

ARTYKUŁY

PRACA REAKTORA BADAWCZEGO MARIA W 2021 ROKU

Research reactor MARIA operation in 2021

Piotr Witkowski

Streszczenie: Wysokostrumieniowy reaktor badawczy MARIA, eksploatowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku, wykorzystywany jest do produkcji radioizotopów, badań materiałowych i technologicznych, barwienia minerałów. Obecnie prowadzenie badań z wykorzystaniem wiązek neutronów zostało wstrzymane z powodu remontu hali fizycznej. W artykule opisano parametry techniczne reaktora i charakterystykę jego pracy w 2021 r.

Abstract: The MARIA high-flux research reactor, operated at the National Center for Nuclear Research at Świerk (Poland), is used for the production of radioisotopes, material and technological research, mineral staining. Currently conducting research using neutron beams has been stopped due to the renovation of the physical hall. The article describes the technical parameters of the reactor and the characteristics of its operation in 2021.

Słowa kluczowe: reaktor MARIA, Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), eksploatacja reaktora MARIA w 2021 r.

Keywords: MARIA reactor, National Center for Nuclear Research (NCNR), operation of MARIA reactor in 2021

Wysokostrumieniowy reaktor badawczy MARIA fot. 1, jest eksploatowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku od 1974 r. Obecnie jest wykorzystywany do produkcji izotopów promieniotwórczych dla potrzeb medycyny i przemysłu, badań materiałowych i technologicznych, natomiast prowadzenie badań fizycznych wykorzystujących wiązki neu-

tronów wstrzymane jest z powodu remontu hali fizycznej i modernizacji kanałów poziomych.

Reaktor MARIA jest reaktorem kanałowo-basynowym moderowanym i chłodzonym zwykłą wodą z reflektorem grafitowym. Nominalna moc cieplna reaktora wynosi 30 MW przy strumieniu neutronów termicznych równym $2 \cdot 10^{14}$ n/(cm²s). W 2021 r. wykorzy-



Fot. 1. Widok reaktora MARIA z lotu ptaka (fot. NCBJ)
Fig. 1. The MARIA reactor (photo NCBJ)

stywane były elementy paliwowe typu MR-6, produkcji rosyjskiej o wzbogaceniu 19,7% w izotop U-235 (tzw. niskowzbożone paliwo uranowe LEU) w kształcie 6 koncentrycznych rur o długości 1000 mm koszulkowanych aluminium.

W roku 2021 reaktor MARIA przepracował łącznie 4053 godzin na mocy cieplnej od 19 do 27 MW, co przedstawiono na załączonym zestawieniu (rys. 1).

Ponadto w 2021 r. prowadzono napromienianie minerałów, w trzech specjalnych stanowiskach znajdujących się w matrycy grafitowej. Do zapewnienia odpowiedniego widma neutronów zastosowano bloki wodne zawierające filtr neutronów.

W ubiegłym roku prowadzono komercyjne napromienianie płytek uranowych służących do produkcji molibdenu (Mo-99), który to izotop ulega przemianie



Rys. 1. Zestawienie pracy reaktora MARIA w 2021r.

