

Źródła promieniotwórcze dla celów medycznych (**)

RADIONUKLIDY lub RADIOIZOTOPY – to izotopy promieniotwórcze, czyli takie które samorzutnie podlegają przemianie promieniotwórczej. Jeżeli mają służyć do celów diagnostyki medycznej, to muszą spełniać szereg warunków, z których do najistotniejszych należą:

1. Okres półrozpadu powinien być taki, aby zapewnić optymalny stosunek uzyskiwanej informacji na temat badanego organu, do dawki promieniowania aplikowanej w zabiegu pacjentowi.
2. Dla celów diagnostyki stosuje się izotopy emitujące promieniowanie gamma i byłoby najlepiej, gdyby nie towarzyszyła temu emisja promieniowania alfa lub beta. Promieniowanie to stanowi bowiem dawkę obciążającą pacjenta, a nie dostarcza użytecznej informacji. Należy więc wybierać takie radioizotopy, by dawka ta była minimalna. Wyjątek stanowi tu diagnostyka PET, gdzie stosowane są źródła emitujące pozytony.
3. Energia emitowanych fotonów powinna zawierać się w granicach ok.: 100 – 500 keV. Przy wyższych energiach trudniej jest zapewnić kolimację wiązki, a wydajność detekcji fotonów jest mniejsza.
4. Izotop powinien łączyć się w takie związki chemiczne, które umożliwią ich wchłanianie przez organy podlegające badaniu oraz o stosunkowo krótkim czasie wydalania.
5. Powinien być łatwo dostępny i niedrogi.

(**) W prezentacji tej wykorzystano materiały opracowania: VI. PRODUKCJA RADIONUKLIDÓW
http://ncbj.edu.pl/zasoby/wyklady/ld_podst_fiz_med_nukl-01/med_nukl_06_v4.pdf

Produkcja źródeł promieniotwórczych dla celów medycznych

Najczęściej stosowane metody otrzymywania źródeł dla celów medycznych to:

1. Reakcje zachodzące pod wpływem neutronów z reaktora jądrowego,
2. Reakcje wywoływane przez cząstki naładowane przyspieszane w akceleratorach,
3. Nuklidy uzyskiwane w reakcjach rozszczepienia ciężkich jąder atomowych.

Uzyskiwana aktywność zależy od wielu czynników. Do najważniejszych należą:

1. Czas napromieniania izotopu wyjściowego, t .
2. Przekrój czynny dla reakcji jądrowej, w której produkowany jest radioizotop, σ ,
3. Stała rozpadu produkowanego radioizotopu, λ ,
4. Wielkość tarczy wyrażana przez liczbę jąder w jednostce objętości, N ,
5. Gęstość strumienia cząstek wyrażana w liczbie cząstek na jednostkę czasu, Φ .

Warto zauważyć, że naświetlanie zbyt długie, w stosunku do czasu półrozpadu produkowanego izotopu, nie jest celowe. Produkowany izotop rozpada się bowiem już w czasie naświetlania, o czym mówi czynnik eksponentyjalny, i kiedy przyrost aktywności zrówna się z szybkością rozpadu, to przyrostu aktywności nie będzie.

Aktywność nasycenia (saturacji) można wyrazić wzorem:

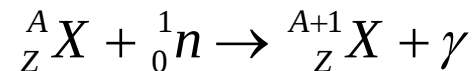
$$A = \Phi \cdot N \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

Produkcja źródeł promieniotwórczych w reaktorze jądrowym

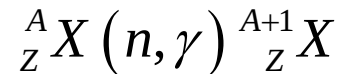
Reakcje, w których produkowane są izotopy promieniotwórcze wywoływane są zwykle przez neutrony o małych energiach (mniejszych niż ok. 0,1 MeV), tzw. neutrony termiczne.

Neutrony takie pochłaniane są przez jądra materiału naświetlanego w reaktorze.

