

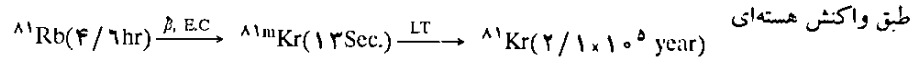
گزینش واکنش هسته‌ای مناسب برای تولید رادیوداروی کریبتون-۸۱m

محمد رضا عبودزاده، حسین آفریده، سید محمد حاجی سعید

بخش سیکلوترون، مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

کریبتون-۸۱m رادیوایزوتوپی است گازی شکل و ناپایدار با نیمه‌عمری برابر ۱۳ ثانیه که در اثر واپاشی روبیدیوم-۸۱،



طبق واکنش هسته‌ای

تولید می‌شود.

کریبتون-۸۱m، پرتوگاما با انرژی ۱۹۰ کیلو الکترون‌ولت و با فراوانی ۶۵٪ تابش می‌کند. نیمه‌عمر کوتاه این رادیوایزوتوپ و فراوانی نسبتاً بالای پرتوگامای ساطع شده از آن در اثر واپاشی، سبب شده است که پزشکان هسته‌ای بتوانند به کمک دوربینهای گاما از آن به عنوان ردیاب مناسب در عکسبرداریهای متعدد ریوی، بدون آسیب دیدگی زیاد بیمار، استفاده کنند. روبیدیوم-۸۱ هسته مادر کریبتون-۸۱m است و به دلیل کوتاه بودن نیمه عمر کریبتون-۸۱m، در هر لحظه می‌توان آن را از نظر آکتیویته در حال تعادل با روبیدیوم-۸۱ دانست.

در این مقاله، ابتدا محاسبه نظری بازده تولید روبیدیوم-۸۱ به کمک کد محاسباتی ALICE-91 [۱ و ۲] بررسی شده، سپس نتایج این بررسی با نتایج تجربی بدست آمده مقایسه گردیده است.

از متداولترین واکنشهای هسته‌ای برای تولید روبیدیوم-۸۱

انتخاب واکنش هسته‌ای مناسب

درج شده است [۳].

رادیوایزوتوپ روبیدیوم-۸۱ را می‌توان به یاری

واکنشهای هسته‌ای متعددی تولید کرد. در جدول ۱ فهرستی

جدول ۱ -

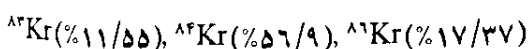
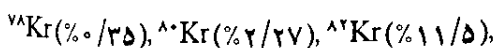
| حالت فیزیکی | ماده هدف | واکنش هسته‌ای | ردیف |
|-------------|---|---|------|
| جامد | NaBr Cu ₇ Br ₇ | ${}^{74}\text{Br}(\alpha, \gamma n){}^{81}\text{Rb}$ | ۱ |
| جامد | NaBr | ${}^{81}\text{Br}(\alpha, \gamma n){}^{81}\text{Rb}$ | ۲ |
| جامد | NaBr/CuBr ₇ | ${}^{74}\text{Br}({}^3\text{He}, n){}^{81}\text{Rb}$ | ۳ |
| جامد | NaBr | ${}^{81}\text{Br}({}^3\text{He}, \gamma n){}^{81}\text{Rb}$ | ۴ |
| گاز | ${}^{80}\text{Kr}(\% 37)$ | ${}^{80}\text{Kr}({}^3\text{He}, p, n)\text{Rb}){}^{81}\text{Rb}$ | ۵ |
| گاز | ${}^{80}\text{Kr}(\% 37)$ ${}^{80}\text{Kr}(\% 70)$ ${}^{80}\text{Kr}(\% 91/8)$ | ${}^{80}\text{Kr}(d, n){}^{81}\text{Rb}$ | ۶ |
| گاز | Kr(Natu.) | ${}^{82}\text{Kr}(d, \gamma n){}^{81}\text{Rb}$ | ۷ |
| گاز | Kr(Natu.) | ${}^{82}\text{Kr}(p, \gamma n){}^{81}\text{Rb}$ | ۸ |
| گاز | Kr(Natu.) | | |
| گاز | Kr(Natu.) | | |

ديگر، چون احتمال انجام واكنش‌هاي هسته‌اي موردنظر در انرژي‌هاي کمتر از ۱۰ مگاالکترون‌ولت بسيار کم است لازم بود که در محدوده ۱۰ تا ۳۰ مگاالکترون‌ولت، انرژي بهينه انتخاب شود.

براي تعيين انرژي بهينه که در آن حداکثر توليد محصول موردنظر (^{81}Rb) و حداقل توليد محصولات مزاحم رخ دهد، مي‌بايست مقدار هر يک از محصولات حاصل از واكنش‌هاي هسته‌اي که به موازات واكنش موردنظر توليد مي‌شود بررسي گردد. دو پارامتر سطح مقطع واكنش هسته‌اي^۱، (يا احتمال برخورد واكنش‌ها) و فراواني ايزوتوپ هدف عوامل بسيار مؤثر در اين بررسي بودند.

اندازه‌گيري عملي سطح مقطع واكنش‌هاي هسته‌اي کار بسيار دقيق و كاملاً "پيچيده‌اي است که معمولاً" در آزمايشگاه‌هاي مجهز فزيك هسته‌اي انجام مي‌گيرد. در سالهاي اخير به موازات گسترش دانش رايانه‌اي و کاربرد آن در تمام شاخه‌هاي علمي و فني، کد رايانه‌اي جالبي تحت عنوان ALICE-91 در زمينه فزيك هسته‌اي به بازار عرضه شده است که از قابليت‌هاي متعددي از جمله، محاسبه سطح مقطع واكنش‌هاي هسته‌اي براساس «مدل واپاشي هسته مرکب برانگيخته پيش از تعادل» برخوردار مي‌باشد. از اينرو تصميم گرفته شد که با استفاده از اين کد محاسباتي، ضمن آنکه سطح مقطع‌هاي موردنظر حساب مي‌شوند، ميزان صحت و دقت اين برنامه نيز ارزشيابي گردد.

گاز كريپتون طبيعي از ايزوتوپ‌هاي پايدار و با درصد‌هاي فراواني مختلف زير تشكيل يافته است:



واكنش‌هاي هسته‌اي مناسب براي توليد روبيديوم- 81 در شتابدهنده مرکز تحقيقات کشاورزي و پزشكي هسته‌اي کرج، با توجه به اين که شتابدهنده موجود تنها قادر به توليد ذرات دوترون و پروتون به ترتيب با حداکثر انرژي ۱۵ و ۳۰ مگاالکترون‌ولت است، واكنش‌هاي ردیف ۶ و ۷ و ۸ جدول ۱ به عنوان واكنش‌هاي برگزيده مورد بررسي قرار گرفته‌اند.

