

Dr hab. Marek Scholz  
Instytut Fizyki Jądrowej  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
[marek.scholz@ifj.edu.pl](mailto:marek.scholz@ifj.edu.pl)

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Ewy Łaszyńskiej, pt.:  
"Badania kalibracyjne aparatury przeznaczonej do aktywacyjnej diagnostyki  
neutronów z reakcji syntezy jądrowej D-T w tokamaku"

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Ewy Łaszyńskiej została wykonana na zlecenie Rady  
Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

## **Wstęp**

Rozprawa doktorska została wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Marka J. Sadowskiego  
w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Promotorem pomocniczym pracy był dr inż.  
Sławomir Jednoróg z Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy.

Rozprawa dotyczy kalibracji „in-situ” komór rozszczepieniowych używanych do pomiaru  
wydajności emisji neutronów (diagnostyka KN1) oraz diagnostyki aktywacyjnej KN2 używanej  
do pomiaru całkowitej emisji neutronów podczas jednego wyładowania w tokamaku JET.  
Większość pracy poświęcono określeniu, za pomocą metody aktywacyjnej, emisyjności 14  
MeV generatora neutronów w warunkach laboratoryjnych, który następnie spełniał rolę  
źródła kalibracyjnego.

Praca składa się z 9 rozdziałów, spisu literatury, oznaczeń i skrótów, jest uzupełniona o  
streszczenie w języku polskim i angielskim oraz zawiera 4 dodatki. Praca liczy sumarycznie  
195 stron.

Rozdział 1 obejmuje przedstawienie i skrótowy opis tokamaka JET, reakcji jądrowych które  
mogą być wykorzystane w przyszłym reaktorze termojądrowym wraz z ich przekrojami  
czynnymi oraz warunek produkcji energii w syntezie t-j zwany kryterium Lawsons. Ostatnie  
dwa paragrafy tego rozdziału są poświęcone reakcjom jądrowym z neutronami, ich  
podziałem na grupy energetyczne oraz klasyfikacją diagnostyk neutronowych i ich  
zastosowaniem, wykorzystywanych w układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy.

W następnym rozdziale w wielkim skrócie przedstawiono diagnostyki służące do pomiaru  
neutronów na układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy, głównie na JET. Ostatnią  
część tego rozdziału poświęcono metodzie aktywacyjnej, również tam wykorzystywanej .

W rozdziale 3 pracy opisano w skrócie kalibrację „in-situ” diagnostyk neutronowych KN1 i  
KN2 zainstalowanych na tokamaku JET. Kalibracja została przeprowadzona w 2013 roku za

pomocą źródła  $^{252}\text{Cf}$  i miała na celu określenie współczynników kalibracyjnych tych diagnostyk w przypadku pracy tokamaka JET z deuterem jako gazem roboczym. W podsumowaniu tego rozdziału stwierdzono, że podobną procedurę kalibracyjną „in-situ” diagnostyk KN1 i KN2 wykonano z wykorzystaniem generatora neutronów o energii 14 MeV, co pozwoliło na znalezienie współczynników kalibracyjnych dla tych diagnostyk w przypadku pracy JET-a z mieszaniną deuteru i trytu jak gazem roboczym. Podano przyczyny, dla których zdecydowano się na pomiar charakterystyk takiego źródła neutronów przed kalibracją „in-situ” w komorze tokamaka JET, oraz powody monitorowania pracy tego źródła w trakcie kalibracji.

Rozdział 4 zawiera główną tezę rozprawy cel pracy oraz listę zadań eksperymentalnych i obliczeniowych, które pozwolą na udowodnienie tezy i osiągnięcie celu pracy.

W następnym rozdziale przedstawiono zagadnienia z dziedziny spektrometrii gamma m.in. zależności na wydajność rejestracji fotonów oraz opisano metodologię wyznaczenia wydajności rejestracji fotonów dla detektora germanowego.

W rozdziale 6 podano jakie materiały aktywacyjne wykorzystano do wyznaczenia charakterystyk emisyjnych generatora 14 MeV neutronów jako źródła kalibracyjnego. Przedstawiono wyniki obliczeń z zastosowaniem kodu FISPACT – II oraz wyniki doświadczeń przeprowadzonych dla wybranych materiałów aktywacyjnych za pomocą generatora Genie 16C firmy SODERN. Wyniki z obliczeń pozwoliły na ustalenie sekwencji pomiarowej aktywowanych materiałów detektorem HPGe. Ponadto, zamieszczono wyniki aktywności tych wybranych materiałów, które otrzymano podczas kampanii deuterowej na tokamaku JET.

