

PRACA REAKTORA BADAWCZEGO MARIA W 2020 ROKU

Research reactor MARIA operation in 2020

Piotr Witkowski

Streszczenie: Wysokostrumieniowy reaktor badawczy MARIA, eksploatowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku, wykorzystywany jest do produkcji radioizotopów oraz do prowadzenia badań z wykorzystaniem wiązek neutronów. W artykule opisano parametry techniczne reaktora i charakterystykę jego pracy w 2020 r.

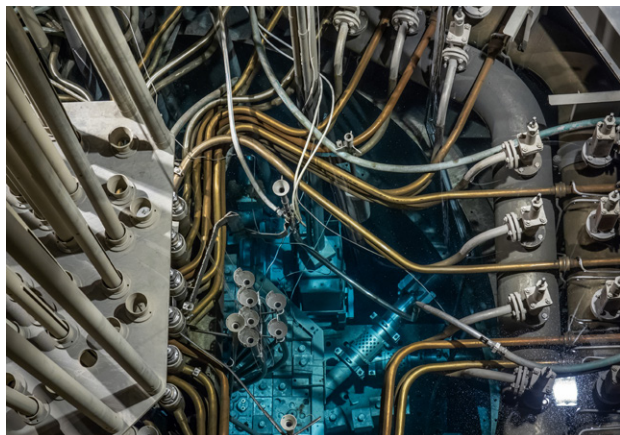
Abstract: The MARIA high-flux research reactor operated at the National Centre for Nuclear Research at Swierk (Poland) is used for targets irradiation and to run physical experiments. The technical parameters of the reactor and characteristics of its operation in 2020 are presented.

Słowa kluczowe: reaktor MARIA, Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), eksploatacja reaktora MARIA w 2020 r.

Keywords: MARIA reactor, National Center for Nuclear Research (NCNR), operation of MARIA reactor in 2020

Wysokostrumieniowy reaktor badawczy MARIA, eksploatowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku, wykorzystywany jest do produkcji izotopów promieniotwórczych dla potrzeb medycyny i przemysłu oraz do prowadzenia badań fizycznych. Jest to reaktor kanałowo-basenowy z paliwem umieszczonym w matrycy berylowej otoczonej reflektorem grafitowym, moderowany i chłodzony zwykłą wodą. Nominalna moc cieplna reaktora wynosi 30 MW przy strumieniu neutronów termicznych równym $2 \cdot 10^{14}$ n/(cm²s). W 2020 r. wykorzystywane były dwa rodzaje elementów paliwowych: typu MC-5 i MR-6, o wzbogaceniu 19,75% oraz 19,7% w izotop U-235 (tzw. paliwo LEU) w kształcie 5 lub 6 koncentrycznych rur o długości 1000 mm koszulkowanych aluminium.

Na fot. 1. przedstawiono widok z góry rdzenia reaktora MARIA wraz widocznymi rurociągami i kolektorami doprowadzającymi i odprowadzającymi wodę chłodzącą z kanałów paliwowych.



