

Pomiary promieniowania γ z wykorzystaniem detektora półprzewodnikowego. Wpływ geometrii pomiaru oraz orientacji źródła względem detektora

1. Podstawowe informacje

1.1. Wydajność w pomiarach aktywności.

Wydajność detekcji promieniowania przez urządzenie (detektor/licznik) limitowana jest przez kilka czynników. Najważniejsze z nich to:

1. Prawdopodobieństwo oddziaływania promieniowania z materiałem czynnym detektora (scyntylator, półprzewodnik, gaz itp.) prowadzącego do efektów, które są mierzalne przez detektor. Przykładowo, promieniowanie γ ma daleki zasięg (silnie przenikliwe) i potrzebuje przebyć stosunkowo długi (w porównaniu z α i β) dystans w materiale detektora, aby zaszło oddziaływanie z materią (efekty Comptona, fotoelektryczny, tworzenia par). Wraz ze wzrostem jego przenikliwości rośnie objętość materiału czynnego detektora (scyntylator, gaz w liczniku gazowym, półprzewodnik w detektorze półprzewodnikowym itp.) niezbędna do tego, aby promieniowanie pozostawiło w nim całą swoją energię w wyniku oddziaływań (zostało całkowicie zaabsorbowane). W konsekwencji, objętość czynna detektora do pomiaru promieniowania γ musi być znacznie większa niż dla mniej przenikliwych cząstek α czy β .
2. Zdolność elektroniki detektora do detekcji i pomiaru powstającego sygnału. Przykładowo, wydajności fotokatod w fotopowielaczach (uwalnianie fotoelektronów przez kwanty promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez scyntylator w wyniku oddziaływania z promieniowaniem jonizującym) może być rzędu 20-30 %.
3. Absorpcja (samoabsorpcja) i rozproszenie promieniowania w materiale czynnym detektora w/na materiałach detektora
4. Absorpcja i rozproszenie promieniowania emitowanego przez próbkę w/na materiałach znajdujących się pomiędzy próbką a detektorem (w tym samoabsorpcja w próbce czy absorpcja/rozproszenie w/na obudowie detektora)
5. Geometria układu detektor-próbka – zdolność detektora do „przechwycenia” całego promieniowania emitowanego przez próbkę zależna od odległości źródła od detektora, rozmiaru (objętości) detektora oraz kształtu detektora względem próbki. Ćwiczenie ma na celu określenie wpływu tego właśnie czynnika oraz wskazanie sposobów poprawy wydajności detekcji promieniowania poprzez odpowiedni dobór geometrii układu pomiarowego.

Czynniki opisane w punktach 1 i 4 zależą od energii emitowanego promieniowania. Wpływ energii promieniowania γ na wydajność jego rejestrowania przez detektor półprzewodnikowy omawiany był w trakcie ćwiczenia w ramach przedmiotu "detekcja promieniowania jądrowego. Efekt ten nie będzie szczegółowo badany w trakcie niniejszego ćwiczenia.

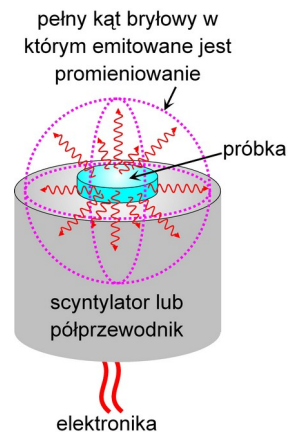
1.2. Geometria układu pomiarowego

Przyjmując, że:

- promieniowanie jest emitowane przez źródło izotropowo (równomiernie w pełnym kącie bryłowym),
- objętość materiału czynnego detektora (scyntylator, półprzewodnik, gaz itp.) jest dobrana adekwatnie do rodzaju mierzonego promieniowania,
- osłona materiału czynnego detektora nie stanowi przeszkody dla promieniowania,
- substancja promieniotwórcza równomiernie wypełnia całą objętość próbki

można uznać, że czynnik geometryczny jest determinowany przez procent cząstek promieniowania (α , β , fotony itp.) „przechwyconych” przez detektor, czyli takich, które „dostały” się wnętrza materiału czynnego detektora. To z kolei zależy od:

- kształtu materiału czynnego detektora
- kształtu próbki
- stosunku rozmiaru próbki do rozmiaru materiału czynnego detektora
- ustawienia, odległości i orientacji próbki względem detektora



