

話 題

ICR 法による安定同位体の分離

稲垣 隆雄^{*1}・大見 和史^{*2}・高木 昭^{*2}・田中 賢一^{*3}・鈴木 達也^{*4}
林崎 規託^{*5}・羽倉 尚人^{*6}・柴田 徳思^{*7}

R&D Study of Stable Isotope Separation Using ICR Method

Takao INAGAKI^{*1}, Kazuhito OHMI^{*2}, Akira TAKAGI^{*2}, Ken-ichi TANAKA^{*3}, Tatsuya SUZUKI^{*4}
Noriyosu HAYASHIZAKI^{*5}, Naoto HAGURA^{*6} and Tokushi SHIBATA^{*7}

Abstract

We have been studying a stable isotope separation/enrichment using Ion-Cyclotron-Resonance (ICR) method. Since most of basic technologies for the ICR method has been accumulated and exists in the accelerator science, we could start the study using equipment available in KEK. Here, we report the status of the study. While a slight effect of enrichment for zinc isotopes has been observed, many problems still remain. We are looking forward to receiving helpful suggestions.

1. はじめに

安定同位体 (SI) は約 280 種あり, 自然界にある元素の約 100 種と比べて, 3 倍近くある。しかも, 宇宙での元素合成はくまなく行われてきたので, 全ての安定同位体は地上に有意に存在している。従って, 安定同位体の分離技術の向上によって, 資源として存在する安定同位体を有効活用でき, 非常に広い利用分野を切り開くことができる。

筆者達が開発研究を始めた直接の動機は, 2 重 β 崩壊¹⁾ の親核としての利用である。2 重 β 崩壊のみに崩壊する核は, 標準理論で許容される 2 ν モード (2 つの電子と 2 つのニュートリノ (ν)) 崩壊でも半減期が宇宙年齢よりはるかに長いので, 親核は安定同位体だとみなすことができる。ところで, その 0 ν モード (2 つの電子のみに崩壊) は ν 質量が有限である場合に許容され, その崩壊の強さは ν 質量の 2 乗に比例する。 ν 振動実

験によっては解けない 3 世代 ν の質量順がノーマル ($\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$) かインバース ($\nu_3 < \nu_1 < \nu_2$) か, ヒエラルヒー問題といわれるこの素粒子物理学上重要な問題を解くことができるのは, 今のところ 0 ν モード 2 重 β 崩壊の測定しかない。ところが, 実験の感度はヒエラルヒー問題を解くには 2 ~ 4 桁低い。実験装置の向上や親核の増加が必要で, それらを可能にする親核の濃縮はキーとなる課題である。

安定同位体には他にも多様な利用がある。それらは直接利用と間接利用に分類できる。典型的な直接利用には, 開放系でも使える安全なトレーサーとしての利用があり, 間接利用としては, 放射線性同位元素 (RI) 生成の原料という利用がある。生物・医学分野のみの例でも, 前者には, 理研の重窒素 (¹⁵N) 計画²⁾ があり, 後者には, PET 用の放射線同位体 ¹⁸F の生成という実例がある³⁾。

*1 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 Institute of Particle and Nuclear Physics, KEK (E-mail: inagaki@post.kek.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設 Accelerator Laboratory, KEK

*3 高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センター Cryogenics Science Center, KEK

*4 長岡技術科学大学原子力システム安全工学専攻

Department of Nuclear System Safety Engineering, Nagaoka University of Technology

*5 東京工業大学先端原子力研究所 Laboratory for Advanced Nuclear Energy, Tokyo Institute of Technology

*6 東京都市大学原子力安全工学科 Nuclear Science Engineering, Tokyo City University

*7 日本アイソトープ協会 Japan Radioisotope Association

それでも、安定同位体の利用が限られてきたのは分離が難しいためである。安定同位体の分離法は、化学分離や遠心分離などの統計的分離法と個別的分離法に大別できる。ICR法⁴⁾は、個別的分離法に属する。原理的には全ての核種に適応できる。同様に個別的分離法で全核種に適応できるものとして、電磁法(質量分析法)があるが、収量が少なく、第二次世界大戦中に作られた超大型装置も老朽化している⁵⁾。1980年代に一世を風靡したレーザー分離法が頓挫した後、電磁法に代わる新規の個別的分離法案は、ICR法だけである。

ICR法による安定同位体分離装置は、米国のセラジェニックス社に唯一現存している。DOEから払い下げを受け、その後パラジウム同位体などの分離に使われたという情報⁶⁾以上の報告はない。ロシアのクルチャトフ研究所には、建設計画⁷⁾がある。

