

Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Reaktor MARIA

Krzysztof Pytel

1. Narodowe Centrum Badań Jądrowych [NCBJ-1]

Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), powstałe 1 września 2011 roku w wyniku połączenia Instytutu Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana oraz Instytutu Energii Atomowej jest jednym z największych instytutów naukowych w Polsce, dysponującym m. in. jedynym w Polsce reaktorem jądrowym MARIA.

W Centrum prowadzone są zarówno badania podstawowe z dziedziny fizyki subatomowej (fizyka jądrowa i cząstek elementarnych, fizyka plazmy gorącej), jak i badania z zakresu zastosowań metod fizyki jądrowej oraz rozwijanie technologii jądrowych. Badania te, prowadzone również we współpracy z wielkimi, międzynarodowymi konsorcjami badawczymi, obejmują poszukiwania najbardziej fundamentalnych praw przyrody zarówno w mikroświecie, jak i w skali kosmicznej. Prowadzone są badania reaktorowe i prace nad bezpieczeństwem instalacji jądrowych, badania gorącej plazmy dla energetyki jądrowej przyszłości, a także badania na rzecz ochrony środowiska i bezpieczeństwa.

Centrum produkuje i opracowuje nowe radiofarmaceutyki oraz urządzenia stosowane w rozmaitych gałęziach nauki i gospodarki, w tym medycyny. W NCBJ budowane są podsystemy największych akceleratorów na świecie, a także same akceleratory, produkowana jest specjalistyczna aparatura i wyposażenie medyczne, wykonywane są podzespoły na potrzeby misji kosmicznych.

Centrum tworzy infrastrukturę informatyczną i laboratoryjną, niezbędną do wsparcia programu budowy energetyki jądrowej w Polsce, przygotowując się do pełnienia roli organizacji wsparcia technicznego (TSO) dla tego programu. Istotnym elementem tych przygotowań jest kształcenie kadr, również we współdziałaniu z krajami, zaawansowanymi w energetyce jądrowej.

2. Krótka historia reaktorów jądrowych

Pochodzenie uranu

Historię reaktorów jądrowych wypada zacząć od pytania, skąd pochodzi paliwo do tych reaktorów czyli uran. Na pytanie o pochodzenie ciężkich pierwiastków we Wszechświecie próbuje coraz skuteczniej odpowiedzieć astrofizyka jądrowa. Wiadomo już, że powstały one w wyniku nukleosyntezy, głównie w tzw. procesach r [NCBJ-2].

Proces r to szybki (rapid) wychwytywanie kilku neutronów przez jądro atomowe, na tyle szybki, aby odstępy czasu między kolejnymi wychwytywaniami neutronów były znacznie krótsze od okresów czasu między kolejnymi rozpadami β^- . Warunki takie zachodzą tam, gdzie mamy do czynienia z bardzo wysokimi strumieniami neutronów, czyli np. podczas wybuchów supernowych (niezbyt chlubne próby z wybuchami termojądrowymi wykazały, że w trakcie szybkich procesów do jądra może przyłączyć się kolejno kilkanaście neutronów). Czas trwania nukleosyntezy w supernowej to zaledwie kilka godzin.

Modele nukleosyntezy są na tyle dobrze opracowane, że na ich podstawie można określić, jaki był stosunek ilości dwóch podstawowych izotopów uranu, tj. ^{235}U i ^{238}U bezpośrednio po zakończeniu procesu ich powstawania. Stosunek ten wynosił początkowo ~ 1.6 lecz z upływem czasu zmienia się, ponieważ oba izotopy są nietrwałe i ulegają rozpadowi promieniotwórczemu z różnymi okresami połowicznego zaniku. Okresy te wynoszą odpowiednio 0.713 mld lat dla ^{235}U i 4.6 mld lat dla ^{238}U . Znając obecną zawartość izotopu ^{235}U w uranie (0.72%) można wykonać prosty rachunek i ocenić, że uran wydobywany na Ziemi liczy sobie ok. 6.6 mld lat, czyli powstał 2 mld lat wcześniej, niż nasz Układ Słoneczny.

Uran występuje w przyrodzie głównie w postaci rud uranowych. Największe eksploatowane złoża uranu występują w Kazachstanie, Kanadzie i Australii. Niezbyt wydajne złoża uranu występują również w Polsce.

Reaktory naturalne

Do tego, aby w reaktorze jądrowym zachodziła samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa muszą być spełnione dwa podstawowe warunki: zgromadzenie w ograniczonej objętości odpowiedniej ilości paliwa (podstawowym materiałem paliwowym jest ^{235}U) oraz moderatora, czyli spowalnicza neutronów. W odległej przeszłości wzbogacenie uranu w izotop ^{235}U było wyższe niż obecnie i gdyby technika reaktorów została opanowana np. 2 miliardy lat temu, nie trzeba byłoby wzbogacać uranu. Zdziwiające jest to, że przyroda wykorzystwała taką możliwość.

W 1972 roku podczas rutynowego badania rud uranu wydobytych z kopalni Oklo w Gabonie, francuscy technicy stwierdzili w nich mniejszą zawartość procentową uranu-235. Przyczyną obniżonej zawartości ^{235}U okazało się być jego wypalenie podczas pracy naturalnych reaktorów jądrowych [NCBJ-3,4]. Reaktory te pracowały 1.74 miliarda lat temu, gdy wzbogacenie w ^{235}U wynosiło około 3%. Reaktory powstały w miejscu, gdzie odkładał się uran nanoszony przez wody rzeki Ogowe, wypłukującej przed milionami lat rudy uranu. Ta sama rzeka dostarczała również wodę, pełniącą rolę moderatora i chłodziwa.

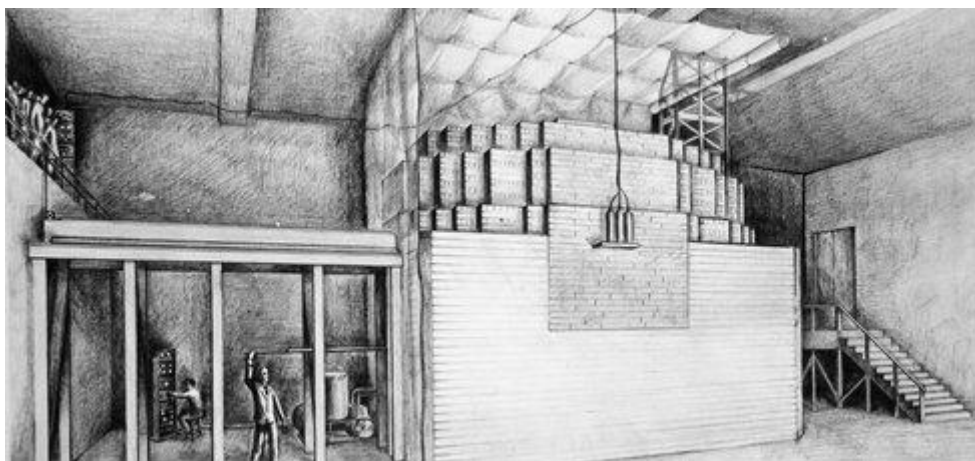
Reaktory pracowały w sposób cykliczny przez długi okres czasu, nawet do miliona lat. Samoregulacja reaktorów polegała na tym, że wzrostowi mocy reaktora towarzyszył wzrost temperatury i odparowanie wody, co z kolei prowadziło do wyhamowania reakcji łańcuchowej. Ponowne zalanie złoża wodą rzeczną wznawiało pracę reaktora. Moc reaktora osiągała chwilowe wartości rzędu 100 kW, a strumienie neutronów – do 10^{21} n/cm²s.

Istnieją dowody na to, że w reaktorach w Oklo powstawał (z ^{238}U) i wypalany był również ^{239}Pu . Można zatem traktować naturalny reaktor w Oklo jako prekursor reaktorów powielających, tzw. „breeder reactors”.

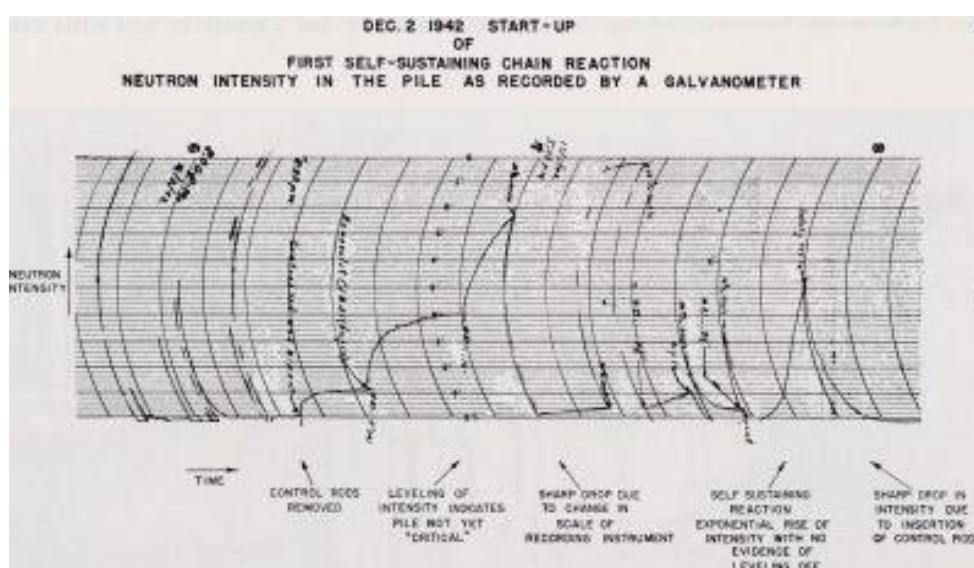
Pierwszy stos atomowy

2 grudnia 1942 roku pod zachodnimi trybunami stadionu Stagg Field w Chicago pierwszy, zbudowany przez człowieka stos atomowy (tak początkowo nazywano reaktory jądrowe) osiągnął stan krytyczny, czyli zachodziła w nim samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa [NCBJ-5]. Stos zbudowano w ramach Projektu Manhattan, mającego na celu skonstruowanie broni jądrowej. Ze względu na tajność projektu nie wykonano dokumentacji fotograficznej reaktora i dostępne są jedynie jego rysunki (ryc. NCBJ-2.1). Pracami nad uruchomieniem reaktora kierował Enrico Fermi.

