

[12P-17]

## ION-PUMPING EFFECT IN A PULSED PIGIS

T. Miyata<sup>\*</sup>), K. Jincho, M. Yamamoto, H. Ogawa, K. Ueda  
A. Kitagawa<sup>A)</sup>, M. Muramatsu<sup>A)</sup>, T. Murakami<sup>A)</sup>, S. Yamada<sup>A)</sup>, and Y. Sato<sup>A)</sup>

Accelerator Engineering Corporation  
NIRS-HIMAC, Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba-ken, 263-8555 JAPAN

<sup>A)</sup>National Institute of Radiological Sciences  
Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba-ken, 263-8555 JAPAN

### Abstract

Since 1994, at HIMAC in the National Institute of Radiological Sciences (NIRS), the Penning ionized-gauge ion source (PIGIS) has so far been used for radiotherapy with carbon beams and for basic research with several ion species. The source can produce beams from H<sub>2</sub> to Fe with a charge-to-mass ratio of between 1/7 and 1/2. Under the low-gas pressure by an ion-pumping effect, it is possible to produce highly charged ions, for example 400 eμA of Ar<sup>8+</sup> or 500 eμA of Si<sup>5+</sup>. For most of cw-PIGISs, it was generally difficult to produce such highly charged ions due mainly to the high-gas pressure for stabilizing the arc. This paper describes the mechanisms for producing highly charged ions in PIGIS.

### パルス PIG イオン源のイオンポンプ効果

#### 1. はじめに

PIG イオン源にとって多価イオンの生成が困難であるが、それは主に以下に挙げた理由による。

1) 電子衝突電離に必要な電子の運動エネルギーが、K 殻や L 殻のような核外電子のなかでも深いポテンシャルに存在する電子を弾き飛ばすには不十分であること (< keV)。2) 短いイオン閉じ込め時間。3) アーク放電プラズマを安定に維持するために必要な高いガス圧力。

Ar<sup>8+</sup>を例にとると、cw 運転においては数 eμA あるいはそれ以下の桁でしかビーム量が得られないが、低デューティーのパルス運転では低価イオンで数 emA の桁のビーム量が容易に得られると共に、多価イオンに関してもその収量が大幅に (~3 桁) 増加する。

多価イオンの生成量を増加させる方法として、最小ガ

ス流量の実現またはガスパルシング (ガス供給のパルス化) 技術が挙げられる。前者はしばしばアーク放電の不安定化を招き、また後者は放電開始時での高いガス圧力と多価イオン生成のための低いガス圧力の両方を達成することができるが、装置の複雑化を招く。

NIRS-PIGIS では、ガス供給はパルス化されていない。しかしアーク放電がパルス化されているため、多価イオン生成を可能にするイオン源内のガス圧力の遷移応答がみられることが分かった。

この論文では、パルス PIG イオン源でのガスパルシングと類似した現象であるイオンポンプ効果について述べる。

#### 2. NIRS-PIGIS について

NIRS-PIGIS は多価イオンビーム生成を目的に設計製作されており、詳細は文献[1, 2]に記載されている。

<sup>\*</sup>) T. Miyata, 043-251-4484, aec2g@nirs.go.jp

NIRS-PIGIS はフィラメントを持つホットカソード型の PIGIS であり、カソードの加熱電力は通常約 500 W である。また  $Ar^{7+}$  や  $Ar^{8+}$  のような多価イオン生成を目的とした通常のパルス運転時において、アーク電力は約 5 kWpeak、デューティは 1 %以下である。パルス運転の周期は 1.2Hz であり、これは HIMAC 入射器の運転周期と同じである。なおシンクロトンへ入射するビーム時間幅は通常 350 $\mu$ s となっている。

### 3. 多価イオン生成の観測

Ar ガスを、アーク放電が安定に維持するのに必要な、可能な限り少ない流量(約 0.2cc/min)でパルス PIG イオン源に導入し、周期 1.2Hz、時間幅 9.0ms でアーク放電を起こさせた。この時に観測されたアーク放電電圧、引き出し電流、 $Ar^{8+}$ ビーム量の時間変化を図 1 に示す。アーク放電開始の約 6ms 後から、イオンポンプ効果によるアーク電圧の増大、同時に引き出し電流の減少と  $Ar^{8+}$ ビーム量の減少が認められる。