در واكنش‌هاي ردیف ۶، ماده هدف بايد گاز غني شده با فراواني نسبي $2/27\%$ در گاز كريپتون طبيعي باشد. اين گاز با توجه به درجه غناي بالا، از قيمت بالايي نيز برخوردار است؛ در مورد واكنش ردیف ۷، با توجه به حداکثر انرژي دوترون‌هاي موجود، امکان انجام واكنش هسته‌اي موردنظر وجود ندارد. تنها واكنش هسته‌اي ردیف ۸ است که مشکلات پيش‌گفته را ندارد، زيرا در اين ردیف، گاز هدف كريپتون طبيعي است که واكنش هسته‌اي آن در انرژي‌هاي ۳۰ مگاالکترون‌ولت و کمتر از آن، به راحتی انجام پذير است:

$$^{81}\text{Kr}(\text{P}, \gamma n) \xrightarrow{(4/6 \text{ ساعت})} ^{81m}\text{Kr} \quad (13 \text{ ثانيه})$$

انتخاب انرژي مناسب پروتون‌ها براي بمباران گاز كريپتون طبيعي

اصولاً انتخاب انرژي مناسب ذرات شتاب داده شده براي بمباران هدف، به عوامل متعددي بستگي دارد که مهمترين آنها عبارتند از:

الف - توان شتابدهنده

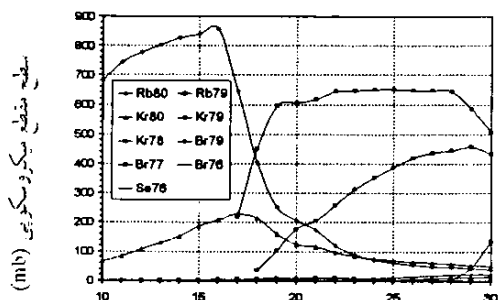
ب - حداکثر مقدار توليد محصول موردنظر

ج - حداقل مقدار توليد محصولات مزاحم

توان دستگاه شتابدهنده مرکز کرج به اندازه‌اي است که حد بالاي انرژي موردنياز جهت واكنش هسته‌اي $^{81}\text{Kr}(\text{P}, \gamma n)$ را به خوبي تأمين مي‌کند. از طرف

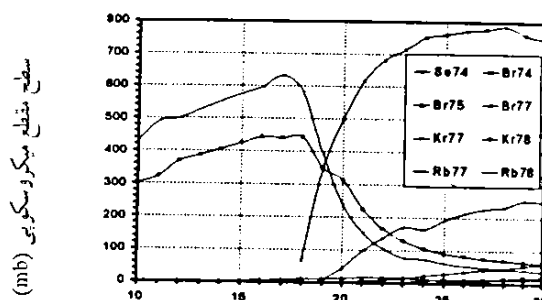
شتابداده شده نشان دهد، بدست آورده و به صورت نمودارهایی رسم کرده‌ایم (شکل ۱).

براین اساس، در محدوده انرژی ۳۰-۱۰ مگاالکترون‌ولت، سطح مقطع واکنشهای هسته‌ای مختلفی را که ممکن است هر ایزوتوپ پایدار کریبتون با پروتون‌های



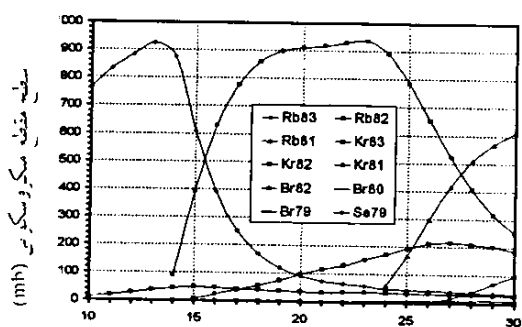
انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۱-ب) - سطح مقطع برخورد پروتونها با ^{80}Kr



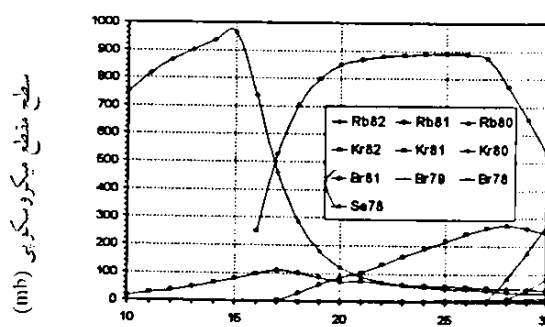
انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۱-الف) - سطح مقطع برخورد پروتونها با ^{78}Kr



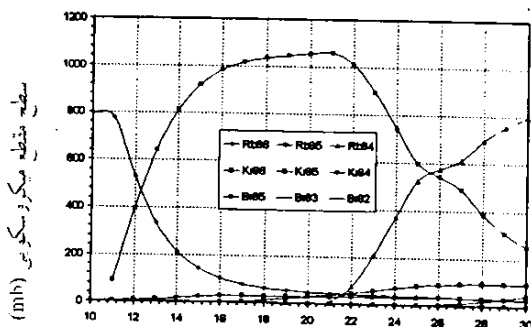
انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۱-د) - سطح مقطع برخورد پروتونها با ^{82}Kr



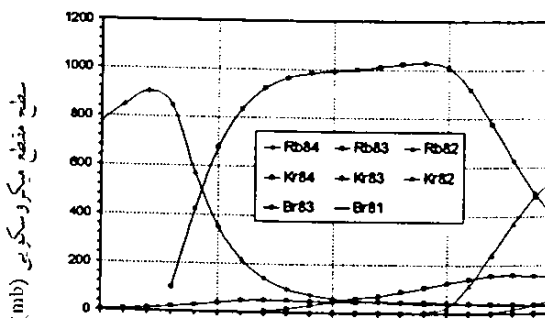
انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۱-ج) - سطح مقطع برخورد پروتونها با ^{81}Kr



انرژی پرتابه پروتون (MeV)

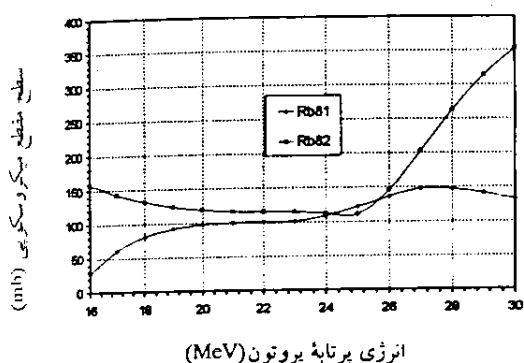
(۱-و) - سطح مقطع برخورد پروتونها با ^{83}Kr



انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۱-ه) - سطح مقطع برخورد پروتونها با ^{84}Kr

شکل ۱- نمودارهای سطح مقطع برخورد پروتونهای شتابداده شده با ایزوتوپهای پایدار کریبتون



شکل ۲- نمودار سطح مقطع تشکیل ^{81}Rb و ^{82}Rb در اثر بمباران گاز کریپتون توسط پروتونها در محدوده انرژی ۱۶-۳۰ MeV

