

高周波自動整合器の修理

○伊藤康彦^{#A)}、中野治久^{B),C)}、星野航希^{C)}

^{A)}核融合科学研究所 技術部

^{B)}核融合科学研究所 プラズマ装置学ユニット

^{C)}名古屋大学大学院 工学研究科 総合エネルギー理工学専攻

概要

核融合研究炉心プラズマのプラズマ加熱装置として、中性粒子ビーム入射加熱装置 (NBI) がある。核融合科学研究所 (NIFS) では NBI にセシウムフリー高周波負イオン源を目指した研究を行っている。この負イオン源では電力 1.2 kW、周波数 13.56 MHz の高周波電源により高周波プラズマ放電を生成している。高周波電源と放電用アンテナコイル間にはインピーダンス整合をとるために自動整合器が用いられる。今回、この自動整合器 (アステック社製、DH-30-02A) の制御部 PIC マイコンが損傷し、内臓プログラムも消失する故障が発生した。また外注修理が困難であったため NIFS で行っている修理についての経過を報告する。

1. 研究背景と目的

1.1 中性粒子ビーム入射装置

磁場閉じ込め核融合炉心プラズマを 1 億度以上まで加熱する装置のひとつとして (重) 水素負イオンを用いた中性粒子ビーム入射装置 NBI (Neutral Beam Injector) がある。負イオン NBI は世界で日本のみ、核融合科学研究所と量子科学技術研究開発機構 (旧日本原子力研究開発機構) において実用化されている。負イオン NBI の基本構成を図 1 に示す[1]。

負イオン NBI では、まず水素負イオン源にて水素のイオン源プラズマ中に水素不イオンを生成する。生成された水素負イオンは、ビーム加速器によって水素負イオンビームとなる。水素負イオンビームは、中性化セルで水素ガスと衝突して電子が 1 つ脱離されて原子ビーム (中性粒子ビーム) となり、炉心プラズマに電力を供給する。国際熱核融合実験炉 ITER では 1 基の NBI 当たり静電加速により 1 MeV、40 A の水素負イオンビームを生成し、16.5 MW の電力を炉心プラズマに供給する。

実用化されている負イオン NBI ではフィラメント・アーク (FA) 放電型負イオン源が用いられている。ここでは、フィラメントの損耗や突発的な異常放電によるフィラメント損傷が起るためフィラメントの交換が必要となる。また、水素負イオン源では、

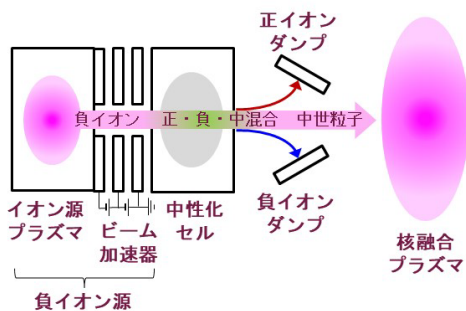


図 1. 中性粒子ビーム入射装置

itoy@nifs.ac.jp

イオン源プラズに低仕事関数元素であるセシウム (Cs) を添加し、プラズマ・ビーム境界の電極 (プラズマグリッド電極 (PG) 表面に Cs を被覆することによって仕事関数を下げ、PG 表面に衝突する水素正イオンや原子に電子を付着させることによって水素負イオンを大量生成している。FA では、フィラメント材質であるタングステンが PG 表面に付着するため、Cs 添加量が多くなることが知られている。また、仕事関数が低い Cs はビーム加速器内で異常放電を起こしやすくする。このため、保守性や定常運転に必要な ITER や核融合原型炉の NBI ではフィラメントを用いない高周波 (RF) 放電型負イオン源が必須となり、ITER では RF 負イオン源が採用されている。

1.2 Cs フリー水素負イオン源研究

日本の核融合原型炉では、ITER-NBI の RF 負イオン源から更に進んで Cs を用いない Cs フリー RF 負イオン源が求められている。核融合科学研究所では、Cs 被覆 PG の代替として日本発の機能性材料であり、低仕事関数 (~2.4 eV) かつ加工性に優れ、また原材料の入手性に優れた C12A7 エレクトライドの PG を用いた Cs フリー水素負イオン源の基礎研究が行われている。この研究では C12A7 エレクトライドの表面状態を保つ面からも RF 放電が必須となっている。

