



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

BIULETYN

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

1 (135) 2025

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

WYDAWCA

Państwowa Agencja Atomistyki

ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa

REDAKCJA

Maciej JURKOWSKI – redaktor naczelny

Elżbieta ZALEWSKA – redaktor prowadzący

Marek WOŹNIAK – redaktor techniczny

Jarosław CHILMON – członek redakcji

ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa

TEL. 22 628 94 39

FAX 22 621 37 86

E-MAIL biuletyn@paa.gov.pl

WWW. gov.pl/web/paa

RADA PROGRAMOWA

prof. dr hab. **Janusz JANEK** – przewodniczący Rady

prof. dr hab. inż. **Andrzej CHMIELEWSKI** – członek Rady

prof. dr hab. n. med. **Marek K. JANIAK** – członek Rady

prof. dr hab. n. med. **Eugeniusz DZIUK** – członek Rady

prof. dr hab. n. med. **Leszek KRÓLICKI** – członek Rady

dr hab. **Agnieszka KORGUL** – członek Rady

dr **Tomasz NOWACKI** – członek Rady

e-ISSN 2353-9062

ISSN 0867-4752

DRUK

Print Profit Sp. z o.o., Koźmin 27, 59-900 Zgorzelec

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

BIULETYN INFORMACYJNY PAŃSTWOWEJ AGENCJI ATOMISTYKI

Nr 1 (135) 2025
Warszawa

Spis treści

- 6** Redakcja Biuletynu BJIOR PAA
Wspomnienie o profesorze NCBJ dr. inż. Andrzej Strupczewskim
- 9** Andrzej G. Chmielewski
Wskaźniki poziomu gotowości technologicznej (TRL) a oferowane obecnie technologie jądrowe
- 23** Michał Ochmański, Krzysztof Isajenko, Barbara Piotrowska
Radiologiczny monitoring gleby w otoczeniu Krajowego Składowiska
Odpadów Promieniotwórczych w Różanie w latach 2014–2023
- 31** Łukasz Koszuc
Wpływ reflektora SiO_2 na bezpieczeństwo krytycznościowe bezpośredniego (geologicznego)
składowania wypalonego paliwa jądrowego – benchmark Japońskiej Agencji Energii Atomowej
- 47** Robert Bobkier, Ewa Katarzyna Czech
Radon in Educational Institutions. Part I: Obligations of Heads of Educational Institutions
Towards Pupils under Article 23c (1–2) of Polish Atomic Law

Szanowni Państwo

Bieżący numer otwiera wspomnienie o zmarłym dniu 18 lutego 2025 roku wybitnym polskim specjalście w dziedzinie energetyki jądrowej i bezpieczeństwa jądrowego, długoletnim pracowniku instytutów w ośrodku badań jądrowych w Świerku, **dr. inż. Andrzeju Strupczewskim**, profesorze NCBJ (Narodowe Centrum Badań Jądrowych). Zmarły był Przewodniczącym Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego i rzecznikiem energetyki jądrowej w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, ekspertem ds. bezpieczeństwa jądrowego Komisji Europejskiej i Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA), wiceprezesem Stowarzyszenia Ekologów na rzecz Energii Nuklearnej (SEREN), członkiem Komisji Egzaminacyjnej na uprawnienia inspektorów dozoru jądrowego Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, oraz współpracownikiem redakcji naszego Biuletynu.



Wspomnienie to poprzedza ważna bieżąca informacja o udziale Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki w spotkaniu poglądowym Wspólnej Konwencji Bezpieczeństwa w Postępowaniu z Wypalonym Paliwem Jądrowym i Bezpieczeństwa w Postępowaniu z Odpadami Promieniotwórczymi w Wiedniu.

Artykuły opublikowane w bieżącym numerze poświęcone są różnym aspektom bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, dotyczącym obiektów istniejących, obiektów czy technologii dopiero wdrażanych, oraz doskonaleniu instrumentów prawnych i działań pozwalających skutecznie unikać zagrożeń wynikających z sytuacji istniejącego narażenia na promieniowanie jonizujące.

W pierwszym z nich **Andrzej Chmielewski** podejmuje temat konieczności oceny poziomu gotowości technologicznej nowo wdrażanych technologii radiacyjnych czy jądrowych przed podjęciem decyzji o ich wdrożeniu, co ma bardzo istotny wpływ na późniejszą jakość obiektów czy procesów z punktu widzenia zagrożeń jakie mogą one stwarzać, gdy jakość ta jest niedostateczna z powodu niedoszacowania nakładów potrzebnych do osiągnięcia wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Autor podaje przykład wdrożenia skomplikowanej technologii radiacyjnej z wcześniejszym oszacowaniem poziomu jej gotowości technologicznej według skali TRL (*Technical Readiness Level*) oraz przytacza rezultaty oceny z wykorzystaniem TRL postępów prac w zakresie rozwoju nowych technologii jądrowych, jakimi są małe reaktory modułowe SMR.

W kolejnym artykule **Michał Ochmański, Krzysztof Isajenko i Barbara Piotrowska** analizują wyniki pomiarów skażeń gleby, wykonanych w latach 2014–2023 wokół Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie, w ramach systematycznego monitoringu radiacyjnego środowiska wokół tego obiektu, w celu stwierdzenia, czy składowane tam odpady wpływają na skażenie promieniotwórcze otoczenia.

Kwestie bezpieczeństwa krytycznościowego głębokiego (geologicznego) składowania wypalonego paliwa jądrowego podjął **Łukasz Koszucki**, relacjonując w swoim artykule wyniki benchmarku, zorganizowanego przez Japońską Agencję Energii Atomowej, którego uczestnicy badali wpływ dwutlenku krzemu jako reflektora neutronów na wartość współczynnika mnożenia neutronów w perspektywie czasowej dziesiątek milionów lat, tj. znacznie dłuższej niż przyjmowany projektowy czas życia głębokich składowisk wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych.

W ostatnim z zamieszczonych artykułów **Robert Bobkier i Ewa Katarzyna Czech** analizują obowiązki kierowników jednostek systemu oświaty, wynikających z przepisów Prawa atomowego dotyczących sytuacji narażenia na radon, w kontekście ich odpowiedniego stosowania do uczniów. Autorzy koncentrują się na obowiązku zapewnienia pomiarów stężenia radonu oraz realizacji działań optymalizacyjnych i informacyjnych, wskazując na ich znaczenie dla ochrony zdrowia dzieci przebywających w jednostkach systemu oświaty.

Życzymy Państwu owocnej lektury,

Redaktor naczelny
Maciej Jurkowski

Spotkanie przeglądowe Wspólnej Konwencji Bezpieczeństwa w Postępowaniu z Wypalonym Paliwem Jądrowym i Bezpieczeństwa w Postępowaniu z Odpadami Promieniotwórczymi w Wiedniu

Polskiej delegacji podczas ósmego spotkania przeglądowego Wspólnej Konwencji przewodniczył Prezes Państwowej Agencji Atomistyki, Andrzej Głowacki, któremu towarzyszyli eksperci PAA, Ministerstwa Przemysłu i Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych.