ساخت محفظه گاز کریپتون هدف

در طراحی محفظه گاز هدف مناسب، عوامل متعددی دخالت دارند که مهمترین آنها عبارتند از: شکل محفظه و طول و قطر آن. برای تعیین شکل محفظه می‌بایست نحوه نفوذ ذرات شتابداده شده در گاز هدف، مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا مناسبترین حالت یک محفظه گازی حالتی است که با رعایت حداقل حجم، حداکثر برخورد بین ذرات شتابداده شده و مولکولهای گاز هدف رخ دهد و از برخورد آنها با جدار محفظه، که به نوعی سبب اتلاف ذرات و آکتیو شدن جدار می‌شود جلوگیری به عمل آید. مسیر نفوذ پروتونها در گاز کریپتون طبیعی در فشار ۲/۵ اتمسفر و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به وسیله کد محاسباتی TRIM [۴] حساب شد. یکی از پارامترهای مورد نیاز در این برنامه، طول محفظه هدف بود که به وسیله برنامه TRIM تعیین شد. بُرد نفوذی پروتونها^۲ در محدوده انرژی ۱۰-۳۰ مگاالکترون‌ولت در گاز کریپتون طبیعی با مشخصات ذکر شده، در شکل ۳ نشان داده شده است.

رادیونوکلئیدهای مزاحم را که به هنگام تولید یک رادیونوکلئید خاص در اثر واکنشهای هسته‌ای موازی تولید می‌شوند از لحاظ طول نیمه عمر می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

الف) رادیونوکلئیدهایی که دارای نیمه عمر کوتاه‌اند،

ب) رادیونوکلئیدهایی که نیمه عمر طولانی دارند،

ج) رادیونوکلئیدهایی که نیمه عمری در حد نیمه عمر رادیونوکلئید مورد نظر دارند.

به عنوان مثال، در مقایسه با ^{81}Rb (محصول اصلی) که نیمه عمر آن ۴/۶ ساعت است، رادیونوکلئید ^{84}Rb با نیمه عمر ۳۲/۸ روز و ^{86}Rb با نیمه عمر ۲۲/۹ دقیقه به ترتیب رادیونوکلئیدهای با نیمه عمر طولانی و کوتاه محسوب می‌شوند. رادیونوکلئیدهایی که نیمه عمر کوتاه دارند عملاً پس از گذشت زمانی کوتاه از بین می‌روند و آنهایی که نیمه عمر طولانی دارند، در مقایسه با رادیونوکلئید مورد نظر جزو ایزوتوپهای پایدار محسوب می‌شوند. بر این اساس، تمام محصولات ناشی از بمباران گاز کریپتون طبیعی با پروتون از لحاظ نیمه عمر، با ^{81}Rb مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. از این بررسی مشخص شد که، ^{82}Rb با نیمه عمر ۶/۵ ساعت، مهمترین ناخالصی است که باید در انتخاب انرژی بهینه پروتونها مدنظر گیرد. نمودار تغییرات سطح مقطع تشکیل رادیوایزوتوپهای ^{81}Rb و ^{82}Rb در اثر بمباران گاز کریپتون طبیعی با پروتونها در محدوده انرژی ۱۶-۳۰ مگاالکترون‌ولت در شکل ۲ نشان داده شده است. از بررسی این نمودار و با توجه به مطالب پیش‌گفته، انرژی ۲۶/۵ مگاالکترون‌ولت به عنوان انرژی مناسب برای پروتونها، در محدوده ۱۰-۳۰ مگاالکترون‌ولت، انتخاب شد.

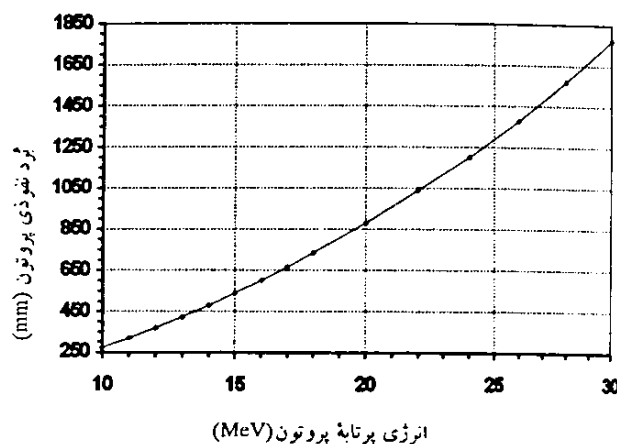
بیشتر می شود.

ثالثاً، سطح شیبدار محفظه سبب می شود تا محلول در اثر نیروی وزن خود از محفظه خارج شود و نیازی به برقراری جریان هوا یا گاز نباشد.

متأسفانه عدم دقت کافی در انتخاب شکل صحیح محفظه هدف، یکی از نقاط ضعفی است که در ساخت برخی از محفظه ها مشاهده می شود. به عنوان مثال، محفظه گازی ساخته شده به توسط محقق آلمانی Norber Kernert در ۱۹۸۷/۱۳۶۶ برای بمباران گاز کریپتون [۵] محفظه استوانه ای شکل توخالی است که به وسیله آب، که به دور آن جریان دارد خنک می شود (شکل ۵).

پارامتر مهم دیگر در طراحی محفظه قطر آن است که بستگی به طول محفظه، قطر باریکه ذرات خروجی از شتاب دهنده و نهایتاً مسیر نفوذ پروتونها در محفظه دارد. قطر باریکه خروجی از دستگاه شتاب دهنده مرکز تحقیقات کرج ۱۲ میلی متر است؛ از طرفی، به هنگام بررسی مسیر نفوذ پروتونها به وسیله کد محاسباتی TRIM داده های اطلاعاتی متعددی، از جمله زاویه های انحراف پروتونها در ضمن عبور از گاز به دست می آید که می توان با میانگین گیری از آنها واگرایی جدار محفظه را نیز تعیین نمود. میانگین حساب شده برای این محفظه هدف برابر با ۲/۴ درجه بود. با در نظر گرفتن این مقدار، قطر انتهای محفظه هدف، بر پایه قطر ابتدای آن که برابر ۱۷ میلی متر انتخاب شده بود، ۵۶/۶ میلی متر بدست آمد. چون در کارگاه امکان ساخت قطعه مخروطی شکل توخالی با این قطرها و طول ۴۷۳ میلی متر وجود نداشت، به ناچار انتخاب یکی از دو مورد زیر ضروری بود:

- ۱- افزودن قطرهای ابتدایی و انتهایی محفظه
- ۲- کاستن طول محفظه



شکل ۳- بُرد نفوذی پروتون در گاز کریپتون (۲۵°C و ۲/۵atm)

قبلاً متذکر شدیم که انرژی ۲۶/۵ مگا الکترون ولت را به عنوان انرژی مناسب برای بمباران گاز کریپتون طبیعی انتخاب کرده ایم. پروتونها ممکن است تا انرژی ۲۱ مگا الکترون ولت، افت انرژی داشته باشند، زیرا میزان ناخالصی نسبت به محصول از یک حداقل نسبی برخوردار می باشد. با توجه به این مطالب و بُرد نفوذی پروتونها در محدوده این دو انرژی، طول معادل برای این مقدار افت انرژی با توجه به منحنی شکل ۳ برابر با ۴۷۳ میلی متر محاسبه گردید.

