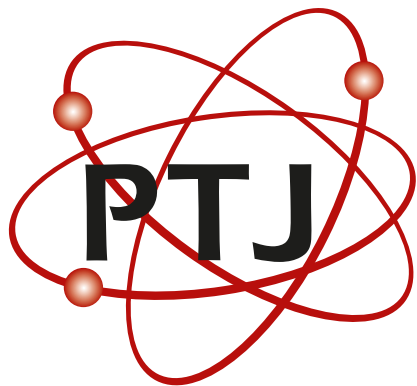




POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ

VOL. 68 Z. 2 ISSN 0551-6846 WARSZAWA 2025



STACJA POBORU AEROZOLI ATMOSFERYCZNYCH ASS-500

(fot. prof. J.W. Mietelski, więcej na str. 28)

2-2025

INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JĄDROWEJ
POLSKIE TOWARZYSTWO NUKLEONICZNE

SPIS TREŚCI NR 2/2025

DROGI ATOMIE...

Marcin Oleksiuk..... 2

WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO
NA ELEKTRONIKĘ CYFROWĄ W TECHNOLOGII CMOS
ORAZ SPOSOBY JEJ ZABEZPIECZEŃ

Marek Ostrysz, Jakub Kołodziej 5

UWARUNKOWANIA BUDOWY I EKSPLOATACJI
ELEKTROWNI JĄDROWEJ W KONTEKŚCIE MODELI
FINANSOWANIA INWESTYCJI

Paweł Włoch, Magdalena Lazarek-Janowska 12

MIĘDZY WOLNYM RYNKIEM A OCHRONĄ ZDROWIA –
POLITYKA REGULACYJNA RADONU W USA

Robert Bobkier 20

OGŁOSZENIA 27

DONIESIENIA Z KRAJU 28

DONIESIENIA ZE ŚWIATA 38

WYDARZENIA 43

INFORMACJE O KSIĄŻKACH

CZĘŚĆ ELEKTRYCZNA I AKPIA ELEKTROWNI
JĄDROWEJ: BUDOWA, DZIAŁANIE, WYMAGANIA
NORMALIZACYJNE I JAKOŚCIOWE, WYTTCZNE I
ZALECENIA DLA DOSTAWCÓW I WYKONAWCÓW
– JACEK NOWICKI

Krzysztof Rzymkowski 44

FELIETON

RYZYO POMIĘDZY SCYLLĄ FILOZOFII,
A CHARYBDĄ TECHNIKI
(FILOZOFIA, METODYKA I PRAGMATYKA
RYZYKA – CZ. III)

Marek Bielski..... 45

IN MEMORIAM

POŻEGNANIE WITOLDA ŁADY
(2.01.1931 – 7.06.2025).....47POŻEGNANIE PROF. DR. HAB. MARKA
TROJANOWICZA
(30.04.1944 – 7.06.2025)48Kwartalnik naukowo-informacyjny
Postępy Techniki JądrowejWydawca:
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa,Kontakt telefoniczny:
Tel. 22 504 12 48
Fax.: 22 811 15 32Redaktor naczelny:
Krzysztof Madaj
k.madaj@ichtj.waw.plKomitet redakcyjny:
Wojciech Głuszewski
Marek Rabiński
Łukasz Sawicki
Elżbieta ZalewskaWspółpracują z nami:
Marek Bielski
Stanisław Latek
Andrzej Mikulski
Małgorzata Nowina-Konopka
Małgorzata Sobieszczyk-MarciniakRedakcja:
PTJ-redakcja@ichtj.waw.plAdres strony internetowej PTJ:
<http://ptj.waw.pl>Opracowanie graficzne:
Daniel Jaskółta (Agencja Reklamowa TOP)Zastrzegamy sobie prawo skracania i adjustacji
tekstów oraz zmian tytułów.Recenzowanie artykułów
Większość manuskryptów przesyłana jest do recenzowania
przez 1-2 ekspertów z dziedziny, której dotyczy artykuł. Na
podstawie opinii recenzentów artykuły są akceptowane do
druku, kierowane do poprawy, lub odrzucone.Prenumerata
Zamówienia na prenumeratę kwartalnika
POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ
należy składać na adres redakcji jak wyżej.
Wpłaty proszę przekazać na konto:
Bank Pekao SA,
45 1240 3480 1111 0000 4278 2935
Koszt prenumeraty rocznej
(4 zeszyty łącznie z kosztami przesyłki) wynosi 60 zł.
Składając zamówienie należy podać adres osoby
lub instytucji zamawiającej, na który
ma być przesłane czasopismo oraz numer NIP.Skład i druk:
Agencja Reklamowa TOP,
ul. Chocimska 4, 87-800 Włocławek

Szanowni Państwo

Z ogromną przyjemnością prezentuję Państwu drugi numer „Postępów Techniki Jądrowej”. W tym wydaniu znajdują Państwo wybrane artykuły oraz najnowsze doniesienia z dziedziny nauki, technologii jądrowej oraz szeroko rozumianej atomistyki.

Marcin Oleksiuk rozmawia z dr. hab. Wojciechem Duczmalem, prof. Akademii Nauk Stosowanych Wyższej Szkoły Zarządzania i Administracji w Opolu, o tym, czy budowa elektrowni jądrowej w Polsce jest opłacalna. W wywiadzie przedstawiono argumenty za jej budową, podkreślając, że choć inwestycja ta wiąże się z wysokimi kosztami, zapewnia stabilne i tanie źródło energii oraz bezpieczeństwo energetyczne kraju. Profesor zaznacza, że koszty budowy są znane i można je porównywać, a korzyści nie ograniczają się jedynie do produkcji energii, lecz obejmują także aspekty edukacyjne, naukowe i turystyczne. Podkreśla, że energetyka jądrowa rozwija się globalnie i nie jest przeżytkiem, a decyzje o jej odrzuceniu często wynikają z mitów i strachu – szczególnie wokół odpadów promieniotwórczych. Wskazuje na konieczność rzetelnej edukacji społeczeństwa i dialogu opartego na faktach, a nie emocjach. Ponadto zaznacza, że choć niektóre państwa odchodzą od energii jądrowej, to strategiczne decyzje często zależą od polityki, a nie wyłącznie od ekonomii. Autor wywiadu stwierdza, że nie stać nas na brak energii jądrowej – to właśnie brak tej technologii może nas kosztować najwięcej.

Marek Ostrysz i Jakub Kołodziej analizują wpływ promieniowania jonizującego na elektronikę cyfrową, co jest kluczowe dla zapewnienia niezawodności i trwałości systemów pracujących w trudnych warunkach radiacyjnych. Autorzy omówili główne źródła promieniowania oraz jego oddziaływanie na układy elektroniczne, skupiając się na trzech mechanizmach degradacji: dawce jonizującej (TID), uszkodzeniach przemieszczeniowych (DD) oraz pojedynczych zdarzeniach (SEE). Przedstawiono różnorodne metody ochrony, w tym technologie odporne na promieniowanie, modelowanie wpływu promieniowania oraz testy laboratoryjne. Szczególną uwagę zwrócono na nowoczesne rozwiązania materiałowe, takie jak półprzewodniki szerokiej przerwy energetycznej, technologie kompozytowe oraz druk 3D w tworzeniu osłon fizycznych. W artykule opisano także metody monitorowania promieniowania, które pozwalają na śledzenie zmian poziomu promieniowania w czasie rzeczywistym, co jest istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności układów elektronicznych w warunkach radiacyjnych.

Z kolei Paweł Włoch i Magdalena Lazarek-Janowska omawiają znaczenie budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych jako kluczowego elementu współczesnej transformacji energetycznej, mającej na celu dekarbonizację gospodarki i zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego. Wskazują na rosnące inwestycje w sektorze jądrowym, szczególnie w kontekście wycofywania starszych elektrowni węglowych. Autorzy zauważają jednak lukę w wiedzy dotyczącej aspektów ekonomicznych tych inwestycji, podkreślając wysokie koszty kapitałowe, długi okres zwrotu oraz złożoność ryzyk finansowych i operacyjnych związanych z elektrowniami jądrowymi. Celem artykułu jest systematyzacja wiedzy na temat uwarunkowań finansowania takich inwestycji, a także wypracowanie kryteriów decyzyjnych, które mogą wspierać efektywne i zrównoważone planowanie oraz realizację projektów jądrowych.

W ostatnim artykule Robert Bobkier analizuje ewolucję regulacji dotyczących radonu w Stanach Zjednoczonych, zwracając uwagę na wyzwania wynikające z uwarunkowań instytucjonalnych, ekonomicznych i ideologicznych. Przedstawia historyczne i współczesne strategie regulacyjne, w tym plany działania takie jak FRAP 2011, NRAP 2015 i NRAP 2021, oceniając ich skuteczność. Szczególną uwagę poświęca amerykańskiej

koncepcji „poziomu działania” (action level), która zakłada odpowiedzialność właścicieli nieruchomości za ograniczanie ryzyka radonowego – w przeciwieństwie do europejskiego systemu wiążących norm. Analiza obejmuje także trudności wynikające z podziału kompetencji między agencjami federalnymi oraz wpływ ograniczeń budżetowych na efektywność polityki radonowej.

Oprócz artykułów, w publikacji uwzględniliśmy także informacje z kraju i ze świata, które umożliwiają szersze spojrzenie na wydarzenia związane z technikami jądrowymi.

W dziale „Doniesienia krajowe” przypominamy o 70. rocznicy powołania Instytutu Badań Jądrowych. Znajdują się również relacje z 41. edycji Konferencji EuroPOWER & OZE POWER, spotkania uczestników po drugim roku realizacji projektu RADOV, pierwszego w Polsce międzynarodowego warsztatu poświęconego radiofarmaceutom znakowanym Aktyntem-225 oraz udziału IChTJ w 10. kongresie przemysłu jądrowego Europy Środkowo-Wschodniej – CEE NUCLEAR POWER & SMR FOCUS 2025.

Zachęcam do zapoznania się z wiadomościami z zagranicy. W szczególności warto zwrócić uwagę na doniesienia z CERN.

W bieżącym numerze pragnę zwrócić uwagę na wydarzenie związane ze 100-leciem powstania Instytutu Radowego w Warszawie, upamiętniające Marię Skłodowską-Curie.

Dr inż. Krzysztof Rzymkowski przedstawia książkę Jacka Nowickiego „Część elektryczna i AKPiA elektrowni jądrowej” – szczegółowe opracowanie dotyczące systemów elektrycznych i aparatury kontrolno-pomiarowej w elektrowniach jądrowych z reaktorami lekkowodnymi (PWR i BWR). Autor omawia budowę, działanie oraz wymagania normalizacyjne i jakościowe tych systemów, ze szczególnym naciskiem na aspekty bezpieczeństwa i zgodności z międzynarodowymi normami. Publikacja zawiera również informacje o uwarunkowaniach prawnych, wytycznych dla dostawców i wykonawców, a także rekomendacje dla polskich przedsiębiorców planujących udział w międzynarodowym łańcuchu dostaw dla energetyki jądrowej. Całość uzupełniają ilustracje, wykresy oraz słownik skrótów technicznych, co czyni ją wartościowym źródłem wiedzy zarówno dla specjalistów, jak i studentów związanych z techniką jądrową i regulacjami branżowymi.

Felieton Marka Bielskiego pt. „Ryzyko pomiędzy Scyllą filozofii, a Charybdą techniki” analizuje pojęcie ryzyka w kontekście filozofii, techniki i codziennego życia. Autor zastanawia się nad tym, jak rozumiemy ryzyko, dlaczego jest ono trudne do zdefiniowania i jak zmieniało się na przestrzeni lat. Porusza kwestie związane z brakiem tego pojęcia w dawnych encyklopediach, jego znaczeniem w prawie i codziennych sytuacjach, a także jego wpływem na rozwój technologii, zwłaszcza w obszarze energetyki jądrowej. Tekst podkreśla potrzebę refleksji filozoficznej nad ryzykiem, które jest nieodłącznym elementem współczesnego świata i decyzji dotyczących bezpieczeństwa.

W numerze nie zabrakło także miejsca na refleksję i upamiętnienie wybitnych postaci związanych z atomistyką. Na zakończenie, pragniemy uczcić pamięć prof. dr. hab. Marka Trojanowicza oraz Witolda Łady.

Zachęcam do zapoznania się z lekturą, która, mam nadzieję, przyniesie Państwu inspirację do dalszego zaangażowania się w rozwój technologii jądrowych w Polsce.

Z radością informuję, że z okazji 70-lecia atomistyki w Polsce zmieniliśmy logo naszego czasopisma. W imieniu redakcji „Postępów Techniki Jądrowej” dziękuję za Państwa wsparcie i zapraszam do dalszego śledzenia naszych publikacji.

Krzysztof Madaj
Redaktor naczelny

DROGI ATOMIE...

Drogi atomie...

Marcin Oleksiuk

Na wstępie muszę przyznać, że nie znam ani jednego eksperta, który będąc zwolennikiem elektrowni jądrowej w Polsce, nie przyznaje, że ta inwestycja będzie droga. Dlatego niektórzy przeliczają, że za pierwsze 60 mld, które właśnie zatwierdził Sejm, kupimy 40 mld butelek czy 30 mln rowerów albo 12 mln iPhone'ów lub 6000 luksusowych willi. Możemy też pokazać, jak ta kwota przekładałaby się na przydomowe instalacje fotowoltaiczne lub ilość farm wiatrowych albo przekonywać, że możemy rozdać każdemu Polakowi pompę ciepła, jak robią to często oponenci atomu, ale i dużych inwestycji. Zwolennicy z kolei mogą pokazywać, na co te pieniądze zmarnujemy, jeśli elektrowni nie wybudujemy. Tylko, po co? My przecież elektrownię jądrową chcemy mieć i proponuję po prostu uznać wysokość kosztów budowy tego obiektu za fakt, który powszechnie akceptujemy. Świadomie piszę w liczbie mnogiej, ponieważ społeczne nastroje, odzwierciedlone w wielu sondażach, pokazują, że w stosunku do żadnego źródła energii nie było chyba nigdy tak zielonego światła.

To zielone światło i zgodę na zielony atom widać, chociażby w ostatnim sondażu PGE GiEK. Statystyki nie pozostawiają złudzeń, że nawet mieszkańcy lokalizacji, w których mają powstać te obiekty, widzą szansę rozwoju regionu, a post apokaliptyczne wizje, kreślone latami przez mity o Czarnobylu, nie wytrzymały próby konfrontacji z rosnącą świadomością społeczną. Tego wszystkiego nie byłoby jednak bez wysiłku szeregu naukowców, popularyzatorów wiedzy, świadomych polityków, samorządowców i ekonomistów, którzy na rzecz atomu nie lobbują, ale starają się tłumaczyć, jak pewne mechanizmy działają. Dlatego ja pozwoliłem sobie tym razem zaprosić przedstawiciela nauki, Pana dra hab. Wojciecha Duczmala, który zarządzanie i finanse zna też od strony praktycznej, kierując jako Prorektor Akademią Nauk Stosowanych – Wyższą Szkołą Zarządzania i Administracji w Opolu.

Marcin Oleksiuk: Jako pierwsze zadam pytanie, które pada przy okazji każdej praktycznie rozmowy o budowie elektrowni jądrowej w Polsce. Czy nam się to opłaca?

Wojciech Duczmal: Na wstępie pominę w ogóle kontekst kosztów budowy samej elektrowni jądrowej. Musimy pamiętać, że inwestycje infrastrukturalne, które mają być elementem użyteczności publicznej, nie zawsze na siebie zarobią, a nierzadko nawet się nie



Fot.1. dr hab. Wojciech Duczmal, Prorektor ds. finansów i rozwoju, prof. Akademii Nauk Stosowanych WSZiA w Opolu (fot. Karolina Hałdaś)

Photo 1. Dr. hab. Wojciech Duczmal, Vice-Rector for Finance and Development, prof. of the Academy of Applied Sciences, WSZiA in Opole (photo Karolina Hałdaś)

zwrócić, a jeśli nawet tak będzie, to ten zwrot trwa czasami lata czy dekady. Często, jeśli mówimy o zysku, to należy go rozpatrywać w szerszym kontekście, a nie tylko materialnym – w tym przypadku można mówić o taniej energii w przyszłości i stabilnym źródle jej wytwarzania. I tutaj tania energia jest elementem, który możemy policzyć, natomiast bezpieczeństwo energetyczne, szczególnie w dzisiejszych czasach, wydaje się kwestią bezcenną. Natomiast oczywiście najpierw trzeba ponieść koszty i one będą spore. Jednak wiedzieliśmy to,

zanim wbito przysłowiową łopatę w ziemię. Zresztą ekonomia związana z takimi obiektami nie jest jakąś wiedzą tajemną, a finalny koszt budowy elektrowni jądrowej to informacja, którą możemy sprawdzić z poziomu smartfona.

M.O.: Jednak kwota oscyluje w granicach 200 mld złotych. Te środki można byłoby wykorzystać z przeznaczeniem na inne cele, jak mówią często przeciwnicy atomu.

W.D.: Patrząc tylko na finanse i porównując przysłowiowe gruszki do jabłek, zaczniemy zaraz kwestionować funkcjonowanie filharmonii, bo przecież muzykę mamy dzisiaj za darmo w telefonie. To oczywiście skrajny przykład i ja nie lubię takich porównań, ale on świetnie pokazuje konstrukcje argumentów używanych często w dyskusji o dużych inwestycjach. Musimy pamiętać, że budżet państwa nigdy nie będzie na tyle zasobny, aby sfinansować wszystkie potrzeby, więc trzeba określić priorytety. Czasami wybrać coś kosztem czegoś. Można wspomnianą filharmonię zamknąć i wtedy wygenerujemy zyski, tylko będą one niewspółmierne do tego, co straciliśmy. Tak jak filharmonia, tak i elektrownia jądrowa to obiekty, których korzyści posiadania nie da się wyrazić tylko w pieniądzu. Jeśli mówimy o tym, że funkcją takiego obiektu jest produkcja energii, to nie zapominajmy, że spełnia on też określone role, na przykład naukowo – badawcze, edukacyjne czy nawet turystyczne.

M.O.: Turystyka jądrowa brzmi ciekawie, tylko komu będzie się opłacać być atomowym biurem podróży?

W.D.: W tym przypadku znowu nie liczyłbym na korzyści finansowe i nie kierował się czystą ekonomią. Chińczycy na przykład, dla zwiększenia poparcia dla swojego programu jądrowego, organizują wycieczki, które oferuje tamtejszy największy operator energetyczny. Wątpię, żeby ta idea zarabiała na sobie. W Polsce można zwiedzać słynny reaktor MARIA, czy też składowisko odpadów, ale popularyzacja tego typu aktywności edukacyjnej jest dalej niestety marginalna.

M.O.: Skoro nie chodzi tu o pieniądze, to jakie konkretnie korzyści mogłaby przynieść chociażby taka forma turystyki?

W.D.: Przede wszystkim byłyby to inwestycja w edukację i budowanie świadomości społecznej. Dzięki takim wycieczkom można pokazać, jak naprawdę funkcjonują obiekty związane z energetyką jądrową. To szansa, by w bardziej przystępny sposób przybliżyć, szczególnie młodzieży, tematykę, która często wydaje się skomplikowana i zarezerwowana dla nauk ścisłych. Tego typu inicjatywy pozwalają rozwiewać mity, budować zaufanie do nowoczesnych technologii oraz zainteresować młodsze pokolenia nauką i przemysłem

energetycznym, który jest ważnym elementem naszej przyszłości.

M.O.: Często pojawia się też teza, że tak naprawdę atomu nie potrzebujemy. Uzasadnia się to rosnącą popularnością OZE albo mówi się o tym, że energia pozyskiwana z elektrowni jądrowych to przeżytek.

W.D.: Sektor energetyki jądrowej rozwija się tak jak każdy inny i inwestycje uwzględniają postęp technologiczny. Ciężko mi się zgodzić z tym, że atom należy do przeszłości, jeśli inwestuje w niego wiele wysoko rozwiniętych krajów. Oczywiście te inwestycje napotykają często problemy, ale elektrownia jądrowa nie powstanie w rok.

M.O.: To w takim razie czy warto czekać aż tyle lat? Niektóre głosy sprzeciwu mówią nawet, że zwolennicy atomu użyją każdego argumentu, żeby przekonać społeczeństwo.

W.D.: Polska stoi przed wyzwaniem transformacji energetycznej i pomijając sympatie oraz antypatie, szczególnie te podyktowane światopoglądowo, musimy zadbać przede wszystkim o dywersyfikację źródeł energii. To nie jest tak, że jeśli ja teraz wypowiadam się pozytywnie o inwestycji w elektrownię jądrową, to tym samym neguję i krytykuję inne źródła energii. Zresztą my w Polsce powinniśmy zadbać o pewną synergii, jeśli chodzi o to skąd energię pozyskujemy, a nie wzajemnie się zwalczać, bo czasami odnoszę takie wrażenie, że powstają bardzo radykalne obozy i z tego robi się polityka. Spójrzmy, że często dyskusja odbywa się poprzez porównywanie różnych rozwiązań technologicznych, różnych kosztów i innych skali zaspokajania naszych potrzeb. Nie twierdzę, że nie warto słuchać głosów sprzeciwu, bo one są ważne, ale te argumenty muszą być budowane raczej w oparciu o logikę, naukę a nie politykę. Dla mnie lobbowanie na rzecz jakiegokolwiek źródła energii powinno pokazywać, szczególnie społeczeństwu, plusy i minusy, ale na podstawie realnych wyliczeń czy też faktów, a nie osobistych przekonań czy wręcz mitów.

I te mity nie dotyczą tylko atomu. Jeśli na przykład weźmiemy pod uwagę farmę wiatrową, to oczywiście jest, że ingeruje ona w wizualny aspekt krajobrazowy i to jest fakt, który słusznie postrzegamy, jako minus. Z drugiej strony na przykład dla danej gminy taka instalacja może być źródłem sporego dochodu i jest to na pewno plus. Natomiast, jeśli próbuje się tworzyć takie pojęcia jak „syndrom turbiny wiatrowej” to jest to już pewna manipulacja. Dlatego ja nie twierdzę, że minusów takiego projektu jak budowa elektrowni jądrowej nie ma, tylko patrząc na to z szerszej perspektywy, jest to inwestycja po prostu potrzebna.

M.O.: Wróćmy jeszcze na chwilę do kosztów. Elektrownia jądrowa, jak zaznaczają często przeciwnicy to niebezpieczne odpady no i ewentualny proces zamykania takiego obiektu.

W.D.: Ja nie jestem ekspertem jeśli chodzi o techniczne aspekty zabezpieczenia takich odpadów, czy ich utylizacji, ale tak jak w przypadku budowy elektrowni jądrowej są to po pierwsze koszty policzalne, a po drugie znane. Znamy też procedury i bazujemy na doświadczeniach naszych i innych krajów. Proszę zauważyć, że my naprawdę nie wyważamy otwartych już drzwi i wystarczy zobaczyć na mapie, a to zawsze działa na wyobraźnię, ile takich obiektów działa na świecie, ile jest w likwidacji, bo to po części naturalny proces oraz ile tych obiektów jest zaplanowanych do budowy. Dodam jeszcze, w nawiązaniu do tej likwidacji, że zamyka się nie tylko elektrownie jądrowe i nie tylko te obiekty produkują niebezpieczne odpady. Spalanie węgla, chociaż dzisiaj obwarowane wieloma przepisami dotyczącymi ochrony środowiska, również powoduje, że odpady powstają.

M.O.: Przyzna Pan jednak, że kwestia odpadów promieniotwórczych to jeden z koronnych argumentów przeciwko energetyce jądrowej i tutaj chyba ekonomia społeczeństwa nie przekonamy?

W.D.: Nawet nie powinniśmy, bo uzyskamy efekt odwrotny do zamierzonego. Niestety w dzisiejszych czasach, kiedy w masowy sposób można tworzyć treści w cyfrowym świecie, szczególnie te pseudonaukowe, bazujące na strachu, to zdaję sobie sprawę, że jakaś część społeczeństwa będzie się obawiać o swoje zdrowie. To nie dotyczy tylko energii pozyskiwanej z atomu, ale przecież też utylizacji paneli fotowoltaicznych, czy hałasu generowanego przez wiatraki. Dlatego potrzebne są konsultacje społeczne. Takie, które nie są prowadzone jako monolog przedstawicieli inwestora, gdzie pokazuje się tylko same plusy. Z ludźmi trzeba rozmawiać szczerze o atomie w sposób szczególny, często pozbawiony naukowego języka. Dlatego ważna jest też popularyzacja wiedzy, nawet taka jak ten wywiad, bo ciężko mnie i Pana nazwać lobbystą, no i przede wszystkim ten materiał ukaże się na łamach czasopisma naukowego, które ze względu na swój charakter nie pozwala na przemycanie tylnymi drzwiami chociażby polityki czy reklamy. W ogóle uważam, że taka luźniejsza forma, szczególnie w kontekście nauk ścisłych, pozwala zmniejszyć dystans i pokazuje, że nie trzeba być tak jak ja fizykiem, aby móc i chcieć pewne procesy zrozumieć.

Ale nic tak nie przekona opinii społecznej jak działający obiekt, który można zobaczyć, czy zwiedzić.

M.O.: Jednak niektóre kraje odchodzą od energii z atomu.

W.D.: Jeśli spojrzymy na samą Europę, dlatego tak jak wspomniałem wcześniej, ważna jest wizualizacja, to na przykładzie naszego podwórka widzimy inwestycje w Czechach czy na Słowacji. Oczywiście trzeba być obiektywnym i pokazać Niemcy, które mają inną politykę dotyczącą energii z atomu, ale to w dużej mierze polityka a nie ekonomia. Wspomnę też przy okazji Ukrainę, bo podczas wojny wydawałoby się, że są ważniejsze wydatki niż odkupienie od Bułgarii reaktorów jądrowych. I to pokazuje, że wspomniana przeze mnie czysta ekonomia i finansowa kalkulacja nie zawsze sprawdza się przy strategicznych inwestycjach. Myślę, że warto również podkreślać to, że polskie firmy będą miały swój znaczący udział w budowie tego obiektu. To nie jest tak jak często słyszeliśmy, że my wylejemy tylko przysłowiowy beton na fundamenty, a resztę zarobią wyłącznie zagraniczni wykonawcy.

M.O.: Dziękuję serdecznie za rozmowę.

W.D.: Ja również dziękuję za rozmowę i za zaproszenie. Bardzo doceniam to, że przedstawiciele nauk społecznych mogą znaleźć swoje miejsce na łamach Postępów Techniki Jądrowej, bowiem energia to zasób niezwykle ważny, do którego trzeba podejść interdyscyplinarnie.

Kiedy zabieram się za podsumowanie rozmowy, to wyjątkowo nie mam jeszcze tytułu, a przeważnie od tego zaczynam, bawiąc się w grę słów albo chcąc wywołać w czytelniku zainteresowanie. Często sam pomysł na tytuł powoduje, że powstaje tekst. Czytam więc wywiad jeszcze raz, szukając inspiracji i pamiętając ze szkoły średniej, że zakończenie powinno być objętościowo podobne do wstępu. I nagle uświadamiam sobie, że tak naprawdę mogę to zrobić pisząc po prostu, że to nie jest tak, że nas na atom nie stać, tylko że nie stać nas, żeby go nie mieć. Zatem Drogi Atomie, czekamy.

*Marcin Oleksiuk,
Akademia Nauk Stosowanych,
Wyższa Szkoła Zarządzania i Administracji,
Opole*

WPŁYW PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ELEKTRONIKĘ CYFROWĄ W TECHNOLOGII CMOS ORAZ SPOSOBY JEJ ZABEZPIECZEŃ

The influence of ionizing radiation on digital electronics in CMOS technology and methods of its protection

Marek Ostrysz, Jakub Kołodziej

Streszczenie: Wpływ promieniowania jonizującego na elektronikę cyfrową stanowi istotne zagadnienie w kontekście niezawodności i trwałości systemów elektronicznych pracujących w trudnych warunkach radiacyjnych. W artykule omówiono główne źródła promieniowania, jego oddziaływanie na układy elektroniczne oraz strategie ochrony przed skutkami napromieniowania. Przedstawiono trzy podstawowe mechanizmy degradacji: całkowitą dawkę jonizującą (Total Ionizing Dose, TID), uszkodzenia przemieszczeniowe (Displacement Damage, DD) oraz efekty pojedynczych zdarzeń (Single-event effects, SEE). Ponadto, opisano różnorodne metody zabezpieczenia układów scalonych, w tym wykorzystanie technologii odpornych na promieniowanie, modelowanie wpływu promieniowania oraz testy laboratoryjne. Szczególną uwagę poświęcono nowoczesnym rozwiązaniom materiałowym, jak półprzewodniki o szerokiej przerwie energetycznej, technologie kompozytowe oraz wykorzystanie druku 3D w projektowaniu osłon fizycznych. Dodatkowo uwzględniono metody monitorowania promieniowania, które umożliwiają precyzyjne śledzenie zmian w poziomie promieniowania w czasie rzeczywistym.

Abstract: The impact of ionizing radiation on digital electronics is a crucial issue in the context of its reliability and durability in harsh radiation environments. This article discusses the main sources of radiation, its effects on electronic circuits, and strategies for protection against radiation exposure. Three primary degradation mechanisms are presented: total ionizing dose (TID), displacement damage (DD), and single-event effects (SEE).

In addition, various methods for securing integrated circuits are described, including radiation-hardened technologies, radiation modeling, and laboratory testing. Particular attention is given to advanced materials such as wide-bandgap semiconductors, composite technologies, and the use of 3D printing in designing physical shields. Additionally, radiation monitoring methods that enable precise real-time tracking of radiation changes are considered.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, CMOS, odporność radiacyjna, technologie kompozytowe, druk 3D, systemy monitorowania

Keywords: ionizing radiation, CMOS, radiation hardness, composite technologies, 3D printing, monitoring systems

Wprowadzenie

Promieniowanie jonizujące stanowi jedno z najważniejszych wyzwań dla współczesnej elektroniki, zarówno w środowisku naziemnym jak i kosmicznym. Powoduje uszkodzenia odwracalne i nieodwracalne, wpływa na parametry działania urządzeń, a w skrajnych przypadkach prowadzi do ich całkowitej awarii. Rozwój technologii półprzewodnikowych, miniaturyzacja komponentów oraz zastosowania elektroniki w trudnych środowiskach, takich jak kosmos, reaktory jądrowe czy systemy lotnicze wymuszają dokładne zrozumienie efektów promieniowania oraz projektowanie systemów odpornych na jego wpływ.

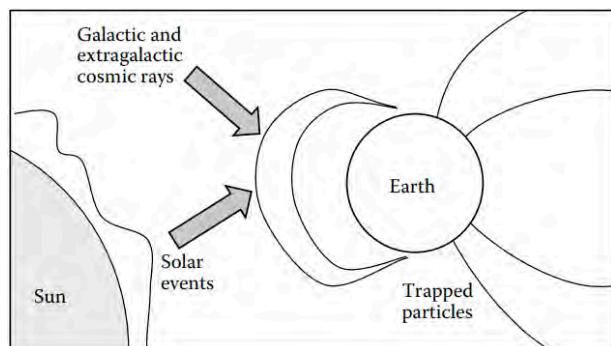
Środowiska promieniowania

Przestrzeń kosmiczna

Kosmos jest jednym z najbardziej wymagających środowisk pod względem promieniowania jonizującego, co wynika z obecności trzech głównych źródeł promieniowania (rys. 1).

