

[15017]

レーダー法による電離電子の位置測定と電波による収束の基礎研究

An Early Stages of Study in Position and Convergence

of Ionization Electrons by Radar Method

内海 倫明^{#A)}, 金岩 潤一郎^{B)}, 赤川 和希^{A)}, 林田 智樹^{A)}, 千葉 雅美^{C)}, 上條 敏生^{C)}, 矢吹 文昭^{C)}, 小田木 秀斗^{C)}, 近 匡^{D)}, 清水 裕^{D)}, 藤井 政俊^{E)}

Michiaki Utsumi^{#A)}, Junichiro Kanaiwa^{B)}, Kazuki Akagawa^{A)}, Tomoki Hayashida^{A)}, Masami Chiba^{C)}, Toshio Kamijyo^{C)}, Fumiaki Yabuki^{C)}, Syuto Odagi^{C)}, Tadashi Kon^{D)}, Yutaka Shimizu^{D)}, Masatoshi Fujii^{E)}

^{A)} Department of Nuclear Engineering, Tokai University

^{B)} Graduate school of Engineering Course of Applied Science, Tokai University

^{C)} Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University,

^{D)} Faculty of Science and Technology, Seikei University

^{E)} School of Medicine, Shimane University

Abstract

A precise measurement of the microwave reflection from electrons beam excitation plasma have performed. The plasma reflection signals were measured by null method at 435MHz microwave and the frequency properties of the incident microwave scanning from 100MHz to 1.5GHz of the plasma reflection were also measured. The clear evidence of the microwave reflection signals was confirmed, but the frequency dependence of the reflection was not confirmed. In order to confirm clear frequency dependences of the microwave reflection from the plasma, it is expected of the improvement of a new gas enclosure vessel.

Keyword: microwave reflection, plasma confinement, Doppler shift

1. はじめに

我々は、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所の 1 号加速器を使って、平成 21 年度から平成 26 年度の期間に、“超高エネルギーニュートリノ検出器のためのパルス電子ビームの照射による誘電体温度上昇と電波反射測定”（課題研究番号 14017）^[1,2]を行ってきた。これは電波反射が誘電体の温度上昇による誘電率の変化によるものと考え、岩塩と氷（固体）に電子ビーム照射中に同時に電波を入射し、電波の反射と位相変化を観測する実験である。これまでの研究内容と成果として、電子ビーム照射による岩塩、および氷からの電波反射が確認され、電波反射の位相および位置が測定された。また、これらの結果が温度上昇による屈折率上昇を考慮した電波反射のシミュレーションの結果と一致した。本研究は長年行ってきたこの微弱電波反射測定の技術を利用して、気体プラズマからの電波反射を測定し、電波によるプラズマの収縮を確認することが目的である。

電離層では、太陽からの放射線により気体分子が電離したプラズマ状態になっている。電離層に自身のプラズマ振動数より低い周波数の電波が入射したとき屈折率が 1 より大きくなり、電波を反射する。この電波の反射現象を利用して、ラジオ放送や無線などが地球の裏側まで送、受信され通信が可能となっている。

プラズマに対してそのプラズマ周波数に非常に近いが少しだけ低い周波数の電波が入射するとき、電波の進行方向と逆方向に運動する粒子によって反射される。しかし、電波の進行方向と同じ方向（順方向）に運動するプラズマに対しては反射しない。これはドップラー効果によって、順方向に運動する粒子と逆方向に運動する粒子では観測される電波の振動数が変化するからである。つまり、近づいてくる電波の振動数は高く、遠ざかる電波の周波数は低くなるからです。逆方向に運動するプラズマには大きな反跳運動量を、順方向に運動するプラズマには小さな反跳運動量しか与えない。本研究ではプラズマに照射する電波に二つの役割【(1)電波によるプラズマ収束、(2)電波反射の位相測定からプラズマ中の電離電子の位置情報の取得】を担わせ、プラズマ収束を定量評価する。まず、最初に電離状態を比較的、長く保つことができる希ガスであるアルゴンに高エネルギー電子を照射し、生成されるプラズマに電波を入射して、その反射波の測定を行った。

2. 実験

2015 年度は、高崎量子応用研究所の 1 号加速器で電子ビーム照射実験を 2 回行った。435 MHz 電波による零位法を用いた電波反射の測定実験とネットワークアナライザーを使用しての、入射電波周波数 300 MHz から 1.5 GHz までの反射強度の周波数スキャン実験である。両実験共に市販のポリカーボネート成