پس از تعیین طول محفظه، رفتار پروتونها در گاز کریپتون بررسی شد که نتیجه آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

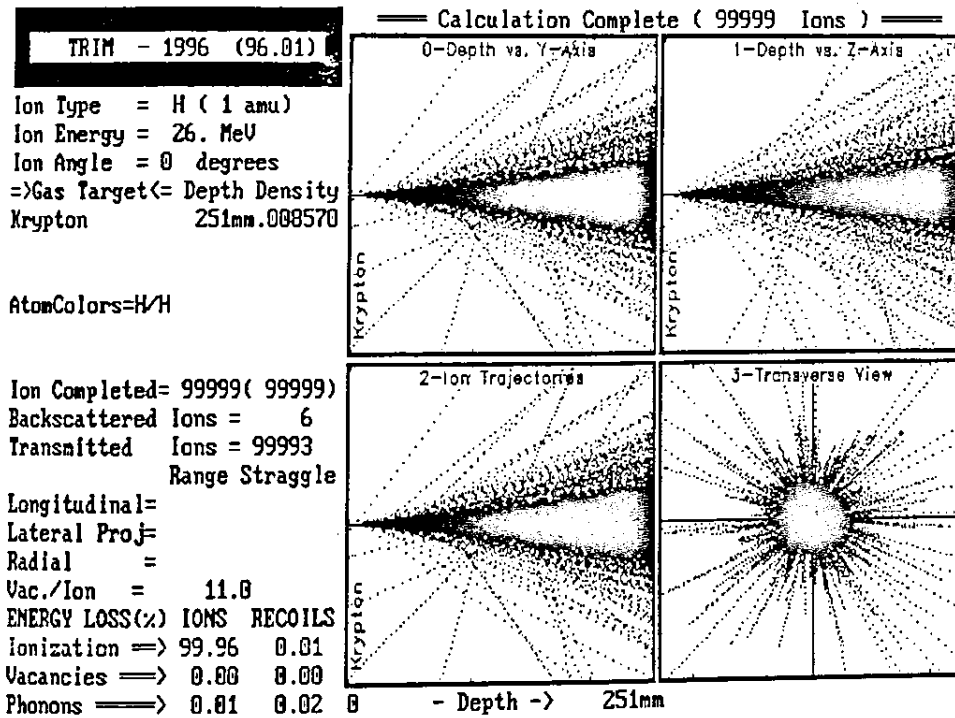
به طوریکه ملاحظه می شود، به علت پراش پروتونها در اثر برخورد با مولکولهای گاز، مسیر نفوذ آنها مخروطی است. بنابراین، برای دستیابی به وضعیت بهینه محفظه، شکل مخروطی برای آن برگزیده شد. با این انتخاب:

اولاً، تعداد برخورد پروتونها با جدار محفظه، به دلیل تبعیت هندسی آن از مسیر نفوذ پروتونها، کاهش یافته و از آکتیو شدن آن به مقدار زیاد جلوگیری می شود.

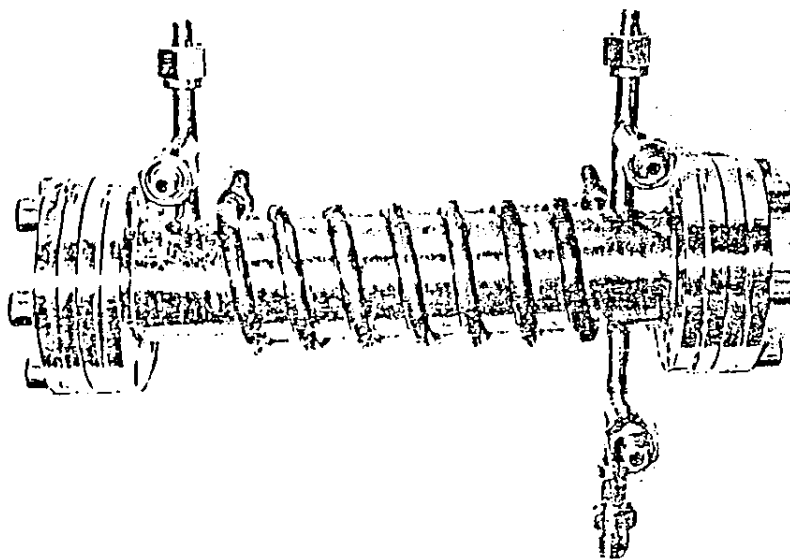
ثانیاً، به سبب افزایش سطح تماس، امکان تبادل حرارتی

مهندسی رعایت مسائل اقتصادی از نکات مهم تصمیم‌گیریها به حساب می‌آید، لذا طول محفظه، در محدوده امکانات کارگاه، کاسته شد و با کاستن طول محفظه، قطر انتهایی آن نیز به ۳۸ میلی‌متر تقلیل یافت.

در حالت اول، افزودن قطر افزایش حجم و مصرف گاز بیشتر را به همراه داشت، علاوه بر این افزایش حجم تأثیری بر بازده تولید نداشت و تنها موجب افزایش هزینه مصرف گاز در محفظه می‌شد. با توجه به این که در طراحی‌های



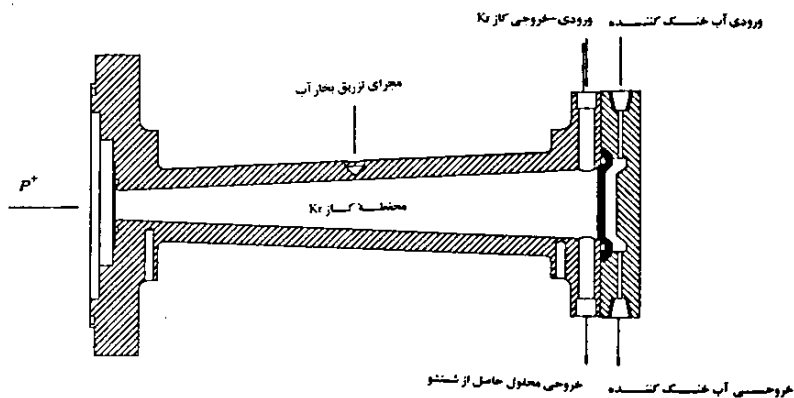
شکل ۴- مسیر نفوذ پروتونها در گاز کریبتون طبیعی



شکل ۵- محفظه هدف طراحی شده به توسط Norbert Kernert، برای بمباران گاز کریبتون

محفظه ساخته شده را نشان می دهد.