図 2 にこの研究の実験装置概念図を示す[1]。図 1

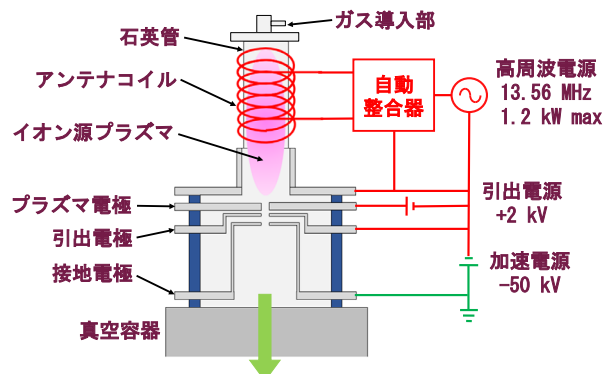


図 2. Cs フリー水素負イオン源研究の実験装置

の負イオン源と同様にイオン源プラズマ部とビーム加速部に分かれている。イオン源プラズマ部はビームエネルギーに相当する電圧(最大 52 kV)分だけ(絶対値として)高電位となっている。イオン源プラズマ部では、水素ガスを上流側から内径 40 mm の石英ガラス管に導入する。石英ガラス管には外径 6 mm の銅管製のアンテナコイルが巻かれている。アンテナコイルには RF 電源より最大 1.2 kW (13.56 MHz) の電力が自動整合器を通して給電され、石英ガラス管内部に誘導結合により水素プラズマが生成される。

プラズマのインピーダンスはプラズマパラメータによって変化する。自動整合器は、高電位に置かれている RF 電源と負荷(アンテナコイルとプラズマ)との間でインピーダンス整合を自動的に行い、RF 電源への反射電力を抑制するとともに、高効率で RF 電力をプラズマへ結合させる。水素プラズマ内に生成された負イオンは、加速器の一部でもある PG と引出電極間に印加した電圧により両電極の穴から引き出され、更に引出電極と加速電極間の電圧により所定のビームエネルギーまで加速される。

1.3 自動整合器の故障と本報告の目的

上記装置を用いた実験中に、加速器内の異常放電が発生し、自動整合器が突然動作しなくなった。本報告では、自動整合器の故障原因を推定し、対策を施した上で自動整合器を修理することを目的とした作業を紹介する。

表 1. RF 自動整合器の仕様

モデル名	DH-30-02A
使用周波数	13.56 MHz
最大定格電力	3k W
入力インピーダンス	50 Ω
負荷インピーダンス	2 Ω以下
整合精度	0.5 %以下
整合時間	1~2 秒以内
冷却	強制空冷
寸法(H×W×D)	245×188×360
重量	約 9 kg

2. 自動整合器の仕様

故障した自動整合器を構成する主要部を図 3 に、内部の写真を図 4 に、仕様を表 1 に示す[2]。

まず動作の概略を述べる。RF 電力はインピーダンス測定回路を経て負荷との整合状態を検出し、この情報は制御回路のマイコンによって処理される。マイコンは整合回路を構成する可変コンデンサ(バリコン)をステッピングモータによって回転駆動し、負荷となる誘導コイル側からの反射電力が最小となるように制御する。以下、各部について述べる。

