

Koordynatorka: Katarzyna SZARŁOWICZ

Jerzy CETNAR (4), Elżbieta FORNALIK-WAJS (4), Sebastian GURGUL (4), Filip JĘDRZEJEK (2), Anna KAWALEC (1), Mariusz KOPEĆ (4), Elżbieta KWAPISZ (4), Bogdan LIPKA (3), Ewa ŁASZYŃSKA (1), Mikołaj OETTINGEN (1), Ludwik PIEŃKOWSKI (5), Katarzyna SZARŁOWICZ (2), Katarzyna ZBROJA (3)

X. Energetyka jądrowa i radioanalityka

Abstrakt: Artykuł przedstawia wieloaspektowe podejście do wykorzystania radionuklidów w kontekście ochrony środowiska i energetyki jądrowej oraz zasady przygotowania i prawidłowego użytkowania przyrządów dozymetrycznych stosowanych w ochronie radiologicznej. Omówiono zarówno znaczenie naturalnych i sztucznych izotopów promieniotwórczych w monitoringu środowiskowym, jak i innowacyjne metody odzysku uranu z odpadów. Zwrócono uwagę na kluczową rolę technik radiochemicznych i metod numerycznych w analizie systemów jądrowych, m.in. w projektowaniu układów z paliwem torowym, analizie dawek promieniowania i ocenie materiałów konstrukcyjnych dla fuzji jądrowej. Zaprezentowano analizy numeryczne rdzenia badawczego reaktora HTR i oceniono parametry neutronowe, efektywność paliwa oraz przebieg potencjalnej awarii PLOFA. W części dotyczącej małych reaktorów modułowych (SMR) opisano aktualne strategie inwestycyjne, identyfikując wyzwania technologiczne, finansowe i lokalizacyjne.

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa, metody numeryczne, jądrowy cykl paliwowy, radionuklidy, dozymetria, HTR, SMR

W dobie rosnącej troski o środowisko naturalne oraz poszukiwania niskoemisyjnych źródeł energii istotną funkcję pełnią technologie jądrowe. Współczesne podejście do wykorzystania izotopów promieniotwórczych obejmuje nie tylko monitorowanie i kontrolę poziomu promieniowania w środowisku, ale również innowacyjne metody odzyskiwania surowców jądrowych, takich jak uran z odpadów przemysłowych. Z kolei metody numeryczne odgrywają kluczową rolę w analizie energetycznych systemów jądrowych, takich jak reaktory jądrowe będące w eksploatacji, w budowie oraz w fazie projektowania. Energetyka rozproszona, obejmująca głównie niewielkie, często odnawialne źródła energii, zyskuje na znaczeniu jako elastyczny element współczesnych systemów energetycznych. W szerszym ujęciu obejmuje ona także większe jednostki o mocy do 150 MW,

tworząc tzw. dużą generację rozproszoną. Tradycyjnie światowa energetyka jądrowa opiera się na dużych scentralizowanych blokach o mocy rzędu 1 GW, jednak można zaobserwować rosnące zainteresowanie małymi reaktorami modułowymi (SMR), zwłaszcza w krajach modernizujących swoje systemy energetyczne. Szczególną uwagę zwracają wysokotemperaturowe reaktory jądrowe (HTR) dzięki zdolności do samoczynnego zapobiegania awariom rdzenia, nawet w ekstremalnych warunkach. W euroatlantyckiej przestrzeni gospodarczej żaden projekt SMR nie został jeszcze zrealizowany, masowe inwestycje będą możliwe dopiero wtedy, gdy zaprezentowane projekty okażą się z jednej strony bezpieczne, a z drugiej – opłacalne biznesowo. Prace badawcze w zakresie SMR prowadzone są w następujących trzech obszarach: ocena przygotowań do uruchomienia pierwszych inwestycji, analiza strategii budowania konkurencyjności poszczególnych projektów, identyfikacja kluczowych barier w Polsce.

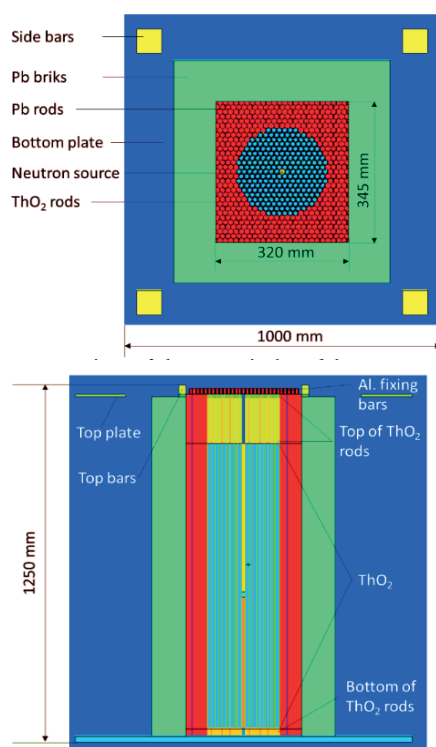
1. Wykorzystanie metod numerycznych do projektowania i analizy energetycznych systemów jądrowych

Przy obecnym wykorzystaniu uranu jako paliwa jądrowego przewiduje się, że jego zasoby konwencjonalne wystarczą na ok. 90 lat. Biorąc jednak pod uwagę

rosnącą liczbę planowanych elektrowni jądrowych, szacuje się, że i w takiej perspektywie jego rezerwy mogą być niewystarczające. Tym samym konieczne jest znalezienie alternatywnego paliwa jądrowego. Jednym z potencjalnych rozwiązań jest wykorzystanie paliwa torowego. Paliworodny izotop toru ^{232}Th pod wpływem absorpcji neutronu i serii rozpadów promieniotwórczych konwertuje do rozszczepialnego izotopu uranu ^{233}U .

1.1. Projektowanie układu podkrytycznego z paliwem torowym

Badania nad potencjalnym wykorzystaniem toru w energetyce jądrowej prowadzone są w Katedrze Energetyki Jądrowej i Radiochemii AGH. Jednostka dysponuje unikalnym stosem torowo-ołowianym zbudowanym z cylindrycznych prętów wypełnionych tlenkiem toru, otoczonych ołowianym reflektorem w postaci heksagonalnych ołowianych prętów. Całość zamknięta jest dodatkowo w osłonie wykonanej z ołowianych cegieł, utrzymywanych przy pomocy stalowego stelaża.



