

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, Poland.

www.ifj.edu.pl/reports/2003.html
Kraków, grudzień 2003

Raport 1936/AP

**Otrzymywanie izotopów promieniotwórczych
w cyklotronie AIC-144 w latach 2000-2003**

Edmund Bakewicz, Krzysztof Daniel, Henryk Doruch,
Barbara Petelenz, Marek Tałach, Mirosław Szalkowski

Streszczenie:

Cyklotron AIC-144 Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, modernizowany w celu jego przyszłych zastosowań medycznych, jest od roku 2000 coraz intensywniej wykorzystywany do otrzymywania izotopów. Odpowiednie tarcze są napromieniane wiązką wewnętrzną.

Raport przedstawia sposób pokonania problemów napotkanych przy aktywacjach i osiągnięte rezultaty. Krótko opisano nową, uruchamianą obecnie, zautomatyzowaną sondę izotopową przeznaczoną do produkcji większych aktywności izotopów przy większych niż obecnie natężeniach wiązek.

W rozdziale Dodatek przedstawiono wykaz 34 nuklidów promieniotwórczych otrzymanych w ciągu ostatnich 4 lat w 89 próbach, z podaniem celu aktywacji i nazwy zespołu, który prowadził badania.

1. Wstęp

Cyklotron AIC-144 Instytutu Fizyki Jądrowej PAN umożliwia akcelerację protonów, deuteronów i helionów (cząstek alfa). Zakres energii i uzyskiwane intensywności wiązek wewnętrznych przedstawia tabela 1. Wiązkami tymi w latach 2000-2003 wykonano szereg aktywacji tarcz w celu otrzymania nuklidów dla celów badawczych.

Tabela 1. Energia cząstek i intensywności wiązek akcelerowanych na cyklotronie AIC-144.

Rodzaj cząstek	Energia na końcowym promieniu	Natężenie wiązki zmierzone	Maksymalne natężenie wiązki, do uzyskania w miarę potrzeb
Protony	22 MeV	2 μA	50 μA
	35 MeV	20 μA	50 μA
	42 MeV	15 μA	50 μA
	48 MeV	15 μA	50 μA
	60 MeV	1 μA	10 μA
Deuterony	18 MeV	100 μA	100 μA
	30 MeV	1 μA	50 μA
Heliony (cz. alfa)	36 MeV	5 μA	10 μA
	60 MeV	1 μA	5 μA

Zalety napromieniania tarcz na wiązce wewnętrznej cyklotronu są następujące:

1. Szybka, bez przestrajania cyklotronu, zmiana energii cząstek poprzez ustawienie tarczy na odpowiednim dla żądanej energii promieniu.
2. Możliwość wykorzystania dużych intensywności wiązek.
3. Brak aktywacji urządzeń systemu ekstrakcji i transportu wiązki, a więc mniejsze zagrożenie radiacyjne dla personelu.
4. Niezawodność i stabilność ze względu na mniejszą liczbę pracujących urządzeń, gdyż nie trzeba korzystać z deflektorów ani zasilaczy urządzeń transportu wiązki.

Napromienianie takie stwarza również problemy:

1. W izochronicznym Cyklotronie AIC-144 rozmiar wiązki w pionie wynosi ok. 2 mm, szerokość orbity mierzona po promieniu to mniej niż 1 mm – zatem cała moc cieplna wiązki przechodzi przez 2 mm² powierzchni prostopadłej do toru cząstek. Moc ta może sięgać kilowatów – np. dla 20 μA protonów o energii 45 MeV wynosi 950 W. Wymaga to zarówno intensywnego chłodzenia tarczy, jak i ustawienia tarcz prawie stycznego, pod kątem kilku stopni do toru wiązki, w celu zwiększenia powierzchni odprowadzającej ciepło (rys. 10, rozdz. 3.2).
2. Różne formy aktywowanych materiałów, takie jak proszki czy substancje łatwo topliwe i parujące, mogą prowadzić do zanieczyszczenia radiacyjnego komory akceleracji. Fakt,

że zwykle produkuje się na cyklotronie izotopy krótkożyciowe, zmniejsza problemy wynikające z takiego skażenia.

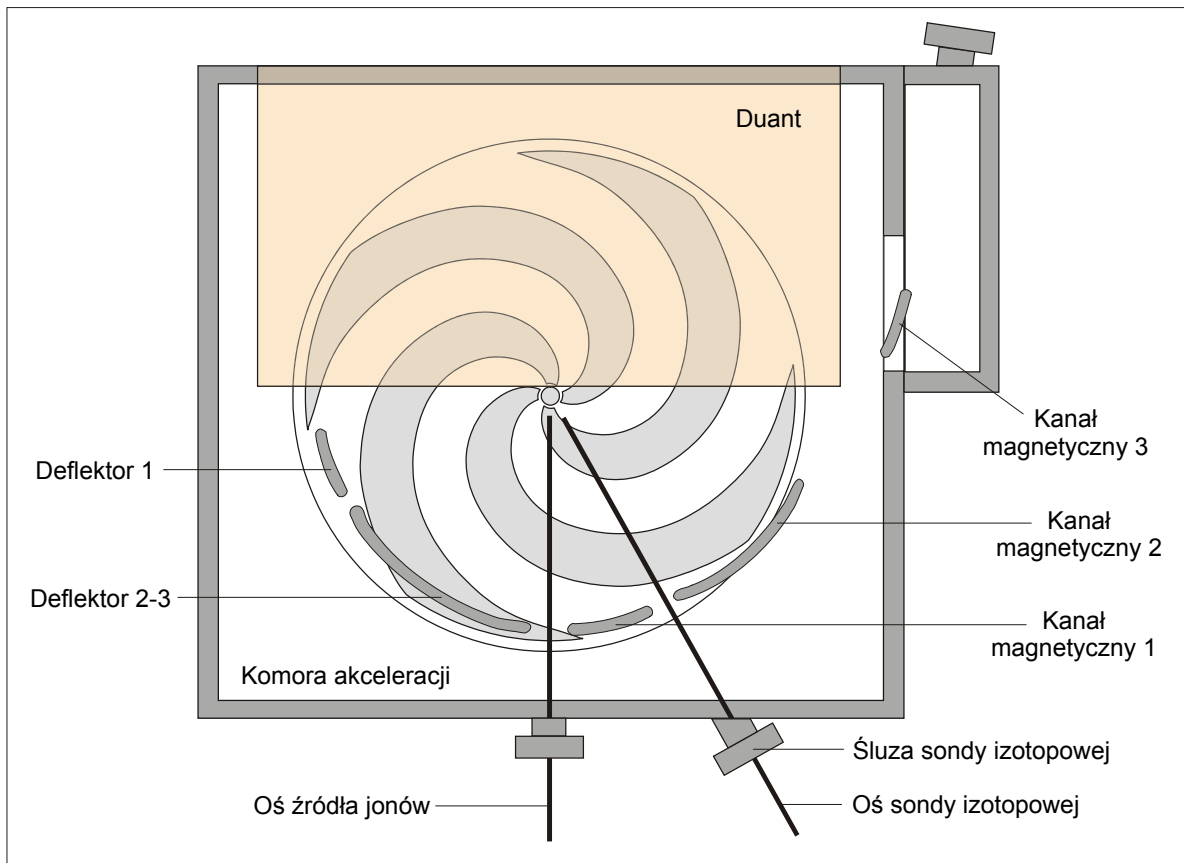
3. Aby zapobiegać możliwościom skażeń wnętrza cyklotronu, aktywowany materiał zabezpiecza się cienką folią aluminiową. Jednakże, nawet cienka, np. 0,05 mm, folia ustawiona pod małym kątem do wiązki (rozdz. 3.3), wprowadza degradację energii, szczególnie dużą przy napromieniowaniach cząstkami α – i trzeba to uwzględnić przy ustalaniu warunków aktywacji.
4. Na skutek spiralności sektorów magnetycznych cyklotronu AIC-144 tor wiązki nie tylko silnie odbiega od okręgu, ale również na różnych promieniach ustawienia sondy izotopowej ma nieco różny kąt w stosunku do promienia akceleracji i kierunku sondy (rys. 7 i 8). Ponieważ aktywowana tarcza ustawiana jest pod kątem kilku stopni do kierunku wiązki, konieczne było obliczenie tego kąta w zależności od promienia i uwzględnienie go przy ustawianiu tarcz do naświetlania (rozdz. 3.3).
5. Drgania radialne orbit akcelerowanej wiązki (rys. 6) prowadzą do skomplikowanej zależności energii cząstek od promienia. Przeprowadzone modelowanie pokazuje, że przy właściwym ustaleniu parametrów początkowych akceleracji (położenie źródła i tzw. pullera) efekt ten nie ma istotnego znaczenia (rozdz. 3.1).
6. Napromienione tarcze są niekiedy bardzo aktywne (moc dawki przekracza 100R/h), a dotychczas ich zdejmowanie odbywa się ręcznie. Powoduje to konieczność odczekania, aż „wystygną” najkrótsze izotopy – a więc i stratę czasu pracy cyklotronu. Nowa sonda z automatyczną ewakuacją tarcz wyeliminuje ten problem.