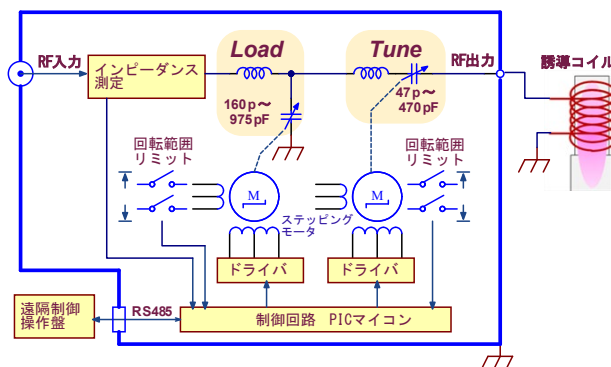


図 3. 高周波自動整合器の構成

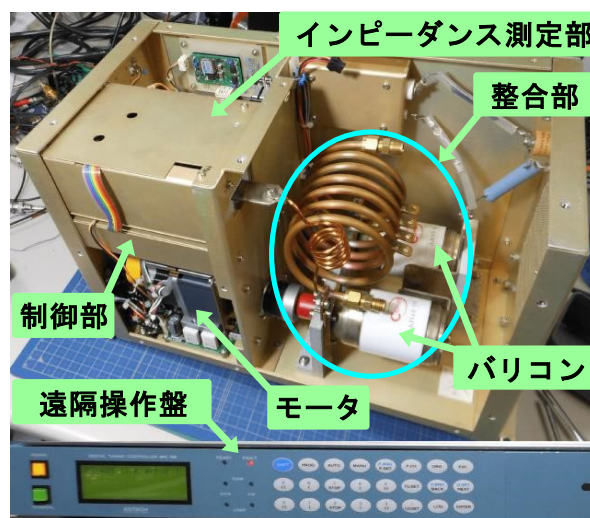


図 4. 高周波自動整合器内部

RF 電力はトロイダルコイル 3 個を貫通し、2 次側となるインピーダンス測定回路に磁気結合され、6 系統の検波回路を経て H8 マイコン基板 AKI-H8/3664F (秋月電子通商) に取り込まれインピーダンス計算に利用される。

RF 信号は Load 及び Tune の各共振回路を通して負荷となるアンテナコイルに出力される。共振回路にはステッピングモータで駆動される 10 回転のバリコンがあり、制御方法は不明ではあるが、最終的に反射電力が最小となるように、制御部によってこれを調整している。

制御部の内部を図 5 に示す。主要部はマイコン PIC16F877-20/P (Microchip Technology Inc.) 2 個で構成され、各々 Load と Tune バリコン調整用のステッピングモータを駆動する。その他の機能はモータの回転範囲の制限及び、遠隔操作盤との RS-485 規格による通信等を行っている。

本自動整合器の電源は遠隔操作盤内臓のスイッチング電源から供給される。

3. 高周波自動整合回路の故障箇所と対策

3.1 故障原因

本自動整合器を調査してみると、5 V 系電源電圧が 2.2 V まで低下しており、制御部シールドボックス内

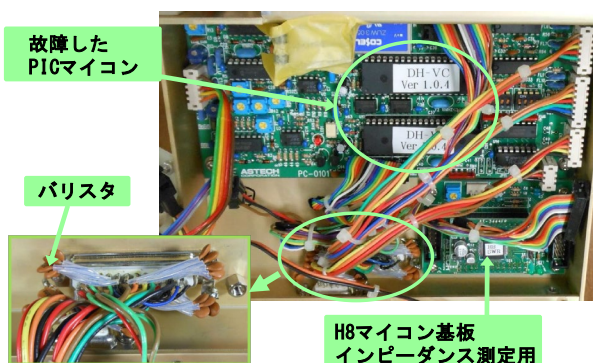


図5. 故障した制御部内部

で異常加熱していたPICマイコン2個の不良であることが分かった。この原因は異常放電によるサージ電圧が制御部のD-subコネクタを経由してPICマイコンに印加され、ラッチアップしたものと思われる。

3.2 手動操作で対応

PICマイコンの不良により自動制御ができず、修理予算確保が困難であったため、応急対策として自動制御なしの手動遠隔操作で対応することにした。早急な対応が求められ、使用を終えていた超音波モータ操作盤を改造して適用した(図6)。

3.3 超音波モータ操作盤の改造

本自動整合器の操作盤は簡単な個別TTLロジック回路で構成され、超音波モータドライバ2個に対し、絶縁されたCW/CCW(時計/反時計回転)パルスの送出及び、回転範囲リミット信号を受信するものである。モータ部との通信はパラレル方式である。

