نرخ تولید ایزوتوپ F^{18} و پروتون در دستگاه PET با بکارگیری واکنش همجوشی $^3He(d;p)\,^4He$

حسینی مطلق،سیده نسرین *(۱)– حمیدی،یکتا *(۲)

(۱و۲)دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، دانشکده علوم ،کشاورزی و فناوری های نوین،گروه فیزیک

چکیده:

فلوئورو – دی اکسی گلوکوز (FDG) با فلوئور –۱۸ نشانه گذاری می شود که اغلب در تصویر برداری تومور از طریق گسیل پوزیترون (PET) استفاده می شود . تصویر برداری PET یک ابزار مفید می باشد که در درجه اول در تشخیص و مدیریت سرطان مورد استفاده قرار می گیرد. رشد PET به طور جزئی مشکلاتی وابسته به تولید فلوئور –۱۸ دارد ،که آن را محدود کرده است . این مقاله در برگیرنده یک بررسی نظری مربوط به روش جدیدی درباره تولید فلوئور –۱۸ با بکارگیری تولید پروتون از طریق واکنش همجوشی هسته ای $^3He(d;p)\,^4He$ می باشد. اخیرا اغلب روش های معمول مربوط به تولید فلوئور –۱۸ برای PET با یک سیکلوترون پزشکی همراه است که پروتون ها را تا انرژی های مگا الکترون ولت شتاب می دهد. این پروتون ها سپس به سمت هدفی که غنی از اکسیژن ۱۸ است ، سمت گیری می نمایند . این باعث می شود که واکنش $^{18}O(p;n)^{18}F$ انجام گیرد تا اینکه فلوئور –۱۸ تولید گردد.

کلمات کلیدی:تولید ،فلوئور–۱۸،همجوشی،پروتون،آهنگ.

The production rate of the isotope ^{18} F and proton in a PET machine using a fusion reaction ^{3} He (d; p)^4 He

Hosseinimotlagh, Seyede Nasrin[1]; Hamidi, Yekta[2]
[1,2] Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Abstract:

Fluoro-deoxyglucose (FDG) labeled with fluorine-18 is commonly used in positron emission tomography (PET) imaging. PET imaging is a powerful tool used primarily in the diagnosis and management of cancer. The growth of PET has been limited partly by the difficulties associated in producing fluorine-18. This paper involves a theoretical investigation of a novel method of producing fluorine-18 utilising proton generation via the ^{3}He(d,p)^{4}He nuclear reaction. Currently the most common method of producing fluorine-18 for PET is with a medical cyclotron that accelerates protons to mega-voltage energies. These protons are then directed onto a target rich in oxygen-18. This initiates the 18O(p,n)18F reaction to produce fluorine-18.

Key words : production, fluorine-18,fusion,proton,rate.

مقدمه:

*پت اسکن اول بار در دانشگاه سنت لوییس واشنگتن درسال ۱۹۷۵ توسط مایکل فلپس اختراع گشت .در این سیستم یک عنصر رادیواکتیو با نیمه عمرکوتاه که با گرفتن پوزیترون متلاشی میشود به بدن بیمار تزریق میگردد و پس از وقفه کوتاهی بیمار جهت تصویرگیری به داخل دستگاه اسکن منتقل میشود. مولکولی که بدین منظور استفاده میشود فلوئورو دی اکسی گلوکز (*18 FDG*) میباشد. امروزه دستگاههای پت در بیمارستانها در سرتاسردنیا کاربرد وسیع دارند.*یکی از رایج ترین ایزوتوپ هایPET ، F۱۸، عمدتا در هدف های مایع تولید می شود. بازده تولید به طور خطی به جریان باریکه پروتونی به کار رفته بستگی دارد. با این حال، برای افزایش انرژی باریکه پروتونی ، جریان باریکه پروتونی منجر به بجاگذاری مقادیر زیادی حرارت داخل محفظه هدف محصورشده با آب می شود و نهایتا منجر به شکست آن می شود. از این رو، درک ترمودینامیک یک محفظه هدف آبی می تواند منجر به بهینه سازی هدف، از بین بردن حداکثر مقدار حرارت برای توازن فشار، افزایش عملکرد و تضمین ثبات و دوام سیستم شود. هدف این کار بررسی تحلیلی جزییات مدل سازی فرایندهای ترمودینامیکی در یک هدف مایع است [۱-٤] . و به دنبال آن نرخ تولید پروتون ناشی از واکنش همجوشی $^{3}He(d;p)\,^{4}He$ تعیین می گردد.

