



解説

セシウムフリー水素負イオン源

-核融合プラズマでのNBI加熱に向けて-

Cs-Free Negative Hydrogen Ion Sources for Neutral Beam Injection Heating in Fusion Plasmas

笹尾 真実子

SASAO Mamiko

同志社大学 研究開発推進機構

(原稿受付: 2024年 8月16日)

DEMO 炉における中性粒子入射装置 (NBI) の開発において、重水素負イオン源のセシウムフリー化は開発重点項目の一つとなっている。そのため、体積生成型負イオン源に立ち戻りつつも新たな知見・視座からの開発が進捗している。さらに、セシウム塗布なしで負イオン生成率の高いプラズマグリッド材料の探査が進められている。これらを俯瞰すると同時に、新材料 C12A7 エレクトライドの負イオン生成率、仕事関数変化などの最近の成果を紹介し、プラズマグリッド材料として適用性について議論する。

Keywords:

DEMO, NBI, negative ion, volume-production, surface-production, sheet plasma, recombinative-desorption, C12A7-electride

1. はじめに

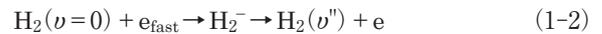
中性粒子入射装置 (NBI) は、核融合プラズマの加熱・電流駆動方法において最も効率が高い方法の一つとして近年の多くの大型装置で採用されている。核融合プラズマサイズが大きくなり密度も高くなると、正イオンビームでの中性化効率が著しく小さいイオンエネルギー領域となり、負イオン (D^-) ビーム加速が必要となる。それゆえに、JT-60U, JT-60SA, LHD では負イオン加速に基づく NBI が用いられており、高性能プラズマの実現や多様な物理研究に寄与している [1]。1 MeV 程度のイオンエネルギーが要求される ITER においても負イオン加速 NBI が用いられる [2]。さらに DEMO 炉でも NBI は重要な役目を果たすと思われる [3, 4]。それには商業運転に耐えうる NBI を用意しておかなければならない。

負イオンは、正イオンに比べると生成が難しく、しかも壊れやすい。1970 年代には、ローレンス・バークレー研究所 (LBL, 米) を中心に正イオンビームのアルカリガスセル通過により負イオンを生成することが主流であった。一方で、タンデム加速器の分野の負イオン源 [5] で以前より使われていたセシウム (Cs) をペニング型およびマグネトロン型の水素負イオン源に投入する試みが、1970 年代にブドカー原子核物理研究所 (BINP, 露) で行われ、パルスモードではあるが $1 A/cm^2$ という記録を報告した [6]。そのような中、1977 年にエコール・ポリテクニク (仏) のバカールらは、Cs 等のアルカリ金属を使用せずと

も水素プラズマ中に H^- が高密度で存在することを報告し [7]、さらにその後、光脱離法によりプラズマ中の H^- の存在を確定的なものとした [8]。実際にはそれ以前に理論的な研究で共鳴状態 (H_2^-) を介して低速電子による振動励起分子の解離性付着



により H^- が生成されることが予測されていたが、バカールらの実験結果では振動励起分子 $H_2(\nu)$ はプラズマ中の高速電子により生成され、



その後低速電子による解離性付着反応



により負イオンが生成されることを示唆している。また、振動励起分子 $H_2(\nu)$ の生成については、後述するように高温の真空容器内壁で生成される可能性も指摘されている。実際、理論的に式 (2) の解離性付着の断面積は閾値近傍で極大値となり、 $\nu=4$ の断面積は $\nu=0$ の断面積に比べても 4 桁も大きいことがわかっている。これがいわゆる水素負イオンの体積生成 (Volume Production) である。詳細はバカール・和田のレビュー論文を参考にされたい [9]。体積生成型イオン源では、高速電子 (e_{fast}) 成分のある領域と低速電子 (e_{slow}) 領域が分けられている必要が

あり、そのため通常は磁気フィルターが設置される。

一方で、前述のBINPでの実験では、イオン源の金属表面の仕事関数 (ϕ_w) がCs投入により低下したことが考えられ、並行して仕事関数が負イオン生成にどのように関わるか、表面を離れる時の速度が生成された負イオン存続にどのように関わるか (水素原子と金属の間の電子に対するポテンシャル障壁の透過度が原子から表面までの距離が増すにつれて急速に低下するため、急速に遠ざかる負イオンは中和される確率が下がる) 等の理論的研究が進展した [10]。これらの結果を踏まえて近似的に定式化したのがラッサーの式と言われ、しばしば引用されている [11]。

$$\beta^- = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi(\phi_w - E_A)}{2aV_z}\right) \quad (3)$$

ここで β^- は負イオン生成確率、 E_A は水素の電子親和力 (0.754 eV)、 V_z は表面を脱出する時の垂直方向速度、 a は遠方で電子の遷移確率となるよう定める比例定数である。以上が負イオンの表面生成 (Surface Production) である。

表面生成の進展をふまえて、LBLを中心にこれまでの体積生成型イオン源にCsを投入する試みが開始され、初期の実験で負イオンの収率が16倍となったと報告があった [12]。以来、我が国を中心に本格的なイオン源開発・大型化の努力が蓄積され [13]、JT-60Uで用いられ、現在ではJT-60SA、LHDで活躍している。これらのイオン源でも磁気フィルターが設置されており、引き出し領域付近に低速電子 (e_{slow}) 領域をつくり、プラズマ電極表面で生成された負イオンが



