



بررسی تولید رادیوایزوتوپ‌های ^{18}F و ^{13}N با استفاده از هدف مایع چرخشی سیکلوترون

زهره عبدی^۱، محمد میرزایی^{۲*}، کامران یوسفی^۲، طیب کاکاوند^۳، شهرزاد فضلی^۱، محمد رحیمی^۲
۱. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه زنجان، صندوق پستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، زنجان - ایران
۲. پژوهشکده‌ی کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸، کرج - ایران
۳. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، صندوق پستی: ۳۴۱۴۹-۱۶۸۱۸، قزوین - ایران

چکیده: دو رادیوایزوتوپ ^{18}F ($T_{1/2}=109.7\text{ min}$, $I_{\beta^+}=97\%$, $E_{\beta^+}=0.63\text{ MeV}$) و ^{13}N ($T_{1/2}=10\text{ min}$, $I_{\beta^+}=100\%$, $E_{\beta^+}=0.96\text{ MeV}$) تقریباً به طور کامل از طریق گسیل پوزیترون واپاشی می‌کنند. به همین سبب، از این دو رادیوایزوتوپ به منظور مقطع‌نگاری گسیل پوزیترون (PET) در تشخیص سلول‌های سرطانی استفاده می‌شود. در این مقاله، پس از محاسبه‌ی توابع برانگیختگی برای واکنش‌های هسته‌ای منجر به ^{18}F ، $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ ، ^{13}N و $^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$ با استفاده از کد هسته‌ای ALICE-91 و مقایسه با داده‌های تجربی، بهترین بازه‌ی انرژی برای تولید با شتاب‌دهنده‌ی سیکلوترون و میزان حرارت سپرده شده به مایع هدف تعیین شد. برای برداشت حرارت ایجاد شده‌ی حاصل از پرتوی فرودی در هدف، یک مبدل حرارتی مینیاتوری طراحی و ساخته شد. طراحی حرارتی این مبدل با استفاده از نرم‌افزار Aspen HTFS+ انجام شد. نقشه‌ی ساخت آن نیز با نرم‌افزار SolidWorks ترسیم شد. پس از ساخت مبدل حرارتی و جانمایی هدف مایع چرخشی در اتاق هدف مایع، تولید ^{13}N از راه بمباران پروتونی آب خالص با انرژی ۱۷٫۵ MeV به منظور صحت‌گذاری محاسبات نظری انجام گرفت.

کلیدواژه‌ها: ^{18}F ، ^{13}N ، گسیلنده‌ی پوزیترون، سیکلوترون، هدف مایع چرخشی، مبدل حرارتی مینیاتوری

Investigation of ^{18}F and ^{13}N Radioisotopes Production Using Cyclotron Recirculating Liquid Target

Z. Abdi¹, M. Mirzaii^{2*}, K. Yousefi², T. Kakavand³, Sh. Fazli¹, M. Rahimi²

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, Zanjan University, P.O.Box: 45371-38791, Zanjan - Iran

2. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31485-498, Karaj - Iran

3. Department of Physics, Faculty of Sciences, Imam Khomeini International University, P.O.Box: 34149-16818, Qazvin - Iran

Abstract: Two radioisotopes of ^{18}F ($T_{1/2}=109.7\text{ min}$, $I_{\beta^+}=97\%$, $E_{\beta^+}=0.63\text{ MeV}$), and ^{13}N ($T_{1/2}=10\text{ min}$, $I_{\beta^+}=100\%$, $E_{\beta^+}=0.96\text{ MeV}$) decay almost completely via positron emission. Due to this characteristic, these radioisotopes are used in PET (positron emission tomography) camera for detection of cancer cells. In this article, after calculating the excitation function for nuclear reactions leading to the ^{18}F , $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$, and ^{13}N , $^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$ formation using the ALICE-91 nuclear code and by a comparison of the results with the experimental data, the best range of energy to produce with a cyclotron accelerator and the amount of heat deposited to the target material, was determined. For the waste heat removal, a miniature heat exchanger was designed and manufactured. A thermal design of the heat exchanger by the Aspen HTFS+ software was created, and its mechanical plan sheet was drawn using the SolidWorks software. After the fabrication of the heat exchanger and recirculation liquid target located at the liquid target room, ^{13}N was produced via pure water proton bombardment with 17.5 MeV energies verifying the theoretical calculations.