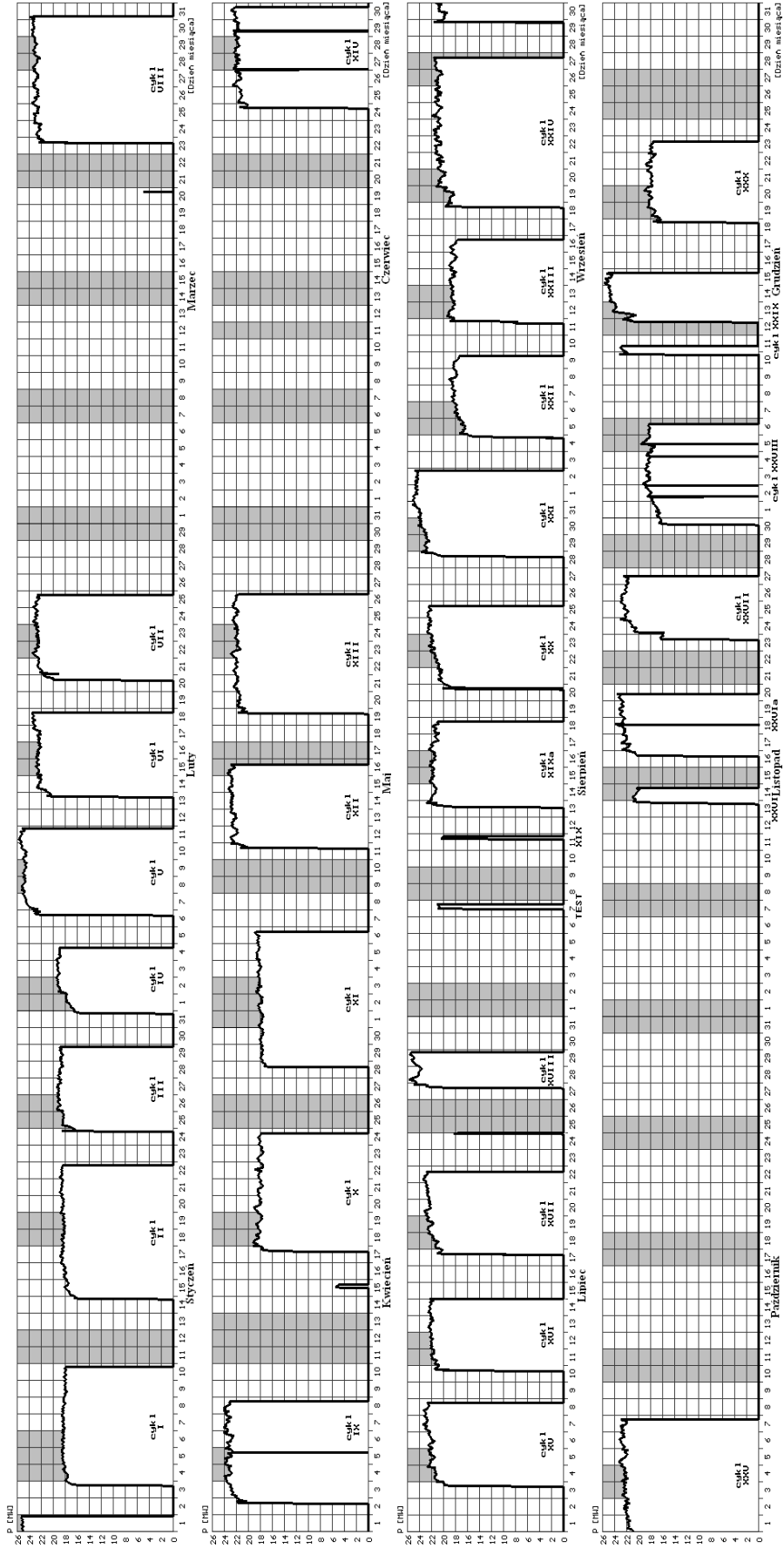
Fot. 1. Widok rdzenia reaktora MARIA (fot. NCBJ)
Photo 1. View of the MARIA reactor (photo NCBJ)

W roku 2020 reaktor MARIA przepracował łącznie 4058 godzin na mocy cieplnej od 18 do 27 MW, co przedstawiono na załączonym zestawieniu (rys. 1). Eksploatacja reaktora dostosowana była w szczególności do zapotrzebowań na napromienianie płytek uranowych do produkcji molibdenu (Mo-99) dla amerykańskiej firmy Curium oraz do zapotrzebowania Ośrodka Radioizotopów POLATOM, Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej na napromienianie materiałów tarczowych oraz realizacji programów badawczych.