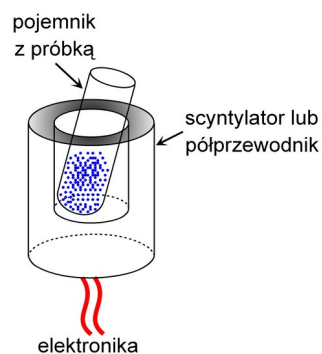
Rys. 1. Ograniczenia wynikające z geometrii układu detektor-próbka (geometria "płaska"). Elektronika oznacza układy zasilające (dla półprzewodników) oraz przetwarzające powstały w materiale detektora sygnał (wzmacniacze, fotopowielacze, analizatory itp.)

1.2.1. Kształt materiału czynnego detektora

Dostępne na rynku kształty detektorów scyntylacyjnych i półprzewodnikowych do pomiaru promieniowania γ :

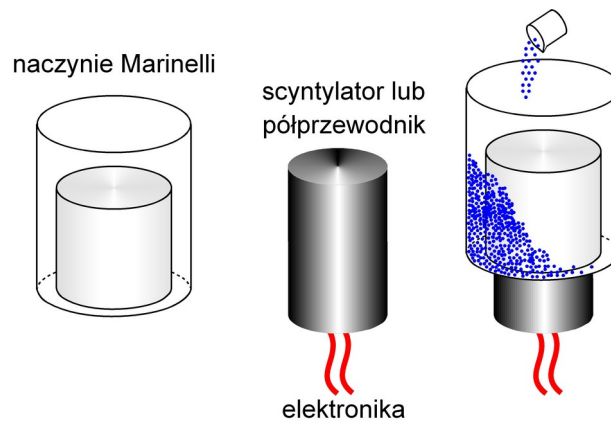
- geometria "płaska" - obszar "styku" próbki z materiałem czynnym detektorem jest płaski (rys. 1) (należy pamiętać, że w celu uniknięcia skażenia detektora substancją promieniotwórczą zalecane jest, aby pomiędzy próbką a detektorem umieścić substancję (bibuła, folia itp.), która będzie ograniczała ryzyko skażenia detektora). Materiał czynny detektora obejmuje nie więcej niż połowę kąta bryłowego, w którym emitowane jest promieniowanie - nie więcej niż 50% emitowanych cząstek (α , β , fotony) "wejdzie" do materiału czynnego detektora.

- "studzienka" - scyntylator lub półprzewodnik z wgłębieniem, w którym umieszcza się próbkę. Materiał detektora prawie całkowicie "otacza" próbkę.



Rys. 2. Detektor studzienkowy

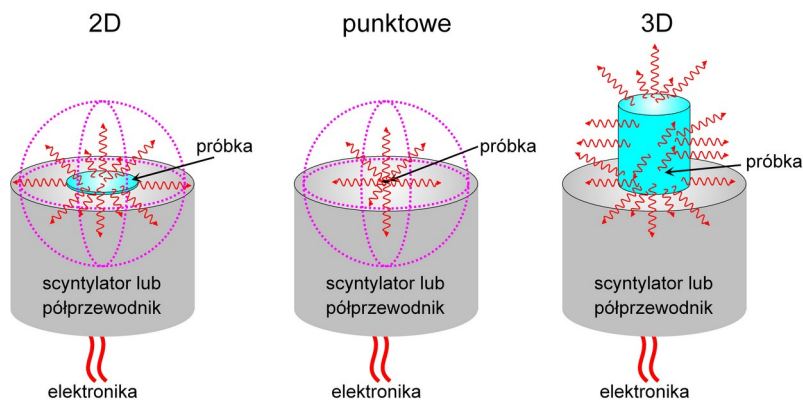
- trójwymiarowy scyntylator/półprzewodnik zazwyczaj cylindryczny dopasany do naczynia Marinelli. To ostatnie ukształtowane jest tak, aby otaczało detektor z wszystkich stron poza spodem detektora, gdzie podłączony jest kontakt elektryczny, fotopowielacz itp. Wykonane jest z różnych materiałów (szkło, HDPE itp.). Próbka "otacza" materiał detektora w większym stopniu niż przy typowej "płaskiej" geometrii. Objętość materiału czynnego detektora musi być dopasowana do rozmiarów naczynia Marinelli - czasami niska objętość materiału czynnego detektora.