روش کار

برای درک کامل ترمودینامیک هدف مایع، یک مدل عددی بر اساس تحلیل انتگرالی یک سیستم معادلات جفت شده انرژی پیشنهاد شده است. معادلات حاکم (معادلات ۱-۵) براساس یک هندسه ی ساده شده در شکل۱ -الف نوشته شده است. فرض می شود که محفظه کاملا با آب پر شده باشد؛ از این رو اثر کسرخالی اولیه و در نتیجه اثر گاز قابل چگالش گنجانده نشده است.

$$\frac{dT_i}{dt} = f_i(\varphi)S_i - \sum_{j\neq i} H_{ij}(\varphi)\left(T_i - T_j\right) + \Lambda_i(\varphi)\frac{d\chi}{dt} \qquad (i = 1 \to 6) \quad (۱) \qquad , P = g\left(T_{\vartheta}\rho\right) \quad (2)$$

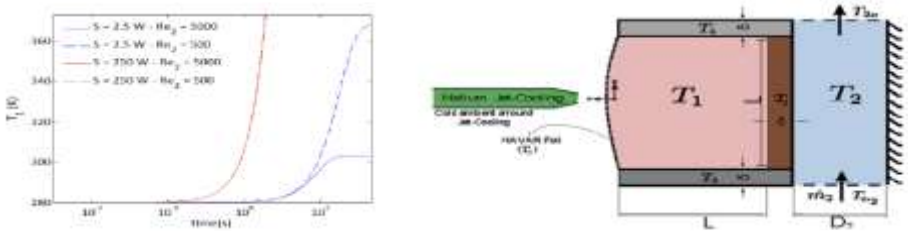
$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = c^2\nabla^2 w + \frac{(P-P_0)}{\gamma_6}\ (۳), V_0 + \int w dA = m_0\left(\frac{\chi}{\rho_i} + \frac{1-\gamma}{\rho_g}\right)\ (٤), \varphi = \frac{\chi}{\chi+(1-\chi)\left(\frac{\rho}{\rho_g}\right)} \quad (۵)$$

که در آن H_{ij} تابعی از ضریب انتقال حرارتی بین حوزه های i و j است،P فشار و P_0 فشار اتمسفر است،$\mathrm{R_e}$ عدد رینولد می باشد،S_i تابعی از چشمه حرارتی در حوزه i ام است، T_i دمای حوزه i ام است،V_0 حجم اولیه محفظه است ، c سرعت صوت است،m_0 مجموع جرم آب و بخار آب است، t زمان ، w انحراف فویل است،Λ_iتابعی از گرمای نهان حوزه i ام است ،ρ_i چگالی اب مایع در حوزه iام است،ρ چگالی است، ρ_gچگالی بخار آب در حوزه i ام است،χ کسر جرمی

مایع است،φ کسر حجمی مایع است ،γ جرم واحد سطح فویل است،σ کشش سطحی فویل است.توجه داشته باشید که در معادله ۳، c سرعت صوت در فویل است که بستگی به مدول کششی و چگالی مواد آن دارد. هندسه مدل شامل شش حوزه است: • حوزه (۱) :محفظه هدف آبی • حوزه (۲): سیستم خنک کننده آبی • حوزه (۳): دیواره عقبی بدنه هدف • حوزه های(٤، ٥): بدنه هدف • حوزه (٦): فویل HAVAR و سیستم خنک کننده هلیوم- -جت.معادله ۱ یک سیستم جفت شده معادلات دیفرانسیل معمولی است که جفت شدگی حرارتی بین حوزه ها را توصیف می کند. از آنجا که سیستم بسته است، در داخل محفظه ،جفت شدگی بین فشار و دما وجود دارد. در اینجا فرض می کنیم که تعادل بین دما و فشار در محفظه ۱ وجود دارد و این رابطه توسط جداول بخار ی مشخص می شود. به اختصار، معادله ۲ نشان دهنده رابطه بین T_1 و P است که در حالت های کامل سیستم، یعنی به طور کاملا مایع، مخلوط مایع -بخارو یا به طور کاملا بخار ، بکار گرفته شده است.بر اساس طراحی هندسه و قدرت مکانیکی فویل HAVAR در هدف های آبی معمولی سیکلوترون، فرض بر این است که سومین شرط در معادله ۲ قابل قبول نیست، به این معنی که آب مایع داخل محفظه به طور کامل بخار نمی شود. قبل از رسیدن به این حالت یا سیستم شکست می خورد و یا فشار داخل محفظه به مقدار بسیار زیادی افزایش می یابد به طوری که بخار مخلوط با مایع می شود. در مدل ارائه شده، اثر متقابل ساختار -سیال با سیستم معادلات با استفاده از معادله ارتعاشی غشاء جفت می شود.توجه داشته باشید که تغییر فشار باعث تغییر درجه حرارت دمای آب مورد نظر و خواص فیزیکی آن می شود. جفت شدگی بین سیال درون محفظه و فویل HAVAR یک مشکل متقابل جفت شدگی ساختار -سیال است. برای ساده کردن پیچیدگی مسئله در این مرحله، جفت شدگی به دلیل فشار تنها مورد توجه قرار گرفته است. معادله ۳ رفتار دینامیکی فویل HAVAR را با توجه به سیگنال فشار ورودی مدل می کند. معادله ٤ معادله پایستگی در حجم است که همیشه باید برآورده شود. معادله ٥ وابستگی کسر های جرمی و حجمی مایع را توصیف می کند. شکل. ۲ نتایج مربوط به مورد جملات چشمه توان باریکه(توان باریکه بجا گذاشته شده در هدف آب)، را نشان می دهد. هر مورد برای دو روش آهنگ مختلف جریان خنک کننده بدنه هدف: یکی نشان دهنده یک جریان لامینار R_e = (٥٠٠)و دیگری نشان دهنده جریان آشفته است (R_e = ٥٠٠٠).

