

# POMIARY UWOLNIEŃ GAZÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH Z REAKTORA JĄDROWEGO.

## ĆWICZENIE 3

**Jan Lechniak**  
**Krzysztof Pytel**

Materiał dydaktyczny dla Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, opracowany w ramach zadania nr 33:  
„Modyfikacja kształcenia na Wydziale Fizyki w zakresie wykorzystywania technik i technologii jądrowych w gospodarce narodowej” projektu „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (Program Operacyjny Kapitał Ludzki)



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



**PROGRAM ROZWOJOWY**  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Świerk, grudzień 2009

### **Ćwiczenie 3. Pomiary uwolnień gazów promieniotwórczych z reaktora jądrowego**

#### ***Cel ćwiczenia***

Celem ćwiczenia jest ocena emisji gazów promieniotwórczych uwalnianych do środowiska przez komin reaktora MARIA. Poznanie źródeł powstawania i rodzaje emitowanych gazów pozwolą na ocenę szczelności elementów paliwowych w zagadnieniach bezpieczeństwa pracy reaktora. Uczestnictwo w poborze próbek pozwoli na poznanie roli układów wentylacji w systemie ochrony radiologicznej reaktora. Spektrometryczne pomiary aktywności emitowanych gazów, wykonane za pomocą specjalnej komory emitowanych gazów pozwalają na porównanie wielkości emisji z roboczymi limitami uwolnień.

#### ***Przygotowanie ćwiczenia***

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się z następującymi zagadnieniami z zakresu fizyki reaktorów:

- zasada działania reaktora jądrowego (rozszczipienie jąder, reakcja łańcuchowa, neutrony natychmiastowe i opóźnione, źródła neutronów w reaktorze, stabilizacja mocy reaktora),
- źródła promieniotwórczych gazów szlachetnych w reaktorze MARIA,
- bariery bezpieczeństwa zapobiegające przenikaniu gazowych produktów rozszczepień do środowiska,
- budowa detektorów półprzewodnikowych,
- detektory do pomiarów spektrometrycznych promieniowania gamma,
- wydajność detekcji, energetyczna zdolność rozdzielcza,
- wielokanałowe analizatory amplitudy służące do przeprowadzania i analizy pomiarów spektrometrycznych.

W ramach przygotowania do ćwiczenia zostanie przedstawiony spektrometryczny zestaw pomiarowy wraz z komorą do pomiaru próbek gazów oraz zespół ciągłych pomiarów gazów emitowanych przez komin reaktora za pomocą stacjonarnego systemu dozymetrycznego.

### ***Przebieg ćwiczenia***

Pomiary uwolnień gazów promieniotwórczych wykonywane są na mocy nominalnej reaktora MARIA. Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy przeprowadzić sprawdzenie kalibracji energetycznej jako niezbędnego elementu dla procedury identyfikacji izotopów w komorze pomiarowej.

Przewidywane są następujące etapy ćwiczenia:

- pomiar tła promieniowania gamma w domku pomiarowym z komorą pomiarową przed napełnieniem próbki powietrza z komina reaktora,
- opróżnienie komory z powietrza pompą próżniową,
- napełnienie komory powietrzem zasysanym z komina reaktora przez pompę próżniową,
- odczyt wydatku powietrza usuwanego przez komin reaktora,
- przeniesienie komory i umieszczenie na detektorze germanowym.

Wyniki pomiarów w postaci zbiorów tekstowych zawierają zidentyfikowane izotopy promieniotwórcze oraz sumę liczby zliczeń netto w pikach.

### ***Opracowanie wyników***

Opracowanie wyników pomiarów obejmuje następujące etapy:

- wyznaczenie zależności wydajności od energii dla detektora germanowego na podstawie otrzymanych par danych: energia-wydajność,
- obliczenie aktywności poszczególnych gazów promieniotwórczych zawartych w komorze pomiarowej z uwzględnieniem wydajności kwantowej oraz czasu trwania pomiaru,
- korekta otrzymanych wyników uwzględniająca efekty rozpadu promieniotwórczego w czasie transportu próbki do stanowiska pomiarowego oraz w trakcie trwania pomiaru,
- porównanie obliczonych uwolnień do roboczych godzinnych limitów uwolnień w reaktorze MARIA przekazanych w materiałach do ćwiczenia.

