

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560770

研究課題名(和文) 先進プラズマ立ち上げシナリオの研究

研究課題名(英文) Investigation of advanced plasma ramp up scenario

研究代表者

井手俊介 (IDE SHUNSUKE)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

研究者番号：20354590

研究成果の概要(和文)：国内外のトカマク装置の実験データを調査する事により、プラズマの立ち上げ方と得られる電流分布形状や閉じ込め特性との関連を明らかにした。これに関する国内外のシミュレーション研究結果の調査および自身によるシミュレーションの実施により、得られる電流分布発展の予測を行った。また、最適なプラズマ立ち上げ後に得られる高閉じ込めモードについて電流分布や閉じ込め性能の評価を実施した。

研究成果の概要(英文)：Through investigations in experimental results on various tokamak machine worldwide, relationship between a way how a plasma is ramped up and resultant current profile and confinement characteristics is documented. Through investigations on related simulation results worldwide and execution of simulation of our own, evaluation on current profile evolution is carried out. Furthermore, evaluation of the current profile and the confinement characteristics of a high confinement plasma, which is expected to be formed as a result of optimized plasma ramp up.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合

キーワード：先進トカマク、立ち上げ、電流分布制御、圧力分布制御

## 1. 研究開始当初の背景

ITERの標準運転はELMy H-modeでエネルギー増倍率( $Q$ ) $\geq 10$ を目指す。ELMy H-modeはこれまでのトロイダルプラズマ研究から十分な知見が得られており、これに基づいたITER標準運転シナリオは確立されたシナリオと言える。一方、経済的な核融合炉の運転シナリオとして有力視されている高自発電流割合( $f_{BS}$ ) $\gg 70\%$ の完全非誘導電流駆動シナリオ(定常運転シナリオ)に関しては現在まだ広く研究が進められている段階である。ITERにおいても、将来の定常核融

合を見据えて $f_{BS} > \sim 50\%$ の定常運転( $Q \geq 5$ )が想定されている。ITERにおいてはまた、ブランケットや壁材料の試験を考えて、放電あたりの総中性子発生量の多い運転シナリオ(ハイブリッド・シナリオ)も想定されている。ハイブリッド・シナリオに適用しうるプラズマは、現在多くのトカマク装置で得られており、その特性や運転シナリオについて知見が蓄積されつつ有る。ELMy H-modeプラズマに対して、これら定常運転やハイブリッド運転に用いるプラズマは先進プラズマ、またその運転を先進運転、と呼ばれる事が多

い。

これら先進プラズマは ELMy H-mode プラズマに比べて高い閉じ込め性能やプラズマ圧力を有するが、その性能を十分に引き出すためには  $I_p$  の立ち上げに注意を払う必要が有る。特に電流分布 ( $j(\rho)$ ,  $\rho$ は規格化小半径) は重要なファクターであり、電流分布形状の違いによって得られるプラズマ特性が異なってくる。多くのトカマク放電に置いては、プラズマ電流立ち上げ時に特に手段を講じない場合、電流分布は中心へ向かってピーキングしてゆき、中心での安全係数 ( $q_0$ ) が 1 をある程度下回ったところで鋸歯状波 (Sawtooth) 振動が発生し  $j(\rho)$  はほぼ定常状態となる (図 1(a))。放電は安定に維持されるが、この Sawtooth 振動も維持され、これにより中心付近のエネルギーは周辺部に吐き出されるため閉じ込め性能は高くはない。一方、多くのハイブリッド・プラズマは  $q_0 \sim 1$  であるが Sawtooth 振動が発生しないうちに高加熱を行うことにより、ELMy H-mode より高い閉じ込め状態が得られる。またこの状態では、電流分布のそれ以上のピーキングは起こらずいわゆる弱磁気シア分布と成り Sawtooth 振動のない状態で維持される (図 1(b))。プラズマ電流立ち上げ時に電流上昇率 ( $dI_p/dt$ ) を高くし同時に加熱あるいは電流駆動を行うと、プラズマ中心部よりも周辺での  $j(\rho)$  がより増えるため、 $j(\rho)$  は中心付近で平坦あるいは凹型になる。このとき安全係数分布 ( $q(\rho)$ ) は中心付近で上昇するいわゆる負磁気シア配位となる (図 1(c))。このようなプラズマでは非常に強い内部輸送障壁 (ITB) が形成され高い閉じ込め特性が得られる事が知られている。

