

# PRACA REAKTORA BADAWCZEGO MARIA W 2022 ROKU

## Research reactor MARIA operation in 2022

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 2022 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 2022 are presented.

**Słowa kluczowe:** reaktor MARIA, Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), eksploatacja reaktora MARIA w 2022 r.

**Keywords:** MARIA reactor, National Center for Nuclear Research (NCNR), operation of MARIA reactor in 2022

Reaktor badawczy MARIA jest eksploatowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku od 1974 r. Reaktor MARIA (fot. 1) charakteryzuje się unikalną konstrukcją na tle innych reaktorów badawczych. Jest to reaktor typu basenowego z ciśnieniowym obiegiem chłodzenia kanałów paliwowych. Rolę moderatora pełni woda oraz beryl znajdujący się pomiędzy elementami paliwowymi. Rdzeń reaktora otacza reflektor zbudowany z bloków grafitowych. Każdy z bloków grafitowych jest koszulkowany. Szczelinę pomiędzy grafitem, a zewnętrzną koszulką bloku grafitowego wypełnia azot. Stanowi on izolację termiczną dla grafitu, podnosząc temperaturę wewnątrz bloku, co znacząco zmniejsza wpływ fluencji neutronów na proces zwiększania się wymiarów zewnętrznych bloku grafitowego znajdującego się wewnątrz aluminiowej koszulki.

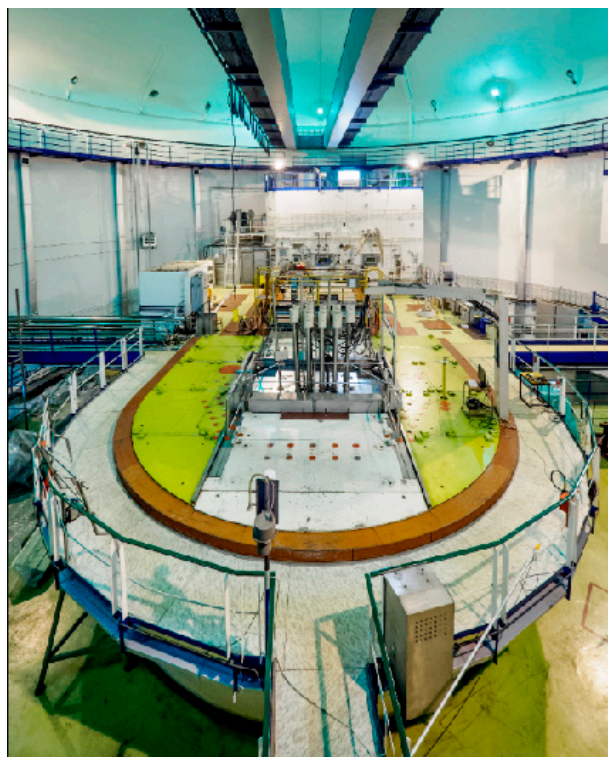
Reaktor został zaprojektowany do pracy z nominalną mocą cieplną do 30 MW. Obecnie reaktor pracuje z mocą nominalną 19-27 MW. Moc cieplna jest dostosowywana do harmonogramu napromieniowań materiałów tarczowych umieszczonych w rdzeniu reaktora. Maksymalny strumień neutronów termicznych w rdzeniu reaktora wynosi  $2,5 \cdot 10^{14}$  n/(cm<sup>2</sup>s), natomiast maksymalny strumień neutronów prędkich wynosi  $1,0 \cdot 10^{14}$  n/(cm<sup>2</sup>s).

### Zestawienie pracy reaktora „MARIA” w 2022 roku

Reaktor MARIA posiada zezwolenie na eksploatację dwóch standardowych typów elementów paliwowych o oznaczeniach MR-6 i MC-5. Obecnie w rdzeniu znajdują się elementy paliwowe typu MR-6, wyprodukowane przez rosyjską firmę TVEL należącą do koncernu Rosatom. Każdy z elementów paliwowych w sześciu koncentrycznych rurach paliwowych zawiera 485 g U-235 o wzbogaceniu 19,75 %. Uran jest umieszczony w po-

