

4. センターソレノイド無しの立ち上げ，定常維持は可能か？ : 4.1 センターソレノイド無しの立ち上げは可能か？

前川，孝
京都大学

永田，正義
兵庫県立大学

御手洗，修
九州東海大学

小野，靖
東京大学

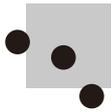
他

<https://hdl.handle.net/2324/1544160>

出版情報 : Journal of plasma and fusion research. 80 (11), pp.935-939, 2004-11-25. The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

バージョン :

権利関係 :



4. センターソレノイド無しの立ち上げ，定常維持は可能か？

4.1 センターソレノイド無しの立ち上げは可能か？

前川 孝，永田正義¹⁾，御手洗 修²⁾，小野 靖³⁾，高瀬雄一³⁾
(京都大学，¹⁾兵庫県立大学，²⁾九州東海大，³⁾東京大学)

4. Is an Operation Scenario for CS-Less Current Ramp-Up to Steady-State Burning Feasible? 4.1 Is "Current Ramp-Up without a Center Solenoid" Possible?

MAEKAWA Takashi, NAGATA Masayoshi¹⁾, MITARAI Osamu²⁾, ONO Yasushi³⁾ and TAKASE Yuichi³⁾

Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

¹⁾*University of Hyogo, Himeji 671-2201, Japan*

²⁾*Kyushu-Tokai University, Kumamoto 867-8762, Japan*

³⁾*University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan*

(Received 25 July 2004)

The present status of experimental and theoretical efforts and future prospects on current start-up and ramp-up methods for ST reactors to reach fusion burning without a center solenoid are discussed. First, we need to form an initial magnetic surface and next to ramp-up the plasma current to a sufficient level for energetic neutral beam injection (NBI). The second heating and current drive by NBI with the ramp-up of the external vertical field may bring the plasma to fusion ignition. The first stage will be realized by refinement of various methods including radio frequency heating and current drive, coaxial helicity injection, plasma merging, and poloidal flux swing. In the second stage, α heating and the bootstrap current dominate as the plasma gets close to burning condition. This is a totally new regime and we need further experimental and theoretical efforts involving novel approaches to ramp-up such a self-regulated plasma successfully.

Keywords:

center solenoid, non-inductive current ramp-up, RF current drive, coaxial helicity injection, NB current drive, plasma merging start-up, poloidal flux swing current drive

4.1.1 はじめに

球状トカマク (ST) の特長を最大限引き出すためには，アスペクト比をできるだけ小さく抑える必要があり，センターソレノイド (CS) 無しの運転が望まれる．このとき，コイル系はトロイダルコイル系とトラス外側のポロイダルコイル系のみになり，最も単純な炉心構造が実現できる[1]．

5.1節で詳述するようにCS無しSTは炉の大幅な簡素化，軽量化につながり，非常に魅力的であるが，これを現実のものとするためにはCSによる誘導電流駆動無しに，

初期プラズマの立ち上げ (初期磁気面形成)

第一段ランプアップ (NBI 開始まで)

第二段ランプアップ (核燃焼開始まで)

核燃焼プラズマの定常維持

の各段階を達成しなければならない．第二段ランプアップにおいては，プラズマに良好な閉じ込め特性を持たせ，これに中性粒子入射 (NBI) による大電力加熱を行い，プラズ

corresponding author's e-mail: maekawa@energy.kyoto-u.ac.jp

マ圧力を核燃焼に向け増大させる．これを可能にするため，第一段でNBIを開始するのに十分な電流値までプラズマ電流を増大させる必要がある．4.1節では主に - に関して述べ， は4.2節で述べる．

の初期プラズマ立ち上げに関しては，電子サイクロロン加熱 (ECH)，同軸ヘリシティ入射 (CHI)，ポロイダル磁場 (PF) 反転法およびプラズマ合体法 (Merging) など，基礎実験レベルも含めて多くの研究実績がある．

の第一段ランプアップに関しても，すでに数百 kA レベルまでのプラズマ電流のランプアップがCHI法やMerging法により実現されている．また，同程度の電流値までのランプアップがPF反転生成および低域混成波電流駆動 (LHCD) により実現できることがJT-60Uにおいて実証されている．