このように電流分布はプラズマ性能に大きな影響を及ぼすが、電流分布の形状はプラズマの立ち上げ方 (電流上昇率、形状、加熱、電流駆動、H-mode 遷移の有無やタイミング等、図 2 参照) に大きく依存する。また、立ち上げ方の効果もターゲットプラズマのパラメータ (断面積、密度等) や加熱装置自身のパラメータ (パワー、入射位置、共鳴条件等) に大きく依存する。さらに、立ち上げ時には電流駆動型の MHD 不安定性が発生し易く、電子密度やプラズマ形状 (装置の制御能力に依存する) 等により制約されるファクター (中性粒子ビームの突抜や高周波とプラズマの結合特性等) も多い。

これらの内的/外的要因を考慮しつつ、望まれる電流分布に向けてプラズマを立ち上げる手法の研究は、出来上がったプラズマに対して行われている程には進展していないと言える。ITER のハイブリッドや定常運転、あるいは定常炉のシミュレーションも国際トカマク物理活動 (ITPA) を中心に行われているが、 $I_p$  フラットトップでのプラズマの議

論がメインで立ち上げの最適化という点では、まだ研究途上と言える。

今後、立ち上げ手法の研究は更に重要度を増すと考えられ、ITPA が主導する国際比較実験でも取り上げられてゆく (特に「定常運転」トピカル物理グループを中心に)。本研究を進める事は、世界のトカマク研究の中で日本の貢献を明らかにする上でも意義が有る。

## 2. 研究の目的

プラズマ電流 ( $I_p$ ) のフラットトップにおけるトカマク・プラズマの特性は、プラズマ着火からフラットトップにいたるプラズマ立ち上げのシナリオに依存する事が多い。特に高閉じ込めプラズマでは、それが顕著である。

本研究は、ITER や JT-60SA 等の核融合実験装置や原型炉における運転シナリオの確立、特に ITER で想定されている高出力・長時間放電シナリオ (ハイブリッド・シナリオ) や経済的な核融合炉の運転方式である高自発電流割合の完全非誘導電流駆動運転シナリオ (定常運転シナリオ)、に必要不可欠である立ち上げシナリオの最適化を既存の実験データ及び解析コード両面から行うものである。

得られた知見は、ITER におけるハイブリッド運転や定常運転等のいわゆる先進運転シナリオや JT-60SA における高ベータ定常運転シナリオの準備/最適化、さらに先進運転シナリオに基づく原型炉のデザイン等に貢献する事が期待される。

## 3. 研究の方法

(1) 種々のトカマク装置 (JT-60U、JET、DIII-D、ASDEX-Upgrade 等) の高閉じ込めプラズマが、どのようなターゲットプラズマ条件 (特に電流分布) で得られているか、またそれを得るためどのようなプラズマ立ち上げ (電流上昇率、加熱/電流駆動、粒子補給、形状制御等) が必要とされているかの調査を行い、これを整理する。これにより、どのようなプラズマ立ち上げが、高閉じ込めプラズマ形成に有効であるかを経験的に明らかにする。プラズマ立ち上げは装置固有の条件 (加熱/電流駆動性能、プラズマ形状制御性) に大きく左右され得るため、装置固有の条件と一般化可能な条件の分離を行う。また、比較のために通常の閉じ込めプラズマ、Lモード/Hモードプラズマについても調査を行う。

(2) プラズマ立ち上げ時の各種プラズマ分布、特に電流分布、の成長を計算コードといくつかのプラズマモデルを用いてシミュレーションし、分布形状や成長の仕方が立ち上げ方にどのように依存するかを既存の装置