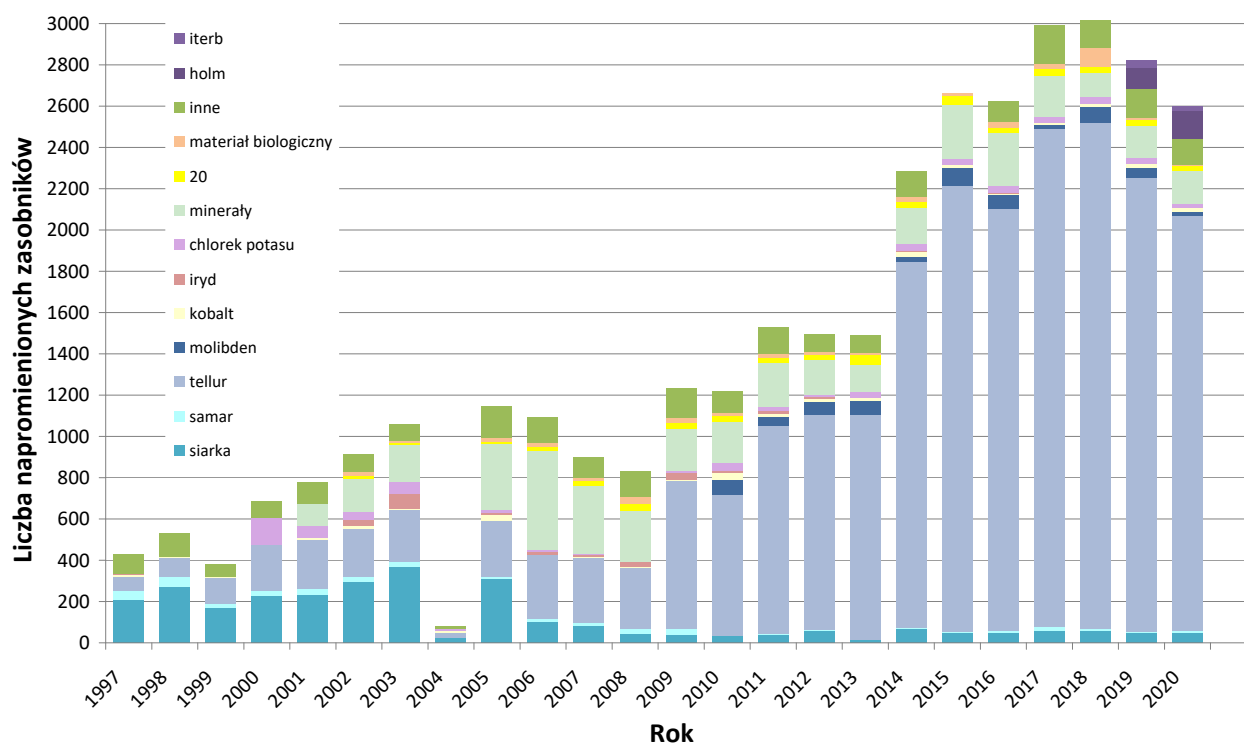
Zestawienie pracy reaktora „MARIA” w 2020 roku

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. 1200 TBq oraz 1658,7 TBq dla molibdenu-99. Wykaz napromienianych materiałów tarczowych w reaktorze MARIA, w postaci liczby załadowanych zasobników przedstawiono na załączonym zestawieniu (rys. 2). Ponadto w 2020 r. prowadzono napromienianie minerałów, w trzech specjalnych stanowiskach, co wymaga stosowania „nietyposwej” konfiguracji rdzenia reaktora z ośmioma blokami wodnymi zawierającymi filtr, modelujący widmo neutronów (konfiguracja rdzenia jest identyczna jak w 2019 r.¹ z tym, że uległa zmniejszeniu liczba bloków paliwowych po wymianie bloków berylowych na nowe, nie zatrute helem i litem).

