

SPEKTROMETRIA AKTYWACYJNA DLA POTRZEB DRUGIEJ KAMPANII DEUTEROWO-TRYTOWEJ NA TOKAMAKU JET

The activation spectrometry for the purpose of the Second Deuterium-Tritium Experimental Campaign on JET tokamak.

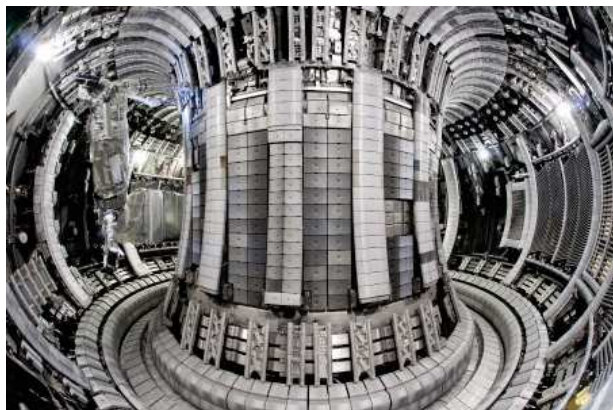
Ewa Łaszyńska, Sławomir Jednoróg

Streszczenie: Metoda aktywacyjna stosowana do charakteryzacji różnych źródeł neutronów, należy do jednej z najstarszych metod stosowanych w neutronice. Pomimo tego jest wciąż ważna, gdyż prowadzi do otrzymania wartości bezwzględnych wydajności neutronów, a czasami pozwala na dekonwolucję ich rozkładu energetycznego. Druga Deuterowo-Trytowa Kampania Eksperymentalna na Wspólnym Europejskim Tokamaku JET jest wielkim wyzwaniem. Po jej zakończeniu nastąpi zamknięcie i odstawienie JETa, a tym samym zakończenie jakże ważnego rozdziału w historii fizyki plazmy. Przed kampanią deuterowo-trytową nastąpi kalibracja diagnostyk neutronowych tokamaka i to z niepewnością niższą niż 5%. Technika aktywacyjna posłuży do charakteryzacji generatora neutronów, który będzie zastosowany, jako ustandaryzowane źródło neutronów 14 MeV, a następnie będzie zastosowana w czasie ostatniej kampanii eksperymentalnej do monitorowania wydajności neutronów.

Abstract: The activation technique used for characterization of many different neutron sources belongs to the oldest one applied in neutronics area. It is still important because it leads to obtainment of obsolete value of neutron yield and from time to time allows neutron spectrum deconvolution. The Second Deuterium-Tritium Experimental Campaign that is held on Joint European Torus is a great challenge. After completing the above campaign the shut down and decommissioning of the JET is expected. Thus, the important chapter in history of plasma physics will be definitely closed. But before the deuterium-tritium campaign starts, the calibration of neutron diagnostic should be completed with uncertainty better than 5%. The activation technique is used for neutron diagnostics characterization that is chosen as the source of 14 MeV neutrons. Afterwards, the activation technique will be applied as neutron yield monitor during last experimental campaign on JET tokamak.

Słowa kluczowe: tokamak JET, metoda aktywacyjna, kalibracja diagnostyk neutronowych tokamaka JET, generator neutronów 14 MeV, wydajność neutronowa

Key words: JET tokamak, activation technique, calibration of neutron diagnostics for JET tokamak, 14 MeV neutron generator, neutron yield



Fot. 1. Wnętrze JET (ang.: Joint European Torus) największego działającego tokamaka

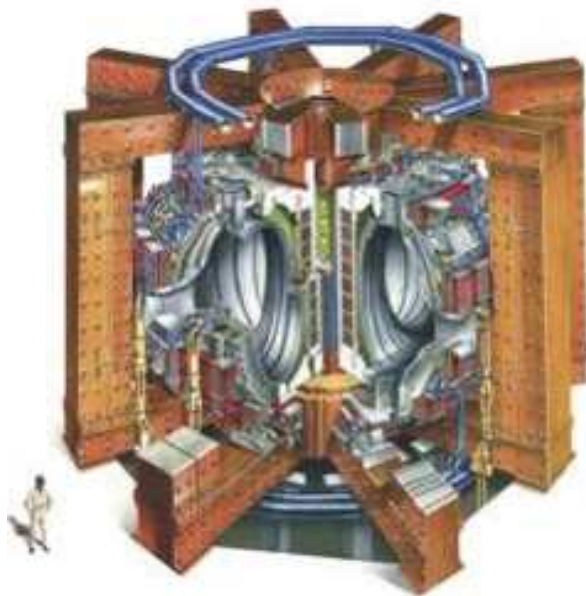
Phot. 1. The biggest to date JET tokamak inside

Wprowadzenie

Pomiar wydajności neutronowej Y_n (ang.: neutron yield) urządzeń fuzyjnych jest zagadnieniem z zakresu badań podstawowych. Spowodowane jest to koniecznością określenia mocy wyjściowej urządzenia fuzyjnego, przewidywaniem jego budżetu neutronowego oraz względami bezpieczeństwa. Do niedawna wydajność emisji neutronów w różnych eksperymentach plazmowych mierzono za pomocą aparatury pomiarowej, która powinna być kalibrowana przy wykorzystaniu odpowiedniego rodzaju źródeł neutronowych o znanych charakterystykach. Obecnie przyjęto odmienną filozofię kalibracji. Opracowuje się model geometryczny urządzenia, w którym odwzorowane są najmniejsze detale z uwzględnieniem ich struktury

materiałowej. Taki model stanowi dane wejściowe (ang.: geometrical input) dla programów symulujących oddziaływanie promieniowania (w tym przypadku neutronów) z materią. Następnie do urządzenia wprowadza się źródło neutronów i porównuje dane eksperymentalne z danymi pochodzącymi z symulacji. Jeśli nie otrzymuje się zgodności pomiędzy nimi to udoskonala się, aż do skutku model geometryczny.