Reakcje takie mogą być zapisane w postaci:

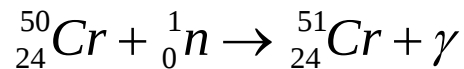


co może też być zapisane w postaci:

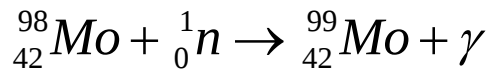


W reakcji tej nie zmienia się liczba protonów w jądrze, a więc nazwa pierwiastka pozostaje niezmienniona. Wzrasta natomiast liczba neutronów. W rezultacie jądra takie ulegają zwykle rozpadowi β^- .

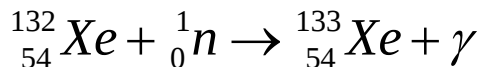
Przykładowe reakcje:



Stosowany m.in. do znakowania czerwonych ciałek krwi.



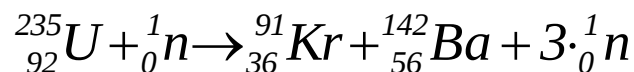
Stosowany do produkcji izotopu technetu.



Jest w postaci gazowej i stosowany w badaniach płuc.

Nuklidy promieniotwórcze uzyskiwane w reakcjach rozszczepienia

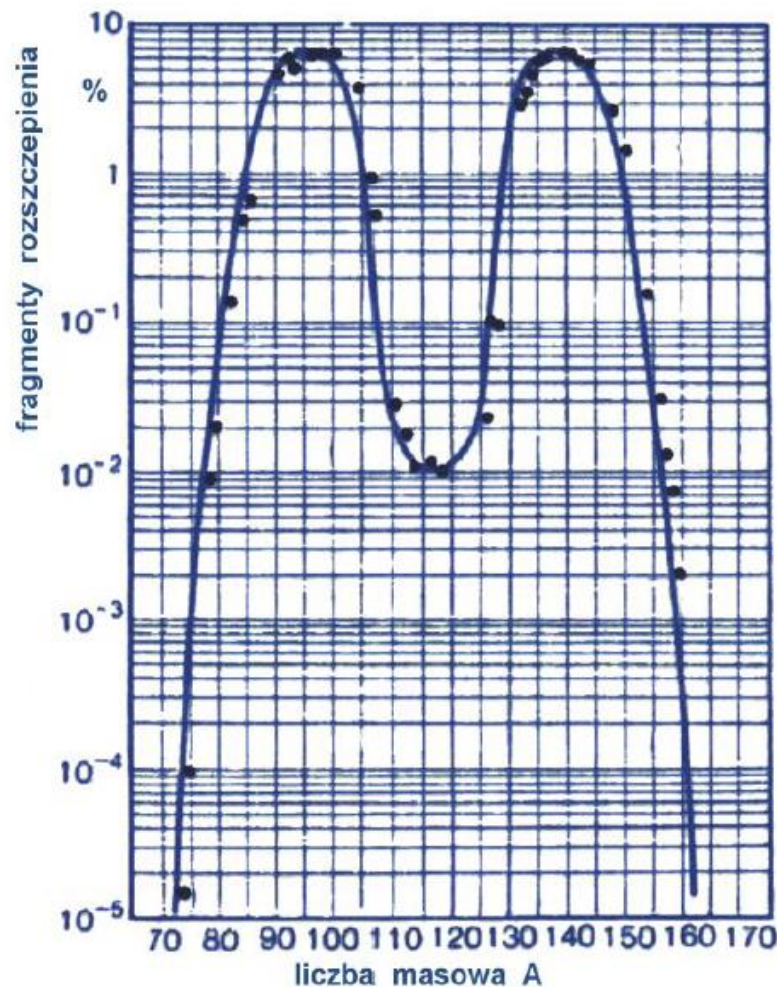
Rezultatem rozszczepienia uranu w reaktorach jądrowych są jądra promieniotwórcze, które mogą być użyteczne dla celów medycznych. Przykładowa reakcja rozszczepienia może być zapisana w postaci:



Rozkład mas – produktów rozszczepienia pokazuje rysunek obok (**).