Pierwszym z nich jest promieniowanie kosmiczne galaktyczne (Galactic Cosmic Rays, GCR) składające się głównie z wysokoenergetycznych protonów oraz cząstek alfa pochodzących spoza Układu Słonecznego. Cząstki te mogą przenikać przez większość materiałów, utrudniając ich ekranowanie, a ich energia sięga nawet GeV.

Drugim istotnym źródłem są cząstki emitowane przez Słońce, zwłaszcza podczas burz słonecznych



Rys. 1. Schematyczna ilustracja trzech głównych źródeł promieniowania w kosmosie [1] (fot. M. Bagatin i S. Gerardin)

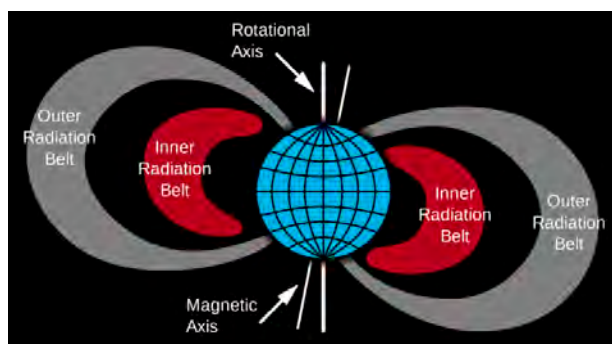
Fig. 1. Schematic illustration of the three main sources of radiation in space [1] (photo M. Bagatin and S. Gerardin)

i koronalnych wyrzutów masy (Coronal Mass Ejection, CME). W takich przypadkach Słońce emituje cząstki o energiach powyżej 10^{11} MeV na nukleon, a ich strumień może osiągać wartości 10^5 cząstek/cm²/s [1].

Słońce jako główne źródło materii w przestrzeni międzyplanetarnej emituje wiatr słoneczny, czyli strumień naładowanych cząstek, który oddziałuje z ziemską magnetosferą prowadząc do powstania zjawisk takich jak zorza polarna. Średnia gęstość materii na wysokości orbity Ziemi wynosi około 10 cząstek na cm³, natomiast w dalszych częściach Układu Słonecznego może spaść nawet do dziesięciokrotnie mniejszych wartości (poniżej 10^6 atomów wodoru na 1 m³). Neutrony pochodzące z promieniowania korpuskularnego Słońca mają średni czas życia wynoszący około 15 minut, a ich energia nie przekracza 20 MeV. Większość swobodnych neutronów rozpada się jeszcze w przestrzeni kosmicznej, zanim dotrą do powierzchni Ziemi.

Trzecim źródłem promieniowania są cząstki uwięzione w magnetosferze planetarnej, w tym w ziemskich pasach radiacyjnych Van Allena (rys. 2).

Magnetosfera Ziemi zatrzymuje elektrony i protony tworząc strefy o podwyższonym poziomie promieniowania. Szczególnie istotna jest Anomalia Południowoatlantycka (South Atlantic Anomaly, SAA), gdzie pasy Van



Rys. 2. Ziemską magnetosferę z wyszczególnionymi pasami radiacyjnymi Van Allena [2] (fot. NASA)

Fig. 2. Earth's magnetosphere with Van Allen radiation belts highlighted [2] (photo NASA)

Allena znajdują się wyjątkowo blisko powierzchni Ziemi, prowadząc do zwiększonego narażenia satelitów oraz systemów elektronicznych na wpływ promieniowania jonizującego. W konsekwencji satelity oraz systemy elektroniczne pracujące na orbicie są szczególnie narażone na zwiększony wpływ promieniowania jonizującego, co bezpośrednio oddziałuje na pracę tych urządzeń.

Środowisko ziemskie

Na Ziemi poziom promieniowania jest znacznie niższy niż w przestrzeni kosmicznej, ale nadal występują jego istotne źródła. Jednym z nich są neutrony atmosferyczne powstające w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą. Są to cząstki o energii wystarczającej do oddziaływania z materiałami elektronicznymi i mogą prowadzić do uszkodzeń w układach scalonych. Ich intensywność wzrasta wraz z wysokością, osiągając maksimum na poziomie około 15 km, co czyni lotnictwo i systemy elektroniczne działające w górnych warstwach atmosfery szczególnie narażonymi na ich wpływ.

Ponadto istnieje globalne pole elektryczne o natężeniu około 100 V/m, które wynika z obecności ujemnego ładunku macierzystej planety. Z kolei ziemskie pole magnetyczne, którego maksymalna wartość wynosi około 20 μ T pełni funkcję ochronną przed promieniowaniem kosmicznym, jednak może być neutralizowane poprzez wytworzenie pola zorientowanego przeciwnie do jego kierunku [3].

Dodatkowym źródłem promieniowania na Ziemi są cząstki alfa, które pochodzą z naturalnych zanieczyszczeń promieniotwórczych takich jak uran czy tor, obecnych w materiałach stosowanych w produkcji układów scalonych. W miarę miniaturyzacji technologii CMOS (Komplementarny półprzewodnik tlenku metalu, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) problem ten staje się bardziej istotny, ponieważ nawet pojedyncze cząstki mogą prowadzić do błędów w funkcjonowaniu urządzeń elektronicznych.

Sztuczne źródła promieniowania

Promieniowanie jonizujące występuje również w sztucznych środowiskach takich jak laboratoria fizyki wysokich energii (np. Europejska Organizacja Badań Jądrowych, *Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*, CERN), w których ze względu na ekstremalne warunki radiacyjne wymagane jest stosowanie specjalnie zaprojektowanych układów odpornych na promieniowanie.

Innym istotnym źródłem promieniowania są reaktory jądrowe, w tym zaawansowane systemy fuzji jądrowej takie jak Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termonuklearny (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER).

Wszystkie te środowiska wymagają stosowania specjalnych technologii ochrony przed promieniowaniem,

zwłaszcza w kontekście projektowania odpornych systemów elektronicznych, zarówno w przestrzeni kosmicznej jak i w warunkach ziemskich.

Rodzaje uszkodzeń powodowanych przez promieniowanie jonizujące

Całkowita dawka jonizująca (TID)

Całkowita dawka jonizująca (Total Ionizing Dose, TID) to miara ilości energii pochłoniętej przez materiał w wyniku długotrwałej ekspozycji na promieniowanie jonizujące. Gdy materiał jest narażony na promieniowanie jonizujące (np. promieniowanie gamma, rentgenowskie, protony, elektrony) następuje jonizacja atomów i cząstek prowadząca do powstania defektów strukturalnych oraz zmiany właściwości fizycznych i chemicznych. W układach elektronicznych promieniowanie może powodować akumulację ładunków w warstwach izolujących prowadząc do przesunięcia progów napięcia i uszkodzenia tranzystorów. TID odnosi się do energii jonizującej zdeponowanej w materiałach urządzeń [1]:

Efekty ekspozycji na TID w tranzystorach bipolarnych:

- Degradacja współczynnika wzmocnienia prądowego (spadek prądu kolektora w stosunku do bazy),
- Efekt ELDRS [4] – degradacja jest większa przy niskim tempie dawki promieniowania (przebieg kosmiczna), co sprawia że testy laboratoryjne mogą nie doszacować degradacji w rzeczywistych warunkach.

Efekty ekspozycji na TID w tranzystorach MOSFET:

- Nagromadzenie dodatniego ładunku w tlenkach bramki prowadzi do przesunięcia napięcia progowego i zwiększenia prądu upływu,
- Tworzenie stanów pułpkowych na interfejsie Si/SiO₂ obniża mobilność nośników i zwiększa rozproszenie ładunku.

Całkowita dawka jonizująca jest jednym z kluczowych czynników wpływających na niezawodność systemów pracujących w warunkach wysokiego promieniowania, dlatego jej monitorowanie i minimalizacja są istotne w wielu dziedzinach inżynierii i nauki.

Uszkodzenia przemieszczeniowe (DD)

Uszkodzenia przemieszczeniowe to defekty strukturalne powstające w materiałach na skutek wybijania atomów z ich pozycji w sieci krystalicznej przez wysokoenergetyczne cząstki. Głównym mechanizmem tego zjawiska jest przekazanie energii atomowi, który staje się atomem zderzeniowym (Primary Knock-on Atom, PKA) inicjującym kaskadę zdarzeń i prowadzącym do powstania wakancji (przerw w strukturze krystalicznej) oraz atomów międzywęzłowych. W wyniku tych

procesów dochodzi do lokalnych zaburzeń struktury, osłabienia wiązań i degradacji właściwości mechanicznych i termicznych materiału. Przy długotrwałej ekspozycji na promieniowanie mogą tworzyć się większe skupiska defektów powodujące kruchość, zmiany gęstości oraz pęknięcia materiału. Wysoka liczba uszkodzeń przemieszczeniowych prowadzi do utraty funkcjonalności komponentów, zwłaszcza w środowiskach narażonych na intensywne promieniowanie. Skutki tych defektów są szczególnie istotne w reaktorach jądrowych, technologiach kosmicznych oraz mikroelektronice, gdzie mogą wpływać na bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji.

Efekty pojedynczych zdarzeń (SEE)

Efekty te wywoływane są przez pojedyncze cząstki wysokoenergetyczne, które oddziałują z wrażliwymi regionami urządzeń. Efekty SEE obejmują zarówno uszkodzenia odwracalne jak i nieodwracalne. Do przykładowych efektów SEE można zaliczyć [1]:

- **Upset pojedynczego zdarzenia (SEU)** – zmiana wartości logicznej w pamięci wywołana przez jedną cząstkę jonizującą. Ten efekt jest odwracalny i można go naprawić poprzez ponowne zapisanie odpowiedniej wartości logicznej,
- **Upset wielobitowy (MBU)** – jednoczesna modyfikacja kilku sąsiednich bitów pamięci spowodowana działaniem jednej cząstki jonizującej,
- **Przemijające zdarzenie (SET)** – krótkotrwały impuls napięcia lub prądu wywołany przez cząstkę jonizującą w obwodach analogowych lub cyfrowych. Może zostać zarejestrowany w pamięci, powodując tzw. błąd miękki,
- **Funkcjonalna przerwa pojedynczego zdarzenia (SEFI)** – zakłócenie pracy maszyny stanów w chipie, prowadzące do funkcjonalnych przerw w działaniu urządzenia. Problem może zostać naprawiony przez ponowne zresetowanie urządzenia,
- **Ruptura bramki (SEGR)** – trwałe uszkodzenie tlenku bramki w tranzystorach mocy, szczególnie w MOSFET-ach. Jest to nieodwracalny efekt destrukcyjny,
- **Spalenie pojedynczego zdarzenia (SEB)** – trwałe awaria elementów elektronicznych dużej mocy takich jak tranzystory MOSFET lub IGBT wynikająca z uruchomienia pasożytniczych struktur bipolarnych po interakcji z cząstkami jonizującymi,
- **Zjawisko latch-up (SEL)** – zwarcie wywołane przez promieniowanie w strukturach CMOS, w wyniku aktywacji pasożytniczych struktur bipolarnych, prowadzące do nagłego wzrostu prądu w układzie,
- **Zjawisko snapback (SES)** – efekt powstający w strukturach półprzewodnikowych typu SOI (krzem na izolatorze), gdy cząstki jonizujące inicjują regeneracyjne sprzężenie zwrotne mogące doprowadzić do trwałej awarii układu.

Technologie kompozytowe

Materiały kompozytowe stanowią fundamentalną rolę w ochronie przed promieniowaniem jonizującym w przestrzeni kosmicznej, szczególnie w misjach dalekiego zasięgu, gdzie konieczne jest minimalizowanie wrażliwych systemów elektronicznych. Obok stosowanych od lat materiałów metalicznych, które przez dokładne przebadanie, cenę i skuteczność są stosowane do dziś, to kompozyty stają się coraz powszechniejsze w zastosowaniach kosmicznych i przemysłowych.

Badania [5] wskazują, że kompozyty o niskiej liczbie atomowej, takie jak włókno węglowe w osnowie polieteroeteroketonu, wykazują wyższą skuteczność osłonową w porównaniu do tradycyjnie stosowanego aluminium. Dzięki większej zdolności do absorpcji protonów i ciężkich jonów oraz lepszej zdolności do fragmentacji cząstek kompozyty te mogą zwiększyć skuteczność ekranowania o około 17% w stosunku do stopów aluminium [5].

Jednocześnie rozwój kompozytów polimerowych i ich połączeń z tradycyjnymi materiałami opartymi o włókno szklane, węglowe oraz aramidowe, w szczególności poprzez zastosowanie nanowypełniaczy, otwiera nowe możliwości projektowania lekkich i efektywnych osłon radiacyjnych. Integracja nanocząstek, takich jak bor, węgiel czy tlenki metali, może znacząco poprawić zdolności ekranowania promieniowania bez negatywnego wpływu na właściwości mechaniczne materiałów [6].

Zastosowanie kompozytów w osłonach radiacyjnych stanowi współcześnie ważny krok w kierunku redukcji masy systemów krytycznych na promieniowanie oraz zwiększenia ich trwałości w ekstremalnych warunkach środowiskowych.

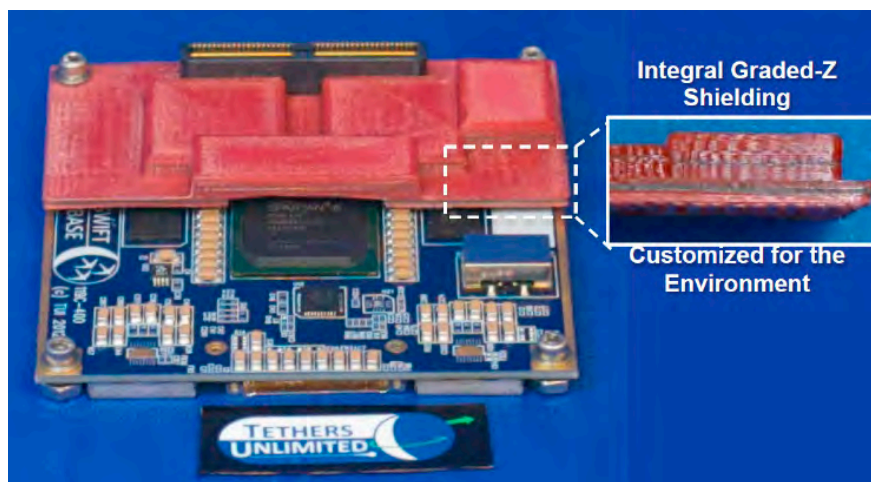
Druk 3D i technologie addytywne – nowe perspektywy w projektowaniu materiałów odpornych na promieniowanie jonizujące

Druk 3D oraz technologie addytywne umożliwiają tworzenie osłon radiacyjnych o zoptymalizowanych właściwościach dzięki precyzyjnej kontroli nad geometrią, strukturą wewnętrzną oraz składnikami materiałowymi. W badaniach nad tym zagadnieniem [7] przedstawiono, iż odpowiednie dobranie parametrów druku, takich jak temperatura, prędkość i sposób nakładania warstw znacząco wpływa na właściwości termomechaniczne wydrukowanych osłon, przekładając się na ich zdolność do absorpcji energii promieniowania [7], [8].

Rysunek 3 przedstawia przykładową realizację, w której widać optymalizację struktury osłony w sposób warstwowy – zarówno pod kątem odporności na promieniowanie jak i optymalizację wagową i strukturalną umożliwiając zaoszczędzenie wagi, która jest szczególnie krytyczna w zastosowaniach kosmicznych ze względu na cenę wyniesienia instrumentu w przestrzeń. Druk wielomateriałowy umożliwia jednocześnie wykorzystanie różnych materiałów w jednym elemencie. Pozwala to na projektowanie osłon z gradientem właściwości, gdzie warstwy o wysokiej wytrzymałości mogą współpracować z warstwami zoptymalizowanymi pod kątem absorpcji promieniowania, czy zachowywania optymalnych parametrów termicznych [9].

Takie narzędzia stwarzają także możliwości do przestrzennego wykonywania elementów, które mogą mieć większe zastosowanie – na przykład być elementem strukturalnym lub użytkowym, pomimo swej osłonowej pierwotnej charakterystyki. Szybki rozwój w ostatnich latach urządzeń wytwarzających elementy addytywne z różnych metali pozwala na zróżnicowane projektowanie pod kątem elastyczności zastosowania, lecz wielomateriałowe rozwiązania umożliwiają znacznie szersze i kreatywne ich wykorzystanie [10].

Równocześnie wyniki przedstawione w innych pracach pokazują, że modyfikacja polimerowych filamentów (czynniki wykorzystywane w druku 3D) poprzez dodanie specyficznych dodatków (np. nanocząstek tlenków metali, lub azotku boru) pozwala na poprawę właściwości osłonowego materiału bez utraty korzystnych cech mechanicznych. Dzięki temu można uzyskać lekkie, ale jednocześnie wysoce odporne na promieniowanie struktury [11], [12].



Rys. 3. Przykładowa zintegrowana, wielowarstwowa osłona radiacyjna (Integral Graded-Z Shielding) wykonana metodą druku 3D, dostosowana do warunków środowiskowych i zamontowana na module elektronicznym [8] (fot. Tethers Unlimited, Inc.)

Fig. 3. Example of an integrated, multi-layer 3D-printed radiation shield (Integral Graded-Z Shielding) customized for specific environmental conditions and mounted on an electronic module [8] (photo Tethers Unlimited, Inc.)

Integracja wyników badań laboratoryjnych, technologii druku 3D oraz zaawansowanych symulacji umożliwia projektowanie osłon fizycznych, które nie tylko redukują dawkę promieniowania docierającą do wrażliwych układów, ale także spełniają wymagania aplikacji kosmicznych i przemysłowych.

Metody ochrony przed działaniem promieniowania jonizującego

Oprócz poprzednio przedstawionych degradacji fizycznych i odwracalnych, których sugestie poprawy pracy zaprezentowano wcześniej, istotne są także inne sposoby zabezpieczeń. W przypadku dużego systemu mikroprocesorowego opartego na CMOS możliwe jest programowe zabezpieczenie układowe. W przypadku mniejszej skali istotnym staje się redundancja komponentowa lub specjalne podejście i metody zabezpieczeń [13].

Modelowanie / symulacja efektów promieniowania jako metoda przeciwdziałania na ich wpływ

Modelowanie i symulacja efektów promieniowania stanowią niezbędne narzędzia w projektowaniu układów odpornych na negatywne skutki promieniowania jonizującego. Dzięki nim można przewidzieć, jak całkowita dawka promieniowania wpływa na parametry urządzeń CMOS oraz zidentyfikować mechanizmy degradacji już na etapie projektowania. Testy te są szczególnie istotne i wykorzystywane w urządzeniach mających pracować na niskich orbitach [14].

Równocześnie często wykorzystywane są symulacje oparte na narzędziu SPICE z dodatkami projektowymi pozwalając na odwzorowanie zmian charakterystyk tranzystorów i całych układów pod wpływem promieniowania. Takie podejście umożliwia symulację dynamicznych zmian parametrów urządzeń, co jest nieocenione przy opracowywaniu metod kompensacyjnych i zabezpieczeń jeszcze przed wdrożeniem fizycznym. Rozwój narzędzi symulacyjnych, takich jak TCAD, pozwala na modelowanie interakcji promieniowania z materiałami na poziomie atomowym, co otwiera nowe możliwości w projektowaniu technologii odpornych na ekstremalne warunki radiacyjne [15].

Sposoby zabezpieczeń układów scalonych w laboratoriach fizyki wysokich energii

Wybór półprzewodników do zastosowań kosmicznych

Artykuł [16] opublikowany przez badaczy z Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) omawia wpływ promieniowania jonizującego na układy elektroniczne oraz metody badania ich odporności na takie warunki. Wiele systemów detekcyjnych, niezbędnych w różnych dziedzinach fizyki opiera się na elektronice,

która często pracuje w środowiskach narażonych na promieniowanie jonizujące. Dlatego prowadzone są ciągłe badania nad materiałami półprzewodnikowymi, scyntylatorami i fotopowielaczami w celu lepszego zrozumienia ich zachowania w takich warunkach.

W artykule podkreślono znaczenie półprzewodników o szerokiej przerwie energetycznej, takich jak azotek galu (GaN) i azotek indowo-galowy (InGaN), które znajdują zastosowanie w optoelektronice, m.in. w diodach LED, laserach czy tranzystorach. Materiały te charakteryzują się dużą odpornością na wysokie temperatury i promieniowanie, co czyni je odpowiednimi do zastosowań w przestrzeni kosmicznej, np. w panelach fotowoltaicznych satelitów.

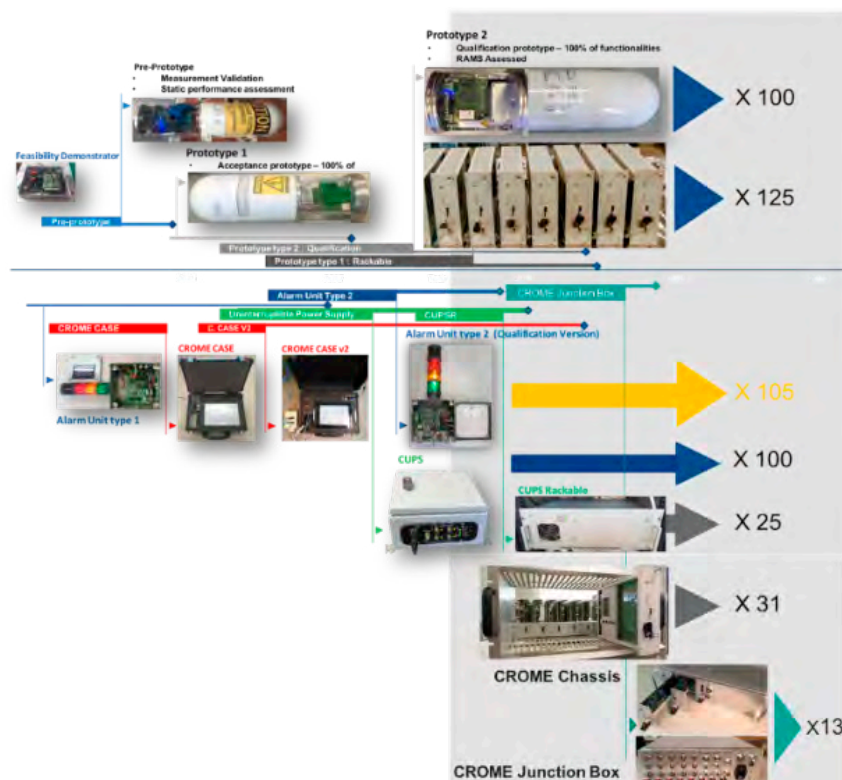
Badania przeprowadzone we współpracy z Instituto Superior Técnico w Lizbonie oraz Zakładem Technologii Plazmowych i Jonowych NCBJ wykazały, że InGaN jest bardziej podatny na uszkodzenia spowodowane promieniowaniem jonizującym niż czysty GaN. Napromieniowanie próbek wiązkami jonów ksenonu i ołowiu o wysokich energiach spowodowało powstawanie tzw. torów, wzdłuż których materiał ulegał przemianom fazowym, co wpływało na jego właściwości. Stwierdzono, że czysty GaN ma większe zdolności do samonaprawy struktury krystalicznej niż InGaN, w którym mogą tworzyć się stabilne zgrupowania defektów utrudniające rekonstrukcję krystaliczną.

W artykule omówiono również metody badania odporności elektroniki na promieniowanie jonizujące. Tradycyjnie stosuje się napromienianie elementów za pomocą źródeł promieniotwórczych, takich jak kobalt-60. W NCBJ rozwijana jest alternatywna metoda wykorzystująca liniowe akceleratory elektronów, które poprzez zderzenia elektronów z tarczą wolframową generują wiązki promieniowania X. Metoda ta jest stosowana zarówno w badaniach systemowych jak i komercyjnie, np. dla firm z polskiego przemysłu kosmicznego.

Niezawodny system ochrony radiologicznej

CROME (CERN RadiatiOn Monitoring Electronics) to nowa generacja systemu monitorowania promieniowania jonizującego opracowana przez CERN w celu zapewnienia ochrony radiologicznej w środowisku akceleratorów cząstek. Projekt rozpoczął się w 2014 r., a jego pełne wdrożenie zakończyło się w 2021 r., zastępując wcześniejszy system ARCON oraz inne starsze technologie monitorowania, takie jak RAMSES. System CROME integruje około 800 kanałów pomiarowych, które działają w rozproszonych lokalizacjach w kompleksie akceleratorów CERN, w tym w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) oraz jego podsystemach.

CROME (rys 4.) oferuje pomiary promieniowania jonizującego w niezwykle szerokim zakresie 9 rzędów wielkości od $10^{(-9)}$ Sv/h (nanosievertów na godzinę) do 1 Sv/h, umożliwiając detekcję zarówno niskiego jak i wysokiego poziomu promieniowania w czasie



Rys. 4. Główne wyposażenie systemu monitoringu CROME [17] (fot. CERN)

Fig. 4. Main equipment of the CROME surveillance system [17] (photo CERN)

rzeczywistym. System posiada zdolność do wykrywania nagłych skoków promieniowania w czasie rzędu milisekund, pozwalając na błyskawiczne reakcje w przypadku wzrostu dawek. Prawdopodobieństwo awarii systemu alarmowego zostało ograniczone do $10^{(-7)}$, zapewniając wysoką niezawodność w krytycznych warunkach pracy.

CROME współpracuje z systemem nadzoru SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), umożliwiając długoterminowe i niezawodne rejestrowanie danych. Dane te są wykorzystywane do monitorowania warunków radiacyjnych i analizy trendów w czasie rzeczywistym, pozwalając CERN na optymalizację procedur ochrony radiologicznej. System wdrożono zgodnie z nowoczesnymi zasadami edge computing oznaczającymi możliwość przetwarzania danych lokalnie, bez konieczności przesyłania ich do centralnych serwerów w każdej operacji. To pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie infrastruktury obliczeniowej oraz szybszą reakcję na nagłe zmiany warunków radiacyjnych.

Nowa technologia umożliwia bardziej precyzyjne wykrywanie i analizę radiacji, zapewniając wyższy poziom bezpieczeństwa dla personelu i środowiska. Obecnie CROME monitoruje promieniowanie w różnych częściach CERN, w tym w tunelach akceleratorów, halach eksperymentalnych oraz w pobliżu instalacji wysokiej mocy, gdzie emisja promieniowania może ulegać znacznym wahaniom.

Dzięki CROME CERN zyskał nowoczesny system radiacyjny zdolny do działania w ekstremalnych warunkach pracy, gdzie promieniowanie wtórne powstające w wyniku zderzeń cząstek ma zupełnie inny charakter niż standardowe promieniowanie jonizujące w przemyśle jądrowym [17]. To oznacza, że CROME został zaprojektowany nie tylko do rejestrowania standardowych dawek, ale także do adaptacji w dynamicznie zmieniających się warunkach, czyniąc go jednym z najbardziej zaawansowanych systemów monitorowania radiacji na świecie.

Podsumowanie

Wpływ promieniowania jonizującego na elektronikę cyfrową w technologii CMOS jest szczególnie ważny w środowiskach o wysokiej ekspozycji, takich jak przestrzeń kosmiczna,

reaktory jądrowe czy laboratoria fizyki wysokich energii. Energia pochodząca z kosmicznego promieniowania galaktycznego, cząstek emitowanych podczas burz słonecznych oraz efektów związanych z pasami Van Alлена, a także naturalnych źródeł na Ziemi czy działalnością człowieka może prowadzić do uszkodzeń układów scalonych i elektroniki.

Promieniowanie to oddziałuje na kilka zasadniczych mechanizmów m.in. poprzez całkowitą dawkę jonizującą, uszkodzenia przemieszczeniowe oraz efekty pojedynczych zdarzeń, które powodują zarówno trwałe uszkodzenia, jak i odwracalne zakłócenia działania elementów (np. tranzystorów).

Aby przeciwdziałać tym negatywnym skutkom stosuje się rozwiązania obejmujące projektowanie układów odpornych na promieniowanie, wykorzystanie materiałów o szerokiej przerwie energetycznej (np. GaN) oraz zastosowanie kompleksowego podejścia do zagadnienia poprzez wykorzystanie zaawansowanych technologii kompozytowych i druku addytywnego, które pozwalają na tworzenie lekkich i efektywnych osłon radiacyjnych.

Dodatkowo, modelowanie efektów promieniowania przy użyciu narzędzi takich jak SPICE czy TCAD umożliwia przewidzenie degradacji parametrów urządzeń już na etapie projektowania, pozwalając na wdrożenie odpowiednich mechanizmów kompensacyjnych.

Współczesne systemy monitorowania, jak system CROME opracowany przez CERN, umożliwiają bieżące śledzenie zmian w środowisku radiacyjnym, co jest strategiczne dla szybkiej reakcji na nagłe wzrosty dawek promieniowania.

Marek Ostrysz,
Jakub Kołodziej,
Wojskowa Akademia Techniczna,
Wydział Elektroniki,
Warszawa

Literatura:

- [1] M. Bagatin i S. Gerardin, *Ionizing Radiation Effects in Electronics. From Memories to Imagers*, CRC Press, 2015.
- [2] T. Tietz, „James van Allen and the Weather in Space”, Sci-Hi Blog, 2018.
- [3] L. Dobrzyński, *Zarys nukleoniki*, Otwock (NCBJ): Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [4] A. R. C. C. M. J. R. S. T. A. & B. H. J. Benedetto, „Radiation-Induced Defects in BJTs on NASA ELDRS Space Experiment”, w *38th Hardened Electronics and Radiation Technology (HEART) Conference*, 2022.
- [5] Masayuki Naito, Hisashi Kitamura, Masamune Koike, Hiroki Kusano, Tamon Kusumoto, Yukio Uchihori, Toshiaki Endo, Yusuke Hagiwara, Naoki Kiyono, Hiroaki Kodama, Shinobu Matsuo, Ryo Mikoshiba, Yasuhiro Takami, Masahiro Yamanaka, Hiromichi Akiyama, Wataru Nishimura, Satoshi Kodaira, „Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft”, *Life Sciences in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.08.004>.
- [6] Toto, Elisa, Lucia Lambertini, Susanna Laurenzi, and Maria Gabriella Santonicola. 2024. “Recent Advances and Challenges in Polymer-Based Materials for Space Radiation Shielding” *Polymers* 16, no. 3: 382. <https://doi.org/10.3390/polym16030382>.
- [7] Brounstein Z, Zhao J, Wheat J, Labouriau A. Tuning the 3D Printability and Thermomechanical Properties of Radiation Shields. *Polymers (Basel)*. 2021 Sep 26;13(19):3284. doi: 10.3390/polym13193284.
- [8] Voronka, Nestor. “Versatile Structural Radiation Shielding and Thermal Insulation through Additive Manufacturing”, 2013.
- [9] Patpatiya P, Chaudhary K, Shastri A, Sharma S. A review on polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*. 2022;236(14):7899-7926. doi:10.1177/09544062221079506.
- [10] E. Grossman, N. Atar, A. Bolker, B. E. Riggs, T. K. Minton, I. Gouzman, Y. Vidavsky, Space Durable 3D Printed High-Performance Polymers Based on Cyanate Ester/Extended-Bismaleimide. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2313255. <https://doi.org/10.1002/adfm.202313255>.
- [11] Woosley, S., Galehdari, N.A., Kelkar, A. *et al.* Fused deposition modeling 3D printing of boron nitride composites for neutron radiation shielding. *Journal of Materials Research* 33, 3657–3664 (2018). <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.316>.
- [12] Jreije, Antonio, Swaroop Kumar Mutyala, Benas Gabrielis Urbonavičius, Aušrinė Šablinskaitė, Neringa Keršienė, Judita Puišo, Živilė Rutkunienė, and Diana Adlienė. 2023. “Modification of 3D Printable Polymer Filaments for Radiation Shielding Applications” *Polymers* 15, no. 7: 1700. <https://doi.org/10.3390/polym15071700>.
- [13] Petrosyants, K.O., Sambursky, L.M., Kharitonov, I.A. *et al.* Radiation-Induced Fault Simulation of SOI/SOS CMOS LSI's Using Universal Rad-SPICE MOSFET Model. *J Electron Test* 33, 37–51 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10836-016-5635-8>.
- [14] Muhammad Sajid, N.G. Chechenin, Frank Sill Torres, Muhammad Nabeel Hanif, Usman Ali Gulzari, Shakaib Arslan, Ehsan Ullah Khan, Analysis of Total Ionizing Dose effects for highly scaled CMOS devices in Low Earth Orbit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.05.014>.
- [15] Pesic-Brdanin, Tatjana. (2017). Spice modeling of ionizing radiation effects in CMOS devices. *Facta universitatis – series: Electronics and Energetics*. 30. 161-178. 10.2298/FUEE1702161P.
- [16] „How does electronics deal with ionizing radiation?”, 7 June 2023. [Online]. Available: <http://ncbj.gov.pl/en/aktualnosci/how-does-electronics-deal-ionizing-radiation>.
- [17] „CERN RadiatiOn Monitoring Electronics,” [Online]. Available: <https://crome.web.cern.ch/node/25>.