や JT-60SA、ITER に対して調べる。

(3) プラズマ立ち上げの研究と平行して、電流フラットトップで得られる高閉じ込めプラズマに関して電流分布や閉じ込め性能の評価を行う。

上記 (1) ~ (3) の結果をもとに、特に JT-60SA や ITER 等将来の装置に置ける先進プラズマ形成手法の確立、およびそのために必要な手段 (加熱/電流駆動装置の追加/修正、プラズマ制御アルゴリズムの最適化等) の提言、に向けた研究を進める。

#### 4. 研究成果

プラズマ立ち上げ時の加熱や H モード遷移が、内部インダクタンス等のプラズマ運転領域に及ぼす影響について、JET や DIII-D 等の実験結果を用いて調べた。これらの装置の結果から、立ち上げ時に加熱を行う事により、

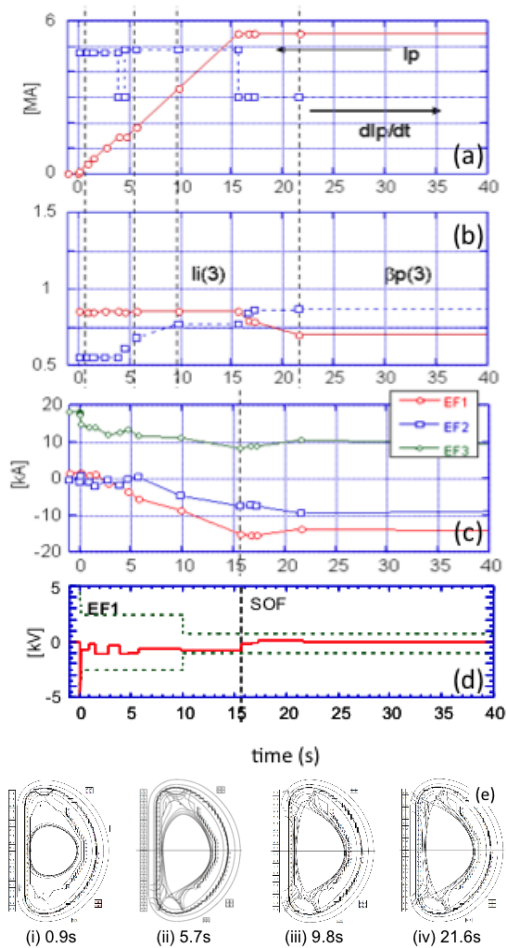


図 1: JT-60SA の 5.5MA 放電でのプラズマ立ち上げ時のモデル化の例。(a) プラズマ電流  $I_p$  とその変化率。(b) プラズマ内部インダクタンス  $li(3)$  とポロイダルベータ。(c) 平衡制御コイルの電流波形。(d) ある平衡制御コイルの電圧。(e) モデル化した平衡の時間発展。

内部インダクタンスが高くなりすぎるのを抑えることができることが示された。立ち上げ途中で H-mode 遷移する事によりさらに内部インダクタンスは低く抑えられる事が明らかになった。また、ITER の立ち上げ時の加熱の影響についても、情報を収集した。立ち上げ時の磁束は、加熱により大きく節約できることが電流駆動による節約は少ないことが判った。また、これらの結果を参考に、プラズマ立ち上げ時の平衡配位の変化と、それによる外部コイル電流やコイル端電圧の変化等のモデリングを行った。対象は、主に JT-60SA で想定している各種のレファレンス・プラズマである。これらの JT-60SA レファレンス・プラズマのパラメータを基に、ダイバータ移行時期やプラズマ断面形状、内部インダクタンス/ポロイダル・ベータ等に対するプラズマ平衡の時間発展をモデル化し、外部コイルの電流やコイル端電圧の変化等を調べた (図 1)。これにより、立ち上げ時のプラズマの運転領域の同定を行った。

一方、モデルシミュレーションによるプラズマ立ち上げについても調査を行った。シミュレーションにおいても実験と同様、立ち上げ時の加熱による内部インダクタンスの低下の傾向が得られるが、シミュレーションで実験を再現するにはより適切な輸送モデルが必要であることが、種々の輸送モデルおよびコードを用いた計算から分かってきた。国際トカマク物理活動 (ITPA: International Tokamak Physics Activity) を中心とする世界的な議論でもまだ最適なモデルには至っていない。