等の過程による損失を抑制する。

ITER用NBIにおいても、Csを導入しプラズマ電極の仕事関数 ϕ_w を下げる方式を採用する予定である。しかし、

- 負イオン生成に最適な表面状態を長時間維持できるか
- Csの漏洩による加速部での絶縁劣化の程度はどの程度なのか

などについては今後の試験結果を待たなければならない。さらにDEMO炉、商業炉にとっては、Csの補給等のメンテナンスのためのアクセスが、頻度・作業時間・接近距離ともに大幅に制限される。

NBIの負イオン源では、

- ① 極度に制限された保守・修理へのアクセスのみならず
- ② 負イオンビームの収量 ($\sim 30 \text{ mA/cm}^2$)
- ③ 同時に引き出される電子電流と負イオン電流の比の低減 ($J_e/J_{H^-} \sim 1$ 以下)
- ④ 空間的な均一性
- ⑤ 低ガス圧での運転

などの課題が同時に解決されなければならない。

そのため、我が国や欧州各国では、Csフリー負イオン源開発にむけて、基礎研究や小型試験研究が活発に行われている [14]。本記事では、次章でCsを使わない体積生成型イオン源開発の現状について、新規のイオン源プラズマ生成方式とプラズマ容器壁材料研究の2点について紹介す

る。第3章では、プラズマグリッド電極のための低仕事関数材料の開発、特に我々がここ数年取り組んでいる、エレクトライド電極の研究の現状について紹介する。

2. 体積生成型イオン源におけるCsフリー化

2.1 新規のイオン源プラズマ生成

前章で紹介したように、体積生成では、振動励起分子 $H_2(v^n)$ 生成のための高速電子を含む高温プラズマと、解離性付着のための低い電子温度のプラズマのタンデム型の構造が必要とされる。

このような背景のもとで、1980年代の名古屋大学プラズマ研究所では浦本が、シートプラズマ源での H^-/D^- 生成実験の結果を発表した。この装置では数個のヘルムホルツコイルによる均一磁場中 (B_z) で、六ホウ化ランタン (LaB_6) 冷陰極とコイルを内蔵した2枚の中間電極、装置端のアノード電極により約180 Aの放電柱を生成し、それを強力な2枚の角形永久磁石で円柱をシート型に変形する。その結果、幅20~25 cm、厚み約1.0 cm、長さ約30 cmの高エネルギーシートプラズマが生成され、その両面が低電子温度プラズマの H^-/D^- イオン生成領域となり、負イオン引出し面積 600 cm^2 以上が実現している [15, 16]。

図1にシートプラズマ領域のプラズマ源と負イオン測定系の図を示す。このシートプラズマの中心付近の磁場 (B_z) は約110 G、シートの両側の引出し電極付近 ($y \sim 15 \text{ cm}$) の磁場は約60 Gであり、プラズマ密度、電子温度はシート中心付近 ($y = 0$) でそれぞれ約 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、25 eV、シート両側の ($y = 2 \sim 15 \text{ cm}$)、引出し電極付近までが約 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 、2.0 eVと報告されており、上述の体積生成に必要なタンデム構造が実現している。また、 H^-/D^- イオン引出し領域に図1に示されるような、磁場を使った運動量分析器と全量測定のための電極を設置して、この領域

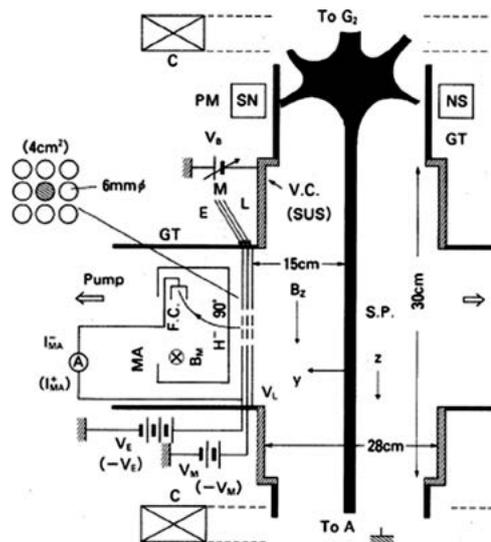


図1 Uramoto型負イオン源のシートプラズマ生成と測定部の概念図。中央上部のカスプ型プラズマが大型の永久磁石 (PM) でプラズマシートに成型されている (黒色で示されている部分)。シートの両面は低電子温度プラズマ領域であり、その端に設置された9個の $\phi 6 \text{ mm}$ の引出し穴をもつ3枚電極から引き出された負イオン、正イオンは質量分析器 (MA) で測定する。(文献 [15] より転載)

の H^- と正イオン ($H^+ + H_2^+ + H_3^+$) 電流比を測定したところこの2種の測定方法において、ともに約1:1.5の比が得られ、シート上下の周辺部に両極性プラズマに近い状況が実現していることがわかる。4.5 kVの引出し電圧においての全電流量測定の結果として、 H^- の場合、 D^- の場合それぞれ19 mA/cm²、16 mA/cm²との報告[15, 16]があるが、以降この装置はイオンインプランテーションのための装置として改造され、このタイプのシートプラズマの研究は同志社大学[17]、フィリピン大学[18]での小規模装置に引き継がれた。これらの装置では、放電電流がそれぞれ0.4 A、3 A以下である。後者の実験では、放電電流を増加させると解離性付着領域の電子温度も上がる問題があったが、少量のアルゴン (Ar) ガスやマグネシウムアノード電極を用いることによる表面での振動励起分子生成を確認している。

その後、東海大学ではUramoto型負イオン源と異なるシートプラズマ源TPDsheet-Uを使い、放電電流90 A級でのCsフリー水素負イオン源開発を行っている[19, 20]。図2はその装置図(a)、および負イオン引出し系・測定系