2. ICR 分離の原理

ICR法では、荷電粒子が磁場中を周回運動(サイクロトロン振動)する振動数が、粒子のエネルギーに依存せず、磁場に比例し、粒子の質量に逆比例することを利用する。均一磁場内では、特定のイオンのサイクロトロン振動数に等しい外部高周波をかけることによって、そのイオンの振動が積み上がっていく。即ち選択的な振動の励起(ICR加熱)が起こる。その際、電子と同位体イオンのサイクロトロン振動数には3~6桁という大きな差があるので、電子の振動は励起されない。そのため、電子とイオンが共存するプラズマ状態でもICR加熱が可能である。これが、電磁法より大幅に収量を増やすという期待を生む。

ICR装置は、**図1**のようにソレノイド磁場中の真空容器の内に、Ion Source部、Accelerating部、Collector部を設置したものである。

Ion Source部では、スパッタリング等によって同位体原子がMaterial plateから放出され、マイクロ波により電離されてプラズマ状態となる。電離された電子およびイオンは磁力線に巻き付いて閉じ込められる。磁力線方向の運動は拘束を受けない。Accelerating部では、ヘリカル形状のアンテナで発生する高周波によって、特定同位体イオンのサイクロトロン運動を励起する。**図2**のようなCollector部で励起されて振幅が大きくなっ

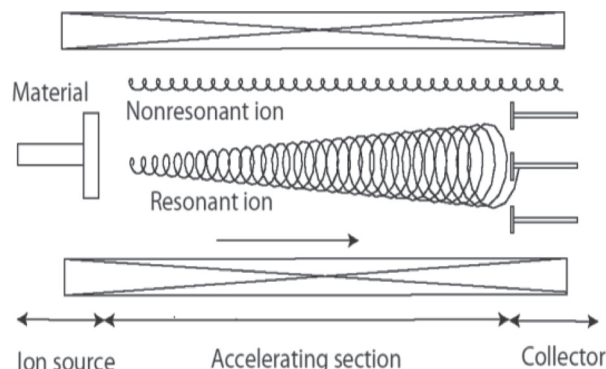


図1 ICR同位体分離装置の概念図。

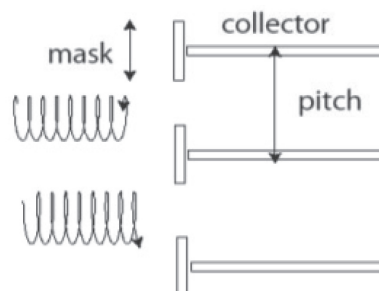


図2 収集系概念図。maskによって、ラーマー半径が小さいイオンが、collectorに当たらないようにする。

たイオンを収集する。

一価のイオンのサイクロトロン周波数 f は $2\pi eB/M$ である。磁場 B に比例し、質量 M に逆比例する。 e は単位電荷である。 B [T (テスラ)]と原子量 A [amu]を使うと、

$$f = 2.2 \times 10^5 \cdot (B/1.5 \text{ T}) \cdot (A/100)^{-1}$$

である。 $B=1.5 \text{ T}$, $A=100$ では $f=2.2 \times 10^5 \text{ Hz}$ である。一方、サイクロトロン振動の振幅(ラーマー半径)は $\sqrt{2ME}/eB$ である。ここで E はイオンの横方向運動エネルギーである。 $E=10 \text{ eV}$, $A=100$ のイオンのラーマー半径は 3 mm , 電子のラーマー半径は $7 \mu\text{m}$ である。

しかし、**図1**に示す Non-resonant ionの動きは概念的すぎる。位相はズレていくが、途中には励起が起こる。位相のズレの積分が 2π に達すると、それまでのネットの励起がゼロとなる。共鳴するアイソトープから1核子離れたイオンに対してこの位相差の積分値が 2π 以上であるという条件を入れると、

$$B \cdot L > 2.5 \cdot (E_L/10 \text{ eV})^{1/2} \cdot (A/100)^{3/2}$$

という関係式が得られる。\$E_L\$ は、イオンの軸方向エネルギーである。必要となる \$B \cdot L\$ 値 (テスラ・メートル) は、核子数 \$A\$ の \$3/2\$ 乗に比例する。このために、ICR 法は重い核の分離には適さないことが分かる。これは、ICR 法がウランウム等の核燃料物質に関係する政治的な問題とは無縁であるという意味では、利点だと言えなくもない。