UWARUNKOWANIA BUDOWY I EKSPLOATACJI ELEKTROWNI JĄDROWEJ W KONTEKŚCIE MODELI FINANSOWANIA INWESTYCJI

The conditions for the construction and operation of a nuclear power plant in the context of investment financing models

Paweł Włoch, Magdalena Lazarek-Janowska

Streszczenie: Budowa i eksploatacja elektrowni jądrowych stanowią istotny element współczesnej transformacji energetycznej, która jest odpowiedzią na rosnące wyzwania związane z dekarbonizacją gospodarki oraz koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego państw. W ostatnich latach nasilenie działań inwestycyjnych oraz projektowych w zakresie energetyki jądrowej wskazuje na strategiczne znaczenie tego sektora dla przyszłości systemów elektroenergetycznych, zwłaszcza w kontekście stopniowego wycofywania z eksploatacji wysłużonych elektrowni węglowych.

Autorzy zidentyfikowali lukę wiedzy dotyczącą ekonomicznych aspektów realizacji inwestycji w energetykę jądrową. Elektrownie jądrowe charakteryzują się wysokimi nakładami kapitałowymi (Capital Expenditure, CAPEX), długookresowym zwrotem z inwestycji (Return on Investment, ROI) oraz wieloma wymiarami ryzyka finansowego i operacyjnego, co sprawia, że proces ich finansowania jest szczególnie skomplikowany. Kluczowym wyzwaniem pozostaje określenie optymalnych modeli finansowania, które z jednej strony minimalizowałyby obciążenie budżetowe państwa, a z drugiej strony ograniczałyby koszty ponoszone przez odbiorców końcowych.

Celem niniejszego artykułu jest systematyzacja wiedzy na temat uwarunkowań budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych w kontekście modeli finansowania inwestycji. Przegląd dostępnych rozwiązań pozwoli na wskazanie kryteriów decyzyjnych, które mogą wspierać efektywne i zrównoważone planowanie oraz realizację tego rodzaju przedsięwzięć.

Abstract: The construction and operation of nuclear power plants constitute a significant element of the modern energy transition, which is a response to the growing challenges of decarbonizing the economy and ensuring energy security for nations. In recent years, the intensification of investment and project activities in the nuclear energy sector highlights its strategic importance for the future of power systems, particularly in the context of the gradual decommissioning of aging coal-fired power plants.

The authors have identified a knowledge gap regarding the economic aspects of such investments. Nuclear power plants are characterized by high capital expenditures (CAPEX), long-term return on investment (ROI), and multidimensional financial and operational risks, making their financing particularly complex. The key challenge remains the identification of optimal financing models that, on the one hand, minimize the fiscal burden on the state and, on the other hand, limit the costs borne by end consumers.

This article aims to systematize knowledge on the conditions for the construction and operation of nuclear power plants in the context of investment financing models. A review of available solutions will allow for the identification of decision-making criteria that can support effective and sustainable planning and implementation of such projects.

Słowa kluczowe: elektrownia jądrowa, model finansowy

Keywords: nuclear power plant, financial model

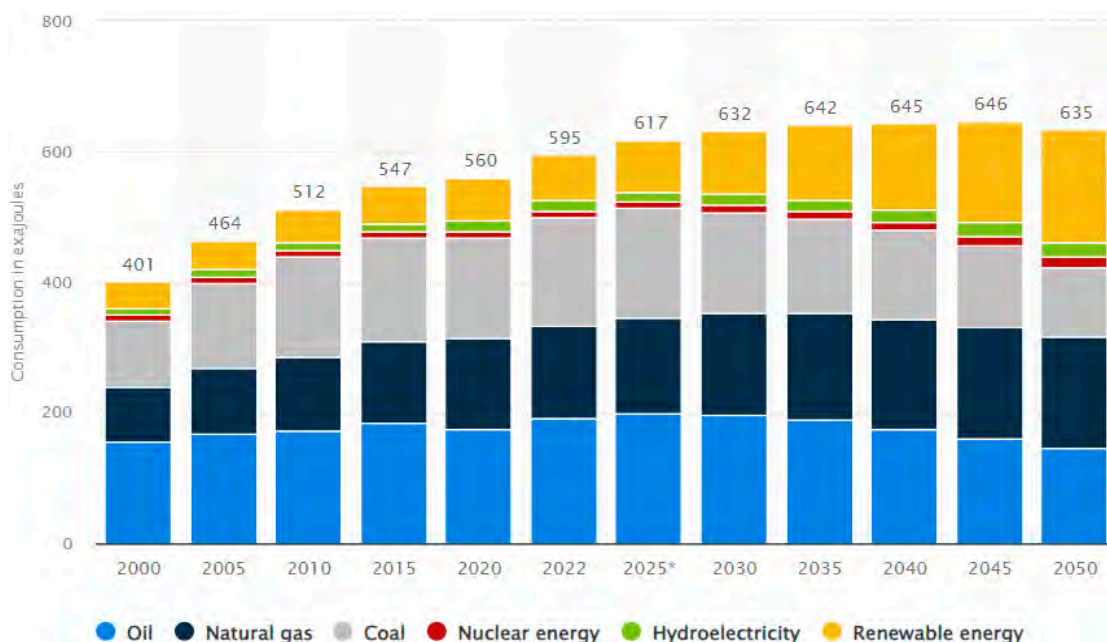
Wstęp

Niepodważalnym faktem jest obserwowalny globalny wzrost konsumpcji energii na świecie. Zgodnie z danymi zaprezentowanymi na rys. 1 można zaobserwować wzrost zapotrzebowania na energię od roku 2000 z prognozą sięgającą roku 2050. Wzrost ten jest determinantą dla rozbudowy infrastruktury wytwórczej i przesyłowej, w tym zastępowania

wyeksplotowanych obiektów generujących energię elektryczną nowymi.

Na podstawie danych publikowanych przez World Nuclear Association około 90 nowych reaktorów o całkowitej mocy 90 GWe jest w fazie planowania, a ponad 300 nowych inwestycji na etapie weryfikacji¹. Oznacza

¹ <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide#nuclear-reactors-planned-and-proposed>, data dostępu: 20.12.2024



Rys. 1. Konsumpcja energii elektrycznej na świecie od roku 2000 oraz prognoza do roku 2050. Źródło: <https://www.statista.com/statistics/222066/projected-global-energy-consumption-by-source/#:~:text=Global%20energy%20consumption%20has%20increased,of%20the%20global%20energy%20consumption>. Data dostępu: 20.12.2024

Fig. 1. Global electricity consumption since 2000 and forecast to 2050. Source: <https://www.statista.com/statistics/222066/projected-global-energy-consumption-by-source/#:~:text=Global%20energy%20consumption%20has%20increased,of%20the%20global%20energy%20consumption>. Access date: 20.12.2024

to, że energetyka jądrowa jest rozpatrywana, jako istotny element przyszłego parytetu wytwórczego energii w wielu krajach na całym świecie.

Częstym zadawanym pytaniem w dyskusji o przyszłość ludzkości jest to, czy można wyobrazić sobie dalszą egzystencję bez energii elektrycznej. Pomimo pewnych zawirowań, natury polityczno-gospodarczej, globalne zużycie energii na świecie systematycznie rośnie. Na rys. 1 przedstawiono wzrost zapotrzebowania na energię od roku 2000 oraz prognozę do roku 2050. Naturalną konsekwencją tego trendu jest konieczność utrzymania infrastruktury wytwórczej i przesyłowej, a także zastępowania wyeksploatowanych obiektów nowymi źródłami wytwarzania energii elektrycznej.

Zgodnie z danymi opublikowanymi przez World Nuclear Association, obecnie około 90 nowych reaktorów jądrowych o łącznej mocy 90 GWe znajduje się w fazie planowania, a ponad 300 lokalizacji jest analizowanych pod kątem przyszłych inwestycji². Oznacza to, że energetyka – jądrowa jest postrzegana, jako istotny element przyszłego parytetu wytwórczego w wielu krajach na całym świecie.

W Polsce temat budowy elektrowni jądrowej jest przedmiotem aktywnej debaty od blisko dwóch dekad. Wcześniej, bo 31 grudnia 1992 r. oficjalnie zakończono realizację projektu budowy elektrowni jądrowej w Żarnowcu [1]. Można zatem stwierdzić, że od ponad

dwudziestu lat podejmowane są działania mające na celu reaktywację programu energetyki jądrowej w Polsce. W roku 2005 ówczesne Ministerstwo Gospodarki zainicjowało prace nad nową strategią energetyczną, która miała uwzględniać budowę elektrowni jądrowej. Pierwszy podmiot celowy, który miał realizować projekt budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej w Polsce – PGE EJ1 – został powołany 28 stycznia 2010 r. przez Polską Grupę Energetyczną.

Przewidywany profil eksploatacji elektrowni jądrowej³

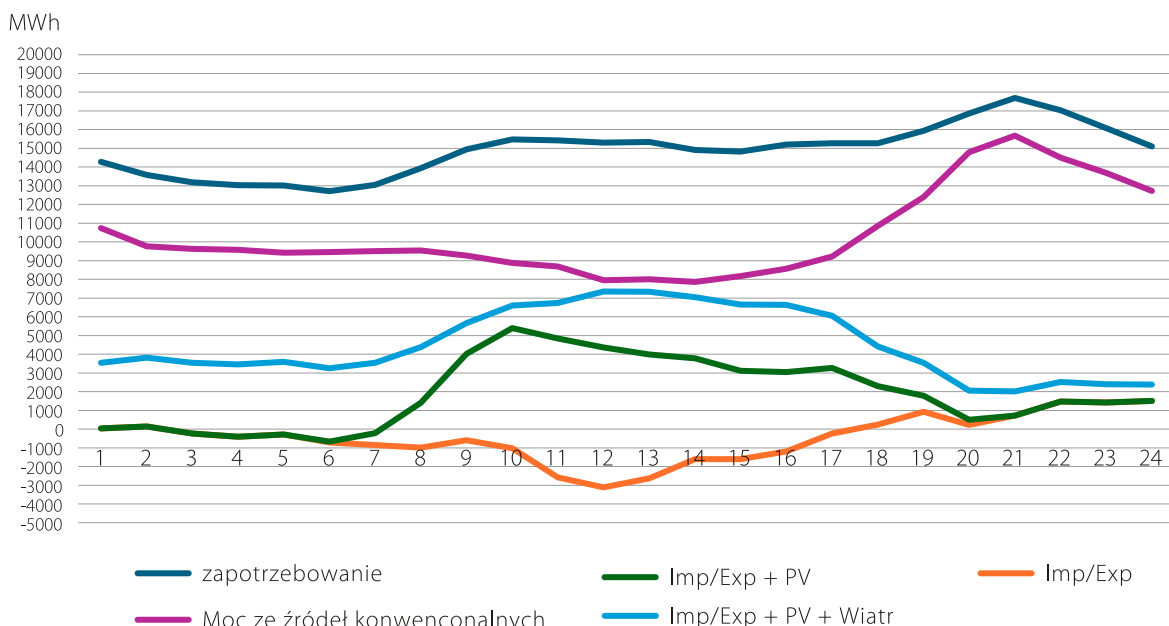
W ostatnich dwóch dekadach działalności Unii Europejskiej opracowywano i publikowano liczne dokumenty strategiczne określające kierunki rozwoju systemów energetycznych. W zapisach tych wyraźnie wybrzmiewa potrzeba realizacji inwestycji w odnawialne źródła

³ Elektrownie jądrowe charakteryzują się:

- planowanym długim okresem życia (projekty długoterminowe),
- dużymi nakładami inwestycyjnymi (Capex – heavy projects),
- długim okresem zwrotu z inwestycji (Long – term ROI),
- wysokim ryzykiem regulacyjnym i środowiskowym,
- strategicznym znaczeniem dla bezpieczeństwa energetycznego państw.

Mając na uwadze charakter finansowania tego typu przedsięwzięć polegający na częściowym finansowaniu za pomocą instrumentów dłużnych (np. kredyty) co wiąże się z koniecznością minimalizacji ryzyka dla podmiotów współfinansujących. Dlatego też, przy tego typu inwestycjach oczekiwane są wieloletnie zabezpieczenia, w najlepszym wypadku na okres spłaty zobowiązań kredytowych, z możliwie najsilniejszymi poręczeniami i zabezpieczeniami.

² <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide#nuclear-reactors-planned-and-proposed>, data dostępu: 20.12.2024



Rys. 2. Zapotrzebowanie na energię elektryczną, import/eksport energii, generacja z fotowoltaiki i wiatru, oraz zapotrzebowanie na moc źródeł konwencjonalnych dla 23.04.2023 r. Źródło: Opracowanie własne, na podstawie danych z Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

Fig. 2. Electricity demand, energy import/export, photovoltaic and wind generation, and demand for conventional power sources for 23.04.2023. Source: Own study, based on data from Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.

energii, jako fundamentu produkcji energii elektrycznej dla społeczeństwa europejskiego.

Przykładem takiego aktu prawnego jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r., tzw. Dyrektywa RED II, która wspiera wykorzystanie energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych⁴.

Promowanie inwestycji w odnawialne źródła energii, których specyfika pracy zależy od chwilowego zapotrzebowania oraz warunków atmosferycznych, ma bezpośredni wpływ na poziom generacji elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych. Jednocześnie wyklucza to możliwość ich stabilnej pracy ujęciu rocznym, rozumianej jako stała liczba roboczogodzin przepracowanych w każdym kolejnym roku.

Na rys. 2. zaprezentowano zmienność krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną, generację ze źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych, oraz wymianę transgraniczną, dla przykładowego dnia, jakim był 23 kwietnia 2024 r.

W odniesieniu do dynamiki pracy jednostek wytwórczych w systemie elektroenergetycznym, kluczowe znaczenie ma specyfika danej technologii wytwarzania energii. Poszczególne jednostki charakteryzują się różną zdolnością do reagowania na zmiany zapotrzebowania na moc. Przykładowo, elektrownie

gazowe cechuje wysoka elastyczność i szybka reakcja, natomiast elektrownie węglowe reagują wolniej.

Dodatkowo, możliwości regulacyjne wielu bloków wytwórczych są ograniczone. W Polsce dominują bloki węglowe o mocy 200 MW, których dynamiczny zakres regulacji wynosi od około 130 do 200 MW [2].

W przypadku elektrowni jądrowych postęp technologiczny przyczynił się do poprawy ich zdolności regulacyjnych. Dla porównania, elektrownie jądrowe II generacji osiągają zmienność rzędu 10% mocy nominalnej na minutę i oferują zakres regulacji od 60% do 100% mocy nominalnej⁵.

Współcześnie bloki jądrowe, takie jak AP1000 firmy Westinghouse, zostały zaprojektowane do pracy w trybie "Load-following mode" (czyli dostosowywania produkcji do bieżącego zapotrzebowania). Charakteryzują się one zakresem dynamiki pracy od 25% do 100% mocy nominalnej oraz szybkością reagowania, zmiany mocy wynoszącą +5% mocy nominalnej/minutę w górę i -10% mocy nominalnej/minutę w dół [5]. Warto również podkreślić wskaźnik dostępności pracy reaktora AP1000, który wynosi 85,6%⁶.

Choć dynamiczna regulacja mocy w elektrowniach jądrowych jest technicznie możliwa, wiąże się ona jednak z szybszym wyeksploatowaniem jednostki

⁴ <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzienniki-UE/dyrektywa-2018-2001-w-sprawie-promowania-stosowania-energii-ze-zrodel-69125090>, data dostępu: 07.01.2025

⁵ <https://www.cire.pl/artykuly/atom/czy-elektrownie-jadrowe-moga-pracowac-w-systemie-nadzania-za-obciazeniem>, data dostępu: 30.12.2024

⁶ <https://westinghousenuclear.com/energy-systems/ap-1000-pwr/operations-and-maintenance/>, data dostępu: 30.12.2024

oraz zagrożeniami związanymi ze skażeniami promieniotwórczymi, co powoduje, że praca elektrowni jądrowych powinna być wspomagana elektrowniami szczytowymi [3]. Oczywiście elektrownie jądrowe najlepiej funkcjonują, jako źródła energii w podstawie (base – load mode), tzn. ze stałą, możliwie najwyższą produkcją energii elektrycznej przez cały okres eksploatacji.

Modele finansowania z perspektywy udziału skarbu państwa

Z perspektywy zaangażowania kapitału skarbu państwa można wyróżnić podział modeli finansowania na trzy grupy, tj.:

- finansowanie samodzielne, bez udziału skarbu państwa (francuska elektrownia Flamanville 3 – EDF jako samodzielny inwestor);
- 2. partnerstwo publiczno-prywatne (PPP), gdzie ryzyko i odpowiedzialność jest dzielona pomiędzy sektor publiczny i prywatny (brytyjska elektrownia Hinkley Point C – kontrakty różnicowe wspierane przez państwo);
- 3. finansowanie państwowe – środki w całości lub w większości pochodzą z budżetu państwa, funduszy publicznych lub rządowych gwarancji kredytowych (amerykańska elektrownia Vogtle 3 i 4 z gwarancją rządową, czy budowy realizowane w Chinach i Rosji, które są w pełni finansowane przez państwo).

W tabeli 1 przedstawione główne uwarunkowania modeli finansowania uzależnione od udziału skarbu państwa.

Modele finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej

W ramach przeprowadzonej analizy przyjęto siedem zdefiniowanych i stosowanych modeli finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej. Są to:

- PPA (Power Purchase Agreement),
- Kontrakty różnicowe (Contract for Difference, CfD),
- Model Mankala,
- Model SO – HO (Single Owner – Hybrid Owner),
- Model Exeltium,

- Model RAB (Regulated Asset Base),
- Model SaHo.

Model PPA (Power Purchase Agreement)

Podstawowy model finansowania inwestycji w sektorze energetycznym, gwarantujący stabilność inwestycyjną. PPA, czyli umowa zakupu energii, to model polegający na związaniu producenta energii i odbiorcę długoletnią umową na sprzedaż energii po określonej cenie. Umowy PPA mają różny horyzont czasowy, w zależności od chwilowych zachowań cen energii na rynkach dnia następnego. W praktyce spotykane są umowy 1-roczone, 3-letnie, 10-letnie. Umowy wykraczające poza horyzont 10 lat stanowią rzadkość. [6]

Kontrakty różnicowe (Contract for Difference)

Mechanizm ten jest powszechnie stosowany w energetyce. Jego podstawowym zadaniem jest zapewnienie stabilności finansowej inwestycji, poprzez określenie stałej, przewidywalnej dla długiego okresu ceny jednostkowej dla wytworzonej energii elektrycznej. Sam mechanizm jest stosunkowo prosty, ponieważ polega na określeniu ceny referencyjnej (strike price), wobec której dochodzi do rozliczenia końcowego wytworzenia i sprzedaży energii. W jej funkcjonowaniu występują dwa podmioty, tj. operator elektrowni jądrowej i gwarant. Operator elektrowni w okresie eksploatacji prowadzi bieżącą sprzedaż energii w różnych formach, ale dla każdej jednostki sprzedanej energii weryfikowana jest uzyskana cena względem ceny referencyjnej i nadwyżka ponad cenę referencyjną jest zwracana do gwaranta, a różnica, poniżej ceny referencyjnej jest wypłacana przez gwaranta operatorowi elektrowni jądrowej [7,8].

Model Mankala

Podstawową cechą tego modelu jest forma spółdzielczości i współwłasności elektrowni jądrowej przez użytkowników końcowych energii. Sam model wywodzi się z Finlandii. W modelu tym właścicielem elektrowni jest spółka założona przez udziałowców, takich jak firmy energetyczne, przemysłowe czy miasta. Każdy z jej udziałowców ma prawo do określonej ilości energii

Tabela 1. Zalety i wady modeli finansowania z perspektywy udziału skarbu państwa. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Advantages and disadvantages of financing models from the perspective of the state treasury's share. Source: own study

	Zalety	Wady
Zamówienia publiczne	• dostępność finansowania, • stabilność i odporność na ryzyka inwestycyjne, • cele strategiczne (polityczne, społeczne)	• wyższe koszty budowy, • mniejsza elastyczność, • ryzyko opóźnień
Zamówienia prywatne	• niższe koszty, • szybsza realizacja, • elastyczność	• wyzwania w pozyskaniu finansowania, • ryzyko upadłości
Partnerstwo publiczno-prywatne (PPP)	• dzielenie ryzyka, • efektywność, • zrównoważony rozwój	• złożoność, • potencjalne konflikty

wygenerowanej przez elektrownię, proporcjonalnie do swojego udziału w inwestycji. Energia elektryczna jest sprzedawana jej udziałowcom po kosztach operacyjnych („at cost”). Spółka nie generuje zysków, a koszty związane z budową i eksploatacją pokrywają udziałowcy [9].

Model SO – HO (Single Owner – Hybrid Owner)

Model ten stosowany jest w projektach energetycznych, gdzie używana jest kombinacja dwóch podejść inwestycyjnych. Jego podstawowym założeniem jest możliwość podzielenia przedsięwzięcia na mniejsze, elementy składowe, których finansowanie jest realizowane oddzielnie, w niektórych częściach przez jeden podmiot (Single Owner), a w innych przez grupę podmiotów (np. spółki energetyczne)[10].

Model Exeltium

Model ten został zapoczątkowany we Francji w 2006 r. Model ten miał w swoim założeniu zapewnić dostęp dużym odbiorcom przemysłowym do energii elektrycznej po konkurencyjnych cenach. Jego fundamentem są długoterminowe kontrakty, pomiędzy odbiorcami a wytwórcą, które mają za zadanie stabilizować cenę energii. Przykładem zastosowania była modernizacja elektrowni jądrowych we Francji, współfinansowana przez podmioty przemysłowe, które w zamian otrzymały kontrakty na dostawę energii po stałej cenie na okres 24 lat [11].

Model RAB (Regulated Asset Base)

Ideą tego modelu jest określanie cen, bazując na wartości aktywów przedsiębiorstwa. Dążeniem było uzyskanie równowagi pomiędzy potrzebami inwestycyjnymi firm a interesami konsumentów. Jego mechanizm ma za zadanie zapewnić stabilność finansową operatora oraz kontrolę ceny dla użytkownika końcowego. Podstawowym kryterium modelu jest określenie „regulowanej podstawy aktywów” („Regulated Asset Base”), która stanowi wycenę aktywów operatora do prowadzenia działalności wytwarzania. Wartość aktywów stanowi podstawę do wyliczenia dochodów operatora, który jest wynagradzany za inwestycję w infrastrukturę. W wyliczeniu dochodów uwzględniana jest stopa zwrotu z inwestycji, określana przez regulatora (np. rząd) w horyzoncie np. 5 lat⁷.

Model SaHo

Podstawowym założeniem modelu jest realizacja inwestycji na jej początkowym etapie przez inwestora państwowego. Następnie, na dalszym etapie realizacji inwestycji, inwestor sprzedaje udziały w projekcie inwestorom końcowym. Do grona tych inwestorów mogą zaliczać się podmioty prywatne, jak również niewielkie

pakiet może trafić do sektora publicznego (np. wojsko, administracja rządowa). Autorzy modelu przewidzieli trzy wersje, tj. wyjściową, podstawową i rozszerzoną⁸.

Metodyka badania

W ramach przeprowadzonego badania zrealizowano analizę porównawczą popartą studium przypadku. Celem analizy było określenie głównych uwarunkowań, w jakich przychodzi podjąć decyzję o modelu finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej, oraz jakie są cele, które zamierza się zrealizować poprzez budowę i eksploatację elektrowni jądrowej. Kluczowym kryterium zakresu analizy było określenie sposobu oddziaływania poszczególnych modeli na odbiorcę końcowego, czyli konsumenta energii. W analizie skupiono się na ocenie wpływu wyboru modelu finansowania na obciążenie kosztami bezpośrednimi i pośrednimi oraz ryzykiem inwestycyjnym odbiorcę końcowego. Badanie zostało poparte analizą przypadku na przykładzie wybranych, zrealizowanych projektów budowy elektrowni jądrowych. Wszelkie dane będące przedmiotem analizy zostały zgromadzone w drodze badania literaturowego oraz analizy dokumentów publicznych. Przyjętą metodą badawczą jest analiza jakościowa.

Dyskusja i wyniki analizy

Na podstawie opisanych uwarunkowań i założeń zidentyfikowano następujące kryteria, jakie należy rozpatrywać w procesie decyzyjnym dotyczącym wyboru modelu finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej.

- **Uwarunkowania i cele, będące podłożem decyzji o wyborze modelu finansowania**

Na podstawie przedstawionych aspektów zdefiniowano następujące uwarunkowania i cele, będące podłożem decyzji o wyborze modelu finansowania elektrowni jądrowej:

1. **Bezpieczeństwo:** Fundamentalnym kryterium, jakim kierują się decydenci w przypadku decyzji o budowie i eksploatacji elektrowni jądrowej, jest jej rola w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego, oraz wynikających z niego bezpieczeństwa pochodnych. Oznacza to, że w myśl stanowiska, iż obecnie niemożliwe jest funkcjonowanie ludzkości bez energii elektrycznej, zadaniem jest zapewnienie ciągłości jej dostaw. Niewątpliwie sprzyja temu specyfika pracy, jako dużej jednostki, o regulowanych parametrach pracy, mogącej aktywnie reagować na zmiany zapotrzebowania.

⁷ <https://www.gov.uk/government/news/future-funding-for-nuclear-plants>, data dostępu: 30.12.2024

⁸ Sawicki Ł, Horbaczewska B., „Model SaHo – polski model biznesowy dla energetyki jądrowej”, PTJ vol. 66 z.3 2023

2. **Ciągłość/zastępowalność:** Mając na uwadze, że systemy energetyczne stanowią urządzenia o określonej żywotności, nowe elektrownie jądrowe mają za zadanie zastąpić wyeksploatowane instalacje. Zapewnienie bezpieczeństwa należy rozumieć w sposób bezpośredni, jako ciągłość dostaw energii elektrycznej oraz w sposób pośredni jako zapewnienie możliwie taniej i przewidywalnej ceny energii, która jest fundamentem wytwarzania blisko 100% produktów i usług. [14] Jest to o tyle istotny aspekt, że z racji zastępowania wyeksploatowanych jednostek wytwórczych nie zaistnieje sytuacja nadpodaży energii.
3. **Inicjator:** Inicjatorem budowy elektrowni jądrowej mogą być zarówno rządy (skarby państwa), jak i podmioty prywatne. Przykładem takich inicjatyw może być np. działanie polskiego rządu zmierzającego do budowy elektrowni jądrowej⁹ oraz podmiotów prywatnych, które chcą prowadzić działalność gospodarczą polegającą na sprzedaży energii elektrycznej (Synthos¹⁰), bądź chcą ją wytwarzać na potrzeby własne (Google¹¹).
4. **Regulacje prawne będące efektem przyjętych strategii państwowych:** Sektor energetyczny jest obszarem działalności gospodarczej mocno regulowanym przez państwa, ze względu na swoje strategiczne znaczenie. Jednocześnie należy mieć na uwadze współistnienie różnych kryteriów determinujących przyjmowane strategie. Przykładem tego jest strategia "Fit for 55" czy "green deal" Unii Europejskiej, która to dąży do zastąpienia konwencjonalnych źródeł energii, odnawialnymi źródłami energii¹². W efekcie nowe elektrownie jądrowe miałyby pracować jako źródła uzupełniające generację ze źródeł odnawialnych, czyli w trybie Load-following.
5. **Zapewnienie (możliwie) taniej i przewidywalnej ceny energii:** Niewątpliwie kluczowym kryterium wyboru modelu finansowania

budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej jest dążenie do zapewnienia przewidywanej w długim horyzoncie czasowym i możliwe taniej energii elektrycznej. Niezależnie, czy przedsięwzięcie jest realizowane przez skarby państwa czy podmiot prywatny, dla zapewnienia energii dla społeczeństwa, czy potrzeb własnych, przewidywana i tania energia jest jednym z kluczowych kryteriów decyzyjnych.

• Kryterium zakresu analizy

Energia elektryczna kwalifikowana jest do grupy produktów masowych. Oznacza to, że jest ona dostępna w bardzo dużej ilości (roczne zużycie energii elektrycznej w Polsce w 2023 r. wyniosła 176 TWh) i posiada wielu dostawców/wytwórców. W sytuacji jeżeli inicjatorem:

- jest podmiot prywatny:
 - » głównym kryterium jest cena energii,
- jest skarby państwa:
 - » głównym kryterium jest zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego, a w drugiej kolejności, przy możliwie najmniejszej cenie energii.

Sama decyzja budowy i eksploatacja elektrowni jądrowej podyktowana jest dążeniem do zapewnienia ciągłości bezpieczeństwa dostaw energii. Kluczowym kryterium oceny staje się zatem wpływ modelu finansowania elektrowni jądrowej na koszt energii, zarówno bezpośredni (cena wytworzenia energii elektrycznej) i pośredni (obciążenia podatkowe), oraz ze względu na długi okres realizacji (często wynikający z opóźnień) ryzykiem inwestycyjnym.

