



PL9801689

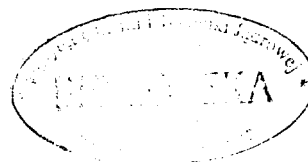


Instytut Fizyki Jagiellońskiej, im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie

RAPORT Nr 1740/C

**Założenia użytkowe do projektu
stanowiska do aktywacji tarcz w stanie stałym
na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144**

Barbara Petelenz



Adresy:

29 - 29

Siedziba główna:
ul. Radzikowskiego 152,
31-342 Kraków.
e-mail: dyrektor@bron.ifj.edu.pl

Zakład Wysokich Energii:
ul. Kawiorów 26 A,
30-055 Kraków.
e-mail: hepsec@chopin.ifj.edu.pl

R

RAPORT Nr 1740/C

**Założenia użytkowe do projektu
stanowiska do aktywacji tarcz w stanie stałym
na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144**

Barbara Petelenz

Kraków, wrzesień 1996

**WYDANO NAKŁADEM
INSTYTUTU FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
KRAKÓW, UL. RADZIKOWSKIEGO 152**

Kopię kserograficzną wykonano w IFJ Kraków

Założenia użytkowe do projektu stanowiska do aktywacji tarcz w stanie stałym na wiązce wewnętrznej cyklotronu AIC-144

Wstęp

Zbudowany w IFJ cyklotron AIC-144 został w roku 1996 przeniesiony ze stanowiska konstrukcyjnego na stanowisko robocze. Obecnie trwają prace nad wysokoefektywnym wyprowadzeniem wiązek protonów i deuteronów dla powstającego przy IFJ Centrum Terapii Hadronowej.

Przewiduje się, że poza okresami pracy dla celów terapeutycznych, cyklotron AIC-144 będzie wykorzystywany do produkcji izotopów, zwłaszcza izotopów stosowanych w diagnostyce medycznej in vivo.

Zakłada się, że większość izotopów będzie wytwarzana na wiązce wewnętrznej, co pozwoli na bardziej efektywne wykorzystanie intensywności wiązki cząstek naładowanych.

Urządzenie do otrzymywania izotopów na wiązce wewnętrznej, zwane dalej stanowiskiem do naświetlań lub próbnikiem, powinno zostać zaprojektowane zgodnie z założeniami podanymi poniżej.

Schematy i skrócone objaśnienia niektórych rozwiązań technicznych opisanych w literaturze zamieszczono w Dodatku. Opracowany w IFJ projekt stanowiska do naświetlania metalicznych tarcz stałych na wiązce wyprowadzonej znajduje się w archiwum Biura Konstrukcyjnego IFJ.

Elementy konstrukcyjne stanowiska do naświetlań

Głównymi elementami konstrukcyjnymi każdego stanowiska do naświetlań są [a]:

- 1) materiał tarczowy wraz z podkładką;
- 2) uchwyt oraz izolowana elektrycznie puszka Faradaya do pomiaru intensywności wiązki;
- 3) układ chłodzenia dla tarczy i puszki Faradaya, zapewniający skuteczne odprowadzenie ciepła.

Zasadą ogólnie obowiązującą przy projektowaniu i konstrukcji stanowisk do naświetlań jest dążenie do ich maksymalnej prostoty oraz wytrzymałości w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa awarii [c].

Stanowiska do naświetlań różnią się rozwiązaniami technicznymi zależnie od tego, czy są one przeznaczone do pracy na wiązce wewnętrznej czy wyprowadzonej oraz od tego, czy materiał tarczowy jest w stanie stałym, ciekłym czy gazowym. W niniejszym opracowaniu będą podane założenia dla stanowiska do naświetlania tarcz w stałym stanie skupienia (ang.: solid target system [a]), na wiązce wewnętrznej cyklotronu.

Najważniejszym parametrem, który należy brać pod uwagę przy projektowaniu jest wytrzymałość stanowiska do naświetlań na wysokie prądy wiązki, czyli efektywność chłodzenia tarczy przy zadanej wartości prądu wiązki. Efektywność ta zależy od doboru materiałów konstrukcyjnych, materiału i geometrii tarczy wraz z podkładką oraz od geometrii i szybkości przepływu wody, ewentualnie innych substancji chłodzących.

Nowoczesne stanowisko do naświetlań powinno być w maksymalnym możliwym stopniu zautomatyzowane, co wynika z konieczności ochrony personelu przed promieniowaniem jonizującym (ręczne manipulowanie naświetloną tarczą o wysokiej aktywności jest niedopuszczalne). Niezależnie od automatyzacji, może być konieczne zaprojektowanie osłon biologicznych wokół stanowiska.

Planowany asortyment wytwarzanych nuklidów

Konstrukcja stanowiska do naświetlań zależy od rodzaju materiałów tarczowych, a te z kolei zależą od tego, jakie izotopy mają być wytwarzane. Na cyklotronie AIC-144 w pierwszej kolejności mają być wytwarzane izotopy używane w diagnostyce medycznej do tzw. tomografii emisyjnej, a mianowicie ^{67}Ga , ^{111}In i ^{201}Tl . Spośród radionuklidów o niemedycznym przeznaczeniu przewiduje się wytwarzanie ^{139}Ce , i zapewne ^{86}Y . Wszystkie wspomniane nuklidy mają charakter metaliczny, a otrzymuje się je z tarcz w stanie stałym, metalicznych, lub tlenkowych.

