

جداسازی و پالایش شیمیایی ایزوتوپ پایدار ساماریم- ^{152}Sm با استفاده از

روش الکترومغناطیسی (EMIS)

هوشنگ بختیاری، محمد رضا قاسمی، پروین سرآبادانی، معصومه شربتداران، ضرام

اسدالهی، سید محمود محاطی، حسن نور کجوری، هوشیار سیدی، پروین بلاش آبادی

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه فیزیک و شتابگرها

(hbakhtiari@nrcam.org)

خلاصه

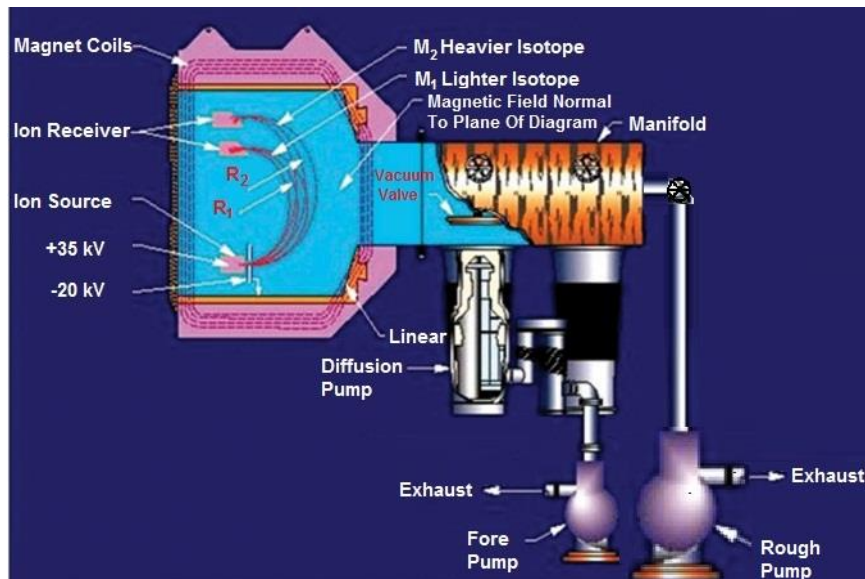
سیستم جداکننده الکترومغناطیسی برای دستیابی به ایزوتوپ‌های پایدار و غنی شده عنصر ساماریم بر اساس نیاز به ایزوتوپ ^{152}Sm برای تولید رادیوایزوتوپ ^{153}Sm که یک رادیوداروی درمانی است، به کار می‌رود. در این فرآیند از ماده اولیه تری‌اکسید ساماریم جهت شارژدر چشمه یونی کاترون استفاده شد. مراحل بازیافت از پاکت‌ها، پالایش شیمیایی و در نهایت کنترل کیفی ایزوتوپ‌ها از طریق آنالیز طیف‌سنجی جرمی برای تعیین خلوص ایزوتوپی، آنالیز عنصری با استفاده از روش الکتروشیمیایی ولتامتری چرخه‌ای الکتروود خمیر کربن اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر خلوص ایزوتوپی ۸۲/۵۴٪ و خلوص شیمیایی ۹۵٪ می‌باشد.

کلمات کلیدی: جداکننده الکترومغناطیسی، ایزوتوپ، ساماریم، طیف‌سنجی جرمی، الکتروشیمیایی

مقدمه

ایزوتوپ‌های پایدار کاربرد وسیعی در تحقیقات بنیادی و پزشکی دارند، به طوری که با رشد تحقیقات علوم مختلف نیاز برای ایزوتوپ‌های جدید افزایش یافته است. در هر جامعه‌ای وجود یک منبع تامین کننده ثابت و قابل اعتماد ایزوتوپ‌های پایدار و رادیواکتیو برای کاربردهای پزشکی، کشاورزی و صنعتی ضروری می‌باشد. تولید ایزوتوپ‌های عناصری نظیر Fe, Mo, Ni, Sr, Zn, Sm و ... و تولید ایزوتوپ‌های جدید مورد نیاز مراکز علمی و صنعتی، با استفاده از سیستم جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپ‌ها، موجب ارتقای دانش فنی و توانمندی تحقیقاتی و گامی در جهت رشد اقتصادی و استقلال صنعتی می‌باشد. ایزوتوپ‌ها علاوه بر تولید رادیوداروها، در علوم زیستی، تغذیه، مطالعات منابع آب و ... کاربرد دارند.

جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپها



شکل (۱): سیستم جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپها [1]

تئوری

نیرویی که بر یک ذره باردار در یک میدان مغناطیسی وارد می‌شود، از رابطه $F = qV \times B$ محاسبه می‌گردد که در آن V سرعت ذره باردار است که بستگی به جرم ذره نیز دارد، B میدان مغناطیسی عمود بر F و q بار ذره می‌باشد. سیستم جداکننده بر اساس این رابطه طراحی شده است. یون‌ها در چشمه یونی تولید شده و به وسیله ولتاژ بالا شتاب یافته و با سرعت زیاد وارد محفظه خلاء می‌شوند. میدان مغناطیسی باعث منحرف شدن یون‌ها شده و با توجه به جرم، مسیرهای متفاوتی را طی می‌کنند. به‌طور کلی تمام یون‌های با انرژی و جرم یکسان در یک نقطه متمرکز و شعاع مسیر پرتو از رابط (۱) بدست می‌آید [2].

$$\begin{cases} F_m = Bev/c \\ F_c = mv^2/R \end{cases} \Rightarrow Bev/c = mv^2/R \Rightarrow v = \sqrt{2eV/m} \therefore R \simeq \frac{144.5\sqrt{MV}}{B} \quad (1)$$

که در آن R شعاع مسیر یون بر حسب سانتی متر، B میدان مغناطیسی بر حسب گوس، V ولتاژ شتاب دهنده (بر حسب ولت) و M عدد جرمی یون‌ها می‌باشند.

یون‌هایی که با جرم یکسان از چشمه یونی به داخل محفظه وارد می‌شوند دارای واگرایی زاویه‌ای اولیه نسبت به پرتو مرکزی می‌باشند. پرتوهای پراکنده شده تحت زاویه $\pm\alpha$ از پرتو مرکزی انحراف می‌یابند. بنابر این در یک نقطه مشترک با پرتو مرکزی هم کانون نمی‌باشند. برای کانونی کردن (جمع ایزوتوپ‌ها در یک نقطه) این پرتوهای واگرا شده با پرتو مرکزی، می‌توان میدان را برای پرتو مرکزی تقویت و برای پرتوهای کناری تضعیف نمود. برای این منظور، بین سطوح قطبین مگنت شیم‌های آهنی قرار داده که باعث ایجاد میدان غیر یکنواخت و در نتیجه تقویت پرتو مرکزی و تضعیف پرتو کناری و در نهایت بهبود کانونی شدن پرتو واگرا با پرتو مرکزی را سبب می‌گردد [3].

