

東京大学 CNS 14 GHz HyperECR イオン源の現状報告

STATUS REPORT ON 14 GHz HyperECR ION SOURCE AT CNS, UTokyo

鎌倉恵太 *^{A)}, 小高康熙 ^{A)}, 酒見泰寛 ^{A)}, 山口英斉 ^{A)}, 森田泰之 ^{B)}, 笠置歩 ^{C)},
岡直哉 ^{D)}, 西隆博 ^{B)}, 中川真菜美 ^{E)}, ムラン・ジョナ ^{F)}, ジャケ・ガブリエル ^{F)}

Keita Kamakura*^{A)}, Yasuteru Kotaka^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{A)}, Hidetoshi Yamaguchi^{A)}, Yasuyuki Morita^{B)},
Ayumi Kasagi^{C)}, Naoya Oka^{D)}, Takahiro Nishi^{B)}, Manami Nakagawa^{E)}, Jonah Mourrain^{F)}, Gabriel Jacquet^{F)}

^{A)}CNS, the University of Tokyo, ^{B)}Nishina Center, RIKEN,

^{C)}Rikkyo Univ. AI, ^{D)}NICT, ^{E)}JWU, ^{F)}ENSICAEN

Abstract

14 GHz Hyper ECR ion source at the Center for Nuclear Study, the University of Tokyo, provides various ion beams to the RIKEN AVF cyclotron. It has been continuously improved for more than 30 years since its installation, and its production of high-intensity multi-charged heavy ion beams has matured. However, there is still a difficulty with beam stability, primarily when supplying beams with solid samples. In this presentation, we will report on the HyperECR ion source operation in the year 2024, as well as the recent development of a sulfur beam using SF₆, the long-term supply of a boron beam using the MIVOC method, and the current status of the development of an ECR ion source beam intensity prediction model using machine learning.

1. 概要

東京大学 CNS では 14 GHz HyperECR イオン源を用いて理研 AVF サイクロトロンに様々なイオンを供給している。本イオン源では設置から 30 年以上にわたり改良が続けられており、その多価重イオンビームの大強度供給技術は成熟してきた。一方で特に固体試料ビーム供給時のビーム強度及び安定度に課題が残っている。本発表では、2024 年の HyperECR イオン源の運転実績に加え、SF₆ を用いた硫黄ビームの開発、MIVOC 法によるホウ素ビームの長期供給、さらに機械学習を用いた ECR イオン源ビーム強度予測モデル開発の現状について紹介する。

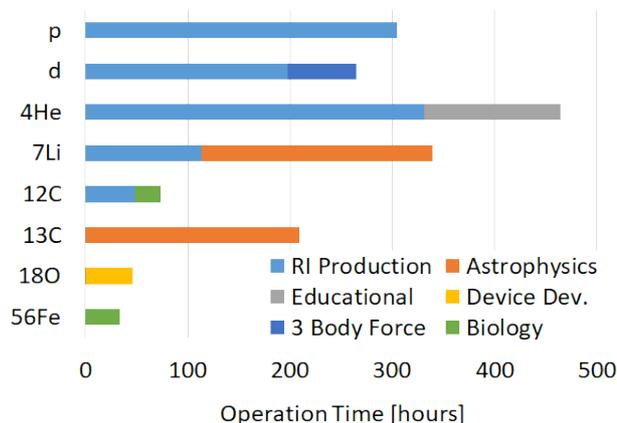


Figure 1: AVF cyclotron operation time for each ion beam supplied by the HyperECR ion source in the year 2024. Out of 3403 hours of the total operation time, HyperECR provided for 1735 hours, which makes up 51%.

2. HyperECR イオン源の運転状況

東京大学 CNS HyperECR イオン源は理化学研究所仁科加速器科学研究センター RI ビームファクトリーの AVF サイクロトロン施設内に設置され、様々なイオン種のビームを供給している。その用途は原子核物理をはじめ、核化学、生物照射など多岐にわたる。Figure 1 に HyperECR からのビーム供給状況を示す。AVF サイクロトロンには HyperECR のほか理研 18 GHz イオン源と偏極イオン源からビーム入射可能であるが、2024 年には AVF 総運転時間 3403 時間の 51% に当たる 1735 時間 HyperECR から供給した [1,2]。

3. 硫黄ビーム開発

CNS 宇宙核物理グループからの要請で硫黄ビームの開発を行った。ビーム要求条件は理研 RIBF の CRIB スペクトロメータ標的で 8.3 MeV/u、100 pA、48 時間の供給であった。エネルギーの要請から AVF サイクロトロンでの加速に 11 価が必要になり、加速・輸送効率を考慮すると HyperECR での要求ビーム強度は 8 μ A 程度となる。

