

燃料粒子制御に向けた磁場閉じ込め核融合プラズマ における 粒子排気のこれまでとこれから

| | |
|------|---|
| 著者 | MOTOJIMA Gen |
| 雑誌名 | プラズマ・核融合学会誌 |
| 巻 | 98 |
| 号 | 10 |
| ページ | 429-438 |
| 発行年 | 2022-10 |
| NAIS | 13688 |
| URL | http://hdl.handle.net/10655/00013531 |





解説

燃料粒子制御に向けた磁場閉じ込め核融合プラズマにおける
粒子排気のこれまでとこれからParticle Exhaust in Magnetic Confinement Fusion Plasmas
for Particle Control: Past and Future

本島 巖

MOTOJIMA Gen

核融合科学研究所

(原稿受付：2022年7月22日)

本解説では、粒子制御に向けたこれまでの取り組みとして、主として粒子排気という視点に立ち、プラズマ対向壁の燃料粒子吸蔵、放出現象のほか、ダイバータによる効率的な燃料排出について筆者が行ってきた研究を中心に紹介する。また、粒子制御を行うための重要な計測手法として、中性粒子圧力計測の一つである高速イオンゲージ開発の進展についても触れる。そのほか、燃焼プラズマで想定される水素同位体、ヘリウム混合プラズマ中の同位体分離や、効率的な粒子排出を可能にする粒子制御手法についても紹介し、これからの粒子制御に向けた展望を述べる。

Keywords:

particle control, divertor pumping, fast ion gauge, neutral particle

1. はじめに-粒子制御について

皆さんは、核融合プラズマにおける燃料粒子制御をどのように捉えているだろうか。読者の中には、例えばガスパフなどの燃料供給法により、簡単に密度制御できている人もいるかもしれない。ここで、プラズマの線平均電子密度をある値に維持する場合を考えてみよう。ガスパフや固体水素を使って、ある密度になるまで燃料粒子を供給し、かつ真空ポンプで電離しなかった（または、再結合して中性化した）燃料粒子を真空容器外へ排出しつつ、干渉計などの電子密度計測信号によるフィードバック制御をすれば、少なくとも平均密度は制御できるはずと思われるかもしれない。しかしながら、実際はそう簡単な話にはならない。その最も大きな理由は、真空容器第一壁あるいはダイバータ板といった、プラズマ対向壁（ここでは壁と言う）による燃料粒子吸蔵、放出現象が起こるからである。壁の粒子吸蔵、放出の絶対量が粒子供給量に比べて無視できるような状況や、絶えず一定量の粒子を吸蔵（放出）するような状況を作り出すことができれば、確かに密度制御は簡単だと言えるかもしれない。しかしながら、壁の粒子吸蔵、放出特性は、壁の材料によって大きく変わるほか、壁温にも大きく依存するので、壁の条件を絶えず一定にできない。そういった観点では、壁の材料、温度の選択は粒子制御にとって重要である。例えば、壁が炭素壁か金属壁かで壁の粒子吸蔵量が大きく異なっていることが報告さ

れている。有名な事例として欧州トールス研究施設（Joint European Torus）JETで行われた実験結果を紹介しよう。JETではタングステン壁化した場合、壁の粒子吸蔵量が炭素壁に比べて1/10になっていることが報告されている[1]。これは、炭素とベリリウムによる燃料粒子の共堆積の違いによって説明されている（共堆積とは、堆積層が形成される際に燃料粒子を取り込む現象のことを言う）。材料学的にはベリリウムとタングステンは炭素と比べて水素同位体との化学的親和力が低く、蓄積しにくいと予想されていたが、大型実験装置で実際に検証された例として大きな意義をもつ結果である。また、プラズマ境界力学実験装置 QUEST では壁温による壁の吸蔵量の違いが調べられている[2]。壁温が200℃の場合は、5分間のプラズマ放電で燃料供給粒子のほとんどが、真空ポンプにより排出され、壁への吸蔵がほとんど見られないのに対し、壁温が120℃の場合は、5分間のプラズマ放電で、真空ポンプにより粒子が排出されず、壁に粒子が吸蔵される。このように、壁温の違いによって、粒子の吸蔵特性が大きく変わることがわかる。これまでに説明した背景を至極簡単な式で表現すると、式(1)で表すことができる。

$$\int \Gamma_{\text{fuel}} dt \sim \int \Gamma_{\text{wall}} dt + \int \Gamma_{\text{Ex}} dt \quad (1)$$

ここで、 Γ_{fuel} は外部燃料供給レート、 Γ_{wall} は壁の吸蔵あるいは放出レート、 Γ_{Ex} は真空ポンプで粒子排気レートを示

す（プラズマ中の粒子数は小さいのでここでは無視している）． Γ_{fuel} , Γ_{Ex} は、正の値を取るが、 Γ_{wall} のみ正負どちらの値も取ることができる（吸蔵時は正、放出時は負）．原型炉における粒子制御では、トリチウムインベントリ（壁に蓄積するトリチウム）抑制の観点および定常運転の観点から壁の粒子吸蔵がない、いわゆる壁が100%粒子をリサイクリングすることが望ましい．そうなると原型炉を想定した場合、粒子バランスは式(1)から式(2)に変換され、非常に簡単な式を満たす必要がある．

$$\int \Gamma_{\text{fuel}} dt \sim \int \Gamma_{\text{Ex}} dt \quad (2)$$

ここで、粒子排気として、トラス外側赤道面に設置されている主排気系ポンプ (Γ_{Exmain}) と、ダイバータ部に設置されているダイバータポンプ (Γ_{Exdiv}) による粒子排気を考える (式(3))．

$$\int \Gamma_{\text{Ex}} dt = \int \Gamma_{\text{Exmain}} dt + \int \Gamma_{\text{Exdiv}} dt \quad (3)$$

主排気系ポンプのあるトラス外側赤道面では中性粒子が低圧縮である一方で、プラズマ放電時のダイバータではその幾何学的構造を閉塞化することにより中性粒子を圧縮することが可能である．従って、同程度の排気速度のポンプを用いれば、ダイバータポンプは、主排気系ポンプよりも効率的な粒子排気が可能である．ゆえに、ダイバータによる粒子排気の優位性が存在することがわかる．

本解説では、第2章にて粒子制御に向けたこれまでの取り組みを紹介し、第3章では、粒子制御のための重要計測と手法として、中性粒子圧力計測の進展について紹介する．第4章では、混合プラズマにおける効率的な粒子排出手法について過去の事例、最近の事例を紹介する．第5章で、これからの粒子制御に向けた取り組みを述べる．

2. 粒子制御に向けたこれまでの取り組み

2.1 長時間放電実験におけるプラズマ対向壁の粒子吸蔵、放出の研究

粒子制御に向けた取り組みとして、磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるこれまでの長時間放電実験の歴史を、粒子制御研究のアウトカムの一つとして振り返ってみたい．1980年代に超伝導トカマク装置が誕生し、RFを用いた電流駆動による長時間放電実験が本格化してきた．九州大学の TRIAM-1M では、1998年に1時間のトカマク放電を達成した．その後は毎年記録を更新し、2003年には5時間を超える放電時間を達成している [3]．当時のプラズマ対向材料の主流は炭素材であったが、TRIAM-1M では、モリブデン、ステンレスを中心とした高Z金属壁が採用された．この金属壁における一連の長時間放電実験で、粒子リサイクリングが、壁温によって大きく影響を受け、金属壁が粒子吸蔵源から粒子放出源に転移することを実験で示した．また、炭素壁の実験装置で見られていた共堆積効果により、金属壁でも粒子吸蔵が完全に飽和することが無いことを初めて明らかにした．炭素壁の実験では、1986年に完成

