集中講座

プラズマ物理実験温故知新

6. 小型トカマク装置を用いたプラズマ生成・制御とその応用

上 杉 喜 彦

(名古屋大学大学院工学研究科)

Plasma Generation, Control and Application Using Small Tokamaks

UESUGI Yoshihiko

Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

(Received 10 October 2003)

Abstract

Tokamak plasma research has been carried out for more than forty years. Small size tokamaks with major and minor radii of ~ 0.3 m and ~ 0.1 m were built and used in early experiments, and led the tokamak research to its present successful status involving large tokamaks such as the JT-60U and JET. The role of small tokamaks may have changed, but they still contribute to the understanding of tokamak physics and to the development of tokamak technology. Here, some experimental studies using small tokamaks are shown.

Keywords:

small tokamak, long pulse discharge, feedback control, DSP, MHD stabilization

6.1 はじめに

トカマク型プラズマ装置は、その装置規模の大小によらずトーラス形状を有する磁場配位において変圧器の原理を利用して生成される誘導電場による初期封入ガスの絶縁破壊とトーラスプラズマの生成、プラズマ中に誘起される誘導電流によるプラズマのジュール加熱とプラズマ電流が作る磁場によるプラズマ閉じ込めの促進といった基本的な特性を有しているプラズマ発生・閉じ込め装置である[1, 2]。これまでの40年以上にわたるトカマク研究の中で、研究室レベルの小型トカマク装置を用いた多岐にわたる先進・先導的研究により核融合炉心プラズマの研究の進展に大きく寄与し、また小型トカマクを運転し実験を行った学生・研究者がその後のJT-60U等の大型トカマクの研究に従事し、核融合研究の一翼を担っ

てきたことはいままでのない。国内外の小型トカマク装置とその研究の一例として、国内では、TNT-A トカマクにおける非円形断面プラズマの閉じ込め・制御[3]、TORIUT トカマクにおける極低 q 運転とMHD不安定性制御[4]、WT トカマクにおける高周波加熱・電流駆動[5, 6]、TRIAM-1 トカマクにおける強磁場トカマクプラズマの閉じ込め研究[7]、また国外ではTOSCA トカマクにおける非円形断面プラズマとMHD不安定性制御[8]、STOR-1M トカマクにおけるAC トカマク運転[9]等、現在の核融合プラズマ研究の先駆けとなる研究が活発に行われ、現在に至っている。

大型トカマクによる長時間核燃焼プラズマの生成が現実的なものになってきた中で、小型トカマクを用いた核融合プラズマ研究も、球状トカマク(Spherical Toka-

author's e-mail: uesugi@nuee.nagoya-u.ac.jp

mak) に代表されるような革新的な磁場配位やプラズマ構造を有するトカマクプラズマの閉じ込め研究, 最新のプラズマ発生・制御用機器を用いたトカマクプラズマの高性能化, 周辺電磁場制御によるプラズマ輸送制御研究やトカマクプラズマの産業応用への試み等, 多方面に展開され, 核融合・プラズマ研究に寄与すべく努力がなされている. ここでは, これらの研究の中から筆者がかかわっているいくつかの研究について以下に紹介する.

6.2 高速インバータ電源を用いた多モードトカマク放電と長時間放電の模擬

6.2.1 小型トカマク CSTN-IV 装置 [10, 11]

前述のように, トカマクプラズマ中に流れるプラズマ電流は, 鉄心あるいは空芯変圧器により誘起される誘導電場により駆動されることから定常電流を得ることは原理的に不可能である. プラズマ電流の持続時間は変圧器の持つ有効掃引磁束幅で規定され, 長時間放電を得るためにはより大型の変圧器が必要となり装置の小型化とは相容れない. また, 誘導電場を用いない非誘導電流駆動法として, 中性粒子入射や高周波電流駆動, あるいはプラズマの自発電流であるブートストラップ電流等の利用もあるが, これらいずれの手法も小型装置のプラズマパラメータや装置規模の限界から現実的には利用が困難である.

