

SLOWRI——汎用低速 RI ビーム生成法——

和田道治

（理化学研究所原子物理研究室 351-0198 和光市広沢 2-1 e-mail: mw@riken.jp）

高周波イオンガイド法という新しいビーム減速冷却・捕集機構によって、高速の放射性同位体ビーム（RI ビーム）から低速 RI ビーム、あるいは静止 RI イオンを高効率で生成することができるようになった。これによって、次世代 RI ビーム施設の一つの目標である、あらゆる元素の生成可能な同位体を、ビーム強度を除いては安定核ビームと同等の品質で提供する手法の道を開いた。この方法に基づいた低速 RI ビーム施設（SLOWRI）が理化学研究所の RI ビームファクトリの一施設として建設が進められている。

1. はじめに

高エネルギー（ $>1 \text{ GeV}$ ）RI ビーム（放射性同位体ビーム）を高速・高効率で減速・冷却する技術は、次世代の RI ビーム施設実現に不可欠である。不安定原子核、とりわけ安定核から遠く離れた短寿命原子核は、高エネルギー原子核反応によるビーム核あるいはターゲット核の核破碎反応によって生成される。近年、理化学研究所の加速器施設（RIKEN-RARF）のような重イオン加速器施設において、広範囲の核種の高エネルギー RI ビームを、元素の化学的性質や原子核の寿命の制限をほとんど受けずに提供することが可能になってきた。¹⁾ その RI ビームの生成・分離には入射核破砕片分離器（projectile fragment separator）が用いられている。しかしながらそのビームの強度、品質、とりわけビームエネルギーおよびその広がり、ビームエミッタス、イオン純度については、従来の加速器から提供される安定核ビームと比べ格段に劣る。

次世代 RI ビーム施設は、生成可能なあらゆる不安定原子核を静止状態から核子あたり数 MeV 程度、あるいはさらに高いエネルギーまでの広いエネルギー範囲で、強度以外の点では安定核ビームと遜色ない RI ビームを提供する

ことをを目指している。その一つのアプローチは、生成した不安定核をターゲット中で停止させ、その物質中の拡散、蒸発、およびイオン源でのイオン化の過程を通じて核種の選別・分離を行い、その後再加速を行うもので、ISOL（オンライン同位体分離器）型 RI ビーム加速法と分類される。この方式では、物質中の拡散・蒸発しやすさとイオン化効率が元素によって大きく異なるため汎元素性は望めないながら、特定の元素については大強度（毎秒 10^8 個以上）の RI ビームを安定核ビームに極めて近い品質で提供することができる。基本的な技術は長年にわたって各地で開発されてきており、既にいくつかの施設が運用されている。²⁾ 日本では、KEK-JAERI の短寿命核分離加速実験装置（TRIAC: Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex）がこれに該当する。海外では、米オークリッジ国立研究所の HRIBF、カナダ TRIUMF の ISAC、欧州 CERN の REX-ISOLDE が稼働している。もう一つの方法は、入射核破砕片分離器で一旦生成分離された高エネルギー RI ビームを減速・冷却し必要なエネルギーまで再加速するもので、化学過程を本質的に含まない、汎元素な手法である。図 1 に示すように、生成時の核子あたり 100 MeV からエネルギー減衰板、ガスセルによる減速、さらにガスおよびレーザー冷却による μeV に至る過程は、最大 10^{-15} 倍もの運動エネルギーの変化を制御するものであり、いくつかの異なる過程を経て初めて達成される。筆者らは、この過程の鍵となる新しい技法を提案し試験を重ねてきており、一定の性能を得ることに成功し、ごく最近、 ^{10}Be イオンにおいてこの全過程を一筋に完遂させることに成功した。この技術を用いて、理化学研究所の次期加速器施設である RI ビームファクトリにおいて汎元素低速 RI ビーム施設（SLOWRI）計画を進めている。

2. SLOWRI 計画

SLOWRI 計画は、あらゆる元素の原子核をとりわけ低エネルギー（30 keV 以下）ないしはトラップ中に静止した不安定核イオンとして精密分光実験に提供しようとするものである。全体構成を図 2 に示す。重イオンサイクロトロンと入射核破砕片分離器によって得られる高エネルギー RI ビームをまずエネルギー減衰板によって核子あたり数 MeV まで減速させた後、100 Torr ほどの圧力のヘリウムガ

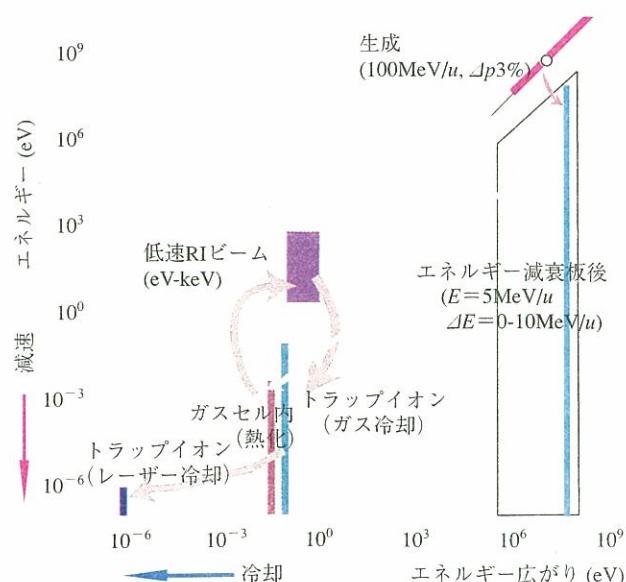


図 1 入射核破砕片分離器からの高エネルギー RI ビームから最終的にレーザー冷却されるまでの減速・冷却過程。エネルギー減衰板による減速だけでは核子あたり 0~数 MeV ものエネルギー分布を持つため、実用的な低速ビーム生成には強力な冷却機構が必須である。