ICR 法のもう一つの特徴は、ICR 加熱がプラズマ状態でも可能なので、質量分析法 (電磁法) のように、イオン相互の反発・空間電荷効果による制限を受けないことである。取量を大幅に上げることができる。

繰り返しになるが、ICR 法では、強く均一な磁場、プラズマ生成用装置、高周波アンテナなどが必要となる。これらの多くは加速器科学で培われた技術である。ICR 法は加速器科学のスピノフだと位置づけることができる。

3. 実証実験

3.1 モンテカルロシミュレーション

研究の出発点となったのは、クルチャトフ研究所の Potanin の論文⁸⁾ である。彼は、均一磁場中のイオンに、

$$E_x + iE_y = E_{xy} \exp[i(kz - \omega t)], \quad E_z = 0$$

という理想的な高周波電場を印加すると、運動方程式が解析的に解けることを示した。ここで、\$E_{xy}\$ は横方向 (\$E_x\$ と \$E_y\$ はその水平、垂直成分)、\$E_z\$ は軸方向電場である。

これに近い高周波電場を発生しうるのは、**図3**のようなヘリカル形状のアンテナコイルである。しかしそれでも、発生する電場は、理想とは程遠い。軸上以外では、\$E_z\$ はゼロではない。この電場でも同じような ICR 励起が得られるだろうか？

ビオサヴァール式を使って、電場を位置毎に計算し、磁場も3次元的に入れて、イオン軌道をレンゲクッタ法でモンテカルロ計算するコードを開発し、理想的な場合と比較検討した⁹⁾。**図4**に示すように、理想的電場の場合、解析的な解を再現し、ヘリカルアンテナコイルの場合も、ICR 励起という最終結果では、理想的電場の場合に比べて遜色のない励起が得られることが分かった。

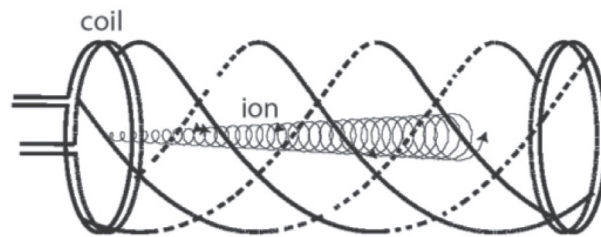


図3 製作したアンテナコイルの形状。直径が 30 cm、長さ 60 cm で、2本のコイルが90度の位相差で配置されている。

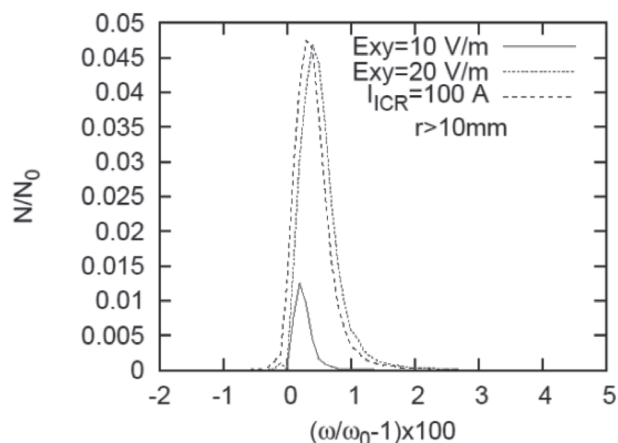


図4 安定同位体 ^{98}Mo の ICR 励起の様子。コイルに 100 A 流すと、必要とする 20 V/m の電場と同じ効果が得られることが分かる。縦軸は、天然存在比の Mo の数 (N_0) に対するラーマー半径が 10 mm 以上になった ^{98}Mo の数 (N) の比であり、横軸の ω は励起高周波の周波数、 ω_0 は eB/M (M は ^{98}Mo の質量) である。共鳴点の ω_0 からズレは、コイルの捻りとイオンのサイクロトロン回転の相対方向で決まる所謂ドップラーシフトである。

しかしながら、このモンテカルロ計算でも、電子が共存するプラズマ状態の完全なシミュレーションにはなっていない。電子には、磁気に垂直面の動きはなく、イオン間の反発、即ち空間電荷効果を防いでいるということと、軸方向には容易に動いて、コイルの発生する軸方向電場を打ち消しているという、2つの役割が仮定されているだけである。この仮定が実際に成り立っているかをシミュレーションで確かめることは難しい。実験で確かめる必要がある。