Keywords: ^{18}F , ^{13}N , Positron Emitter, Cyclotron, Recirculation Liquid Target, Miniature Heat Exchanger

**۱. مقدمه**

^{18}F یک رادیوایزوتوپ گسیلنده‌ی پوزیترون با نیمه‌عمر 109min ، و یکی از چهار عضو خانواده‌ی استاندارد PET است. این رادیوایزوتوپ با انرژی پوزیترون گسیل شده برابر با 0.63MeV ، کم‌ترین انرژی پوزیترون گسیلی را در بین اعضای این خانواده دارد. دو ویژگی مهم این رادیوایزوتوپ نسبت به دیگر اعضا، یعنی نیمه‌عمر نسبتاً طولانی و کم‌ترین انرژی پوزیترون گسیلی، باعث شده است تا استفاده از این رادیوایزوتوپ به صورت روزافزون افزایش یابد [۱]. از جمله رادیوداروهایی که با استفاده از ^{18}F تهیه می‌شوند عبارتند از: پتاسیم فلئورید (^{18}F K) [۲]، فلئوروتیاهیتادکانویک اسید (^{18}F THA) [۳، ۴]، سدیم فلئورید (^{18}F Na) [۵، ۶] و فلئورودی‌اکسوسی‌گلوکز (^{18}F DG) [۷].

^{13}N نیز یک رادیوایزوتوپ پوزیترون‌دهنده با نیمه‌عمر 10min است که تولید و مراحل شیمیایی تبدیل آن به ماده‌ی نشاندار شده‌ی مناسب برای ترکیبات بیولوژیک، با مشکلات خاصی مواجه بوده است. این رادیوایزوتوپ به دلیل نیمه‌عمر کوتاه، نیاز به روش‌های بسیار سریع برای سنتز و به‌کارگیری دارد و به شیوه‌های مختلفی تولید می‌شود. اما این نیمه‌عمر کوتاه مزیت‌هایی از جمله پایین بودن میزان پرتوگیری در موجود زنده در فرایندهای پژوهشی درون‌تنی^(۱) نیز دارد، ضمن آن‌که امکان تکرار پیایی در زمان‌های کوتاه را آسان می‌سازد [۸]. ^{13}N تاکنون به فرم‌های $^{13}\text{N}[\text{NH}_3]$ و $^{13}\text{N}[\text{N}_3]$ تهیه، و در مطالعه‌ی جریان خون موضعی، بررسی متابولیسم و نیز ماده‌ی آغازکننده در سنتز ملکول‌های پیچیده‌تر مثل اسیدهای آمینه استفاده شده است [۹، ۱۰].

واکنش‌های هسته‌ای رایج برای تولید این دو ایزوتوپ به ترتیب واکنش‌های $^{18}\text{O}(p, \alpha)^{18}\text{F}$ و $^{13}\text{N}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ هستند که ماده‌ی هدف برای واکنش اول، آب غنی شده با ^{18}O ، و برای واکنش دوم، آب معمولی است [۱۱]. پس ماده‌ی هدف برای تولید هر دو رادیوایزوتوپ، به شکل مایع است و برای تولید آنها باید از هدف مایع استفاده کرد.

به طور کلی هدف‌های مایع به دو دسته‌ی ایستا^(۲) و پویا^(۳) (یا چرخشی) تقسیم می‌شوند.

در هدف‌های ایستا، مایع هدف در طول بمباران به صورت ثابت داخل محفظه‌ی هدف قرار گرفته است و غیر از جابه‌جایی طبیعی حاصل از نیروی ارشمیدسی که بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است، حرکت دیگری ندارد [۱۲]. خنک‌سازی این نوع هدف‌ها نیز به راه‌های مختلف مثل عبور آب خنک‌کننده از پشت بدنه‌ی هدف صورت می‌گیرد که معمولاً به دلیل ناکافی بودن و ضعف برداشت حرارت در این سیستم‌ها، محدودیت افزایش جریان بمباران وجود دارد [۱۳]. هم‌چنین از آن‌جا که گرمای سپرده شده در مایع هدف پرتوی پرتونی، متناسب با محصول تولید شده است، نرخ تولید محصول با توانایی هدف در انتقال و حذف گرمای اضافی محدود می‌شود [۱۴]. در حالی که در هدف‌های چرخشی (پویا)، مایع هدف در طول بمباران با کمک یک پمپ از محفظه‌ی هدف خارج، و با عبور از یک مبدل حرارتی و از دست دادن حرارت اضافی خود، به داخل محفظه‌ی هدف بازگردانده می‌شود تا تحت بمباران قرار گیرد [۱۵]. در این صورت از افزایش بیش از حد دمای مایع و رسیدن به نقطه‌ی جوش جلوگیری می‌شود و می‌توان از جریان‌های بالاتری برای بمباران استفاده کرد. در نتیجه، نرخ تولید محصول نیز افزایش می‌یابد. از این نوع هدف در گذشته چندین بار برای تولید ^{18}F استفاده شده است، از جمله؛ وایلند^(۴) در سال ۲۰۰۳ [۱۲]، کیسلو^(۵) در سال ۲۰۰۱ [۱۵] و کلارک^(۶) در سال ۲۰۰۴ [۱۶].

