

1.5 GW核融合原型炉における不純物入射シナリオとダイバータ設計 Impurity seeding scenario and divertor design for 1.5 GW-level Fusion Power DEMO

朝倉伸幸¹, 星野一生¹, 徳永晋介¹, 清水勝宏¹, 坂本宜照¹, 宇藤裕康¹, 染谷洋二¹, 本間裕貴¹,
工藤広信¹, 飛田健次¹, 大野哲靖², 原型炉設計合同特別チーム
ASAKURA N.¹, HOSHINO K.¹, TOKUNAGA S.¹, SHIMIZU K.¹, SAKAMOTO Y.¹, et al.

¹量研機構, ²名大
¹QST, ²Nagoya Univ.

原型炉設計合同特別チームでは核融合出力 (P_{fusion}) を 1.5GW 程度とした原型炉についてダイバータの物理および工学概念設計を進めている。本発表では主に原型炉における熱排出シナリオの物理検討の現状を報告する。炉心プラズマ設計では、主プラズマにおける放射損失パワー ($P_{\text{rad}}^{\text{main}}$) を不純物ガスの入射により増加させる必要があり、ダイバータ設計への要請に大きく影響する。一方、不純物イオン密度の割合 (n_{imp}/n_e) も増加し主プラズマ中の燃料が希釈されるため、主プラズマ周辺部における不純物制御が必要である。さらには、 $P_{\text{rad}}^{\text{main}}$ の増加により排出パワー (P_{sep}) が H モード遷移閾値程度に低下すると原型炉で期待する高い HH ファクター (1.2-1.3) を得ることが難しい。ダイバータ設計とシミュレーションを行うに当たり、 n_{imp}/n_e に対する P_{sep} を評価した。本検討では、低温から高温プラズマにおいて放射損失率が比較的大きいアルゴン (Ar) ガスの場合を示す。

Ar ガス入射量の増加に伴う P_{fusion} , $P_{\text{rad}}^{\text{main}}$, P_{sep} の変化を図 1 に示す。2014 年に提案された原型炉パラメータ ($\kappa_{95}=1.65$, $\langle n_e \rangle=6.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) では燃料希釈に伴い P_{fusion} は 1.5GW 以下に減少するとともに高い HH ファクターの達成が要請される。このため現在は、 $I_p=13.5 \text{MA}$, $\kappa_{95}=1.75$, $\langle n_e \rangle=7.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ へ増加することを目指した検討を行っている。プラズマ電流と密度の増加により P_{fusion} は 1.5GW を越え、HH ファクターの要求も 1.2-1.3 程度となる。 P_{sep} は低下するが、H モー

ド遷移閾値を懸念するには至らない。これらの考察から、 n_{Ar}/n_e を 0.5% から 0.7% へ増加した場合、 P_{sep} は 280-220 MW へ減少し、ダイバータ設計の熱処理パラメータ (P_{sep}/R_p) は 33 から 25 MW/m となり、ITER の 2-1.6 倍に相当する。

SONIC コードにより非接触プラズマの発生・維持に必要で十分なダイバータの大きさを検討している。 $P_{\text{sep}}=250 \text{MW}$ と設定した検討結果を示す。外側ダイバータのレッグ長について、図 2 に示す $L_{\text{div-o}}=1.6 \text{m}$ とともに 2m (ITER の 1.6、2 倍) を候補として、Ar ガスの入射によりエッジ SOL・ダイバータ領域で合計 P_{sep} の約 80% の放射損失を行った場合におけるダイバータ板でのプラズマと熱負荷分布を図 3 に示す。内側ダイバータでは広い範囲で $T_i = T_e \sim 1 \text{eV}$ (非接触プラズマ) となる一方、外側ダイバータではストライク点付近で非接触プラズマとなる「部分非接触」ダイバータが発生する。総熱負荷 (q_d^{total}) は、プラズマ熱流束、ダイバータ板表面でのプラズマの再結合、放射損失によるパワーおよびダイバータ板の上流で発生する再結合等による中性粒子の合計として評価される。 $L_{\text{div-o}}=1.6 \text{m}$ では外側および内側ダイバータで 5MWm^{-2} 程度であるが、 $L_{\text{div-o}}$ が長くなると非接触領域が広がり、接触部でのプラズマ温度も低下し、 q_d^{total} が低下する。今後、放射損失パワーの低減に伴うダイバータの運転領域 ($q_d^{\text{total}} < 10 \text{MWm}^{-2}$) を評価する予定である。非接触プラズマモデル等の物理検討課題についても述べる。

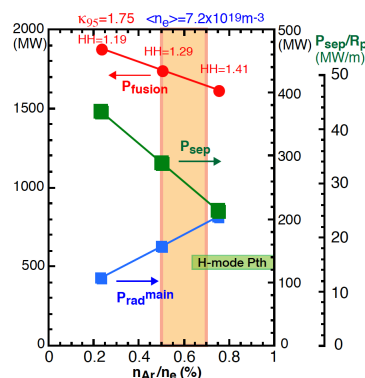


図 1 システムコードによる評価 ($\kappa_{95}=1.75$, $\langle n_e \rangle=7.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$): アルゴン密度割合に対する核融合出力 (P_{fusion}), 主プラズマでの放射損失 ($P_{\text{rad}}^{\text{main}}$), 主プラズマからの排出パワー (P_{sep}).

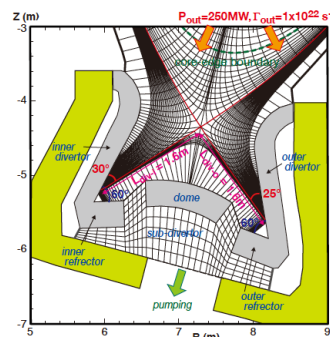


図 2 2015 年のダイバータ形状の検討案と SONIC 計算メッシュ: 内側・外側ダイバータのレッグ長 (L_{div}) は内外ともに 1.6m, 傾斜角はそれぞれ 30°, 25°.

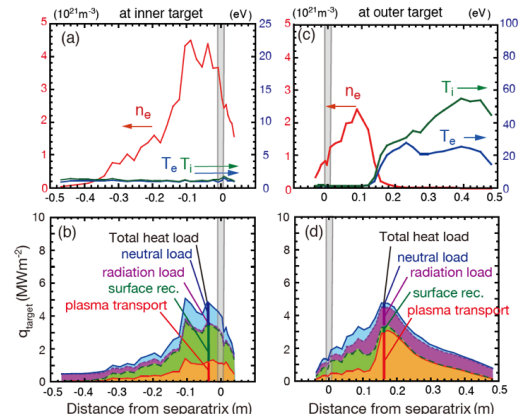


図 3 プラズマ及び熱負荷分布: 内側ダイバータにおける (a) n_e , T_e , T_i および (b) 熱負荷成分とその積算値. 外側ダイバータにおける (c) n_e , T_e , T_i および (d) 熱負荷成分とその積算値.