Rozkład ten posiada minimum w rejonie połowy masy uranu i dwa maksima dla mas większych i mniejszych, co pokazują też liczby masowe produktów rozszczepienia w podanej wyżej przykładowej reakcji.

Przykładowymi izotopami, pozyskiwanym z reakcji rozszczepienia dla celów medycznych, są izotopy: ${}^{99}\text{Mo}$, ${}^{131}\text{I}$, ${}^{133}\text{Xe}$.



Diagnostyka medyczna z pomocą izotopu technetu

Izotop technetu ^{99m}Tc jest jednym z najczęściej stosowanych izotopów w diagnostyce medycznej. Jest po temu kilka powodów:

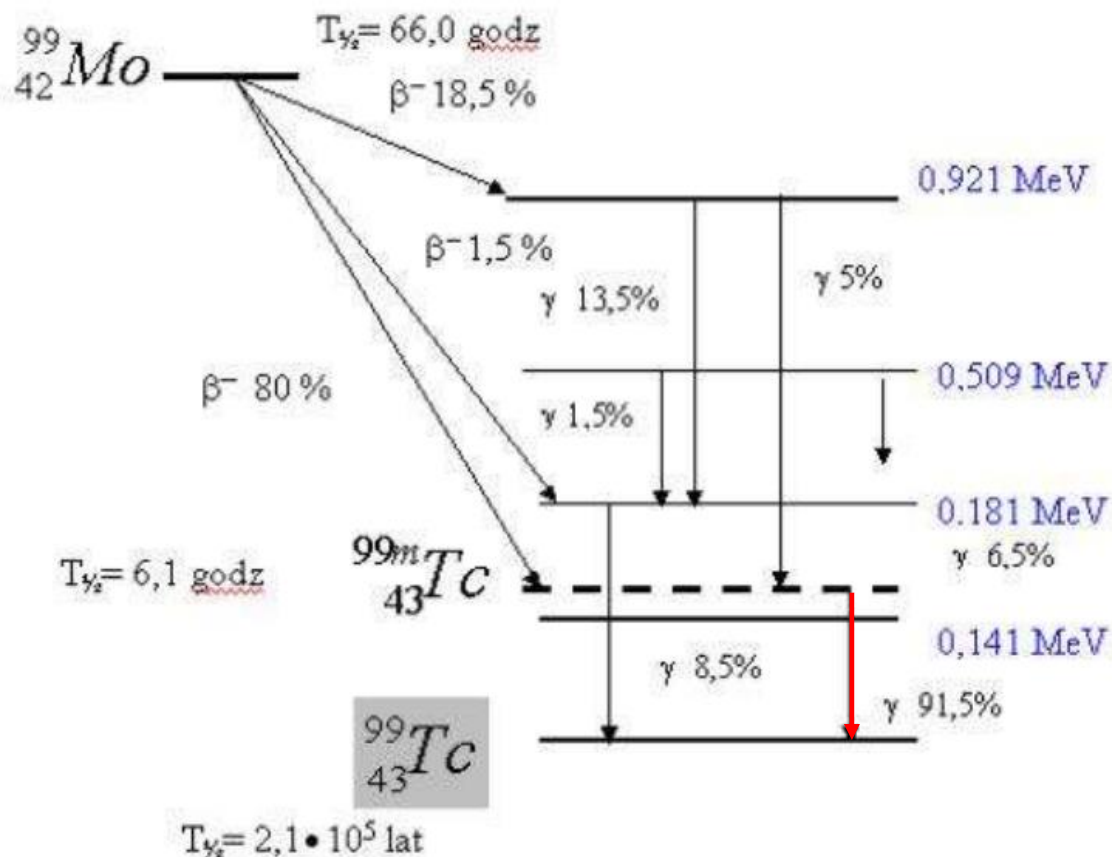
1. Okres półrozpadu (6 godz.) jest odpowiedni dla zastosowania w tomografii pojedynczego fotonu SPECT oraz dla wielu innych zastosowań medycznych.
2. Energia emitowanego przez ten izotop promieniowania gamma (140 keV) jest optymalna dla detekcji z pomocą detektorów scyntylicyjnych NaI(Tl).
3. Pozyskiwanie tego izotopu możliwe jest z pomocą łatwych w transporcie generatorów. Może więc być stosowany w stacjach diagnostycznych rozmieszczonych w różnych lokalizacjach.
4. Promieniowaniu gamma tego izotopu nie towarzyszy inny rodzaj promieniowania, bowiem emisja fotonów jest rezultatem przejścia ze stanu izomerycznego tego izotopu do stanu podstawowego.