3.2 実験装置

実験には、KEK・低温センターにあり共同利用されている超伝導ソレノイド磁石を使う。磁石の

諸元は表1のようである。

磁場が 1×10^{-3} 以下の精度で平坦な領域にアンテナコイルを置く真空容器を製作した。

図5は全体図, 図6と図7は上流部と下流部の写真である。上流部に取り付けたプラズマ室は, 再利用品で, 壁を水冷し, 胴部にカスプ磁場が形成できる Sm-Co 永久磁石を配したものである。

プラズマ室の上流端板に真空側に突き出たポートを取り付け, その先端に試料となる金属 (亜鉛) 板を取り付ける。円柱状のポートの周囲の脇から, 石英ガラス窓を介して 2.45 GHz マイクロ波が注

入される (図8)。

下流部から 1,500 l/sec のターボ分子ポンプで排気し, プラズマ室とアンテナコイルとの間に, 中央に直径 50 mm の穴がある金属板 (オリフィス) 3段を置いて, プラズマ室と ICR 加熱室との間に約 1 桁の差圧を付けている。

アンテナコイルの下流に, 収集箱 (図9) を設置した。

ICR 加熱用高周波発生装置の調達には難渋した。調達先と想定した 12 GeV-PS のメインリングやブースターリングからの再利用品は, これら加速器の典型的な周波数帯域が, 少し高めだったためである。当初は加速器を使った ^{99}Tc の生成の材料として, ^{98}Mo や ^{100}Mo の濃縮を考えたが, 見つけたパワーアンプは定格帯域が 0.3-30 MHz だったので, 共鳴周波数が 0.25 MHz 付近

