

تأثير تغير كثافة غاز الديتيريوم في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 على قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13}

للطالبة: نهى بسام كفا كلية العلوم - جامعة البعث

بإشراف الدكتور : وليد صهيوني

والدكتور المساعد: علاء ناصيف

ملخص

تم في هذا البحث دراسة تأثير كثافة غاز الديتيريوم على قيمة النشاط الإشعاعي للنظير المشع N^{13} الذي يتم إنتاجه من خلال قذف أهداف من الكربون C^{12} بأيونات الديتيريوم الناتجة عن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2. تم إيجاد مميزات منبع الأيونات (قبضة البلازما) باستخدام برنامج Lee ثم حساب عدد أيونات الديتيريوم الناتجة من انهيار قبضة البلازما ومردود التفاعل $N^{13} (d,n) C^{12}$ حيث بلغت قيمة النشاط الإشعاعي للنظير الناتج $A = 6.99 \times 10^5 \text{ Bq}$ عند قيمة الضغط 3 Torr. تم دراسة تأثير تغير كثافة غاز الديتيريوم على قيمة النشاط الإشعاعي من خلال تغيير الضغط حيث تبين أن القيم المنخفضة للضغط تؤدي إلى زيادة قيمة النشاط الإشعاعي وذلك بسبب زيادة سرعة تحرك طبقة البلازما محورياً وقطرياً داخل الجهاز وبالتالي وصول كمية أكبر من طاقة بنك المكثفات إلى قبضة البلازما وبالتالي زيادة عدد و طاقة أيونات الديتيريوم الناتجة وبالنتيجة زيادة قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13} .

الكلمات المفتاحية: قبضة البلازما، PET، النشاط الإشعاعي.

Effect of the change of density of deuterium gas in dense plasma focus device NX2 on the value of the radioactivity of the isotope N^{13}

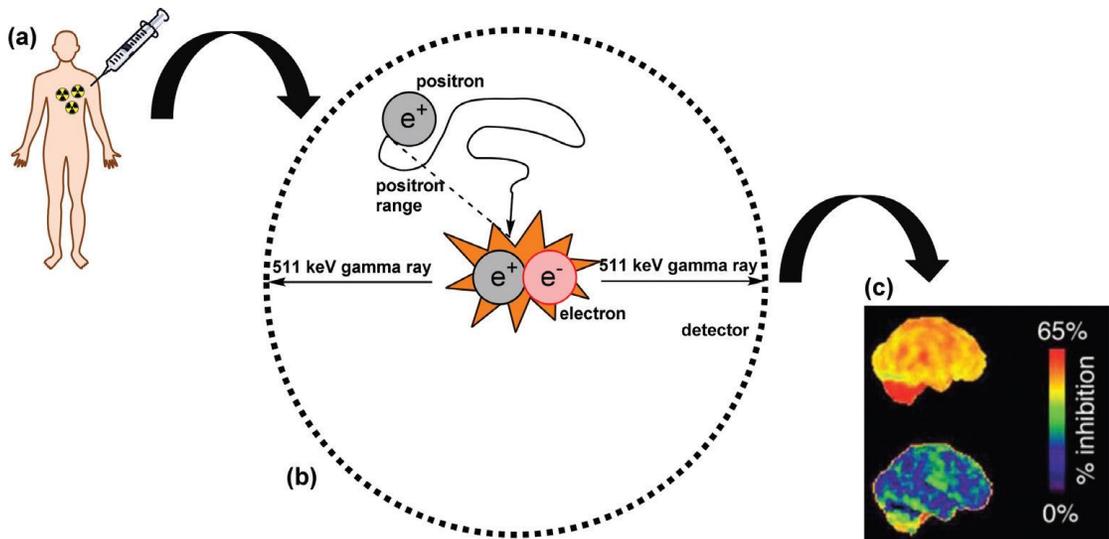
Abstract

In this paper, the effect of the density of deuterium gas on the radioactivity value of the radioactive isotope N^{13} which is produced by bombarding C^{12} carbon targets with deuterium ions from the NX2 dense plasma device was studied. The characteristics of the ion source (plasma pinch) were found using the Lee code, then the number of deuterium ions resulting from the collapse of the plasma pinch and the reaction yield $C^{12} (d,n) N^{13}$ was calculated, where the value of the radioactivity of the resulting isotope was $A = 6.99 \times 10^5 \text{ Bq}$ at a pressure value of 3 Torr. The effect of changing the density of deuterium gas on the value of radioactivity was studied through changing the pressure where it was found that low values of pressure lead to an increase in the value of radioactivity due to an increase in the speed of movement of the plasma layer axially and radially inside the device and thus the arrival of a greater amount of the energy of the capacitor bank to the plasma pinch and thus increasing the number and energy of the resulting deuterium ions and as a result increasing the value of the radioactivity of the isotope N^{13} .

Key words: plasma pinch, PET, radioactivity.

1- مقدمة:

تعدّ تقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (Positron emission tomography (PET) إحدى تقنيات التصوير الجزيئي الوظيفي باستخدام مجسّات (probes) تسمّى المتتبع المشع (radiotracers) الذي يتكون من جزيئات نشطة بيولوجياً (الجلوكوز أو الأكسجين) موسومة بالنويات المشعة المصدرة للبوزيترون (مثل الكربون 11 والنيتروجين 13 والأكسجين 15 والفلورايد 18)؛ حيث ينتقل البوزيترون لمسافة قصيرة في الأنسجة حتى يصطدم بالإلكترون وينتج زوج من أشعة غاما يصدران باتجاهين متعاكسين بطاقة 511 KeV لكل منهما، يتم الكشف عنهما باستخدام كواشف (collinearly aligned) بشكل متزامن حيث تكون الكواشف مثبتة على شكل حلقة مما يسمح بقياس النشاط الإشعاعي للعضو المراد دراسته بزوايا ومسافات كبيرة بصورة مباشرة. تعد هذه الطريقة في التصوير الشعاعي واحدة من أسرع المجالات نمواً في مجال الأشعة [1,2].