Najistotniejsze z punktu widzenia pracy są rozdziały 7 i 8. W rozdziale 7 przedstawiono metodologię i wyniki pomiarów wydajności emisji neutronów dwóch generatorów ING-17, przewidzianych jako źródło do kalibracji „in-situ” monitorów neutronowych na tokamaku JET. Opisano tutaj przygotowanie do pomiarów spektrometrycznych próbek napromieniowanych na stanowisku pomiarowym w National Physical Laboratory (NPL). Przedstawiono stanowisko pomiarowe i generator neutronów wraz z przygotowanym uchwytem na próbki. Zaprezentowano wyniki pomiarów i obliczeń emisyjności oraz analizę tych wyników. Natomiast rozdział 8 został poświęcony przebiegowi i wynikom kalibracji „in-situ” diagnostyk neutronowych KN1 i KN2 na tokamaku JET z wykorzystaniem 14-MeV generatora neutronów o kontrolowanej wydajności emisji. Podsumowanie i końcowe wnioski zostały przedstawione przez Doktorantkę w rozdziale 9.

Praca zawiera spis literatury przedmiotu zawierający 69 pozycji. Dziewięć prac jest współautorstwa Doktorantki, zostały one opublikowane w latach 2015-2017 w tym większa część w recenzowanych czasopismach.

## **Teza pracy i jej potwierdzenie**

Pani mgr Ewa Łaszyńska sformułowała następującą tezę swojej rozprawy doktorskiej:

„Metoda aktywacyjna spełnia wymagania umożliwiające monitorowanie wydajności emisji neutronów w czasie kampanii deuterowo-trytowych w tokamaku JET”.

W celu udowodnienia postawionej tezy Doktorantka sformułowała zadania badawcze, w trakcie których wytypowała określone radionuklidy do monitorowania neutronów prędkich o energiach 14 MeV oraz przeprowadziła napromienienia wybranych materiałów na generatorach neutronów i na tokamaku JET. Dalej, Doktorantka wykonała pomiary aktywności wytypowanych radionuklidów na przygotowanym torze pomiarowym wyposażonym w detektor HPGe a ponadto wykonała obliczenia numeryczne z wykorzystaniem kodu FISPACT-II w celu opracowania optymalnej sekwencji pomiaru aktywności wzbudzonej tych radionuklidów. Te przygotowania pozwoliły Doktorantce na wzięcie udziału w eksperymentach związanych z przeprowadzeniem kalibracji „in-situ” diagnostyki neutronowej KN1 i KN2 zainstalowanej na tokamaku JET.

Badania eksperymentalne i symulacje numeryczne obejmowały:

1. Obliczenia z zastosowaniem kodu FISPACT – II z biblioteką przekrojów jądrowych TENDL-2014 dla wyselekcjonowanych uprzednio materiałów (tabela 7), co pozwoliło opracować sekwencję pomiarową dla wybranych próbek w trakcie ich napromieniowania 14 MeV neutronami.
2. Przygotowanie spektrometrycznego toru pomiarowego, wyposażonego w detektor HPGe firmy Canberra, dla dwóch geometrii pomiarowych („cylindrycznej” i „rozety”) oraz napromieniowanie wyselekcjonowanych próbek materiałów aktywacyjnych za pomocą generatora Genie 16C firmy SODERN. Pozwoliło to na wyznaczenie aktywności radionuklidów powstałych w wyniku tego napromienienia oraz porównania aktywności zmierzonej jak i obliczonej w p.1 (tabela 8). Na podstawie tych wyników zdecydowano, że próbki wykonane z Nb będą mierzone w geometrii „rozety”
3. Pomiary aktywności wyselekcjonowanych próbek napromieniowanych w końcówce KN2 3U dla poszczególnych wyładowań na tokamaku JET. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 9 odnosząc je do całkowitej wydajności neutronów emitowanych w poszczególnych wyładowaniach. W wyniku tych pomiarów przyjęto, że do dalszych eksperymentów będą wykorzystywane tylko reakcje indukowane w Al., Fe, Nb postaci:  $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ .
4. Napromieniowanie, na stanowisku pomiarowym w National Physical Laboratory, wyselekcjonowanych w poprzednim punkcie próbek materiałów aktywacyjnych za pomocą kolejno dwóch generatorów ING-17, co, pozwoliło na wyznaczenie aktywności radionuklidów powstałych w wyniku tego napromienienia (tabela 13 – 16) oraz określenie wydajności emisji neutronów z tych generatorów (rys. 65,66).
5. Monitorowanie emisji neutronów z wybranego, kalibracyjnego generatora neutronów ING-17 podczas kalibracji „in-situ” monitorów neutronowych KN1 za pomocą pomiaru aktywności wybranych radionuklidów przeliczonej na wydajność emisji neutronów tego generatora. Porównanie zmierzonej i obliczonej kodem FISPACT-II aktywności wybranych radionuklidów przeliczonej na wydajności tej emisji generatora.
6. Wyznaczenie współczynników kalibracyjnych systemu KN2 poprzez napromienienie kalibracyjnym generatorem neutronów wybranych próbek materiałów umieszczonych w końcówce KN2-3U tokamaka JET, dla trzech różnych położeń tego generatora.

