



第18回若手科学者によるプラズマ研究会
平成27年3月4-6日

JT-60Uにおけるプラズマ制御実験と 原型炉に向けたプラズマ制御研究

日本原子力研究開発機構
六ヶ所核融合研究所
坂本宜照

はじめに

- 炉心プラズマ研究や炉工学技術の進展により、定常核融合炉の実現は大きく近づいている。
 - ✓ 国際熱核融合実験炉ITERの建設(2020年ファーストプラズマ、2027年DT燃焼実験)
 - ✓ 核融合発電の技術的実証を目指す原型炉開発の本格的な議論が開始
- 核融合炉開発における炉心プラズマ研究の究極の目的は、燃焼プラズマ制御手法の確立である。
- 燃焼プラズマ制御では、装置の健全性を確保しつつ、所要の核融合出力を安定に維持するために、現実的かつ信頼性のある手法を構築することが重要
- 本講演では、JT-60Uにおける炉心プラズマ制御研究の進展を紹介し、原型炉に向けたプラズマ制御研究について、議論する。

JT-60Uにおけるプラズマ制御実験

～ 高性能放電の達成と長時間維持への挑戦 ～

- ✓ 高自発電流割合プラズマの長時間維持に向けた制御技術の進展
- ✓ 様々な実時間制御技術

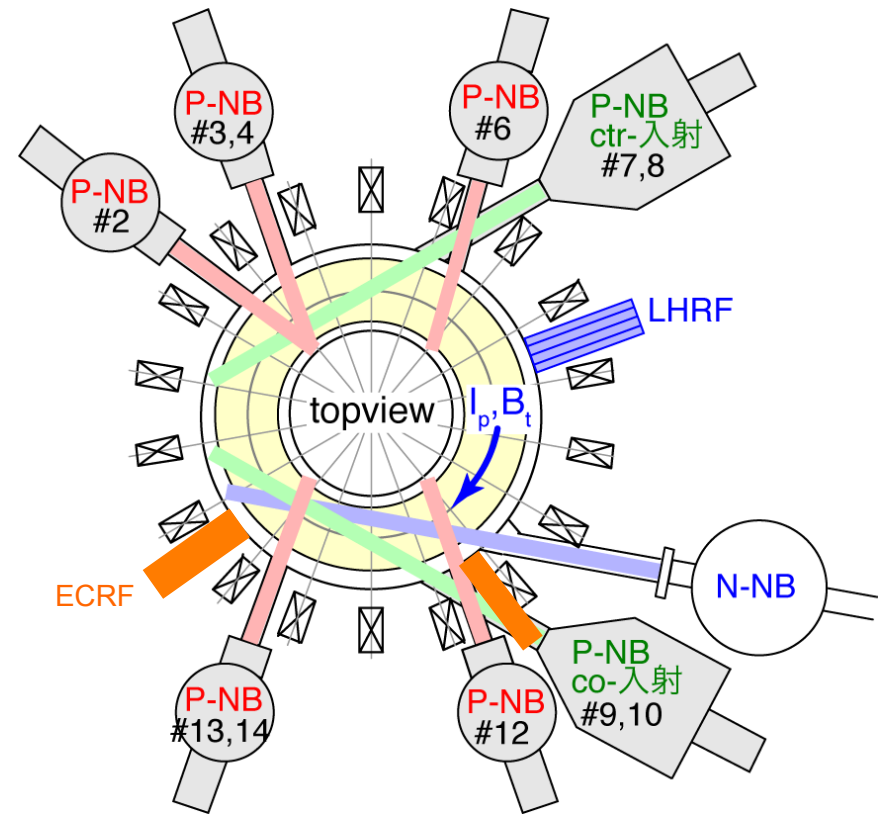
JT-60Uにおける炉心プラズマ制御研究

炉心プラズマ制御研究の意義

- 運転領域の開拓
 - ✓ 高性能放電の実現
 - ✓ 長時間維持に貢献
- 物理実験研究
 - ✓ 安定した放電
 - ✓ パラメータスキャン

シンプルな制御から高度な制御への挑戦

- JT-60Uの持つ多彩なアクチュエーターと実時間計測技術の進展によって、
 - ✓ シンプル(グローバル量)の実時間制御
 - ✓ 複雑な(複合、分布、MHD)の実時間制御を開発。



JT-60Uにおけるプラズマの実時間制御

グローバル量の実時間制御

- 線密度(干渉計、ガスパフ)
- 中性子発生率(中性子計測、NB加熱)
- 蓄積エネルギー(反磁性ループ、NB加熱)
- 放射損失(ボロメーター、不純物ガスパフ)

ローカル量(分布)の実時間制御

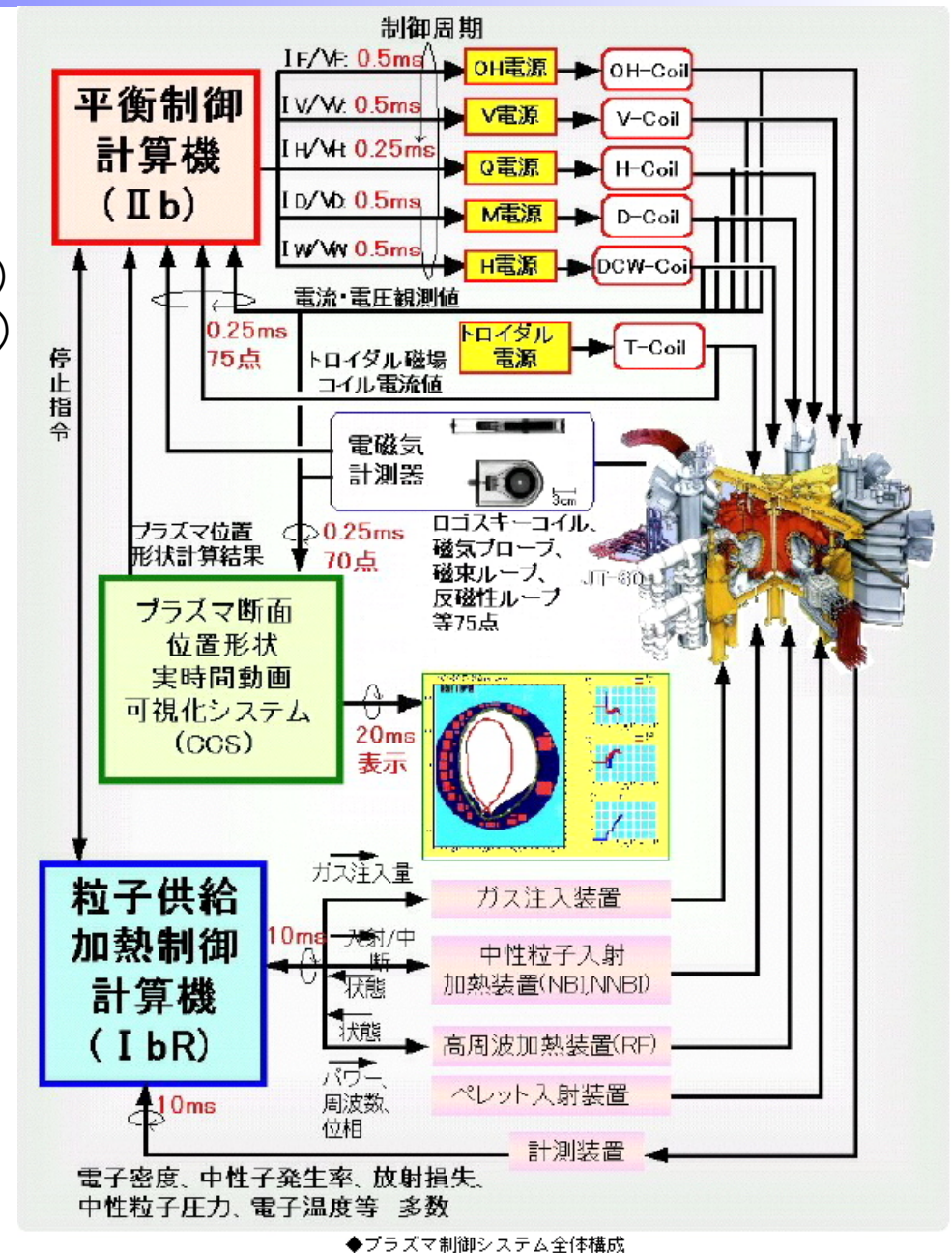
- 電子温度・温度勾配(ECE、NB加熱)
- イオン温度・温度勾配(CXRS、NB加熱)
- 回転速度(CXRS、接線NB加熱)
- 電流・安全係数(MSE、LHCD)

不安定性の実時間制御

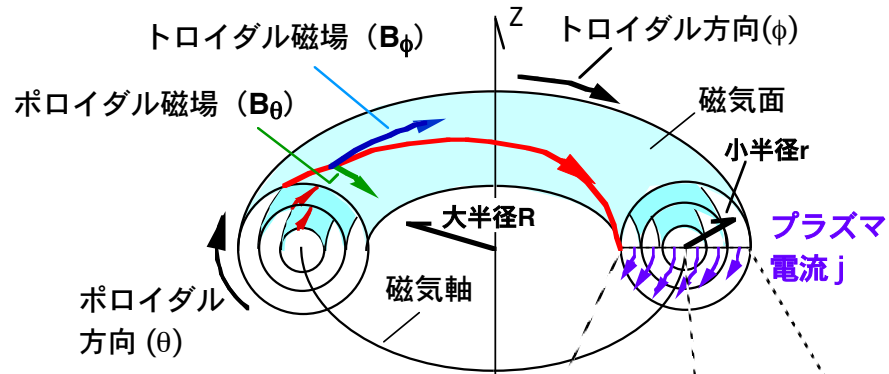
- 新古典テアリングモード(ECE、ECCD)