¹ I. Owsianko: Praca reaktora badawczego MARIA w 2019 r., PTJ nr 1/2020, s.6-11



Rys. 1. Zestawienie pracy reaktora MARIA w 2020 r. (Opracowanie i wykonanie Andrzeja Frydrysiak – DOM EJZ)
 Fig. 1. The MARIA reactor operation diagram in 2020



Rys. 2. Wykaz napromienionych materiałów tarczowych w reaktorze MARIA w 2020 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 2020. Decreased number of irradiated targets in 2004 year was caused by limited hours of reactor operation due to lack of nuclear fuel

W roku 2020 prowadzono komercyjne napromienianie płytek uranowych służących do produkcji molibdenu ($Mo-99$), który to izotop ulega przemianie w technet ($Tc-99m$), będący najbardziej powszechnym na świecie radiofarmaceutykiem stosowanym w diagnostyce medycznej. Płytki uranowe napromieniano w 4 cyklach pracy reaktora, łącznie napromieniono 80 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 godz.

W ubiegłym roku prowadzono również współpracę z holenderską firmą QUIREM, w ramach której napromieniono 139 zestawów tarcz holmu w postaci mikrosfer ($Ho-165-PLLA MS$). Napromienione tarcze holmowe wykorzystywane są w selektywnej brachyterapii polegającej na podawaniu mikrosfer, zawierających izotop $Ho-165$ bezpośrednio do tętnicy wątrobowej w leczeniu nowotworu tego organu.

We współpracy z Ośrodkiem Radioizotopów POLATOM zrealizowano cztery testowe napromieniania materiałów tarczowych wzbogaconych do 96%

w izotop telluru. Działania zmierzają z jednej strony do uzyskania większej aktywności I-131 z tarczy, z drugiej do zmniejszenia odpadów promieniotwórczych. W odniesieniu do reaktora pozytywne efekty testów pozwolą na optymalizację wykorzystania kanałów izotopowych.

Można stwierdzić, że opisane wyżej technologie napromieniania zostały sprawdzone technologicznie i stanowią podstawę do przyszłych zastosowań w reaktorze MARIA.

W 2020 r. nie prowadzono badań na wiązkach neutronów wyprowadzanych z kanałów poziomych reaktora przez Środowiskowe Laboratorium Neutronografii. Kanały poziome zostały zamknięte. Rozpoczęto modernizację systemu wentylacji hali fizycznej, co pozwoli na przeprowadzenie jej remontu. Modernizacja umożliwi zainstalowanie, na wylocie kanałów poziomych reaktora, wysokiej klasy aparatury badawczej, pozyskanej z wyłączonego z eksploatacji reaktora, w niemieckim instytucie badawczym Helmholtz-Zentrum-Berlin (HZB) w Berlinie. Modernizacja dotyczyć będzie głównie wykonania nowej posadzki oraz takich układów technologicznych jak: układ sterowania zasuwami kanałów poziomych, instalacja dostawy sprężonego powietrza itp.

W 2020 r. uruchomiono dwukrotnie reaktor w celu pomiaru wiązki strumienia neutronów z kanału poziomego H2, który jest odbudowywany i umożliwi szersze wykorzystanie neutronów epitermicznych do badań biologicznych i materiałowych.

