

# 1 Wstęp

Rozwój energetyki jądrowej wymaga jednoczesnego rozwoju w wielu dziedzinach nauki. Utrzymanie stałego rozwoju pokrewnych dziedzin fizyki jądrowej jest niezbędne dla bezpiecznej i wydajnej pracy przyszłych reaktorów. Należy również pamiętać o odpadach promieniotwórczych, których utylizacja, przetworzenie lub bezpieczne składowanie jest niezbędnym czynnikiem poprawiającym rachunek ekonomiczny oraz przede wszystkim akceptację społeczną dla wszystkich planów związanych z energetyką jądrową.

Przyszłe reaktory prędkie (FR) i reaktory sterowane akceleratorem (ADS) wymagają wielu lat badań i symulacji, które umożliwią zaprojektowanie instalacji o maksymalnej wydajności. Niezbędne w tym celu jest dokładne poznanie właściwości używanych materiałów- izotopów oraz parametry zachodzących reakcji jądrowych, takie jak wydajność reakcji, przekroje czynne czy czynniki sprzyjające lub przeszkadzające w ich zachodzeniu. Jest to powodem, dla którego fizycy jądrowi od wielu lat przeprowadzają eksperymenty, za pomocą których wyznaczają lub poprawiają dokładność już wyznaczonych parametrów reakcji jądrowych i przede wszystkim rozwijają metody pomiaru pól neutronów oraz udoskonalają metody numeryczne do badania i projektowania instalacji jądrowych. W tej dziedzinie badania teoretyczne muszą być zawsze związane z badaniami eksperymentalnymi, i jako takie cały czas wzajemnie się uzupełniają.

W latach dziewięćdziesiątych w ośrodku badań jądrowych w Dubnej pod Moskwą rozpoczął się nowy cykl doświadczeń i badań pod nazwą „Energia plus Transmutacja” (E+T). Do badań użyto zestawu eksperymentalnego, który był wykonany z ołowianej tarczy otoczonej cylindrami z uranu naturalnego, a całość była zamknięta w stalowym płaszczu. W rdzeń-tarczę uderzała wiązka wysokoenergetycznych cząstek o energii rzędu gigaelektronowoltów pochodząca z akceleratora. Warunki wewnątrz zestawu E+T miały symulować te, jakie mogą panować wewnątrz rdzenia przyszłych reaktorów a w szczególności złożone rozkłady pól neutronów o bardzo różnych energiach.

Do prac nad tym zestawem przystąpił wielonarodowy zespół, z bardzo rozbudowanym i różnorodnym zestawem eksperymentów, badań i pomiarów. Głównym zadaniem było dopracowywanie technik pomiarowych wydajności reakcji jądrowych i pól neutronów oraz energii wydzielanej w takich warunkach. Drugim celem było sprawdzenie i ewentualne poprawienie istniejących kodów służących do obliczeń wydajności reakcji i rozkładu pól neutronów wewnątrz zestawu badawczego, poprzez porównywanie wyników obliczeń teoretycznych z eksperymentalnymi. Zamierzano też ocenić wydajność procesów transmutacji różnych aktywności i produktów rozszczepienia, w różnych warunkach badanego zestawu.

Zespół z Polski (pod kierownictwem Profesora Z. Strugałskiego) dołączył do eksperymentu w 1999r. Brałszy udział w budowie samego zestawu badań, czyli całej konstrukcji ołowiowo - uranowej ukrytej w specjalnej osłonie radiacyjnej. Nawiązując współpracę z innymi grupami badawczymi zaczęto wykonywać obróbkę i kalibrację uzyskiwanych wyników. Na podstawie literatury naukowej i doświadczeń z pierwszych eksperymentów zaobserwowano, że najbardziej cenne (z punktu widzenia badań nad przyszłymi konstrukcjami rdzeni reaktorów) jest rozwijanie technik pomiaru pól neutronów o wysokich energiach. Neutrony te mogą być wykorzystywane np. do wypalania szkodliwych odpadów podczas normalnej pracy reaktora, i w tym celu muszą być opracowane dokładne kody obliczające warunki panujące wewnątrz tych konstrukcji podczas ich pracy. Nie było to jednak możliwe bez bogatego materiału eksperymentalnego z łatwymi do uzyskania i porównywania wynikami. Stwierdzono pewne braki i związane z tym trudności przy analizie uzyskanych wyników w dotychczas wykorzystywanych materiałach detektorów aktywności. Postanowiono rozwiązać te problemy, co stało się bezpośrednią inspiracją do