نتایج:

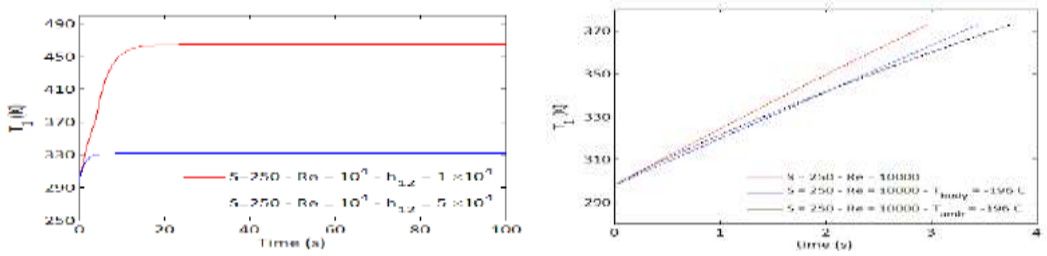
شکل.۱ ب نشان می دهد که سیستم با جمله چشمهW ۲.٥ = S به حالت پایدار در دمای بسیار پایین برای خنک کننده جریان متلاطم می رسد. با این حال، حالت پایدار در دماهای بسیار بالاتر برای حالت خنک کننده لامینار ملاقات خواهد شد. این به این دلیل است که مقادیرعددی Nusselt (ضریب انتقال گرما همرفتی بدون بعد) برای سیستم خنک کننده آشفته بسیار بیشتر از سیستم های خنک کننده لامینار است. در این هندسه ساده هیچ حالت وضعیت پایدار برایW ۲٥۰ = S یا برای جریان لرزه ای یا جریان آشفته مشاهده نمی شود. این به این دلیل است که مرتبه بزرگی چشمه بسیار بزرگتر از مرتبه بزرگی حذف گرما است که توسط ضرایب انتقال حرارت کنترل می شود.



ب) الف)

شکل ۱:الف)هندسه مدل هدف آبی ب)دمای آب بر حسب زمان برای منابع مختلف حرارتی و نرخ جریان خنک کنندگی-آب بدنه هدف.