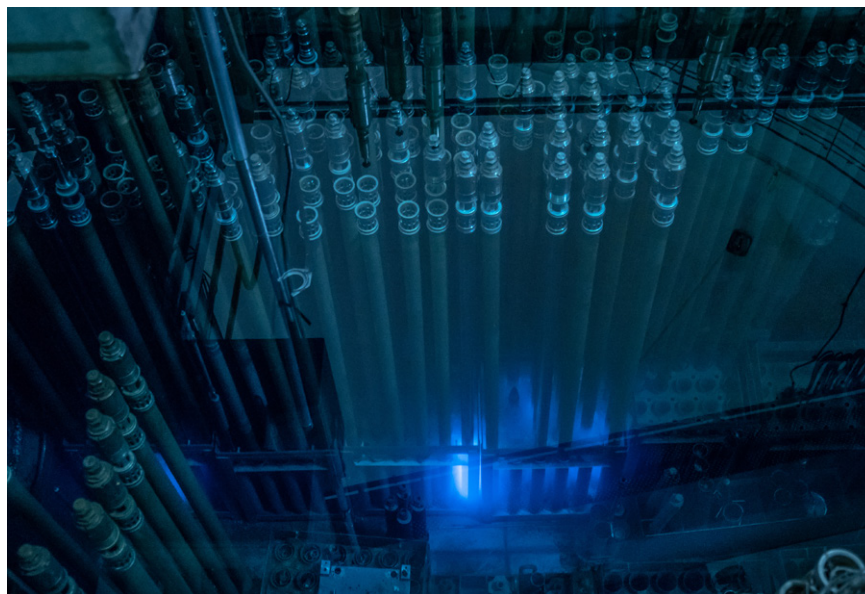
W omawianym roku prowadzone były prace mające na celu wprowadzenie sond termostatycznych do napromieniowań wysokotemperaturowych w rdzeniu reaktora MARIA, pierwsze z nich zostaną umieszczone w rdzeniu reaktora w 2021 r. Sondy wysokotemperaturowe są efektem współpracy NCBJ z ośrodkami naukowymi na całym świecie. I tak sonda MAKARONI (oficjalna nazwa) dla reaktora fuzyjnego budowanego w ramach projektu WP-ENS/EuroFusion ma za zadanie zbadać zachowanie drutów grzejnych oraz innych próbek materiałowych podczas pracy w polu promieniowania, a w tym materiałów konstrukcyjnych dla tokamaków (dla CCFE-UKAEA). Sonda JMTR służy do napromieniania układów, które potem wykorzystywane są w wykrywaniu uwolnień produktów rozszczepień w paliwie w elektrowniach zawodowych. Jest to pierwsza z sond prowadzona we współpracy JAEA, chcemy dostosować ich technologię do konstrukcji naszego rdzenia, a w przyszłości rozwinąć współpracę o inne sondy. Prowadzone są także prace nad sondą ISHTAR z projektu Gospostrateg HTR, która ma służyć do napromieniania próbek grafitu od różnych producentów w warunkach zbliżonych do panujących w rdzeniach reaktorów HTR, przy zachowaniu bezpiecznej pracy w rdzeniu reaktora MARIA.

W 2020 r. zakończono eksploatację paliwa typu MC-5, wyprodukowanego przez francuską firmę AREVA. Jest to paliwo 5-rurowe, zawierające 485 g uranu o wzboga-

gaceni 19,75% w izotop U-235, a więc paliwo nisko-wzbogacone (LEU). Materiałem rozszczepialnym jest krzemek uranu w dyspersji z aluminium (U_3Si_2-Al) koszulkowany aluminium i umieszczony w pięciu koncentrycznych rurach. Paliwo to jest bardzo dobrej jakości i dzięki temu, możliwe było jego głębsze wypalanie, przewyższające 55%, co zdecydowanie podniosło efektywność ekonomiczną wykorzystania tego paliwa. Od 2018 r. rozpoczęto eksploatację paliwa typu MR-6, produkcji rosyjskiej firmy TVEL. Jest to paliwo 6-rurowe, w którym materiałem paliwowym jest dyspersja UO_2 w aluminium, o wzbogaćeniu 19,7% w izotop U-235 i zawartości uranu 485 g. Od roku 2018 do końca 2020 r. rozpoczęto eksploatację w rdzeniu reaktora 36 elementów paliwowych typu MR-6. Obecnie prowadzony jest dialog techniczny przed procedurą przetargową na kolejną dostawę paliwa dla reaktora MARIA.