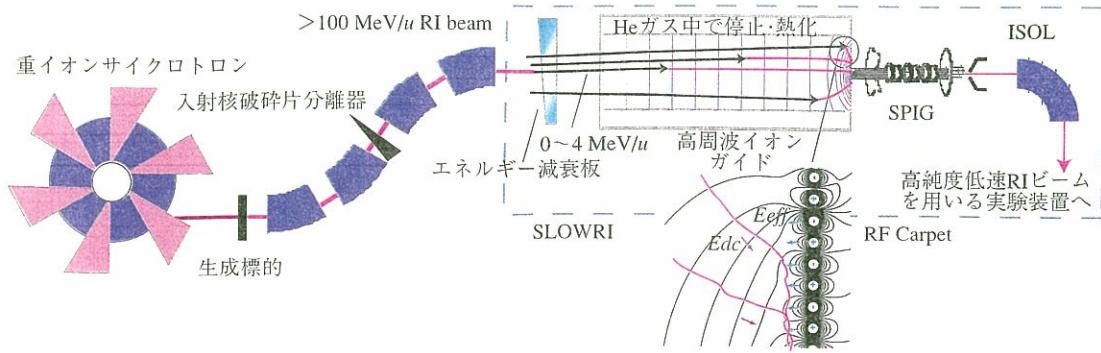


図2 汎元素低速 RI ビーム施設 (SLOWRI) 計画の模式図.

スを充填した厚さ 2 m もの大きなセルに入射し熱化させる。ヘリウムの高いイオン化電位のため、多くの入射イオンが 1 倍の正イオンの状態で熱化する。この熱化イオンを効率よく真空中に導き出すための機構が高周波イオンガイド法と名づけた新しい技術である。この高周波イオンガイド法でガスセルから引き出された熱化イオンは、さらに高周波六重極イオンビームガイド (SPIG) によって残留ヘリウムガスと分離されると同時に冷却・パンチ化後、超高真空領域まで輸送され、必要に応じて静電加速・質量分離され (ISOL) 各種実験装置へと導かれる。

2.1 イオンガイド法

ヘリウムガス中で熱化したイオンを引き出してイオンビームにする方式は、1970年代にユバスキラ大学で開発されたイオンガイド式オンライン同位体分離器 (IGISOL)³⁾ に起源を持つ。IGISOL では、小型 (100 cc 程度) のガスセル中に置いたターゲットにサイクロトロンビームを照射し、原子核反応によって不安定核を生成する。反跳エネルギーによってターゲット物質からイオンとして飛び出してくる不安定核を熱化し、そのイオンをセルの出口に開けた小さな (1 mm ϕ 以下) ノズルからガスの流れによって引き出す。これを従来の ISOL のイオン源として用いることによってこれまで困難であった高融点元素の低速不安定核ビームを生成することに成功した。⁴⁾ 仙台、ルーパン等の ISOL 施設でも採用され、数々の新同位体の発見、寿命・質量決定等画期的な成果を上げた。^{5, 6)} IGISOL 法の最大の弱点は、有効ターゲット厚が小さいことに起因する収量の低さと、ISOL で加速する際に残量ガスとの衝突によって生じる比較的大きなエネルギー広がりである。後者については、本稿で紹介する、筆者らによる高周波六重極イオンビームガイド (SPIG) によるビーム冷却^{7, 8)} や、別の冷却法⁹⁾ によって改善することができるようになったが、前者の問題はより本質的であった。イオンガイド法では、熱化イオンの輸送をガスの流れだけに頼っているため、原子核の寿命や中性化等の様々な化学反応率に比べて十分早く引き出すためにはセルの大きさが制限される。そのため反跳イオンのガス中の阻止能は高々核子あたり 10 keV である。反応生成物のうち、ターゲット中で減速されターゲット表面から核子あたり 10 keV 以下で出射したものだけがガス中で熱化で

きる。より高いエネルギーの成分、すなわちより表面付近で生成されたイオンはセルに衝突して失われ、ターゲットのより深い部分で生成されたイオンはターゲット中で停止して失われる。反跳エ

ネルギーの高い、核分裂片の場合にはその問題がより深刻となる。では、有効ターゲット厚を大きくするにはどうすればいいのだろうか。それは単にガスの阻止能を大きくすることである。それには、ガスの圧力を上げるか、ガスセルを大きくすることが有効な方法であるが、熱化イオンの輸送をガスの流れに頼っている以上それはガスの排気速度によって制限される。1 mm ϕ のノズルから 10 リットルの容器を排気するのに要する時間が長いことは容易に想像できよう。

2.2 高周波イオンガイド

ガスセルを大きくせずにイオンの経路長を長くして阻止能を上げる方法として、片山らは、ガス充填型サイクロトロン減速器を提案した。¹⁰⁾ これは、弱収束型サイクロトロン磁石中でガスのイオン化による減速を受けながら中心付近に熱化イオンとして集める機構である。これはまだ実現に至っていないが、サイクロトロンの中心付近の熱化イオンを壁に衝突させることなく引き出すイオンバリアの機構は、後述する高周波イオンガイドとして実用化された。

大きなガスセル中でより速くイオンを運ぶには、電気を帯びたイオンなのだから電場を使って導くのが良いように思える。しかし、単純な静電場ではうまくいかない。ガス中のイオンは、電場による加速、衝突による減速を繰り返すため、平均の運動としては電気力線に沿ってその電場に比例した速度で運動する。静電場を単純な陽極板と陰極板を用いて作ったとしよう。イオンはその易動度と電場強度の積に比例して高速に陰極板方向に輸送されるが、たとえ陰極板を網で造ったとしてもイオンはすべてその陰極網に到達して失われることになる。電気力線の終点を、ノズルの外あるいは、十分ガス流が速いところに置けるような電場を作ること、例えば $V=1/r^2$ に従う電位分布ができれば、静電場のみを使った能動的イオンガイドが実現できることになる。しかしその電位分布はノズル付近において極めて急峻であり、放電限界に制限され容易ではない。実際このような静電場を近似的に生成して大きなガスセルを使う方法がいくつかの施設で試行されているが、後に述べる空間電荷効果の影響を受けやすく、まだ実用化には至っていない。

静電場によるガス中の熱化イオンの高速輸送を実現する

ためには、終点陰極への付着を防ぐ手段が講じられれば良い。その方法として、筆者らは1997年に不均一高周波電場を使ってガスセル内の陰極表面にバリアを生成して陰極に触れることなくイオンをノズルまで導く高周波イオンガイド法を提案した。基本原理は、高周波四重極(RFQ)トラップと同じで、不均一高周波電場において条件に合ったイオンの平均運動はイオンの極性によらず電場勾配の小さい方へ向かう事実による。不均一高周波電場を用いて大気圧中で荷電微粒子を操作する技法は、1970年代初頭から、東大工学部の増田研究室で開発されており、その形状によって「電界カーテン」「電界ホッパー」等の名で呼ばれ、荷電エアロゾルから生物細胞まで制御することに成功している。¹¹⁾また、漏斗状に組み上げた高周波不均一場電極(RF-funnel)は、高分子分析化学におけるスプレーイオン源の効率向上のためにも用いられるようになった。¹²⁾