Inne izotopy będą wytwarzane na AIC-144 zależnie od bieżących potrzeb użytkowników oraz od możliwości rozbudowy pracowni chemicznych w IFJ. Ze względu na możliwość zastosowań medycznych będą to najprawdopodobniej izotopy ^{123}I i ^{211}At . Można je wytwarzać z tarcz tlenkowych w stanie stałym, ale przy projektowaniu stanowiska do naświetlań należy uwzględnić konieczność zabezpieczenia próżni cyklotronu przed ulatnianiem się produktów z tarczy.

System zabezpieczeń przed powstawaniem lotnych produktów w tarczy stałej (ze stopionego tlenku), stosowany przy otrzymywaniu ^{123}I na wiązce wyprowadzonej cyklotronu U-120 w IFJ opisano w [b]. Rozwiązania techniczne (przyjęte ogólnie na świecie) polegały na odgrodzeniu materiału tarczowego od próżni cyklotronu dodatkową, gazoszczelną przesłoną. Geometria stanowiska do naświetlań na wiązce wyprowadzonej pozwalała wprowadzić dodatkowo za taką przesłonę strumień gazu nośnego, który będąc jednocześnie chłodziwem, służy do usuwania lotnych produktów z tarczy: na bieżąco lub tylko w przypadku jej przegrzania.

Podobne rozwiązanie dla wiązki wewnętrznej może być trudne. Rozwiązaniem stosowanym w Juelich przy otrzymywaniu ^{75}Br na wiązce wewnętrznej było pokrywanie zewnętrznej powierzchni materiału tarczowego cienką warstwą metalicznego srebra, które reaguje chemicznie z produktem naświetlania.

Postać materiału tarczowego

Wytwarzanie powyższych radionuklidów w cyklotronie AIC-144 będzie oparte na materiale tarczowym w stałym stanie skupienia. Wymaganiem ogólnym jest, aby materiał taki posiadał dużą stabilność, wysoką temperaturę topnienia, wysokie przewodnictwo cieplne oraz dobry kontakt termiczny z materiałem podkładki [a].

Materiałem tarczowym do wytwarzania wspomnianych wyżej izotopów będą metale w postaci czystej lub ich tlenki, na ogół wzbogacone w izotop stabilny, na którym zachodzi żądana reakcja jądrowa. Materiał tarczowy, w ilości rzędu 0,1-2,0 g, będzie наносzony na podkładkę zapewniającą dobry kontakt termiczny z materiałem tarczowym. Podkładka, najczęściej miedziana, będzie chłodzona od tyłu wodą. Projektując system chłodzenia należy pamiętać że niektóre metaliczne materiały tarczowe do produkcji przewidywanych izotopów mają stosunkowo niskie temperatury topnienia (np. Zn: 419,5°C, Cd: 321°C).

Zależnie od własności chemicznych i mechanicznych, metaliczny materiał tarczowy będzie наносzony elektrolitycznie lub mocowany w postaci folii na podkładce. Skrócona informacja o sposobie przygotowania materiału tarczowego podana jest Tabeli 1.

W niektórych przypadkach będzie konieczne zapobieżenie dyfuzji międzymetalicznej na granicy materiału tarczowego i podkładki, co czyni się pokrywając podkładkę cienką warstwą innego metalu. W przypadku wytwarzania izotopu ^{67}Ga z metalicznego cynku, zabezpieczeniem jest warstwa niklu naniesionego elektrolitycznie na podkładkę miedzianą.

Wydzielanie radioizotopów z tarcz będzie się odbywać na ogół metodą moką, tj. przez rozpuszczenie naświetlonego materiału tarczowego w kwasie, a następnie oddzielenie odeń radioaktywnego mikroskładnika. W projekcie próbnika należy przewidzieć możliwie prosty i szybki, zdalnie sterowany sposób zrzutu naświetlonej tarczy ze stanowiska do naświetlań do pojemnika transportowego, umożliwiający równie proste wyjmowanie jej z pojemnika i przenoszenie do szklanego naczynia ze stężonym kwasem.

W przypadku otrzymywania izotopu ^{111}In ze srebra, gdzie najwygodniejszą postacią materiału tarczowego jest cienka folia, aktywność będzie wydzielana przez odparowanie produktu z folii w

podwyższonej temperaturze. W projekcie należy przewidzieć sposób mocowania folii w głowicy stanowiska do naswietlań, zapewniający skuteczne odprowadzenie ciepła. Jak poprzednio, konieczny będzie automatyczny zrzut folii do pojemnika transportowego oraz prosty i szybki sposób wyjmowania folii z pojemnika.

W trzech pierwszych rubrykach poniższej Tabeli 1 podane są: lista planowanych izotopów, informacja o typie przewidywanych reakcji jądrowych i wymagane energie początkowe przyspieszanych cząstek. Tam, gdzie to było możliwe, podano również energię cząstek opuszczających tarczę. W dalszych rubrykach podany jest skład izotopowy, postać chemiczna i temperatury topnienia odpowiednich materiałów tarczowych oraz przewidywana grubość materiału tarczowego.