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać krótki opis poszczególnych etapów opracowywania wyników.

Dodatek A

## Spis treści

1. WSTĘP
  2. ŹRÓDŁA PROMIENIOTWÓRCZYCH GAZÓW SZLACHETNYCH W REAKTORZE
  3. BARIERY BEZPIECZEŃSTWA W REAKTORZE MARIA I UPROSZCZONY MODEL ICH PRZENIKANIA
  4. POMIAR SZYBKOŚCI UWALNIANIA GAZÓW SZLACHETNYCH Z REAKTORA MARIA
  5. LIMITY SZYBKOŚCI UWOLNIEŃ SUBSTANCJI PROMIENIOTWÓRCZYCH DO OTOCZENIA
- REFERENCJE

## 1. WSTĘP

Pod wpływem neutronów w reaktorze jądrowym zachodzi szereg reakcji jądrowych, z których najważniejsze to reakcje rozszczepień w paliwie. W reakcjach rozszczepień powstaje kilkadziesiąt, na ogół aktywnych produktów rozszczepień. Ponadto w materiałach konstrukcyjnych rdzenia, paliwie a także chłodziwach zachodzą reakcje jądrowe, którym również towarzyszy powstawanie izotopów promieniotwórczych.

Konstrukcja reaktora stanowi szereg barier, uniemożliwiających lub co najmniej znacznie utrudniających przedostawanie się substancji radioaktywnych do środowiska. Szczególnie starannie konstruowane są bariery osłaniające źródło największych aktywności, jakimi są produkty rozszczepień.

Wśród produktów rozszczepień i aktywacji najtrudniej zapobiec uwalnianiu do środowiska gazów szlachetnych. Pomiaru skażeń promieniotwórczych uwalnianych do otoczenia wraz z powietrzem potwierdzają, słabszą niż w innych przypadkach, skuteczność barier w przypadku gazów szlachetnych. Źródła emisji promieniotwórczych gazów szlachetnych w reaktorze jądrowym zostaną omówione w rozdziale 2.

Na przykładzie reaktora badawczego MARIA w rozdziale 3 omówione zostaną bariery bezpieczeństwa, zapobiegające lub co najmniej minimalizujące uwolnienia substancji promieniotwórczych do otoczenia. Przedstawiony zostanie również prosty model przenikania gazowych substancji promieniotwórczych przez bariery. Znając rzeczywiste szybkości uwalniania wybranych gazów szlachetnych do otoczenia można w oparciu o ten model oszacować

W rozdziale 4 opisana zostanie metoda pomiaru szybkości uwalniania gazów promieniotwórczych z reaktora MARIA. Każdy obiekt jądrowy lub stosujący lotne i gazowe substancje promieniotwórcze ma określone tzw. limity uwolnień tych substancji. Sposób określania tych limitów zostanie krótko omówiony w rozdziale 5, gdzie podane zostaną wybrane wielkości limitów szybkości uwolnień dla reaktora MARIA.

## 2. ŹRÓDŁA PROMIENIOTWÓRCZYCH GAZÓW SZLACHETNYCH W REAKTORZE

### *Argon-41*

W reaktorach jądrowych chłodzonych wodą najsilniejszym, w sensie aktywności, źródłem radioaktywnych gazów szlachetnych nie są gazowe produkty rozszczepień lecz produkt aktywacji argonu – izotop promieniotwórczy  $^{41}\text{Ar}$ . Powstaje on w reakcji wychwytu radiacyjnego:  $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$ , zachodzącej przede wszystkim pod wpływem neutronów termicznych. Neutrony termiczne, o średnich energiach około 25 meV, dominują w rdzeniach reaktorów jądrowych wykorzystujących jako paliwo uran-235.

Argon-40 to podstawowy izotop (99.6%) argonu naturalnego, występującego w powietrzu; zawartość argonu w powietrzu wynosi 0.93%. Woda chłodząca paliwo i pozostałe elementy rdzenia reaktora zawiera pewną ilość rozpuszczonego powietrza. Argon zawarty w tym powietrzu jest transportowany wraz z wodą do rdzenia i tam ulega aktywacji. Ponieważ izotop  $^{41}\text{Ar}$  ulega rozpadowi z okresem połowicznego zaniku 1.83h (stała rozpadu  $\lambda_{\text{Ar-41}} = 1.05 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) oraz uwalnianiu z wody do powietrza, jego stężenie w wodzie ustala się na pewnym poziomie po upływie kilku godzin od rozpoczęcia pracy reaktora. Ustala się również szybkość uwalniania tego gazu do otoczenia.

