

STUDY ON AN EXTRACTION ELECTRODE OF AN ECR ION SOURCE FOR CANCER THERAPY

Yuko Kijima^{A)}, Yasuto Ando^{#1,A)}, Sadahiro Kawasaki^{A)}, Atsushi Kitagawa^{#2,B)}, Takashi Fujita^{B)}, Masayuki Muramatsu^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric Corporation

Energy Systems Center, Advanced Electromagnet application systems development
1-1-2, Wadamisaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8555, Japan

^{B)} National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan

Abstract

A compact electron cyclotron resonance ion source for carbon-ion radiotherapy improved on the high voltage beam extraction has been studied. The structure of extraction and plasma electrodes were optimized for the resistance of the discharge with the calculation. The electric field analysis has performed by the calculation code of electric field (SCAM) in the case of the extraction voltage between 30 kV and 40 kV. It was obtained that the structure modified to smooth surface (of large R corner) was satisfied under the surface field criteria.

がん治療用炭素線イオン源の大電流化のための引出電極の検討

1. はじめに

普及型重粒子線がん治療装置として、炭素線イオンを用いた小型かつ低コストの装置の実用化、性能向上に向けた改善を実施している。イオン供給能力の向上のためには、イオン源が長期安定であること、運転・メンテナンスが容易であることが重要となる。さらに、引出電圧を高め、大強度のイオン源の実用化を目指している。

小型 ECR イオン源 Kei2-source^{[1][2][3]}は放射線総合医学研究所で治療用イオン源として開発実用化されている。そのイオン源の引出電極付近の電界解析及び評価を行い、引出電圧を 30 kV から 40 kV へ増加しビーム強度増強を図った場合の構造の改善案を検討した。

ここでは、Kei2-source の電極形状に最大 40 kV 印加した場合の電界解析を 2次元表面電荷法コードを用いて行った。表面電界の大きな部分の形状寸法をパラメータとし、その変化の影響を定量的に評価した。

また、電圧の限界は、真空中放電限界を Kilpatrick Criterion より設定し、ガス供給による真空度上昇の影響は、Kei2-source を用いた測定結果より推定した。

その結果より設計上の表面電界強度の限界レベルを設定し、高強度化に向けた引出電極及びプラズマチャンバー形状の改善を提案した。

2. 計算コードによる電磁界解析

2.1 電極部の構造

小型 ECR イオン源はプラズマ閉じ込め磁場を永久磁石で構成することで、大幅に小型化することができた。ビーム軸方向の閉じ込め磁場を大きくするため、プラズマチャンバー内径を $\phi 50$ mm と小さくしている。このプラズマチャンバー内で生成された炭素イオンはアノード電極と引出電極間に印加された引出電圧で加速される。通常、 C^{4+} を線形加速器に 8 keV/u で入射するため、引出電圧は 24 kV に設定する。また電極の gap 間隙は C^{4+} を引き出すのに実験より経験的に最適化し、26 mm にしている。引出電圧としてプラズマチャンバー側のイオン源全体に正電圧を印加するため、大地側の引出電極外周にアルミナセラミックダクトを用いて絶縁している。

各寸法を表 1 に、構造を図 1 に示す。

表 1: イオン源電極及びプラズマチャンバー寸法

項目	寸法[mm]	材料
プラズマチャンバー内径	$\phi 50$	銅
引出電極	穴径	$\phi 10$
	外径	$\phi 33$
アノード電極	穴径	$\phi 6$
引出, アノード電極間隙	26	