Problemy powyższe i sposoby ich rozwiązania, rezultaty osiągnięte na istniejącej sondzie izotopowej i krótki opis uruchamianej sondy zautomatyzowanej przedstawione są w niniejszym raporcie.

2. Budowa istniejącej sondy do aktywacji tarcz na wiązce wewnętrznej

Sonda izotopowa umożliwia wprowadzanie różnego rodzaju tarcz do wnętrza komory akceleracji cyklotronu i aktywację tych tarcz na wiązce wewnętrznej.

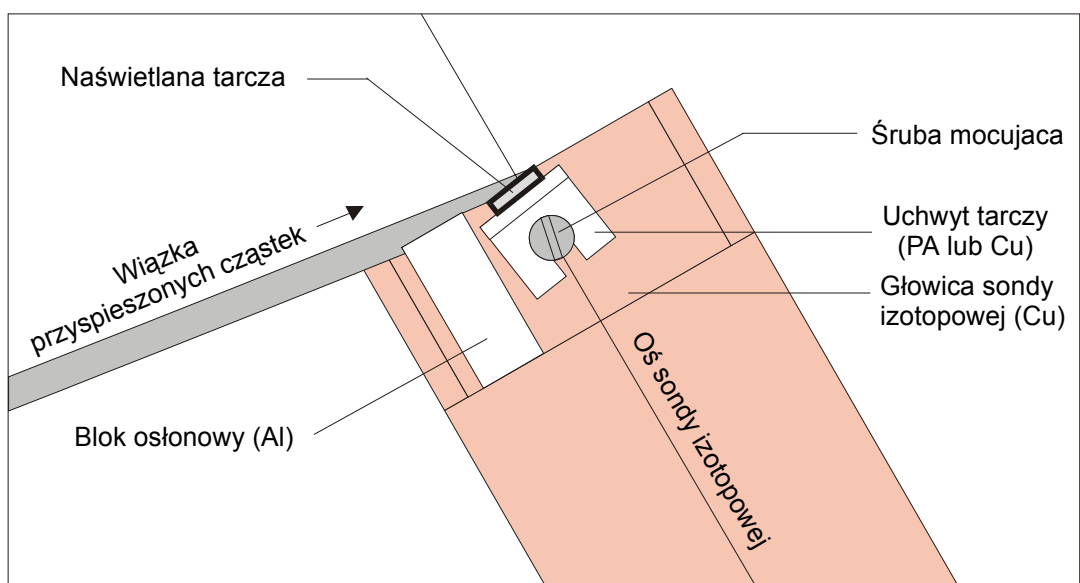
Sonda izotopowa pozwala wprowadzać tarcze na tor orbity przyspieszanych cząstek o promieniach od 5 do 65 cm i porusza się po osi wytyczonej pod kątem 30 stopni względem toru źródła jonów (rys.1). Głowica sondy (rys.3) została wykonana z miedzi i jest chłodzona przepływającą przez nią wodą, która pochłania ciepło dostarczane przez wiązkę jonów o mocy do około 6 kW. Do chłodzenia głowicy stosowana jest woda destylowana pobierana z ogólnej instalacji chłodzącej cyklotronu, przepływ wody jest kontrolowany przez czujnik. Sonda charakteryzuje się znaczną upływnością elektryczną, spowodowaną przewodnością wody, upływność ta jest szczególnie duża podczas pomiarów małych prądów, np. dla prądu 1 μ A wynosi około 40%. Sonda izotopowa jest ręcznie wprowadzana do śluzy w komorze akceleracji. Przesuw głowicy wewnątrz komory jest realizowany za pomocą silnika i kontrolowany na wskaźniku optycznym. Możliwy jest też przesuw głowicy z pulpitu cyklotronu i kontrola położenia przy pomocy kamery przemysłowej.



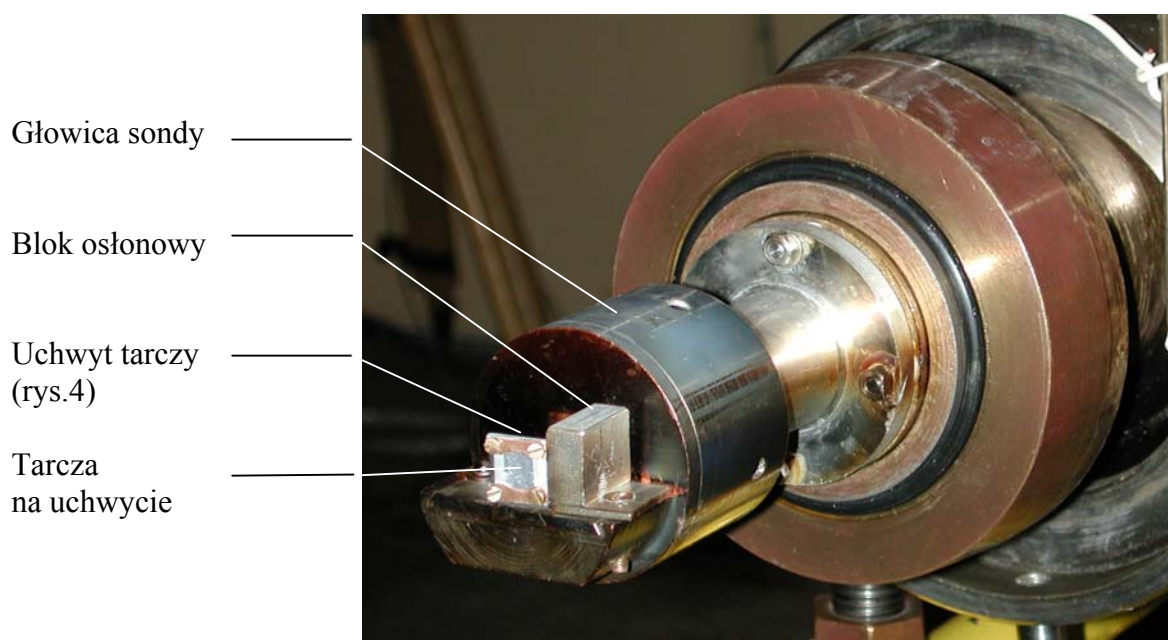
Rys. 1. Usytuowanie sondy izotopowej wewnątrz komory cyklotronu AIC-144

Na czas aktywacji tarcz do głowicy sondy izotopowej mocuje się aluminiowy blok osłonowy (rys.2, 3). Blok ten posiada dobry kontakt termiczny z chłodzoną miedzią głowicą i zabezpiecza głowicę przed dostępem tej części wiązki, która nie została zatrzymana przez aktywowaną tarczę. Izotopy powstałe w napromieniowanym bloku aluminiowym mają krótki okres półrozpadu i dzięki temu krótki jest też czas oczekiwania na spadek radiacji sondy do wartości pozwalającej na ręczną ewakuację naświetlonej tarczy.