- Spośród omówionych modeli finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej tylko PPA nie stanowią obciążenia budżetowego i oddziałują wyłącznie na cenę energii dla odbiorcy. Pozostałe modele (CfD, RAB, SO – HO, Mankala, Exelium, Sa – Ho) stanowią obciążenie budżetowe skarbu państwa i finalnie mogą pojawić się w formie nowej daniny lub podatku (np. opłata mocowa w rachunkach za energię elektryczną).
- Udział skarbu państwa może wpłynąć pozytywnie na obniżenie średnioważonego kosztu kapitału (Weighted Average Cost of Capital, WACC), ponieważ posiada on dostęp do tańszych instrumentów dłużnych niż podmioty prywatne. Choć określanie WACC dla pieniędzy skarbu państwa nie jest powszechną praktyką, dokonuje się takich wyliczeń dla projektów realizowanych w formule porozumienia prywatno – publicznego, a WACC w takich przypadkach oscyluje na poziomie 4% [15]. Dla porównania WACC wyliczony dla spółek dystrybucji energii elektrycznej na lata 2023-2028 określany przez

⁹ <https://www.gov.pl/web/polski-atom/program-polskiej-energetyki-jadrowej>, data dostępu: 03.01.2025

¹⁰ [¹¹ <https://techcrunch.com/2024/10/14/google-signed-a-deal-to-power-data-centers-with-nuclear-micro-reactors-from-ka-iro-s-but-the-2030-timeline-is-very-optimistic/>, data dostępu: 03.01.2025](https://businessinsider.com.pl/wiadomosci/michal-solowow-wybuduje-elektrownie-atomowa-w-polsce/q5v25fd#:~:text=Firma%20Synthos%2C%20kt%C3%B3rej%20wsp%C3%B3lce%20w%20C5%82a%20C5%9Bcielem%20jest%20najbogatszy%20Polak%20Micha%C5%82,typu%20obiekt%20w%20Polsce%2C%20a%20do%20tego%20prywatny., data dostępu: 03.01.2025</p>
</div>
<div data-bbox=)

¹² https://www.lr.org/en/expertise/maritime-energy-transition/fit-for-55-/?creative=&keyword=fit+for55+&matchtype=&network=o&device=c&utm_source=bing&utm_campaign=&utm_medium=cpc&utm_content=&utm_term=fit+for+55&mclid=9906b7abcc3f1a6e37cdd0dc07c08926, data dostępu: 03.01.2025

Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki (URE) wynosi 7,478% [16].

- Udział skarbu państwa, ze względu na fakt wydatkowania pieniędzy publicznych może wiązać się z wyższym kosztem realizacji, co oznaczać będzie wyższy CAPEX do sfinansowania.
- Udział skarbu państwa w procesie finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej pozytywnie wpływa na mitygację ryzyk inwestycyjnych, jakie mogą zaistnieć w czasie realizacji przedsięwzięcia.

W tabeli nr 2 przedstawiono dopasowanie modeli finansowych pod kątem uwzględnienia udziału skarbu państwa.

Realizacja budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej może wpłynąć na odbiorcę końcowego w dwojaki sposób:

- Wpływ na ceny energii elektrycznej,
- Daniny i podatki.

Studium przypadku

W tabeli 3 przedstawiono główne założenia modeli finansowania dla wybranych elektrowni jądrowych, na

Tabela 2. Podział modeli finansowania pod kątem udziału skarbu państwa w realizacji projektów. Źródło: opracowanie własne

Table 2. Division of financing models in terms of the state treasury's share in project implementation. Source: own study

Finansowanie samodzielne	Partnerstwo publiczno - prywatne	Finansowanie państwowe
Exeltium	CfD	Mankala
So – Ho	PPA	
PPA	RAB	
Sa – Ho	So – Ho	
	Sa – Ho	
	Mankala	

przykładzie realizowanych inwestycji w Europie i Ameryce północnej.

W tym miejscu należy wskazać, że elektrownie jądrowe są również budowane w Rosji i Chinach, aczkolwiek są one realizowane wyłącznie przy zaangażowaniu skarbu państwa.

W przypadku elektrowni Vogtle 3 i 4 budowa oraz eksploatacja elektrowni wpłynęła na odbiorcę końcowego zarówno poprzez ceny energii elektrycznej, jak i dodatkowe daniny. Wpływ na ceny energii został uwzględniony w taryfach cen energii elektrycznej, a w formie danin ujęto koszty rządowych gwarancji kredytowych.

Realizacja elektrowni jądrowej Hinkley Point C, nie ma większego wpływu na ceny energii (jedyne oddziaływanie to wpływ na podaż energii na rynku). Jednak mechanizm kontraktów różnicowych obciąża skarb państwa, który musi pozyskać stosowne fundusze w drodze danin i podatków.

W przypadku elektrowni jądrowej Olikiluoto odbiorcą energii są udziałowcy, którzy pozyskują energię po kosztach operacyjnych. Rząd Finlandii udzielił wsparcia w formie rządowych gwarancji kredytowych oraz regulacje prawne dedykowane dla ułatwienia procesu budowy.

Elektrownia Flamanville jest projektem samodzielnie finansowanym przez francuskie przedsiębiorstwo państwowe, zajmujące się dostarczaniem energii elektrycznej Électricité de France (EDF), bez wsparcia rządowego. W tym przypadku nie pojawia się wpływ na budżet państwa i konieczność pozyskiwania nowych danin i podatków, aczkolwiek odbija się to na cenach energii oferowanych przez EDF.

Podsumowanie

Niewątpliwie wybudowanie i eksploatacja elektrowni jądrowej ma za zadanie wesprzeć zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego, rozumianego, jako ciągłe zapewnienie dostaw energii, przy możliwie

Tabela 3. Modele finansowania wybranych elektrowni jądrowych. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Financing models for selected nuclear power plants. Source: own study

Elektrownia jądrowa	Model finansowania	Źródła finansowania	Gwarancje i poręczenia
Vogtle 3 i 4	Koszty przenoszone na odbiorców poprzez taryfy energii elektrycznej	Projekt finansowany przez grupę przedsiębiorstw użyteczności publicznej	Wsparcie rządowe - gwarancje kredytowe 12 mld USD
Hinkley Point C	CfD – 35 lat	Finansowanie przez konsorcjum EDF Energy (66,5%) i China General Nuclear Power Corporation (33,5%)	Gwarancja w formie ceny CfD, udzielona po zrealizowaniu obiektu
Olikiluoto	Mankala	Pożyczki oraz emisja obligacji	Ze względu na opóźnienia udzielono dodatkowych zabezpieczeń przez konsorcjum i wykonawców (Areva i Siemens)
Flamanville	Samofinansowanie EDF	Z przychodów oraz emisji obligacji	Brak wsparcia rządowego

niskiej oraz przewidywalnej cenie. Równie ważnym uwarunkowaniem jest fakt, że elektrownia jądrowa ma za zadanie zastąpić wyeksploatowane elektrownie i wpisać się w strategię funkcjonowania systemów elektroenergetycznych. Niewątpliwie cechy elektrowni jądrowych (m.in. CAPEX – have project, long term ROI) powodują, że jest to przedsięwzięcie niezwykle kapitałochłonne, długotrwałe, podatne na wiele ryzyk w trakcie realizacji. Dlatego też istotnym zagadnieniem jest określenie kryteriów decyzyjnych dla wyboru modelu finansowania budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej, które możliwie najmniej będą obciążać budżet państwa oraz koszty funkcjonowania odbiorców końcowych. Na podstawie przedstawionej analizy należy wskazać, że koszt budowy i eksploatacji elektrowni jądrowej obciąża podatników na dwa sposoby, tj. bezpośrednio w cenie energii elektrycznej, ale również w drodze dodatkowych danin. Warto podkreślić, że znaczenie budowy tego typu obiektów powinno być analizowane nie tylko przez pryzmat wpływu na koszt energii elektrycznej, ale również, a może i przede wszystkim z perspektywy dążenia do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego. Istnieje szereg działań gospodarczych, które są w stanie ponieść wyższe koszty energii elektrycznej, ale bez dostępu do niej ich funkcjonowanie staje się niemożliwe.

*dr inż. Paweł Włoch,
Zachodniopomorska Szkoła Biznesu,
Akademia Nauk Stosowanych,
dr Magdalena Lazarek – Janowska,
Zachodniopomorska Szkoła Biznesu,
Szczecin*

Literatura:

- [1] Jezierski G, „Kalendarium budowy elektrowni jądrowej w Żarnowcu, czyli... jak straciliśmy swoją szansę”, *Energia Gigawat*, styczeń 2006 r.
- [2] Trzeszczyński J, Dobosiewicz J, Stanek R, „Bezpieczny i dyspozycyjny blok klasy 200 MW”, *Biuletyn – Energetyka*, nr 2/2019.
- [3] Kubowski J, „Problemy współpracy elektrowni jądrowych z systemem elektroenergetycznym”, *Biuletyn – Energetyka*, kwiecień 2010.
- [4] Włoch P, „Analiza rozwoju odnawialnych źródeł energii elektrycznej z perspektywy zapotrzebowania na energię elektryczną oraz elastyczność Krajowego Systemu Elektroenergetycznego i wymiany transgranicznej”, *Firma i Rynek – Zeszyty Naukowe*, 2023/02.
- [5] AP1000 – Design Control Document rev. 19 – Introduction and general description of the plant – U.S. Nuclear Regulatory Commission, accession number: ML11171A500, 21.06.2011.
- [6] Lichtenstein S, Davis M, „Power Purchase Agreements for Renewable Energy Projects”, Springer, 2016.
- [7] M. Szolucha, „Kontrakty różnicowe w energetyce jądrowej”, *PTJ* vol. 59 Z. 2 2016, 09.2016.
- [8] A. Witkowska, „Czym są kontrakty różnicowe? Proste wprowadzenie do zagadnienia w sektorze energetycznym”, *Wise Europa*, 2023.
- [9] Sawicki Ł, Horbaczewska B, „Model Mankala w energetyce jądrowej na przykładzie fińskiej spółki Fennovoima”, *PTJ* vol. 62 Z. 4 2019/01.2020.
- [10] Sawicki Ł, Horbaczewska B. Role of the state in implementation of strategic investment projects: The SaHo Model for nuclear power. *International Journal of Management and Economics*. 2021;57(4): 343-359.
- [11] Bowker T, „Exeltium Virtual Power Project Financing”, *IJ-Global*, 2010.
- [12] Nowicki P, „Efektywne zamówienia publiczne jako rezultat stosowania nowego podejścia do zamówień publicznych”, *Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości*, Warszawa 2013.
- [13] Kowalik J, „Analiza porównawcza dotycząca partnerstwa publiczno – prywatnego na przykładzie sektora energetycznego”, *Academia.edu*, 2016.
- [14] Praca zbiorowa, red. Pawełczyk M, „Współczesne problemy bezpieczeństwa energetycznego – sektor gazowy i energetyczny”, *Polska Agencja Prawa Konkurencji i Regulacji Sektorowej ius Publicum*, 2018.
- [15] MFiPR, „Raport rynku PPP 2009 – III kw. 2024”, www.ppp.gov.pl.
- [16] Urząd Regulacji Energetyki, „Metoda określania kosztu zaangażowanego kapitału dla operatorów systemów elektroenergetycznych na lata 2023 – 2028”, URE.gov.pl, 2024.
- [17] Durand P, Scott K, Carroll G, „Plant Vogtle - the true cost of nuclear power in the United States”, May 2024.
- [18] Sawicki Ł, Horbaczewska B, „Model SaHo – polski model biznesowy dla energetyki jądrowej”, *PTJ* vol. 66 z.3 2023.

MIĘDZY WOLNYM RYNKIEM A OCHRONĄ ZDROWIA – POLITYKA REGULACYJNA RADONU W USA

Between Free Market and Public Health Protection – Radon Regulatory Policy in the USA

Robert Bobkier

Streszczenie: Artykuł podejmuje problematykę ewolucji regulacji materii radonu w Stanach Zjednoczonych, wskazując na kluczowe wyzwania wynikające z uwarunkowań instytucjonalnych, ekonomicznych i ideologicznych. Analizowane są historyczne oraz współczesne strategie regulacyjne, w tym rozwój kolejnych planów działania na rzecz radonu (FRAP 2011, NRAP 2015, NRAP 2021) oraz ich skuteczność. Uwagę poświęcono amerykańskiej koncepcji „poziomu działania” (action level), pozostawiającej odpowiedzialność za ograniczanie ryzyka radonowego właścicielom nieruchomości, w przeciwieństwie do europejskiego modelu regulacyjnego, który wprowadza wiążące normy. Przedmiotem analizy są także trudności wynikające z podziału kompetencji między agencjami federalnymi oraz wpływ ograniczeń budżetowych na skuteczność polityki radonowej.

Abstract: The article addresses the issue of radon exposure regulation in the United States, highlighting key challenges stemming from institutional, economic, and ideological constraints. It examines historical and contemporary regulatory strategies, including the evolution of successive radon action plans (FRAP 2011, NRAP 2015, NRAP 2021) and their effectiveness. Special attention is given to the American concept of "action levels," which places the responsibility for radon risk mitigation on property owners, in contrast to the European regulatory model that establishes binding exposure limits. The analysis also explores the difficulties arising from jurisdictional fragmentation among federal agencies and the impact of budgetary limitations on policy effectiveness.

Słowa kluczowe: radon, regulacje środowiskowe, prawo USA, poziom działania, polityka zdrowotna, jurysdykcja agencji federalnych

Keywords: radon, environmental regulations, U.S. law, action level, health policy, federal agency jurisdiction

Wstęp

Amerykański model zarządzania zagadnieniami radonu stanowi interesujący przypadek w ramach szerszej refleksji nad filozofią prawa ochrony środowiska oraz odmiennymi tradycjami regulacyjnymi w prawie publicznym. W przeciwieństwie do europejskiego podejścia, w którym konsekwentnie dążono do ustanowienia jednolitych, wiążących norm prawnych, system amerykański pozostaje zakorzeniony w paradygmacie wolnorynkowym, podporządkowanym zasadzie subsydiarności oraz prymatowi inicjatywy prywatnej. Ta dychotomia nie zasadza się jedynie na różnicy w środkach prawnych, lecz wyraża głębszy spór o rolę państwa w zarządzaniu ryzykiem zdrowotnym oraz o filozoficzne podstawy relacji między jednostką a instytucjami publicznymi.

Wspólnota Euratom ukształtowała podejście regulacyjne w oparciu o scentralizowane, hierarchiczne mechanizmy kontroli narażenia na radon [1]. Tymczasem Stany Zjednoczone konsekwentnie rozwijały strategię opartą na rekomendacjach, dobrowolnych działaniach i rozproszonym systemie instytucjonalnym.

Ten swoisty brak normatywnego przymusu w zakresie ochrony przed radonem stanowi wyjątek w amerykańskim prawie ochrony zdrowia i środowiska, gdzie inne czynniki kancerogenne podlegają bardziej restrykcyjnym regulacjom. Zjawisko to skłania do zadania fundamentalnego pytania o granice interwencji publicznej w sytuacjach, w których ryzyko jest długoterminowe i obciążone wysokimi kosztami mitygacji.

Należy podkreślić, że analiza amerykańskiego modelu regulacji radonu nie może być sprowadzona wyłącznie do porównania skuteczności poszczególnych instrumentów prawnych. U jej podstaw leży spór o zakres odpowiedzialności państwa wobec obywateli, od epistemicznych podstaw zarządzania ryzykiem, przez napięcia między wiedzą naukową a polityką publiczną, po problem decentralizacji decyzji regulacyjnych. Rozważenie amerykańskiej ścieżki regulacyjnej jako przedmiotu odrębnej analizy uzasadnia nie tylko jej specyfika prawna i instytucjonalna, lecz także fakt, że w ciągu ostatnich dekad ulegała ona istotnym modyfikacjom, redefiniując relację między nauką, prawem a mechanizmami rynkowymi. O ile model europejski można postrzegać jako ewolucję w kierunku coraz większej

interwencji państwa, amerykańska trajektoria regulacyjna ukazuje napięcie między liberalizmem gospodarczym a koniecznością ochrony zdrowia publicznego, co czyni ją cennym przedmiotem refleksji w ramach filozofii prawa.

1. Początki. „The Stanley Watras case”

Warto podkreślić, że to właśnie w literaturze amerykańskiej sformułowano w 1951 r. przełomowe stanowisko, zgodnie z którym pochodne radonu stanowią czynnik etiologiczny raka płuc [2]. W początkowym etapie badań zakres analiz nie obejmował jednak obecności radonu w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi [3]. Powstanie Agencji Ochrony Środowiska USA (*US Environmental Protection Agency, EPA*) w 1970 r. zapoczątkowało pilotażowe badania nad stężeniami radonu w budynkach mieszkalnych. Ich efektem była publikacja raportu EPA w 1979 r., w konkluzjach którego oszacowano, że gaz ten odpowiada za 10–20% przypadków raka płuc w USA, a dzieci są dwukrotnie bardziej narażone na jego skutki niż dorośli. Dokument ten uwzględniał również analizę ekonomicznych i społecznych konsekwencji występowania wysokich stężeń radonu, wskazując na potencjalne obciążenia budżetów domowych, lokalnych administracji i rynku pracy [4, 5]. Jednocześnie w amerykańskim piśmiennictwie publikowano pierwsze szacunki dotyczące liczby zgonów spowodowanych ekspozycją na radon w pomieszczeniach zamkniętych [6, 7]. Odnotowano również korelację między termomodernizacją budynków a wzrostem stężeń radonu wewnątrz pomieszczeń, przy czym obserwacja ta pozostaje w zgodzie z wcześniejszymi ustaleniami europejskiego piśmiennictwa naukowego, które jako pierwsze zwróciło uwagę na to zjawisko [8].

Początkowo przypadki te nie wywołały ani większego zainteresowania społecznego, ani reakcji ustawodawcy. Sytuacja zmieniła się dopiero w grudniu 1984 r. w Pensylwanii, gdy rutynowa kontrola dozymetryczna Stanleya Watrasa, pracownika elektrowni jądrowej, wykazała poziom promieniowania znacznie przekraczający dopuszczalne normy [9]. Badania wykazały, że źródłem promieniowania nie było miejsce pracy Watrasa, lecz jego dom, w którym stężenie radonu wynosiło 4400 pCi/l (162 800 Bq/m³), czyli 1100 razy więcej niż rekomendowane przez EPA 4 pCi/l (148 Bq/m³) [10]. Z uwagi na okoliczność, że Watras był pracownikiem sektora jądrowego, zdarzenie to wywołało już zainteresowanie opinii publicznej i wzmoczoną presję na władze. Przekaz medialny barwnie przedstawiał, że przebywanie w domu Watrasa przez rok oznaczało narażenie na dawkę promieniowania odpowiadającą 455 000 prześwietleniom klatki piersiowej [11], stukrotnie większą niż w kopalniach uranu [12], natomiast ryzyko zachorowania na raka płuc było równoważne paleniu 135 paczek papierosów dziennie [13].

Ta nagłośniona przez środki masowego przekazu historia zwiększyła zainteresowanie problemem radonu i „zapoczątkowała amerykański przemysł radonowy” [14]. Analizy prowadzone w kolejnych latach pozwoliły na sformułowanie poglądu, że w USA każdego roku na raka płuc wywołanego ekspozycją na radon umiera nawet 30 tys. osób [15], jak również, że koszty mitygacji w 8 mln dotkniętych zjawiskiem budynków sięgają 40 mld dolarów [16], co stanowi obecnie ekwiwalent kwoty 107 mld USD.

W następstwie tzw. „sprawy Stanleya Watrasa” w amerykańskim piśmiennictwie przystąpiono do konstruowania szerokiego katalogu potencjalnych pozwanych w procesach odszkodowawczych dotyczących obecności radonu w budynkach. Zakres podmiotowy tego katalogu obejmował w szczególności geodetów, architektów, inżynierów budownictwa, sprzedawców nieruchomości, przedsiębiorstwa zajmujące się pomiarami radonu, cieśli, hydraulików, dostawców materiałów budowlanych, inspektorów budowlanych oraz wykonawców systemów wentylacyjnych [17]. Szczególnie akcentowano zasadność kierowania roszczeń przeciwko deweloperom i agentom nieruchomości sprzedającym budynki na terenach o podwyższonym ryzyku ekspozycji na radon [18], jako podmiotom dysponującym największymi możliwościami skutecznego zapobiegania zagrożeniom. Wskazywano ponadto na konieczność kompensacji nie tylko samego *damnum emergens*, lecz także również chociażby potencjalnego narażenia na ryzyko zdrowotne [19].

2. Reakcja legislacyjna

Obecność problematyki radonu w mediach wywołała stosunkowo szybką reakcję legislacyjną w Stanach Zjednoczonych. Skutkowała ona uchwaleniem dwóch aktów prawnych z dnia 17 października 1986 r.: *Radon Gas and Indoor Air Quality Research Act* oraz *Radon Assessment and Mitigation Act*. Ustawy te ufundowały podstawy finansowe podstawy do prowadzenia bardziej intensywnych badań nad przedmiotowym zagadnieniem [20].

Kolejnym aktem prawnym, wyróżniającym się już znacznie większą precyzją legislacyjną, była ustawa z dnia 28 października 1988 r. – *Indoor Radon Abatement Act* (IRAA) [21]. Zgodnie z § 2661b pkt 1 tej ustawy, jej regulacje obejmowały, oprócz szkół (§ 2662) oraz budynków federalnych (§ 2669) wyłącznie budownictwo publiczne oraz mieszkania wielorodzinne należące do Departamentu Mieszkalnictwa i Rozwoju Miast (HUD), nieruchomości socjalne oraz budownictwo przeznaczone dla ludności rdzennej. Zakres stosowania IRAA nie obejmował natomiast nieruchomości prywatnych. Ustawa przewidywała w szczególności obowiązek identyfikacji obszarów geograficznych, w których mogą występować podwyższone jego stężenia.

Zgodnie z § 2663a IRAA, mechanizm zapewnienia społeczeństwu odpowiedniej edukacji na temat zagrożeń związanych z radonem miał być realizowany poprzez aktualizację i udostępnienie przez EPA do 1 czerwca 1989 r. przewodnika *A Citizen's Guide to Radon*. Dokument ten (§ 2663b pkt 1 IRAA) miał zawierać opisy zalecanych poziomów działań (*Action Levels*), które rekomenduje się podjąć w zależności od wykrytych stężeń radonu.

Najbardziej charakterystycznym elementem amerykańskich rozwiązań prawnych, odróżniającym je od – późniejszych – regulacji europejskich była okoliczność, że ustawodawca federalny nie zdecydował się na normatywne, administracyjne określenie dopuszczalnego poziomu stężenia radonu w pomieszczeniach. W USA ograniczono się jedynie do wskazania – i to nie w samej treści IRAA, lecz w *A Citizen's Guide to Radon* – poziomów działania, które stanowią jedynie zalecenia, w zależności od wyników pomiarów stężenia radonu [22].

Podstawowy poziom działania ustalony w *A Citizen's Guide to Radon* wynosi 4 pCi/l (148 Bq/m³). W przypadku uzyskania wyższych wyników pomiarów rekomendowano dla stężeń radonu w zakresie: 4–20 pCi/l (148–740 Bq/m³) – przeprowadzanie powtórnych pomiarów przez co najmniej rok w kolejnych latach; 20–200 pCi/l (740–7400 Bq/m³) – przeprowadzanie powtórnych pomiarów z zamkniętymi oknami i drzwiami przez okres do 3 miesięcy w kolejnych miesiącach oraz redukcję stężenia do poziomu poniżej 20 pCi/l (740 Bq/m³); przekraczających 200 pCi/l (7400 Bq/m³) – przeprowadzanie powtórnych pomiarów, również z zamkniętymi oknami i drzwiami, w okresie do jednego tygodnia, tak szybko jak to możliwe. W tym przypadku zalecano także tymczasowe opuszczenie miejsca zamieszkania do czasu obniżenia stężenia radonu poniżej 200 pCi/l [23].

3. Efektywność regulacji prawnych USA dotyczących ochrony przed narażeniem na radon

Opisane w podrozdziale 2. ustawodawstwo federalne Stanów Zjednoczonych jest przedmiotem przeważająco negatywnej oceny w tamtejszym piśmiennictwie, w którym wskazuje się, że koszty osiągnięcia celów IRAA przekraczają możliwości finansowe właścicieli budynków [24]. Już w XXI w. postulowano – co nie jest częste w amerykańskiej doktrynie – by rozważyć zmiany w obrębie unormowań, zbliżające je do rozwiązań legislacyjnych przyjętych w innych państwach [25].

Wydaje się, że – przynajmniej z eurocentrycznego punktu widzenia nie do końca zasadnie – punkt ciężkości tej krytyki spoczywał na ograniczonej efektywności mechanizmu edukacyjnego, ustanowionego w ramach IRAA. Moim zdaniem jednak kluczowym czynnikiem wpływającym na efektywność amerykańskiej polityki była nie tyle niska skuteczność działań informacyjnych, lecz przede wszystkim przyjęcie

podejścia nieregulacyjnego oraz bariery finansowe, które znacząco wpłynęły na stopień implementacji założeń ustawowych.

3.1. Aspekt informacyjno-edukacyjny

Kilka kluczowych czynników wpłynęło, w opinii amerykańskiego piśmiennictwa, na niską skuteczność federalnej kampanii informacyjnej dotyczącej radonu. Po pierwsze, wysokie koszty pomiarów i redukcji stężeń radonu sprawiają, że wielu właścicieli nieruchomości postrzega te działania jako nieopłacalne. Po drugie, poczucie bezpieczeństwa związane z posiadaniem domu powoduje niechęć do akceptowania informacji o potencjalnym zagrożeniu. Rządowy przekaz powinien więc akcentować, że działania naprawcze są dostępne i skuteczne. Kolejno, strach przed deprecjacją wartości majątku i „stygmatyzacją” w społecznościach lokalnych prowadzi do unikania testowania. Rozwiązaniem może być zaangażowanie liderów społeczności do promowania transparentności wyników badań. Dodatkowo, trudność w postrzeganiu radonu jako realnego zagrożenia wynika z jego długofalowego wpływu na zdrowie, który jest mniej dostrzegalny niż skutki natychmiastowych zagrożeń. Dlatego rekomenduje się stopniowe budowanie świadomości poprzez częstsze przekazywanie informacji w mniejszych dawkach. Piątym problemem jest brak adekwatnych porównań ryzyka – skuteczniejsze byłoby zestawianie zagrożenia radonem z dobrze znanymi czynnikami rakotwórczymi, jak dym tytoniowy czy azbest, zamiast nieadekwatnych analogii do wypadków losowych. Wreszcie, sprzeczne, wzajemnie się wykluczające informacje i pseudonaukowe treści w Internecie utrudniają rzetelną komunikację o zagrożeniach, do tego stopnia, że ma miejsce „pandemia dezinformacji” („infodemia”), utrudniająca skuteczne działania edukacyjne w zakresie radonu [26, 27].

Zaobserwowano, że informacje o radonie są łatwiej przyswajane, gdy przedstawia się je wizualnie, np. w formie map zagrożeń, nie zaś w formie tekstowej [28]. Badania wskazują, że w tym kontekście najskuteczniejsze są metody opisowe charakterystyczne dla mediów masowych, które lepiej przyciągają uwagę niż przekaz naukowy. Komunikacja narracyjna zapewnia wyższą retencję wiedzy [29]. Postuluje się, by – z uwagi na dostępność informacji dla najmłodszych – przekazywano informacje w formacie podobnym do gier komputerowych [30]. Takie formy komunikacji, zwłaszcza wzbogacone o argumentację odwołującą się do emocji, przeważają nad przekazem ustnym i pisemnym. Skuteczność w tym zakresie podnosi wykorzystanie mediów społecznościowych i YouTube [31, 32].

3.2. Aspekt regulacyjny

Krytyczna – w piśmiennictwie USA – ocena amerykańskiego ustawodawstwa dotyczącego radonu koncentruje się głównie na ograniczonej skuteczności

działań edukacyjnych przewidzianych w IRAA. Z perspektywy europejskiej można jednak wskazać dodatkowe powody negatywnej oceny, które rzadziej pojawiają się w tamtejszej literaturze.

Po pierwsze, IRAA nie ustanawia administracyjnie określonych dopuszczalnych poziomów radonu w pomieszczeniach, a jedynie zaleca „poziomy działań” w przewodnikach EPA. To podejście kontrastuje z surowymi regulacjami dotyczącymi innych czynników rakotwórczych w USA [33]. Zamiast regulacji prawnych, EPA uzyskała jedynie uprawnienia do badań, wsparcia technicznego i finansowego dla stanów oraz wydawania zaleceń. Jest to tym bardziej zaskakujące, że od lat 70. kwestie ochrony środowiska w USA budzą silne emocje, a EPA miała kluczową rolę w kształtowaniu polityki środowiskowej [34].

Niektórzy badacze uzasadniali przyjęte podejście nieregulacyjne (*non-regulatory approach*) argumentacją, że podjęcie działań dobrowolnych jest skuteczniejsze, zarazem przyznając jednocześnie, że bez interwencji regulacyjnej nie uda się przezwyciężyć społecznej apatii [35]. Inni autorzy sugerowali, że to brak międzynarodowego konsensusu w sprawie norm stężeń radonu utrudniał ich wdrożenie na poziomie krajowym. Jednak te uzasadnienia nie są przekonujące w świetle ścisłych regulacji dotyczących innych czynników rakotwórczych w USA [36, 37].

W literaturze amerykańskiej pojawia się argument, że ustanowienie administracyjnych limitów stężeń radonu w pomieszczeniach mogłoby skutecznie ograniczyć liczbę zgonów na raka płuc. Nawet niewielkie obniżenie poziomu radonu poprzez interwencję legislacyjną przyniosłoby korzyści zdrowotne i społeczne. Podkreśla się, że EPA powinna mieć mandat do ustalania dopuszczalnych poziomów radonu, a nie jedynie wydawać zalecenia bez mechanizmów ich egzekwowania [38]. Istnieje także obawa, że brak regulacji może prowadzić do lekceważenia ryzyka radonowego przez społeczeństwo [39].

Ten stan, w którym federalne przepisy USA ograniczają się do jedynie do określenia zalecanych poziomów działań, bez prawnie określonych progów dopuszczalnych stężeń, Moore określił w 1988 r. jako „dylemat radonowy” [40]. Współczesna ochrona radiologiczna opiera się przecież na założeniu, że ryzyko nowotworowe nie ma progu dolnego, stąd Boichicchio argumentował w 2008 r., że polityka kontroli radonu powinna obejmować nawet niskie jego stężenia, co mogłoby znacząco ograniczyć liczbę przypadków raka płuc [41].

Powyższy amerykański *non-regulatory approach* w odniesieniu do radonu różnił się więc od tego europejskiego niejako *ab initio* – jako że decyzja o pomiarach i działaniach naprawczych zależy wyłącznie od właścicieli nieruchomości, a nie od rzeczywistego poziomu zagrożenia w danym rejonie.

