

理研 28 GHz 超伝導 ECR イオン源からの X 線測定

MEASUREMENT OF X-RAY FROM RIKEN 28 GHz SUPERCONDUCTING ECR ION SOURCE

大関和貴^{#, A)}, 日暮祥英^{A)}, 大西純一^{A)}, 中川孝秀^{A)}
 Kazutaka Ozeki^{#, A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}
^{A)} RIKEN Nishina Center

Abstract

In order to search the ion source parameter which can reduce the X-ray heat load in the cryostat of the RIKEN 28 GHz superconducting ECR ion source, we conducted the measurements of bremsstrahlung X-ray emitted from the ion source under various configurations of the mirror magnetic field, along with the measurements of beam intensity of $^{124}\text{Xe}^{20+}$. From obtained energy spectra, we derived the spectrum temperature and the amount of radiation (count rate) of bremsstrahlung X-ray assuming the Maxwell distribution. For these measurements, we found that the emission of bremsstrahlung X-ray toward axial direction is increased by enhancing the radial magnetic field intensity. Based on the result, we propose a new method to reduce the heat load of refrigerator.

1. はじめに

多くの実験施設において、大強度の RI ビームを供給するための外部イオン源として、超伝導 ECR イオン源(SC-ECRIS)が製作されている^[1-4]。近年、イオン源内のプラズマから放射される制動 X 線が SC-ECRIS のクライオスタットに数 W 以上の熱負荷を与えることが報告された^[2, 3]。通常、SC-ECRIS のような小型の超伝導マグネットシステムの場合、クライオスタットを低温に保持するために小型冷凍機(GM 冷凍機など)を用いる。この場合 4.2 K における冷凍能力は数 W が上限であるのが現状である。このような場合、前述の制動 X 線による熱負荷が大きいと、イオン源内に導入できる RF パワー、ひいてはビーム強度が、冷凍機の冷却能力によって制限されることが容易に推測される。

この問題点の回避方法の一つとして、イオン源のパラメーター調整によって制動 X 線の放射量や放射方向を調節することが挙げられる。本研究では、理研 28 GHz SC-ECRIS^[1]においてミラー磁場の形状を様々に変化させながら、 $^{124}\text{Xe}^{20+}$ のビーム強度ならびに制動 X 線の測定を行った。その結果を基に、制動 X 線に起因するイオン源の冷凍機の熱負荷を低減させる方法について提案する。

2. 測定

本測定におけるセットアップを Figure 1 に示す。イオン源の軸方向下流に 2 mmφ×150 mm の銅製のコリメーターと NaI(Tl)シンチレーションカウンターを設置した。18 GHz, 500W のマイクロ波をイオン源内に導入し、イオン源のミラー磁場を様々に変化さ

せて ^{124}Xe イオンの電荷分布を測定すると同時に、イオン源より放射される制動 X 線のエネルギースペクトルを測定した。 ^{124}Xe イオンを生成するためのサポートガスとして酸素を使用した。

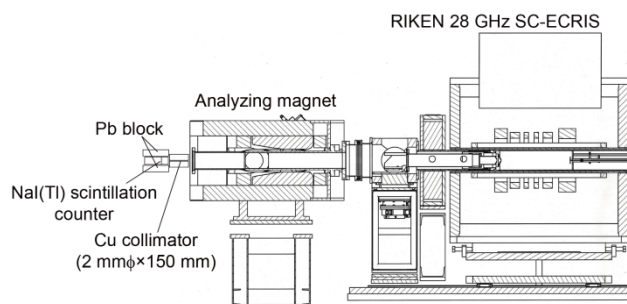


Figure 1: Setup of X-ray measurement.

イオン源内の軸上のミラー磁場分布を Figure 2 に示す。ビーム引き出し側の最大磁場(B_{ext})を 1.04, 1.14, 1.23 T の 3 通りに固定し、チェンバー壁面における動径方向の磁場強度(B_r)をそれぞれ変化させて(0.95 T ~ 1.31 T)測定を行った。

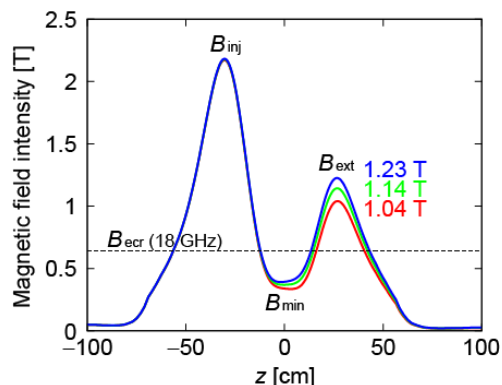


Figure 2: Axial mirror magnetic field distributions.