Wypalone elementy paliwowe, po wyjęciu z rdzenia reaktora, schładzane są w basenie przechowawczym reaktora (fot. 2.), gdzie poddawane są systematycznej kontroli uwolnień produktów rozszczepienia, do wody chłodzącej. W ramach tej kontroli (tzw. sipping test) wykonywane są pomiary poziomów aktywności produktów rozszczepienia uwalnianych z tych elementów do wody, w tym głównie Cs-137. Na podstawie spektrometrycznych pomiarów aktywności produktów rozszczepienia, oceniana jest szczelność wypalonych elementów paliwowych. Dotychczasowe pomiary wykazują dobry stan koszulek wypalonych elementów paliwowych, umieszczonych w basenie przechowawczym reaktora. W przypadku dwóch prototypowych elementów paliwowych MC001 i MC002 (produkcji firmy AREVA) oraz prototypowego elementu paliwowego MR 2212 zaobserwowano wzrost uwolnienia Cs-137, co wskazuje na pogorszenie stanu koszulek tych elementów. Elementy te zamknięte są w kapsułach przechowawczych i systematycznie monitorowane. Wzrost koncentracji produktów rozszczepienia zmierzono także w dwóch elementach paliwowych typu MR-6, które zostały wycofane z eksploatacji z powodu zwiększonego poziomu uwolnień podczas pracy w rdzeniu reaktora.

Reaktor MARIA jest wyposażony w układ wykrywania nieszczelności elementów paliwowych (WNEP), pozwalający na monitorowanie stanu elementów paliwowych pracujących w rdzeniu reaktora. Działają-



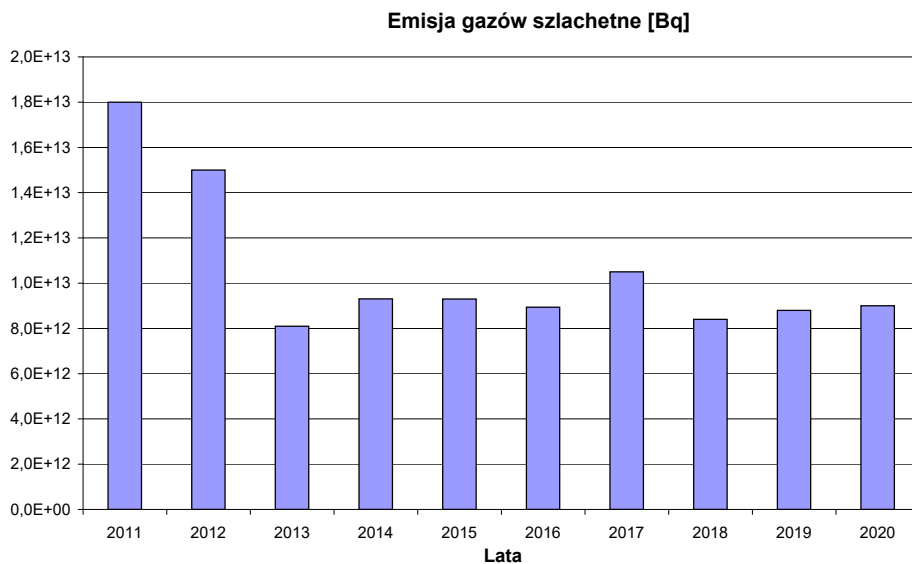
Fot. 2. Basen przechowawczy wypalonego paliwa z reaktora MARIA (fot. NCBJ)
Photo 2. Spent fuel pool of the MARIA reactor (photo NCBJ)

nie układu polega na okresowym próbkowaniu wody z każdego kanału paliwowego i pomiarze aktywności neutronów opóźnionych, emitowanych przez produkty rozszczepienia znajdujące się w wodzie przepływającej przez dany element paliwowy w sytuacji jego rozszczelnienia. W przypadku dwóch elementów paliwowych typu MR-6 układ WNEP bardzo szybko wykrył źródło zwiększonych uwolnień do obiegu chłodzenia. Uwolnienia nie spowodowały zagrożenia dla personelu czy zwiększenia poziomu emisji produktów rozszczepienia do środowiska. Obecnie prowadzone są ustalenia z producentem paliwa, mające na celu zbadanie przyczyny zwiększonych uwolnień.

