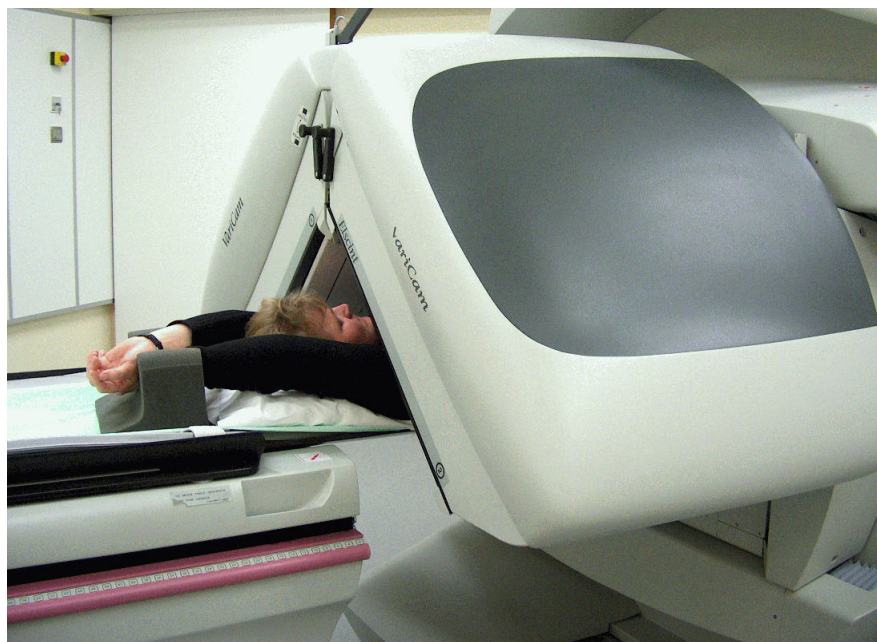


## Ćwiczenia z radiochemii 2

### Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Określenie znaku i wielkości ładunku jonów technetu-99m wykorzystywanych do otrzymywania radiofarmaceutyków

#### 1. Wstęp

Technet-99m jest radionuklidem najpowszechniej stosowanym w medycynie nuklearnej do celów diagnostycznych. Jego właściwości jądrowe: energia promieniowania gamma,  $E_\gamma = 140$  keV, mieszcząca się w optymalnym zakresie detekcji detektorów scyntylacyjnych NaI(Tl), i stosunkowo krótki okres połowicznego zaniku,  $T_{1/2} = 6,0$  h; czynią go niemal idealnym znacznikiem promieniotwórczym dla techniki SPECT (*single photon emission computerized tomography*) – komputerowej tomografii pojedynczego fotonu (rys. 1), a bogata chemia koordynacyjna technetu pozwala na otrzymywanie licznych kompleksów  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  – radiofarmaceutyków stosowanych do diagnostyki medycznej i prekursorów takich radiofarmaceutyków [1,2].

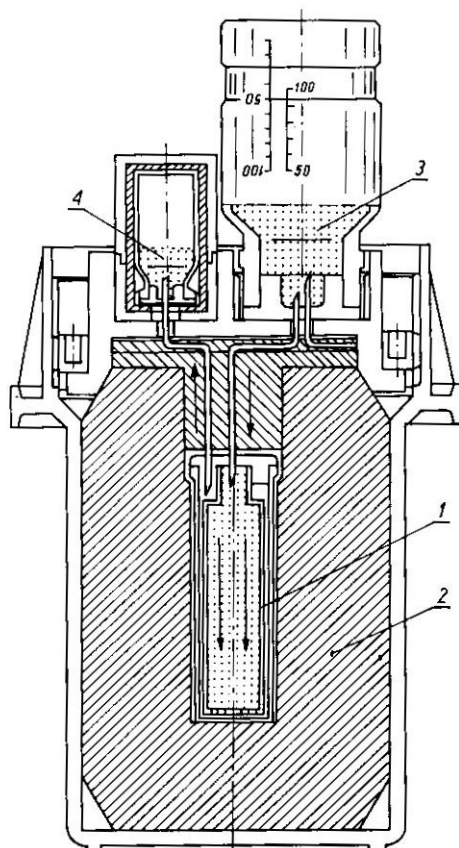


Rys.1. Gamma kamera rotacyjna, dwugłowicowa.