Rys. 1. Przekrój radialny i osiowy numerycznego modelu zestawu torowego

Główną zaletą zestawu jest możliwość ustawienia poszczególnych prętów, zarówno torowych, jak i ołowianych, w dowolnej konfiguracji. Co więcej, możliwe jest również wykonanie prętów o tej samej geometrii z innych materiałów, takich jak np. polietylen czy grafit, co zwiększa potencjał badawczy poprzez możliwość modyfikacji intensywności oraz widma strumienia neutronów. Układ zestawu pozwala bowiem na wprowadzenie do niego zarówno izotopowego źródła neutronów, jak i folii aktywacyjnych z wybranych materiałów, które mogą zostać umieszczone w dowolnym położeniu. Aktywacja neutronowa może być również prowadzona z wykorzystaniem generatora neutronów, co miało miejsce w przeszłości.

W ostatnich latach badania nad stosem paliwowym skupiają się na symulacjach numerycznych z wykorzystaniem metod Monte Carlo (*Monte Carlo continuous energy burnup code*, MCB) do transportu neutronów. W celu przeprowadzania symulacji numerycznych został opracowany dokładny trójwymiarowy model numeryczny stosu torowego, przedstawiony na Rys. 1. Symulacje skupiały się na obliczeniach zarówno osiowego, jak i radialnego rozkładu strumienia neutronów oraz widma neutronów w wybranych lokalizacjach. Dodatkowo obliczono wydajność reakcji absorpcji neutronów w ^{232}Th , a tym samym intensywność produkcji rozszczepialnego ^{233}U w wybranych lokalizacjach w stosie, w których powielanie paliwa jest najbardziej wydajne. W badaniach posłużono się modelem źródła neutronów w postaci ^{252}Cf (Oettingen 2020, Oettingen et Stanisław 2018).

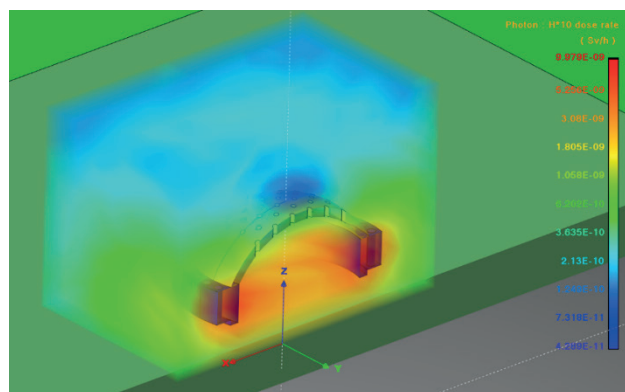
1.2. Obliczenia dawek promieniowania podczas demontażu głowicy reaktora jądrowego

Wyłączanie z eksploatacji obiektów jądrowych, takich jak elektrownie, wymaga oszacowania trójwymiarowego rozkładu dawki promieniowania w pobliżu radioaktywnych elementów konstrukcyjnych. Znajomość rozkładu dawki promieniowania umożliwia znalezienie miejsc o największej wartości

promieniowania, dzięki czemu można skutecznie planować operacje dekontaminacji, demontażu, rozbiórki oraz transportu, z uwzględnieniem zasad ochrony radiologicznej zaangażowanego personelu.

Głównym celem prac naukowych prowadzonych w Katedrze Energetyki Jądrowej i Radiochemii AGH przez Zespół Technologii Jądrowych jest oszacowanie dawki promieniowania dla wybranych obiektów jądrowych będących w likwidacji z zastosowaniem nowoczesnych narzędzi numerycznych poświęconych ochronie radiologicznej. W tym celu użyto kodu Monte Carlo RayXpert, który służy do obliczeń transportu promieniowania gamma w dowolnej trójwymiarowej geometrii modelu numerycznego (Rayxpert). Za pomocą kodu obliczono rozkład przestrzennego równoważnika dawki promieniowania gamma ($H^*(10)$) wokół głowicy reaktora wodnego ciśnieniowego pracującego w zamkniętej włoskiej elektrowni jądrowej Trino Vercellese (1965–1987) (Rossini et al. 2018). Po ponad trzech dekadach od jej wyłączenia elementy konstrukcyjne – w szczególności głowica reaktora, zbiornik ciśnieniowy reaktora oraz jego elementy wewnętrzne – pozostają radioaktywne z powodu zarówno aktywacji neutronowej, jak i skażenia powierzchniowego.

Opracowany model numeryczny składa się z półkolistej głowicy zbiornika reaktora umieszczonego w pomieszczeniu otoczonym betonowymi ścianami. Analiza skupia się na rozkładzie przestrzennego równoważnika dawki, biorąc pod uwagę izotopy ^{63}Ni , ^{60}Co , ^{59}Ni i ^{55}Fe jako główne źródła promieniowania. Symulacje uwzględniają podział przestrzeni wokół głowicy na kilkadziesiąt objętości kontrolnych w celu przeprowadzenia obliczeń Monte Carlo z precyzją poniżej 3%. Narzędzia wizualizacyjne dostępne w oprogramowaniu RayXpert zostały wykorzystane do stworzenia trójwymiarowej mapy cieplnej odzwierciedlającej rozkład przestrzenny równoważnika dawki (Rys. 2). Wygenerowana mapa (Rys. 2) bezpośrednio pokazuje miejsca o najwyższym narażeniu na promieniowanie gamma, co pozwala na planowanie działań związanych z zagospodarowaniem głowicy reaktora, z uwzględnieniem dozwolonych limitów dawek promieniowania.



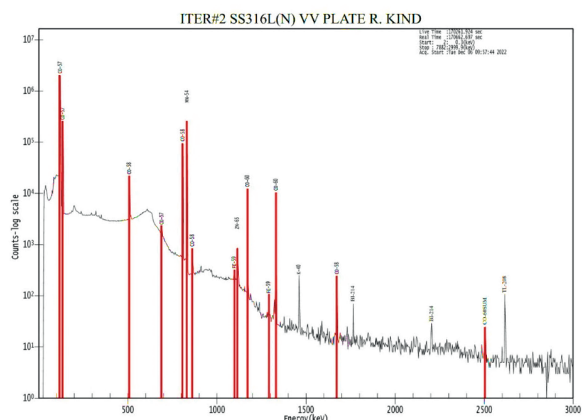
Rys. 2. Wizualizacja przestrzennego równoważnika dawki ($H^*(10)$)

1.3. Badania aktywacji materiałów konstrukcyjnych na potrzeby fuzji jądrowej

Fuzja jądrowa jako źródło energii przyszłości wymaga nie tylko zaawansowanych rozwiązań inżynierskich, ale przede wszystkim materiałów zdolnych do długoterminowej pracy w ekstremalnych warunkach – intensywnego promieniowania neutronowego, wysokich temperatur oraz naprężeń mechanicznych. Istotnym tematem jest charakterystyka właściwości fizycznych i chemicznych materiałów oraz przewidywanie ich zachowania w środowisku reaktorowym. W tym celu prowadzone są m.in. zaawansowane badania mające na celu aktywację w trakcie kampanii eksperymentalnych na tokamaku JET, jak również różnego rodzaju symulacje numeryczne (Packer et al. 2024, Valentine et al. 2021).