2.3 高周波イオンガイド法の原理

高周波イオンガイドでは、ガスセル末端の陰極は多数の円環電極で構成される。個々の円環電極に、中心に向かって単調に減少する直流電位と、隣同士の円環電極で位相の反転した高周波電位が重ねられて印加されたとき、生成される陰極表面の不均一高周波電場によってバリアが造られ、熱化イオンが電極表面に達することなくその中心にある出口ノズルへ導かれる。ここで、数値的および解析的手法によってその原理と特性を調べてみる。

まず、イオンの運動方程式

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -e\mathbf{E}(\mathbf{r})\cos(\Omega t) \quad (1)$$

から直接、ガスの効果を微視的散乱モデルで扱うことで数値的に軌道を見る。ここでそれぞれ、 m : イオンの質量、 \mathbf{r} : イオンの座標、 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$: 高周波電場の振幅、 Ω : 高周波電場の角振動数である。図3は、リチウマイオンが110 Torrヘリウムガス中を輸送されていく様子をシミュレーションした

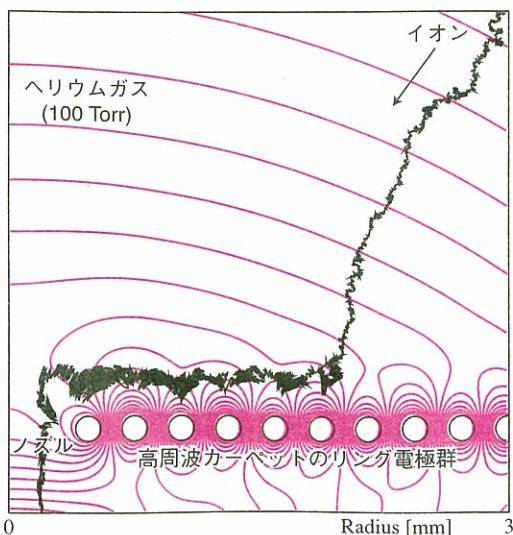


図3 RF カーペット電極の出口ノズル付近のイオンの軌道とある高周波相時の電位分布。直流電場で電極表面付近まで導かれたイオンは、RF カーペット上の多数の円環電極によって形成された高周波電場によって微少振動を繰り返しながら電極に到達することなく平均直流電位の勾配に従って中心の出口ノズルまで導かれる。

ものである。ここでは、同心円の円環電極を平面上に 0.28 mm 間隔で並べた RF カーペット型電極を用い、16 MHz, 100 V_{pp} の高周波電圧を印加している。高周波電極近傍の不均一場において、微少振動を繰り返しながら、あたかもバリア上を滑るようにしてノズルへと導かれていくことがわかる。

次に、不均一高周波電場を擬ポテンシャルモデルで近似し、ガスの効果は粘性として扱い、より定性的にバリアの性質を調べる。一般に安定条件を満たした不均一高周波電場中の微少振動は、平均的には擬ポテンシャル $\Psi_{ps} = (e/4m\Omega^2)\nabla E^2$ に従う平均運動になる。¹³⁾ よってその平均運動 r_{av} の運動方程式は、

$$\ddot{r}_{av} + \frac{1}{\tau_v} \dot{r}_{av} = -\frac{e^2}{4m\Omega^2} \nabla E^2 \left(\frac{1}{1+1/(\tau_v^2\Omega^2)} \right) \quad (2)$$

によって与えられる。ここで、粘性摩擦項の係数の τ_v は、速度緩和時間で、イオンの易動度 μ と $\tau_v = \mu m/e$ の関係にある。

具体的な有効電場強度を勘定しやすいように、各々の電極に対となる仮想電極を置き四重極場で近似すると、この高周波電場による有効電場は、

$$E_{eff} = \frac{2e\tau_v^2}{m(\Omega^2\tau_v^2+1)} \frac{V^2}{r_0^3} \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (3)$$

となる。ここで、 r は、仮想電極との中間点を原点とする距離であり、 $r=r_0$ は電極表面に相当する。実際に使用するガス圧では、速度緩和時間 τ_v は ns の程度に短く、実用的な高周波の周波数の周期に比べて極めて短い。その場合には、

$$E_{eff} \approx \frac{2e\tau_v^2}{m} \frac{V^2}{r_0^3} \left(\frac{r}{r_0} \right) = \frac{2m\mu^2}{e} \frac{V^2}{r_0^3} \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (4)$$

となる。最大有効電場は、高周波電圧 V の 2 乗に比例し電極間隔 r_0 の 3 乗に反比例するので、有限な印加可能電圧を考慮すると電極をより微細に製作することが、特に軽いイオンの輸送において鍵となる。原子イオンの易動度は、ほぼ質量によらず一定（常温 1 気圧のヘリウムガス中で $\mu \approx 20 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）で、ガス圧に反比例するので、一般に、重いイオンを低いガス圧下でより駆動しやすいことがわかる。この有効電場は、あくまでイオンの運動が安定な条件下にある場合の記述であり、安定条件そのものは別途安定性ダイアグラムかモンテカルロシュミレーションを用いて評価する必要がある。

2.4 SPIG

RF カーペットのノズルからは、イオンばかりでなく大量の He ガスが吹き出すため、それを効率よく選り分ける必要がある。このために、図4に示すような、6 極(SPIG)ないし 8 極(OPIG)の高周波多重極イオンビームガイドを用いる。^{7, 14)} SPIG では、6 本の電極棒に交互に逆位相の高周波電圧をかけて径方向の閉じ込めをし、軸方向には初速のままビームを輸送する。中心軸からの近接距離 r_0 に放射状に置かれた $2N$ 本 ($N \geq 2$) の電極に、高周波電圧 $V \cos(\Omega t)$ をかけた場合、ビームガイド中の擬ポテンシャル