– اجزا اساسی جداکننده الکترومغناطیسی

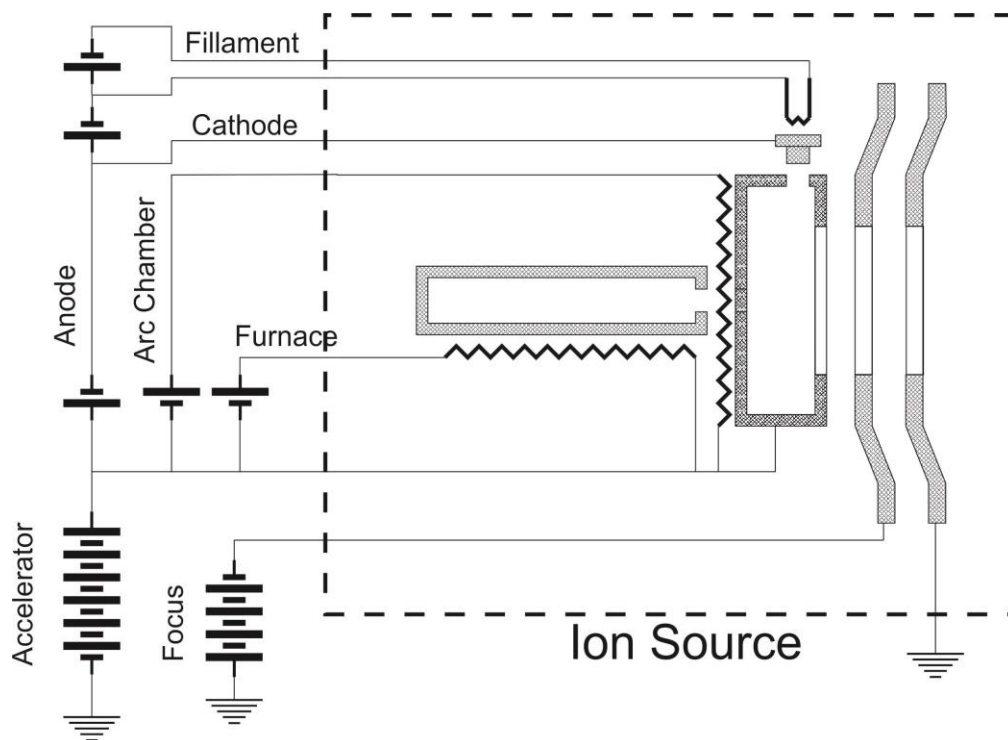
قسمت‌های اصلی عبارتند از: چشمه یونی، کلکتور، محفظه خلاء، الکترومگنت، منابع تغذیه، سیستم‌های خلاء و خنک کننده

چشمه یونی کاترون

چشمه یونی جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپ ها شامل الکترودهای مختلف است که هر کدام از آنها نیاز به یک منبع تغذیه DC خواهند داشت، مجموعه این منابع تغذیه و مدارهای کنترل مربوط به آنها به عنوان منبع تغذیه چشمه یونی نامیده می شود [4]. مشخصات الکتریکی این منابع تغذیه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) مشخصات الکتریکی منابع تغذیه

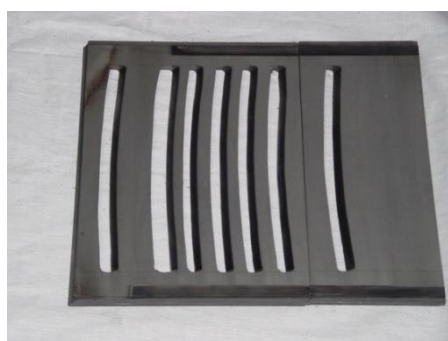
| منبع تغذیه | نوع منبع | رنج ولتاژ | رنج جریان | ولتاژ پایه |
|-------------------------|----------|-----------|-----------|------------|
| شتاب دهنده | DC | 0-35KV | 0-0/2A | زمین |
| متمرکز کننده | DC | 0-25KV | 0-0/2A | زمین |
| فیلمان | DC | 0-15V | 0-150A | ولتاژ شتاب |
| کاتد | DC | 0-1000V | 0-1A | ولتاژ شتاب |
| آند | DC | 0-500V | 0-5A | ولتاژ شتاب |
| هیتر محفظه قوس الکتریکی | DC | 0-50V | 0-50A | ولتاژ شتاب |
| هیتر کوره | DC | 0-15V | 0-150A | ولتاژ شتاب |