Próbki materiałów konstrukcyjnych budowanego tokamaka ITER, takie jak EUROFER97, wolfram, CuCrZr, Inconel-718, SS316L(N), oraz płaszcz cewki poloidalnej, zostały napromieniowane w trakcie kampanii eksperymentalnych z zastosowaniem paliwa deuterowego, trytowego oraz deuterowo-trytowego na tokamaku JET. Próbkę umieszczono w specjalnym uchwycie wewnątrz komory tokamaka. Po zakończeniu kampanii eksperymentalnej uchwyt wraz z próbkami wyciągnięto z komory, a następnie przekazano do pomiarów promieniowania gamma emitowanego przez napromieniowane próbki.

Pomiary te wykonano za pomocą detektorów HPGe o dużej rozdzielczości. Przykładowe widmo zarejestrowane dla jednej z próbek przedstawiono na Rys. 3. W kolejnym etapie badań wyznaczono radioaktywność produktów powstałych w materiałach oraz porównano ją z wynikami obliczeń aktywacyjnych przeprowadzonych z zastosowaniem kodu FISPACT-II.



Rys. 3. Widmo promieniowania gamma zarejestrowane dla próbki wykonanej ze stali SS316L(N) zaaktywowanej w trakcie kampanii DTE2 i TT na tokamaku JET

Wyniki wykazały dobrą zgodność pomiędzy obliczeniami a pomiarami, zwłaszcza dla głównych produktów aktywacji, takich jak ^{60}Co , ^{54}Mn i ^{181}W . Stwierdzono, że dokładność przewidywań z zastosowaniem kodu FISPACT-II zależy m.in. od geometrii umieszczenia próbki. Analizy wykazały również duże znaczenie wykonania precyzyjnej kalibracji systemu detekcyjnego oraz konieczność uwzględniania efektów niejednorodności pola neutronowego w modelach (Packer et al. 2024).

2. Radioanalitika jako narzędzie wsparcia w zarządzaniu cyklem paliwowym i w ochronie środowiska

Obecność radionuklidów w środowisku jest zjawiskiem naturalnym. Jednak rozwój nauki, przemysłu oraz technologii spowodował możliwość sztucznej

produkcji radioizotopów. Niestety w sposób niekontrolowany do środowiska przedostały się też radionuklidy powstałe w wyniku awarii jądrowych (np. Czarnobyl) czy testów z bronią jądrową.

2.1. Oznaczanie i kontrola radioizotopów występujących w środowisku

Kluczowymi zagadnieniami ochrony środowiska w aspekcie narażenia na promieniowanie jonizujące są m.in. kontrola jego poziomów, zapobieganie skażeniu środowiska radionuklidami oraz ochrona zdrowia i ludzi. Badania radionuklidów w ochronie środowiska dotyczą: oceny, kontroli i monitoringu radionuklidów naturalnych i sztucznych w różnych komponentach środowiska naturalnego; rozprzestrzeniania się radionuklidów w środowisku (np. w ekosystemach wodnych, lądowych i atmosferycznych); wykorzystania radioizotopów jako znaczników promieniotwórczych w interpretowaniu zmian zachodzących w środowisku; szeroko rozumianej dozymetrii środowiskowej.

Zespół Analityki Radiochemicznej i Promieniotwórczości w Środowisku, działający przy Katedrze Energetyki Jądrowej i Radiochemii AGH, realizuje wiele projektów badawczych z wykorzystaniem unikatowego i specjalistycznego sprzętu pomiarowego, w tym m.in. spektrometrów promieniowania gamma i alfa oraz licznika ciektoscyntylacyjnego. Celem tych działań jest m.in.: rozpoznanie radiologiczne (np. ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{40}K , ^{226}Ra) gleb i roślin pobranych na różnych terenach zlokalizowanych w Polsce, monitoring radiologiczny gleb, radiometryczna analiza osadów dennych i ich wykorzystanie w ocenie zmian zachodzących w środowisku naturalnym, ocena radioaktywności gleb technogenicznych, analizy radiometryczne produktów tytoniowych, wykorzystanie techniki ciektoscyntylacyjnej w analizie trytu, ocena zawartości radionuklidów w wybranych produktach żywnościowych, a także wykorzystanie wyników celem wyznaczenia dawki promieniowania jonizującego dla organizmów żywych.

Do najważniejszych osiągnięć publikacyjnych w aspekcie zagadnień dotyczących ochrony środowiska zaliczyć można:

- opracowanie innowacyjnej strategii pobierania próbek na podstawie map fizjograficznych makroregionów Karpat polskich, celem określania narażenia radiologicznego terenu (Jędrzejek et al. 2024);
- zbudowanie systemu redukcji tła pomiarowego w pomiarach gamma spektrometrycznych, co umożliwiło znaczne obniżenie limitów detekcji i granicy oznaczalności, szczególnie dla radionuklidu ^{210}Pb w próbkach o małej objętości (Jędrzejek et Szarłowicz 2024);
- opracowanie procedury badań geochronologicznych osadów dennych z zastosowaniem ^{210}Pb i wykorzystanie narzędzia w interpretacji rozwoju ekosystemów, identyfikacji zanieczyszczenia oraz zmian klimatycznych na podstawie analiz jezior i zbiorników wodnych (Slobodníková Štillová et al. 2023);
- oszacowanie narażenia radiologicznego oraz poziomów skażeń obszaru Polski południowej, a także określenie radioaktywności gleb technogenicznych oraz produktów (np. kawa, herbata, tytoń) i ocena dawki promieniowania jonizującego (Uzarowicz et al. 2024).

