

スフェリカルトカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ

御手洗, 修
東海大学熊本教養教育センター

Kessel, Charles
Princeton Plasma Physics Labs.

広瀬, 章
サスカチュワン大学物理工学科プラズマ物理研究所

<https://hdl.handle.net/2324/1544165>

出版情報 : The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. A, A publication of Fundamentals and Materials Society. 129 (9), pp.605-608, 2009-09-01. The Institute of Electrical Engineers of Japan

バージョン :

権利関係 :

スフェリカルトカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ

正員 御手洗 修
非会員 Charles Kessel
非会員 広瀬 章

電気学会論文誌A

(基礎・材料・共通部門誌)

平成21年9月号抜刷

IEEJ Trans. FM, Vol. 129, No. 9, 2009

スフェリカルトカマクにおけるプラズマ電流立ち上げ

正員 御手洗 修* 非会員 Charles Kessel**
 非会員 広瀬 章***

Plasma Current Start-up in a Spherical Tokamak

Osamu Mitarai*, Member, Charles Kessel**, Non-member, Akira Hirose***, Non-member

The various plasma current start-up techniques and related topics in a spherical tokamak (ST) device are described. The Ohmic heating coil current clamp experiments in NSTX are described and discussed, and the plasma current start-up experiments in the STOR-M tokamak with iron core and the outer vertical field coil is presented as one of technique for a plasma current start-up in a ST.

キーワード：スフェリカルトカマク，プラズマ電流スタートアップ，トランスフォーマーレス運転

Keywords : spherical tokamak, plasma current start-up, CS-less operation

1. 序論

核融合材料を DT 中性子を用いて照射試験することができかつ同時にスフェリカルトカマク (ST) の特性実験も行える Component Test Facility (CTF) やスフェリカルトカマク核融合炉ではセンターソレノイド (CS) を設置するスペースがほとんどない。従って、CS なしでプラズマ電流をスタートし、ランプアップさせる技術は ST 炉開発にはきわめて重要である。

現在 (1) NSTX の Coaxial helicity injection (CHI) 実験で行われているような電極を挿入してプラズマ電流を立ち上げる方法⁽¹⁾、(2) LATE で行われているような EBW を一定垂直磁場に入射してプラズマ電流を形成し、パワーを増大して電流駆動によってプラズマ電流をランプアップさせる方法⁽²⁾、(3) RF パワーと同時に垂直磁場を印加して、磁束を入れ、RF パワーによるプラズマが外側に広がるのを垂直磁場で抑え平衡を保ちながらプラズマ電流をスタートさせかつランプアップさせる方法^{(3)~(6)}、(4) MAST で行われている ECRH と誘導電場により上下 2 カ所にプラズマ電流を作りマーキングさせるマーキング立ち上げ実験法⁽⁷⁾、が研究されている。

(1) の方法は電極のために不純物が混入する可能性が高く、将来の核融合炉への適用は不向きであろうと推測される。(2) は最近 20kA までプラズマ電流が駆動されており、以前よりも遥かに有望な方法になってきた⁽²⁾。しかし、プラズマ体積が大きくなり、加熱電流駆動パワーの密度が小さくなる大型装置においてもそれが可能であるどうかは不明であり、外挿性に問題がある可能性は否定できない。(3) は JT60U, TST-2 で実験が行われそれぞれ 100kA, 10kA 程度まで比較的大きなプラズマ電流をスタートアップさせることができるが、プラズマ電流をフラットトップにした結果はまだ示されていない。しかしながら実験の初めからプラズマ電流をすぐに立ち上げることができたのは、本方法がトカマクを特徴づける誘導電場を利用したものであり、そのために再現性もよいためと考えられる。現在、記録が伸びていないのは実験を行っていないからである (注：筆者は QUEST においてこの実験を行う予定である)。また、フラットトップが得られていないのは、プラズマ平衡のための垂直磁場と立ち上げに必要な垂直磁場との整合性がとれていないからである。(4) も炉への適用が考えられている⁽⁸⁾ (注：筆者は現在進行中の QUEST においてこれに近い実験も行う予定である)。本論文においては、垂直磁場によるプラズマ電流駆動に関連した課題と、さらに新しい方法である小型鉄心を用いたプラズマ電流立ち上げ法について述べる。

