

## 核融合炉へ向けた高性能定常放電とPWI研究の新展開

## New development on high performance steady-state discharge and plasma-wall interaction research toward fusion reactor

笠原寛史<sup>1</sup>、長崎百伸<sup>2</sup>、吉村泰夫<sup>1</sup>、上田良夫<sup>3</sup>、時谷政行<sup>1</sup>、芦川直子<sup>1</sup>、関 哲夫<sup>1</sup>、  
 斉藤健二<sup>1</sup>、關良輔<sup>1</sup>、熊沢隆平<sup>1</sup>、神尾修治<sup>1</sup>、久保 伸<sup>1</sup>、下妻 隆<sup>1</sup>、伊神弘恵<sup>1</sup>、高橋裕<sup>1</sup>、  
 庄司 主<sup>1</sup>、若月琢馬<sup>4</sup>、山田一博<sup>1</sup>、土屋隼人<sup>1</sup>、田中宏彦<sup>1</sup>、吉村信次<sup>1</sup>、徳沢季彦<sup>1</sup>、  
 田村直樹<sup>1</sup>、武藤 敬<sup>1</sup>、LHD実験グループ<sup>1</sup>

KASAHARA Hiroshi<sup>1</sup>, NAGASAKI Kazunobu<sup>2</sup>, YOSHIMURA Yasuo<sup>1</sup>, UEDA Yoshio<sup>3</sup>,  
 TOKITANI Masayuki<sup>1</sup>, ASHIKAWA Naoko<sup>1</sup>, SEKI Tetsuo<sup>1</sup>, SAITO Kenji<sup>1</sup>, SEKI Ryosuke<sup>1</sup>,  
 KUMAZAWA Ryuhei<sup>1</sup>, KAMIO Shuji<sup>1</sup>, KUBO Shin<sup>1</sup>, SHIMOZUMA Takashi<sup>1</sup>, IGAMI Hiroe<sup>1</sup>,  
 TAKAHASHI Hiromi<sup>1</sup>, SHOJI Mamoru<sup>1</sup>, WAKATSUKI Takuma<sup>4</sup>, YAMADA Ichihiro<sup>1</sup>,  
 TSUCHIYA Hayato<sup>1</sup>, TANAKA Hirohiko<sup>1</sup>, YOSHIMURA Shinji<sup>1</sup>, TOKUZAWA Tokihiko<sup>1</sup>,  
 TAMURA Naoki<sup>1</sup>, MUTOH Takashi<sup>1</sup>, LHD Experiment group<sup>1</sup>

<sup>1</sup>核融合研, <sup>2</sup>京大, <sup>3</sup>阪大, <sup>4</sup>東大

<sup>1</sup>NIFS, <sup>2</sup>Kyoto Univ., <sup>3</sup>Osaka Univ., <sup>4</sup>Tokyo Univ.

核融合炉実現に向けた材料損傷プロセス、熱・粒子制御、定常プラズマ維持研究を進展させるためには、高性能定常放電の実現が重要となる。核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置(LHD)では外部電流駆動の必要が無い閉じ込め方式の長所を生かし、非常に安定したプラズマ維持を行うことができ、1MWの大電力高周波加熱(少数イオン加熱:ICH+電子サイクロトロン加熱:ECH)を行うことで、磁気軸での磁場強度( $B_0$ ) 2.71T、線平均電子密度( $n_{e0}$ )  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度( $T_{e0}$ ) 2.5 keV (~イオン温度)となるプラズマを約19分間維持することに成功した(図1)。

高性能定常放電を達成するには、ICHおよびECHの加熱機器の増強だけでなく、波動加熱物

理研究を基にしたそれぞれの加熱の最適化が貢献している。ICH加熱では、波数制御アンテナ(HAS)を本格的に定常加熱に利用し、プラズマ放電中にRFシースを低減させ、局所熱負荷および不純物混入の少ない高品質な定常加熱を行うことに成功した。

粒子供給・制御に関しては、放電に必要な粒子供給率は放電開始直後では $3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であった。プラズマ維持に必要な粒子供給率は放電開始から2sの間に大幅に低下し、その後緩やかにプラズマ維持に必要な粒子供給率が低下した。800s付近では粒子閉じ込め時間に比べ長い時間粒子供給せずとも壁またはダイバータからの粒子供給によりプラズマ維持を可能とす

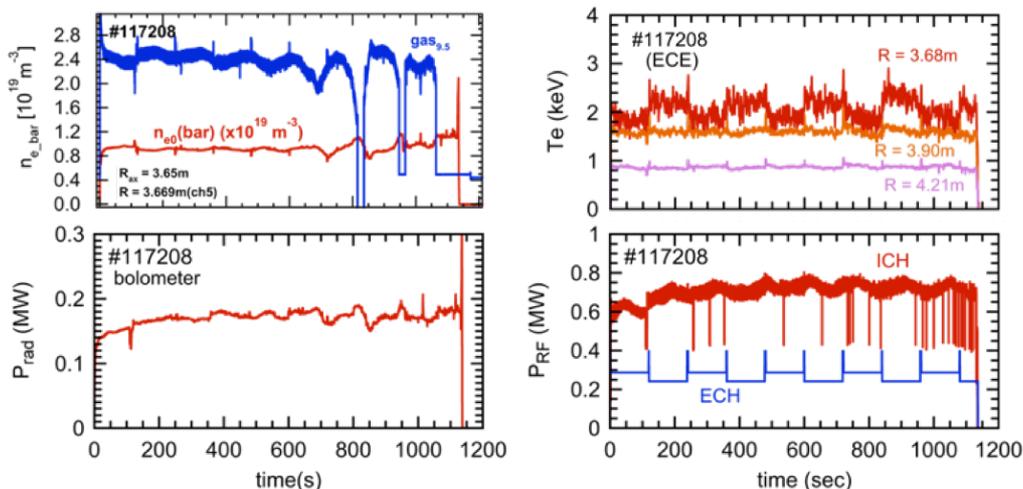


図1. 高性能定常放電の放電波形(19分)