Tabela 1. Planowany asortyment nuklidów i parametry eksploatacyjne

Produkt	Reakcja	Energia (MeV)	Materiał tarczowy	Temp. topnienia °C	Grubość tarczy, mg/cm ²
⁶⁷ Ga	⁶⁸ Zn(p,2n)	40→18 ^{(4)*}	⁶⁸ Zn(98,46%), el ^{**}	419,47	250 ⁽⁹⁾
¹¹¹ In	¹¹² Cd(p,2n)	30→15 ⁽¹⁾	¹¹² Cd(98,1%), el ^{*)} lub CdO	320,9(Cd)	380
¹¹¹ In	¹¹¹ Cd(p,n)	18→7	¹¹¹ Cd(95,9%), el ^{*)} lub CdO	900(CdO) rozkład	400
¹¹¹ In	¹⁰⁹ Ag(α,2n)	30→18 ⁽²⁾	¹⁰⁹ Ag(48,2% lub wzbog.), folia	960,8	116 ⁽⁸⁾
²⁰¹ Tl	²⁰³ Tl(p,3n) ²⁰¹ Pb (²⁰⁵ Tl(p,5n) ²⁰¹ Pb)	~30 (46→38)	²⁰³ Tl (%), ²⁰⁵ Tl(99,46%) el?	303,5	630-296 ⁽⁶⁾
¹³⁹ Ce	¹³⁹ La(d,2n)	~15	^{nat} La(99,91% ³⁹ La), La ₂ O ₃	2320	160 ⁽¹⁰⁾
⁸⁸ Y	⁸⁸ Sr(p,n)		^{nat} Sr(82,6% ⁸⁸ Sr), SrO	2430	
¹²³ I	¹²⁴ Te(p,2n)	24→20	¹²⁴ Te(91,86%), TeO ₂	733	370 ⁽⁵⁾
²¹¹ At	²⁰⁹ Bi(α,2n)	28	^{nat} Bi(100%) Bi ₂ O ₃	820	100 ⁽⁷⁾

*) odsylacze literaturowe podano na końcu raportu

***) el = warstwa naniesiona elektrolitycznie

Kontrola parametrów wiązki

- wybór cząstek padających na tarczę i kontrola ich energii

Interesujące użytkowników izotopy będą na ogół wytwarzane w reakcjach jądrowych z protonami, rzadziej z deutronami lub cząstkami alfa. Energia kinetyczna cząstek, E_k jest (z pominięciem efektów relatywistycznych) proporcjonalna do drugiej potęgi promienia orbity akceleracji

$$E_k = R^2 q^2 B^2 / 2m = \text{const} \cdot R^2,$$

Zgodnie z powyższym wzorem, energia kinetyczna cząstek padających na tarczę będzie dobierana przez wybór odpowiedniej orbity w cyklotronie, czyli przez wsuwanie tarczy do komory próżniowej cyklotronu na żadaną głębokość. Żądany zakres energii będzie wynosił od 60 do 22 MeV, a zatem tarcza powinna móc się przesuwać wzdłuż promienia w zakresie od $R=72$ do $R=41,5$ cm.

Konstrukcja stanowiska do naświetlań musi zapewniać płynny i zdalnie sterowany ruch głowicy tarczy wewnątrz komory. Niektóre opublikowane rozwiązania techniczne przesuwu głowicy podano w Dodatku.

- pomiar prądu wiązki i kontrola rozkładu intensywności wiązki

Szybkość powstawania produktu reakcji jądowej zależy od intensywności wiązki bombardującej tarczę. Całkowita intensywność wiązki przeznaczona do regularnej produkcji izotopów powinna wynosić co najmniej $50 \mu\text{A}$, choć do niektórych zastosowań wystarczy intensywność mniejsza. Jako maksymalną intensywność wiązki należy przyjąć $100 \mu\text{A}$.

Rozkład intensywności wiązki względem jej osi można opisać za pomocą funkcji Gaussa. Przy wytwarzaniu izotopów pożądana jest możliwie duża szerokość połówkowa tej funkcji, czyli w przybliżeniu równomierny rozkład intensywności na całej powierzchni tarczy.

Projekt stanowiska musi zapewnić możliwość pomiaru ładunku padającego na tarczę w czasie naświetlania. Miejsca pomiaru w różnych rozwiązaniach technicznych zaznaczone są na schematach w Dodatku.

Pośredni pomiar rozkładu intensywności wiązki przez pomiar temperatury na tarczy opisano w [1]. Pomiar taki daje przede wszystkim informację o efektywności chłodzenia.

Odprowadzenie ciepła

Moc wiązki cząstek naładowanych padających na powierzchnię tarczy dana jest wzorem:

$$P[W] = E[\text{MeV}] \cdot I [\mu\text{A}],$$

gdzie E =energia cząstek, I =natężenie prądu.

Oznacza to, że np. wiązka protonów o energii 60MeV i intensywności $100 \mu\text{A}$ ma moc 6kW . Odprowadzenie ciepła wydzielanego na tarczy odbywa się za pośrednictwem wody chłodzącej. Elementy chłodzące najczęściej wykonuje się z miedzi, która jest materiałem o wysokim przewodnictwie cieplnym, wygodnym do pokrywania metodą elektrolityczną i względnie łatwym w obróbce. Dla zwiększenia skuteczności odprowadzenia ciepła zwiększa się powierzchnię roboczą tarczy przez umieszczenie jej pod kątem $3-15^\circ$ w stosunku do osi wiązki [m]. W pracy [1] zaproponowano zwiększenie efektywności chłodzenia przez wyprofilowanie tylnej powierzchni podkładki w żeberka o optymalizowanej geometrii.