平衡の実時間制御

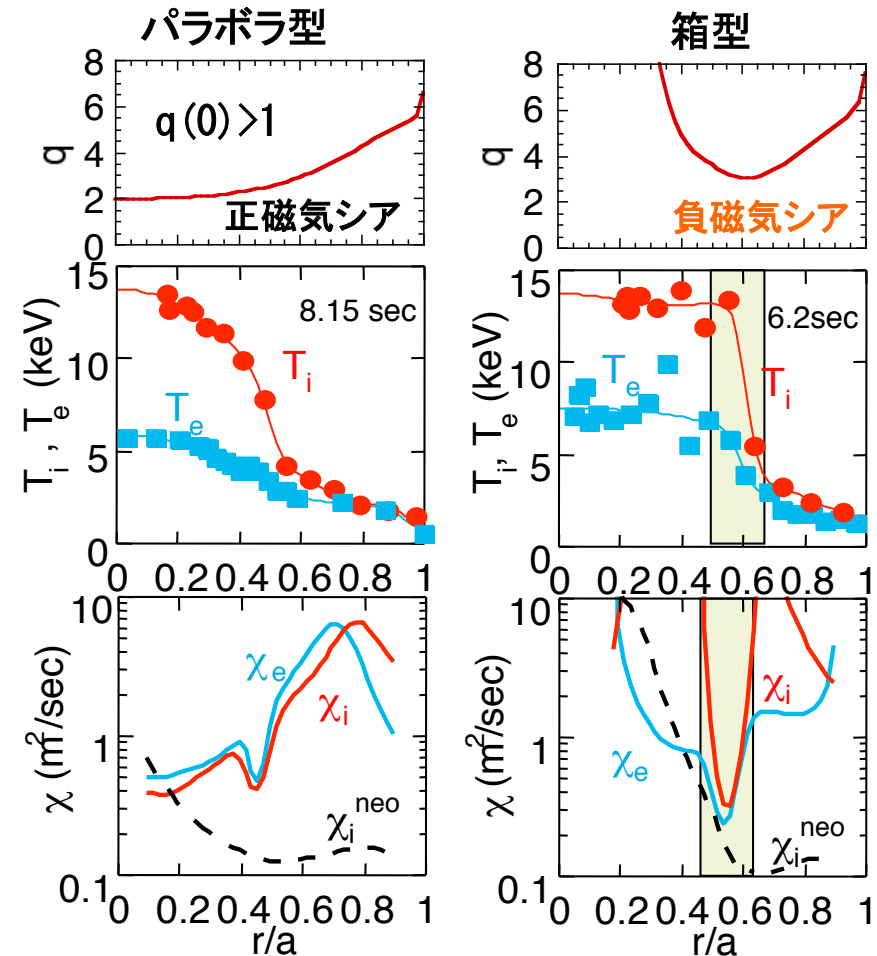
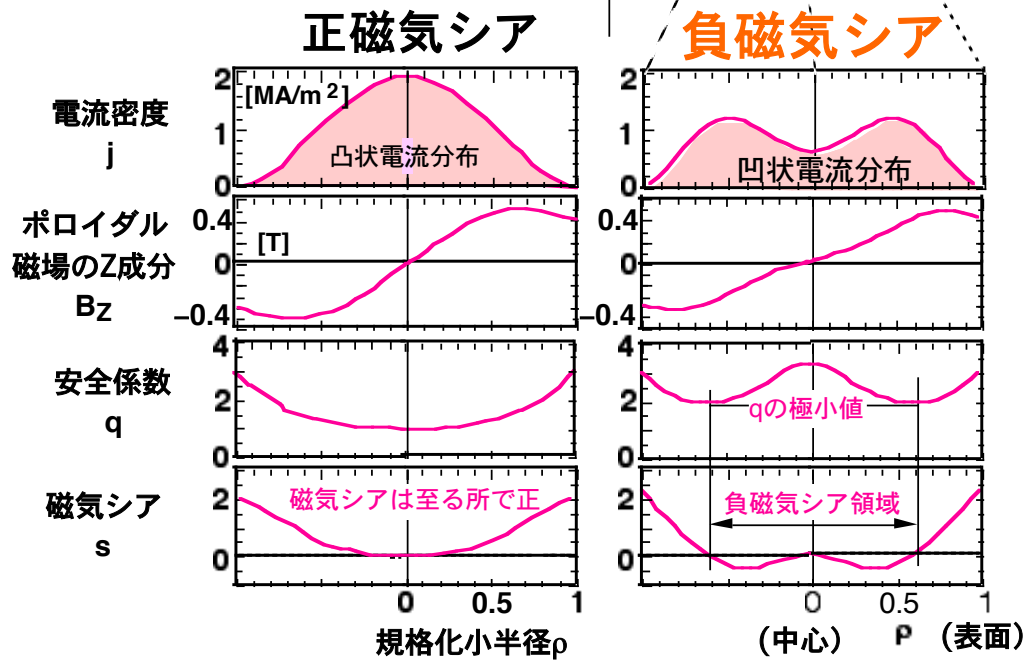
- プラズマ位置・形状(磁気プローブ、PFコイル)



磁気シアと内部輸送障壁(ITB)



ITBは弱正磁気シア、負磁気シアで形成
 > 負磁気シアでより強い輸送低減(箱型の温度分布、 $\chi_i \sim \chi_i^{NC}$)
 > 弱正磁気シアではパラボラ型の温度分布 ($\chi_i > \sim 3\chi_i^{NC}$)

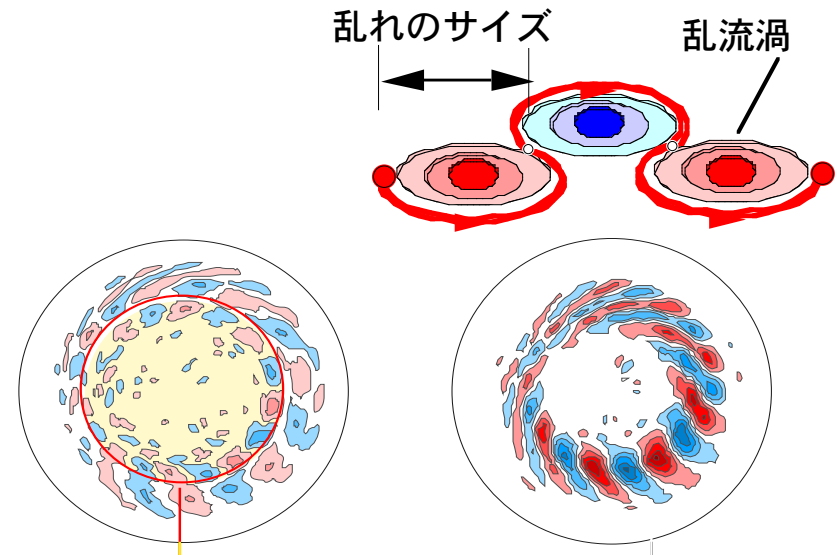


電流分布はq分布、磁気シア分布を通じてMHD安定性、輸送に影響

内部輸送障壁の形成機構と意義

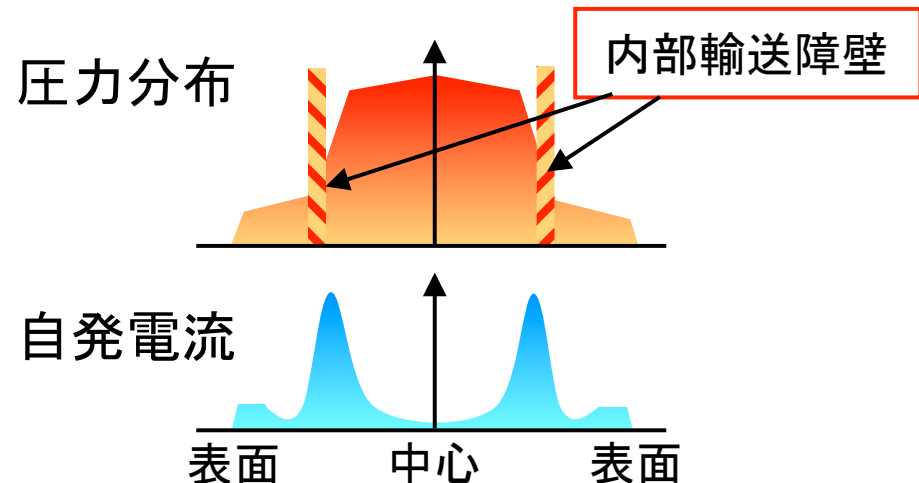
内部輸送障壁の形成機構

- 加熱により温度勾配が大きくなると、電場の揺らぎが発生し、乱流渦が成長して、径方向輸送が増大 → 異常輸送
- 径電場勾配によるExBシア流により乱流渦を分断し、径方向輸送が減少
→ 内部輸送障壁の形成



内部輸送障壁の意義

- トカマクの定常運転のためには、自発電流割合(f_{BS})を高める必要がある。
- 自発電流は圧力勾配に比例して流れる。
- 内部輸送障壁により、強い圧力勾配が形成され、自発電流が多く流れる。



内部輸送障壁を制御するためには、径電場 E_r の制御が有効、そのためには、、

$$E_r = (Z_i e n_i)^{-1} \nabla p_i + v_{\phi i} B_{\theta} - v_{\theta i} B_{\phi}$$