الشكل (1): مبدأ التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني: (a) حقن النظير المشع، (b) تحرك البوزيترون لمسافة قصيرة واصطدامه بالإلكترون ثم زوج أشعة جاما بطاقة KeV 511 في وقت واحد عند 180^0 لكل منهما (c) اكتشاف أشعة جاما وتحويلها إلى صور ثلاثية الأبعاد [1].

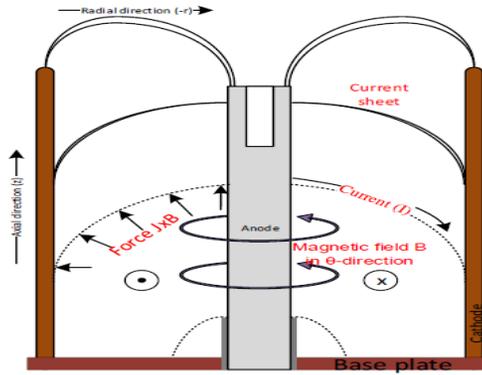
نعلم يتم الحصول على هذه النظائر المشعة من خلال قصف الأهداف المناسبة بواسطة الحزم الأيونية المنتجة في المسرعات (accelerators)، ولكن نظراً لعمر النصف القصير لهذه النظائر المشعة فيجب إنتاجها في مكان يُتوقع استخدامها فيه وبالتالي يجب استخدام المسرعات في المستشفيات. ولكن إنتاج النظائر المشعة PET عن طريق المسرعات طريقة باهظة الثمن لذلك تطرح أجهزة البلازما المحرقة كأحد البدائل في إنتاج النظائر المشعة قصيرة العمر لأنها منخفضة التكلفة وسهلة الاستخدام والصيانة [3].

2- **هدف البحث:** يهدف البحث إلى دراسة تأثير كثافة غاز الديتيريوم على قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13} وذلك من خلال إجراء دراسة عددية لتفاعل حزمة أيونات ديوتيريوم صادرة عن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 مع هدف الكربون C^{12} .

3- جهاز البلازما المحرقة الكثيفة Dense Plasma Focus Device:

يعدّ جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (Dense Plasma Focus DPF) مسرع ثنائي الاتجاه لأيونات، يستفيد الجهاز من نشوء قوة لورنز $F = J \times B$ ، حيث J هي كثافة التيار و B هي الحقل المغناطيسي لتسريع جزيئات الغاز التي يجرفها غلاف البلازما بشكل محوري بسرعة عالية إلى موضع معين (نهاية الأقطاب) ليتم بعدها تحويل التدفق إلى تدفق قطري مع سرعة أعلى ونشوء خيوط (filament) عالية الكثافة من البلازما تسمى البلازما المحرقة (Plasma Focus) [4]. الجهاز في الأصل عبارة عن مسرع متحد المحور (coaxial accelerator) [5] مكوّن من حجرة (chamber) بداخلها قطب مركزي يشكل مصعد محاط بمجموعة من الأقطاب تشكل مهبط معزولين عن بعضهما بواسطة عازل يتم وصلهما مع بنك مكثفات (كمون شحن بنك المكثفات عدة عشرات kV)، تحتوي الحجرة على غاز أو مجموعة من الغازات تحت ضغط معين. يعتمد مبدأ عمل الجهاز على نقل الطاقة المخزنة في بنك المكثفات إلى الأقطاب من خلال تيار التفريغ (يصل إلى عدة مئات kA في الأجهزة متوسطة الطاقة ويصل إلى MA في أجهزة عالية الطاقة) والذي يعمل على توليد حقل مغناطيسي. يُخترن الحقل المغناطيسي المتحرض خلف طبقة مؤينة من الغاز. يُشار إلى غمد البلازما المتحرك تحت تأثير الحقل المغناطيسي بالمكبس المغناطيسي (Magnetic Piston) [6]؛ تمتد هذه الطبقة المؤينة بين الأقطاب الكهربائية الداخلية والخارجية (المصعد والمهبط) وهي المسؤولة عن نقل التيار الكهربائي بينها. وتسمى الطبقة المتأينة التي تحمل التيار تسمى

صفحة التيار (Current Sheet CS) والتي تمثل المكون J من قوة لورنز، ويمر التيار الكهربائي عبر المهبط من قاعدته إلى موضع صفحة التيار مؤدياً إلى تحريض حقل مغناطيسي زاوي حول المهبط في الاتجاه الزاوي (B_θ) ، كما هو موضح في الشكل (2). يقع المجال المغناطيسي خلف صفحة التيار، يدفع كل من J_r و B_θ صفحة التيار بقوة لورنز (F_z) للوصول إلى سرعة محورية عالية تصل إلى 10^7 cm/s والتي تتضاعف في الاتجاه القطري، كما تزداد الكثافة لتصل إلى $10^{19}/\text{cm}^3$ لإنتاج خيوط بلازمية جداً بطاقة عدة وتتحد هذه الخيوط على قمة المصعد مشكلةً ما يسمى قبضة البلازما (Pinch) والتي هي عبارة عن عمود صغير من البلازما الحارة جداً وكثيفة جداً والذي ينهار بعد فترة قصيرة جداً (عشرات ns) نتيجة لا استقرارات البلازما ووجود كمون مرتفع مما يؤدي إلى إصدار حزم الأيونات و الإلكترونات في اتجاهين متعاكسين [4].