Wydaje się, że w polskiej literaturze przedmiotu do tej pory nie podnoszono istotnej kwestii, dotyczącej efektywności amerykańskiego nieregulacyjnego podejścia do redukcji ryzyka związanego z narażeniem na radon. W piśmiennictwie wskazuje się, że model ten cechuje się znacząco wyższą efektywnością w porównaniu do strategii regulacyjnych stosowanych w Europie [42]. Kluczowym elementem różnicującym oba podejścia jest metodologia pomiarowa. W Stanach Zjednoczonych powszechnie stosuje się pomiary krótkoterminowe (od 2 do 7 dni) [43, 44], podczas gdy w Europie dominują pomiary długoterminowe – od trwających, co najmniej miesiąc w Polsce (art. 3 pkt 47a Prawa atomowego [45]), po trwające rok w Niemczech (§ 124 zd. 1 StrlSchG [46]). Warto nadmienić, że cena jednostkowa typowego, jednorazowego narzędzia pomiarowego, powszechnie dostępnego w amerykańskich supermarketach wynosi 7 USD, a wynik pomiaru dostarczany jest online w ciągu 5 dni roboczych [47]. W rezultacie ilość dokonanych w USA od wejścia IRAA w życie pomiarów stężeń radonu szacowana jest na kilkadziesiąt milionów, co stanowić może wartość do 100 razy większą niż w Unii Europejskiej [48, 49]. Rzecz jasna poza sporem pozostaje, że preferowane na Starym Kontynencie pomiary długoterminowe wyróżniają się wyjątkową dokładnością w uchwyceniu rocznych wzorców narażenia, ograniczając (w przypadku polskim) lub wręcz eliminując (jak w przypadku niemieckim) niepewność czasową. Niemniej jednak, jak zasadnie wskazano w publikacji z 2024 r., to właśnie ich „zasobochłonna natura często prowadzi do niskiego poziomu przeprowadzonych testów i ograniczonej liczby wdrożonych środków zaradczych, co budzi pytania o ich ogólną efektywność” [50].

3.3. Aspekt finansowy

Drugim, rzadziej omawianym negatywnym aspektem amerykańskiego ustawodawstwa radonowego są jego skutki finansowe. Zgodnie z sekcją 2662 IRAA, regulacje tej ustawy dotyczyły jedynie instytucji edukacyjnych i wybranych nieruchomości publicznych, a właściciele prywatnych nieruchomości nie otrzymywali żadnej pomocy federalnej. Co więcej, sekcja 2665(d)(2-3) IRAA nakładała na podmioty inne niż administracja publiczna obowiązek pokrywania kosztów udziału w programach EPA dotyczących radonu.

Rozwiązanie to wynika, wskazali Saum i Messing, z konstytucyjnej zasady polegania na sektorze prywatnym, „kiedy tylko jest to możliwe”. W przypadkach, w których radon stanowi zagrożenie w budynkach prywatnych, ingerencja rządu federalnego, nawet w postaci finansowania pomiarów, byłaby sprzeczna z zasadą ochrony własności. W miejsce podejścia regulacyjnego administracja ogranicza się, więc jedynie do informowania społeczeństwa, a sama eliminacja zagrożeń została powierzona rynkowi – i winna być

pokrywana przez właścicieli nieruchomości. Tak ufun-
dowany „przemysł radonowy” ma być, wywodzą wska-
zani autorzy, logiczną alternatywą dla biurokracji, efek-
tywnie ograniczającą wydatki publiczne [51].

W 1998 r. EPA zdecydowała się na działania, okre-
ślane jako prywatyzacja programu radonowego, co
tłumaczono brakiem środków na działania wykracza-
jące poza wąskie ramy IRAA. Argumentowano w tym
zakresie, że systemy komercyjne działają sprawniej i są
tańsze dla podatników [52]. Podejście to wpisuje się
w dominującą w USA narrację wolnorynkowej ochro-
ny środowiska (*free-market environmentalism*), zgodnie
z którą regulacje środowiskowe powinny być minimali-
zowane na rzecz mechanizmów rynkowych [53]. W ra-
mach tej retoryki, jeszcze podczas pierwszej kadencji
prezydenta USA Donalda Trumpa podjęto w 2017 r.
działania zmierzające do ograniczenia części budżetu
EPA, przeznaczonego na program radonowy [54].

4. Rewizja podejścia w XXI w. – Radonowe Plany Działania

W 2011 r., gdy od wejścia w życie IRAA minęło
ćwierćwiecze, problem radonu nadal dotyczył w USA
9 200 000 budynków [55]. W związku z tym EPA podję-
ła próbę rewizji dotychczasowego podejścia. Próba ta
objawiła się w formie kolejnych Radonowych Planów
Działania.

Celem ogłoszonego w 2011 r. Federalnego Radono-
wego Planu Działania (*Federal Radon Action Plan 2011*)
było skoordynowanie rozproszonych działań agencji fe-
deralnych, które wcześniej niezależnie zajmowały się tą
problematyką. Plan ten zakładał wdrożenie powszech-
nych pomiarów stężeń radonu oraz zachęt finanso-
wych dla właścicieli nieruchomości. Jego zasadniczym
założeniem było wyposażenie do 2021 r. 30% (około
3 mln) już istniejących budynków w systemy ograni-
czające stężenia radioaktywnego gazu. Jednocześnie
wszystkie nowo budowane domy na terenach o wyso-
kim potencjale radonowym miały zostać zaopatrzone
w analogiczną technologię. Zwracano również uwagę
na istotne braki w świadomości społecznej, ponieważ
mimo wieloletnich działań EPA, aż 88% Amerykanów
nadal nie było świadomych rakotwórczego działania
radonu [56]. Te ambitne zamierzenia nie zostały osią-
gnięte. W miejsce planowanych 30% domów, jedynie
16% z nich wyposażono w systemy redukujące radon.
W nowych budynkach założenie zrealizowano w zale-
dwie jednej trzeciej przypadków. Natomiast pomiary
stężeń radonu w budynkach publicznych zrealizowano
jedynie w 12% planowanych obiektów [57].

W październiku 2015 r. EPA ogłosiła przedwczesne
zakończenie Federalnego Planu z 2011 r. i wdrożenie
nowego – tym razem Narodowego Radonowego Pla-
nu Działania (*National Radon Action Plan 2015*). Miał
on opierać się na „sukcesach Planu z 2011 r., które

„doprowadziły do ochrony 105 000 domów przed ra-
donem” [58]. Jednak pierwotnym celem w 2011 r. było
przecież objęcie ochroną 3 mln budynków, co podwa-
ża optymizm tej narracji. Cele Narodowego Planu istot-
nie ograniczono w porównaniu do jego poprzednika.
W miejsce zapobieżenia „dziesiątkom tysięcy zgonów”,
założono zmniejszenie liczby zgonów o 3 200 rocznie
do 2020 r. oraz redukcję stężeń radonu w mniejszej lic-
bie budynków [59]. Pod względem założeń, Plan z 2015 r.
powielał wcześniejsze strategie, ograniczając ilościowo
zamierzone cele. Mimo tej limitacji EPA w 2021 r. wska-
zała na istnienie szeregu systemowych barier, unie-
możliwiających realizację Planu, wymieniając w tym za-
kresie ograniczenia finansowe, wadliwość istniejących
unormowań oraz problemy organizacyjne [60].

Kolejnym etapem rewizji amerykańskiej polityki re-
gulacyjnej był Narodowy Radonowy Plan Działania na
lata 2021-2025 (*National Radon Action Plan 2021-2025*).
Ta najnowsza edycja formułuje cele, co do zasady, po-
dobne do poprzedniego Planu, zakładając zapobie-
żenie 3 500 zgonów rocznie, zarazem sygnalizując już
explicite potrzebę pełnej prywatyzacji działań związa-
nych z radonem [61]. Skuteczność aktualnego Planu
wymyka się jeszcze ocenie, jednak w piśmiennictwie
formułowane są względem niego o tyle głosy krytycz-
ne, że koncentruje się on jedynie na raku płuc jako skut-
ku narażenia na radon, pomimo istnienia badań wska-
zujących na związkach radonu z innymi chorobami
onkologicznymi i nieonkologicznymi [62, 63].

5. Podsumowanie

Regulacja ekspozycji na radon w Stanach Zjedno-
czonych ukazuje zasadnicze napięcia między ideolo-
gicznie motywowanym dystansem wobec interwencji
państwa, postępem naukowym a ograniczeniami eko-
nomicznymi. Analiza amerykańskiego modelu unor-
mowania omawianej problematyki odsłania złożoną
strukturę systemu prawnego, w którym brak jedno-
znacznej centralizacji odpowiedzialności skutkować
może częściowym podejściem do problemu. Powoła-
nie do życia EPA miało ustrukturyzować działania admi-
nistracji federalnej w tej dziedzinie, lecz wciąż nie roz-
wiązało problemu braku jednoznacznej koordynacji.
Kolejne Radonowe Plany Działania ujawniają tenden-
cję, by uczynić sektor prywatny kluczowym aktorem
w zakresie redukcji narażenia na radon.

Specyfiką amerykańskiej polityki radonowej jest
konceptcja „*action levels*” – poziomów wyznaczających
próg rekomendowanego działania, które jednak nie
są prawnie wiążące. To fundamentalna różnica wzglę-
dem europejskiego modelu, w którym obowiązują
poziomy odniesienia dla stężenia radonu. Brak mecha-
nizmów egzekwowania redukcji zagrożenia sprawia,
że problematyka radonu w Stanach Zjednoczonych

pozostaje głównie kwestią prawa cywilnego, a nie administracyjnego.

Nie można pominąć także roli czynników ekonomicznych, które od dekad wpływają na kształtowanie regulacji. Już w latach 80. sygnalizowano niewystarczające finansowanie EPA, a w 2017 r. próbowano niemal całkowicie zredukować budżet na działania związane z radonem. W efekcie postępuje proces prywatyzacji odpowiedzialności – NRAP 2021 wprost zakłada, że głównym mechanizmem redukcji ryzyka ma być rozwój sektora usług profesjonalnych.

Na tle tych uwarunkowań warto podkreślić, że model amerykański, mimo braku administracyjnych narzędzi regulacyjnych, wykazuje istotne cechy efektywności. Powszechność pomiarów krótkoterminowych oraz ich niska cena jednostkowa sprzyjają dostępności diagnostyki, co tłumaczy znacznie większą skalę testów w USA niż w Europie. Decentralizacja odpowiedzialności oraz oparcie systemu na mechanizmach rynkowych doprowadziły do wykonania pomiarów stężeń radonu w ilościach o rzędy wielkości przewyższających te, dokonane w Unii Europejskiej. Przyjęta w Stanach Zjednoczonych strategia masowego, taniego testowania, pomimo pełnej świadomości ograniczeń wynikających z niepewności krótkoterminowych pomiarów, umożliwia statystycznie szeroką ocenę stężeń radonu w budynkach. Takie podejście pozwala na skuteczniejsze mapowanie obszarów podwyższonego ryzyka i formułowanie bardziej kompleksowych strategii zarządzania ekspozycją na ten czynnik.

Z perspektywy filozofii prawa amerykańska regulacja radonu stanowi klasyczny przykład konfrontacji liberalnego podejścia do prawa z potrzebą ochrony dobra wspólnego. Wybór konceptu „action level” zamiast norm prawnie egzekwowalnych ukazuje, jak dalece filozofia amerykańskiego prawa odrzuca paternalistyczną rolę państwa na rzecz prymatu decyzji jednostki. Jest to jednak wybór obciążony konsekwencjami – literatura wskazuje, że mechanizmy dobrowolnej redukcji narażenia nie osiągnęły oczekiwanych efektów.

Podsumowując, regulacja radonu w Stanach Zjednoczonych pozostaje sferą nieustannego kompromisu między naukową koniecznością, ograniczeniami finansowymi a ideologicznymi uprzedzeniami wobec regulacji. Z punktu widzenia teorii prawa, stanowi studium przypadku, w którym normatywny minimalizm przenosi ciężar ochrony zdrowia publicznego z państwa na obywateli, przy jednoczesnym braku skutecznych narzędzi do zapewnienia ich bezpieczeństwa. Doświadczenia amerykańskie różnią się od tych europejskich, niemniej jednak ich analiza pozwala, pomimo oczywistych odrębności ustrojowych, na całościową ocenę również i wprowadzonych w 2019 r. polskich rozwiązań normatywnych.

Robert Bobkier,
Abraham & Ben Hadar Law and Audit

Literatura:

- [1] Kovler, K., Tsapalov, A., Bobkier, R., Wiegers, R., Schroyers, W., Kovács, T., Toth-Bodrogi, E., El Bounagui, O., Babczuk, A., 2025. Indoor radon and NORM in building materials: Critical analysis of the current European regulation and road map for the next decade. *Journal of Environmental Radioactivity*, 107668.
- [2] Bobkier, R., Kovler, K., Tsapalov, A., 2025. “Fusion of Horizons”: Part I. Historical context and early radon discoveries (until 1951). *Journal of Environmental Radioactivity* 283, 107636.
- [3] Pearson, J.E., 1967. Natural Environmental Radioactivity from Radon 222. U.S., *Department of Health, Education, and Welfare*.
- [4] Ruckelshaus, W.D., 1984. Environmental protection: a brief history of the environmental movement in America and the implications abroad. *Environmental Law* 15, 455.
- [5] Guimond, R., Elliott, W., Fitzgerald, J., Windham, S., Cumy, P., 1979. Indoor Radiation Exposure Due to Radium-226 in Florida Phosphate Lands. *Environmental Protection Agency*.
- [6] Nero, A., 1983. Indoor radon exposures from 222Rn and its daughters. *Health Phys.* 2, 277–288.
- [7] Harley, N., 1984. Radon and lung cancer in mines and homes. *N. Engl. J. Med.* 23, 1525–1526.
- [8] Bobkier, R., 2024. Ewolucja badań i regulacji prawnych radonu do 1980 r. jako przykład gadamerowskiego „stapiania horyzontów”: Wstęp do problematyki filozoficznego wymiaru prawa atomowego. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki* 4, 37–56.
- [9] Smay, V.E., 1985. Radon exclusive. *Popular Sci.* 11, 76–77.
- [10] King, R.D., 1993. The legal implications of residential radon contamination: the first decade. *William Mary Environ. Law Pol. Rev.* 1, 108.
- [11] Rickard Jackowitz, A., 1988. Radon’s radioactive ramifications: how federal and state governments should address the problem. *Boston Coll. Environ. Aff. Law Rev.* 16, 330.
- [12] Galen, M., 1986. Lawyers grapple with the radon issue: litigation surge likely. *Natl. Law J.* 7, 243.
- [13] Shuko, C.M., 1986. Radon gas: contractor liability for an indoor health hazard. *Am. J. Law Med.* 2, 241.
- [14] George, A.C., 2015. The history, development and the present status of the radon measurement programme in the United States of America. *Radiat. Protect. Dosim.* 1–3, 8–9.
- [15] Nichols, R.M., 1990. Construction Contractors Confront the Indoor Radon Hazard: Homeowners’ Private Causes of Action and a Federal Response with the Indoor Radon Abatement Bill. *Washington University Journal of Urban & Contemporary Law*, 37, 135.
- [16] Hanson, B., 1978. EPA guideline for indoor radon levels evokes response from nuclear medicine. *Society of Nuclear Medicine Newslines* 7, 1087.
- [17] Sherman, R., 1986. Radon and real estate: potentially costly mixture. *New York Law Review* 2–3, 27 November 1986.

- [18] Cross, F.B., Murray, P.C., 1988. Liability for toxic radon gas in residential home sales. *N. C. Law Rev.* 1, 703.
- [19] Locke, P.A., 1990. Promoting radon testing, disclosure, and remediation: protecting public health through the home mortgage market. *Environmental Law Reporter News & Analysis* 20, 13.
- [20] Sextro, R.G., Offermann, F.J., Nazaroff, W.W., Nero, A., Revzan, K.L., Yater, J., 1986. Evaluation of indoor aerosol control devices and their effects on radon progeny concentrations. *Environ. Int.* 12, 429–438.
- [21] Indoor Radon Abatement Act, 1988. Pub. L. No. 100-551, 102 Stat. 2755 (codified as amended at 15 U.S.C. §§ 266-67). <https://uscode.house.gov/view.xhtml?path=/prelim@title15/chapter53/subchapter3&edition=prelim>. (Accessed 15 February 2025).
- [22] Bobkier, R., Kovler, K., Tsapalov, A., 2025. "Fusion of Horizons": Part II. Modernizing radon regulation (1954–1993). *Journal of Environmental Radioactivity* 283, 107637.
- [23] A Citizen's Guide to Radon, 1990. *United States Environmental Protection Agency*, pp. 7–11.
- [24] Dyess, T.M., Osborne, M.C., 1991. The U.S. EPA Office of Research and Development: Overview of Current Radon Research Report EPA/600/D-91/259. *Environmental Protection Agency*, 484.
- [25] Angell, W.J., 2008. The US radon problem, policy, program and industry: achievements, challenges and strategies. *Radiation Protection Dosimetry* 1.
- [26] Fisher, A., Johnson, F.R., 1990. Radon risk communication research: Practical lessons. *Journal of the Air & Waste Management Association* 5, 5.
- [27] WHO, 2019. Ten threats to global health in 2019. <https://www.who.int/newsroom/spotlight/tenthreatstoglobalhealthin2019>, (Accessed 16 March 2025).
- [28] Burns, S.F., Ashbaugh, S.G., Paris, R., Toombs, G., 1998. Presentation of radon potential maps to the public: A case history for Portland, Oregon. In: Welby, C.W., Gowan, M.E. (Eds.), *A paradox of power*. Geological Society of America, 43–52.
- [29] Desvousges, W.H., Smith, V.K., Rink, H.H., 2022. Communicating radon risks effectively: The Maryland experience. In: Smith V.K. (Ed.), *The Economics of Environmental Risk. Information, Perception and Valuation*. Edward Elgar Publishing, 224–229.
- [30] LaTour, M., Tanner, J.F., 2003. Radon: Appealing to our fears. *Psychology & Marketing* 5, 377–394.
- [31] Lemos, J. de, Brugge, D., Cajero, M., Downs, M., Durant, J., George, C.M., Henio-Adeky, S., Nez, T., Manning, T., Rock, T., Seschillie, B., Shuey, C., Lewis, J., 2009. Development of risk maps to minimize uranium exposures in the Navajo Churchrock mining district. *Environmental Health* 8, 13.
- [32] Sixto-García, J., García-Orosa, B., González-Lois, E., Pascual-Presa, N., 2025. Transparency on YouTube for radon risk communication. *Revista Latina de Comunicación Social* 83.
- [33] Marcinowski, F., Napolitano, S., 1993. Reducing the Risks from Radon. *Air & Waste* 7, 956.
- [34] McMahon, R., 2006. The Environmental Protection Agency: Structuring Motivation In A Green Bureaucracy: The Conflict Between Regulatory Style And Cultural Identity. *Sussex Academic Press*, 11.
- [35] Oge, M., 1992. Overview of the United States Environmental Protection Agency Radon Action Programme. *Radiation Protection Dosimetry* 1–4.
- [36] Ahmed, J.U., 1992. Regulatory approach toward controlling exposure to radon in dwellings. *Radiation Protection Dosimetry* 1–4, 747–749.
- [37] McLaughlin, J.P., 1996. Natural radiation hazards: Radon in the home and in the workplace. In: Chernobyl – 10 Years On: A Conference on Radiological Protection and a Review of the Health Consequences of the Chernobyl Accident: Proceedings of a Conference organised by the Radiological Protection Institute of Ireland and held in Dublin, 30 April 1996. *Radiological Protection Institute of Ireland*.
- [38] Boschi, N., 1998. A risk management strategy for radon: The US experience. *Radiation Protection Dosimetry* 1, 25.
- [39] Vanmarcke, H., 2008. Radon: a special case in radiation protection. *Radiation Protection Dosimetry* 1, 77.
- [40] Moore, J.I., 1988. The Radon Review: The Federal and State Government's Response to Indoor Radon Contamination. *Temple Journal of Science, Technology & Environmental Law* 7, 46.
- [41] Bochicchio, F., 2008. The radon issue: considerations on regulatory approaches and exposure evaluations on the basis of recent epidemiological results. *Applied Radiation and Isotopes* 11, 1564.
- [42] Tsapalov, A., Kovler, K., 2021. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation. *Environmental Challenges* 4, 100204.
- [43] EPA, 2024. Home Buyer's and Seller's Guide to Radon. *Environmental Protection Agency*, EPA 402/K-24/001, 14–15.
- [44] AARS, 2019. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. *AARST Consortium on National Radon Standards*, MAH 2019.
- [45] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277 z późn. zm.).
- [46] Ustawa z dnia 27 czerwca 2017 o ochronie przed szkodliwym działaniem promieniowania jonizującego, *Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 27. Juni 2017 (Bundesgesetzblatt I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Mai 2021 (BGBl. I S. 1194; 2022 I 15) geändert worden ist (Strahlenschutzgesetz, StrlSchG)*.
- [47] Walmart, 2025. *PRO-LAB RA100 Radon Gas Do It Yourself Test Kit*, <https://www.walmart.com> (Accessed 19 March 2025).
- [48] Kovler, K., Tsapalov, A., 2023. A challenging path to rational and harmonized international regulation of indoor radon. *Radiation Protection Dosimetry* 199, 1047–1055.
- [49] Tsapalov, A., Kovler, K., Kiselev, S., Yarmoshenko, I., Bobkier, R., Miklyaev, P., 2025. IAEA Safety Guides vs. Actual Challenges for Design and Conduct of Indoor Radon Surveys. *Atmosphere* 16(3), 253.
- [50] Mphaga, K.V., Mbonane, T.P., Utembe, W., Rathebe, P.C., 2024. Short-Term vs. Long-Term: A Critical Review of Indoor Radon Measurement Techniques. *Sensors* 24(14), 4575.
- [51] Saum, D., Messing, M., 1991. EPA radon policy and its effects on the radon industry. In: The 1991 International

- Symposium on Radon and Radon Reduction Technology, April 2-5, 1991, Pennsylvania. *Environmental Protection Agency*.
- [52] Tracy, T., Jackson, I., Shipman, M., 2001. Bush EPA Faces Tough Choices over Clinton-Era Water Rules in 2002. *Inside EPA Water Policy Report* 27, 22.
- [53] Beder, S., 2006. The changing face of conservation: commodification, privatisation and the free market. *University of Wollongong Faculty of Arts Papers* 6, 7.
- [54] Stockton, N., 2017. Trump Wants the EPA Radon Program Cut. So Do Some Scientists. *Wired* 31.07.2017, <https://www.wired.com/story/to-radon-or-radont-that-is-the-question/>, (Accessed 19 January 2025).
- [55] Vogeltanz-Holm, N., Schwartz, G.G., 2018. Radon and lung cancer: What does the public really know. *Journal of Environmental Radioactivity* 192, 26.
- [56] FRAP, 2011. Protecting People and Families from Radon: A Federal Action Plan for Saving Lives. *Environmental Protection Agency*.
- [57] Gordon, K., Terry, P.D., Liu, X., Harris, T., Vowell, D., Yard, B., Chen, J., 2018. Radon in schools: a brief review of state laws and regulations in the United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10, 1.
- [58] Clair, C.S., 2015. EPA and Partners Announce National Plan to Prevent Lung Cancer Deaths Due to Radon Exposure. *Environmental Protection Agency News Releases*, 11 October 2015, <https://www.epa.gov/archive/epa/new-releases/epa-and-partners-announce-national-plan-prevent-lung-cancer-deaths-due-radon-exposure.html>, (Accessed 16 February 2025).
- [59] NRAP, 2015. National Radon Action Plan 2015: A Strategy for Saving Lives. *Environmental Protection Agency*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-05/documents/nrap-a_strategy_for_saving_lives_-_final.pdf, (Accessed 29 January 2025).
- [60] EPA, 2021. Reflections on the National Radon Action Plan's (NRAP) Progress, 2015–2020: NRAP 2020. *Environmental Protection Agency*. http://www.radonleaders.org/sites/default/files/2021-11/NRAP_Accomplishments_2015-2020_Alt-CVR_508.pdf, (Accessed 28 January 2025).
- [61] EPA, 2022. The National Radon Action Plan 2021–2025: Eliminating Preventable Lung Cancer From Radon in the United States by Expanding Protections for All Communities and Buildings, 2022. *Environmental Protection Agency*.
- [62] Anthony, K.M., Collins, J.M., Love, S.A., Stewart, J.D., Buchheit, S.F., Gondalia, R., Schwartz, G., Huang, D., Meliker, J.R., Zhang, Z., Barac, A., Desai, P., Hayden, K.M., Honigberg, M., Jaiswal, S., Natarajan, P., Bick, A., Kooperberg, C., Manson, J., Reiner, A., Whitsel, E., 2024. Radon Exposure, Clonal Hematopoiesis, and Stroke Susceptibility in the Women's Health Initiative. *Neurology* 2.
- [63] Lu, L., Zhang, Y., Chen, C., Field, R.W., Kahe, K., 2022. Radon exposure and risk of cerebro-vascular disease: a systematic review and meta-analysis in occupational and general population studies. *Environmental Science and Pollution Research* 30, 45031–45043.



XX Zjazd Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. Marii Skłodowskiej-Curie

Kraków, 25-27 września 2025 r.

Z przyjemnością informujemy, że XX Zjazd Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. Marii Skłodowskiej-Curie odbędzie się w Krakowie w dniach 25-27 września 2025 r. Organizatorem Zjazdu jest Krakowski Oddział PTBR.

Program naukowy Zjazdu obejmować będzie zagadnienia związane z najnowszymi osiągnięciami w takich dziedzinach, jak radioterapia, radiobiologia, chemia radiacyjna i fotochemia, higiena radiacyjna (w tym ochrona radiologiczna i promieniowanie jonizujące w środowisku), a także bioelektromagnetyzm, ochrona przed promieniowaniem niejonizującym oraz inne pokrewne obszary badań.

Podczas Zjazdu wręczone zostaną medale imienia patronki Towarzystwa, Marii Skłodowskiej-Curie. Wyróżnienia te przyznawane są wybitnym polskim naukowcom, którzy wnieśli istotny wkład w badania radiacyjne, a także zagranicznym uczynom, którzy przyczynili się do rozwoju tych badań w Polsce.

Od 1971 r. Zarząd Główny PTBR przyznaje również nagrody za najlepsze prace naukowe w dziedzinie promieniowania jonizującego i niejonizującego, w obszarze nauk biologicznych i fizyko-chemicznych.

Szczegółowe informacje na temat Zjazdu będą systematycznie publikowane na stronie internetowej PTBR, w zakładce XX Zjazd PTBR: <http://www.ptbr.org.pl/xx-zjazd-ptbr.html>.

dr inż. Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



70. ROCZNICA POWOŁANIA INSTYTUTU BADAŃ JĄDROWYCH

4 czerwca 1955 r., na podstawie uchwały Prezydium Rządu nr 419/55 powołano Instytut Badań Jądrowych (IBJ) Polskiej Akademii Nauk (PAN) w Warszawie. Decyzji tej nadano szczególną rangę, powołując równocześnie Komisję Rządową ds. Pokojowego Wykorzystania Energii Jądrowej, której przewodniczył pierwszy zastępca prezesa Rady Ministrów Hilary Minc, oraz Komitet ds. Pokojowego Wykorzystania Energii Jądrowej przy Prezydium PAN. Organom tym powierzono nadzorowanie i koordynowanie prac nad realizowaniem postanowień zawartych w uchwale. Prezydium PAN, już 19 lipca 1955 r., specjalną uchwałą powołało kierownictwo Instytutu. Pierwszym dyrektorem IBJ został prof. dr Andrzej Sołtan. Po jego rezygnacji, w 1957 r., kierownictwo objął prof. Jan Paweł Nowacki.

14 czerwca 1958 r. w IBJ uruchomiono pierwszy reaktor EWA (Eksperymentalny, Wodny, Atomowy). W następnych latach oddano do użytku reaktory o zerowej mocy: MARYLA, ANNA i AGATA, służące do badań fizyki reaktorów.

W roku 1961 r. w Różanie, w powiecie makowskim, rozpoczęto eksploatację składowiska powierzchniowego służącego do składowania odpadów promieniotwórczych krótkożytych oraz do przechowywania odpadów promieniotwórczych długożytych nazwanego w tamtych czasach Centralną Składowicą Odpadów Promieniotwórczych. Obecnie obiekt ten funkcjonuje pod nazwą Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych.

W 1966 r. podjęto decyzję o budowie drugiego polskiego reaktora badawczego o nazwie MARIA, który został w całości zbudowany przez polskich specjalistów i uruchomiony w Świerku 18 grudnia 1974 r.

Przez niemal trzy dekady działalności, naukowcy nie tylko rozwijali reaktory, lecz także zdobyli doświadczenie w budowie akceleratorów, detektorów oraz urządzeń plazmowych.

W 1982 r. IBJ został podzielony na trzy oddzielne instytuty związane z atomistyką:

- Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana – obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych;
- Instytut Chemii i Techniki Jądrowej;
- Instytut Energii Atomowej – obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych.

W związku z powyższym jubileuszem 3 numer *Postępów Techniki Jądrowej* będzie specjalnym wydaniem poświęconym 70-leciu atomistyki w Polsce.

*Krzysztof Madaj,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*



ZANIM RUSZY W POLSCE ENERGETYKA JĄDROWA

Już w 2006 r. pierwszy raz liczba zwolenników elektrowni jądrowych w Polsce przewyższyła liczbę przeciwników. To rezultat wieloletniej kampanii. Elementami bardzo sprzyjającymi były edukacja społeczeństwa oraz groźba zamykania kurków energetycznych przez różnych dostawców. Zrozumiano, że w porównaniu do węglowej, elektrownia jądrowa jest bardziej ekonomiczna, znacznie czystsza i bezpieczniejsza dla ludzi i środowiska, o ile oczywiście bloki jądrowe są eksploatowane zgodnie z bardzo wysokimi światowymi standardami.

Obecnie trwają negocjacje odnośnie lokalizacji w Polsce kilku elektrowni jądrowych. Najprawdopodobniej pierwsza powstanie w gminie Choczewo na Pomorzu. Są rozważane projekty budowy elektrowni w Koninie (Wielkopolska) oraz w Bełchatowie (woj. Łódzkie). Niewielkie elektrownie z reaktorami typu SMR mają powstać w Małopolsce: np. Stawach Monowskich, koło Oświęcimia czy w Nowej Hucie. Przewiduje się budowę kilkunastu małych elektrowni jądrowych z reaktorem typu SMR.

Spośród pakietu ustaleń dotyczących wprowadzenia energetyki jądrowej obok finansowania niezwykle ważne są warunki bezpieczeństwa radiologicznego. Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) jest koordynatorem Ogólnopolskiej Sieci Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej. Pracownia Skażeń Promieniotwórczych IFJ PAN kierowana przez prof. Jerzego Mietelskiego od wielu lat prowadzi pełny monitoring radioaktywności uwalnianej do środowiska i ma rangę jednego z kilku istniejących w Polsce tzw. laboratoriów specjalistycznych polskiego systemu monitoringu radioaktywności środowiska koordynowanych przez Państwową Agencję Atomistyki. Należy też do ogólnopolskiej sieci laboratoriów badających radioaktywność środowiska (ALMERA - Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity), którą koordynuje Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA).

