

RCNP AVF サイクロトロン新 RF 共振器運転の現状

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

安田裕介[#], 福田光宏, 齋藤高嶺, 依田哲彦, 神田浩樹, 友野大, 田村仁志, 永山啓一, 原隆文, 荘浚謙,
Zhao Hang, 橘高正樹, 松井昇大朗, 井村友紀, 渡辺薫
Yusuke Yasuda[#], Mitsuhiro Fukuda, Takane Saito, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Dai Tomono, Hitoshi Tamura,
Keiichi Nagayama, Takafumi Hara, TsunHim Chong, Hang Zhao, Masaki Kittaka, Shotaro Matsui, Tomoki Imura,
Kaoru Watanabe
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

At the AVF cyclotron in RCNP, the newly installed RF cavities and power amplifiers have been operated for accelerating beam since March 2021. Although the RF system has faced some problems in the process of making the Dee voltages up, the Dee voltages have reached 45 kV for acceleration. The examination into the problems and the treatment for avoiding them are presented. We made the waveguide between the amplifier and the coupler longer to avoid the resonance in the waveguide. The effect of the longer waveguide is also discussed.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) の AVF サイクロトロンでは、2019 年からの高機能化工事にて、共振器をこれまでの 180 度 Dee 共振器 1 台から 90 度 Dee 共振器 2 台に変更した。2022 年 3 月からビーム加速を再開し、ビームコミッショニングを行いながら、これまでのところ、AVF サイクロトロン単独で ^1H 65 MeV、 ^4He 28.5 MeV および 100 MeV のビームを、リングサイクロトロンとあわせて ^1H 230 MeV および 392 MeV、 ^4He 400 MeV のビームを実験に供給してきた。

2. 共振器の運転状況

新しく置き換えた共振器では、当初、周波数によってパワーが入らなかつたり、アンプ内部での放電や出力同調コンデンサ、パワーフィーダー同軸管の焼損トラブルが発生したが、2022 年夏までに RF アンプ内部へのフェライト板の設置とパワーフィーダー同軸管の延長を行い、アンプからカップラーの間でのトラブルを軽減させ、主要な周波数である 33.69 MHz などで Dee 電圧をそれまでの 35 kV 付近から 40 kV まで上げることができた[1]。しかし、実際の加速では安定性が重視され、電圧を下げて運転を行った。

2022 年秋には加速箱内部でダミーディーを延長するシールドを大型化し、RF シールドを強化した。秋以降、安定にかけられる電圧は徐々に上がり、45 kV での加速運転も可能になった。

2023 年に入り、Dee 電圧 50 kV を目指して電圧を上げようと試みていたが、励振が安定しなかった。また、励振開始から 3 日程度で電圧が上げられなくなった後、終には一方の共振器はカップラーでの同調がとれなくなった。2023 年 3 月、調査の結果、共振器ショート板のコンタクトフィンガーの焼損が見つかった。原因はコンタクトフィンガーの接触不良と考えられた。

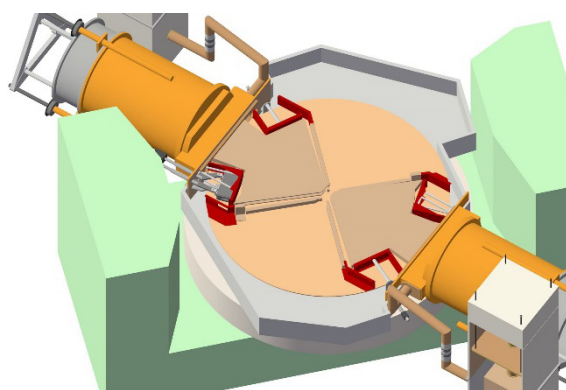


Figure 1: Schematic view of the inside of the AVF cyclotron. Red-colored components are added or remodeled from the original design.

焼損したコンタクトフィンガーを交換した後、コンタクトフィンガーの形状や押し付け方などの変更を検討しているが、この部分を改良、更新するまでは Dee 電圧を 45 kV に制限している。

現状で、周波数 35.2 MHz、33.7 MHz、28.2 MHz での運転において Dee 電圧は 45 kV まで上がってきているものの、目標としている 50 kV での安定した励振には至っていない。Dee 電極まわりでの放電の兆候があることから、電極回りでのマルチパクタリング防止のためのシールド設置などの試行錯誤を続けている。また、未だに同軸管内や RF アンプ内に放電痕が見られることから、放電の原因を探っている。