الشكل (2): الحركة المحورية والقطرية للورقة الحالية في جهاز تركيز بلازما محرقة كثيفة

[5]

في حال تمّ استخدام غاز الديتيريوم في جهاز البلازما المحرقة فيمكن الاستفادة من حزم الأيونات الطاقية الناتجة بعد انهيار قبضة البلازما واصطدامها بهدف مناسب من أجل

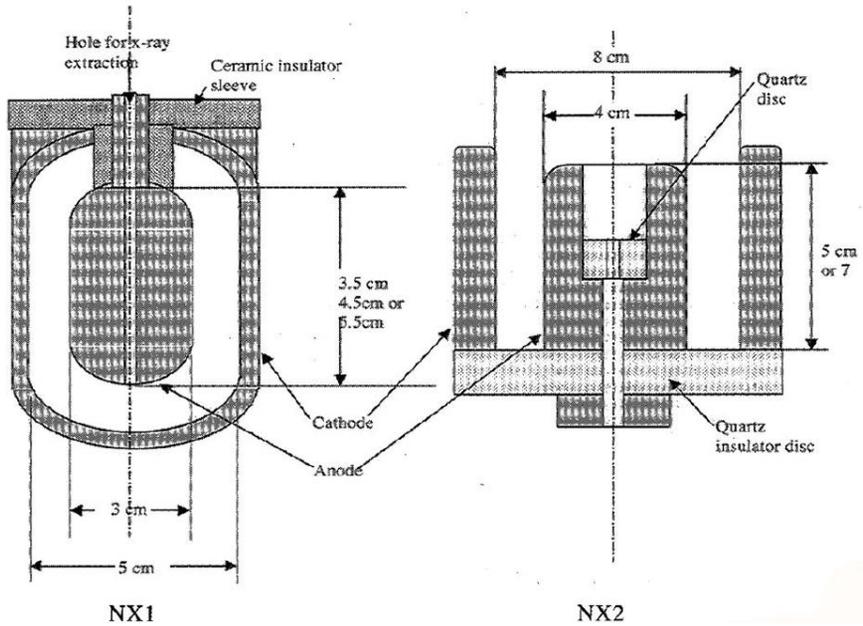
إحداث التفاعل المطلوب. ولهذه الغاية فقد تم إجراء العديد من الأبحاث والدراسات التجريبية والعديد للبحث في إمكانية الاستفادة من حزم الأيونات الصادرة عن انهيار عمود من البلازما متشكل في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة وخاصة عند استخدام غاز الديتيريوم كغاز للتشغيل من أجل إحداث التفاعل النووي المطلوب لإنتاج النظائر المشعة قصيرة العمر، حيث وضع Sumini [7] تصميم جهاز بلازما محرقة كثيفة بطاقة 150 kJ يعمل بنمط تكراري 1 Hz لإنتاج النظير المشع $18F$ بنشاط إشعاعي 1 Ci كوري في زمن ساعتين ووضع التصميم الهندسية للأقطاب وبارامترات الدارة الكهربائية وتم تنفيذ 128 عملية إطلاق. كما درس Shirani [8] إمكانية الحصول على النظير المشع $13N$ من جهاز بلازما محرقة منخفض الطاقة ونم الحصول على قيمة نشاط إشعاعي 10 kBq من أجل عملية إطلاق واحدة وازدادت قيمة النشاط الإشعاعي إلى عدة عشرات MBq من عند معدل تشغيل $f = 1\text{ Hz}$ لزمن تشغيل 600 s في حين أن النشاط الإشعاعي المطلوب طبيياً حوالي 4 GBq وتم طرح فكرة تغيير تصميم الأقطاب أو ضغط غاز الديتيريوم لزيادة طاقة طيف الديترونات الصادر. وأجرى Akel [9] تجارب عديدة باستخدام كود Lee لحساب خصائص حزم الأيونات الصادرة عن عدد من أجهزة البلازما المحرقة ذات طاقات تشغيل مختلفة وحساب النشاط الإشعاعي للتفاعل $13N(d,n)12C$ وتوصلوا إلى أنه يجب أن يعمل الجهاز بنمط تكراري (معدل تكرار $f = 25\text{ Hz}$ لفترة تشغيل 600 s) للوصول إلى قيمة النشاط الإشعاعي المطلوب طبيياً وأن إمكانية التشغيل هذه غير متوفرة في الأجهزة الحالية بالإضافة إلى ظهور مشكلة تحمّل الأهداف للأحمال الحرارية الناتجة. في عام 2019 طرح Sadeghi وآخرون [10] فكرة إضافة عدسات مغناطيسية (magnetic lenses) من أجل تركيز وتوجيه حزم الأيونات الصادرة وتقليل نسبة التشتت وتم تنفيذ محاكاة على 16 جهاز بلازما محرقة مختلفة بطاقتها من 400 J إلى 500 kJ وتم الوصول إلى قيمة نشاط

تأثير تغير كثافة غاز الديتيريوم في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 على قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13}

إشعاعي $0.016 - 7.71 GBq$ وأن 9 من الأجهزة المدروسة كان لها القدرة على الوصول إلى القيمة المطلوبة طبيياً للنظير $13N$ من خلال استخدام هذه التقنية.

4- جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 :

يعدّ جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 نسخة مطورة عن جهاز البلازما المحرقة PF (Nanyang X-ray source) الذي تمّ تطويره في جامعة Nanyang، NTU NIE ، سنغافورة. يختلف هذا الجهاز عن النسخة الأولى بقيم أعلى للتيار وتردد التشغيل بالإضافة إلى الأبعاد الهندسية لحجرة التفريغ.



الشكل (3) مقارنة بين تصميم الجهازين NX1 و NX2 [11]

يعمل الجهاز في وضع دورية نبضية بتردد 1-20 هرتز، ومنبع طاقة 1.6-3.3 كيلو جول. وتصل قيمة التيار الكلي إلى 190-510 كيلو أمبير. حجرة التفريغ من النوع Mather type ، يستخدم في هذا الجهاز مجموعة متنوعة من الغازات: الهيدروجين، الديوتيريوم، الهليوم، الأرجون، النيون، خليط من الأرجون والأكسجين وذلك حسب التطبيق المراد الاستخدام لأجله، بمجال ضغط يقع ضمن المجال 0.7-20.0 ميلي بار. تكون الأقطاب مصنوعة من النحاس أو الفولاذ، يكون المصعد ذي قمة مجوفة لها أحجام متغيرة، قطره من 23-40 مم وطوله 25-70 مم، يلعب بينما المهبط يكون عبارة عن مجموعة من القضبان 8-12 بقطر 80-100 مم بسمك 10 مم وطول 50 مم. في بعض التجارب، كان الجزء العلوي من المصعد مخروطي الشكل، أو تم إدخال التيتانيوم أو FeCo في الطرف العلوي من المصعد، والعازل مصنوع من قرص كوارتز أو أنبوب زجاجي من نوع Pyrex [11].