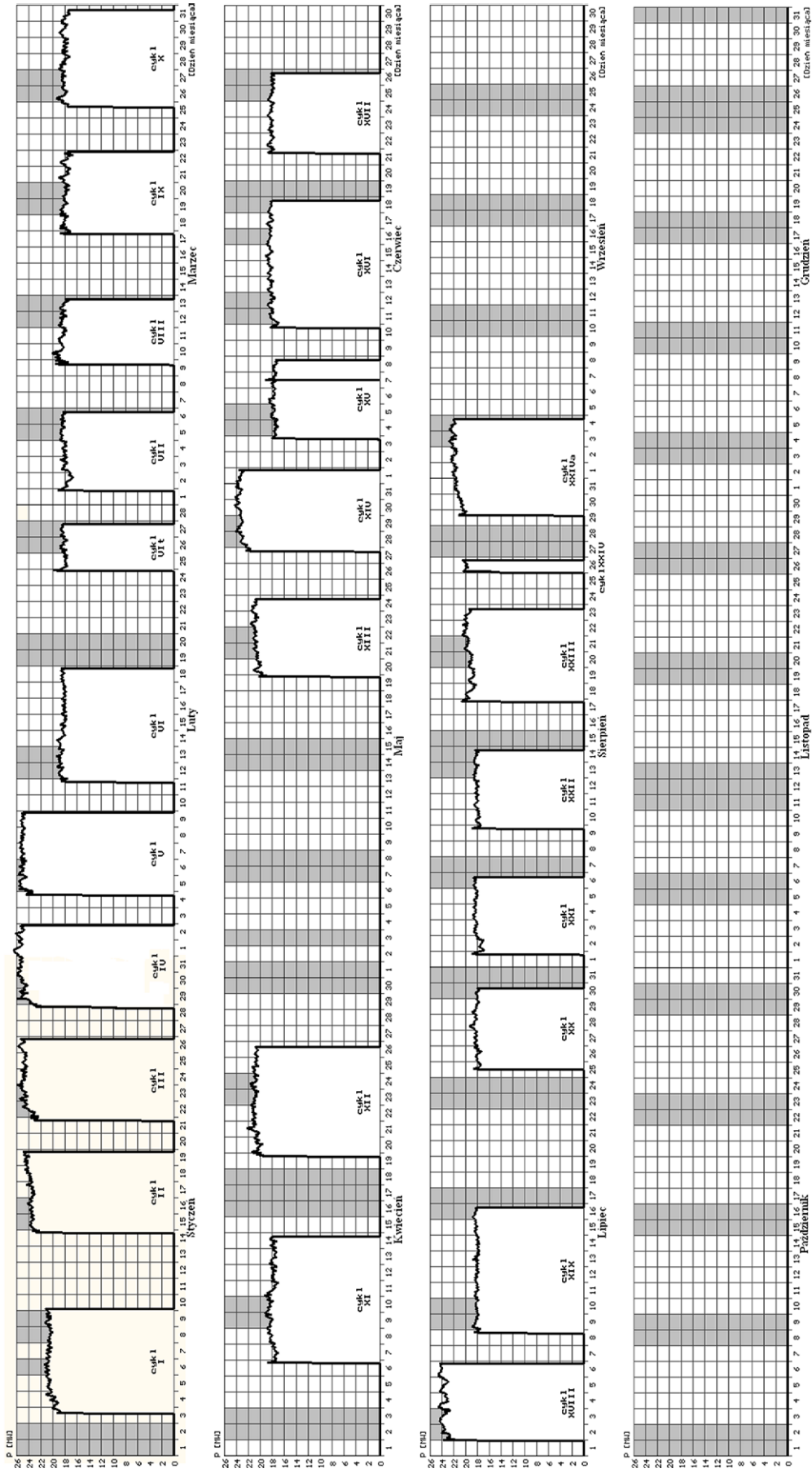
staci dyspersji tlenku uranu w aluminium. W 2023 r. jest planowane zakończenie eksploatacji elementów paliwowych typu MR-6. W ubiegłym roku NCBJ podpisał kontrakt z firmą Framatome na produkcję w zakładach CERCA i dostawę elementów paliwowych typu MC-5.

Pierwsze elementy paliwowe zostaną dostarczone do reaktora MARIA w na początku 2023 r. Zamówiona partia paliwa pozwoli na eksploatację reaktora przez najbliższe trzy lata. Elementy paliwowe typu MC-5 były



Fot. 1. Reaktor MARIA (fot. NCBJ)

Photo 1. The MARIA reactor (photo NCBJ)