Izotop ten nie występuje w przyrodzie i produkowany jest w sposób pośredni z izotopu molibdenu, który uzyskiwany jest w reaktorach jądrowych w reakcjach rozszczepienia lub wskutek wychwytu neutronu.

Izotop technetu ^{99m}Tc otrzymywany jest w rezultacie rozpadu beta minus izotopu molibdenu ^{99}Mo . Schemat tego rozpadu pokazany jest na rysunku poniżej (*). Okres półrozpadu ^{99}Mo wynosi 66 godzin, natomiast izotopu ^{99m}Tc – tylko 6,1 godziny. W wyniku przejścia izomerycznego do stanu podstawowego emitowany jest foton o energii 0,141 MeV.

Przejście to zaznaczone jest **czerveną** strzałką.

$$\frac{T_{1/2}(^{99}_{42}\text{Mo})}{T_{1/2}(^{99m}_{43}\text{Tc})} = \frac{66}{6,1} \approx 10,8$$



(*) Schemat został skopiowany z opracowania:

L. Dobrzyński, E. Droste, W. Trojanowski, „Elementy Fizyki Promieniowania Jonizującego”

http://ncbj.edu.pl/zasoby/rozne/elementy_fiz_prom_jonizujacego.pdf

Generator technetu

Podstawą działania generatora jest rozpad długożyciowego jądra macierzystego do krótko-życiowego jądra, generowanego radionuklidu. W przypadku generatora technetu, jądrem macierzystym jest jądro molibdenu, $^{99}_{42}\text{Mo}$, a jądrem generowanym jest metastabilny stan jądra technetu, $^{99m}_{43}\text{Tc}$.

Zasadę działania generatora ilustruje rysunek obok.