2. 実験結果

(2.1) NSTX におけるオーミッククランプ実験
 垂直磁場でプラズマ電流を立ち上げることが可能かどうか

* 東海大学・熊本教養教育センター
 〒862-8652 熊本市渡鹿 9-1-1
 Liberal Arts Education Center, Kumamoto Campus, Tokai University
 9-1-1, Toroku, Kumamoto 862-8652

** Princeton Plasma Physics Labs.
 Princeton, New Jersey, USA

*** Plasma Physics Laboratory, Department of Physics and Engineering
 Physics, University of Saskatchewan
 116 Science Place, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, S7N 5E2

かを通常の実験で確かめる場合、オーミック放電においてオーミックコイル (OH あるいは CS) 電流を一定に保った状態で、加熱パワーを入力した場合にプラズマ電流がランプアップするかどうかを見ればよい。これをここではオーミックランプ実験と呼ぶ。この場合プラズマ電流を一定にするフィードバック制御はスイッチオフしておかなければいけない。歴史的に見ると、JT60U の古いデータに、IMA のプラズマ電流を流した後に OH をクランプし、その間に NBI を印加すると、プラズマ電流が駆動されるという実験結果があり⁽⁹⁾、それを筆者が解析した結果、垂直磁場によって駆動されていることが明らかになった⁽¹⁰⁾。その実験結果は、筆者が提案していたトカマクにおいて垂直磁場によってプラズマ電流を駆動できるという考え⁽³⁾を実験的に示す傍証であった。その後筆者は NSTX で同様の実験を日米科学技術協力事業のもとで提案した。このとき NBI の代わりに RF を印加しても良い。最終的に C. Kessel 博士の協力で、HHFW の RF パワー入射によるランプアップ実験を行い、その後で NBI を入射して共同で実験を行うという方法で、遠隔実験を行うことができた。その結果、オーミックランプ実験では RF を印加した場合、Fig.1 に示すように、1ショットのみ (#116449) わずかにプラズマ電流が一定に保たれ、駆動されるようなデータが得られたのみで、後はそのような結果は得られなかった。Fig.1(e) に示す様にプラズマエネルギーは増大するものの、(d) に示す様にループ電圧は上昇していないので、垂直磁場による駆動ではなく、RF 電流駆動による可能性が考えられる。また、再現性が良くないのは、オーミック電流をクランプするとプラズマ断面が収縮し、アンテナとの結合が悪くなるなどの結果のためであろうと推測しているがその域を出ていない。なお、筆者は実験に先立ち NSTX のパラメータを用いて数値計算を行っていたが、それに基づけば、有意な差を観測するには加熱パワーそのものが足りない可能性も否定できない。また、NBI を印加した場合も有意なプラズマ電流ランプアップあるいは一定状態は実現しなかった。しかしながら NBI 入射実験はプラズマ電流が小さいと高エネルギー粒子の閉じ込めが悪いので、大電流で行う必要があるが、そのときは 500kA 程度のプラズマ電流で小さく、そのためであったとも理解できる。

高アスペクト比の JT60U では、最近でも NBI を用いた実験が行われプラズマ電流が増加することが観測されている⁽¹¹⁾。これらの差は、ST のトロイダル磁場が高アスペクト比の通常トカマクよりも小さいことに起因しているからではないかと推測しているが、理由はまだよくわかっていない。筆者は垂直磁場によってプラズマ電流を駆動できるということが、これによって否定されるのではなく、むしろそのような状況をうまく作り出せなかったのではないかと考えている。また、トロイダル磁場が小さいと高アスペクト比のトカマクと同様な実験結果が再現できないこともあるので、より強磁場の ST 実験に移行すべきという考えも出てきている。