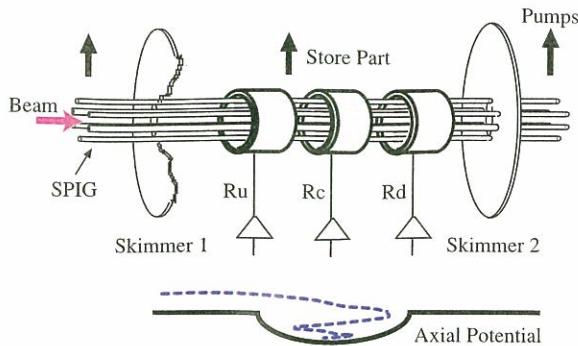


図4 高周波6重極イオンビームガイド(SPIG)。イオンは多重極高周波電場による径方向の閉じ込め場によって多段の差動排気を経て下流の高真圧領域へ輸送され、ガスは電極の隙間から効率よく排気される。

ルは、

$$\Psi = \frac{eN^2}{4m\Omega^2} \left(\frac{V}{r_0} \right)^2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2(N-1)} \quad (5)$$

となる。4重極の場合は、一般にマスフィルターとして使われるものと同等である。高次の多重極場を使うメリットは、式(5)で示される通り、同じ高周波電圧を印加した場合、高い多重極場の方がより大きい($\propto N^2$)閉じ込めポテンシャルが得られ、より大きな空間電荷容量が得られることがある。一方、4重極場以外は調和振動ポテンシャルでないため($r^{2(N-1)}$)、冷却機構がない場合には高周波加熱を受けやすいという欠点がある。

高周波多重極場によるビームガイドは、原子分子衝突実験によく用いられてきた装置であるが、¹⁵⁾ 片山らはIGISOLのビームエミッタス向上のため使うことを1990年に提案した。¹⁶⁾ 東大原子核研究所のIGISOLにおいてガスセル出口から高真圧領域へ100%近い効率かつ0.8 eV以下の小さいエネルギー広がりでイオンビームを輸送することができ、⁷⁾ その後各地のIGISOL施設で標準技術として使われるようになった。⁸⁾

このビームガイドに直流電位を印加した円環電極を被せることによって、ビームガイドの中心における直流電位を電極棒の平均電位からシフトさせ、軸方向の閉じ込め電場を生成することができる。この円環電極の電位をパルス的に制御することによって、残留ガスによる冷却効果と合わせて、イオンの蓄積・バンチ引き出しが可能となる。¹⁴⁾

3. オンライン試験

高速RIビームを用いたオンライン実験は、理化学研究所の加速器施設において入射核破碎片分離器RIPSを使用して行った。RIビームとして核子あたり100 MeVの¹³Cビームからの生成物である⁸Liイオンビームを主に使用して試験を行っている。⁸Liはベータ遅発アルファ崩壊するため、検出効率100%で信頼度高く測定でき、試験に適している。先に述べたように軽いイオンは、高周波イオンガイドとより制御が困難であること、さらにエネルギー減衰板後のエネルギー広がりが極端に大きいこと、ガス中のレンジが長いこと、と困難が多いため、軽いイオンで動作が確

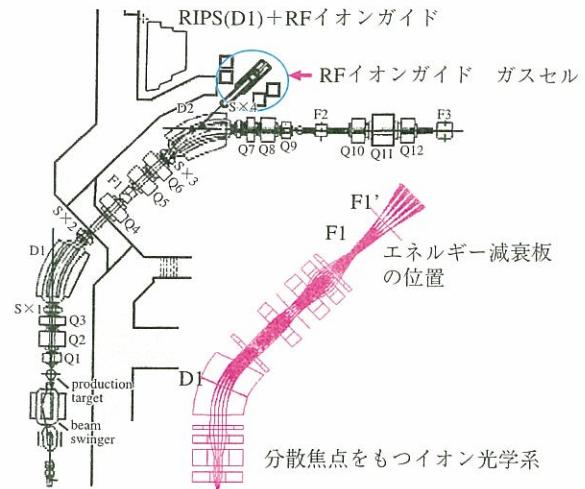


図5 理化学研究所加速器施設E6実験室におけるオンライン試験装置。入射核破碎片分離器の前半部分のみを用い、その第1双極磁石(D1)の運動量分散焦点面にエネルギー減衰板、高周波イオンガイドガスセルを配置した。

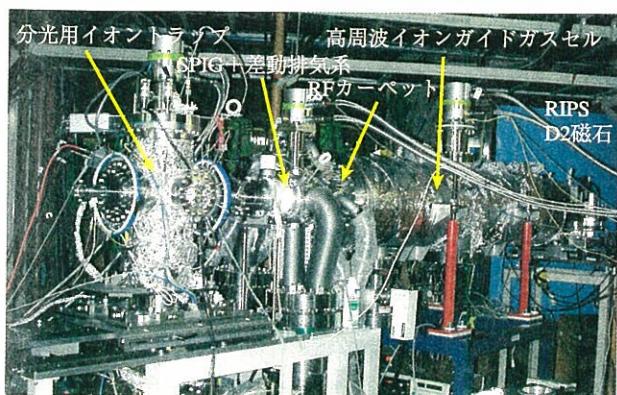


図6 高周波イオンガイドガスセルとビームガイド下流に配置した分光用イオントラップ。ガスセル(2 m × 40 cm²)内部には、180 cm × 30 cm²の直流電場用円筒電極と、末端に30 cm² RFカーペット電極が設置されている。

認できればより重いイオンへの適用は確実であるといえる。また、最初の応用として¹¹Beなど、比較的軽いイオンの研究を予定しているので、そこで十分な性能を得ることが不可欠である。

図5に示すように、装置はRIPSの前半部分(第1双極電磁石(D1)のみによる分離)に直結したコースに配置されているため、完全な分離が行われず等しい運動量荷電比を持つ破碎核はすべて入射される。⁸Liの場合、その純度は10%以下であるが、エネルギー減衰板で減速する過程で有効純度を50%程度まで上げることができる(range separation)。一方、このビームコースでは運動量分散を持つ焦点面に装置が置かれるため、楔形減衰板と組み合わせば、減速後のエネルギー広がりを最低限に保つことができる(range focusing)。RIPSからのRIビームは、このコースの運動量アクセプタンス3%いっぱいに広がっており、この機能無しではガス中での停止効率が1桁以上悪くなる。