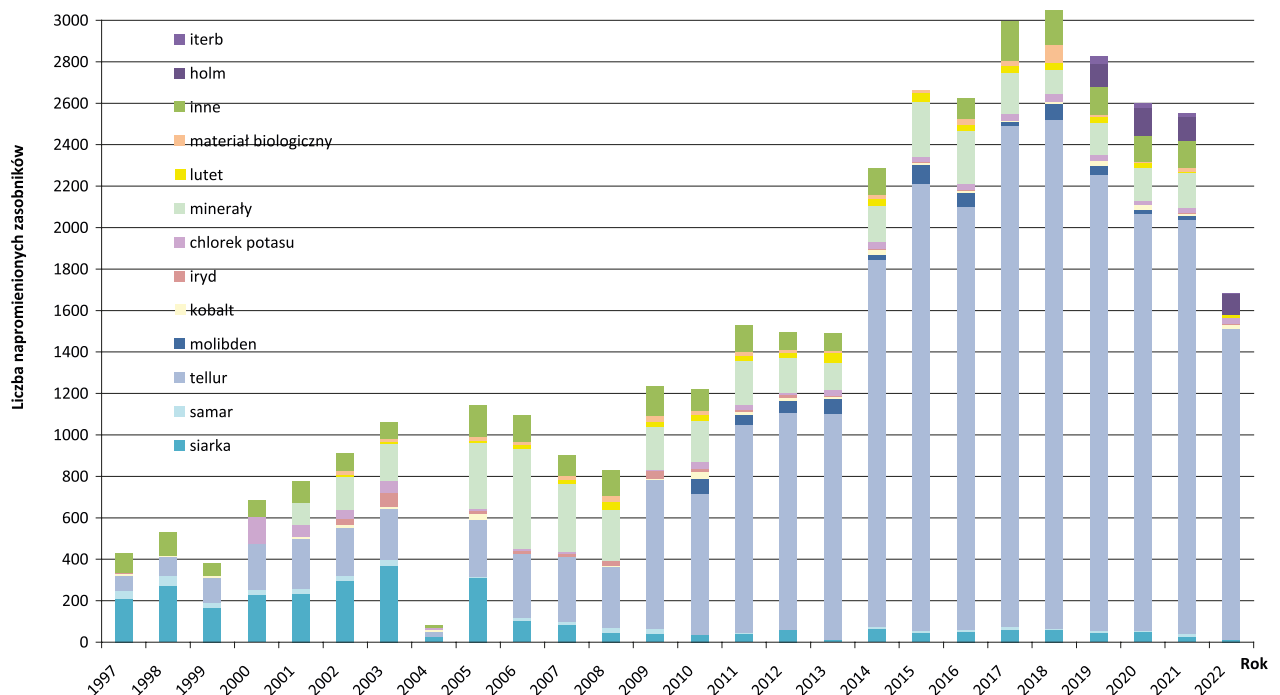
Rys. 1. Zestawienie pracy reaktora MARIA w 2022 r.  
 Fig. 1. MARIA reactor operation diagram in 2022  
 Opracowanie i wykonanie Andrzej Frydrysiak - DOM EJ2

eksploatowane w reaktorze MARIA w latach 2009-2020, mają zbliżoną konstrukcję do paliwa typu MR-6. Główną różnicą jest ilość rur paliwowych 5 w elemencie MC-5 (wobec 6 w elemencie MR) oraz postać materiału jądrowego, którą w elemencie MC-5 jest dyspersja krzemku uranu w aluminium. Reaktor MARIA jest wyposażony w unikalny układ wykrywania nieszczelności elementów paliwowych (WNEP), pozwalający na bezpieczną eksploatację w rdzeniu reaktora kilku typów elementów paliwowych, poprzez stałe monitorowanie parametrów ich pracy. Działanie układu WNEP polega na okresowym próbkowaniu wody przepływającej w kanałach paliwowych i wykrywaniu w niej produktów rozszczepienia wydostających się z elementów paliwowych poprzez pomiar neutronów opóźnionych, emitowanych przez te produkty.

W 2022 r. reaktor był uruchamiany 29 razy. Czas pracy na mocy nominalnej wynoszącej od 18 do 25 MW wyniósł 3382 godziny i obejmował realizację 26 cykli pracy, co przedstawiono na rys. 1. Czas trwania cykli w zależności od programów napromieniania mieścił się w przedziale od 79 do 192 godzin. Harmonogram pracy reaktora był dostosowany do zapotrzebowania na napromienianie Ośrodka Radioizotopów Polatom oraz napromienianie tarcz uranowych do produkcji  $^{99}\text{Mo}$ . Reaktor był również uruchamiany na potrzeby realizacji prac badawczych, m.in. pomiarów parametrów reaktywności rdzenia oraz pomiarów gęstości strumienia neutronów w rdzeniu reaktora.