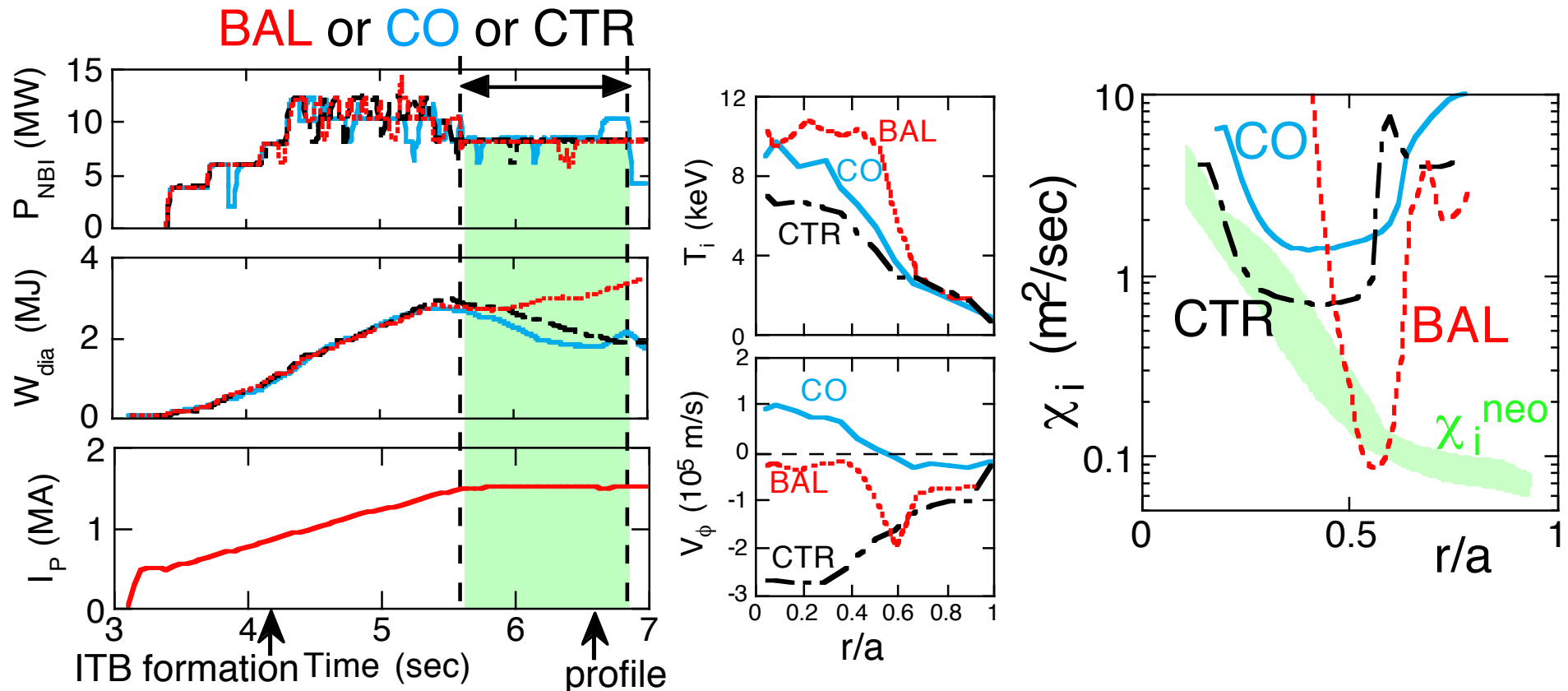
内部輸送障壁 (ITB) の運動量入力に対する応答

JT-60の接線NB (プラズマ電流方向入射 (CO)x2、逆方向入射 (CTR) x2) の組合せを変えて、運動量入力に対する内部輸送障壁の応答特性を調べた。

BAL入射: 強い内部輸送障壁を維持
 CO入射: 内部輸送障壁の劣化
 CTR入射: 内部輸送障壁の劣化



アクチュエーター(接線NB)に対する制御対象(ITB)の応答特性

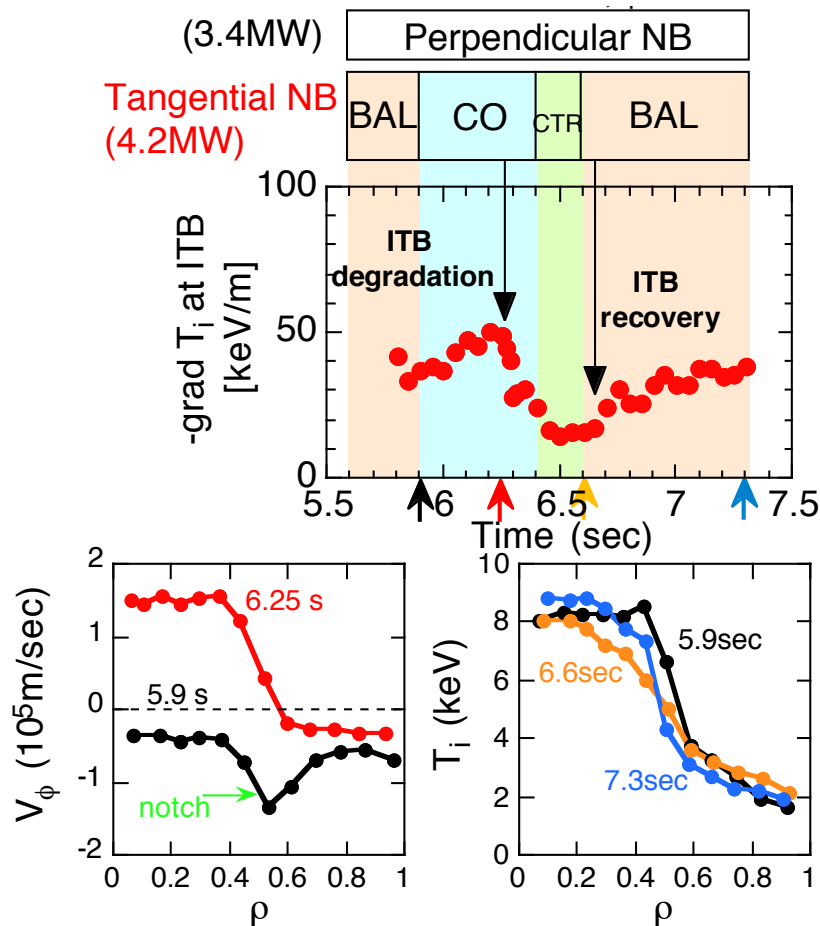


内部輸送障壁(ITB)の制御

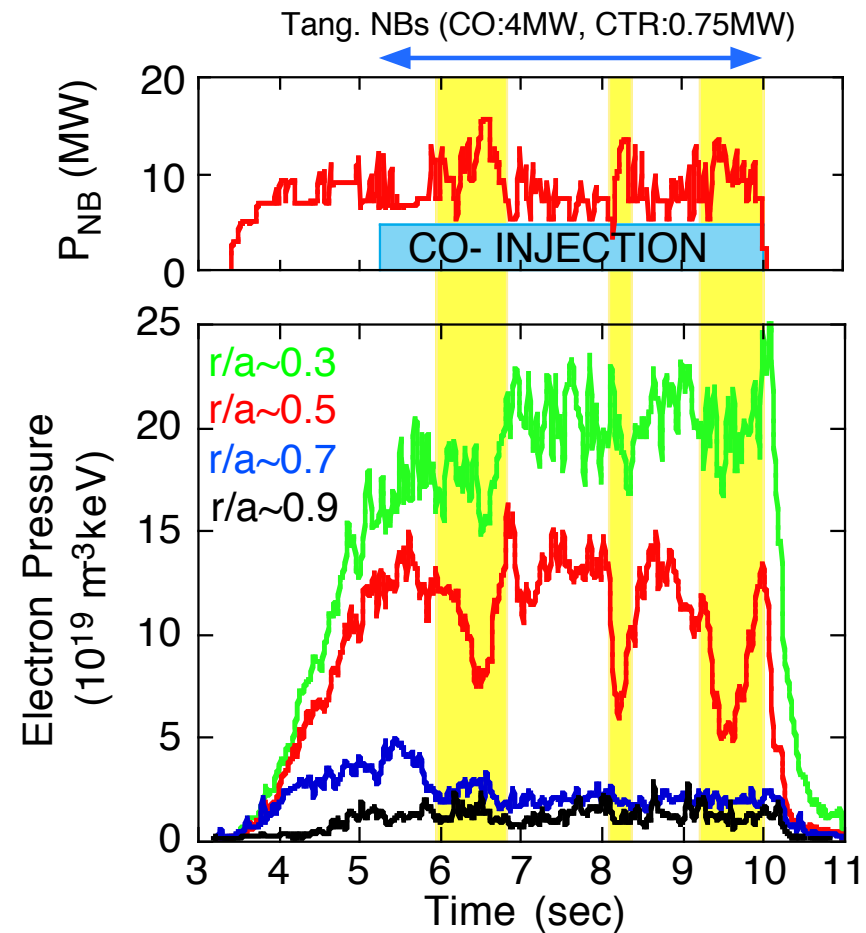
応答特性に基づいて、放電中にアクチュエーター(接線NB)でITBを制御できるか？

$$E_r = (Z_i e n_i)^{-1} \nabla p_i + v_{\phi i} B_{\theta} - v_{\theta i} B_{\phi}$$

運動量入力によるITBの制御



運動量入力と加熱パワーによるITB制御



ITB制御によって高 f_{BS} プラズマの長時間維持を実証

長時間維持の課題

- q_{min} 値は、定常状態に向かって時間的に低下
- q_{min} 値が、整数になる時刻で不安定性が発生
- 維持時間を制限
- 圧力勾配を低減すれば、不安定性を回避可能

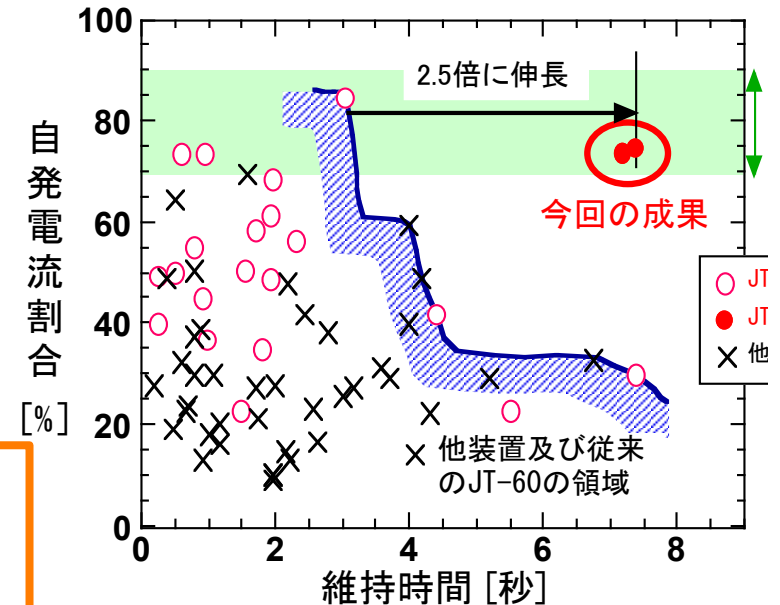
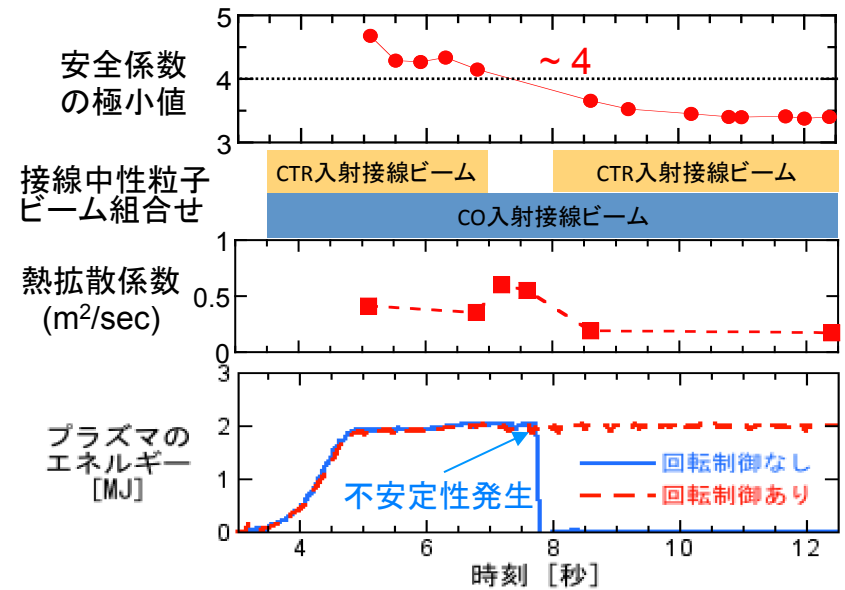
工夫

- q_{min} 値が整数になるタイミングでITBを弱めて、不安定性を回避



- ◇ 原型炉で想定されるブートストラップ電流(自発電流)割合(~75%)を世界最長の7.4秒間(電流拡散時間 τ_R の約3倍)維持。
- ◇ 圧力分布と電流分布がほぼ一定に落ち着くこと明らかにした。

この制御手法を、「使える技術」に発展させるためには、 q_{min} が整数になるタイミングを実時間で認識する必要がある。



MSE計測を用いた q分布制御の開発

MSE計測

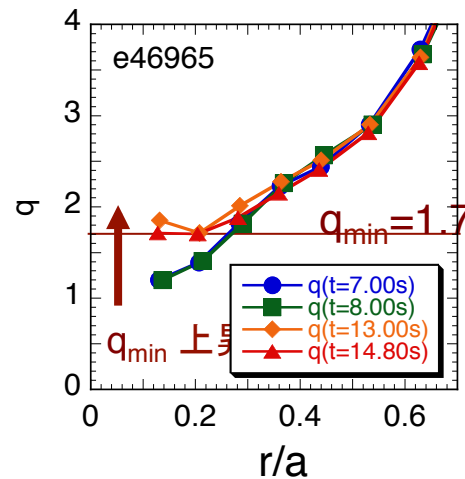
NBIにより入射された重水素原子のスペクトル線 D_α が、ローレンツ電場 $E_L = v \times B$ により分離・偏光（モーショナルシュタルク効果；Motional Stark Effect (MSE)）。局所的な磁場ピッチ角（ q ）の計測が可能。