楔形エネルギー減衰板通過後、RIビームは高周波イオンガイドガスセルに入射される(図6)。軽いイオンで有効なイオンバリアを生成できる条件を満たすには、セルのガス圧は高々100 Torrに限られるため、2 mの厚さ(4.7 mg/

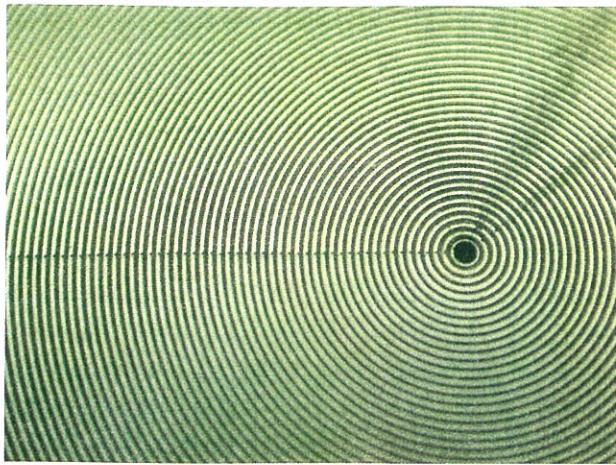


図7 RF カーペット電極. カプトン製フレキシブルプリント基板にエッチング処理によって 0.28 mm 間隔の高周波円環電極を形成.

cm^2) をもってしても、その阻止能は核子あたり 4 MeV (中重核)~2 MeV (Li イオン) である。さらに、エネルギー減衰板透過後のエネルギー広がりは、Li イオンの場合 range focusing したとしても核子あたり 0~10 MeV にも及ぶため、RIPS からの ${}^8\text{Li}^+$ イオンビームの~12% しかガス中で停止できることになる。

3.1 RF カーペット

本装置の鍵となるガスセル中の熱化イオンの捕集機構である RF カーペットは、図7のような構造をしている。開発初期には、金属板を積み重ねた漏斗状電極や、フレキシブルプリント基板を用いてやはり漏斗状構造をしたものを使用してきたが、¹⁷⁾ 電極間隔を小さく、かつできるだけ高い周波数で高い電圧をかけられるようにするために、現在の平面型(カーペット状)の構造に至った。RF カーペット部分は、0.2 mm 厚のカプトン製プリント基板でできており、0.14 mm 幅の導体パターンでできた円環電極を 0.14 mm 幅の空隙を開けて同心円状に直径 120 mm まで並べた構造となっている(図7)。中心には 0.8 mm ϕ のノズルがあり、直径 120 mm から 280 mm までの部分は、直流電位のみを印加している。個々の円環電極への高周波電位の給電は、プリント基板のビアホールを利用して裏面から行っている。基板裏面には、高周波電位を交互の電極に分配する回路と、各々異なる直流オフセット電位を与える回路が配置されている。円環電極の半径が変わり、高周波の同調条件が中心部と外周部で大きく異なる。そこで電極を 3 群に分けて独立の増幅器と同調回路を用意し、発振器の信号をアッテネータとディレイラインを経て分配し整合を取った。このような構造で、周波数 12 MHz, 150~200 V_{pp} の高周波電圧を印加できている。

3.2 引き出し効率と空間電荷

高周波イオンガイドから引き出された低速 ${}^8\text{Li}^+$ イオンをシリコン検出器に入射させ、そのベータ遅発アルファ線を検出することによって引き出された ${}^8\text{Li}^+$ イオン数を勘定し、RIPS 出口に置いたプラスチックシンチレータによって計

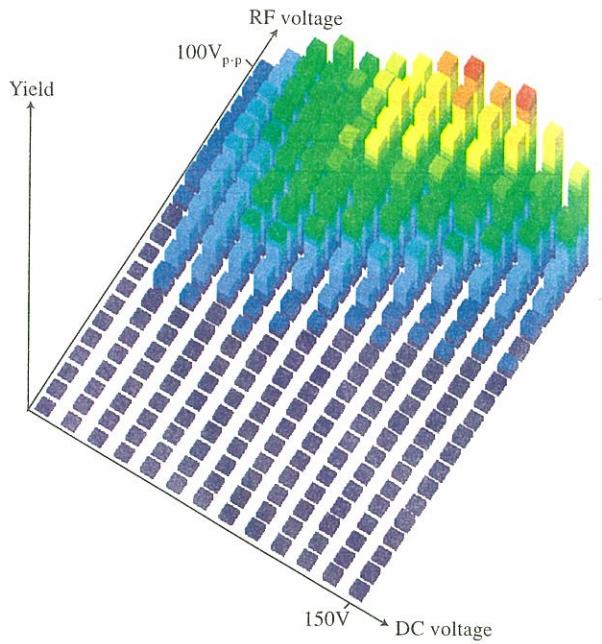


図8 低速 ${}^8\text{Li}^+$ イオンの強度の、RF カーペット印加高周波電圧と RF カーペット上の直流電位差依存性。DC 150 V は、カーペット面上の横方向の電場~10 V/cm に相当する。

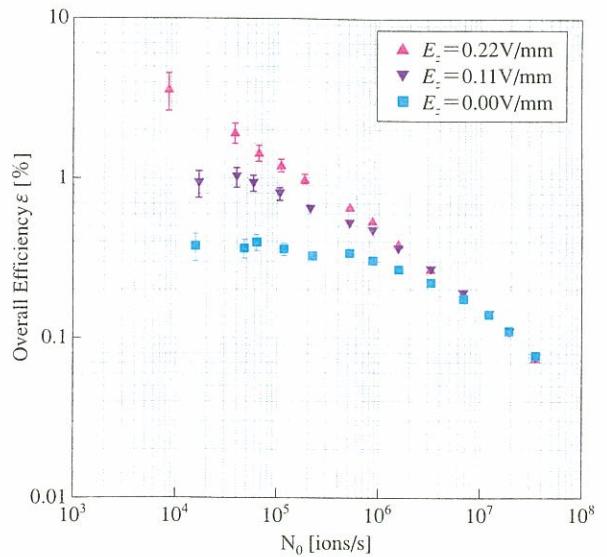


図9 RIPS から得られる高速 ${}^8\text{Li}$ の減速冷却による低速 ${}^8\text{Li}^+$ イオンビームの全効率のビーム強度依存性。 E_z は、ガスセル内のビーム軸方向にかけた直流電場であり、それが小さいときには遠方からイオンが輸送される間に ${}^8\text{Li}$ が崩壊してしまうため効率が小さくなっている。ビーム強度が強いときは、下流域の RF カーペット近傍のみが有効体積となるので E_z による違いがない。