#1 Ando.Yasuto@ct.MitsubishiElectric.co.jp

#2 kitagawa@nirs.go.jp

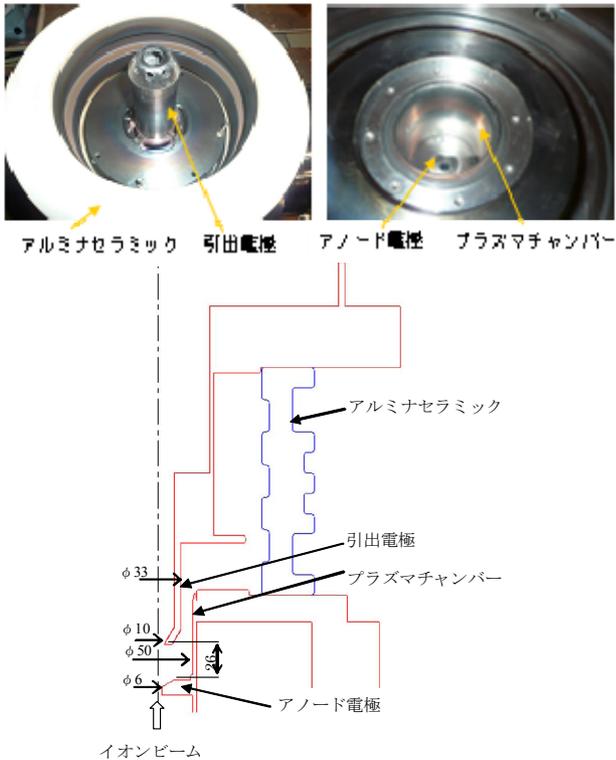


図1: イオン源の電極構造

2.2 電磁界解析結果

電極及びプラズマチャンバーの設計寸法をパラメータとして、表面電界分布を解析した。解析には2次元の表面電荷法を用いた解析コード SCAM^[4]を使用した。

現状の設計形状での電界解析結果を図2に示す。引出電極構造で表面電界が高くなる部分の寸法を変更して、影響を確認した。引出電極径、電極先端の角のR形状、プラズマチャンバー先端の形状と表面電界との関係解析した。

(1) 電極間の間隔の影響

引出電極径は $\phi 33$ mmを基準に径と表面電界との関係を確認した。結果を図3に示す。理論値と解析結果はほぼ一致しており、径すなわち動径方向の電極間隔を変更すると、①と②に示す引出電極同軸部で電界は変化するが、その変化は緩やかである。

(2) 引出電極先端の端部形状の影響

引出電極テーパ角部③及び電極先端④のR形状をパラメータ変更して最大表面電界を求めた。R 0.5 mm を基準としR半径を変更した。結果を図4に示す。Rを大きくすることで、電界集中が改善できることがわかった。

(3) プラズマチャンバーの端部形状の影響

プラズマチャンバーの銅ダクトの先端部⑤の加工径を変更して最大表面電界を求めた。R 0.1 mm を基準としR半径を変更した。結果を図5に示す。Rを大きくすることで、電界集中は改善できる。