3.1 純硫黄 (固体) によるビーム開発

硫黄ビームは過去に 9 価での供給実績がある。その際は固体試料を坩堝に充填し、プラズマチェンバに挿入することでビーム供給を行っている。2012 年 9 月と同年 10 月の 2 回の実験のうち、坩堝を ECR プラズマに近づけ大強度ビーム供給を行った 9 月の実験では、銅製の導波管が高温の硫黄蒸気にさらされたことで腐蝕・破損している (Fig. 2)。今回は導波管にニッケルメッキを施し、耐蝕性を高めることでその対策を行った。

本開発では顆粒状の純硫黄の固体試料を用い、坩堝の大きさ、蒸気孔の径・数、挿入方法などの条件を変えて ³²S¹¹⁺ の大強度安定生成の実現可能性を模索した。硫黄は 115°C で融解し、一気に蒸気圧が上がるため、試料温度管理の困難な現状のシステムでは、坩堝方式で要求ビーム強度・安定度・試料消費率を満たす条件を見つけることができなかった。

* kamakura@cns.s.u-tokyo.ac.jp

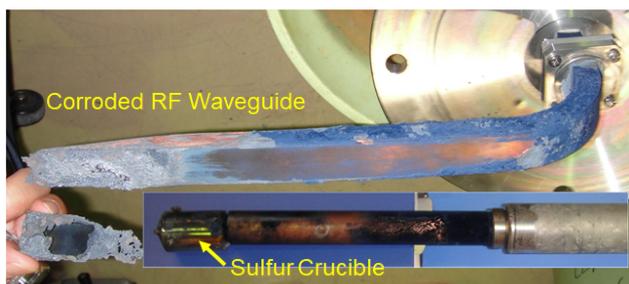


Figure 2: RF waveguide corrosion found after the $^{32}\text{S}^{9+}$ experiment in 2012. Sulfur crucible position is shown by the overlaid picture. Hot sulfur vapor came out of crucible seemed to destroy the waveguide.

3.2 SF₆ (ガス) によるビーム開発

固体試料でのビーム生成が要求条件を満たさなかったため、六フッ化硫黄 (SF₆) ガスを用いた開発に変更した。ガス試料は小型タンク (容量: ~600 mL、充填圧力: ~700 mbar) より供給している。この方法で試験を行ったところビームの要求強度・安定度を満たしたため、同条件で本実験の供給を行った。Figure 3 に AVF サイクロトロン入射開始前のイオンスペクトルを示す。ビーム供給中のガス試料消費率は約 0.6 mL/hour、 $^{32}\text{S}^{11+}$ の最大ビーム強度は約 11 eμA であった。

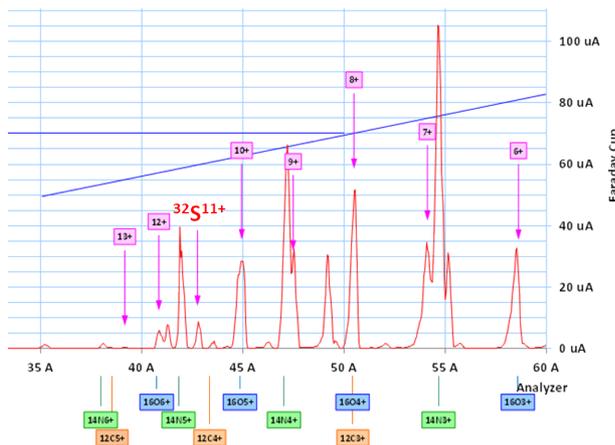


Figure 3: Ion spectrum of extracted beam from HyperECR before $^{32}\text{S}^{11+}$ acceleration in the AVF cyclotron.

今回実験に関わる SF₆ 使用量はガス種変更に伴うガスラインの排気を含め全体で約 70 mL であった。SF₆ は CO₂ の約 23 900 倍の温室効果を持つ [3] ため本来は回収・破壊が必要となる。今回は理研施設部との協議の結果、排出量が微量であるため、回収処理による環境負荷の方が大きくなるため回収は行わないこととした。

4. ホウ素ビームの長期供給

硫黄と同様に CNS 宇宙核物理グループからの要請で ^{10}B の 14 日間にわたる長期供給を行った。ビームエネルギーは 7.8 MeV/u、CRIB ターゲットでの要求ビーム強度は 400 pnA であった。AVF サイクロトロンでの加速に 4 価が必要になる。ビームの加速・輸送効率を

考慮すると必要ビーム強度はイオン源で 8 eμA 程度であった。ホウ素ビームの生成は、揮発性の高いデカボラン (B₁₀H₁₄) を用いた MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) 法 [4] を使用している。通常イオン化ガスの導入に使用しているガスラインの途中に試料チャンバー (Fig. 4) を挿入し、ヘリウムガスを流しながら、ガス系上下流のバルブを操作することで、デカボラン蒸気の流量を変化させ、効率的なイオン生成条件を調整している。最大ビーム強度は 26 eμA であったが、試料消費を抑えるためにガス流入を絞り、8 eμA 前後で供給を行った。試料消費率は 4 日で 1 g 程度であった。14 日間のユーザー実験中、試料補充のため 3 回のビーム供給中断を行った。ビーム停止から復旧までのダウンタイムは 1 時間程度で、持続的に長期供給を行うことができた。