پس از تعیین پارامترهای مهم محفظه، اقدام به ساخت آن در کارگاه تراشکاری مرکز کرج شد. شکل ۶ طرح ساده

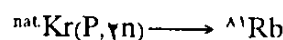


شکل ۶- محفظه هدف ساخته شده در مرکز کرج

کریتون که با پروتونهای کمتر از ۳۰ مگاالکترون ولت تولید ^{81}Rb می نمایند با مراجعه به نمودارهای سطح مقطع (شکل ۱) مشخص شدند که عبارتند از ایزوتوپهای پایدار ^{82}Kr (%۱۱/۵) و ^{83}Kr (%۱۱/۵). شکل ۷، نمودار مجموع مقادیر حاصلضرب سطح مقطع واکنش هر یک از ایزوتوپهای ^{82}Kr و ^{83}Kr در تعداد اتمهای آنها در واحد حجم گاز را نشان می دهد. از این نمودار چنین استنباط می شود که تغییرات سطح مقطع ماکروسکوپی بر حسب انرژی ذره پرتابه (پروتون) مقدار ثابتی نیست. بنابراین،...

محاسبه بازده تولید رویدیوم-۸۱

بازده تولید رویدیوم-۸۱، به کمک واکنش هسته ای:



و با استفاده از رابطه ۱، حساب شد.

$$R = \int_0^L \frac{\lambda(x) \times n \times I \times 3600 \times (1 - e^{-(\lambda(x) \times t)})}{3/7 \times 10^7} dx$$

در این رابطه:

R: بازده تولید $(\frac{\text{mCi}}{\mu\text{A}\cdot\text{hr}})$

δ : احتمال برخورد یا سطح مقطع برخورد (Cm^2)

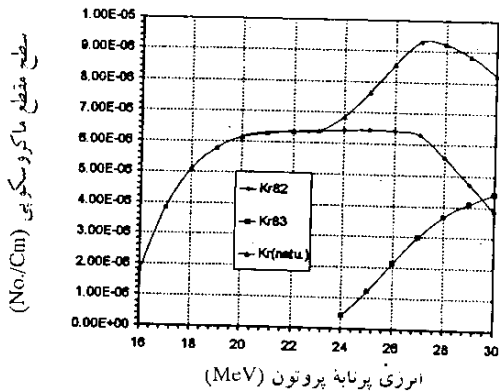
n: تعداد ذرات گاز در واحد حجم $(\frac{\text{No.}}{\text{Cm}^3})$

I: تعداد ذرات تابانده شده به گاز در واحد زمان $(\frac{\text{No.}}{\text{Sec.}})$

$t_{1/2}$: نیمه عمر محصول (Sec.)

dx: طول جزئی از حجم محفظه (mm)

L: طول هدف گازی (m m)

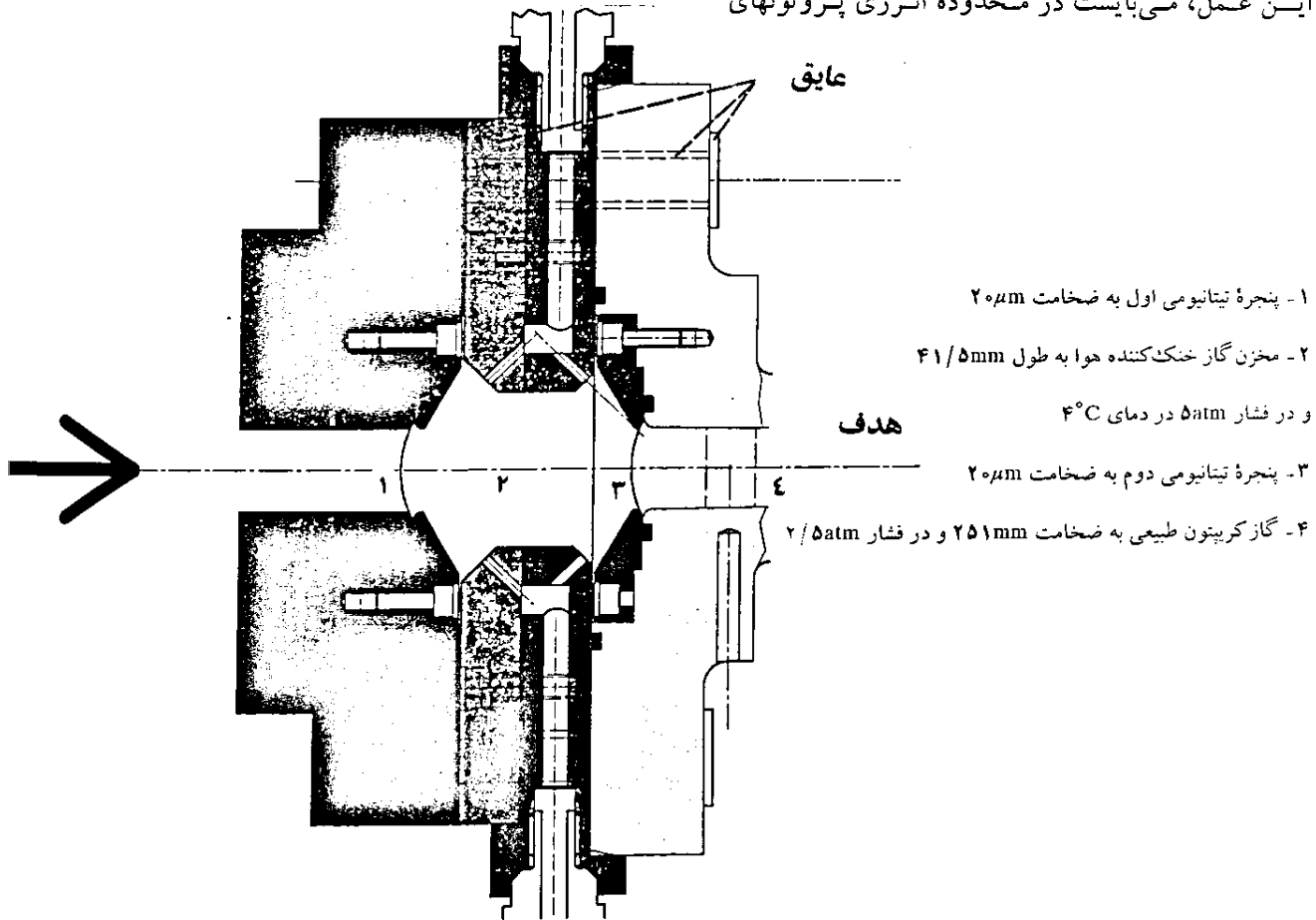


شکل ۷- نمودار سطح مقطع ماکروسکوپی بر حسب انرژی ذره پرتابه (پروتون)

برای محاسبه سطح مقطع برخورد پروتونها با ایزوتوپهای گاز کریتون، ابتدا ایزوتوپهای پایداری از

ورودی-خروجی گاز هدف انجام می‌گرفت. بنابراین، مجموعه هدف گازی ما متشکل از اجزای زیر است (شکل ۸):