Spotkanie odbyło się 17–28 marca pod auspicjami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Celem Wspólnej Konwencji, która obowiązuje od 2001 r. i której sygnatariuszem jest również Polska, jest osiągnięcie i utrzymanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa w postępowaniu z wypalonym paliwem jądrowym i odpadami promieniotwórczymi na całym świecie.



Fot. 1. Polska delegacja podczas spotkania przeglądowego (Prezes PAA drugi od prawej; fot. PAA).

W trakcie dyskusji pozytywnie oceniono (*areas of good performance*) następujące działania Polski:

1. Zapewnianie społeczeństwu przez PAA kompleksowych informacji o bezpieczeństwie jądrowym i ochronie radiologicznej – w tym stałe informowanie o sytuacji w obiektach jądrowych na Ukrainie i sytuacji radiacyjnej na terytorium Polski.
2. Udział PAA we wspólnych inicjatywach z innymi organami dozoru jądrowego w celu identyfikacji i pracy nad rozwiązaniem problemów związanych z licencjonowaniem nowych typów reaktorów oraz prowadzenie dialogu z inwestorami planującymi budowę obiektu jądrowego, w zakresie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego.
3. Wprowadzenie do ustawy Prawo atomowe przepisu o dotacjach celowych na sfinansowanie kosztów przygotowania budowy nowych składowisk odpadów promieniotwórczych. Dotacji udziela minister właściwy do spraw gospodarki surowcami energetycznymi na wniosek dyrektora Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych.

W trakcie pierwszego tygodnia spotkania eksperci wskazywali również najważniejsze wspólne wyzwania stojące przed wieloma krajami w zakresie postępowania z wypalonym paliwem jądrowym i odpadami promieniotwórczymi, tzw. „overarching issues”. To m.in. zarządzanie wiedzą, konieczność wzmocnienia kadrowego, potrzeba wczesnego zaangażowania społeczeństwa w procesy decyzyjne.

Spośród 180 państw członkowskich MAEA, 90 to sygnatariusze Wspólnej Konwencji Bezpieczeństwa w Postępowaniu z Wypalonym Paliwem Jądrowym i Bezpieczeństwa w Postępowaniu z Odpadami Promieniotwórczymi. Spotkania przeglądowe odbywają się co trzy lata.

Wspomnienie o profesorze NCBJ dr. inż. Andrzeju Strupczewskim

W dniu 18 lutego 2025 roku zmarł w wieku 88 lat wybitny polski ekspert w dziedzinie energetyki jądrowej i bezpieczeństwa jądrowego, jeden z ostatnich twórców Instytutu Badań Jądrowych w Świerku – profesor Andrzej Strupczewski. Żegnany przez Rodzinę oficjalne delegacje (NCBJ, PAA i innych instytucji) oraz grono przyjaciół i współpracowników, został pochowany, po Mszy św. w kościele w Starej Miłosnej, na miejscowym cmentarzu w piątek 21 lutego 2025 roku.

Urodzony w 1937 roku w Warszawie, po maturze studiował na Wydziale Konstrukcyjnym (obecnie: Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa) Politechniki Warszawskiej, uzyskując w roku 1960 dyplom magistra inżyniera mechanika o specjalności energetyka jądrowa. Dziedzinie tej poświęcił całe swoje życie, stała się ona jego pasją. Zaraz po studiach podjął pracę przy reaktorze EWA, w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku. Przepracował tam ponad 65 lat (po likwidacji IBJ w 1982 roku – w Instytucie Energii Atomowej i wreszcie – w Narodowym Centrum Badań Jądrowych). Jako specjalista w obliczeniach i pomiarach ciepłno-przepływowych miał znaczący udział w zwiększeniu mocy nominalnej reaktora EWA, którą na podstawie wyników pomiarów wykonanych w trakcie cyklu doświadczeń przeprowadzonych przez niego na pracującym reaktorze, podniesiono z 2 do 10 MW.



Od początku pracy w IBJ miał okazję doskonalić swoje umiejętności zawodowe w wiodących ośrodkach szkolenia kadr dla energetyki jądrowej za granicą, przechodząc m.in. szkolenie w Saclay we Francji, gdzie w 1962 roku uzyskał *Certificat de l'Ecole Pratique de Reacteurs au Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay* oraz odbywając w 1963 roczny staż szkoleniowy w USA, jako asystent profesora ds. obliczeń ciepłno-przepływowych na Columbia University w Nowym Jorku, uczestnicząc ponadto w zajęciach *School of Engineering and Applied Science* na tym uniwersytecie. W 1969 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Na przełomie lat 60. i 70. prowadził prace analityczno-obliczeniowe w ramach analiz bezpieczeństwa związanych z przygotowaniem do uruchomienia nowego wielozadaniowego reaktora badawczego i produkcyjnego w Świerku. Był autorem obliczeń osłon reaktora MARIA, kierował i aktywnie uczestniczył w opracowaniu eksploatacyjnego raportu bezpieczeństwa oraz, jako Kierownik Rozruchu Technologicznego Reaktora, w jego rozruchu, który nastąpił w lipcu 1974 roku.

Od 1975 roku do likwidacji instytutu w 1982 kierował Zakładem Inżynierii Reaktorowej IBJ, w 1977 roku mianowano go docentem. Do jego zadań należała realizacja programów pętlowych, budowa stanowiska badawczo-modelowego przy reaktorze MARIA do badań (we współpracy międzynarodowej z Finlandią i byłym ZSRR) paliwa jądrowego dla reaktorów energetycznych. W latach 1977–1980 przewodniczył sekcji Energetyki Jądrowej w Radzie Naukowej IBJ. Kierując Zakładem Inżynierii Reaktorowej przeprowadził szereg doświadczeń poświęconych badaniu krytycznych parametrów wymiany ciepła przy wrzeniu w niskich i średnich ciśnieniach w pętli WIW-300 i w reaktorze MARIA.

W 1980 znakomita większość z kilku tysięcy zatrudnionych w IBJ pracowników wstąpiła do „Solidarności”, a środowisko reaktorowe było pierwszym, które założyło u siebie w zakładzie organizację NSZZ „Solidarność”. Strupczewski z racji zajmowanego kierowniczego stanowiska nie mógł być działaczem związkowym, jednak wśród przyjętych do „Solidarności” pracowników IBJ stał się 203 w kolejności członkiem związku w instytucie. Zaanga-

zowanie IBJ w ruch „Solidarność” poskutkowało, po wprowadzeniu stanu wojennego w grudniu 1981, likwidacją instytutu i reorganizacją ośrodka jądrowego w Świerku w 1982.

Andrzej Strupczewski od 1977 kierował programem badań bezpieczeństwa reaktorów WWER¹ realizowanym przez Polskę we współpracy z b. ZSRR i Finlandią. Po przejściu tematyki reaktorowej przez nowo utworzony Instytut Energii Atomowej (IEA) Strupczewski w 1983 mianowany został pełnomocnikiem dyrektora IEA do spraw realizacji tego programu, koncentrując się na współpracy międzynarodowej i na kontynuacji programów pętlowych w reaktorze MARIA. Ruszała wtedy budowa 2 bloków z reaktorami WWER 440 typ 213 elektrowni jądrowej Żarnowiec, która mimo sporego zaawansowania prac została jednak niedługo po katastrofie czarnobylskiej ostatecznie wstrzymana w 1990.