小型トカマク装置 CSTN-IV では, 完全交流放電による 1 分の連続運転や高繰返しトカマク放電による長時間放電の模擬が実現され, 長時間放電時のリサイクリング特性の動的変化や回転ヘリカル摂動磁場によるリサイクリング制御等の実験が行われている. Fig. 1 にトカマク装置 CSTN-IV の装置全体図を示す. CSTN-IV は大半径 40 cm, 小半径 10.3 cm で厚さ 2 mm の SUS304 製のトーラス型真空容器を持つ. トロイダル磁場 B_T は完全定常で最大 1.2 kGauss, 通常 860 Gauss で運転されている. 真空排気系としては, 実行排気速度が約 158 l/s (公称 650 l/s) のターボ分子ポンプを用い, 放電ガスを導入しないときの真空容器内の圧力は 4.0×10^{-7} Torr 程度に達している. 放電ガスである水素ガスの導入部は, 流量センサ (STEC 社製 高性能マスフローメータ SEF-300) と応答速度が 0.5 秒以内のピエゾバルブ (STEC 社製ピエゾバルブ PV-1000) をコントロールユニット (STEC 社製圧力/流量コントローラ PCU-2000) を介して連動させることによって, 流量が一定になるように制御されている. 放電時における真空容器内の圧力は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ Torr である. トカマク放電のためのジュールコイル電流波形および垂直磁場コイル電流波形を Fig. 2 に示す. これらの波形出力は, National Instruments 社製のソフトウェア LabVIEW 上で構成されたプログラムによって生成される. Fig. 2(b) のように PC 上で 1 つの電流パルスの放電波

Fig. 1 Tokamak device CSTN-IV and diagnostic system.

Fig. 2 Generation of a discharge current waveform using LabVIEW.

形を18~25点の電圧データとして与えて、その間を線形補間して得られた波形を放電の繰り返しの回数分だけつなげてD/Aボード1(National Instruments社製AT-MIO-16E-2)のバッファメモリに書き込み、D/Aボード2(National Instrument社製AT-MIO-16E-10)から生成される測定用トリガと同時に放電電流波形が出力される。長時間の運転では、この過程を繰り返して放電波形を生成する。放電波形生成用のD/Aボード1は時間分解能1MS/s、電圧分解能12bitの精度で波形を出力できる。D/Aボード1より出力された波形は、インピーダンス整合のためのバッファアンプを通して放電用のインバータ電源に入力される。IGBTインバータ回路の概要をFig.3に示す。インバータ電源は、40kHzでパルス幅

変調(PWM)制御されており、入力電圧波形とほぼ同様の電流波形を出力できる。コイルに流れている電流を電流検出器(DCCT)によって検知し、その値と、D/Aボード1から入力される電流指令値 I_J^{ref} (ジュールコイル)、 I_V^{ref} (垂直磁場コイル)の差から、コイルに印加すべき電圧 $V_J^{\text{ref}}, V_V^{\text{ref}}$ を求め、その電圧をパルス幅変調してインバータ回路より出力している。

6.2.2 交流トカマク放電

放電電流の制御の結果、Fig.4に示されているような安定した完全交流放電を得ることができた。これは100Hzの例であるが、50Hz程度の低サイクルまで可能である。プラズマのトラス中心位置からの水平、垂直方向の変位とも、放電中はほぼ一定である。プラズマ電流の反転時に、電流が0になる時間が非常に短く、電子密度 n_e は1桁落ちるものの有限の値を維持しており、プラズマが残存していることを示している。つまり、プラズマは準定常的に生成されていることになる。

トカマク放電では他の放電形式に比べて、より低ガス圧で高密度のプラズマを生成でき、多くの産業分野への応用の可能性を持っている。応用分野の1つとしては、プラズマプロセスへの応用が考えられる。トカマク放電では、電子サイクロトロン共鳴プラズマや誘導結合型プラズマよりも低いガス圧で高密度のプラズマを生成でき、ガスの使用効率が高い。また、ガス圧が低いので、中性粒子によるプラズマ粒子の散乱が少ないという特徴がある。このトカマク放電プラズマをプロセスプラズマとして使用するためには、長時間定常的にプラズマを生成する必要があり、インバータ電源の導入で長時間運転が達成された意味は大きい。CSTNトカマクでは、 N_2 ガスの長時間AC放電によってTiN薄膜の生成が試みられ、通常のプラズマCVDで作成したTiN膜と同等のものを得ている[12]。また、最近では、電極バイアスによる

Fig. 3 Block diagram for current control circuit in the inverter power supply.

Fig. 4 (a) Loop voltage V_{loop} , (b) plasma current I_p , (c)(d) plasma positions, (e) electron temperature T_e and (f) electron density n_e at an AC tokamak discharge. (The neutral gas pressure is 1.0×10^{-4} Torr. The probe position is $r = 9$ cm.)