数した入射高速 ${}^8\text{Li}^+$ イオンと比べることによって、全効率を信頼度高く測定することができる。

図8は、RF カーペットのバリア効果を検証するために、印加高周波電圧とカーペット上の直流電位差を変えながら ${}^8\text{Li}^+$ の収量を調べたものである。高周波電圧が閾値(~45 V_{pp}) より低い場合、Li イオンは全く引き出されず、高周波カーペットによるバリアなしではイオンは輸送されないことがわかる。また、カーペット上の直流電場を大きくしたとき、必要な高周波電圧がより高くなるのは、直流電場に対抗するバリアの有効電場が大きい必要があるからである。

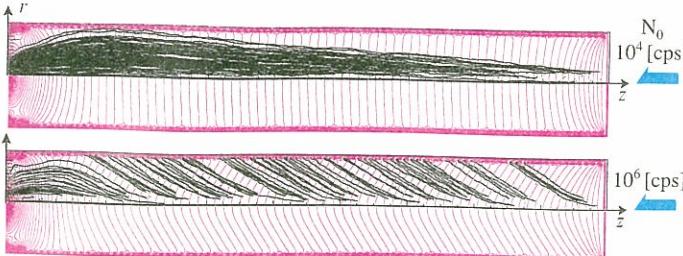


図10 入射ビームによって生成された He イオンの空間電荷によるガスセル中の直流電位分布(赤線)とイオンの軌跡(黒線)のシミュレーション。見やすさのため、下半分に電場のみを、上半分に電場とイオンの軌跡を表示した。z, r は、2 m 長の 30 cm ϕ 円筒電極内のビーム軸方向、径方向の座標。

図9は、全効率を入射ビーム強度と円筒部分の直流電場強度ごとに測定したものである。ビーム強度が 10^4 個毎秒のとき、全効率4%を達成している。これは、ガスセル内で停止した⁸Li イオンの引き出し効率にして33%に相当する。一方、入射ビーム強度を高くするに従い、効率はほぼ強度の平方根に反比例して減少している。

この現象は、入射ビームの減速過程で生ずる大量のヘリウムイオンによる空間電荷効果によって説明できる。¹⁸⁾ 入射高速イオンが He のイオン化によってエネルギーを 8 MeV 損失したとき、 2×10^5 個のイオン-電子対が生成される。外部電場によって電子はすぐに排除され、イオンは自分自身の生成する電場によって径方向へドリフトしていくとすると、定常状態の空間電荷は入射ビーム強度の平方根に比例する。このモデルに基づいた空間電荷とセル内の電極による境界条件をもとに計算した電位分布(赤線)とそこでのイオンの軌跡(黒線)を図10に示す。外部電極によって作られた上流から下流側へ向けて(図中右から左)の滑り台のような電位勾配に加えて、空間電荷による高電位部の隆起がビーム入射軸($r=0$)を中心に尾根状に形成される。入射⁸Li イオン強度が毎秒 10^4 個では、中心部分の空間電荷は、 4×10^{-18} C/mm³ 程度で、尾根の隆起は高々数 V であり、イオンは若干径方向へ逸らされるものの、RF カーペットへ到達できる。毎秒 10^6 個になると 16 V ほどの隆起となり、セル下流の部分を除いてイオンはセル側壁へ到達し失われる。空間電荷強度とイオンの捕集効率の関係は、幾何学的構造などの条件に依存するが、ほぼ反比例するので、イオンの捕集効率は、ビーム強度の平方根に反比例することになる。

3.3 より高性能をめざして

ガスセルの陰極に不均一高周波電場によるバリアを生成する高周波イオンガイド法では、空間電荷によってイオンの軌道が多少拡げられても、それを受け止めるだけの広いバリアを持った陰極をもってすれば受容できる。一方、静電場とガスの流れのみを用いた方式では、仮想的に陰極は出口ノズルの1点になっていなければならぬ。空間電荷によってイオンの軌道がそれると即出口に到達できなくなってしまう。

図10において、ビーム強度が強いときでも高い捕集効率を維持するためには、セルの側壁に至るまで、より広い範囲にバリアを張り巡らせば良い。Li イオンのような軽いイオンでは、高い周波数かつ電極間隔がごく小さくなければならず、巨大なカーペットを作ることは現実的ではないが、中重核イオンにおいては十分に実現可能である。

一方、全効率をより高くするためには、ガスセルのイオン阻止能を上げることが必須である。また、より短寿命核を扱うためには輸送速度も高い必要がある。現在の試験装置において、熱化イオンは 3~10 m/s の速度で輸送されているが、阻止能を上げるためにガス圧を上げたり、セル長を長くするとそれに反比例して引き出し時間が長くなる。さらに、ガス圧を上げると不均一高周波電場による有効電場が圧力に反比例して弱くなるので、いまの方式でガスセルの圧力を 1 気圧にするのは現実的ではない。

ガスセルの圧力を 1 気圧で運用し、かつ 7 m/s 程度の輸送速度が得られる“順風イオンガイド法”という新しい提案がある(図11)。¹⁹⁾ これは、静電場ではなくガスの流れによってイオンを輸送するもので、古典的イオンガイド法への回帰ともいえる手法である。イオンの引き出しノズルは小さいまま高速にガスを流すために、ノズルの手前でガスを還流するための大きな引き口を設け、そこへイオンが引き込まれないようにするために、不均一高周波電場のバリアによるフィルターを置く(第1 RF漏斗)。前述(式(4))のようにバリアの強度はガス圧の 2 乗に反比例するので、1 気圧もの高いガス圧で機能させるのは一見不可能に見える。しかし、順風イオンガイドにおいては静電場がなく、“風”に対抗さえできれば良いため、高周波電場によるバリアは比較的弱いもので十分なのである。シミュレーションによれば、ごく軽いイオンを除いては、現実的な電極間隔、周波数、電圧で、1 気圧でも機能することが確かめられた。今後試験装置を作り、空間電荷に対する性能等を調べていく予定である。