→実時間化

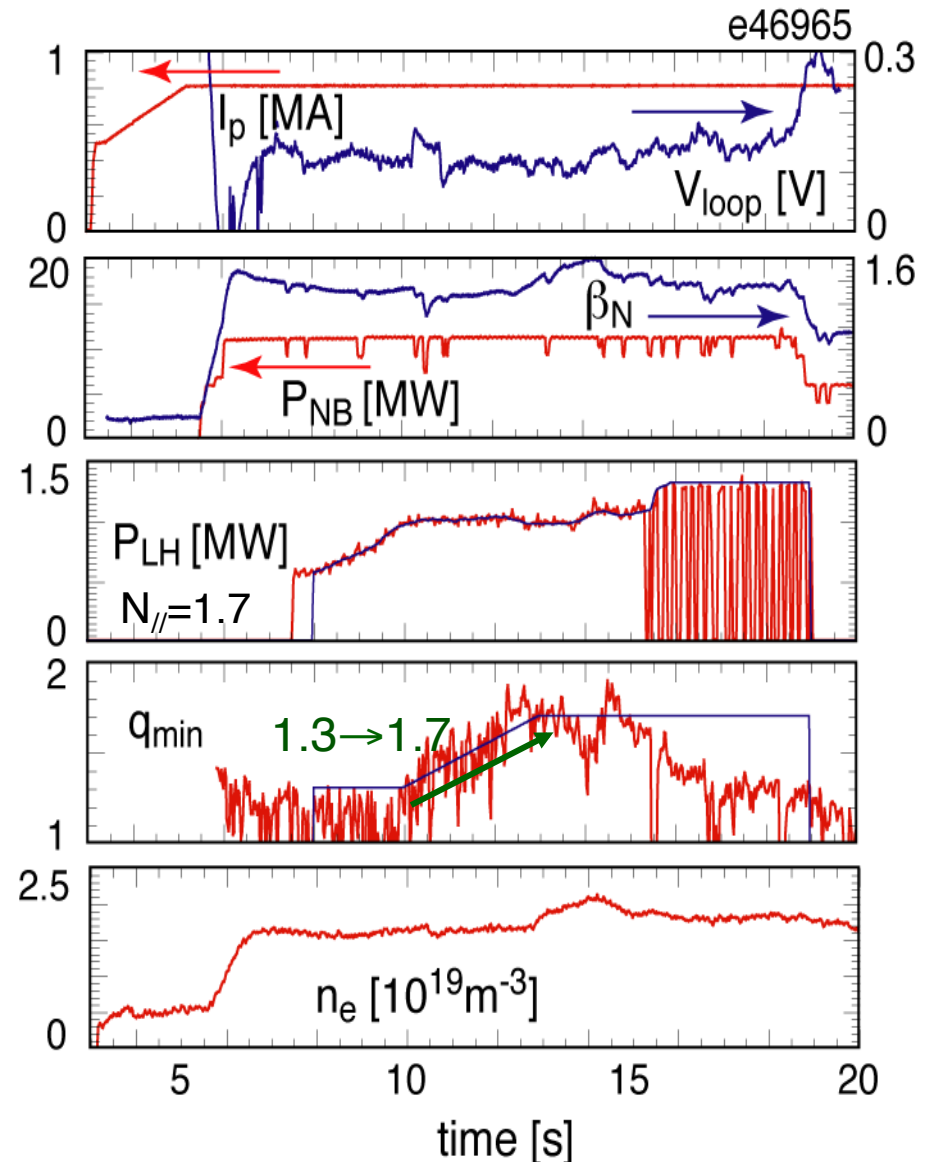
低域混成波(LH)による電流駆動

アンテナモジュール間のLH波位相差を制御することで、電流駆動位置の制御が可能

→実時間化

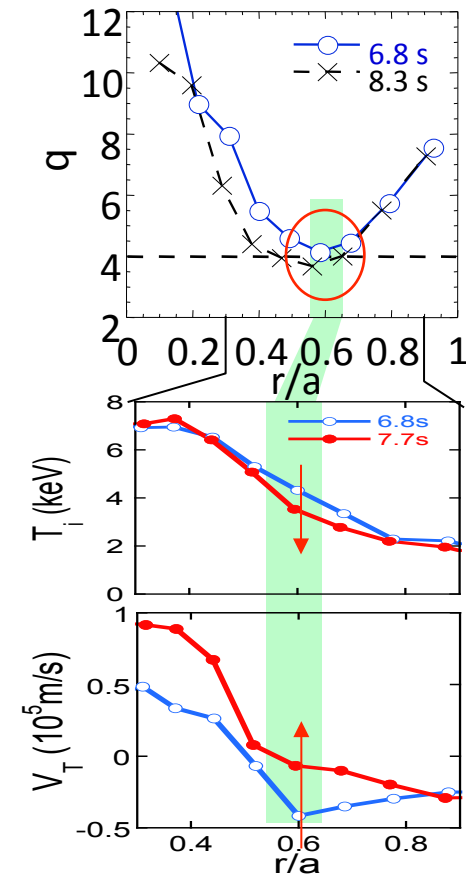
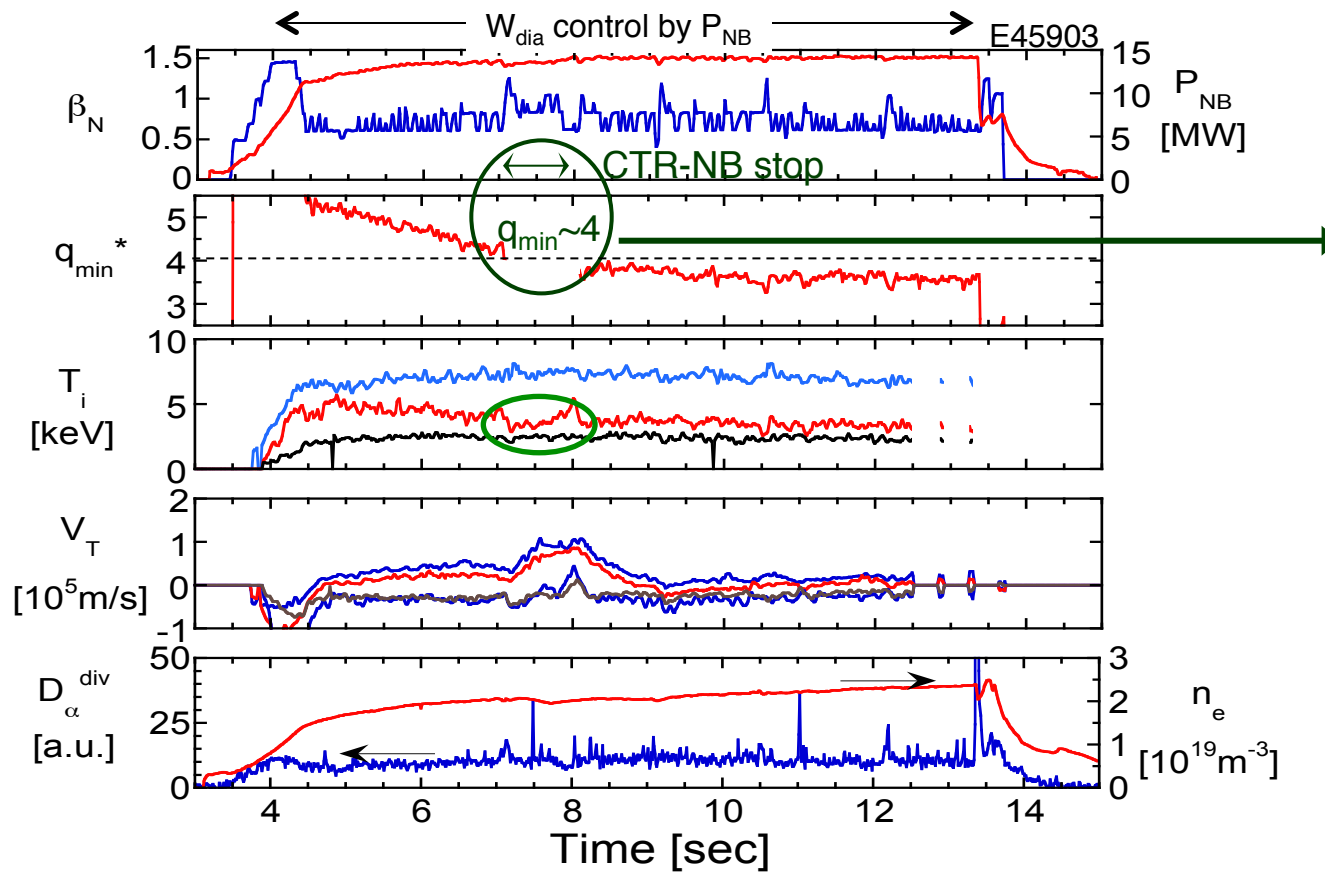


q_{min} が整数になるタイミングを実時間で認識することが可能



実時間MSE計測による内部輸送障壁制御の自動化

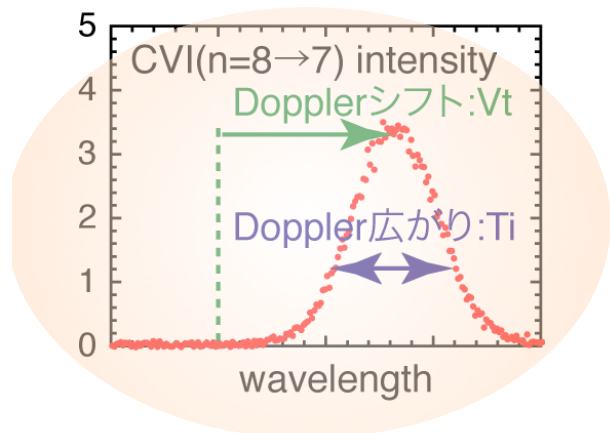
- q_{min} が整数になるタイミングを自動認識し、トルク入力の自動制御によって、不安定性を回避し、高自発電流割合プラズマを長時間維持することに成功
- しかし、圧力分布がピーキングしたため、 q_{min} 整数でないタイミングで不安定性が発生