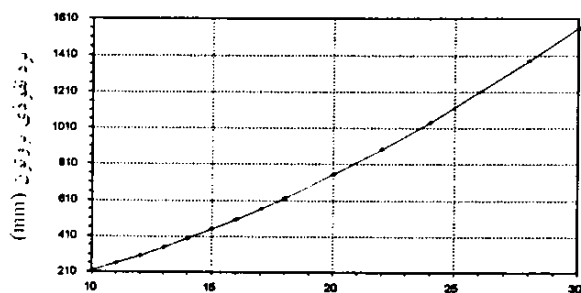
استفاده از رابطه ۱، ایجاب می‌کند که نمودار شکل ۷ را به اجزای کوچکتری تقسیم کنیم به گونه‌ای که سطح مقطع ماکروسکوپی در هر یک از آنها تقریباً مقدار ثابتی باشد. این عمل، می‌بایست در محدوده انرژی پروتونهای



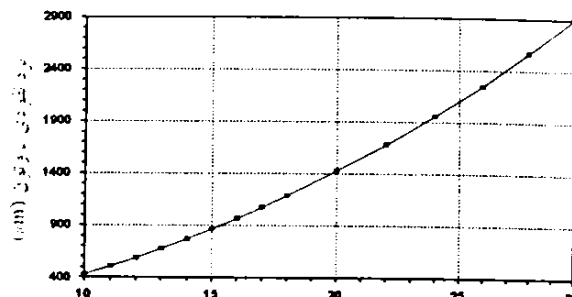
شکل ۸- اجزاء مختلف موجود در مسیر پروتونها از لحظه خروج آنها از مسیر انتقال باریکه^۳

TRIM استفاده شد و برای این منظور نوع و انرژی ذره، چگالی و نوع محیط تحت تابش و در نتیجه بُرد نفوذی ذره شتاب داده شده در محیط مورد نظر تعیین گردید. در نمودارهای شکل ۹ مقادیر نفوذ پروتونها بر حسب انرژی (MeV) نشان داده شده است.

پروتونها با انرژی $26/5$ مگاالکترون‌ولت و شدت جریان 1 میکروآمپر، به عنوان جریان خروجی از لوله انتقال باریکه در نظر گرفته شد و مقادیر انرژی در هر یک از محیط‌ها، و بالطبع مقادیر انرژی ورودی-خروجی گاز کریپتون حساب شد. در این محاسبه، از برنامه رایانه‌ای



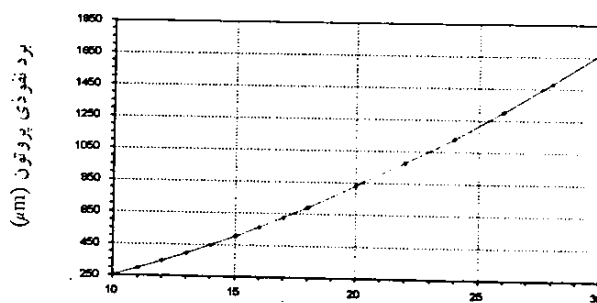
انرژی پرتابه پروتون (MeV)



انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۹-ب) - بُرد نفوذی پروتونها در هوا (۴°C و ۵atm)

(۹-الف) - بُرد نفوذی پروتونها در تیتانیوم



انرژی پرتابه پروتون (MeV)

(۹-ج) - بُرد نفوذی پروتونها در فولاد-۳۱۶

شکل ۹- نمودارهای نفوذ پروتون در محیطهای مختلف

محاسبه شد (جدول ۲).

به کمک این نمودارها، با توجه به ضخامت هریک از

محیطها، مقادیر انرژی ورودی و خروجی

جدول ۲- انرژی ورودی و خروجی پروتونها از هر منطقه هدف گازی

| انرژی خروجی (MeV) | انرژی ورودی (MeV) | طول مسیر عبور | مشخصات محیط | محیط |
|-------------------|-------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| ۲۶/۳۷ | ۲۶/۵ | ۲۰μm | تیتانیوم | پنجره اول |
| ۲۵/۸۸ | ۲۶/۳۷ | ۴۱/۵mm | هوا (۴°C و ۵atm) | گاز خنک کننده |
| ۲۵/۷۳ | ۲۵/۸۸ | ۲۰μm | تیتانیوم | پنجره دوم |
| ۲۲/۷۸ | ۲۵/۷۳ | ۲۵۱mm | کربتون طبیعی (۲۵°C و ۲/۵atm) | گاز هدف |
| ۰/۰ | ۲۲/۷۸ | ۷mm | فولاد ۳۱۶ | دریوش انتهایی |

$$n.\delta = 8/26 \times 10^{-1} \text{ No./Cm} \quad (5)$$

برطبق رابطه (۱) در این محدوده برابر $0/26 \text{ mCi}/\mu\text{A hr}$ بدست آمد.
بازده‌های تولید مربوط به سایر جزءها در جدول ۳ داده شده است.

به دلیل ثابت نبودن سطح مقطع برخوردها در محدوده انرژی موردنظر، بازده جزئی تولید حساب شده است، مثلاً " برای باریکه‌ای از پروتون‌ها تا جریان یک میکروآمپر، بازده تولید اولین جزء، با توجه به نمودار شکل ۳ در محدوده انرژی $25/73 - 25/59$ مگاالکترون‌ولت به ازای سطح مقطع ماکروسکوپی:

جدول ۳

| R(mCi/ μ A.hr) | dX(mm) | $\sigma.n(\text{No./Cm})$ | $E_r(\text{MeV})$ | $E_1(\text{MeV})$ |
|--------------------|--------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 0/260 | 12/39 | $8/26 \times 10^{-1}$ | 25/59 | 25/73 |
| 0/202 | 9/74 | $8/15 \times 10^{-1}$ | 25/48 | 25/59 |
| 0/198 | 9/73 | $8/05 \times 10^{-1}$ | 25/37 | 25/48 |
| 0/197 | 9/74 | $7/95 \times 10^{-1}$ | 25/26 | 25/37 |
| 0/177 | 8/85 | $7/85 \times 10^{-1}$ | 25/16 | 25/26 |
| 0/192 | 9/73 | $7/75 \times 10^{-1}$ | 25/05 | 25/16 |
| 0/172 | 8/85 | $7/65 \times 10^{-1}$ | 24/95 | 25/05 |
| 0/204 | 10/62 | $7/55 \times 10^{-1}$ | 24/83 | 24/95 |
| 0/185 | 9/74 | $7/45 \times 10^{-1}$ | 24/72 | 24/83 |
| 0/215 | 11/5 | $7/35 \times 10^{-1}$ | 24/59 | 24/72 |
| 0/180 | 9/74 | $7/25 \times 10^{-1}$ | 24/48 | 24/59 |
| 0/225 | 12/39 | $7/15 \times 10^{-1}$ | 24/34 | 24/48 |
| 0/222 | 12/39 | $7/05 \times 10^{-1}$ | 24/2 | 24/34 |
| 0/219 | 12/39 | $6/95 \times 10^{-1}$ | 24/06 | 24/2 |
| 0/262 | 15/04 | $6/85 \times 10^{-1}$ | 23/89 | 24/06 |
| 0/289 | 16/82 | $6/75 \times 10^{-1}$ | 23/7 | 23/89 |
| 0/300 | 17/7 | $6/65 \times 10^{-1}$ | 23/5 | 23/7 |
| 0/295 | 17/7 | $6/55 \times 10^{-1}$ | 23/3 | 23/5 |
| 0/363 | 22/12 | $6/45 \times 10^{-1}$ | 23/05 | 23/3 |
| 0/349 | 21/60 | $6/35 \times 10^{-1}$ | 22/78 | 23/05 |

بدین شرح است که ابتدا محفظه هدف از گاز کریبتون طبیعی تا فشار $2/5$ آتمسفر پر شد، سپس عملیات بمباران گاز با پروتونهای دارای انرژی $26/5$ مگاالکترون‌ولت و در شدت جریان 10 میکروآمپر (برای مجموع جریان بمباران برابر 10 میکروآمپرساعت) انجام گرفت. پس از توقف عملیات بمباران، اقدام به بازیابی گاز کریبتون درون محفظه و استخراج رویدیوم- 131 تولید شده به کمک بخار آب شد.