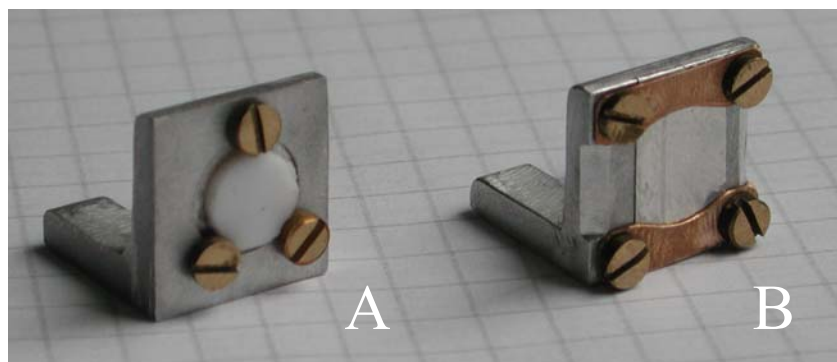
Tarcza jest mocowana na głowicy sondy pomiarowej za pośrednictwem aluminiowego lub miedzianego nośnika tarczy, wykonanego z kątownika o wymiarach około $15 \times 15 \times 3$ mm (rys.2, 3 i 4). Mocowanie tarczy odbywa się przez dokręcenie śruby mocującej, a ewakuacja tarczy przez poluzowanie śruby i zdjęcie (pincetą) tarczy wraz z kątownikiem. W przypadku tarcz proszkowych substancja aktywowana jest osłaniana folią aluminiową. Praca operatorów przy sondzie izotopowej, a zwłaszcza ewakuacja tarcz odbywa się pod nadzorem inspektora ochrony radiologicznej.



Rys. 2. Głowica sondy izotopowej w komorze cyklotronu podczas naświetlania tarczy. Szczegóły konstrukcji.



Rys. 3. Widok głowicy sondy izotopowej z zamocowaną tarczą do naświetlania.



Rys. 4. Widok uchwytów do mocowania tarczy na głowicy sondy izotopowej.

A – uchwyt do mocowania tarcz o stałej konsystencji

B – uchwyt do mocowania tarcz w osłonie z folii
(proszkowych lub podatnych na rozsypanie się)

Aktualnie rozpatrywana jest taka modyfikacja istniejącej sondy izotopowej, by możliwa była ewakuacja naświetlonej tarczy z większej odległości. Możliwa będzie wtedy produkcja izotopów o krótszym okresie półrozpadu, wymagająca szybkiego wyjęcia tarczy.

Oś toru sondy izotopowej przechodzi między kanałami magnetycznymi, i z tego powodu sonda jest wykorzystywana również jako pomiarowa podczas ustalania właściwego położenia tych kanałów (rys.1).

3. Usytuowanie sondy izotopowej w komorze cyklotronu

3.1. Zależność energii od promienia

Zadanie polega na znalezieniu wewnątrz komory cyklotronu miejsca, w którym energia przyspieszanych cząstek osiąga żądaną wartość. W pierwszym przybliżeniu cząstki poruszają się po orbitach kołowych i ich energia, przy określonych parametrach pracy zależy od promienia R orbit wg prostego wzoru:

$$E = m \cdot v^2 / 2 = 2 \pi^2 \cdot f^2 \cdot R^2$$

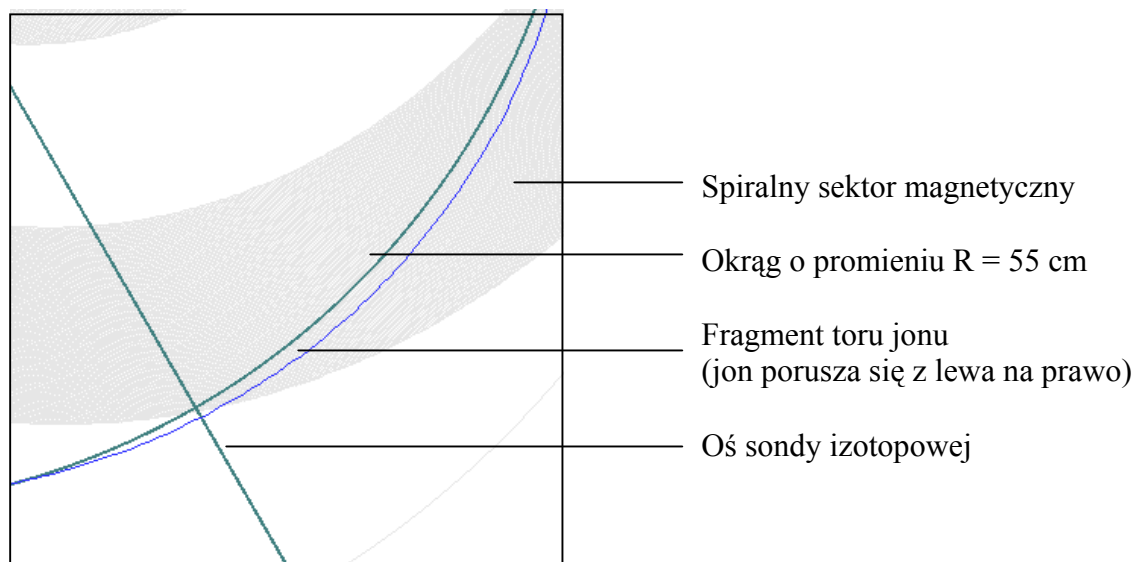
gdzie v - prędkość cząstki, m – masa cząstki, f – częstotliwość obiegu cząstki ustalona przez generator cyklotronu, R – promień orbity toru cząstki.

W rzeczywistości cząstki poruszają się po liniach wytyczonych przez niejednorodne pole magnetyczne (na rys.5 przedstawiono fragment toru cząstki). Widoczny jest wpływ spiral magnetycznych na tor wiązki. W otoczeniu spiral wzrasta wartość indukcji pola magnetycznego i w konsekwencji wzrasta krzywizna toru cząstki, natomiast między spiralami krzywizna maleje. Wskutek powyższego tor cząstki przyjmuje kształt pośredni między okręgiem a wielokątem o kształcie zależnym od liczby spiral magnetycznych.

Innym zjawiskiem wpływającym na kształt toru przyspieszanych cząstek są drgania radialne cząstek w płaszczyźnie akceleracji (poziomej), jest ono widoczne na rys.6. Dokładniejsze obliczenia zależności energii cząstki od promienia R, przedstawiono na rys.7 i 8. Widoczne pofałdowania krzywej energii i kąta toru cząstki są wynikiem wspomnianych