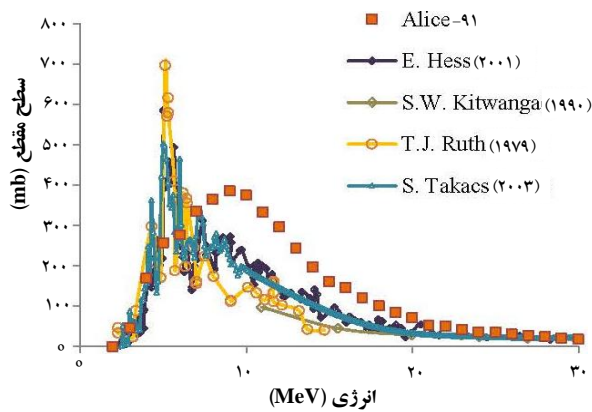
۲. روش کار

در ساخت هدف مایع چرخشی، علاوه بر بدنه‌ی هدف و پمپ، نیاز به یک مبدل حرارتی است که برای داشتن کم‌ترین حجم ممکن باید به صورت مینیاتوری ساخته شود. بدنه‌ی هدف مورد استفاده در این کار از جنس نیویم، و عمق آن 24.8mm است. استفاده از فلز نیویم برای ساخت بدنه‌ی هدف در مقایسه با نقره که پیش از این برای این منظور استفاده می‌شد، موجب کاهش انتقال حرارت می‌شود. ویژگی مهم نیویم، مقاومت شیمیایی بسیار خوبی است که نسبت به نقره دارد.

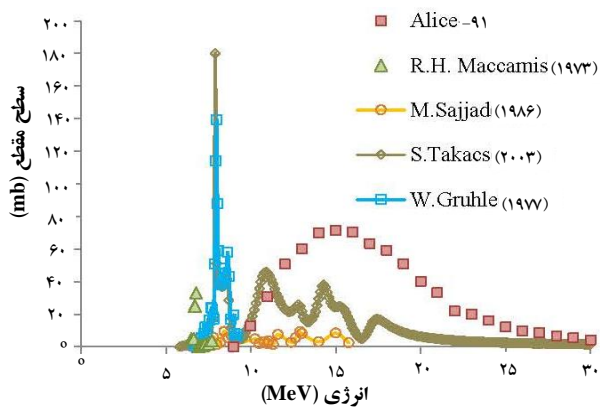
برای طراحی مبدل حرارتی نیز قبل از هر چیز باید توانایی برداشت حرارتی آن تعیین شود. میزان حرارتی که مبدل باید قادر به برداشت آن باشد برابر با میزان انرژی از دست داده شده‌ی پرتون‌های فرودی به صورت گرما در مایع هدف است. برای



با مقایسه‌ی سطح مقطع‌های تئوری با تجربی حاصل از پژوهش سایر پژوهش‌گران در سطح جهان که از سایت $\text{NDS}^{(7)}$ استخراج شده است [۱۸] (شکل‌های ۳، ۴)، و هم‌چنین بهینه‌سازی بازه‌ی انرژی برای عدم تولید ناخالصی‌های ایزوتوپی و شیمیایی، مشاهده شد که انرژی 18MeV برای تولید هر دو رادیوایزوتوپ مناسب است. برد پروتون‌هایی با انرژی 18MeV در مایع هدف یعنی آب خالص با کد SRIM 2012، برابر با $3/45\text{mm}$ تعیین شد. کد SRIM 2012 یک کد هسته‌ای است که در محاسبه‌ی توان ایستاندگی ماده‌ی هدف و برد ذره‌ی پرتابی در آن توانمند است [۱۹]. با توجه به عمق محافظه‌ی هدف که در بخش قبل بیان شد، پروتون‌ها تمام انرژی خود را با عبور از مایع هدف از دست می‌دهند. بنابراین اگر جریان پروتون‌های فرودی $20\mu\text{A}$ در نظر گرفته شود، میزان حرارت سپرده شده به مایع هدف معادل 360 W ($18\text{ MeV} \times 20\mu\text{A}$) خواهد بود.