### 4. イオンポンプ効果と多価イオン生成

低い運転周期(< 1 Hz)及び短いアーク放電時間(< 10 ms)を考慮すると、アーク電力が時間平均で通常 50 W 以下と小さいことや冷却水の効果により、チムニ(プラズマ生成室)壁表面からのガス放出は周期的であると考えられる。ガス流量一定の下での平衡状態において、中性粒子はアーク OFF の間(< 1 s)にチムニ壁に吸着され、アーク ON と同時にチムニ壁から急速に放出されると考えられる。以下にイオンポンプ効果についての仮説とその根拠となる観測結果について述べる。

#### 4.1 仮説

ここではイオンポンプ効果の発生とそれがどのように多価イオン生成に寄与しているかについて、図 1 の波形に沿って、時系列的に説明する。図 1 の上に仮説のモデル曲線を示しておく。

- 1)アーク ON の直前までは上で述べたようにチムニ壁からのガスの放出と壁への吸着が平衡状態にあるため、チムニ内のガス圧力は一定値を保つ(約  $1 \times 10^{-3}$  Torr)。
- 2)アーク ON によりプラズマが発生し、チムニ壁面から

中性粒子のアウトガスが発生するため、急速にガス圧力が増大しアーク放電(プラズマ)が安定に維持される。アーク電流( $I_{arc}$ )は、イオン電流としてカソードに流入して消滅する( $I_i$ )と同時にビームとしてチムニの外に引き出される( $I_{ext}$ )。

$$I_{arc} \sim I_i + I_{ext}$$

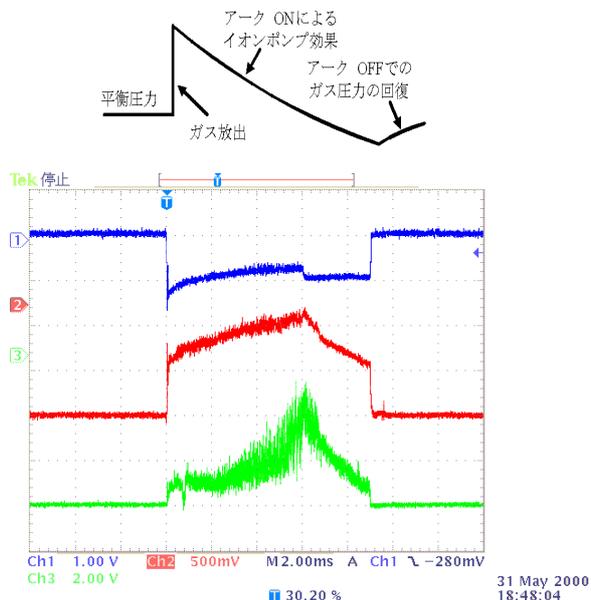


図 1. 多価イオン生成によるイオンポンプ効果

ガス: Ar (0.2 cc/min)

上: アーク電圧 1 kV/div.

中: 引出電流 15 mA/div.

下:  $Ar^{8+}$ ビーム波形 200  $\mu$ A/div. (400  $\mu$ Apeak)

図 1 の上にある曲線は縦軸をガス圧力にとり、図 1 に合わせて 4.1 の仮説をモデル化したもの。

$Ar^{8+}$ ビームを数 100  $\mu$ A 生成する場合、 $I_{arc}$ として約 5 A が必要となる。この時  $I_{ext}$  は 100 mA 以下なので、90 %程度のほとんどのイオンはカソードに流れ込んでイオンポンプ効果を生む要因となる。こうして数 ms の間にほとんどの中性粒子がチムニから消失し、アウトガスはポンプ効果により直ちに枯れる。3)中性粒子数はコンダクタンスの小さい導入ガス系では十分に補完されず、チムニ内の中性粒子数は急速に減少する。4)中性粒子数が不足になる前のアーク ON から約 6 ms において十分に低いガス圧力の下、大収率の  $Ar^{8+}$ が得られる(400  $\mu$ Apeak)。5)その後中性粒子数は不足し、

イオンの収率がアークOFF(アークONから9 ms)まで低下し続ける。6)アーク OFF 後チムニ壁面での中性粒子の吸着と放出が平衡に戻り始める。

#### 4.2 観測結果

真空チャンバー(約 50 l)はチムニ(約 10 cc)と比較して 3 桁も容積が大きく、またチムニからチャンバーに排出されるガスは開口部サイズが 1×30 mm のスリットを通過しなければならず、また真空計はアーク放電発生場所から 1 m 程離れている(図 2)ため、真空計の応答はチムニ内のガス圧力の変化よりもかなり遅いと考えられる。更に真空計(Penning gauge)自身の応答時間による遅れもある。Ar ガスでアーク放電を起こした時のアーク放電と真空計によるガス圧力のパターンを図 3a,b に示す。図 3a によると、アーク ON 後ガス圧力は増大し、その後アーク ON 前の平衡圧力を下回りアーク OFF と同時に上がり始め、アーク OFF から約 100 ms で元のガス圧力に戻っている。