Rys. 3. Idea pomiaru z naczyniem Marinelli

1.2.2. Kształt próbki

Ograniczenia z nadaniem próbce optymalnego kształtu związane są z jej stanem skupienia oraz tym, czy próbka może być przetworzona (poddana destrukcji - rozpuszczeniu itp.). Jak wynika z rysunku 4, największy procent cząstek emitowanych przez próbkę (α , β , fotony) trafia do materiału czynnego detektora, kiedy próbka jest punktowa lub dwuwymiarowa. Z punktu widzenia opisu matematycznego najwygodniejsza jest próbka punktowa (nieskończenie mały promień) gdyż m.in. pomijamy efekty związane z samoabsorpcją promieniowania w próbce. W praktyce z reguły mamy do czynienia z próbkami o skończonych rozmiarach: dwu- lub trójwymiarowymi. Te ostatnie najlepiej jest mierzyć z użyciem detektora studzienkowego.



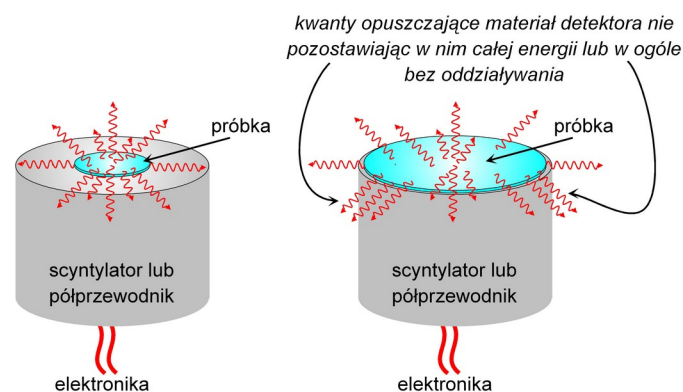
Rys. 4. Próbkę punktowa, dwu- i trójwymiarowa.

Szczególnym przypadkiem jest wprowadzenie badanej substancji promieniotwórczej do wnętrza materiału czynnego detektora. W takim układzie każda cząstka emitowanego

promieniowania trafia do materiału czynnego detektora. Przykładem jest rozpuszczanie próbki w ciekłym scyntylatorze lub wprowadzenie gazowej próbki do wnętrza detektora gazowego.

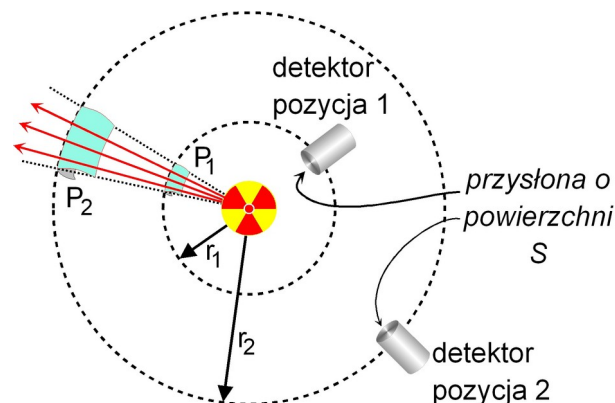
1.2.3. Stosunek rozmiarów próbki i detektora

Stosunek rozmiarów próbki i detektora ma największe znaczenie w przypadku silnie przenikliwego promieniowania γ . Potrzebuje ono przebyć wystarczająco dużą objętość w materiale czynnym detektora, aby pozostawić w nim całą swoją energię - być zaabsorbowanym (efekty fotoelektryczne i Comptona). W przypadku próbki o promieniu porównywalnym z promieniem materiału czynnego detektora emitowane fotony (trafiające do materiału detektora blisko jego krawędzi) mogą opuścić materiał detektora pozostawiając w nim tylko część swojej energii (efekty Comptona bez efektu fotoelektrycznego) lub w ogóle bez oddziaływania z nim - droga przebyta przez promieniowanie będzie na to zbyt krótka (Rys. 5). W konsekwencji spada wydajność detekcji



Rys. 5. wpływ stosunku rozmiarów próbki i detektora.

1.2.4. Odległość między detektorem a próbką



Rys. 6. Wpływ odległości od źródła na mierzoną aktywność.