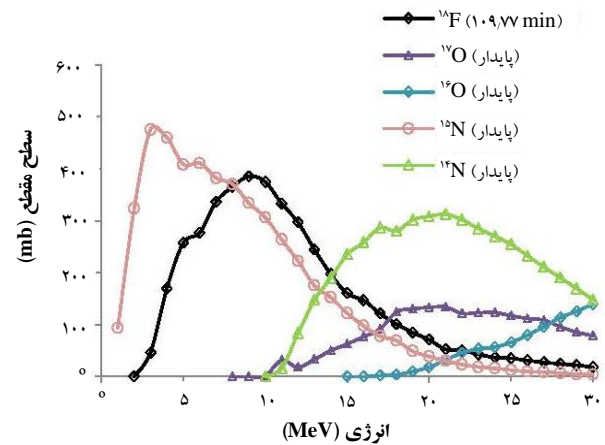
شکل ۳. مقایسه‌ی سطح مقطع تولید ^{18}F حاصل از کد ALICE-91 با سطح مقطع‌های تجربی.



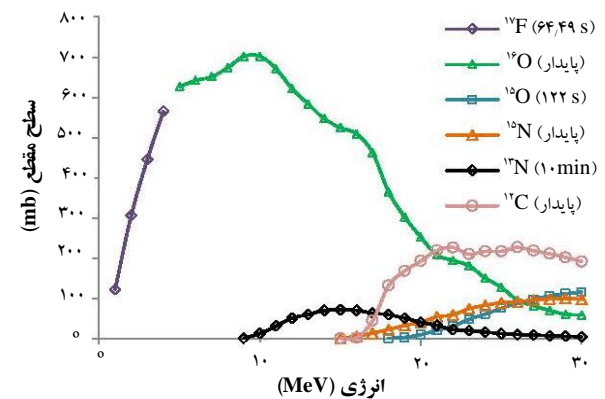
شکل ۴. مقایسه‌ی سطح مقطع تولید ^{13}N حاصل از کد ALICE-91 با سطح مقطع‌های تجربی.

تعیین این انرژی، سطح مقطع دو واکنش $^{18}\text{O} (p, n)^{18}\text{F}$ و $^{16}\text{O} (p, \alpha)^{13}\text{N}$ با استفاده از کد هسته‌ای ALICE-91 محاسبه شد (شکل‌های ۱ و ۲).

کدهای هسته‌ای مختلفی براساس سازوکار واکنش‌های تعادل و پیش از تعادل توسعه یافته‌اند. این کدها از نظر فیزیکی تقریباً مشابه هستند و تنها در مدل‌های هسته‌ای استفاده شده، پیچیدگی تهیه‌ی داده‌های ورودی و زمان لازم برای محاسبه، تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند. یکی از این کدها، کد ALICE است که مارشال بلان و همکارانش به منظور بررسی و مطالعه‌ی واکنش‌های هسته‌ای ارائه کرده‌اند. اولین برنامه‌ی این کد به منظور تحلیل توابع برانگیختگی در سال ۱۹۶۲ در دانشگاه روچستر، روی کامپیوتر IBM اجرا شد [۱۷].



شکل ۱. نمودار سطح مقطع تولید ^{18}F حاصل از کد ALICE-91.

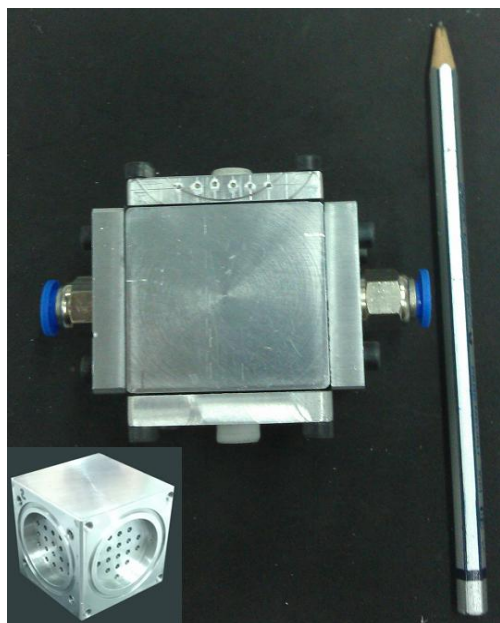


شکل ۲. نمودار سطح مقطع تولید ^{13}N حاصل از کد ALICE-91.

۱.۲ طراحی و ساخت مبدل حرارتی مینیاتوری

جدول ۱. نتایج طراحی حرارتی مبدل با نرم افزار Aspen HTFS+

دمای سیال داغ خروجی (°C)	تعداد لوله‌ها	طول لوله‌ها (cm)	حرارت برداشت شده (W)
۷۷	۴	۱۵،۲۵	۴۰۵
۵۰	۴	۱۸،۰۳	۵۰۱
۵۰	۸	۱۳،۴۶	۵۱۰
۵۰	۱۴	۱۰،۹۸	۵۰۹
۵۰	۲۲	۴،۷۱	۴۱۶


شکل ۵. مبدل حرارتی جریان متقاطع.