の概念図(b)である[21]。プラズマ中心部 ($y = 0 \sim 5$ mm) にプラズマ密度、温度が 3.5×10^{12} cm⁻³、10–20 eVの高電子温度領域が形成され、その周辺 ($y = 1.5 \sim 2.5$ cm) に 4.0×10^{11} cm⁻³、1–2 eVの低電子温度領域が形成されている。ただしTPD sheet-Uの場合、Uramoto型と異なりプラズマパラメータの空間分布がガウス分布的であるのは、シートプラズマの形成方法の違いによると思われる。この装置の負イオン引出し実験の結果、負イオン電流密度として単穴で ~ 8.4 mA/cm²を記録している。また、随伴電子電流を同時に測定し、負イオン電流との比 (J_e/J_{H^-}) を減少させるため、引出し付近に小型永久磁石フィルター (SMF: soft magnetic filter) や、 $E \times B$ ドリフト走行を遮るフェンス等を設置することにより、 J_e/J_{H^-} 比を8程度から2以下に減少させることに成功している[22]。多穴電極 ($\phi 4$ mm \times 3 \times 13) でも随伴電子電流値は高いものの約 ~ 11 mA/cm²が得られたと報告している[22]。

一方海外でも、Csフリー体積生成負イオン源の研究は、各国の予を受けて進められている。特に欧州およびオーストラリアでは修理やメンテナンスによるNBIの運転中断を避けるため、フィラメントや冷陰極を使わない、ECR放電[23–25]、ヘリコンプラズマ[26–30]を用いることを基本として開発研究を行なっている。具体的には、負イオンビームの収量を ~ 30 mA/cm²以上とすること、同時に引き出される電子電流との比 (J_e/J_{H^-}) を1以下とすることを実現するために、プラズマ内の負イオン密度を $n_{H^-} \approx 10^{11}$ cm⁻³以上にすることを目標としている。2.45 GHzのECR駆動の水素負イオン源 (Prometheus I) ではプラズマは、タンデム構造ではなく、2成分の電子温度分布を持ち、 $n_{H^-} \approx 4 \times 10^9$ cm⁻³を記録したが、作動圧力を高く、目標の負イオン密度を得るのは簡単ではない[24]。一方でヘリコンプラズマによる負イオン源では、前述の東海大学と同様に中心部に高温高密度プラズマを生成し、周辺部に低温プラズマを配置する。図3にスイスのResonant Antenna Ion Device (RAID) で測定された負イオン密度分布を示す。中心部から5 cm程離れた領域に目標の5分の1程度の負イオン密度の高い領域が形成されている。このような成果の背景に、欧州のDEMOでの採用が検討されている光脱離中性化法NBIシステム (Siphore) [31]がある。このシステムでは、ビームの断面

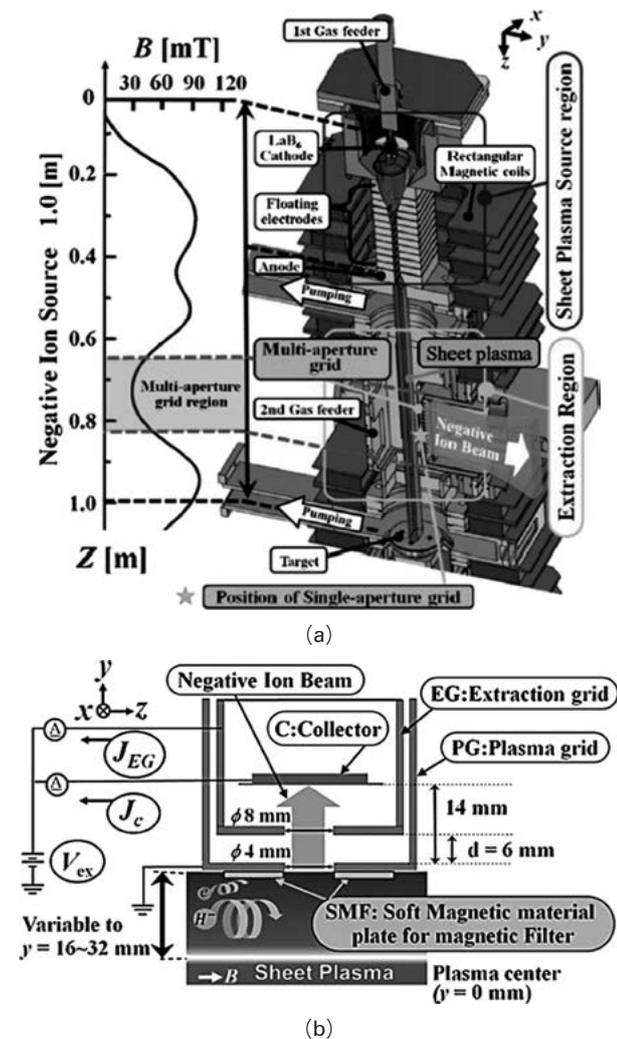


図2 (a) TPD sheet-U型水素負イオン源装置図、左側に中心での磁場の強さが示されている。(b) TPD sheet-U型水素負イオン源の単孔引出し負イオン測定系、磁気フィルターSMFにより随伴電子電流値を低減することができる。(文献[21]より転載)