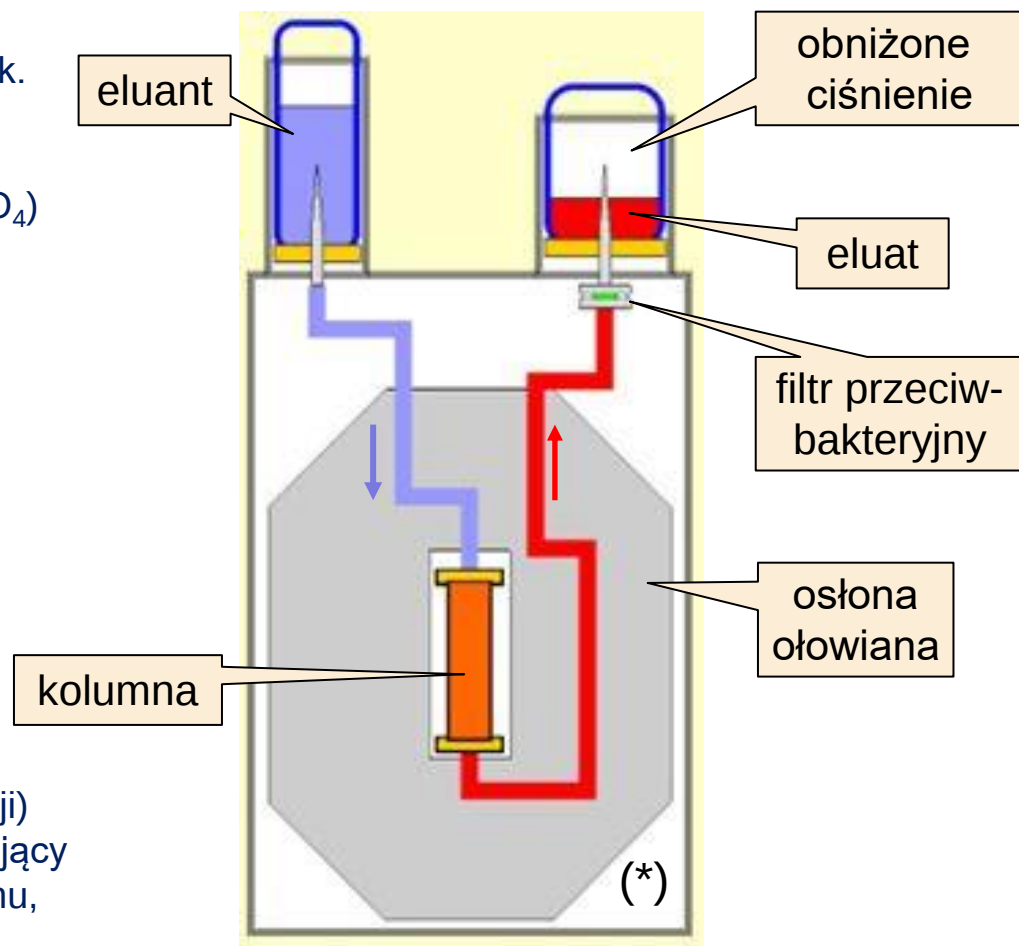
W kolumnie znajduje się trójtlenek glinu (Al_2O_3) z zaadsorbowanym molibdenianem sodu ($\text{Na}_2^{99}\text{MoO}_4$). Kolumna znajduje się w grubej osłonie ołowianej.

Fiolka niebieska zawiera wodny roztwór chlorku sodu (NaCl) (sól fizjologiczną).