閉じ込め改善モードを得るには立ち上げ時からどのような状況を作らないといけなにかについても調査を進めた。JT-60U をはじめ DIII-D、JET 等の実験データから、立ち上げ時の電流分布と高閉じ込めモード形成に相関があることが判った。特に内部インダク

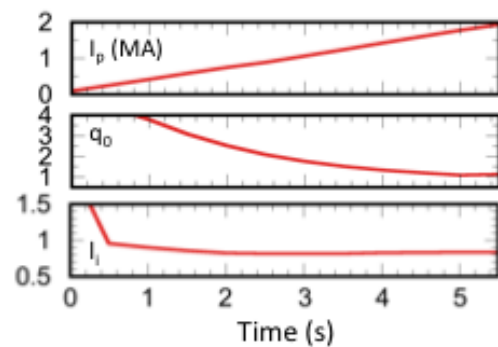


図 2: JT-60SA の電流立ち上げ時のシミュレーション例、各パラメータの時間発展。

(a) プラズマ電流  $I_p$ 。(b) 中心安全係数  $q_0$ 。(c) 内部インダクタンス。

タンスが高閉じ込めモード形成の指標となり得る事が他装置の調査や研究者との議論で明らかになった。また、主に JT-60SA を対象として、立ち上げ時の安全係数や内部インダクタンスの時間発展のシミュレーションを行い、これらパラメータの詳細な振る舞いを調べた (図 2)。計算には非定常輸送コード TOPICS を用い、評価に用いた輸送モデルは、

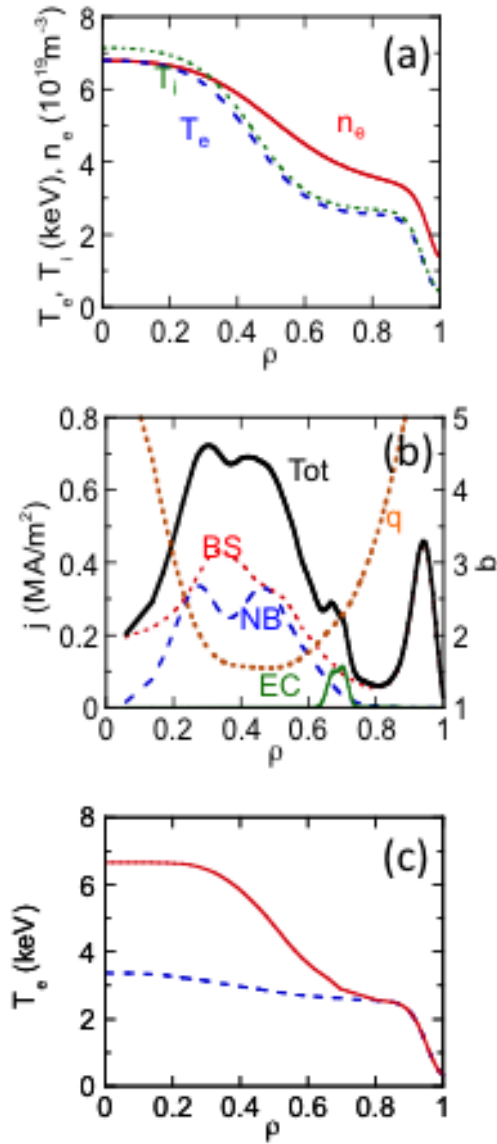


図 3 : JT-60SA の高圧力定常運転放電を基にその閉じ込め性能を評価した例。(a) 想定した電子/イオン温度、電子密度の分布。(b) プラズマ中の電流分布の内訳、Tot = 全電流/BS = 自発電流/NB = 中性粒子ビーム/EC = 電子サイクロトロン波、と安全係数 ( $q$ ) 分布。(c) (a) の電子密度分布と (b) の電流分布を仮定した場合の高閉じ込めモード形成の様子。破線 = 形成前、実線 = 形成後。