– Prowadzimy monitoring skażeń przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego w ramach sieci wysokoczułych pomiarów radioaktywności powietrza koordynowanej przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR). Sieć tę tworzy obecnie 12 wysokowydajnych stacji poboru aerozoli atmosferycznych ASS-500 (opracowane w CLOR) rozlokowanych na terenie całego kraju. Próbkę pyłów pozyskane za pomocą stacji ASS-500 poddawane są pomiarom z wykorzystaniem niskotłowej spektrometrii promieniowania gamma, co pozwala na określenie składu izotopowego zanieczyszczeń pyłowych – zarówno jakościowo, jak i ilościowo (tj. w Bq/m³) z progiem wykrywalności na poziomie poniżej jednej milionowej części naturalnej radioaktywności powietrza związanej z dominującym w niej radonem

(Rn-222). Pozwalają więc na rejestrację uwolnień radioaktywności zachodzących nawet tysiące kilometrów poza naszymi granicami – mówi kierownik tej pracowni prof. Jerzy W. Mielicki.

W IFJ PAN, oprócz stacji należącej do sieci znajduje się druga, własna stacja ASS-500, dostosowana w roku 2002 do możliwości gromadzenia próbek nie tylko cząstek pyłu atmosferycznego, lecz również gazowej frakcji radioaktywnego jodu. Dzięki temu, w roku 2011, w trakcie przechodzenia chmury z Fukushima laboratorium z IFJ było jednym z siedmiu miejsc w Europie, w których udało się zmierzyć stężenia frakcji gazowej I-131. Prowadzone są też pomiary stężeń transaktynowców (izotopy Pu i Am) zarówno w pyłe atmosferycznym, jak i w opadzie atmosferycznym. Badania opadu atmosferycznego umożliwia kolektor opadu o powierzchni 2,2 m². Rutynowe pomiary gamma spektrometryczne opadu prowadzone są w cyklu miesięcznym od roku 2005, a dla pyłu w cyklu tygodniowym od roku 1990. Laboratorium dysponuje też przenośną stacją poboru próbek pyłu atmosferycznego typu HVS-30 umożliwiającą pobór próbek w innych lokalizacjach. W ramach prac badawczych powstały dziesiątki publikacji naukowych i kilkanaście doktoratów. Badane były próbki gleby, wody, żywności, materiałów przemysłowych, roślinnych i zwierzęcych z wielu obszarów na świecie. Pracownia jest wyposażona w niezwykle czołą aparaturę spektrometryczną: pięć niskotłowych spektrometrów promieniowania gamma z detektorami germanowymi (HPGe – High Purity Germanium), dwanaście półprzewodnikowych spektrometrów promieniowania alfa z detektorami krzemowymi i spektrometr ciekłoscintylacyjny (LSC – Liquid Scintillation Counting) promieniowania alfa i beta. Dwa z niskotłowych spektrometrów gamma to konstrukcje unikatowe, posiadające aktywne osłony zbudowane z dużych scyntylacyjnych detektorów mionów kosmicznych oraz system zapisu typu "event – by – event" (zdarzenie po zdarzeniu) z rozdzielczością czasową 5 ns. Umożliwia to badanie dowolnych związków logicznych pomiędzy sygnałami, a więc koincydencji, antykoincydencji, koincydencji opóźnionych itp. W Pracowni opracowano i wdrożono procedury radiochemicznego oznaczania izotopów plutonu, ameryku, kiuru, uranu, toru, radu i polonu, a ponadto Sr-90 /Y-90, Sr-89, Sm-147, Ni-63 i Tc-99 oraz elektrolitycznego zateżniania i po nim pomiaru LSC trytu (H-3). W dyspozycji Pracowni jest też jeden z dwóch istniejących w Polsce Spektrometrów Całego Ciała, wyposażony w dwa detektory germanowe HPGe i antropomorficzny fantom kalibracyjny. Przy Pracowni, w pełnej unii personalnej, istnieje część prowadząca usługi pomiarowe o nazwie Laboratorium Analiz Promieniotwórczości, która posiada akredytację PCA: AB 877 na pomiary gamma spektrometryczne oraz alfa spektrometryczne plutonu.

Natomiast Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych (zakredytowanymi metodami badawczymi nr akredytacji PCA: AB 788) kierowane przez prof. Krzysztofa



Fot.1. Pomieszczenie Pracowni Badań Skażeń Radioaktywnych Środowiska (fot. prof. J.W. Mielicki)

Kozaka zajmuje się badaniami naturalnych i sztucznych izotopów promieniotwórczych w środowisku. Posiada mobilne laboratorium spektrometryczno-dozymetryczne CHIMERA LAB z aparaturą umożliwiającą identyfikację i wysokoczułe pomiary ilościowe i jakościowe izotopów gamma promieniotwórczych w próbkach środowiskowych m.in. metodą niskotłowej spektrometrii promieniowania gamma in situ oraz wysokoczułe pomiary stężeń radonu i mocy dawek w środowisku. Laboratorium to realizowało już prace i badania związane z planowanym rozwojem energetyki jądrowej w Polsce poprzez udział w strategicznym projekcie badawczym Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) mającym na celu opracowanie metodyki i wykonanie badań pilotażowych wokół lokalizacji przyszłej elektrowni jądrowej w Polsce dla oznaczenia stanu zerowego stężenia naturalnych i sztucznych pierwiastków promieniotwórczych. Prowadzi ponadto specjalistyczne szkolenia m.in. dla służb mundurowych (wojsko, straż pożarna) oraz pracowników administracji i studentów.

IFJ PAN jest również wiodącym ośrodkiem w zakresie dozymetrii, zwłaszcza opartej na wykorzystaniu różnych rodzajów detektorów termoluminescencyjnych, które w tym instytucie zostały opracowane. Laboratorium Dozymetrii Indywidualnej i Środowiskowej wykonuje rutynowo pomiary dawek na całe ciało, skórę dłoni, soczewki oczu oraz elementy środowiska. Prowadzi testy specjalistyczne urządzeń radiologicznych używanych w wielu dziedzinach medycyny.

Tworzenie sektora energetyki jądrowej jest przedsięwzięciem wymagającym wykształcenia wysokiej klasy specjalistów. Odpowiedzią na dynamiczny wzrost zapotrzebowania fachowców w zakresie budowy bloków jądrowych i związanej z ich działaniem całej infrastruktury otoczenia gospodarczego jest oczywiście kształcenie studentów, którzy w przyszłości będą stanowić kadre pracowników elektrowni. Szacuje się, że liczba specjalistów w tej dziedzinie jest kilkakrotnie za mała.

W Polsce dziewięć wyższych uczelni technicznych prowadzi kierunek energetyka jądrowa, a są to: Politechnika Gdańska, Politechnika Łódzka, Politechnika Opolska, Politechnika Poznańska, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska oraz dwie uczelnie w Krakowie: Akademia Górniczo-Hutnicza i Politechnika Krakowska. Studenci mają możliwość poszerzenia swojej wiedzy na studiach licencjackich oraz magisterskich w zakresie problematyki energetyki jądrowej – najnowszych technologii jądrowych, a także ochrony radiologicznej, dozymetrii oraz badań skażeń promieniotwórczych środowiska. Ponadto zdobywają przygotowanie do pracy w elektrowniach konwencjonalnych. Znajomość termodynamiki, mechaniki płynów, wymiany ciepła jest niezbędna we wszystkich rodzajach elektrowni, w tym także tych bazujących na źródłach odnawialnych. Absolwenci Politechniki Krakowskiej będą zatem przygotowani do pracy nie tylko w energetyce, ale w wielu innych gałęziach przemysłu.

W ubiegłym roku rektor Politechniki Krakowskiej, prof. Andrzej Szarata, podpisał z dyrektorem Instytutu Fizyki Jądrowej, prof. Tadeuszem Lesiakiem, umowę o współpracy, która zapewni wyższą jakość kształcenia, a nawet otworzy przed studentami perspektywę kontynuowania edukacji na studiach doktoranckich. Z ramienia IFJ koordynatorem porozumienia jest prof. Paweł Olko, pełnomocnik dyrektora ds. energetyki jądrowej, a ze strony Politechniki Krakowskiej prof. Jan Taler, inicjator organizacji i opiekun kierunku energetyka jądrowa.

Współpraca rozpoczęła się od nowego semestru 2025 r. Przygotowanie i realizację wykładów powierzono profesorom z IFJ: Jerzemu Wojciechowi Mietelskiemu, Krzysztofowi Kozakowi, Maciejowi Budzanowskiemu oraz Edycie Łokas, kierującej Zakładem Spektroskopii Masowej. W miarę potrzeb do tego grona dołączą także inni specjaliści z IFJ.

Politechnika Krakowska dba o międzynarodowe kontakty swoich studentów, organizując wizyty profesorów z zagranicy. Wśród gości znaleźli się przedstawiciele z Indii, Turcji, Bułgarii, Szwecji, Niemiec i innych krajów. Ponadto uczelnia nawiązała współpracę z czeskim Centrum Badawczym Řež (Centrum Výzkumu Řež, CVŘ), posiadającym eksperymentalne reaktory badawcze oraz stanowiska doświadczalne, gdzie wysłano studentów na praktyki.

Zespół Politechniki (a wcześniej AGH i różne inne krakowskie gremia) dużą wagę przywiązuje do przygotowania społeczeństwa do transformacji w energetyce, czego wyrazem są konferencje i debaty z udziałem specjalistów oraz ważnych osobistości Krakowa. Wszystko to ma wpłynąć na przyspieszenie władz w podejmowaniu najistotniejszych decyzji dotyczących finansowania budowy polskich elektrowni jądrowych.

*dr Małgorzata Nowina Konopka,
Kraków*



POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ NA 41. EDYCJI KONFERENCJI EUROPOWER & OZE POWER

W dniach 3-4 kwietnia 2025 r. w hotelu The Westin Warsaw odbyła się 41. edycja konferencji EuroPOWER & OZE POWER, której patronatem medialnym były m.in. „Postępy Techniki Jądrowej”. Program wydarzenia został przygotowany pod przewodnictwem dr. Leszka Juchniewicza, Przewodniczącego Rady Programowej, Piotra Rutkowskiego, Sekretarza Rady, oraz Macieja Bando, Współprzewodniczącego Rady Programowej.

W inauguracji wydarzenia uczestniczyły najważniejsze osoby z rządu – Paulina Hennig-Kloska, Minister Klimatu i Środowiska, oraz Marzena Czarnecka, Minister Przemysłu. Ich przemówienia przybliżyły obecnym najnowsze informacje z sektora energetycznego oraz nakreśliły kierunki polityki państwa w zakresie transformacji energetycznej i rozwoju przemysłu zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Program obejmował debatę o wizji transformacji, podkreślając kluczowe dokumenty (Krajowy Plan

w dziedzinie Energii i Klimatu, Polityka Energetyczna Polski 2040), integrację źródeł energii, innowacje i społeczną akceptację. Dyskutowano o roli gazu, biogazie, wodoru, odnawialnych źródłach energii, magazynach energii i infrastrukturze.

Szczególne miejsce w programie zajęła debata poświęcona obecnej sytuacji i przyszłości polskiej energetyki jądrowej. Panel, moderowany przez Krzysztofa Madaję, redaktora naczelnego czasopisma „Postępy Techniki Jądrowej”, zgromadził czołowych ekspertów z branży, instytucji państwowych oraz partnerów międzynarodowych.

Prelegenci omówili najważniejsze wyzwania związane z realizacją projektu budowy elektrowni jądrowych w Polsce oraz jaki jest aktualny stan realizacji projektu, podkreślając, że Polska znajduje się na początku drogi do uruchomienia własnych elektrowni atomowych.

Dyrektor Departamentu Energii Jądrowej dr Paweł Gajda z Ministerstwa Przemysłu zaznaczył, że kluczowe jest wypracowanie spójnej strategii, aby osiągnąć założone cele w Programie Polskiej Energetyki Jądrowej w najbliższych latach.

Pełniący obowiązki Prezesa Polskich Elektrowni Jądrowych Piotr Piel poinformował, że prace nad pierwszą polską elektrownią jądrową są na zaawansowanym etapie przygotowań. Podkreślił, że ważne są nie tylko

kwestie łatwo dostrzegalne jak prace geodezyjne, ale i te „niewidzialne”, podpisanie umów, pozyskanie finansowania i zadbanie o właściwą dokumentację.

Uczestnicy panelu wskazywali, że rozwój technologii jądrowej jest szansą na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego kraju. Prezes Andrzej Głowacki z Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) poinformował, że PAA aktywnie przygotowuje się do skutecznego nadzoru nad realizacją programu jądrowego, dążąc do zapewnienia bezpieczeństwa, zgodności i wysokich standardów jakościowych na każdym etapie inwestycji.

Prezes Westinghouse Mirosław Kowalik podkreślił, że jednym z najważniejszych celów jest aktywne wspieranie rozwoju lokalnego przemysłu i zwiększanie udziału polskich dostawców w projekcie.

Z kolei Leszek Hołda, Prezes firmy Bechtel – Głównego Wykonawcy budowy Elektrowni Jądrowej przekazał, że na terenie przyszłej budowy elektrowni jądrowej kontynuowane są prace geologiczne wykonywane przez polskie instytucje, których wyniki pozwolą dokładnie zaprojektować posadowienie trzech reaktorów AP-1000.

Andrzej Jarczyk, Prezes Zarządu, Towarzystwa Ubezpieczeń Wzajemnych Polski Zakład Ubezpieczeń Wzajemnych podkreślił, że rola ubezpieczycieli w takich dużych i skomplikowanych projektach jest kluczowa. Niezbędne jest zapewnienie kompleksowej ochrony, która uwzględni specyfikę technologii jądrowej oraz potencjalne zagrożenia związane z jej funkcjonowaniem.

Bartosz Safiejko, Dyrektor Strategy& Polska poinformował, że osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050 jest możliwe, ale wymaga zrównoważonego rozwoju i intensywnych działań w zakresie odnawialnych źródeł energii, poprawy efektywności energetycznej

oraz innowacji technologicznych. Zaznaczył jednak, że bez energetyki atomowej, która stanowi stabilne i duże źródło energii, realizacja tego celu staje się znacznie trudniejsza.

Rozwój małych reaktorów modułowych (SMR) został przedstawiony jako strategiczna opcja dla Polski. Łukasz Gola, Dyrektor ds. Energetyki, Hitachi Europe zaznaczył, że SMR-y mogą służyć nie tylko do produkcji energii elektrycznej, ale także do ciepła, co zwiększa ich wszechstronność i potencjał inwestycyjny. Wskazano na konieczność dalszych badań, inwestycji i integracji tych technologii z istniejącą infrastrukturą energetyczną.

Podsumowując, panel pokazał, że Polska stoi przed dużymi wyzwaniami, ale także szansami w zakresie rozwoju energetyki jądrowej. Kluczowe jest wypracowanie spójnej strategii, zapewnienie odpowiedniego finansowania oraz rozwój technologii, w tym SMR-ów, które mogą odegrać ważną rolę w transformacji energetycznej kraju. Eksperti zgodnie podkreślili, że sukces projektu zależy od współpracy wszystkich sektorów i skutecznej realizacji wyznaczonych celów.

W konferencji udział wzięli m.in. podsekretarze stanu, prezesi dużych spółek i eksperci branżowi. Wydarzenie potwierdziło, że polska energetyka jest w kluczowym momencie transformacji, wymagając współpracy sektora publicznego, prywatnego i nauki. Zapraszam do zapoznania się z fotorelacją: <https://konferencjaeuropower.pl/41-konferencja-energetyczna-europower-oze-power-3-4-04-2025/>

Krzysztof Madaj,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



SPOTKANIE UCZESTNIKÓW PO DRUGIM ROKU REALIZACJI PROJEKTU RADOV / RADOV 24M ANNUAL MEETING

W dniu 25 września 2024 r. w Królewskim Instytucie Technicznym (KTH) w Sztokholmie odbyło się spotkanie podsumowujące pierwsze dwa lata realizacji projektu europejskiego RADOV – “RADiation harvesting of bioactive peptides from egg prOteins and their integration in adVanced functional products”.

Spotkanie, które było zorganizowane w formie hybridowej, zgromadziło piętnastu uczestników z czterech krajów, reprezentujących instytucje oraz partnerów przemysłowych zaangażowanych w projekt. Celem wydarzenia było przedstawienie i omówienie wyników uzyskanych w pierwszych 24 miesiącach realizacji projektu, a także zaplanowanie działań na kolejny rok.

Liderzy sześciu pakietów i dziewiętnastu zadań przedstawili zrealizowane już prace i ich wyniki. Intensywna eksperymentalna praca prowadzona w ciągu

The EU project RADOV held its second annual meeting at the KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden, on September 25, 2024, after completing the second year of project implementation. Fifteen participants from four countries, representing institutions and companies involved in RADOV, convened to discuss the results achieved in the first two years of the project and to plan activities for the upcoming year. The event was organized in a hybrid format.

During the meeting, the six work packages (WPs) and their 19 associated tasks were presented and discussed. A Steering Committee (SC) meeting was also held. The intensive experimental work conducted during the first two years of RADOV led to the irradiation of 900 samples using gamma rays and electron beams.



Fot.1. Uczestnicy spotkania (fot. Linnea Masso)
Photo 1. Participants of the meeting (photo Linnea Masso)

pierwszych dwóch lat projektu zaowocowała napromieniowaniem około 900 próbek – zarówno w stanie stałym, jak i w roztworach. Badano wpływ dawki promieniowania, szybkości dawkowania oraz atmosfery, w której próbki były napromieniowane na fragmentację protein oraz na właściwości bioaktywne otrzymanych materiałów.

Do napromieniowania trzech protein pochodzących z jaj kurzych – owotransferyny, lizozymu i owalbuminy oraz białka kurzego zastosowano wiązkę elektronów i promieniowanie gamma. Równolegle prowadzone są prace nad opracowaniem dwóch produktów końcowych: hydrożelowego opatrunku oraz folii opakowaniowej, zawierających bioaktywne peptydy lub proteiny. Pierwsze wyniki dotyczące powiększenia skali procesu są obiecujące.

Oprócz zagadnień naukowych uczestnicy poświęcili czas również na omówienie aspektów zarządzania projektem, kwestii formalnych i finansowych oraz aktywności związanych z rozpowszechnianiem rezultatów projektu oraz jego promocją.

Dodatkowo uczestnicy wysłuchali również raportu z działalności Innovation and Quality Management Board (IQMB), który jest organem wspierającym wybór produktów i technologii, które spełniają kryteria predestynujące je do komercjalizacji.

This research aimed to study the effects of irradiation conditions on protein fragmentation and the bioactive properties of irradiated materials. The investigation focused on various irradiation factors, including dose, dose rate, physical state, and atmosphere, specifically for three egg-derived proteins: lysozyme, ovotransferrin, ovalbumin and egg white.

Additionally, two products a hydrogel wound dressing and packaging foil that contain bioactive proteins or peptides are being developed simultaneously. Preliminary results from the scaling-up phase of these selected products are promising.

In addition to scientific discussions, topics such as project management, communication, dissemination activities, and formal and financial aspects of RADOV were also addressed. The activities of the Innovation and Quality Management Board (IQMB), which supports the research team in effectively transferring know-how and selecting products and technologies for further development, were reported. The event concluded with the Steering Committee meeting.

*dr inż. Dagmara Chmielewska-Śmietanko,
 Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
 Warszawa*



Funded by the
European Union

Podziękowanie

Ten projekt jest finansowany z Programu Euratom Research and Training Programme (EURATOM) Horizon Europe Unii Europejskiej (nr umowy grantowej 101061694)

Acknowledgement

This project has received funding from the European Union's Euratom Research and Training Programme (EURATOM) Horizon Europe under Grant Agreement No 101061694



PIERWSZY W POLSCE MIĘDZYNARODOWY WARSZTAT POŚWIĘCONY RADIOFARMACEUTYKOM ZNAKOWANYM AKTYNEM-225

W dniach 2-6 czerwca 2025 r. w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (ICHTJ) w Warszawie odbył się Technical Workshop on Production and Quality Control of Actinium-225 Radiopharmaceuticals – pierwsze tego typu wydarzenie w Polsce poświęcone produkcji i kontroli jakości radiofarmaceutyków z użyciem radionuklidu Ac-225.

Workshop został zorganizowany przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA) w IChTJ we współpracy z Joint Research Centre w Karlsruhe, w ramach realizowanego projektu badawczego „Production and quality control of Ac-225 radiopharmaceuticals”. Wydarzenie zgromadziło grono wybitnych ekspertów z całego świata zajmujących się radiochemią, radiofarmacją oraz zastosowaniem emiterów promieniowania alfa w terapii przeciwnowotworowej.

Uroczystego otwarcia dokonał prof. Andrzej Chmielewski, dyrektor IChTJ. Wśród zaproszonych gości znaleźli się również: Andrzej Głowacki – prezes Państwowej Agencji Atomistyki, dr Celina Horak i dr Aruna Korde – przedstawicielki MAEA, dr Frank Bruchertseifer – przedstawiciel JRC Karlsruhe oraz prof. Agnieszka Pollo – pełniąca obowiązki dyrektorki Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

W trakcie sesji wykładowych uczestnicy mieli okazję wysłuchać prezentacji wybitnych naukowców i praktyków.

Integralną część workshopu stanowiły zajęcia praktyczne, podczas których uczestnicy samodzielnie przeprowadzali syntezę i kontrolę jakości radioznakowanych biokoniuugatów z użyciem izotopu Ac-225. Następnie testowano ich działanie na nowotworowych



Fot.1. Powitanie uczestników warsztatów przez prof. dr. hab. inż. Andrzeja Chmielewskiego, dyrektora IChTJ (fot. Sylwester Wojtas)

liniach komórkowych. Warsztaty prowadzili doświadczeni specjaliści: prof. Agnieszka Majkowska-Pilip, dr Monika Łyczko, dr Frank Bruchertseifer, dr Rafał Walczak oraz doktorantki Agata Malinowska i Magdalena Piątkowska.

W ostatnim dniu workshopu odbyło się podsumowanie oraz uroczyste wręczenie certyfikatów uczestnictwa. Organizatorzy: prof. Agnieszka Majkowska-Pilip, dr Monika Łyczko, dr Frank Bruchertseifer oraz dr Rafał Walczak, zapowiadają kolejne edycje wydarzenia, które – jak podkreślają – cieszyło się dużym zainteresowaniem oraz spełniło swoje naukowe i edukacyjne cele.

*dr hab. Agnieszka Majkowska-Pilip, prof. IChTJ,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*



Fot.2. Uczestnicy warsztatów (fot. Sylwester Wojtas)



KONFERENCJA BRANŻOWA NA TEMAT OCHRONY RADIOLOGICZNEJ W ENERGETYCE JĄDROWEJ, PRZEMYŚLE I MEDYCYNIE

W dniach 11-13 czerwca 2025 r. w Katowicach odbyła się branżowa konferencja pt. „Od Marii Goeppert-Mayer do współczesnej atomistyki: ochrona radiologiczna w energetyce jądrowej, przemyśle i medycynie”. Organizatorem wydarzenia był Zarząd Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej oraz Śląskie Centrum Radiometrii Środowiskowej Głównego Instytutu Górnictwa.

Konferencja stanowiła forum wymiany wiedzy i doświadczeń, pełniąc również istotną rolę w przygotowaniach do egzaminów na inspektorów ochrony radiologicznej. Uczestnicy mieli okazję zapoznać się z aktualnymi zagadnieniami związanymi z programem polskiej energetyki jądrowej oraz z wytycznymi

dotyczącymi bezpieczeństwa i wykorzystania promieniowania jonizującego. Omówiono również zasady ochrony radiologicznej, nadzór nad działalnością wiążącą się z narażeniem na promieniowanie, ocenę narażenia pracowników oraz ludności, a także procedury przystępowania do egzaminu na inspektora ochrony radiologicznej.

W tegorocznej konferencji wzięło udział ponad 200 uczestników, co podkreśla jej znaczenie oraz rosnące zainteresowanie tematem ochrony radiologicznej w różnych sektorach gospodarki.

Redakcja PTJ



Fot. 1. Uczestnicy konferencji (fot. GIG-PIB)



UDZIAŁ ICHTJ W 10. KONGRESIE PRZEMYSŁU JĄDROWEGO EUROPY ŚRODKOWEJ I WSCHODNIEJ CEE NUCLEAR POWER & SMR FOCUS 2025

W dniach 10-11 czerwca 2025 r. w Warszawie odbył się 10. Kongres Przemysłu Jądrowego Europy Środkowo-Wschodniej – CEE NUCLEAR POWER & SMR FOCUS 2025, którego celem było zgromadzenie przedstawicieli instytucji działających we wszystkich obszarach cyklu życia elektrowni jądrowych w regionie. Wydarzenie, uznawane za kluczowe forum branży jądrowej Europy Środkowo-Wschodniej, zgromadziło profesjonalistów z całej branży, aby omówić najnowsze trendy, projekty i technologie w energetyce jądrowej.

W pierwszym dniu konferencji, zatytułowanym „Wizja strategiczna i innowacje”, omówiono najnowsze trendy, wyzwania i perspektywy rozwoju energii jądrowej w Europie i na świecie.

Skupiono się na eksploracji nowych możliwości wykorzystania mocy jądrowych. Prelegenci przedstawili globalną strategię na rok 2030, podkreślając kluczowe znaczenie energii jądrowej dla bezpieczeństwa energetycznego i osiągnięcia celów zerowej emisji netto.



Fot. 1. Uczestników kongresu wita prof. dr hab. inż. Andrzej Chmielewski, dyrektor IChTJ (fot. organizator konferencji)

Omówiono dynamiczny rozwój projektów jądrowych, wyzwania związane z konkurencyjnością w kontekście geopolitycznym (m.in. konfliktów zbrojnych), a także postęp w technologii reaktorów nowej generacji.

Szczególnie interesujące były perspektywy przyszłości, wskazujące na rosnące znaczenie energii jądrowej w procesie transformacji energetycznej oraz jej znaczenie w realizacji celów klimatycznych Unii Europejskiej na rok 2040.

Przedstawiono aktualizację polityk UE, zmiany w ramach regulacyjnych oraz inicjatywę Europejskiego Sojuszu Przemysłowego ds. SMR (Small Modular Reactors). Podkreślono potrzebę zacieśnienia współpracy, rozwijania kompetencji oraz zapewnienia stabilnego finansowania sektora.

Profesor Agnieszka Korgul, prezes Polskiego Towarzystwa Nukleonowego oraz kierownik Programu Inżynierii Energetyki Jądrowej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, zwróciła uwagę na kluczowe znaczenie edukacji w realizacji polskich ambicji jądrowych.

Omówiła aktualny stan i plany rozwoju sektora jądrowego w Polsce, wskazując na konieczność kształcenia specjalistów oraz budowania świadomości społecznej w zakresie energii jądrowej.

Podkreśliła, że edukacja odgrywa kluczową rolę w budowaniu zaufania do technologii jądrowych oraz w przygotowaniu przyszłych pokoleń inżynierów i naukowców do pracy w tym sektorze.

Jej wystąpienie było okazją do omówienia wyzwań i szans związanych z rozwojem energetyki jądrowej w Polsce, a także do refleksji nad rolą instytucji edukacyjnych w tym procesie.

Po zakończeniu pierwszej części wykładowej odbyła się dyskusja panelowa, podczas której omówiono wyzwania związane z finansowaniem, regulacjami, łańcuchem dostaw oraz akceptacją społeczną dla energii jądrowej w Europie Środkowo-Wschodniej.

Podkreślono znaczenie innowacyjnych mechanizmów inwestycyjnych i regionalnej współpracy jako kluczowych elementów dalszego rozwoju sektora.

W drugim dniu konferencji uczestnicy mieli okazję wziąć udział w dwóch równoległych sesjach: Sesji 1 poświęconej nowym konstrukcjom, likwidacji obiektów jądrowych oraz postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi, oraz Sesji 2 skupionej na technologii SMR oraz innowacjach w dziedzinie zaawansowanych reaktorów.

Sesja 1 rozpoczęła się od prezentacji dotyczącej wyzwań związanych z harmonizacją procedur i regulacji w zakresie licencjonowania elektrowni jądrowych na poziomie międzynarodowym, co ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i spójności europejskiego rynku energii jądrowej. Omówiono także postęp w projekcie Paks II na Węgrzech. Kolejne prezentacje dotyczyły rozwoju nowych bloków jądrowych w Kozłoduju oraz przyszłości rumuńskiej energetyki jądrowej z rozwojem dużych reaktorów i SMR w Cernawodzie oraz Doicești. Polska zaprezentowała ambitne plany rozwoju energetyki jądrowej, w tym harmonogram projektu Lubiatowo-Kopalino oraz współpracę międzynarodową dotyczącą nowoczesnych technologii, takich jak HTGR.

W dyskusji panelowej omówiono wyzwania i rozwiązania w realizacji nowych elektrowni jądrowych, w tym kwestie finansowania, zarządzania ryzykiem.

Podczas panelu podkreślano, że jeżeli zastosuje się do projektowania i budowy elektrowni jądrowej normy ASME to inwestor musi korzystać z materiałów do budowy elektrowni jądrowych, takich jak specjalistyczne stale i inne komponenty, które są zgodne z tymi amerykańskimi standardami. Normy ASME (American Society of Mechanical Engineers) odnoszą się do zestawu standardów i kodów technicznych opracowanych przez tę organizację, które określają wymagania dotyczące projektowania, produkcji, inspekcji i eksploatacji urządzeń i instalacji inżynierskich, w szczególności w dziedzinie maszyn, ciśnieniowych urządzeń, konstrukcji stalowych oraz systemów bezpieczeństwa.

Niestety, wiele z tych materiałów, w szczególności określone gatunki stali wysokiej wytrzymałości czy specjalistyczne stopów, nie jest produkowanych lub dostępnych na rynku europejskim. W związku z tym, aby spełnić wymogi norm ASME, konieczne może być ich importowanie z USA lub innych krajów, co wiąże się z dodatkowymi kosztami, czasem realizacji oraz koniecznością spełnienia wymogów dotyczących certyfikacji i jakości. To może wpłynąć na logistykę, budżet i harmonogram projektów związanych z budową elektrowni jądrowej na terenie Europy.

Równolegle, w sesji 2 skoncentrowano się na rozwoju technologii SMR w Europie Środkowo-Wschodniej. Uczestnicy mieli okazję zapoznać się z aktualnym statusem budowy reaktora Mochovce-4 oraz planach rozwoju SMR w Słowacji, strategią firmy

UNIMOT w transformacji energetycznej poprzez rozwój energetyki jądrowej i odnawialnej w Polsce, a także o wyzwaniach i sukcesach związanych z rozwojem Międzynarodowego Reaktora Termojądrowego Eksperymentalnego (ITER) w projekcie fuzji jądrowej.

Dominik Oleksiak z GE Vernova Hitachi Nuclear Energy omówił plany wdrożenia reaktora BWRX-300 w Polsce i regionie. Podkreślił znaczenie budowania kompleksowych relacji z dostawcami oraz zapewnienia zgodności z wymogami regulacyjnymi i technicznymi, co jest kluczowe dla powodzenia projektu.

Kolejne prezentacje dotyczyły perspektywy rozwoju energii jądrowej w krajach bałtyckich, rozwojowi łańcucha dostaw dla energetyki jądrowej w Indiach oraz konieczność angażowania młodych naukowców w działania na rzecz walki ze zmianami klimatycznymi w rozwoju sektora jądrowego i fuzji jądrowej.