Zakład Medycyny Nuklearnej Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego

Łatwa dostępność i stosunkowo niski koszt radioznacznika  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  stały się możliwe dzięki opracowaniu już w latach 50. XX wieku t.zw. generatora  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  (rys. 2), który obecnie stanowi praktycznie jedyne źródło technetu-99m dla klinik medycyny nuklearnej. Zasada działania generatora radionuklidów została omówiona w poprzednim ćwiczeniu. Technet-99m powstaje w wyniku rozpadu  $\beta^-$  radionuklidu macierzystego – molibdenu-99 ( $T_{1/2} = 66$  h). Generatory najbardziej rozpowszechnionych typów mają złożę uwodnionego tlenku glinu w postaci drobnych granulek wypełniających szklaną kolumnę o średnicy ok. 1 cm i wysokości kilku do kilkunastu cm. Na kolumnę, osłoniętą dla bezpieczeństwa obsługi warstwą ołowiu, nanosi się małą ilość roztworu zawierającego do kilkudziesięciu GBq  $^{99}\text{Mo}$  w formie anionu molibdenianowego, który w bardzo małych stężeniach trwale wiąże się chemicznie ze złożem. W wyniku rozpadu  $\beta^-$  radionuklidu  $^{99}\text{Mo}$  w warstwie złoża tlenku glinu nagromadza się radionuklid pochodny w formie anionu nadtechnecjanowego,  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ . Już po kilku

godzinach jon ten może być wymyty z kolumny kilkoma ml obojętnego wodnego roztworu soli fizjologicznej (0,9% NaCl). Wydajność wymywania wynosi  $70 \div 80 \%$ . Macierzysty radionuklid  $^{99}\text{Mo}$  pozostaje na złożu kolumny i proces nagromadzania się radionuklidu  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  rozpoczyna się od nowa. W celu przygotowania radiofarmaceutyku określoną ilość eluatu z generatora wstrzykuje się do ampułki zawierającej zestaw stałych związków chemicznych (ang. „kit”). Jedne z tych związków po rozpuszczeniu się w roztworze powodują redukcję  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$  do technetu na niższym stopniu utlenienia, np. Tc(V), a inne składniki zestawu tworzą z powstałą formą technetu radiofarmaceutyk diagnostyczny, gotowy do wstrzyknięcia pacjentowi.



Rys. 2. Budowa generatora radionuklidów: 1 – kolumna generatora, 2 – ołowiany pojemnik osłony, 3 – eluent, 4 – eluat. Wg [3]; za zezwoleniem)

Współczesne generatory komercyjne pozwalają uzyskać  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  o bardzo dużych aktywnościach, przekraczających 20 GBq na szarzę, a aktywność właściwa  $^{99}\text{Mo}$  w generatorze powinna sięgać  $50 \text{ GBq mg}^{-1}$  [4]. Możliwość otrzymywania radionuklidów w stężeniach znacznikowych (bezośnikowych lub n.c.a.), szczególnie ważna dla medycyny nuklearnej, jest dodatkową zaletą stosowania generatorów.

W wyniku rozpadu promieniotwórczego macierzystego radionuklidu  $^{99}\text{Mo}$  aktywność generatora stopniowo spada. Generatory  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  używane są w klinikach medycyny nuklearnej zazwyczaj do dwóch tygodni od daty dostawy. Generator używany w niniejszym

ćwiczeniu jest starszy – już w znacznym stopniu wyczerpany i nieużyteczny dla kliniki, ale ma jeszcze wystarczająco dużą aktywność, by wykorzystywać go do celów badawczych.