Andrzej Strupczewski, jako uznany ekspert o światowej renomie, zaangażował się w latach 90. we współpracę z Międzynarodową Agencją Energii Atomowej (MAEA) i Komisją Europejską.

W latach 1993–2000 pracował w MAEA na wysokim stanowisku (P-5, wymagającym najwyższych kwalifikacji technicznych) eksperta ds. bezpieczeństwa reaktorów jądrowych i ocen porównawczych zagrożeń od różnych rodzajów źródeł energii, specjalizując się w ocenie bezpieczeństwa rosyjskich reaktorów energetycznych typu WWER-440 i WWER-1000. Badał bezpieczeństwo elektrowni jądrowych w Armenii, w Bułgarii, w Czechach, na Węgrzech i w Słowacji, prowadził misje MAEA do oceny bezpieczeństwa elektrowni Paks na Węgrzech, Dukowany i Temelin w Czechach, wykonywał analizy dla EJ Temelin i EJ Mochowce. Prowadził też analizy porównawcze wpływu różnych źródeł energii na środowisko i zdrowie człowieka. Z ramienia MAEA opracował wytyczne (*safety guidelines*) do oceny i podnoszenia bezpieczeństwa elektrowni jądrowych z reaktorami WWER, współdziałał przy opracowaniu podobnych dokumentów MAEA dla innych rodzajów reaktorów wodnych-ciśnieniowych (PWR). Jako ekspert MAEA był także jednym z czterech fachowców międzynarodowych powołanych do oceny najnowszych reaktorów III generacji, proponowanych dla Wielkiej Brytanii, przeprowadzonej przez MAEA na zlecenie brytyjskiego dozoru jądrowego.

W latach 90. jako ekspert Komisji Europejskiej w programie TACIS² wykonał ocenę wpływu programów pomocowych Unii Europejskiej w obszarze *nuclear safety* na bezpieczeństwo elektrowni jądrowych w Rosji i na Ukrainie, przeprowadzając w tym celu wizje lokalne we wszystkich elektrowniach jądrowych, organizacjach wsparcia technicznego i urzędach dozoru jądrowego tych państw. Zorganizował również misję międzynarodową do oceny bezpieczeństwa elektrowni jądrowej Balakovo, kierował jej pracami na terenie samej elektrowni i opracował obszerny raport zaakceptowany przez Komisję Europejską.

Andrzej Strupczewski był bardzo zaangażowany w swoją pracę, był perfekcjonistą, wybitnym inżynierem praktykiem, bardzo zdolnym analitykiem i pomiarowcem, odważnym eksperymentatorem, ale także sprawnym negocjatorem i doskonałym mówcą. W tym ostatnim oraz w łatwym nawiązywaniu kontaktów pomagała mu doskonała znajomość kilku języków. Wykorzystując swoje nieprzeciętne uzdolnienia zdobył nawet uprawnienia tłumacza symultanicznego i korzystał z tego na licznych konferencjach, traktował to jako hobby stając się w dziedzinie energetyki jądrowej ustnym tłumaczem niedościgłym. Dość powiedzieć, że obsługiwał w tym charakterze w kraju i zagranicą ustne tłumaczenia nie tylko angielsko-polskie, ale także angielsko-rosyjskie. Warto też wspomnieć, że był jednym z ojców założycieli Stowarzyszenia Tłumaczy Polskich. Był człowiekiem o niezwyklej kreatywności i niewyczerpanej energii, angażował się w wiele inicjatyw związanych z jego dziedziną, w której był niekwestionowanym autorytetem. W latach 2000–2022 kierował pracami Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego przy dyrektorze IEA, a potem dyrektorze utworzonego w 2011 Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), jako posiadacza zezwolenia na eksploatację reaktora MARIA, jasno i klarownie formułując wnioski wynikające z ocen bezpieczeństwa pracy układów technologicznych tego reaktora. Zdając sobie sprawę z ogromnego deficytu wiedzy o bezpieczeństwie energetyki jądrowej w społeczeństwie i z potrzeby, czy wręcz konieczności jej upowszechniania, był inicjatorem, wykładawcą i organizatorem cyklicznych kilkudniowych dużych konferencji szkoleniowych, zwanych Szkołami Energetyki Jądrowej (w latach 2001–2023 odbyło się ich łącznie 11). Był także autorem książek dotyczących tej tematyki oraz artykułów w periodykach branżowych takich jak *Przegląd Elektrotechniczny*, *Postępy Techniki Jądrowej*, czy nasz biuletyn *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*. Jest autorem 5 książek i około 300 prac na temat energetyki jądrowej. W 1984 roku ukazało się pierwsze wydanie podręcznika akademickiego *Podstawy Energetyki Jądrowej* dla studentów wyższych uczelni technicznych, którego był współautorem z prof. Zdzisławem Celińskim. Duży publiczny rozgłos zyskała także jego książka *Nie bójmy się energetyki jądrowej*, która została opublikowana w 2010 roku przy wsparciu SERENy (Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej, którego później był wiceprezesem) oraz SEPu (Stowarzyszenia Elektryków Polskich).

¹ Radziecki typ reaktora chłodzonego i moderowanego wodą pod ciśnieniem (odpowiednik zachodnich reaktorów wodnych ciśnieniowych PWR).

² *Technical Assistance for the Commonwealth of Independent States* – był programem pomocy technicznej Unii Europejskiej dla państw byłego Związku Radzieckiego, tworzących tzw. Wspólnotę Niepodległych Państw – WNP.

Po roku 2010, w dekadzie renesansu energetyki jądrowej i prac nad programem polskiej energetyki jądrowej (PPEJ) był rzecznikiem ds. energetyki jądrowej NCBJ. Uczestniczył w opracowaniu planów rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, pełnił wiodącą rolę w konsultacjach krajowych i transgranicznych PPEJ. Współdziałał przy opracowaniu polskich przepisów bezpieczeństwa jądrowego, badał zgodność tych przepisów z wytycznymi międzynarodowymi i z przepisami państw wiodących w rozwoju energetyki jądrowej. W latach 2011–2012 r. jako ekspert Komisji Europejskiej prowadził ocenę bezpieczeństwa bloków jądrowych 3 i 4 w bułgarskiej EJ Kozłoduj w ramach akcji europejskich stress-testów po awarii japońskiej elektrowni jądrowej w Fukushima. Na prośbę ówczesnego prezesa PAA przeprowadził kurs szkoleniowy w zakresie bezpieczeństwa reaktorów energetycznych generacji III i III+ dla analityków i inspektorów dozoru jądrowego Departamentu Bezpieczeństwa Jądrowego PAA. Był wtedy także członkiem Komisji Egzaminacyjnej Prezesa PAA do przeprowadzenia egzaminu kwalifikacyjnego na stanowisko inspektora dozoru jądrowego II stopnia i autorem zestawu pytań egzaminacyjnych dotyczących bezpieczeństwa nowoczesnych reaktorów energetycznych. Opublikował też szereg artykułów w biuletynie *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna* Państwowej Agencji Atomistyki, w tym artykuł *Elektrownie jądrowe – bezpieczeństwo i koszty* udzielający wyczerpującej odpowiedzi na fundamentalne pytania: czy elektrownie jądrowe są bezpieczne i czy Polskę stać na ich budowę (bj i or nr 1(119)2020).