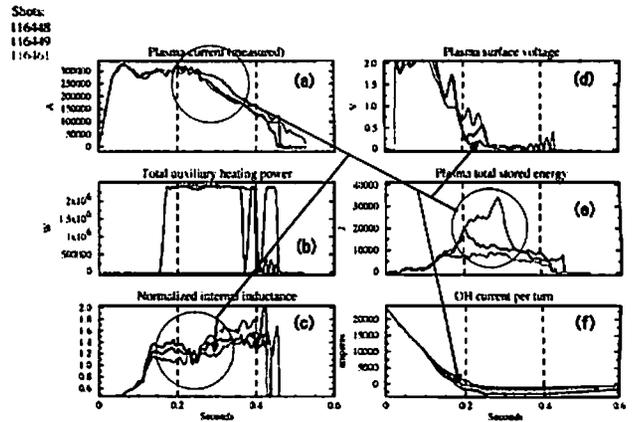


Fig. 1. OH clamp experiments in NSTX : (a) the plasma current, (b) RF power, (c) the internal inductance, (d) the surface loop voltage, (e) plasma energy, and (f) Ohmic coil current. (#115448 and #116449: RF with OH clamp. #116461 No RF with OH clamp).

〈2.2〉 STOR-M 鉄心トカマクにおける外側垂直磁場コイルを用いたプラズマ電流スタートアップ実験 上述のように、ST におけるプラズマ電流スタートアップの実験が最近あまり進歩しないので、NSTX グループの研究者と議論し、直径 10cm 程度の小型鉄心を ST のトロイダルコイルの中心部に設置し、プラズマ電流を生成する方法を、アスペクト比が若干大きくはなるものの、CTF 設計に取り入れることになった。何故なら鉄心を中心に入れ、一次巻線を使用せずに、プラズマの外側に設置された垂直磁場コイルだけでプラズマ電流を立ち上げることができれば、シンプルな構造が可能となるからである。実際、ST における小型鉄心の使用は日本原子力機構の西尾 敏博士によって提案されたが⁽¹²⁾、その後真剣に検討されたことはなかった。

鉄心は TM-3 に始まるトカマク研究の隆盛の一要因であった。それは鉄心の結合の良さを利用して小さい電源で大きなプラズマ電流を生成できたからであり、シンプルなコイル構造で研究室レベルで比較的手軽にトカマク実験ができたからである。しかし鉄心はその飽和現象のために核融合炉のような長時間パルスが必要とする状況では次第に利用されなくなりつつある。何故なら鉄心はヒステリシスや飽和のある非線形材料であるために、鉄心の飽和で磁場配位が変化し、実験は難しくなるからである。筆者はカナダ・サスカチュワン大学の STOR-IM 鉄心トカマクの設計製作中に、鉄心トカマクの特性について理論的、実験的に調べ、次のような知見を得た⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。(1) 鉄心の境界で磁力線は垂直に交わる境界条件によって、鉄心が無い場合に比していわゆるイメージ磁場が追加される。(2) 一次コイル電流が増加し鉄心が飽和すると、このイメージ磁場は消え、一次コイルは空芯コイルとなる。(3) 非誘導電流駆動を行うと、鉄心は一次コイル電流増加による鉄心飽和とは逆方向に励磁され飽和する。

これらを考慮し CTF に小型鉄心を利用すべく理論的、実

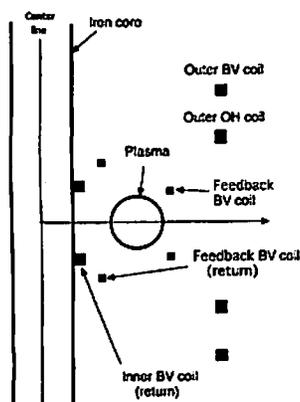


Fig. 2. Outer OH coil (we call this outer vertical coil in this paper) and vertical coil winding with return winding in the STOR-M tokamak.