Stos chicagowski (Chicago Pile CP-1) składał się z ok. 4000 kostek grafitowych i kul uranowych o rozmiarach piłeczki baseballowej umieszczonych w 22000 otworach w kostkach grafitu. Grafit pełnił rolę moderatora. Kostki grafitowo-uranowe układano w duży stos (stąd nazwa) o kształcie zbliżonym do kuli. Ręcznie poruszane pręty kadmowe, pochłaniające neutrony, służyły do sterowania reakcją łańcuchową i wyłączania reaktora. Dodatkowe zabezpieczenie stanowiły wiadra z kwasem borowym, który mógł zostać wylany na rdzeń w przypadku niesprawności prętów kadmowych. Ze względu na brak odpowiednich osłon poziom mocy reaktora był niewielki i wynosił ok. 200 W.



Ryc. NCBJ-2.1. Stos chicagowski CP-1



Ryc. NCBJ-2.2. Historyczny zapis stanu krytycznego reaktora CP-1 w dniu 2 grudnia 1942

Od historycznego początku ery atomowej w grudniu 1942 roku do chwili obecnej uruchomiono co najmniej tysiąc reaktorów różnego typu, głównie komercyjnych i badawczych, a także militarnych. Reaktory jądrowe pracowały już w prawie 70 krajach świata na wszystkich kontynentach z Antarktydą włącznie, a także w przestrzeni kosmicznej (ponad 30 reaktorów – głównie rosyjskich).

Reaktory jądrowe w Polsce

Miejscem lokalizacji wszystkich, dotychczas zbudowanych w Polsce reaktorów jądrowych jest ośrodek Świerk w pobliżu Warszawy.

Pierwszy polski badawczy reaktor jądrowy EWA, uruchomiono 14 czerwca 1958 roku. Była to konstrukcja radziecka typu WWR-S o mocy cieplnej 2 MW, którą następnie zwiększono do 8 MW a od 1972 roku do 10 MW. Strumień neutronów termicznych w reaktorze osiągał wartość $1.2 \cdot 10^{14}$ n/cm²s. Reaktor był wykorzystywany do produkcji izotopów promieniotwórczych oraz do badań prowadzonych na wiązkach neutronów z kanałów poziomych. Izotopy promieniotwórcze, wytwarzane w reaktorze EWA, wykorzystywane były

głównie w diagnostyce i terapii medycznej, lecz także w przemyśle i badaniach naukowych. Dzięki reaktorowi EWA ośrodek Świerk stał się znaczącym w świecie centrum rozwoju badań i technik jądrowych.



Fot. NCBJ-2.3. Reaktor badawczy EWA

Reaktor EWA był jednym z najlepiej eksploatowanych badawczych reaktorów jądrowych na świecie. Jego eksploatację zakończono w 1995 roku, a rozpoczęty w 1997 roku proces likwidacji osiągnął w 2002 roku stan, określany w odpowiednich przepisach, jako zakończenie fazy drugiej. Z reaktora usunięto wypalone paliwo jądrowe (wywiezione do Federacji Rosyjskiej w 2010 roku) oraz skażone i promieniotwórcze elementy reaktora. Nie przewiduje się likwidacji obiektu do stanu „zielonej trawy” (faza trzecia) ponieważ obiekt jest nadal wykorzystywany przez Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych.

Przed uruchomieniem reaktora MARIA w 1974 roku w ośrodku Świerk zbudowano i uruchomiono szereg zestawów krytycznych i tzw. reaktorów mocy zerowej: MARYLA (dwie wersje), ANNA, P-ANNA (pierwszy i jedyny polski reaktor prędkości), UR-100 (nie mylić z międzykontynentalnymi, rosyjskimi raketami balistycznymi) oraz AGATA. Wszystkie te reaktory są obecnie nieczynne.

Zwieńczeniem badań nad reaktorami jądrowymi w Polsce było zaprojektowanie, budowa i uruchomienie w 1974 roku wysokostrumieniowego reaktora badawczego MARIA.

3. Reaktor MARIA

Historia reaktora MARIA

W 1964 roku opracowano program wykorzystania drugiego polskiego reaktora badawczego, zgodnie z którym reaktor miał być wykorzystywany do:

- prowadzenia badań fizycznych na wiązkach neutronów;
- prowadzenia badań radiochemicznych;
- prowadzenia badań materiałowych w sondach i pętłach;
- napromieniania materiałów tarczowych dla produkcji izotopów;
- wykorzystania promieniowania gamma wypalonych elementów paliwowych do prowadzenia badań radiochemicznych;
- prowadzenia naświetlań dla spektrometrii krótkożyciowych izotopów;
- prowadzenia badań w zakresie inżynierii reaktorowej i energetyki jądrowej.

Budowę reaktora MARIA rozpoczęto w 1970 roku, a stan krytyczny reaktor osiągnął po raz pierwszy 18 grudnia 1974 roku. Reaktor ten, zaprojektowany i zbudowany przez polskich specjalistów i techników, został skonstruowany jako reaktor wielozadaniowy o wyso-

kim strumieniu neutronów – z zadaniem uzupełnienie możliwości badawczych reaktora EWA. Reaktor ten zbudowano również z myślą o prowadzeniu na nim badań materiałowych, niezbędnych w programach budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych.

Reaktor był eksploatowany do połowy 1985 roku, kiedy to został poddany gruntownej modernizacji. Przedmiotem działań modernizacyjnych było:

- wymiana systemu sterowania na blokowy system aparatury reaktorowej SAKOR-B,
- przegląd i diagnostyka stanu grafitowych bloków stanowiących reflektor reaktora,
- uzupełnienie konfiguracji rdzenia o dodatkowe bloki berylowe,
- budowa osłony biologicznej stabilizatora ciśnienia,
- modernizacja urządzeń systemu chłodzenia reaktora,
- modernizacja systemów klimatyzacji i wentylacji reaktora,
- instalacja systemu obiegowej kontroli temperatur i przepływów w kanałach chłodzenia paliwa reaktora (system OKCR).

Po awarii reaktora energetycznego w Czarnobylu nastąpiła zmiana w podejściu do analiz bezpieczeństwa reaktorów jądrowych. W rezultacie prowadzonych analiz, reaktor MARIA został wyposażony w szereg nowoczesnych układów eliminujących wystąpienie określonych zdarzeń lub minimalizujących ich konsekwencje. Zainstalowano pasywny układ zalewania kanałów paliwowych wodą basenową w przypadku spadku ciśnienia w obiegu chłodzenia elementów paliwowych, zamontowano nowe konstrukcje poziomych kanałów wyprowadzających wiązki neutronów z reaktora.