深い負電位井戸の形成と慣性静電閉じ込め核融合による中性子源への応用に向けた実験も始まっている。

6.2.3 高繰り返しトカマク放電

交流放電について、放電波形を調節することで、Fig. 5 に示すような安定した高繰り返し高運転責務の放電を実現することができた。高繰り返し放電におけるデータの集録は、放電開始のトリガパルスと同期して行っている。 N 回目のトリガから、 t_d だけ遅れた点でデータを取り、これを繰り返すことでボックスカー的なデータ収集を行い、S/N 比の高いデータの収集が可能である。データ集録の時間は自由に移動することができ、あらゆる時点でのデータの高精度収集が可能である。

6.2.4 高繰り返し放電による長時間放電の模擬

Fig. 5 の高繰り返し放電を長時間行った時の放電波形が Fig. 6 である。AC 放電の場合と同じく、長時間運転においてインバータ電源は何ら問題がないことがわかった。放電自体は不連続であるが、放電を繰り返すことで、電子温度、密度などのパラメータが時間的にゆっくりと

Fig. 5 Time traces of (a) plasma current I_p , (b) loop voltage V_{loop} , (c)(d) plasma positions, (e) electron temperature T_e , (f) electron density n_e and (g) H_α intensity for a high-repetition high-duty discharge. (The neutral gas pressure is 1.0×10^{-4} Torr. T_e and n_e are measured at $r=9$ cm. Δ shows the timing of start trigger for each discharge.)

変化していることがわかる。放電開始後、最初の 300 ms では、Fig. 5 でも見られるように、電子密度と水素の H_α 線強度が減少し、電子温度は上昇している。これは、壁排気の効果であると考えられ、その後、壁中の水素量が飽和に近づくとき、電子密度、 H_α 線強度ともに増加してくる。このような秒単位という比較的長い時間スケールでのプラズマパラメータの変化は、準定常の高繰り返しパルス放電によって、長時間の連続放電を模擬できることを示していると考えられる。したがって、この連続パルス放電によって、長時間の水素リサイクリングについての調査が行える。長時間放電時のリサイクリング特性に関する実験の詳細は参考文献 13, 14 を参照されたい。

6.3 PWM インバータと高速 DSP の組み合わせによるトカマクプラズマ高速制御

6.3.1 HYBTOK-II トカマク装置と制御システム

Fig. 6 Temporal evolutions of (a) the loop voltage V_{loop} , (b) the electron temperature T_e , (c) the density n_e and (d) the $H\alpha$ intensity for a high-repetition discharge with a long duration. (The initial neutral gas pressure is 1.0×10^{-4} Torr. The probe position is $r = 9$ cm.)

磁場閉じ込め核融合装置の長時間放電の実現や閉じ込め特性の向上とともに、生成・保持されるプラズマの安定かつ高精度・高速制御がますます要求されてきている。IGBT PWMインバータは前節で述べたように高速応答性を有しており、かつ並列接続による大容量化も容易であり、MPU や DSP と組み合わせることによる高機能化も可能なことから小型プラズマ装置から大型装置にわたってプラズマ制御用磁場コイル電源として最適である。本節では、HYBTOK-II トカマクの垂直磁場コイル電源として IGBT PWM インバータを導入し、DSP と組み合わせることで高速のプラズマ水平位置の帰還制御システムを構成し、その制御特性を調べた結果を述べる [15]。

HYBTOK-II は、大半径：0.4 m、小半径：0.11 m、プラズマ電流：< 15 kA、トロイダル磁場：< 0.5 T の小型トカマクであり、回転ヘリカル摂動磁場 (Dynamic Ergodic Divertor : DED) によるプラズマ制御 [16] など、電磁場によるプラズマ制御に関する基礎実験を中心に行っている装置である。今回実験に用いられた小型トカマク HYBTOK-II における帰還制御システムの構成を Fig. 7 にそれぞれ示す。使用している DSP の主要仕様を

Fig. 7 Block diagram of a fast feedback system using DSP and IGBT inverter for plasma position control in HYBTOK-II tokamak.

Table 1 Typical specification of DSP (TI:TMS320C6701).