2.2. Innowacyjna metoda pozyskiwania uranu z produktów odpadowych

Mimo rozwoju koncepcji zaawansowanych reaktorów opartych na torze czy reaktorów powielających, głównym paliwem w obecnie eksploatowanych jednostkach energetycznych pozostaje uran. Z tego względu zapewnienie jego dostępności i efektywne zarządzanie zasobami staje się strategicznym celem dla wielu państw oraz instytucji międzynarodowych (Crossland 2012, IAEA 2023, Nuclear Energy Agency 2015, 2020, Saunders et al. 2026).

Choć dominującymi metodami pozyskiwania uranu są wciąż techniki tradycyjne, takie jak górnictwo

odkrywkowe lub podziemne, to zasady zrównoważonej gospodarki są motorem do wprowadzania kolejnych innowacji do tradycyjnego cyklu paliwowego. Jednym z obiecujących kierunków badań, wspieranym przez Zespół Analityki Radiochemicznej i Promieniotwórczości w Środowisku, jest odzysk uranu z nietypowych źródeł – m.in. z popiołów lotnych powstających w wyniku spalania węgla. Popioły lotne zawierają podwyższone stężenia uranu – znacznie wyższe niż pierwotne paliwo kopalne. W procesie spalania węgla związki lotne są usuwane w postaci gazowej, a cięższe pierwiastki, takie jak uran, akumulują się w popiołach i żużlu.

W ramach badań zespołu opracowano innowacyjną metodę ekstrakcji uranu z popiołów poprzez zastosowanie półprzepuszczalnych membran, które umożliwiają efektywne rozdzielenie cząstek stałych od roztworu zawierającego jony uranu. Jest to odpowiedź na problemy procesowe, które utrudniają pozyskanie wartościowego pierwiastka uranu z pylistych frakcji materiałów odpadowych. Badania eksperymentalne wykazały wyjątkową skuteczność tego podejścia – średnia wydajność ługowania wyniosła aż 96,7%. W ramach dotychczasowych prac rozpoznano również mechanizmy odpowiadające za przebieg całego procesu oraz zaproponowano model opisujący jego kinetykę. W procesie pojawia się jeszcze wiele wyzwań w zakresie optymalizacji i skalowania do przemysłowych rozmiarów. Stanowi on jednak podstawę do rozwoju technologii odzysku uranu jako realnej i konkurencyjnej alternatywy dla tradycyjnych metod pozyskiwania rud uranowych (Jędrzejek et al. 2025).

3. Przygotowanie i prawidłowe użytkowanie przyrządów dozymetrycznych do pomiarów w ochronie radiologicznej

Praca z wykorzystaniem źródeł promieniowania jonizującego wykonywana jest zgodnie z zezwoleniem uzyskiwanym na podstawie Ustawy Prawo atomowe

wraz z rozporządzeniami wykonawczymi, która między innymi obliguje do posiadania i stosowania prawidłowo dobranego i właściwie przygotowanego sprzętu dozymetrycznego (zwany także radiometrem lub miernikiem promieniowania jonizującego). Prawidłowe wykonanie pomiaru dozymetrycznego takim radiometrem powinno zapewnić skuteczną ochronę radiologiczną odpowiednio do rodzaju źródeł promieniowania jonizującego, z którymi pracuje lub planuje rozpocząć pracę ich użytkownik, z uwzględnieniem rodzaju pracy wykonywanej przy wykorzystaniu tych źródeł.

Przy wyborze miernika promieniowania jonizującego należy wziąć pod uwagę rodzaj i energię promieniowania emitowanego przez dane źródło (alfa, beta, gamma, rentgenowskie, neutrony). Bardzo ważne są również takie kwestie jak aktywność źródła promieniotwórczego oraz parametry urządzenia wytwarzającego promieniowanie jonizujące (w tym przypadku należy wziąć pod uwagę zakres pomiarowy samego radiometru), szczególnie podczas pracy ze źródłami promieniotwórczymi o wyższej aktywności oraz urządzeniami wytwarzającymi promieniowanie jonizujące, pracującymi przy wyższych parametrach prądowo-napięciowych. Właściwy będzie wybór radiometru wyposażonego w sygnalizację przekroczenia pułapu pomiarowego przyrządu, ponieważ tylko w takim zakresie przyrząd będzie mierzył prawidłowo, natomiast w polu promieniowania jonizującego o wyższych parametrach powinien zasygnalizować przekroczenie progu.

Przy wyborze miernika dozymetrycznego należy uwzględnić postać źródła (aparat RTG, akcelerator, w szczególności cyklotron, źródło izotopowe otwarte lub zamknięte) i dobrać przyrząd, który będzie przystosowany do pomiaru mocy dawki (mocy kermy), dawki (kermy) lub skażeń promieniotwórczych. W przypadku wykonywania prac z użyciem zamkniętych źródeł promieniotwórczych standardowo dokonuje się pomiaru mocy dawki promieniowania jonizującego albo dawki promieniowania jonizującego. Dodatkowo Ustawa Prawo atomowe nakazuje użytkownikowi zamkniętych źródeł promieniotwórczych

wykonanie kontroli szczelności przynajmniej raz w roku, przy użyciu przyrządu pomiaru skażeń promieniotwórczych.

Przy wykonywaniu czynności z użyciem otwartych źródeł izotopowych w rutynowych pracach należy monitorować zarówno poziom promieniowania jonizującego, jak i ewentualne skażenia promieniotwórcze powstałe podczas standardowej instrukcji pracy. W tym przypadku potrzebne będą miernik mocy dawki i miernik skażeń promieniotwórczych lub urządzenie, którego konstrukcja pozwala na wykonanie obydwu rodzajów pomiarów.

Wyżej wspomniana ustawa zobowiązuje użytkownika źródeł promieniowania jonizującego do regularnego wzorcowania radiometru. Przynajmniej raz w roku należy wykonać takie wzorcowanie sprawnego przyrządu dozymetrycznego w akredytowanym laboratorium wzorcowania, a jeśli przyrząd wyposażony jest we własne źródło kontrolne – wówczas czas pomiędzy kolejnymi wzorcownikami można wydłużyć dwukrotnie (do dwóch lat). Radiometr, który wcześniej uległ uszkodzeniu, po naprawie, zanim zostanie użyty do pomiarów dozymetrycznych, powinien przejść ponowne wzorcowanie. Przy przekazaniu go do tych celów należy dołączyć czytelną informację na temat rodzaju wzorcowania, jakie ma być przeprowadzone. Szczególnie istotne są wytyczne dotyczące następujących kwestii:

- rodzaj promieniowania jonizującego emitowanego przez źródła, z którymi wykonywane są codzienne prace; zakres przyrządu, który powinien zostać wykalibrowany,
- rodzaj wzorcowania, który powinien zostać wykonany: moc dawki, dawka, występowanie skażeń promieniotwórczych, sygnalizacja zadanego progu mocy dawki, pomiar dawki promieniowania jonizującego.