Podczas dyskusji panelowej omówiono najnowsze trendy i innowacje w dziedzinie SMR oraz technologii jądrowych przyszłości. Paneliści podkreślili znaczenie wprowadzania nowoczesnych rozwiązań, takich jak modułowe projekty, zaawansowane materiały oraz automatyzacja, które mają przyspieszyć wdrożenie SMR i zwiększyć ich bezpieczeństwo oraz efektywność. Ważnym tematem była współpraca między operatorami, dostawcami i regulatorami, co ma kluczowe znaczenie dla skrócenia czasu przygotowania technologii do komercyjnego użytku. Wskazano, że partnerstwa tego typu mogą przyspieszyć rozwój i akceptację nowych technologii jądrowych. Omówiono



Fot. 2. Wystąpienie dr hab. Katarzyny Kiegiel, prof. IChTJ (fot. organizator konferencji)

także szerokie zastosowania SMR, obejmujące nie tylko produkcję energii elektrycznej, ale także transport, odsalanie wód, procesy przemysłowe i inne obszary. W kontekście przyszłości zwrócono uwagę na postępy w technologiach Gen-IV oraz fuzji jądrowej, które mogą zrewolucjonizować energetykę.

Należy podkreślić, że IChTJ odegrał znaczącą rolę w trakcie: „The 10th Central & Eastern Europe Nuclear Industry Congress 2025” jako główny partner wspierający organizatorów kongresu. Dyrektor IChTJ – prof. dr hab. inż. Andrzej G. Chmielewski wraz z dr hab. Katarzyną Kiegiel, prof. IChTJ współprzewodniczyli sesji zatytułowanej „SMR-y i zaawansowane technologie jądrowe”. Ponadto Dyrektor Instytutu wygłosił otwierającą



Fot. 3. Wykład prof. dr hab. inż. Andrzeja Chmielewskiego (fot. organizator konferencji)

kongres prezentację dotyczącą wskaźników poziomu gotowości technologicznej (TRL), w odniesieniu do oferowanych obecnie technologii jądrowych. Przedstawił proces oceny stopnia rozwoju różnych technologii SMR oparty na skali poziomu TRL w rozumieniu zarówno instytucji działających w kraju, w którym ta skala powstała, jak również w Unii Europejskiej i Polsce. Prezentacja skupiała się na rekomendowanych działaniach strategicznych mających na celu przyspieszenie wdrażania technologii SMR i podniesienie ich poziomu dojrzałości technologicznej. Wśród proponowanych działań rekomendowano m.in. wzmocnienie międzynarodowej współpracy w zakresie harmonizacji przepisów, zwiększenie finansowania badań na rzecz testowania i demonstracji prototypów, zachęcanie do partnerstw publiczno-prywatnych w celu inwestycji i komercjalizacji, a także opracowywanie polityk mających na celu integrację SMR z istniejącymi sieciami energetycznymi.

Z kolei prof. Katarzyna Kiegiel wraz z dr Ireną Herdzik-Koniecko przygotowały prezentację pt. „Zaawansowany cykl paliwowy - wyzwania związane z przetwarzaniem wypalonego paliwa”. Głównym wyzwaniem związanym z zagospodarowaniem wypalonego paliwa jądrowego z reaktorów nowej generacji jest konieczność adaptacji obecnych systemów przechowywania i przetwarzania odpadów do nowych typów paliw. Nowe paliwa jądrowe, niezależnie od wybranego cyklu (otwartego czy zamkniętego), wymagają kompleksowych badań i modyfikacji istniejących technologii, ponieważ obecne systemy są zoptymalizowane pod kątem paliw tlenkowych, używanych obecnie, w reaktorach II i III/III+ generacji.

Podkreślono fakt, iż ograniczenia mocy zakładów recyklingu oraz przestrzeni na składowanie odpadów wysokoaktywnych stanowią kolejne bariery w efektywnym zarządzaniu odpadami. Reaktory typu LWR, w tym niektóre koncepcje SMR, w porównaniu z reaktorami GenIV, na obecnym stanie rozwoju techniki generują mniej problematyczne odpady w kontekście ich składowania, natomiast reaktory GenIV dążą do zamknięcia cyklu paliwowego.

Profesor Kiegiel przedstawiła obecnie badane nowoczesne koncepcje przetwarzania paliwa jądrowego oraz wyzwania i możliwości rysujące się na horyzoncie rozwoju technologii jądrowych, które najprawdopodobniej wkrótce zastąpią obecnie stosowane rozwiązania.

Ponadto Instytut zaprezentował swoją działalność na stanowisku wystawowym, prezentując projekty realizowane w IChTJ związane z chemicznymi aspektami energetyki jądrowej, w tym EURAD-2 („European Partnership on Radioactive Waste Management”), GEMINI 4.0 („GEMINI for Zero Emission”), DESIRE („Plan dekarbonizacji krajowej energetyki zawodowej na drodze modernizacji z wykorzystaniem reaktorów jądrowych”) oraz IAEA CRP („Analysis of aspects related to



Fot. 4. Stoisko wystawowe IChTJ (fot. Tomasz Smoliński)

the back-end of the SMR fuel cycle as a step towards the implementation of SMR technology in Poland”). Zaprezentowano także projekty dotyczące innych zastosowań technik jądrowych (non power applications), m.in. RADOV („RADiation harvesting of bioactive from egg prOteins and their integration in adVanced functional products”), finansowany z programu Euratom Research and Training Programme (EURATOM) w ramach Horizon Europe. A także projekt polsko – chiński TAPEB „Zaawansowane oczyszczanie typowych antybiotykowych ścieków farmaceutycznych za pomocą napromieniowania wiązką elektronów”, finansowany przez MCBiR.

Podsumowując, program konferencji był niezwykle bogaty w treści, ukazując szerokie spektrum działań i perspektyw rozwoju energetyki jądrowej w Europie Środkowo-Wschodniej i na świecie. Dyskusje i prezentacje pokazały, że mimo wyzwań związanych z regulacjami, finansowaniem i akceptacją społeczną, energia jądrowa jest postrzegana jako kluczowy element transformacji energetycznej i walki ze zmianami klimatycznymi.

Niewątpliwie, konferencja ta umocniła wizję przyszłości, w której innowacje i współpraca regionalna odgrywają kluczową rolę w rozwoju zrównoważonej energetyki jądrowej. Udział przedstawicieli z IChTJ podkreśla aktywną rolę Instytutu w rozwoju nauki i technologii jądrowej zarówno w Polsce, jak i w Europie Środkowo-Wschodniej.

Podkreślić zatem trzeba, że była to konferencja obejmująca ważne zagadnienia techniczne, co nie jest częste w przypadku konferencji organizowanych w Polsce, a mówcami byli specjaliści bezpośrednio zaangażowani w budowę lub eksploatację elektrowni jądrowych.

Krzysztof Madaj,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



ICARST-2025

Naukowcy z IChTJ wzięli udział w konferencji Third International Conference on Applications of Radiation Science and Technology ICARST-2025, która odbyła się w dniach 7–11 kwietnia 2025 r. w siedzibie Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) w Wiedniu. Wydarzenie zgromadziło ponad 1000 specjalistów z całego świata, koncentrując się na najnowszych osiągnięciach naukowych i aplikacyjnych technologii radiacyjnych w przemyśle, ochronie środowiska, medycynie, rolnictwie oraz konserwacji dziedzictwa kulturowego.

Główne cele ICARST-2025 obejmowały:

(1) Ocenę najnowszych osiągnięć technologii radiacyjnych, bazując na aktualnym stanie wiedzy w tej dziedzinie;

(2) Analizę istniejących inicjatyw mających na celu wdrażanie przemysłowych zastosowań technologii radiacyjnych z uwzględnieniem korzyści społeczno-ekonomicznych;

(3) Stworzenie platformy umożliwiającej współpracę przedstawicieli przemysłu i środowiska akademickiego w celu rozwoju nowych inicjatyw, które zapewnią dalszy rozwój technologii radiacyjnych oraz

(4) Generowanie pomysłów, które staną się podstawą przyszłych programów IAEA w obszarze technologii radiacyjnych i osiągania celów zrównoważonego rozwoju (SDGs).

Reprezentanci IChTJ uczestniczyli w pracach komitetów Steering Committee oraz Scientific Committee, wygłosili cztery prezentacje ustne, zaprezentowali 7 posterów, przewodniczyli sesjom, brali udział w ocenie plakatów młodych naukowców biorących udział w konkursie Young Professionals Award oraz byli współautorami wielu prac przedstawionych na konferencji w ramach współpracy z ośrodkami naukowymi z całego świata. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej wziął również udział jako wystawca. Na stoisku wystawowym, IChTJ zaprezentował własne badania i osiągnięcia,



Fot. 1. Statuetka dla IChTJ za udział w konferencji Third International Conference on Applications of Radiation Science and Technology ICARST-2025 (fot. M. Walo)

w tym projekty: I.FAST, RADOV, EURO-LABS, HITRIplus, Erasmus+, „RAPID – Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych. Zwiększenie potencjału badawczego IChTJ poprzez zakup akceleratora liniowego” finansowany z Krajowego Planu Odbudowy (KPO).

dr inż. Marta Walo,
dr inż. Magdalena Rzepna,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



ATLAS POGŁĘBIA BADANIA MECHANIZMU HIGGSA

Odkrycie bozonu Higgsa przez współpracę ATLAS i CMS w CERN w 2012 r. zrewolucjonizowało nasze rozumienie podstawowych zasad funkcjonowania Wszechświata. Ujawniło istnienie tajemniczego pierwotnego pola, z którym cząstki elementarne oddziałują, aby uzyskać swoje najważniejsze masy. Proces ten jest regulowany przez subtelny mechanizm zwany łamaniem

symetrii elektroslabej, który został po raz pierwszy zaproponowany w 1964 r., ale nadal jest jednym z najmniej poznanych zjawisk Modelu Standardowego fizyki cząstek. Aby go zbadać fizycy potrzebują bardzo dużego zbioru danych zderzeń cząstek o wysokiej energii.

Na konferencji Rencontres de Moriond współpraca ATLAS przybliżyła fizyków o krok do zrozumienia natury mechanizmu łamania symetrii elektroslabej. Wykorzystując pełny zestaw danych zderzeń proton-proton z Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC, Large Hadron Collider) LHC Run 2, zebranych przy energii 13 TeV w latach 2015–2018, zespół przedstawił pierwsze dowody kluczowego procesu obejmującego bozon W – jeden

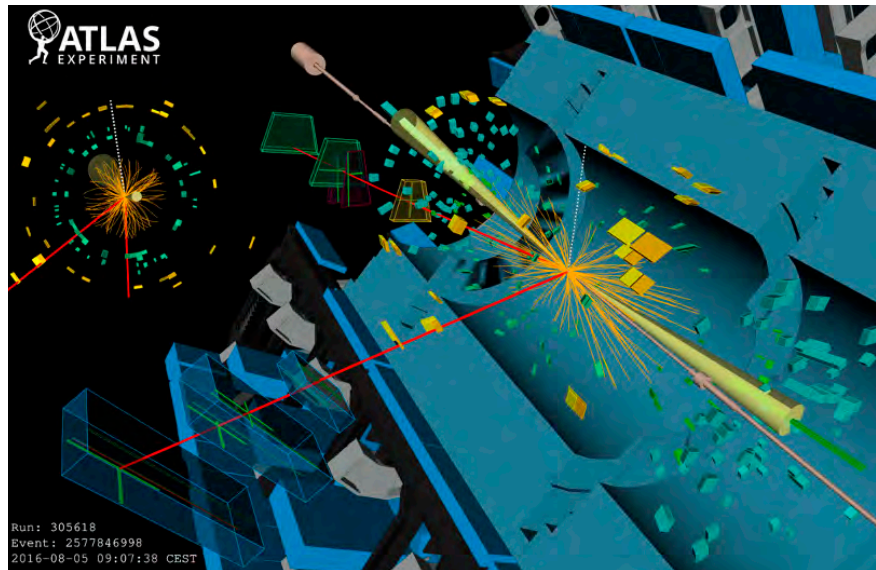
z mediatorów oddziaływania słabego.

W Modelu Standardowym fizyki cząstek elementarnych oddziaływania elektromagnetyczne i słabe są dwiema stronami tej samej monety, zunifikowanymi jako oddziaływanie elektroślabe. Uważa się, że oddziaływanie elektroślabe przeważało bezpośrednio po Wielkim Wybuchu, gdy Wszechświat był niezwykle gorący. Jednak symetria między tymi dwoma oddziaływaniami została w jakiś sposób złamana, ponieważ nośniki oddziaływania słabego, bozony W i Z, są obserwowane jako masywne, podczas gdy foton, który pośredniczy w oddziaływaniu elektromagnetycznym, jest bezmasowy.

W Modelu Standardowym złamanie tej symetrii zachodzi poprzez znany jako mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa (BEH), który wyjaśnia, dlaczego niektóre cząstki mają masę. Odkrycie bozonu Higgsa dostarczyło pierwszego eksperymentalnego potwierdzenia tego mechanizmu. Następnym krokiem jest zmierzenie właściwości nowej cząstki, w szczególności tego, jak silnie oddziałuje ona z innymi cząstkami elementarnymi. Pomiaru te są obecnie w toku, a ich celem jest potwierdzenie, że masy cząstek materii elementarnej są również wynikiem ich oddziaływania z polem BEH.

Jednak mechanizm BEH przewiduje również inne interakcje. W szczególności należy zmierzyć dwa procesy, aby potwierdzić, że mechanizm jest rzeczywiście taki, jak przewiduje Model Standardowy: oddziaływanie między podłużnie spolaryzowanymi bozonami W lub Z oraz oddziaływanie bozonu Higgsa z samym sobą. Badania samooddziaływania bozonu Higgsa powinny być możliwe najwcześniej dzięki projektowi High-Luminosity Large Hadron Collider, który ma rozpocząć działanie w 2030 r. i będzie wymagał szczegółowego określenia przyszłego zderzacza, ale pierwsze badania rozpraszania podłużnie spolaryzowanych bozonów cechowania powinny być możliwe wcześniej.

W przypadku cząstek polaryzacja odnosi się do sposobu, w jaki ich spin jest zorientowany w przestrzeni. Podłużnie spolaryzowane cząstki mają spin zgodny z kierunkiem ich pędu, co jest możliwe tylko w przypadku cząstek posiadających masę. Istnienie podłużnie spolaryzowanych bozonów W i Z (WL i ZL) jest bezpośrednią konsekwencją mechanizmu BEH, a sposób, w jaki te stany oddziałują ze sobą, jest zatem bardzo czułym testem tego, w jaki sposób łamana jest symetria elektroślaba.



Fot. 1. Rejestracja zdarzenia kandydującego do produkcji dwóch bozonów W+ poprzez rozpraszanie bozonów wektorowych, a następnie ich rozpadu na dwa miony i dwa neutrina mionowe (Źródło: ATLAS/CERN. Oznaczenia: miony są reprezentowane przez czerwone linie w wewnętrznym detektorze i spektrometrze mionowym, a dwa strumienie przez żółte stożki. Kierunek brakującej energii poprzecznej związanej z dwoma neutrinami jest oznaczony przerywaną szarą linią. Wykrycie produkcji bozonów W o polaryzacji podłużnej w Wielkim Zderzaczu Hadronów stanowi ważny krok w kierunku zrozumienia, w jaki sposób pierwotna symetria elektroślaba została złamana, co doprowadziło do powstania mas cząstek elementarnych (fot. CERN)

Badanie tej interakcji powinno pozwolić fizykom stwierdzić, czy łamanie symetrii jest realizowane poprzez minimalny mechanizm BEH, czy też jest zaangażowana jakaś nowa fizyka wykraczająca poza Model Standardowy. Nowy wynik współpracy ATLAS daje pierwszy wgląd w ten nieuchwytny proces.

Oddziaływanie WL-WL można zbadać eksperymentalnie w zderzeniach proton-proton, badając proces zwany rozpraszaniem bozonów wektorowych (Vector Boson Scattering, VBS). Proces rozpraszania bozonów wektorowych VBS polega na tym, że każdy kwark w nadchodzących protonach emituje bozon W, a następnie te dwa bozony W oddziałują ze sobą, prowadząc do wytworzenia pary bozonów W lub Z. VBS można zidentyfikować, szukając zderzeń zawierających produkty rozpadu dwóch bozonów wraz z dwoma kwarkami, które uczestniczyły w oddziaływaniu, tworząc dwa strumienie cząstek biegnące w przeciwnych kierunkach.

Nowa analiza danych ATLAS ma na celu zderzenia, w których dwa bozony W rozpadają się na elektron lub mion i ich odpowiednie neutrina. Aby stłumić tła, głównie z procesów obejmujących produkcję par kwarków szczytowych, oba leptony muszą mieć ten sam ładunek elektryczny. Potwierdzeniem eksperymentalnym jest, zatem para leptonów o tym samym ładunku (elektron-elektron, mion-mion lub elektron-mion), dwa „strumienie” cząstek o przeciwnych kierunkach wytwarzane przez rozpady kwarków oraz brakująca energia pochodząca z niewykrywalnych neutrin.

Zaprogramowano dedykowane sieci neuronowe tak, aby rozróżniały polaryzację poprzeczną i podłużną, co umożliwiło uzyskanie końcowego wyniku: dowodu o istotności statystycznej 3,3 sigma, że co najmniej jeden z dwóch bozonów W był spolaryzowany podłużnie. Po wybraniu kandydatów do procesu VBS można było określić polaryzację bozonów W. Jest to bardzo trudne wyzwanie i można je zrealizować jedynie poprzez dokładną analizę korelacji między kierunkami zrekonstruowanych elektronów i mionów, a właściwościami innych cząstek wytworzonych w interakcji.

Ten pomiar jest kamieniem milowym w badaniach nad wartością fizyki rdzenia poprzez oddziaływania spolaryzowanych bozonów w procesach rozpraszania bozonów wektorowych – mówi Yusheng Wu, koordynator grupy ATLAS Standard Model. – Wyznacza on kierunek ostatecznego badania rozpraszania bozonów spolaryzowanych podłużnie przy użyciu danych LHC Run-3 i HL-LHC”.

dr Małgorzata Nowina Konopka,
Kraków



ALICE WYKRYWA KONWERSJĘ OŁOWIU W ZŁOTO W WIELKIM ZDERZACZU HADRONÓW

W pobliżu zderzenia między jądrami ołowiu o wysokiej energii w Wielkim Zderzaczu Hadronów (Large Hadron Collider, LHC) generują się intensywne pola elektromagnetyczne, które mogą wybijać protony i przekształcać ołów w ułotne ilości jąder złota.

Genewa, 8 maja 2025 r. – W artykule opublikowanym w *Physical Review Journals* współpraca ALICE przedstawia pomiary, które ilościowo określają transmutację ołowiu w złoto w LHC w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN (*Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire*).

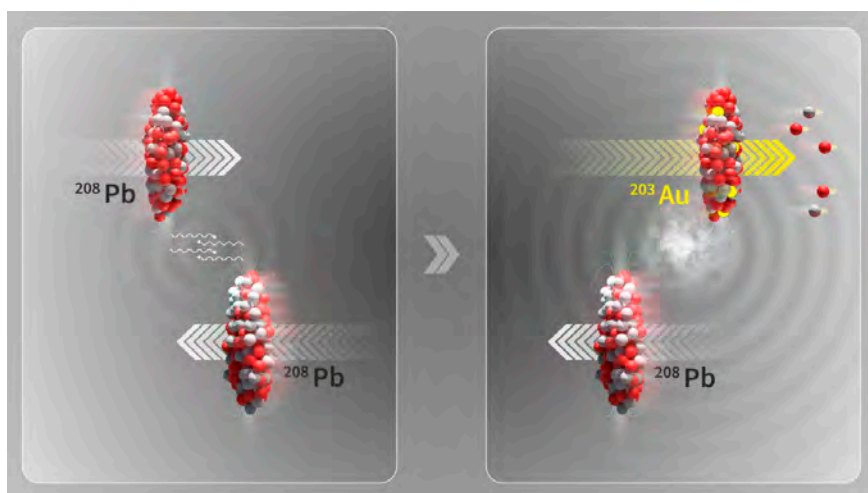
Przekształcenie metalu ołowiu w stan podstawowy w złoto – metal szlachetny – było marzeniem średniowiecznych alchemików. To długotrwałe dążenie, znane jako chryzopoeia, mogło być motywowane obserwacją, że matowoszary, stosunkowo często występujący ołów ma gęstość podobną do złota, które od dawna było pożądane ze względu na swój piękny kolor i niską abundancję. Dopiero znacznie później stało się jasne, że ołów i złoto to odrębne pierwiastki chemiczne i że metody chemiczne są bezsilne, aby przekształcić jeden w drugi.

Wraz z nadejściem fizyki jądrowej w XX wieku odkryto, że ciężkie pierwiastki mogą przekształcać się w inne – albo spontanicznie, poprzez rozpad radioaktywny, albo w laboratorium, pod wpływem bombardowania neutronami lub protonami. Chociaż złoto było już

wcześniej sztucznie wytwarzane w ten sposób, współpraca ALICE zmierzyła teraz przemianę ołowiu w złoto za pomocą nowego mechanizmu obejmującego niemal wszystkie zderzenia między jądrami ołowiu w LHC.

Ekstremalnie wysokoenergetyczne zderzenia jąder ołowiu w LHC mogą tworzyć plazmę kwarkowo-gluonową, gorący i gęsty stan materii, który prawdopodobnie wypełniał wszechświat około milionowej części sekundy po Wielkim Wybuchu, dając początek materii, którą znamy obecnie. Jednak w znacznie częstszych interakcjach, w których jądra po prostu mijają się, nie „dotykając się”, intensywne pola elektromagnetyczne wokół nich mogą indukować interakcje foton–foton i foton–jądro, które otwierają dalsze ścieżki eksploracji.

Pole elektromagnetyczne emanujące z jądra ołowiu jest szczególnie silne, ponieważ jądro zawiera 82 protony, z których każdy niesie jeden elementarny ładunek. Co więcej, bardzo duża prędkość, z jaką jądra ołowiu poruszają się w LHC (odpowiadająca 99,999993% prędkości światła), powoduje, że linie pola elektromagnetycznego są spłaszczane w cienki naleśnik, poprzecznie do kierunku ruchu, wytwarzając krótkotrwały impuls fotonów.



Fot. 1. Ilustracja zderzenia ultra peryferyjnego, w którym dwie wiązki jonów ołowiu Pb-208 w LHC przechodzą blisko siebie bez zderzenia. W procesie dysocjacji elektromagnetycznej foton oddziałujący z jądrem może wzbudzić oscylacje jego wewnętrznej struktury i spowodować wyrzucenie niewielkiej liczby neutronów (dwóch) i protonów (trzech), pozostawiając jądro złota Au-203 (fot. CERN)

Często wyzwala to proces zwany dysocjacją elektromagnetyczną, w którym foton wchodzący w interakcję z jądrem może wzbudzić oscylacje jego wewnętrznej struktury, co skutkuje wyrzuceniem niewielkiej liczby neutronów i protonów. Aby stworzyć złoto (jądro zawierające 79 protonów), trzy protony muszą zostać usunięte z jądra ołowiu w wiązkach LHC.

– To imponujące, że nasze detektory potrafią poradzić sobie ze zderzeniami czołowymi, wytwarzającymi tysiące cząstek, a jednocześnie są wrażliwe na zderzenia, w których powstaje tylko kilka cząstek na raz, co umożliwia badanie rzadkich procesów elektromagnetycznej „transmutacji jądrowej” – mówił Marco Van Leeuwen, rzecznik współpracy ALICE.

Zespół ALICE wykorzystał kalorymetry zerowego stopnia (Zero Degree Calorimeters, ZDC) jako detektora do zliczenia liczby oddziaływań foton-jądro, doprowadzających do emisji zera, jednego, dwóch i trzech protonów, którym towarzyszy co najmniej jeden neutron, a więc które są związane z produkcją odpowiednio ołowiu, talu, rtęci i złota. Chociaż jest to mniej częste niż tworzenie talu lub rtęci, wyniki pokazują, że LHC obecnie wytwarza złoto z maksymalną szybkością około 89 tys. jąder na sekundę w wyniku zderzeń ołów-ołów w punkcie zderzenia ALICE. Jądra złota wyłaniają się ze zderzenia z bardzo wysoką energią i uderzają w rurę wiązki LHC lub kolimatory w różnych punktach poniżej, gdzie natychmiast rozpadają się na pojedyncze protony, neutrony i inne cząstki. Złoto istnieje tylko przez ułamek sekundy.

Analiza ALICE pokazuje, że podczas Run 2 LHC (2015–2018) w czterech głównych eksperymentach powstało około 86 mld jąder złota. Pod względem masy odpowiada to zaledwie 29 pikogramom ($2,9 \times 10^{-11}$ g). Ponieważ jasność w LHC stale wzrasta dzięki regularnym ulepszeniom akceleratorów, Run 3 wyprodukował prawie dwukrotnie więcej złota niż Run 2, ale suma nadal jest bilion razy mniejsza niż potrzeba do wykonania biżuterii. Podczas gdy marzenie średniowiecznych alchemików technicznie się spełniło, ich nadzieje na bogactwo po raz kolejny zostały rozwiane.

– Dzięki unikalnym możliwościom ALICE ZDC, niniejsza analiza jest pierwszą, która systematycznie wykrywa eksperymentalnie i analizuje sposób produkcji złota w LHC – mówiła Uliana Dmitrieva ze współpracy ALICE.

– Wyniki pozwalają również na przetestowanie i udoskonalenie teoretycznych modeli dysocjacji elektromagnetycznej, które poza ich wewnętrznym zainteresowaniem fizycznym, służą do zrozumienia i przewidywania strat wiązki, stanowiących główne ograniczenie wydajności LHC i przyszłych zderzaczy – dodał John Jowett, również członek współpracy ALICE.

*dr Małgorzata Nowina Konopka,
Kraków*



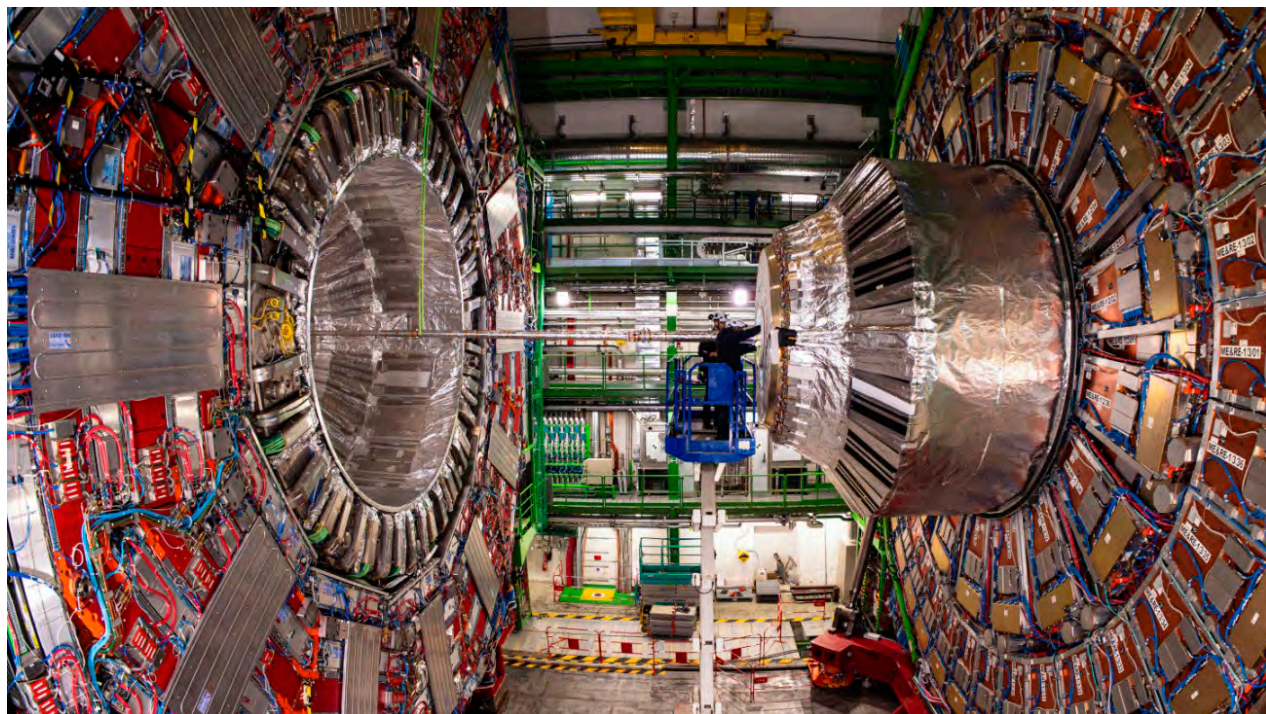
SZTUCZNA INTELIGENCJA ZWIĘKSZA POWAB BOZONU HIGGSA

Współpraca CMS przedstawia nowe poszukiwania rozpadu bozonu Higgsa na kwarki powabne, przybliżając fizyków do odkrycia, w jaki sposób ta wyjątkowa cząstka obdarza materię masą.

Bozon Higgsa, odkryty w Wielkim Zderzaczu Hadronów (Large Hadron Collider, LHC) w 2012 r., odgrywa centralną rolę w Modelu Standardowym fizyki cząstek elementarnych, nadając elementarnym cząstkom, takim jak kwarki, masę poprzez swoje oddziaływanie. Zostało zaobserwowane oddziaływanie bozonu Higgsa z najcięższymi kwarkami „trzeciej generacji” – kwarkami górnymi i dolnymi – które okazało się zgodne z Modelem Standardowym. Jednak badanie oddziaływań bozonu z lżejszymi kwarkami „drugiej generacji”, takimi jak kwark powabny, oraz najlżejszymi kwarkami „pierwszej generacji” – kwarkami górnymi i dolnymi, które tworzą podstawowe elementy jąder atomowych – stanowi nadal ogromne wyzwanie. Pozostawiając bez odpowiedzi pytanie, czy bozon Higgsa jest odpowiedzialny za generowanie mas kwarków, z których zbudowane są zwykłe materie?

Naukowcy badają oddziaływania bozonu Higgsa, obserwując, jak cząstka rozpada się na inne cząstki lub jest produkowana z innymi cząstkami w zderzeniach protonów o wysokiej energii w LHC. Na seminarium zorganizowanym w CERN w kwietniu 2025 r. współpraca eksperymentalna CMS przedstawiła wyniki pierwszego poszukiwania bozonu Higgsa rozpadającego się na parę kwarków powabnych w zdarzeniach kolizyjnych, w których bozon Higgsa jest produkowany obok dwóch kwarków górnych. Wykorzystując najnowocześniejsze techniki sztucznej inteligencji, to nowatorskie badanie zostało zastosowane do ustalenia najsurowszych jak dotąd ograniczeń dotyczących oddziaływania między bozonem Higgsa a kwarkiem powabnym.

Produkcja bozonu Higgsa w powiązaniu z parą kwarków górnych, przy czym bozon Higgsa rozpada się na pary kwarków, to nie tylko rzadki proces w LHC, ale także taki, który jest szczególnie trudny do odróżnienia od podobnie wyglądających zderzeń tła. Dzieje się tak, ponieważ kwarki natychmiast wytwarzają skolimowane strumienie (lub „strumienie”) hadronów, pokonujących tylko niewielką odległość przed rozpadem. To sprawia, że identyfikacja strumieni pochodzących z kwarków powabnych, które powstają w rozpadzie bozonu Higgsa ze strumieni pochodzących z innych typów kwarków, jest szczególnie trudna. Tradycyjne metody identyfikacji, zwane „taggingiem”,



Fot. 1. Zdjęcie eksperymentu CMS (fot. CERN)

mają trudności z efektywnym rozpoznawaniem strumieni powabnych, co wymaga opracowania bardziej zaawansowanych technik dyskryminacji.