Aktywność rejestrowana przez detektor spada wraz z odległością pomiędzy detektorem a próbką emitującą promieniowanie izotropowo w pełnym kącie bryłowym (rys. 6). Strumień promieniowania, ϕ , liczony dla całej powierzchni sfer o promieniach r_1 i r_2 (rys. 6) wynosi:

$$\phi = \frac{N_0}{4\pi r^2} \quad (1)$$

gdzie r jest równe odpowiednio r_1 lub r_2 a N_0 to całkowita ilość cząstek emitowanych przez źródło w pełnym kącie bryłowym w danej jednostce czasu. Ilość cząstek przechodząca przez powierzchnię P , N_P , w jednostce czasu jest, zatem równa:

$$N_P = A \frac{N_0}{4\pi r^2} \quad (2)$$

Gdzie P jest równe P_1 lub P_2 a r odpowiednio r_1 lub r_2 (rys. 6). Aby strumień cząstek dla powierzchni A był taki sam niezależnie od promienia sfery, której jest ona częścią, to wartość P musi rosnąć proporcjonalnie do promienia sfery, czyli do r^2 , i taki warunek spełniają powierzchnie P_1 i P_2 na rys. 6. Jeżeli rozważymy detektor którego przesłona ma powierzchnię równą S (powierzchnia materiału czynnego przez który trafia do niego promieniowanie) która jest niezależna od położenia detektora ($S = \text{const.}$) to ilość cząstek trafiających do materiału detektora, N_S , wynosi:

$$N_S = S \frac{N_0}{4\pi r^2} \quad (3)$$

Ponieważ S jest stałe to N_S spada wraz z odwrotnością kwadratu odległości detektora od źródła. Aktywność mierzona przez detektor, A , jest zdefiniowana jako (pomijamy tutaj wcześniej wymieniane czynniki ograniczające wydajność, takie jak prawdopodobieństwo oddziaływania promieniowania z materiałem detektora, przetwarzanie powstałego sygnału itp.):

$$A = \frac{N_S}{t} = S \frac{N_0}{4\pi r^2} \frac{1}{t} \quad (4)$$

gdzie t to jednostka czasu aktywności. Oznacza to, że mierzona aktywność spada wraz z kwadratem odległości od źródła. Oczywiście analogiczne rozumowanie stosowane jest do opisu zależności dawki promieniowania od odległości od źródła.

2. Wykonanie ćwiczenia

Pomiary będą wykonywane z wykorzystaniem germanowego detektora półprzewodnikowego dedykowanego do pomiaru promieniowania γ (HPGe). Aktywności odczytuje się z zarejestrowanego przez komputer widma jako pole danego sygnału (piku/fotopiku) podzielone przez czas akwizycji.

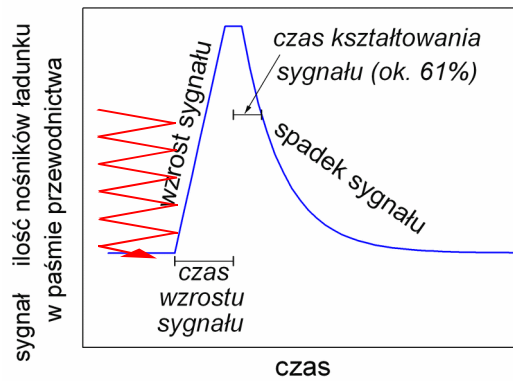
Pomiary będą wykonywane dla:

- źródeł zamkniętych (wpływ odległości od detektora)
- źródeł otwartych (wpływ geometrii źródła)

2.1. Wpływ odległości między źródłem a detektorem

Pomiar dokonywany jest dla źródła zamkniętego umieszczanego w różnych odległościach od detektora. Odległości mierzone są za pomocą linijki. Należy dopilnować, aby orientacja środka źródła względem środka detektora (materiału czynnego) była cały czas taka sama. Na podstawie sporządzonego wykresu mierzonej aktywności od funkcji odległości należy przedyskutować słuszność równania 4.

Ponieważ odległość pomiędzy źródłem a detektorem zmienia rejestrowaną aktywność to w przypadku próbek o bardzo wysokiej aktywności może mieć wpływ nie tylko na wielkości (pola) poszczególnych sygnałów na widmie, ale także na ich ilość. Sygnał rejestrowany przez detektor półprzewodnikowy charakteryzuje się szybkim wzrostem impulsu oraz jego stosunkowo powolnym opadaniem (rys. 7).