W uznaniu swoich zasług był nagradzany odznaczeniami państwowymi: Złotym Krzyżem Zasługi, Krzyżem kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski, a w roku 2015 otrzymał Krzyż oficerski Orderu Odrodzenia Polski *Polonia Restituta*.

Posiadał 6 patentów i świadectw wynalazczych, z czego 1 w 6 krajach.

Prof. Strupczewski był człowiekiem pogodnym i życzliwym, z humorem zdystansowanym wobec siebie, z uwagą słuchającym innych, potrafiącym w sposób elegancki, ale stanowczy bronić swoich poglądów. Był otwarty, gotowy dzielić się z innymi swoją ogromną wiedzą i doświadczeniem, stawiał na młodych. Był symbolem elegancji, niewyczerpanej energii i fachowego mistrzostwa. Takim pozostanie w naszej wdzięcznej pamięci. *Requiescat in pace!*

**Kierownictwo i Pracownicy Państwowej Agencji Atomistyki
Redakcja Biuletynu BJiOR PAA**

Wskaźniki poziomu gotowości technologicznej (TRL) a oferowane obecnie technologie jądrowe

Technology Readiness Level (TRL) indicators, and the nuclear technologies currently being offered

Andrzej G. Chmielewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Streszczenie: W pracy prezentowany jest proces oceny stopnia rozwoju technologii lub produktu oparty na skali poziomu gotowości technologicznej (TRL) w rozumieniu zarówno instytucji działających w kraju, w którym ta skala powstała, jak również w Unii Europejskiej i Polsce. Przedstawiono też przykład praktyczny działania polegający na wdrażaniu w energetyce skomplikowanej technologii radiacyjnej, co jest dowodem na to, że jest on analogiczny do stosowanych procedur powiększania skali w realizacji projektów inżynierskich. W końcowej części artykułu przedstawiono rezultaty oceny z wykorzystaniem TRL postępów prac w zakresie rozwoju nowych technologii jądrowych, jakimi są reaktory SMR.

Słowa kluczowe: Poziom gotowości technologicznej, technologie radiacyjne, SMR.

Abstract: The paper presents the process of assessing the degree of development of a technology or product based on the Technology Readiness Level (TRL) scale in the understanding of both institutions operating in the country where this scale was created, as well as in the European Union and Poland. A practical example of the implementation of complex radiation technology in the energy sector is also presented, which proves that it is analogous to the procedures used to scale up in the implementation of engineering projects. In the final part of the paper, the results of the assessment of the progress in the development of new nuclear technologies, such as SMR reactors, were presented with the use of TRL.

Keywords: Technology Readiness Level, radiation technologies, SMRs.

1. Wprowadzenie

Proces oparty na skali TRL (*Technology Readiness Level*) służy do ilościowej i jakościowej oceny dojrzałości danej technologii. Proces TRL został opracowany i z powodzeniem jest wykorzystywany przez amerykański Departament Obrony DoD (*Department of Defence*) do opracowywania i wdrażania nowych technologii oraz systemów do zastosowań obronnych. W latach 80. ubiegłego wieku NASA z powodzeniem wykorzystwała proces TRL do opracowania i wdrożenia nowych systemów do zastosowań w kosmosie. TRL, czyli poziomy gotowości technologicznej, służą do definiowania stopnia zaawansowania technologii oraz umożliwiają dokonanie porównania stanu zaawansowania prac nad technologiami. Wprowadzenie nowych technologii z laboratorium na rynek wymaga przej-

ścia przez kontinuum badań, rozwoju, demonstracji i wdrażania RDDD (*Research, Development, Demonstration & Deployment*). Wykorzystuje to z powodzeniem Biuro ds. Transformacji Technologicznych Departamentu Energii (DoE), które ma za zadanie nadzorować działania komercjalizacyjne w całym departamencie i poza nim. Aby wdrożyć nowe rozwiązania na skalę komercyjną, należy pokonać przeszkody zarówno techniczne, jak i związane z ich zaadaptowaniem przez ekosystem. Zarządzanie nowoczesnymi portfelami technologii można usprawnić, uzupełniając szeroko stosowane ramy poziomu gotowości technologicznej. Jednak wykonalność techniczna to tylko połowa sukcesu, jeśli chodzi o wdrożenie produktu na skalę komercyjną. Inne kwestie związane z przyjęciem – takie jak dopasowanie produktu do rynku, popyt, łańcuch dostaw, ryzyko regulacyjne i dostępność siły roboczej –

odgrywają rolę w prawdopodobieństwie pomyślnego wdrożenia technologii.

Konieczność stworzenia takiej skali wynika z faktu, że obecnie o decyzjach dotyczących finansowania projektów i komercjalizacji technologii decydują przemysłowcy, ekonomiści, prawnicy, a w przypadku projektów obronnych czy dużych będących skomplikowanymi działaniami natury technicznej i mających dużą wagę społeczną, np. takich jak budowa elektrowni jądrowych, także politycy. Sekwencyjność działań podobnych do TRL wynika z wiedzy przekazywanej studentom, przyszłym inżynierom w trakcie wykładów w uczelniach technicznych. Kierunek ten został stworzony z myślą o osobach, które pragną stanowić pomost między naukowcami, twórcami nowych rozwiązań i inżynierami z innych dziedzin, łącząc, przy wdrażaniu projektu, ich umiejętności oraz interdyscyplinarne spojrzenie na procesy przemysłowe.

Wpajany studentom schemat działań obejmuje wszelkie etapy wypunktowane w skali TRL: Badania laboratoryjne i opracowywanie wybranych elementów technologii; Optymalizacja technologii; Miniaturowa instalacja modelowa; Instalacja półtechniczna – powiększanie skali; Instalacja przemysłowa – produkcja [1].

2. Definicje poziomów gotowości technologicznej (TRL) w świecie, EU i Polsce

Skala TRL została zaprojektowana w celu usprawnienia procesów decyzyjnych i rozwoju technologii od pomysłu do realizacji. Po pierwsze, podstawową zaletą skali TRL jest to, że ustanawia ona uniwersalne ramy oceny poziomu dojrzałości technologii. W związku z tym promuje wspólne zrozumienie wśród różnych interesariuszy w zakresie sposobu oceny dojrzałości technologicznej, służąc im jako wspólny język w ocenie projektu i podejmowaniu odpowiednich decyzji.