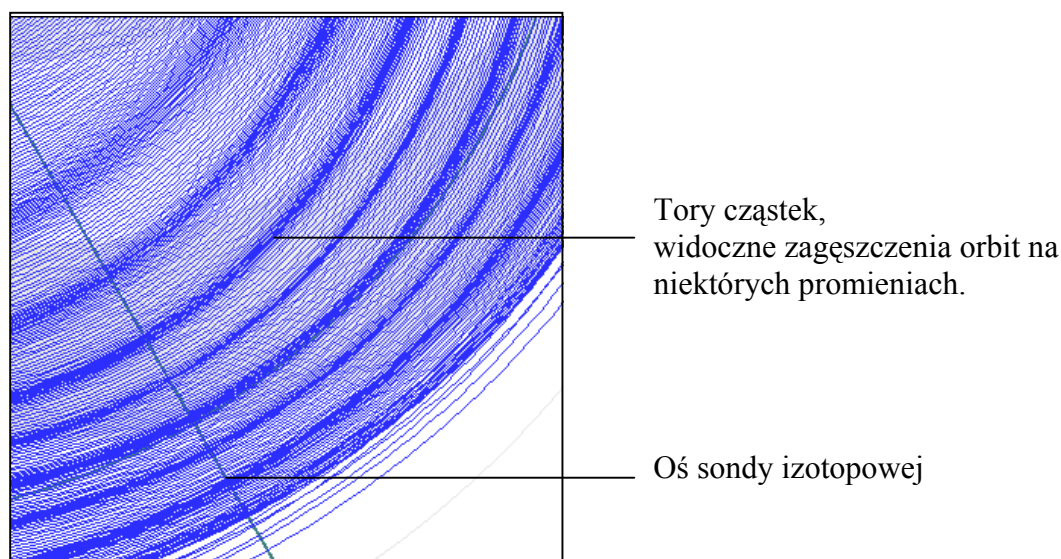
wcześniej drgań radialnych. Na rys.9. pokazano analogiczne przebiegi, przy występowaniu znacznie większych drgań spowodowanych niewłaściwym umiejscowieniem źródła jonów wewnątrz komory. Wynika stąd wniosek, iż sprawowanie kontroli nad energią na wybranym promieniu R wymaga minimalizacji drgań radialnych przyspieszanych cząstek.

Obliczenia wykonano przy pomocy programu AIC_tor3 napisanego w Pracowni Cyklotronowej.

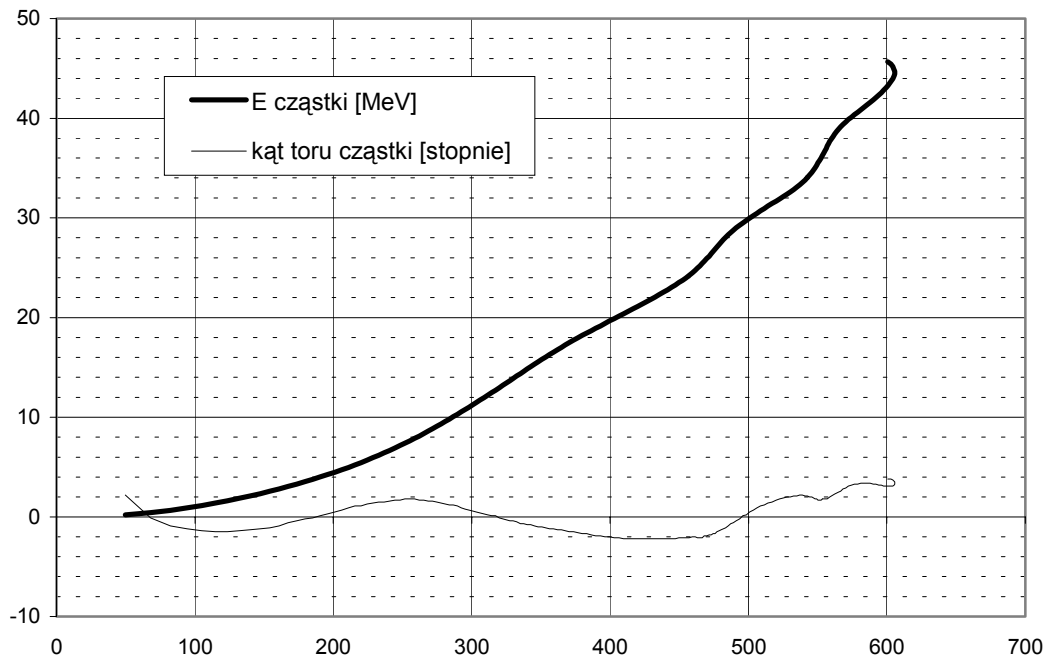


Rys. 5. Fragment toru protonu wewnątrz komory cyklotronu.

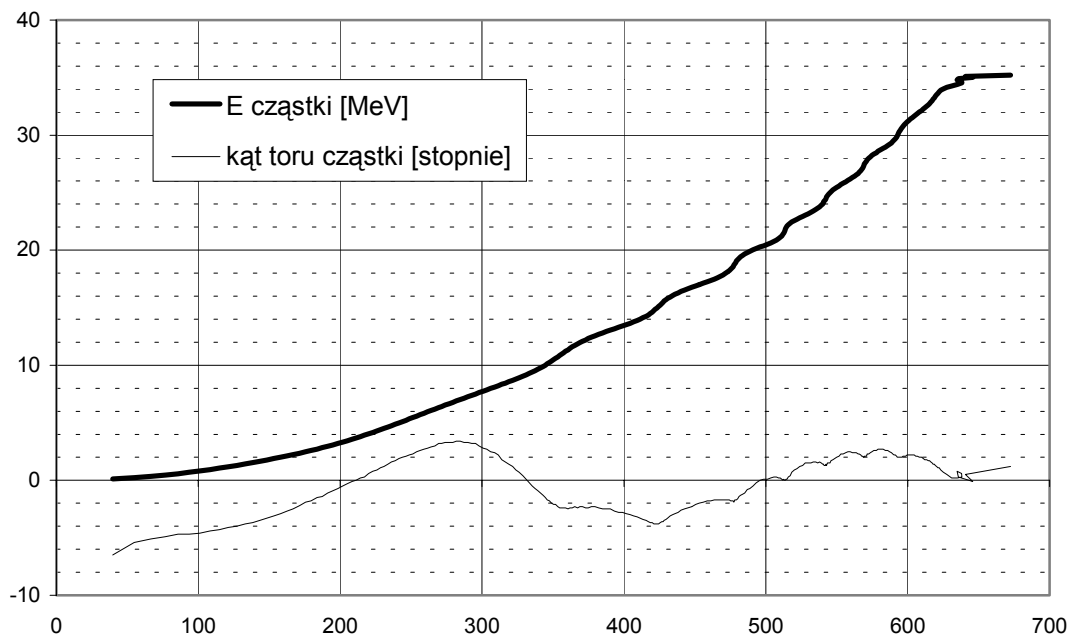
Główne parametry: Energia 35 MeV; częstotliwość generatora w. cz. 20 MHz; prąd uzwojenia głównego 169,2 A; położenie źródła $x = 11$ mm, $y = -8$ mm. Na rysunku jest widoczny fragment komory równy 40×40 cm.



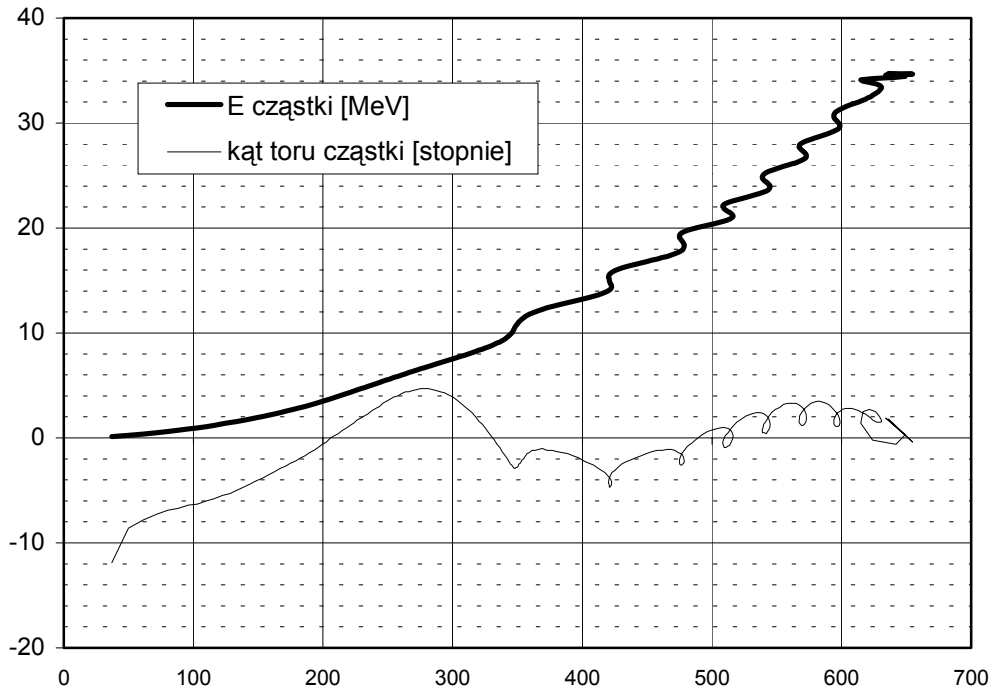
Rys. 6. Fragment toru protonu wewnątrz komory cyklotronu. Parametry takie jak na rys.5.