شکل ۶. مبدل حرارتی پوسته و لوله.

پس از تخمین میزان حرارت سپرده شده به مایع هدف، طراحی حرارتی مبدل با استفاده از نرم‌افزار Aspen HTFS+ انجام شد. نرم‌افزار Aspen یک نرم‌افزار قدرتمند برای طراحی حرارتی و مکانیکی مبدل‌های حرارتی صنعتی است که هسته‌ی اصلی آن در سال ۱۹۸۱ با هدف تجاری و بخشی از پروژه‌ی ASPEN^(۸) در دانشگاه MIT ساخته شد [۲۰]. برای این طراحی، دمای سیال داغ ورودی ۹۹°C و قطر لوله‌ها در حدود ۲mm تعریف شد. خلاصه‌ای از نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است.

در ابتدا یک مبدل حرارتی جریان متقاطع^(۹) ساخته شد که بر مبنای نتایج بیان شده در سطر آخر جدول ۱، در سمت سیال داغ آن ۲۱ سوراخ ۱،۵mm در نظر گرفته شد.

نقشه‌ی ساخت مبدل جریان متقاطع با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks کشیده، و مبدل به صورت یک مکعب ۴،۵cm ساخته شد که از دو وجه مجاورش، سوراخ‌هایی عمود بر یکدیگر به شکل لوله‌های مجازی دارد. این سوراخ‌های متقاطع نباید هیچ ارتباطی با یکدیگر داشته باشند.

به دلیل مشکلات به وجود آمده در حین ساخت قطعه، تعداد سوراخ‌های سمت سیال داغ به ۱۸ سوراخ ۲mm کاهش پیدا کرد. تعداد سوراخ‌های سمت سیال سرد (خنک‌کننده) نیز ۲۶ سوراخ ۲mm بود. تصویر مبدل حرارتی جریان متقاطع در شکل ۵ نمایش داده شده است.

در اولین تست سرد، مشخص شد که سوراخ‌های سمت سیال داغ و سیال سرد در یک یا چند نقطه با یکدیگر برخورد کرده‌اند و مبدل ساخته شده، قابلیت استفاده برای هدف مایع چرخشی را ندارد و نیاز به ساخت مبدل دیگری وجود دارد.

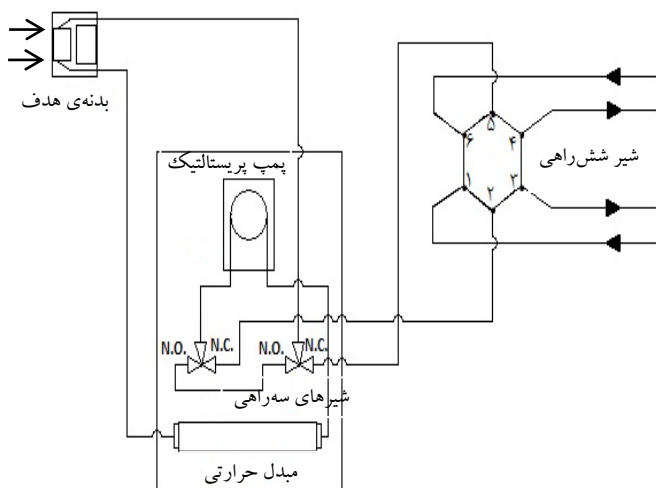
برای جلوگیری از مشکلات پیش آمده در ساخت مبدل قبلی، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله^(۱۰) بر مبنای نتایج بیان شده در سطر اول جدول ۱ ساخته شد. بعد از کشیدن نقشه‌ی ساخت مبدل پوسته و لوله با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks، مبدل به صورت یک لوله با طول ۱۵ و قطر ۱،۲cm که چهار لوله با قطر داخلی ۲،۴mm در داخل آن جوش داده شده است، ساخته، و در شکل ۶ نشان داده شده است.



جدول ۲. نتایج آزمایش سرد مبدل حرارتی

دبی پمپ (ml/min)	دمای آب داغ خروجی (°C)	دمای آب سرد ورودی (°C)	دمای آب سرد خروجی (°C)
۱۱	۲۷	۱۸	۲۲
۶۵	۲۶	۲۰	۲۶
۵	۲۶	۲۰	۲۶
۳	۲۵	۲۰	۲۶

پرتوی فرودی



شکل ۷. طرح‌واره‌ای از چیدمان پنل مبدل حرارتی و اتصال آن به بدنه‌ی هدف مایع.