以上のように電極間隔よりも電界集中部分の形状を変更することで、電圧増加の高强度化に向けて改善できることがわかった。

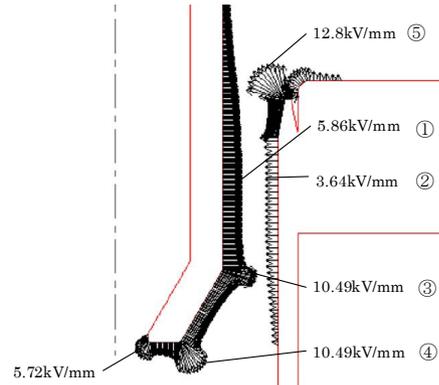


図2: 表面電界分布と変更箇所

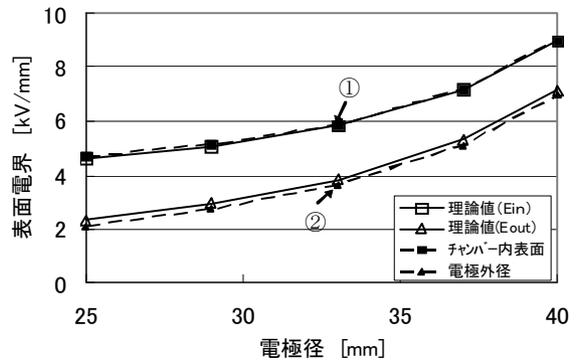


図3: 引出電極径と表面電界の関係

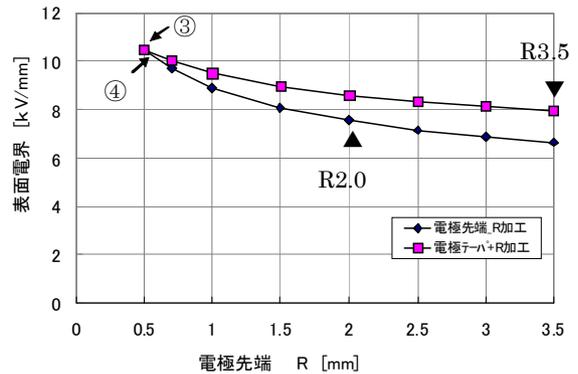


図4: 引出電極先端のR加工と表面電界の関係

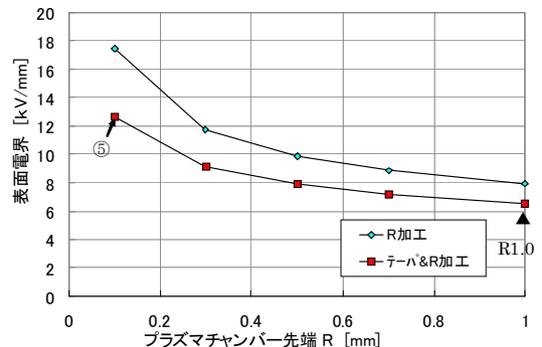


図5: プラズマチャンバーのR加工と表面電界の関係

3. 耐圧試験による設計放電限界の設定

3.1 真空中放電の限界

引出電圧を高くした場合の放電限界の傾向を実機の耐圧試験により確認した。真空放電の表面電界強度は良好な環境では Kilpatrick Criterion^[5] に従う。これによれば、平行平板間の電圧 W と電界 E には、

$$W \cdot E^2 \exp(-1.7 \times 10^5 / E) = 1.8 \times 10^{14}$$

W : 極間電圧 (V)

E : 表面電場強度 (V/cm)

という境界線があり、安定な電界を実現するために、これを超えない領域に設計しなければならない。

そこで第一に最高表面電界強度をこの Kilpatrick Criterion 以下となるように限界を設定する。平行平板電極間の電圧と表面電界の関係を表 2 に示す。

表 2: 真空放電の表面電界強度

電極間電圧 W [kV]	表面電界の限界 E [kV/mm]
30	14.1
40	12.9

3.2 放電とイオン源動作時の真空度の影響

計算上の放電限界に対し、実際のイオン源の放電限界はガス供給による真空度の上昇の影響が大きいと考えられる。真空度と放電限界の関係は Kei2-source を用いて経験的に測定されている。ただし測定時の電極形状は本論文の計算時の形状とは異なるため、影響については比率と傾向のみを評価した。

ガス量と真空度の関係を図 6 に示す。ただし、引出電極付近の真空度は実測できず、下流側インツェル電極チャンバーの 450 l/s ターボポンプ近傍に設置された真空ゲージの測定値 (Extraction Vacuum: $10^{-5} \sim 10^{-4}$ Pa) を示した。引出電極付近の真空度は測定値より悪いと考えられる。

放電の状況の指標として引出電源のリーク電流を測定した。引出電圧は 25 kV から 40 kV まで、ガス量も運転に使用している 0.06 ccm を基準に 0~0.09 ccm まで変化させた。測定結果より図 7 のように、(#1)安定領域、(#2)パルス放電発生開始、(#3)連続リーク電流領域、大リーク電流が発生する領域に区別することができる。各領域での引出電極リーク電流の波形を図 8 に示す。

測定結果より、

- 安定領域では、リーク電流は低いレベルでほぼ一定でガス量による大きな変動はない。
- 電圧を上げていくと、最初にパルス放電が発生する。ガス量が大きいほどパルス放電の開始電圧は下がる。
- さらに電圧を上げると、連続的に放電が発生し、2~4 mA の大きなリーク電流が発生する。連続放電、大リーク電流に移行する電圧レベルは、ガス量が大きいほど電圧は低くなる。