したフランスの Tore Supra が1990年代初頭に20秒を超える放電に成功し、1996年には約2分の放電を達成した [4]．Tore Supra のプラズマ対向壁は炭素部（内側リミター）、ステンレス部ともに水冷されており、実験前には200℃ベーキングとグロー放電による真空容器壁のコンデショニングが行われた．また、長時間放電に対応した粒子制御を行うために、100連発の固体水素ペレット入射装置や、ポンプリミターも備えられていた．同装置はその後2003年にイオン温度1.5 keV のプラズマを6分以上維持することに成功し、その時の入力エネルギーは1 GJ を超えた [5]．

長時間放電の例として、大型ヘリカル装置 (LHD) における長時間放電についても概説したい．LHD は1998年から超伝導コイルを用いたプラズマ実験を開始し、ヘリカル系の特長を活かして長時間放電での実績を上げてきた．MWクラスの定常加熱実験として中心電子、イオン温度2 keV のプラズマを約48分間保持し、入力パワー3.36 GJの世界記録を樹立した [6]．LHD のプラズマ対向壁の構成は、第一壁にステンレス鋼、ダイバータ板とNBI対向壁に炭素材が使用されており、異なる材料が使用されている．そのため、スパッタリングによって形成される堆積層は金属と炭素の混合堆積層（ミックスマテリアル堆積層 [7]）となっている．ミックスマテリアル堆積層はプラズマ放電中に形成されるが、先に述べた共堆積の特性がある．第一壁上の堆積層の広範囲な形成分布は反射率測定により推定されており、真空容器トラス外側部において厚い堆積層の形成が確認できている [8]．また、ダイバータ板上にもストライク点から離れた部分において堆積層の形成が確認されている [9]．このような堆積層の燃料放出、吸蔵過程は、堆積層の置かれている条件に依存する．すなわち、堆積層の温度によって粒子吸蔵放出特性が変わることが示されているほか [10]、ダイバータ材料そのものである炭素も温度によって粒子吸蔵放出特性が変わることも示されている [11]．また、ステンレス鋼部は、ヘリウムグロー放電によるバブル形成などの表面改質が起きると粒子の捕捉サイトになったり、あるいは吸蔵特性が低減したりと、粒子吸蔵・放出特性は複雑化する [12, 13]．

ここで、LHD におけるイオンサイクロトロン加熱 (ICH) および電子サイクロトロン加熱 (ECH) による、ヘリウムを燃料粒子とした長時間放電を例に挙げる．図1に放電例を示す．図1(a)のように、ターボ分子ポンプのみの排気を行った約2分間の放電に対し0次元グローバル粒子バランス解析を行った結果、ガスパフした燃料粒子のほぼすべてが壁に吸蔵されていることがわかった [14]．ここで、プラズマ内の粒子数および真空容器内の中性粒子数は無視できるほど小さい．ガスパフした燃料粒子 (48 Pam^3) のうち、96%が壁に吸蔵されていることになる．なお、この壁への吸蔵量は、動的吸蔵（比較的弱い捕捉で表面に吸着された燃料粒子がプラズマ放電後に放出される）も含めたものであり、放電終了後の粒子バランス解析を行うことにより動的吸蔵量は約 21 Pam^3 と評価された．最終的に、ガスパフで導入した燃料粒子のうち、56% (27 Pam^3) が、放電終了

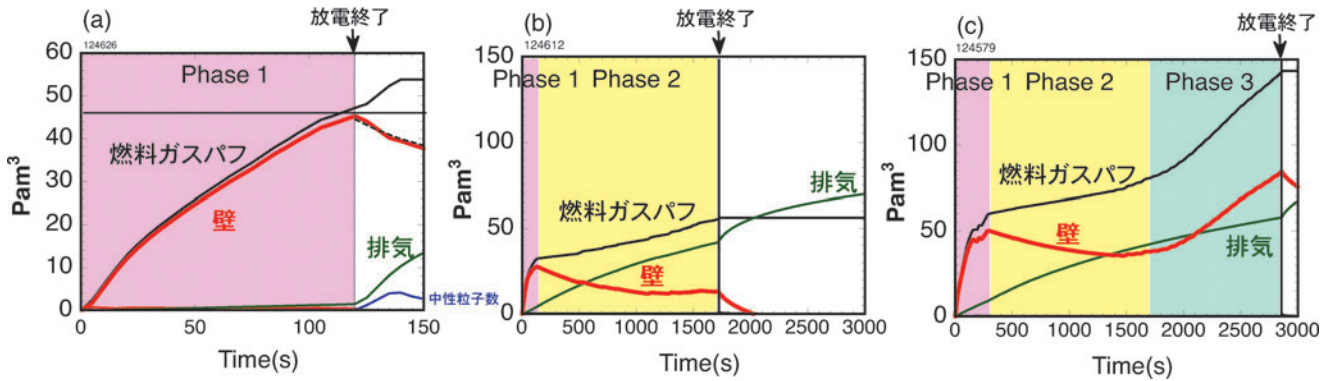


図1 LHDにおける長時間放電における粒子バランス解析結果. (a)は2分間, (b)は28分間, (c)は48分間の放電を示す. 黒色は燃料ガスパフ量, 赤色は壁の粒子吸蔵量, 緑色は真空ポンプによって排出された量を示す.

後も壁に吸蔵されていることになる. 今度は, 図1 (b)に示すように, 放電時間を28分間にした場合を見てみると, 2分放電と同様に最初の放電フェーズでは粒子が吸蔵されるが, その後, 壁による粒子吸蔵が飽和し, 粒子が放出されるフェーズが出現する. さらに, 図1 (c)に示すように, クライオポンプを用いた48分間のICH+ECH長時間放電において粒子バランス解析を行ったところ, 壁排気はさらに動的な変化を見せ粒子吸蔵フェーズが再出現する. 粒子の吸蔵・放出特性は, 主に3つの段階に分けられる. 第1段階 (0-300秒) では, 2分間の放電と同様, 燃料粒子の壁への吸蔵が見られ, その後, 第2段階 (300-1500秒) では, 壁への吸蔵が抑えられ, 壁からの燃料粒子放出も見られる. しかしながら, 第3段階 (1500秒-放電終了) では再び壁への吸蔵が見られる. このような動的な粒子吸蔵, 放出特性は, LHDのような異なる材料から構成されるプラズマ対向壁が一因であると考えられる. すなわち, ミックスマテリアル堆積層形成は共堆積によりプラズマ放電中一定の粒子吸蔵を担うが, ダイバータ板に蓄積された粒子は, ダイバータ板の温度とともに吸蔵から放出へと転じると考えられる. この実験では, 試料駆動装置を用いた材料試料へのプラズマ照射実験も行っており, グローバル粒子バランスの解析結果と材料試料分析結果について定量的な比較を試みた結果, とともに矛盾のない結果が得られている [15]. このような粒子吸蔵放出特性の動的変化は粒子制御にとっては避けなければならないものであり, 堆積層の形成をいかに防ぐかが一つの重要な課題であると言える.