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, holm, kobalt, próbki materiałów alkalicznych, biologicznych i geologicznych. Całkowita aktywność napromienionych materiałów wyniosła około 1230 TBq dla zasobników z materiałami tarczowymi oraz 3435 TBq dla płytek uranowych przeznaczonych do produkcji molibdenu-99. Osiągnięta całkowita aktywność izotopów promieniotwórczych jest porównywalna z aktywnością z roku 2021, pomimo krótszego o około 700 godzin czasu pracy reaktora. Lepszy stosunek aktywności do czasu pracy był spowodowany zwiększeniem udziału w napromienianych zasobnikach wysokowzbogaconych tarcz telluru do produkcji I-131. Z jednego zasobnika z wysokowzbogaconym tellurem można uzyskać czterokrotnie wyższą aktywność jodu w porównaniu do standardowego. Wykaz napromienianych materiałów tarczowych w reaktorze MARIA, w postaci liczby załadowanych zasobników przedstawiono na rys. 2. Ponadto w 2022 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 ( $\text{Mo-99}$ ), który to izotop ulega przemianie



**Rys. 2.** Wykaz napromienionych materiałów tarczowych w reaktorze MARIA w 2022 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 MARIA reactor in 2022. Decreased number of irradiated targets in 2004 year was caused by limited hours of reactor operation due to lack of nuclear fuel

w technet ( $Tc-99m$ ), będący najbardziej powszechnym na świecie radiofarmaceutykiem stosowanym w diagnostyce medycznej. Płytki uranowe napromieniano w 6 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 Europie cztery reaktory badawcze (BR-2 Belgia, HFR Holandia, MARIA Polska, LRV-15, Czechy) produkują izotop molibden-99 na potrzeby diagnostyki medycznej. Największy udział w produkcji mają reaktory BR2 i HFR, które znajdują się blisko zakładów przerobu płytek uranowych. Z płytek tych uzyskuje się izotop moliibdenu ( $Mo-99$ ), który jest jednym z produktów rozszczepienia i dalej podlega przemianie w technet, który służy do diagnostyki medycznej. W przypadku nieplanowanej przerwy w pracy któregoś z reaktorów HFR czy BR-2, powstają duże niedobory na rynku radioizotopów i konieczne jest pilne uzupełnienie rynku, tę właśnie rolę przejął reaktor MARIA na początku 2022 r., uzupełniając niedobory światowego zapotrzebowania na izotopy medyczne. Warto wspomnieć, że reaktor MARIA uruchomiony w 1974 r. jest najnowszym reaktorem z reaktorów badawczych produkujących izotop  $Mo-99$ . Reaktor LVR-15 został uruchomiony w 1957 r., reaktor HFR w 1961, natomiast BR-2 w 1962 r.

W 2022 r. nie prowadzono badań na wiązkach neutronów wyprowadzanych z kanałów poziomych reaktora z powodu modernizacji hali fizycznej. Remont hali ma na celu dostosowanie parametrów hali do aparatury badawczej, pozyskanej z wyłączonego z eksploatacji reaktora, w niemieckim instytucie badawczym Helmholtz-Zentrum-Berlin (HZB) w Berlinie, w ramach modernizacji m.in.:

- zmodernizowano system wentylacji hali, w celu zapewnienia odpowiednich parametrów powietrza,
- obniżono poziom posadzki w hali, aby dostosować poziom wyprowadzonej z rdzenia wiązki neutronów do wysokości pozyskanej aparatury badawczej
- wyposażono halę fizyczną w nowe instalacje gazów technicznych,
- wyremontowano pomieszczenie oraz zmieniono układ funkcjonalny (zmiana parametrów antresoli, przebudowa wejścia do hali).

Zakończenie prac jest planowane w I kw. 2023 r.

W 2022 r. rozwijano w reaktorze MARIA projekty badawcze, m. in. realizowano napromieniania materiałów w badawczych sondach termostatycznych, czyli utrzymujących stałą temperaturę wokół napromienianych próbek. Pierwszą sondą termostatyczną, w której osiągnięto temperaturę  $1000^{\circ}C$  była termostatyczna sonda badawcza ISTHAR, umieszczono w niej próbki grafitu na potrzeby programu rozwoju reaktorów wysokotem-

peraturowych HTR. Zdjęcie sondy ISTHAR przedstawiono na fot. 2.

Z sukcesem napromieniono próbki, które w lutym 2022 r. zostały wyjęte z sondy i przekazane do dalszych badań materiałowych w Laboratorium Badań Materiałowych NCBJ. W 2022 r. realizowano również napromienianie dielektryków w sondzie INDRA. Jest to sonda pasywna, wykorzystująca tylko grzanie jądrowe. Pod wpływem oddziaływania strumienia neutronów prędkich i promieniowania gama osiągnięto temperaturę napromienianych próbek około  $300^{\circ}C$ . Prace były wykonywane w ramach pakietu badań materiałowych (WP-MAT) realizowanego przez konsorcjum EURO-fusion. W swojej części NCBJ był odpowiedzialny za zrealizowanie napromieniania materiałów konstrukcyjnych, rozważanych do zastosowania w technologiach termojądrowych. W szczególności przewidywanych do zastosowania w układach diagnostycznych i dogrzewania plazmy w tokamakach, z uwzględnieniem wymagań projektowanej prototypowej elektrowni termojądrowej. Po napromienianiu próbki przekazano do dalszych badań w laboratorium badań materiałowych CIEMAT w Madrycie. Kolejną eksploatowaną sondą