験的研究が開始された。そのために、まずカナダ・サスカチュワン大学の STOR-M 鉄心トカマク ($R=46\text{cm}$, $a=12\text{cm}$, $B_t=1\text{T}$, $I_p\sim 20\text{kA}$)⁽¹⁵⁾において理論的、実験的研究を行うことにした。2007年6月に、中心ソレノイドを切り離し、垂直磁場コイルでプラズマ電流生成を試みた。すなわち、Fig.2に示すように従来設置していた鉄心上の内側オーミックコイルを回路から切り離し、プラズマの外側におかれた外側オーミックコイルのみでプラズマ電流生成を試みた(注:従って、Fig.2の Outer OH coilは垂直磁場を生成するようになるので、外側垂直磁場コイルとなる。Outer Vertical coilは元々設置している垂直磁場コイルであり、inner vertical coilがその巻き戻しになっているので磁束は作らない)。このコイル配位は今までの伝統的な配位とは異なるものであり、だれも試したことはなかった。

実験の前に回路シミュレーションを行ってみると、初期の鉄心逆バイアスに必要なコイル電流が小さく、その結果漏れ磁場は4G程度と小さく、それもほぼ一様に分布するために、プラズマ生成空間の全面にわたってヌル点に近い領域が形成されることがわかった。その知見を基に実験を行った結果、第一ショットからプラズマ電流が得られ、放電洗浄とともにプラズマ電流は増大し、Fig.2に示すように、ほぼ10kAのプラズマ電流が得られた。巻き数を半分にしたためにプラズマ電流は通常の運転時の半分になる。外側オーミックコイルが垂直磁場を作るが、STOR-Mの場合、真空容器の周りに巻き戻しを有する垂直磁場フィードバックコイルがおかれているために、これとあわせて最適な平衡垂直磁場を作り、制御することができる。将来は鉄心を飽和させてもプラズマ電流が維持できるか、平衡がとれるかどうかの実験も計画している。

このように鉄心があれば、中心ソレノイドがなくても外側垂直磁場コイルできわめて簡単にプラズマ電流がスタートアップできることが実験的にも理論的にも明らかになった⁽¹⁶⁾。しかしながらCTFに本方法を採用する場合、300kA程度の初期プラズマ電流の生成は容易であるが、その後鉄心が飽和し、さらに非誘導駆動を併用すると、鉄心が逆方

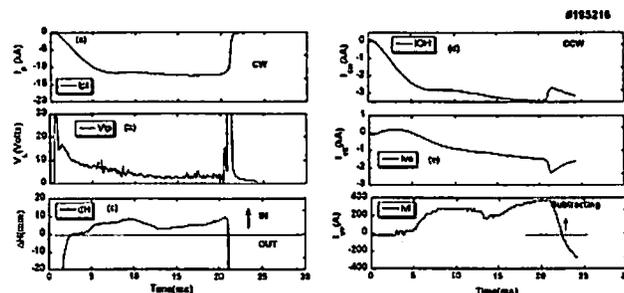


Fig. 3. Plasma current start-up experiments using the outer vertical coils in STOR-M : (a) plasma current, (b) the loop voltage, (c) plasma position, (d) the outer OH coil current, (e) the outer+inner vertical coil current in series connection, (f) Bv feedback coil current.

向に飽和するので詳細な解析が必要である。また鉄心の非飽和、飽和前後で磁気面の形状が変化するのでそのための制御も必要になってくる。このように鉄心によって初期プラズマ電流のスタートアップは非常に簡単になるが、その後の制御には十分に注意しなければならない、今後の詳細な解析が必要である。

しかしながら、CTFに小型鉄心を入れるスペースがあれば小型空芯コイルを入れることも可能なので、鉄心の非線形性に制約されない運転が可能となる。この観点から現在小型空芯コイルを利用した電流立ち上げ法も検討中である。(平成21年2月20日受付、平成21年4月22日再受付)