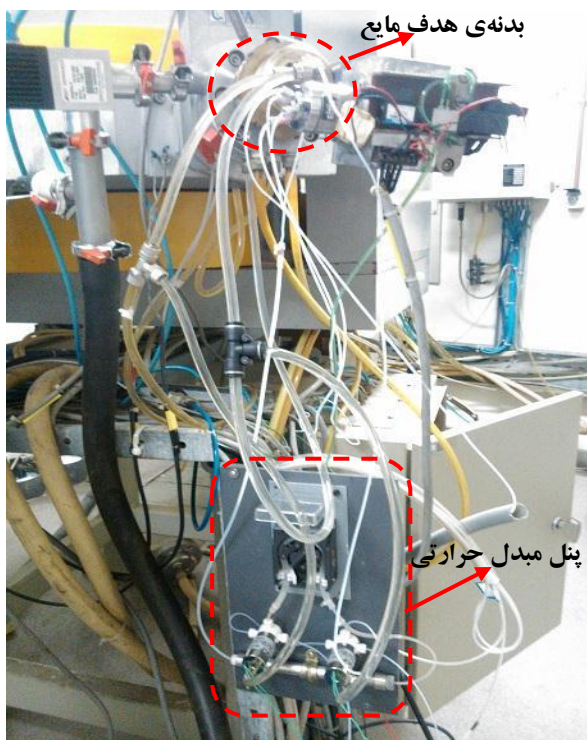
۲.۲ تست سرد مبدل حرارتی مینیاتوری

برای استفاده از مبدل حرارتی در سیستم هدف پویا، باید عملکرد حرارتی آن در شرایط مختلف آزمایش می‌شد. به این منظور، قبل از انجام بمباران، آزمایش سرد روی مبدل حرارتی صورت گرفت. برای آزمایش سرد، دمای آب با کمک یک گرمکن الکتریکی تا نزدیک نقطه‌ی جوش افزایش داده شد. به دلیل موقعیت مکانی آزمایشگاه، نقطه‌ی جوش آب 93°C بود، بنابراین دمای آب با استفاده از یک دماسنج هوشمند روی 90°C ثابت نگه داشته شد. با استفاده از یک پمپ مالشی (پرستالتیک) آب داغ 90°C به داخل مبدل حرارتی هدایت، و پس از خروج از مبدل دمای آن ثبت شد. برای آب خنک‌کننده نیز از آب سرد شهری با دبی 1800 ml/min استفاده شد. از آن‌جا که دبی آب خنک‌کننده در اتاق هدف که در طول بمباران به جای سیال سرد مبدل حرارتی استفاده می‌شود، 400 ml/min است، بدترین حالت ممکن برای دبی سیال خنک‌کننده در نظر گرفته شد تا بازدهی حرارتی مبدل در سخت‌ترین شرایط سنجیده شود. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش سرد در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج حاصل از آزمایش سرد بسیار مطلوب بود و در دبی‌های مختلف پمپ، دمای آب داغ پس از عبور از مبدل حرارتی بیش از 60°C کاهش یافت که از مقدار پیش‌بینی شده نیز بهتر بود. بنابراین مبدل حرارتی مینیاتوری ساخته شده، توانایی استفاده در سیستم هدف مایع چرخشی را داشت.

۳.۲ ساخت هدف مایع چرخشی

برای ساخت هدف چرخشی، مبدل حرارتی ساخته شده به همراه پمپ و دو شیر سه‌راهی که برای اتصال مبدل و پمپ به بدنه‌ی هدف مایع مورد نیاز بودند، روی یک پنل نصب شدند (شکل ۷). پس از جانمایی این پنل در نزدیک‌ترین مکان ممکن نسبت به بدنه‌ی هدف مایع و خط باریکه‌ی سیکلوترون در اتاق هدف مایع سیکلوترون پژوهشکده‌ی پزشکی هسته‌ای کرج (شکل ۸)، سیستم هدف مایع چرخشی آماده‌ی انجام بمباران بود. حجم کل هدف مایع چرخشی که شامل حجم محفظه‌ی هدف، مبدل حرارتی، پمپ پرستالتیک و شیرها و شیلنگ‌های مورد استفاده برای اتصال این اجزا به یک‌دیگرند، در حدود 9.5 ml است.



شکل ۸. محل جانمایی پنل مبدل حرارتی در اتاق هدف مایع سیکلوترون.



