



研究最前線

Wendelstein 7-X ファーストプラズマ

First Plasma from Wendelstein 7-X

鈴木康浩

SUZUKI Yasuhiro

自然科学研究機構・核融合科学研究所，総合研究大学院大学

(原稿受付：2016年12月13日)

Keywords:

Wendelstein 7-X, Helias, first plasma, limiter, ECH plasma

2015年12月10日にマックスプランク・プラズマ物理研究所（ドイツ）の Wendelstein 7-X (W7-X) 装置が実験を開始した。W7-X 装置は、建設に15年を要した最適化ステラレータ配位の超伝導プラズマ閉じ込め実験装置である。第1期のプラズマ実験は OP1.1 と呼ばれ、前半のヘリウムプラズマ放電と後半の水素プラズマ放電からなっている。W7-X は、定常プラズマ放電の実証をめざした装置であるが、OP1.1 はダイバータ配位のための炉内機器が設置されておらず、リミター配位での実験となった。そのために、加熱パワー、放電時間ともに限られたものとなっているが、興味深い実験結果が得られている。本稿では、ヘリウム放電、および水素放電で得られた結果のいくつかを紹介する。

1. はじめに

Wendelstein 7-X (W7-X) 装置は、ドイツ・グライスヴァールドに建設された超伝導ステラレータ実験装置である。W7-X 装置は、先進ステラレータ (HELIAS: HELIcal Advanced Stellarator) 配位と呼ばれる閉じ込め磁場配位を採

用しており、複雑な3次元形状のプラズマと閉じ込め磁場を作るポロイダルモジュラーコイル群を持つ。図1に、W7-X 装置の鳥瞰図を示す。単純な円形ではない、ポロイダルモジュラーコイル群を見て取ることができる。このような複雑なコイル形状かつ、それらのコイルがすべて超伝導コイルのため、建設には15年の歳月を要した。W7-X は、ステラレータ型核融合炉の実現をめざした実験装置であり、定常プラズマ閉じ込めを実証するために炉内冷却を含めたダイバータ、加熱装置が整備される。W7-X 装置や磁場配位の特性については、すでにいくつかの解説記事 [1-3] があるのでそちらを参考されたい。

しかし、建設期間が長期に及んだため、すべての炉内機器の整備をあきらめ、まずはリミター配位で実験が開始されることとなった。そのためECH加熱の入力パワーおよび放電時間が制限されている。また、計測装置の整備も基本計測を優先し、揺動計測など先進的な計測装置開発は先送りされることとなった。したがって、ファーストプラズマを含む初期実験 (OP1.1) はすべて上記の限られた加熱・計測条件で行われている。OP1.1 実験は、前半と後半に分けて考えたほうが良く、前半はコミッショニングを含むヘリウム放電、後半は水素放電である。ヘリウム放電実験は2015年12月10日に実験を開始し、3ヶ月の予定で OP1.1 がスタートした。特に、2016年2月3日には、アンゲラ・メルケルドイツ政府首相招待のもと、水素放電におけるファーストプラズマの記念式典が行われた。このときは、内外400名の招待者と共に記念式典が行われ、ヨーロッパにおける新しい実験装置の完成と世界最大規模の超伝導実験装置の完成と実験開始が祝われた。OP1.1 では、940の実験提案が行われ、92の装置試験のための実験、446のプラズマ生成実験 (加熱調整やリミター放電の健全性確認) が行われた。にもかかわらず、402の物理実験が行われたことは驚くべきことである。これは、W7-X 装置の建設が成功裏に行われ、大きな問題が発生することなくプラズマ実験が