Fig. 1. MARIA reactor operation diagram in 2021

Opracowanie i wykonanie Andrzej Frydrysiak - DOM EJ2

Zestawienie pracy reaktora „MARIA” w 2021 roku

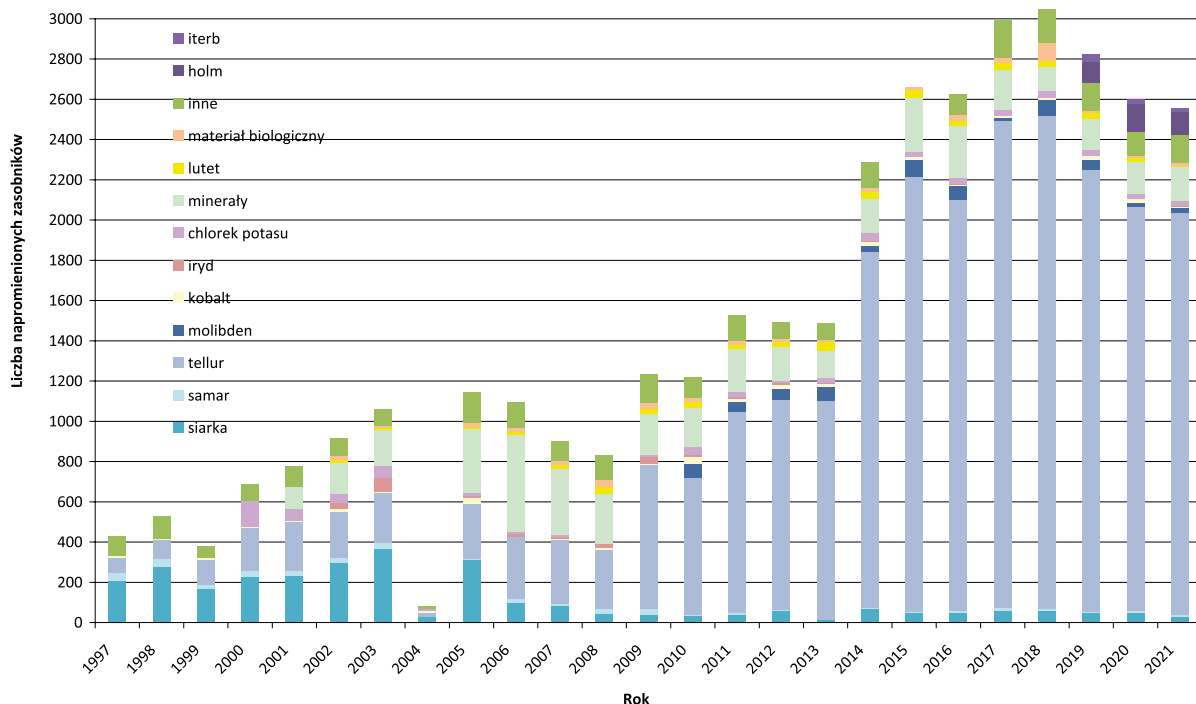
Eksploatacja reaktora dostosowana była w szczególności do zapotrzebowania Ośrodka Radioizotopów Polatom, Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej na napromienianie materiałów tarczowych oraz amerykańskiej firmy Curium na napromienianie płytek uranowych do produkcji molibdenu (Mo-99), a także dla realizacji programów badawczych m.in. napromieniania grafitu w ramach programu Gospostrateg GoHTR, pomiarów parametrów wiązki neutronów na wylocie z kanału poziomego H2 w celu walidacji modelu obliczeniowego.

Napromieniania dotyczyły głównie takich materiałów tarczowych, jak: dwutlenek telluru (do produkcji I-131), siarka (do produkcji P-32), chlorek potasu (do produkcji S-35), iryd, bromek potasu, związki samaru, lutet, lantan, miedź, kobalt, próbki materiałów alkalicznych, biologicznych i geologicznych. Całkowita aktywność napromienionych materiałów wyniosła ok. 1227 TBq oraz 2269 TBq dla molibdenu-99. Wykaz napromienianych materiałów tarczowych w reaktorze MARIA, w postaci liczby załadowanych zasobników przedstawiono na załączonym zestawieniu (rys. 2).

w technet (Tc-99m), będący najbardziej powszechnym na świecie radiofarmaceutykiem stosowanym w diagnostyce medycznej. Płytki uranowe napromieniano w 4 cyklach pracy reaktora, łącznie napromieniono 96 płytek niskowzbożonych (o wzbogaceniu 19,75% w uran-235). Napromienianie płytek prowadzone jest w tzw. kanałach molibdenowych, których konstrukcja jest identyczna jak kanałów paliwowych. Napromienianie realizowane jest w dwóch gniazdach i-6 i f-7 rdzenia reaktora, w czasie wydłużonych cykli pracy reaktora do 120 godzin.