Fot. 2. Termostatyczna sonda badawcza ISTHAR (fot. NCBJ)  
Photo 2. The ISTHAR thermostatic research rig (photo NCBJ)

termostatyczną była sonda MAKARONI. Eksploatacja sondy miała na celu badania grzejników wykonanych z rury stalowej owiniętej izolowanymi drutami oporowymi oraz określenie wpływu pól promieniowania i wysokiej temperatury na ich wytrzymałość i strukturę, w warunkach zbliżonych do występujących w komorze do napromieniania w urządzeniu DONES (DEMO-Oriented Neutron Source). Osiągnięto zakładane parametry pracy sondy, napromienione próbki zostały przekazane do dalszych badań.

Reaktor MARIA stale poszerza możliwości napromieniania w rdzeniu reaktora. W 2022 r. wprowadzono do rdzenia prototypowy element paliwowy typu MR-2 pozwalający na napromienianie materiałów w widmie neutronów prędkich przekraczającym  $1,0 \cdot 10^{14}$  n/(cm<sup>2</sup>s) (ostateczna weryfikacja osiągniętego strumienia nastąpi na początku 2023 r. po pomiarach detektorów umieszczonych wewnątrz elementu). Element MR-2 posiada dwie zewnętrzne rury paliwowe analogiczne do rur w standardowym elemencie MR-6 natomiast, zamiast wewnętrznych występuje przestrzeń, w której można umieścić zasobnik o zewnętrznej średnicy 34 mm.

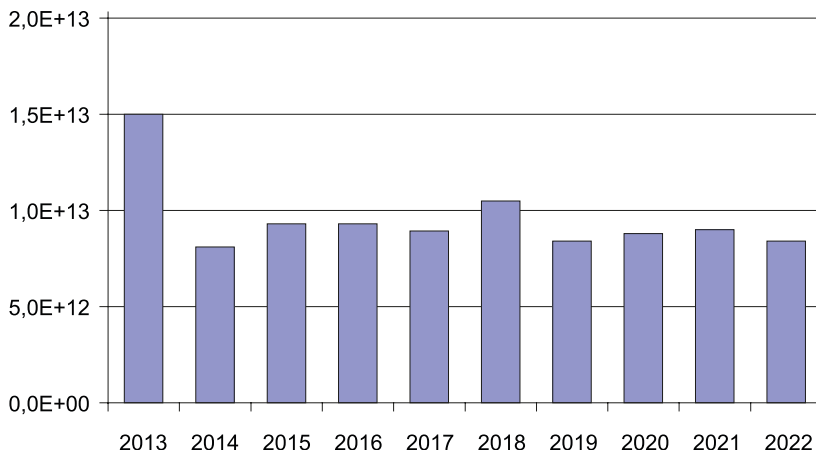
Reaktor badawczy MARIA jest w sposób ciągły monitorowany pod względem uwolnień produktów radioaktywnych do środowiska. Poziomy uwolnień do atmosfery przedstawione na rys. 3 i 4 w 2022 r. wynosiły:

- emisja gazów szlachetnych (głównie Ar-41 oraz izotopy ksenonu i kryptonu) –  $7,6 \times 10^{12}$  Bq, co stanowi około 0,8% limitu uwolnień,
- emisja jodów –  $1,2 \times 10^8$  Bq, co stanowiło 1,2% rocznego limitu uwolnień.

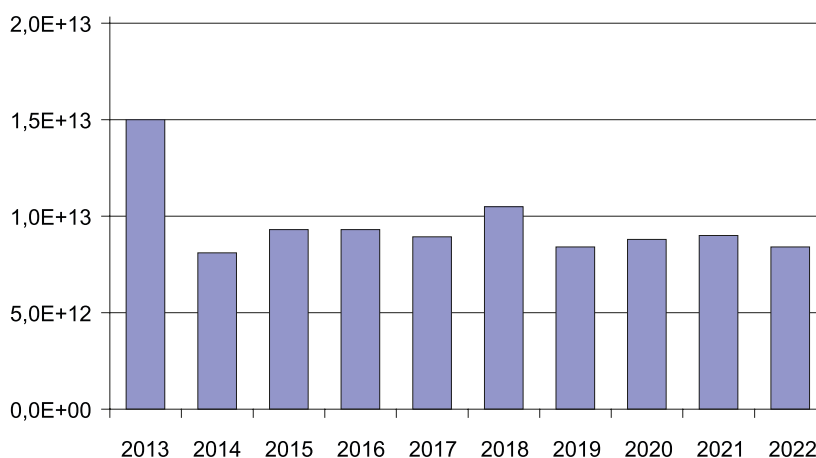
W 2022 r. 125 pracowników reaktora otrzymało dawkę mierzalną na całe ciało (Hp-10) zawierającą się w granicach 0,10-1,20 mSv, a 9 pracowników otrzymało dawkę mierzalną na skórę (Hp-0,07) w granicach 0,25-2,67 mSv.