شکل (۲): شماتیک چشمه یونی کاترون

کلکتور

کلکتور که یکی از قسمت‌های اساسی دستگاه است برای جمع‌آوری ایزوتوپ‌ها استفاده می‌شود که طراحی آن با در نظر گرفتن مواردی چون راندمان جمع‌آوری بالا، مقاوم در مقابل حرارت، مقاوم در مقابل بمباران یونی، عدم واکنش شیمیایی با ایزوتوپ‌ها، استخراج آسان ایزوتوپ از روی پاکت‌ها، عدم ایجاد آلودگی ایزوتوپی انجام شد. جنس قطعات مورد استفاده در ساخت آن باید غیرمغناطیسی (فولاد ضدزنگ غیرمغناطیسی، آلومینیوم، مس و گرافیت) باشد و به منظور اندازه‌گیری جریان پرتو یونی، قسمت‌های مختلف کلکتور (پاکت‌ها، صفحه جلویی، درب، پایه) بایستی از نظر الکتریکی کاملاً نسبت به یکدیگر عایق شده باشند [5]. برای تنظیم دقیق‌تر موقعیت پاکت‌ها در نقطه تمرکز پرتو یون‌ها، نیاز به حرکت کلکتور در داخل محفظه خلا می‌باشد. به منظور بالا بردن کارایی پاکت‌ها در جمع‌آوری ایزوتوپ‌ها، باید دو عامل کاهش در اثر تبخیر حرارتی و اثر کندوپاش را در نظر گرفت.

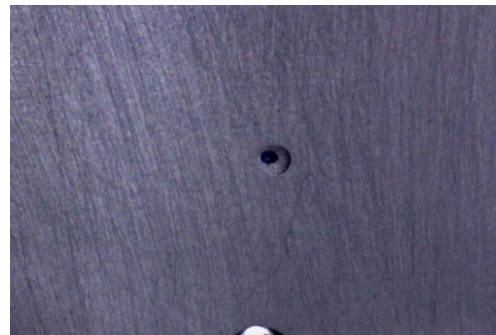


شکل (۳): صفحه جلویی گرافیتی و پاکت ایزوتوپ



شکل (۴): پاکت‌های گرافیتی در غلافی از مس و آلومینیوم

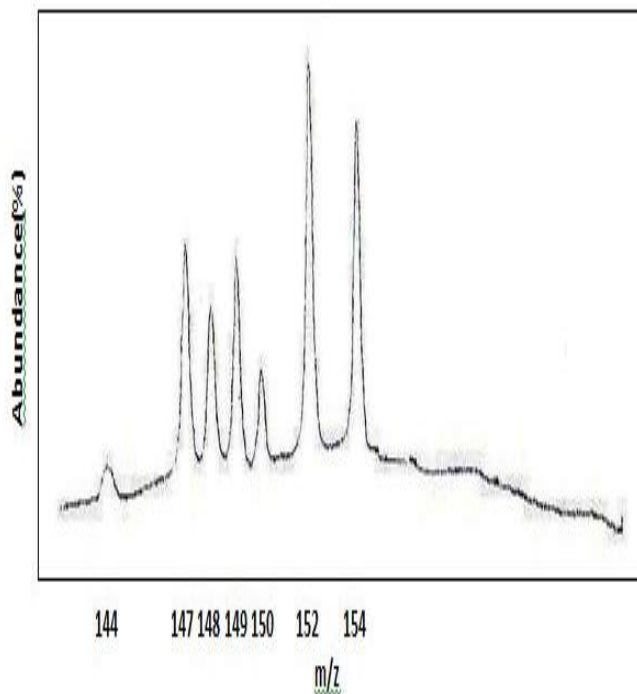
بر روی صفحه جلویی کلکتور یک دتکتور نصب شد تا پیک جرمی ایزوتوپ‌ها قبل از عمل جمع‌آوری با یک دستگاه ثابت بر روی کاغذ ثبت شود. این عمل برای کنترل کیفی اولیه و مشاهده صحت جداسازی ایزوتوپ‌ها می‌باشد. تصاویر زیر دتکتور و شکاف آن را بر روی درب کلکتور، نشان می‌دهند.