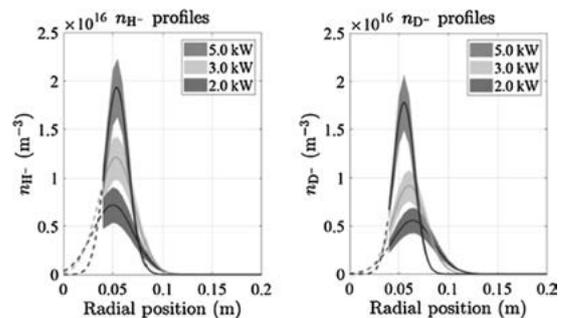


図3 13.56 MHzヘリコンプラズマ水素負イオン源 (RAID) でプローブによる光脱離法で測定された負イオン密度分布。左は軽水素、右は重水素プラズマ。負イオン密度の絶対値はCRD方法との比較で確認されている(文献[14]より転載)。

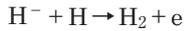
積は $3\text{ m} \times 0.03\text{ m}$ という、あたかも“刺身包丁の刃”のような形状が仮定されており、上述の RAID やフランスの Cybele といったヘリコンプラズマ型負イオン源はこの形状を意識して開発が進んでいる。

2.2 体積生成促進のための壁材料

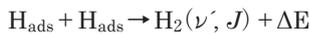
Cs フリーの体積生成型負イオン源で水素負イオン密度を増加させる方法として、振動励起分子をイオン源内壁表面で生成する方法が考えられる。この背景には、タンタル (Ta)、タングステン (W) といった高温ガスセル内壁で生成される水素分子の振動励起分布がボルツマン分布から大きくずれて高励起分布成分を持つという Hall [32] および Eenshuistra [33] らの実験結果報告がある。また最近では、フィラメントのない ECR 源でも振動励起分子の増加が報告されている [14, 25] (図 4 参照)。

Hall らの研究発表を受けて、Bacal らは、 H^- 密度および引き出される負イオン電流が、フィラメント材料および電極材料について、Ta と W でどのように違いが出るかを調べた [34-37]。それらの結果は、Ta フィラメントは明らかに負イオン密度を増加させ、それに伴い引き出される負イオン電流を増加するが、Ta を電極材料に用いても顕著な差は出ない (図 5 参照 [38])。これらの実験結果にはいくつかの解釈がありうる。

A) Ta 蒸気が引出し領域の水素原子密度を減少させ、



による負イオン密度低下を妨げていることも考えられるが、B) Ta あるいは W 表面で、会合脱離過程 (recombinative desorption) により回転振動励起分子が生成されている可能性が高い。



この会合脱離過程での分子振動の加熱については、日本物理学会誌に笠井氏らの詳しい説明がある [39]。

今後、会合脱離に関する理論的研究、様々な実験とモデル計算を行うことで振動励起分子を効率よく生成する条件が得られる可能性がある。

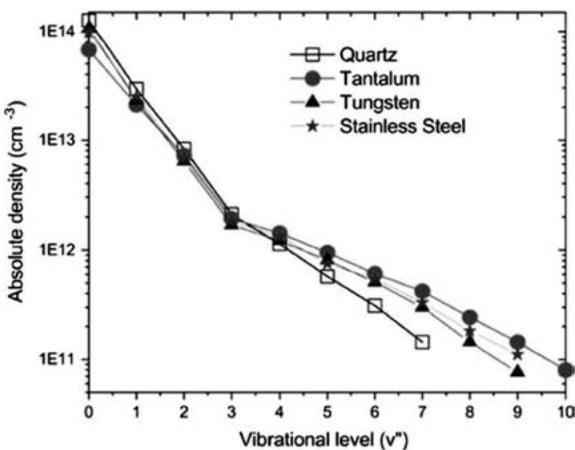


図 4 放射光 DESIRS beamline を使い ECR 源 Reactor SCHEME II + において、水素振動励起分布のイオン源容器材料依存性を測定、Ta で高振動励起分子が多く生成されている (文献 [14] より転載)。

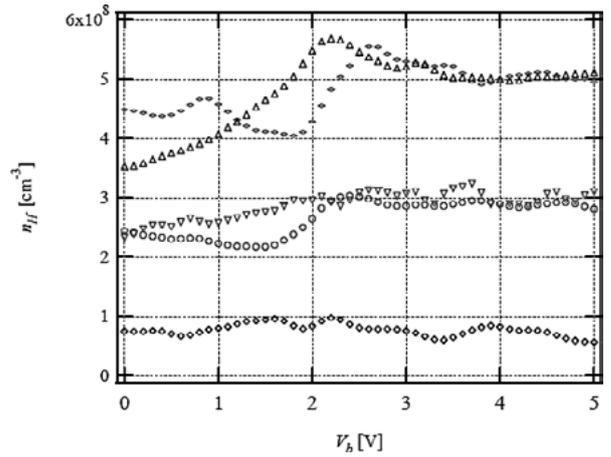


図 5 フィラメント材料とプラズマ電極材料の様々な組み合わせについて、プローブを使っての光脱離法で測定して負イオン密度のプラズマ電極バイアス電圧依存性。SUS プラズマ電極の場合、タンタル (Ta) フィラメント (Δ) とタングステン (W) フィラメント (\square) では約 2 倍の差が見られるが、プラズマ電極材料に Ta を用いても (∇)、効果は見られない (文献 [38] より転載)。

3. 低仕事関数プラズマグリッド材料開発

前述のように、現在核融合分野で活躍している H^-/D^- イオン源では、低仕事関数のプラズマグリッド上で負イオンが生成されていると考えられており、式 (3) でも示したようにその生成率は仕事関数に大いに依存する。Cs を Mo に 0.3-0.5 原子層程度塗布すると仕事関数は 1.8 eV 以下に低下するが、Cs を使用しない場合、仕事関数の低い材料としてはどのようなものがあるのか。