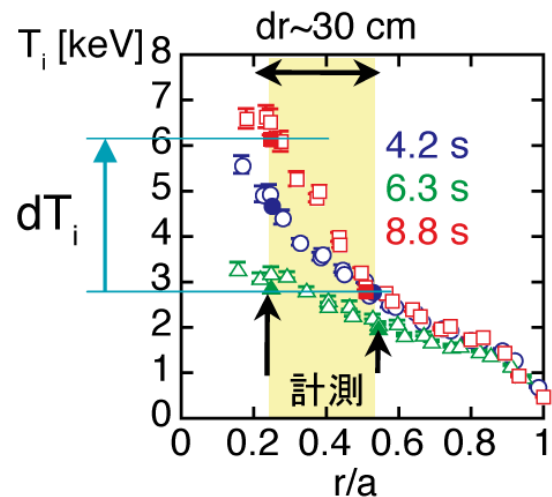
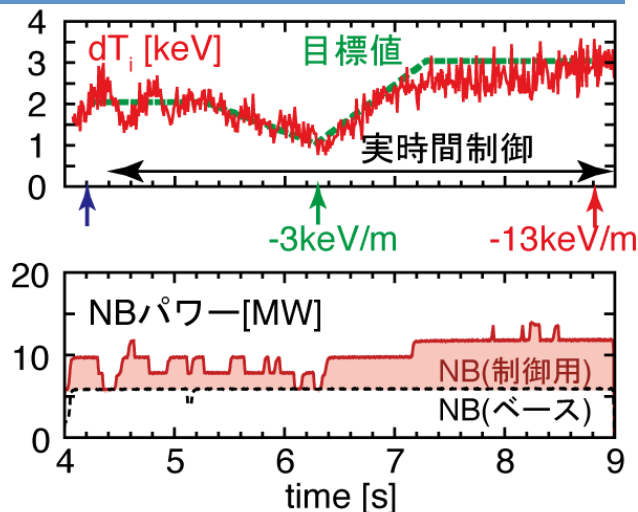
圧力分布の実時間制御や回転制御手法の開発が必要

イオン温度勾配とトロイダル回転の実時間制御

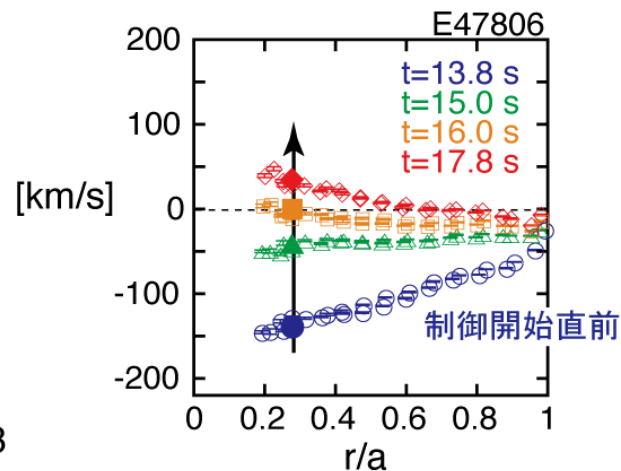
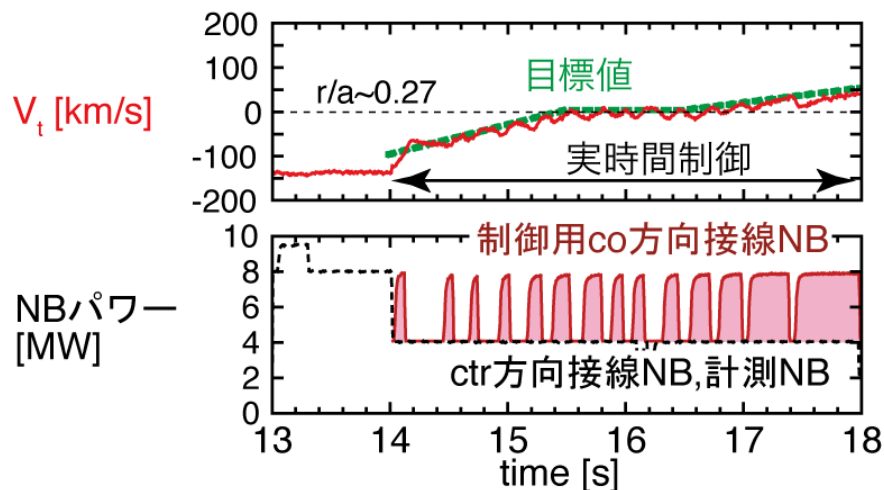
- 荷電交換再結合分光 (CXRS)計測の高速化と実時間化



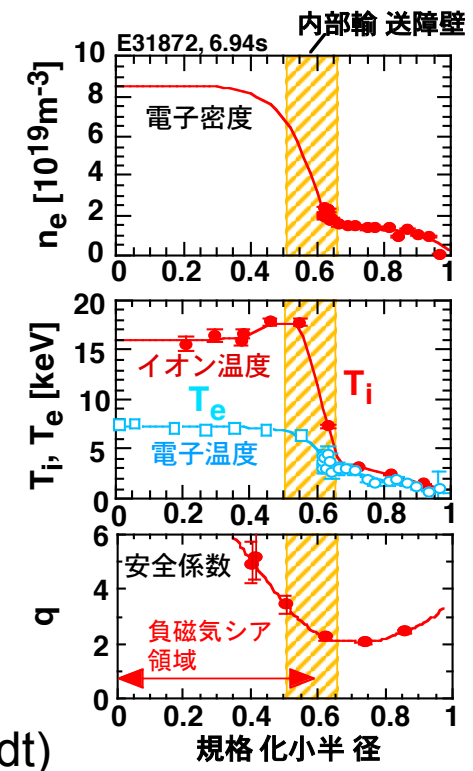
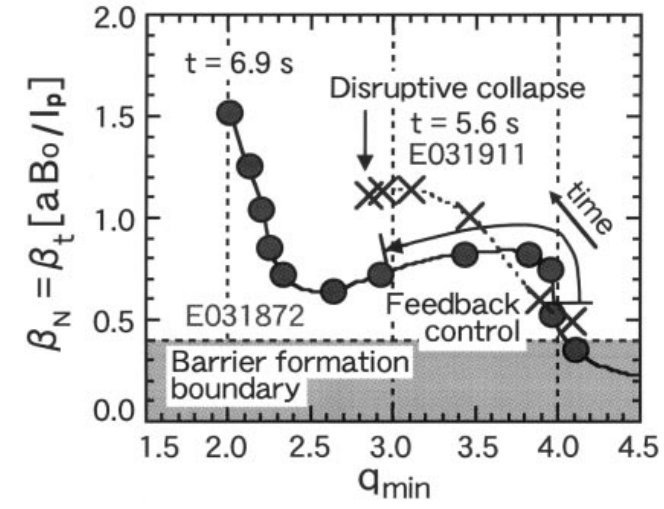
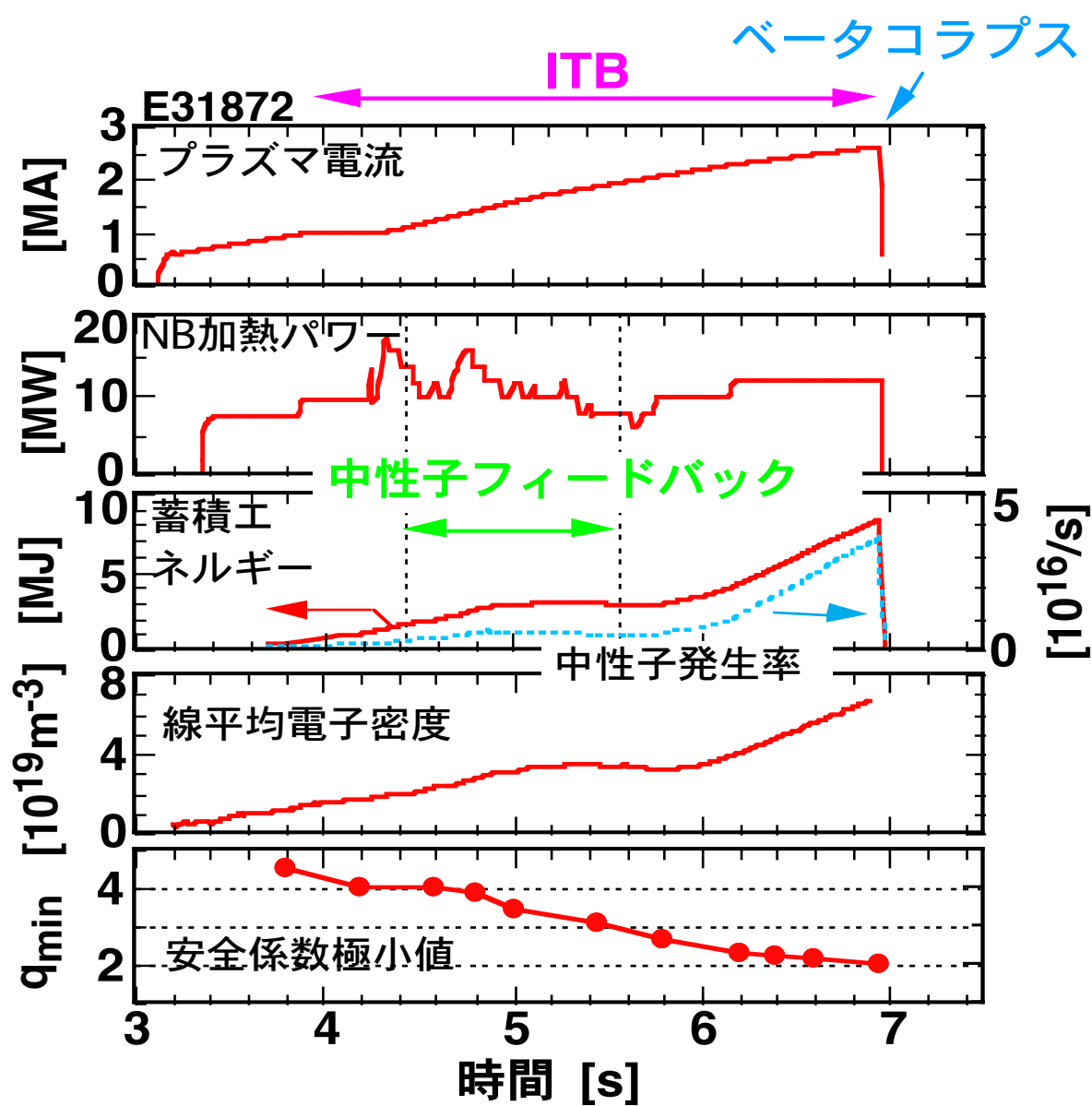
イオン温度勾配の実時間制御