رادیوایزوتوپ ^{13}N برخوردار است. به طور کلی نتایج حاصل از سه مرحله بمباران

جدول ۳. نتایج بمباران هدف مایع چرخشی

مدت بمباران (min)	جریان بمباران (μA)	اکتیویته ($\text{MBq}/\mu\text{Ah}$)	بهره‌ی تولید تجربی ($\text{MBq}/\mu\text{Ah}$)	بهره‌ی تولید نظری ($\text{MBq}/\mu\text{Ah}$)
۲	۱۰	۱۰۹۵	۳۲۸۶	۳۷۷۴
۱۰	۸	۳۳۳۷	۲۵۰۴	۳۷۷۴
۱۰	۱۰	۴۴۲۲	۲۶۵۳	۳۷۷۴

تنها در حدود ۲۰ تا ۳۰٪ خطا دارند. یکی از علل این میزان خطا، استفاده از سطح مقطع‌های نظری برای محاسبه‌ی بازده است، در حالی که با دقت در شکل‌های ۳ و ۴، اختلاف سطح مقطع نظری با سطح مقطع‌های تجربی کاملاً آشکار است. از سوی دیگر، قطع و وصل شدن میدان‌های رادیو فرکانسی (RF) سیکلوترون در حین بمباران نیز در کاهش بهره‌ی واکنش مؤثر بوده است. هم-چنین پیش‌بینی می‌شود با افزایش بیش‌تر جریان بمباران، بهره‌ی تولید نیز افزایش پیدا کند و هر چه بیش‌تر به بازده‌ی نظری محاسبه شده نزدیک شود.

لازم به یادآوری است که یکی از مشکلاتی که در تولید دو رادیوایزوتوپ ^{13}N و فلوئور ^{18}F با استفاده از هدف‌های ایستا پیش می‌آید، عدم تخلیه‌ی کامل محفظه‌ی هدف است. یعنی پس از تخلیه‌ی کامل سیستم، مقداری از مایع حاوی محصول داخل بدنه‌ی هدف باقی می‌ماند که در سیستم هدف چرخشی این مشکل مشاهده نشد و همان مقدار مایعی که داخل سیستم بارگذاری شده بود، بعد از بمباران تخلیه شد و این خود یکی از برتری‌های هدف چرخشی نسبت به هدف ایستا است.

پی‌نوشت‌ها

1. In Vivo
2. Static
3. Dynamic
4. C. Wieland
5. M.Y. Kiselev
6. J.C. Clark
7. Nuclear Data Services
8. Advanced System for Process Engineering
9. Cross Flow Heat Exchanger
10. Shell and Tube Heat Exchanger

۳. بمباران هدف و نتایج

برای تولید ^{13}N ، هدف مایع چرخشی محتوی ۹ml آب خالص با پروتون‌های ۱۷,۵MeV در جریان‌های متفاوت از طریق واکنش هسته‌ای $^{13}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{10}\text{O}$ ، بمباران شد. چیدمان اجزای هدف مایع چرخشی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مایع هدف از راه ورودی ۱ و سپس ۲ شیر شش‌راهی و با عبور از پمپ و مبدل، محفظه‌ی هدف را پر می‌کند. در این مرحله، مسیر N.C. شیرهای سه‌راهی باز بوده و پمپ به صورت ساعت‌گرد می‌چرخد. در هنگام بمباران با باز شدن مسیر N.O. شیرهای سه‌راهی مایع هدف و چرخش پادساعت-گرد پمپ، مایع هدف با عبور از میان مبدل حرارتی و از دست دادن گرمایی که از طریق برخورد پروتون‌ها دریافت کرده است، دوباره وارد محفظه‌ی هدف می‌شود و تحت بمباران قرار می‌گیرد. پس از پایان بمباران، مایع حاوی ^{13}N (محصول مورد نظر) از مسیر N.C. شیرهای سه‌راهی از سیستم تخلیه می‌شود. نتایج این بمباران‌ها در جدول ۳ ارائه، و در بخش بعد در مورد آن بحث شده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بازده‌ی نظری تولید این رادیوایزوتوپ با استفاده از سطح مقطع‌های حاصل از کد ALICE-91 در حدود $3774 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ تعیین شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بهره‌ی تولید ^{13}N حاصل از ۲ min بمباران پروتونی آب خالص با جریان $10 \mu\text{A}$ در حدود $3293 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ به دست آمد که در مقایسه با بازده‌ی نظری، تنها حدود ۱۰٪ اختلاف دارد. با افزایش زمان بمباران به ۱۰ min، یعنی محدوده‌ی نیمه‌عمر ^{13}N و با جریان $8 \mu\text{A}$ ، هسته‌هایی که در ابتدای بمباران تولید شده بودند شروع به واپاشی می‌کنند و در نتیجه‌ی کاهش ۲۰٪ بهره‌ی تولید واکنش، به حدود $2516 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ می‌رسد. آخرین بمباران با افزایش جریان پرتوی پروتونی به $10 \mu\text{A}$ در مدت زمانی مشابه با دومین بمباران صورت گرفته است و همان‌طور که انتظار می‌رود، بهره‌ی تولید افزایش می‌یابد و به حدود $2664 \text{ MBq}/\mu\text{Ah}$ می‌رسد. این نتایج به آن معنی است که هدف ساخته شده تا حد قابل قبولی از کارایی لازم برای تولید