Przy projektowaniu systemu chłodzenia należy pamiętać, że przy eksploatacji trudne może być [n]:

- 1) zapewnienie wodoszczelności układu;
- 2) zapewnienie wystarczającej wydajności przepływu wody chłodzącej;
- 3) uniknięcie dostawania się pęcherzyków powietrza lub pary wodnej między powierzchnią chłodzonego metalu a warstwą wody chłodzącej;
- 4) opróżnienie głowicy z wody chłodzącej po naświetlaniu.

W szczególności, pęcherzyki gazu zaadsorbowane na chłodzonej powierzchni bardzo zmniejszają efektywność chłodzenia. Podobnie, efektywność chłodzenia jest gorsza w przypadku stosowania tlenkowych materiałów tarczowych, których przewodnictwo cieplne jest niższe niż przewodnictwo cieplne metali.

Grubość materiału tarczowego

Grubość materiału tarczowego dobiera się tak, aby zapewnić wyhamowanie cząstek padających na tarczę, od zadanej wartości początkowej energii kinetycznej do zera lub do innej zadanej wartości. Przewidywane grubości tarczy, w mg/cm^2 , mierzone wzdłuż osi wiązki, podano w Tabeli 1.

W przypadku tarczy umieszczonej pod kątem α w stosunku do osi wiązki grubość warstwy maleje o czynnik $\sin \alpha$, z jednoczesnym zwiększeniem roboczej powierzchni tarczy. Przy takiej geometrii naświetlania maleje gęstość mocy wiązki padającej na tarczę, natomiast rośnie objętość wody, która przy zadanej szybkości przepływu może omywać tarczę. Oba te czynniki, wraz z efektywnym zmniejszeniem grubości warstwy, poprawiają efektywność chłodzenia.

Wybór okna w komorze próżniowej cyklotronu

Przewiduje się że stanowisko do naświetlań będzie umieszczone w oknie cyklotronu AIC-144, zgodnie ze wskazaniami budowniczych tego cyklotronu.

Zabezpieczenie próżni w komorze cyklotronu

Miejsce wprowadzenia próbника z tarczą do komory cyklotronu jest miejscem potencjalnego rozszczelnienia komory próżniowej. Projekt stanowiska do naświetlań musi przewidywać system służący odcinającym próżnię cyklotronu i umożliwiającym wstępne odpompowanie lub zapowietrzenie próbника, odpowiednio, przed wprowadzeniem do komory lub wyjęciu z niej.

Urządzenie do próżnioszczelnego transportu tarcz (przeznaczone do nieco innego celu) opisano w Dodatku.

Ochrona radiologiczna

- osłony biologiczne)

Projektując osłony biologiczne dla stanowiska do naświetlań należy przyjąć, że przy otrzymywaniu izotopów dla diagnostyki medycznej maksymalna aktywność tarczy na koniec bombardowania (EOB) może wynieść około 5 Ci (185 GBq). Przy tak zadanej maksymalnej aktywności tarczy należy przyjąć, że przy wszystkich pracach z udziałem człowieka musi być ona osłonięta warstwą ołowiu o grubości 10 cm. Po naświetlaniu tarcza musi być wysunięta z komory cyklotronu, a następnie umieszczona w pojemniku transportowym, w którym zostanie przewieziona do pracowni radiochemicznej. Wszystkie te czynności powinny odbywać się w sposób automatyczny.

- transport naświetlonej tarczy

Naświetlona tarcza musi zostać przetransportowana z cyklotronu do miejsca obróbki w boksie radiochemicznym. Boks radiochemiczny znajduje się w pomieszczeniu 1118, w odległości ok. 10 m w linii prostej od cyklotronu. Transport tarczy do boksu powinien odbywać się możliwie najkrótszą trasą, w miarę możliwości w sposób zdalnie sterowany. Pojemnik transportowy musi w prosty sposób przenosić się z wózka do śluzki prowadzącej do boksu radiochemicznego, umieszczonej tuż nad podłogą korytarza.

Ołowiany pojemnik wraz z wózkiem, zaprojektowany w IFJ do transportu tarczy ze stanowiska do naświetlań na wiązkę wyprowadzonej, może być wykorzystany również do transportu tarcz naświetlanych na wiązkę wewnętrznej. Ze względu na duży ciężar pojemnika (ok. 300 kg) wózek transportowy powinien mieć własny napęd.

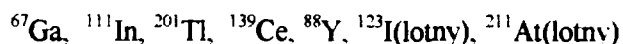
Podziękowanie

Serdecznie dziękuję Pani dr Ewie Ochab za cenne uwagi i dyskusje.

Podsumowanie

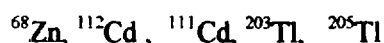
Powyżej podano ogólne wymagania dotyczące projektu stanowiska na wiązkę wewnętrzną cyklotronu AIC-144. Poniżej zebrano przewidywane parametry eksploatacyjne stanowiska do naświetlań.

