

プラズマ-壁境界領域制御による核融合炉コア性能改善の可能性
**Plasma-Wall Boundary Control towards the Improved Core Performance
 in Magnetic and Inertial Confinement Fusion Reactors**

シンポジウムの趣旨説明

廣岡慶彦
 Yoshi Hirooka

核融合科学研究所
 National Institute for Fusion Science

背景

脱原発後の代替エネルギー開発が叫ばれる中、開始から約 50 年を経た核融合エネルギー研究開発に関しては、ようやくフランスで人類初のトカマク型国際熱核融合実験炉：ITER[1]の建設が始まり、一方、アメリカではレーザー型核融合点火実験施設：NIF[2]の点火試験が目前に迫って来た。

国内核融合研究コミュニティの次のステップは、2050 年台建設を目指した原型炉・商用炉の設計である。現在、トカマク型炉：Slim-CS[3]、ヘリカル型炉：FFHR[4]等の「定常運転」磁気閉じ込め原型炉や KOYO-F[5]等の「高繰り返し」慣性閉じ込め発電炉の設計が進行中である。しかし、核燃焼原理検証実験としての ITER や NIF がそれぞれの目的を達成した後、これら原型炉・商用炉建設に進むためには、適正な核燃焼環境を担保するための炉容器システムに関する研究課題を解決することが必要である。

そのような研究課題のひとつが、プラズマ-壁相互作用に関する研究である。これは、磁気炉で数万～数十万度、慣性炉で数十億から数百億度の高温プラズマ粒子に暴露される炉壁の材料開発などの工学的側面とプラズマが壁と接触した結果、コア閉じ込めが影響を受けるという物理的側面を持つ境界分野の研究であるが、最近までどちらかと言えば、それぞれの研究分野が独立に発展してきた歴史がある。ところが、このような境界分野の研究を更に発展させるには、磁気炉研究者と慣性炉研究者、材料研究者とプラズマ研究者の相互理解と密接な研究連携が不可欠である。

プラズマ-壁境界制御の効果を初めて実証したのは、1986 年にプリンストンプラズマ物理研究所 (PPPL) の大型磁場閉じ込め装置：TFTR に於いて行われた閉じ込め実験である (後にスー

パーショット[6]と呼ばれた)。これは、プラズマ対向壁を重水素プラズマ閉じ込め本実験前にヘリウムプラズマでコンデショニングして脱ガスさせておき本実験中の壁からの粒子放出 (壁リサイクリング) を低減することで飛躍的にコアプラズマ閉じ込め性能が向上したものである。この傾向は、図-1 に示したエネルギー閉じ込め時間(τ_E)の壁リサイクリング (D_α) によるスケーリングデータベース則に現れている。即ち、壁コンデショニングによって境界領域に於ける粒子制御を以て、エネルギー閉じ込めを改善するというノウハウは、それ以降、世界の大小閉じ込め装置の実験シナリオに大

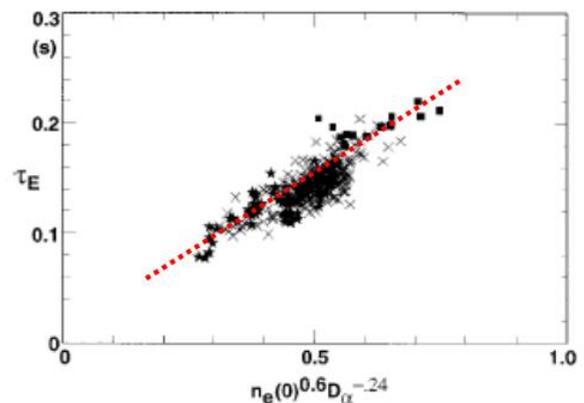


図-1 TFTR のエネルギー閉じ込め時間と壁リサイクリングによるスケーリング[6]。

きな影響を与え、現在も PPPL の球状トカマク装置：NSTX の閉じ込め実験に応用されている。

ところが、このプラズマ-壁境界制御効果の物理機構は、TFTR スーパーショット実験以来、約四半世紀経った現在でも解明されていない。そのため設計研究が進行中の定常運転原型炉・商用炉に壁コンデショニングが必要か、また、それが有効であるかも予想できない状態である。