Najważniejszą częścią pracy było

1. Opracowanie harmonogramu napromienienia wyselekcjonowanych próbek z wykorzystaniem obliczeń aktywności kodem FISPACT-II, przygotowanie spektrometrycznego toru pomiarowego, wyposażonego w detektor HPGe firmy Canberra, dla dwóch geometrii pomiarowych („cylindrycznej” i „rozety”) oraz napromieniowanie wyselekcjonowanych próbek materiałów aktywacyjnych za pomocą generatora Genie 16C firmy SODERN na stanowisku pomiarowym w NCBJ, co pozwoliło określić geometrię pomiarową radionuklidów na detektorze HPGe.
2. Określenie aktywności wybranych próbek napromieniowanych w końcówce 3U tokamaka JET.
3. Wyznaczenie aktywności wybranych próbek napromieniowanych generatorem neutronów ING\_17 na stanowisku pomiarowym w NPL oraz określenie wydajności emisji tych generatorów. Porównanie wyznaczonych aktywności z obliczonymi kodem FISPACT-II.
4. Pomiar aktywności wybranych próbek podczas kampanii kalibracyjnej „in-situ” diagnostyk neutronowych KN1 i KN2 tokamaka JET, w celu określenia wydajności emisji neutronów generatora wykorzystywanego w trakcie kalibracji oraz wyznaczenie współczynników aktywacyjnych dla próbki Al i Nb.

## **Błędy i nieścisłości dostrzeżone w pracy:**

### *Rozdział 1. Wprowadzenie*

Uwagi:

1. Występują niedokładności pojęciowe:

Str 15. Przedstawiony opis „Komora o kształcie torusa obejmuje rdzeń transformatora, który jest źródłem toroidalnego pola magnetycznego. Pole to z kolei generuje wewnątrz toroidu wirowe pole elektryczne, które przyspiesza naładowane cząstki plazmy. Ruch elektronów i jonów powoduje przepływ prądu elektrycznego i w następstwie dalszą jonizację plazmy oraz wzrost jej temperatury. Prąd płynący w plazmie wytwarza również własne pole magnetyczne, prostopadłe do kierunku jego przepływu, tzw. pole poloidalne. Powoduje ono ściskanie plazmy (tzw. zjawisko pinchu), zwiększenie jej gęstości i nadanie jej kształtu zaciskającego się pierścienia plazmowego” ; jest nieprawidłowy.

Str 18. Rys.2. Przekroje czynne przedstawione na rysunku zależą od energii, zależność od temperatury (co jest w opisie rysunku) zwykle podaje się dla szybkości reakcji (wydajności reakcji), gdyż jest to przekrój czynny na reakcję uśredniony po rozkładzie Maxwella cząstek.

Str 19. Minimum w krzywej  $n\tau$  dla reakcji DT występuje dla ok. 25 keV, a  $\tau$  opisuje czas utrzymania energii w plazmie, a nie czas utrzymania plazmy.

