

研究課題：JT-60SA 電子サイクロトロン加熱装置用広帯域偏波器の開発研究

研究代表者：三枝幹雄（茨城大学）

原子力機構担当者：森山伸一

研究協力者：小山岳（茨大）、小林貴之（原子力機構）、杉山直弥（茨大）、松原史明（茨大）、滝井啓太（茨大）

研究期間：平成24年度-25年度

「研究目的・意義」

ITER のサテライトトカマクとしてその成果を期待される JT-60SA の電子サイクロトロン波帯加熱電流駆動装置では、現在の 110 GHz 帯に加え 138 GHz 帯での運転も検討されており、それに伴って伝送路に設置されている偏波器も広帯域化が必要となった。本研究では、JT-60SA 用に 110 GHz と 138 GHz の2周波数で使用可能な広帯域マイターバンド型偏波器の開発を目指す。この実現により偏波器を周波数毎に製作し交換する必要がなくなり、コストと時間の節約が可能となる。

「研究成果」

(1) 研究背景

トカマク型核融合炉のプラズマ閉じ込め改善に有効な電子サイクロトロン波加熱電流駆動の高効率波動励起には、ミリ波帯の電磁波を磁化プラズマに対して特定の入射角とそれに最適な楕円偏波で入射する必要がある。そのため、モード変換器内蔵型ジャイロトロンが発生した直線偏波の HE₁₁ モードを特定の楕円偏波に変換するために反射型回折格子を用いた偏波器が使用されている。従来は単一の周波数に対応した偏波器が用いられていたが、2周波数可変型ジャイロトロン(110, 138 GHz)の開発に伴い広帯域の偏波器が必要となった。そのため貴機構からの平成22年度委託研究「JT-60SA の電子サイクロトロン波入射装置における広帯域制御に関する検討」の成果を活かして本共同研究を行なった。

(2) 偏波器の原理

マイターバンド型偏波器の反射鏡の表面は、図1に示す反射型回折格子形状になっており、入射された電磁波は格子方向の磁界成分 Hz を持たない Fast Polarization (FP) と、格子方向の電界成分 Ez を持たない Slow Polarization (SP) の2つのモードに分けて考えることができる。溝の周期 a が入射電磁波の半波長以下では FP は溝の内部に進入できず回折格子の表面で反射され、SP は溝の内部まで進入し回折格子の底面で反射される。溝の深さ h により反射波の FP と SP で位相差が生じ、回折格子を回転させて2つのモードの成分比を調節することで特定の楕円偏波を生成することができる。

全域偏波器は図2のように溝の深さの異なる2枚の回折格子の組み合わせで構成される。Twister は溝の深さが波長の約4分の1で反射波の FP と SP の位相差は180度程度となり、回折格子を回転させることで反射波の偏波面を回転させる事ができる。また、Circular polarizer は溝の深さが約8分の1波長で、反射された FP と SP の位相差は90度程度となり反射波を任意の楕円偏波にすることができる。本研究では回折格子形状の最適化により、2周波数で全偏波が発生できる広帯域偏波器の開発を目指した。

(3) 低電力試験

低電力試験用に4種類の回折格子を製作し、偏波特性の評価を行った。溝に比べて畝を十分に細くする事により広帯域化を目指した。最終的に選ばれた2種の回折格子の設計値と測定値を表1に示す。

表1 回折格子の主要寸法の設計値と実測値

	周期 a [mm]	溝幅 b [mm]	溝の深さ h [mm]	回折格子のR [mm]	材質
Twister	1.17	0.91	設計:0.85, 実測:0.84	0.1	無酸素銅
Circular Polarizer	1.17	0.91	設計:0.56, 実測:0.54	上面:0.1, 底面:0.15	アルミ合金

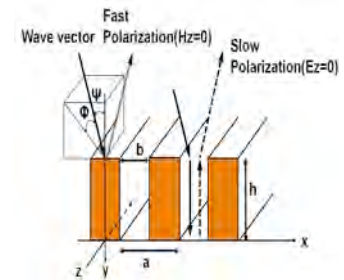


図1 反射型回折格子

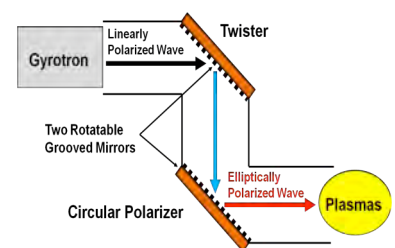


図2 2枚の回折格子による全域偏波器の原理

低電力試験は 110 GHz 帯および 138 GHz 帯で行った。円形コルゲート導波管の HE₁₁ モードを偏波器へ入射し、偏波器で生成された楕円偏波を導波管開口部からガウスビームで放射し、2枚の位相板 (π 位相板、 $\pi/2$ 位相板) を通過させて直線偏波に戻すことで偏波を測定した。Twister は溝の深さ 0.84 mm で 2つの周波数で偏波面を 0 度から 360 度まで回転させられる事を、Circular polarizer は溝の深さ 0.54 mm で広帯域特性を確認した。測定値から図 2 のように Twister と Circular polarizer を組み合わせ、直線偏波入射で得られる偏波を計算により求め、ポアンカレ球上にプロットすると、図 3、図 4 のように 110 GHz と 138 GHz でほぼ全面が覆える事を確認した。