### *Gazowe produkty rozszczepień*

W przypadku idealnie szczelnego paliwa produkty rozszczepień zatrzymują się w podstawowej barierze, jaką jest koszulka elementu paliwowego. Dotyczy to również gazowych produktów rozszczepień. W niektórych paliwach, jak np. w paliwie MR stosowanym w reaktorze MARIA, dodatkową barierą jest sama struktura paliwa. Warstwę paliwową stanowi dyspersja tlenku uranu w aluminium, co utrudnia migrację gazów w materiale paliwa.

Produkty rozszczepień mogą jednak uwalniać się z paliwa na skutek takich efektów jak zabrudzenie powierzchniowe paliwa uranem, wada produkcyjna lub degradacja koszulki paliwowej w czasie eksploatacji paliwa (np. korozja wżerowa). We wszystkich tych przypadkach produkty rozszczepień zostają unoszone przez chłodziwo, a stąd różnymi drogami mogą przedostać się do otoczenia.

Pojedyncze rozszczepienie jądra uranu-235 prowadzi do powstania dwóch produktów rozszczepień. Rozkład prawdopodobieństwa liczb masowych tych produktów ma charakterystyczne maksima dla liczb masowych  $\sim 100$  i  $\sim 140$ . W pobliżu

tych dwóch maksimów wydajności występują izotopy kryptonu i ksenonu. Są to dwa pierwiastki – gazy szlachetne, będące produktami rozszczepień. W tabeli I zestawiono te izotopy kryptonu i ksenonu, których zawartość w paliwie i tym samym możliwość uwolnienia do otoczenia, są znaczące. Podano również tzw. wydajności wyjścia  $\gamma_i$ , czyli skumulowane prawdopodobieństwa wyjścia na jedno rozszczepienie oraz okresy połowicznego zaniku tych izotopów.

Ponieważ procedura pomiaru emisji radioaktywnych gazów szlachetnych polega na poborze próbki powietrza z komina reaktora, a następnie spektrometrycznym pomiarze ich aktywności, izotopy o okresie połowicznego zaniku poniżej kilkunastu minut zanikają. Konieczne jest również, aby podczas rozpadów emitowały wyraźnie wydzielone linie gamma. W tabeli zaznaczono (szare tło) te izotopy, które są praktycznie mierzone w reaktorze MARIA.

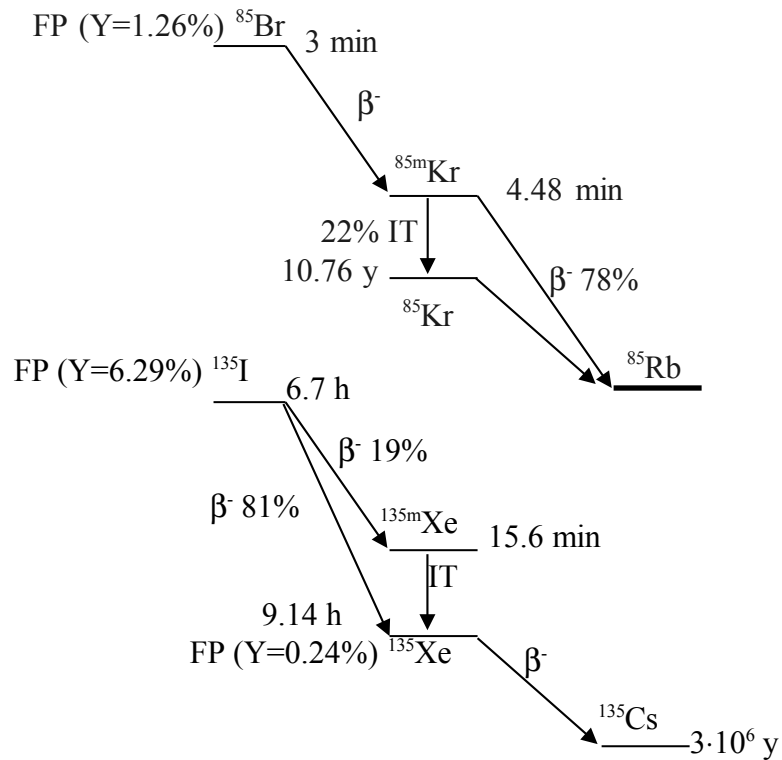
Tabela I. Gazy szlachetne – produkty rozszczepień.