Podczas wzorcowania w laboratorium istotne jest wykonanie pomiaru tła, które wskazuje radiometr w warunkach laboratoryjnych, i porównanie wyniku z efektami kolejnego wzorcowania. Wnioski wzorcowania są przedstawiane w postaci współczynnika

poprawkowego dla pomiaru w zakresie mocy dawki, dawki i pomiaru skażeń promieniotwórczych, lub jako informacja o ewentualnej niesprawności działania sygnalizacji przekroczenia progu dla pola promieniowania o odpowiedniej energii i zakresie. Współczynnik poprawkowy dla pola o odpowiedniej energii jest liczbą, przez którą należy pomnożyć wskazanie radiometru podczas pomiaru dozymetrycznego, aby otrzymać wartość rzeczywistą.

Ważnym elementem podczas pomiarów dozymetrycznych jest znajomość samego radiometru, dlatego warto wykonywać pomiary ćwiczeniowe dla zapoznania się z zachowaniem przyrządu w polu promieniowania jonizującego o małej mocy dawki. Pozwala to zorientować się, jaka jest stała czasowa urządzenia, jakie są wahania wskazań, jak szybko radiometr reaguje na pojawienie się promieniowania jonizującego itp.

Przygotowując się do właściwego pomiaru, należy w pierwszej kolejności sprawdzić zasilanie radiometru, ponieważ tylko jego odpowiedni poziom zapewni poprawność pomiaru. Spadek poniżej ustalonego limitu oznacza konieczność wymiany baterii lub naładowania akumulatorów. Przy wyborze zasilania należy wziąć pod uwagę, gdzie i jak długo stosowany będzie przyrząd dozymetryczny. Przykładowo podczas długich prac w terenie, na którym nie ma możliwości naładowania akumulatorów, lepiej sprawdzą się wymienne baterie.

Kolejnym krokiem jest pomiar tła w takim miejscu, w którym jesteście pewni, że ewentualne podniesione wskazanie nie jest efektem oddziaływania jakichkolwiek sztucznych źródeł promieniowania jonizującego. Następnie można dokonać pomiaru w interesującym miejscu lub miejscach. Otrzymany wynik/wyniki należy pomnożyć przez odpowiedni współczynnik kalibracyjny otrzymany podczas wzorcowania przyrządu dozymetrycznego. W ten sposób uzyskuje się rzeczywistą wartość samej dawki, mocy dawki lub skażeń promieniotwórczych.

W przypadku przyrządów dozymetrycznych wyposażonych w ręczną zmianę zakresu pomiarowego i terenu o nieznanym polu promieniowania

jonizującego bezpieczniej będzie włączyć radiometr przed wejściem i ustawić go na najwyższy zakres. Pozwoli to na opuszczenie w jak najkrótszym czasie terenu w przypadku wskazania mocy dawki o wysokiej wartości (Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 11 maja 2023 r.).

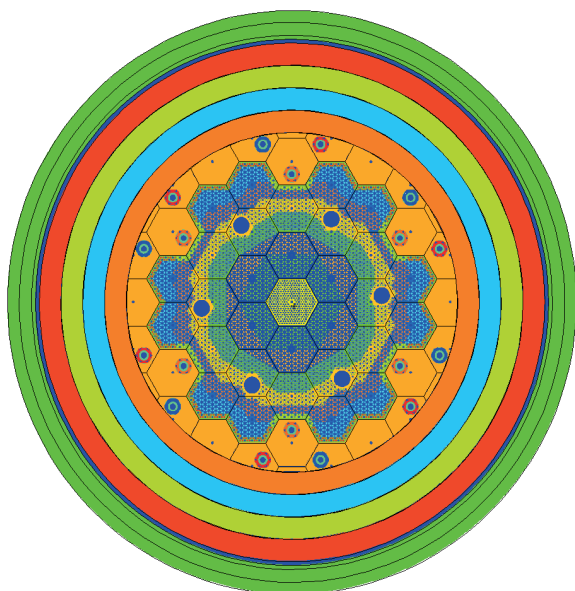
4. Modelowanie projektowe fizyki rdzenia reaktorów wysokotemperaturowych

Wysokotemperaturowe reaktory jądrowe HTR (*high temperature reactor*) wyróżniają się na tle innych technologii jądrowych tzw. inherentnym bezpieczeństwem. Termin ten odnosi się do zdolności reaktora do samoczynnego zapobiegania awariom rdzenia, nawet w przypadku całkowitej utraty chłodzenia lub niesprawności aktywnych układów sterowania. Osiągnięcie tak wysokiego poziomu bezpieczeństwa wymaga odpowiedniego zaprojektowania rdzenia reaktora, co realizowane jest poprzez zaawansowane modelowanie komputerowe procesów fizycznych zachodzących w jego wnętrzu. Modelowanie tego rodzaju (*high temperature reactor core physics design modeling*) pozwala na określenie kluczowych charakterystyk pracy reaktora zarówno w warunkach nominalnych, jak i awaryjnych. Analiza wyników umożliwia optymalizację parametrów konstrukcyjnych rdzenia w celu zapewnienia maksymalnego marginesu bezpieczeństwa przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności paliwowej.

4.1. Struktura rdzenia

Zespół Analiz Reaktorowych w Katedrze Energetyki Jądrowej i Radiochemii przeprowadził analizy projektowe w odniesieniu do małego reaktora HTR o mocy cieplnej 30 MW, który będzie pełnił rolę demonstratora technologii oraz postulowanych cech bezpieczeństwa. Przebadano trzy podstawowe konfiguracje geometryczne rdzenia oznaczone symbolami V1, V2 i V3, gdzie pierwsze dwie zbudowane były na bazie

31 kolumn paliwowych, a trzecia na bazie 19 kolumn. Wersja V1 posiada cztery warstwy bloków, a pozostałe wersje sześć warstw. Struktura prętów paliwowych zbudowanych z kompaktów TRISO (mikrokapsulek paliwowych) o średnicy jądra paliwowego 500 μm podlegała optymalizacji w zakresie upakowania do 30% objętości oraz wzbogacenia paliwa w ^{235}U : 5%, 8%, 12%. Wzbogacenie oraz upakowanie paliwa, a także rozmieszczenie prętów z trutycznymi wypalającymi się, było zróżnicowane geometrycznie w całej objętości rdzenia w procesie optymalizacji. Ogólny przekrój reaktora przedstawiono na Rys. 4 z podziałem na strefy wypalania.