شکل (۵): حفره ورود پرتو به فنجان فارادی نصب شده روی درب کلکتور

عملیات جداسازی

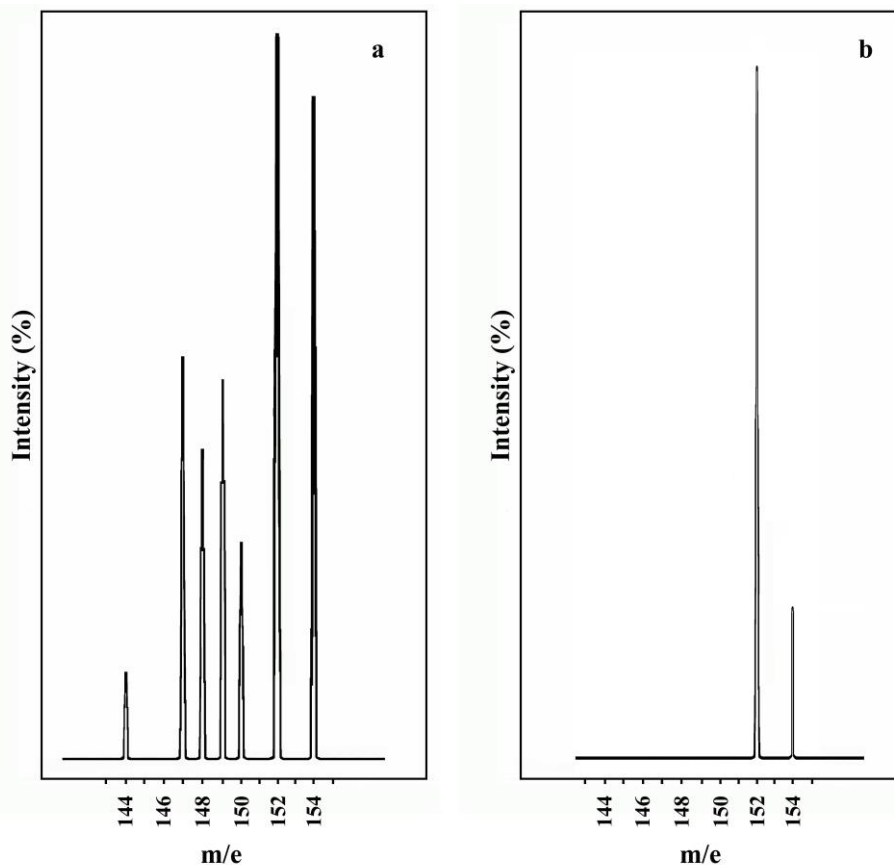
ماده اولیه ساماریم کلراید $\text{SmCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ را در بوته چشمه یونی کاترون حرارت داده تا از حالت جامد به بخار تبدیل شود. بخار در محفظه قوس الکتریکی چشمه یونی به وسیله کاتد داغ تحت بمباران الکترونی قرار می گیرد و به روش برخورد الکترونی یونیزه می شود و پرتوهای یونی با یک انرژی ثابت وارد میدان مغناطیسی یکنواخت شده و مسیر نیم دایره را طی خواهند کرد که شعاع انحناء برای جرم های مختلف، متفاوت می باشد. با تنظیم جریان کویل های الکترومغناطیسی، میدان مغناطیسی مناسب (در حدود ۲۰۰۰ گوس) به محفظه خلاء اعمال و پس از اطمینان از صحت اتصالات الکتریکی، تست ولتاژ فشار قوی انجام می شود. با هیتر محفظه قوس الکتریکی بوته گرافیتی حاوی ماده اولیه در چشمه یونی گرم و ماده تبخیر شده در صورت نیاز به دمای بیش از 340°C از هیتر دیگری (کوره) استفاده می شود. وقتی که در شروع کار، دمای چشمه یونی به حدود 540°C رسید با اعمال ولتاژ کاتدی مناسب، پلاسمایی پایدار در محفظه قوس الکتریکی ایجاد می شود. با اعمال ولتاژی در حدود ۳۰ kV، یون های ساماریم یک بار مثبت از چشمه یونی استخراج شده و بر اساس تفاوت جرم از یکدیگر تفکیک و مسیر ۱۸۰ درجه ای را تا رسیدن به پاکت های مخصوص هر ایزوتوپ طی می کنند. در نتیجه یون های ایزوتوپ های مختلف از هم تفکیک و در پاکت های مجزا که در انتهای مسیر قرار دارند، جمع آوری می شوند در پایان یک دوره کاری، ایزوتوپ های جمع آوری شده از پاکت ها استخراج و بعد از طی مراحل پالایش شیمیائی محصول نهایی به فرم اکسید ایزوتوپ مورد نظر تهیه می شود [6,7].