Izotop	$\gamma_i$ [%]	$T_{1/2}$	Izotop	$\gamma_i$ [%]	$T_{1/2}$
Kr-83m	0.54	1.83 h	Xe-133m	0.19	2.19 d
Kr-85m	1.26	4.48 h	Xe-133	6.70	5.24 d
Kr-85	0.27	10.76 y	Xe-135m	1.21	15.3 min
Kr-87	2.51	76 min	Xe-135	6.53	9.14 h
Kr-88	3.57	2.84 h	Xe-137	6.11	3.8 min
Kr-89	4.61	3.2 min	Xe-138	6.37	14.1 min

Znając szybkości emisji tylko niektórych gazowych produktów rozszczepień można ocenić szybkość emisji pozostałych. Kody obliczeniowe (np. [1]) pozwalają na obliczenie szybkości produkcji i koncentracji produktów rozszczepień w paliwie. Przyjmując, że mechanizmy uwalniania do otoczenia są identyczne dla tych samych pierwiastków (np. izotopów kryptonu lub ksenonu), można określić szybkość uwalniania wszystkich produktów rozszczepień, izotopów tego samego pierwiastka.

Gazy szlachetne – produkty rozszczepień, powstają często niebezpośrednio w trakcie rozszczepień, lecz jako elementy łańcucha rozpadów innych produktów. Przykładami są izotopy  $^{85m}\text{Kr}$  i  $^{85}\text{Kr}$  oraz  $^{135m}\text{Xe}$  i  $^{135}\text{Xe}$ . Schematy produkcji i rozpadów tych izotopów pokazano na rys.1.

W reaktorze mierzone są stężenia promieniotwórcze różnych produktów rozszczepień w chłodziwie, a także pyłów i aerozoli osadzonych na specjalnych filtrach w układach pomiarowych, zlokalizowanych w kominie reaktora. Wszystkie te pomiary, po starannej analizie i obróbce numerycznej, służą do oceny rzeczywistych wielkości uwolnień gazów, pyłów i aerozoli promieniotwórczych do otoczenia.



Rys.1. Przykładowe schematy produkcji i rozpadów gazowych produktów rozszczepień



### **3. BARIERY BEZPIECZEŃSTWA W REAKTORZE MARIA I UPROSZCZONY MODEL ICH PRZENIKANIA**

Z punktu widzenia uwolnień substancji promieniotwórczych do otoczenia reaktor jądrowy skonstruowany jest jako system barier adresowany w szczególności do produktów rozszczepień paliwa. W reaktorze MARIA system ten stanowią:

- struktura paliwa, a w szczególności koszulka elementu paliwowego,
- zamknięty, ciśnieniowy obieg pierwotny chłodzenia paliwa,
- otwarty basen reaktora zapełniony wodą,
- hala reaktora z systemem wentylacji i filtrów powietrznych.

Barierom tym można przypisać pewne parametry, charakteryzujące ich szczelność. Szczelność barier jest różna dla różnych pierwiastków, ich postaci chemicznej i fizycznej. System takich barier jest najmniej szczelny w odniesieniu do gazów szlachetnych. Jest zrozumiałe, że w powietrzu usuwanym za pomocą systemu wentylacji do atmosfery, dominują promieniotwórcze gazy szlachetne. Mimo znaczących aktywności tych gazów zagrożenie radiologiczne środowiska jest podczas normalnej pracy reaktora pomijalnie małe. Wynika to z faktu, że gazy szlachetne mogą jedynie oddziaływać na ludność jako źródło zewnętrznego promieniowania gamma na całe ciało lub promieniowania beta na skórę.

Znacznie poważniejsze zagrożenie mogłaby stanowić emisja znaczących ilości innych substancji radioaktywnych, jak np. izotopy jodu czy cezu, których radiotoksyczność jest bardzo wysoka.

