) を使い、プローブでアンプ内部の内導体(プレート出力側)と外導体(グランド側)の間のインピーダンスを測定した。

Figure 3 は、アンプを 33.69 MHz 励振時の状態にして測定したインピーダンスを示している。Figure 3 では、アンプ単体での測定と、アンプ、同軸管および共振器までを含めた測定をプロットしている。アンプ単体のインピーダンスを測定する際は、アンプから出た同軸管の先で 50 Ω 終端して測定を行った。

アンプ単体では、33.69 MHz 付近で位相が正の領域から負の領域へ行って戻る共振の位相変化と 110 MHz 付近で位相が変化する様子が見られる。これに、共振器までを接続すると、位相が負の領域へ行って戻る共振がさらに 4 つ現れることが分かる。特に、70 MHz 付近の共振は、周波数が 36.09 MHz の 2 倍の周波数に近く、そこでインピーダンスの大きさも大きくなることから、36.09 MHz 励振時に 2 倍波が高くなることの原因と考えられた。アンプからカップラーまでの同軸管の長さは約 3200 mm で、これは 70 MHz 波長の 4 分の 3 にあたる。

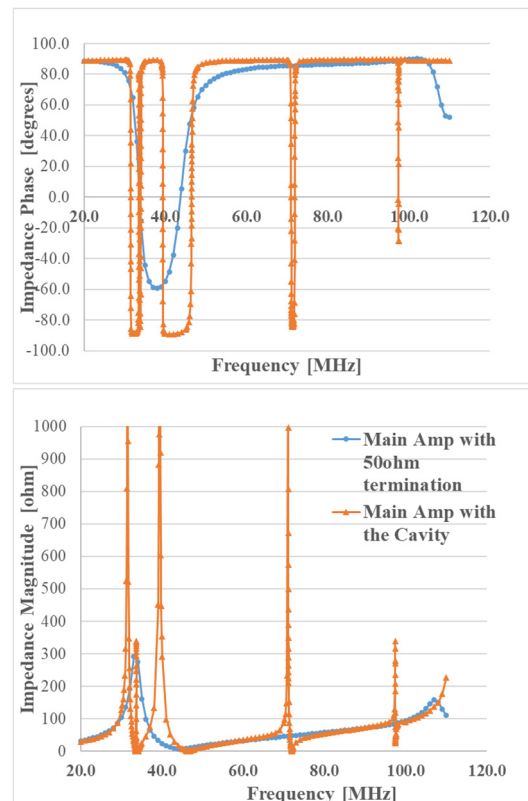


Figure 3: Measured plate impedance for 33.69 MHz configuration with 50 ohm termination or connection to the cavity.

3.2 同軸管長さを変えたインピーダンス測定

Figure 3 で共振器までをつないだ際に現れた共振点と同軸管の長さに依存するのであれば、同軸管の長さを変えることで 2 倍波が共振点にかかることをさげられる可能性がある。このことを調べるために、同軸管の長さを変えてインピーダンスの測定を行った。

追加の同軸管を途中に挿入することで、オリジナルの長さに加えて +716 mm、+1432 mm、+2000 mm での測定を行った。結果を Fig. 4 にまとめた。共振のピークが、同軸管が長くなるにつれて周波数が低い側に動いている様子が見られる。これで位置が変わった共振は、同軸管の長さに依存したものと考えられる。

オリジナル長さで 70 MHz 付近にあった懸案のピークは、+716 mm で 63 MHz まで移動した。この長さで実際にパワーを入れたところ、プレートピックアップ信号の 2 倍波はそれまでよりも下がり、それまで放電トラブルを起こしていた Dee 電圧値を越えて電圧を上げることができた。

この他に、周波数を変えてのインピーダンス測定も行ったが、共振点は、運転周波数およびプレートインピーダンスによっても変動することが分かり、+716 mm では、運転周波数 30 MHz 付近での運転で 2 倍波が共振に影響される可能性があることが分かった。その場合、同軸管の長さを元にもどせば回避できる可能性はある。励振周波数の全ての領域を 1 つの同軸管長さで運転することは難しい。同軸管の長さを変える機構を検討したい。