これらに比べ，の第二段ランプアップは， α 粒子による自己加熱や自発電流も加わって，プラズマの自律性が高まる未踏の研究領域である．ここでは高度のプラズマ制御

が要請されると予測されるが、考慮すべき3つのポイントがある。第一は電子温度が上昇して抵抗が下がるため、プラズマ電流の上昇に伴う逆方向誘導電界により大きな逆方向電流が発生することである。その効果は電流拡散時間 $\tau = a^2 \mu_0 / \eta$ (ここでは逆方向電流の減衰の特性時間) で評価できる[2]。たとえば電子温度 $T_e = 10$ keV, プラズマ半径 $a = 1.4$ m の場合、最終電流値および電流分布に到達するのに1時間程度を要する。最終的には定常運転を行うので、これはさほど問題にならず、むしろ逆方向電流の存在下でプラズマを安定に保つための最適電流分布の確保が重要な問題となる。第二は核燃焼に向けてプラズマ圧力が増加することである。このときプラズマループの平衡をとるための外部垂直磁場強度 (B_v) も増加する。これは上記の電流拡散の特性時間に比べて短い時間で行えるので、プラズマループを貫くポロイダル磁束を保存すべくプラズマ電流が圧力とともに自発的に上昇し、圧力増加とともに目標の電流値に到達できる。この機構は磁束保存トカマク平衡モデル[3]として知られている。第三はSTでは高プラズマ圧力下で大きな自発電流が発生することである。圧力を十分高く保てばプラズマ電流を上回る自発電流を生じ・維持させつつ所定のプラズマ電流値に達することが可能である。今後はこれらのポイントを考慮しつつ最適の第二段ランプアップシナリオを構築する必要がある。

以上の核燃焼に向けての立ち上げの各段階において、各方式に期待される役割分担を Table 1 に示す。現段階では各方式とも原理実証を終え、ST 炉の立ち上げでの有効性を明らかにすべく、実験的、理論的研究が個別に進められている。各方式とも、長所と短所がある。それらの詳細は 4.1.2 に述べるが、今後はこれらをうまく組み合わせ、最善のシナリオを組み上げることが、研究課題となる。

4.1.2 ST の立ち上げと電流駆動

(1) 高周波による立ち上げ

高周波によるランプアップの利点は、その機構が物理的によくわかっていることである。プラズマ着火および初期磁気面形成は既に ST でも実績がある。第一段ランプアップについては、通常アスペクト比のトカマクで多くの実績があるが、ST プラズマは高い誘電率をもつため必ずしも同様の手法が使えとは限らないので、今後実証していく

必要がある。高密度の第二段ランプアップにおいて高周波で電流を増加させるには莫大なパワーが必要となるため、プラズマ制御を除いて、あまり大きな期待はできない。

初期プラズマ発生にはECHが有効である。低温の初期プラズマの場合放射損失が主となるために、プラズマを形成・維持するために必要な電力はプラズマ体積に比例する。ITERの初期プラズマ立ち上げについての解析がなされていて[4]、1 m³あたり0.025 MWの電力吸収が必要との結果が得られている。プラズマ体積を100 m³とすると数 MWレベルの電力となるので、10 MW程度のマイクロ波電力を用意すれば初期プラズマの立ち上げは可能と予測される。

初期ECHプラズマに適切なミラー比を持つ弱い垂直磁場を印加しておくこと、トロイダル電流が自発的に発生し、初期磁気面が形成される。オーミック加熱(OH)と異なりECHの場合電子は磁場に垂直に加熱され、非一様なトロイダル磁場のもとで電子とイオンは垂直方向に互いに逆向きにドリフトし、上下に荷電分離する。垂直磁場が重畳されていると磁力線は螺旋状になり、磁力線に沿って電子とイオンが流れ荷電中和するが、このときトロイダル方向に正味の電流が生じる。この方法は基礎実験レベルであるが、CDX-U[5]やTST-U[6]、LAT[7]において実現されている。またDIII-D[5]においても実証されている。Fig. 1はLATEの結果である。マイクロ波入射後1.3 kAのプラズマ電流が自発的に発生し、初期磁気面が形成され、その後、垂直磁場を徐々に上げることにより電流は4 kAに達し、初期ST配位が形成された。