Wykorzystanie poziomów TRL służy obecnie jako kryterium kwalifikowalności do niektórych programów UE, zapewniając jasne wskazanie poziomu dojrzałości technologicznej wymaganego do zakwalifikowania projektu do finansowania. Programy finansowania UE mają różne cele, które wymagają różnych poziomów TRL, a dogłębne zrozumienie TRL może pomóc w zapewnieniu niezbędnego finansowania projektu. Wnioskodawcy mogą wykorzystać te informacje, aby upewnić się, że ich projekt spełnia niezbędne wymagania, a ewaluatorzy stosują je do oceny projektu.

TRL pozwala również kierownikom projektów identyfikować i przewidywać potencjalne zagrożenia w początkowych fazach projektu, poprzez wstępne etapy testowania proponowanych rozwiązań, procesów. Niższe poziomy TRL są zazwyczaj związane z wyższym ryzykiem. Różne procesy i kamienie milowe zintegrowane ze skalą TRL pozwalają menedżerom na wczesne zajęcie się potencjal-

nymi zagrożeniami, zmniejszając możliwość napotkania istotnych problemów na późniejszych etapach projektu. W ten sposób wskaźniki TRL pomagają upewnić się, że technologia zostanie odpowiednio przetestowana i zweryfikowana, zanim zostanie wdrożona na dużą skalę.

TRL służy nie tylko jako narzędzie do zarządzania i ograniczania ryzyka, ale także jako cenne narzędzie planowania w podejmowaniu decyzji w ogóle. Określa mapę drogową, umożliwiając kierownikom projektów wyznaczanie realistycznych celów i identyfikację kluczowych kamieni milowych, które należy osiągnąć, zanim technologia będzie gotowa do komercjalizacji. Chociaż projekty o niższym TRL zwykle doświadczają większej liczby niedotrzymanych terminów niż projekty o wyższym TRL, skala TRL nadal okazuje się przydatna w wyznaczaniu osiągalnych celów.

Definicję i opis poszczególnych wskaźników gotowości technologicznej (TRL) opracowane i przyjęte przez wspomniane Biuro ds. Transformacji Technologicznych DOE przedstawiono w tabeli 1.

W tym dokumencie podano etapy rozwoju przedsięwzięcia do TRL 8, w TRL 9 następuje komercjalizacja. Zwykle w USA, EU i Polsce stosuje się skalę od TRL 1 do TRL 9.

W programie „Horyzont Europa” poziomy gotowości technologicznej są wykorzystywane jako wskaźnik służący lepszej klasyfikacji zgłaszanych projektów [3]. Poziomy gotowości technologicznej umożliwiają wnioskodawcom i oceniającym dostosowanie wniosków projektowych do oczekiwań Komisji Europejskiej poprzez zapewnienie wspólnej jednostki miary ich zaawansowania oraz wartości. Na przykład w wytycznych różnych programów finansowania wyższy poziom gotowości technologicznej oznacza, że poszukuje się projektów w obszarze składania wniosków. Z drugiej strony, niski poziom gotowości technologicznej może wskazywać na to, że zaproszenie koncentruje się na projektach badawczo-rozwojowych. W odniesieniu do swoich instrumentów finansowania Komisja Europejska dostosowała definicję TRL. TRL opisują różne etapy rozwoju technologii, produktu lub usługi w skali od 1 do 9. Poziomy gotowości technologicznej to sposób opisu dojrzałości technologii oraz narzędzie służące porównaniu stanu zaawansowania prac nad różnymi technologiami. Według tej skali dojrzałość technologii opisuje się od fazy conceptualizacji konkretnego rozwiązania (TRL 1) aż do etapu dojrzałości (TRL 9), kiedy ten concept (w wyniku prowadzonych badań naukowych i prac rozwojowych) przybiera postać rozwiązania technologicznego, które można zastosować w praktyce – np. w postaci uruchomienia rynkowej produkcji. Skala ta ułatwia zewnętrznym inwestorom śledzenie postępu rozwoju produktów oraz jest pomocnym narzędziem i wskaźnikiem rozwoju KPI (*Key Performance Indicator*). Z punktu widzenia inwestora, czym wyższy TRL, tym większa szansa na sukces i mniejsze ryzyko inwestycyjne.

Tabela 1. Poziomy gotowości technologicznej (według US Department of Energy – DOE Technology Readiness Levels-(TRLs).**Table 1.** Technology Readiness Levels (TRL).

EERE R 540.112 – 02 [2]: Poziomy gotowości technologii (TRL): Należy określić poziom gotowości technologii związanej z projektem, a także planowany postęp w trakcie realizacji projektu. Należy podać szczegółowe wyjaśnienie uzasadnienia szacowanego poziomu gotowości technologii. Należy określić szczegółowe kryteria wejścia na kolejny wyższy poziom gotowości technologii. Zastosowanie mają następujące definicje:

TRL-1. Zaobserwowane i ogłoszone podstawowe zasady procesu: Zidentyfikowany problem naukowy lub zjawisko. Zasadnicze cechy i zachowania systemów oraz ich struktur są identyfikowane z użyciem formuł matematycznych lub algorytmów. Obserwacja podstawowych zasad lub zjawisk naukowych została potwierdzona w recenzowanych badaniach. Technologia jest gotowa do przejścia od badań naukowych do badań stosowanych.

TRL-2. Sformułowana koncepcja i/lub zastosowanie technologii: Badania stosowane. Teoria i zasady naukowe koncentrują się na konkretnych obszarach zastosowań w celu zdefiniowania koncepcji. Opisywana jest charakterystyka aplikacji. Opracowywane są narzędzia analityczne do symulacji lub analizy aplikacji.

TRL-3. Analityczna i eksperymentalna weryfikacja krytycznej funkcji i/lub charakterystyki koncepcji: Na tym poziomie osiągnięto potwierdzenie słuszności koncepcji. Eksperymentalne badania i rozwój rozpoczynają się od badań analitycznych oraz laboratoryjnych. Wymagania dotyczące systemu/zintegrowanego procesu dla ogólnego zastosowania systemu są dobrze znane. Demonstracja wykonalności technicznej z użyciem niedojrzałych wdrożeń prototypowych jest wykonywana z reprezentatywnymi danymi wejściowymi interfejsu, w tym elementami elektrycznymi, mechanicznymi lub sterującymi w celu walidacji prognoz.

TRL-4. Walidacja komponentu i/lub procesu w środowisku laboratoryjnym – prototyp alfa (komponent): Samodzielna implementacja prototypu i testowanie w środowisku laboratoryjnym demonstruje koncepcję. Integracja i testowanie elementów technologii komponentów są wystarczające do potwierdzenia wykonalności.

TRL-5. Walidacja komponentu i/lub procesu w odpowiednim środowisku – prototyp beta (komponent): Przeprowadzane są dokładne testy prototypu komponentu/procesu w środowisku odpowiednim dla użytkownika końcowego. Podstawowe elementy technologiczne są zintegrowane z rozsądnie realistycznymi elementami wspierającymi, opartymi na dostępnych technologiach. Implementacje prototypów są zgodne z docelowym środowiskiem i interfejsami.