W praktyce, kiedy radionuklid wymywamy z generatora wielokrotnie, nie wyczekujemy do chwili osiągnięcia stanu równowagi, lecz wymywamy go wcześniej lub znacznie wcześniej. Kierujemy się tu aktualnym zapotrzebowaniem na ten radionuklid i musimy pamiętać, że intensywność przyrostu jego aktywności wykładniczo zmniejsza się w czasie. Wymywanie  $^{99m}\text{Tc}$  z generatora powtarza się zwykle co 24 h, tj. co cztery okresy połowicznego zaniku  $^{99m}\text{Tc}$ , kiedy to ilość nagromadzonego  $^{99m}\text{Tc}$  przekracza 93% wartości maksymalnej, ale już po 6 h ilość ta wynosi 50%.

## 2. Cel ćwiczenia

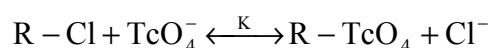
a) Wymycie z generatora  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  krótkożyciowego radionuklidu technetu-99m i określenie jego formy chemicznej, tj. znaku i wielkości ładunku jonu w roztworze;

b) Wykonanie prostych doświadczeń fizykochemicznych z preparatami promieniotwórczymi.

W wyniku samodzielnie wykonanego ćwiczenia student oswaja się z pracą laboratoryjną z otwartymi źródłami promieniotwórczymi i pomiarem aktywności promieniotwórczej, poznaje praktyczne zagadnienia dotyczące generatorów radionuklidów (w tym najważniejszego dla medycyny nuklearnej generatora  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ ) i zapoznaje się z problematyką wymiany jonowej – jednej z podstawowych radiochemicznych metod rozdzielania radionuklidów w formie jonów metali. Bardzo mała ilość wykorzystywanego w ćwiczeniu radionuklidu  $^{99m}\text{Tc}$  oraz krótki okres połowicznego rozpadu i niska energia promieniowania gamma tego radionuklidu powodują, że zagrożenie wynikające z ewentualnego skażenia promieniotwórczego jest niewielkie.

## 3. Zasada ćwiczenia

Jony zawierające  $^{99m}\text{Tc}$  (jak się oczekuje, aniony  $^{99m}\text{TcO}_4^-$ ) w rozcieńczonym wodnym roztworze HCl w kontakcie z drobnymi ziarnami żywicy anionowymiennej (anionitu) w formie  $\text{Cl}^-$  (R-Cl) ulegają procesowi wymiany jonowej:



w wyniku którego część jonów  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  sorbuje się na żywicy i początkowa aktywność właściwa roztworu zmniejsza się. Stan równowagi procesu zależy od stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  w roztworze, a stała równowagi procesu,  $K$ , jest równa (symbole  $a$  oznaczają aktywności termodynamiczne formy chemicznej podanej w indeksie dolnym):

$$K = \frac{a_{\text{R-TcO}_4} a_{\text{Cl}}}{a_{\text{R-Cl}} a_{\text{TcO}_4}}$$

Zastąpmy aktywności termodynamiczne formy  $X$  iloczynami stężeń i współczynników aktywności:  $a_X = f_X [X]$  i załóżmy, że współczynniki aktywności wszystkich form  $^{99m}\text{Tc}$  (występujących w mikroilościach) są równe jedności, a aktywność żywicy R-Cl nie zmienia się w wyniku sorpcji mikroilości jonu  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  i może być włączona do wartości stałej, która przybiera wartość  $K'$ . Wówczas:

$$K' = \frac{[R - \text{TcO}_4] f_{\text{Cl}^-} [\text{Cl}^-]}{[\text{TcO}_4^-]}$$