مراجع

- [1] E. Hess, S. Takács, B. Scholten, F. Tárkányi, H.H. Coenen, S.M. Qaim, Excitation function of the ^{18}O (p, n) ^{18}F nuclear reaction from threshold up to 30MeV, *Radiochi. Acta* **89** (2001) 357-362.
- [2] G.J. Cook, G.M. Blake, Quantification of skeletal kinetic indices in Paget's disease using dynamic ^{18}F -fluoride positron emission tomography. *J. Bone Miner. Res.* **17(5)** (2002) 854-859.
- [3] M. Inubushi, J.C. Wu, S.S. Gambhir, G. Sundaresan, N. Satyamurthy, M. Namavari, S. Yee, J.R. Barrio, D. Stout, A.F. Chatziioannou, L. Wu, H.R. Schelbert, Positron-Emission Tomography Reporter Gene Expression Imaging in Rat Myocardium. *Circulation* **107** (2003) 326-332.
- [4] M.P. Chandler, Increased nonoxidative glycolysis despite continued fatty acid uptake during demand-induced myocardial ischemia, *Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol.* **282** (2002) 1871-1878.
- [5] N. Tse, C. Hoh, R. Hawkins, M. Phelps, J. Glaspy, Positron emission tomography diagnosis of pulmonary metastases in osteogenic sarcoma, *Am. J. Clin. Oncol.* **17(1)** (1994) 22-25.
- [6] G.J.R. Cook, I. Fogelman, The role of positron emission tomography in skeletal disease, *Semin. Nucl. Med.* **31(1)** (2001) 50-61.
- [7] N. Satyamurthy, C. William Alvord, Tantalum [^{18}O] Water Target for the Production of [^{18}F] Fluoride with High Reactivity for the Preparation of 2-Deoxy-2- [^{18}F] Fluoro-D-Glucose, *Mol. Imag. Biol.* **4(1)** (2002) 65-70.
- [8] R.B. Firestone, V.S. Shirley, C.M. Baglin, J. Zipkin, Table of isotopes. 8th Ed. New York, John Wiley and Sons (1996) 319-332.
- [9] M.G. Straatman, A look at ^{13}N and ^{15}O in Radiopharmaceuticals. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **28** (1977) 13-20.
- [10] M.L. Firouzbakht, D.J. Schlyer, A.P. Wolf, Cross-section measurements for the ^{13}C (p, n) ^{13}N and ^{12}C (d, n) ^{13}N nuclear reactions, *Radiochi. Acta* **55** (1991) 1-5.
- [11] S.K. Zeisler, D.W. Becker, R.A. Pavan, R. Moschel, H. Ruhle, A water-cooled spherical niobium target for the production of [^{18}F]fluoride, *J. Appl. Radiat. Isot.* **53** (2000) 449-453.
- [12] W. Wieland, Recirculating Target and Method for Producing Radionuclide, patent application publication (2004).
- [13] R. Iwata, T. Ido, F. Brady, T. Takahashi, A. Ujje, [^{18}F] Fluoride Production with a Circulating [^{18}O] Water Target, Annual report of Tohoku University, *J. Appl. Radiat. Isot.* **38** (1987) 979-984.
- [14] J.M. Doster, N. Elizondo, Recirculating Targets for ^{18}F Radionuclide Production, North Carolina State University, Raleigh NC 27695-7909 (2008) 29-52.
- [15] Y. Kiselev, Experiments with Recirculating Target for F-18 Production, Application of Accelerators: 17'th international conference (2003) 1129-1132.
- [16] J.C. Clark, D.J. Silvester, A Cyclotron Method for the Production of Fluorine-18, *J. Appl. Radiat.* (1996) 151-154.
- [17] C.H. Broeders, M. Konobeev, A. Yu, A. Korovin, A. Yu, V.P. Lunev, M. Blann, ALICE/ASH-Pre-compound and Evaporation Model Code System for Calculation of Excitation Function, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reaction at Intermediate Energies, Available at <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7183.pdf> (2006).
- [18] International Atomic Energy Agency, Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), Database Version of October 07, 2014, <https://www.nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>.
- [19] SRIM, The Stopping and Range of Ions in Matter, James F. Ziegler, Jochen P. Biersack, Matthias D. Ziegler, Lulu Press Co (2010).
- [20] Aspen Technology, Inc, <http://www.aspentech.com> (2014).