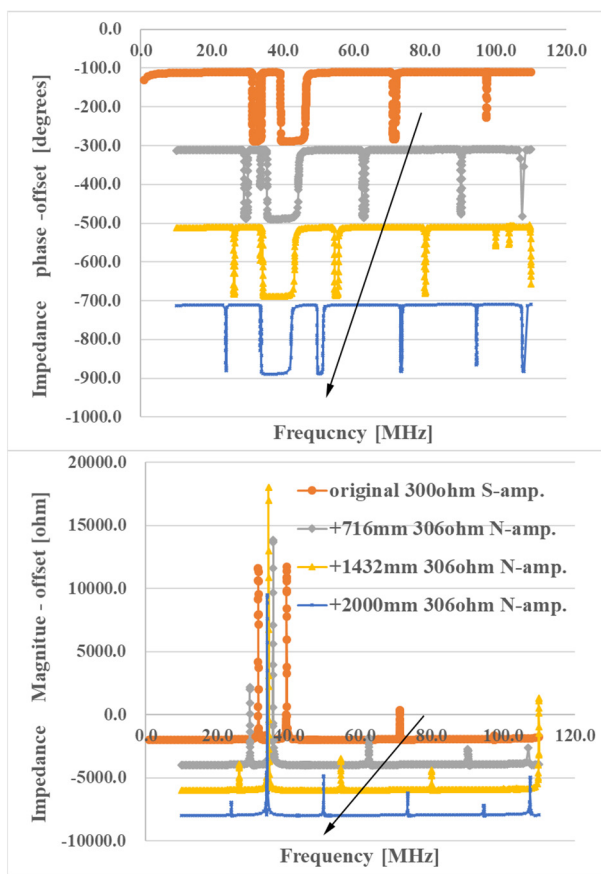


Figure 4: Measured plate impedance for 33.69 MHz configuration changing the length of coaxial waveguide. Plotted data was measured at either North or South amplifier.

3.3 RF アンプへのフェライト板の設置

33.69 MHz での励振の際、プレートピックアップ信号で 3 倍波が高く観測されていた。また、時折 100 から 110 MHz 付近で寄生発振も観測された。有限要素法によるアンプの解析では、アンプで 110 MHz 付近に別の共振モードが存在することが予想された。基本波が主にアンプ上部でのみ磁束を発生するのに対して、そのモードはアンプ上部だけでなく、下部でもアンプ軸回りに磁束が発生するものであったので、この励振を抑えるため、真空管の回りにフェライト板を並べ、磁束を吸わせるようにした。33.69 MHz の設定で、アンプ単体のインピーダンスを測定し、フェライト有無の違いを比較したのが Fig. 5 である。この時は、100 mm × 100 mm × 6.5 mm のフェライト板を 20 枚並べた。33.69 MHz の基本波の共振はほとんど影響を受けていないが、100 MHz 付近のインピーダンスは影響を受けて変化している。フェライトを入れた状態でアンプを励振すると、それまでと比べて 2 倍波、3 倍波が抑えられ、パワーを共振器に入れることができた。アンプから共振器までのインピーダンス測定の結果をフェライト有無で比べると、70 MHz 付近、97 MHz 付近にあった共振もインピーダンスの大きさが抑えられていた。これらの共振は、同軸管の長さで共振周波数が変わるので同軸管長さに依存する共振であるが、アンプ

底部のフェライトによって押さえられるようである。同軸管も含めたアンプの解析を行っているが、その再現に成功しておらず、メカニズムとして十分な理解には至っていない。

アンプでの出力を大きくすると、フェライトは、温度が上がり、100 °C を超えるものもある。フェライトは間接冷却によって冷却をしているが、温度が上がりすぎると効果が無くなる可能性がある。また、磁束の吸収が飽和する可能性もあるので、さらにパワーを上げる際、注意を要する。

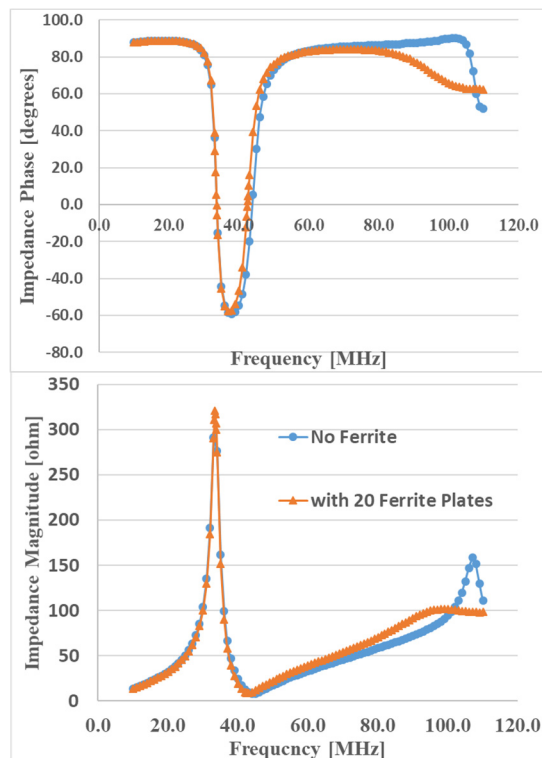


Figure 5: Measured plate impedance for 33.69 MHz configuration with or without ferrite plates. The output of the power amplifier was terminated.

4. まとめと今後

問題を抱えていた 36.09 MHz と 33.69 MHz での励振は、同軸管の長さを変えることとフェライト板を設置することにより、邪魔になる共振を抑えることができた。現状で 40 kV まで電圧を上げることができている。他に 50 kV まで到達した周波数もあるが、加速箱内部にさらなる RF シールド増強を計画しており、増強の後にさらに電圧を上げていく予定としている。

謝辞

今回のコミッションングでは、住友重機械工業株式会社よりご助言をいただきました。感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, presented at PASJ2022, Oct. 2022, FROA04.