初期磁気面の形成後、核燃焼プラズマの閉じ込めが確保できるレベルまでプラズマ電流をランプアップする必要がある。LHCDによるランプアップは最も実績があり、WT-2およびWT-3[8]、JIPPT-II[9]、PLT[10]、Alcator-Q[11]、TRIAM1-M[12]等、日本のトカマクを中心とした多くのトカマクで実証された。最近ではJT-60U[13]においてはECHを重畳することにより400 kAに到達するランプアップに成功している (Fig. 2: 2 - 7 sec)。

LHCDの実験の進展にあわせて、LHCDをはじめ、電子サイクロトロン波電流駆動(ECCD)、速波電流駆動(FWCD)のような高速電子の共鳴加熱を用いたランプアップに関する理論が提案され[14]、最適の条件で20 - 30%の効率で高周波電力をプラズマループの磁気エネルギーに変換できることが示されている。LHCDの実験結果はこの理論で良く説明できているが、ECCDやFWCDに関しては実験データが不十分で、実験的検証が今後の課題で

Table 1 Expected roles for current ramp-up.

methods	Initiation of A Closed Flux Surface	Current Ramp-up		Sustainment of Steady Burning
		First Step	Second Step	
RF	*****	+++++	-----	
Bootstrap			-----	
CHI	*****			
Merging		*****		
PF reversal	*****			
NBI			*****	
B_v ramp			*****	

Demonstrated in (*)ST, in (+)Tokamak and (-)expected

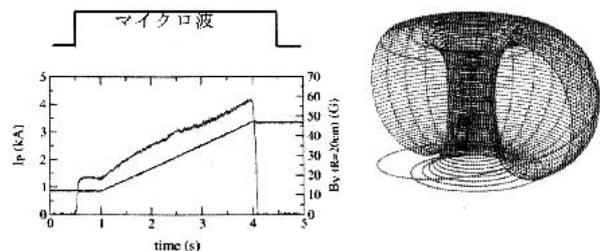


Fig. 1 Start-up of ST by ECH (LATE) [7].

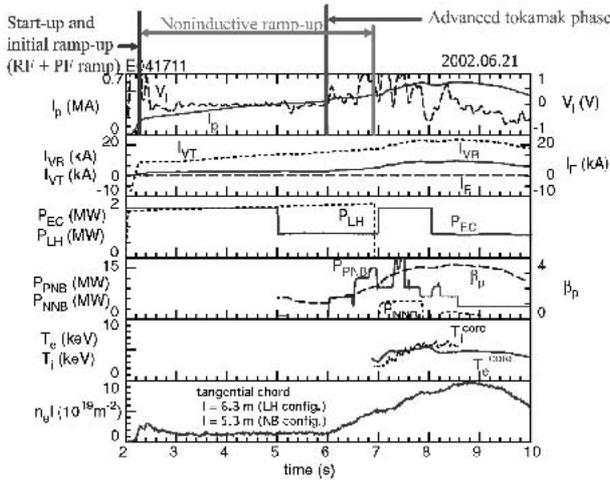


Fig. 2 Formation of advanced tokamak without the use of center solenoid (JT-60U) [13].

ある。この理論によると LHCD の場合も含めて高周波電流駆動による電流ランプアップで重要なポイントは逃走電子の発生を抑制することである。逃走電子の大量発生は実効的に抵抗を大幅に下げ、大きな逆方向電流が生じるからである。そのためにはバルク電子温度を低く保つことが要請されるが、炉心プラズマの寸法でプラズマ電流が数 MA レベルになると、これは困難である。したがって、現時点で考えられる最良のシナリオは、低温、低密度プラズマを維持しながら高周波により電流を MA レベルまでランプアップし、NBI に切り替えて、磁束保存トカマク平衡の機構を用いて B_v ランプアップ法により高圧力の核燃焼プラズマに至る方式である。入射した高周波電力を10%の効率でプラズマ電流の磁気エネルギーに変換できるとすると、10 MW の電力で、1分程度で 4 MA まで到達できる。その後、 B_v ランプアップ法を用いれば良い。LHCD に NBI をつなぎ、 B_v ランプアップ法によりプラズマ電流をランプアップできることは JT-60U での実験で示された[13 (Fig. 2: 6 - 8 sec)]。