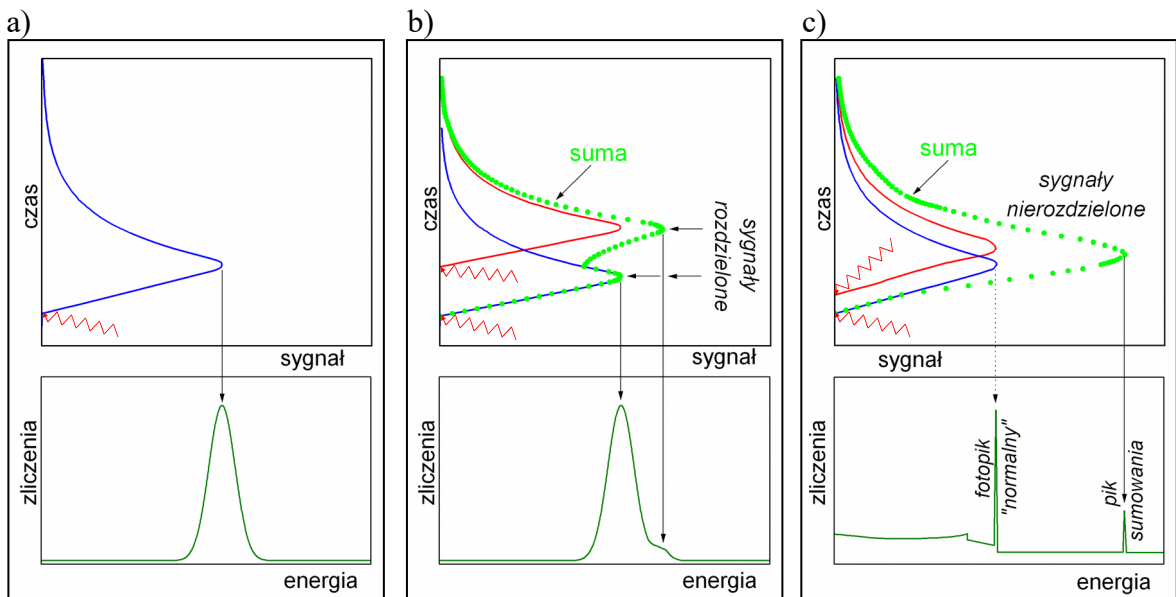


Rys. 7. Kształt impulsu w detektorze półprzewodnikowym.

Nowy sygnał (kolejny foton) może być zarejestrowany dopiero po spadku sygnału (czas martwy). Jeżeli jednak następny foton trafi do detektora zanim sygnał wytworzony przez poprzedni nie opadnie to wytworzony przez niego sygnał „doda się” do sygnału wygenerowanego przez poprzedni foton i zamiast dwóch osobnych sygnałów zaobserwujemy jeden przy energii równej sumie energii obydwu fotonów (sumowanie nośników ładunku wprowadzonych do pasma przewodnictwa w wyniku oddziaływania materiału detektora z obydwoma fotonami). Jest to tzw. pik sumowania (rys. 8). Pojawia się on wtedy, gdy prawdopodobieństwo wejścia do detektora kolejnego fotonu zanim opadnie pierwotny sygnał jest niezerowe:

- czas opadania sygnału jest zbyt długi
- aktywność rejestrowana przez detektor jest zbyt wysoka.

Ten ostatni parametr możemy modyfikować poprzez zmianę położenia próbki względem detektora. W trakcie ćwiczenia zostanie zbadany wpływ odległości od detektora na pojawianie się pików sumowania (czas kształtowania sygnału nie będzie zmieniany).



Rys. 8. Zlewanie się sygnałów na widmie z detektora HPGe. Górny panel: kształt impulsu, dolny: widmo. a) czas opadania sygnału i aktywność próbki dobrane prawidłowo, nie ma zlewania sygnałów. Czas opadania sygnału lub aktywność coraz bardziej rosną przechodząc

do b) i c). W efekcie sygnały zlewają się coraz bardziej aż, przy wystarczająco dużej aktywności (lub bardzo krótkim czasie opadania sygnału) pojawia się pik sumowania (rys. c).