[15017]

型真空デシケーター(アズワン株式会社、MVD-300、電波反射容器ということにする。)と対数周期アンテナ (SCHWARZBECK UHALP 9108 A1(1098) 300MHz~1.5GHz)を使用し反射電波を S11 モードで測定した。両実験共に電波反射容器とアンテナの配置は同じである。Figure 1 は電子ビーム照射の概略図を示し、写真 1 は、対数周期アンテナが見える角度からの写真を示している。鉛直上方より電子ビームがシート状に照射され、照射と同時に水平方向から電波を入射し、反射波を測定する。通常の電子ビーム照射では所定の加速電圧とビーム電流に到達後ビームシャッターを開くが、シャッターの開閉の際に電波の反射が変化し、プラズマからの電波反射と区別できなくなったために、シャッターを開いたまま電圧、電流を上昇させた。電圧、電流が所定の値に達した時から 60 秒間照射実験を行った。したがって、実際には電子ビームは 60 秒間だけではなく、電流が上昇しているときにもガスに照射されている。ガス容器の保護のために容器の上部と下部に厚さ 1 cm のアルミ板を取り付けた。電子がガス容器の中央を通過するために上部と下部の中央に矩形の穴をあけ、この部分に、厚さ 0.5 mm のアルミの照射窓 (7 cm × 2 cm) を設置した。また、アルゴンガスは大気圧でフローした。

2.1 電波反射測定実験

2 MeV, 1 mA~6mA の電子ビーム照射による周波数 435 MHz 電波入射に対する電波反射強度を測定した。鉛直方向からの電子ビームに対して、水平方向から対数周期アンテナにより、電波を入射し同時に、S11 モードで零位法により、電波反射を測定した。読み取り回路ロジックを図 2 に示す。反射波の微小変化を測定する為に零位法を用いた。課題研究番号 14017 で構築した National Instruments 社の LabVIEW system による自動振幅負帰還装置を使用した。この装置は、測定した振幅値をゼロとするように参照信号の可変減衰器と Variable Phase shifter (可変移相器)を同時調整する。Splitter と circulator によりそれぞれ分離された参照信号と反射波は Combiner で足し合わされる。可変移相器を制御してゼロ調整を LabVIEW system が行う。電子ビーム照射直前に自動振幅負帰還装置によるゼロ調整を中止し、この振幅測定により電波反射率(電力)を得る。可変移相器を通過後の信号は参照信号(reference)として合成器(Combiner)で反射(reflected)信号と合成される。合成器出力は分配器により Textronix 社のリアルタイムスペクトラムアナライザ RSA3303B (RSA) と検波器(Detector)へ分岐され、RSA3303B はタイムドメインで合成器出力を測定する。検波された信号は LabVIEW system の ADC でデジタル化され、デジタル化された信号は外部コンピュータに記録される。その大きさに応じて制御プログラムが計算した可変位相器供給用電圧は外部コンピュータに記録される。電圧出力値は LabVIEW system の DAC によってアナログ変換された制御電圧は可変移相器へ供給され参照信号の位