電流拡散型バルーニングモード (CDBM : Current Diffusive Ballooning Mode) である。

立ち上げの検討と平行して立ち上げ後に期待される高閉じ込めプラズマの検討も行った。前述のように立ち上げ時の電流分布を最適化すると高閉じ込めプラズマの形成が期待される。特に立ち上げ時に負磁気シアを形成することができると、閉じ込め性能が高く自発電流割合も高いプラズマの生成が期待されることが JT-60U の結果から判っている。JT-60SA における高圧力定常放電が期待される運転領域のレファレンス・プラズマに対して電流駆動コード ACCOME を用いて電流分布を予想し得られる閉じ込め性能を評価した (図 3)。まず、期待されるパフォーマンスが得られる温度/密度分布を仮定し (図 3 (a))、この時の電流分布を評価した (図 3

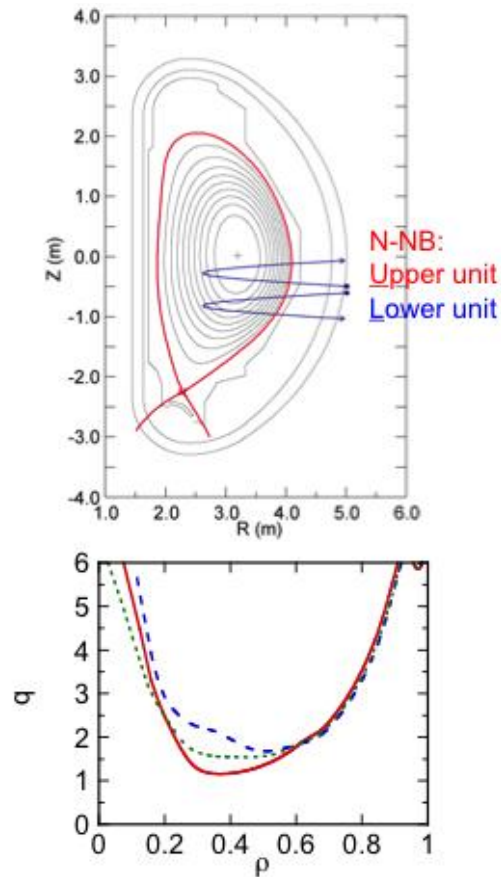


図 4 : 外部電流駆動源による安全係数分布 ( $\Leftrightarrow$ 電流分布) の制御性を調べた例、JT-60SA プラズマを基にしている。上図 : プラズマのポロイダル断面平衡と N-NB ビームライン (上下ユニット)。下図 : 上ユニットのみ (実線)、下ユニットのみ (破線)、上下ユニット両方 (点線)、それぞれの場合の安全係数分布の変化。

(b)。仮定した密度分布と得られた電流分布をもとに、TOPICS を用いて温度分布の成長を評価した (図 3 (c))。最初平坦だった温度分布 (ここでは電子温度) が大きく成長している事が判る。ここでも輸送モデルとして CDBM モデルを評価に用いた。

また、JT-60SA プラズマを対象として、外部電流駆動装置を用いてどの程度電流分布を変える事が出来るか等の評価も行った (図 4)。JT-60SA では、主要な外部電流駆動源である負イオン源中性粒子ビーム (N-NB) 入射装置が二つのイオン源を持ち、それらのビームラインが少し異なる事により安全係数分布 (⇔電流分布) を大きく変える事が出来る事が判った (図 4)。

JT-60U で得られていた高閉じ込めモードである高ポロイダルベータプラズマと同様な性能を持ったプラズマが近年 JET、DIII-D や ASDEX-Upgrade 等他の装置でも得られており、この種のプラズマを生成維持するには中心での安全係数を 1 あるいはその少し上にす