Wykresy na rys. 5 przedstawiają dwa parametry, informujące o dyspozycyjności reaktora MARIA na przestrzeni ostatnich 10 lat:

- stosunek liczby przepracowanych godzin do sumy liczby przepracowanych godzin i liczby godzin nie-



**Rys. 3.** Roczne uwolnienia gazów szlachetnych z reaktora MARIA w ciągu ostatnich dziesięciu lat  
**Fig. 3.** Yearly noble gases emission from MARIA reactor in the last 10 years

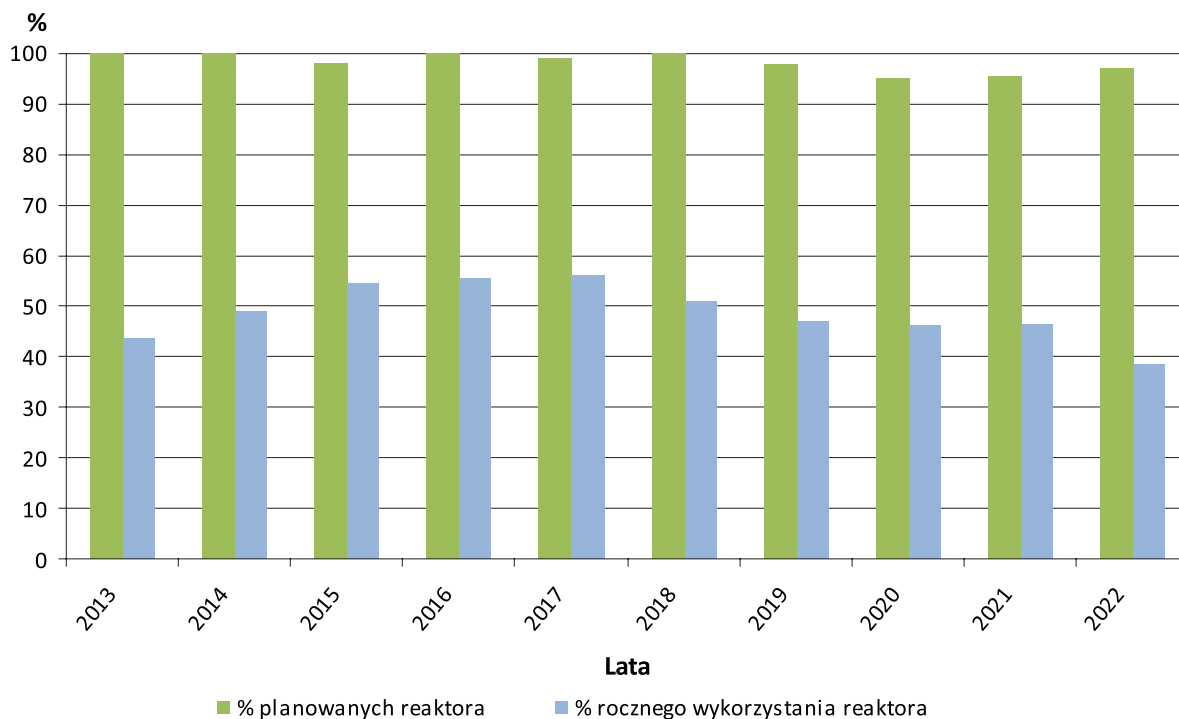


**Rys. 4.** Roczne uwolnienia jodów z reaktora MARIA w ciągu ostatnich dziesięciu lat  
**Fig. 4.** Yearly iodines emission from MARIA REACTOR in the last 10 years

planowanych wyłączeń w 2022 r. ( $A_1$ ), który wynosił 97,1%,

- stosunek liczby godzin pracy reaktora do liczby godzin w 2022 r. ( $A_2$ ) wynoszący 38,6%.