イオン温度勾配の実時間制御



中性子発生率の制御を用いて $Q_{DT}=1.25$ の達成



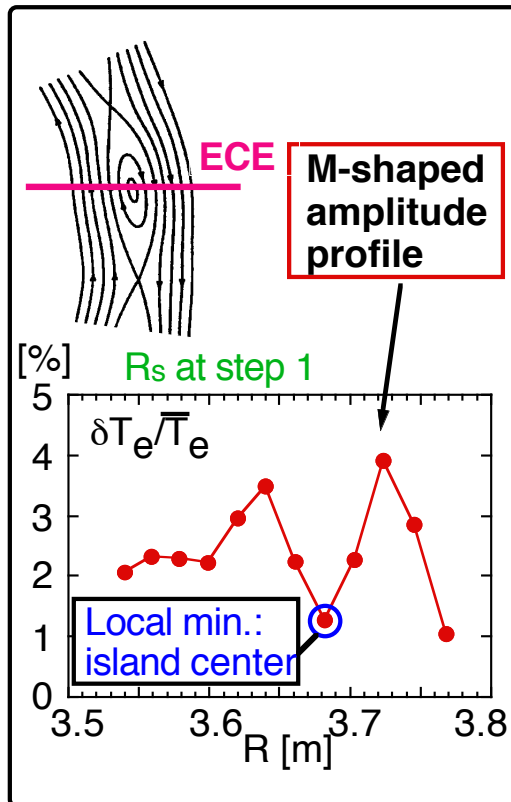
$$Q_{DT}^{eq} = P_{fusion}^{eq} / (P_{input} - dW/dt)$$