表1 ソレノイド磁石の諸元。

中心磁場	磁石全長	磁石口径
1.5 T	2 m	0.8 m

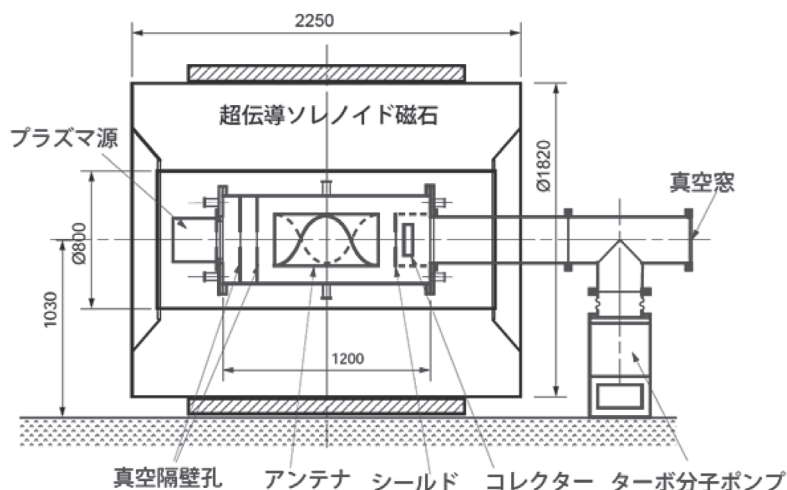


図5 全体図。

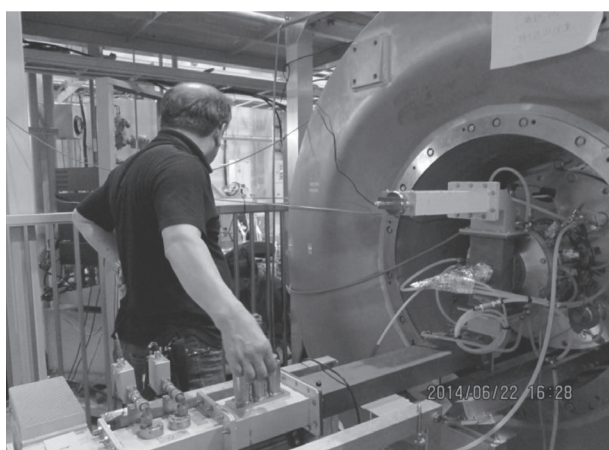


図6 上流側, マイクロ波入力調整中。

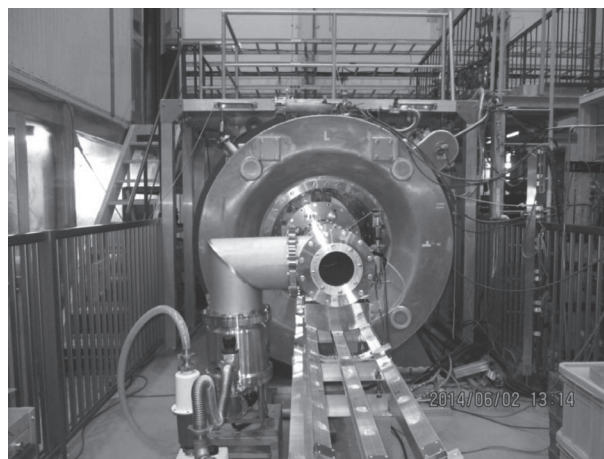


図7 下流側から見た写真。

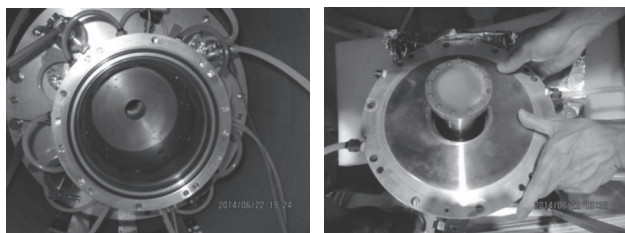


図8 上流部プラズマ室. 左は, 上流端のフランジを外した状態でのプラズマ室の写真. 右の写真は, そのフランジの内面である. 中央のポートの先端に垂鉛板が付き, ポート脇の隙間が見える.

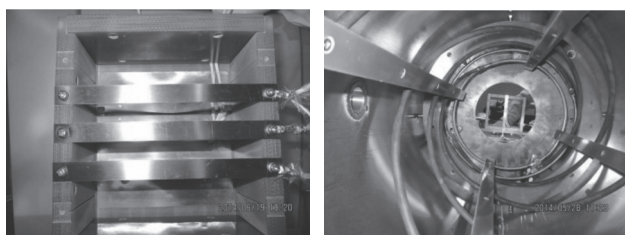


図9 収集箱. 左の写真で, 前面で光を反射しているのがマスクで, その陰に水平に収集板が置かれている. 右の写真は, 上流から, 銅パイプ製のアンテナコイル, そこからの漏れ高周波の遮蔽用の銅板の穴を通して眺めた収集箱である.

にあるモリブデン (Mo) の同位体分離には使えなかった. やむなく垂鉛 (Zn) へと目標を変更した. しかも, 調達できたアンプは, 若干パワー不足であった.

負荷のアンテナコイルにインダクタンス (L) とキャパシタンス (C) を直列接続し, アンプ出力側で, 負荷と合わせて直列共振回路を形成した. 共振時には純抵抗負荷となることを利用し, トランスの巻き数比で, アンプの出力インピーダンス 50Ω と負荷のインピーダンスを整合した. 安定同位体毎の多様な周波数で回路の共振を得るために, コイル状の巻き線に導体を差し込む素子を使って, 共振周波数を可変できるようにした. 可変範囲は垂鉛の全同位体: $A=64, 66, 67, 68, 70$ の ICR 周波数をカバーする.

3.3 実験の経過と結果

2014年1月から2016年10月まで, 期間約1月の実験を計5回行った. 磁石が共同利用なので, 実験の度に装置を搬入し, 組み立て, 調整し, 終了後はばらして搬出するという作業があつて, データ採取のための運転は各実験ともおよそ1

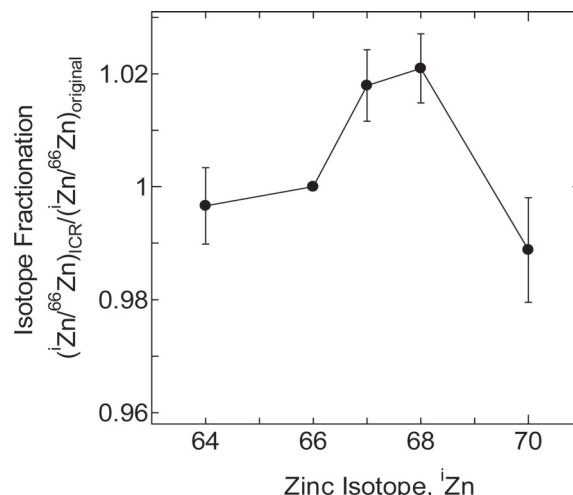


図10 第2回実験後の同位体分析で得られた収集板表面の垂鉛の同位体分布. 縦軸は, 実験前 (original, 天然存在比) の比を取り, さらに ${}^{66}\text{Zn}$ の値で規格化されている. ICR 加熱は, 横軸の原子数が 67 と 68 の間に対応する周波数で行われている. 約 2% 程度の濃縮が見てとれる. 誤差は, 測定時の統計的エラーを示す.