Fiolka czerwona (próżniowa) ma wypompowane powietrze, co umożliwia proces zasysania.

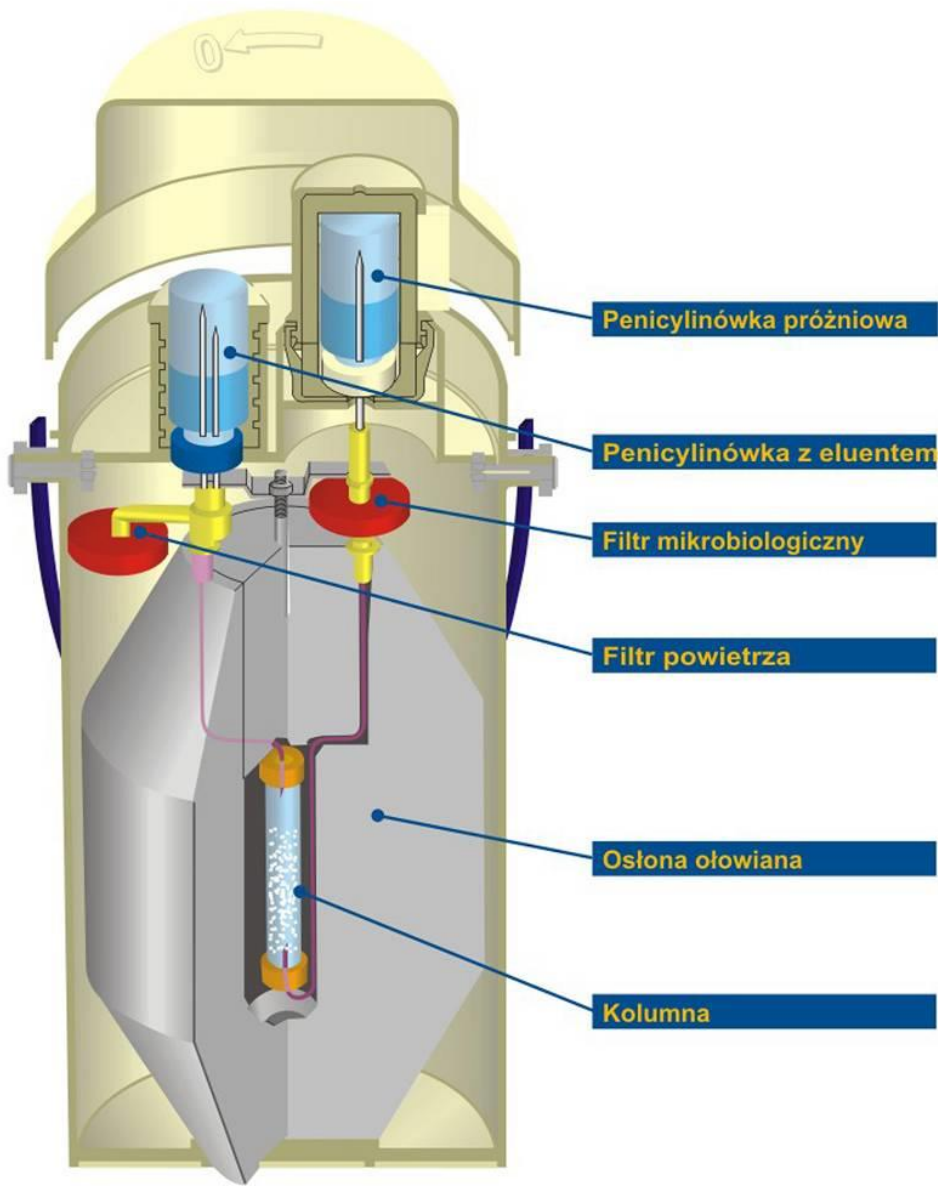
Znajdujący się pod fiolką filtr przeciwbakteryjny zapewnia sterylność zasysanego roztworu.