ECH/ECCD は、原理的には初期プラズマ生成からプラズマ電流のランプアップまでプラズマから十分離れた位置に設置したアンテナからのマイクロ波入射で行えるのが特長である。特に、役割を第一段ランプアップまでに限定すれば、低密度下で電磁波モードを用いることができる。第二段以降の高密度下では、唯一の伝播モードである電子バースタイン波 (EBW) へ高効率でモード変換する必要があり、このようなプラズマでの高効率モード変換の実証が課題である。

LHCD も高密度条件下では伝播できないので、第一段ランプアップに限定される。第二段以降にプラズマ周辺部での電流分布制御に使えるかどうかは波動伝播可能性について吟味する必要がある。一方 FWCD に関しては、NSTX で高次高調速波 (HHFW) を使った高密度下での電流駆動が実証されている[15]、核燃焼プラズマでは α 粒子や高エネルギーイオンによる吸収と競合するので、これらを回避する必要がある。LHCD、FWCD とともに比較的大きなアン

テナをプラズマ近傍に設置する必要があるのが問題となる。

(2) CHI による立ち上げ、定常維持

同軸ヘリシティ入射 (Coaxial Helicity Injection : CHI) 法は、Fig. 3(c)のようにセンターポストのある同軸プラズマ銃により ST を生成する方法で、初期磁気面形成から定常維持までをカバーできる可能性がある。すなわち、ダイバータ板を同軸型電極とし、局部的にガスパフを行いながら放電を行い、放電電流とトロイダル磁束との相互作用で発生するローレンツ力により、着火したプラズマを装置中心面に向かって噴出させる。噴出速度 v とダイバータバイアス磁束 B による誘導電場 $v \times B$ によってトロイダル方向に一樣なプラズマ電流が誘起駆動され、噴出プラズマの後部で磁気リコネクションを起こして閉じた磁束が形成される。最終的に磁場揺動を介して X ポイントを含んだダイバータと閉じ込めの全領域で MHD 緩和が起き、平衡配位が形成される。緩和平衡配位で決まる全ポロイダル磁束に対する閉じた磁束の割合はプラズマ電流を一定とすると、外部トロイダル磁界 (TF) とダイバータバイアス磁束の大きさに依存する。

この方法は米国ワシントン大学の HIT [16] や兵庫県立大学 HIST [17] など小型 ST 装置で実験がスタートし、その実績を踏まえ NSTX 装置では CHI 構造が取り入れられた。NSTX での初期実験では、Fig. 4 に示すように、50 MW の DC 電源を用い、入射電圧 1 kV、入射電流 25 kA の条件下で最大 400 kA のトロイダル電流 (閉じた磁気面外の電流も含む) のランプアップと 300 ms 間の電流維持を実証している[18]。この時、 $n = 1$ のトロイダルモードの MHD 振動と $E \times B$ 方向のプラズマのトロイダル回転 (速度 10 - 20 km/s) が観測され、HIT で提案されている電流駆動モデル [16] の妥当性が検証された。最近、初期プラズマ電流の立ち上げに CHI が有効であることが HIT 実験 [19] で実証され、NSTX では2004年夏にこの電流立ち上げに着目した実験が予定されている。

特長は、CS なし立ち上げとして 1) 同軸銃が比較的簡便な構成でかつ 2) 電流駆動効率がかかなり高いことである。反面、1) オープンな磁束が多いため、クローズした磁気面をもった良好な閉じ込め特性が得られるか、2) 閉じ込め