Rys. 4. Przekrój modelu rdzenia reaktora badawczego HTR w konfiguracji V1 oraz V2

4.2. Założenia badawcze

Za najważniejsze uwarunkowania bezpieczeństwa przyjmuje się:

- utrzymanie maksymalnej temperatury paliwa w trakcie awarii utraty chłodzenia na poziomie zapewniającym szeroki margines względem temperatury granicznej zachowania integralności mikrokapsulek TRISO, tj. poniżej 1600 °C;

- ograniczenie maksymalnej temperatury zbiornika reaktora podczas takiej awarii do wartości zapewniającej zachowanie jego integralności mechanicznej, oznacza to utrzymanie temperatury poniżej 500 °C.

Dodatkowymi warunkami technicznymi sprzyjającymi stabilnej pracy systemu oraz realizacji misji reaktora badawczego są:

- odpowiednie wyprofilowanie osiowego rozkładu mocy, uzyskiwane za sprawą zwiększenia gęstości mocy w górnej strefie rdzenia przy jej redukcji w dolnej;
- wyrównanie radialnego rozkładu mocy w rdzeniu reaktora;
- zwiększenie stopnia wykorzystania paliwa; parametr ten jest mierzony i wyrażany stosunkiem współczynnika rozszczepień (FIMA) do wzbogacenia.

W celu zwiększenia efektywności paliwowej oraz poprawy rozkładu mocy w rdzeniu reaktora rozważono kilka wariantów strategii przeładunku paliwa. Ze względu na ograniczoną moc cieplną oraz eksperymentalny charakter reaktora przyjęto częściowy wielokrotny przeładunek prowadzony w sposób cykliczny z przemieszczeniem wkładów paliwowych w kierunku osiowym (z góry na dół) po zakończeniu każdego cyklu.

4.3. Wyniki analiz

W wyniku przedstawionych prac wyznaczono współczynniki wykorzystania paliwa i charakterystyki reaktywności. Tab. 1 pokazuje, że konfiguracja V2 osiąga najwyższą efektywność (ponad 91%) w sytuacji, gdy zarówno wzbogacenie, jak i upakowanie wynosi 12%. Dla różnych wzbogaceń zachowano podobny rozkład mocy i temperatury, co pozwala na elastyczne dostosowanie paliwa do potrzeb bez wpływu na bezpieczeństwo. Wydajne wykorzystanie paliwa wymaga zdolności do osiągnięcia wypalenia na poziomie 100 MWd/kg.

Tab. 1. Wykorzystanie paliwa w reaktorze HTGR w wybranych konfiguracjach geometrycznych

Rdzeń	Upakowanie [%]	Cykl [dni]	Wzb. [%]	Uran total [kg]	Liczba przeładunków	U w przeł. [kg]	Czas wypalania [dni]	Wypalenie [MWd/kg]	FIMA [%]	FIMA/Wzb
V1	30 - 20	2x550	12	603,70	2	301,85	1100	54,66	5,96	0,4967
V2	12	3x500	12	455,39	3	151,80	1500	98,82	10,95	0,9125
V2	20	3x500	8	758,98	3	252,99	1500	59,29	6,51	0,8138
V2	30	3x300	5	1138,47	3	379,49	900	23,72	2,574	0,5148
V3	30	3x600	12	666,34	3	222,11	1800	81,04	8,61	0,7175
V3	30	2x450	8	666,34	2	333,17	900	40,52	4,22	0,5275

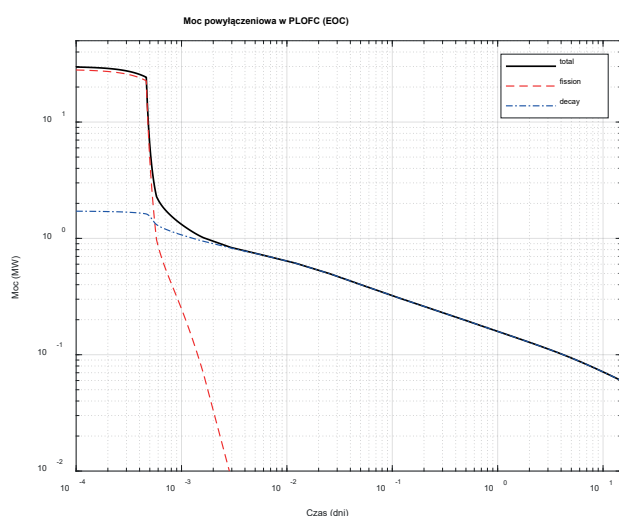
4.4. Generacja ciepła powyłączeniowego w warunkach awaryjnych

Przeanalizowano scenariusz PLOFA (utrata obiegu chłodziwa przy utrzymanym ciśnieniu). Obliczenia przeprowadzono przy użyciu systemu MCB (neutrony i wypalenie) i narzędzi MATLAB (kinetyka neutronowa) oraz ANSYS Fluent (modelowanie cieplne). Rys. 5 przedstawia przebieg generacji mocy powyłączeniowej, zaś Rys. 6 obrazuje maksymalną temperaturę w najgorętszym regionie rdzenia (konfiguracja V2, 12% wzbogacenia, koniec cyklu). Wzrost temperatury paliwa nie przekracza

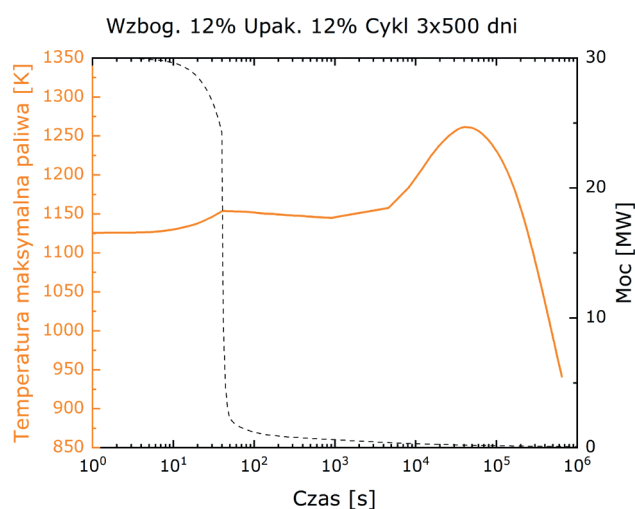
150 °C, co pozostaje ponad 600 °C poniżej limitu integralności TRISO.