شکل. ۲ الف بدنه هدف خنک شده با آب را تا حالت از قبل سرد شدن بدنه هدف با نیتروژن مایع قبل از تابش دهی و نیز داشتن بدنه هدف احاطه شده با نیتروژن مایع و هر سه با یک جمله چشمه حرارتیS = ۲۵۰ W مقایسه می کند. در تمام این سه نمونه آزمایشی، خنک کننده آب آشفته (R_e = ۱۰۰۰۰)بکار گرفته شده است.نتایج نشان می دهد که نرخ تغییر دما هم برای سیستم از پیش- خنک شده و هم برای سیستم غوطه ور شده از سیستم در شرایط استاندارد کندتر است، اما این اثرات در محدوده ی مورد مطالعه بسیار قابل توجه نیستند. این به این دلیل است که مکانیزم انتقال حرارت سیستم های هدف آبی از طریق مرتبه بزرگی جمله چشمه گرما و ضرایب انتقال حرارت دیکته می شود. از این رو اثر دمای اولیه بدنه هدف به طور کامل پس از یک زمان کوتاه حذف خواهد شد، اگر مرتبه بزرگی جمله بزرگ باشد. علاوه بر این، مطالعات نشان می دهد که رسیدن به حالت پایا برای سیستمی که در نیتروژن مایع غوطه ور است بیشتر قابل دستیابی است.شکل.۲ ب نتایج مربوط به هدف (S = ۲۵۰ W) را با استفاده از ضریب انتقال حرارت مختلف همرفتی بین بدنه هدف و کانال آب خنک کننده نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت همرفتی اثر قابل توجهی بر حذف گرما دارد. این سیستم سریعتر به شرایط پایا در دمای پایین تر با افزایش ضریب انتقال حرارت به اندازه فاکتور ۵، می رسد.



ب) الف)

شکل ۲ الف)دمای هدف آبی مورد نظر بر حسب زمان خنک سازی آب (قرمز)، از پیش خنک شدگی بدنه هدف با نیتروژن مایع (آبی) و غوطه ور کردن بدنه هدف در طول تابشدهی در نیتروژن مایع (سیاه). ب)دمای آب بر حسب زمان - بررسی تأثیر مرتبه بزرگی ضریب انتقال حرارت همرفتی بر روی حذف حرارت کلی.

مقدار ضریب انتقال حرارت همرفتی بین هدف آبی و کانال خنک کننده بدنه هدف آبی بستگی به مرتبه بزرگی ضرایب انتقال حرارت گرما از هدف آبی به بدنه هدف و از بدنه به آب خنک کننده است: .h۳۲ / ۱ + h۱۳ / ۱ = h۱۲ /۱این بدان معنی است که افزایش خنک شدگی بدنه هدف، پس از رسیدن به یک نقطه خاص انتقال حرارت از هدف آبی به بدنه هدف، که عامل محدود کنندگی است، را کاهش می یابد. از این رو، پیدا کردن راهی برای افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی حفره برای افزایش کلی ضریب انتقال حرارت اجباری است.مدل سازی هدف های آبی سیکلوترون با استفاده از تحلیل انتگرال سیستم معادلات انرژی جفت شده و تقابل ساختار- سیال، دارای این مزیت است که به چگونگی وضوح نحوه کار سیستم پیچیده منجرشود. رویکرد فعلی به ما یک ایده اولیه را در مورد اینکه چگونه برخی از پارامترهای غالب با یکدیگر در توازن هستند و کدام ضرایب می توانند انتقال حرارت از محفظه را تا حدودی کنترل کنند ، میدهد. با این وجود، روش فعلی نمیتواند فیزیک کامل پشت مسئله را توضیح دهد. اعتقادبر این است که روش فعلی می تواند رفتار اصلی سیستم را تا حد معقولی پیش بینی کند. روش ارائه سیستم معادلات خطی وابسته به زمان بر اساس توازن حوزه های مختلف انرژی ، مقادیر جدول بخار استاندارد برای محاسبه فشار مربوطه را بکار میگیرد، که از معادله دیفرانسیلی جزئی خطی برای محاسبه انحراف غشاء و به روز رسانی حجم مربوطه و در نهایت پایستگی حجم را برای تکمیل سیستم معادلات جفت شده استفاده می کند. جهت بررسی معادلات توازن انرژی و ذره در سوخت D-^{۳}He ابتدا نیاز به بررسی و تعیین مقدار متوسط واکنش پذیری می‌باشد . جهت تعیین این کمیت در دماهای مختلف ابتدا به کمک فرمول Bosch و Hale که در آن: $\langle \sigma v \rangle = C_1 \zeta^{-5/6} \xi^2 \exp(-3\zeta^{1/3}\xi)$ و $\zeta = 1 - \frac{C_2 T + C_4 T^2 + C_6 T^3}{1 + C_3 T + C_5 T^2 + C_7 T^3}$ ازمعادله $\xi = \frac{C_0}{T^{\frac{1}{3}}}$قابل تعیین است.که مقادیر C_0 تا C_7 برای واکنش D-^{۳}He در محدوده دمایی ۰٫۵ تا ۱۹۰ keV عبارتست از:$C_0 = 10 \cdot 572 keV^{1/3}$، $C_1 \times 10^{16} = 151 \cdot$ $C_2 \times 10^3 = 6 \cdot 4192 keV^{-1}$، $C_3 \times 10^3 = -2 \cdot 0290 keV^{-1}$ $C_4 \times 10^3 = -0 \cdot 019108 keV^{-2}$، $C_5 \times 10^3 = 0 \cdot 13578 keV^{-2}$ و $C_6 \times 10^3 = 0 keV^{-3}$ ، $C_7 \times 10^3 = 0$ keV . به کمک معادلات فوق و مقادیر عددی موجود نمودار تغییرات دمایی واکنش پذیری واکنش $^3He(d;p)\,^4He$ را ترسیم نموده ودر شکل ۳ آورده ایم. همانطور که از نمودار دیده می شود در محدوده دمایی ۰.۵ تا ۱۹۰ keV با افزایش دما میزان واکنش پذیری رو به افزایش است.

