

## JT-60Uの改善閉じ込め放電への不純物ガス注入

## Impurity gas injection to discharges with the improved energy confinement in JT-60

伊丹潔、玉井広史、桜井真治、久保博孝、木島滋、正木圭、朝倉伸幸

原研那珂

核融合炉では、ダイバータへ到達する熱流束を減少させるため、少量の不純物ガスを注入し、放射損失を増大させることが想定されている。このとき主プラズマのエネルギー閉じ込め性能の劣化を最小限にするため、最適な不純物ガス種の選択とプラズマからの放射損失分布制御を行う必要がある。JT-60Uでは、W型ダイバータの高い粒子排気性能を利用して、ELMy H-modeプラズマあるいは負磁気シアプラズマの改善閉じ込め放電において、不純物ガスとして注入されたアルゴン(Ar)あるいはネオン(Ne)の混入量を制御した実験を行い、この研究課題に取り組んでいる。

ELMy H-modeプラズマでは、境界ペデスタル温度を高く維持しながら放射損失を大きくすることがエネルギー閉じ込め性能を維持するために本質的に重要である。高三角形度のELMy H-modeプラズマ ( $I_p = 1.2$  MA,  $B_T = 2.5$  T, NB加熱パワー = 18 MW) において、高電子温度でも放射損失率の高いAr注入を行い、低リサイクリング状態で、境界ペデスタル温度を維持したまま、放射損失パワーを加熱入力パワーの約80%まで増加させるとともに、 $H_{98} \sim 1.5$ の閉じ込め改善度を維持することに成功した[1]。核融合炉では、ELM熱流束による炭素ダイバータ材の瞬間的な温度上昇に伴う昇華がダイバータ材の寿命を決めると考えられている。そこでプラズマからの放射損失分布制御を行ったときの、ELM熱流束の低減効果について調べた。ダイバータへ到達するELM熱流束を250 $\mu$ sの時間分解能の赤外カメラにより測定した。ELMは非定常なイベント的MHD現象であるので、ダイバータ熱流束は、ELM時とELM間のパターンに分けられる。ELM熱流束はELM間熱流束に比べて、以下の3点で大きく異なる。

- 1) ELM毎に分布が異なり複数のピークを持つ。
- 2) 内側ダイバータ領域に集中し、外側ダイバータ領域に比べて3倍以上高い非対称性を有する。
- 3) 250 $\mu$ s - 500 $\mu$ s 以内の短時間内に集中してピーク温度上昇で200度以上、ピーク熱流束密度で100MW/m<sup>2</sup>以上となりうる。

図1は全放射損失率（放射損失パワー／NB加熱パワー）が約80%の時の、ELM熱流束分布を、ELMを含む時間平均した全ダイバータ熱流束と比べてある。

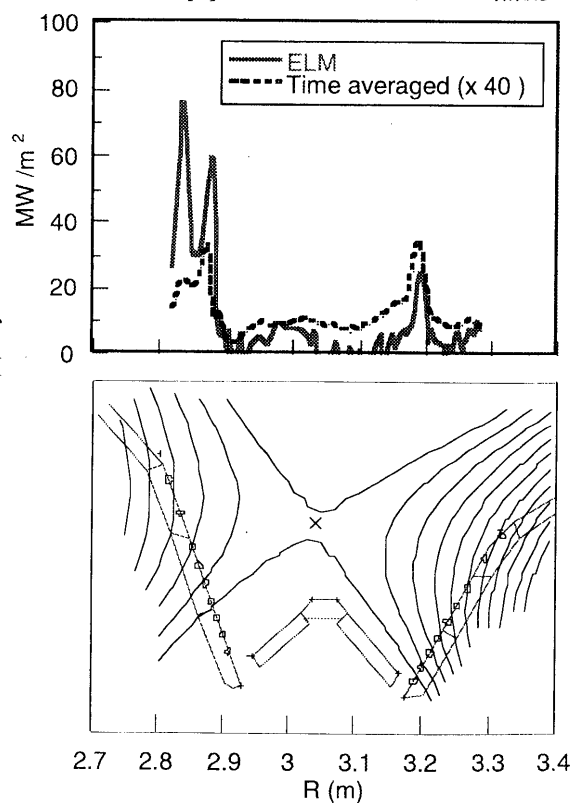


図1  
ダイバータ熱流束分布

## 招待27aB01

このとき内側ダイバータはELM間熱流束は大幅に低減して非接触ダイバータ状態になり、ELM時のみELM熱流束が支配的である。外側ダイバータについては、ストライク点近傍のELM熱流束だけでなくELM間熱流束も大きい。