2.2. Wpływ geometrii źródła

Źródła zostaną przygotowane poprzez pobranie takich samych aktywności roztworu wodnego zawierającego izotop promieniotwórczy do naczyń/obiektów o różnej geometrii. Do każdego źródła zostanie odpipetowana taka sama aktywność roztworu i jedyną zmienną będzie tutaj geometria źródła. Przygotowane zostaną następujące źródła:

- trójwymiarowe (roztwór wprowadzony do szklanej fiolki)
- dwuwymiarowe (bibuła nasyczona roztworem)
- roztwór w naczyniu Marinelli.

Wszystkie źródła zostaną odpowiednio zabezpieczone przed skażeniem (zakręcone, w torebce itp.). Na podstawie pomiarów dla każdego ze źródeł zostanie określony wpływ geometrii źródła na wydajność detekcji. Będzie to polegało na określeniu, dla jakiej geometrii została zarejestrowana największa ilość zliczeń. Ponieważ wszystkie źródła będą miały taką samą aktywność a czas rejestrowania widma będzie taki sam to największą wydajnością będzie charakteryzować się ta geometria, dla której uzyskamy największą ilość zliczeń. Nie jest to, zatem wydajność bezwzględna a tylko określenie najkorzystniejszej geometrii źródła (próbki).

2.3. Analiza wyników

Każdy pomiar zostanie powtórzony dwukrotnie lub więcej, jeżeli różnica pomiędzy pomiarami przekraczać będzie 5%. Uzyskane wyniki należy uśrednić. Odchylenie standardowe, σ , dla n pomiarów wyznaczamy jako:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - X)^2 + (x_2 - X)^2 + \dots + (x_n - X)^2}{n}} \quad (5)$$

gdzie $x_1 \dots x_n$ to kolejne pomiary a X to średnia arytmetyczna z pomiarów.

Znając okres półrozpadu wykorzystywanego radioizotopu należy przedyskutować wpływ spadku jego aktywności na dokonywane pomiary. Czy spadek aktywności w trakcie trwania całego ćwiczenia (czyli sumaryczny czas pomiaru wszystkich aktywności) będzie miał duże znaczenie na mierzone wartości.

Bezpieczeństwo

Aktywność sumaryczna roztworu zawierającego I131 (źródło otwarte) używanego do wytworzenia źródeł do pomiaru geometrii nie przekracza 150 kBq. Źródłem zamkniętym będzie Cs137 o aktywności ok. 37 kBq. Dane w Tabeli I dla Cs137 dotyczą układu 137Cs/137mBa w równowadze promieniotwórczej. 137mBa (okres półrozpadu 2.6 min.) powstaje z rozpadu Cs137.

Tabela I. Dane dotyczące izotopów promieniotwórczych wykorzystywanych w ćwiczeniu (Rozporządzenie RM z 18.01.2005 w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego; Canadian Nuclear Safety Commission, nuclearsafety.gc.ca; B. Gostkowska, Ochrona Radiologiczna, Suplement 1, CLOR, Warszawa, 2002).

Wielkość	I131	Cs137
Okres półrozpadu	8.04 dni	30.02 lat
Energia maksymalna promieniowania β	606 keV (89%) 334 keV (7%) 248 keV (2%)	0,514 MeV (94%) 1,176 MeV (6%)
Energia średnia promieniowania β	192 keV (89%) 97 keV (7%) 69 keV (2%)	0,157 MeV (94%) 0,415 MeV (6%)
Promieniowanie γ	723 keV (1.8%) 637 keV (7.3%) 364 keV (81.2%) 284 keV (6.1%) 80 keV (2.6%) (względem całkowitej aktywności, od Xe131)	661.6 keV
Zasięg promieniowania β w powietrzu	165 cm (606 keV)	144 cm (0,514 MeV) 1300 cm (1,176 MeV)
Całkowita absorpcja promieniowania β	0.9 mm szkła; 1.6 mm plastiku	2.1 mm szkła 3.8 mm plastiku
Obciążająca dawka skuteczna przy wchłonięciu drogą oddechową (szybkie wchłonięcie, ogół ludności >17 lat)	$7,4 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq	$4,6 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq
Obciążająca dawka skuteczna przy wchłonięciu drogą pokarmową (ogół ludności >17 lat)	$2,2 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq	$1,3 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq
Równoważnik stałej ekspozycyjnej dla promieniowania γ	$5,4 \cdot 10^{-3}$ cGyh ⁻¹ GBq ⁻¹ m ²	$8 \cdot 10^{-3}$ cGyh ⁻¹ GBq ⁻¹ m ²
Grubość połówkowa dla promieniowania γ	3,5 mm Pb	8 mm Pb
Krotność osłabienia promieniowania γ w ołowiu	10 (1 cm Pb) 90 (3 cm Pb)	10 (2 cm Pb) 90 (4 cm Pb)