本自動整合器の製作会社は廃業しており、手元には主要部の結線図のみがあり、回路図がなかった。手動操作に必要な部分として本器のモータ駆動及び、リミット部に絞って回路図を作成し、これらと適合するように手動操作盤回路を修正した。本整合器の制御部は不要となるので取り外した。本整合器専用の遠隔操作盤では、バリコンの回転位置情報をステップモータへの送出パルス数と回転方向を基に取得している。

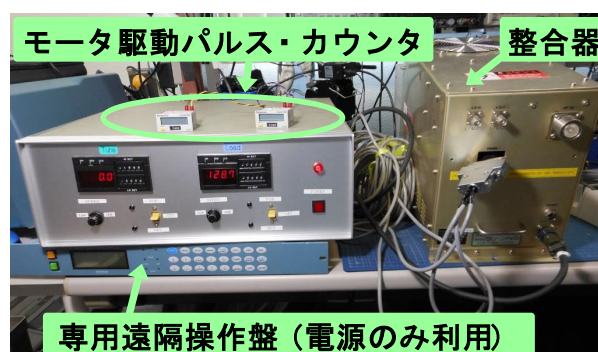


図6. 改造した超音波モータ操作盤

これに対し手動操作盤では、アップカウンタLC2H(Panasonic co.)を用いてモータ送出パルスを計数した。カウントダウンができないため不便であったが、応急的に利用した。

3.4 手動操作の問題

プラズマ放電実験で利用した結果、以下の問題が分かった。

- 調整手順はLoadからTuneの順で共振するポイントを探す操作を繰り返すため、最適値に到達するまでに時間を要する。
- Tuneの共振周波数を調整する際、共振範囲が極めて狭く操作が容易でない。
- 実験条件及び放電状態が変化した場合、整合が大きく外れると早急に応答できない。
- 手動での最適値探索では、高周波発振器の定格電力の半分以下の500W程度までの運用が限界である。