3. 加速箱内部の改修

加速箱内部では、励振開始直後から、アース板にマルチパクタリングが疑われる痕が見られた。Dee 電極がダミー Dee 電極に面していないところで、アース板上に焼けた痕が見られたので、Dee 電極の周りを囲うように、RF

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

シールドを設置した。コンペンセータやグラディエントコネクタも、駆動部を Dee 電極から隠すようにシールドを延長した。Figure 1 は、AVF サイクロトロン加速箱内部の概略図で、赤色で示した部分が、追加した RF シールドおよび大型化したコンペンセータなどを示している。この改修は段階的に行った。RF シールドを追加すると、アース板上の焼け痕が小さくなったが、まだ完全になくなったわけではない。

4. 同軸管での反射波の観測

2022 年 5 月、RF アンプからカプラーまでを接続した状態で、同軸管の長さを変えつつ、アンプからインピーダンス測定を行った。Figure 2 に示すように、オリジナルの同軸管長さ(約 3,200 mm)の時、71 MHz 付近に共振があることが分かった。また、同軸管の長さを変えることでその共振周波数が変わることが分かった。この結果を受けて、同軸管の長さを 716 mm 延長した[1]。

オリジナル長さの同軸管で 35~36 MHz での励振時、アンプのプレートピックアップ信号の 2 倍波が大きくなっていたことがこの測定のきっかけで、同軸管の長さを延長してからは、この 2 倍波は小さくなった。今回は、別途測定していた方向性結合器の信号の測定結果を整理した。

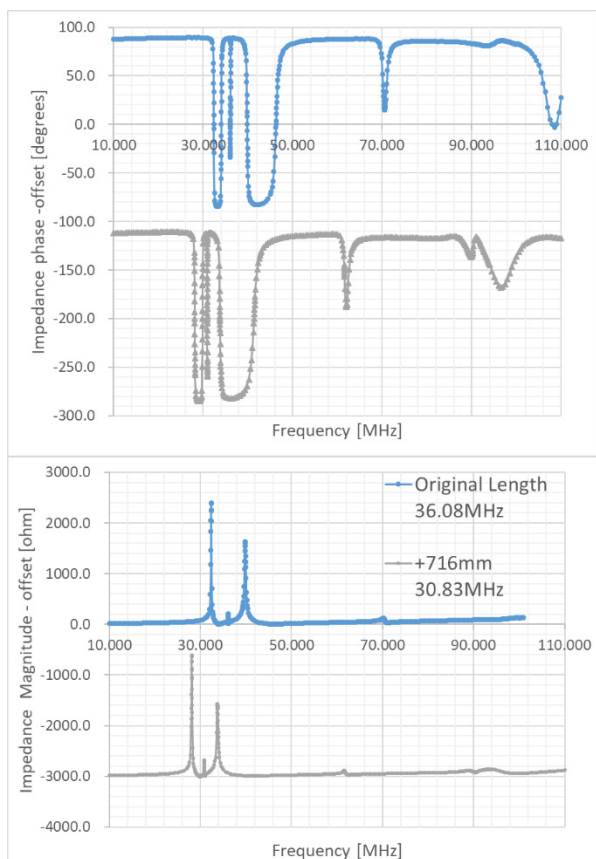


Figure 2: Measured plate impedance for 36.08 MHz configuration with original wave guide length and that for 30.83 MHz with additional 716 mm wave guide.

パワーフィーダー同軸管内に挿入している方向性結合器は、約 60 dB の結合度をもち、結合度には周波数依存性がある。ネットワークアナライザで周波数依存性を測定し、周波数の情報と併せて電力を見積もった。運転時、入力波(FWD)と反射波(BWD)の波形について、オシロスコープによる観測とスペクトルアナライザによる強度分布測定を行っている。ここでは反射波(BWD)に注目し、データを整理した。

Figure 3 は、励振周波数 35~36 MHz のときのデータで、反射波中の 2 倍波強度(kW)と反射波信号の大きさ(mV_{pp})との相関を示している。同軸管がオリジナル長さの時は 2 倍波が大きく、1.7 kW から 3.3 kW まで観測されている。一方で、同軸管を 716 mm 延長した場合は、反射波中の 2 倍波は 1 桁ほど小さくなり、反射波信号全体も小さくなっている。このデータからも、同軸管の長さを変えることで、同軸管での共振を避けられていることが分かる。また、ここにプロットできていない記録で、反射波中の 2 倍波が 5.7 kW という記録があり、その記録の直後、アンプでの出力同調コンデンサの焼損と、同軸管の焼損が見つかった。ここまで反射が大きくなるとトラブルが起きる目安と言える。