2.2 ダイバータ排気を用いた粒子制御

粒子制御性を高めるためには, 壁の粒子吸蔵に頼らない強力な粒子排気を実現する必要があることは先に述べた通りである. JT-60Uの40秒ELMy-Hmode放電では, 固体水素ペレットおよびガスパフにより密度を一定にする制御が行われたが, 放電後半に壁の粒子吸蔵が飽和して粒子放出に転じ, 燃料供給による密度制御が不能となり密度が上昇する結果となっている [16]. 長時間の粒子制御を確立するためには, 壁の粒子吸蔵に頼らない積極的な粒子排気が必要である. そこでダイバータ排気の活用が考えられてきた. 先に述べた通り, ダイバータ排気では, ダイバータ部での中性粒子圧力を高めることで, 効率的な排気が期待で

きる. JT-60Uではダイバータ排気を活用した実験も行われており, ダイバータ排気によってMARFE (トラス内側のプラズマ表面近傍の領域に局在して放射損失が強まる現象) が消滅した事例が報告されている [17].

ここでは, LHDのダイバータ排気に関する実験結果を紹介して, ダイバータ排気がいかに粒子制御性の向上に寄与し得るのか述べる. LHDではトラス内側のダイバータを閉構造化することにより中性粒子の高圧縮化が可能になった [18]. そこで, ダイバータ内に設置可能な高圧縮された中性粒子を効率的に排気できるような真空ポンプの開発を行い, 実験に導入してきた. 真空ポンプの開発については3.3にて詳細に述べるが, 概要は次の通りである. 真空ポンプには活性炭を用いたガス吸着型のクライオポンプを採用した. 排気コンダクタンスを増大するための構造検討, R&Dによる高性能活性炭の選択, クライオパネル配置の工夫により排気面積を増加し, 大きな排気速度と容量を得たことが主要な成果として挙げられる. 開発した高性能クライオ吸着ポンプをLHDトロイダル5セクションの閉構造ダイバータ内部に設置した. クライオポンプを含むダイバータの断面図を図2に示す. 高性能ダイバータポンプの排気速度は約70 m³/sとなり, 主排気系ポンプと同程度とすることができた [19]. また, 排気容量は58,000 Pam³となり, 水素ペレット約20,000発分に相当するまで向上させる事ができている. これは, LHD高密度実験の20日分に相当するものであり, 十分な排気容量を持たせることができたことになる. この高性能化により, プラズマ放電中に全燃料供給量の50%を排気するまでに至っている. LHDの主真空排気系は全燃料供給量の5%を排気しているので, ダイバータによる排気量はその10倍に値する [20].

上記の高性能ダイバータ排気を, LHDのプラズマ実験に適用した結果, 壁でのリサイクリング率の低減が可能となった. リサイクリング率 (R) は一般的には, プラズマから壁に入った燃料粒子の内, 再びプラズマ中に戻る粒子の割合を示す. ゆえに, リサイクリング率の低減は, ダイバータ排気により壁へ吸蔵される燃料粒子量を低減することができたことを意味する. ここで, リサイクリング率を含む粒子バランスは下記の式 (4) で表すことができる.

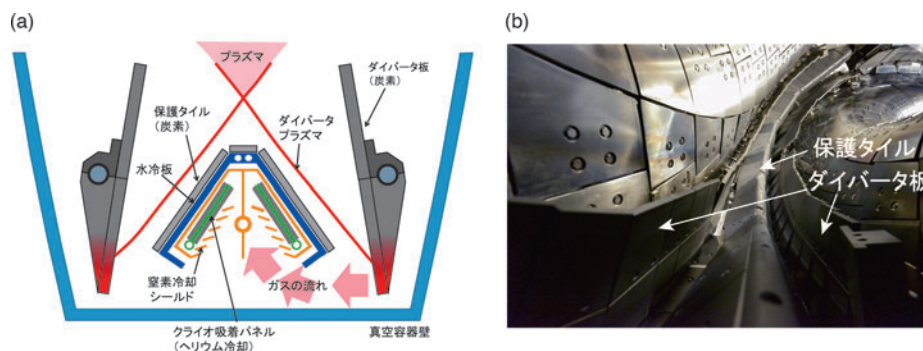


図2 (a)高性能化された閉構造ダイバータ断面図および(b)真空容器内に設置された閉構造ダイバータ。

$$\begin{aligned}
 \frac{d\bar{n}_e}{dt} &= -\frac{\bar{n}_e}{\tau_p} + S_R + S_{\text{fuel}} \\
 &= -\frac{\bar{n}_e}{\tau_p} + R \frac{\bar{n}_e}{\tau_p} + S_{\text{fuel}} \\
 &= -(1-R) \frac{\bar{n}_e}{\tau_p} + S_{\text{fuel}} \\
 &= -\frac{\bar{n}_e}{\tau_p^*} + S_{\text{fuel}}, \tag{4}
 \end{aligned}$$

n_e はプラズマの線平均電子密度, τ_p はプラズマの粒子閉じ込め時間, S_R, S_{fuel} はそれぞれリサイクリングに関する項, 燃料供給による粒子源に関する項を示す. 密度の時間変化は, リサイクリングを考慮した実効的粒子閉じ込め時間 τ_p^* を用いて表すことができる. 燃料供給による粒子源が無視できる場合は, 実効的な閉じ込め時間は, 下記のように表すことができる.

$$\tau_p^* = -\frac{\bar{n}_e}{\frac{d\bar{n}_e}{dt}}. \tag{5}$$

また, τ_p が不変であれば, τ_p^* と R は一対一関係となり, R が大きければ τ_p^* は大きくなり, R が小さければ τ_p^* は小さくなる.

$$R = 1 - \frac{\tau_p}{\tau_p^*}. \tag{6}$$

ここで, LHDのダイバータ排気を使った場合の実効的な粒子閉じ込め時間を図3に示す. ダイバータ排気がある場合は, 無い場合に比べて, 短い τ_p^* が得られている. これは低リサイクリング状態が観測されていることを示すものである. すなわち, 低密度へのアクセスがダイバータ排気によって可能となったことを示している. 例えば, 低リサイクリング状態を必要とする, 高イオン温度実験では第一壁のコンディショニングが必要であり, ECH放電洗浄により第一壁を低リサイクリング状態とすることが高イオン温度を達成するための一つの要因となっている[21]. 効率的なECH放電洗浄がダイバータ排気で可能になったことを示す結果も得られており, ダイバータ排気を用いた高イオン温度実験等への寄与も確認されている[20]. また, 低リサイクリングをダイバータ排気によって達成できたことによって固体水素ペレット入射による燃料供給の際の固体水

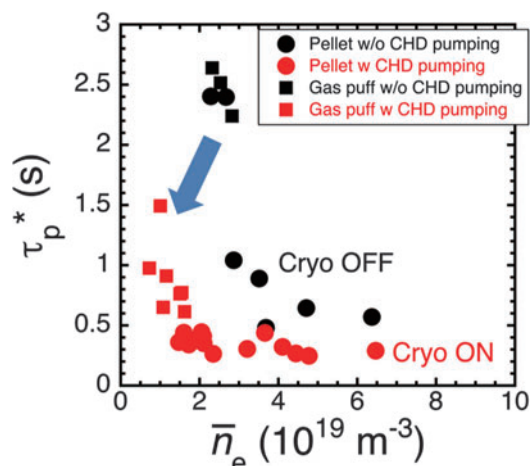


図3 クライオ排気有無における実効的な粒子閉じ込め時間 (τ_p^*) と密度の関係. 文献[19]より引用.