W ciągu kilku najbliższych lat na tokamaku JET (fot. 1.) planowana jest druga w jego historii kampania z wykorzystaniem trytu (DTE2 – Deuterium-Tritium Experimental Campaign), w czasie której z reakcji deuteru i trytu (D-T) emitowane będą duże ilości prędkich 14 MeV neutronów. Planuje się, że kampania ta zostanie przeprowadzona w 2019 r. System monitorujący emisję neutronów na tokamaku JET składa się obecnie z komór rozszczepieniowych (KN1) i urządzeń do diagnostyki aktywacyjnej (KN2). Urządzenia te zostały absolutnie wykalibrowane w 2013 r. Kalibrację przeprowadzono za pomocą neutronów, pochodzących z ^{252}Cf , którego widmo energetyczne w zadowalający sposób symuluje widmo neutronów emitowanych w czasie reakcji syntezy D-D w plazmie deuterowej. Źródło to umieszczano w wielu miejscach w komorze próżniowej tokamaka JET. Celem tej kalibracji było zbadanie odpowiedzi komór rozszczepieniowych i urządzeń do diagnostyki aktywacyjnej. Następnie dokonywano superpozycji odpowiedzi. Kalibrację przeprowadzono z niepewnością 10%. Badano również poprawność modelowania numerycznego, stosując metodę MCNP (Monte Carlo N-particle code). Dane doświadczalne otrzymane w czasie kalibracji NSC (Neutron Source Calibration) weryfikowano później w czasie kampanii eksperymentalnej.



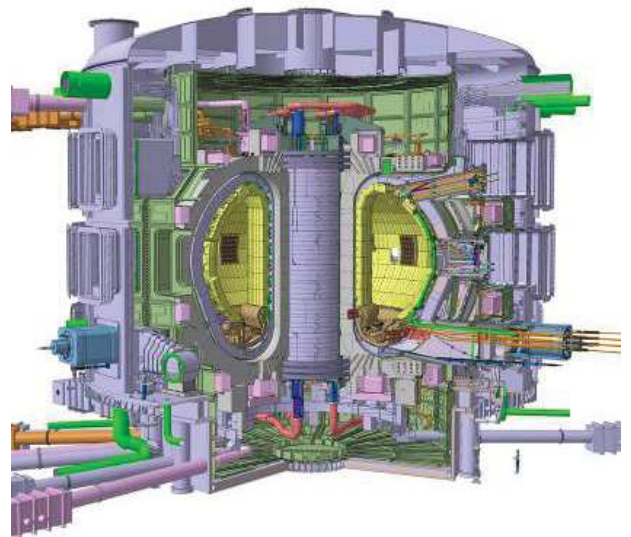
Fot. 2. Schemat JET. Postać znajdująca się w dolnym lewym rogu pozwala ocenić rozmiary urządzenia

Phot. 2. Schematic view of JET. The person that is visible in the left bottom corner allows to understand the size of the device

Ekstrapolacja współczynników kalibracyjnych, określonych dla neutronów o energii 2,5 MeV – z reakcji D-D, na współczynniki kalibracyjne dla neutronów o energii 14 MeV – z reakcji D-T spowodowałaby zwiększenie niepewności wyników pomiarów. W konsekwencji nastąpiłoby zwiększenie marginesów błędów oceny budżetu neutronowego. W celu jego właściwego określania konieczne jest przeprowadzenie kalibracji neutronami o energii 14 MeV ze źródła wykorzystującego neutrony z reakcji D-T.

Doświadczenie zdobyte podczas kalibracji neutronami 14 MeV na tokamaku JET zostanie następnie wykorzystane przy tworzeniu procedur kalibracyjnych dla budowanego w Cadarache pierwszego Międzynarodowego Eksperymentalnego Reaktora Termojądrowego – ITER (ang.: International Termonuclear Experimental Reactor). Wymieniona kalibracja będzie również przeprowadzana przy użyciu generatora neutronów 14 MeV.

Kalibracja diagnostyk neutronowych tokamaka JET, przy użyciu generatora 14 MeV będzie przeprowadzona po raz pierwszy. W tym celu użyty zostanie 14 MeV - NG (ang.: Neutron Generator) o wydajności rzędu $5 \cdot 10^8$ n/s. Przed ekipą wykonującą postawione zostało zadanie przeprowadzenia jej z niepewnością 5%. W związku z tym wydajność emisji NG oraz widmo energetyczne wyemitowanych z niego neutronów musi być zmierzone absolutnie i precyzyjnie scharakteryzowane dla różnych kątów emisji. Ze względu na możliwą zmianę intensywności emisji oraz widma energetycznego NG podczas jego eksploatacji konieczne jest przeprowadzanie pomiarów intensywności emisji w trakcie kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET oraz po jej zakończeniu.



Fot. 3. Schemat ITERa - największego na świecie będącego w budowie tokamaka, który będzie wzorem dla komercyjnych elektrowni jądrowych opartych na syntezie izotopów wodoru. Postać znajdująca się w dolnym prawym rogu pozwala ocenić rozmiary urządzenia

Phot. 3. Schematic view of ITER- the biggest tokamak that is under construction. It shall be the beginning for the commercial power plants based on hydrogen isotopes fusion. The person that is visible in the right bottom corner allows to understand the size of the device



Fot. 4. ITER w budowie

Phot. 4. ITER tokamak under construction

Metoda aktywacyjna jest metodą, która została użyta do charakteryzacji NG. Z jej pomocą możliwe było wyznaczenie, w sposób bezwzględny, ilości emitowanych neutronów na jednostkę czasu i powierzchni, czyli gęstości strumienia neutronów (ang.: neutron flux density) [$n \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$].

Spośród wielu reakcji jądrowych wywoływanych przez neutrony przeważnie reakcje progowe¹ mają zastosowanie w technice aktywacyjnej. Podczas wyboru tychże reakcji bierze się pod uwagę kolejno: położenie progu energetycznego, wartość przekroju czynnego, wiarygodność danych jądrowych, oraz właściwości promieniotwórcze produktów powstających w czasie aktywacji. Przy dobieganiu energii progowej, powyżej której zachodzić będzie rozpatrywana reakcja bierze się pod uwagę lokalizację tego progu w stosunku do progu innych, już wytypowanych reakcji oraz zakres energii neutronów, który podlega szczegółowemu badaniu. Wartość przekroju czynnego wyrażana w barnach ($1b=10^{-28} m^2$) powinna być na tyle duża, aby aktywność powstających produktów umożliwiała ich detekcję. Z reguły typowaną metodą radiometryczną, za pomocą której następuje określenie poziomu aktywacji jest spektrometria promieniowania gamma. Produkty aktywacji powinny mieć na tyle długi czas połowicznego zaniku, aby możliwa była ich rejestracja. Ponadto emitowane kwanty gamma nie powinny interferować ze sobą oraz być na tyle intensywne, aby otrzymać, przy uzyskiwanej aktywności, zadowalający poziom błędów pomiarowego. Dodatkowo spektrometr promieniowania gamma powinien mieć wyznaczoną wydajność rejestracji promieniowania gamma w szerokim zakresie energii dla próbek o rozpatrywanej geometrii pomiarowej a w szczególności wykonanych z metali (pierwiastków) o znacznie różniących się gęstościach (Z-efektywne).