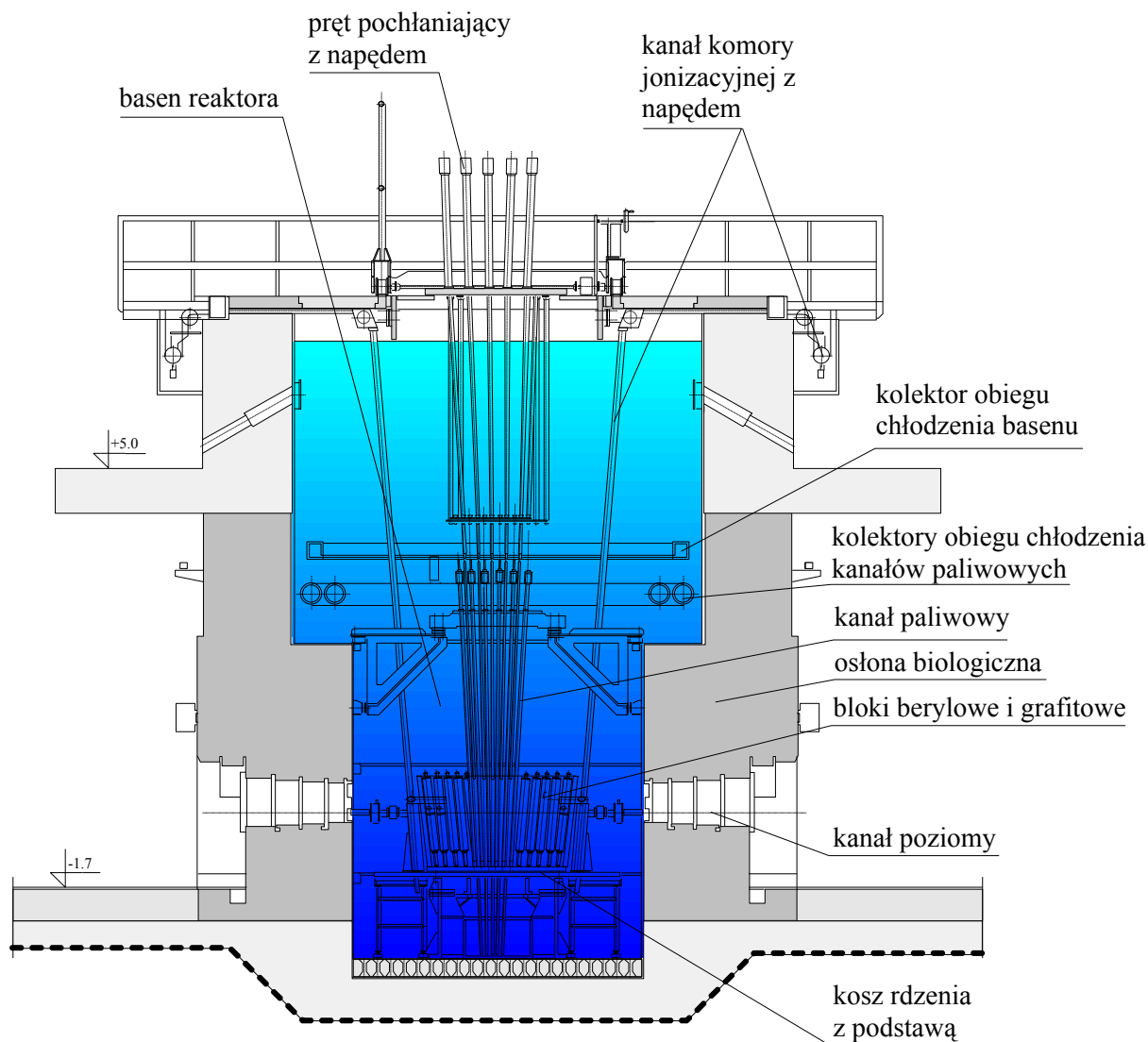
Reaktor został ponownie uruchomiony w grudniu 1992 roku i od 1993 roku po przejściu przez procedurę rozruchu energetycznego, reaktor MARIA podjął normalną eksploatację, która trwa do dnia dzisiejszego. Warto podkreślić, że obecny program użytkowy reaktora niemal dokładnie odpowiada programowi wykorzystania, zaproponowanemu przed niemal półwiekiem.

Reaktor poddawany jest ciągłym modyfikacjom mającym na celu bądź poprawę jego bezpieczeństwa, bądź związanych z programem jego wykorzystania. Najważniejsze zmiany dotyczą paliwa jądrowego. Pierwotnie w reaktorze MARIA eksploatowano paliwo o wzbogaceniu 80% w izotop ^{235}U . W 2000 roku rozpoczęto wprowadzanie do eksploatacji paliwa o wzbogaceniu 36%, a we wrześniu 2012 – paliwa o wzbogaceniu 19.7%. Ta ostatnia zmiana pociąga za sobą konieczność wymiany głównych pomp cyrkulacyjnych w obiegu chłodzenia kanałów paliwowych.

Wg aktualnych ocen technicznych reaktor MARIA może być eksploatowany do 2020 roku, a po modernizacji do 2050 - 2060 roku.

Konstrukcja reaktora

MARIA jest reaktorem o dość nietypowej konstrukcji (rys. NCBJ-3.1). Jest reaktorem kanałowym i basenowym jednocześnie. Paliwo jest umieszczone w specjalnych rurowych kanałach paliwowych, zapewniających efektywne jego chłodzenie wodą pod ciśnieniem 1.7 MPa. Kanały paliwowe wraz z pozostałymi elementami rdzenia reaktora, takimi jak: bloki moderatora berylowego i reflektora grafitowego, pręty pochłaniające, zasobniki z materiałami tarczowymi znajdują się w tzw. koszu rdzenia w basenie reaktora pod 7-metrową warstwą wody. Basen reaktora jest konstrukcją betonową z wykładziną stalową. Basen połączony jest służą z sąsiednim basenem przechowawczym, który pełni rolę krótkookresowego przechowalnika wypalonego paliwa i napromienionych elementów konstrukcyjnych oraz eksperymentalnych reaktora.

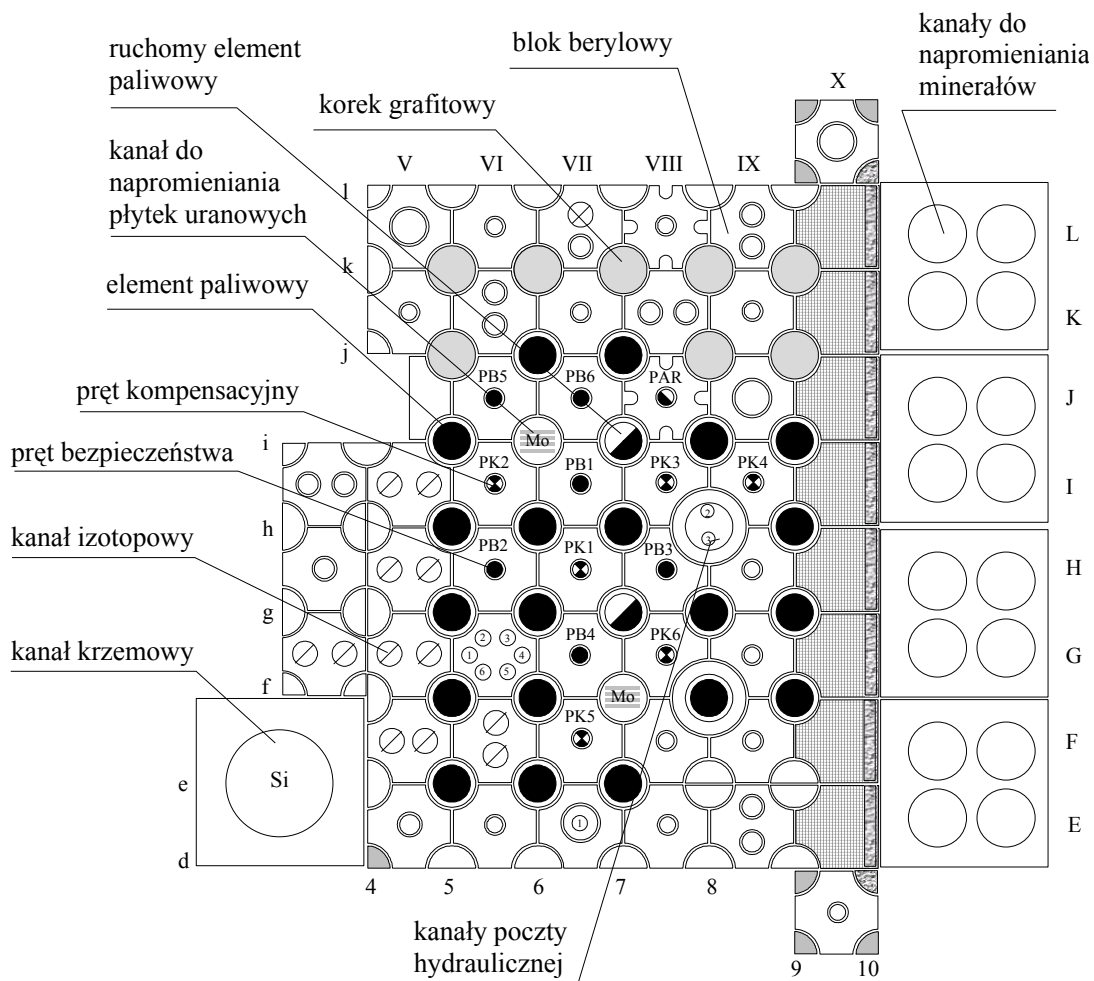


Rys. NCBJ-3.1. Przekrój pionowy bloku reaktora MARIA

Rdzeń reaktora MARIA ma konstrukcję modułową, dostosowywaną każdorazowo do programu produkcyjnego lub badawczego. Oprócz elementów paliwowych znajdują się w nim bloki moderatora berylowego, kanały z prętami pochłaniającymi oraz kanały izotopowe różnego typu do prowadzenia napromieniowań materiałów tarczowych. W zewnętrznej części kosza znajdują się bloki reflektora grafitowego, urządzenia do napromieniania materiałów o dużej objętości, jak np. krzemu lub minerałów, a także inne urządzenia eksperymentalne, jak np. konwerter do terapii borowo-neutronowej. Bezpośrednio za koszem rdzenia rozmieszczone są kanały komór jonizacyjnych, służących do kontroli i sterowania reaktorem.