Ar注入により全放射損失率（放射損失パワー／NB加熱パワー）が上昇するとともにELM周波数は低くなるが、ELM一個あたりのエネルギーには影響が少ない（図2参照）。つまりArパフの効果は、個々の熱流束を低減する効果としては現れない。Arを注入した放電におけるイオン温度分布測定でも、境界ペDESTALでのイオン温度が高く維持されていることから [2]、ELM熱流束はペDESTAL温度と密接に関連づけられる。

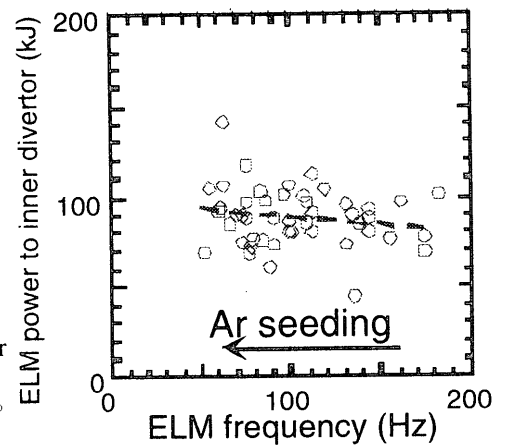


図2 Ar注入したELMy H-mode放電でのELMによる熱エネルギーの周波数依存性（外側ダイバータのみ）

負磁気シアプラズマ放電において、プラズマからの放射損失を増大させるとき問題となるのは、内部輸送障壁の内側への不純物の蓄積である。そこで定常に近い負磁気シアプラズマ放電で不純物輸送を研究した。不純物ガス摂動法でHe, C及びNeの対流速度を測定した結果、内部輸送障壁の領域で、内向き対流速度が、C及NeはHeに比べて大きくなっていることがわかった。実際にNeを注入した負磁気シアプラズマへの放射冷却実験では、C及Neが電子密度分布と同程度にピーキングしていた。図3(a), (b)は、Ar及びNeを注入した負磁気シア放電の放射損失分布である。高温で放射効率の高いArは主プラズマ中心部も放射損失が上昇する（図3(a)）。一方Neは周辺プラズマ（ダイバータ及びスクレイプオフ層）で放射損失が上昇する（図3(b)）。Ne注入が周辺プラズマを低電子温度化及び高粒子リサイクリング化して、周辺プラズマ領域で放射パワーを増大させるからであり、プラズマ中心部を冷却しにくい点でArより優れている。Ne及び重水素注入により負磁気シアプラズマの閉じ込め改善度（約2）を維持したまま、放射損失パワーを加熱入力パワーの約70%にすることが出来た。しかし、さらに閉じ込め改善度の高い負磁気シアプラズマでは、Neの排気制御が難しく今後の課題となっている。

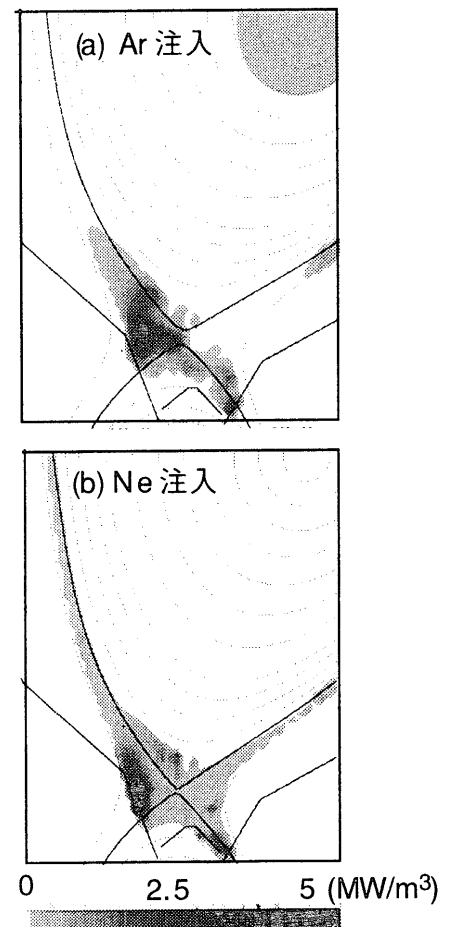


図3 不純物ガス注入した負磁気シア放電における放射損失分布

[1] S. Sakurai. et al, 14th PSI conference, 2000.

[2] H. Kubo et al., 18th IAEA, 2000.