

## STRESZCZENIE

Paliwo TRISO to izotropowe, trój-strukturalne paliwo jądrowe, które składa się z jądra na bazie uranu otoczonego tzw. warstwami okrywającymi, do których należy węgiel pyrolityczny oraz węglík krzemu. Częsteczki paliwowe TRISO są najmniejszym składnikiem budującym tego rodzaju paliwa. Tysiące cząsteczek paliwa TRISO jest zanurzonych w matrycy grafitowej, formując kulę - wykorzystywaną jako paliwo w reaktorze o złożu kulowym lub pastylkę paliwową - wykorzystywaną w reaktorze pryzmatycznym. Obie formy paliwa są charakterystyczne dla wysokotemperaturowych reaktorów chłodzonych gazem, tzw. HTGR-ów. W wyniku procesu napromieniowania paliwa w rdzeniu reaktora, może dojść do częściowego lub całkowitego uszkodzenia warstw okrywających cząsteczek TRISO. Badanie powstałych defektów w warstwach okrywających TRISO jest kluczowym aspektem dobrego zrozumienia bezawaryjnej pracy tego paliwa, a także ma kluczowe znaczenie dla bezpiecznego i wydajnego funkcjonowania reaktorów typu HTGR.

Co do zasady, badanie potencjalnych uszkodzeń warstw okrywających TRISO odbywa się na etapie produkcji lub dopiero po wydobyciu paliwa z rdzenia reaktora, tzn. po okresie jego napromieniowania. Z uwagi na fakt, iż proces napromieniowania neutronowego jest długotrwały, w niniejszej rozprawie proponuje się alternatywną metodę badania, w postaci implantacji jonowej. Metoda ta pozwala odzwierciedlić zjawisko napromieniowania paliwa w rdzeniu reaktora. Tym samym wiedzę na temat potencjalnych uszkodzeń warstw okrywających paliwa TRISO możemy uzyskać nie tylko w znacznie krótszym czasie, ale także bez konieczności obcowania z materiałem radioaktywnym.

W niniejszej rozprawie doktorskiej skupiono się na wstępnych badaniach jakości paliwa TRISO, tzn. na etapie front-end. Celem tego etapu badawczego jest zweryfikowanie warstw okrywających, pod kątem występowania uszkodzeń, jeszcze przed umieszczeniem paliwa TRISO w rdzeniu reaktora, ale w warunkach odpowiadających napromieniowaniu paliwa w rdzeniu reaktora. Taka diagnostyka cząstek TRISO może być prowadzona zarówno na świeżo wyprodukowanym paliwie jak i na paliwie zmagazynowanym i wcześniej niewykorzystywanym. W niniejszej rozprawie prowadzono badania na tzw. surogatach paliwa, nazwanych paliwem p-TRISO. Cechą szczególną cząsteczek p-TRISO jest brak uranu w jądrze, który został zastąpiony tlenkiem cyrkonu. Próbkę tego paliwa zostały wyprodukowane w 2001 r., od tamtego czasu były wyłącznie przechowywane.

Podstawę badania stanowił eksperyment z wykorzystaniem techniki implantacji jonowej, przeprowadzony zarówno na przepolerowanych jak i na niepolerowanych próbkach paliwa p-TRISO. Cząsteczki p-TRISO były implantowane za pomocą jonów neonu i jonów helu o odpowiednio dobranej energii i fluencji. Celem badania było wychwycenie momentu, w którym dochodzi do powstania uszkodzenia pojedynczej warstwy okrywającej, a tym samym, zrozumienie powstawania uszkodzeń na styku dwóch warstw (tj. Buffer i IPyC). Jako metody diagnostyczne wykorzystano: spektroskopię Ramana, skaningowy mikroskop elektronowy czy też konfokalny mikroskop materiałowy.

Przeprowadzone w ramach doktoratu badania pozwoliły określić, czy i jak upływ czasu wpływa na powstawanie zmian w strukturze warstw okrywających paliwa TRISO oraz czy i jak upływ czasu wpłynął na wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia badanego paliwa. W eksperymencie potwierdzono, że znaczące zmiany strukturalne pojawiają się po upływie roku od napromieniowania próbek. Co istotne, wraz z dalszym okresem (tj. po upływie 3 i 5 lat) napromieniowania próbek, nie zaobserwowano zauważalnych zmian w warstwach okrywających paliwa p-TRISO, w stosunku do zaobserwowanych zmian po upływie 1 roku. Należy mieć na uwadze, iż eksperymenty przeprowadzono na 22-letnich próbkach paliwa p-TRISO. Wyniki eksperymentu pozwalają zatem uznać, że również paliwo zmagazynowane można efektywnie wykorzystać jako paliwo umieszczone w rdzeniu reaktora. Oczywiście otrzymane wyniki w ww. zakresie dot. uszkodzania się warstw okrywających próbek p-TRISO, które należałoby potwierdzić porównując je z wynikami otrzymanymi dla świeżo wyprodukowanych cząsteczek paliwa TRISO. Wówczas możliwe byłoby otrzymanie odpowiedzi na pytanie, czy uszkodzenia w warstwach TRISO postępują w takim samym stopniu w „starym” paliwie (np. zmagazynowanym) jak i w „nowym” (tj. świeżo wyprodukowanym). Badania takie nie były jednak przedmiotem niniejszej rozprawy, niemniej jednak powinny zostać podjęte w przyszłości.

Niezależnie od powyższego, przeprowadzony eksperyment potwierdził przyjętą w rozprawie tezę, że metoda implantacji jonowej jest szybkim i efektywnym narzędziem pozwalającym odzwierciedlać uszkodzenia w warstwach okrywających paliwa TRISO. Metoda ta może być wykorzystana na etapie wstępnych badań paliwa, w celu weryfikacji jakości paliwa TRISO oraz określenia czy paliwo kwalifikuje się do umieszczenia w rdzeniu reaktora.