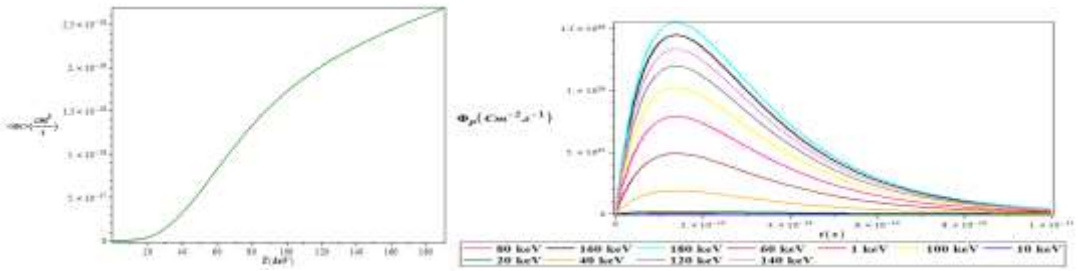
معادلات اساسی توازن ذره و انرژی برای واکنش D-^{۳}He

به صورت زیر نوشته $^3He(d;p)\,^4He$ معادلات دینامیکی مربوط به توازن ذرات و توازن انرژی برای واکنش همجوشی می شوند: $\frac{dn_D}{dt} = -\frac{n_D}{\tau_p} - n_D n_{3He} \langle \sigma \upsilon \rangle_{D3He} + s_D$ (۶) و $\frac{dn_{3He}}{dt} = -\frac{n_{3He}}{\tau_p} - n_D n_{3He} \langle \sigma \upsilon \rangle_{D3He} + s_{3He}$ (۷)

و (۸) $\frac{\mathrm{dn}_\alpha}{\mathrm{dt}} = -\frac{\mathrm{n}_\alpha}{\tau_\alpha} + \mathrm{n_D n_{3He}} \langle \sigma \upsilon \rangle_{\mathrm{D3He}}$ و (۹) $\frac{\mathrm{dn}_p}{\mathrm{dt}} = -\frac{\mathrm{n}_p}{\tau_p} + \mathrm{n_D n_{3He}} \langle \sigma \upsilon \rangle_{\mathrm{D3He}}$

(۱۰) $\frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dt}} = -\frac{\mathrm{E}}{\tau_E} + \mathrm{Q n_D n_{3He}} \langle \sigma \upsilon \rangle_{\mathrm{D3He}} - P_{rad}$ که در آن:

S_{3He} ، S_D به ترتیب معرف آهنگ تزریق ذرات همجوشی کننده دوتریوم و هلیوم -۳ است. P_{rad} آهنگ انرژی اتلافی تابشی است. از حل عددی معادلات سینتیکی غیر خطی دیفرانسیلی فوق تحت شرایط: $S_D = 2.65 \times 10^{22} cm^{-3}$ ، $S_{3He} =$ $0.844 \times 10^{22} cm^{-3}$، $\tau_P = \tau_\alpha = 9 \times 10^{-12} s$، $\tau_E = 1/4\tau_\alpha$ و شر ایط اولیه: $n_D(0) = 2.65 \times 10^{22} cm^{-3}$ ،$n_{3he}(0) =$ $0.844 \times 10^{22} cm^{-3}$، $E(0) = 0$ ، $n_\alpha(0) = 0$ ، $n_p(0) = 0$ تابعیت زمانی چگالی عددی ذرات n_D ، n_{3He} ، n_α ، n_p را در محدوده دمایی 1 keV تا 180 keV بدست آورده و همچنین شار ذرات پروتون تولید شده در اثر انجام واکنش همجوشی $^3He + D \rightarrow P(14 \cdot 7MeV) + {}^4He(3 \cdot 6\ MeV)$ از رابطه $\Phi_p = n_p v_p$ به دست می آید که در آن n_p و v_p به ترتیب چگالی و سرعت ذرات پروتون تولید شده در اثر واکنش فوق می باشد. با حل کردن معادلات دیفرانسیل (٦)تا (۱۰)به طریق عددی و داشتن n_p به صورت تابعی از زمان و دماو $v_p = \sqrt{\frac{2E_p}{m_p}}$ نمودار تغییرات شار پروتونی تولید شده به صورت تابعی از زمان و دما را ترسیم کرده ودر شکل ۳ آورده ایم.