Planowany asortyment wytwarzanych nuklidów:



Materiały tarczowe:

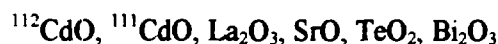
a) stałe, metaliczne, naniesione elektrolitycznie na podkładkę



b) stałe, metaliczne, mocowane w postaci folii



c) stałe, w postaci tlenków



Zakresy energii cząstek używanych do produkcji izotopów

protonów: 22 - 60 MeV

deuteronów: 15 - 30 MeV

cząstek alfa: 27 - 60 MeV

Zakres ruchu głowicy tarczy wzdłuż promienia cyklotronu: 31cm (R=72 do R=41 cm)

Maksymalna intensywność wiązki protonów: 100 mikroA

Szerokość połówkowa wiązki: 3 mm

Maksymalna moc wiązki na tarczy: 6 kW

Maksymalne wymiary powierzchni tarczy: 3 cm × 6 cm

Maksymalne wymiary materiału tarczowego: 2 cm × 5 cm

Kąt nachylenia powierzchni tarczy w stosunku do osi wiązki: 3-15°

Minimalna temp. topnienia materiału tarczowego: 321°C (Cd metaliczny)

Temperatura początkowa wody chłodzącej: nie wyższa niż 20°C

Ciśnienie przepływu wody chłodzącej: 4 atm (~400 kPa)

DODATEK

D1. Stanowisko do naświetlań w Sloan Kettering Institute for Cancer Research, New York USA, [d]

Opisany w cytowanej pracy próbnik służył do naświetlań na wiązkę wewnętrzną. Jest on przyrządem, w którym tarcze o średnicy 2,7 - 3,3 cm są umieszczane pod kątem około 5° w stosunku do padającej wiązki, tak że wiązka uderza w powierzchnię tarczy na długości ok. 2,5 cm i szerokości równej szerokości wiązki.

Na jednym końcu próbnika znajduje się tarcza, na drugim układ sterowania, a całość jest połączona rurą ze stali nierdzewnej o długości 86,5 cm i średnicy 5 cm. Układ sterujący składa się ze stałego bloku, przez który przechodzą dwa ruchome pręty łączące. Stały blok posiada gwintowany otwór, w którym porusza się trzon przytrzymujący ruchomy blok. Trzon ten, po obróceniu za pomocą moletowanej galki, zwalnia uchwyty mocujące tarczę na drugim końcu próbnika.

Izolację elektryczną uchwytów stanowią izolatory ceramiczne lub aluminiowe pokryte tlenkiem glinu, dzięki którym pręty łączące znajdujące się tuż za głowicą izolującą mogą być użyte do monitorowania prądu wiązki.

Woda chłodząca doprowadzona jest kanałami nawierconymi wzdłuż rury, przez głowicę izolującą aż do tylnej powierzchni tarczy. Woda kierowana jest na tylną powierzchnię tarczy, po czym odpływa przez pierścieniową komorę wokół rury, przez którą jest doprowadzana.

Tarcza jest izolowana od głowicy miedzianej za pomocą izolatora aluminiowego pokrytego tlenkiem glinu, który pozwala monitorować prąd dochodzący na tarczę.

Mechanizm umożliwiający zdalne wsuwanie i wysuwanie próbnika przez zawór pneumatyczny został dobudowany do cyklotronu.

Zmierzony przepływ wody przez próbnik wynosił 0,6 l/min przy ciśnieniu 2,8 kg/cm². Normalnie ciśnienie wody chłodzącej w opisanym cyklotronie wynosi 5,6 kg/cm², tak że przepływ jest zwykle większy niż 0,6 l/min.

Próbnik został przetestowany przez naświetlanie krążka miedzianego o średnicy zewnętrznej 2,9 cm i grubości 3 mm, na który naniesiono trzy rodzaje lutów o temperaturach topnienia 223°C, 380°C i 555°C.

Naświetlanie tarczy cząstkami $^3\text{He}^{2+}$ o energii 23 MeV prądem 150 μA w ciągu 10 minut nie spowodowało zauważalnego stopienia żadnego z tych lutów. Wiązka omiatała równomiernie powierzchnię tarczy o wymiarach ok. 1 cm \times 2,6 cm.

D2. Próbniki do otrzymywania krótkożyciowych izotopów w cyklotronie U-310 w Dubnej [f]

W cytowanej pracy opisano kilka różnych próbników. Próbniki służyły do otrzymywania krótkożyciowych izotopów na wiązkę wewnętrzną cyklotronu o średnicy 310 cm. Były to próznoizolacyjne urządzenia składające się z głowicy, rury łączącej i części sterującej.

Wymagania, jakie stawiano opisanym próbnikom, to:

- a) możliwość szybkiego transportu krótkożyciowych izotopów z tarczy do detektorów,
- b) maksymalne zmniejszenie tła,
- c) niezawodność działania w czasie nieprzerwanej wielogodzinnej, a nawet wielomiesięcznej eksploatacji,
- d) możliwość pracy na wiązkę wewnętrzną w obecności pola magnetycznego, wysokiego napięcia na duantach oraz wysokiej próżni w komorze cyklotronu.