化学的に不安定で融点の低いアルカリ金属を除くと、Ce ($\phi_w = 2.89\text{ eV}$), Pr (2.83 eV), Sm (2.81 eV), Eu (2.74 eV), Gd (3.09 eV), Ho (3.05 eV), Yb (2.91 eV) といった希土類元素があるが [40]、プラズマグリッドのような大きなものを製作するのは現実的ではない。山口大学の原・吉田らはイオン性プラズマ (正イオンと負イオンから成るプラズマ) の研究のためアルミニウム (Al) 表面での負イオン生成の研究を行っており、さらに Al のプラズマグリッドを用いて、1 kW のアーク放電プラズマから $115\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ というビーム電流密度が得られたと報告している [41, 42]。また Cartry らは、表面から離れる負イオンの延命にバンドギャップに関わる可能性に注目し、ダイヤモンドライクカーボンや高配向性熱分解グラファイト (HOPG) について調べている [43, 44]。

一方で我々が注目したのは東京工業大学 (現 東京科学大学) の細野教授らが開発した C12A7 エレクトライドである。図 6 (a) は C12A7 エレクトライドの構造を示したもので、それぞれ正の 4 価に帯電した 12 個のケージ (直径約 0.4 nm) が 3 次元的に隣接し結晶骨格を形成している。そこに 2 つの酸素イオン (O^{2-}) が各ケージ内に緩く包接されており、自由酸素イオンと呼ばれている [45]。C12A7 全体では、自由酸素イオンの負電荷と結晶骨格の正電荷が電氣的に補償されている。自由酸素イオンは、高温域では、高速イオン拡散するので、カルシウムやチタンなど還元性の強い金属と高温で反応させることにより、C12A7 内部

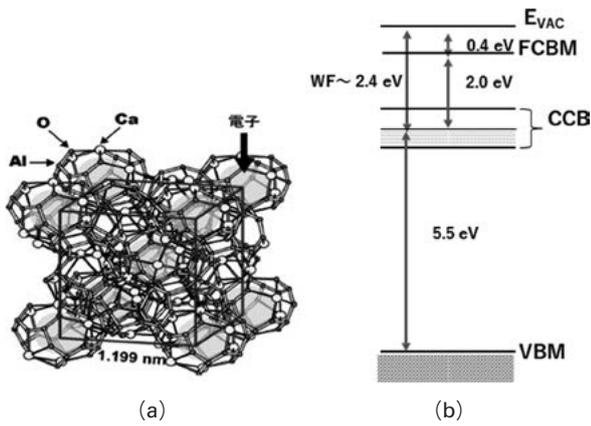


図6 (a) C12A7: e4エレクトライドのケージ構造, サブナノメータのケージが連結されケージ内に電子4個が内包されている. (文献[45]より転載). (b) C12A7: e4エレクトライドのエネルギーダイアグラム, 結晶骨格の価電子帯と伝導電子帯の間のエネルギーギャップにケージ伝導帯 (CCB) が形成され, その中にあるフェルミレベルのトップ面と真空レベル (E_{vac}) の差が仕事関数 (2.4eV) となる. FCBM: 伝導電子帯最小レベル, VBM: 価電子帯最大レベル.

のすべての自由酸素イオンを電子 (e^-) で置換することが可能となる [46,47]. 還元処理により得られた化合物は, C12A7: e^- と表すことができる. これは電子が, ケージ内の特定結晶サイトを占有し, 結晶骨格とイオン結合した化合物である. こうした電子が陰イオンとして機能する (電子陰イオン) 化合物は “電子化物” (エレクトライド) と呼ばれて, 最大 1.5×10^5 S/m の導電性を示す. また, 包接された電子に由来して, ϕ_w が 2.4 eV とアルカリ金属並みに低いことが, 紫外光分光法 (UPS) や光電子収量分光法 (PYS) 測定などで確認されている [48].

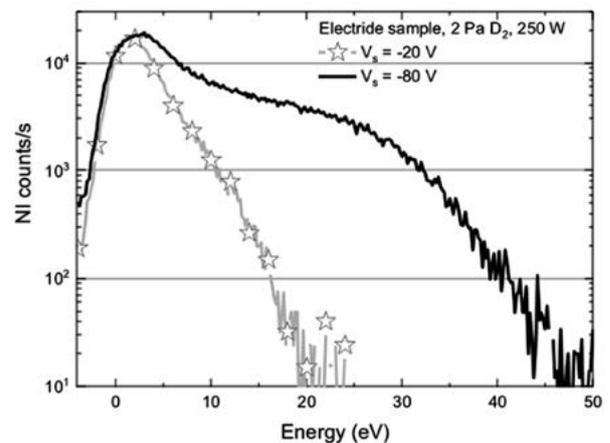
そこで我々は細野の協力を得て, (株)AGC 提供の C12A7 エレクトライドサンプルに水素原子源からの H^0 フラックスを入射し, C12A7 エレクトライドから電子以外の負電価が出ているのを確認した [49]. その後, 水素負イオン生成を直接測定し, プラズマグリッド電極材としての適性を調べるために

- (I) エクス=マルセイユ大学 (仏) におけるプラズマ中の C12A7 エレクトライドから出る負イオンの質量とエネルギーの同時分析測定
- (II) C12A7 エレクトライド製プラズマ電極をもつ小型イオン源の製作とビーム引出し実験

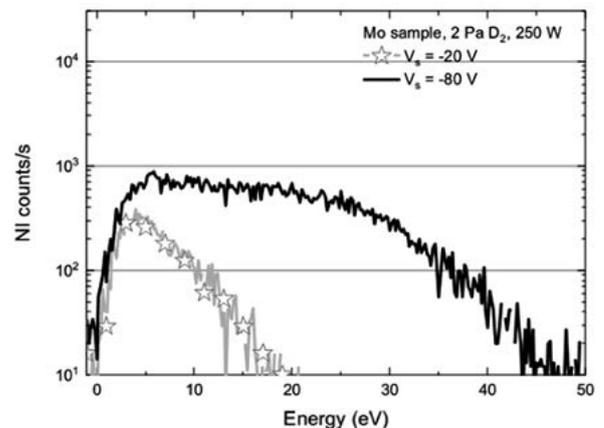
の二つの方向で研究を進めた.