Betonowa konstrukcja basenu stanowi (wraz z wodą w zbiorniku) boczną osłonę biologiczną reaktora. Na wysokości rdzenia zastosowano ciężki beton o gęstości 3.6 g/cm^3 . W osłonie betonowej znajduje się 8 otworów. W sześciu z nich zlokalizowano kanały poziome, którymi wyprowadzane są wiązki neutronów wykorzystywane do badań fizycznych.

Przekrój poprzeczny przez rdzeń reaktora MARIA pokazano na rys. NCBJ-3.2. Konfiguracja, przedstawiona na rysunku zawiera większość typowych elementów rdzenia. Oprócz wymienionych wcześniej, pokazano również kanały do napromieniania płytek uranowych do produkcji ^{99}Mo oraz kanały poczty hydraulicznej do prowadzenia krótkotrwałych napromieniowań.



Rys. NCBJ-3.2. Konfiguracja rdzenia reaktora MARIA

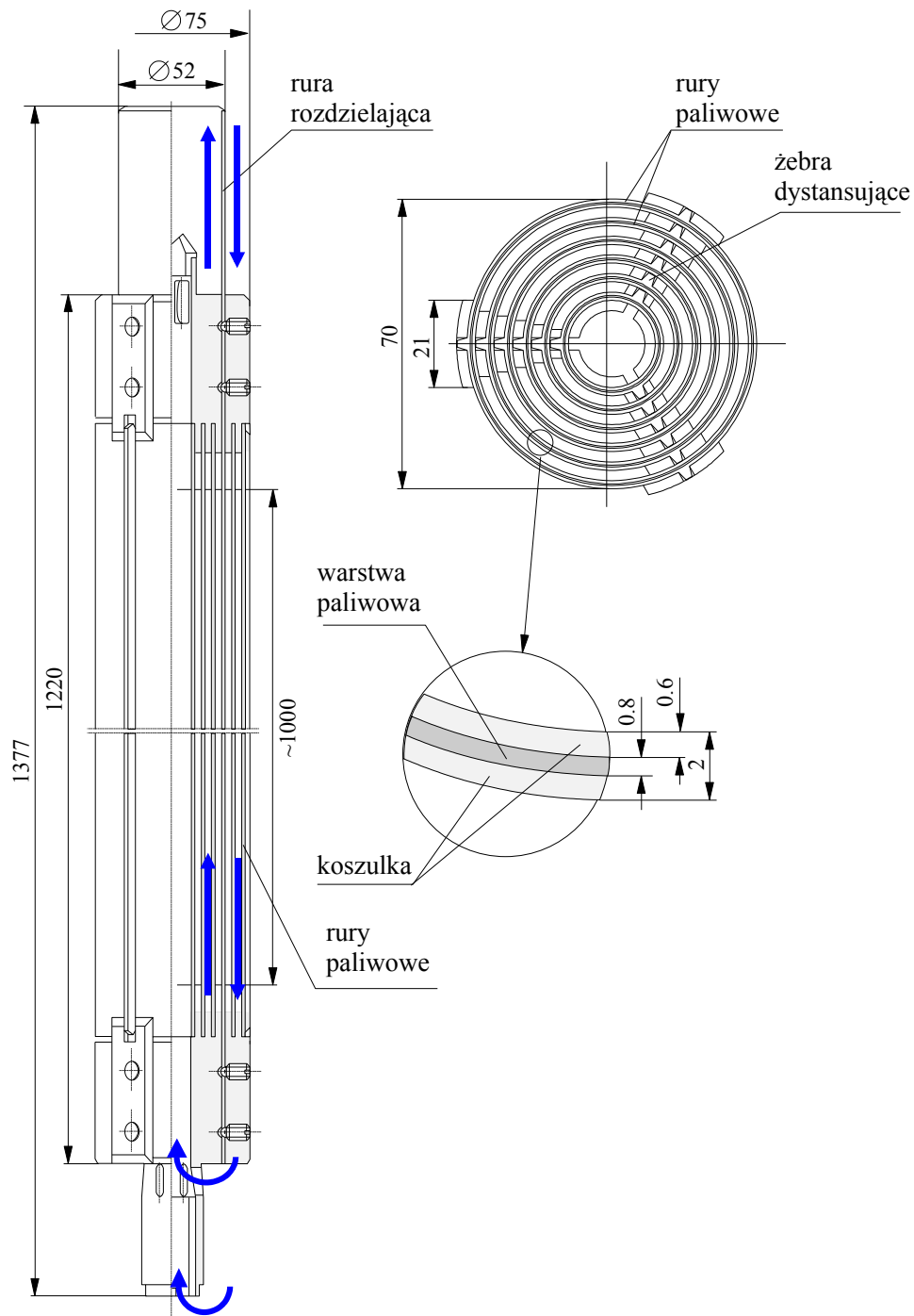
Sterowanie i zabezpieczenie reaktora realizowane jest za pomocą prętów pochłaniających, wypełnionych węglikiem boru (pochłanianie neutronów następuje w izotopie ^{10}B). Pręty kompensacyjne (PK) służą do kompensacji efektów zatrucia reaktora ^{135}Xe i ^{149}Sm , wypalenia paliwa oraz efektów temperaturowych. Pręty bezpieczeństwa (PB) są podczas pracy reaktora wysunięte ponad rdzeń i służą do wyłączania reaktora. Pojedynczy pręt automatycznej regulacji (PAR) współpracuje z układem automatycznej regulacji mocy i pozwala na automatyczne utrzymywanie stałego poziomu mocy reaktora.

Paliwo reaktora MARIA

Element paliwowy reaktora MARIA składa się z 6 lub 5 koncentrycznych rur o grubości 2 mm, oddzielonych 2,5-milimetrową szczeliną wodną. Woda w szczelinach między rurami paliwowymi odgrywa podwójną rolę. Po pierwsze stanowi moderator (spowalniacz) neutronów, potrzebny do tego aby neutrony prędkie, powstające w trakcie rozszczepień spowolnić do energii termicznych, przy których wydajnie następują kolejne rozszczepienia jąder ^{235}U . Woda pełni również rolę chłodziwa, czyli służy do odbioru ciepła, generowanego w paliwie.

W zależności od wzbogacenia uranu w elemencie paliwowym jest od 430 g uranu-235 (paliwo o wzbogaceniu 36%) do 485 g w paliwie niskowzbożonym (19,75% wzbogacenia). Różnica wynika stąd, że konieczne jest odpowiednie skompensowanie efektu pochłaniania neutronów w ^{238}U . Materiał paliwowy stosowany w reaktorze MARIA jest dyspersją tlenku uranu (paliwo 36%) lub krzemku uranu (paliwo 19,75%) w aluminium. Warstwa paliwowa o grubości od 0,5 do 0,8 mm umieszczona jest między dwoma warstwami tzw. koszulki pali-

wowej, co zapobiega uwalnianiu produktów rozszczepień do chłodziwa. Element paliwowy reaktora MARIA pokazano na rys. NCBJ-3.3.



Rys. NCBJ-3.3. Element paliwowy reaktora MARIA

W rdzeniu reaktora MARIA znajduje się każdorazowo od 6 do 7.5 kg uranu-235. Ilość ta zależy od konfiguracji rdzenia, wypalenia paliwa oraz aktualnego programu pracy. Elementy paliwowe są usuwane z rdzenia po osiągnięciu wypalenia ^{235}U w granicach $40 \div 60\%$. Dalsze wypalanie paliwa jest niekorzystne z ekonomicznego punktu widzenia.

Po zakończeniu pracy w rdzeniu paliwo jest przeładowywane do basenu przechowawczego, skąd po kilkuletnim okresie schładzania jest odbierane przez producenta.

Chłodzenie reaktora MARIA

W trakcie pojedynczego aktu rozszczepienia ^{235}U wydziela się ponad 200 MeV energii. Część tej energii jest wynoszona przez neutrino, natomiast reszta wydziela się w reaktorze w postaci ciepła. Ponad 80% energii rozszczepienia to energia kinetyczna produktów rozszczepień, deponowana praktycznie w miejscu powstania, czyli w warstwie paliwowej. Stąd szczególnie istotne jest chłodzenie samego paliwa.

W reaktorze MARIA chłodzenie paliwa zapewnia ciśnieniowy obieg chłodzenia kanałów paliwowych. Przy ciśnieniu wody na wlocie do elementu paliwowego równym 1.7 MPa, temperaturze wody na wlocie do 50°C oraz wydatku przepływu od 25 do 30 m³/h, z jednego elementu paliwowego można odebrać moc równą 1.8 MW. Dla porównania całkowita moc cieplna pierwszego polskiego reaktora badawczego EWA (przed modernizacją) wynosiła 2 MW. Mimo tak wysokiej generacji ciepła maksymalna temperatura koszulki elementu paliwowego nie przekracza 155°C. Jest to temperatura znacznie niższa od temperatury nasycenia wody przy ciśnieniu panującym w kanale paliwowym (ponad 200°C).

Schemat przepływu chłodziwa w elemencie paliwowym pokazano na rys. NCBJ-3.3. Zimna woda wpływa od góry do szczelin między 3 zewnętrznymi rurami paliwowymi, zwraca w dolnej części elementu i wraca do góry szczelinami wodnymi między wewnętrznymi rurami paliwowymi. Środkowa rura (oznaczana tradycyjnie jako rura #4) rozdziela przepływ góra-dół i stanowi przedłużenie rury rozdzielającej przepływ wzdłuż całej wysokości kanału paliwowego.