以上の事から手動では作業効率が極めて悪く、整合の自動制御が大変有効であったことが判明し、早急に自動制御の復旧が必要となった。

4. 自動制御回路の自作

4.1 制御用マイコンの選択

主要部となるマイコンは、使用経験のあったマイコンボードSTM32F303E(STMMicroelectronics NV)を

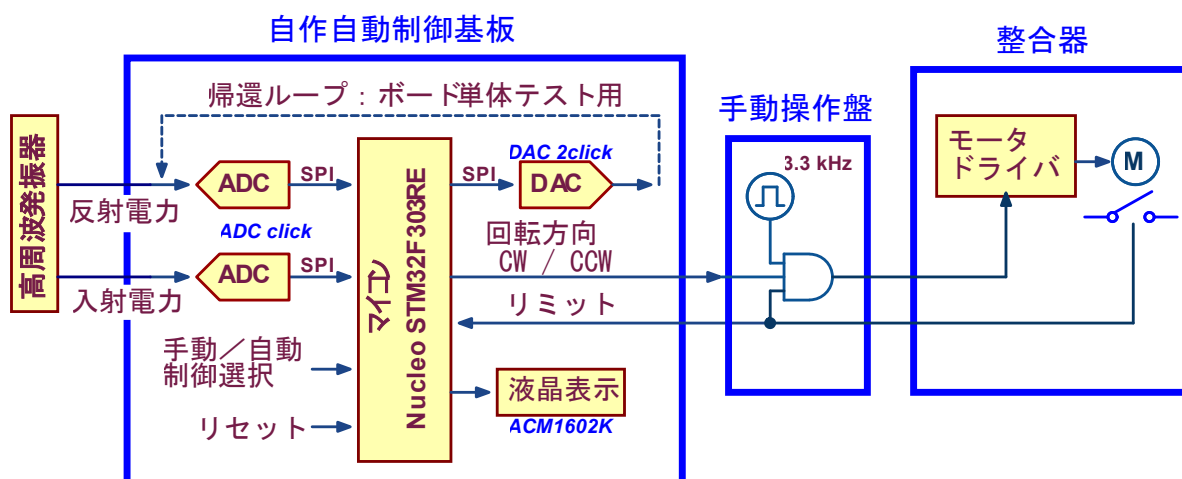


図7. 製作した自動制御ボードの構成

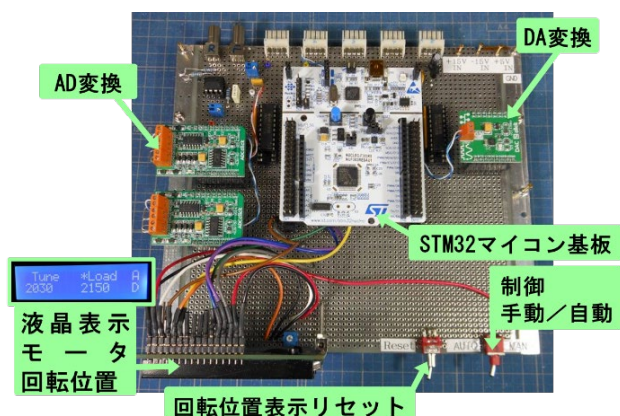


図 8. 自作した自動制御ボード

選択し、プログラム言語は C を利用している。制御ボードの構成図を図 7 に、その外観を図 8 に示す。

4.2 整合状態の測定

整合器はインピーダンス測定回路を用いて整合状態を測定し、反射電力が最低となるように自動制御を行っていた。この回路を利用するためには、その回路動作と測定結果からインピーダンス計算方法を解析する必要があり、時間を要するため、今回は利用しなかった。

自作する回路では上記の代替として、RF 電源のモニタに表示される反射電力を最小にするという、手動整合時に行っていた調整方法を参考に、RF 電源からの入射及び反射電力モニタ信号を利用する方法とした。

これらの信号を取得する AD 変換器 (ADC) は、マイコン内臓の物よりも低ノイズとなるよう、外付けで ADCclick (MicroElectronika) を利用した。

4.3 制御方式

制御方式を決めるにあたっては、故障した本自動整合器の方式が不明なため、以下の簡易的な方法を採用した。

モータ駆動用として 0.1 ms 周期のパルスを 0.5 ms ~ 10 ms の時間幅で送出した後、反射電力を測定し、これが減少するような回転方向のパルスをモータドライバへ送出する。この手順で最初は Load で反射電力が最低になるまで調整した後、同様に Tune の調整を行う。以上の動作を反射電力が数ワット以下になるまで繰り返し行う。

4.4 疑似負荷、液晶表示

DA 変換器 DAC2click (MicroElectronika) はボード単体での動作試験用に疑似負荷信号を出力するために利用する。振幅反転したガウス関数波形を疑似共振波形として出力し、これを反射電力入力端子に接続して帰還ループを形成するために利用する。

液晶 (LCD) 表示は Load、Tune の各モータドライバへ送出するパルス数を表示させ、バリコンの静電容量の目安とする。バリコンが最大容量の場合を 0 とし、容量の変化に応じてカウント値が増減する。

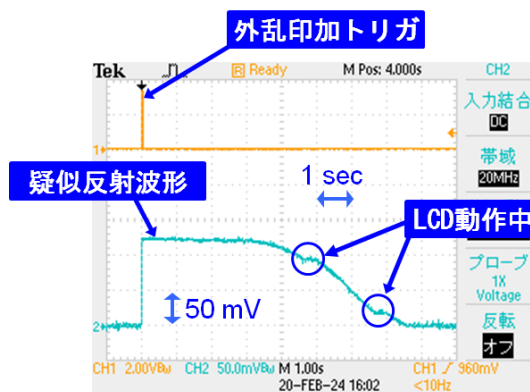


図 9. 制御ボード単体での制御波形

5. 動作試験

5.1 制御ボード単体動作試験

模擬負荷を利用して机上で回路及び制御プログラムのデバッグを行った。反射が最低レベルの状態、つまり整合が取れた状態から、外乱として整合ポイントを大幅に外した所までずらした後、整合ポイントまで制御される応答性を見ながらプログラムの調整を行った。この時の応答波形を図 9 に示す。