るレベルに到達した(図2)。この時、排気装置は運転し続けているため、外部粒子供給を停止することにより、緩やかな密度減少が観測されている。以前の54分間維持( $n_{e0} \sim 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ )した放電から予想される $n_{e0} \sim 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の放電における粒子供給率は300s程度で既に到達し、その後も粒子供給量の低下が進む事を考えると、プラズマ・壁相互作用がグローバル粒子バランスに強く影響される領域に達していることが予想される。

プラズマ・壁相互作用(PWI)に伴う第一壁(ステンレス鋼)表面に対するプラズマ粒子の吸蔵/放出特性が、プラズマの加熱方式(ICH or ECH)でどのように異なるのかを調べる目的で、ICH+ECH、ECH加熱による定常放電においてステンレス鋼試料への曝露試験を実施した。LHDのような室温壁装置では、第一壁材料からの室温近傍( $\sim 400\text{K}$ )での粒子の吸蔵/放出挙動が粒子バランスに大きな影響を与える。今回の結果からHeバブルとMixed-material堆積層の形成がその挙動を左右する可能性が示され、さらにICHとECHでは第一壁へ与える表面変質の特徴が異なることも明らかになってきた。

不純物の挙動を追跡するために設置された多数のCCDカメラの計測結果から、定常放電中にダイバータ付近で複雑な軌道を描く多数の発光が観測されている。異なるトロイダルセクションに設置されている放射光と炭素・鉄のスパイク信号のタイミングを比較すると、炭素や鉄の発光と放射光のスパイクが必ずしもトロイダル方向で同期しているわけではないため、このような不純物の発光は非閉じ込め領域で生じており、コアプラズマへの進入が弱いことが分かった。放射損失の入射パワー依存性は弱く、密度・不純物の依存性についても研究を進めており、放電時間拡大によって懸念される不純物蓄積も現在のところ見受けられていない。

このようにLHDにおいて高性能定常放電を実現させる事で、PWI研究が定常放電で研究可能となり、短い放電との違いを比較出来るようになってきた。本年度の目標は $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 2keV程度のプラズマを1時間維持し、PWI効果の時間発展研究を進める計画をしている(図3)。

本講演では、高性能定常放電を実現するのに必要な加熱機器の整備および進展を含め、定常放電時の粒子供給の変遷に強く影響を及ぼす第一壁の表面変質による材料の水素吸蔵/放出特性、不純物混入に関連するプラズマ周辺部での粒子挙動および熱バランス等について、短い放

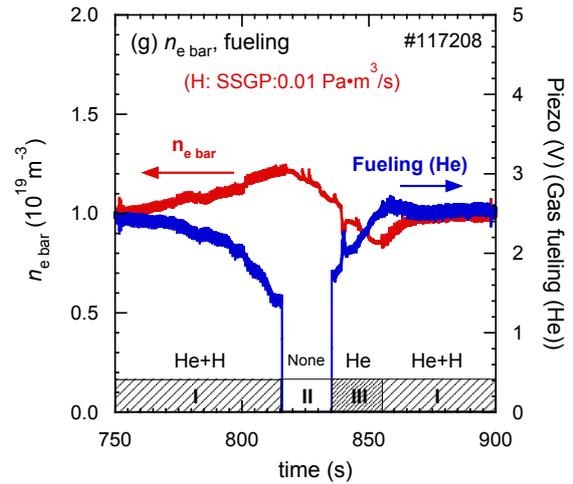


図 2. 壁排気効果の低下

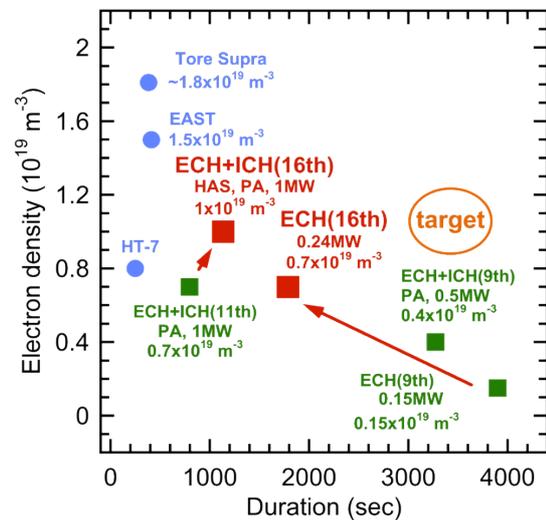


図 3. 高性能定常放電のターゲット

電では得られなかった定常放電中に変化し続ける表面変質によるPWI効果を含めた高性能定常放電の実験結果に関して報告を行う。