Pozostałe elementy rdzenia są chłodzone wodą przepływającą z góry na dół przez basen reaktora. Jest to otwarty (bezcisnieniowy) obieg chłodzenia basenu. Ciepło generowane w poza paliwowych elementach rdzenia pochodzi głównie z promieniowania gamma emitowanego z paliwa, a także z reakcji jądrowych, zachodzących w materiałach rdzenia pod wpływem promieniowania neutronowego. Znaczna część ciepła odbieranego przez obieg chłodzenia basenu pochodzi z wymiany ciepła między kanałami paliwowymi a basenem.

Oba pierwotne obiegi chłodzenia reaktora MARIA (obieg kanałów paliwowych i obieg basenu) odprowadzają ciepło do wspólnego obiegu wtórnego, a ten z kolei – do atmosfery.

Pozostałe systemy reaktora MARIA

Duży obiekt jądrowy, jakim jest reaktor MARIA wymaga pracy szeregu układów, pozwalających na jego bezpieczną eksploatację. Poniżej krótkie wyliczenie tych systemów i ich funkcji:

- Układ wentylacji. Układ ten zapewnia kontrolowane uwalnianie do otoczenia powietrza z obiektów reaktora. Uwalnianie to następuje poprzez komin o wysokości 60 m. W stanach normalnych z reaktora uwalniane są pewne ilości gazów radioaktywnych (ponad 95% stanowi ^{41}Ar , będący produktem aktywacji powietrza). W warunkach awaryjnych mogą wystąpić uwolnienia innych gazów i aerozoli promieniotwórczych, np. gazowych produktów rozszczepień. W takim przypadku powietrze jest poddawane filtracji.
- Układy bezpieczeństwa reaktora, obejmujące awaryjne wyłączanie reaktora, tzw. blokady zabezpieczeń (blokady rozruchu i podnoszenia mocy reaktora), sygnalizację, układ awaryjnego zalewania rdzenia.
- Aparatura systemów sterowania, zabezpieczeń i kontroli technologicznej reaktora. Układ zapewnia prawidłowe działanie wszystkich elementów sterowania i zabezpieczeń reaktora oraz zbieranie danych nt. przebiegu procesów fizycznych i technologicznych w reaktorze. Główne elementy układu znajdują się sterowni reaktora.

- Układ zasilania w energię elektryczną to rozbudowany układ zasilania z wielostopniowymi systemami, zapewniającymi ciągłość zasilania w warunkach normalnych i awaryjnych.
- Magazynowanie i transport świeżego oraz wypalonego paliwa jądrowego.
- Instalacje ścieków nisko- i średnioaktywnych w obiekcie reaktora oraz gospodarka odpadami promieniotwórczymi, powstającymi podczas eksploatacji reaktora.
- System dozymetryczny obejmujący zarówno monitorowanie pól promieniowania i zagrożeń radiologicznych w obiektach reaktora, jak i ochronę radiologiczną personelu. W ramach systemu dokonywane są również oceny zagrożenia ludności, wynikające z działalności reaktora MARIA

4. Wykorzystanie reaktora MARIA

Reaktor badawczy to przede wszystkim źródło neutronów o wysokiej intensywności. W mniejszym stopniu wykorzystuje się również promieniowanie gamma, towarzyszące reakcjom jądrowym z udziałem neutronów lub emitowane podczas rozpadów promieniotwórczych np. z wypalonego paliwa.

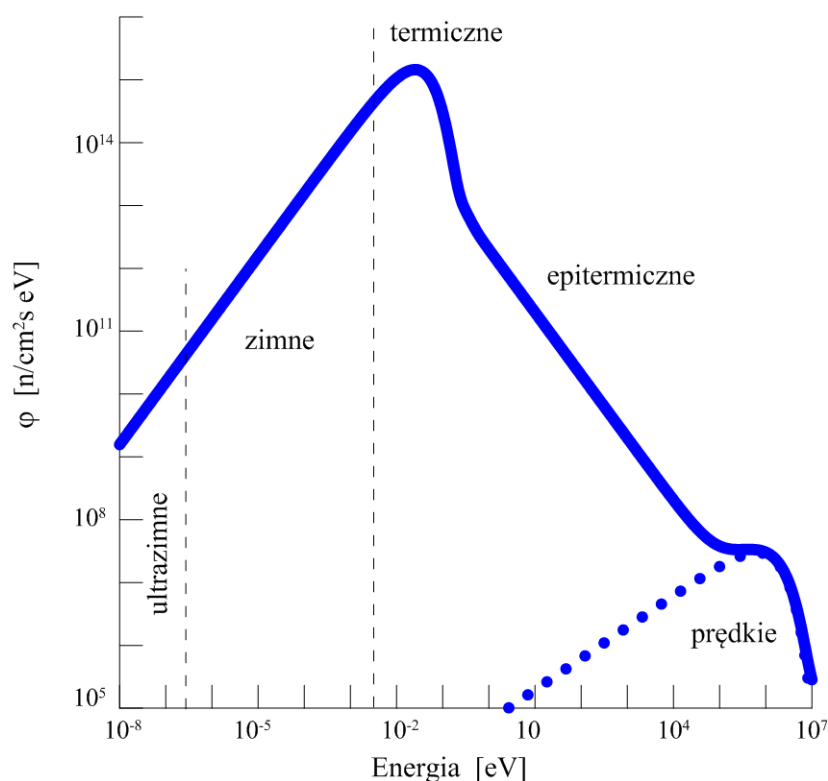
Sam reaktor i zachodzące w nim procesy bywają również obiektem badań zwłaszcza, gdy dotyczy to zagadnień związanych z bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną. Reaktor może być również wykorzystywany do prowadzenia zajęć dydaktycznych w zakresie fizyki i techniki reaktorowej.

Widmo energetyczne neutronów w reaktorze

Neutrony emitowane podczas rozszczepień mają energie rzędu kilku megaelektronowoltów i określane są jako neutrony prężkie (rys. NCBJ-4.1). W wyniku zderzeń z jądrami ośrodka, głównie moderatora, w widmie neutronów pojawia się obszar neutronów epitermicznych o charakterystycznej zależności od energii typu $1/E$. Po osiągnięciu energii rzędu kilkunastu meV ustala się stan równowagi termodynamicznej między energiami neutronów a energiami drgań termicznych ośrodka. Stąd nazwa: neutrony termiczne. W tym obszarze widmo energetyczne neutronów charakteryzuje się rozkładem Maxwella. Ze względu na wykorzystanie do badań fizycznych w obszarze niskich energii wydzielone są jeszcze obszary neutronów zimnych i ultrazimnych.

Neutrony ze wszystkich zakresów energii znajdują swoje zastosowanie. Neutrony prężkie w tzw. reakcjach progowych, czyli reakcjach jądrowych, które zachodzą z udziałem neutronów o pewnej minimalnej energii progowej. W obszarze energii neutronów powyżej 0.1 eV zachodzą reakcje rezonansowe, których przekroje czynne mają charakterystyczny, rezonansowy charakter. Neutrony termiczne są najczęściej wykorzystywane w reakcjach wychwytu radiacyjnego; przekroje czynne tych reakcji mają najczęściej charakterystyczny przebieg typu $1/v$.

Długości fali de Broglie'a neutronów termicznych są porównywalne z odległościami międzyatomowymi w ciele stałym i stąd powszechne wykorzystanie tych neutronów do badań w zakresie fizyki materii skondensowanej.



Rys. NCBJ-4.1. Widmo neutronów w reaktorze jądrowym

Wytwarzanie izotopów promieniotwórczych

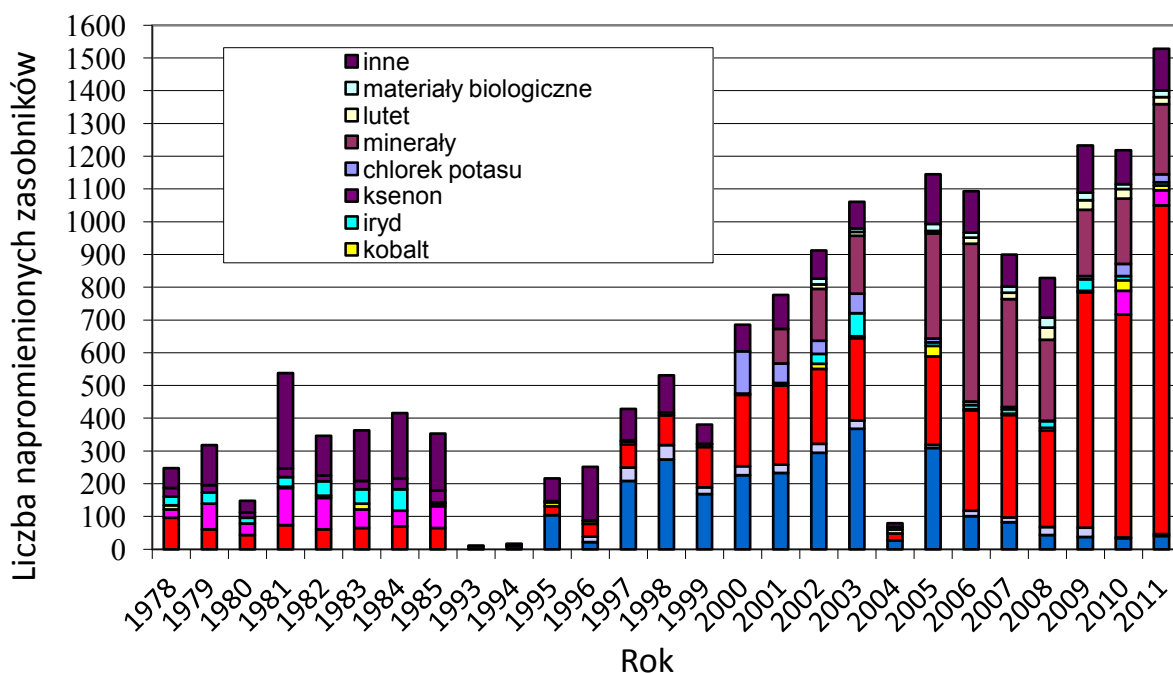
Do wytwarzania izotopów promieniotwórczych w reaktorze MARIA wykorzystuje się kilkadziesiąt tzw. kanałów izotopowych, charakteryzujących się różnymi natężeniami i widmami energetycznymi neutronów. Materiały tarczowe, z których powstają radioizotopy, są na ogół napromieniane w zasobnikach aluminiowych.