TRL-6. Demonstracja modelu systemu/procesu lub prototypu w odpowiednim środowisku: Implementacja prototypu jest częściowo zintegrowana z istniejącymi systemami. Wykonalność inżynierska zademonstrowana w pełni w rzeczywistym środowisku lub wysoce wiernie odtworzonym środowisku odpowiednim dla użytkownika końcowego.

TRL-7. Demonstracja zintegrowanego prototypu zakwalifikowanego poprzez testy. Demonstracja przedkomercyjna: System jest w pełni zintegrowany ze środowiskiem operacyjnym, wyposażony w pełni działające systemy sprzętowe i programy sterujące. Wszystkie funkcje są testowane w symulowanych i operacyjnych scenariuszach z wykazaniem osiągnięciem specyfikacji podanej przez końcowego użytkownika systemu. Technologia jest gotowa do przejścia do etapu rozwoju prowadzącego do pełnej komercjalizacji rozwiązania.

TRL-8. Rzeczywisty system/proces ukończony i zakwalifikowany poprzez testy i demonstrację. Gotowość technologiczna: Koniec rozwoju systemu. Pełnowymiarowy system jest w pełni zintegrowany ze środowiskiem operacyjnym, wyposażony w pełni działające systemy sprzętowe i programy sterujące. Wszystkie funkcje zostały przetestowane w symulowanych i operacyjnych scenariuszach z wykazaniem osiągnięciem specyfikacji podanej przez końcowego użytkownika systemu. Technologia jest gotowa do produkcji i sprzedaży na skalę przemysłową.

Polskie Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) dofinansowuje projekty według logiki TRL – celem większości programów jest takie dopracowanie technologii, aby można było ją zastosować w warunkach rzeczywistych (tzn. aby osiągnęły poziom gotowości technologicznej 9). Oczywiście należy pamiętać także o własnym IT Due Diligence, nie zawsze bowiem firmy oferujące produkt lub technologię dobrze oceniają TRL, a wręcz podwyższają skalę dojrzałości produktu. NCBR wykorzystuje dziewięciopozomowy system klasyfikacji gotowości technologicznej do oceny projektów badawczo-rozwojowych i innowacyjnych, określając ich stopień zaawansowania i gotowość do praktycznego zastosowania. Ta klasyfikacja poziomów pomaga w identyfikacji obszarów, w których technologie wymagają dalszego rozwoju i wsparcia, a także ułatwia podejmowanie decyzji dotyczących finansowania i inwestowania w projekty o różnym stopniu zaawansowania technologicznego [4].

Trzeba wspomnieć, że rozporządzenie o projektach obronnych wspomina o konieczności stosowania oceny proponowanych projektów według skali TRL [5], bez wątpienia skala ta powinna być wykorzystywana w projektach dotyczących technologii radiacyjnych i jądrowych.

3. Przykład stosowania TRL przy powiększaniu skali w przypadku wdrażania technologii radiacyjnej w energetyce

Dobrym przykładem postępowania zgodnego z zaleceniami skali TRL był proces wdrażania technologii jądrowych i radiacyjnych w energetyce, dotyczył on zastosowania radiacyjnej metody oczyszczania gazów odlotowych z kotłów opalanych węglem [6]. W realizację projektu, autorstwa pracowników Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej były zaangażowane biura projektowe Energo-

Tabela 2. Poziomy gotowości technologicznej (według Narodowego Centrum Badań i Rozwoju).
Table 2. Technology Readiness Levels (according to National Centre for Research and Developments).

Skalę TRL można podzielić na trzy grupy:

TRL I: Prace koncepcyjne, analiza pomysłu, produktu, realności jego stworzenia

TRL II-VI: Badania przemysłowe nad produktem

TRL VII-IX: Prace rozwojowe nad produktem

Poziom I – podstawowe zasady technologii. Obserwacja i opis podstawowych zasad związanych z funkcjonowaniem danej technologii: Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie mogą obejmować opracowania dotyczące podstawowych właściwości technologii. Poziom ten wskazuje na faktyczny początek rozwoju technologii rozumianej jako sformułowana wiedza teoretyczna, która może zostać zweryfikowana mierzalnie.

Poziom II – określenie koncepcji technologii. Oznacza to rozpoczęcie działań związanych z przyszłym zastosowaniem technologii:

Zidentyfikowane teoretyczne podstawy nowej technologii pozwalają na sformułowanie założeń jej praktycznego zastosowania. Planowane przyszłe zastosowania są oparte na przewidywaniach. Może nie istnieć jeszcze żaden dowód ani szczegółowa analiza potwierdzająca przyjęte założenia praktycznego zastosowania technologii. Działania ograniczone są do opracowań analitycznych. Opracowania te mogą obejmować publikacje lub inne materiały, które przedstawiają rozważane możliwości zastosowania technologii, dostarczając jednocześnie analiz potwierdzających koncepcję technologii. Istotne jest jednak, aby nowa technologia była opisana spójnie i szczegółowo.

Poziom III – weryfikacja koncepcji potwierdzająca analitycznie i eksperymentalnie krytyczne funkcje lub charakterystyki technologii: Zostają zainicjowane aktywne działania obejmujące opracowania analityczne i przeprowadzenie badań laboratoryjnych, mających na celu fizyczne potwierdzenie analitycznych przewidywań dotyczących odrębnych elementów technologii. Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie obejmują komponenty, które nie są jeszcze zintegrowane w całość lub nie są reprezentatywne dla całej technologii.

Poziom IV – weryfikacja komponentów technologii w warunkach laboratoryjnych: Podstawowe komponenty technologii zostają zintegrowane w celu potwierdzenia, że będą one współpracować. Uzyskuje się ogólne (o niskiej wierności w porównaniu do docelowego systemu) odwzorowanie technologii w warunkach laboratoryjnych. Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie obejmują sprzęt zintegrowany *ad hoc* w laboratorium.

Poziom V – weryfikacja komponentów technologii w środowisku zbliżonym do rzeczywistego: Wierność odwzorowania technologii wzrasta znacząco. Podstawowe komponenty technologii są zintegrowane z elementami wspomagającymi, imitującymi elementy rzeczywiste. Technologia może być przetestowana w symulowanych warunkach operacyjnych. Weryfikacja nowej technologii powinna zostać przeprowadzona w kontekście jej specyficznego zastosowania w przyszłym systemie lub sprzęcie oraz wykorzystywać w testach elementy odzwierciedlające konkretne, przewidywane zastosowanie.

Poziom VI – demonstracja technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych: Osiągnięty zostaje znaczący postęp w zakresie gotowości technologicznej. Reprezentatywna technologia, która jest znacznie bardziej zaawansowana od występującej na poziomie V, jest poddawana badaniom i testom. Do badań na tym poziomie zalicza się badania modelu albo demonstratora technologii w warunkach laboratoryjnych odwzorowujących z dużą wiernością warunki rzeczywiste lub w symulowanych warunkach operacyjnych. Stosowanie elementów komercyjnie dostępnych o obniżonej odporności jest nadal możliwe, jeżeli nie jest sprzeczne z rodzajem warunków środowiskowych, w których model albo demonstrator technologii będzie poddawany testowaniu.