相を制御する。

2.2 周波数依存性

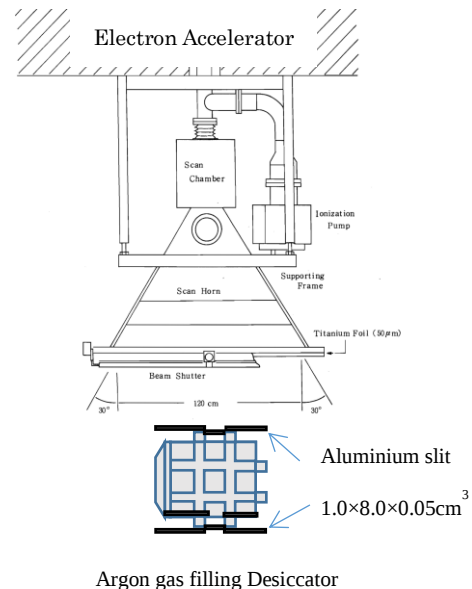


Figure 1 over view of the experiment

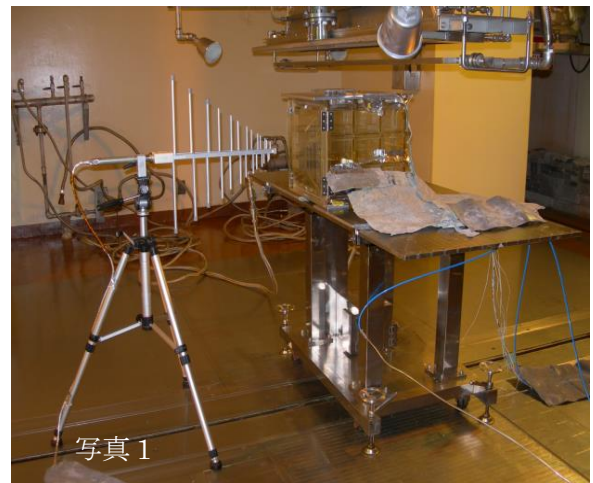


写真 1

ネットワークアナライザー (E5061A) を用いて、100 MHz~1.5 GHz の入射電波に対する反射電波強度を調べた。前の実験と同様に真空デシケーターにアルゴンガスをフローしながら鉛直上方より電子ビームを照射し、水平方向から対数周期アンテナにより電波を入射した。また、ビームシャッターの開閉によるノイズを避けるためにビームシャッターは開いたまま電子ビームの加速および電流調整を行った。電子ビームのエネルギーは 2 MeV で電流を 1, 2, 4, 6, 8 mA の 5 回実験を行った。所定の電流に到達し

[15017]

てから 60 秒間ビームを照射した。

3. 結果

図 3 は電波反射測定結果を示している。電子ビームのエネルギーは 2 MeV で電流は 1 mA である。青プロットは入射信号 -10 dBm, 435 MHz の電波に対する反射率を示している。縦軸は電波反射の電力を dBm で表し、横軸は時間[s]である。また、第 2 縦軸はオレンジプロットのビームステータスを電圧[V]で表している。黒の実線は電波反射の 20 秒移動平均を示している。加速器の状態は領域 A(緑),B(青),C(赤)で表されている。領域 A(緑)は電圧上昇領域、B(青)は電流上昇領域、C(赤)は実験 (60 秒) の領域を示している。この結果より、アルゴンガスへの電子ビーム照射による 435 MHz 電波の反射が確認された。電流が 1mA になる前に、反射強度が飽和していることが分かる。これは、零位法の感度が高く -40 dBm のあたりで、信号が飽和したと考える。

図 4 は 2 MeV,6mA の電波入射に対する電波反射

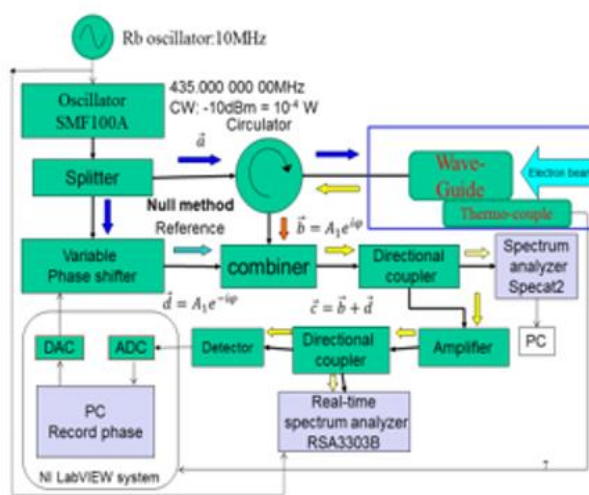


図2 Electronics

の入射電波の周波数特性を示している。実線 (青) は電子線照射前の反射特性を示し、プロット (橙) は電子線照射中の周波数特性を示している。電子線を照射しなくても電波の反射は観測された。これは、アルゴンガスの容器であるポリカーボネート製の容器自身の扉部分に蝶番、側面にガス圧力計、バルブ等の金属部品が取り付けられていることと電子ビームを遮蔽するために、容器の上下部分に 1 cm 厚のアルミ板が取り付けられていることによると考えられる。特に 100 MHz~270 MHz における電波反射強度比は電子ビーム照射前、照射中とかなり高いのでこの部分は省略した。また、300MHz~1500MHz においては、電子ビーム照射前と照射中における電波反射強度の違いはわずかでプロットと実線が殆どすべて