Ze względu na uzyskiwane rocznie aktywności, listę radioizotopów wytwarzanych w reaktorze MARIA otwierają: ^{131}I , ^{35}S , ^{32}P , ^{153}Sm , ^{169}Yb , ^{60}Co i ^{177}Lu . Większość z radioizotopów, pochodzących z reaktora MARIA to izotopy stosowane w medycynie nuklearnej.

Produkcję radioizotopów, wyrażoną w liczbie zasobników z materiałami tarczowymi napromienionych w kolejnych latach pracy reaktora MARIA pokazano na rys. NCBJ-4.2.

Szczególnie ważnym radioizotopem, stosowanym w 80% procedur z zakresu medycyny nuklearnej, jest technet-99m. Izotop ten jest produktem rozpadu ^{99}Mo (rozpad ten następuje w tzw. generatorach technetowych). Molibden-99 może być wytwarzany w procesie aktywacji naturalnego izotopu ^{98}Mo , lecz najbardziej wydajnym źródłem ^{99}Mo jest proces rozszczepienia uranu-235.

W reaktorze MARIA trzecie uranowe do produkcji ^{99}Mo są napromieniane w specjalnie do tego celu zaadaptowanych kanałach paliwowych [NCBJ-7]. Dzięki wydajnemu układowi chłodzenia, jakim jest obieg chłodzenia kanałów paliwowych, w płytkach uranowych można uzyskać wysokie gęstości rozszczepień i tym samym wysokie aktywności ^{99}Mo . Czas trwania napromieniania płytek wynosi ok. 140 godzin, co pozwala na uzyskanie na zakończenie aktywacji 7500 Ci Mo-99 z 40 g uranu-235. Po napromienieniu i kilkunastogodzinnym okresie schładzania, wysokoaktywne płytki uranowe są przewożone do zakładu przerobu (Petten, Holandia), w którym wydobywany jest izotop ^{99}Mo .



Rys. NCBJ-4.2. Produkcja radioizotopów w reaktorze MARIA

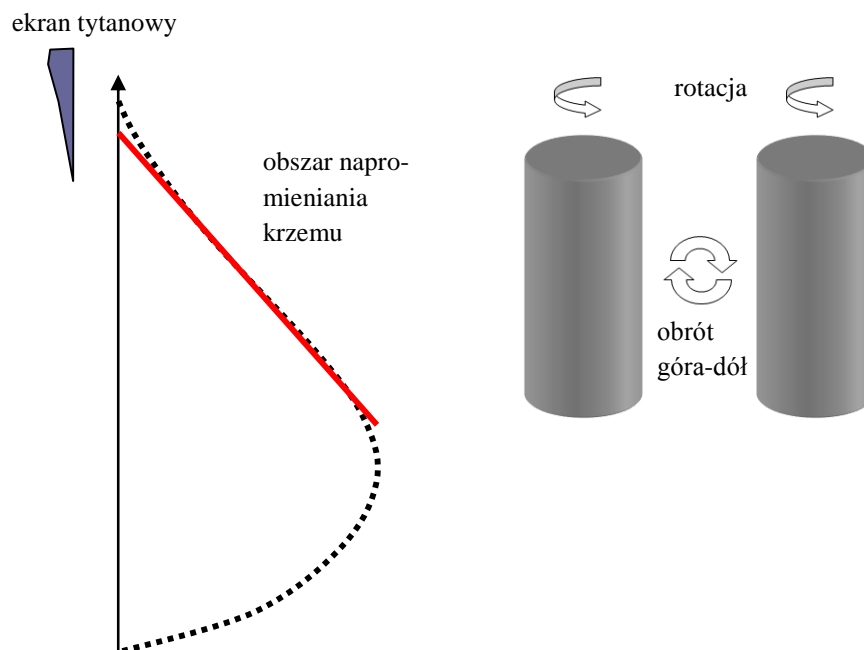
Modyfikacja materiałów, neutronowe domieszkowanie krzemu

Oddziaływanie neutronów z materią prowadzi nie tylko do powstawania izotopów promieniotwórczych, lecz często do zmian własności materiałów. Tak dzieje się np. w przypadku napromieniania neutronami prędkimi niektórych nadprzewodników wysokotemperaturowych, gdzie w wyniku takiego napromieniania obserwuje się znaczne zwiększenie prądów krytycznych.

Innym przykładem zmiany własności materiałów jest barwienie minerałów topazu. Minerale topazu, występujące w przyrodzie są bezbarwne. Napromienianie takich minerałów neutronami prędkimi powoduje zmianę ich zabarwienia na niebieski. W reaktorze MARIA barwienie minerałów topazu przeprowadza się w specjalnie przystosowanych kanałach izotopowych, w reflektorze grafitowym. W instalacjach tych zastosowano ekranowanie neutronów termicznych w celu zminimalizowania niepożądanego aktywacji minerałów.

Neutrony reaktorowe są również wykorzystywane w procesie neutronowego domieszkowania krzemu (NTD). Podstawą fizyczną tego procesu jest reakcja $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P}$. Powstający w jej wyniku stabilny izotop fosforu stanowi domieszkę typu n w krzemie. O własnościach półprzewodnikowych krzemu (oporności właściwej) decyduje poziom domieszkowania fosforem czyli koncentracja ^{31}P . Ta z kolei zależy od fluencji (dawki) neutronów termicznych, którą otrzymał krzem w reaktorze.

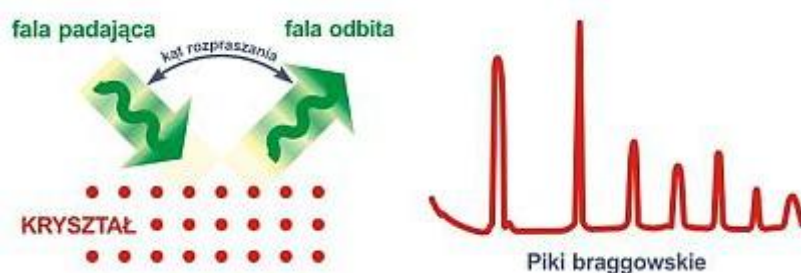
Kluczowym parametrem jakościowym technologii NTD jest jednorodność pola neutronowego w krzemie, ponieważ tylko wówczas można uzyskać jednorodny poziom domieszkowania, przewyższający klasyczne metody domieszkowania. W reaktorze MARIA próbki krzemu o znacznych wymiarach (walce o wysokości 50 cm i średnicy do 6") są napromieniane w specjalnie przystosowanym kanale. Na rys. NCBJ-4.3 pokazano schematycznie obszar napromieniania krzemu w instalacji krzemowej oraz sposób zapewnienia osiowej i promieniowej jednorodności dawki neutronów. Oprócz ciągłej rotacji próbki podczas napromieniania (jednorodność promieniowa) w połowie cyklu napromieniania walec krzemowy jest odwracany góra-dół (jednorodność osiowa).



Rys. NCBJ-4.3. Schemat napromieniania krzemu w reaktorze MARIA

Wiązki neutronów z kanałów poziomych

Z reaktora MARIA są wyprowadzone wiązki neutronów, wykorzystywane w większości do badań materii skondensowanej [NCBJ-8]. Pięć spośród 6-ciu aktualnie dostępnych kanałów poziomych wyposażonych jest w urządzenia, wykorzystujące efekty rozpraszania fal neutronów (dyfraktometry, spektrometry trójosiowe). Fizyczne podstawy rozpraszania neutronów na strukturach krystalicznych ilustruje schemat na rys. NCBJ-4.4.