Materiał i metody

1. Fuzja izotopów wodoru

Reakcje syntezy izotopów wodoru zostały przedstawione w równaniach 1-8:

¹ Progowe reakcje jądrowe to takie reakcje, których zachodzenie uzależnione jest od osiągnięcia przez kwanty promieniowania, cząsteczki, lub bombardujące jądra, pewnej minimalnej energii zwanej energią progową. Poniżej progu energetycznego, przekrój czynny na daną reakcję jest równy zeru.

$$d + t = \alpha (3,518) + n (14,072) + Q (17,590) \quad (1)$$

$$d + t = {}^5\text{He} + \gamma + Q (16,625) = \alpha + n + \gamma + Q (17,590) \quad (2)$$

$$d + d = {}^3\text{He} (0,817) + n (2,452) + Q (3,269) \quad (3)$$

$$d + d = t (1,008) + p (3,025) + Q (4,033) \quad (4)$$

$$d + d = \alpha + \gamma + Q (23,843) \quad (5)$$

$$t + t = \alpha + n + n + Q (11,323) \quad (6)$$

$$t + t = {}^5\text{He} (1,729) + n (8,645) + Q (10,374) =$$

$$\alpha + n + n (8,645) + Q (11,323) \quad (7)$$

$$t + t = {}^5\text{He}^* (1,296 \pm 0,333) + n (6,479 \pm 1,667) + Q (7,775) =$$

$$\alpha + n + n + Q (11,323) \quad (8)$$

Liczby podane w nawiasach wyrażone są w megaelektronowoltach - MeV i dotyczą energii wydzielonej w czasie reakcji i o ile jest możliwe energii unoszonej przez jej produkty. Reakcje 2, 7 prowadzą do powstania ${}^5\text{He}$ w stanie podstawowym podczas, gdy reakcja 8 prowadzi do powstania tego radionuklidu w stanie wzbudzonego ${}^5\text{He}^*$. Gdy reakcja prowadzi do powstania trzech cząstek, jak ma to miejsce w przypadku fuzji trytu dystrybucja energii między tymi produktami ma charakter ciągły i dlatego nie jest ona podawana przy poszczególnych produktach.

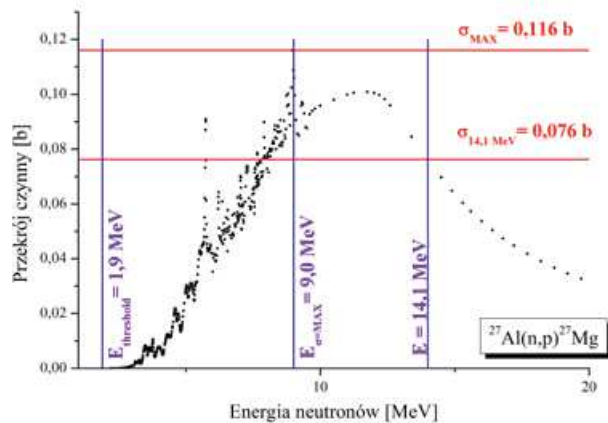
2. Wybór reakcji jądrowych

Wśród wielu reakcji jądrowych wywoływanych przez neutrony, tylko niektóre posiadają odpowiednio usytuowany próg oraz wysokie prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Podczas selekcji rozważanych jest wiele istotnych parametrów jądrowych. Dotyczą one zarówno materiału tarczowego jak również produktów, które otrzymywane są w wyniku zajścia danej reakcji. Parametry określające przydatność danej reakcji jądrowej do realizacji celów przedstawionych powyżej można podzielić na dwie grupy: charakterystyka jądrowa materiału tarczowego w zakresie oddziaływania neutronów oraz charakterystyka produktów tych reakcji w zakresie ich mierzalności wytypowaną metodą radiometryczną. Najważniejszymi parametrami przynależnymi do pierwszej grupy, które decydują o użyteczności danej reakcji jądrowej w trakcie określonego eksperymentu są: energia progowa (najmniejsza energia, neutronów, przy której dana reakcja zachodzi), przekrój czynny na daną reakcję jądrową, udział rozpatrywanego nuklidu (stabilnego) w mieszaninie naturalnych nuklidów danego pierwiastka (abundancja). Do drugiej grupy należą takie parametry jak czas połowicznego rozpadu, energia najintensywniej emitowanych kwantów gamma, która charakteryzuje dany produkt aktywacji. Materiały aktywacyjne, które zostaną użyte podczas kalibracji diagnostyk tokamaka JET z użyciem 14 MeV neutronów zostały wybrane na podstawie poniższych kryteriów: energia progowa $<2,5-14,1>$ MeV, relatywnie wysoki przekrój czynny na daną reakcję wynoszący co najmniej dziesiąte części barna, odpowiedni czas połowicznego rozpadu rzędu sekund do pojedynczych dni, produkty aktywacji emitują mierzalne, intensywne kwanty gamma, wiarygodny przekrój czynny traktowany jako standard dozymetryczny.

Na podstawie powyższych kryteriów, do celów kalibracyjnych zarówno NG, a następnie diagnostyk toka-

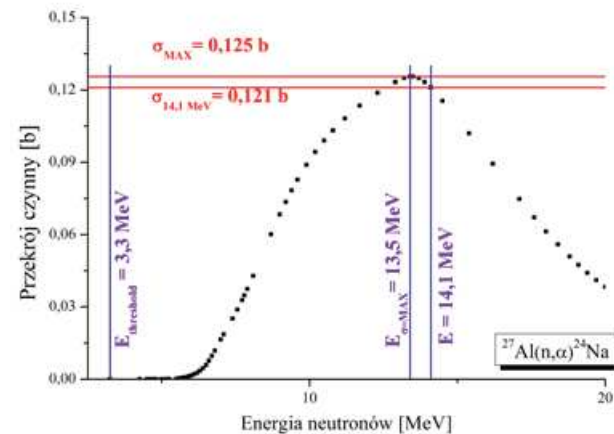
maka JET i kolejno EDT2, kampanii T-T i zamykającej erę tokamaka JET kampanii D-D, wytypowano następujące reakcje jądrowe: $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$, $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$. Jako wiarygodną bazę danych jądrowych przyjęto International Reactor Dosimetry and Fusion File IRDFF v.1.05. Przekroje czynne dla wytypowanych reakcji jądrowych wraz z ich najważniejszymi parametrami przedstawiono na rys. 1-4.