Działanie generatora polega na wymywaniu (elucji) przez sól fizjologiczną (**eluant**) z kolumny, powstający w niej wskutek rozpadu radioaktywnego molibdenu, metastabilny izotop technetu ^{99m}Tc w postaci nadtechnecjanu sodu ($\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$), (**eluat**)



(*) Schemat pochodzi z opracowania:
C. Świątaszczyk, Radiofarmacja - Medycyna Nuklearna,
<http://www.nuk.org.pl/index.php?la=pl&go=radfa>

Generator technetu produkowany przez Ośrodek Radioizotopów POLATOM W Narodowym Centrum Badań Jądrowych (**)



Na rysunku poniżej pokazana jest zmiana w czasie aktywności izotopu pierwotnego (molibdenu) oraz, będącego wynikiem rozpadu, izotopu wtórnego (technetu).

(Wykres ten otrzymany został z pomocą aplikacji do analizy rozpadów sukcesywnych.)

Krzywą **czerveną** pokazana jest aktywność molibdenu, krzywą **zieloną** - aktywność technetu.

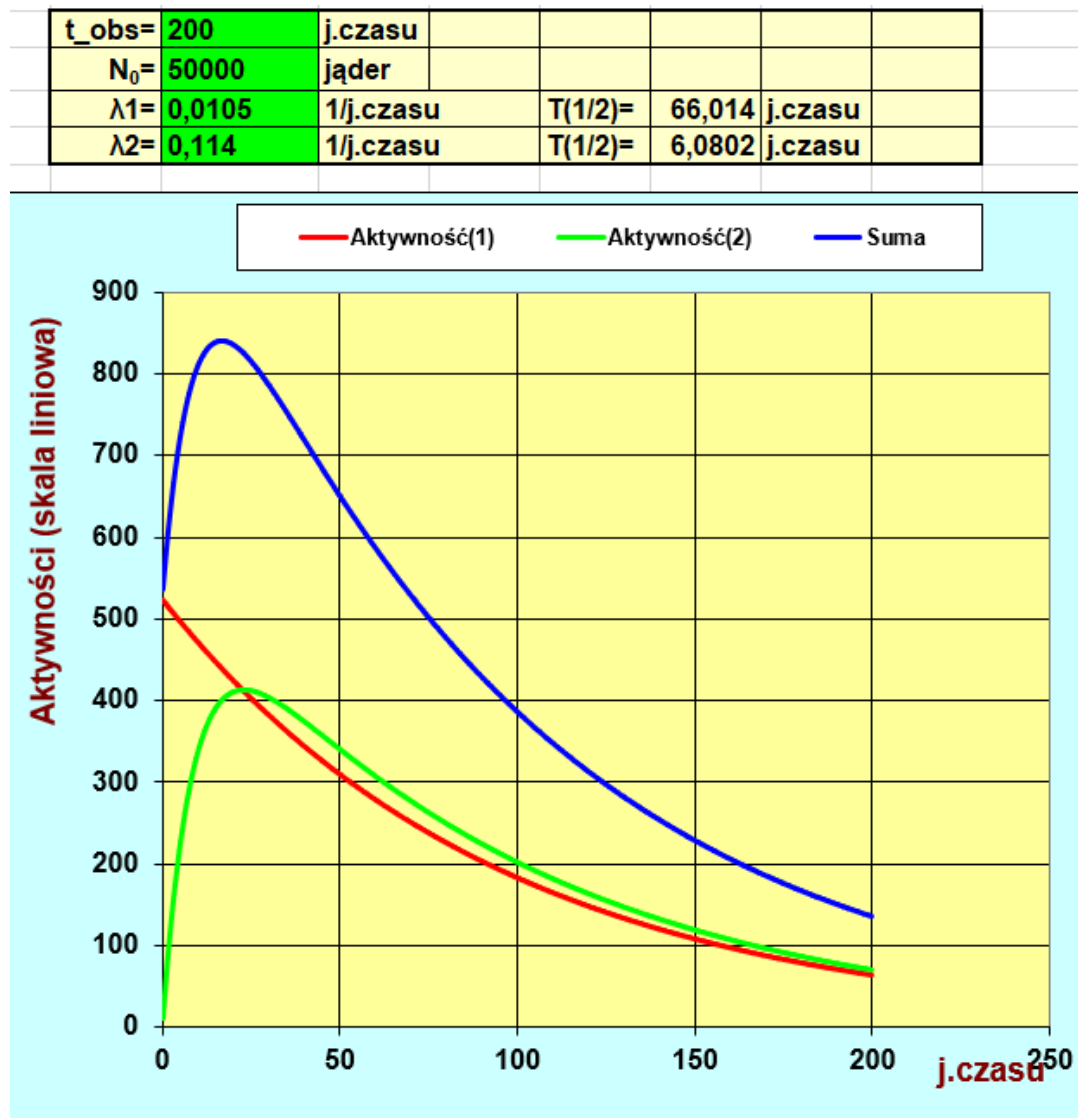
Widzimy, że po ok. 30 godzinach aktywności obu izotopów są podobne, czyli osiągnięty został stan równowagi.

Czas obserwacji ($t_{\text{obs}} = 200$ godz.), czyli nieco ponad 8 dni.

Aktywność technetu osiąga wartość maksymalną po czasie ok. jednej doby, po czym zmniejsza się podobnie jak aktywność molibdenu. W czasie tej obserwacji aktywność zmniejszyła się ponad czterokrotnie.