素のプラズマへの侵入長が短くなる実験結果も得られている. これは, ダイバータ排気によりプラズマの周辺密度が下がる一方, 周辺温度が上がったことにより, 固体水素の溶発が促進されたことが原因と考えられる. ダイバータ排気によって, 固体水素のバルクプラズマへの吸収分布が変わることも興味深い結果である.

次に, ECH40秒長時間放電においてもダイバータ排気を適用し, 粒子制御性が向上した結果を示す[22]. 図4に時間発展を示す. ダイバータ排気がない場合, プラズマ電子密度 ($n_e \sim 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) がガスパフ燃料のみによるフィードバックでは制御できず, 放電途中で放射崩壊に至った一方, ダイバータ排気がある場合, ガスパフにより安定した電子密度を維持することが可能となった. 粒子バランスを評価した結果, ダイバータ排気によって主排気系ポンプに比べて50倍の粒子排気量の違いを生んでいることがわかった[23]. ダイバータ排気は中性粒子を圧縮し, 効率よく粒子排気できていることを示している. また, 図4(h)は壁の吸蔵量とガスパフ量の比をとったものである. これを見ると, ダイバータ排気がない場合は, その比が放電途中で負に切り替わっており壁リサイクリングが支配的になっている. 一方, ダイバータ排気がある場合は, その比が一定となり, 壁の粒子吸蔵の飽和を避けることができ, 壁リサイクリングによる粒子供給過多の状態を防ぐことができている. 最近では, 熱輸送解析の結果, ダイバータ排気は周

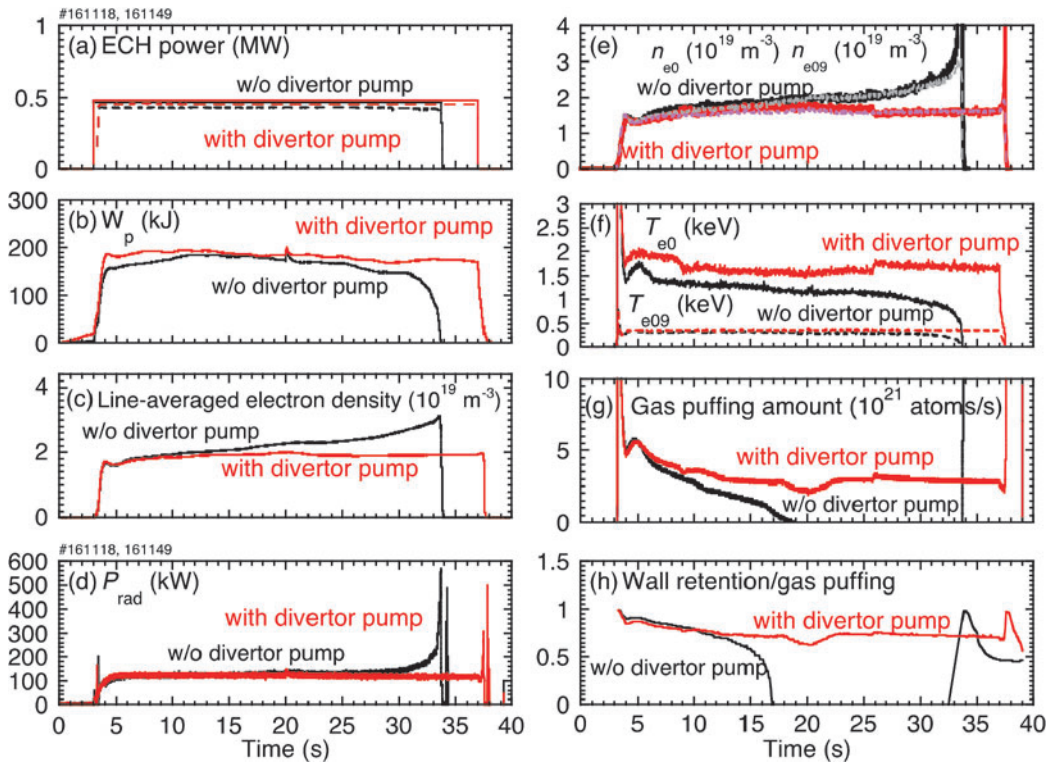


図4 ダイバータ排気有無におけるLHDのECH40秒放電例。(a)ECHパワー、(b)蓄積エネルギー、(c)線平均電子密度、(d)輻射パワー、(e)中心および周辺密度、(f)中心および周辺温度、(g)ガスパフ量、(h)壁の吸蔵量/ガスパフ量。文献[22]より引用。

辺プラズマの熱伝導率に影響を与えないものの、電子内部輸送障壁の生成によりプラズマコアの熱伝導率を下げていくことがわかった[22]。このことは、ダイバータ排気によるリサイクリングの低下によりプラズマ周辺部の中性粒子の密度が減少した結果、プラズマコア部の熱輸送が低下したことを示している。プラズマコア部の輸送が周辺部のパラメータの影響を強く受けるという、プラズマコア・周辺の相互作用現象として物理的に興味深い結果であり、今後の研究の進展が期待される。

3. 粒子制御のための重要計測と手法：中性粒子圧力計測の進展

3.1 周辺中性粒子圧力計測—さまざまな真空計

粒子制御を行う上で、ガスパフ、あるいは壁の粒子放出はプラズマの周辺から粒子が供給されることから、周辺中性粒子をいかに制御するかが重要なファクターとなる。ここではそのために重要な、周辺中性粒子圧力計測を紹介したい。核融合プラズマ実験における中性粒子計測として、様々な真空ゲージが使用されている。簡単に図5に纏めている。例えば、冷陰極電離真空計は、コールドカソードゲージとも言われており、超高真空の測定にも使用可能である。冷陰極電離真空計は、陰極—陽極間に高電圧を印加し、プラズマ放電すると陰極から電子が放出され、中性粒子との衝突により、イオンを発生させ、イオン電流を計測することにより圧力を測定するものである。一方、熱陰極電離真空計は、ホットカソードゲージとも言われており、中性粒子を電離させるための電子は、加熱したフィラメントから生成される。いずれの真空計も高真空、超高真空に

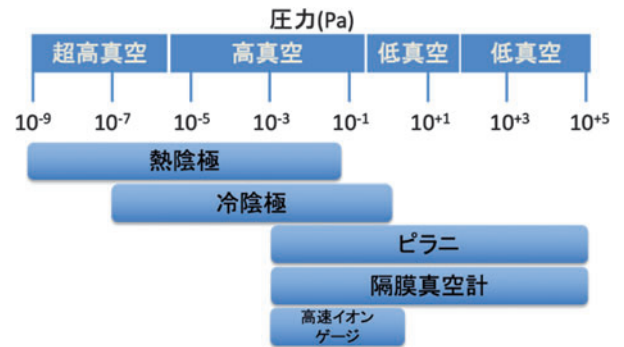


図5 様々な真空計とその測定範囲。詳細は、<http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/people/ikuji/edu/vac/chap3/gauge.html>が参考になるだろう。