Próbnik był wprowadzany do komory próżniowej przez służbę. Głowica próbnika wchodzi do komory pomiędzy biegunami magnesu a duantami. Wiązka jonów z ostatniej orbity pada na próbnik. Jeden z próbników posiadał wymienną część tarczową do pracy na odchylonej wiązce, za deflektorem. Próbnik ten był wprowadzany do komory na mniejszą głębokość. Oba próbniki poruszają się na wózkach transportowych.

D3. Stanowisko do naświetlań na wiązce wewnętrznej cyklotronu C-30 w Instytucie Energii Atomowej w Świerku wg [g]

Stanowisko do naświetlań składa się z następujących elementów:

- sferycznej lub cylindrycznej głowicy chłodzonej bezpośrednio wodą;
- ruchomego, prózniejszczelnego tłoka, na którym głowica jest zamontowana;
- śluzi prózniowej dla transportu głowicy.

Próbnik z tarczą umieszczany jest w oknie cyklotronu, a głowica tarczy wsuwa się na głębokość odpowiadającą żądanej energii protonów.

Materiał tarczowy może być naniesiony elektrolitycznie lub napyłony na cylindryczną podkładkę tarczy, a po naświetleniu usunięty metodami chemicznymi. Posiadana obecnie przez IEA głowica może wytrzymać bez stopienia średni prąd wiązki do $10 \mu\text{A}$ (3 kW w impulsie).

D4. Opis prózniejszczelnej śluzi do przenoszenia tarcz w kontrolowanej atmosferze [h]

Opisane w cytowanej pracy urządzenie przeznaczone było do transportu wrażliwych chemicznie lub higroskopijnych tarcz w próżni lub w atmosferze kontrolowanej, a następnie do prowadzenia eksperymentów w komorze rozprożeń. Opis urządzenia zamieszczono tutaj ze względu na sposób rozwiązania odcięcia próżni.

Układ prózniowego transportu tarcz składa się z korpusu transportowego, korpusu przejściowego i zaworów prózniowych, których kołnierze są dopasowane do kołnierzy napyłarki i komory rozprożeń.

Prożnia w napyłarce wynosi ok. 10^{-4}Pa . Po połączeniu napyłarki z urządzeniem transportowym i zamknięciu zaworów, za pomocą pompy rotacyjnej odpompowuje się korpus przejściowy do ok. 10Pa . Korpus przejściowy łączy się z korpusem transportowym, przy zamkniętym zaworze prózniowym prowadzącym do pompy.

Zasuwa odcinająca próżnię od strony cyklotronu/napyłarki jest wtedy zamknięta, a zasuwa od strony tarczy otwarta. Po otwarciu pierwszej zasuwy tarczy można wprowadzić do napyłarki, w której utrzymuje się próżnię ok. $5 \cdot 10^{-3}\text{Pa}$. Po napyleniu, układ tarcz przesuwa się do korpusu transportowego i zamyka obie zasuwy. Po odłączeniu urządzenia transportowego od napyłarki łączy się je z komorą rozprożeń, w której panuje próżnia 10^{-4}Pa . W korpusie transportowym jest wtedy ok. 10^{-1}Pa . To samo postępowanie powtarza się zanim otworzy się zasuwę łączącą z komorą rozprożeń.

D5. Stanowisko do naświetlań materiałów tarczowych w postaci stopów metalicznych w Juelich [e,p]

Stanowisko to służyło w Juelich do wytwarzania izotopów ^{77}Br i ^{75}Br za pomocą wiązki o wysokiej intensywności. Materiałem tarczowym był stop Cu_3As . Naświetlania prowadzono na wiązce wewnętrznej cząstkami $^3\text{He}^{2+}$ o energii 36 MeV.

Materiał tarczowy wtapiano w zagłębienie podkładki, które ma wymiary $77\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$. Podkładkę montowano w stanowisku do naświetlań i tam chłodzono (tylko od tyłu) strumieniem wody o szybkości przepływu 10 l/min. Płaska podkładka była przytrzymywana w głowicy za pomocą klamer, które zwalniano przez obrót mechanizmu sterującego.

Wiązka wewnętrzna cząstek $^3\text{He}^{2+}$ o energii 36 MeV padała na tarczę pod kątem $3,2^\circ$. Prąd na tarczy wynosił około $100 \mu\text{A}$, ale dzięki dużej powierzchni tarczy gęstość mocy wynosiła tylko około $400\text{W}/\text{cm}^2$.

Radioizotopy bromu (pierwiastek o dużej lotności) wydzielano z tarczy w zdalnie sterowanej aparaturze chemicznej. Cienka warstwa srebra pokrywająca materiał tarczowy zabezpieczała przed ulatnianiem się produktu w czasie naświetlania.

D7. Optymalizacja chłodzenia tarczy i pomiar temperatury na tarczy wg [1]

W oryginalnym rozwiązaniu tarcza jest przeznaczona do naświetlań na wiązkę wyprowadzonej. Praca jest tutaj cytowana ze względu na rozwiązanie problemu chłodzenia.

Dla zwiększenia skuteczności odprowadzenia ciepła tylną powierzchnię tarczy wyprofilowano w kanaliki dla wody chłodzącej. Geometria żeberk powstałego w ten sposób radiatora była optymalizowana programem komputerowym uwzględniającym moc wiązki, przewodnictwo cieplne materiału podkładki oraz konwekcję ciepła między materiałem podkładki a wodą chłodzącą.