Rys. 7. Energia cząstek alfa oraz kąt toru cząstek na poszczególnych promieniach R podczas akceleracji. Kąt określono względem stycznej do okręgu o promieniu R. Kąt i energia były liczone wzdłuż osi sondy pomiarowej. Główne parametry: Energia 48 MeV; częstotliwość generatora w. cz. 12,09 MHz; prąd uzwojenia głównego – 286 A; położenie źródła $x = 18$ mm, $y = -9$ mm.



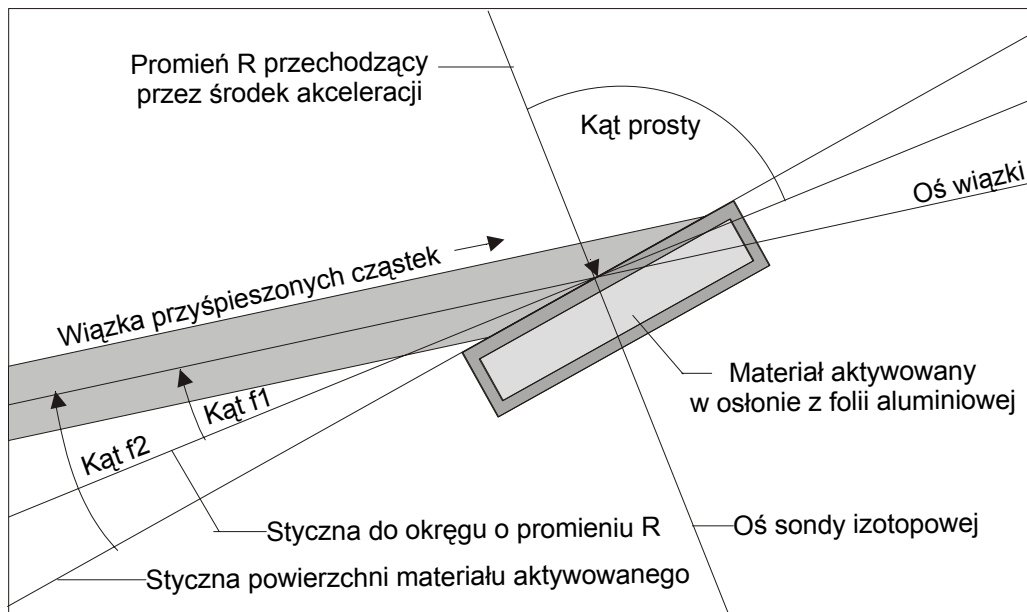
Rys. 8. Energia protonu oraz kąt toru protonu na poszczególnych promieniach R podczas akceleracji. Kąt określono względem stycznej do okręgu o promieniu R. Kąt i energia były obliczane wzdłuż osi sondy pomiarowej. Główne parametry: Energia 35 MeV; częstotliwość generatora w. cz. 20 MHz; prąd uzwojenia głównego – 169,2 A; położenie źródła $x = 11$ mm, $y = -8$ mm.



Rys. 9. Energia protonu oraz kąt toru protonu na poszczególnych promieniach R podczas akceleracji. Parametry jak na rys.8, z wyjątkiem usytuowania źródła jonów, $x = 5$ mm, $y = -8$ mm (usytuowanie nieoptymalne).

3.2. Kąt padania wiązki na tarczę – zależność od promienia

Płaski nośnik z materiałem aktywowanym umieszcza się w komorze akceleracji, pod małym kątem w stosunku do toru wiązki przyspieszanych cząstek. Kąt pod którym montujemy nośnik na sondzie izotopowej jest różnicą między żądanym kątem f_2 , pod którym mamy napromieniać materiał a obliczonym kątem f_1 toru cząstki. Na rys.10 przedstawiono schematycznie wspomniane kąty, natomiast na rys.7, 8 i 9 pokazano obliczenia kąta f_1 przy akceleracji protonów i cząstek alfa dla przykładowych parametrów.



Rys. 10. Usytuowanie aktywowanego materiału wewnątrz komory cyklotronu (widok z góry, prostopadły do płaszczyzny akceleracji). Widoczne kąty: f_1 – toru cząstek względem stycznej do okręgu, w miejscu przecięcia z torem sondy izotopowej oraz f_2 – między wiązką, a powierzchnią materiału aktywowanego.

3.3. Degradacja energii przez osłonę folią tarczy

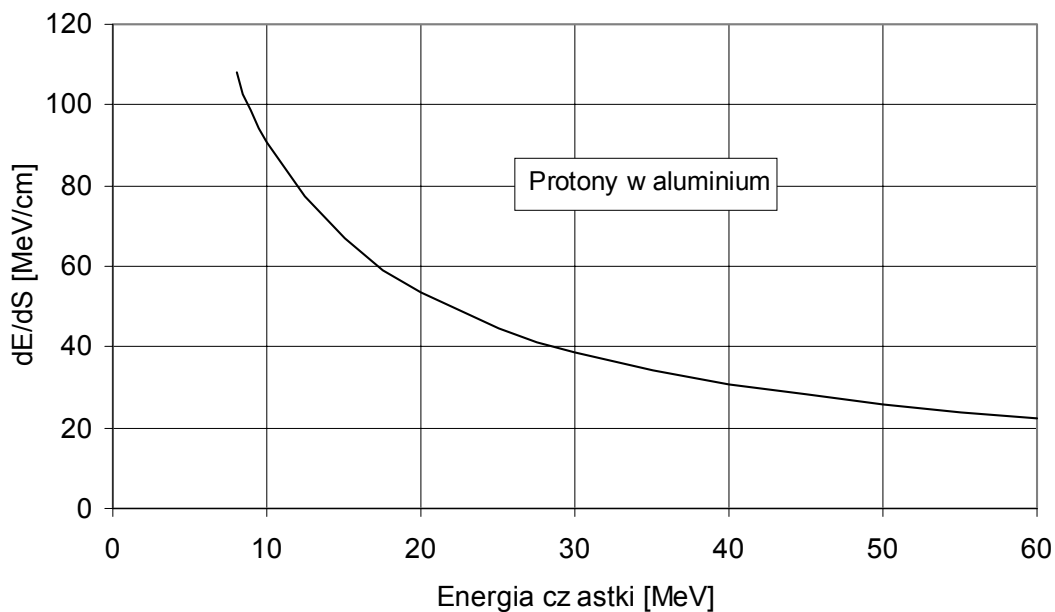
Oslonięcie materiału aktywowanego folią aluminiową zabezpiecza cyklotron przed skutkami rozsypania się materiału wewnątrz komory cyklotronu. Użycie osłony powoduje jednak spowolnienie cząstek przenikających przez folię, a w konsekwencji zmniejszenie energii cząstek padających na aktywowany materiał. Stratę energii można obliczyć z zależności:

$$\Delta E = (dE/ds) \Delta l$$

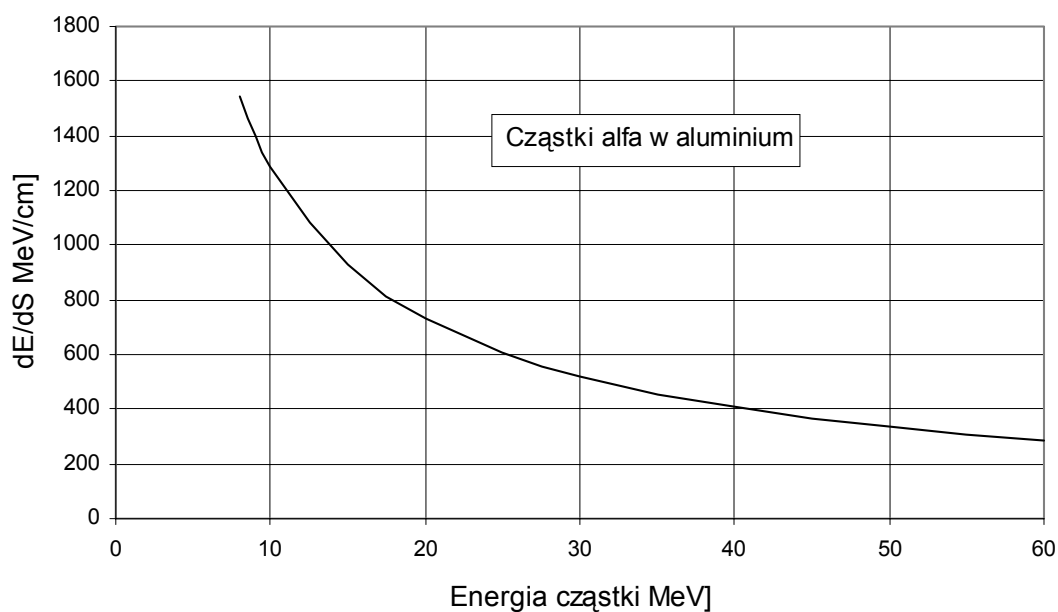
gdzie s – jest zasięgiem cząstki, E – energią cząstki, dla której zasięg wynosi s , dE/ds – jest zmniejszeniem energii cząstki przechodzącej przez cienką folię o grubości ds , Δl jest długością drogi cząstki wewnątrz folii i jest ona równa $g/\sin(f_2)$, przy czym g – grubość folii, f_2 – kąt padania wiązki na folię.

Straty energii cząstek alfa i protonów dE/ds przy przenikaniu przez folię aluminiową przedstawiono na rys.11 i 12. Straty energii obliczono na podstawie tabel zależności zasięgu cząstek od ich energii, publikowanych przez National Institute of Standards and Technology [1].

Folia stosowana w praktyce ma grubość około 0,05 mm, co przy małych kątach padania powoduje znaczne zmniejszenie energii cząstek. Przykładowo, dla protonów o energii 35 MeV, strata ΔE po przejściu przez folię pod kątem $f_2 = 3$ stopnie wynosi 3,3 MeV, a więc około 10%. Dla cząstek alfa straty energii są jeszcze większe. Wynika stąd konieczność uwzględniania straty ΔE przy doborze promienia orbity dla planowanej reakcji jądrowej.



Rys. 11. Strata energii przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową, na jednostkę jej grubości, dla cząstek będących protonami. Opracowano na podstawie danych publikowanych przez National Institute of Standards and Technology [1].



Rys. 12. Strata energii przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową, na jednostkę jej grubości, dla cząstek alfa. Opracowano na podstawie danych publikowanych przez National Institute of Standards and Technology [1].

4. Nowa sonda izotopowa

4.1. Założenia konstrukcyjne

Nową sondę zaprojektowano w celu zwiększenia wydajności wytwarzania izotopów promieniotwórczych. Aby móc korzystać z wiązek o najwyższej intensywności dostępnej na tym cyklotronie, udoskonalono układ chłodzenia tarczy. Aby uniknąć zwiększenia zagrożenia radiacyjnego wynikającego ze zwiększonej mocy produkcyjnej, w projekcie starano się ograniczyć do minimum konieczność pracy ręcznej, zwłaszcza konieczność manipulacji z aktywną tarczą bezpośrednio po jej napromienianiu. Podstawowe zespoły konstrukcyjne nowej sondy, opisane we wcześniejszych Raportach IFJ [3, 4], to:

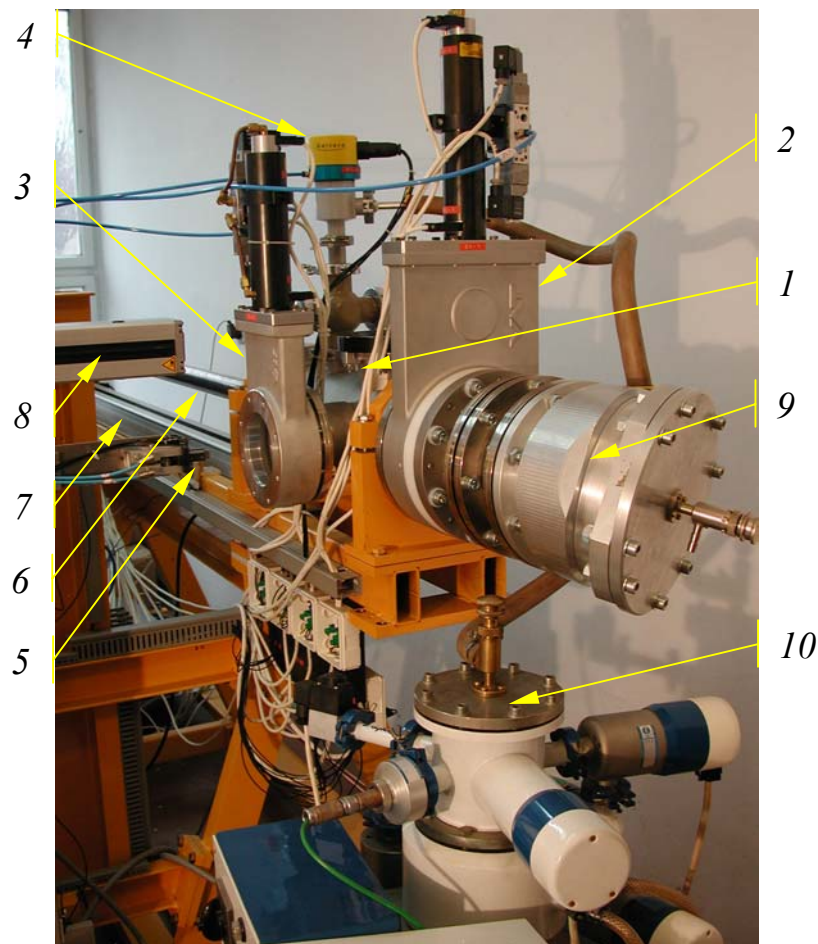
1. Zespół komory próżni wstępnej
2. Zespół napędów liniowych x, y, z
3. Głowica sondy
4. Zespół chwytaków tarczy
5. Zespół transportu aktywnej tarczy

Uruchamiane obecnie urządzenie prototypowe różni się od projektu opisanego w Raportach [3] i [4] następującymi szczegółami:

1. Zespół komory próżni wstępnej został wyposażony dodatkowo w ręczny zasuwowy zawór próżniowy. W normalnych warunkach pracy zawór ten jest stale otwarty, natomiast w razie konieczności odłączenia od cyklotronu całego zespołu sondy (np. na czas remontu) jest on zamykany.
2. Część czołowa głowicy chłodzona od tyłu wodą jest wykonana z aluminium, a nie z miedzi, co zmniejsza ryzyko aktywacji tego elementu pod wpływem napromieniania. Inaczej niż planowano pierwotnie, część ta jest na stałe mocowana do zakończeń rur z wodą chłodzącą. Wewnątrz bloku aluminiowego jest nawiercony kanał, w którym umieszczono czujnik temperatury. Częściami wymiennymi w tym zespole są cienkie płaskie podkładki miedziane, będące nośnikami materiału tarczowego. Na czas aktywacji podkładka jest dociskana do części aluminiowej przez szczęki siłownika.
3. Pierwotnie planowany zespół automatycznego transportu tarcz nie został dotąd zrealizowany.
4. W uruchamianym obecnie urządzeniu prototypowym nie osiągnięto pełnej automatyzacji. Cykl aktywacji, od założenia tarczy do jej zrzutu, jest nadzorowany przez sterowniki oprogramowane zgodnie z zadaniami eksploatacyjnymi. Ręczne czynności operatorskie będą jednak konieczne przy zakładaniu świeżej tarczy w szczęki chwytaka podawczego, a także przy odebraniu aktywnej tarczy w pojemniku osłonowym.