週間程度であった.

第2回実験で図10のような結果を得た¹⁰⁾.

4. 第3回実験以降の現状

4.1 はじめに

第3回以降の実験は, この図10の結果を改善するために行われてきた. その到達点をプロセスに分けて説明する.

本実験での ICR 加熱までのプロセスは図11のようである.

図11の内容をもう少し丁寧に説明すると, まず, プラズマ室内にアルゴンガスを注入し, 商用帯域のマグネトロン・マイクロ波 (2.45 GHz) で, アルゴンプラズマを生成する. 次に, スパッタリング電極に負の高圧電位をかけて, アルゴンイオンを垂鉛電極に衝突させ, 垂鉛元素を叩き出す. そして, その垂鉛元素をアルゴンプラズマ中の電子によって電離する. プラズマ構成物の一つである電子は, 2.45 GHz のマイクロ波によって揺すられ激しく動いている. 電離後の垂鉛イオンは, 垂鉛元素として叩き出された反跳を保持して, 下流方向へと突き進む. その際, 横方向の運動は, 1.5 テスラという強い磁場のサイクロトロン振動に転

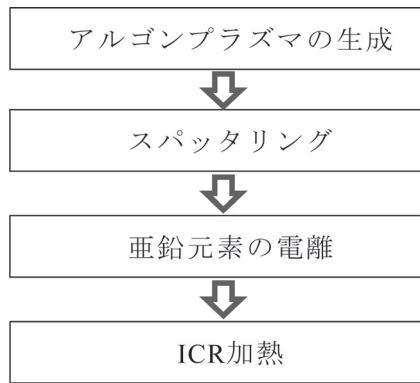


図 11 ICR 加熱までのプロセス.

化して、閉じ込められる。亜鉛イオンは、外部高周波によって、選択的に加熱される。

4.2 スパッタリングまでの過程

スパッタリングまでの過程は、以下のような改造を経て漸次改善されてきた¹¹⁾。

1. 第 2 回実験以降は、マイクロ波導入をケーブル+ループアンテナから導波管に変えた。
2. 第 3 回実験以降は、ターゲット部(スパッター電極やポート)の亜鉛以外の銅表面を、石英ガラスで包み込んだ。
3. 第 4 回実験以降は、マイクロ波導波管のサーキュレーターとダミーロード部の空冷を強化した。
4. 同じく第 4 回実験以降、スパッター電極の形を変えて、マイクロ波が直進できるようにした。
5. 第 5 回実験では、プラズマ生成室を上流側に移動し、ソレノイド磁場変化が最大となる位置がプラズマ室出口付近になるように置き、磁場変化が最大な点で起こるピンチ効果を利用して、電子が下流へ流出するのを防ぐ策をとった。

項目 1, 2 および 3 によって、プラズマ生成が安定化した。項目 4 によって、マイクロ波の入口での反射を減らし、アルゴンプラズマ量(亜鉛元素生成量)を大幅に増やした。項目 5 によって、アルゴンプラズマの生成の閾値となるアルゴンガス注入量(真空度)を下げた。

現在の到達点は、

1. 連続的なプラズマ生成を保證するアルゴンガス流量(閾値)は 5 ccm (cc/min) まで

低めることができた。その時の真空度は ICR コイルの場所で 9×10^{-3} Pa (プラズマ室内で 1.2×10^{-1} Pa) であった。なお、ガスを流さない時の ICR 領域の真空度は 7×10^{-4} Pa である。

ところで、アルゴン元素の幾何学的断面積を使い、ICR 加熱室で 1 m 走った時に、アルゴン相互の衝突が 1 回以下であるという単純計算では、そこでの圧力が 3×10^{-3} Pa 以下でなければならない。 9×10^{-3} Pa は、その目標値に近いが、まだ 3 倍の開きがある。アルゴンガスの注入流量を減らすか、ポンプの排気速度を増やすという策があるが、そのためには、プラズマ発生 of 閾値を下げるか、差圧を増やすかどちらかを達成する必要がある。