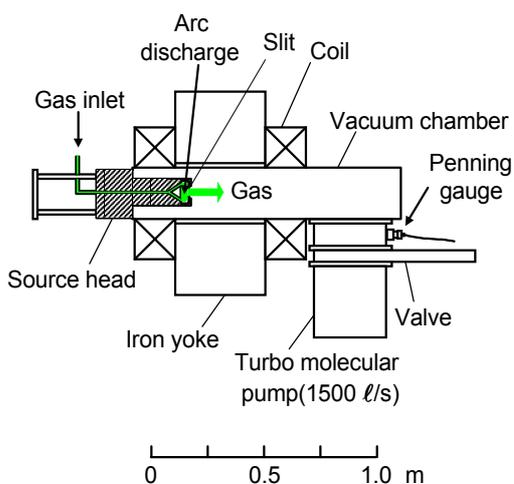


図 2. PIGIS 断面図

真空計(Penning gauge)はアーク放電発生場所から約 1 m 離れている。

#### 5. 結論

仮説として示したポンプ効果によるガス圧力の曲線が実際の圧力変動をうまく説明していることは、引出電流パターン及びイオンビーム波形の観測結果から判断して間違いないだろう。これまで低価イオン生成用とされてきた PIGIS だが、イオン源自身をパルス化することに

よって非常に低いガス圧力の条件をつくり出せることが解った。これにより PIGIS が最新の ECRIS に匹敵する多価イオン生成( $\text{Ar}^{8+}$ 等)にも十分応用できると証明された。

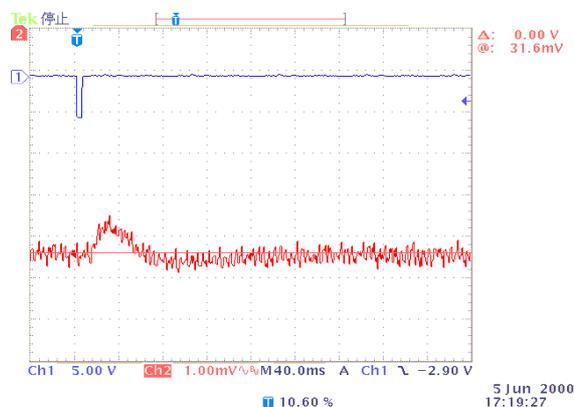


図 3a. アーク放電によるガス圧力の変化  
上:アーク放電電流 (5 Apeak, 5 ms)  
下:ガス圧力変動 ( $7 \times 10^{-6}$  torr)

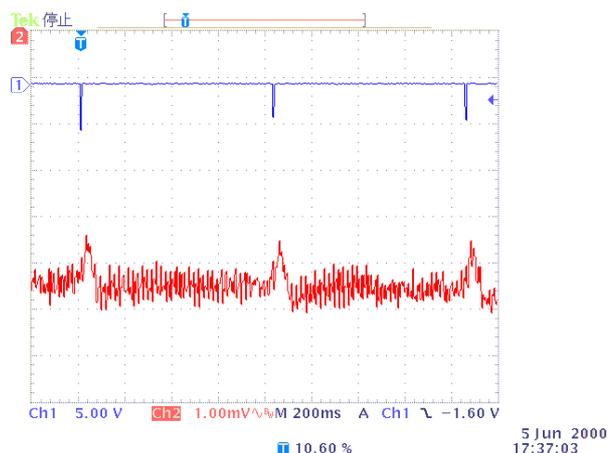


図 3b. アーク放電によるガス圧力の変化  
周期 1.2 Hz  
上:アーク放電電流 (5 Apeak, 5 ms)  
下:ガス圧力変動 ( $7 \times 10^{-6}$  torr)

#### 参考文献

- [1]Y. Sato, A. Kitagawa, H. Ogawa and S. Yamada, J. Appl. Phys. **76**, 3947 (1994)
- [2]T. Miyata *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **71**, No.2, Part II, 972 (2000)