powstania tej pracy doktorskiej. Zaproponowane zostało użycie dodatkowego (innego) detektora aktywacyjnego, ponad dotychczas wykorzystywany zestaw, który by rozwinął i ułatwił takie pomiary. Należało użyć materiału (typu detektora) dotychczas nie wykorzystywanego lub wykorzystywanego w małym stopniu w tego typu badaniach. Detektor ten miałby uzupełniać wykorzystywany dotychczas zbiór reakcji progowych. Materiał nowego detektora musiał charakteryzować się dobrze określonymi energiami reakcji progowych z neutronami o względnie dużych przekrojach czynnych takich reakcji. Z praktycznych obserwacji wynika, że kluczowe są tu własności izotopów danego materiału powodujące, że analiza uzyskanych widm będzie prosta i możliwa, uwzględniając sensowne czasy ich pomiaru na spektrometrach gamma.

Po przeanalizowaniu kilku materiałów, m.in. fosforu, od roku 2004 zaczął być wykorzystywany izotop Itru ( $Y-89$ ). Głównymi zaletami itru jest występowanie w przyrodzie tylko jednego stabilny jego izotopu oraz posiadanie przez niego kilku dobrze określonych i możliwych do detekcji reakcji progowych typu  $(n,xn)$ . Reakcje te zaczynają się od energii 11,5 MeV i rozmieszczone są w mniej więcej równych odstępach, co ok. 10MeV. Możliwe do detekcji jest 5 kolejno po sobie następujących reakcji progowych, co jest wyjątkową cechą i olbrzymią zaletą w stosunku do dotychczas użytkowanych materiałów takich jak kobalt czy złoto. Mógłby się więc on stać materiałem idealnym do analizy pól neutronów o energii powyżej 10MeV w rdzeniach reaktorów.

**Tematem tej pracy doktorskiej jest spektrometria neutronów wysokiej energii. W pracy wykazano, że zaproponowany materiał detektora aktywacyjnego, sposób wykonywania detektorów oraz wybrana metoda pomiarowa daje powtarzalne i łatwe w analizie wyniki i uzupełnia dotychczas wykorzystywane techniki.**

Itr-89 uzupełnia zbierany materiał eksperymentalny. Stał się dodatkowym, niezależnym kanałem zbierania wyników, co umożliwiło porównywanie ich z innymi rezultatami uzyskiwanymi podczas tego samego eksperymentu. W trakcie eksperymentów, dopracowany został sposób rozmieszczania detektorów, dzięki czemu można było uzyskać wyniki dotyczące rozkładu neutronów o różnych energiach w całym modelu, bez potrzeby ekstrapolacji. Ułatwia to analizę i prezentację wyników. Wykorzystanie nowego typu detektora aktywacyjnego, dało użyteczne i wygodne narzędzie do pomiarów pól neutronów w zakresie wyższych energii w przedziale 10-50 MeV i potencjalnym dodatkowym zakresie 50-100MeV. W trakcie przygotowywania kolejnych eksperymentów rozwiązany został problemem, jakim była duża trudność w wykonaniu dobrych detektorów (powtarzalny kształt i waga) związana z trudnościami w obróbce materiału.

Opis tworzenia i wykorzystywania tego detektora oraz opis wszystkich eksperymentów i uzyskanych rezultatów, znaleźć będzie można w niniejszej pracy.

Część umieszczonych w tej pracy rysunków pozostawiono w wersji oryginalnej, z napisami w języku angielskim. Zostały one przeniesione z innych publikacji lub materiałów w oryginalnej formie aby nie zmniejszyć ich czytelności. Pełne objaśnienia tych rysunków w języku polskim znajdują się zawsze pod rysunkami i w treści pracy.