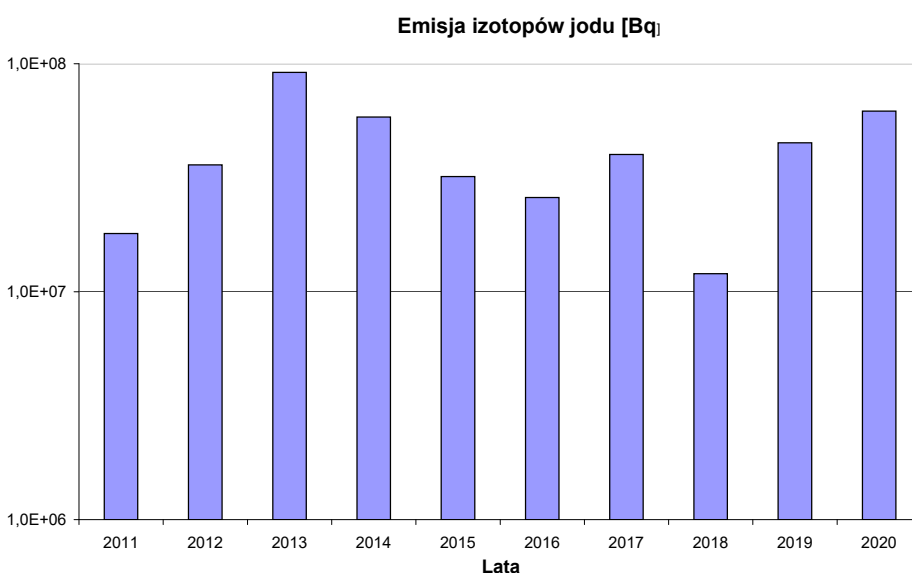
Reaktor badawczy MARIA jest w sposób ciągły monitorowany pod względem uwolnień produktów radioaktywnych do środowiska. Poziomy uwolnień do atmosfery przedstawione na rys. 4 i 5 wyniosły:

- emisja gazów szlachetnych (głównie Ar-41 oraz izotopy ksenonu i kryptonu) – $9,0 \cdot 10^{12}$ Bq, co stanowi ok. 0,9% limitu uwolnień,
- emisja jodów – $6,2 \cdot 10^7$ Bq, co stanowiło 0,9% rocznego limitu uwolnień.

W 2020 r. 121 pracowników reaktora otrzymało dawkę mierzalną na całe ciało (Hp-10) zawierającą się



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 jodów z reaktora MARIA w ciągu ostatnich dziesięciu lat
Fig. 5. Yearly iodine's emission from the MARIA reactor in the last 10 years

w granicach 0,10-1,96 mSv, a 10 pracowników otrzymało dawkę mierzalną na skórę (Hp-0,07) w granicach 0,65-2,43 mSv, przy granicach dopuszczalnych wynoszących odpowiednio 20 i 500 mSv.

W 2020 r. odnotowano 17 nieplanowanych wyłączeń reaktora. Jedenaście krótkotrwałych wyłączeń nie spowodowało konieczności skrócenia cyklu pracy reaktora. Sześć wyłączeń spowodowało konieczność zmiany harmonogramu pracy reaktora. Większość z przyczyn pogorszonej dyspozycyjności reaktora została wyeliminowana lub zostanie usunięta podczas najbliższych modernizacji.

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 2020 r. (A_1), który wynosił 95,3 %,
2. stosunek liczby godzin pracy reaktora do liczby godzin w 2019 r. (A_2) wynoszący 46,2%.