Tabela 1 przedstawia parametry reakcji jądrowych przeznaczonych do charakteryzowania NG, kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET oraz dalszych czynności, takich jak monitorowanie wydajności neutronowej w czasie kampanii DTE2, T-T, oraz D-D.



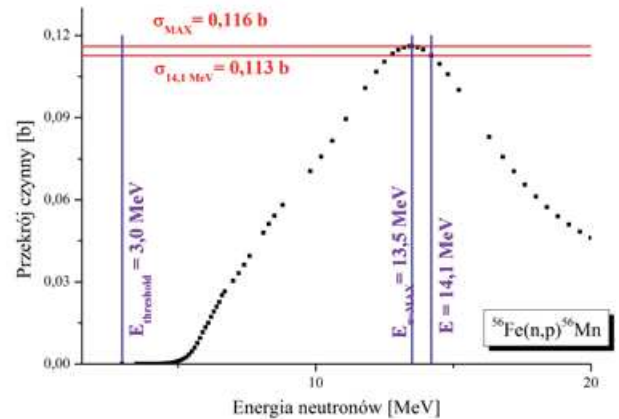
Rys. 1. Przekrój czynny na reakcję $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ na podstawie IRDFF v.1.05, gdzie: $\sigma_{14.1\text{MeV}}$ - przekrój czynny dla neutronów o energii 14 MeV z reakcji D-T (b), σ_{max} - maksymalny przekrój czynny (b), $E_{\text{threshold}}$ - energia progowa (MeV), $E_{\sigma=\text{MAX}}$ - energia, przy której przekrój czynny osiąga maksimum (MeV)

Fig. 1. The cross section for nuclear reaction $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ based on IRDFF v.1.05, where: $\sigma_{14.1\text{MeV}}$ - cross section for 14 MeV neutrons released from D-T reaction (b), σ_{max} - maximal cross section (b), $E_{\text{threshold}}$ - threshold energy (MeV), $E_{\sigma=\text{MAX}}$ - energy for maxima cross section (MeV)



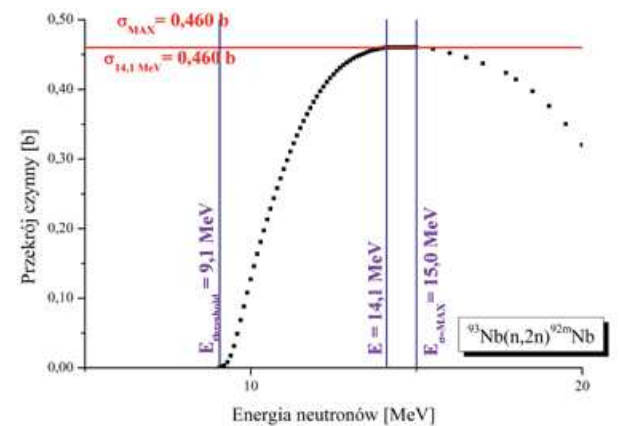
Rys. 2. Przekrój czynny na reakcję $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ na podstawie IRDFF v.1.05.

Fig. 2. The cross section for nuclear reaction $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ based on IRDFF v.1.05.



Rys. 3. Przekrój czynny na reakcję $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ na podstawie IRDFF v.1.05.

Fig. 3. Cross section for nuclear reaction $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ based on IRDFF v.1.05.



Rys. 4. Przekrój czynny na reakcję $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ na podstawie IRDFF v.1.05.

Fig. 4. Cross section for nuclear reaction $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ based on IRDFF v.1.05.

Dla wytypowanych reakcji jądrowych określono właściwości powstających produktów pod kątem ich przydatności do mierzenia metodą spektrometrii promieniowania gamma. Dane te przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 1. Parametry wybranych reakcji jądrowych
Table 1. Main parameters of selected nuclear reactions

Reakcja jądrowa	Abundancja	$E_{\text{Threshold}}$ [MeV]	$E_{\sigma=\text{MAX}}$ [MeV]	σ_{MAX} [b]	$\sigma_{14\text{MeV}}$ [b]
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1	3,249	13,5	0,125	0,121
$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	1	1,896	9,0	0,116	0,076
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	0,918	2,966	13,5	0,116	0,113
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	1	9,064	15,0	0,460	0,459

gdzie: $E_{\text{Threshold}}$ oznacza energię neutronów, powyżej której istnieje niezerowe prawdopodobieństwo zachodzenia określonej reakcji, $E_{\sigma=\text{MAX}}$ oznacza energię neutronów, dla której prawdopodobieństwo zachodzenia danej reakcji jest największe oraz σ_{MAX} i $\sigma_{14\text{MeV}}$ oznaczają kolejno maksymalną wartość przekroju czynnego i wartość przekroju czynnego dla neutronów o energii 14 MeV.

Tabela 2. Najważniejsze parametry produktów wyselekcjonowanych reakcji jądrowych pod kątem ich mierzalności metodą spektrometrii gamma

Table 2. Main parameters of selected nuclear reaction products in terms of its measurability by means of gamma spectrometry method

Reakcja jądrowa	Czas połowicznego rozpadu	Energia kwantów gamma (keV)	Intensywność kwantów gamma	Gęstość ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	9,458 min	843,8	0,718	2,7
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	2,577 h	846,7	0,989	7,874
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	15,03 h	1369	0,999	2,7
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	10,25 day	934,5	0,740	8,57

3. Generator neutronów



Fot. 5. Generator neutronów ING-17 (VNIIA)

Phot. 5. Neutron Generator ING-17 (VNIIA)

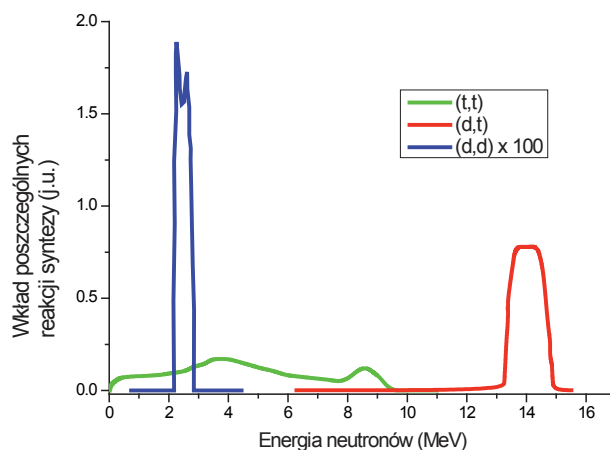
Do celów kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET wytypowany został NG ING-17 produkcji VNIIA. Fot. 5 przedstawia generator ING-17 wraz z zespołem sterowania i zasilania. Tabela 3 przedstawia najważniejsze parametry użytkowe tego generatora.