أظهرت التجارب تطابقاً في متوسط طاقة إشعاع SXR لجهاز NX2 مع قيمتها NX1 (10 J لكل طلقة) [12] و 100 J [13] ، وأن القيمة القصوى لتيار حزمة الإلكترونات الصادرة هو 22 كيلو أمبير [14] ، وأن أكبر قيمة للمردود النيوتروني لكل طلقة 7×10^8 [15]، وأن عدد الديوترونات الصادرة هو 2.4×10^{12} [16]. تم استخدام هذا الجهاز كمصدر SXR للطباعة الإلكترونية الدقيقة، بالإضافة إلى استخدامه كمصدر النيوترونات والديوترونات وحزم الإلكترونات، والتي بدورها تستخدم في اصطناع جزيئات FeCo النانوية [14]، وإنشاء أفلام رقيقة بلورية نانوية من ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 ، وعينات من البلورات الضوئية [17].

5- النتائج والمناقشة:

إيجاد مميزات حزمة الديترونات الصادرة عن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة:

تمّ حساب عدد الأيونات الناتجة وذلك بالاستفادة من بارامترات قبضة البلازما (المنبع) التي تمّ إيجادها باستخدام برنامج Lee وذلك بالاستفادة من مميزات الجهاز الآتية [18]:

$$V = 14 \times 10^3 v \quad \text{كمون التشغيل:}$$

$$C_0 = 28 \times 10^{-6} F \quad \text{سعة بنك المكثفات:}$$

$$L_0 = 20 \times 10^{-9} H \quad \text{التحريض:}$$

يمكن حساب قيمة تيار التفريغ الكلي الناتج عن بنك المكثفات وفق العلاقة :

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} = \frac{4 \times 10^3}{\sqrt{\frac{20 \times 10^{-9}}{28 \times 10^{-6}}}} = 523.83 \times 10^3 A \quad \dots \dots (1)$$

ويكون زمن تفريغ بنك المكثفات:

$$t_0 = \sqrt{L_0 C_0} = \sqrt{20 \times 10^{-9} \times 28 \times 10^{-6}} \\ = 74.8 \times 10^{-6} \text{ s} \quad \dots \dots (2)$$

ودور التفريغ :

$$T = 2\pi \times t_0 = 2\pi \times 74.8 \times 10^{-6} = 469.9810^{-6} s \quad \dots \dots \dots (3)$$

يعطى زمن تحرك طبقة البلازما خلال المرحلة المحورية بالعلاقة :

$$t_a = \sqrt{\left[\frac{2\pi^2(c^2 - 1)}{\mu_0 \ln c} \right]} \left[\frac{\sqrt{f_m} \times Z_0 \sqrt{\rho}}{f_c \left(\frac{I_0}{a} \right)} \right] \dots \dots (4)$$

وزمن تحرك طبقة البلازما قطرياً على قمة المصعد حتى الوصول إلى مرحلة التقبض
بالعلاقة:

$$t_r = \left[\frac{4\pi}{\mu_0 \sqrt{(\gamma + 1)}} \right] \left[\frac{\sqrt{f_m} \sqrt{\rho}}{f_c \left(\frac{I_0}{a} \right)} \right] a \dots \dots \dots (5)$$

حيث:

$$c = \frac{b}{a} = \frac{4.1}{1.9} = 2.2 \text{ نسبة نصف قطر المهبط على نصف قطر المصعد}$$

نفاذية الخلاء $Z_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ، μ_0 طول المصعد

$f_m = 0.06$ عامل فقدان الكتلة في المرحلة المحورية ، $f_c = 0.7$ عامل فقدان التيار
في المرحلة المحورية

γ : نسبة السعة الحرارية النوعية لبلازما الديتريوم وتساوي قيمة ثابتة مقدارها $5/3$.

$\rho(kg/m^3)$ كثافة غاز الديتريوم وتحسب من العلاقة:

$$\rho = \frac{P.M}{R.T} \dots (6)$$

أظهرت الدراسات أن حوالي 60% من تيار التفريغ الكلي سوف يشكل تيار الذروة
(I_{peak}) والذي يستمر بدفع طبقة البلازما حتى الوصول إلى مرحلة تشكّل قبضة

تأثير تغير كثافة غاز الديتريوم في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 على قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13}

البلازما [19] ولذلك فقد تم اختيار قيمة ضغط غاز الديتريوم $P = 3Torr$ حيث يتحقق عندها هذا الشرط. وبالتالي:

$$P = \frac{3 \times 1.013 \times 10^5}{760} = 400 Pa$$

$$T = 273 + 20 = 293 K \text{ : درجة الحرارة}$$

$$R = 8.31 J/Kmol.K \text{ : ثابت الغازات}$$

$$M = 4.027 Kg/mol \text{ : الكتلة المولية لغاز الديتريوم}$$

بالتعويض لحساب كثافة غاز الديتريوم نجد:

$$\rho = \frac{P.M}{R.T} = \frac{400 \times 4.027}{8.31 \times 293} = \frac{0.661kg}{m^3} \dots \dots \dots (7)$$

تم الاستفادة من القيم التي تم حسابها وبلاستعانة ببرنامج Lee لحساب قيم سرعات طبقة البلازما في المرحلتين المحورية والقطرية حيث حصلنا على القيم التالية:

السرعة المحورية (Axial Velocity):

$$v_a = 12.9 \times 10^4 m/s \dots (8)$$

السرعة القطرية (Radial Velocity):

$$v_r = 32.7 \times 10^4 m/s \dots (9)$$

يتم حساب كثافة تيار الأيونات باستخدام علاقة Langmuir-child [20]:

$$J_i = 1.86 \times \left(\frac{4}{9}\right) \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \times \frac{\phi^{3/2}}{d^2} \dots \dots \dots (10)$$