おける中性粒子計測として、重宝される。一方、真空計の計測として考慮しなければならないことは、各ガス種によって感度が異なる点である。純度の高いプラズマであれば、感度校正係数を考慮して中性粒子圧力を測定することができるものの、混合プラズマであればどのように感度校正係数を決めるべきなのか、難しいところである。全圧を測定することができる隔膜真空計を併用することも考えられるが、隔膜真空計は、高真空、超高真空下での精度が期待できず、超高真空まで全圧を校正できる具体的な解決策があるわけではない。また、磁場閉じ込め実験装置では、外部磁場による擾乱が電離真空計に及ぼす影響についても考慮すべき点である。適切な磁場遮蔽を行い、実験に適用することが求められる。次の節では、磁場中の中性粒子圧力を測定できる真空計として、磁場閉じ込め核融合研究から発展していった熱陰極ゲージである、高速イオンゲージ

について解説する。

3.2 中性粒子圧力測定法である高速イオンゲージの進展

高速イオンゲージは「高速」と名がついている通り、時間応答に優れており、0.2 msec の時間分解能で中性粒子圧力を計測できる（例えば、隔膜真空計は一般的に数十 msec の時間分解能とされる）。この時間分解能は、ELM (Edge Localized Mode) と呼ばれるプラズマ周辺部の不安定性の計測のために求められた。高速イオンゲージは、フィラメント、コントロールグリッド、加速グリッド、イオンコレクターから構成されており、これらの電極を、磁場と平行 ($\pm 25^\circ$ まで許容できる) に設置することで荷電粒子のラーモア運動の影響を受けずにイオン電流を収集することができる。図 6 にゲージの概略と電極間の電位プロファイルを示す。

電流を流すことで加熱されたフィラメントから放出された電子は、加速電極とフィラメント間の電位勾配によって加速される。中性粒子の電離により発生したイオンはイオンコレクターで収集される。フィラメントから加速グリッドへの電子束は、コントロールグリッドの電位をフィラメント電位よりも高い電位から低い電位へ高周波で掃引することによりチョッピングされる。フィラメントからの電子束がコントロールグリッドを越えない間に、測定したバックグラウンドプラズマによるイオンコレクター電流のオフセットを差し引くことで、ゲージ内の中性粒子の電離のみからの正味のイオン電流を得ることができる。イオンコレクター電流を加速電極で測定したエミッション電流で規格化すると、その値は中性粒子数の指標として使用できる。高速イオンゲージの最大のメリットは、磁場中で使用できることである。一方で、高速イオンゲージの課題として、使用中のフィラメントの劣化が挙げられる。高速イオンゲージは、通常、直径が 0.6 mm 程度のトリウム入りタングステン (2%トリウム含有) を使ったフィラメントが用いられている。高速イオンゲージは、古くは 1998 年頃から使用されてきており、初めて使用された装置に因んで ASDEX ゲージとも呼ばれる [24]。中性粒子圧力を測定するためには、陽極電極で 200 μ A 程度の電子電流を必要とし、通常 18 A 程度までタングステンフィラメントに電流を

流す必要がある。しかしながら、プラズマ実験中の磁場により、フィラメントに $J \times B$ による力が働き、フィラメントの形状が変形する事例が多数報告されている [25]。フィラメント形状が変形すると、フィラメントが信号電極に接触して短絡し、適切なイオン電流を測定することができなくなり、計測不能に陥る。高速イオンゲージはダイバータなど狭隘部にも設置することができ、ダイバータ内の中性粒子圧力を測定するのに重宝されるものの、一度測定できなくなれば、真空排気中 (プラズマ実験中) にフィラメントを取り替えることができないため、修理できない難点がある。高速イオンゲージを計測に使ったことのある研究者は、一発勝負の測定に疲弊した経験がきっとあるはずである。そうした中、安定に中性粒子圧力を測定するための新しいフィラメントを用いた研究が進められている。フィラメントの劣化を防ぐためには、フィラメントに働く $J \times B$ による外力をできるだけ防ぐ必要がある。すなわち、フィラメントに流す電流を小さくすればよい。そこで、最近では、新しいフィラメント素材として六ホウ化ランタン (LaB_6) を使った高速イオンゲージが開発されている [26]。 LaB_6 は高い電子放出率、低い仕事関数、高融点材料であり、電子顕微鏡に必要な電子線源として用いられているが、意外にも高速イオンゲージのフィラメントとして適用されたのは最近になってからのことである。 LaB_6 フィラメントの両側に、高配向性熱分解グラファイトが取り付けられており、低電流 (オーミック加熱) でフィラメントの温度を上げられない分、グラファイトの温度を上げて間接的にフィラメントの温度を上げる処置がなされている。ドイツのステラレータ装置である W7-X では 40 時間に渡ってプラズマ実験に適用し、安定に動作していることが確認されている。LHD でも国際共同研究により LaB_6 を使った高速イオンゲージの測定が行われている。国際熱核融合実験炉 ITER など将来の核融合プラズマ実験装置への適用に向け、フィラメントの材料あるいはゲージの構造を最適化するなどして、高速イオンゲージの開発は現在も精力的に行われている。

3.3 ダイバータにおける粒子排気のための真空ポンプの開発

磁場閉じ込め核融合装置において、溜め込み式の真空ポンプであるクライオポンプは、大きな排気速度が得られ、かつ磁場環境中でも使用しやすいこともあって、さまざまなプラズマ実験装置で使用されてきた。現在建設が進んでいる ITER [27]、ファーストプラズマが待たれる JT-60SA [28]、強制冷却ダイバータ板およびダイバータ排気を用いたプラズマ実験を予定している W7-X [29] でもダイバータ排気にはクライオポンプが採用されている。クライオポンプは、排気中に吸蔵した水素燃料や不純物を保持しているが、保持した粒子を放出させることで、再度排気させることができる。そのためには、クライオパネルの温度を 20 K 以下から常温まで昇温する必要がある (一般的に、この操作を再生と言う)。原型炉を想定した場合にはトリチウムインベントリの観点から溜め込み式の真空ポンプの採用には課題があるが、磁場環境下で使用できる真空ポンプとし

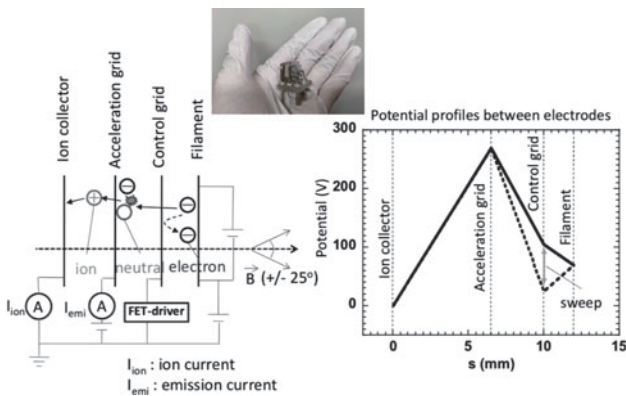


図 6 高速イオンゲージの原理。ゲージヘッドは手の上に置けるほどの大きさである。電位のポテンシャルを利用して、中性粒子がイオン化された量をイオン電流として計測する。