一方、慣性閉じ込め炉では、ターゲットチェンバー内壁がペレット爆縮の際に発生する短パルス(100ns~1μs)超高強度 X-線と高温のプラズマ粒子(未燃焼 DT・He 灰粒子・ペレット成分原子)に照射される。その際のエネルギー流束は、 10^{8-9}W/cm^2 に達する。これは、ITER に於けるディスラプションの熱流束より更に3-4桁も高いもので、液体壁、固体壁に関わらず、壁表面がアブレーション(表面原子がプラズマ化して放出される現象)を起こす。その結果、放出された壁材料プラズマ粒子が、チェンバーの中心付近で会合・衝突し、エアロゾルが大量に生成することが最近の実験で分かってきた[7, 8, 9]。

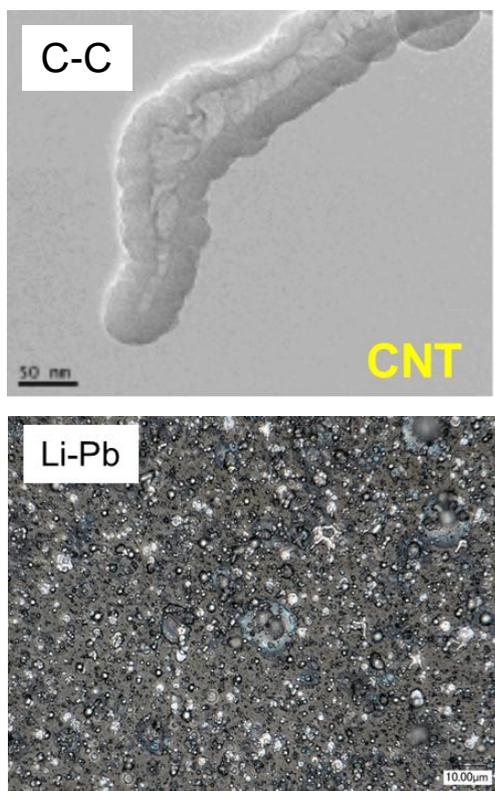


図-2 LEAF-CAP 装置で得られたエアロゾル：
(a) 炭素 CNT 様エアロゾル[8];
(b) リチウム-鉛液滴状エアロゾル[9]。

このエアロゾルがペレット爆縮位置付近に浮遊する間、引き続く爆縮レーザー光(又は、駆動イオンビーム)が散乱されるため、爆縮プラズマの対称性等に重大な影響を与える。ごく最近のレーザー型核融合原型炉:LIFE の設計研究[10]では、壁アブレーションを低減するため数 mTorr のキセノンをバッファーガスとしてチェンバーに充填することが提案されている。しかし、この場合も、そのガスがプラズマ化するた

め熱流体的挙動がこう繰り返し爆縮の妨げとなる可能性がある。いずれにしても、慣性閉じ込め炉に於けるプラズマ-壁相互作用が、最終的には発電性能に重大な影響を与える。しかるに、現在までエアロゾル生成機構、バッファーガスの熱流体挙動の理解は、甚だ不十分である。

目的

本シンポジウムでは、現在稼働中のヘリカル型装置:LHD、球状トカマク型装置:QUEST、リニア型装置:GAMMA10 から得られたプラズマ-壁境界領域に於ける壁材料と周辺プラズマの挙動に関連する実験結果を系統的に整理し、慣性炉に於けるエアロゾル生成の制御に関しては、実験室系装置:LEAF-CAP から得られたエアロゾル生成実験の現状を紹介し、慣性炉に於けるプラズマ-壁境界制御の革新的なアイデアを提案・議論する。

総合討論では、磁場・慣性閉じ込め両方式原型炉へ外装できるようなプラズマ-壁境界制御の方法論を提案・議論する事を目的とするものである。

参考文献

- [1]R. Aymar et al. Nucl. Fusion **41**(2001)1301.
- [2] E. I. Moses, J. Phys. Conf. Ser. **244**(2010) 012006.
- [3]K. Tobita et al. Nucl. Fusion **49**(2009)075029.
- [4]A. Sagara et al., Fusion Technol. **39**(2001)753.
- [5]K. Mima, Nucl. Fusion **50**(2010)014006.
- [6]J. D. Strachan, Nucl. Fusion **39**(1999)1093.
- [7]Y. Hirooka et al. J. Phys. Conf. Ser. **244**(2010) 032033.
- [8]Y. Hirooka et al., Fusion Sci. Eng. **60**(2011)804.
- [9]Y. Hirooka et al., Fusion Eng. Des. **87**(2012) 1760.
- [10]J. F. Latowski et al. Fusion Sci. & Technol. **60**(2011)54-60.