حيث : $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$: سماحية الخلاء

شحنة الالكترن : $e = 1.6 \times 10^{-19} c$

كتلة أيون الديتريوم : $m_i = 3.34 \times 10^{-27} Kg$

$$\Phi = I_0 \left(\frac{dL_p}{dt} \right) \dots (11)$$

البلازما

d : عرض طبقة ثنائي البلازما المتشكلة

نحسب التحريض الناشئ ضمن قبضة البلازما $\frac{dL_p}{dt}$ باستخدام العلاقة:

$$\frac{dL_p}{dt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{b}{r_p} \right) v_a + \left(\frac{z}{r_p} \right) v_r \right] \dots \dots (12)$$

حيث $b = 4.1 \text{ cm}$ نصف قطر المهبط ، $r_p = 0.302 \text{ cm}$ نصف قطر قبضة

البلازما ، $z = 2.806 \text{ cm}$ طول قبضة البلازما. بالتعويض نحصل على:

$$\frac{dL_p}{dt} = 0.674$$

وبالتالي يكون الكمون المتحرض ضمن قبضة البلازما:

$$\Phi = I_0 \left(\frac{dL_p}{dt} \right) = 523.83 \times 10^3 \times 0.674 = 353 \times 10^3 \text{ V}$$

نحسب كثافة تيار الأيونات:

$$J_i = 1.86 \times \left(\frac{4}{9} \right) \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \times \frac{\Phi^{3/2}}{d^2} = 1.90 \times 10^4 \text{ A/m}^2$$

وبالتالي نحصل على عدد أيونات الديتريوم المقذوفة من قبضة البلازما:

$$N_i = \pi \frac{r_p^2}{e} J_i \tau_p = 65 \times 10^{11} \text{ ions ... (13)}$$

حساب المردود الإشعاعي للتفاعل:

يعطى التوزيع الطاقى للأيونات الصادرة من قبضة البلازما بالعلاقة:

$$f(E) = \frac{dN_i}{dE} = C \cdot E^{-m} \dots \dots \dots (14)$$

$f(E)$: تابع توزيع طاقة الأيونات

N_i : عدد أيونات الديتريوم

C : ثابت، m يأخذ القيم ضمن المجال $2 < m < 3.5$

$$N_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} C E^{-m} dE = C \left[\frac{E^{1-m}}{1-m} \right]_{E_{min}}^{E_{max}}$$

وبالتالي :

$$f(E) = N_i \left[\frac{1-m}{E_{max}^{1-m} - E_{min}^{1-m}} \right] E^{-m} \dots (15)$$

E_{max} : أعظم طاقة للديتريونات الصادرة.

E_{min} : أصغر طاقة للديتريونات الصادرة.

يعطى المردود الإشعاعي للتفاعل بالعلاقة:

$$\langle y \rangle = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \left[\frac{1-m}{E_{max}^{1-m} - E_{min}^{1-m}} \right] \int_{E_{min}}^{E_{max}} n \frac{E^{-m} \sigma(E)}{\frac{dE}{dx}} dE \dots (16)$$

حيث:

Ω_1 : الزاوية المجسمة للمنبع (القبضة)، Ω_2 : الزاوية المجسمة للهدف.

n : كثافة هدف الغرافيت $n = 1.129 \times 10^{29} m^{-3}$.

$\frac{dE}{dX}$: قدرة الإيقاف لهدف الغرافيت.

$\sigma(E)$: المقطع العرضي التجريبي للتفاعل $^{12}C(d,n)^{13}N$.

حساب الزوايا:

توجد زاويتان يجب حسابهما: الأولى هي زاوية إصدار الأيونات من القبضة، والثانية هي زاوية ورود الأيونات على الهدف.

زاوية الإصدار: تصدر أيونات الديتيريوم على شكل مخروط رأسه يقع على القبضة وقاعدته تقع على الهدف. تعطى الزاوية المجسمة للمخروط بالعلاقة:

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos\theta_1) \dots (17)$$

بفرض: $\theta_1 = 25^\circ = 0.436 \text{ rad}$ وبالتالي: (ستراديان) $\Omega_1 = 0.587 \text{ sr}$

زاوية الورود: جزء من الأيونات الصادرة تسقط على هدف الغرافيت وتتناسب هذه الزاوية مع مساحة السطح وهي تعطى بالعلاقة:

$$\Omega_2 = \pi\theta_2 = \pi\left(\frac{r}{R}\right)^2 \dots (18)$$

حيث r نصف قطر المنبع، R البعد بين الهدف والمنبع (القبضة).

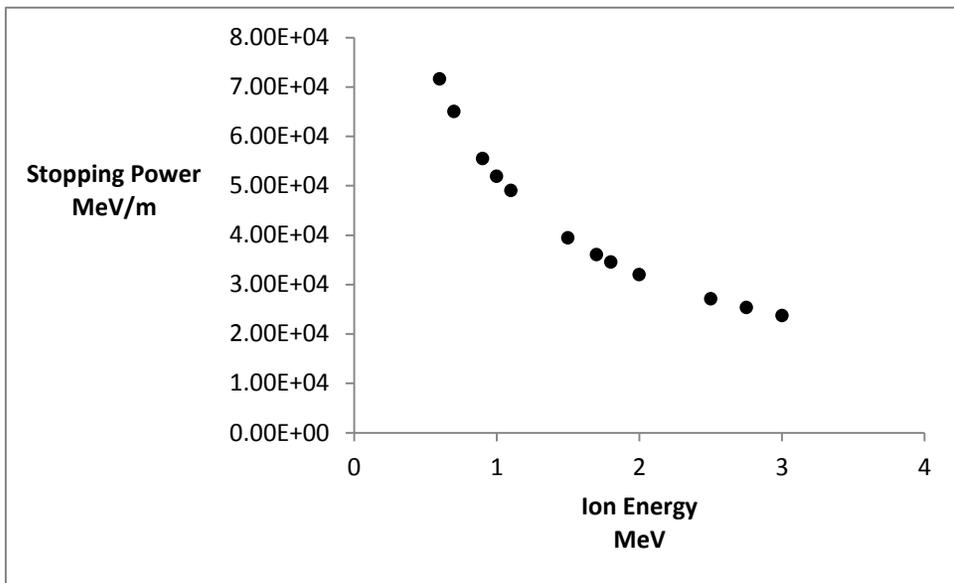
بفرض $R = 20 \text{ cm}$ ، $r = 1 \text{ cm}$ نجد:

$$\Omega_2 = 0.0078 \text{ sr}$$

حساب قدرة الإيقاف لهدف الغرافيت $\frac{dE}{dX}$:

تم استخدام برنامج SRIM 2013 (Stopping and Range of Ions in) [21] لإيجاد قدرة الإيقاف لأيونات الديتيريوم ضمن المجال الطاقى (0.6 – 3 MeV) ضمن هدف الغرافيت وكانت النتائج كما هو موضح في الجدول الآتي:

قدرة الإيقاف (Stopping Power) $\times 10^4$ (MeV/m)	طاقة أيونات الديتيريوم (Ions Energy) (MeV)
7.16	0.6
6.50	0.7
5.55	0.9
5.19	1
4.90	1.1
3.94	1.5
3.60	1.7
3.45	1.8
3.20	2
2.71	2.5
2.53	2.75
2.37	3



الشكل (4) قدرة الإيقاف لأيونات الديتيريوم ضمن هدف الغرافيت مع منحنى المطابقة

برسم منحنى المطابقة نحصل على العلاقة التي تعطي قدرة الإيقاف:

$$\frac{dE}{dX} = 51408E^{-0.691}$$

إيجاد المقطع العرضي التجريبي للتفاعل $^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$: $\sigma(E)$

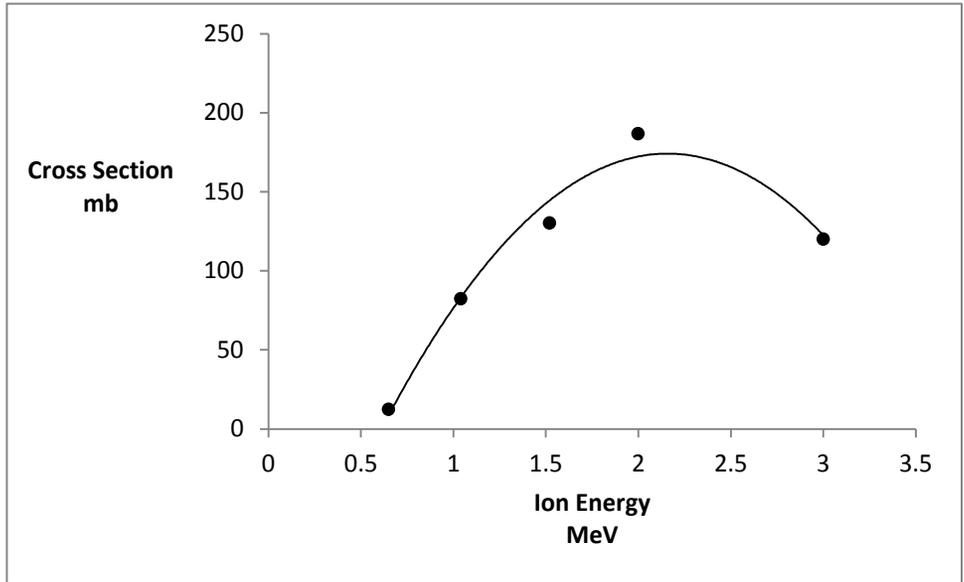
لإيجاد المقطع العرضي للتفاعل $^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$ تم استخدام قاعدة بيانات

Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) التابعة للوكالة الدولية

للطاقة الذرية (IAEA) [22]:

تأثير تغير كثافة غاز الديتريوم في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 على قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13}

$\sigma(E)$ (mbarn)	طاقة أيون الديتريوم (Mev)
12.37	0.65
82.29	1.04
130.2	1.52
186.5	2
119.9	3



الشكل (5) المقطع العرضي لتفاعل $^{12}C(d,n)^{13}N$ مأخوذ من قاعدة بيانات (EXFOR)

وبالتالي نحصل على العلاقة التي تعطي المقطع العرضي:

$$\sigma(E) = -72.771E^2 + 314.1E - 164.78$$

بتعويض العلاقات السابقة لحساب قيمة المردود عند قيم: $m = 2, 3, 3.5$ نجد:

$$m = 2 \Rightarrow \langle y \rangle = 9.31 \times 10^{-5}$$

$$m = 3 \Rightarrow \langle y \rangle = 1.4534 \times 10^{-5}$$

$$m = 3.5 \Rightarrow \langle y \rangle = 3.142 \times 10^{-5}$$

يتم حساب النشاط الإشعاعي باستخدام العلاقة:

$$A = N_i \langle y \rangle \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \dots (19)$$

حيث: $T_{1/2} = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$ عمر النصف للنظير المشع N^{13}

وبالتالي تكون قيمة النشاط الإشعاعي من أجل $m = 2$:

$$A = 6.99 \times 10^5 \text{ Bq}$$

دراسة تأثير كثافة غاز الديتيريوم على قيمة النشاط الإشعاعي:

تعتبر كثافة غاز الديتيريوم من العوامل المؤثرة على تشكّل طبقة البلازما وسرعتها محورياً وقطرياً وعلى بارامترات قبضة البلازما المتشكلة في نهاية المرحلة القطرية وبالتالي تأثيرها على التحريض المتولد ضمن قبضة البلازما والكمون المتولد ضمنها ولاحقاً على كثافة التيار وعدد الأيونات الناتجة من انهيار القبضة لذلك تم إيجاد كثافة الغاز عند تغيير ضغط غاز الديتيريوم من القيمة $P = 1 \text{ Torr}$ حتى القيمة التي لا يحدث بعدها تمحرق ومن ثم إيجاد قيم سرعات طبقة البلازما المحورية والقطرية وأبعاد وزمن بقاء قبضة البلازما المتشكلة باستخدام برنامج Lee وكانت النتائج كالتالي:

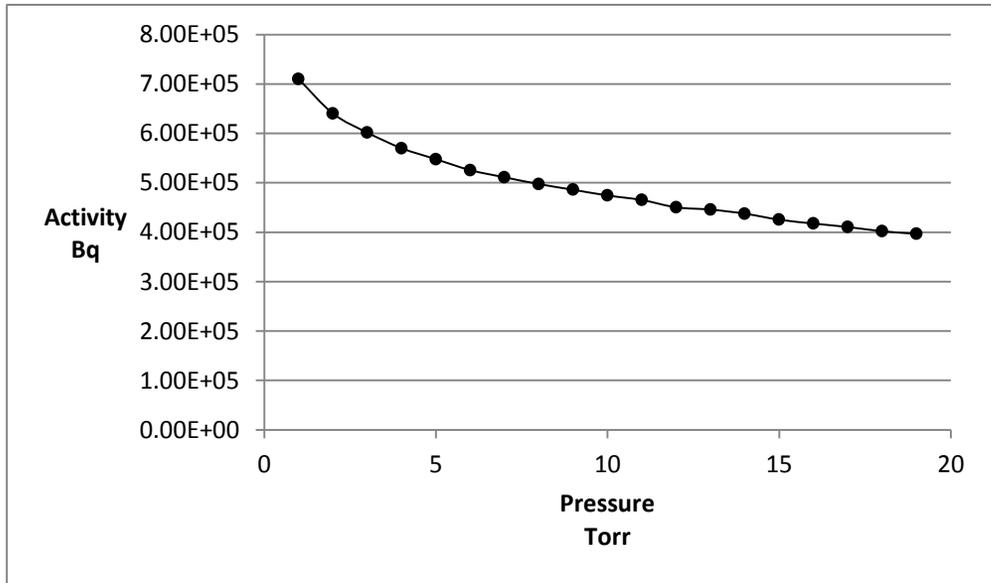
تأثير تغير كثافة غاز الديتيريوم في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة NX2 على قيمة النشاط الإشعاعي
للنظير N^{13}

ضغط غاز الديتيريوم Deuterium Pressure Torr	كثافة غاز الديتيريوم Deuterium Density Kg/m ³	سرعة طبقة البلازما محورياً Axial Velocity ×10 ⁴ m/sec	سرعة طبقة البلازما قطرياً Radial Velocity ×10 ⁴ m/sec	نصف قطر قبضة البلازما Pinch Radius ×10 ⁻² m	طول قبضة البلازما Pinch Length ×10 ⁻² m	فترة بقاء قبضة البلازما Pinch Duration ×10 ⁻⁹ sec
1	0.220	17.6	45.7	0.301	2.806	13.5
2	0.440	14.5	37.1	0.302	2.804	16.7
3	0.661	12.9	32.7	0.304	2.806	19.1
4	0.881	11.8	29.7	0.305	2.804	21
5	1.102	11.1	27.4	0.306	2.805	22.8
6	1.322	10.5	25.7	0.308	2.803	24.3
7	1.543	10	24.3	0.309	2.802	25.8
8	1.763	9.5	23.1	0.311	2.805	27.3
9	1.984	9.2	22.1	0.312	2.803	28.6
10	2.204	8.9	21.1	0.313	2.803	30
11	2.424	8.6	20.3	0.315	2.805	31.4
12	2.645	8.3	19.5	0.317	2.802	32.6
13	2.865	8.1	18.9	0.318	2.804	33.9
14	3.086	7.9	18.3	0.32	2.803	35.2
15	3.306	7.7	17.6	0.322	2.804	36.5
16	3.527	7.5	17.1	0.324	2.805	37.7
17	3.747	7.4	16.6	0.326	2.804	39
18	3.968	7.2	16.1	0.328	2.804	40.3
19	4.1885	7.1	15.7	0.33	2.802	41.6

تم حساب قيمة تحريض قبضة البلازما والكمون المتولد ضمنها وكثافة تيار الأيونات وعددها باستخدام العلاقات (10)،(11)،(12)،(13):

ضغط غاز الديتيريوم Deuterium Pressure Torr	تحريض قبضة البلازما inductance	الكمون المتحرض ضمن قبضة البلازما the induce voltage in the plasma Pinch $\times 10^5$ V	كثافة التيار current density $\times 10^3$ A/m ²	عدد أيونات الديتيريوم المقذوفة the number of the ejected deuteron $\times 10^{12}$ Ions
1	0.9439	4.945	31.64	6.60
2	0.7645	4.005	23.09	5.95
3	0.6707	3.514	18.95	5.59
4	0.6074	3.182	16.35	5.30
5	0.5599	2.933	14.46	5.09
6	0.5221	2.735	13.04	4.89
7	0.4924	2.579	11.95	4.75
8	0.4656	2.439	10.97	4.62
9	0.4444	2.328	10.24	4.52
10	0.4237	2.219	9.534	4.41
11	0.4056	2.125	8.919	4.32
12	0.3872	2.028	8.336	4.19
13	0.3747	1.963	7.924	4.14
14	0.3608	1.890	7.495	4.07
15	0.3457	1.811	7.022	3.95
16	0.3341	1.750	6.668	3.88
17	0.3230	1.692	6.342	3.82
18	0.3116	1.632	6.010	3.74
19	0.3023	1.584	5.753	3.69

تمّ باستخدام العلاقة (19) تمّ حساب قيمة النشاط الإشعاعي عند تغيّر ضغط غاز الديتيريوم والنتائج موضحة في الشكل الاتي:



الشكل (6) تغيّر قيمة النشاط الإشعاعي مع تغيّر غاز الديتيريوم

6- الاستنتاجات:

نلاحظ أن زيادة ضغط غاز الديتيريوم أدى إلى زيادة زمن تحرك قبضة البلازما محورياً وقطرياً وبالتالي تناقص سرعة البلازما محورياً من $17.6 \times 10^4 m/s$ عند الضغط $1 Torr$ حتى $7.1 \times 10^4 m/s$ عند أعلى قيمة للضغط ($19 Torr$)، كما أدى إلى تناقص سرعة تحرك البلازما على قمة المصعد قطرياً من $45.7 \times 10^4 m/s$ إلى $15.7 \times 10^4 m/s$ وبالتالي انخفاض قيمة الطاقة الواصلة من بنك المكثفات إلى قبضة البلازما وبالنتيجة انخفاض قيمة التحريض داخل قبضة البلازما والكمون المتولد

ضمنها وبالتالي عدد الأيونات المقذوفة من قبضة البلازما وفق العلاقات (12)، (11)، (13) ولذلك تتخفض قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13} كما هو موضح في الشكل (6) من $7.1 \times 10^5 Bq$ إلى $3.97 \times 10^5 Bq$.