Rys. NCBJ-4.4. Schemat rozpraszania fali neutronu na kryształach

Dyfraktometr ultraniskokątowego rozpraszania umożliwia między innymi badania rozmiarów domen magnetycznych w materiałach amorficznych, nanokrystalicznych i polikrystalicznych, a także wpływ czynników zewnętrznych, takich jak temperatura, naprężenia mechaniczne i pole magnetyczne na rozmiary tych domen. Dyfraktometr niskokątowego rozpraszania neutronów jest przeznaczony do badania drobnych (1 nm ÷ 30 nm) niejednorodności występujących w materiałach, natomiast dyfraktometr o dużej zdolności rozdzielczej służy między innymi do badań jakości monokryształów metali. Dyfraktometr przeznaczony do badań uporządkowań atomowych i magnetycznych może być wykorzystany jako dyfraktometr spolaryzowanych neutronów.

Trójosiowe spektrometry neutronów termicznych służą głównie do badania kolektywnych ruchów atomów (fononów) i momentów magnetycznych (magnonów) metodą nieelastycznego (spójnego) rozpraszania neutronów. Stosowane są również do badania elektronowych poziomów energetycznych w jonach tworzących ciało stałe metodą nieelastycznego (niespójnego) rozpraszania neutronów.

Przy jednym z kanałów poziomych (H8) zainstalowane jest stanowisko radiografii neutronowej i gamma. Radiografia jest metodą otrzymywania obrazów wewnątrz obiektów nieprzezroczystych dla światła widzialnego. Przedmiot, który całkowicie pochłania promieniowanie świetlne, może być prawie przezroczysty dla innych rodzajów promieniowania, takiego jak promieniowanie rentgenowskie, gamma czy neutronowe. Gdy rejestracja obrazu pozwala na obserwację ruchu badanego obiektu mówi się o radiografii dynamicznej. W znajdującym się przy reaktorze MARIA stanowisku dynamicznej radiografii neutronowej i gamma wykorzystywane jest wytwarzane w reaktorze promieniowanie neutronowe i gamma. Szczególnie dużo informacji otrzymuje się dzięki zastosowaniu neutronów. Obecnie zastosowania radiografii neutronowej koncentrują się na badaniu obiektów statycznych (wewnętrzna struktura urządzeń technicznych, wykrywanie defektów i niejednorodności materiałów) oraz na badaniu procesów, takich jak: migracja wody w materiałach porowatych, transport cieczy w złożach filtracyjnych, rozwój systemu korzeniowego roślin, transport ropy naftowej w złożach geologicznych itp.



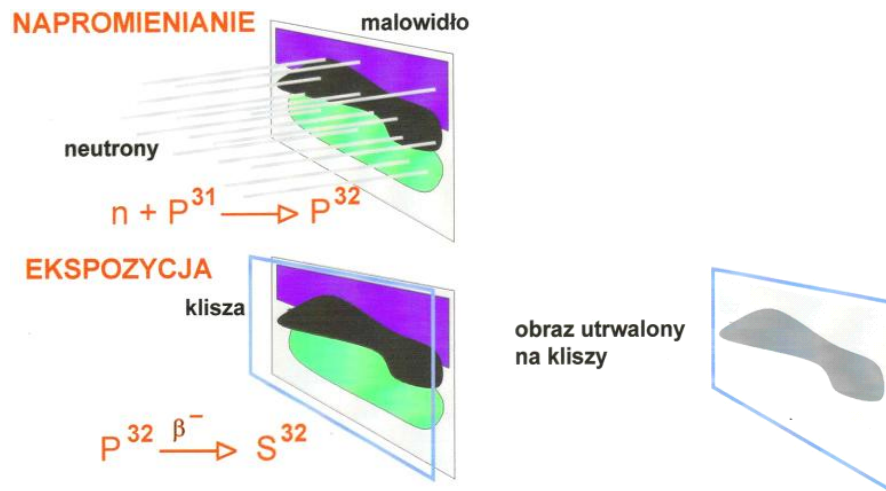
Rys. NCBJ-4.5. Wizualizacja struktury urządzenia technicznego za pomocą radiografii neutronowej (kanał H8)

Autoradiografia malowideł

Wiązka neutronów z kanału poziomego może być również wykorzystana do badania malowideł techniką autoradiografii neutronowej. Technikę taką zastosowano w reaktorze MARIA do badania obrazów mistrzów malarstwa weneckiego XIV – XVIII wieku ze zbiorów Muzeum Narodowego w Warszawie, prezentowanych w ramach wystawy „Serenissima – światło Wenecji” w 2000 roku.

Technika autoradiografii polega na napromienieniu malowideł neutronami termicznymi i wywołaniu reakcji wychwytu radiacyjnego w niektórych izotopach, wchodzących w skład warstw malarskich, np. $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$. Po zakończeniu procesu napromieniania neutronami następuje rozpad (na ogół rozpad beta) powstałych izotopów promieniotwórczych, np. $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S}$. Jeśli w tym czasie obraz pokryty jest kliszą rentgenowską, emitowane cząstki β^- powodują zaczernienie kliszy. Wzór powstały na kliszy odzwierciedla rozkład izotopu – emitera cząstek beta w warstwie malarskiej. Dotyczy to nie tylko powierzchni obrazu lecz również głębszych struktur warstwy malarskiej. Obraz zaczernienia kliszy jest charakterystyczny

dla użytego pigmentu i pozwala na analizę głębszych warstw malarskich. Na rys. NCBJ-4.6 pokazano schematycznie technikę autoradiografii malowideł.



Rys. NCBJ-4.6. Autoradiografia malowideł – zasada działania

Spektakularnym przykładem zastosowania tej techniki jest autoradiografia obrazu „Portret weneckiego admirała” Jacopo Tintoretto. Na rys. NCBJ-4.7 pokazano oryginał oraz jeden z autoradiogramów, wskazujący na istnienie innego portretu pod właściwym obrazem.



Rys. NCBJ-4.7. „Portret weneckiego admirała” i jego autoradiogram

5. Neutrony reaktorowe a badania podstawowe

Neutrony są wszechobecne w otaczającym nas świecie w takim samym stopniu jak protony i elektrony. O ile wytwarzanie swobodnych protonów i elektronów w laboratorium jest proste, o tyle z neutronami sprawa jest znacznie trudniejsza. Neutrony są związane silnie w jądrach, a swobodne neutrony są niestabilne i rozpadają się z okresem połowicznego zaniku około 15 minut. Do uzyskania swobodnych neutronów o wysokich strumieniach potrzebne są duże instalacje wykorzystujące reakcje jądrowe. Największymi takimi urządzeniami są reaktory jądrowe.

Dlaczego, mimo trudności z ich uzyskaniem, neutrony są atrakcyjnym obiektem i narzędziem badań? Jako hadrony ulegają wszystkim czterem znanym oddziaływaniom (silnym, elektromagnetycznym, słabym, grawitacji) i być może nieznanemu jeszcze „piątemu”, związanemu z czarną materią. Ponadto neutrony nie muszą pokonywać bariery kulombowskiej przy oddziaływaniu z materią.

Jest zadziwiające w jak wielu badaniach fizycznych korzystano (trwa to do dzisiaj) z neutronów reaktorowych [NCBJ-9]. Neutrony termiczne i zimne są najczęściej stosowane w fizyce materii skondensowanej. Ich energie kinetyczne są porównywalne z energiami wzbudzeń termicznych. Czystym zbiegiem okoliczności długość fali de Broglie'a neutronów termicznych jest w zakresie angstromowym (10^{-10} m), czyli typowym dla odległości międzyatomowych. Podobnie jest z momentem magnetycznym neutronu, którego wielkość powoduje, że amplitudy rozpraszania neutronów na momentach magnetycznych jonów bądź atomów są porównywalne z amplitudami rozpraszania neutronów na jądrach.

Elektromagnetyczne własności neutronu

Rozpoczęte w połowie dwudziestego wieku i trwające do dziś próby zmierzenia elektrycznego momentu dipolowego neutronu mogą odegrać istotną rolę we wyjaśnieniu jednego z najważniejszych problemów kosmologicznych, a mianowicie nierównowagi między materią i antymaterią podczas pierwotnej bariogenezy. Modele bariogenezy, wykorzystujące Model Standardowy wymagają, aby cząstki takie jak: neutron czy elektron miały niezerowy elektromagnetyczny moment dipolowy (EMD). Obecnie większość pomiarów EMD dokonuje się z wykorzystaniem tzw. źródeł ultrazimnych neutronów w reaktorach badawczych. Aktualna wartość zmierzonego EMD jest mniejsza od $2.9 \cdot 10^{-26}$ ecm. Planowane są eksperymenty, które pozwolą na obniżenie niepewności tego pomiaru do 10^{-27} ecm; konieczne jest do tego zwiększenie intensywności źródeł neutronów ultrazimnych.

Ładunek elektryczny neutronu został zmierzony z wysoką dokładnością ($<10^{-21} e$) kilka dekad temu. W badaniach innych modeli niż Model Standardowy pożyteczna byłaby ponowna eksperymentalna weryfikacja neutralności ładunkowej neutronu. Ostatnio pojawiły się propozycje takich eksperymentów.

Monopole (ładunki) magnetyczne są elementem niektórych teorii wielkiej unifikacji (GUT). Pomiary ładunku magnetycznego neutronu wykazały, że jest on mniejszy niż $10^{-26} ce/\alpha$.