(I) のエクス=マルセイユ大学 PIIM 装置は, RF (13.56 MHz) プラズマまたは ECR プラズマを測定領域に拡散させ, その中央に加熱, バイアス印加できるサンプルを設置し, プラズマイオン (又は電子) の照射により生成される負イオンをエネルギー分析可能な質量分析器 (HIDEN-EPQ200) で分析するものである [43]. 負バイアスを印加した場合, プラズマイオンはサンプル前に形成されるシースで加速されるためサンプルに垂直に入射する. 図 7 (a) は 2 Pa で 250 W の重水素の RF プラズマ中に置かれた C12A7 エレクトライド表面で生成される負イオンのスペクトルである (ただし, 横軸の粒子エネルギーはプラズマポテンシャルによる加速は測定器の入口で再度減

速されること, シースでの加速は補正済みである). この時, サンプルには -20 V (星印灰色線) または -80 V (黒線) が印加されている [50]. 出射エネルギーが $0 \sim 10$ V に見られるピークは吸着した重水素原子がイオン入射により負イオンとして脱離 (desorption by sputtering) したものが主成分と考えられる. 事実重水素プラズマ照射のちに Ar プラズマ照射に切り替えると, 切り替えた当初はこの重水素負イオンが観測される [50]. それより高いエネルギーに見られるのは, 入射イオンが負イオンとして反射 (back scattering) したものが主成分で, 入射イオンは大部分が H_3^+ であるため, それぞれ約 7V, 約 30V に肩をもつ連続スペクトルとなる. 図 7 (b) は直後にモリブデン (Mo) にプラズマイオン (または電子) を照射した場合に得られたスペクトルである. 脱離領域では C12A7 エレクトライドと Mo の比はほぼ 50 : 1 であり, 反領域では 7 : 1 であった. その後, 磁石内蔵斥電場分析器 (MRFEA) により全生成量を比較したところ Mo との比は 10 倍以上であった. 現在, この装置では波長掃引型光電子測定による



(a) C12A7



(b) Mo

図 7 (a) エクス=マルセイユ大学の PIIM において測定された RF 重水素プラズマ中で負バイアス電圧印加時 ($V_s = -20$ V と -80 V) に C12A7: e4 エレクトライド表面で生成される負イオンのスペクトル. (b) 同様にモリブデン (Mo) 表面で生成される負イオンのスペクトル. 縦軸は毎秒あたりの負イオンカウント, 横軸は補正後の粒子エネルギーで, 表面を出るときのエネルギーに相当する.

仕事関数測定が可能となっており、負イオン生成率と仕事関数の関係は式(3)とはかなり異なることもわかってきた[50-52]。これは、図6に見られるようにバンド構造にギャップがあり、表面を離れる時に負イオンの電子が伝導帯にもどることを抑制しているためと思われる。

(II)のC12A7エレクトライドを含め様々な材料のプラズマ電極をもつ小型ECRイオン源によるビーム引出し実験は主に同志社大学で行われてきた[53-55]。図8はプラズマ電極をエレクトライド、Mo、Alを用いて、小型ECR源から引き出された H^- 電流値の加速電圧依存性である。エレクトライドはMo製電極に比べると約10倍のビーム電流となっている。注意しなければならないのは、引き出された電流には体積生成による負イオンビームも含まれており、プラズマ電極材料の相違の直接的な比較ができないことである。そのため、イオン源の構造が違くとMo製電極との比は変化する。しかしいずれの場合でもC12A7エレクトライド電極はMo製電極に比べると数倍～約30倍のビーム電流となり、電極表面で負イオンが生成されていることを示している。また、Alについては、前述の吉田・大原らの報告の場合とは、イオン源プラズマ点弧方式・電力(1kW:30W)、電極形状・測定方法が異なっていることに注意しなければならない。

(I)のクス=マルセイユ大学での実験、(II)の同志社大学での実験を遂行する際に、C12A7エレクトライドをプラズマグリッド電極として用いるためのいくつかの技術的な課題をクリアすることができた。

- ① 加工製について：テーパをもつ引出し穴の加工は2mm径まで問題がない。
- ② 耐熱性：800℃までのベーキングに耐える。仕事関数は上昇するが、負イオン生成率も300℃までで大きな変化はない[44]。
- ③ 水素・重水素プラズマ照射効果：水素プラズマ照射により回復する[56,57]。