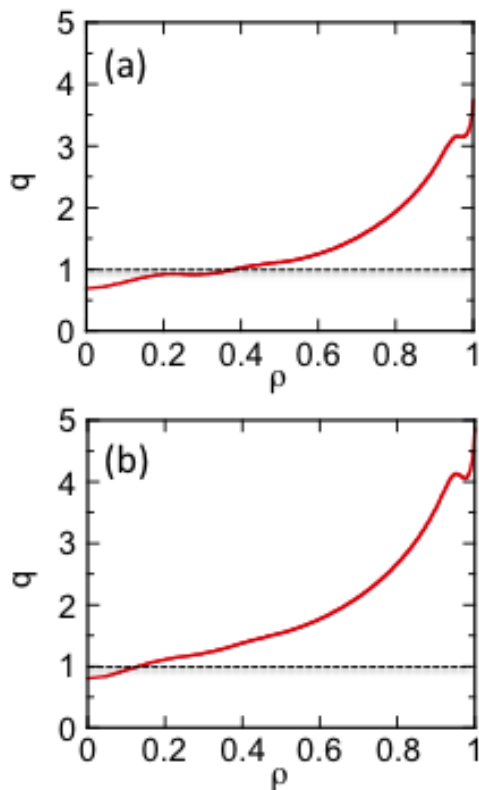


図 4 : JT-60SA プラズマでの運転領域により予測される安全係数 ( $q$ ) 分布の違い。(a) 高プラズマ電流 (5.5MA) 低安全係数 ( $q_{95} \sim 3$ ) 領域。(b) 中プラズマ電流 (4.4MA) 中安全係数 ( $q_{95} \sim 4.2$ ) 領域。後者では、改善閉じ込め H モードにより適した安全係数分布、 $q < 1$  となる領域が中心付近のみに限定されている、が期待できることが判る

るのが重要であることが判って来た。そのため JT-60SA においてもそのような放電の可能性があるかどうかを ACCOME コードを用いて検討した (図 4)。JT-60SA の最大電流 (5.5MA) では低密度 (グリーンワルド密度の 50%) でも安全係数が 1 を切る領域が小半径の 40% 程度まで広がってしまう。一方、プラズマ電流を 20% 下げた (4.4MA) 領域では、高密度 (グリーンワルド密度の 80%) でも  $q$  が 1 を切る領域をプラズマ中心付近のごく狭い範囲にとどめられる可能性がある事が判った。

この研究をとおして、プラズマ立ち上げの重要性とその影響の仕方を複数の装置にまたがる普遍的なものとしてとらえることができた。またこれから、JT-60SA や ITER 等の将来の装置においてどのような立ち上げが可能であるかについての予想の基を築くことができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

A. C. C. Sips, S. Ide (11 番目) 他全 31 名、Experimental studies of ITER demonstration discharges, Nuclear Fusion、査読有り、49 巻、2009、085015-085025

[学会発表] (計 6 件)

① A. C. C. Sips, EXPERIMENTAL STUDIES OF ITER DEMONSTRATION DISCHARGES、22nd IAEA Fusion Energy Conference、2008 年 10 月 17 日、ジュネーブ (スイス)

② 井手俊介、JT-60SA における先進プラズマの生成と性能評価の現状、プラズマ・核融合学会第 26 会年会、2009 年 12 月 4 日、京都市国際交流会館 (京都府)

③ S. Ide、Assessment of integrated physics design of the JT-60SA plasmas、第 37 回欧州物理学会 (プラズマ物理)、ダブリン市立大学 (ダブリン、アイルランド)

④ 井手俊介、JT-60SA における先進プラズマ生成と運転領域および性能評価の現状、プラズマ・核融合学会第 27 会年会、2010 年 12 月 2 日、北海道大学 (北海道)

⑤ S. Ide、Progress in physics assessment of JT-60SA plasmas towards ITER and DEMO、IAEA 「定常運転」に関する第 6 回技術会合、2010 年 12 月 6 日、IAEA 本部 (ウィーン、オーストリア)

⑥ S. Ide、The JT-60SA project and its plasma regimes、日中拠点大学プログラム総括セミナー、2011 年 3 月 9 日、沖縄県立美術館 (沖縄県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井手 俊介 (IDE SHUNSUKE)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核  
融合研究開発部門・研究主幹  
研究者番号：20354590

### (2) 研究分担者

坂本 宜照 (SAKAMOTO YOSHINORI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核  
融合研究開発部門・研究副主幹  
研究者番号：30354583

(H20-H21 のみ)

浦野 創 (URANO HAJIME)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核  
融合研究開発部門・研究員  
研究者番号：70391258