Tabela 3. Charakterystyka techniczna generatora neutronów ING-17
Table 3. Technical characterization of neutron generator ING-17

Parametr	Wartość
Wydajność emisji neutronów [n/s]	do $3\cdot 10^8$ ($E_n=14$ MeV), do $5\cdot 10^6$ ($E_n=2,5$ MeV)
Tryb pracy	impulsowa lub ciągła
Długość impulsu neutronowego (praca impulsowa) [μs]	20-100
Częstotliwość (praca impulsowa) [Hz]	400-10000
Czas operacyjny [h]	300
Napięcie zasilania	110/220V, 50/60Hz
Maksymalny pobór mocy [W]	120
Wymiary generatora [mm]	średnica: 70 długość: 480

Spodziewano się, że widmo neutronów emitowanych z NG bazującego na reakcji D-T będzie zawierało komponenty pochodzące nie tylko z reakcji deuteru z trytem, ale również trytu z trytem i deuteru z deuterem. Wynika to z obecności trytonów w źródle jonów oraz implantacji w materiale trytowanej tarczy deuteronów z wiązki. Są to pierwotne jony z wiązki, które nie przereagowały z jądrami tarczy. Oprócz jonów wiązka uderzająca w tarczę zawie-

rać może molekuly (d^+d^+ , d^+t^+ , t^+t^+ , $d^+d^+d^+$, $d^+d^+t^+$, $d^+t^+t^+$, $t^+t^+t^+$). Kształt widma neutronów w dużym stopniu zależy od energii przyspieszania, obecności poszczególnych składowych w wiązce oraz zmiennej w czasie charakterystyki źródła jonów. Ponadto kierunkowa charakterystyka neutronów podlega zmianie w zależności od położenia monitora w stosunku do osi układu wyznaczonej przez wiązkę jonów. Nieregularność emisji neutronów² jest immanentną cechą reakcji fuzji. Dlatego zagadnienie oszacowania widma neutronów z NG jest niezwykle trudne już w samym założeniu.



Rys. 5. Poglądowy rozkład neutronów względem energii dla generatora neutronów z trytowaną tytanową tarczą

Fig. 5. Schematic view of neutron distribution over energy for the neutron generator with tritiated titanium target

Rozkład energetyczny neutronów z reakcji D-T może być przedstawiony w postaci piku o energii maksymalnej 14 MeV (rys. 5, czerwona składowa wykresu). Kiedy reakcja T-T prowadzi do powstania trzech produktów (trypartycja) to dystrybucja energii pomiędzy nimi ma szerokie widmo, stąd też określenie teoretyczne takiego rozkładu neutronów jest zadaniem skomplikowanym. Widmo energetyczne neutronów z reakcji T-T przedstawia się zwykle w postaci elipsy zmodyfikowanej w zakresie niskich energii w wyniku wtórnych interakcji (rys. 5, początkowa i środkowa część zielonej składowej wykresu). Widmo neutronów będące wynikiem powstania ^5He w stanie podstawowym, ma kształt piku o maksymalnej energii 8,7 MeV (rys. 5, wkład do piku widocznego w zakresie wysokich energii na zielonej składowej wykresu). Z kolei powstawaniu $^5\text{He}^*$ w stanie wzbudzonym towarzyszy emisja neutronów w postaci piku o energii 7,7 MeV (rys. 5, wkład do piku widocznego w zakresie wysokich energii na zielonej składowej wykresu). Neutrony pochodzące z reakcji D-D mają kształt piku o energii maksymalnej 2,5 MeV. Pik ten ulega deformacji w związku z oddziaływaniami neutronów z materiałem tarczy i obudowy generatora stąd jego symboliczne rozszczepienie przedstawione w postaci niebieskiej składowej wykresu (rys. 5). Końcowy kształt tego widma

² Anizotropia to nieregularności emisji neutronów mierzone w stosunku do osi Z. Asymetria radialna to nieregularności w emisji neutronów mierzone w poprzek do osi Z.

zależy od charakterystyki źródła jonów, stosunku ^5He do $^5\text{He}^+$, składu wiązki i energii przyspieszania jonów oraz stabilności wymienionych powyżej parametrów.

Metody pomiarowe

Stanowisko badawcze w Narodowym Laboratorium Fizyki w Teddington

Na listopad 2015 r. oraz czerwiec 2016 r. zaplanowano sesje eksperymentalne, których zadaniem było wyznaczenie widma energetycznego neutronów emitowanych z NG dla różnych kątów emisji oraz bezwzględnej ilości emitowanych neutronów. Eksperyment odbywał się w Narodowym (Brytyjskim) Laboratorium Fizyki - NPL (ang.: -National Physical Laboratory, Teddington) w Londynie. Wydajność emisji miała zostać scharakteryzowana w sposób absolutny z błędem nie przekraczającym 5%. Wymaganie to postawiono ze względu na zastosowanie omawianego NG do kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET.

Fotografia 6 przedstawia wnętrze hali nisko-rozproszeniowej w Laboratorium Metrologii Neutronów im Sir Jamesa Chadwicka. Hala posiada na tyle znaczące rozmiary, aby móc zanieść składową pochodzącą od rozproszenia podczas pomiarów neutronów. Podlegający charakterystyce NG został zamontowany na jej środku (fot. 6). Wokół NG zamontowane zostały liczne urządzenia służące do monitorowania neutronów, takie jak precyzyjny długi licznik dePanghera (ang.: precision long counter), dwa liczniki długie (LC ang.: long counter), detektor diamentowy na bazie pojedynczego diamentowego monokryształu - SDD (ang.: Single crystal Diamond Detector), półprzewodnikowy detektor krzemowy - SSD (ang.: silicon semiconductor detector), scyntylacyjny spektrometr neutronowy NE-213 i folie aktywacyjne. Wszystkie pomiary wspomagane były obliczeniami z zastosowaniem kodu numerycznego MCNP.