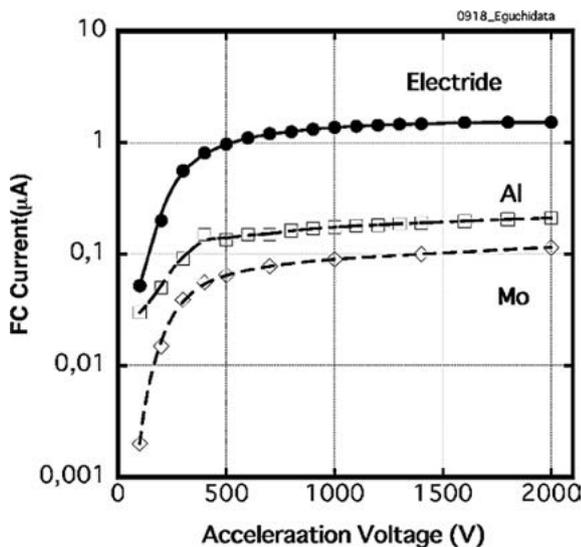


図8 小型ECR源(H_2 ガス圧 1.5×10^{-1} Pa, ECR入力28 - 30 W)から引き出された H^- 電流値の加速電圧依存性、プラズマ電極はそれぞれエレクトライド(●)、Mo(◇)、Al(□)の材質の場合の比較である。

④ 再現性：フィラメントを使った放電では、フィラメント材が蒸着され仕事関数も上がり負イオン生成も下がる。長期の使用では徐々に仕事関数も上がり負イオン生成も下がる。しかし、アルゴンスパッタリングと水素プラズマ照射により回復し、再現性は良い[57,58]。

③の水素プラズマ照射による回復については、プラズマ中の反応性水素原子による表面不純物の除去の効果と図6に示されるようなC12A7ケージ構造の中に水素負イオンが入り込むことによる新たなケージ伝導帯の出現が理論的に予測されており[59]、その影響も考えられる。

4. まとめと今後の展望

Csを使用しない方法として、シートプラズマ、あるいはヘリコンプラズマを芯としたタンデム型の体積生成法に基づいた負イオン源の研究および開発が進んでいる。現在までのところ、負イオン密度・負イオン電流密度としては目標の20%程度まで到達しており、東海大学では大電流非Cs型負イオン源のプロトタイプ(TPDsheet-NIS)を設計・製作しているということである[60]。また、Ta等により振動励起分子増大の実験結果が蓄積されており、プラズマ配位の改良と組み合わせることによりCsフリー体積生成型イオン源の将来が展望できる。

Csを使用しないプラズマグリッド電極材料の開発は、C12A7エレクトライドがアルカリ金属を用いない各種の材料のなかで、負イオンの生成率が高く、プラズマグリッド電極として用いるためのいくつかの技術的な課題をクリアしていることを考えると、現在のところでは、最も有望視できるものと考えられる。現在は中規模のイオン源実験の実験結果を待っている状況である[61]。また、我々の研究で、仕事関数と負イオン生成量の関係は、エレクトライドや半導体の場合は従来考えられていたモデルをミクロスコピックな観点で見直す必要があることがわかった。一方、表面での負イオン生成は引出しシースへの輸送も考える必要があるが、エレクトライドの場合、プロトンおよび水素分子イオン入射による反射実験では、斜入射斜出射の場合負イオン化が正イオン化に比べて異常に高いという実験結果が最近報告された[62]。そのため今後はさらに好条件で高効率の負イオン生成ができる可能性がある。

本稿であまり議論しなかった項目のひとつに、①同時に引き出される電子電流と負イオン電流の比($J_e/J_{H^-} \sim 1$ 以下)、②低ガス圧での運転などの問題があるが、これらは負イオンの生成が十分に引出し領域近辺のプラズマが両極性に近い条件が満たされる、あるいは振動励起分子の付加的な生成が期待できれば緩和される可能性がある。そのためにも、両極性に近い条件やイオン性プラズマの研究等が重要な役割を果たす。