外乱から整合までの時間が 8 秒と長くなっているのは、応答状態の観測の都合で故意に遅らせたことによるものである。制御中の波形で 200 ms に渡ってフラットになっている部分があるが、液晶表示用の LiquidCrystal ライブラリに含まれる print() 関数の実行中に制御が停止したためである。

5.2 実負荷動作試験

ボード単体で一応の結果を得たので現場での動作試験に移行した。実負荷となる放電部と自動整合部が実験装置の高所部に設置されており、この部位に頻りにアクセスして調整することが容易でなかった。このため、まずは簡単に試験を進められるよう、実験装置から放電部を取り外し、机上に放電部や整合回路、測定機器を置き、低 RF 電力給電 (10 W) による無放電での動作試験を行うことにした (図 10)。10 W 以下の RF 給電であるため、全反射状態となっても各機器に損傷を与えることはない。

動作試験の結果、空間ノイズが大きいいためマイコンが誤動作を起こして正常に機能しなかった。対策として網目状の銅線を電磁シールドとしてアンテナコイルに巻き付けることにより、誤動作は解消された。

6. まとめ

保守性に優れた高周波負イオン源で使用する高周波自動整合器が故障し、メーカー修理が困難となったため制御回路を自作し、制御ボード単体での動作試験を終えた。次に低 RF 電力給電による無放電での実負荷試験を行ったところ、ノイズの影響によるマイコンの誤動作が発生したが、ノイズ対策を施すことで問題は解消された。現在は自動整合プログラムの調整を行っているところである。

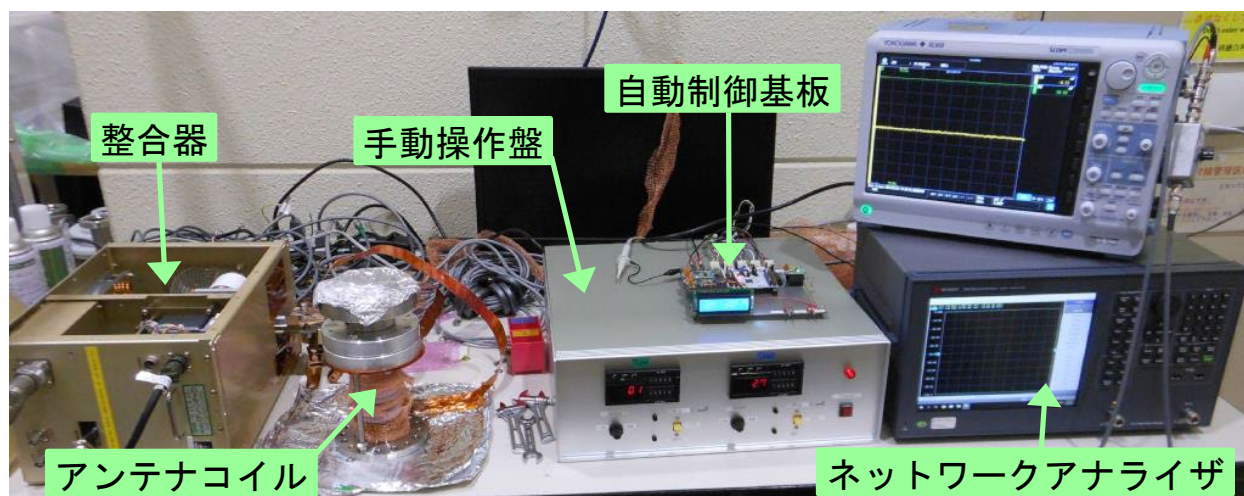


図 10. 実負荷へ接続しての動作試験

参考文献

- [1] 星野航希、“セシウムフリー水素負イオン源の性能評価に向けたイオン源開発”、令和5年度名古屋大学工学部エネルギー理工学科核融合炉工学グループ、田中・中野研究室卒業論文
- [2] “自動整合器モデル DH-30-02A-F01 取扱説明書”、アステック株式会社