### *Rozdział 2. Ocena aktualnego stanu wiedzy o metodach pomiaru neutronów emitowanych z urządzeń plazmowych*

Uwagi:

1. Tytuł jest nieadekwatny do zawartości rozdziału ocena ma w sobie element wartościujący. Nie podano tutaj kryterium oceny tych metod, a raczej wymieniono te, które były lub są stosowane na JET.
2. W przypadku techniki aktywacyjnej brakuje wzmianki o zaletach i wadach tej metody w porównaniu z innymi metodami pomiaru neutronów

### 3. Występują tak jak poprzednio niedokładności pojęciowe

Str.23. Źródłem energii w przyszłym elektrowniach t-j będzie reakcja jądrowa, a nie sama plazma. Literką  $Y_n$  oznaczono raz wydajność emisji neutronów a innym razem całkowitą wydajność emisji neutronów.

Str. 24. Niezrozumiałe jest pojęcie aktywnych detektorów rozróżniających energię neutronów

Str. 26. Zamiast zakończenia poczty pneumatycznej lepiej jest używać nazwy końcówek do napromienienia.

Str. 27. Zamiast monitor profili neutronowych lepiej użyć pojęcia monitor profilu emisji neutronowej lub radialna kamera neutronowa.

Str. 33. W opisie poszczególnych etapów metody aktywacyjnej brakuje wzmianki o transporcie, schładzaniu i przygotowaniu wzorców

### *Rozdział 3. Uzasadnienie tematyki badań*

Uwagi:

1. Zabrakło w tym rozdziale zdecydowanego i zwięzłego wyjaśnienia dlaczego przeprowadza się kalibrację „in-situ” liczników neutronowych w układach plazmowych.
2. Zabrakło wyraźnego stwierdzenia, że na kalibrację diagnostyk KN1 i KN2 zdecydowano się także ze względu na wymianę „Plasma Facing Component” (PFC) z węglowych na berylowe w ramach programu „ITER-like wall”.
3. Zabrakło odniesienia do przeprowadzonej za pomocą generatora neutronów kalibracji tokamaka TFTR.

Str. 37. Pomiar temperatury jonowej określa się z widma energetycznego neutronów, a nie z całkowitej wydajności emisji.

Nie podano powodu dlaczego ekstrapolacja współczynników kalibracyjnych otrzymanych dla neutronów 2.45 MeV, w przypadku neutronów 14 MeV zwiększa niepewność pomiarów i powiększenie marginesów bezpieczeństwa budżetu neutronowego.

Str. 42. „Zakończenie kanału aktywacyjnego” chyba lepiej końcówka do napromienienia KN2 U3

Str. 45. Obecność anteny do mikrofalowego grzania zwiększa rozpraszanie neutronów zmiana widma jest tego konsekwencją.

Str. 47. „zmniejszenie wskazań komór rozszczepieniowych” – chyba zliczeń.

Nie podano w jaki sposób została zweryfikowana poprawność przeprowadzonej kalibracji w trakcie kampanii eksperymentalnej.

Str. 48. Przydałoby się doprecyzowanie na czym polegało „wyeksploatowanie” generatora neutronów.

### *Rozdział 4. Główna teza rozprawy.*

Uwagi:

1. W tezie użyto sformułowania, że metoda aktywacyjna spełnia wymagania umożliwiające monitorowanie wydajności emisji neutronów ... nie precyzując o jakie wymagania chodzi.
2. W przedstawionym celu pracy nie sprecyzowano o jaką aparaturę pomiarową do aktywacyjnej diagnostyki neutronów chodzi.

## *Rozdział 5. Przygotowanie metod spektrometrycznych.*

Uwagi:

1. Tytuł rozdziału nie odnosi się do jego zawartości, gdyż w rozdziale jest mowa głównie o przygotowaniu detektora HPGe do pomiaru aktywności napromienionych próbek z wykorzystaniem oprogramowania dostarczonego przez producenta.
2. W przypadku wzorów, w których użyto wielkości  $\mu$  trudno się zorientować, czy chodzi o ten sam współczynnik, czy może tego samego oznaczenia użyto do oznaczenia różnych współczynników.