[#] k_ozeki@riken.jp

あるミラー磁場分布における ^{124}Xe イオンの電荷分布および制動 X 線のエネルギースペクトルを Figure 3, 4 に示す。

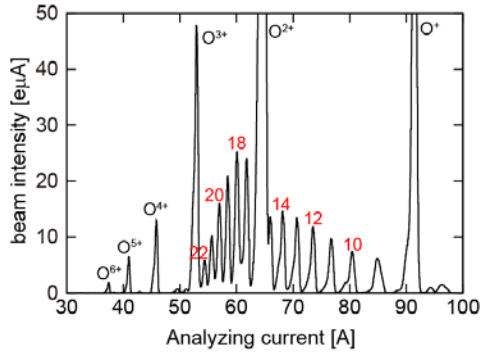


Figure 3: Charge distribution of ^{124}Xe ion.

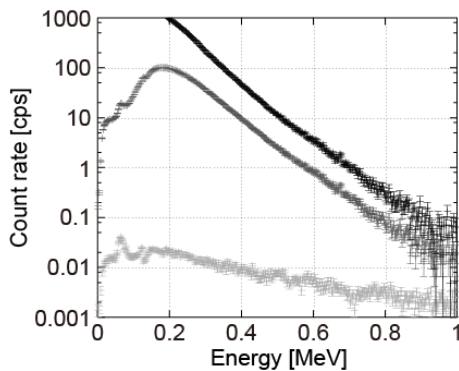


Figure 4: Energy spectra of bremsstrahlung X-ray. See text for detail.

得られたエネルギースペクトル(濃灰)からバックグラウンド(薄灰)を差し引き、検出器の前にある物質(フランジ、検出器の窓)による X 線の吸収の補正を行った(黒)。補正後のエネルギースペクトルについて Maxwell 分布を仮定してフィッティングを行い、制動 X 線のスペクトル温度と軸方向への放射量を導出した。

$^{124}\text{Xe}^{20+}$ のビーム強度、制動 X 線のスペクトル温度および放射量の B_r 依存性を Figure 5 に示す。横軸は B_r のうち磁場強度が最小となる場所での値とした。

$^{124}\text{Xe}^{20+}$ のビーム強度と制動 X 線の軸方向への放射量は、 B_r の増加に従って増加し、 $B_r \sim B_{\text{ext}}$ (B_{ext} より若干大きい値)で最大値を取り、 B_r が更に強い領域ではほぼ一定、もしくは減少に転じるという傾向が見られた。また、各最大値は B_{ext} の増加に従って増加する。一方、制動 X 線のスペクトル温度は、 B_r の増加に従って減少し、 $\sim B_{\text{ext}}$ より強い領域では一定という傾向が見られた。

3. 考察

3次元電磁場解析ソフト Opera-3d^[5]を使用して、イオン源内の磁場分布を計算した。 B_r を変化させた場合の磁場分布について Figure 6 に示す。磁場強度が B_{ext} に等しい領域が赤で示される。

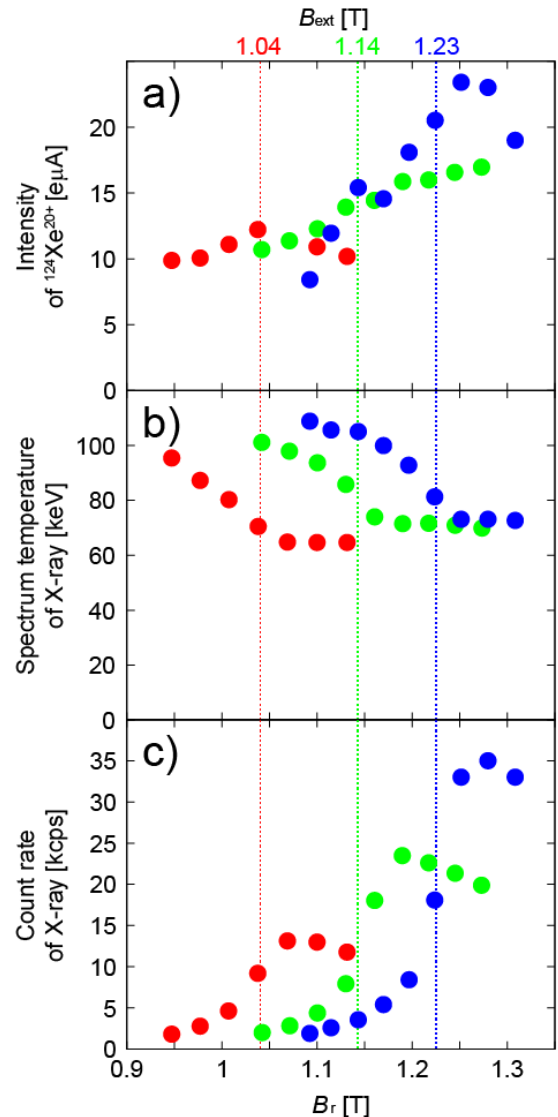


Figure 5: B_r dependences of a) beam intensity of $^{124}\text{Xe}^{20+}$, b) spectrum temperature of X-ray, and c) count rate of X-ray.