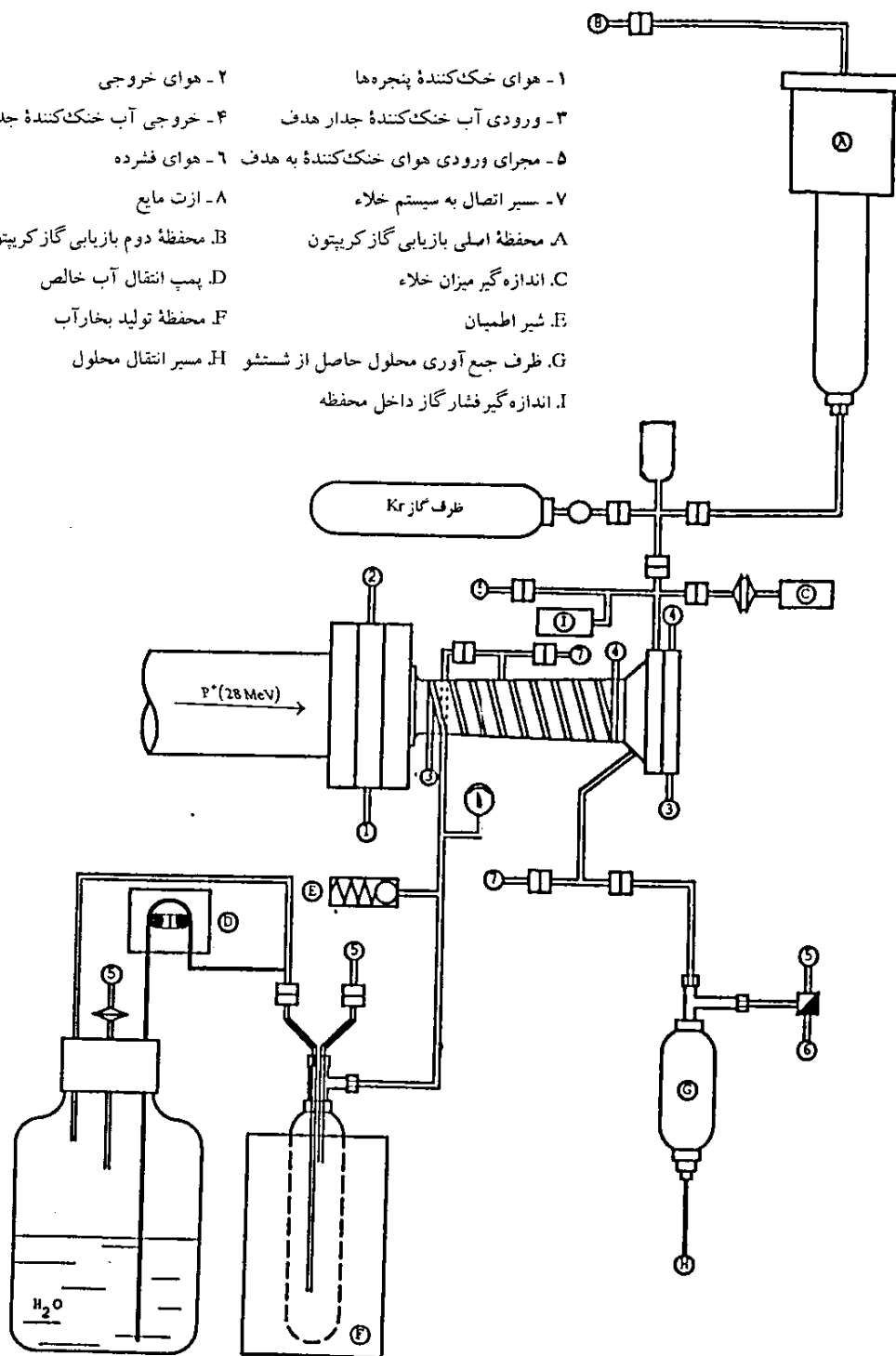
با جمع کردن بازده‌های تولید حاصل از اجزای مختلف، بازده کل تولید بدست می‌آید که برابر است با:

$$R = 4/707 \text{ mCi}/\mu\text{A hr}$$

بحث و نتیجه گیری

برای مقایسه بازده تولید محاسبه شده با مقدار واقعی آن، آزمایشهای متعددی به عمل آمد. نحوه انجام آزمایشها

- ۱- هوای خنک‌کننده پنجره‌ها
- ۲- هوای خروجی
- ۳- ورودی آب خنک‌کننده جدار هدف
- ۴- خروجی آب خنک‌کننده جدار هدف
- ۵- مجرای ورودی هوای خنک‌کننده به هدف
- ۶- هوای فشرده
- ۷- سیر اتصال به سیستم خلاء
- ۸- ازلت مایع
- A. محفظه اصلی بازیابی گاز کریپتون
- B. محفظه دوم بازیابی گاز کریپتون
- C. اندازه‌گیر میزان خلاء
- D. پمپ انتقال آب خالص
- E. شیر اطمینان
- F. محفظه تولید بخار آب
- G. ظرف جمع‌آوری محلول حاصل از شستشو
- H. مسیر انتقال محلول
- I. اندازه‌گیر فشار گاز داخل محفظه