Na tak zoptymalizowanej tarczy wiązka protonów o energii 28MeV i intensywności 200 μ A rozmyta jest na powierzchni ok. 15cm². Tarcza jest w stanie rozproszyć energię do 6,4 kW, utrzymując temperaturę powierzchni poniżej 160°C. Woda chłodząca ma na wejściu temperaturę 13-16°C i ciśnienie 4,2 kg/cm². Maksymalna gęstość energii na tarczy wynosiła 985W/cm². Tarcza próbna była grubsza od tarczy produkcyjnej, aby umożliwić podłączenie termopar do pomiaru temperatury.

D8. Tarcza do otrzymywania ²¹¹At z ²⁰⁹Bi na wiązce wewnętrznej wg [r]

Tarczę aktywowano cząstkami alfa o energii 28 MeV i intensywności 20-40 μ A. Do ich pełnego wyhamowania grubość tarczy umieszczonej prostopadle do osi wiązki powinna wynosić minimum 200 μ m. Metaliczny materiał tarczowy ma niską temperaturę topnienia (271°C) i niskie przewodnictwo cieplne.

Stanowisko do naświetlań zainstalowano w oknie, w którym poprzednio znajdował się próbnik do monitorowania wiązki. Wymiary korpusu stanowiska musiano dostosować do rozmiarów hali cyklotronu i do optyki wiązki. Układ tarczy składa się z napędzanego silnikiem tłoka o długości 305 cm, głowicy, służy próżniowej i skrzynki z oprzyrządowaniem. Skrzynka służy jako mechaniczna podstawa dla tłoka, a mieści się w niej pompa, zawory i części elektryczne, a także pulpit sterowniczy do obsługi dwóch zasuw służy próżniowej, dopływu i wydmuchu wody chłodzącej oraz pneumatyczny mechanizm regulacji położenia tłoka. Radialne i kątowe położenie tłoka jest powtarzalne z dokładnością do 0,5 mm i można je regulować zarówno bezpośrednio na hali, jak też zdalnie z konsoli cyklotronu. Cyfrowe parametry położenia wyświetlane są na konsoli obok przycisków sterujących ruchem tłoka.

Powierzchnia głowicy tarczy jest zakrzywiona (promień krzywizny = 71 cm), co poprawia rozkład intensywności wiązki na całej długości tarczy (10 cm). Kąt padania wiązki wynosi 1,5 - 4,5°. Jej intensywność jest monitorowana od czoła i od tyłu głowicy za pomocą izolowanych elektrycznie grafitowych próbników. Tarcza jest chłodzona od tyłu, a efektywność chłodzenia optymalizowano profilując tylną powierzchnię w żeberka.

Prąd wiązki mierzono najpierw za pomocą próbnika wprowadzanego do komory cyklotronu na odpowiednią orbitę. Następnie próbnik usuwano, a na tę samą orbitę wprowadzono stanowisko do naświetlań zaopatrzone w czołowy i tylny monitor. Odczytywano prądy na obu monitorach, a położenie głowicy regulowano tak, aby na prąd na monitorach był minimalny, a maksymalny na tarczy. Zwykle na monitorach deponowało się 5-10% intensywności wiązki.

Jako materiał podkładki wyprobowano zarówno miedź, jak też aluminium. Oba materiały aktywowały się: w miedzi powstawały izotopy ⁶⁶Ga ($t_{1/2}$ =9,5h) i ⁶⁸Ga ($t_{1/2}$ =1,13h), a w aluminium izotop ³⁰P ($t_{1/2}$ =2,50 min). Z powodu krótszego okresu połowicznego rozpadu izotopu ³⁰P, aluminium uznano za materiał bardziej odpowiedni do tych naświetlań.

Wewnętrzna tarcza z aluminiową podkładką ważyła 118g, z miedzianą - 374g, a tarcza wewnętrzna z podkładką aluminiową tylko 8g. Większe rozmiary i masa podkładek dla tarczy wewnętrznej są problemem przy termicznym wydzielaniu aktywności z tarczy.

