

医療用水素負イオン源における
水素負イオン生成量増大のための数値シミュレーション
**Numerical Simulation for enhancement of H⁻ Production
in Hydrogen Negative Ion Source for Medical Use**

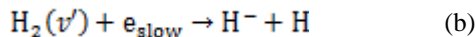
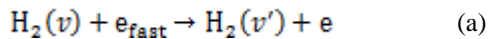
山田翔太¹, 北見尚久², 野村真史², 青木康², 星野一生¹, 畑山明聖¹
YAMADA Shota¹, KITAMI Hisashi², NOMURA Shinji², AOKI Yasushi²,
HOSHINO Kazuo¹, HATAYAMA Akiyoshi¹

¹慶大理工, ²住友重機械工業
¹Keio Univ., ²Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

1. 研究背景, 目的

次世代癌治療法であるホウ素中性子補足療法の治療時間短縮に向け, 医療用水素負イオン源における水素負イオン (H⁻) 生成量増大が要求されている^[1].

医療用水素負イオン源では, チャンバー内に形成される水素プラズマ気相中で, 体積生成と呼ばれる衝突過程により H⁻ が生成される. 体積生成は, 以下の(a)振動励起反応と(b)解離性付着反応 (Dissociative Attachment: DA) の2段階から成る.



前者では, H₂分子に 10 eV 以上の高温電子が衝突することで, H₂分子の振動励起準位が上がる ($v < v'$). 後者では, 1 eV 程度の低温電子が振動励起分子に衝突することで, H⁻ が解離生成される.

また, チャンバー内はフィルタ磁場と呼ばれる横磁場により, ドライバ領域と引出領域に二分される. 前者は, 高温・高密度電子領域となり, (a)振動励起反応が支配的となる. 一方, 後者は低温・低密度電子領域となり, (b) DA 反応が支配的となる.

本研究の目的は, 負イオン源の運転パラメータが, H⁻体積生成に与える影響を理解し, H⁻生成量増大に貢献することである. 本発表では, フィルタ磁場構造が H⁻体積生成に及ぼす影響を, 数値シミュレーションを用いて解析した結果について報告する.

2. 手法

Figure 1 に示した 2 種類のフィルタ磁場分布について, 引出領域 (Z=0-20 mm) の H⁻密度を計算した. チャンバーは半径 48.8 mm, 高さ 159.1 mm の円筒形であり, Z 軸は円筒軸と一致する. フィルタ磁場は Z 垂直方向に印加され, その強度は Z 依存性を持つ.

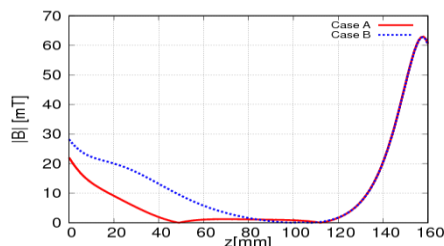


Fig. 1 Strength of magnetic filter field along Z-axis

<計算モデル>

運動論的粒子輸送モデルである, KEIO-MARC code^[2,3]を用いて, イオン源内各点の電子エネルギー分布 (Electron Energy Distribution Function: EEDF) を求めた. 本コードでは 3 次元装置形状, 3 次元磁場配位を考慮し, 運動方程式から電子軌道を追跡する. また, モンテカルロ法により, 弾性・非弾性衝突, クーロン衝突過程が計算される.

続いて, (i)各振動励起準位のレート方程式を解き, 全準位の H₂分子密度を求めた. さらに, (ii)定常状態における H⁻粒子バランスの式から, 引出領域の H⁻密度を計算した. なお, (i)では, ドライバ領域 (Z=20-159.1 mm) を代表して Z=80 mm の EEDF, (ii)では引出領域 (Z=0-20 mm) で平均した EEDF を用いた.

3. 結果

Table 1 に, 2 種類のフィルタ磁場における, 引出領域の H⁻密度, 電子密度を示した. Case B では, Case A に対して H⁻密度が約 1 桁低くなるのがわかった.

Case B では, フィルタ磁場の強度・印加範囲が Case A に比べて大きく設計されており, フィルタ効果による電子密度減少が大きくなる. この結果, 引出領域における Case B 電子密度は, Case A に対して約 1 桁低くなっており, この電子密度の差から, 引出領域における H⁻密度の差は説明される.

Table 1 H⁻ density in the extraction region

	Case A	Case B
H ⁻ density [m ⁻³]	4.3 × 10 ¹⁶	4.7 × 10 ¹⁵
Electron density [m ⁻³]	3.2 × 10 ¹⁷	3.6 × 10 ¹⁶

4. 結論

フィルタ磁場の強度・印加範囲を増大させることが, 引出領域における電子密度, ひいては H⁻密度に大きく影響することがわかった. 今後は, 複数のフィルタ磁場分布での解析を通じ, H⁻体積生成量増大に向けたフィルタ磁場分布の検討を行う.

参考文献

- [1] H. Etoh, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 02B107 (2014).
- [2] T. Shibata, *et al.*, J. Appl. Phys, **114** 143301 (2013).
- [3] A. Hatayama, *et al.*, New J. Phys., **20** 065001 (2018).