永年負イオン源開発に携わってきたが、負イオン電流の計測の難しさに苦勞してきた。例え磁場を使っても電子はどこからでも混入してくる。電流の熱的測定、プローブ計測、負イオン密度光脱離法の併用など多面的な計測と上述のプラズマ物理・プラズマ固体表面相互作用との研究連携が不可欠である。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、東京工業大学（現 東京科学大学）の細野秀雄先生、同志社大学の和田元先生、東海大学の利根川昭先生には貴重な知見をいただき、ご議論いただいたことに深く感謝いたします。また、C12A7エレクトライドについて(株)AGCのご協力をいただいたこと、ならびに同社の宮川直通博士、渡邊暁博士、戸田喜丈博士には貴重な知見をいただき、ご議論いただいたことに深く感謝いたします。日本原子力研究開発機構J-PARCセンターの神藤勝啓氏には本記事の企画・編集でたいへんお世話になりました。ここに感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Y. Takeiri *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 565 (2005).
- [2] R.S. Hemsworth *et al.*, New J. Phys. **19** 025005 (2017).
- [3] 柏木美恵子：プラズマ・核融合学会誌 **95**, 345 (2019).
- [4] R. McAdams, Rev. Sci. Instrum. **85**, 02B319 (2014).
- [5] R. Middleton, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **214** 139 (1983).
G. Alton, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **37-38**, 45 (1989).
- [6] Y.I. Belchenko *et al.*, Nucl. Fusion, **14**, 113 (1974).
- [7] E. Nicolopoulou *et al.*, J. Phys. France, **38**, 1399 (1977). also “Proc. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams”, K. Prelec (eds), BNL Report 50727, 26 (1977).
- [8] M. Bacal and G.W. Hamilton, Phys. Rev. Lett. **42**, 1538 (1979).
- [9] M. Bacal and M. Wada, Appl. Phys. Rev. **2**, 021305 (2015).
M. Bacal and M. Wada, “Fundamental processes of hydrogen negative ion production in ion source plasma volume”, in “Physics and Applications of Hydrogen Negative Ion Sources”, M. Bacal (eds) Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, 124. Springer, Cham., 2023.
- [10] M.E. Kishinevskii, Zh. Tekh. Fiz., **45**, 1281 (1975).
- [11] B. Rasser *et al.*, Surf. Sci. **118** 697 (1982).
- [12] S.R. Walther *et al.*, J. Appl. Phys. **64**, 3424 (1988).
- [13] Y. Okumura *et al.*, AIP Conf. Proc. **210** 169 (1990).
Y. Takeiri *et al.*, AIP Conf. Proc. **1515**, 139 (2013).
M. Kashiwagi *et al.*, Fusion Eng. Des. **96-97**, 107 (2015).
- [14] F. Taccogna *et al.*, Eur. Phys. J. D **75**, 227 (2021).
- [15] 浦本上進：真空 **29**, 212 (1986).
- [16] J. Uramoto, AIP Conf. Proc. **158**, 319 (1987).
- [17] M. Wada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **61**, 430 (1990).
- [18] V.R. Noguera *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **266**, 2627 (2008).
- [19] K. Hanai *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, 2721 (2020).
- [20] K. Hanai, Plasma and Fusion Res. **15**, 2401029 (2020).
- [21] A. Tonegawa *et al.*, Nucl. Fusion **61**, 106030 (2021).
- [22] H. Kaminaga *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **91**, 113302 (2020).
- [23] S. Bechu *et al.*, AIP Conf. Proc. **1097**, 74 (2009).
- [24] S. Aleiferis *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 095203 (2016).
- [25] P. Svarnas *et al.*, “ECR-driven negative ion sources operating with hydrogen and deuterium” in “Physics and Applications of Hydrogen Negative Ion Sources”, M. Bacal (eds) Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, 124. Springer, Cham., 2023.
- [26] J. Santoso *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 093513 (2015).
- [27] A. Simonin *et al.*, New J. Phys. **18**, 125005 (2016).
- [28] C. Marini *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 036024 (2017).
- [29] J. Santoso *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 093513 (2015).
- [30] I. Furno *et al.*, EPJ Web of Conferences **157**, 03014 (2017).
- [31] A. Simonin *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 123020 (2015).
- [32] R.I. Hall *et al.*, Phys. Rev. Lett. **60**, 337 (1988).
- [33] P.J. Eenshuistra *et al.*, Phys. Rev. Lett. **60**, 341 (1988).
- [34] T. Inoue *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **1**, 75 (1992).
- [35] M. Bacal *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 1699 (2004).
- [36] S. Masaki *et al.*, AIP Conf. Proc. **2052**, 020002 (2018).
- [37] M. Bacal *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 075014 (2021).
- [38] K. Maeshiro *et al.*, AIP Conf. Proc. **2373**, 100005 (2020).
- [39] 笠井秀明 他：日本物理学会誌 **52**, 824 (1997).
- [40] H. Kawano, Progress in Surface Science **97**, 100583 (2022).
- [41] M. Yoshida *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 033512 (2021).
- [42] W. Oohara *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 083518 (2016).
- [43] G. Cartry *et al.*, New J. Phys. **19**, 025010 (2017).
- [44] M. Sasao and G. Cartry, “Plasma electrode for cesium-free negative hydrogen ion sources”, in “Physics and Applications of Hydrogen Negative Ion Sources”, M. Bacal (eds) Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, 124. Springer, Cham., 2023.
- [45] 戸田喜丈：東京工業大学博士論文（2007年3月）。
- [46] S. Matsuishi *et al.*, Science **301**, 626 (2003).
- [47] H. Hosono, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 090001 (2013).
- [48] Y. Toda *et al.*, Adv. Mater. **19**, 3564 (2007).
- [49] M. Sasao *et al.*, AIP Conf. Proc. **1869**, 020005 (2017).
- [50] M. Sasao *et al.*, Appl. Phys. Express **11**, 066201 (2018).
- [51] G. Cartry *et al.*, presented at ICPIG2023, and NIBS2024.
- [52] Om Raval, private communication.
- [53] M. Kobayashi *et al.*, AIP Conf. Proc. **2052**, 020003 (2018).
- [54] T. Eguchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **91**, 013508 (2020).
- [55] K. Bito *et al.*, AIP Conf. Proc. **2373**, 030006 (2021).
- [56] A. Heiler *et al.*, AIP Conf. Proc. **2373**, 020004 (2021).
- [57] M. Sasao *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **2743** 012028 (2024).
- [58] 西脇万由子：同志社大学修士論文（2024年3月）。
- [59] P.V. Sushko *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **129**, 942 (2007).
- [60] A. Tonegawa, private communication.
- [61] 星野航希 他, C12A7エレクトライドを用いたセシウムフリー kW 級高周波水素負イオン源における負イオンビーム特性, 2024プラズマ・核融合学会 第41回年会。
- [62] H. Yamaoka *et al.*, J. Appl. Phys. **136**, 043306 (2024).



ささ お ま み こ
笹尾 真実子

同志社大学研究開発推進機構嘱託研究員。
1976年東北大学理学研究科原子核理学専攻終了。博士（理学）。5年のポストク後、分野を変更して名古屋大学プラズマ研究所に就職。核融合科学研究所を経て東北大学へ。主な研究分野は核反応計測。計測用ヘリウム・リチウム負イオン源開発。ITPA計測G。特定領域研究「プラズマ燃焼のための先進計測」等で活動。現在は同志社大学で学生さん達と水素負イオン源開発研究を行っている。