إذا أدى تخفيض ضغط الغاز إلى زيادة قيمة النشاط الإشعاعي للنظير N^{13} ولكن حتى يصبح من الممكن استخدامه طبياً في تقنية التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني (PET) يجب أن تكون قيمة النشاط الإشعاعي ضمن المجال $(- 370 \times 10^6 Bq)$ وبالتالي يجب البحث في طرق إضافية من أجل زيادة قيمة النشاط الإشعاعي بالإضافة إلى الضغط المنخفض لغاز الديتيريوم مثل زيادة معدل تشغيل الجهاز أي تعرّض الهدف لعدد من الطلقات المتتالية (أي زيادة مردود التفاعل) أو من خلال زيادة طاقة تشغيل الجهاز.

المراجع المستخدمة

1. Yang L, Scott PJ, Shao X. [11C] Carbon Dioxide: Starting Point for Labeling PET Radiopharmaceuticals. In Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery 2017 Dec 20. IntechOpen.
2. von Schulthess GK, Steinert HC, Hany TF. **Integrated PET/CT: current applications and future directions.** Radiology. 2006 Feb;238(2):405-22.
3. Saed M, Roshan MV, Banoushi A, Habibi M. **The investigation capability of plasma focus device for ^{13}N radioisotope production by means of deuteron experimental spectrum.** Journal of Modern Physics. 2016 Aug 2;7(12):1512-8.
4. Mohamed AE. **A dense plasma focus device as a pulsed neutron source for material identification.** Kansas State University; 2015.
5. Mather JW, Bottoms PJ. **Characteristics of the dense plasma focus discharge. The physics of fluids.** 1968 Mar;11(3):611-8.
6. Lee S. **Plasma focus radiative model: Review of the Lee model code.** Journal of Fusion Energy. 2014 Aug;33(4):319-35.
7. Sumini M, Mostacci D, Rocchi F, Frignani M, Tartari A, Angeli E, Galaverni D, Coli U, Ascione B, Cucchi G. **Preliminary design of a 150 kJ repetitive plasma focus for the production of ^{18}F .** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2006 Jun 23;562(2):1068-71.

8. Shirani B, Abbasi F. **Prospects for ^{13}N production in a small plasma focus device.** Journal of Fusion Energy. 2013 Apr;32(2):235-41.
9. Akel M, Alsheikh Salo S, Ismael S, Saw SH, Lee S. **Interaction of the high energy deuterons with the graphite target in the plasma focus devices based on Lee model.** Physics of plasmas. 2014 Jul 15;21(7):072507.
10. Sadeghi H, Amrollahi R, Fazelpour S, Omrani M. **Simulation of dense plasma focus devices to produce N-13 efficiently.** Laser and Particle Beams. 2019 Jun;37(2):209-16.
11. P. Lee, X. Feng, G.X. Zhang, M.H. Liu, S. Lee, **Lithography using a compact plasma focus electron source.** Proc. SPIE **3183**, 169 (1997b). <https://doi.org/10.1117/12.280538>
12. V.A. Gribkov, A. Srivastava, P.L.C. Keat, V. Kudryashov, S. Lee, **Operation of NX2 dense plasma focus device with argon filling as a possible radiation source for micro-machining.** IEEE Trans. Plasma Sci. **30**, 1331 (2002). <https://doi.org/10.1109/TPS.2002.802156>
13. C.R. Kant, M.F. Srivastava, R.S. Rawat, **Dense plasma focus energetic ions based fullerene films on a Si(III) substrate.** Phys. Lett. A. **239**, 109 (1998). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375960197009535?via%3Dihub>
14. G.X. Zhang, J. Lin, A. Patran, D. Wong, S.M. Hassan, S. Mahmood, T. White, T.L. Tan, S.V. Springham, S. Lee, P. Lee, R.S. Rawat, **Optimization of a plasma focus device as an electron beam source for thin film deposition.** Plasma

Sources Sci. Technol. **16**, 250 (2007). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/16/2/006>

15. J.M. Koh, R.S. Rawat, A. Patran, T. Zhang, D. Wong, S.V. Springham, T.L. Tan, S. Lee, P. Lee, **Optimization of the high pressure operation regime for enhanced neutron yield in a plasma focus device.** Plasma Sources Sci. Technol. **14**, 12 (2005). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/14/1/002>

16. M.V. Roshan, P. Lee, Z. Pan, R. Verma, R.S. Rawat, S.V. Springham, **Correlation analysis of intense and high-energy deuteron beam, pinch images, and neutron yield.** IEEE Trans. Plasma Sci. **38**, 2434 (2010). <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2056940>

17. R.S. Rawat, V. Aggarwal, M. Hassan, P. Lee, S.V. Springham, T.L. Tan, S. Lee, **Nano-phase titanium dioxide thin film deposited by repetitive plasma focus: ion irradiation and annealing based phase transformation and agglomeration.** Appl. Surf. Sci. **255**, 2932 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.08.055>

18. Lee S, Saw SH. **Plasma focus ion beam fluence and flux—Scaling with stored energy.** Physics of Plasmas. 2012 Nov 12;19(11):112703.

19. L. Soto, Plasma Phys. Contr. Fusion 47, A352–A381 (2005).

20. P. Carlqvist, Solar Phys. 7, 377–392 (1969)

21. www.srim.org for the stopping and range of ions in matter

22. <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>