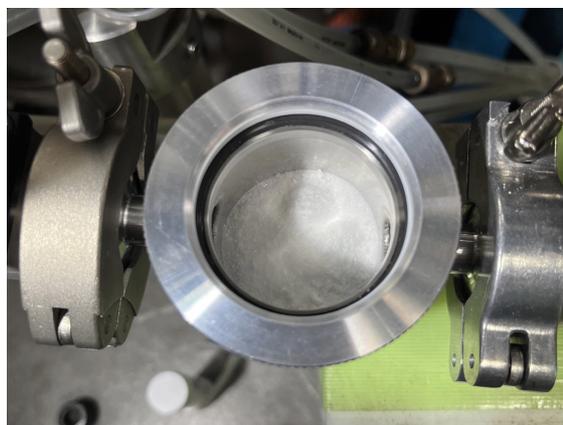


Figure 4: Decaborane (B₁₀H₁₄) powder in a sample chamber.

5. 機械学習によるビーム強度予測

これまで CNS では他機関の専門家の協力を得て、ニューラルネットワークを用いたイオン源ビーム強度予測モデルの検討を進めてきた。これは我々の目指す ECR イオン源自動制御の第一段階として重要な機

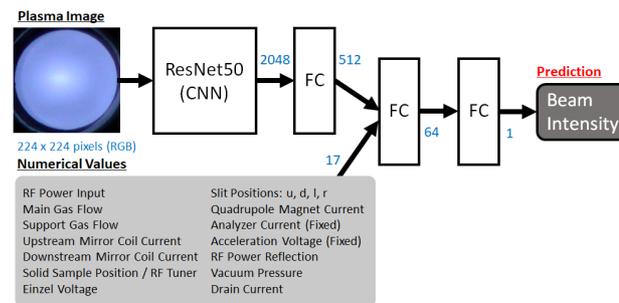


Figure 5: Diagram of the beam current prediction model. A 224×224 RGB image goes through ResNet50 and is characterized by 2048 parameters. A fully connected layer (FC) compresses them down to 512. They are combined with 17 numerical values and fed into another FC layer. It returns 64 parameters. The final layer processes them and returns the beam intensity [5].

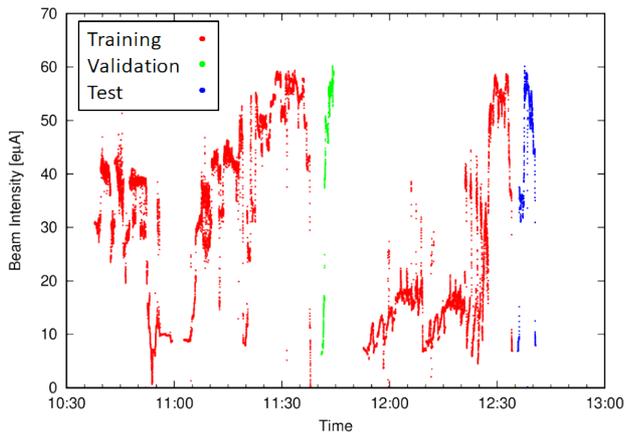


Figure 6: $^{12}\text{C}^{4+}$ beam intensity during the data acquisition. Training, validation, and test data are obtained over the course of two hours.

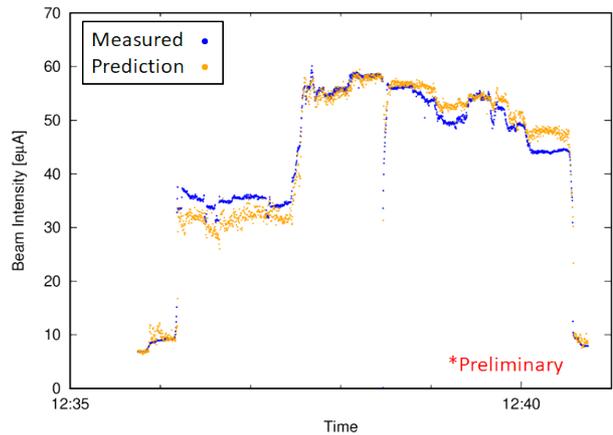


Figure 9: Measured $^{12}\text{C}^{4+}$ beam intensity during the test run and the corresponding prediction with the neural network model. (preliminary result).



Figure 7: Training and validation curves after several attempts of hyperparameter tuning. Epoch=88 is chosen for the test.