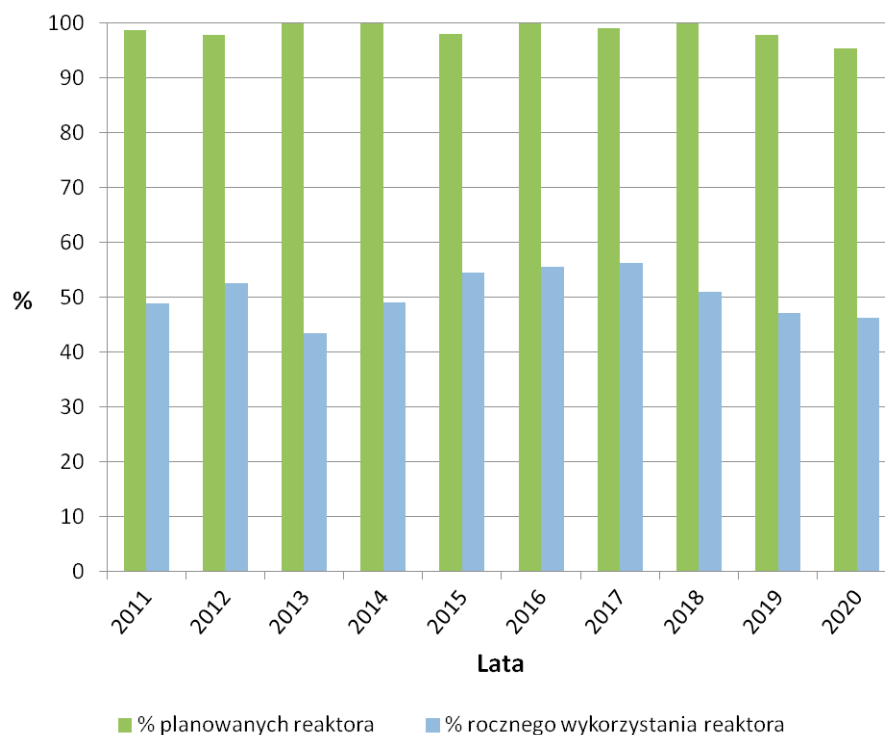
Reaktor MARIA jest stale modernizowany w celu zachowania wysokiego poziomu bezpieczeństwa, a także niezawodności reaktora. Z ważniejszych prac modernizacyjnych zrealizowanych w 2020 r. należy wymienić modernizację układów progowych oraz separatorów

zasilaczy współpracujących z torami pomiarowymi nateżenia przepływów, pomiarów ciśnień oraz poziomów wody w obiegach reaktora MARIA. Kontynuowano też wymianę bloków berylowych w matrycy reaktora MARIA. Wymieniono 4 bloki o najwyższej fluencji neutronów, wymiana 4 kolejnych jest planowana na 2021 rok. Ponadto przygotowano dokumentację (zatwierdzoną przez Państwową Agencję Atomistyki) na modernizację systemu zasilania oraz sterowni reaktora MARIA. W trakcie realizacji jest także modernizacja impulsowej linii rozruchowej polegająca na dobudowaniu drugiej nowej linii i wymianie istniejącej. Impulsowa linia rozruchowa służy do pomiaru strumienia neutronów przy niskim poziomie mocy reaktora.

W 2020 r. z powodu pandemii COVID-19 ograniczono działalność edukacyjną Narodowego Centrum Badań Jądrowych. Sytuacja epidemiczna nie wpłynęła na pracę reaktora, jedynie z powodu ograniczeń w pracy szpitali można zauważyć zmniejszone zapotrzebowanie na izotopy promieniotwórcze.

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca reaktora w 2020 r. przebiegała bez większych zakłóceń, potwierdzając jego dobrą dyspozycyjność oraz spełnianie warunków bezpiecznej eksploatacji.

*inż. Piotr Witkowski,
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
Świerk*



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