W ubiegłym roku prowadzono również współpracę z holenderską firmą QUIREM, w ramach której napromieniono 134 zestawy tarcz holmu w postaci mikrosfer (Ho-165-PLLA MS). Reaktor MARIA jest jednym z głównych ośrodków napromieniania mikrosfer zawierających polilaktyd holmu (polimer kwasu mlekowego), służących do miejscowej radioterapii, głównie w przypadku nowotworów wątroby.

We współpracy z Ośrodkiem Radioizotopów Polatom zrealizowano napromienianie materiału tarczowego wzbogaconego do 96% w izotop telluru ^{130}Te (zamiast dotychczasowego wzbogacenia do 33,8%).



Rys. 2. Wykaz napromienionych materiałów tarczowych w reaktorze MARIA w 2021 r. Widoczne na wykresie obniżenie liczby napromienionych zasobników w 2004 r. spowodowane było wyłączeniem reaktora z powodu braku paliwa jądrowego

Fig. 2. List of irradiated targets in the MARIA reactor in 2021. Decreased number of irradiated targets in 2004 year was caused by limited hours of reactor operation due to lack of nuclear fuel

Nowy materiał tarczowy pozwala na uzyskanie większej aktywności ^{131}I , przy jednoczesnym zmniejszeniu ilości odpadów produkcyjnych i sprzyja bardziej efektywnemu wykorzystaniu kanałów pionowych reaktora, jednak wadą nowego materiału jest stosunkowo wysoki koszt zakupu materiału tarczowego.

W 2021 r. nie prowadzono badań na wiązkach neutronów wyprowadzanych z kanałów poziomych reaktora. Kanały poziome pozostały zamknięte na okres modernizacji hali fizycznej polegającej na obniżeniu poziomu posadzki oraz zapewnieniu jej odpowiednich parametrów (newralgiczne elementy nowej aparatury badawczej będą poruszać się na poduszce powietrznej w celu eliminacji wpływu drgań na systemy pomiarowe). W ramach modernizacji zostanie zainstalowana nowa infrastruktura techniczna niezbędna do użytkowania aparatury badawczej. Zakończenie remontu planowane jest w drugiej połowie 2022 r. Prowadzona jest również odbudowa kanału H2, której celem jest ukształtowanie wiązki neutronów epidemicznych o parametrach potrzebnych do prowadzenia badań nad terapią BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) – metodą leczenia nowotworów np. glejaków mózgu. W ubiegłym roku przeprowadzono modernizację systemu wentylacji hali fizycznej. Modernizacja polegała na rozdzielaniu systemu wentylacji hali fizycznej od systemu wentylacji hali reaktora. Rozdzielenie wentylacji pozwala na remont hali fizycznej bez oddziaływania na pracę innych systemów reaktora. Po zakończeniu

remontu, nowy system wentylacji zapewni odpowiednie warunki pracy dla wysokiej klasy aparatury badawczej, pozyskanej z wyłączonego z eksploatacji reaktora, w niemieckim instytucie badawczym Helmholtz-Zentrum-Berlin (HZB) w Berlinie.