Masa neutronu

Ze względu na brak ładunku elektrycznego masa bezwładna neutronu nie może być zmierzona w typowym spektrometrze masowym. Z pomiarów, przeprowadzonych na obiektach makroskopowych wynika, że stosunek masy grawitacyjnej do bezwładnej jest równy 1 z dokładnością do 10^{-13} . W przypadku pomiarów z użyciem swobodnych ultrazimnych neutronów potwierdzono tę równowagę z dokładnością do 10^{-4} .

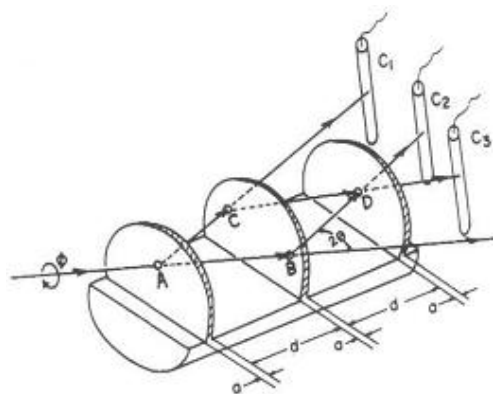
Do pomiaru masy bezwładnej neutronu wykorzystuje się reakcję wychwytu radiacyjnego $n + p \rightarrow d + \gamma$. Masy protonu i deuteronu są dokładnie znane, energię fotonu udaje się

określić z dokładnością $\sim 10^{-7}$. Pozwala to na wyznaczenie masy neutronu ze względną dokładnością $8 \cdot 10^{-10}$.

Wyznaczenie dokładnej wartości masy neutronu znalazło zaskakujące zastosowanie przy określaniu stałej sprzężenia oddziaływań elektromagnetycznych α mimo, że neutron nie ma ładunku elektrycznego [NCBJ-9]. Stałą struktury subtelnej α można obliczyć z innych, dokładniej znanych parametrów. W przypadku neutronów wykorzystuje się dokładną znajomość stałej Rydberga oraz stosunków mas neutronu, protonu i elektronu. Eksperymentalnie należy wyznaczyć dokładnie prędkość i długość fali de Broglie'a neutronu (termicznego). Wprawdzie obecnie przyjmowana, dokładniejsza wartość stałej α pochodzi z eksperymentów z elektronami przy założeniu poprawności elektrodynamiki kwantowej, lecz potwierdzenie tej wartości z mniejszą dokładnością w eksperymencie z neutronami jest wartościowe, ponieważ zostało uzyskane przy innych założeniach.

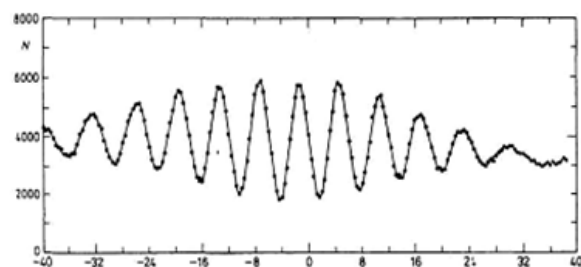
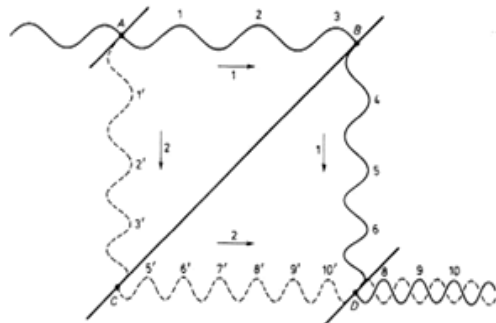
Neutrony w polu grawitacyjnym

Neutrony są jedynymi cząstkami elementarnymi, dla których udało się zaobserwować wpływ pola grawitacyjnego. W eksperymencie z interferometrem neutronowym [NCBJ-10], pokazanym schematycznie na rys. NCBJ-5.1 fala de Broglie'e neutronu ulega ugięciu na dwóch kolejnych płytkach a następnie interferencji na ostatniej płytce. W przypadku poziomej orientacji interferometru tory ABD i ACD są w pełni symetryczne i interferencja fali na końcowej płytce jest w pełni konstruktywna.



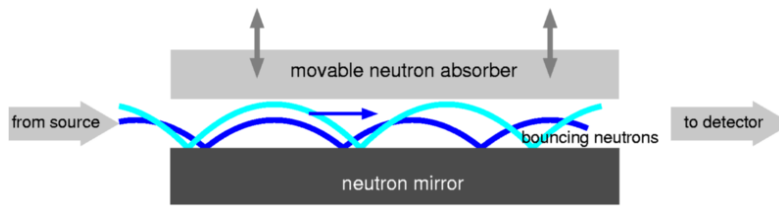
Rys. NCBJ-5.1. Interferometr neutronowy

Interferometr można obracać wokół osi prostopadłej do płytek. Powoduje to zaburzenie symetrii torów ABD i ACD. Fala neutronowe wzdłuż obu torów mają inną energię potencjalną (grawitacyjną). Ich interferencja nie jest już w pełni konstruktywna. Na rys. NCBJ-5.2 pokazano schematycznie różnice długości fali neutronu wzdłuż obu torów oraz zliczenia neutronów na wyjściu z interferometru (detektor C3) w zależności od kąta obrotu interferometru.



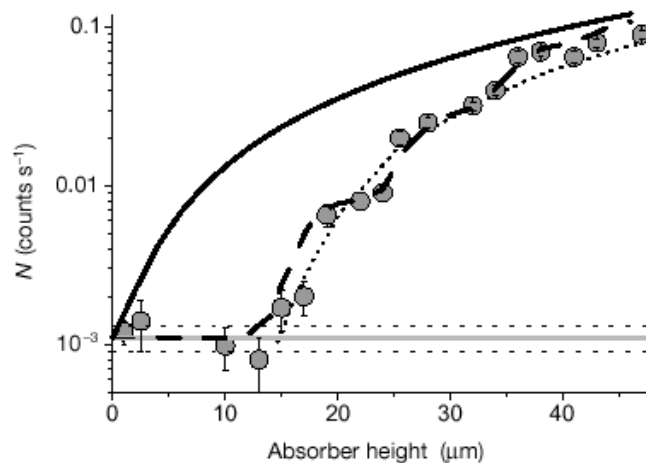
Rys. NCBJ-5.2. Grawitacyjnie indukowana interferencja neutronów

Ciekawy eksperyment z neutronami ultrazimnymi w polu grawitacyjnym przeprowadził w 2002 roku Nesvizhevsky [NCBJ-11]. Neutrony poruszają się w wąskiej, poziomej szczelinie



Rys. NCBJ-5.3. Schemat eksperymentu z neutronami w polu grawitacyjnym

między zwierciadłem a ruchomym absorberem neutronów (rys. NCBJ-5.3). Liniowy potencjał pola grawitacyjnego Ziemi mgz i odpychający potencjał zwierciadła tworzą trójkątną studnię potencjału, w której poruszają się neutrony. Rozwiązanie równania Schrödingera z takim potencjałem prowadzi do dyskretnych stanów kwantowych neutronu. Na rys. NCBJ-5.4 pokazano zależność szybkości zliczeń neutronów przechodzących przez szczelinę w funkcji jej wysokości. Krzywa ciągła odpowiada przewidywaniom klasycznym, przerywana – rozwiązaniu kwantowo-mechanicznemu.



Rys. NCBJ-5.4. Przejście neutronów przez szczelinę w funkcji wysokości szczeliny

Referencje

- [NCBJ-1] <http://www.ncbj.gov.pl>
- [NCBJ-2] <http://courses.washington.edu/bangblue/Cowan-Nucleosynth-PhysTod04.pdf>
- [NCBJ-3] A. Meshik: The Workings of an Ancient Nuclear Reactor. Scientific American, styczeń 2009. <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=ancient-nuclear-reactor&page=3>
- [NCBJ-4] M.Ragheb: Natural Nuclear Reactors, the Oklo Phenomenon. 5/6/2012
<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Natural%20%20Nuclear%20Reactors,%20The%20Oklo%20Phenomenon.pdf>
- [NCBJ-5] M.Ragheb: First Human Made Reactor and Birth of Nuclear Age. 8/6/2012
<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/First%20Human%20Made%20Reactor%20and%20Birth%20of%20Nuclear%20Age.pdf>
- [NCBJ-6] <http://www.nuclear.pl/polska,ewa,0.html>
- [NCBJ-7] E. Iller, J. Jaroszewicz, K. Pytel: Molibden-99 – radionuklid deficytowy. Postępy Techniki Jądrowej, Vol. 53, Z.3 – p. 20 – 29. 2010
- [NCBJ-8] <http://www.ncbj.gov.pl/maria/wykorzystanie>
- [NCBJ-9] D.Dubbers, M.G.Schmidt: The neutron and its role in cosmology and particle physics. Reviews of Modern Physics, Vol. **83**, No. 4, October-December 2011, p. 1111
- [NCBJ-10] S.A. Werner, J.L. Staudenman, R. Corella, A.W. Overhauser: Gravitational and Rotational Effects on the Neutron Phase. Neutron Interferometry. Clarendon Press. Oxford. 1979. P. 209
- [NCBJ-11] V.V. Nesvizhevsky, *et al*: 2002, Nature (London) **415**, p. 297