Operation Frequency	167 MHz
Floating Point Arithmetic	1 GFLOPS
Internal Program Memory	64 kByte (16k, 32bit)
Internal Data Memory	64 kByte (16k, 32bit)
SBSRAM	6 MByte
DPRAM	512 kByte
Flash ROM	512 kByte
Port Size	PCI Full Size
Power Supply Voltage	+5V 1.7 A (Typ)

Table 1に示す．プラズマ水平位置の測定にはトーラス内外に配置された磁気プローブ信号を積分し，DSP に付属した AD 変換器に入力している．他の DSP 入力信号としては，トロイダル磁場補正用のトロイダルコイル電流波形，プラズマ電流波形等である．DSP とホストコンピュータ間のプログラムやデータの入出力は DSP に内蔵されている DPRAM (Dual Port RAM) を介して行われる．プラズマ制御に直接関与しないデータ類は横河電機(株)の WE7272 と WE7275 のディジタイザにより収集され，TCP/IP LAN 接続によりホストコンピュータに保存される．内外の磁気プローブ信号から DSP により計算されたプラズマ位置と目標位置との誤差信号 (ΔH) から比例制御あるいは比例・積分制御時の帰還信号として， $I_{FB} = I_{pre} + G_p \delta H$ あるいは $I_{FB} = I_{pre} + G_p \Delta H + G_i \int \Delta H dt$ が外部帰還信号として DSP に付属している DA 変換器を介して IGBT 電源に入力される．ここで I_{pre} は事前に作成しておく平衡に必要な垂直磁場コイル電流値， G_p および G_i はそれぞれ，比例制御ゲインと積分制御ゲインである．これら一連の実時間制御の 1 サイクル周期は DSP 内蔵のタイマーで制御されており，今回の実験では 20 μs に設定してある．

比例制御時の代表的なプラズマ位置変化を Fig. 8 に示す．帰還制御の目標位置が $t = 12$ ms で $\Delta H = -2$ cm から 0 cm にステップ的に変化させた場合のプラズマの応答性を比例ゲインを変えて得たものである．比例ゲイン = 0 A/m は帰還制御がないプレプログラミング制御のみの場合に相当する．比例ゲインを大きくするにつれてプラズマは目標位置に近づき，さらに大きくすると振動し不安定振動状態になることがわかる．また，比例制御のみでは定常偏差が残ることも実験において示されている．Fig. 9 に定常偏差を抑えるために行った比例・積分制御結果の一例を示す．比例・積分制御により目標位置に ~ 0.7 ms の時間応答で精度よく制御されていることがわか

Fig. 8 Time response of the plasma column position in the proportional control. (a): $G_p = 0$ A/m, (b): $G_p = 730$ A/m, (c): $G_p = 1830$ A/m, (d): $G_p = 2380$ A/m.

Fig. 9 Time response of the plasma column position in the PID control. $G_p = 1280$ A/m, $G_i = 2 \times 10^7$ A/(m s).

る．以上の結果は，パーソナルコンピュータと高速 DSP および IGBT インバータ電源を用いることで，簡単な回路構成でかつ高速・高精度のプラズマ位置制御システムを構築できることを示すもので，位置制御のみならず MHD 不安定制御用コイル電源システムとして応用できるものである．

Fig. 10 Plasma current waveform at 5 kHz modulation.

6.3.2 IGBT PWM インバータを用いた高速プラズマ電流変調

トカマクプラズマにおいてはジュールコイル電源、垂直磁場コイル電源をはじめとして MHD 不安定性制御コイル電源など種々の制御電源を必要としており、プラズマの高性能化に向けてより高速応答・高精度電源が必要とされている。先に述べたように PWM インバータは外部参照信号に比例して任意の振幅をもつ電圧・電流波形を出力することができ、近年高速・大電力化の進歩が著しい IGBT を主スイッチング素子として用いることで、従来のサイリスタ電源では実現不可能な高速・高精度なトカマク電源システムを構成できる。本節では小型トカマク装置 HYBTOK-II において IGBT PWM インバータを用いた高速プラズマ電流変調実験について簡単に述べる。高速プラズマ電流変調の目的は、ヘリカル摂動磁場に対する共鳴面 ($q = m/n$) を小半径方向に高速に移動させることにより磁気島成長を抑制することでティアリング不安定性の安定化を狙ったものである。Fig. 10 に準定常プラズマ電流 5 kA の放電において 5 kHz でプラズマ電流を正弦波変調したときの波形を示す。ジュールコイル電源として用いている IGBT PWM インバータ電源の搬送波周波数は 40 kHz で、-3 dB 帯域は約 1 kHz であるので 5 kHz や 10 kHz の変調実験はゲインの低下したところでインバータ電源を運転していることとなる。Fig. 10 の変調波形にあるように ~1 kA の幅でほぼ正弦波に近い変調が得られており、初期的実験では 15 kHz までの変調周波数で正弦波変調が可能であることを確認している。現在、これらの予備実験を終えティアリング不安定性によるディスラプションに対するプラズマ電流変調の効果を実験的に調べるべく準備を行っている。Fig. 11

Fig. 11 Waveforms of the plasma current, loop voltage and mode amplitudes of the magnetic fluctuations in the disruption experiment. The modulation frequency is 2.5 kHz in this case.