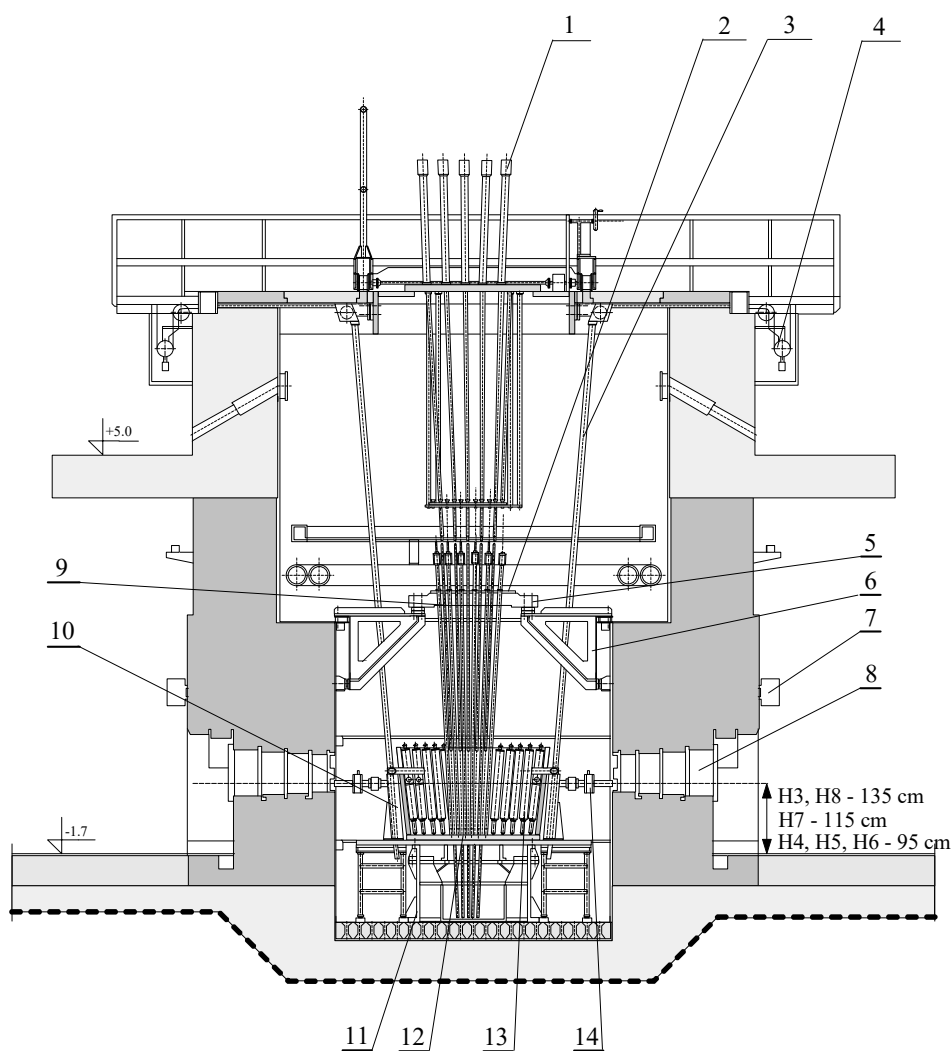
W 2021 r. reaktor był dwukrotnie uruchamiany na potrzeby badań wiązki neutronów w kanale H2. Pomiarzy pozwoliły określić parametry wiązki oraz warunki do realizacji prac badawczych po uruchomieniu i włączeniu do eksploatacji kanału H2.

W 2021 r. wprowadzono do eksploatacji pierwszą sondę wysokotemperaturową ISHTAR (Irradiation System for High-Temperature Reactors), która została zaprojektowana i wykonana w NCBJ w ramach projektu GoHTR – „Przygotowanie instrumentów prawnych, organizacyjnych i technicznych do wdrażania reaktorów HTR”. Sonda umożliwia napromienianie w reaktorze MARIA próbek materiałowych w warunkach panujących w reaktorach wysokotemperaturowych chłodzonych gazem, tj. temperaturze do 1000°C i w atmosferze helowej. Tak wysoka temperatura została zapewniona we wnętrzu sondy dzięki jednoczesnemu grzaniu materiałów sondy przez promieniowanie gamma i przez grzałki elektryczne oraz dzięki zastosowaniu izolacji cieplnej z gazu osłonowego. Prowadzone badania próbek umieszczonych w sondzie mają określić wpływ promieniowania neutronowego i gamma oraz wysokiej temperatury na wytrzymałość i strukturę materiałów przewidywanych do wykorzystania w konstrukcji

nowych reaktorów, a w szczególności przy konstrukcji elementów rdzenia i jego otoczenia. Sonda pracowała w rdzeniu reaktora przez pięć cykli pracy reaktora, czyli przez 670 godzin osiągając temperaturę napromieniowanych zasobników ok. 1000°C. Po demontażu sondy, przewidywanym w 2022 r. próbki zostaną przetransportowane do Laboratorium Badań Materiałowych NCBJ, gdzie zostaną przeprowadzone właściwe badania.

Obecnie w reaktorze MARIA jest eksploatowane paliwo typu MR-6, produkcji rosyjskiej firmy TVEL. Jest to paliwo 6-rurowe, w którym materiałem paliwowym jest dyspersja UO_2 w aluminium, o wzbogaceniu 19,7% w izotop U-235 i zawartości uranu 485 g.