Literatura

- [a] M.Sajjad, R.M.Lambrech - Cyclotron Targetry for Medical Radioisotope Production - *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **B40** (1989) 1100-1104;
- [b] P.Grychowski, J.Kwaśnik, E.Ochab - Otrzymywanie i wydzielanie ^{123}I z tarczy tellurowej - *Opracowanie wewnętrzne*, IFJ, Kraków, 1988;
- [c] W.J.Dickie, N.R.Stevenson, F.F.Szlavik - A Cyclotron Isotope Production Facility Designed to Maximize Production and Minimize Radiation Dose - *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **B79** (1993) 929-932;
- [d] J.R.Dahl, R.S.Tilbury - The Use of a Compact, Multi-Particle Cyclotron for the Production of ^{52}Fe , ^{67}Ga , ^{111}In and ^{123}I for Medical Purposes - *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **23** (1972) 431-437;
- [e] S.M.Qaim, G.Stoeklin - Production of Some Medically Important Short-Lived Neutron-Deficient Radioisotopes of Halogens - *Radiochimica Acta* **34** (1983) 25-40, a tam cytowany: W.Stellmacher - *Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals* **19** (1982) 1355-1357;
- [f] I.V.Kolesov - Konstruktsiya Probnikov dla Sinteza Transuranovykh Elementov na Vnutrennem Puchke Ionov 310-Santimetrovogo Tsiklotrona - *Raport ZIBJ* no.13-3667, Dubna 1968;
- [g] J.Lorkiewicz, J.Olszewski, E.Plawski, J.Sura, J.Wojtkowska - The C-30 Compact Cyclotron at Świerk as a Potential Source for Production of Short Life-Time Isotopes - *Nukleonika* **41** (1996) 67-74;
- [h] D.Kabiraj, S.Mandal, D.K.Avashti - In-vacuum Target Transfer Facility - *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A362** (1995) 205-207;
- [j] E.Aslanides, R.C.Cohen, G.Dugan, W.Nagourney, L.Rosenstein, M.Slagowitz, K.Ziegler - Beam monitoring in the extraction region of the Nevis cyclotron - *IEEE Transactions on Nuclear Science* **NS28** (1981) 573-575;
- [k] J.W.Terry - Production of the Radioisotopes in the ORNL 86-Inch Cyclotron - *IEEE Transactions on Nuclear Science* **NS28** (1981) 1597;
- [l] G.Pinto, M.Straatman, D.Schlyer, J.Currin, G.Hendry - Target systems for radioisotope production - *IEEE Transactions on Nuclear Science* **NS30** (1983) 1797-1800;
- [n] P.Malmborg, O.Byström, L.Einarsson, O.Jonsson, H.Condé, K.Elmgren, S.Hultqvist - The "Crypt". Upgrading and Experiences from Running the Reconstructed Facility for Radionuclide Production and Neutron Irradiation - *Raport Roczny Uniwersytetu w Uppsali*, 1993;
- [p] G.Blessing, R.Weinreich, S.M.Qaim, G.Stöcklin - Production of ^{75}Br and ^{77}Br via the $^{75}\text{As}(^3\text{He}, 3n)^{75}\text{Br}$ and $^{75}\text{As}(\alpha, 2n)^{77}\text{Br}$ reactions using Cu_3As -alloy as High-Current Target Material - *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **33** (1982) 333-339.
- [q] H.B.Hupf, J.E.Beaver - Cyclotron Production of Carrier-Free Gallium-67 - *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **21** (1970) 75-79;
- [r] R.H.Larsen, B.W.Wieland, M.R.Zalutsky - Evaluation of an Internal Cyclotron Target for the Production of ^{211}At via the $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$ Reaction - *Appl. Radiat. Isot.* **47** (1996) 135-143;

Odsylacze do Tabeli 1

- (1) F.Tarkanyi, F.Szelecsenyi, P.Kopecky, T.Molnar, L.Ando, P.Mikecz, Gy.Toth, A.Rydl - Cross Sections of Proton-Induced Nuclear Reactions on Enriched ^{111}Cd and ^{112}Cd for the Production of ^{111}In for Use in Nuclear Medicine - *Appl. Radiat. Isot.* **45** (1994) 239-249;
- (2) S.Fukushima, S.Kume, H.Okamura, K.Otozai, K.Skamoto, Y.Yoshizawa, S.Hayashi - Excitation Functions for the Reactions Induced by Alpha Particles on ^{109}Ag - *Nucl. Phys.* **69** (1963) 273-290;
- (3) L.C.Brown, A.P.Callahan, M.R.Skidmore, T.B.Wilson - High-Yield Zinc-68 Cyclotron Targets for Carrier-Free Gallium-67 Production - *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **24** (1973) 651-655;
- (4) F.M.Nortier, S.J.Mills, G.F.Steyn - Excitation Functions and Yields of Relevance to the Production of ^{67}Ga by Proton Bombardment of ^{68}Zn and ^{68}Ge up to 100 MeV - *Appl. Radiat. Isot.* **42** (1991) 353-359;
- (5) R.Van den Bosch, J.J.M.De Goeij, J.A. van der Heide, J.W.F.Tertoolen, H.M.J.Theelen, C.Zegers - A New Approach to Target Chemistry for the Iodine-123 Production via the $^{124}\text{Te}(p,2n)$ Reaction - *Appl. Radiat. Isot.* **28** (1977) 255-261;
- (6) M.C.Lagunas-Solar, J.A.Jungerman, D.W.Paulson - Thallium-201 Yields and Excitation Functions for the Lead Radioactivities Produced by Irradiation of Thallium-205 with 34-60 MeV Protons - *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **31** (1980) 117-121;
- (7) Z.Mazgaj, J.Mikulski - Method of Thermal Separation of ^{211}At from the alpha Particle Activated Bi_2O_3 Target - *Raport IFJ* no.1610/C (1992);
- (8) Z.Mazgaj, A.Kolaczkowski, J.Mikulski, A.F.Novgorodov, A.Zieliński - High-Temperature Method of Rapid Separation of In-111 from Irradiated Silver Targets - *Raport IFJ* no.1505/C (1990);
- (9) P.Grychowski, J.Mikulski, E.Ochab, J.Panasiewicz - Otrzymywanie Ga-67 z tarczy cynkowej - *Raport IFJ* no.1380/C (1987);
- (10) E.Ochab, R.Misiak - Carrier-free ^{139}Ce . Obtaining and separation from lanthanum target - *Raport IFJ* no.1711/C (1995).