にディスラプション実験時の代表的なプラズマ電流波形を示す。プラズマ電流変調波形に見られるように、IGBT インバータ電源を用いることで電流波形を柔軟かつ高速・高精度に変化させることが可能となり、トカマク制御特性の大幅な向上をもたらしている。現在取り組んでいる MHD 不安定性の安定化実験の詳細は別途報告する予定である。

6.4 まとめ

大容量化、高速・高周波化に向けた進展が著しい半導体スイッチングデバイスを小型トカマクのプラズマ生成・制御用インバータ電源に用いて行った種々の実験結果について述べた。IGBT PWM インバータをトカマク装置のジュールコイルおよび垂直磁場コイル電源として用い、交流あるいは高責務トカマク運転による長時間模擬放電の実現とそれを用いたリサイクリング制御実験について述べた。また、MHD 不安定性の抑制を目的とした高速プラズマ電流変調実験と DSP と組み合わせた高速プラズマ位置制御実験についても報告した。また、高速プラズマ位置制御のための DSP+IGBT PWM インバータによる帰還制御システムを構築し、その制御特性および有効性を明らかにするなど、小型トカマクの特性を生かした研究の一端を紹介した。これら一連の研究が今後の

トカマクプラズマ研究の一助となれば幸いである。

謝辞

本報告をまとめるに当たり，名古屋大学工学研究科エネルギー理工学専攻大学院生の小島寛樹氏および菊池祐介氏に多大な援助をいただき，ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] L.A.アルツイモビッチ著，三谷健次訳：プラズマ閉じ込めとトカマク（東京図書，1972）.
- [2] J.A. Wesson, *Tokamaks* 2nd Edition (Oxford University Press, Oxford, 1997).
- [3] Y. Nagayama, M. Naito, Y. Ueda, Y. Ohki and K. Miyamoto, Nucl. Fusion 24, 1243 (1984).
- [4] Z. Yoshida, K. Okano, Y. Seike, M. Nakanishi, M. Kikuchi *et al.*, *Proc. 9th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* (1982) Vol. 3, p.273.
- [5] T. Maekawa, T. Cho, M. Nakamura, S. Nakao, S. Kubo *et al.*, Nucl. Fusion 23, 242 (1983).
- [6] T. Cho, K. Ogura, A. Ando, H. Tanaka, M. Nakamura *et al.*, Nucl. Fusion 26, 349 (1986).
- [7] K. Toi, N. Hiraki, K. Nakamura, O. Mitarai, Y. Kawai and S. Itoh, Nucl. Fusion 20, 1169 (1980).
- [8] D.C. Robinson, Nucl. Fusion 25, 1101 (1985).
- [9] O. Mitarai, S.W. Wolfe, A. Hirose and H.M. Skarsgard, Nucl. Fusion, 27, 604 (1987).
- [10] S. Takamura, K. Hayashi and K. Tashiro, J. Plasma Fusion Res., 74, 38 (1998).
- [11] 小島寛樹，小林政弘，田代健二，高木 誠，高村秀一：電気学会論文誌 A, 119-A, 109 (1999).
- [12] M.Y. Ye, O. Matsuda, N. Ohno, Y. Uesugi, M. Takagi and S. Takamura, Vacuum 59, 55 (2000).
- [13] H. Kojima and S. Takamura, Jpn. J. Appl. Phys. 41, 6557 (2002).
- [14] H. Kojima and S. Takamura, *To be published in* Jpn. J. Appl. Phys. 42, No. 9A (2003).
- [15] 豊田光洋，菊池祐介，上杉喜彦，高村秀一：電気学会論文誌 A, 123-A, 285 (2003).
- [16] S. Takamura, Y. Kikuchi, Y. Uesugi and M. Kobayashi, Nucl. Fusion 43, 392 (2003).