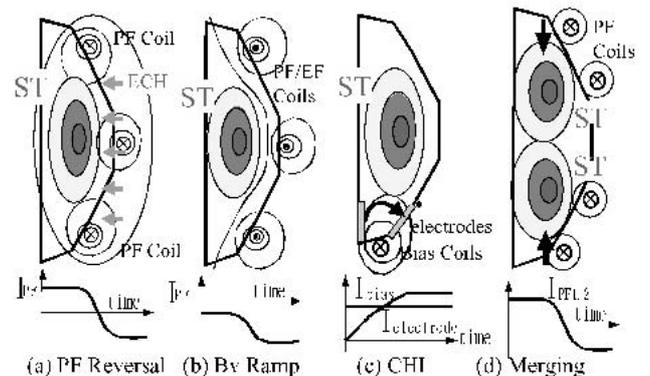


Fig. 3 Comparison of ST startup methods.

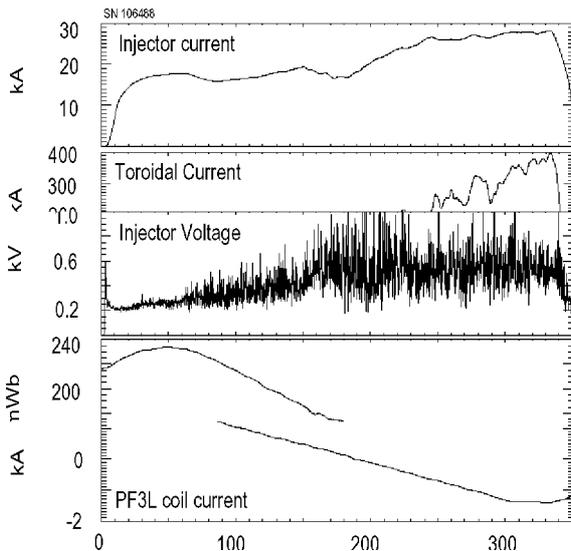


Fig. 4 ST startup and ramp up of plasma current on NSTX by CHI [18].

損失に大きく影響しない揺動レベルで配位維持が可能か、3) 電極放電に伴う不純物問題が解決できるか、4) CHI 電流駆動機構の詳細が不明、などが今後の重要な研究課題としてあげられる。

(3) PF 反転法・合法による立ち上げ

PF 反転法とは、Fig. 3(a)のようにECH等により形成した初期プラズマにポロイダルコイル電流を負から正に反転させたときに生じるフラックススイングによる誘導電圧を加えるものである。初期プラズマ、初期磁気面の形成に有効である。

JT-60UにおいてはECH、LHCD パワーを印加し、VT (三角度)コイルをスイングすることで誘導電流を流し、同時にVR(垂直磁場)コイルで平衡をとるようにして電流を立ち上げている(Fig. 2: 2.0 - 2.3 sec)。内側VT(三角度)コイルを含んだ初期実験の後、最近では完全CSなしの立ち上げを実現している。最近TST-2では、Fig. 5に示すように内側CSの全くない外側だけのポロイダルコイルによる垂直磁場とECHによるプラズマ電流立ち上げ(10 kA)が実験的に示されている[20]。

利点は、最も簡素なPFコイルのフラックススイングだけでプラズマが着火することであり、反面、金属真空容器外から誘導起電力を印加するため、渦電流損失の考慮が必要であり、RFパワーの印加も不可欠である。

合法は、Fig. 3(d)のようにPF反転法を軸方向の2ヶ所で行うもので、コイル付近に2個の低ベータのSTが生成され、それらが互いに引き合うことから軸対称状態で合体するものである。合体時、2つのSTの境界面に磁気リコネクションが発生して、再結合した磁力線がパチンコのひもようになって粒子を加速することから、瞬時にプラズマが加熱され、ベータ値も急増する。古典的なSweet-Parkerモデル[21]の場合、その加速の大きさはアルヴェン速度程度と極めて大きく、再結合磁場に比例する。トロイダル磁場がある場合は減速されるが、その加熱パワーは概ね磁場の自乗に比例して増え、kGオーダーの再結合磁場でも、簡