I131: Moc dawki pochłoniętej (powietrze, 150 kBq I131, 10 cm od źródła) $\approx 1 \mu\text{Sv/h}$
Moc dawki pochłoniętej (powietrze, 150 kBq I131, 1 m od źródła) $\approx 9.3 \text{ nSv/h}$
Moc dawki pochłoniętej na powierzchni osłony Pb (grubość 2 cm, 150 kBq I131) $\approx 0.4 \mu\text{Sv/h}$

Cs137: Moc dawki pochłoniętej (powietrze, 37 kBq Cs137, 10 cm od źródła) $\approx 0.3 \mu\text{Sv/h}$
Moc dawki pochłoniętej (powietrze, 37 kBq Cs137, 1 m od źródła) $\approx 3 \text{ nSv/h}$
Moc dawki pochłoniętej na powierzchni osłony Pb (grubość 2 cm, 37 kBq Cs137) $\approx 0.7 \mu\text{Sv/h}$

Wszystkie prace ze źródłem otwartym, poza samym pomiarem aktywności, wykonywane są pod wyciągiem radiochemicznym. W pracy z I131 stosowane są osłony Pb o grubości ok. 6 cm.

Wszystko, co miało kontakt z I131 traktowane jest jako odpad promieniotwórczy krótkożyciowy i musi być umieszczone w odpowiednio oznakowanym pojemniku do czasu wygaśnięcia (aktywność na poziomie tła). Po tym okresie odpady takie traktowane są jako zwykłe odpady chemiczne w zależności od ich chemicznej toksyczności.

We wszystkich pracach wymagane są rękawiczki jednorazowe. W przypadku podejrzenia rozlania lub rozsypania preparatu zawierającego izotopy promieniotwórcze należy dokonać pomiaru skażenia indywidualnego oraz miejsca pracy za pomocą odpowiednich mierników skażeń. Skażone rękawice, fartuchy, gogle traktowane są jako odpad promieniotwórczy, osoby, które uległy skażeniu promieniotwórczemu poddane zostaną dekontaminacji.

Wymagania

Rodzaje rozpadów promieniotwórczych: α , β^- , β^+ , wychwyty elektronu (EC), konwersja wewnętrzna (IC); modele budowy jądra atomowego; właściwości neutronu jako cząstki elementarnej; właściwości i sposób powstawania promieniowania γ ; przekrój czynny reakcji jądrowych; naturalna abundancja izotopów; równowaga promieniotwórcza (wiekowa); detektory wykorzystywane do detekcji promieniowania jonizującego: półprzewodnikowe i scyntylicyjne.

Uwaga: nie należy uczyć się wzorów na pamięć!

Literatura

- J. Sobkowski, Chemia radiacyjna i ochrona radiologiczna, Adamantan, 2009
- A. Czerwiński, Energia Jądrowa i Promieniotwórczość, OW K. Pazdro, 1998
- W. Szymański, Chemia Jądrowa, PWN, 1996
- A. Vértes, S. Nagy, Z. Klencsár, R.G. Lovas, F. Rösch, Handbook of Nuclear Chemistry, Springer, 2011
- G.F. Knoll, Radiation Detectibn and Measurement, Wiley, 2000
- Radiochemia w Ćwiczeniach i Zadaniach, Praca Zbiorowa, Wydawnictwa UW, 1977
- B. Dziunikowski, S.J. Kalita, Ćwiczenia Laboratoryjne z Jądrowych Metod Pomiarowych, Wydawnictwa AGH, 1995
- B. Dziunikowski, Radiometryczne Metody Analizy Chemicznej, WNT, Warszawa 1991
- F.A. Ugur, EPJ Web Conf., 100 (2015) 03006