شکل (۶): طیف ایزوتوپ‌های ساماریوم در زمان جداسازی و جمع‌آوری

کنترل کیفی

کنترل کیفی فیزیکی ایزوتوپ‌ها از طریق آنالیز طیف‌سنجی جرمی برای تعیین خلوص ایزوتوپی انجام پذیرفت. از طیف سنج جرمی مدل Beifen, LZD-207، مجهز به چشمه یونی حرارتی و آنالیزور جرمی از نوع تک تمرکز (Single Focusing) استفاده شد. با تغییر میدان مغناطیسی، طیف جرمی نمونه‌ها ثبت شد. شعاع انحنای پرتو یونی ثابت و بازوی انحراف ۶۰ درجه برابر با ۲۵ سانتی متر است. برای جمع‌آوری یون‌های خروجی از آنالیزور جرمی از یک دتکتور قیف فارادی و برای تقویت جریان الکتریکی ایجاد شده در اثر برخورد یون به دتکتور از تقویت کننده D.C. با مقاومت $3.3 \times 10^{11} \Omega$ استفاده شد. محاسبات حاصل از نتایج آنالیز در صد غنای ایزوتوپی ^{152}Sm ، ۸۲/۵۴٪ را نشان می‌دهد.



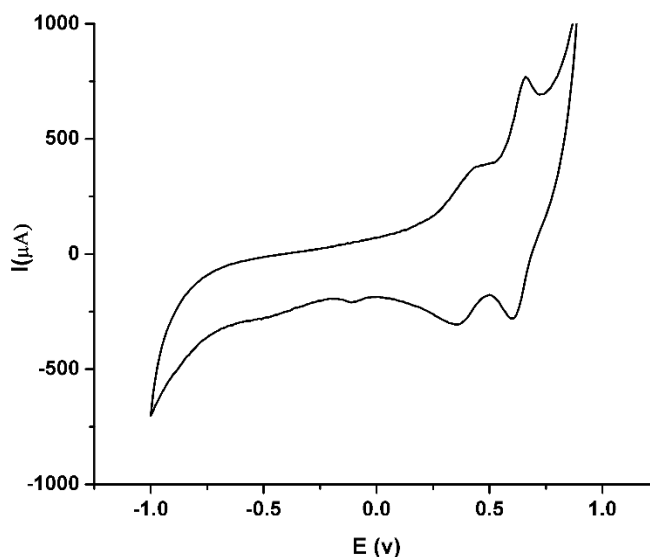
شکل (۷): طیف جرمی نمونه های (a) ساماریم طبیعی (b) ساماریم-۱۵۲ غنی شده

جدول (۲): نتایج خلوص ایزوتوپی ایزوتوپ ساماریم-۱۵۲ و ساماریم طبیعی

| درصد غنای ایزوتوپی محاسبه شده برای ساماریم-۱۵۲ | درصد غنای ایزوتوپی محاسبه شده برای نمونه ساماریم طبیعی | درصد غنای ایزوتوپی برای ساماریم طبیعی بر اساس جداول معتبر | ایزوتوپهای ساماریم |
|--|--|---|--------------------|
| Neg* | ۳/۱۲ | ۳/۰۷ | ¹⁴⁴ Sm |
| Neg | ۱۵/۲۰ | ۱۴/۹۹ | ¹⁴⁷ Sm |
| Neg | ۱۱/۴۸ | ۱۱/۲۴ | ¹⁴⁸ Sm |
| Neg | ۱۴/۰۶ | ۱۳/۸۲ | ¹⁴⁹ Sm |
| Neg | ۷/۷ | ۷/۳۸ | ¹⁵⁰ Sm |
| ۸۲/۵۴ | ۲۵/۶۱ | ۲۶/۷۵ | ¹⁵² Sm |
| ۱۷/۴۶ | ۲۲/۸۳ | ۲۲/۷۵ | ¹⁵⁴ Sm |