Wypalone elementy paliwowe, po wyjęciu z rdzenia reaktora (rys.3), schładzane są w basenie przechowawczym reaktora. Obecnie w basenie przechowawczym znajdują się tylko niskowzbożone elementy paliwowe typu MR-6 produkcji rosyjskiej oraz typu MC-5 produkcji francuskiej firmy CERCA obecnie Framatome. Wysoko i średniowzbożone elementy paliwowe zostały wywiezione do Rosji, proces wywozu zakończono w 2016 r. Wypalone elementy paliwowe są poddawane systematycznej kontroli metodą „sipping test”, polegającej na pomiarze zawartości produktów rozszczepienia w próbce wody pobranej z elementu paliwowego. W minionym roku zostało rozbudowane stanowisko



1. napęd pręta regulacyjnego
2. płyta montażowa
3. kanał komory jonizacyjnej
4. napęd komory jonizacyjnej
5. konstrukcja wsporcza płyty
6. wspornik płyty
7. napęd zasuwy kanału poziomego

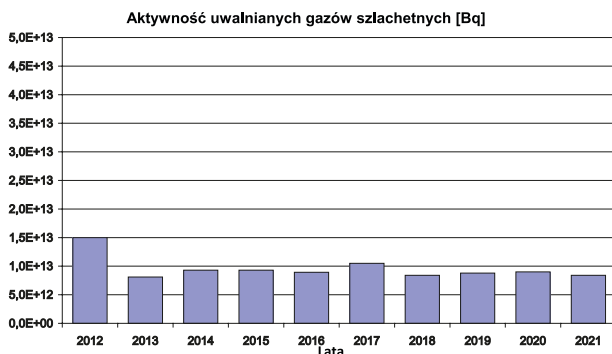
8. zasuwa kanału poziomego
9. kanał paliwowy
10. osłona komór jonizacyjnych
11. podstawa kosza
12. obudowa reflektora
13. bloki reflektora
14. kompensator kanału poziomego

Rys. 3. Przekrój pionowy rdzenia reaktora MARIA
Fig. 3. Vertical cross section of the MARIA reactor core

pomiarowe, obecnie możliwy jest jednoczesny pomiar trzech elementów paliwowych, co pozwala na systematyczną kontrolę w ciągu roku ponad 100 wypalonych elementów paliwowych znajdujących się w basenie przechowawczym.

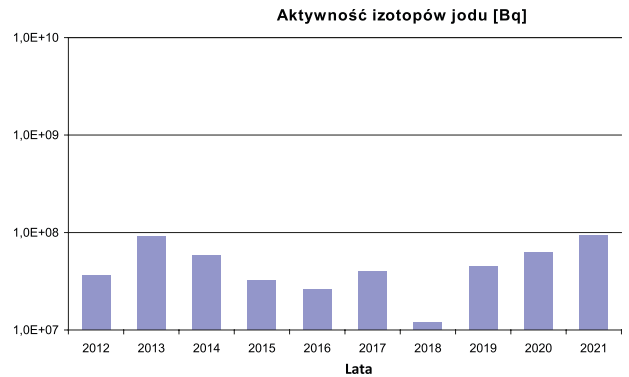
Stan elementów paliwowych pracujących w rdzeniu reaktora MARIA jest stale monitorowany przez układ wykrywania nieszczelności elementów paliwowych (WNEP). Działanie układu polega na okresowym automatycznym pobieraniu wody przepływającej przez kanały paliwowe i pomiarze aktywności neutronów opóźnionych, emitowanych przez produkty rozszczepienia, które mogły się przedostać do tej wody z nieszczelnego elementu paliwowego. W 2021 r. podczas eksploatacji zostały wykryte zwiększone uwolnienia produktów rozszczepienia do obiegu chłodzenia kanałów paliwowych z czterech elementów paliwowych. Elementy paliwowe, z których wydostawały się produkty rozszczepienia zostały wycofane z eksploatacji, a ich stan jest systematycznie monitorowany w basenie przechowawczym.