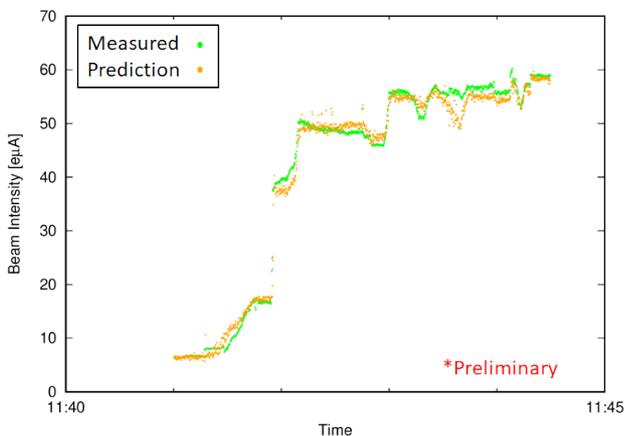


Figure 8: Measured $^{12}\text{C}^{4+}$ beam intensity during the validation run and the corresponding prediction with the neural network model. (preliminary result).

能であるとともに、ファラデーカップを用いない非破壊的なビーム監視を可能にする画期的な技術である。Figure 5 にそのモデルの概要を示す。入力データはイオン源下流から引き出し孔を撮影したプラズマ画像データ (224×224 pixels, 3 channels) と 17 個のイオン源・ビーム輸送系の制御パラメータ及び観測量、出力はビーム強度である。

目下様々なイオン種で本モデルを性能評価を進めているが、今回は $^{12}\text{C}^{4+}$ ビームの運転データを用いて訓練・検証・テストを行った例を報告する。この実験中に操作したパラメータは HyperECR イオン源の運転時に頻繁に調整を行う、上流側ミラーコイル電流値 (MC1)、下流側ミラーコイル電流値 (MC2)、マイクロ波入力 (RF)、イオン化ガスバルブ開度 (Gas1)、サポートガスバルブ開度 (Gas2) の 5 種類である。

訓練データはこれらの値を自由に動かし、イオン源がある程度安定して運転可能な範囲において、多様なパラメータの組み合わせで取得した。検証データは約 $7 \text{ e}\mu\text{A}$ で安定したビーム強度を与える、あるパラメータセット (MC1=500 A, MC2=440 A, RF=135 W, Gas1=1.80 mm, Gas2=0.72 mm) をスタートとしてビーム強度を最大化する調整を行った。テストデータは、検証データと同様にパラメータセットをスタートとしてビーム強度を最大化、その後スタートのパラメータセットに戻すという運転を行った。検証データとテストデータの間には 51 分ほどの間隔をあけており、その間にも訓練データの蓄積を行った (Fig. 6)。

訓練データを用いてこのニューラルネットワークモデルをミニバッチ学習した。使用した損失関数は平均二乗誤差 (MSE)、バッチサイズは 64 である。検証損失を基準にドロップアウト、荷重減衰、学習率などのハイパーパラメータを調整した。最適化は未達成であるが、結果の一例を紹介する。訓練・検証のそれぞれの損失曲線を Fig. 7 に示した。検証損失が安定化し、最小値をとる epoch=88 の検証とテストの結果を Fig. 8 と Fig. 9 にそれぞれ示した。検証損失の値は 3.17、テスト損失の値は 9.97 となっている。損失値の平方根が RMSE に対応するため、この例では数 $\text{e}\mu\text{A}$ の精度で予測することができる。

6. まとめ

東京大学 CNS HyperECR イオン源では、理研 RIBF に様々なイオンを供給している。2024 年は 1735 時間、理研 AVF サイクロトロンへビーム入射を行った。実験グループの要請で、SF₆ による ³²S¹¹⁺ の開発及び、MIVOC 法による ¹⁰B⁴⁺ の 14 日間の長期供給を実施した。HyperECR イオン源のビーム電流を予測する機械学習モデルを開発・改良しつつ、運転データの蓄積を行っている。

参考文献

[1] J. Shibata *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN

AVF cyclotron”, Proceedings of the 21st PASJ Meeting, WTSP01 (2024).

[2] S. Ishikawa *et al.*, “Status report on the operation of RIKEN AVF cyclotron”, The 22nd PASJ Meeting, Tokyo, Japan, Aug. 2025, TFP007, this meeting.

[3] 2010 Annual Report, SF6 Emission Reduction Partnership for Electric Power Systems, U.S. Environmental Protection Agency (2011).

[4] H. Koivisto *et al.*, “Metal ion beams from an ECR ion source using volatile compounds”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 94, Issue 3, pp. 291-296 (1994).

[5] K. Kamakura *et al.*, “Machine learning-aided ECRIS beam current prediction”, Proceedings of the 21st PASJ Meeting, THP085 (2024).