Neg* در دامنه حد تشخیص دستگاه نبوده است

کنترل کیفی شیمیایی ایزوتوپ ساماریم-۱۵۲ با استفاده از روش الکتروشیمیایی ولتامتری چرخه ای الکتروکد خیمیر کربن اصلاح شده تعیین گردید. مطالعات الکتروشیمیایی توسط دستگاه پتانسیو استات/گالوانواستات BHP2063 انجام شد. کلیه محاسبات ولتامتری چرخه ای با کمک یک سیستم سه الکتروکد، شامل الکتروکد خیمیر کربن اصلاح شده، الکتروکد نقره / کلرید نقره (Ag/AgCl) و الکتروکد پلاتین (به ترتیب به عنوان الکتروکد کار، الکتروکد شاهد و الکتروکد کمکی) انجام شد. تمامی جریانات در مقابل این الکتروکد شاهد گزارش شده است. تعیین خلوص شیمیایی ایزوتوپ ساماریم طی دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول منحنی کالیبراسون برای محلول یونهای ساماریم طبیعی رسم گردید و در مرحله بعد نمونه ایزوتوپ ساماریم غنی ساز شده آنالیز گردید. شکل ۱ ولتاگرام چرخه ای الکتروکد خیمیر کربن اصلاح شده در محلولهای حاوی بافر فسفات و ایزوتوپ ساماریم-۱۵۲ غنی شده توسط جداکننده الکترومغناطیسی ایزوتوپها در سرعت روبش ۱۰۰ میلی ولت بر ثانیه می باشد.



شکل (۸): ولتاگرامهای چرخه ای الکتروکد خیمیر کربن اصلاح شده در محلولهای حاوی بافر فسفات و ایزوتوپ ساماریم-۱۵۲ غنی شده در سرعت روبش ۱۰۰ میلی ولت بر ثانیه

نتایج آنالیز ایزوتوپ ساماریم-۱۵۲ توسط روش الکتروشیمیایی ولتامتری چرخه ای نشان می دهد که وجود پیک آندی با جریان ۶۴۴ میکروآمپر در پتانسیل آندی ۰/۶۶ ولت و تطابق آن با منحنی کالیبراسیون دال بر وجود ۹/۵ میلی گرم در لیتر ایزوتوپ ساماریم می باشد. و از آنجایی که محلول ۱۰ میلی گرم در لیتر ایزوتوپ ساماریم-۱۵۲ برای آنالیز تهیه شده بود لذا درصد خلوص شیمیایی ایزوتوپ غنی شده ساماریم حدود ۹۵٪ می باشد.

مراجع

1. <http://www.globalsecurity.org>
2. J. Koch, "Electromagnetic Isotope Separator and Application of Electromagnetically Enriched Isotopes", Amesterdam (1958)
3. Technical Description of Electromagnetic Isotope Separation. CIAE, 1, 7 (1987)
4. Gongpan, Li Zengpu, Pei Tianli and Wang Chaoju, "Some experimental studies of the calutron ion source" Inatitute of Atomic Energy, Academia Sinica, Beijing, China, Available online 21Oct. 2002
5. Lin Zhizhou, The Collector, China, P(5-11), 1991. (کلکتور)
6. Boyd Weaver, Chemical Refinement Procedures in the Electromagnetic Separation of Isotopes, Oak Ridge National Laboratory Report, Aug. 8 (1955)
7. J. A. Marinsky and Y. Marcus, "Ion Exchange and Solvent Extraction", 5 (1973). Keim C.P., Savage H.W., Weaver B., Separation of the Natural Isotopes of Samarium 1 Aug. (1950) Report Numbers Y-640 United States