て、クライオポンプが魅力的であることは事実であろう。LHDではダイバータ排気のため吸着型のクライオポンプを採用している。一般的に真空ポンプはゲートバルブ等を介して真空容器と接続するのが基本であるが、LHDの場合はダイバータ構造がヘリカル構造をしており、ゲートバルブを介することが困難である。ゲートバルブを介さない場合に懸念されるのが有機接着剤使用に伴うガス放出や不純物発生の問題である。従来のクライオ吸着ポンプにおいて、吸着材として、多孔質材料の活性炭が用いられており、冷却基板上（通常は銅が用いられる）に貼り付ける際に、エポキシ系の有機接着剤が使用されてきた。しかし、有機接着材は、運転停止中に有機ガスを放出して真空容器を汚染するほか、特に加熱時の有機系放出ガス量が多く、壁コンディショニングのためのベーキング中に真空容器を汚染するリスクを伴う。無機系のセメントを接着剤として使うことも考えられているが、セメント原料による真空容器の汚染も懸念される[30]。そこで、核融合科学研究所では株式会社協同インターナショナルと共同で、有機ガス放出の無いインジウムを用いた無機接着法を開発した[31]。インジウム（融点156℃）は低融点金属の一つであり、ろう材として使用した。しかしながら、一般的に活性炭はろう材への濡れ性が低く、冷却基板に対して十分な接着強度が確保できない課題があったので、活性炭と冷却基板にアンカー効果を生み出す金属層（Ti, Ni, Ag）をスパッタ成膜処理することにより課題を解決した。なお、詳細は[32]でも報告されているので、参考にされたい。LHDのダイバータクライオ吸着ポンプは、2017年の重水素実験開示以降のプラズマ実験にも供されており、中性子が発生する環境下でも排気性能が維持されている結果が得られている。また、活性炭の剥離も観測されていない。このように、無機接着法は有機接着で問題となる有機系アウトガスによる真空容器の汚染を解決するものであり、今後のクライオポンプ製作において採用される可能性は十分考えられるものである。

クライオ吸着ポンプの性能を決める重要なファクターとして、使用する活性炭の特性が挙げられる。活性炭は多孔質材であり、主に比表面積（ m^2/g ）と細孔径（nm）でその特性が評価される。比表面積は、Brunauer-Emmett-Teller (BET) 法を用いて評価されることが多い。また、細孔径に関しては、一般的には、活性炭の細孔の大きさは、直径 $<2\text{ nm}$ がマイクロ孔、 $2\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$ がメソ孔、 $>50\text{ nm}$ がマクロ孔と分類されている。物理ガス吸着は、マイクロ孔領域の細孔で行われるため、この領域の細孔容量がポンプの排気容量に寄与すると考えられる。一方、メソ孔～マクロ孔領域の細孔は、吸着物質をマイクロ孔へと導く運搬通路の役割を担うため、この領域の細孔容量がポンプの排気速度に寄与すると考えられる。以上のことから、マイクロ孔領域およびメソ孔～マクロ孔領域の細孔容量、そして細孔径分布は、クライオ吸着ポンプの排気性能を決定する重要な要素となっている。ここで、細孔径分布は、ガス吸着脱離等温線の評価したのち、Density Function Theory (DFT) 法やBarrett-Joyner-Halenda (BJH) 法を用いて求められる。LHDのダイバータ排気のクライオ吸着ポンプに用いら

れている活性炭は細孔径分布を評価して、マイクロ孔、メソ孔が豊富に含まれている活性炭が用いられている。

次に、最近の新しい活性炭開発の現状についても触れておきたい。通常活性炭はヤシガラなどの原材料に対して炭化処理をして賦活したり、原料に賦活剤を混合させて炭化・賦活処理をして製造される。最近では、活性炭に高機能性を持たせるために、炭素源にアルカリ土類金属化合物でできた鋳型を混合し、炭化させた後、鋳型を溶出させることで、多孔質構造体を作り出す製法が工業的に確立されている[33]。例えば、CNovelTM[34]やTriporusTM[35]といったものが挙げられる。このような鋳型を用いて活性炭を製造する場合の最大の利点は、細孔径分布を人為的に制御することが可能な点である。これにより、高分散、耐酸化性・耐熱性、長寿命・不変性などの機能と細孔制御を組み合わせることができ、新機能材料として魅力ある活性炭を生み出すことが可能である。燃料電池の触媒などに用途展開されている事例が報告されている[36]。こうした細孔制御された活性炭をクライオポンプの活性炭として展開することも十分に可能だと考えられる。核融合科学研究所ではCNovelTMをクライオ吸着ポンプの活性炭として用いるべくR&Dを行っている。図7に市販品の活性炭とCNovelTMを成形したものを、20 K以下まで冷却し、排気速度試験を行った結果を示す。CNovelTMの方が市販品の活性炭よりも排気速度が高く維持されていることがわかる。CNovelTMの細孔径分布を調べたところ、メソ孔～マクロ孔の細孔量は市販品の活性炭を凌駕するものであることがわかり、高い排気速度が得られたものと推測できる。このことは、CNovelTMのような細孔制御された活性炭がクライオ吸着ポンプの活性炭として使用できる可能性を示唆するものである。

LHDではダイバータ排気として吸着型クライオポンプだけではなく非蒸発型 (NEG) ポンプも活用している[37]。NEGとはNon Evaporable Getterの略で、非蒸発型ゲッターを意味する。NEGポンプは、真空中の気体分子を

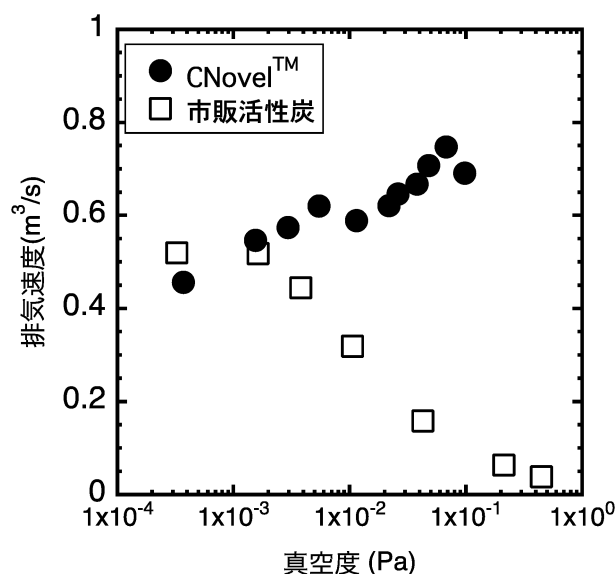


図7 CNovelTM活性炭と市販活性炭の排気速度試験結果。

吸蔵合金の清浄な表面が持っている強い化学反応性を利用することで化学結合し、固定化する作用を利用した真空ポンプである。最近になり、高真空領域に対応した吸蔵合金がサエス・ゲッターズ社において開発され、核融合科学研究所ではこれをダイバータ排気用真空ポンプとして採用した。先に述べた通り、LHD ではダイバータ排気として吸着型のクライオポンプを用いているが、20 K 以下という極低温での運転を必要とする一方、NEG ポンプの運転温度は500 K 程度であるため、特にプラズマ加熱機器と対向するダイバータ領域では、プラズマ運転の両立性が良いという利点がある。本研究では、LHD 閉構造ダイバータ内部の狭小領域に設置可能な、サエス・ゲッターズ社のHV800型のNEG ポンプを42台、ダイバータの1セクションに導入した。これによりLHD ではダイバータ10セクションのうち、6セクションに排気ポンプを備えることとなり、その排気速度は合計80–90 m³/sとなっている。