– To badanie wymagało zmiany paradygmatu w technikach analizy – wyjaśnił Sebastian Wuchterl, pracownik naukowy w CERN – ponieważ kwarki powabne są trudniejsze do oznaczenia niż kwarki dolne, polegaliśmy na najnowocześniejszych technikach rozpoznania maszynowego, aby oddzielić sygnał od tła.

Naukowcy z CMS pokonali dwie główne przeszkody, korzystając z modeli rozpoznania maszynowego. Pierwszą z nich była identyfikacja dżetów powabnych, którą wykonano, stosując rodzaj algorytmu zwanego siecią neuronową grafową. Drugą było odróżnienie sygnałów bozonów Higgsa od procesów tła, co zostało rozwiązane za pomocą sieci transformatorowej rodzaju rozpoznania maszynowego, który stoi za ChatGPT, ale został wytrenowany do klasyfikowania zdarzeń, a nie generowania dialogów. Algorytm znakowania powabnego został wytrenowany na setkach milionów symulowanych dżetów, aby umożliwić mu rozpoznawanie dżetów powabnych z większą dokładnością.

Wykorzystując dane zebrane w latach 2016–2018, w połączeniu z wynikami poprzednich poszukiwań rozpadu bozonu Higgsa na kwarki powabne za pośrednictwem innych procesów, zespół CMS ustalił jak

dotąd najsurowsze ograniczenia dotyczące oddziaływania między bozonem Higgsa a kwarkiem powabnym, zgłaszając poprawę o około 35% w porównaniu z poprzednimi ograniczeniami. Nakłada to znaczące ograniczenia na potencjalne odchylenia od przewidywań Modelu Standardowego.

– Nasze odkrycia stanowią ważny krok – mówił Jan van der Linden, post doktorant na Uniwersytecie w Gandawie. – Dzięki większej ilości danych z nadchodzących przebiegów LHC i ulepszonym technikom analizy możemy uzyskać bezpośredni wgląd w oddziaływanie bozonu Higgsa z kwarkami powabnymi w LHC. Jest to zadanie, które kilka lat temu uważano za niemożliwe.

W miarę jak LHC kontynuuje zbieranie danych, udoskonalenia w znakowaniu powabnym i klasyfikacji zdarzeń bozonu Higgsa mogą ostatecznie umożliwić CMS i towarzyszącemu mu eksperymentowi ATLAS potwierdzenie rozpadu bozonu Higgsa na kwarki powabne. Byłby to ważny krok w kierunku pełnego zrozumienia roli bozonu Higgsa w generowaniu masy wszystkich kwarków i stanowiłby kluczowy test 50-letniego Modelu Standardowego.

dr Małgorzata Nowina Konopka,
Kraków

100. LECIE INSTYTUTU RADOWEGO W WARSZAWIE

W sobotę, 7 czerwca 2025 r., w Parku im. Marii Skłodowskiej-Curie, tuż przy Narodowym Instytucie Onkologii odbył się rodzinny Piknik „POLA RADOści”. Wydarzenie zorganizowano dokładnie 100 lat po dniu, w którym Maria Skłodowska-Curie osobiście położyła kamień węgielny pod budowę Instytutu Radowego. Organizatorami pikniku byli Burmistrz Dzielnicy Ochota Piotr Krasnodębski oraz Narodowym Instytutem Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie. Zaproszenie do udziału w pikniku skierowane zostało do dzieci, rodziców, dziadków, nauczycieli i miłośników nauki. Był to dzień, w którym nauka spotkała się z zabawą, historia z przyszłością, a powaga badań z dziecięcą ciekawością świata. Piknik oficjalnie otworzył prof. dr hab. Andrzej Kułakowski – nestor polskiej onkologii, współtwórca polskiej chirurgii onkologicznej, wybitny chirurg i utalentowany lider. Honorowy Prezes Towarzystwa Marii Skłodowskiej – Curie w Hołdzie.

W programie znalazły się: eksperymenty naukowe, spotkania z naukowcami, warsztaty i pokazy, wykłady bez trudnych słów, edukacja zdrowotna, kąciki kreatywne oraz strefy zabawy dla małych artystów i odkrywców. Przykładowo na stoisku Wydziału Fizyki UW i Studenckiego Koła Fizyki Medycznej RadiON można było poznać tajemnice ultradźwięków, zobaczyć jak wygląda pluszowy pet w PET, dowiedzieć się, kiedy pika Geiger i rozwiązać quiz o Marii Skłodowskiej-Curie. Na plenerowej scenie wykładowej zaprezentowały się „Fizyczne supermoce w białych fartuchach”, czyli

prof. Beata Brzozowska wraz ze studentami Wydziału Fizyki UW. Oprócz badaczy z Wydziału Fizyki UW, oraz Wydziału Chemii UW obecni byli pracownicy naukowcy z Wydziału Biologii UW, Instytutu Biologii Doświadczalnej im. Marcelego Nenckiego PAN, Instytutu Biochemii i Biofizyki PAN, Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie oraz Muzeum Historii Medycyny Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego.

Jak wspomniano na uroczystość wmurowania aktu erekcyjnego i kamienia węgielnego pod Instytut Radowy przyjechała w roku 1925 z Paryża jego inicjatorka, współtwórczyni i patronka Maria Skłodowska-Curie. Uczona przypieczętowała w ten symboliczny sposób starania o realizację jej największego marzenia, jakim było powstanie Instytutu Radowego w jej rodzinnym mieście. O randze tego wydarzenia świadczył udział w uroczystości Prezydenta RP Stanisława Wojciechowskiego, Premiera, Marszałków, władz stolicy, a także licznych przedstawicieli świata nauki, polityki i kultury oraz tłumnie zebranych mieszkańców Warszawy. Przyjazd Marii Skłodowskiej-Curie do kraju budził ogromne zainteresowanie. Delegacje i tłumy warszawiaków witały uczoną na dworcu, a sale wykładowe na Uniwersytecie Warszawskim i w nowo otwartym Instytucie Francuskim, gdzie wygłaszała odczyty, pękały w szwach.

Siedem lat później Maria Skłodowska-Curie po raz ostatni odwiedziła Polskę. 29 maja 1932 r. wzięła udział w uroczystym otwarciu Instytutu Radowego jej imienia.

*dr inż. Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*



Fot. 1. Stoją od lewej: Agata Małkowska (pracownik Muzeum Historii Medycyny Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego), Pola Tyszkiewicz (studentka Wydziału Lekarskiego WUM, członkini Studenckiego Koła Naukowego Sztuki Medycznej „Klio”), prof. hab. n. med. Andrzej Kułakowski, Monika Klimowska (pracownik Muzeum Historii Medycyny WUM) (fot. W. Głuszewski)



CZĘŚĆ ELEKTRYCZNA I AKPIA ELEKTROWNI JĄDROWEJ: BUDOWA, DZIAŁANIE, WYMAGANIA NORMALIZACYJNE I JAKOŚCIOWE, WYTYCZNE I ZALECENIA DLA DOSTAWCÓW I WYKONAWCÓW

JACEK NOWICKI, MINISTERSTWO PRZEMYSŁU, KATOWICE 2024 R.

Na wstępie warto wyjaśnić, czym jest AKPiA – to skrót od Aparatura Kontrolno-Pomiarowa i Automatyka. Tytuł publikacji dobrze odzwierciedla zarówno tematykę, jak i zakres opracowania. Autor skoncentrował się na opisie części elektrycznej elektrowni jądrowych z reaktorami lekkowodnymi: ciśnieniowymi (Pressurized Water Reactor, PWR) i wrzącymi (Boiling Water Reactor, BWR). Szczególną uwagę poświęcono wymaganiom normalizacyjnym, które mogą okazać się pomocne dla polskich przedsiębiorców planujących dostawy komponentów do systemów elektrycznych elektrowni jądrowej.

Publikacja powstała z inicjatywy Ministerstwa Przemysłu w ramach programu „Polski przemysł dla energetyki jądrowej”.

W części wprowadzającej autor przedstawia krótką, zwięzłą historię energetyki jądrowej na świecie. Dzięki temu czytelnicy niezwiązani zawodowo z tą dziedziną mogą zapoznać się z aktualnym stanem rozwoju energetyki jądrowej w różnych krajach oraz z oczekiwaniami polskiego ministerstwa.

W rozdziale pierwszym omówiono podstawowe cechy współczesnych technologii bloków jądrowych, porównując je z dotychczas stosowanymi rozwiązaniami. Szczególną uwagę zwrócono na wykorzystanie energii elektrycznej na potrzeby własne elektrowni.

Rozdział drugi poświęcony jest w całości części elektrycznej elektrowni jądrowej, ze szczególnym uwzględnieniem systemów bezpieczeństwa oraz aparatury kontrolno-pomiarowej.

W rozdziale trzecim omówiono uwarunkowania prawne – zarówno krajowe (ustawy Prawo atomowe oraz Prawo energetyczne), jak i międzynarodowe normy techniczne oraz wytyczne dozoru jądrowego. Przedstawiono m.in. wymagania obowiązujące w Stanach Zjednoczonych w zakresie zasilania potrzeb własnych bloków jądrowych. Następnie omówiono klasyfikację urządzeń elektrycznych oraz sposób wdrażania wymagań regulacyjnych.

Końcowa część tego rozdziału dotyczy wymagań normalizacyjnych, obejmujących wszystkie urządzenia elektryczne wykorzystywane w bloku jądrowym, ze szczególnym uwzględnieniem ich wzajemnej kompatybilności.

Rozdział czwarty poświęcono wymaganiom jakościowym i normom jakości, a piąty – zagadnieniom bezpieczeństwa.

Autor stara się rzetelnie przedstawić rzeczywiste działania organizacyjno-techniczne, które należy podjąć,



Fot.1. Okładka – Polski przemysł dla energetyki jądrowej – część elektryczna

aby włączyć się w międzynarodowy łańcuch dostaw dla budowy bloków jądrowych. Dla polskich przedsiębiorców zainteresowanych dostarczaniem własnych produktów do elektrowni jądrowych szczególnie wartościowe mogą być końcowe rekomendacje i zalecenia.

W publikacji zamieszczono liczne ilustracje i wykresy, które pomagają w zrozumieniu omawianych zagadnień. Dołączono również słownik anglojęzycznych skrótów technicznych. Biorąc pod uwagę szeroki zakres tematyczny opracowania, przydatnym dodatkiem byłby skorowidz. Szkoda, że w książce brakuje informacji o autorze.

Publikacja ta może stanowić cenne wprowadzenie do techniki jądrowej, szczególnie dla studentów kierunków technicznych i legislacyjnych związanych z energetyką jądrową.

dr inż. Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa

RYZIKO POMIĘDZY SCYLLĄ FILOZOFII, A CHARYBDĄ TECHNIKI (FILOZOFIA, METODYKA I PRAGMATYKA RYZYKA – CZ. III)

W pierwszym tekście z tego cyklu, sygnalizowaliśmy kwestie związane z ideą Międzynarodowego Dnia Ograniczania Ryzyka Klęsk Żywiotowych. Podtytuł sugeruje, że temat powinien być przedstawiony w trzech kontekstach. Chcąc wywiązać się z tej zapowiedzi, sięgnijmy najpierw do filozofii, której sama już definicja, obrosła – na przestrzeni wieków – tysiącami komentarzy.

Z filozofią, jest podobnie, jak z definicją czasu! Św. Augustyn mówił, że gdy go nie pytają, czym jest czas, wie. A jeśli zapytają? Ma trudności z wyjaśnieniem. A co zrobić z tymi, którzy są bardzo sceptyczni wobec filozofii? Nie można ich przecież zbyć anegdotą: *Pan twierdzi, że nie wyznaje żadnej filozofii? I to jest właśnie Pańska filozofia.*

W epoce antyku panowało – niestety błędne – przekonanie, iż jeśli coś jest piękne, zarazem musi być szlachetne i oczywiście mądre. Omne trinum perfectum, innymi słowy: *wszystko co potrójne, jest doskonałe.* Doskonała ma też być istota ludzka, która tak samo myśli, mówi i czyni. Czy miłość mądrości, pomoże współczesności? Czy filozofia dysponuje siłą sprawczą? Czy technika znajdzie wsparcie w filozofii? I czy technika rzeczywiście takiego wsparcia potrzebuje?

Może się Państwo uśmiechnąć, że to utopijna refleksja, lecz jestem przekonany, że filozofia – jeśli będzie rozumiana w duchu greckim, jako miłość mądrości – okaże się przydatna nam wszystkim, bez względu na wykonywaną profesję. Dowodów nie należy daleko szukać! Ongiś, w spółce Polskie Elektrownie Jądrowe, członkiem zarządu była osoba, która posiadała wykształcenie wyższe – zdobyte w wyniku ukończenia studiów filozoficznych, co zostało uwidocznione w cv i podane na stronie internetowej PEJ. Notabene, filozofem z wykształcenia był też Pan Palikot, poseł i właściciel biznesu monopolowego.

W ten sposób przynajmniej mamy jeden dylemat, definitywnie rozstrzygnięty. Na pytanie: gdzie mogą pracować absolwenci filozofii? Bez zająknięcia (i bez ryzyka popełnienia błędu) odpowiadamy: wszędzie! Ale dla asekuracji radzę tylko dodać, że wszędzie tam, gdzie wymaga się krytycznego myślenia oraz opanowania sztuki rozwiązywania problemów.

A skoro tegoroczna wiosna, choć nie poczęstowała nas zbyt wysokimi temperaturami, nie oznacza, że mamy być już optymistyczni i mniemać, że zjawisko ocieplenia klimatu, odeszło bezpowrotnie. Każdy z nas, ma inne wyobrażenie tej pory roku. Seniorzy

jeszcze pamiętają tytuły powieści z lat 50. minionego stulecia, chociażby „Traktory zdobędą wiosnę”. Moje pokolenie, wstępujące w wiek mocno już średni, pamięta organizowane w drugiej połowie XX wieku w Polsce, zawsze w maju, „Dni Książki i Prasy”.

W XXI wieku – złośliwi mawiają – że więcej osób pisze, niż czyta. Temu twierdzeniu, przeczą jednak, urządzane w maju i czerwcu 2025 r., liczne imprezy kulturalne, promujące pisarzy i ich książki oraz festiwale i targi książki, tłumnie odwiedzane przez miłośników czytelnictwa. I na tych imprezach, jak się ma książka: *każdy widzi!*

Nie można nie odnotować i innych form popularyzacji, wydawanych współcześnie książek. Nadmienię, że w krzewienia kultury czytelnictwa – od kilku dziesiątek lat – mają swój wkład „Postępy Techniki Jądrowej,” prowadząc stały dział recenzji książek naukowych, wpisując się – w tej formie – w nurt upowszechniania wiedzy z dyscyplin spod znaku nauki, techniki i gospodarki. A w wypadku „PTJ” dotyczy to głównie – co zrozumiałe – upowszechnienia wiedzy z nukleoniki, fizyki, chemii, medycyny, ekologii, a też i takich nawet dziedzin jak... archeologia, czy konserwacja dzieł sztuki.

Korzystając, z przyjaznej dla książek, dobrej, majowo-czerwcowej aury, pozwolę sobie na podzielenie się z Państwem swoją „biblioteczną”, acz domową przygodą z obcowania (w ostatnich dniach) z... encyklopediami. Wiem, że Państwo mają tego rodzaju wydawnictwa w domu, w zasięgu ręki. Często – jak to bywa na co dzień – zamiast wstać od biurka i udać się na poszukiwania, aby znaleźć konkretną książkę, łatwiej jest „kliknąć”. Chyba że brak połączenia z Internetem, uświadomi nam, iż poza wirtualną rzeczywistością, istnieje (jednak!) życie duchowe „normalnie materialne”.

Zdaję sobie sprawę, że intensywniejsze obcowanie z dziełami, powstałymi w wyniku pracy towarzyszy sztuki drukarskiej – jak nazywani byli ongiś zecerzy – nie musi, a nawet nie powinno, być pochodną awarii dysku laptopa, czy braku dostępności do sieci internetowej. Ale tak – niestety – było w moim wypadku, co z dużą skruchą przyznaję!

Korzystanie z książek drukowanych w XIX, czy XX wieku ma, oprócz funkcji poznawczej, także swój wymiar psychoterapeutyczny. Można nawet rzec – z odrobiną niemodnego patosu – że obcowanie z książkami, w postaci opasłych tomów, daje poczucie stabilności, spokoju wyciszenia, zarazem budując – potrzebny dla zdrowia psychiki – dystans, wobec agresywnie reklamowanego świata przedmiotów, które są natrętnie prezentowane w audycjach radiowych i telewizyjnych oraz social mediach. Co stało się już wszechobecną normą!

Teksty w dawnych wydawnictwach encyklopedycznych, nie komplikują odbioru swoją wyrafinowaną

narracją. Dlatego struktura przedstawianych pojęć była dla ówczesnych czytelników, bardziej klarowna, acz w konfrontacji z ustaleniami współczesnych badaczy, wiele informacji zestarzało się już intelektualnie. Cóż, nauka nie stoi w miejscu. I to akurat należy jej (tj. nauce!) zapisać na plus.

Przypomnijmy, że jeszcze w XIX stuleciu większość mieszkańców pomiędzy Odrą i Bugiem, także też i zamieszkujących daleko na zachód od Odry czy jeszcze dalej na wschód od Bugu, nie potrafiła ani pisać, ani czytać. Jaki więc niewielki był pożytek z realizacji marzenia poety, że jego księgi trafią pod strzechy? (Wyjawszy, oczywiście, wydania obficie ilustrowane!?).

A wracając do starych ksiąg, komu przeszkadzało lakoniczne, ale jakże pełne trafności hasło, w staropolskiej encyklopedii Benedykta Chmielowskiego: *Koń jaki jest każdy widzi*. We współczesnej dobie, opartej o kulturę audio-wizualną, jak nie zobaczysz, nie uwierzysz. Nic się nie zmieniło! Jest tylko jedno małe, ale... W czasach wszechpotęgi pojazdów mechanicznych, masz większą szansę zobaczyć konia na gonitwie Wielka Pardubicka, niż pracującego w polu.

Wszelka analiza, a tym bardziej z podtekstem filozoficznym, musi opierać się na słowie. A nas interesuje pojęcie *ryzyka*! Zajrzałem, najpierw do Wielkiej Ilustrowanej Encyklopedii Wydawnictwa Gutenberga. Nie podano tam hasła: *ryzyko*. Nie było go też w Wielkiej Encyklopedii Powszechnej PWN, wydanej w epoce Władysława Gomułki. Nie znalazłem hasła: *ryzyko*, także w pięciotomowej encyklopedii PWN, z czasów panowania Edwarda Gierka. A doprawdy, trudno obawiać się czegoś, czego nie ma nawet w encyklopedii!

Wysunąłem więc tezę, że brak opracowania definicji pewnych pojęć – w wyżej wymienionych wydawnictwach – wiąże się, prawdopodobnie, ze stopniem dużej semantycznej złożoności owych pojęć i zarazem ich nader specyficznej niedookreśloności.

Znamienne, iż znany ze skrupulatności, Władysław Kopaliński, którego słownik wyrazów obcych, cieszy się niezmiennie ogromną popularnością od dziesięcioleci i jest wielokrotnie wznawiany, też pominął słowo *ryzyko*.

Okazuje się, że ważne jest nie tylko to, o czym się informuje czytelnika, ale równie istotne jest, o czym się go nie informuje. Intrygujące jest tylko, z jakich przyczyn!

W jakimś stopniu moje przypuszczenia, dotyczące nieobecności tego pojęcia w wymienionych wydawnictwach encyklopedycznych, potwierdza wpis w „Słowniku wyrazów bliskoznacznych” pod redakcją Stanisława Skorupki. Uwagi tam wydrukowane, dotyczą bliskoznacznych kontekstów tylko dla czasownika *ryzykować*, ale za to tropy poszukiwań przyczyn nieobecności *ryzyka* zasługują na pełne zacytowanie: *Ryzykować: Ryzykować zdrowie, życie – bez potrzeby, lekomyślnie. Hazardować. Losować. Próbować szczęścia.*

Kusić los. Rzucić losy, kości. Ciągnąć los. Stawiać na jedną kartę. (pot.) Kupować kota w worku. Por. Naradzać się, Odważyć się. („Słownik wyrazów bliskoznacznych, pod red. Stanisława Skorupki, Wydawnictwo Powszechne, Warszawa 1971, wyd. V, s.191).

Sięgnąłem więc już z rezygnacją, ale i dużą determinacją, do ostatniej deski ratunku. (I pomyśleć, że skrybowie zakonnicy, opracowali drogocenne manuskrypty deskami, a dziś twarda oprawa z tektury jest przejawem luksusu i konsumpcyjnego rozpasania).

Ostatnia encyklopedia, jaką dysponowałem w przydomowej bibliotece jest skromnym, jednotomowym wydawnictwem z roku 1959. I tu miłe zaskoczenie! Tym razem redaktorzy PWN zaryzykowali. I dzięki tym niestrudżonym w niesieniu kaganka oświaty pracownikom frontu edukacyjnego, możemy dziś przeczytać:

Ryzyko [wł.], w prawie ubezp. możliwość zajścia wypadku lub rodzaj niebezpieczeństwa, objętego ubezpieczeniem (np. gradobicia); w prawie zobowiązaniowym jedna z podstaw odpowiedzialności z tytułu czynów niedozwolonych zobowiązująca do odszkodowania, za wyrządzone szkody, nawet wówczas, gdy sprawca nie ponosi winy” (s.844).

Okazuje się, że w latach 50. zeszłego stulecia, nie byliśmy jeszcze społeczeństwem ryzyka, i jeszcze nikt nie zatytułował swojego hitu książkowego, aby sugerować, że ryzyko towarzyszy nam zawsze i w związku z tym jesteśmy permanentnymi odbiorcami skutków jego aktywności. Nostalgiczny czas ryzyka kojarzącego się wyłącznie z gradobicie, przeszedł już do historii.

Zanim jednak dojdziemy do tego ostatniego punktu naszych rozważań, warto zastanowić się dlaczego pojęcie *ryzyka* przysparza nam określonych trudności poznawczych? Nie wiem, jaka na tak właśnie postawione pytanie – byłaby odpowiedź ze strony kognitywistów, językoznawców, psychologów, czy socjologów.

Jak postrzegamy pojęcie *ryzyka* w roku 2025? Jak je rozumiemy i jakie są jego związki z naszą codzienną sytuacją. W tym ostatnim przypadku, odpowiedź wymagałaby badań socjologicznych, przeprowadzonych na tzw. reprezentatywnej grupie respondentów. Spróbujmy – zamiast owych badań – oprzeć się na internetowej wyszukiwarce. Wpisując słowo *ryzyko* podpowiada ona – na zasadzie częstości jego wyszukiwania – co inni internauci wcześniej szukali w zasobach internetowych na ten właśnie temat. A byli zainteresowani ryzykiem zawodowym, ryzykiem chorób naczyniowo – sercowych, a nawet wpisywali powszechnie znany zwrot: *ryzyk – fizyk*, licząc złudnie, na podanie genezy owego zwrotu.

Dzięki Internetowi dowiadujemy się, iż autorzy krzyżówek, mogą nas pytać, o inne określenie „ryzykowej wyprawy”. A czas wolny możemy z pożytkiem zagospodarować, gdy będziemy korzystali z gry

planszowej zatytułowanej „Ryzyko”. Każdy znajdzie to, czego szuka – można skwitować!

Czy tylko na tej podstawie można rozpocząć budowanie fundamentów kultury bezpieczeństwa? Oczywiście – nie! To zaledwie wstęp, a raczej wstęp do wstępu. Tematyka bezpieczeństwa staje się w XXI wieku wiodącą wśród najważniejszych tematów politycznych, gospodarczych i naukowych. Ryzyko musi być – po prostu – traktowane i opisywane w kategoriach obiektywnego faktu.

Zasadnicza kwestia, która w naszym cyklu powinna zostać poddana także refleksji, dotyczy – w gruncie rzeczy – jednego fundamentalnego pytania: wpływ jakiej filozofii odegrał – i ma nadal – istotne znaczenie

w rozwoju współczesnych technologii, włącznie z technikami jądrowymi, a w konsekwencji m.in. z procesem dotyczącym wydania zezwoleń na budowę elektrowni jądrowych? I próba zobiektywizowania odpowiedzi, na kwestie w tym ostatnim akapicie tekstu zasygnalizowane, nie powinna stronić, także właśnie, od filozofii. Dlatego już teraz zapraszam do lektury kolejnego odcinka naszego felietonowego cyklu.

Marek Bielski,
Przegląd Techniczny,
Warszawa



POŻEGNANIE WITOLDA ŁADY (2.01.1931 – 7.06.2025)

Z żalem przyjęliśmy wiadomość o śmierci Witolda Łady, byłego wiceprezesa oraz Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego Państwowej Agencji Atomistyki.

Witold Łada był absolwentem Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie uzyskał tytuł magistra fizyki w 1959 r. Już podczas studiów rozpoczął pracę zawodową w Instytucie Badań Jądrowych, angażując się w działalność związaną z produkcją i dystrybucją izotopów w Świerku. W 1983 r. dołączył do Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

W 1992 r. objął stanowisko wiceprezesa Państwowej Agencji Atomistyki, a rok później został mianowany Głównym Inspektorem Dozoru Jądrowego. W ramach swoich obowiązków nadzorował bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną w Polsce, w tym kontrolował stosowanie źródeł promieniotwórczych oraz działalność reaktorów badawczych, takich jak MARIA i EWA. Po 15 latach pełnienia tej odpowiedzialnej funkcji przeszedł na emeryturę w 2008 r.

Redakcja PTJ



Fot. 1. Witold Łada (fot. archiwum rodzinne)



POŻEGNANIE
PROF. DR. HAB. MARKA
TROJANOWICZA
(30.04.1944 – 7.06.2025)

10 czerwca 2025 r., w wieku 81 lat, zmarł wybitny polski uczony, specjalista w dziedzinie chemii analitycznej, prof. dr hab. Marek Trojanowicz.

Jego kariera naukowa rozpoczęła się w 1966 r. kiedy to ukończył studia chemiczne na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, pod kierunkiem prof. Wiktora Kemuli.

W 1974 r. pod kierunkiem prof. Adama Hulanickiego obronił doktorat z zakresu chemii analitycznej na temat teorii miareczkowań kompleksometrycznych z detekcją potencjometryczną. W 1981 r. uzyskał habilitację, a przygotowana rozprawa habilitacyjna dotyczyła zastosowań membranowych elektrod jono-selektywnych w analizie wód. W 1991 r. otrzymał tytuł profesora nauk chemicznych. W latach 1989–2014 kierował Pracownią Analizy Przepływowej i Chromatografii na Uniwersytecie Warszawskim.

W 1992 r. prof. Marek Trojanowicz związał się z Instytutem Chemii i Techniki Jądrowej, gdzie pracował niemal do ostatnich dni swojego życia, oddając się pracy z niezmiennym zaangażowaniem i pasją. Zainicjował szereg nowych kierunków badań w Instytucie, dotyczących zastosowania promieniowania jonizującego w ochronie środowiska oraz metod analitycznych w technologiach jądrowych.

Prof. Trojanowicz cieszył się olbrzymim szacunkiem i uznaniem środowiska naukowego. Był cenionym ekspertem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, często delegowany na misje naukowe m.in. do Arabii Saudyjskiej. W IChTJ odegrał bardzo dużą rolę w kształceniu młodych kadr. Był promotorem wielu doktorantów i dyplomantów, a w ramach Studium Doktoranckiego prowadził wykłady z analizy przepływowej.

Prof. Marek Trojanowicz przez wiele lat zajmował czołową pozycję na liście najbardziej wpływowych naukowców na świecie (przygotowana przez Uniwersytet Stanforda we współpracy z wydawnictwem Elsevier: World's Top 2% Scientists). Jego osiągnięcia zostały docenione przez gremia krajowe i międzynarodowe, czego dowodem jest lista wyróżnień i nagród, w tym Medal im. Andrzeja Waksmundzkiego za osiągnięcia z zakresu chromatografii, przyznawany przez Komitet Chemii Analitycznej PAN czy medalem



Fot. 1. prof. dr hab. Marek Trojanowicz (fot. Sylwester Wojtas)

honorowym Japońskiego Towarzystwa Analizy Przepływowej.

Był naukowcem niezwykle aktywnym, wciąż poszukiwał nowych tematów badawczych i współpracował z wieloma ośrodkami naukowymi.

Pracownicy Instytutu zawsze mogli liczyć zarówno na merytoryczną rozmowę na tematy chemiczne, ale także na dyskusję na różnorodne tematy związane z podróżami, ogrodnictwem i muzyką. Jego zainteresowanie muzyką miało również praktyczny charakter, bo prof. Trojanowicz był współzałożycielem i długoletnim prezesem Międzynarodowej Fundacji Promocji Muzyki Polskiej i aktywnym działaczem Chóru Akademickiego UW.

Pozostanie w naszej pamięci jako Człowiek o niezwykle szerokiej wiedzy oraz ogromnym doświadczeniu, a przy tym skromny, koleżeński, pogodny, otwarty na świat i ludzi. Mimo wieku był czynny zawodowo, pełen energii i pasji do działania. Bardzo będzie nam brakowało Pana Profesora.

*dr Ewelina Chajduk,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*

EuroPOWER & OZE POWER

Warszawa, 3-4 kwietnia 2025 r.



Przemówienie Marzeny Czarneckiej, Minister Przemysłu



Wystąpienie Pauliny Hennig-Kloski, Minister Klimatu i Środowiska



Maciej Bando, Współprzewodniczący Rady Programowej EuroPOWER & OZE POWER podczas przemówienia



Deбата inauguracyjna na temat Strategicznej wizji polskiej transformacji energetycznej



Dyskusja na temat polskiej energetyki jądrowej – szanse, zagrożenia i droga do realizacji



Paweł Gajda opowiada o wyzwaniach związanych z realizacją programu jądrowego w Polsce



Zaproszeni paneliści podczas debaty o zielonej energii



Uczestnicy konferencji

(Fot. MMC Polska, zob. więcej na str. 30)

Third International Conference on Applications of Radiation Science and Technology ICARST-2025

Wiedeń, 7-11 kwietnia 2025 r.



Wystąpienie dyrektora IChTJ prof. dr hab. inż. Andrzej Chmielewski (fot. organizator konferencji)



Przedstawiciele IAEA: Celina Horak i Bum Soo Han wręczają statuetkę uznania dla wystawcy IChTJ (fot. J. Perez De La Maza)



Prelegenci i przewodniczący sesji Emerging Applications in Radiation Processing: Marija Majer, Renata Homlok, Igor Danko, Maria Helena Casimiro, Dagmara Chmielewska-Śmietanko, Ahmed A. Basfar, Jongwon Kim (fot. M. Walo)



Uczestnicy konferencji Dr Byungnam Kim i prof. Yongxia Sun (fot. organizator konferencji)



Pracownicy IChTJ biorący udział w konferencji ICARST-2025 (fot. S. Masic)