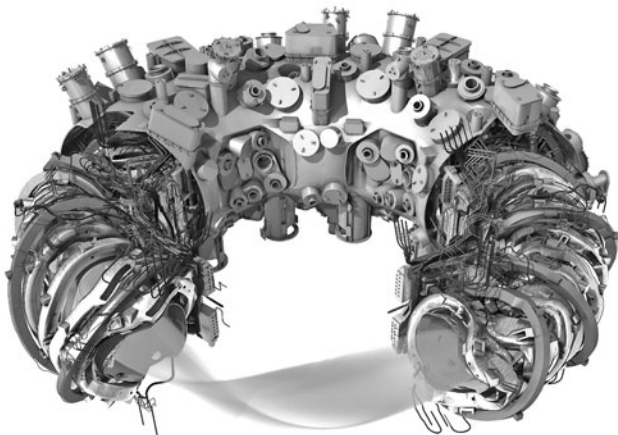


図1 W7-X 装置の鳥瞰図。

立ち上げられたことを証明することである。以下に、OP1.1を前半・後半に分けてハイライトとなる実験結果をいくつか紹介したい[4, 5]。

2. ヘリウム放電実験

前半のヘリウム放電実験の目的は、装置本体、特にカーボンリミターの健全性確認である。そのため、実験初期は加熱入力を2 MW以下、放電時間は1秒以下という制限が課された。カーボンリミターの健全性が確認された後、加熱入力を徐々に増やしながら実験が行われた。実験装置が完成した直後の実験のために壁コンディションが良くなく、初期の放電は50ミリ秒以下で輻射崩壊した。しかし、中心電子温度とイオン温度は1 keVに達し、線平均電子密度は $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ を達成した。OP1.1はグロー電極が準備されていなかったために、壁コンディショニングは短パルスECH放電を行うことによりなされた。壁コンディションが改善されると共に、放電時間は500ミリ秒まで延び、中心温度・密度も向上した。図2に、ヘリウム放電で得られた電子密度分布、および電子・イオン温度分布を示す。この放電は、加熱入力が4 MWのECR加熱プラズマである。電子密度分布、および電子温度分布はトムソン散乱計測により得られている。プラズマ温度分布については、他に電子サイクロトロン放射計測（電子温度）、X線イメージング分光（イオン温度）の結果も用いられている。

3. 水素放電実験

はじめに述べたよう、ヘリウム放電実験の成功により2016年2月3日より水素放電での実験を開始した。図3に、水素放電での典型的な放電波形を示す。上段から、加熱パワー、電子サイクロトロン放射計側信号、線積分電子密度、プラズマ蓄積エネルギー、プラズマ電流を表示している。図から、プラズマ立ち上げ後に加熱パワーを4.3 MWまで上げている。電子サイクロトロン放射計測の信号は、磁気軸付近を計測しているチャンネルの生信号を表示しているために、単位が物理量としての温度になっていないが、電子温度は約10 keVに達した。また、600ミリ秒から水素ガスパフで粒子供給を行うことにより、線積分密度が $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ に達し、プラズマの蓄積エネルギーは400 kJ

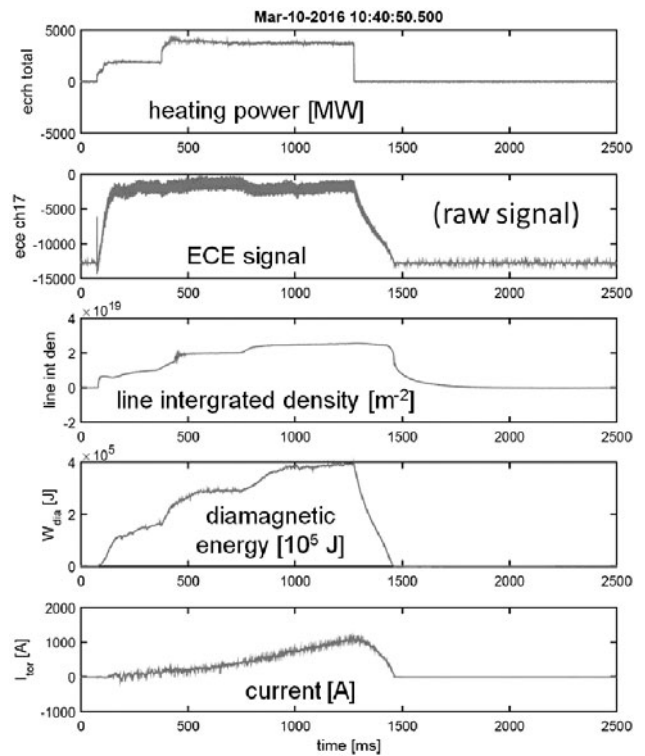


図3 水素放電における典型的な放電波形。上段から、加熱パワー、電子サイクロトロン放射計側信号、線積分電子密度、プラズマ蓄積エネルギー、プラズマ電流を表示している。

を達成した。一方、プラズマ電流は一定の割合で増加し続け、最終的に約1 kAのトロイダル電流が流れた。このとき、輻射損失の割合は約30%であり、パワーバランスから評価したプラズマ閉じ込め時間は100ミリ秒となった。この結果は、国際ステラレータ閉じ込めスケーリングISS04に則しており、他のエネルギー損失を考慮したとしても十分な性能を示したといえる。また、この結果は、ダイバータモジュール設置後の実験についても、よい予測を与える結果といえる。

図4に、水素放電におけるプラズマ温度分布の1例を示す。電子温度はトムソン散乱計測、電子サイクロトロン放射計側により、イオン温度分布はX線イメージング分光計測によるものである。中心電子温度は8 keV、中心イオン