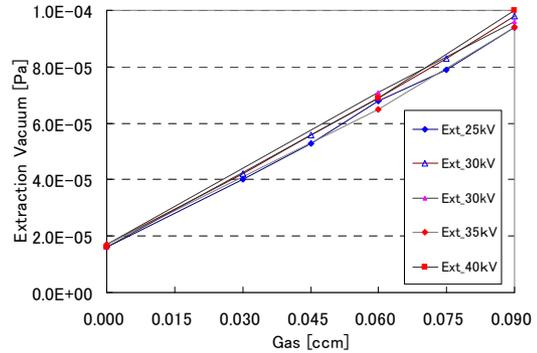


図 6: ガス量と真空度の関係

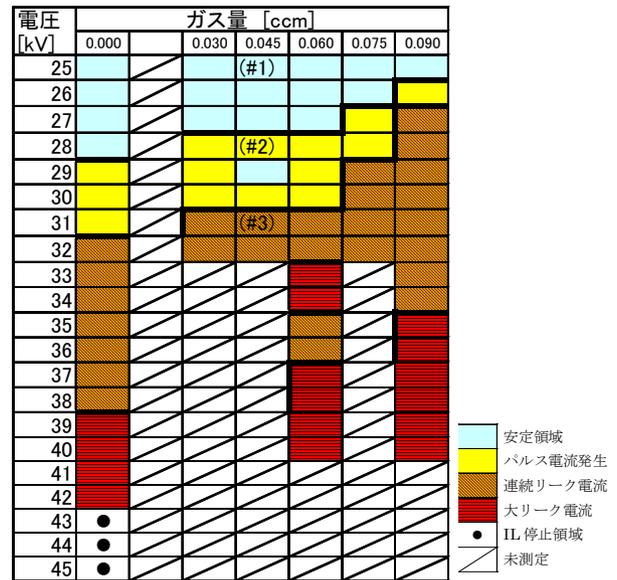
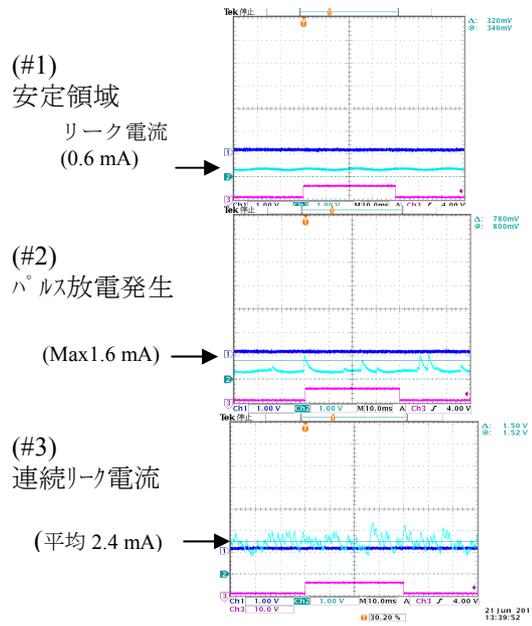


図 7: リーク電流の発生状況のマップ



Ch1: ビーム電流 (ビーム Off 状態で測定)
Ch2: 引出電極のリーク電流 2mA/V

図 8: 引出電極のリーク電流

3.3 設計目標としての放電限界表面電界強度

測定結果からは、パルス放電発生開始電圧、連続リーク電流への移行、大リーク電流への移行電圧のいずれも、ガス量を 0 から 0.09 ccm に増加すると、境界電圧は 85%程度に低下している。

引出電圧 40 kV での真空中の Kilpatrick Criterion より表面電界強度の限界理論値は 12.9 kV/mm である。イオン源の実運転でガスを流すことによる限界電圧の低下を考慮すると、経験的な測定結果 85%を踏まえ 10.9 kV/mm 以下の表面電界に抑える必要がある。設計値としては、さらに製作誤差や表面状態の不均一性などの余裕を 25%見込み、表面電界強度を約 8 kV/mm 以下になるように設定した。

4. 電極構造の改善箇所と電界分布

第 2 章の解析の結果からは、電極間隔よりも端部の R 加工が放電に対する影響において支配的であると推測された。第 3 章で設定した設計上の表面電界強度 8 kV/mm 以下の条件をみたすよう適切な形状を検討し、表 3、図 9 に示す各 R 加工を改善案として提案した。図 10 に示すように等電位線分布及び表面電界の解析にて、改善後の形状は、引出電圧 40 kV の条件下においても各部の表面電界強度を 8 kV/mm 以下に抑える見通しがたった。