4.5. Podsumowanie wyników badań

Analizy wykazały, że konfiguracja rdzenia V2 przy 12-procentowym wzbogaceniu zapewnia najlepsze warunki pracy, wysoką efektywność paliwową oraz spełnienie kryteriów bezpieczeństwa. Przebiegi awaryjne wskazują na stabilność termiczną i ograniczoną akumulację ciepła powyłączeniowego. Reaktor spełnia wymagania demonstracyjne i badawcze dla technologii HTR.



Rys. 5. Przebieg mocy powyłączeniowej w dniowej perspektywie czasowej



Rys. 6. Rozkład maksymalnej temperatury osiąganey w rdzeniu V2 podczas PLOFC, EOC, wzbogacenie o 12%

5. Szanse i wyzwania energetyki jądrowej z reaktorami SMR

Jednym z największych wyzwań dla reaktorów SMR jest rozpoczęcie budowy pierwszych inwestycji. Obecnie wyłaniają się dwie przeciwstawne strategie. Pierwsza koncentruje się na szybkim uruchomieniu inwestycji, nawet gdy projekt zawiera istotne luki. Mimo ryzyka, ta strategia może przyciągnąć znaczące środki finansowe, co potencjalnie umożliwi sprawne dokończenie projektu i pozyskanie kolejnych inwestorów. Druga ścieżka skupia się na minimalizacji ryzyka na etapie projektowania, tak aby ryzyko podejmowania decyzji inwestycyjnych było jak najmniejsze. Nie mniej istotnym globalnym wyzwaniem pozostaje ocena stopnia zaawansowania najbardziej rozwiniętych projektów SMR. Zagadnieniem badania wykonalności wdrożenia reaktorów SMR zajmuje się Zespół Reaktorów Modułowych w Katedrze Energetyki Jądrowej i Radiochemii. W analizie zastosowano publicznie dostępne dane – materiały udostępniane przez projektantów, publikacje naukowe oraz raporty i analizy regulatorów, w szczególności amerykańskiego NRC i brytyjskiego ONR.

5.1. Ocena przygotowań do uruchomienia pierwszych inwestycji

Prace analityczne pozostają na wczesnym etapie i dotyczą wyłącznie euroatlantyckiego obszaru gospodarczego. W ich ramach analizie poddawane są dwa wiodące projekty, którymi są NuScale oraz BWRX-300. Pierwszy z nich, po fiasku w 2023 r. (zaniechanie realizacji inwestycji w Idaho), skupia się obecnie na projekcie w Rumunii. Równolegle prowadzony jest intensywny dialog z amerykańskim regulatorem U.S. NRC, co oznacza realizację strategii minimalizacji ryzyka przed podjęciem decyzji inwestycyjnej. Drugi projekt – BWRX-300 – uzyskał warunkową decyzję inwestycyjną w Kanadzie, mimo że jest jeszcze daleki od etapu certyfikacji.

5.2. Analiza strategii budowania konkurencyjności poszczególnych projektów

Pierwsze wyniki badań zespołu zostały już opublikowane (Pieńkowski 2025). Artykuł przedstawia dwie strategie budowania konkurencyjności w projektach lekkowodnych SMR. Pierwsza z nich koncentruje się na korzyściach płynących z modułowej konstrukcji i seryjnej produkcji. Przykładami są projekty Westinghouse AP300 oraz Rolls-Royce SMR, które bazują na powielaniu sprawdzonych technologii w celu obniżenia ryzyka i kosztów, przy jednoczesnym unikaniu innowacji technicznych postrzeganych jako potencjalne źródło opóźnień i wzrostu kosztów. Druga strategia również zakłada wykorzystanie sprawdzonych rozwiązań i modułowość, ale stawia również na innowacje techniczne. Przykładami są tu projekty NuScale oraz BWRX-300. Na obecnym etapie nie sposób jednoznacznie wskazać, który projekt jest najbardziej obiecujący, ani która ze strategii okaże się skuteczniejsza.

5.3. Identyfikacja kluczowych barier w Polsce

W ostatnich latach zauważalne było znaczące zainteresowanie SMR-ami w Polsce. Przekaz medialny sugerował, że główną barierą jest wybór odpowiedniego projektu. Tymczasem przeprowadzone analizy, częściowo już opublikowane w (Pieńkowski 2024), pokazują, że największym wyzwaniem w Polsce jest brak lokalizacji z odpowiednimi decyzjami administracyjnymi. W krajach, gdzie energetyka jądrowa jest rozwinięta, zazwyczaj zakłada się, że pierwsze SMR-y powstaną na terenach istniejących lub wygaszanych elektrowni jądrowych. Takie podejście znacząco ułatwia podjęcie decyzji inwestycyjnych, gdy technologia osiągnie dojrzałość.

6. Podsumowanie

Metody radiochemiczne i numeryczne odgrywają kluczową rolę w rozwoju technologii i energetyki

jądrowej. Pomiary radiometryczne i dozymetryczne stanowią nieodzowny element zapewniający bezpieczeństwo pracy reaktorów oraz ochrony środowiska. Radioanalitika uranu wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego zarządzania zasobami. Jej dalszy rozwój może przyczynić się do zwiększenia niezależności surowcowej energetyki jądrowej oraz do ograniczenia negatywnego wpływu energetyki konwencjonalnej na środowisko. Z kolei metody numeryczne pozwalają na dokładne modelowanie procesów zachodzących w reaktorach jądrowych, wykonywanie obliczeń dawek promieniowania podczas demontażu zbiornika reaktora, optymalizację projektów oraz przewidywanie skutków awarii. Wspieranie i rozwój innowacyjnych technologii (np. SMR) może przyczynić się do zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa energetyki jądrowej.

Autorzy pragną wyrazić wdzięczność za wsparcie finansowe udzielone w ramach subwencji badawczej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (numer 16.16.210.476), które umożliwiło realizację niniejszych badań. Podziękowania dla PLGrid (Centrum HPC: ACK Cyfronet AGH) za udostępnienie zaplecza komputerowego i wsparcia w ramach grantu obliczeniowego nr PLG/2024/017230.