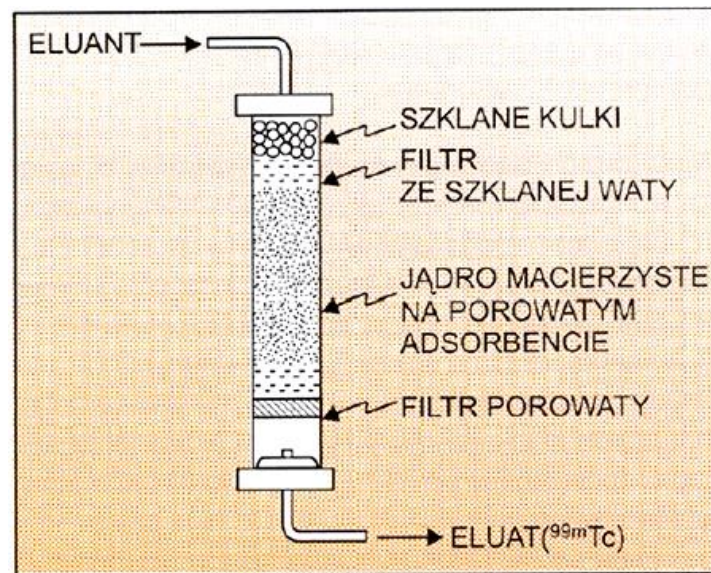
Jest to właśnie czas, w którym można używać generator do celów diagnostycznych. Potem należy ponownie uzupełnić molibden w kolumnie.

(Wykres ten otrzymany został z pomocą aplikacji do analizy rozpadów sukcesywnych.)

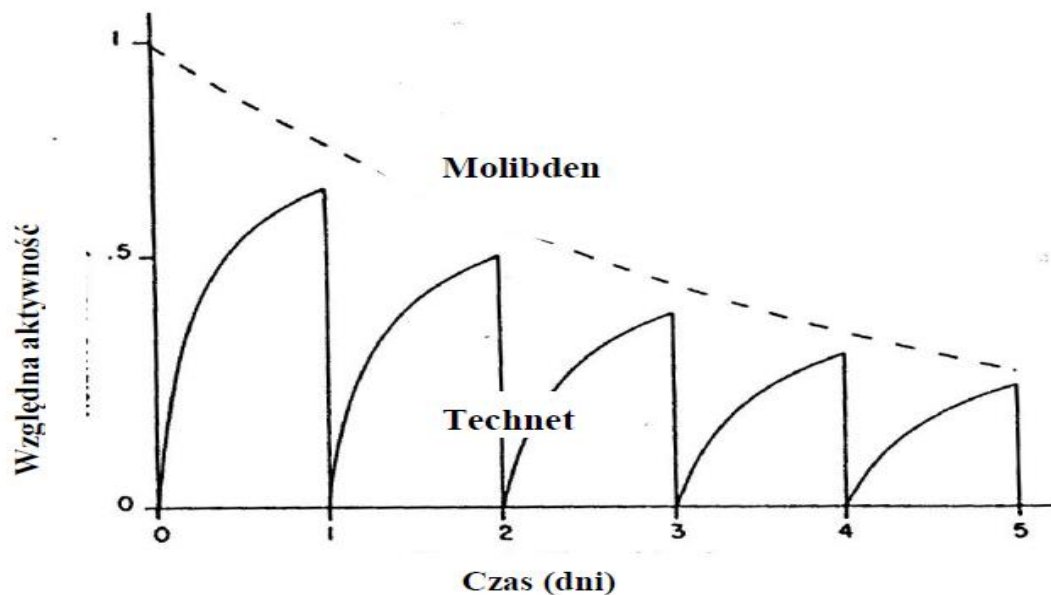


Na rysunku obok (**) pokazany jest schemat budowy kolumny chromatograficznej służącej do rozdzielania radioizotopów.

Rysunek poniżej (**) przedstawia zmiany w czasie aktywności zawartego w kolumnie molibdenu i technetu dla przypadku, kiedy technet jest codziennie (co 24 godziny) usuwany z generatora.



Rysunek poniżej (**) przedstawia zmiany w czasie aktywności zawartego w kolumnie molibdenu i technetu dla przypadku, kiedy technet jest codziennie (co 24 godziny) usuwany z generatora.



Wiele interesujących informacji zawiera też opracowanie SLCJ

„Produkcja radioizotopów medycznych”

http://www.old.slcj.uw.edu.pl/pl/events/Warsztaty/warsztaty2016/warsztaty2016_szkliniarz.pdf