W 2022 r. odnotowano znacznie mniejszą liczbę nieplanowanych wyłączeń reaktora w porównaniu do lat poprzednich. Miały miejsce trzy nieplanowane wyłączenia. Jedno wyłączenie zostało wyzwolone automatycznym sygnałem zaniku napięcia w rozdzielni wtórnego obiegu. Generację sygnału spowodował krótkotrwały zanik napięcia w zewnętrznej sieci zasilającej (trwający poniżej 2 sekund), który zarejestrowały systemy automatyki reaktora. Po kontroli wszystkich parametrów z systemów pomiarowych reaktora podjęto decyzję o ponownym rozruchu i powrocie do mocy nominalnej. Wyłączenie spowodowało jedynie kilkudziesięciu minutową przerwę w pracy reaktora. Przyczyną dwóch nieplanowanych wyłączeń były problemy z eksploatacją paliwa. Przebieg wyłączeń był podobny na podstawie wskazań z systemu dozymetrycznego monitorującego



**Rys. 5.** Roczne wskaźniki pracy reaktora MARIA (opracowanie własne)  
**Fig. 5.** Yearly factors of reactor MARIA operation (own elaboration)

stan elementów paliwowych, kierownik zmiany podjął decyzję o konieczności wyłączenia reaktora. Podejrzenie o nieszczelność elementy paliwowe zostały usunięte z rdzenia i poddane dalszym badaniom w basenie przechowawczym. W opisanych przypadkach przerwa w pracy po nieplanowanych wyłączeniach musiała być dłuższa, ponieważ zgodnie z procedurami eksploatacyjnymi do operacji z elementami paliwowymi w rdzeniu reaktora można przystąpić dopiero po min. 24 godzinach od wyłączenia reaktora. Wyłączenia spowodowały konieczność zmiany harmonogramu reaktora. Problemy z elementami paliwowymi nie wpłynęły na narażenie personelu, czy na emisję gazów promieniotwórczych do atmosfery, które pozostały na niskich poziomach porównywalnych do lat ubiegłych.

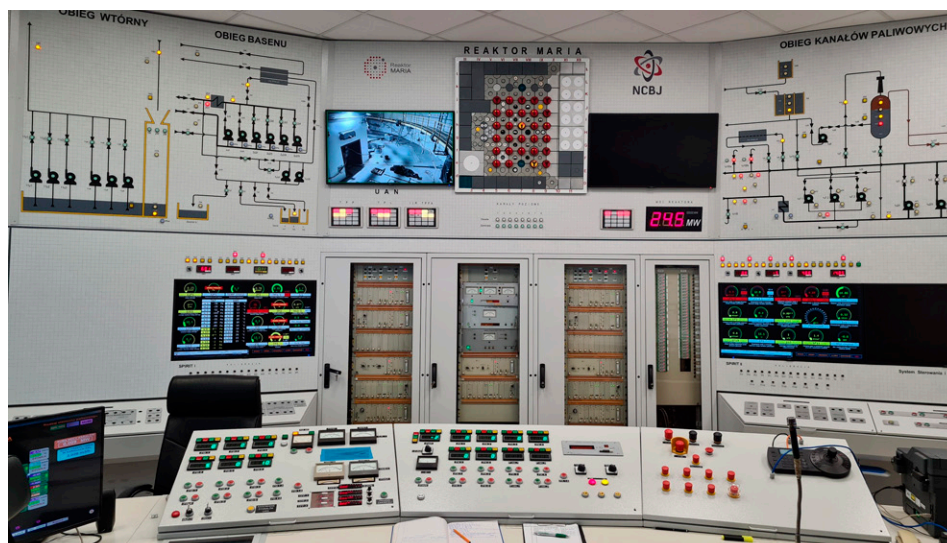
W minionym roku wystąpił znaczący spadek wykorzystania reaktora, który jest spowodowany rozpoczętą we wrześniu 2022 r. przerwą remontową reaktora. Prowadzone są prace modernizacyjno-remontowe, które mają na celu poprawę bezpieczeństwa oraz zapewnienie eksploatacji reaktora w perspektywie do 2050 r.

Najbardziej czasochłonną obecnie realizowaną inwestycją jest modernizacja rozdzielni głównych reaktora. Modernizacja polega na wymianie szaf rozdzielczych wraz z aparatami elektrycznymi, okablowaniem. Zaplanowana jest budowa nowego systemu diagnostyki rozdzielni, który pozwoli na szybką ocenę stanu systemu zasilania reaktora oraz zostanie poprawiona logika zarządzania awaryjnymi źródłami zasilania. Wymienianie podlegają kable sterownicze i zasilające. Za-

stosowano kable o zwiększonej odporności ogniowej, natomiast dla najistotniejszych odbiorów z punktu widzenia bezpieczeństwa reaktora użyto kabli bezhalogenowych.

Kolejną znaczącą realizowaną pracą jest modernizacja zbiornika trójkomorowego na ciekłe odpady promieniotwórcze. NCBJ został zobowiązany decyzją dozoru jądrowego do dostosowania zbiorników na ciekłe odpady promieniotwórcze do aktualnych wymogów ustawy – Prawo atomowe. Zbiornik powinien być umieszczony w wannie stalowej lub betonowej pokrytej od wewnątrz warstwą chemoodporną. Podjęto decyzję o budowie wewnątrz istniejącego zbiornika trójkomorowego nowych zbiorników, w ten sposób istniejący zbiornik będzie stanowił zewnętrzną wannę ochronną o kontrolowanej szczelności. Przed przystąpieniem do prac istniejący zbiornik został zdekontaminowany oraz doszczelniony w newralgicznych punktach. Obecnie jest prowadzona budowa nowego zbiornika wewnątrz istniejącego.