2. 第 5 回実験でのターゲットの亜鉛の重量減は 35 g であった。亜鉛板のモル換算 67.5 g/mol を入れると、 0.51 mol になる。一方、この間ターゲットに流れた電流の積分値は、 $5.5 \times 10^4 \text{ C}$ (クーロン) であった。この電流値を電子とイオンが等しく分け合っていると考えると、アルゴンイオン積分値は $2.8 \times 10^4 \text{ C}$ で、イオン電荷を 1 荷のみと仮定すると、アルゴンイオン数は 0.29 mol となる。ターゲットの重量減のおおよそ半分である。この間のターゲット電圧は 200–300 V だったので、スパッタリング率(入射アルゴンに対する出てくる亜鉛の数の比)は $2-3$ ¹²⁾ である。それを考えると、重量減と電流積分値の両者から求めたスパッターされた亜鉛元素の値は、ほぼ一致している。

安定度が良かった一つのランで電流積分値から算出した亜鉛元素の生成率は、 $0.022 \text{ mol/h} = 1.6 \text{ g/h}$ である。

以上のように、スパッタリングまでの過程は、観測値相互にも一致し、理解も進んできた。

ちなみに、アルゴンガス注入量 5 ccm は、 0.012 mol/h の注入量となり、アルゴンイオン数 0.011 mol/h とほぼ等しい。注入したアルゴンは、一回程度は使われたことになる。

4.3 収集系に至る過程

残念ながら、結論としては、第 2 回実験を上回る成果は得られなかった。しかし、この部分でも

問題点はより明確になった。

収集板の重量増（付着量）は、ランの前後の重さを測ることで、時間当たり直して、0.33 mg/hであった。生成された亜鉛元素量 1.6 g/h に比べて極端に少ない。その比は 2×10^{-4} である。電離されれば軸に平行な強磁場に巻き付いて、拡散することなくドリフトする。そして、そのうちの特定のイオンのサイクロトロン振動が加熱され、マスクの影の収集板に当たるはずである。電離後のこの過程の効率、存在比の大きい A=64 同位体などでは、数%はあり、 2×10^{-4} まで小さくはない。

ターゲットから収集箱の前面を見込む立体角比（全立体角との比）は、 10^{-3} なので、電離されなければ、中性の亜鉛元素は収集箱前面に、収集板の重量増 0.33 mg/h の 5 倍の 1.6 mg/h 程度がくることになる。現実的にはターゲット面の垂直方向にスパッターされやすいので、もっと多い。付着物を中性の亜鉛で説明できないことはない。一方、第 3 回実験以降 ICR 励起高周波のパワーを倍加しても、付着物の同位体分析では、分離（濃縮）能は、せいぜい数%にとどまった。分離されない亜鉛が付着していることと矛盾はない。

4.4 オンラインモニター

マスクの影にある収集板を流れる電流は、電子に影響されず、+イオンの量、即ち、プラズマ状態をモニターできるはずである。しかし、これを亜鉛イオンのモニターとして活用することができていない。収集板には、+20 mA 程度の電流が流れている。この全てが亜鉛イオンだと仮定すると、50 mg/h に相当する。しかしこの値は、ICR 高周波をスキャンしても、ICR 高周波を on-off しても、変わらない。収集板には、亜鉛イオンの他に、アルゴンイオンの横方向エネルギーが高い成分（裾）が当たる。スパッター後の亜鉛の電離が少ないので、アルゴンイオンの裾に隠れてしまった、と考えるのが自然である。アルゴンは蒸着物として付着せず、中性化してガスに戻る。だから、同位体分析には痕跡を残さない。

このように、状況証拠が全て亜鉛元素の電離ができていない、小さすぎるということを示している。

そもそも、何故アルゴンまではプラズマ化し、亜鉛の電離が少ないのだろうか。アルゴンの場合は、4.2 節で述べたように、注入した 5 ccm が少

なくとも 1 回程度イオンとして使われているのに、亜鉛の電離は 4 桁落ちである。アルゴンガスは、容器に閉じ込められ、容器の壁に付着しても消えることはない、一方スパッター後の亜鉛元素は容器内を直進し、壁に当たって付着する。戻ってこない。一度横切るだけである。亜鉛には、より高い電離効率が必要になる。

4.5 これから

研究の今後について、2つの方向から議論がされている。

まず一つの方向では、亜鉛元素の電離不足という当面の問題の解決を目指す。具体的には、プラズマ室を磁石の外側へ移動して、2.45 GHz で ECR（電子サイクロトロン共鳴）が起こる 875 Gauss の面をプラズマ室内に取り込み、ECR 電離を利用する方法である。この案では、プラズマ生成室と ICR 励起室の間にダクトを挿入することになる。マイクロ波は強磁場側から導入しなければならないので、導波管接続からアンテナ入力に変えることになる。この 2 点の改造を伴う。