#### ***Koszulka elementu paliwowego***

Pierwszą i najważniejszą barierą jest paliwo, a w szczególności koszulka elementu paliwowego. Większość układów bezpieczeństwa reaktora służy pośrednio lub bezpośrednio zachowaniu integralności tej bariery. Skuteczność tej bariery zostanie omówiona na przykładzie paliwa, stosowanego w reaktorze MARIA.

Koszulka elementu paliwowego, całkowicie osłaniająca warstwę paliwową, zbudowana jest z aluminium. Jej grubość wynosi  $0.63 \div 0.75$  mm (w zależności od typu paliwa). Zasięg fragmentów rozszczepień w aluminium jest rzędu kilku  $\mu\text{m}$  i koszulka jest dla nich całkowicie nieprzenikalna. W trakcie produkcji paliwa dochodzi na ogół do zabrudzenia zewnętrznych powierzchni koszulek uranem. W tym przypadku produkty rozszczepień mogą przedostać się do chłodziwa.

Producent paliwa do reaktora MARIA deklaruje, że zabrudzenie powierzchniowe paliwa nie przekracza wartości  $3 \cdot 10^{-8}$  g uranu-235 na  $1 \text{ cm}^2$  powierzchni. Całkowita powierzchnia elementu paliwowego wynosi  $1.7 \text{ m}^2$ , co oznacza, że masa  $^{235}\text{U}$  na powierzchni elementu paliwowego wynosi około 0.5 mg. W stosunku do całkowitej masy  $^{235}\text{U}$  w elemencie paliwowym, wynoszącej 540 g stanowi to około  $10^{-6}$ . Ponieważ rozszczepienia zachodzą wewnątrz elementu paliwowego i na jego powierzchni z tymi samymi szybkościami reakcji wielkość  $10^{-6}$  można traktować jako współczynnik przenikalności koszulki elementu paliwowego. Stwierdzenie uwolnień produktów rozszczepień na poziomie odpowiadającym względnej nieszczelności paliwa rzędu  $10^{-6}$  może występować w reaktorze i nie wskazuje na degradację koszulek elementów paliwowych. W przypadku, gdy poziom uwolnień przekracza te wartości mamy do czynienia z utratą szczelności koszulki elementu (-ów) paliwowego.

### ***Obieg chłodzenia paliwa***

Obieg chłodzenia paliwa w reaktorze MARIA jest układem zamkniętym i pracującym pod ciśnieniem do 1.8 MPa. W warunkach normalnej pracy w obiegu istnieją pewne naturalne, technologiczne nieszczelności. Występują one na uszczelnieniach kanałów paliwowych. Poprzez te nieszczelności woda z obiegu chłodzenia paliwa przedostaje się do otwartego basenu reaktora. Specjalny układ technologiczny uzupełnia ubytki wody w obiegu.

Typowa nieszczelność obiegu wynosi  $0.03 \text{ m}^3/\text{h}$ . Przy całkowitej objętości obiegu, wynoszącej  $22 \text{ m}^3$  stała czasowa, związana z ubytkiem wody z obiegu chłodzenia paliwa do basenu wynosi:

$$\lambda_{pb} = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1} = 3.8 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

Wielkość ta jest parametrem eksploatacyjnym, określanym każdorazowo na podstawie szybkości uzupełniania wody w obiegu chłodzenia paliwa.

Nieszczelność obiegu chłodzenia paliwa jest źródłem przecieku substancji radioaktywnych do basenu reaktora. Dotyczy to zarówno produktów aktywacji wody, jej zanieczyszczeń jak i produktów rozszczepień.

### ***Basen reaktora***

Basen reaktora jest otwartym zbiornikiem wody o objętości  $250 \text{ m}^3$ . W czasie pracy reaktora układ wentylacji wyciągowej odprowadza powietrze znad lustra wody do

komina reaktora. Tą drogą produkty aktywacji i rozszczepień mogą przedostać się do otoczenia.