4. 混合プラズマにおける効率的な粒子排出

4.1 水素同位体、ヘリウム分離手法

ここでは水素、ヘリウム分離研究について、ポンドラモータティブ・ポテンシャルを活用したイオン種の選択的閉じ込めの例を挙げる[38]。実際に実験が行われたのはかなり以前であるが、水素同位体、ヘリウム分離などに活用できる可能性があるため、振り返ってみたい。ポンドラモータティブ・ポテンシャルは、印加する高周波閉じ込めの周波数が、プラズマ中のイオンのサイクロトロン周波数に近いときに大きくなる。この性質を利用すれば、仮にプラズマ中にサイクロトロン周波数の異なるイオン種があった場合、このイオンはポテンシャルを感じることなく、磁力線に沿って閉じ込め領域から逃げ出すことになる。これは、高周波閉じ込めが不純物を閉じ込めないという、特異な長所を持っている事を示し、例えばトリチウムの分離回収や同位体分離などへの応用の可能性を示す。このように、特定のイオンのみをいわゆる選択的に閉じ込めるは、当時小型カスプ装置のTPD-IIを用いた実験によって確かめられた[39]。TPDでは、ヘリウム、窒素、アルゴンからなる多種イオンプラズマが、一方のポイントカスプからカスプ磁場中に流入し、ラインカスプで高周波閉じ込めを受ける。ラインカスプから逃げてくるイオンを質量分析した結果、高周波の周波数がヘリウムイオンに対する最適周波数に等しい場合には、ラインカスプの外側へ漏れてくるヘリウムイオンの数は、高周波電圧を増すとともに、減少し、300Vの高周波電圧まで到達すると全くヘリウムイオンを検出しなかった。一方で、窒素イオンはこの影響を受けずに漏れ出ていることがわかった。例えば、図8に示すように、ダイバータ領域に高周波による選択的閉じ込めを利用すれば、ダイバータ部で自動的にイオン分離されて、ヘリウムの効率的な排気などが促進される可能性がある。

4.2 同位体ミキシング

最近では乱流によるミキシングによる効率的なヘリウムの周辺輸送が観測されているので、その一例を示す[40]。LHDの水素・重水素の同位体混合プラズマにおいて、水素

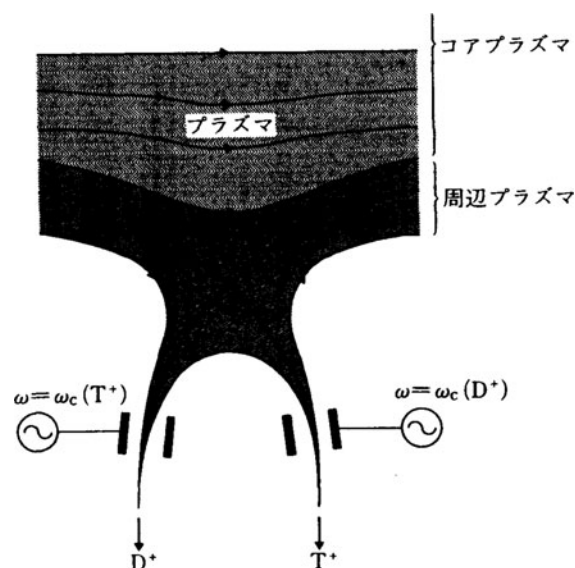


図8 ダイバータ部での選択的高周波閉じ込めの概念図。文献[38]より引用。

と重水素の密度分布をバルク荷電交換分光で計測した。その結果、粒子供給のイオン種と供給する位置（中心供給か周辺供給か）にかかわらず、2つの同位体（水素と重水素）が同じ密度分布となる「同位体ミキシング」と、異なる分布の「同位体非ミキシング」という2状態間の遷移が観測された。具体的に、低リサイクリングの状況のもと（壁は重水素リサイクリングが優位な状況）、軽水素ビームのNBIにより軽水素の中心粒子供給が行われる場合、軽水素密度割合 (n_H/n_H+n_D) の空間分布はピークした分布になる。軽水素ペレット、および重水素ペレットを入射した場合の水素密度割合を図9に示す。なお、ペレットの侵入長は浅く、プラズマへの吸収分布は周辺に位置する。軽水素ペレットを入射した場合、水素密度割合は空間一様になる。一方、重水素ペレットを入射した場合は、周辺のデポジションにより、水素密度割合を下げ、よりピークした分布として予想されるが、実際は空間一様な分布が得られる。このように、重水素ペレットであろうが、軽水素ペレットであろうが、水素密度割合が空間一様になる結果は、同位体のミキシングが起こっていることを示している。一方、同位体非ミキシングでは、ペレットを入射する前のように、水素密度割合が空間的に非一様になっている。この同位体非ミキシングは、低密度または低衝突のプラズマで観測され、乱流は60–90 kHzにピークを持っている。それが、ペレット入射後は、密度あるいは衝突周波数の上昇につれて、同位体ミキシングの状態へ遷移し、乱流のピークは低周波（20–40 kHz）にシフトする（図9右図）。この変化は、ジャイロ運動論的シミュレーションでも再現されており、捕捉電子モード乱流からイオン温度勾配乱流の遷移を示唆するものである[40]。このように、乱流の駆動によって、同位体ミキシング状態を作り出すことができる可能性は、水素同位体のプラズマ中心への粒子供給を乱流駆動によって達成できる可能性を示すほか、水素同位体分布の制御ノブの一つになり得ることを示す重要な結果である。また、原型炉を考えた場合、プラズマ中心で

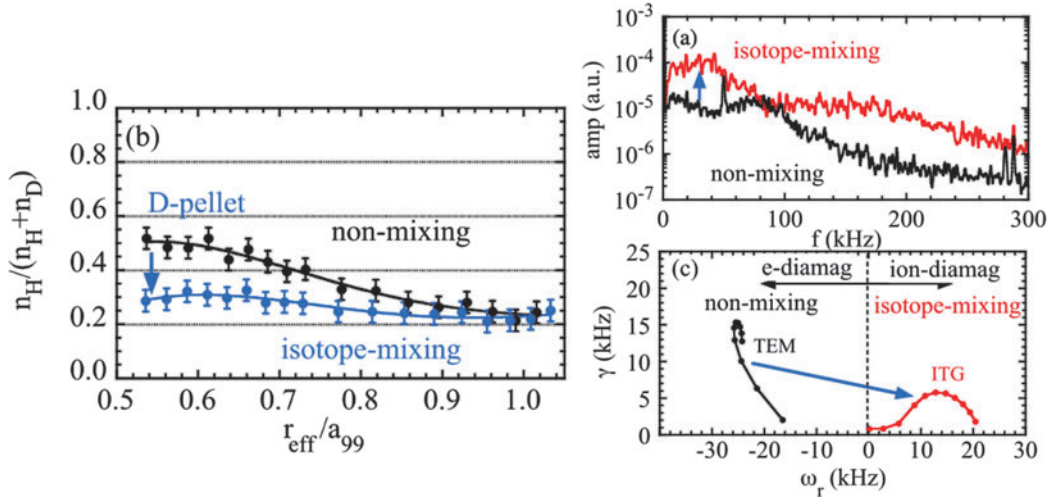


図9 左図 水素密度割合の径方向分布. 浅い侵入長の重水素ペレットを入射したにもかかわらず, 入射後に水素密度割合がフラットな分布となる. 右図: ミキシング状態では非ミキシング状態と異なり, 乱流のピークは低周波 (20–40 kHz) にシフトする. 文献[40]より引用.