Zestaw foli aktywacyjnych przymocowany został do specjalnie zaprojektowanego uchwytu (fot. 7). Schemat pracy NG obejmował 20 min. pracy i kolejno 20 min. chłodzenia pomiędzy cyklami. Podczas przerw dokonywane były m.in. zmiany położenia diagnostyk neutronowych i prace instalacyjne. Stąd też okresy chłodzenia ulegały często wydłużeniu. Dobowy cykl pracy NG składał się zazwyczaj z 11-13 serii. Natomiast folie aktywacyjne usuwane były zazwyczaj po 9 serii, aby umożliwić pomiary spektrometryczne zaindukowanych neutronami radionuklidów.

Na kolejnej fot. 7 przedstawiony został generator neutronów ING-17 zamontowany na środku obrotowego podestu umożliwiającego zbadanie jego charakterystyk emisyjnych w tym kątowych. Na tle generatora w jego przedniej części widoczna jest korona wykonana z aluminium. Spełnia ona rolę odejmowanego uchwytu umożliwiającego przytwierdzenie do niego próbek aktywacyjnych. Uchwyt wraz z foliami w czasie kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET będzie mocowany i zdejmowany za pomocą robota.



Fot. 6. Wnętrze hali eksperymentalnej. NG umieszczony został w centralnej części hali. Na czerwonych prowadnicach dwa LC i NE-213
Phot. 6. Inside the experimental hall. NG has been fixed in the central position. On the red rails are visible two Long Counters and spectrometer NC-213



Fot. 7. NG wraz z przymocowanym do niego SDD (na postumencie w kolorze złotym) oraz uchwytem na folie aktywacyjne
Phot. 7. The NG with attached SDD (on the top of golden pedestal) and holder for activation foils

Uchwyt ten został przedstawiony na fot. 8.



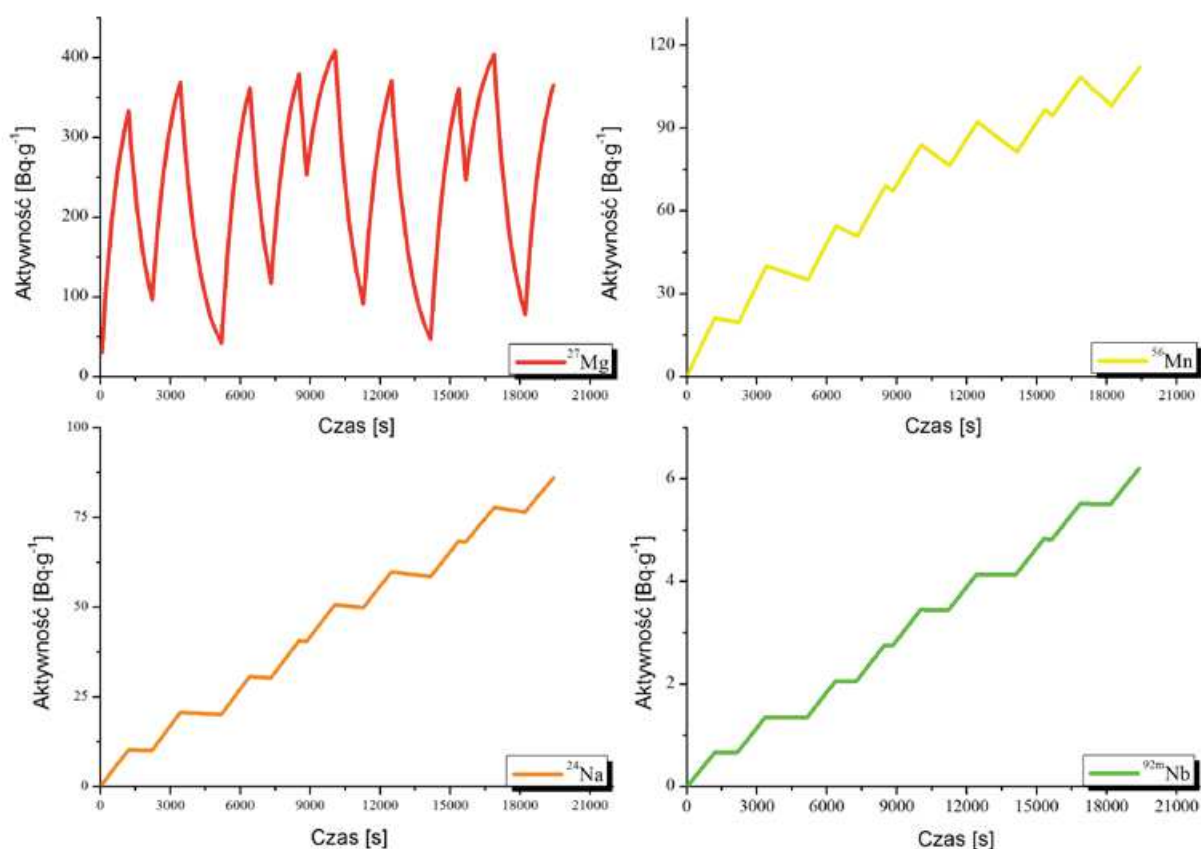
Fot. 8. Uchwyt pozwalający przymocować do generatora w sposób powtarzalny próbki aktywacyjne. W części centralnej dwie folie niobowe oznaczone 1b i 1c
Phot. 8. The holder allows reproducibly fasten activation foils to the generator. In the central position are two niobium foils labeled 1b and 1c

Wyniki i ich omówienie

Spodziewane nieoznaczoności mierzonych wartości pola pod pikiem całkowitego pochłaniania energii były zgodne z wymaganiami dotyczącymi dokładności metody zdefiniowanymi we wstępie.

Rys. 6. ma na celu zobrazować jak zmieniała się aktywność poszczególnych foli aktywacyjnych podczas aktywacji z użyciem NG. Do obliczeń brano rzeczywiste warunki aktywacji

w tym czasy pracy generatora i czasy przerw a aktywność końcowa była określana poprzez pomiar spektrometryczny.