ガスセルのイオン阻止能と熱化イオンの引き出し速度、さらには空間電荷効果への対処のすべてを解決できる可能性のある一つの方法は、前述のガス充填型サイクロトロン減速器¹⁰⁾と高周波カーペットの組み合わせである。理想的な条件が達成できれば、高速イオンの停止ガス厚は 10 m 以上にも達する一方、熱化イオンの出口までの路長は高々數

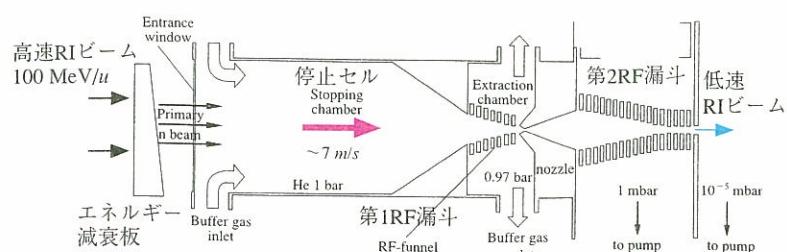


図11 順風イオンガイド法の概念図。停止セル中で熱化したイオンは速いガスの流れによって下流へ輸送される。大量のガスは、第1 RF漏斗部でイオンと分離され還流する。イオンはノズルから射出後、第2 RF漏斗でさらにガスと振り分けられ真空領域へ導かれる。

十 cm であり、ガス圧も低く運用できるので引き出し速度は速い。さらに空間電荷の濃い領域は外周部に偏在し、熱化イオンのドリフト領域への害は軽微である。入射条件等の再評価を進めており、近く試験機を製作する計画である。最近、北米の次世代 RI ビーム施設である RIA 計画の主要装置であるガス捕集装置に、ガス充填型サイクロトロン減速器を使用する提案がミシガン州立大学から出され、²⁰⁾ 理化学研究所との共同研究が発足する予定である。

4. SLOWRI での実験計画

理研 RI ビームファクトリーは、2006年末にファーストビームを出す予定で建設が進んでいる。この加速器施設は、線形加速器と 4 台のサイクロトロンを縦列つなぎにして、ウランまでの重イオンを、最大 1 pA の大強度で核子あたり 400 MeV まで加速し、入射核破碎片分離器 (BigRIPS) によって広範囲の不安定核を大強度で生成するものである。ここで計画されている主たる実験は、高速 RI ビームをそのまま用いた二次原子核反応の研究であるが、本稿で述べた高周波イオンガイドを用いた汎元素低速 RI ビーム施設 (SLOWRI) も一つの柱として計画されている。

この低速 RI ビーム施設の特徴として以下の点が挙げられる。

- 元素の化学的性質や寿命にあまり制限されない広範囲の核種が提供できる。
- 破碎核分離器と同位体分離器の 2 種類の分離器を組み合わせたことによって単独で分離しにくかった同重核や同中性子数核の混じりが少なくビームの純度が高い。
- 冷却およびバンチ化機構によってエミッタスの小さい連続およびパルスビームが得られる。
- ~0 eV から数十 keV、さらに後段加速器を追加すれば数 MeV までの広い範囲でエネルギー可変である。
- 遮蔽の難しい中性子を発生しないので実験中に実験者が装置近傍に立ち入りやすい。

特に汎元素性は従来の低速 RI ビーム施設である ISOL 型施設では得られない特徴である。図12に期待される低速 RI ビームの強度地図を示す。ここでは、原子核の半減期によ

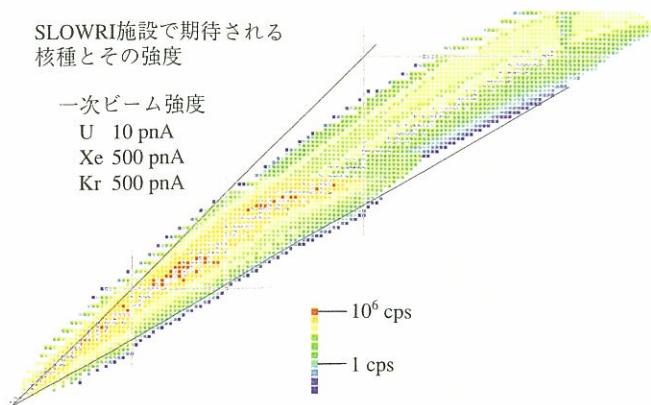


図 12 低速 RI ビーム施設で期待できる核種とその強度。

る制限、すなわち寿命が 0.4 s より短い場合、ガスセルの下流部分の寿命に比例した部分のみが有効体積になること、および、大強度入射ビームにおいて空間電荷による有効体積の減少の効果を織り込んでいる。

このような他では得られないような特徴を持った施設を用いて、いくつかの実験が計画されている。

- 多重反射型飛行時間測定式質量分析器による不安定核原子の質量測定²¹⁾
 - 共線レーザー分光による不安定原子核、とりわけ従来の施設で得られなかった Ni 同位体近傍領域の高融点元素同位体の荷電半径の測定
 - トラップされたアルカリ土類イオンの超微細構造分光による核内磁化分布の測定^{22, 23)}
 - ごく薄い線源あるいはトラップ中の原子核崩壊における α , β , γ 分光およびそれによる基本対称性の研究
- 質量測定装置として Penning トラップを用いたサイクロトロン振動数測定が有名であるが、ここでは一对の静電ミラー電極間を往復させ、アイソクロナス条件下で飛行時間測定する方式の質量分析器を使うべく開発を進めている。これまでに 2.5 ms の測定時間で質量分解能 110,000 を達成している。

さらに、将来には

- 自己蓄積型電子衝突リング (SCRIT) と組み合わせた不安定核の電子散乱による荷電形状因子の測定²⁴⁾
- 反陽子不安定核原子生成による原子核表面の陽子中性子密度比の測定²⁵⁾
- 後段加速器追加による核子あたり数 MeV ビームを用いた天体核物理の研究