発生するヘリウム灰の効率的な排出にも乱流駆動が寄与できる可能性を示唆している.

5. これからの粒子制御に向けた取り組み—まとめにかえて

本解説では, これまでに行ってきた粒子制御研究について, 筆者の行ってきた研究を中心に紹介した. 特に粒子排気の観点から壁の粒子吸蔵, 放出現象が粒子制御に与える影響について, またダイバータでの強力な粒子排気による粒子制御性についてLHDにおける成果を中心に解説した. ダイバータ排気による粒子制御は, その最大のアウトカムとして長時間の高性能プラズマ維持が挙げられるであろう. これからダイバータによる粒子制御実験が本格化するW7-X, また, これからプラズマ実験が始まろうとしているJT-60SA, ITERにおいて, 長時間放電におけるダイバータ排気の有意性がさらに示されていくに違いない. 一方で, アウトカムを得るためのプロセスはどうであろうか. JT-60SA やITERを含む現在の装置におけるダイバータ排気は, クライオポンプを使用している. しかし, 原型炉ではクライオポンプのような溜め込み式の真空ポンプは, トリチウムインベントリの観点から決して最良とは言えないだろう. さらに, プラズマの高性能化と低リサイクリングの関係と, 高リサイクリング率が望まれる原型炉の粒子制御については二律背反の関係性があり, 明確な粒子制御シナリオを描けるところまでは至っていない. また, 混合プラズマ, 特にヘリウムの排気は核融合炉の燃焼率に大きく影響するため, 混合プラズマの粒子排気は重要なテーマでもある. そういった点においては, 第4章で述べたような, 斬新なアイデア (古いアイデアだったとしても) のもとで粒子排気が効率的に行われる手法の確立というのにも必要になってくるであろうし, その創出が原型炉に向けて多大な貢献をもたらすものと考えられる. だからといって, 現在行われている粒子制御研究が否定されることにはならない. 意のままに粒子を制御するためには, どの程度のダイバータ排気が必要なのか, 壁の最適な条件はどういった

ものなのか, そういった問いに, 現在の研究の成果があってこそ答えることができる. 粒子制御がもたらすアウトカムとプロセス, 両輪で答えを出していくことが求められる.

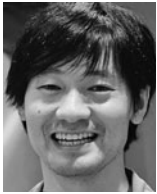
謝辞

本研究の一部は, 核融合科学研究所運営費交付金 (NIF-SULPP801 および ULPP701), 自然科学研究機構産学連携支援事業 (課題番号01512103), 公益財団法人近藤記念財団 研究助成 (2015-02) の支援を受けました. 本解説を纏めるにあたり, 核融合科学研究所の増崎貴氏, 森崎友宏氏, 田中将裕氏, マックス・プランク・プラズマ物理研究所のUwe Wenzel氏, 東洋炭素株式会社の初代善夫氏, および東邦金属株式会社の北垣慎二氏との議論が大変参考になりました. ここに感謝申し上げます. また, このような執筆の機会を提供いただいた, 編集委員の河村学思氏に重ねて感謝申し上げます.

参考文献

- [1] S. Brezinsek *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 083023 (2013).
- [2] K. Hanada *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 076007 (2019).
- [3] H. Zushi *et al.*, Nucl. Fusion **45**, S142 (2005).
- [4] Equipe Tore Supra (prepared by F. Saint-Laurent) Nucl. Fusion **40**, 1047 (2000).
- [5] D. van Houtte *et al.*, Nucl. Fusion **44**, L11 (2004).
- [6] Y. Takeiri, IEEE Trans. Plasma Sci. **46**, 1141(2018).
- [7] M. Tokitani *et al.*, J. Nucl. Mater. **438**, S818 (2013).
- [8] G. Motojima *et al.*, Plasma. Fus. Res. **10**, 1202074 (2015).
- [9] M. Tokitani *et al.*, Nucl. Mater. Energy **18**, 23 (2019).
- [10] M. Tokitani *et al.*, J. Nucl. Mater. Energy **463**, 91 (2015).
- [11] M. Oya *et al.*, Nucl. Mater. Energy **13**, 58 (2017).
- [12] H. Iwakiri *et al.*, J. Nucl. Mater. **307-311**, 135-138 (2002).
- [13] M. Miyamoto *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 065035 (2009).
- [14] G. Motojima *et al.*, J. Nucl. Mater. **463**, 1080 (2015).
- [15] G. Motojima *et al.*, Global Particle Balance and its Relationship with the Plasma Wall Interaction Emerging in Long Pulse Discharges on the Large Helical Device, EX/P8-3 IAEA FEC 2016 Kyoto, Japan EX/P8-3

- (<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202016/fec2016-preprints/preprint0516.pdf>) 2016.
- [16] Y. Kamada, Presented in Atomic Energy Society of Japan (<http://www.aesj.or.jp/~fusion/aesjfmt/H16-9kikaku-session/kamada.pdf>) 2004 (in Japanese).
- [17] S. Higashijima *et al.*, J. Nucl. Mater. **290-293**, 623 (2001).
- [18] T. Morisaki *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 063014 (2013).
- [19] G. Motojima *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 014005 (2018).
- [20] G. Motojima *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 086022 (2019).
- [21] H. Takahashi *et al.*, Nucl. Fusion **58**, 106028 (2018).
- [22] G. Motojima *et al.*, Phys. Scr. **97**, 035601 (2022).
- [23] G. Motojima *et al.*, Plasma. Fus. Res. **16**, 1202014 (2021).
- [24] G. Haas *et al.*, J. Nucl. Mater. **121**, 151 (1984).
- [25] U. Wenzel *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **92**, 083510 (2021).
- [26] U. Wenzel *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 123507 (2019).
- [27] R.J. Pearce *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 809 (2013).
- [28] X. Luo *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, 467 (2018).
- [29] G. Ehrke *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, 2757 (2019).
- [30] M. Scannapiego and C. Day, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **278**, 012160 (2017).
- [31] 村瀬尊則 他：クライオ吸着パネル及びその製造方法、並びにそれを用いた真空装置。特許第6021276号 (2016)。
- [32] 村瀬尊則 他：プラズマ・核融合学会誌 **93**, 213 (2017)。
- [33] 森下隆広：TANSO **278**, 103 (2017)。
- [34] <https://www.toyotanso.co.jp/Products/cnovel/>
- [35] <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/triporous/>
- [36] 2020年炭素材料学会 1月セミナー 講演要旨集
- [37] G. Motojima *et al.*, Fusion Eng. Des. **143**, 226 (2019).
- [38] 佐藤照幸, 高山一男：高周波封じ込めとカスプ IPPJ-REV-5 (名古屋大学プラズマ研究所, 1989).
- [39] S. Hiroe *et al.*, Nucl. Fusion **15**, 769 (1975).
- [40] K. Ida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 025002 (2020).



もと じま げん
本 島 厳

核融合科学研究所 准教授。

「核融合発電を見通せる粒子制御法の確立」に関連した物理研究を行う。具体的に、固体水素による燃料供給法の最適化研究と、ダイバータの能動的排気による周辺粒子制御の確立を目指している。最近、近所にフィットネスクラブができたので、定期的に身体を鍛えています。買い物袋を持つのを躊躇っていると、妻からは何のために鍛えているのか？と言われていました。見た目重視です。