Reaktor MARIA jest wyposażony w dwa niezależne pierwotne obiegi chłodzenia, stanowiące bariery bezpieczeństwa, zabezpieczające przed rozprzestrzenianiem się produktów rozszczepienia. Głównym obiegiem chłodzenia jest obieg chłodzenia kanałów paliwowych, który odbiera bezpośrednio ciepło z elementów paliwowych, jest to obieg o podwyższonym ciśnieniu wymuszonym przez stabilizator ciśnienia. Dodatkowo obieg chłodzenia kanałów paliwowych jest wyposażony w szereg aktywnych i pasywnych funkcji bezpieczeństwa. Drugim z pierwotnych układów chłodzenia jest obieg chłodzenia basenu reaktora, odbiera on ciepło generowane w matrycy berylowej i grafitowej, prętach pochłaniających, materiałach tarczowych oraz elementach konstrukcyjnych rdzenia reaktora. Ciepło z dwóch pierwotnych obiegów chłodzenia jest odbierane przez obieg wtórny chłodzenia, który przekazuje je do atmosfery przez chłodnię wentylatorową.



Rys. 4. Roczne uwolnienia gazów szlachetnych z reaktora MARIA w ciągu ostatnich dziesięciu lat

Fig. 4. Yearly noble gases emission from the MARIA reactor in the last 10 years



Rys. 5. Roczne uwolnienia izotopów jodu z reaktora MARIA w ciągu ostatnich dziesięciu lat

Fig. 5. Yearly emission of iodine isotopes from the MARIA reactor in the last 10 years

Reaktor badawczy MARIA jest w sposób ciągły monitorowany pod względem uwolnień produktów radioaktywnych do środowiska. Poziomy uwolnień do atmosfery przedstawione na rys. 4 i 5, w 2021 r. wyniosły:

- emisja gazów szlachetnych (głównie Ar-41 oraz izotopy ksenonu i kryptonu) – $8,4 \times 10^{12}$ Bq, co stanowi ok. 0,8% limitu uwolnień,
- emisja jodów – $9,4 \times 10^7$ Bq, co stanowiło 0,9% rocznego limitu uwolnień.

W 2021 r. 131 pracowników reaktora otrzymało dawkę mierzalną na całe ciało (Hp-10) zawierającą się w granicach 0,10-1,89 mSv, a 9 pracowników otrzymało dawkę mierzalną na skórę (Hp-0,07) w granicach 0,67-2,26 mSv, przy granicach dopuszczalnych wynoszących odpowiednio 20 i 500 mSv.

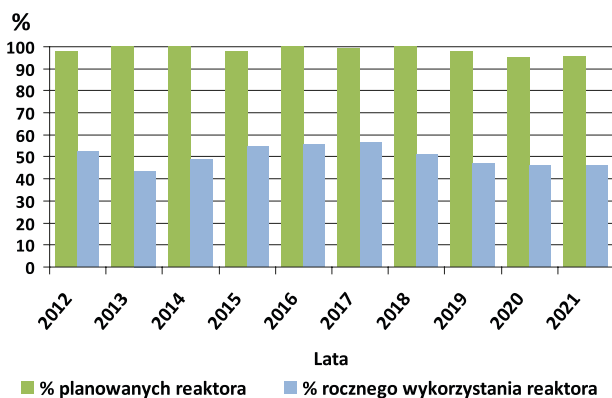
Na rys. 6 przedstawiono dwa parametry, mówiące o dyspozycyjności reaktora MARIA na przestrzeni ostatnich 10 lat:

1. stosunek liczby przepracowanych godzin do sumy liczby przepracowanych godzin i liczby godzin nieplanowanych wyłączeń w 2021 r. (A_1), który wynosił 95,5 %,
2. stosunek liczby godzin pracy reaktora do liczby godzin w 2021 r. (A_2) wynoszący 46,3%.