同軸管を 716 mm 延長することで、71 MHz 付近の共振を避けることができ、そこに 2 倍波に近い 35~36 MHz の励振での問題を回避することができたが、同軸管の共振は長さによって周波数が変わるので、別の周波数の励振で問題が起きる可能性がある。

Figure 2 において、同軸管を 716 mm 延長した状態での 30.83 MHz 設定のインピーダンス測定データを見ると、62 MHz 付近に共振があることから、この設定では、同軸管内やプレートピックアップ信号で 2 倍波が大きくなることが予測された。

同軸管長さ+716 mm の時、周波数 20.29、21.80、28.15、30.83、33.69、35.20、35.50 MHz 励振でのデータについて、Fig. 3 と同様の量をプロットしたものが Fig. 4 である。

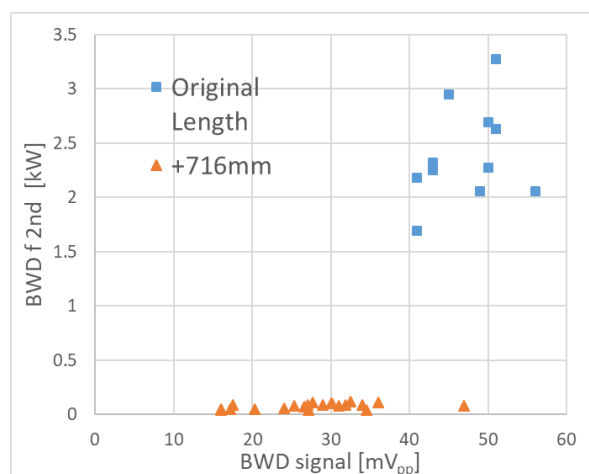


Figure 3: Correlation between the power (kW) of Backward(BWD) 2nd harmonics and the magnitude of BWD signal (mV_{pp}) for 35-36 MHz.

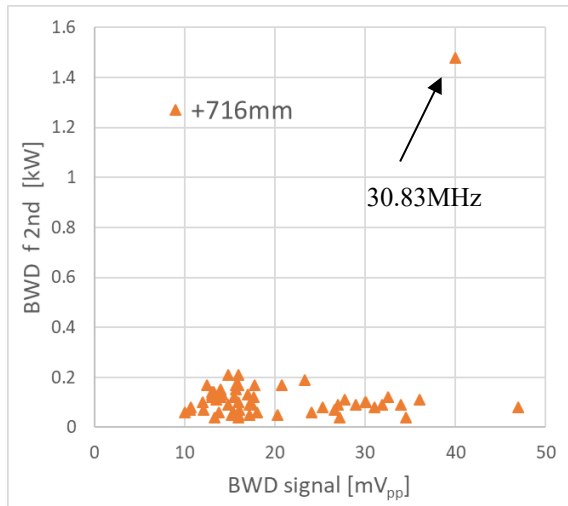


Figure 4: Correlation between power (kW) of Backward(BWD) 2nd harmonics and magnitude of BWD signal (mV_{pp}) for several frequencies when the additional 716mm waveguide is used.

1.5 kW の 2 倍波パワーを示しているプロットが、Dee 電圧 29 kV での 30.83 MHz 励振データである。他の周波数データにおいて2倍波パワーは概ね 0.2 kW 以下であり、これらの中には Dee 電圧 40 kV を超えるデータも含まれている。また、オリジナル長さでの 30.83 MHz 励振では、Dee 電圧が 35 kV でも2倍波は 0.1 kW 未満であったことから、同軸管を延長した状態での 30.83 MHz 励振では、2倍波が共振の影響を受けていると考えられる。これらより、30.83 MHz での励振は、オリジナルの同軸管長さに戻して行う方針である。

5. 今後の展望

フェライトの導入と同軸管の延長により、印加できる電圧は大幅に上がったが、問題がなくなったわけではない。アンプ回りでは、出力同調コンデンサ部分で未だに放電痕が見られる。コロナリングを取り付けてコンデンサを保護しているが、放電の原因調査を続けている。また、加速箱内での放電により励振が不安定になることがあるので、放電痕を見ながら対策を継続していく。

主要周波数である 33.69 MHz では短時間ではあるが Dee 電圧 48 kV での励振実績がある。ショート板のコンタクトフィンガーの改修が終わり次第、50 kV へ向けて電圧を上げていく予定である。

参考文献

- [1] Y.Yasuda *et al.*, “Status of the new RF cavity for the AVF cyclotron in RCNP”, The 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Fukuoka, Japan, October 2022, P836.