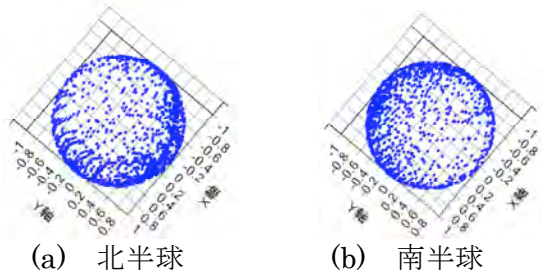


図 3 ポアンカレ球(110 GHz, 測定結果)

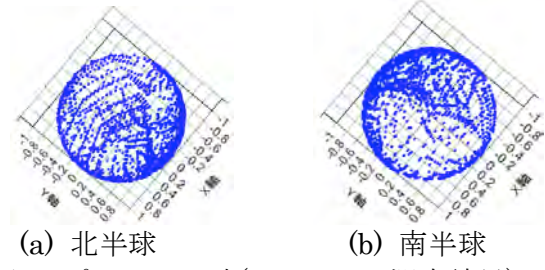


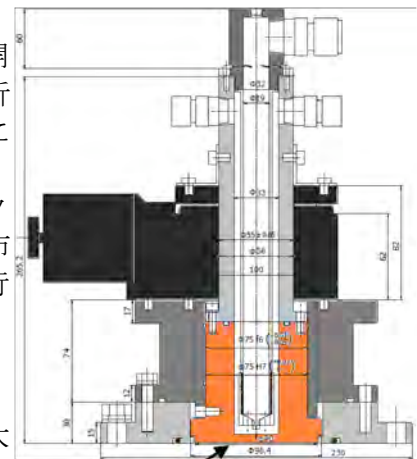
図 4 ポアンカレ球(138 GHz, 測定結果)

(4) 大電力試験用偏波器の設計・製作

1 MW, 100 秒運転を想定した冷却及び駆動機構付き偏波器の開発のため、汎用有限要素法解析コード FEMTET による熱応力解析を行い、その結果を反映して大電力試験用に Circular Polarizer に比ベジュール損失の大きい Twister の設計・製作を行った。また、低電力試験用偏波器で問題となった真空シール構造と駆動トルクの問題を解決する為に、磁性流体による真空シールの導入および市販回転ステージのギャボックス追加による駆動トルクの増強を行い、図 5 に示す大電力試験用偏波器の設計・製作を行った。完成後、真空リーク試験、駆動試験により、実用に堪える事を確認した。

(5) 大電力試験

周波数 110 GHz にて図 5 に示す Twister の 0.24 MW, 3 s までの大電力試験を行った。電力とパルス幅の上限はエージング期間で決まった。回折格子での高周波損失は回転角に依存し、出力の偏波面は同じでも回折格子の回転角が 0 度の損失は 90 度の場合の約半分になり予測と定性的に一致する事を確認した。



偏波板(クロム銅:SH-1)
回折格子形状:Twister

図 5 大電力試験用偏波器

「まとめ」

広帯域低電力試験用偏波器の試作を行い、その特性評価を 110 GHz および 138 GHz で低電力試験により行った。測定データより 110 GHz, 138 GHz の両周波数で全域偏波器となっている事を確認した。また冷却及び駆動機構付き偏波器の設計・製作を行い、周波数 110 GHz にて 0.24 MW, 3 s までの大電力試験を行い、定性的には事前の予測どおりの高周波損失の回転角依存性を確認した。

成果リスト (口頭発表含む)

- 1) 小山岳, 他 6 人, JT-60SA ECCD システム用大電力ミリ波帯広帯域偏波器の開発研究, 第 29 回プラズマ・核融合学会年会, 福岡, 2012 年 11 月 29 日.
- 2) 松原史明, 他 6 人, 大電力ミリ波帯広帯域偏波器の開発研究, 第 20 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 日立シビックセンター, 2012 年 11 月 24 日.
- 3) N. SUGIYAMA, et al., "Research and development of high power wide-band polarizer for ECCD system in JT-60SA", 22nd International Toki Conference, Toki, Nov. 21, 2012.
- 4) 佐井拓真, 他 6 人, 大電力ミリ波帯広帯域偏波器の設計研究, 第 21 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 日立市シビックセンター, 2013 年 11 月 24 日.
- 5) 松原史明, 他 6 人, 第 30 回プラズマ・核融合学会年会, 東工大, 2013 年 12 月 4 日, 04aE58P.
- 6) 佐井拓真, 他 6 人, 大電力ミリ波帯広帯域偏波器の開発研究, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, エポカルつくば, 2014 年 6 月 19 日.
- 7) T. Kobayashi, 他 16 名, submit to 25th Fusion Energy Conf., Saint Petersburg, 2014.
- 8) M. Saigusa, 他 6 名, submit to 28th SOFT, San Sebastián, 2014.