4.2. Porównanie nowej i starej sondy izotopowej

Radialna część nowej sondy izotopowej jest umieszczona pod tym samym kątem, co poprzednia, i pozwala na wybór promienia akceleracji od 20 do 65 cm. Kąt padania wiązki na płaską część tarczy jest stały. Metalowa głowica tarczy jest odizolowana galwanicznie od reszty układu. Woda chłodząca jest doprowadzona rurami z tworzywa sztucznego. Obecnie jest możliwy dokładny pomiar temperatury tarczy. Do tarczy doprowadzony jest również przewód umożliwiający pomiar prądu wiązki, ale nie są zainstalowane urządzenia peryferyjne do tego pomiaru.



Rys. 13. Nowa sonda izotopowa – widok ogólny na stanowisku montażowym.

Objaśnienia: 1 – komora załadunku tarczy, 2 – zawór zasuwowy główny (oddziela komorę akceleracji od komory załadowczej), 3 – zawór zasuwowy boczny (oddziela komorę załadowczą od otoczenia), 4 – zawór odpowietrzający, 5 – chwytak podawczo-odbiorczy do tarcz, 6 – rura nośna tarczy, przewodów pomiarowych i chłodzenia, 7 – liniał radialnego przesuwu tarczy 8 – liniał poziomego przesuwu chwytaka podawczo-odbiorczego, 9 – kołnierz łączący sondę izotopową z komorą akceleracji, 10 – pompa próżniowa (połączona tymczasowo z komorą załadowczą).

Miedziana podkładka z tarczą (nośnik) jest zakładana ręcznie do szczęk chwytaka podawczo-odbiorczego, po czym automatycznie są wykonywane następujące czynności: poziomy transport tarczy do komory próżni wstępnej, przechwycenie tarczy przez siłownik główny, dociśnięcie tarczy do chłodnicy, wycofanie chwytaka podawczo-odbiorczego, zamknięcie bocznego zaworu zasuwowego, odpompowanie komory próżni wstępnej, otwarcie zaworu zasuwowego łączącego komorę próżni wstępnej z komorą akceleracji, ustawienie tarczy na żądanym promieniu akceleracji.

Po zakończeniu napromieniania tarcza jest wycofywana z komory akceleracji do położenia w centrum komory próżni wstępnej, zamyka się zawór oddzielający komorę próżni wstępnej od komory akceleracji, komora próżni wstępnej jest zapowietrzana do ciśnienia

atmosferycznego, otwiera się boczny zawór zasuwowy, przez który wprowadzany jest chwytak podawczo-odbiorczy, zwalnia się docisk głównego siłownika, chwytak przejmuje tarczę i wycofuje się z nią poziomo, a następnie przesuwa się w dół do poziomu pojemnika transportowego. Po zwolnieniu szczęk chwytaka tarcza jest wprowadzana do pojemnika transportowego, który już może być przewożony ręcznie. Po zakończeniu opisanego cyklu urządzenie jest gotowe do przyjęcia nowej tarczy.

Siłownik dociskający tarczę do chłodnicy, chwytak oraz wszystkie zawory próżniowe są obsługiwane elektropneumatycznie. Ruch radialny oraz dwa pozostałe prostopadłe kierunki ruchu tarczy odbywają się za pośrednictwem napędów liniowych z silnikami krokowymi. Wszystkie stany urządzeń: kolejne położenia tarczy, ruchy silników krokowych, stany wszystkich zaworów, przepływ wody, ciśnienie gazów, temperatura, są kontrolowane z pulpitu sterowniczego. Układ automatyki zbudowano na bazie sterowników przemysłowych firmy OMRON.

5. Zakończenie

W chwili obecnej (koniec roku 2003) zostały zakończone próby działania nowej sondy izotopowej na stanowisku montażowym. W trakcie prób sprawdzono tryb pracy każdego podzespołu z osobna, tryb pracy automatycznej oraz reakcję systemu sterowania na szereg stanów awaryjnych. Próby wypadły pomyślnie i nowa sonda zostanie wkrótce przeniesiona na stanowisko robocze przy cyklotronie AIC-144.

6. Dodatek

Lista izotopów promieniotwórczych otrzymanych w cyklotronie AIC-144 w latach 2000-2003

Poniżej przedstawiono listę izotopów otrzymanych w cyklotronie AIC-144 od początku roku 2000 do 14 listopada 2003. Podano charakterystyki otrzymanych izotopów, tematykę prowadzonych badań oraz liczbę aktywacji dla poszczególnych eksperymentów.

Nuklid	$t_{1/2}$	Rozpad	Reakcja jądrowa	Cel aktywacji i zespoły prowadzące badania	Aktywacji
^{11}C	20,38 min	β^+	$^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$	Aktywacyjne oznaczanie ^{11}B w materiałach implantowanych jonowo – NZIXA i Zakład II IFJ .	2
^{48}V	15,98 d	β^+	$^{\text{nat}}\text{Ti}(p,xn)^{48}\text{V}$	Badanie potencjalnych źródeł do brachyterapii śródnaczyniowej – NZIXA i SPOpP, WFiTJ AGH.	1
				Badanie potencjalnych źródeł do kalibracji kamer PET lub 511 KeV SPECT – NZIXA i CMUJ.	1
				Badania próbek TiO_2 – Zakład II IFJ.	1
^{56}Co	77,7 d	EC, β^+	$^{\text{nat}}\text{Ni}(p, X)^{56,57}\text{Co}$	Testowanie krzemowych detektorów paskowych – Zakład II IFJ.	1
^{57}Co	271,8 d	EC	$X=\alpha, 2p$ i in.		
^{62}Zn	9,26 h	β^+	$^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$	Spektroskopia anihilacji pozytonów – Zakład II IFJ.	1
^{62}Cu	9,7 min	β^+	$^{62}\text{Zn}(\beta^+)\rightarrow^{62}\text{Cu}$		
^{67}Ga	78,3 h	EC	$^{\text{nat}}\text{Zn}(p,xn)^{67}\text{Ga}$	Badanie jakości [^{67}Ga] cytrynianu galu (docelowo: medycyna nuklearna) – NZIXA	1
				Badanie własności nowych żelazocyjankowych sorbentów kompozytowych – NZIXC	1
^{67}Ga , ^{69}Ge	78,3 h 39 h	EC β^+	$\text{Zn}(\alpha,xn)^{67}\text{Ga}, ^{69}\text{Ge}$	Wzorzec wewnętrzny ^{69}Ge do badań rozdzielania pary As-Ge – NZIXA; Badanie własności nowych żelazocyjankowych sorbentów kompozytowych – NZIXC	3
^{73}As	80,3d	EC	$^{69}\text{Ga}(\alpha,2n)^{73}\text{As}$	Opracowanie metody otrzymywania i wydzielania ^{73}As , preparatyka znacznika do badań toksykologicznych – Zakład IX IFJ, do współpracy z laboratorium oceanograficznym MAEA, Monaco.	7
^{74}As	17,78 d	β^-, β^+	$^{71}\text{Ga}(\alpha,n)^{74}\text{As}$		
			$^{\text{nat}}\text{Ge}(p,xn)^{73-75}\text{As}$		

Izotopy promieniotwórcze otrzymane w IFJ w latach 2000-2003 (c.d.).