Rys. 6. Przykładowe zmiany aktywności poszczególnych produktów aktywacji
Fig. 6. Examples of changes in the activity of particular activation product

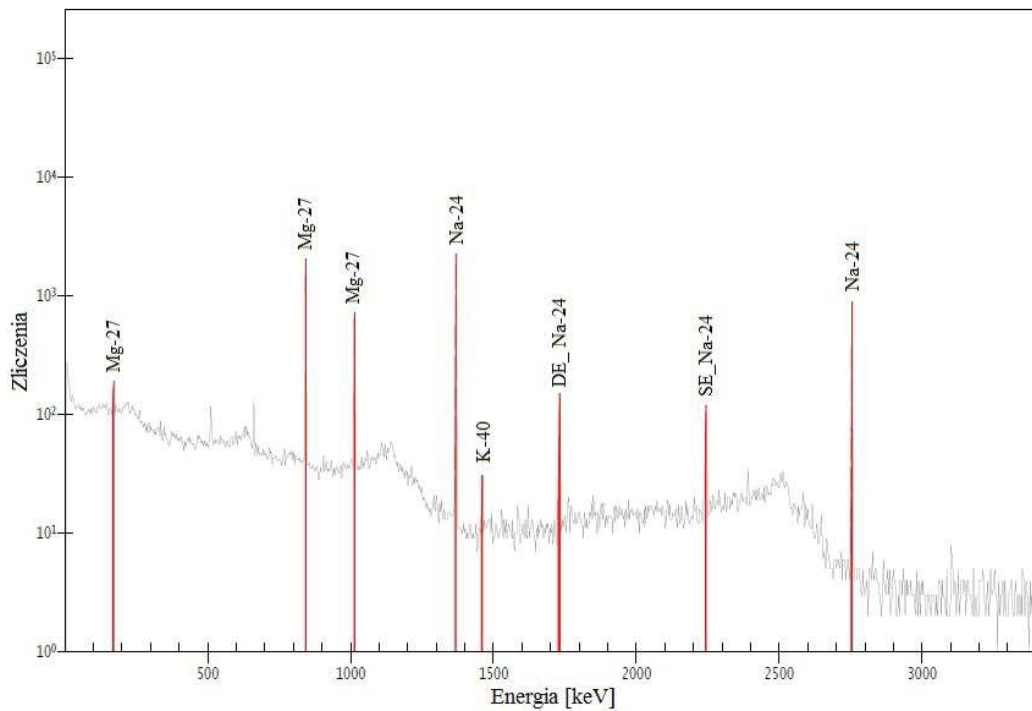
Pomiar spektrometryczny zaktywowanych próbek

Do pomiarów kwantów gamma emitowanych z aktywowanych próbek Al, Fe, Nb użyto wyprodukowany przez Canberra detektor promieniowania gamma, HPGe (ang.: High Purity Germanium) o rozdzielczości 1,85 keV dla pików ^{60}Co o energii 1332,4 keV, wyposażony w charakterystykę numeryczną (NCh) oraz oprogramowanie spektrometryczne GENIE 2000. Dla każdej z powyższych reakcji obliczono wydajność rejestracji kwantów gamma za pomocą oprogramowania LABSCOS/ISOCS. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń ustalono, że produkty reakcji $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ będą mierzone w pierwszej kolejności ze względu na ich czas połowicznego zaniku (Tabela 1), ale 12 min. od zakończenia aktywacji. Opóźnienie to miało na celu umożliwienie rozpadu produktów reakcji $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ i w rezultacie zmniejszenie tła Comptonowskiego wokół pików całkowitego pochłaniania energii fotonów pochodzących z ^{27}Mg . Kolejno mierzono produkty reakcji $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ a następnie $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ i na końcu $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$. Taki porządek uwzględniał wcześniejsze obliczenia spodziewanych

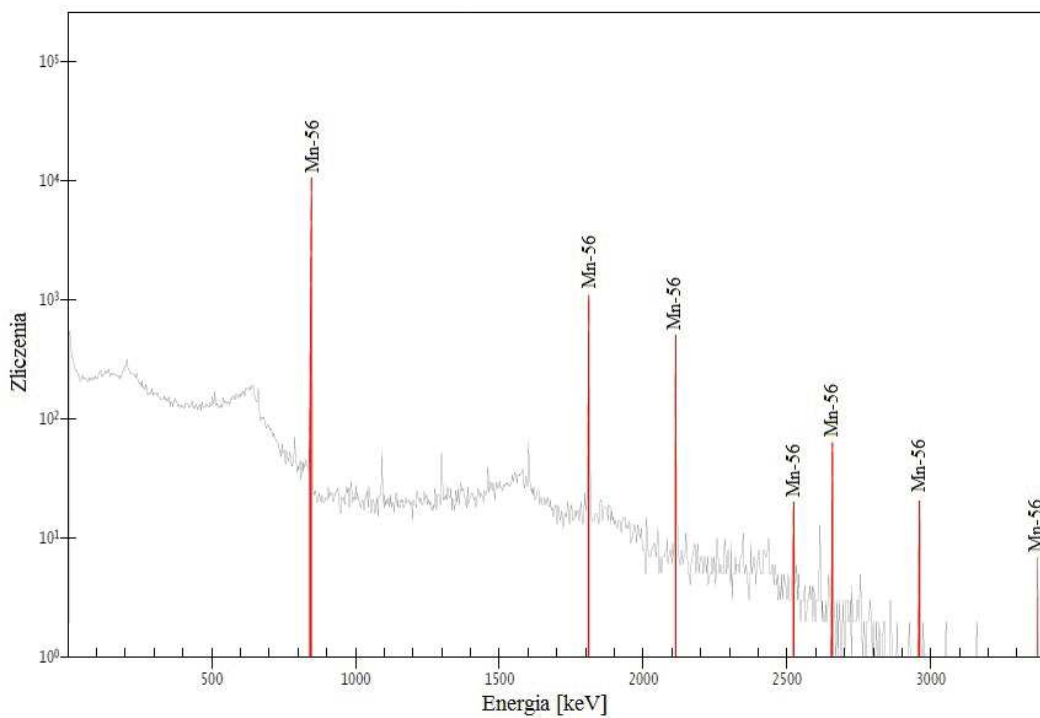
aktywności produktów aktywacji, ich czasy połowicznego zaniku oraz wydajności rejestracji jak również podstawowe zasady akwizycji i obróbki danych spektrometrycznych.

Zmiany aktywności ^{27}Mg mają charakter piłokształtny. Należy jednak zwrócić uwagę, że wobec relatywnie krótkiego okresu połowicznego zaniku ^{27}Mg dość szybko następuje ustalenie równowagi pomiędzy wzrostem aktywności i jej ubytkiem w związku z rozpadem jąder magnezu i jego aktywność nie wzrasta. Wręcz przeciwną sytuację mamy w pozostałych przypadkach.