Otwarty basen reaktora jest dość skuteczną barierą dla większości substancji radioaktywnych za wyjątkiem gazów szlachetnych. W tym ostatnim przypadku można przyjąć, że znaczna część gazów przedostanie się do wentylacji. Zależność czasowa uwalniania gazów z wody do basenu powinna mieć charakter wykładniczy opisany stałą czasową „wymiwania” -  $\lambda_{bw}$ . Jeśli założyć, że „wymiwanie” gazów szlachetnych z basenu do wentylacji jest efektywne, to należy oczekiwać, że stała czasowa będzie duża. Dane eksperymentalne potwierdzają, że uwalnianie gazów do wentylacji odbywa się z okresem poniżej 1 godziny to stała czasowa:

$$\lambda_{bw} > 3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

### ***Układ wentylacji***

Głównym zadaniem układu wentylacji technologicznej reaktora MARIA w warunkach normalnej pracy jest usuwanie argonu-41 i ewentualnych gazowych produktów rozszczepień, pochodzących z powierzchniowego zabrudzenia paliwa. W czasie normalnej pracy powietrze jest usuwane z pomieszczeń technologicznych reaktora bezpośrednio do atmosfery poprzez komin o wysokości 60 m. Nie stosuje się filtracji powietrza. W warunkach awaryjnych, gdy poziom aktywności gazów, pyłów i aerozoli w powietrzu usuwanym do otoczenia przewyższa pewien zadany limit, specjalny zawór dwudrogowy załącza układ filtracji powietrza.

Wydatek układu wentylacji wyciągowej z hali reaktora wynosi około 20000 m<sup>3</sup>/h, co przy kubaturze hali, wynoszącej około 11300 m<sup>3</sup> daje stałą czasową usuwania powietrza z hali reaktora:

$$\lambda_w = 1.8 \text{ h}^{-1} \cong 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

W rzeczywistości stała ta może być kilkakrotnie większa, ponieważ układ wentylacji wyciągowej pobiera powietrze bezpośrednio z nad lustro wody w basenie, czyli z obszaru o znacznie mniejszej kubaturze.

### ***Uproszczony model przenikania gazów przez bariery***

Zakłada się, że zarówno w przypadku zanieczyszczenia powierzchniowego jak i nieszczelności paliwa produkty rozszczepień przedostają się do wody natychmiastowo. Jeśli przez  $X_p$  oznaczymy całkowitą ilość danego produktu rozszczepień w paliwie, a przez  $X_c$  ilość, która przeniknęła do chłodziwa to:

$$X_c = f \cdot X_p$$

gdzie czynnik  $f$  pełni rolę współczynnika przenikalności koszulki elementu paliwowego. Dla zabrudzenia powierzchniowego dopuszcza się  $f \cong 10^{-6}$ .

Zawartość danego produktu rozszczepień w basenie  $X_b$  opisuje równanie:

$$\frac{dX_b}{dt} = \lambda_{pb} X_c - \lambda_X X_b$$

gdzie  $\lambda_X$  jest stałą rozpadu produktu rozszczepień.

W bilansie produktu rozszczepień w hali reaktora  $X_h$  uwzględnia się trzy człony: przejście z wody do hali, rozpad promieniotwórczy i usuwanie przez układ wentylacji do otoczenia:

$$\frac{dX_h}{dt} = \lambda_{bw} X_b - \lambda_X X_h - \lambda_w X_h$$

Szybkość uwalniania aktywności danego produktu rozszczepień do atmosfery zdefiniowana jest jako:

$$\dot{X}_a = \lambda_w \lambda_X X_h$$

i ta wielkość jest określana na podstawie pomiaru aktywności próbek powietrza, pobieranych z komina reaktora.

### **Model uwalniania $^{135m}\text{Xe}$ i $^{135}\text{Xe}$**

Model opisany powyżej wymaga dodatkowych modyfikacji w przypadku, gdy produkcja i rozpad danego izotopu mają bardziej skomplikowany charakter (patrz np. rys. 1). W niektórych przypadkach możliwe jest jednak znaczne jego uproszczenie, np. wówczas, gdy można założyć istnienie stanu ustalonego.

Typowy cykl pracy reaktora wynosi MARIA wynosi 100 h. Okresy połowicznego zaniku izotopów  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135m}\text{Xe}$  oraz  $^{135}\text{Xe}$  są na tyle krótkie, że po tym okresie czasu mamy do czynienia ze stanem ustalonym oraz w warunkach początkowych można założyć koncentracje tych izotopów równe 0. Niech  $I$ ,  $Y$  i  $X$  oznacza odpowiednio zawartości izotopów  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135m}\text{Xe}$  i  $^{135}\text{Xe}$  w poszczególnych układach reaktora. Indeksy  $p$ ,  $b$  i  $h$  oznaczać będą paliwo, wodę w basenie reaktora i halę reaktora. Stałe rozpadu promieniotwórczego poszczególnych izotopów oznaczone są jako  $\lambda_I$ ,  $\lambda_Y$  oraz  $\lambda_X$ .