文 献

- (1) R. Raman, D. Mueller, T. R. Jarboe, B. A. Nelson, M. G. Bell, M. Ono, T. Bigelow, R. Kaita, B. LeBlanc, K. C. Lee, R. Maqueda, J. Menard, S. Paul, and L. Roquemore : "Non-inductive solenoid-less plasma current startup in NSTX using transient CHI", *Nucl. Fusion*, Vol.47, pp.792-799 (2007)
- (2) 前川 孝 : 平成9年度双方向研究報告会, NIFS (2007-1)
- (3) O. Mitarai : "Inductive Plasma Current Start-up by the Outer Vertical Field Coil in a Spherical Tokamak", *Plasma Phys. & Controlled Fusion*, Vol.41, pp.1469-1483 (1999)
- (4) Y. Takase, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, S. Ide, S. Itoh, Y. Kamada, T. Maekawa, O. Mitarai, Y. Miura, Y. Sakamoto, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Taniguchi, K. Ushiguchi, and JT-60 Team : "Plasma Current Start-up, Ramp-up, and Achievement of Advanced Tokamak Plasmas without the Use of Ohmic Heating Solenoid in JT-60U", *J. Plasma & Fusion Res.*, Vol.78, pp.717-718 (2002)
- (5) O. Mitarai, Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, H. Kasahara, T. Yamada, S. Ohara, TST-2 Team, K. Nakamura, A. Iyosama, M. Hasegawa, H. Idoi, M. Sakamoto, K. Hanada, K. Satoh, H. Zushi, TRIAM Group, and N. Nishino : "Plasma Current Start-up by ECW and Vertical Field in the TST-2 Spherical Tokamak", *J. Plasma & Fusion Res.*, Vol.80, pp.549-550 (2004)
- (6) A. Sykes, J.-W. Ahn, R. J. Akers, E. Arends, K. B. Axon, R. J. Buttery, C. Byron, P. G. Carolan, D. Ciric, N. J. Conway, M. Cox, G. Cunningham, A. Darke, J. Dowling, M. R. Dunstan, A. R. Field, S. J. Fielding, S. Gee, M. P. Gryaznevich, R. J. Hayward, P. Helander, M. B. Hood, A. Kirk, I. P. Lehane, B. Lloyd, G. P. Maddison, S. J. Manhood, R. Martin, G. J. McArdle, H. Meyer, M. Magrath, A. W. Morris, MPS Nightingale, T. Pinfold, M. N. Price, C. Ribeiro, D. C. Robinson, V. Shevchenko, K. Stammers, A. Tabasso, D. Taylor, M. R. Tournianski, M. Valovic, G. Voss, M. J. Walsh, S. E. V. Warder, H. R. Wilson, the MAST, and NBI Teams : "Results from the MAST Spherical Tokamak", 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE), Atlantic City, USA (2002-1)