今後、プラズマチャンバー側の形状を段階的に変更して、リーク電流、電圧とガス量、真空度との関係を実測し、形状の妥当性の確認を行う予定である。さらに、構造改良や真空のコンダクタンスの改善も行い、全体として高強度でより安定なイオン源の実用化を図りたい。

表 3: 各部の形状

部位	形状[mm]
引出電極先端	R2.0
電極テーパ角	R3.5
プラズマチャンバー先端	R 1.0 & テーパー加工

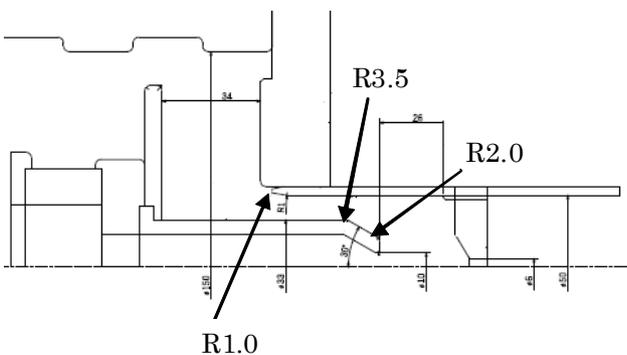


図 9: 形状の提案

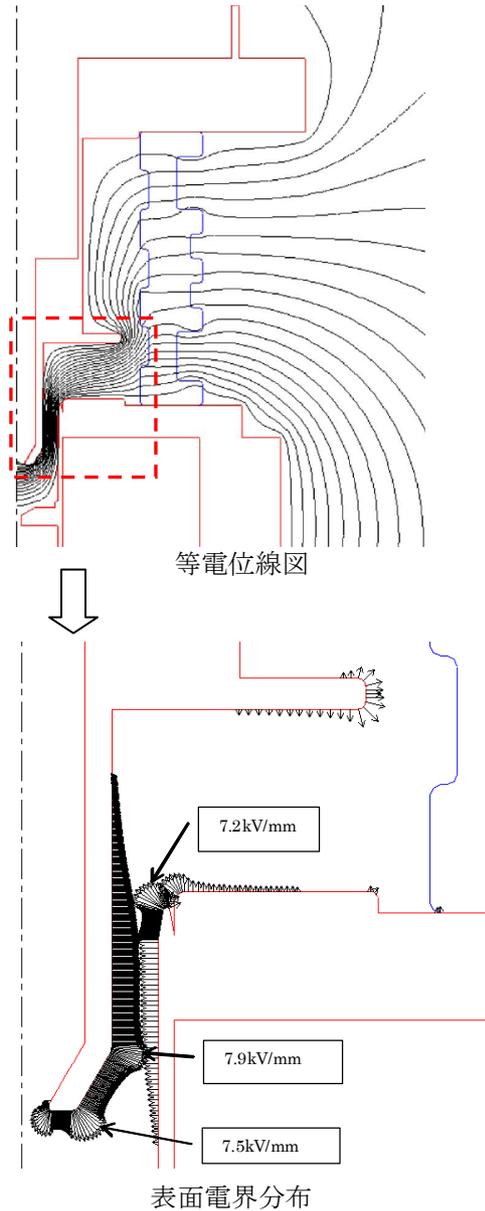


図 10: 表面電界分布と等電位線図

参考文献

- [1] M.Muramatsu et al., "Development of a compact electron-cyclotron-resonance ion source for high-energy carbon-ion therapy", Rev. Sci. Instrum. Vol. 76, No.11, pp.113304 1-6 (2005)
- [2] M.Muramatsu et al., "Production of highly charged Carbon ion at compact ECR ion source Kei2", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2009
- [3] M.Muramatsu et al., "Improvement of compact ECR ion source", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010
- [4] 渋谷義一 他, 「表面電荷法による複合絶縁系の電界解析」, 電気学会論文誌 99 巻 5 号 p8-14
- [5] W.D.Kilpatrick, "Criterion for Vacuum Sparking Designed to include both RF and DC", The Review of Scientific Instruments, Vol.28, No10, 1957, p824