Równania opisujące zawartości trzech, wymienionych wyżej produktów rozszczepień w poszczególnych układach reaktora są postaci:

**paliwo:**

$$\frac{dI_p}{dt} = \gamma_I N \overline{\sigma_f \Phi} - \lambda_I I_p$$

$$\frac{dX_p}{dt} = \gamma_X N \overline{\sigma_f \Phi} - \lambda_X X_p + 0.81 \cdot \lambda_I I_p + \lambda_Y Y_p$$

$$\frac{dY_p}{dt} = -\lambda_Y Y_p + 0.19 \cdot \lambda_I I_p$$

**basen reaktora:**

$$\frac{dI_b}{dt} = \lambda_{pb} f I_p - \lambda_I I_b$$

$$\frac{dX_b}{dt} = \lambda_{pb} f X_p + 0.81 \cdot \lambda_I I_b + \lambda_Y Y_b - \lambda_X X_b - \lambda_{bw} X_b$$

$$\frac{dY_b}{dt} = \lambda_{pb} f Y_p + 0.19 \cdot \lambda_I I_b - \lambda_Y Y_b - \lambda_{bw} Y_b$$

**hala reaktora:**

$$\frac{dX_h}{dt} = \lambda_{bw} X_b + \lambda_Y Y_h - \lambda_X X_h - \lambda_w X_h$$

$$\frac{dY_h}{dt} = \lambda_{bw} Y_b - \lambda_Y Y_h - \lambda_w Y_h$$

W powyższych równaniach  $N$  oznacza całkowitą liczbę jąder uranu-235 w rdzeniu reaktora, a  $\overline{\sigma_f \Phi}$  - średnią szybkość reakcji rozszczepienia w paliwie. Rozwiązanie tych równań dla stanu ustalonego prowadzi do następujących wyrażeń na szybkości uwalniania izotopów  $^{135}\text{Xe}$  i  $^{135m}\text{Xe}$  do atmosfery:

$$\dot{X}_a = A \cdot \lambda_{pb} f N \overline{\sigma_f \Phi}$$

$$\dot{Y}_a = B \cdot \lambda_{pb} f N \overline{\sigma_f \Phi}$$

gdzie stałe  $A$  i  $B$  są zależne jedynie od stałych rozpadu oraz stałych „wymywania”  $\lambda_{bw}$  i usuwania powietrza do atmosfery  $\lambda_w$ . Dokładność określenia tych dwóch ostatnich stałych ma niezbyt duży wpływ na dokładność wyznaczonych stałych  $A$  i  $B$ .

Wprowadzenie modelu transportu produktów rozszczepień poprzez bariery jest konieczne, aby w oparciu o dane eksperymentalne uzyskać oszacowanie podstawowego parametru jakościowego paliwa tj. współczynnika przenikalności koszulki  $f$ . Dokonuje się tego poprzez pomiar szybkości uwolnień jednego z izotopów  $\dot{X}_a$  lub  $\dot{Y}_a$ .

Koncentrację izotopu  $^{135}\text{I}$  w rdzeniu reaktora MARIA w stanie ustalonym można z niezłą dokładnością określić na drodze obliczeniowej. Obliczenia wykonane za pomocą kodu ORIGEN [1] pokazują, że w stanie ustalonym aktywność  $^{135}\text{I}$  w przeliczeniu na 1 MW mocy wynosi  $1.9 \cdot 10^{15}$  Bq. Z drugiej strony aktywność ta jest równa:

$$A_I \equiv \lambda_I I_p = \gamma_I N \overline{\sigma_f \Phi}$$

co pozwala na wyznaczenie nieznanego członu  $N \overline{\sigma_f \Phi}$  i po wstawieniu do wzorów na szybkości uwolnień – oszacowanie współczynnika przenikalności koszulki f.