Poziom VII – demonstracja prototypu technologii w warunkach operacyjnych: Prototyp jest prawie na poziomie systemu operacyjnego albo osiągnął ten poziom. Ten poziom gotowości technologicznej reprezentuje znaczący postęp w stosunku do poziomu VI i wymaga demonstracji rozwijanego prototypu technologii w warunkach operacyjnych, np. na statku powietrznym, w pojeździe, w informatycznym środowisku operacyjnym albo w przestrzeni kosmicznej. Osiągnięcie tego poziomu powinno być uwiarygodnione przeprowadzonymi działaniami w zakresie inżynierii systemowej i zarządzania procesem rozwojowym.

Poziom VIII – skompletowanie i sprawdzenie rozwijanej technologii w wyniku testów i demonstracji: Potwierdzono, że technologia może być zastosowana w jej finalnej postaci i w przewidywanych dla niej warunkach. Przykłady gotowości technologicznej na tym poziomie obejmują badania, walidację i ocenę technologii w warunkach przeznaczonych do jej wykorzystania, np. w ramach systemu uzbrojenia, w celu potwierdzenia założeń projektowych. Praktycznie (w prawie wszystkich przypadkach) poziom ten reprezentuje koniec rzeczywistego rozwoju technologii.

Poziom IX – sprawdzenie rozwijanej technologii w środowisku operacyjnym: Następuje zastosowanie technologii w jej końcowej formie i w przewidywanych warunkach funkcjonowania, np. w warunkach operacyjnych misji lub w rzeczywistym środowisku operacyjnym.

projekt Warszawa i Katowice, Proatom BP, a firmami wykonawczymi Energobudowa, ELWO Pszczyna i inne.

Projekty prowadziły działy inwestycji EC Kawęczyn i ZE Dolna Odra. Instalacje przemysłowe, pilotowa i pełnoskalowa, wymagały wydania zezwoleń przez Państwową Agencję Atomistyki (PAA), Ministerstwo Środowiska, Ministerstwo Zdrowia i władze wojewódzkie. Była to największa instalacja radiacyjna kiedykolwiek zbudowana w świecie, moc zainstalowanych akceleratorów wynosiła 1,2 MW.

TRL 1–2 (i) zaobserwowano i ogłoszono podstawowe zasady procesu, **(ii)** określono podstawy technologii; etap ten był oparty na zaobserwowanych zjawiskach tworzenia plazmy niskotemperaturowej w gazie napromieniowanej wiązką elektronów, a podstawy technologii wynikały z wiedzy o możliwości utleniania niereaktywnego oraz słabo rozpuszczalnego w wodzie NO i SO₂ tworzącego szkodliwe siarczyny, do bezwodników kwasów azotowego (NO₂) i siarkowego (SO₃). Dalsze potwierdzenie efektywności

i stworzenie założeń technicznych realizacji procesu wymagało przeprowadzenia badań laboratoryjnych [7].

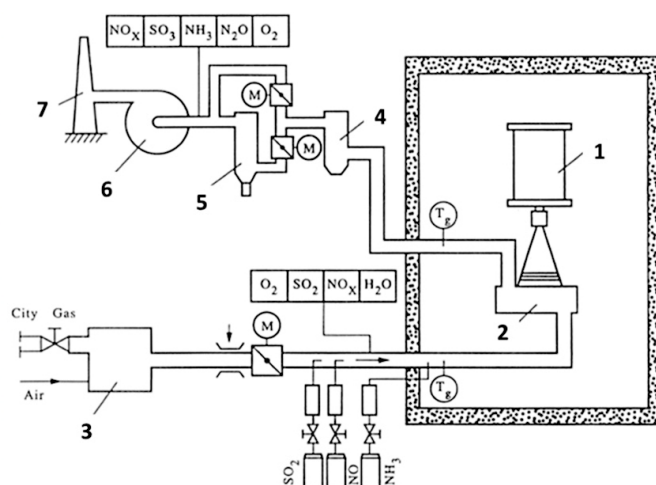
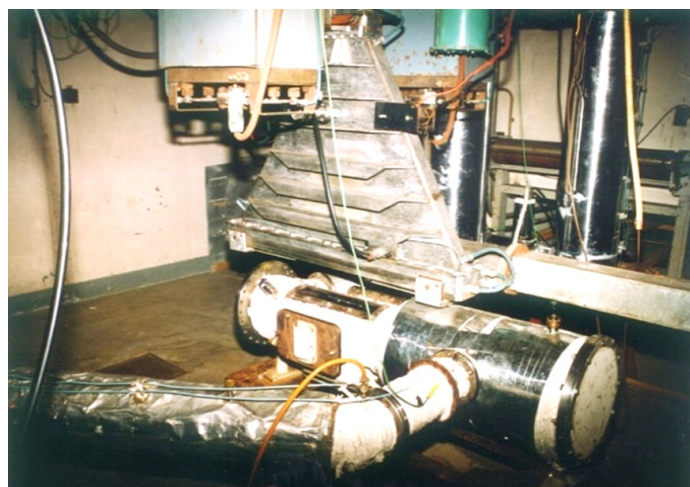
TRL 3–4 (i) weryfikacja koncepcji potwierdzająca analitycznie i eksperymentalnie krytyczne funkcje lub charakterystyki technologii, (ii) weryfikacja komponentów technologii w warunkach laboratoryjnych; etap ten wymagał budowy instalacji laboratoryjnej w IChTJ i przeprowadzenia odpowiednich eksperymentów. Instalacje takie powstały też w Japonii i Niemczech, a później w innych krajach świata: Korei Płd., Chinach, Malezji, Turcji. Instalacja w IChTJ wykorzystywała akcelerator elektronów ILU – 6 o mocy wiązki 20 kW i regulowanej energii elektronów do 2 MeV. Gazy spalinowe były wytwarzane w palniku olejowym, a stężenie zanieczyszczeń gazowych było regulowane przez dodatkowe dozowanie gazów (tlenku azotu i ditlenku siarki), objęściowy przepływ gazów sięgał 400 Nm³/h. Schemat i zdjęcie instalacji laboratoryjnej przedstawiono na rysunku 1 [8]. Określono wpływ dawki na efektywność procesu usuwania kwaśnych zanieczyszczeń gazowych. W trakcie eksperymentów własnych i prowadzonych na innych instalacjach stwierdzono, że mieszanina powstałych kwasów (związana z obecnością pary wodnej w gazie) tworzy mgłę, której usunięcie z gazu nie jest możliwe z użyciem znanych urządzeń (demisterów). Dlatego też powstała idea dodatku amoniaku gazowego i wytwarzania cząstek ciała stałego w postaci mieszaniny siarczanu i azotanu amonowego. Dodatkową zaletą tego rozwiązania było wytwarzanie wartościowego nawozu sztucznego.