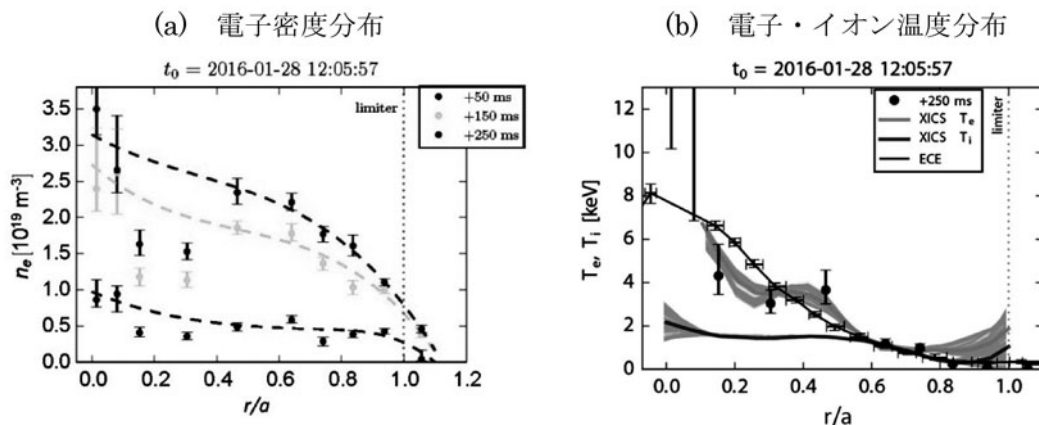


図2 ヘリウム放電における(a)電子密度分布、および(b)電子・イオン温度分布。

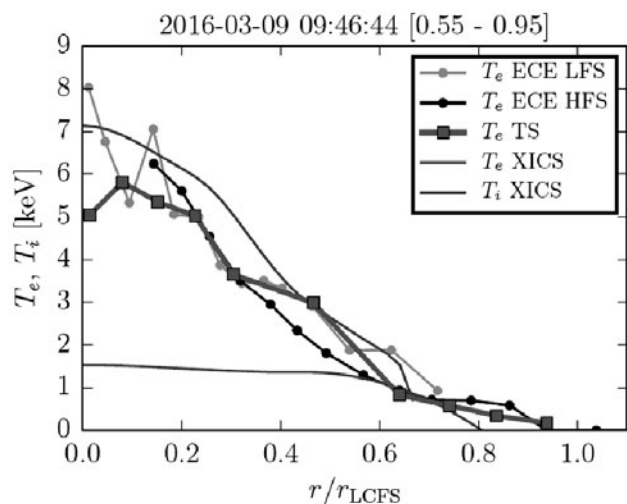


図4 水素放電におけるプラズマ温度分布。電子温度はトムソン散乱計測、電子サイクロトロン放射計測により、イオン温度分布はX線イメージング分光計測によるもの。

温度は1.5 keVに達している。このとき、線平均電子密度は $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であり、磁気計測から見積もられた中心ベータ値は2%となった。

4. おわりに

15年の歳月をかけて建設された Wendelstein 7-X (W7-X) 装置が、2015年12月より実験を開始した。最初の実験キャンペーンである OP1.1 は、冷却無しのリミター放電であるために加熱入力、放電時間それぞれに制限があるものの、予測を超える高温プラズマの生成に成功した。電子加熱

のみであるにもかかわらず、1 keV を超えるイオン温度が観測されており、ステラレータ最適化による良好な閉じ込め特性が実験的に確認されたといえるだろう。今後、得られた実験結果の解析が進むことが期待される。本稿では紙面の都合上、ヘリウム、および水素放電におけるプラズマパラメータの紹介に注力したが、OP1.1 では真空磁気面計測、誤差磁場計測、リミター上の熱負荷計測など様々な成果が得られた。そのような成果も、今後、発表されてゆくと思われる。

OP1.1 終了後、装置は長期メンテナンスに入り、2017年開始の次期実験キャンペーンである OP1.2 の準備が進められているところである。OP1.2 では、強制冷却ではないテストダイバータユニット (Test Divertor Unit: TDU) を設置し、ダイバータ配位による実験を行う予定である。定常核融合炉をめざした先進的な取り組みの一つとして、注目していく必要がある。

本稿を執筆するにあたり、協力していただいた A. Dinklage 博士, R. Wolf 博士, T. Klinger 博士に感謝いたします。

参考文献

- [1] G. Griger *et al.*, Fusion Technol. **21**, 1767 (1992).
- [2] Jürgen Nührenberg, Plasma Phys. Control. Fusion **52**, 124003 (2010).
- [3] H.S. Bosch *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 126001 (2013).
- [4] Wendelstein 7-X Newsletter No. 12 / April 2016
- [5] T. Klinger *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 014018 (2017).