#### 4. POMIAR SZYBKOŚCI UWALNIANIA GAZÓW SZLACHETNYCH Z REAKTORA MARIA

Do pomiaru szybkości uwalniania gazowych produktów aktywacji i rozszczepień do atmosfery służą przyrządy stacjonarnego systemu dozymetrycznego oraz przenośna komora powietrzna do poboru i pomiaru aktywności próbek powietrza uwalnianego przez komin reaktora. W ramach stacjonarnego systemu dozymetrycznego prowadzone są pomiary:

- globalnej aktywności gazów (pomiar detektorem scyntylacyjnym),
- globalnej aktywności gazów (pomiar komorą jonizacyjną),
- pomiar skażeń powietrza, osadzonych na filtrze pomiarowym.

Wszystkie tory pomiarowe dają ciągły odczyt, lecz nie pozwalają na identyfikację składu izotopowego emitowanych gazów. Jest to możliwe dopiero po pobraniu próbki powietrza do specjalnej komory powietrznej o objętości 10 l. Przed pobraniem próbki powietrza z komina komora jest opróżniana z powietrza za pomocą pompy próżniowej. Zasysanie powietrza z komina odbywa się przy pracującej pompie próżniowej. Komora jest następnie uszczelniana i umieszczana na detektorze germanowym gdzie mierzona jest aktywność gazów w niej zawartych. Układ pomiarowy jest odpowiednio wykalibrowany.

Stężenia promieniotwórcze poszczególnych izotopów są następnie przeliczane na czas poboru próbki powietrza w celu uwzględnienia efektu rozpadu promieniotwórczego. Tak uzyskane wartości są następnie mnożone przez wydatek powietrza przez komin reaktora; aktualnie, przy pracującym jednym wentylatorze wyciągowym, całkowity wydatek powietrza przez komin reaktora wynosi  $38000 \text{ m}^3/\text{h}$ .



## 5. LIMITY SZYBKOŚCI UWOLNIEŃ SUBSTANCJI PROMIENIOTWÓRCZYCH DO OTOCZENIA

Zgodnie z Eksploatacyjnym Raportem Bezpieczeństwa reaktora MARIA aktywności gazów szlachetnych, usuwanych do atmosfery są limitowane. Limity te określono obliczeniowo, zakładając, że z komina reaktora uwalniane są w sposób ciągły pewne ilości radioaktywnych gazów. Obliczenia transportu tych gazów w otoczeniu Ośrodka świerk prowadzono dla różnych warunków atmosferycznych. Dla różnych warunków meteorologicznych obliczano zagrożenie radiologiczne osób z tzw. grupy krytycznej, zamieszkujących w pobliżu Ośrodka. Dla każdego radioizotopu określano taką szybkość uwolnień ciągłych, przy której w najbardziej niekorzystnych warunkach radiologicznych osoba z grupy krytycznej otrzymywała w ciągu roku równoważnik dawki 1 mSv [2].

Dodatkowo, w reaktorze MARIA wprowadzono tzw. robocze limity uwolnień, stanowiące w przypadku gazów szlachetnych 10% limitów uwolnień. Po przekroczeniu roboczych poziomów uwolnień eksploatator reaktora podejmuje środki zmniejszające wielkości tych uwolnień (załączenie układu filtracji powietrza, obniżenie mocy reaktora), aż do wyłączenia reaktora, jeśli zajdzie taka konieczność.

W tabeli poniżej zestawiono robocze godzinne limity uwolnień gazów szlachetnych, obowiązujące w reaktorze MARIA.

Tabela II. Robocze, godzinne limity uwolnień w reaktorze MARIA

Izotop	Limit [Bq/h]	Izotop	Limit [Bq/h]
Ar-41	$1.8 \cdot 10^{11}$	Xe-133	$2.8 \cdot 10^{12}$
Kr-85m	$1.2 \cdot 10^{12}$	Xe-135m	$0.6 \cdot 10^{12}$
Kr-85	$2.0 \cdot 10^{12}$	Xe-135	$0.9 \cdot 10^{12}$
Kr-87	$3.0 \cdot 10^{11}$	Xe-138	$2.1 \cdot 10^{11}$
Kr-88	$2.1 \cdot 10^{11}$		

---

## R E F E R E N C J E

- [1] M.J.Bell: ORIGEN - The ORNL Isotope Generation and Depletion Code; ORNL-4628, 1973.



[2] Prawo Atomowe z dnia 29 listopada 2000; Dz. U. Nr 3, poz. 18