W 2021 r. odnotowano dwadzieścia trzy nieplanowane wyłączenia reaktora w tym cztery, które spowodowały skrócenie cykli pracy. Przyczyny wystąpienia nieplanowanych wyłączeń można podzielić na cztery grupy:

- zakłócenia w zewnętrznej sieci elektroenergetycznej (9),
- problemy z eksploatacją paliwa (3),
- fluktuacje przepływu w obiegu basenu (13),
- zakłócenie w pracy układu automatyki neutronowej (1).

	% planowanych reaktora	% rocznego wykorzystania reaktora
	A ₁	A ₂
2001	98	40
2002	99,5	44,5
2003	95,7	45,8
2004	100	3,4 ^{*)}
2005	99	43,7
2006	99,1	45,7
2007	98,7	45,7
2008	98,8	49,1
2009	96,8	48,7
2010	97,1	43,4
2011	98,7	48,8
2012	97,8	52,6
2013	99,9	43,5
2014	100	49
2015	98	54,5
2016	100	55,5
2017	99,1	56,3
2018	99,9	51
2019	97,9	47,1
2020	95,3	46,2
2021	95,5	46,3



Rys. 6. Roczne wskaźniki pracy reaktora MARIA
Fig. 6. Yearly factors of reactor the MARIA operation

Przyczyny wystąpienia zwiększonej ilości nieplanowanych włączeń są analizowane, a obsługa reaktora MARIA dokłada wszelkich starań, aby zmniejszyć ich liczbę i wpływ na harmonogram pracy reaktora. Najczęstszą przyczyną nieplanowanych włączeń był wpływ fluktuacji przepływu wody w obiegu basenu na systemy pomiarowe, który został wyeliminowany w czerwcu 2021 r. przez modernizację układu pomiaru natężenia przepływu wody w obiegu basenu reak-

tora. Należy zauważyć, że od września do końca roku miało miejsce tylko jedno nieplanowane wyłączenie, co wskazuje na poprawę sytuacji. Natomiast problemy z eksploatacją paliwa typu MR-6 nie wpływają znacząco na uwolnienia substancji promieniotwórczych do atmosfery oraz poziom narażenia personelu, uwolnienia do atmosfery i poziom narażenia pracowników jest na stałym, niskim poziomie. Zostało to osiągnięte dzięki doświadczonemu personelowi oraz ścisłym przestrzeganiu procedur eksploatacyjnych.

W 2021 r. przeprowadzono wspomnianą powyżej modernizację systemu wentylacji hali fizycznej oraz prowadzono bieżące naprawy i prace konserwacyjne wyposażenia reaktora. Prowadzono szereg prac przygotowawczych do zaplanowanych prac remontowych w 2022 r. Od września 2022 r. jest zaplanowana kilkumiesięczna przerwa pracy reaktora, podczas której zostaną przeprowadzone modernizacje:

- głównych rozdzielni elektrycznych wraz z okablowaniem,
- modernizacja sterowania reaktora z zastosowaniem systemu wizualizacji danych pomiarowych,
- modernizacja zbiornika na ciekłe odpady promieniotwórcze.

W trakcie realizacji jest także modernizacja impulsowej linii rozruchowej polegająca na dobudowaniu drugiej nowej linii i wymianie istniejącej.

W 2021 r. z powodu pandemii COVID-19 ograniczono działalność edukacyjną NCBJ, wycieczki były przyjmowane do NCBJ stosując ścisły reżim sanitarny. Sytuacja epidemiczna nie wpłynęła na pracę reaktora.

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca reaktora w 2021 r. przebiegała bez większych zakłóceń, potwierdzając jego dobrą dyspozycyjność oraz spełnianie warunków bezpiecznej eksploatacji.

Z ostatniej chwili

W styczniu 2022 r. na prośbę firmy Curium zmieniono harmonogram pracy reaktora, by podjąć produkcję molibdenu dla diagnostyki medycznej z powodu awarii reaktora HFR w Holandii. Rdzeń reaktora został błyskawicznie przekonfigurowany na potrzeby tego zadania. Zrealizowano trzy cykle na podwyższonej mocy do 25 MW, żeby zapobiec światowym brakom w dostawach molibdenu-99 dla medycyny.

inż. Piotr Witkowski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
Świerk