Oznaczmy wartość stosunku stężeń jonu  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$  w żywicy  $[\text{R-TcO}_4]$  i w roztworze  $[\text{TcO}_4^-]$  jako współczynnik podziału  $K_d$ . Wartość  $K_d$  jest funkcją stężenia i współczynnika aktywności jonu  $\text{Cl}^-$  w roztworze:

$$K_d = K' (f_{\text{Cl}^-} [\text{Cl}^-])^{-1}$$

Ponieważ sorpcja mikroilości anionu  $\text{TcO}_4^-$  praktycznie nie zmienia stężenia jonów  $\text{Cl}^-$  ani w jonicie, ani w roztworze, przyjmujemy, że te stężenia w stanie równowagi są równe stężeniom początkowym. Zakładamy, że w rozcieńczonych roztworach HCl, które stosujemy do naszych badań, wartość  $f_{\text{Cl}^-}$  praktycznie się nie zmienia, możemy więc włączyć ją do stałej  $K'$ . Wówczas po zlogarytmowaniu

$$\log K_d = \text{const} - \log[\text{Cl}^-]$$

Jeżeli jonowa forma  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  w roztworze sorbuje się na anionicie zgodnie z zasadami wymiany jonowej, to możemy przyjąć, że jest to anion zawierający  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Zależność współczynnika podziału anionu zawierającego  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  od stężenia jonów  $\text{Cl}^-$ , a w rozcieńczonych roztworach wodnych mocnego kwasu HCl - również i od stężenia HCl, pozwala na wyznaczenie ładunku anionu. Gdyby ładunek anionu zawierającego  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  był różny od  $-1$  i wynosił  $-n$ , to powyższe równanie miałoby postać:

$$\log K_d = \text{const} - n \log[\text{Cl}^-] \quad (1)$$

Wartości  $K_d$  wyznaczamy eksperymentalnie jako stosunek właściwych aktywności promieniotwórczych  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  w żywicy i w roztworze. Ponieważ jednak ziarna żywicy są zwilżone roztworem i pomiar ich aktywności właściwych jest bardzo trudny, wartości  $K_d$  wyznaczamy mierząc dla każdego stężenia HCl różnicę aktywności właściwych roztworu: początkowej,  $A_0$ , i w stanie równowagi wymiany jonowej,  $A_r$ , a właściwie  $A_r(0)$  – po uwzględnieniu poprawki na rozpad krótkożyłowego radionuklidu  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ :

$$K_d = \frac{(A_0 - A_r(0)) \times V}{A_r(0) \times m} \quad (2)$$

gdzie  $V$  oznacza objętość roztworu HCl (ml), a  $m$  – masę jonitu (g). Odkładając tak wyznaczone wartości  $\log K_d$  w funkcji  $\log[\text{HCl}]$  powinniśmy otrzymać linię prostą, której nachylenie jest równe wartości ładunku zawierającego  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Niewielkie odchylenia tej wartości od liczby całkowitej mogą świadczyć o niespełnieniu naszych założeń o stałości współczynników aktywności jonu  $\text{Cl}^-$  w serii badanych roztworów HCl.

#### 4. Opis ćwiczenia – instrukcja dla studentów

Przed przystąpieniem do ćwiczenia student musi wykazać się przed opiekunem prowadzącym ćwiczenie znajomością podstawowych zasad bezpieczeństwa pracy laboratoryjnej z otwartymi źródłami promieniotwórczymi. Po dopuszczeniu przez prowadzącego ćwiczenie student otrzymuje dostęp do profesjonalnego generatora  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  o niskiej aktywności promieniotwórczej, już długo używanego w klinice i nadającego się tylko do celów demonstracyjnych, po czym może przystąpić do wykonania prac opisanych poniżej. Wszystkie prace z preparatami promieniotwórczymi ćwiczący wykonuje w specjalnym stanowisku (wyciągu radiochemicznym) za osłoną z cegieł ołowianych, ubrany w ochronny fartuch laboratoryjny z filmem dozymetrycznym i jednorazowe gumowe rękawiczki chirurgiczne.