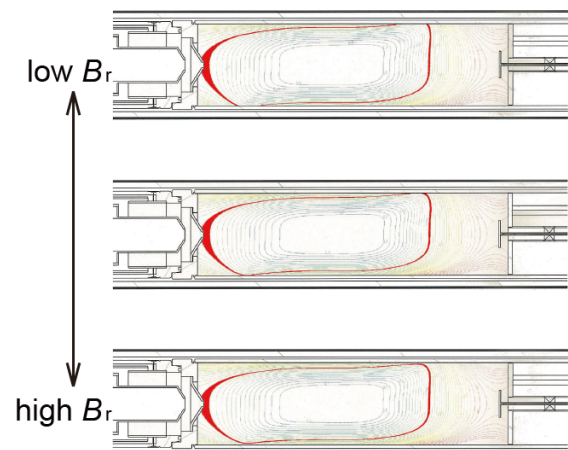


Figure 6: Magnetic field distribution in the ion source calculated by OPERA-3d.

ECR イオン源は、ミラー磁場を用いてプラズマを長時間閉じ込めることによって多価イオンを生成している。プラズマ中の電子はミラー磁場によって閉じ込められているが、ロスコーンと呼ばれる部位から逃走する。ロスコーンの大きさはミラー比に依存し、ミラー比が大きい場合はロスコーンは小さく、ミラー比が小さい場合はロスコーンは大きくなる。ビーム引き出し側のミラー比($B_{\text{ext}}/B_{\text{min}}$)が動径方向の最小ミラー比(B_r/B_{min})よりも大きい場合、つまり $B_{\text{ext}} > B_r$ の場合は、高エネルギー電子が動径方向に流れ込んでチェンバー壁面を叩き、そこが制動 X 線の発生源となると考えられる。一方、 B_r が増加して $B_{\text{ext}} < B_r$ となる(動径方向のロスコーンの方が小さくなる)と、高エネルギー電子がビーム引き出し側に流れ込むようになってプラズマ電極を叩き、そこが制動 X 線の発生源になると考えられる。Figure 5c において、 B_r の増加に従って軸方向に放出される制動 X 線の量が増加するのは、このことに起因するものと推察される。

この現象を積極的に利用して、冷凍機の熱負荷の低減ができるものと期待される(Figure 7 参照)。制動 X 線の発生源を液体ヘリウム容器の端の方へ移すことで、X 線の発生源から液体ヘリウム容器を見込む立体角を減らすことができる。また、発生源周辺の遮蔽を厚くすることによって液体ヘリウム内への制動 X 線の入射量を更に減らすことも可能になる。

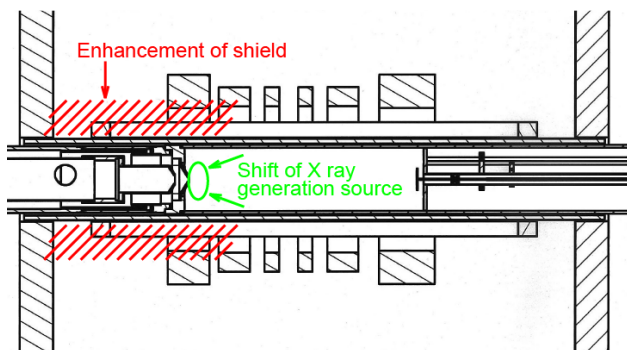


Figure 7: Suggestion for reducing the head load of refrigerator of the ion source.

4. まとめ

理研 28 GHz SC-ECRIS において、冷凍機の熱負荷の低減を実現するためのイオン源のパラメーターの探索を行った。ミラー磁場分布を様々に変え、NaI(Tl)シンチレーションカウンターを用いてイオン源より放射される制動 X 線を測定した。その結果、動径方向の磁場を強くすることで軸方向への放射量が増加することが確認された。チェンバー壁面の磁場が引き出し側の磁場より高くなることで、制動 X 線の発生源が引き出し側に移行するためと考えられる。

この現象を積極的に利用し、かつ引き出し側の周辺の遮蔽を厚くすることによって、液体ヘリウム中に入射する制動 X 線の量ならびに X 線が液体ヘリ

ウムに付与する熱を減らすことができると期待される。冷凍機の熱負荷の低減は、イオン源内に導入できる RF パワー、引いてはビーム強度の増加につながる。

参考文献

- [1] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A320H.
- [2] D. Leitner et al., *Proceedings 19th Int. Workshop on ECR ion sources*, 2010, Grenoble, France, p. 11.
- [3] H. Zhao et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A202.
- [4] T. Sun et al., *Proceedings 19th Int. workshop on ECR ion sources 2010*, Grenoble, France, p. 4.
- [5] Opera-3d, Trademarks from Vector Fields Limited, Oxford, England.