等への発展も期待されている。

高速不安定核ビームを減速冷却して汎元素低速 RI ビームを生成する技術は、まだ新しい技術であり、発展途上にある。筆者らは、長年の研究開発の末、一定の性能を得ることに成功したが、今後も、全く新しい技術の発現を含めて、いっそうの技術的飛躍が期待されている。実際の物理実験を進めていくとともに、技術開発の歩みを止めることなく精進していくたい。

本稿を終えるにあたり、開発グループの方々、とりわけコアメンバーである石田佳久、岡田邦宏、中村貴志、高峰愛子の各氏に謝辞を述べたい。また研究開発当初より実用化に至るまでの間に数々の助言と叱咤激励をいただいた、片山一郎、大谷俊介、山崎泰規の各氏に感謝申し上げる。H. Wollnik, H. Schuessler, V. Varentsov の各氏には、技術的および戦略的な事柄に関して有用な相談に乗っていただいた。オンライン試験においては、理化学研究所加速器施設の方々に協力いただいた。併せて感謝申し上げる。

参考文献

- T. Kubo: Nucl. Instrum. & Methods B **204** (2003) 97.
- R. E. Laxdal: Nucl. Instrum. & Methods B **204** (2003) 400.
- J. Ärje and K. Valli: Nucl. Instrum. & Methods **179** (1981) 533.

- 4) J. Ärje, J. Äystö, H. Hyvönen, P. Taskinen, V. Koponen, J. Honkanen, K. Valli, A. Hautajarvi and K. Vierinen: Nucl. Instrum. & Methods A **247** (1986) 431.
- 5) M. Yoshii, H. Hama, K. Taguchi, T. Ishimatsu, T. Shinozuka, M. Fujioka and J. Ärje: Nucl. Instrum. & Methods B **26** (1987) 410.
- 6) P. Dendooven: Nucl. Instrum. & Methods B **126** (1997) 182.
- 7) H. J. Xu, M. Wada, J. Tanaka, H. Kawakami, I. Katayama and S. Ohtani: Nucl. Instrum. & Methods A **333** (1993) 274.
- 8) P. Van den Bergh, S. Franschoo, J. Gentens, M. Huyse, Yu. A. Kudryavtsev, A. Piechaczek, R. Raabe, I. Reusen, P. Van Duppen and A. Wöhr: Nucl. Instrum. & Methods B **126** (1997) 194.
- 9) A. Nieminen, J. Huijari, A. Jokinen, J. Äystö, P. Campbell and E. C. A. Cochrane: Nucl. Instrum. & Methods A **469** (1986) 244.
- 10) I. Katayama, M. Wada, H. Kawakami, J. Tanaka and K. Noda: Hyperfine Interactions **115** (1998) 165.
- 11) S. Masuda, K. Fujibayashi, K. Ishida and H. Inaba: IEEE, translation from Trans. IEE Japan **92B** (1972) 9.
- 12) T. Kim, et al.: Anal. Chem. **72** (2000) 2247.
- 13) H. G. Dehmelt: "Advances in Atomic and Molecular Physics," Radiofrequency Spectroscopy of Stored Ions. I: Storage (Academic Press, New York, 1967) p. 53.
- 14) S. Fujitaka, M. Wada, H. Wang, J. Tanaka, H. Kawakami, I. Katayama, K. Ogino, H. Katsuragawa, T. Nakamura, K. Okada and S. Ohtani: Nucl. Instrum. & Methods B **126** (1997) 386.
- 15) K. Okuno: J. Phys. Soc. Jpn. **55** (1986) 1504.
- 16) I. Katayama, H. Kawakami, J. Tanaka, M. Wada and S. Ohtani: In *Proceedings of HITRAP Workshop I* (Darmstadt, September 1990, GSI) p. 469.
- 17) M. Wada, Y. Ishida, T. Nakamura, Y. Yamazaki, T. Kambara, H. Ohya, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Nakai, N. Ohshima, A. Yoshida, T. Kubo, Y. Matsuo, Y. Fukuyama, K. Okada, T. Sonoda, S. Ohtani, K. Noda, H. Kawakami and I. Katayama: Nucl. Instrum. & Methods B **204** (2003) 570.
- 18) A. Takamine, M. Wada, Y. Ishida, T. Nakamura, K. Okada, Y. Yamazaki, T. Kambara, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Nakai, N. Ohshima, A. Yoshida, T. Kubo, S. Ohtani, K. Noda, I. Katayama, P. Hostain, V. Varentsov and H. Wollnik: Rev. Sci. Instrum. **76** (2005) 103503.
- 19) V. Varentsov and M. Wada: Nucl. Instrum. & Methods A **532** (2004) 210.
- 20) G. Bollen, D. J. Morrissey and S. Schwarz: Nucl. Instrum. & Methods A **550** (2005) 27.
- 21) Y. Ishida, M. Wada, Y. Matsuo, I. Tanihata, A. Casares and H. Wollnik: Nucl. Instrum. & Methods B **219–220** (2004) 468.
- 22) K. Okada, M. Wada, T. Nakamura, R. Iida, S. Ohtani, J. Tanaka, H. Kawakami and I. Katayama: J. Phys. Soc. Jpn. **67** (1998) 3073.
- 23) T. Nakamura, M. Wada, K. Okada, I. Katayama, S. Ohtani and H. A. Schüssler: Opt. Commun. **205** (2002) 329.
- 24) M. Wakasugi, T. Suda and Y. Yano: Nucl. Instrum. & Methods A **532** (2004) 216.
- 25) M. Wada and Y. Yamazaki: Nucl. Instrum. & Methods B **214** (2004) 196.

(2005年6月13日原稿受付)

SLOWRI—A Universal Slow RI-beam Production

Method—

Michiharu Wada

abstract: A next generation slow radioactive nuclear ion beam facility (SLOWRI) which provides slow, high-purity and small emittance ion beams of all elements has been proposed as one of the major experimental facilities at the RIKEN RI-beam factory. High energy radioactive ion beams from the projectile fragment separator BigRIPS are thermalized in a large gas catcher cell, guided and extracted to vacuum by a combination of DC electric fields and in-homogeneous RF fields in the cell (RF ion guide). In experiments conducted so far, an overall efficiency of 5% was achieved for ≈ 100 MeV ^8Li ion beam from the present projectile fragment separator RIPS and the dependence of the efficiency on the beam intensity was investigated. Possible methods to improve the performance of the RF ion guide scheme as well as planned experiments at SLOWRI are discussed.