Kolejnym realizowanym zadaniem podczas przerwy remontowej jest modernizacja sterowni reaktora (fot. 3) wraz z uruchomieniem systemu wizualizacji i rejestracji danych z obiegów technologicznych reaktora. Modernizacja polega na wymianie przycisków, wskaźników pomiarowych oraz tablic mnemotechnicznych oraz budowie systemu wizualizacji, który ma ułatwić operatorom reaktora analizę danych z przyrządów pomiarowych, generowanie trendów archiwalnych zgodnie z aktualnymi standardami w automatyce procesowej.



Fot. 3. Sterownia reaktora Maria (fot. NCBJ)

Photo 3. The control room of reactor MARIA (photo NCBJ)

Na początku 2023 r. zaplanowany jest montaż drugiej impulsowej linii rozruchowej, monitorującej strumień neutronów podczas rozruchu reaktora. Nowa linia pomiarowa będzie redundantna do aktualnie wykorzystywanego układu. Planowany jest również montaż układu zamykacza kanału poziomego H2, który pozwoli na uruchomienie siódmego kanału do prowadzenia prac badawczych z wykorzystaniem wiązek neutronów.

Opisane powyżej modernizacje są początkiem programu modernizacji reaktora, mającego na celu utrzymanie jedyne w Polsce badawczego reaktora jądrowego w dobrej kondycji i zapewnienia jego eksploatacji do 2050 r. Obecnie reaktor MARIA posiada licencję na eksploatację do marca 2025 r. NCBJ rozpoczął proces relicencjonowania reaktora. Wstępem jest kolejna okresowa ocena bezpieczeństwa reaktora, która jest zaplanowana na 2023 r., następnie zostaną zaktualizowane analizy bezpieczeństwa, procedury i instrukcje technologiczne oraz „Eksploacyjny Raport Bezpieczeństwa Reaktora MARIA”.

Podczas przerwy remontowej oprócz prac modernizacyjnych prowadzone są okresowe przeglądy i inspekcje elementów reaktora, pozwalające ocenić procesy starzenia reaktora. Aktualne wytyczne Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej kładą duży nacisk na rozwój programów monitorujących procesy starzenia reaktorów badawczych, ponieważ większość obecnie eksploatowanych reaktorów badawczych została zbudowana w latach 60. ubiegłego wieku, warto zaznaczyć, że reaktor MARIA jest jednym z najmłodszych

reaktorów badawczych w Europie. Zgodnie z Programem Zarządzania Procesami Starzenia Reaktora MARIA, w listopadzie przeprowadzono inspekcję ponad stu bloków grafitowych. Każdy z bloków poddano wizualnej inspekcji w basenie reaktora, następnie w komorze demontażowej wykonano prześwietlenia RTG bloków, które pozwalają na pomiar szczeliny pomiędzy grafitem, a górną nakładką. Jest to ważny parametr ze względu na właściwości fizyczne gra-

fitu, który pod wpływem fluencji neutronów prędkich ulega wydłużeniu. Badania potwierdzały dobry stan bloków grafitowych. Obecnie trwa inspekcja bloków berylowych, tworzących matrycę, w której umieszczone są elementy paliwowe, oceniany jest stan wizualny bloków oraz prowadzone są obliczenia fluencji neutronów prędkich. Bloki znajdujące się w centralnej części rdzenia o najwyższej fluencji zostaną zastąpione blokami świeżymi.

Zakończenie aktualnej przerwy modernizacyjnej jest zaplanowane w II kwartale 2023 r. Modernizacje wpływają na poziom bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, w związku, z czym będzie wymagane otrzymanie zgody Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki na uruchomienie reaktora po przerwie remontowej.

W 2022 r. z powodu zwiększonego zagrożenia terrorystycznego zastosowano zaostrzone środki bezpieczeństwa reaktora, wpłynęło to m.in. na zmniejszenie działalności edukacyjnej z powodu ograniczenia ilości osób odwiedzających.

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca reaktora w 2022 r. przebiegała bez większych zakłóceń, potwierdzając jego dobrą dyspozycyjność oraz spełnianie warunków bezpiecznej eksploatacji. Trwające i planowane prace modernizacyjne pozwolą na dalszą bezpieczną eksploatację reaktora.

Piotr Witkowski  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,  
Otwock-Świerk