## *Rozdział 6. Wybór reakcji jądrowych służących do pomiaru neutronów o energii 14 MeV.*

Uwagi:

1. Nie ma uzasadnienia dlaczego spośród ok. 14 możliwych reakcji do pomiarów neutronów 14 MeV wybrano akurat te siedem, mimo tego, że podane są jasne kryteria wyboru.
2. Nie wiadomo, czy ten sam zestaw reakcji był wykorzystany podczas kalibracji innych układów typu tokamak.
3. Nie podano przyczyn, wyboru biblioteki przekrojów czynnych IRDFF ver.1.05, tym bardziej, że w obliczeniach stosowano przekroje pochodzące z biblioteki TENDL – 2014
4. Bardzo skrótowy opis wykonanego eksperymentu za pomocą generatora Genie 16C. Zamiast schematu eksperymentalnego jest zdjęcie, podobnie zamiast szczegółów toru spektrometrycznego mamy zdjęcie. Nie podano w jakiej kolejności umieszczono próbki w kapsule ani dlaczego próbki miały takie rozmiary. Brak informacji o sposobie transportu próbek do stanowiska detektora.

Str. 66. „Płaski” przekrój czynny chyba lepsze byłoby stwierdzenie niezależny od energii w tym zakresie.

Str. 71. Brak uzasadnienia dlaczego w przypadku Nb zastosowano inną geometrię pomiarową.

Str. 73. W tabeli 8 w ostatniej kolumnie mamy stosunek aktywności obliczonej do eksperymentalnej a nie stosunek niepewności.

Zamiast wytwarzanie z prędkością zbliżoną do produkcji neutronów 2.5 MeV powinno być stwierdzenie, że wydajność reakcji DD jest taka sama dla dwóch kanałów tej reakcji  
Należy zaznaczyć, że dla całkowitej wydajności emisji neutronów z plazmy deuterowej, 1% emisji to neutrony 14 MeV i jest to charakterystyczne dla JET.

Str. 74. W tabeli 9 w ostatniej kolumnie nie podano z jakiej diagnostyki neutronowej na JET określono wydajność tej emisji.

Stwierdzenie, na podstawie zamieszczonej tabeli 9, że radioaktywność produktów badanych reakcji jądrowych była ściśle związana z całkowitą ilością neutronów wyemitowanych podczas określonego wyładowania plazmowego nie wydaje się prawdziwa. Wystarczy porównać aktywności właściwe dla  $^{27}\text{Mg}$  z całkowitą wydajnością neutronów.

## Rozdział 7. Badanie emisyjności 14-MeV generatora neutronów w warunkach laboratoryjnych

Uwagi:

1. Nie podano explicite metodologii przeliczenia zmierzonej aktywności na wydajność emisji. We wzorze (32) występuje parametr  $B_i$ , który został zmierzony innym monitorem neutronów. Ze względu na to, że na podstawie tego wzoru określano wydajność generatora jakaś dyskusja wprowadzenia  $B_i$  wydaje się potrzebna.
2. Autorka nie prezentuje wspomnianego w pracy narzędzia numerycznego pozwalającego na „określenie radioaktywności każdego z produktów, ..... oraz wyznaczenie wydajności emisji generatora neutronów (str.93)
3. Symulacje numeryczne nie weryfikują poprawności zmierzonych wartości. Jest raczej na odwrót to symulacje numeryczne są weryfikowane eksperymentalnie.
4. Dla ścisłości należałoby przedstawić jednoznacznie, co było właściwym wkładem autorki, a co pozostałych członków zespołu eksperymentalnego.
5. Na rysunkach z widmami spektrometrycznymi gamma zamiast zliczenia użyłbym liczba zliczeń.

Str. 88. Co oznacza stwierdzenie, że konfiguracja rozety stosowana dla Nb była znacznie wydajniejsza ?

Str. 90, rys. 47 opis na osi rzędnych nie zgadza się z podpisem pod rysunkiem.

Str. 93, rys.51 fotografia nie daje jasnego obrazu w jakim rzeczywiście ustawieniu była mierzona wydajność emisji generatora.

Równanie (32) nie upraszcza się do równania (14), przynajmniej nie w takim zapisie.

Str.95, rys.51 na rysunku przedstawiono fluencję neutronów a nie strumień.

Str. 97, rys. 56, Nie jest wyjaśniono skąd mamy w widmie linię  $^{40}\text{K}$  ?

Str. 98, Jak zostało określone tło naturalne wspomniane w tym miejscu ?

Str. 99 – 100, Tabele 13 – 16, Skąd niespójność w wynikach między aktywnościami dla  $^{27}\text{Mg}$  a pozostałymi radionuklidami w dniu NPL1 1.

Str. 105, wartości wydajności emisji neutronów wyznaczone za pomocą detektora diamentowego, jeśli nie są autorki powinny mieć odnośnik literaturowy.