## Przebieg ćwiczenia

Grupa pięciu ćwiczących otrzymuje od opiekuna prowadzącego ćwiczenie wodne roztwory HCl o stężeniach: 0,5; 0,7; 1,0, 1,4 i 2,0 mol dm<sup>-3</sup> (każdy inne) oraz porcje suchego anionitu Dowex 1x8 o uziarnieniu 400 mesh w formie Cl<sup>-</sup> otrzymane w wyniku wielokrotnego przemywania anionitu roztworem HCl o takim stężeniu, jakie zostanie zastosowane w eksperymencie. Każdy z ćwiczących odważa na wadze analitycznej dwie odważki anionitu (po około 30 - 40 mg; zapisuje te liczby!), a do dwóch plastikowych próbek z korkiem dodaje po 5 ml otrzymanego roztworu HCl. Prowadzący ćwiczenie pobiera w obecności ćwiczących eluat z generatora <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc i mierzy jego aktywność właściwą. Każdy z ćwiczących dodaje do próbek z roztworem HCl określoną przez opiekuna porcję (kilkadziesiąt µl) eluatu z generatora <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc. Po dokładnym wymieszaniu roztworów ćwiczący mierzą w liczniku scyntylacyjnym NaI(Tl) 3 razy po 1 min. początkową aktywność 50 µl próbki każdego roztworu, A<sub>0</sub> (Uwaga! Należy pamiętać o odjęciu wartości tła licznika!), notując dokładny czas t<sub>0</sub>, w jakim zakończono pomiar. Do każdej z próbek ćwiczący dosypują swoje odważki anionitu i wytrząsają te próbki w specjalnym urządzeniu przez kilkadziesiąt minut aż do chwili ustalenia się równowagi jonowymiennej. Co 10 minut ćwiczący przerywają wytrząsanie, pobierają pipetą automatyczną po dwie 50 µl (lub 100 µl) porcje roztworu, zwracając uwagę, żeby do pipety nie dostało się nawet najmniejsze ziarno jonitu (w razie konieczności próbki można wcześniej odwirować w specjalnej wirówce) i mierzą kilkakrotnie ich aktywności właściwe w liczniku scyntylacyjnym NaI(Tl). Ćwiczący notują dokładny czas zakończenia pomiaru, t, i zmierzoną średnią wartość A<sub>r</sub> przeliczają według wzoru

$$A_r = A_r(0) \times e^{-\lambda t}$$

opisującego spadek aktywności w wyniku rozpadu promieniotwórczego ( $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$ ), na wartość A<sub>r</sub>(0) odpowiadającą czasowi t<sub>0</sub> [5]. Następnie korzystając ze wzoru (2) każdy ćwiczący oblicza wartość K<sub>d</sub> odpowiadającą określonemu stężeniu HCl w badanym przez siebie roztworze. Po ustaleniu się stanu równowagi, kiedy mierzona wartość K<sub>d</sub> ustala się dla każdego roztworu, ćwiczący tworzą razem wspólny wykres określony wzorem (1), prowadząc przez punkty eksperymentalne linię prostą (metodą najmniejszych kwadratów) i określając wartość nachylenia prostej n. Ćwiczący omawiają uzyskany wynik, podając znak i wielkość ładunku jonu technetu i wyciągając wnioski dotyczące poczynionych wcześniej założeń.

## Literatura

- [1] A. G. Jones, Radiochim. Acta, 70/71 (1995) 289-297.
- [2] R. Alberto, U. Abram, in: Handbook of Nuclear Chemistry, A. Vértes, S. Nagy, Z. Klencsár (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, Vol. 4, pp. 211-256.
- [3] E. Iller, J. Thyn, Metody radioznacznikowe w praktyce przemysłowej, WNT, Warszawa, 1994.
- [4] S. Mirzadeh, L.F. Mausner, M.A. Garland, in: Handbook of Nuclear Chemistry, A. Vértes, S. Nagy, Z. Klencsár (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, Vol. 4, pp. 1-46.
- [5] W. Szymański, Chemia jądrowa, Wyd. 2, PWN, Warszawa, 1996.