شکل ۱۰- طرح ساده دستگاه بمباران محفظه گاز کریپتون هدف

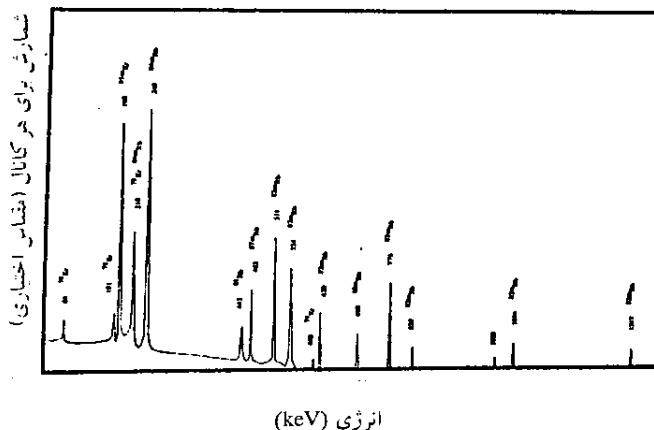
جدول شماره ۴

| شماره آزمایش | شدت جریان کل ($\mu A.hr$) | حجم محلول (ml) | بازده تولید (mCi/ $\mu A.hr$) |
|--------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------|
| ۱ | ۳ | ۹۳/۷ | ۲/۷ |
| ۲ | ۱۰ | ۱۰۰/۳ | ۲/۷۳ |
| ۳ | ۲۰ | ۱۰۱/۸ | ۳/۴ |
| ۴ | ۵ | ۸۷/۳ | - |
| ۵ | ۱۰ | ۱۰۶/۱ | ۲/۵ |
| ۶ | ۱۰ | ۱۰۳/۱ | ۲/۶۶ |
| ۷ | ۲۰ | ۱۰۶/۹ | ۳/۳۶ |
| ۸ | ۱۰ | ۱۰۵ | ۳/۲۴ |
| ۹ | ۱۰ | ۱۰۶ | ۳/۱۹ |

ملاحظه می‌شود که به جز چهارمین آزمایش، که به علت پاره شدن پنجرهٔ تیتانیوم، اندازه‌گیری میسر نشد، در سایر آزمایشها بازده تولید از سیر نسبتاً صعودی برخوردار می‌باشد. علت این امر، نو بودن محفظهٔ هدف و وجود خلل و فرج سطح داخلی آن است؛ زیرا با وجود تلاشهای به عمل آمده در صیقل دادن سطح داخلی محفظه، به علت وجود ناهمواریهای میکروسکوپی، عملاً مقداری از محصول روییدیم- 81 در این ناهمواریها بدام می‌افتاد و به هنگام شستشوی محفظه امکان دستیابی به تمام روییدیم- 81 نبود. اما با تکرار آزمایشها این نقص تا حد زیادی برطرف شد. از مقایسهٔ مقادیر بازده تولید داده شده در جدول ۴ با بازده‌های تولید حساب شده نتیجه می‌شود که بازده تولید حساب شده بطور متوسط تقریباً ۲۰٪ بیشتر از بازده اندازه‌گیری شده است. موارد زیر می‌توانند این اختلاف را توجیه کنند:

۱- برای محاسبهٔ بازده تولید، از سطح مقطع‌های بدست آمده به وسیلهٔ برنامهٔ رایانه‌ای ALICE-91، استفاده شده است. چون مدل‌های فیزیکی که در این برنامه برای

پس از جمع‌آوری محلول و نمونه‌گیری از آن، به کمک دستگاه گاما اسپکتروسکوپی مجهز به آشکارساز HPGGe با توجه به پیک انرژی ۱۹۰ کیلو الکترون‌ولت کریبتون- 81m بازده تولید روییدیم- 81 حساب شد. لازم به توضیح است که پیک انرژی ۱۹۰ کیلو الکترون‌ولت کریبتون- 81m دارای بیشترین نسبت شاخه‌ای $^4(65\%)$ نسبت به سایر گاما‌های ساطع شده از این رادیوایزوتوپ است. چون نیمه عمر کریبتون- 81m در مقایسه با روییدیم- 81 بسیار کوتاه است و در هر لحظه می‌توان این دو هسته را از لحاظ آکتیویته در حال تعادل دانست، لذا بازده تولید روییدیم- 81 را می‌توان با اندازه‌گیری آکتیویتهٔ کریبتون- 81m حساب کرد.



شکل ۱۱- نمودار پیک گامای کریبتون- 81m . [۳]

در این آزمایشها سعی شده است تا حد ممکن، شرایط عمل با حالتی که برای محاسبه در نظر گرفته شده‌اند مطابقت کنند. مقادیری که در عمل برای بازده تولید در آزمایشهای متعدد بدست آمده‌اند در جدول ۴ مندرج است.

۳- شستشوی محفظه بطور کامل انجام نمی‌گیرد، زیرا محلول حاصل از شستشوی محفظه هدف با بخار آب تحت تاثیر نیروی گرانش از محفظه خارج می‌شود و ممکن است قطراتی از محلول که به جدار محفظه چسبیده‌اند در محفظه باقی بمانند، علاوه بر این بخار آب نمی‌تواند تمام رویدایوم-۸۱ تولید شده را از جدار محفظه استخراج نماید.

محاسبه سطح مقطع بکار رفته‌اند، براساس یک رشته مفروضات تصویری پایه‌گذاری شده‌اند، بنابراین، پاسخهایی که از این برنامه بدست می‌آید، تا حدودی با واقعیتها اختلاف دارند.

۲- مقادیر افت انرژی که برای پروتونها در هر یک از محیطها محاسبه شده است، براساس مدل‌های فیزیکی می‌باشند که در آنها شرایط ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

References

- ۱- واپاشی هسته مرکب برانگیخته پیش از تعادل در واکنشهای هسته‌ای و راه‌اندازی و آزمایش کد کامپیوتری Alice-91؛ سیدمهدی صالحی؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه تهران، دانشکده علوم، گروه فیزیک؛ (۱۳۷۲).
2. M. Blann-Recent Progress and current status of pre equilibrium reaction theories and computer code Alice-91; Workshop on "computation and analysis of nuclear data relevant to nuclear energy and safety" H4.SMR 614/5 (1992) P.58.
3. Krypton-81m Generator For Ventilation and Perfusion. ; M.GUILLAUME; Liege University; (1993).
4. TRIM Program, J.P. Biersack and J.F. Zigler; IBM-Research; York Town, NY.10598; (1991).
5. Norbert Kernert; "^{81m}Kr Production System."; Physics department; Karlsruhe Technical university; MSc. thesis; (1986-87).

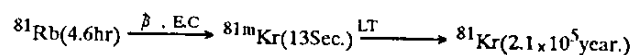
CHOOSING A SUITABLE NUCLEAR REACTION IN ^{81m}Kr RADIO-PHARMACY PRODUCTION

M. Aboudzadeh, H. Afarideh, S.M. Haji Saeid

*Nuclear Research Center for Agriculture & Medicine, Cyclotron Accelerator Department, AEOL,
P.O. Box 31585-4395, Karaj-Iran*

Abstract

^{81m}Kr is a noble gas which is produced from its parent ⁸¹Rb, with a half-life of 4.6 hrs:



^{81m}Kr decay by emitting 190 KeV gamma rays, with a half life of 13 seconds. ^{81m}Kr is an ideal trace for the diagnosis of any chronic obstructive lung disease.

In this paper, a selection of suitable reactions, for production of ⁸¹Rb, design of Kr gas target, and calculation of production yield of ⁸¹Rb through ALICE-91 computer code were investigated.

Since ⁸¹Rb is the precursor of ^{81m}Kr and because of the short half-life of ^{81m}Kr, therefor, at every instant it has the same activity as the ⁸¹Rb; Then the calculated yield was compared with experimentally obtained results.