新古典テアリングモードの安定化制御

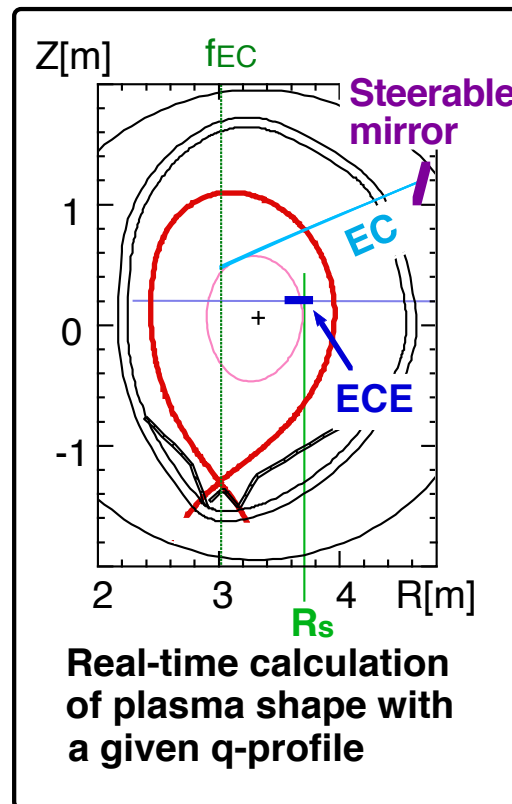
JT-60において、新古典テアリングモード(NTM)の 実時間安定化技術を確立

- 不安定性発生位置を実時間で正確に同定
- 電子サイクロトロン波による局所電流駆動位置を可動ミラーで自動追尾

ECE計測による
磁気島中心位置の同定

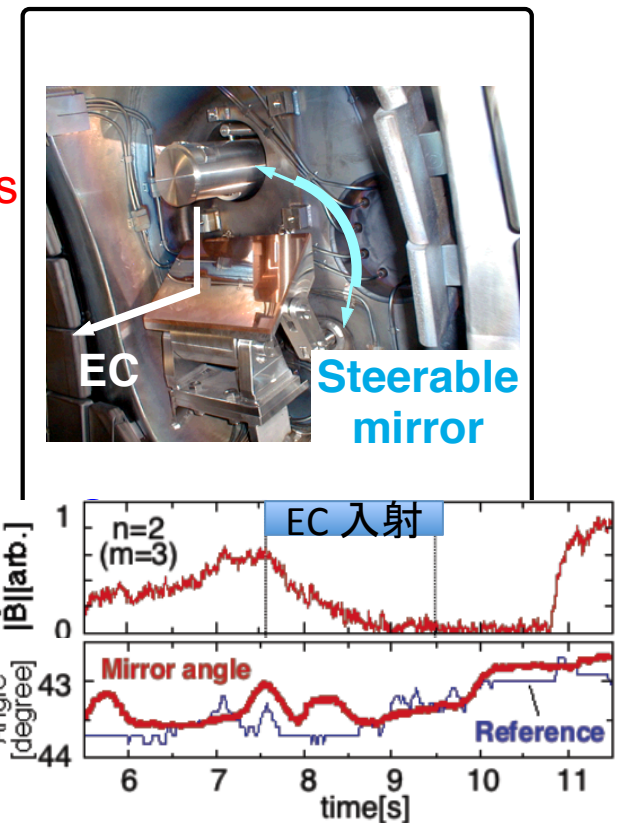


プラズマ形状計算から
EC入射角度を決定



10ms
周期

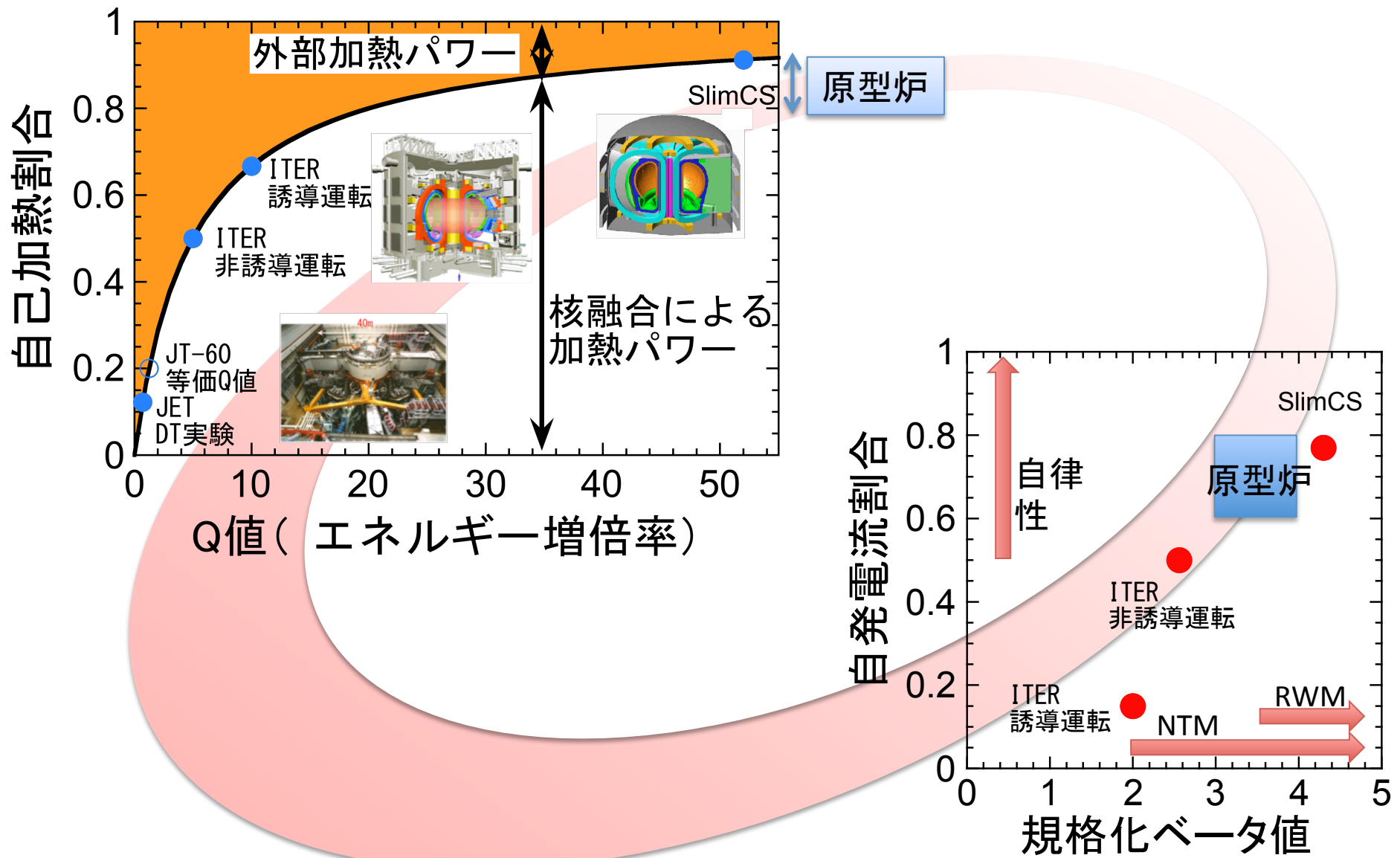
可動ミラーを用いて
磁気島中心を自動追尾



原型炉に向けたプラズマ制御研究

- ✓ 核燃焼プラズマの特徴
- ✓ 制御ロジック構築に向けて必要なこと

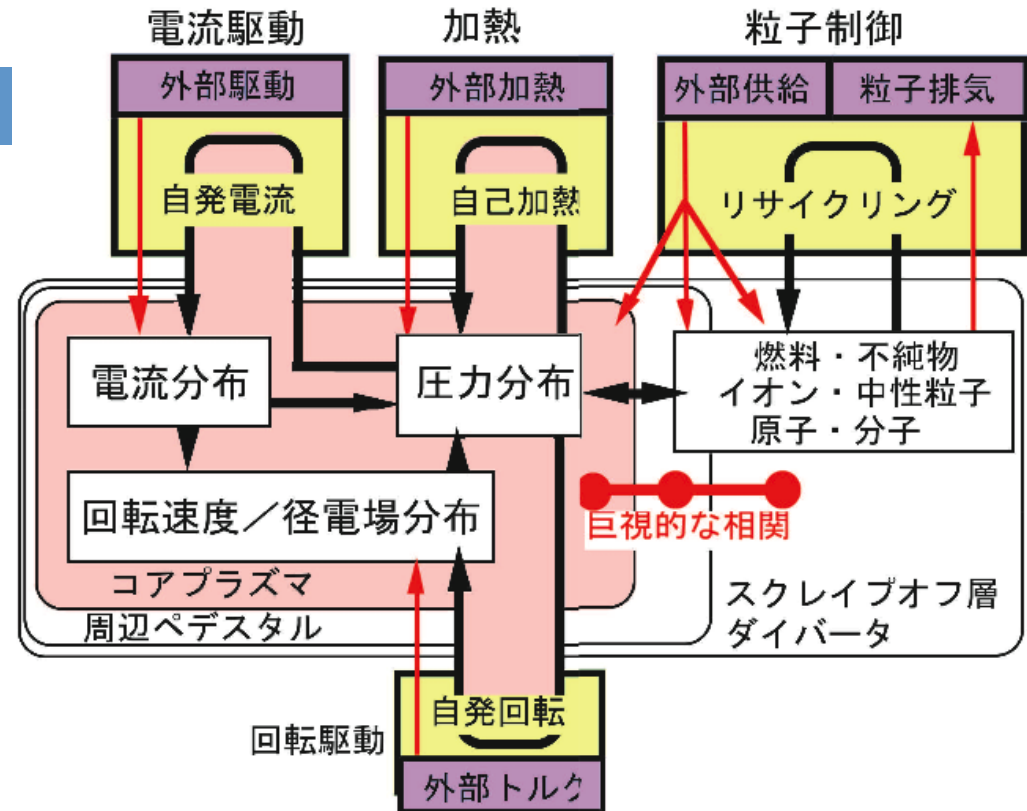
原型炉における燃焼プラズマ制御の展望



燃焼プラズマの自律性

プラズマ性能をプラズマ自身が決める？

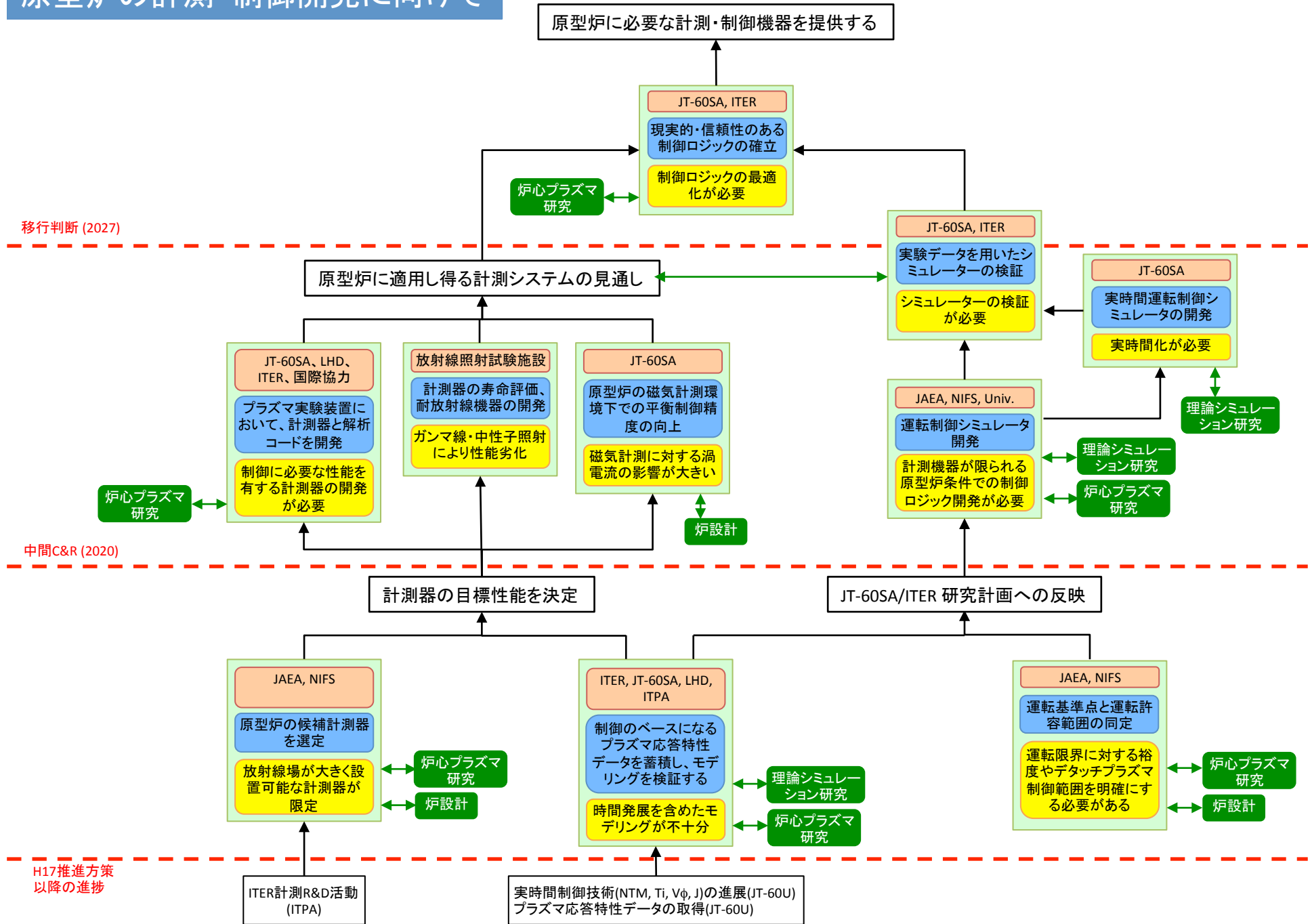
- コアプラズマの輸送特性やMHD不安定性を特徴付ける物理量が**分布として強い相関**
 - ✓ 電流 & 圧力 & 回転
- 周辺ペデスタルも同様
- SOL&ダイバータ、周辺ペデスタル、コアプラズマが、**空間領域で強い相関**
- 圧力 & 電流 & 回転の各分布のソース項のほとんどがプラズマ内部で発生、**外部から制御できる割合は小さい**
 - ✓ 自己加熱、自発電流、自発回転



燃焼プラズマは、自律的に一定の状態に留まるか？

- ✓ 外部入力による制御が必要
- ✓ 自律プラズマの何を制御すると効果的か

原型炉の計測・制御開発に向けて



計測機器・アクチュエータへの制約

原型炉基本概念：合同コアチーム報告（平成26年7月）

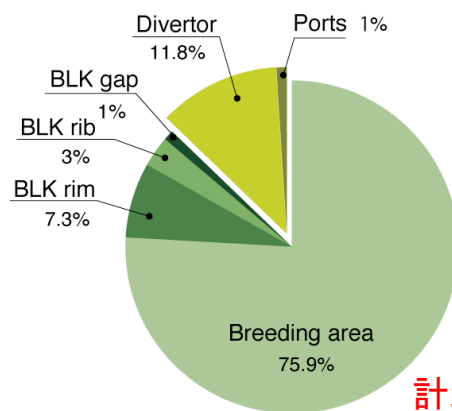
- 数十万kWを超える定常かつ安定な電気出力
- 実用に供しうる稼働率
- 燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖

燃料であるトリチウムはプラズマを取り囲むブランケットで生産

- ブランケットの占有体積を最大限にしたい。
- 計測器、アクチュエータを最低限にした制御系が必要
- ❖ 強い放射線場による設置可能な機器への制約



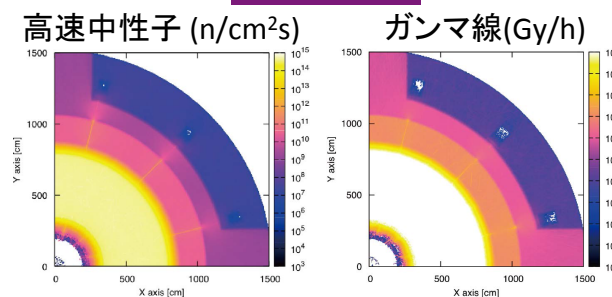
炉壁の占有割合



炉壁の面積：~1000m²

計装機器への割当：~10m²

放射線場



例) 光ファイバーの寿命

BLK背面	高温遮蔽体背面	低温遮蔽体背面 (真空容器前面)
0.00日	0.6日	4日

原型炉に不可欠な制御は？

原型炉に不可欠な制御は？

原型炉基本概念：合同コアチーム報告（平成26年7月）

- 数十万kWを超える定常かつ安定な電気出力
- 実用に供しうる稼働率
- 燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖

原型炉に不可欠な制御は？

装置の健全性確保

ディスラプションの
予測・回避・緩和

ELMの緩和

高放射損失

ダイバータデタッチ
メント

定常核融合出力 制御技術

高ベータ・高密度

高自発電流割合

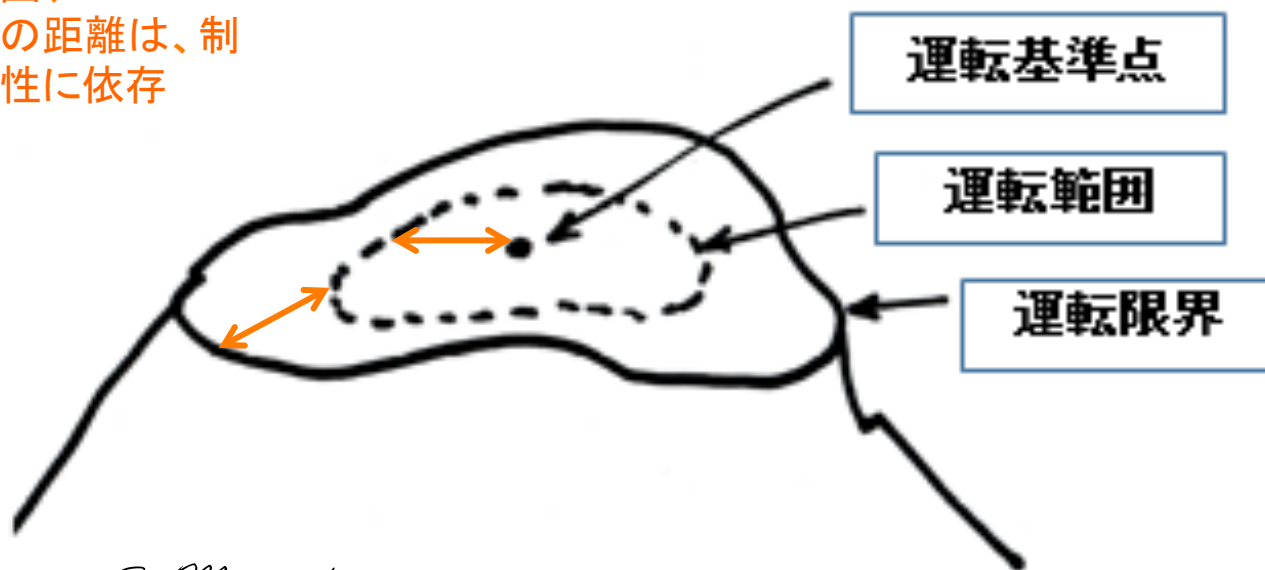
何をどうやって制御するか？

定常運転の制御概念

核融合出力を一定に制御

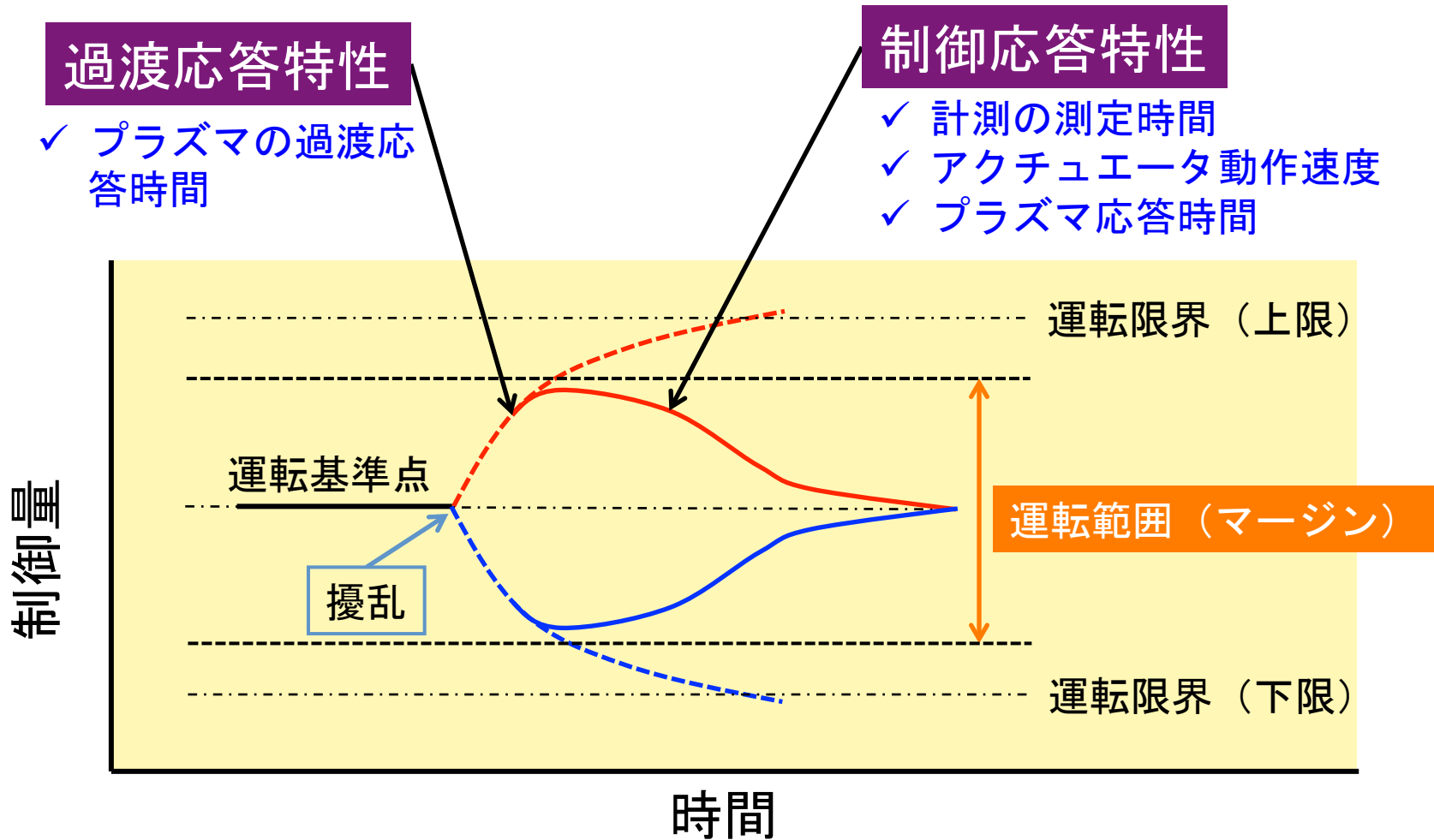
- ✓ 運転基準点
- ✓ 運転範囲: 安定した運転が可能な範囲
- ✓ 運転限界: 不安定性で規定される境界、アクチュエータの動作限界、など

運転基準点と運転範囲、
運転範囲と運転限界の距離は、制
御に影響する応答特性に依存



S. Matsuda

プラズマの応答特性の研究が重要

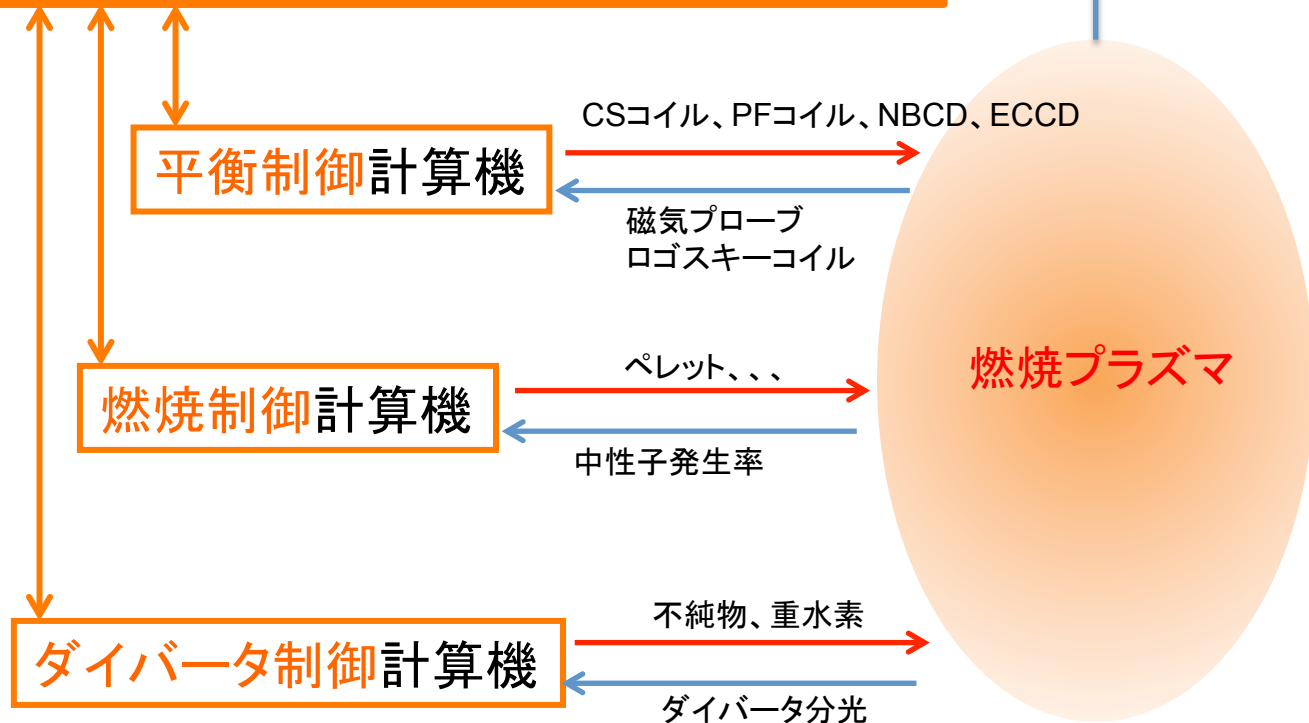


運転制御シミュレーター

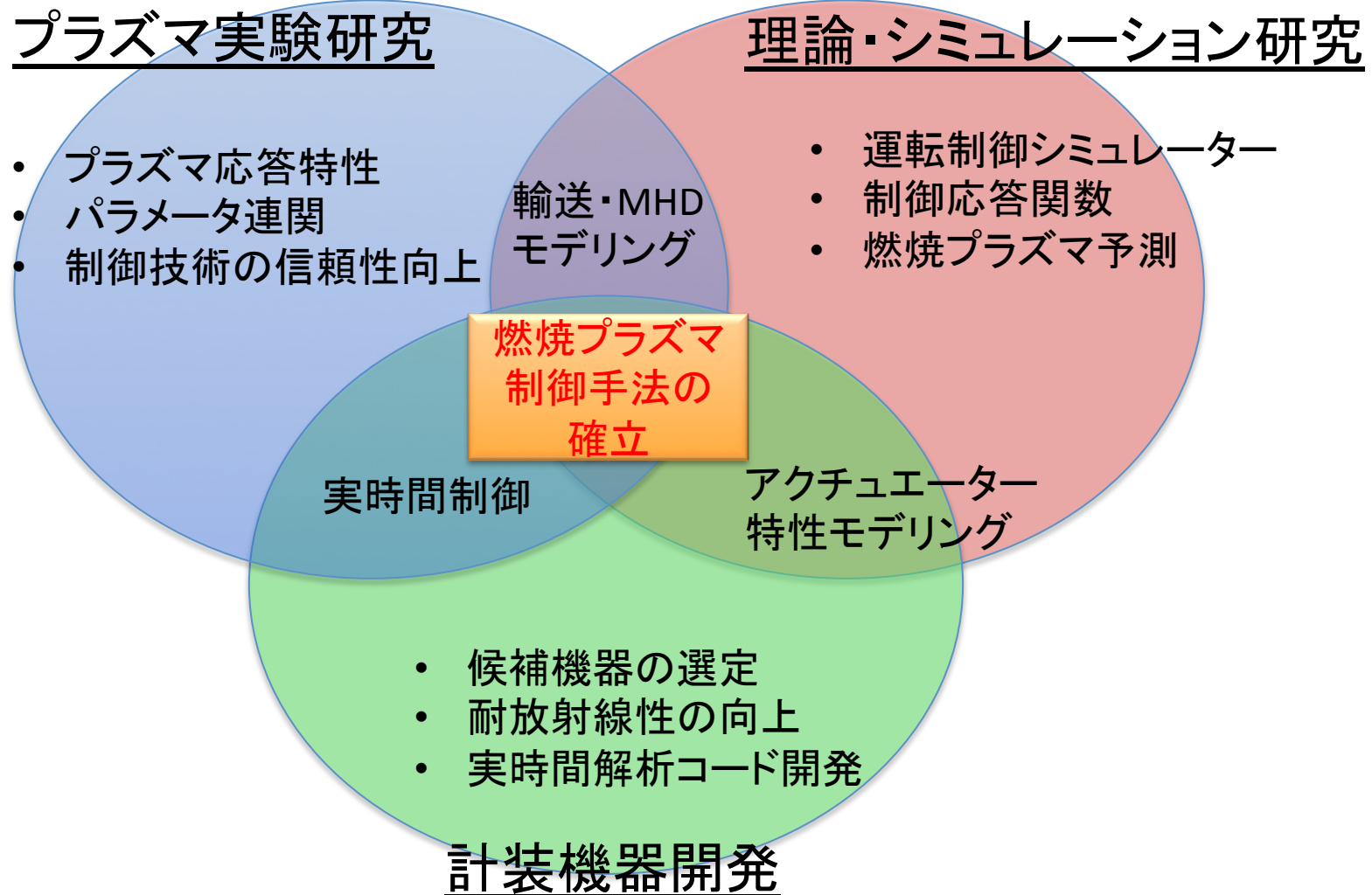
運転制御シミュレーター

- 分離した3つの制御系を統合（相互関連する自律系の制御）
- 他の分布計測データを用いてプラズマの状態を詳細に認識（計測できない物理量は推測）
- 運転限界（MHD限界、密度限界、デタッチ）に対する距離を監視
- **不安定性制御**（出力抑制、ソフトランディング、緊急停止、、、）

トムソン
レーザー偏光計
ECE
等、補完計測器



実験、理論、計装機器開発の連携が重要



おわりに

- 核融合研究開発における炉心プラズマ研究の究極の目的は、燃焼プラズマ制御手法の確立であり、これまでの成果に加えて、JT-60SAやITERにおいて、原型炉環境下（高放射線場、限られた計測器・アクチュエーター）で現実的・信頼性のある制御手法を構築することが肝要である。
- 特に、高い自律性を有する燃焼プラズマの過渡応答特性と制御応答特性を、実験と理論・シミュレーションの両側面から明らかにし、実時間の予測を含めた運転制御シミュレーターの構築が重要になる。
- ❖ 核融合研究開発の大きなマイルストーンである原型炉に向けた本格的な議論が開始されている。

原型炉のスケジュール

- 建設（2030年代前半）
- 運転（2040年代前半）
- 発電実証（2040年代後半）



原型炉の主演は、若手科学者のみなさんです！