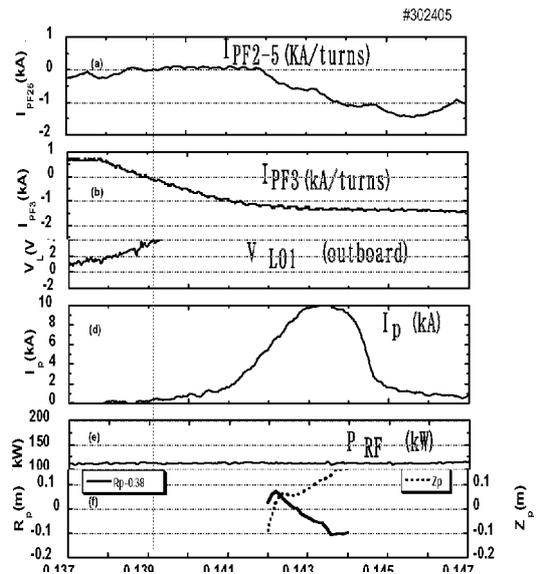


Fig. 5 Plasma current start-up in TST-2 at $B_t = 0.28$ T. (a), (b) PF coil currents, (c) loop voltage, (d) plasma current, (e) RF powers, and (f) horizontal and vertical positions of the plasma current centroid [20].

便に大型NBIに相当する数MWから数十MWの加熱パワーを立ち上げに利用できる点が長所である。当初危惧された合体時の閉じ込めの劣化は、常に外側に再結合済みの閉じた磁気面が存在することから、10%以下のものである。

古くはアルヴェンやウェルズの実験などに起源を持つが、STの合体実験は、80年代末から東京大学TS-3装置[22]、90年代半ばから英国START装置[23]で行われるようになり、最近では中型のMAST装置[24]で採用されて、通常のPF反転法に比べ、速やかにベータが立ち上がることが明らかになっている。利点は、1) 合体・磁気リコネクションによる速いベータの立ち上がり(MWを超える加熱パワー)、2) 軸対称合体による閉じ込め劣化の抑制であるが、PF反転法の課題に加え、合体を行う真空容器内スペースの確保に課題がある。

(4) B_v ランプアップ法による立ち上げ

B_v ランプアップ法は、Fig. 3(b)のようにプラズマ圧力の上昇に伴って外部垂直磁場を立ち上げるもので、磁束保存トカマク平衡モデルを適用した過程であり、最近のJT-60Uにおいて原理実証されている[13]。関連する研究として、ITERやD-T ST炉におけるOH変流器なしプラズマ電流立ち上げの理論的研究[25, 26]、および内部コイルでは80年代のTS-3/[22]や90年代のSTART, MAST[27]での実験、外部コイルでは最近のTST-2実験(Fig. 5)[20]などがあり、この分野の研究が急速に進展した。

この方法は4.1.1で述べたように、核燃焼に至る最後のステップに用いるのが最も有効である。立ち上げ時間は電流拡散時間より十分短い必要があるが、この場合プラズマはすでに超高温であるので電流拡散時間は非常に長く(約1時間)、数分程度の長い立ち上げ時間でも機能する。ST核融合炉を対象に単純なモデルによる電流立ち上げシミュレーションが行われていて、D-T炉ではこの手法で30

MA 以上のプラズマ電流が誘起されることが示されている [26]。ここで興味ある問題は、 B_v ランプアップで点火に必要な電流値に至るための初期電流値をどこまで下げ得るかという点である。最も野心的なシナリオは他のランプアップ法を用いずに ECH と PF 反転法のみで必要な初期電流値を達成し、これに引き続いて強力なプラズマ加熱と B_v ランプアップを行い点火に至るシナリオである。

B_v ランプアップ法の利点は、NBI 加熱があれば、最も簡素な平衡コイルのフラックススイングだけで電流が立ち上がることであり、反面、1) 金属真空容器の渦電流損失や、2) NBI 加熱と平衡コイル電流を立ち上げる際の自由度が少ないことによる微妙な調整や、3) 低アスペクト比での有効磁束の減少などが課題である。