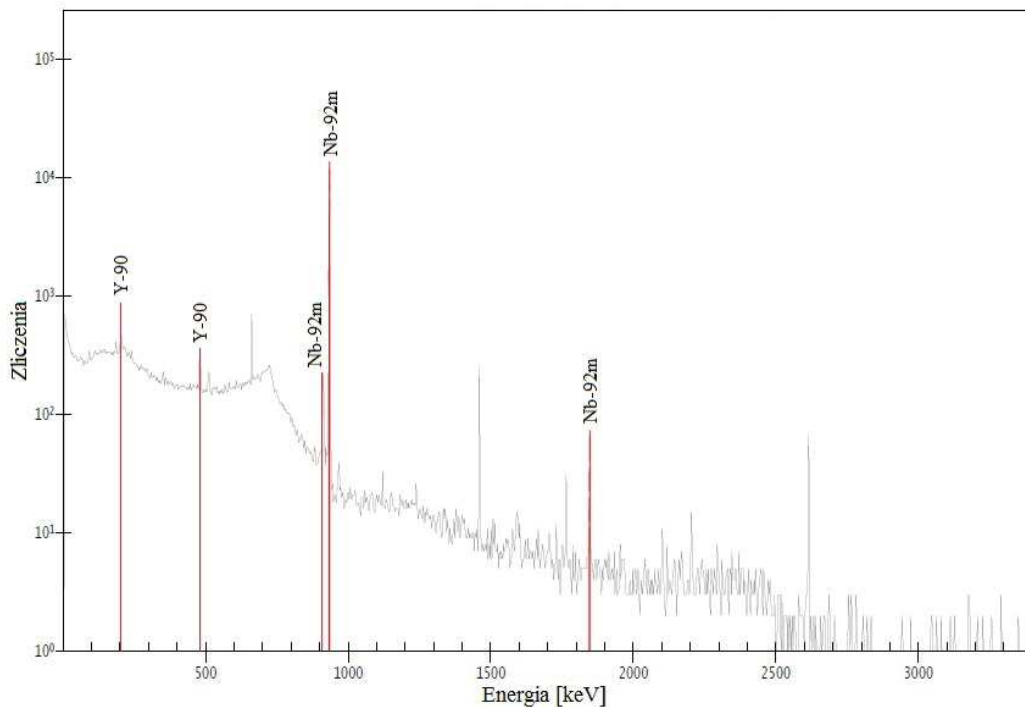
Na rys. 7-9 zaprezentowano przykładowe widma spektrometryczne. Dla aluminium przedstawiono widmo otrzymane w wyniku pierwszego pomiaru dokonanego 12 min. po zakończeniu napromieniowania. Widmo spektrometryczne zebrane podczas drugiego pomiaru niewiele odbiega wyglądem od pierwszego. We wszystkich widmach spektrometrycznych analizowane piki całkowitego pochłaniania energii są wyraźnie widoczne na tle promieniowania tła naturalnego oraz tła Comptonowskiego. Tak więc nie było kłopotu z ich identyfikacją i dalszą analizą.



Rys. 7. Przykładowe widmo spektrometryczne promieniowania gamma emitowanego z próbki aluminium z pierwszego pomiaru
Fig. 7. Exemplary gamma ray spectrum emitted from the aluminum sample during its first measurement



Rys. 8. Przykładowe widmo spektrometryczne promieniowania gamma emitowanego z próbki żelaza
Fig. 8. Exemplary gamma ray spectrum emitted from the iron sample



Rys. 9. Przykładowe widmo spektrometryczne promieniowania gamma emitowanego z próbki niobu
Fig. 9. Exemplary gamma ray spectrum emitted from the niobium sample

Oszacowane wartości aktywności pozostają w dobrej zgodności z wynikami obliczeń. Natomiast nieoznaczoności zbliżają się do wartości krytycznej. Na wartość błędu oszacowania aktywności nie ma wpływu, przy założonych warunkach napromienienia dokładność mierzenia. Istotne znaczenie zawsze ma dokładność oznaczenia wydajności rejestracji kwantów gamma o określonej energii.

W przypadku pomiaru metastabilnego niobu okazało się, że intensywność oddziaływania neutronów z materiałem tarczy jest na tyle duża, że zachodni reakcja $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90}\text{Y}$. Reakcja ta nie była brana pod uwagę w rozważaniach wstępnych.

Oszacowano, na podstawie pomiarów spektrometrycznych i skomplikowanych procedur analitycznych, że wydajność emisji neutronów z badanego generatora wynosiła $2,2 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$.

Podsumowanie

Na rzecz projektu WPJET3 NC14 przygotowano i zrealizowano wiele prac dotyczących spektrometrii aktywacyjnej dla potrzeb tokamaka JET z użyciem neutronów o energii 14 MeV. W fazie wstępnej dokonano wyboru reakcji jądrowych charakteryzujących się odpowiednio wysoką energią progową, czasem połowicznego rozpadu rzędu minut lub pojedynczych dni oraz wysoką wartością przekroju czynnego dla energii neutronów rzędu 14 MeV. Do reakcji tych należą: $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$, $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$, $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$, $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$,

$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$, $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$. Dla każdej z wymienionych reakcji przeprowadzono szczegółową analizę, mającą na celu wybranie reakcji, które posłużą do charakterystyki generatora neutronów i do kalibracji diagnostyk tokamaka JET. Do celów charakterystyki generatora neutronów wybrano następujące reakcje jądrowe: $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$, $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ oraz $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$. Dla założeń przedstawionych w części wstępnej niniejszego opracowania przygotowano zostały obliczenia mające na celu oszacowanie spodziewanych aktywności, które zostaną wzbudzone w próbkach aktywacyjnych. W listopadzie 2015 r. i czerwcu 2016 r. przeprowadzone zostały pomiary mające na celu charakterystykę NG 14 MeV pod kątem wydajności emisji i widma energetycznego neutronów. Otrzymane wyniki pomiarów aktywności nie różnią się w stopniu znaczącym od tych otrzymanych w wyniku obliczeń. W każdym przypadku osiągnięto wymaganą niepewność pomiaru aktywności mniejszą niż 5%. W widmie spektrometrycznym dla niobu wykryto linie gamma pochodzące z reakcji $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90}\text{Y}$, której nie wzięto pod uwagę przy założeniach wstępnych. Obliczono wydajność emisji neutronów z NG. Potwierdzono tym samym, że wytypowane reakcje jądrowe mogą być uważane za skuteczne monitory neutronów w czasie kalibracji diagnostyk neutronowych tokamaka JET, kampanii DTE2, T-T oraz D-D.

mgr inż. Ewa Łaszyńska,
 dr inż. Sławomir Jednoróg,
 Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy,
 Warszawa