Bibliografia:

- Crossland I. (red.) (2012), *Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering*, Woodhead, Cambridge.
- IAEA (2023), *Nuclear Energy in Climate Resilient Power Systems*, International Atomic Energy Agency, Wiedeń.
- Jędrzejek F., Szarłowicz K. (2024), *Evaluation and Reduction of Background Interference Caused by Airborne Particles in Gamma Spectrometry Measurements*, „Measurement” 232: 114730.
- Jędrzejek F., Szarłowicz K., Stobiński M. (2024), *The Method of Radiation Risk Assessment Based on Physico-Geographical Regionalisation: a Case Study of Carpathians, Poland*, „Environmental Science and Pollution Research” 31 (57): 65533–65547.
- Jędrzejek F., Mendera W., Szarłowicz K., Heiss N., Scherer U.W. (2025), *From Coal Ash to Nuclear Fuel: A New Method of Uranium Extraction with Membranes*, manuskrypt w recenzji, „Journal of Environmental Management”.
- Nuclear Energy Agency (2015), *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*, International Atomic Energy Agency, OECD, Wiedeń.
- Nuclear Energy Agency (2020), *Uranium 2020: Resources, Production and Demand*, International Atomic Energy Agency, OECD, Paryż.
- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 11 maja 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo atomowe, <https://api.sejm.gov.pl/eli/acts/DU/2023/1173/text.pdf> [dostęp: 3.07.2025].
- Oettingen M., Stanisław P. (2018), *Monte Carlo Modelling of Th-Pb Fuel Assembly with Californium Neutron Source*, „NUKLEONIKA” 63 (3): 87–91.
- Oettingen M. (2020), *Numerical Design of Thorium and Uranium Fuel Samples Irradiation in Lead Environment*, „EPJ – Nuclear Sciences & Technologies” 6 (12): 51.
- Packer L.W., Batistoni P., Bearcroft C., Bradnam S.C., Eardley E., Fabbri M., Fonnesu N., Gilbert M.R., Ghani Z., Gorzkiewicz K. et al. (2024), *ITER Materials Irradiation within the D-T Neutron Environment at JET: Post-Irradiation Radioactivity Analysis Following the DTE2 Experimental Campaign*, „Nuclear Fusion” 64 (10): 106059.
- Pieńkowski L. (2024), *Szanse i wyzwania lekkowodnych SMR w Polsce. Czyli jak przygotować się na oczekiwane przełomy i nie dać się wciągnąć w cudze porażki*, „Wydawnictwo Nowa Energia” 5–6/2024: 48.
- Pieńkowski L. (2025), *Competitiveness Strategies and Technical Innovations in Light-Water Small Modular Reactor Projects*, „Energies” 18 (5): 1268.
- Rayxpert, <https://www.rayxpert.com/>, [dostęp: 19.05.2025].
- Rossini S., Bertani C., de Salve M., Panella B., Pistelli S. (2018), *Radiological Characterization of the Reactor Pressure Vessel of Trino NPP for Dismantling Purposes*, „Progress in Nuclear Energy” 107: 17–30.
- Saunders J.A., Pivetz B.E., Voorhies N., Wilkin R.T. (2016), *Potential Aquifer Vulnerability in Regions Down-Gradient from Uranium in Situ Recovery (ISR) Sites*, „Journal of Environmental Management” 183 (1): 67–83.
- Slobodníková Štillová V., Hamerlík L., Wojewódka-Przybył M., Sochuliaková L., Szarłowicz K., Buczkó K., Chamutiová T., Sedláčková Přidalová M., Bitušík P. (2023), *Tracking Fish Introduction in a Mountain Lake Over the Last 200 Years Using Chironomids, Diatoms, and Cladoceran Remains*, „Water” 15 (7): 1372.
- Uzarowicz Ł., Stobiński M., Jędrzejek F., Szarłowicz K., Murach D. (2024), *Radioactivity of Technosols on Thermal Power Station Ash Disposal Sites: Assessment of Potential Radiological Human-Health Risk*, „Land Degradation & Development” 35 (13): 4093–4104.
- Valentine A., Fonnesu N., Biełkowska B., Łaszyńska E., Flammini D., Villari R., Mariano G., Eade T., Berry T., Packer L. (2021), *Neutronics Assessment of EU DEMO Alternative Divertor Configurations*, „Fusion Engineering and Design” 169: 112663.

Nuclear energy and radioanalysis

Abstract: The article introduces a comprehensive approach to the application of radionuclides concerning environmental protection and nuclear energy, while also addressing the principles involved in the preparation and utilization of dosimetric instruments within radiological protection frameworks. The discussion encompasses both natural and artificial radioisotopes in the realm of environmental monitoring and explores methodologies for uranium recovery from waste products. The focus extends to the pivotal integration of radiochemical techniques and numerical methods in nutrient systems, particularly in the context of thorium fuel, energy supply, and the implications of construction materials for nuclear fusion. A numerical investigation of the HTR reactor is conducted, providing insights on neutron parameters, fuel dynamics, and the trajectory of potential PLOFA risks. Additionally, in the examination of modular solutions (SMR) available for ongoing implementation, the identification of health, financial, and locational challenges is delineated.

Keywords: nuclear energy, numerical methods, nuclear fuel cycle, radionuclides, dosimetry, HTR, SMR

dr hab. Katarzyna Szarłowicz, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Energetyki i Paliw
szarlowi@agh.edu.pl



Autorzy poszczególnych części:

1. Wykorzystanie metod numerycznych do projektowania i analizy energetycznych systemów jądrowych

dr hab. inż. Mikołaj Oettingen, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Ewa Łaszyńska,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Anna Kawalec,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

2. Radioanalitika jako narzędzie wsparcia w zarządzaniu cyklem paliwowym i w ochronie środowiska

dr hab. Katarzyna Szarłowicz, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Filip Jędrzejek,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

3. Przygotowanie i prawidłowe użytkowanie przyrządów dozymetrycznych do pomiarów w ochronie radiologicznej

Bogdan Lipka,
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Katarzyna Zbroja,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

4. Modelowanie projektowe fizyki rdzenia reaktorów wysokotemperaturowych

prof. dr hab. inż. Jerzy Cetnar,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr hab. inż. Elżbieta Fornalik-Wajs, prof. AGH,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
dr inż. Mariusz Kopeć,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Sebastian Gurgul,
Wydział Energetyki i Paliw AGH
Elżbieta Kwapisz,
Wydział Energetyki i Paliw AGH

5. Szanse i wyzwania energetyki jądrowej z reaktorami SMR

prof. dr hab. Ludwik Pieńkowski,
Wydział Energetyki i Paliw AGH