4.1.3 今後の課題

CS 無しでの初期磁気面形成、および、1 MA 程度までの電流立ち上げは十分可能であると考えられるが、今後は、実機に近い条件の ST 配位で実証していく必要がある。問題は核燃焼に至る第二段ランプアップである。ここで、 B_v ランプはいわば無条件で支給されるボーナスと考えられるが、鎖交磁束の少ない ST 配位での有効性を確認する必要がある。第一の課題は、 B_v ランプを開始するのに必要な初期電流値の下限をどこまで下げ得るかを、最終的な炉心プラズマを考慮した総合的な観点から明らかにすることである。第二の課題は B_v ランプにつなげるための最適の方法を見つけることである。もし必要な初期電流値の下限が MA レベルであれば、(1)ECH 単独、あるいは ECH+PF 反転による初期磁気面形成、(2)ECH/ECCD による MA レベルまでのランプ、(3)NBI と B_v ランプによる燃焼までの立ち上げ、のシナリオは単純な炉心構造の観点から魅力的である。

第二段ランプにおいては良好な閉じ込めと安定性を確保しつつ、プラズマ温度と圧力を核燃焼に必要な値まで上昇させる必要がある。核燃焼に近づくにつれ α 粒子による自己加熱や、ブートストラップ電流のような自発電流が支配的になり、プラズマの自律性が高まる。これらの未開の領

域を炉工学的にも安全で、なおかつ、経済性も確保できる方式で実現する必要がある。これらは相互に関連する複雑な問題であり、戦略を持って研究を進める必要がある。

参考文献

- [1] S. Nishio *et al.*, *Proc. 19th IAEA Fusion Energy Conf.*, IAEA-CN-94/FT/P1-21, Lyon, France.
- [2] S.C. Jardin, *Nucl. Fusion* 40, 1101 (2000).
- [3] R.A. Dory and Y.K.M. Peng, *Nucl. Fusion* 17, 21 (1977).
- [4] B. Lloyd *et al.*, *Plasma Phys. Cont. Fusion* 38, 1627 (1996).
- [5] C.B. Forest *et al.*, *Phys. Plasmas* 1, 1568 (1994).
- [6] Y. Takase *et al.*, *Nucl. Fusion* 41, 1543 (2001).
- [7] M. Uchida *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* 80, 83 (2004).
- [8] S. Kubo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 50, 1994 (1983); K. Ogura *et al.*, *Nucl. Fusion* 30, 611 (1990).
- [9] K. Toi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 52, 2144 (1984).
- [10] F. Jobses *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 52, 1005 (1984).
- [11] Y. Takase *et al.*, *Phys. Fluids* 30, 1169 (1987).
- [12] K. Hanada *et al.*, *Nucl. Fusion* 44, 357 (2004).
- [13] S. Shiraiwa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 92, 035001-1 (2004).
- [14] C.F.F. Karney and N.J. Fisch, *Phys. Fluids* 29, 180 (1986).
- [15] J.R. Wilson *et al.*, *Phys. Plasmas* 10, 1733 (2003).
- [16] T.R. Jarboe *et al.*, *Nucl. Fusion* 41, 679 (2001).
- [17] M. Nagata *et al.*, *Phys. Plasmas* 10, 2932 (2003).
- [18] R. Raman *et al.*, *Nucl. Fusion* 41, 1081 (2001).
- [19] R. Raman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 90, 075005 (2003).
- [20] O. Mitarai, Y. Takase *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* 80, 549 (2004).
- [21] E.N. Parker, *J. Geophys. Res.* 62, 509 (1957).
- [22] M. Yamada, Y. Ono *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 65, 721 (1990); Y. Ono *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 76, 3328 (1996).
- [23] M. Gryaznevich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 80, 3972 (1998).
- [24] A. Sykes *et al.*, *Phys. Plasmas* 8, 2102 (2001).
- [25] O. Mitarai, R. Yoshino and K. Ushigusa, *Nucl. Fusion* 10, 1257 (2002).
- [26] O. Mitarai and Y. Takase, *Fusion Sci. Technol.* 43, 67 (2003).
- [27] A. Sykes *et al.*, *19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE)*, (Atlantic City, USA, January 22-25 2002).