الف) ب)

شکل ۳ الف)نمودار تغییرات دمایی واکنش پذیری واکنش $^3He(d;p)\ ^4He$ ب)نمودار وابستگی زمانی در محدوده $0 \leq t \leq 10^{-11} s$ مربوط به شار ذرات پروتونی تولید شده حاصل از همجوشی $D - {}^3He$ در محدوده دمایی $1 \leq T \leq 180\ keV$

از مشاهده شار ذرات پروتونی تولید شده حاصل از همجوشی $D - {}^3He$ ومقادیر عددی مربوط به شار ذرات پروتونی تولید شده حاصل از همجوشی $D - {}^3He$ در محدوده دمایی $1 \leq T \leq 180\ keV$ در می یابیم که در محدوده زمانی $0 \leq t \leq 10^{-12} s$ مقدارعددی Φ_p رو به افزایش است و در محدوده زمانی $10^{-12} \leq t \leq 10^{-9} s$ روبه کاهش است و در محدوده زمانی $10^{-9} \leq t \leq 100 s$تقریبا به مقدار ثابتی می رسد و از این زمان به بعد همواره ثابت است که مشخصه حالت پایا است اما افزایش دما باعث افزایش مقدارعددی Φ_p می گردد.

نتیجه گیری:

به طور خلاصه، یک سیستم از معادلات ارائه شد که قادر به توصیف رفتار کلی یک سیستم هدف مایع است. این معادلات برای درک رفتار حرارتی یک هدف آبی ساده استفاده می شود. در این مطالعه واکنش $^3He(d;p)\ ^4He$ به عنوان چشمه تولید پروتون معرفی می شوند که برای تولید فلوئور –۱۸ بکار خواهد رفت و این واکنش دارای مقدار Q واکنش ،

$18.35MeV$ می باشد که از این مقدار Q واکنش پروتون حاصل از واکنش $^{3}He(d;p)\,^{4}He$ مقدار انرژی $14.7MeV$ را حمل می کند .که این پروتون های تولید شده با انرژی مربوطه مشابه با همان پروتون هایی هستند که در سیکلوترون پزشکی تولید می شوند لذا این پروتون ها جایگزین خوبی برای پروتون های تولید شده در سیکلوترن پزشکی می باشند.مزیت قابل انتظار این روش نسبت به سیکلوترون پزشکی این است که ذرات تنها نیاز به شتاب گیری تا انرژی های از مرتبه keV نسبت به چند ده MeV مربوط به شتاب گیری پروتون ها در دستگاه سیکلوترون پزشکی دارند. لذا به میزان بسیار زیادی هزینه و سایز سیستم مورد نیاز کاهش می یابد .

مراجع:

1. J. L. Peeples: Design and Testing of Thermosyphon Batch Targets for Production of 18F, PhD thesis (2008), Department of Nuclear Engineering, University of North Carolina.

2. M. H. Stokely: Testing and Analysis of Advanced Thermosyphon Target Systems for Production of Aqueous [18F]Fluoride via 18O(p,n)18F, PhD thesis ,(۲۰۰۸)Department of Nuclear Engineering, University of North Carolina.

3. C. W. Alvord: Computer simulation tools as applied to radioisotope production target design, J. Label. Compd. Radiopharm. 45, pp. 995-1003, 2002.

4. J. Steinbach, K. Guenther, E. Loesel, G. Grunwald, P. Mikecz, L. Ando, F. Szelecsenyi, G. J. Beyer: Temperature Course in Small Volum [18O]Water Targets for [18F]F- Production, Appl. Radiat. Isot. 41(8), pp. 753-756, 1990.