Str.111, Wydaje się, że rozbieżności pomiędzy wartościami emisji obliczonymi i zmierzonymi nie wynikają tylko z różnic w bibliotekach przekrojów.

## Rozdział 8. Kalibracja aparatury służącej do pomiaru neutronów w tokamaku JET przy wykorzystaniu generatora neutronów o energii 14 MeV.

Uwagi:

1. Nie jest jasne, którym detektorem HPGe były mierzone aktywności próbek, w trakcie kalibracji „in-situ” diagnostyki KN1 i KN2.
2. Nie jest jasne, kto wykonywał pomiary i opracowywał wyniki z detektorów diamentowych.
3. Nie ma dyskusji skąd wynika znaczna różnica w aktywnościach próbek zmierzonych w laboratorium NPL i podczas kalibracji w komorze JET-a.
4. Trudno mówić, że pomiary eksperymentalne zostały zweryfikowane przez obliczenia, jest raczej na odwrót to eksperyment weryfikuje obliczenia.

5. Brak dyskusji jak otrzymane współczynniki aktywacyjne dla Al i Nb będą wykorzystane w określeniu całkowitej emisji neutronów podczas wyładowań z deuterem i trytem w JET

Str. 117. Z jakiego powodu użyto do pomiaru wybranych próbek dwóch detektorów HPGe

Str. 118 Tabela 9 przedstawia raczej harmonogram napromienienia, niż szczegóły dotyczące różnych zestawów próbek aktywacyjnych.

Str. 119. Nie podano, jakie oprogramowania narzędziowego używano do określenia wydajności emisji neutronów z generatora i na czym polegała jego adaptacja do warunków „in-vesel”

Str. 120. Rys.72 w opisie nie podano co oznacza względna amplituda wydajności neutronów zmierzona za pomocą detektorów diamentowych

Str.121 – 122. Rys. 73 – 75, nie podano, którym detektorem zarejestrowano pokazane widma.

Str. 133. Rys. 82. Dla tego rysunku powinien być chyba odnośnik do literatury.

Str. 136. Rys. 84 - 86. Nie jest jasne o jaki kod transportu neutronów chodzi opracowany dla całego JET-a, czy tylko dla końcówki 3U diagnostyki KN2.

## *Rozdział 9. Podsumowanie i wnioski.*

### Uwagi:

1. Brakuje tutaj wyraźnego podsumowania własnej pracy i wkładu jaki praca wniosła do wyników zespołu wykonującego kalibrację diagnostyk neutronowych KN1 i KN2 na JET.
2. Nie ma wzmianki o pracach kalibracyjnych przeprowadzonych na tokamaku TFTR i odniesienia się do tych prac.
3. Nie ma wzmianki kto i dlaczego opracował taką metodologię kalibracji diagnostyk KN1 i KN2

## **Ocena pracy**

Zalety tej pracy można przedstawić następująco:

Praca doktorska mgr. Ewy Łaszyńskiej jest obszerną rozprawą poświęconą jednemu z ważniejszych tematów jakim jest kalibracja „in-situ” monitorów emisji neutronów stosowanych w tokamakach. Monitorowanie emisji neutronów i znajomość wydajności tej emisji, ma kluczowe znaczenie dla kontroli własności paliwa przyszłego reaktora termojądrowego, mocy wytworzonej podczas pracy takiego układu oraz spraw związanych z bezpieczeństwem radiacyjnym jego pracy.

Zaletą pracy jest czytelny i systematyczny spis zadań, które autorka konsekwentnie realizowała, przedstawiając bardzo dużą liczbę wyników pomiarowych, które konfrontowano z obliczeniami numerycznymi. Opanowanie metodologii pomiarowej oraz wykorzystanie wyników pracy w międzynarodowym zespole jest dodatkową wartością tej pracy.

Niedociągnięcia tej pracy zostały wymienione w punkcie błędy i nieścisłości dostrzeżone w pracy



## Podsumowanie

Stwierdzam, że recenzowana praca po poprawieniu wymienionych błędów i nieścisłości może być dopuszczona do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim w dziedzinie nauk fizycznych, dyscyplinie fizyka, zgodnie ze znowelizowaną ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami, por. Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455, Nr 112, poz. 654, z 2012 r. poz. 1544) o co wnoszę do Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

Kraków, 22/11/2018

*Marrek Szlach*