もう一つの方向は、スパッターと電離不足という問題から離れて、ICR 加熱時の電子の問題などの新たな問題を探ることである。具体的には、アルゴンに代わって、クリプトンガスを使って、クリプトン自身の同位体分離をすることを考えている。クリプトンには、5つの安定同位体、そのうち 4 つは 10%以上の存在比を持つというアルゴンにない特徴がある。希ガスなので、付着物の同位体分析の手法は使えないが、より簡便で、条件の最適化もできる、電気信号を使った解析ができるからである。この案では、インピーダンス調整器の改造が必要である。

これらを、漸次試みたいと考えている。

5. おわりに

日本加速器学会誌編集委員の方々には、今回、未達成なところも多い本開発研究の現状を報告する機会を与えていただき、大変感謝しております。

本研究の前半には、東工大・原子炉研究所所属だった藤井靖彦氏、KEK・加速器の松本修二氏、KEK・素核研の吉見弘道氏がグループ員として多大な貢献をされました。また、KEK・加速器の吉井正人氏、原科研の永井泰樹氏他、多くの方々からご支援と励ましをいただきました。実験中は、

KEK・低温センターおよび素核研から多大なサポートをいただきました。本研究に対する大部分の資金援助は、科学研究費（課題番号：24310078）によるものです。あらためて、諸氏のご厚情に感謝いたします。

参考文献

- 1) 最近の情報は, K. Olive et al. (Particle Data Group), *Chinese Physics C* 38, 698 (2014) にある.
- 2) 理研の重窒素 (^{15}N) 計画は, 戦後我国の農業の近代化に大きな寄与をした. 仁科芳雄氏らが SI によるトレーサーの途を模索し始めた物語は, 玉木英彦, 江沢洋編, “仁科芳雄 日本の原子科学の曙” みすず書房 (1991 年 12 月) 172 頁あたり (中根良平執筆) に詳しい.
- 3) PET 用薬剤・フルオロデオキシグルコース (FDG) はポジトロン崩壊する ^{18}F を含んでいる. この ^{18}F は, 近傍の安定同位体 ^{18}O から小型加速器で作っている. 例えば, 日本原子力文化振興財団の“原子力の基礎講座 アイソトープ・放射線の利用” (平成 13 年改訂第 5 版) 等を参照されたい.
- 4) M. Dawson et al., “Isotope Separation in Plasma by Use of Ion Cyclotron Resonance”, *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976) 1547; T. Suzuki and Y. Fujii, “ICR プラズマ同位体分離”, *Plasma Kakuyugo Gakkaishi* 74 (1988) 250.
- 5) DOE Audit Report, “Calutron Isotope Production Capabilities”, DOE/IG-0574 Nov. 2002.
- 6) N. R. Stevenson, T. S. Bigelow and F. J. Tarallo, “Production of stable isotopes utilizing the plasma separation process”, *Nucl. Instr. and Meth.* B241 (2005) 652.
- 7) D. A. Dolgolenko and Yu. A. Muromkin, “Plasma isotope separation based on ion cyclotron resonance”, *Phys. Uspekhi* 52 (2009) 345.
- 8) E. P. Potanin, “Analysis of the Separation of Gadolinium Isotopes by the ICR method”, *Plasma Phys. Report* 34 (2008) 140.
- 9) K. Ohmi, T. Inagaki, H. Kichimi, A. Takagi, K. Tanaka, T. Suzuki, T. Shibata and Y. Fujii, “Design of KEK Test Machine for Mo Isotope Separation based on Ion Cyclotron Resonance Plasma Separation”, *JJAP* 52 (2013) 126401-1.
- 10) 稲垣隆雄, 他 7 名, 平成 26 年度日本物理学会秋季大会, 講演番号: 18aSH09 (2014 年 9 月 18 日, 佐賀大学).
- 11) 稲垣隆雄, 他 7 名, 平成 28 年度日本物理学会年次大会, 講演番号: 20pAF11 (2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学).
- 12) S. M. Rossnagel, “High-Vacuum-Based Processes: Sputtering”, in Chapter 5.1 of *Handbook of Vacuum Science and Technology*, edited by D. M. Hoffman et al. (1998) Elsevier inc.