Nuklid	$t_{1/2}$	Rozpad	Reakcja jądrowa	Cel aktywacji i zespoły prowadzące badania	Aktywacji
^{82}Sr	25,5 d	EC	$^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$	Opracowanie generatora $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ – NZIXA, współpraca z IChTJ	2
^{83}Rb ^{83}Sr ^{85}Sr	86,2 d 32,3 h 64,84 d	EC EC, β^+ β^+	$^{85}\text{Rb}(p,3n)^{83}\text{Sr}$ $^{83}\text{Sr}(\beta^+) \rightarrow ^{83}\text{Rb}$ $^{87}\text{Rb}(p,3n)^{85}\text{Sr}$	Opracowanie metody rozdzielania pary Rb/Sr i otrzymywania wzorca wewnętrznego do radiochemicznych procedur oznaczania ^{90}Sr – Zakład IX IFJ, współpraca z Politechniką w Budapeszcie.	4
^{99}Rh	16 d	EC, β^+	$^{\text{nat}}\text{Ru}(p,xn)^{99-102}\text{Rh}$	Badania $\text{Gd}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, RuO_2 , $\text{Y}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$, SrRuO_3 – IF UJ. Spektroskopia efektu Mössbauera – Zakład II IFJ.	4 11
^{103}Ru	39,35 d	β^-	$^{100}\text{Mo}(\alpha,n)^{103}\text{Ru}$	Homolog pierwiastka Hs(108)? – NZIXC	2
^{111}In	2,807 d	EC	$^{\text{nat}}\text{Cd}(p,xn)^{111}\text{In}$ $^{109}\text{Ag}(\alpha,2n)^{111}\text{In}$	Badania ciała stałego metodą zaburzonych korelacji kątowych (PAC) – Zakład II IFJ, 1 grupa badawcza. Badania ciała stałego metodą zaburzonych korelacji kątowych (PAC) – Zakład II IFJ (2 grupy badawcze) i IF UJ (1 grupa, m.in. tarcze: PrAg_6In_6 , LaAg_6In_6 , NdAg_6In_6 , ZrAg).	5 12
^{173}Hf ^{175}Hf	23,6 h 70 d	EC EC	$^{\text{nat}}\text{Yb}(\alpha,xn)^{173,175}\text{Hf}$	Źródło modelowe do badań superciężkich pierwiastków – NZIXC.	1
^{181}W ^{181}W	21,5 d 121,2 d	EC EC	$^{\text{nat}}\text{Ta}(p,xn)^{178,181}\text{W}$	Źródło modelowe do badań superciężkich pierwiastków – NZIXC.	2
$^{197\text{m}}\text{Hg}$ $^{197\text{s}}\text{Hg}$	23,8 h 64,1 h	EC EC	$^{197}\text{Au}(p,n)^{197}\text{Hg}$	Homolog hipotetycznego pierwiastka (112) – NZIXC	1
^{204}Bi	11,22 h	β^+	$^{206}\text{Pb}(p,3n)^{204}\text{Bi}$	Spektroskopia anihilacji pozytonów – Zakład II IFJ.	1
^{207}Bi	33 a	EC, β^+	$^{207}\text{Pb}(p,n)^{207}\text{Bi}$	Spektroskopia anihilacji pozytonów – Zakład II IFJ.	1

Izotopy promieniotwórcze otrzymane w IFJ w latach 2000-2003 (koniec).

Nuklid	$t_{1/2}$	Rozpad	Reakcja jądrowa	Cel aktywacji i zespoły prowadzące badania	Aktywacji
^{207}Po	5,8 h	α	$^{209}\text{Bi}(p,3n)^{207}\text{Po}$	Potencjalne wzorce wewnętrzne do radiochemicznych procedur oznaczania polonu w środowisku naturalnym – Zakład IX IFJ.	6
^{208}Po	2,9 a	α , EC	$^{209}\text{Bi}(p,2n)^{208}\text{Po}$		
^{209}Po	102 a	α , EC	$^{209}\text{Bi}(p,n)^{209}\text{Po}$		
^{210}At	8,3 h	α	$^{209}\text{Bi}(\alpha,3n)^{210}\text{At}$	Chemia At – NZIXA	1
^{211}At	7,2 h	α	$^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)^{211}\text{At}$	Doskonalenie lub opracowywanie metod: wydzielania ^{211}At z tarczy metalicznej, otrzymywania cienkich źródeł α , syntezy radiofarmaceutyków At – NZIXA i współpraca z IChTJ.	10
^{235}Np	396 d	EC, α	$^{235}\text{U}(p,n)^{235}\text{Np}$	Opracowanie metody otrzymywania i wydzielania neptunu oraz preparatyki źródeł wzorcowych do oznaczania neptunu w środowisku – Zakład IX IFJ (tarcza z naturalnego uranu)	3
^{236m}Np	EC, β^-	22,5 h	$^{238}\text{U}(p,3n)^{236}\text{Np}$	Opracowanie metody otrzymywania i wydzielania neptunu – NZIXA, NZIXB	1
^{236g}Np	EC, β^-	10^5 a			

Objaśnienia skrótów:

AGH	– Akademia Górniczo-Hutnicza im. St.Staszica w Krakowie
CMUJ	– Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego
IAEA	– Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej
IChTJ	– Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie
IF UJ	– Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego
IFJ	– Instytut Fizyki Jądrowej im. H.Niewodniczańskiego, Polskiej Akademii Nauk, w Krakowie
NZIXC	– Pracownia Chemii i Radiochemii, Zakład IX IFJ
NZIXB	– Pracownia Badań Skazań Promieniotwórczych Środowiska, Zakład IX IFJ
NZIXA	– Pracownia Fizykochemii Procesów Rozdzielczych, Zakład IX IFJ
SPOpP	– Samodzielna Pracownia Ochrony przed Promieniowaniem IFJ
WFiTJ	– Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej
ZIBJ	– Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych
PET	– Pozytonowa Tomografia Emisyjna
511 KeV SPECT	– Tomografia Pojedynczych Fotonów o energii 511 keV

Bibliografia

- [1] National Institute of Standards and Technology, Gaithersborg, USA
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html> oraz
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html> ICRU (1993) International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 49, Stopping Power Ranges for Protons and Alpha Particles.
- [2] Edmund Bakewicz, Andrzej Budzanowski, Ryszard Taraszkiewicz. AIC-144 cyclotron: present status, Nukleonika 2003 nr 48(Suplement 2) str.117 – 121
- [3] B. Petelenz, B.N. Gikał, R. Misiak, E. Ochab, M. Szałkowski, J. Halik, L. Źródłowski, J. Ligocki, J. Kotuła. Stanowisko do aktywacji tarcz metalicznych na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144. Część I. Założenia eksploatacyjne i projekt wstępny. Raport IFJ Nr 1783/C, Kraków, 1997.
- [4] B. Petelenz, E. Bakewicz, R. Misiak, E. Ochab, M. Szałkowski, J. Halik, L. Źródłowski, J. Ligocki, J. Kotuła. Stanowisko do aktywacji tarcz metalicznych na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144. Część II. Projekt mechaniczny stanowiska - etap I. Raport IFJ Nr 1813/C, Kraków, 1998.