- (7) G. F. Counsell, R. J. Akers, L. C. Appel, D. Applegate, K. B. Axon, Y. Baranov, C. Brickley, C. Bunting, R. J. Buttery, P. G. Carolan, C. Challis, D. Ciric, N. J. Conway, M. Cox, G. Cunningham, A. Darke, A. Dnestrovskij, J. Dowling, B. Dudson, M. R. Dunstan, E. Delchambre, A. R. Field, A. Foster, S. Gee, M. P. Gryaznevich, P. Helander, T. C. Hender, M. Hole, D. H. Howell, N. Joiner, D. Keeling, A. Kirk, I. P. Lehan, S. Lisgo, B. Lloyd, F. Lott, G. P. Maddison, S. J. Manhood, R. Martin, G. J. McArdle, K. G. McClements, H. Meyer, A. W. Morris, M. Nelson, M. R. O'Brien, A. Patel, T. Pinfold, J. Preinhaelter, M. N. Price, C. M. Roach, V. Rozhansky, S. Saarelma, A. Saveliev, R. Scannell, S. Sharapov, V. Shevchenko, S. Shibaev, K. Stammers, J. Storrs, A. Sykes, A. Tabasso, S. Tallents, D. Taylor, M. R. Tournianski, A. Turner, G. Turri, M. Valovic, F. Volpe, G. Voss, M. J. Walsh, J. R. Watkins, H. R. Wilson, M. Wisse and the MAST, NBI, and ECRH Teams : "Overview of MAST results", *Nucl. Fusion*, Vol.45, pp.S157-S167 (2005)
- (8) F. Alladio, et al. : "Plasma formation in spherical tokamaks without a central transformer solenoid", *Current Trends in International Fusion Research: A Review*, Washington, D. C. (2005)
- (9) R. Kurihara, S. Nishio, K. Ushigusa, et al. : "Control of Fusion Power in a Steady-State Tokamak Reactor", *Proceedings of 10th International Toki Conference*, Toki, Japan, *J. Plasma & Fusion Res.*, Series, Vol.3, p.553 (2000-1)
- (10) O. Mitarai, R. Yoshino, and K. Ushigusa : "Plasma current ramp-up assisted by outer vertical field coils in a high aspect ratio tokamak", *Nucl Fusion*, Vol.42, pp.1257-1272 (2002)
- (11) M. Ushigome, S. Ide, S. Itoh, E. Jotaki, O. Mitarai, S. Shiraiwa, T. Suzuki, Y. Takase, S. Tanaka, T. Fujita, P. Gohil, Y. Kamada, L. Lao, T. Luce, Y. Miura, O. Naito, T. Ozeki, P. Politzer, Y. Sakamoto, and the JT-60U Team : "Development of completely solenoidless tokamak operation in JT-60U", *Nucl. Fusion*, Vol.46, pp.207-213 (2006)
- (12) S. Nishio, M. Sato, K. Tobita, and Y. Nakamura : "Operational Flexibility of CS-less Tokamak Reactor", *15th International Toki Conference on Fusion and Advanced Technology*, ITC-15, RD1-3 (2005-12)
- (13) O. Mitarai, S. W. Wolfe, A. Hirose, and H. M. Skarsgard : "Measurements of the Image Field in the STOR-1M Tokamak", *Plasma Phys. & Controlled Fusion*, Vol.27, p.395 (1985)
- (14) O. Mitarai and A. Hirose : "Current Drive Operations in a Tokamak", *J. Fusion Energy*, Vol.4, p.395 (1985)
- (15) A. Hirose, C. Xiao, O. Mitarai, J. Morelli, and H. M. Skarsgard : "STOR-M Tokamak Design and Instrumentation", *Physics in Canada*, March-April Issue, pp.111-120 (2006)
- (16) O. Mitarai, C. Xiao, D. MacColl, M. Dreval, A. Hirose, and M. Peng : "Plasma current start-up by the outer vertical field coil in the iron core STOR-M tokamak for CTF", *The 13th ISTW* (2007-10)

御手洗 修



(正員) 1950年11月14日生。1974年3月九州大学,工学部機械工学科卒業。1981年,工学博士。サスカチュワン大学ポストドクトラルフェローを経て現在,東海大学・熊本教養教育センター教授に従事。主な仕事は,STOR-1Mの設計製作,ACトカマク世界初の実験,DTトカマク核融合炉の燃焼制御,D-³Heトカマク炉,D-³He ST炉の研究,DTヘリカル核融合炉のPID不安定制御法の開発,トカマクにおける垂直磁場を用いたプラズマ電流立ち上げ法の先駆的研究など。

Charles Kessel



(非会員) 1959年3月18日生。1987年11月20日 University of California, Los Angeles 卒業。PhD in Fusion Engineering and Applied Plasma Physics。現在,米国 Princeton Plasma Physics Laboratory, Principal Engineer に従事。Awards: 1994:David J. Rose Excellence in Fusion Engineering, 1997 : US ITER Home Team Merit award for discharge scenario development, 2006 Distinguished Engineering Fellow award from Princeton University Plasma Physics Laboratory。

広瀬 章



(非会員) 1941年8月16日生。1965年3月横浜国立大学卒業。現在,カナダ・サスカチュワン大学 Plasma Physics Laboratory, Professor/Director, FAPS (1981), FIEEE (1986), FRSC (2000), Canada Research Chair (Tier 1) (2001)。Recipient of IEEE NPSS Merit Award (1994) and Plasma Science and Application Award (1996)。Member IUPAP Plasma Physics Committee (2008), Associate Editor IEEE Trans. Plasma Science (1982-), Can. J. Phys. (2007-), Phys. Rev. Lett. (1997-2001), Saskatchewan Centennial Medal (2006)。