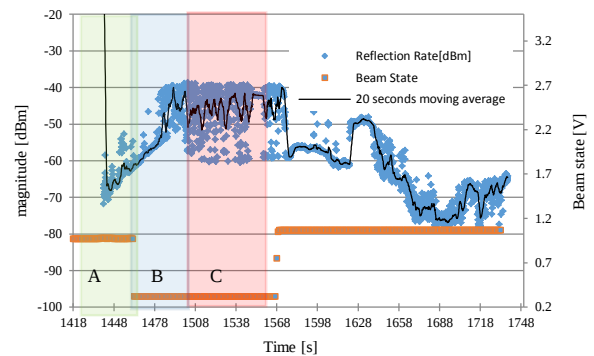


Fig.3 Reflection in Ar plasma by null method

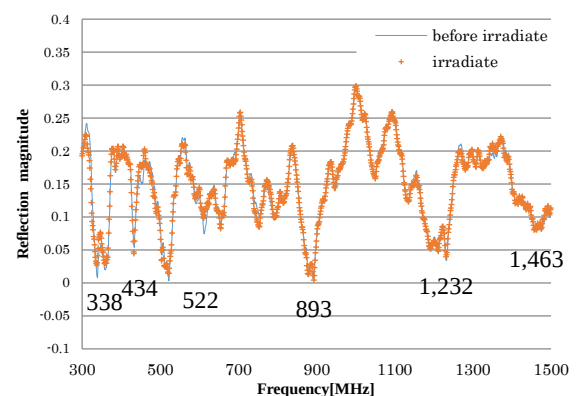


Fig. 4 Reflection scanning from 300MHz to 1.5GHz in Ar Plasma 2MeV,6mA

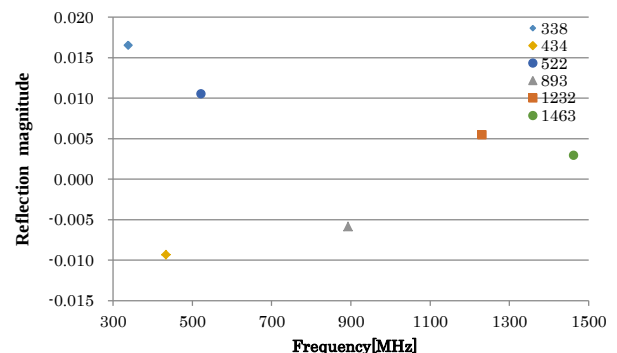


Fig.5 frequency depends of reflection from 300MHz to 1.5GHz(Ar,2MeV,6mA)

の周波数で重なっている。そこで反射強度の低い周波数を 6 点ピックアップしてこの周波数つまり 338、434、522、893、1232、1463MHz において電子線照射前と照射中の反射強度の変化を図 5 にプロットした。図 5 より、約 300 MHz から 1.5 GHz の入射電波に対して電波反射率は 0.015 より低く、900MHz 付近で反射強度が極小となり 1300MHz 付近に極大があるようにも見える。

4. まとめ

希ガスのアルゴンプラズマからの電波反射の測定を行うために、アルゴンに電子ビームを照射し、発生したプラズマに対する電波の反射を S11 モードによるゼロ位法およびネットワークアナライザーによ

[15017]

り測定した。ゼロ位法により、2 MeV, 1 mA 電子ビーム入射時の電波反射が観測された。反射強度は-40 dBm を超える大きな信号であった。また、ネットワークアナライザーによる 100 MHz~1.5 GHz 電波反射の測定を行った。電波反射はアルゴン容器の金属部分等からの反射波が入り混じって観測され、すべての周波数に対する反射波を測定することが困難であったが、反射強度の低い周波数を 6 点選んで電子照射前と照射中の反射強度の差の周波数特性を調べたが、プラズマ周波数に相当する顕著なピークは確認できなかった。これは反射強度の低い 6 点についてのみ調べたのであり、もう少し詳細に調べることが必要であると思われる。その為にはプラズマ以外からの電波反射の原因（金属部品等）を可能な限り取り除き電波反射のノイズ成分を低減させることが重要であると思われる。

- [1] M. Chiba et al., Nuclear Instr. and Meth, **A662**(2012)pp. S222-S225.
doi:10.1016/j.nima.2010.11.165
- [2] M. Chiba et al., N JAEA-Review 2014-050, **4-29**
(2015) pp.157.