TRL 5–6–7 (i) weryfikacja komponentów technologii w środowisku zbliżonym do rzeczywistego, (ii) demonstracja technologii w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, (iii) demonstracja prototypu technologii w warunkach operacyjnych; etap ten wymagał budowy instalacji pilotowej w elektrowni na bloku opalanym węglem. Instalację tę zbudowano w EC Kawęczyn, przepływ gazów spalinowych wynosił 20 000 Nm³/h, zastosowano dwa akceleratory

ELV – 6 o mocy 50 kW każdy i energii wiązki 600 keV. Zdjęcie elektrowni i budynku bloku wodnego, przy którym zbudowany był budynek mieszczący akceleratory i inne elementy oczyszczania spalin, przedstawiono na rysunku 2 [9]. W trakcie testów wymaganych do przeprowadzenia w ramach TRL7 wypróbowano trzy rodzaje urządzeń do usuwania zawiesiny cząstek stałych produktu: workowy filtr tkaninowy, mokry filtr złożowy i elektrofiltr (EF). Stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem jest EF, jednak, mimo, że jest to produkt handlowy, wymagał on wprowadzenia wielu ulepszeń, aby uzyskać właściwe warunki eksploatacji tego urządzenia.

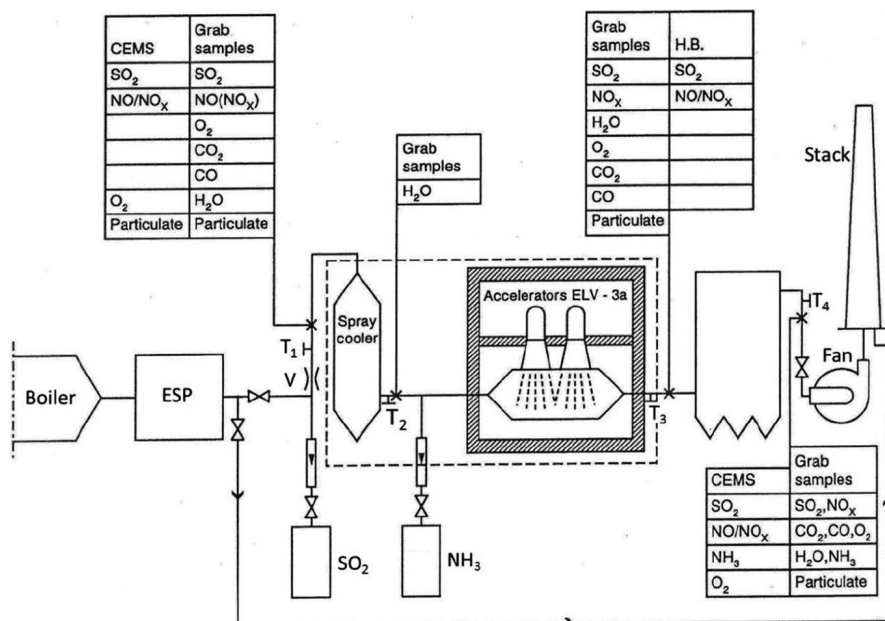
Po osiągnięciu TRL 7, potwierdzeniu wszelkich założeń technologicznych i inżynierskich, przystąpiono do realizacji następnych etapów projektu. Niezbędne było przygotowanie dokumentu opisującego wpływ obiektu na środowisko, projektu z uwzględnieniem raportu bezpieczeństwa pod względem ochrony radiologicznej, stosowania niebezpiecznych związków chemicznych i wybuchowości (amoniak). Uzgodnienia i zgody dotyczyły Ministerstwa Środowiska, Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Państwowej Agencji Atomistyki, Ministerstwa Zdrowia oraz odpowiednich władz wojewódzkich. Po zatwierdzeniu projektów technicznych i przeprowadzeniu przetargów, wyborze producenta akceleratorów przystąpiono do realizacji następnych etapów prowadzących do wdrożenia technologii w energetyce w pełnej skali technicznej.

TRL 8–9 (i) skompletowanie i sprawdzenie rozwijanej technologii w wyniku testów i demonstracji, (ii) sprawdzenie rozwijanej technologii w środowisku operacyjnym, etap ten wymagał budowy w pełnej skali przemysłowej o przepływie gazów przynajmniej 10-krotnie większym od uzyskiwanego w instalacji pilotowej. Instalację taką zbudowano w EC Pomorzany należącej do Zespołu Elektrowni Dolna Odra [10]. Oczyszczano spaliny z kotła WP-100 opalanego węglem kamiennym, przepływ spalin wynosił 270 000 Nm³/h, zastosowano cztery akceleratory



Rys. 1. Fotografia i schemat instalacji laboratoryjnej do radiacyjnego oczyszczania gazów spalinowych. 1 – akcelerator ILU – 6; 2 – komora reakcyjna; 3 – mieszacz gazów; 4 – komora retencyjna; 5 – filtr tkaninowy; 6 – wentylator; 7 – komin (opracowanie własne autora).

Fig. 1. Photo and scheme of laboratory installation for flue gas treatment. 1 – accelerator ILU – 6; 2 – process vessel; 3 – gas mixer; 4 – retention vessel; 5 – bag filter; 6 – ID fan; 7 – stack (author's own work).



Rys. 2. Zdjęcie kompleksu elektrowni EC Kawęczyn i schemat ideowy instalacji oczyszczania spalin wiązką elektronów w skali pilotowej (opracowanie własne autora).

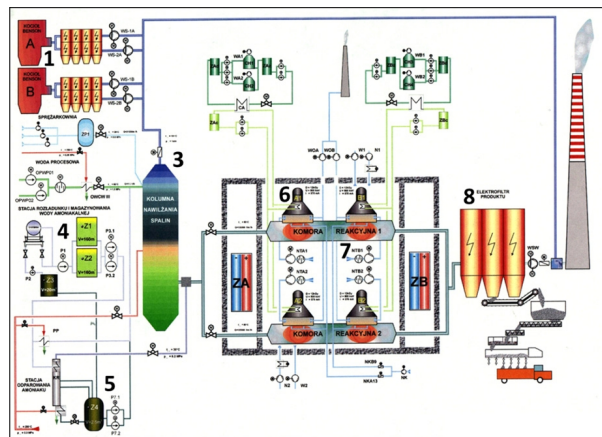
Fig. 2. Photo of EPS Kawęczyn complex and layout of pilot plant for electron beam flue gas treatment (author's own work).

(600 keV) o mocy 300 kW każdy, zasilane z dwu zasilaczy o mocy 600 kW każdy. Zdjęcie elektrowni z kolumną nawilżania spalin należącą do instalacji ich oczyszczania widoczną na froncie fotografii oraz schemat instalacji przedstawiono na rysunku 3.

Opracowana w powyższych działaniach technologia usuwa jednocześnie obydwa zanieczyszczenia kwaśne, co nie jest możliwe w przypadku innych technologii konwencjonalnych. W trakcie realizacji projektu opracowano szereg nowych rozwiązań, które zostały opatentowane i mają wartość szerszą, dotyczącą ich stosowania w innych rozwiązaniach. Należy podkreślić, że promieniowanie jonizujące emitowane przez jeden akcelerator 15 kW ma

moc dawki równą mocy dawki źródła Co-60 o aktywności 1 MCi. A zatem w tym przypadku było to źródło promieniowania równoważne 80 MCi Co-60. W praktyce aktywność większości źródeł stosowanych w obróbce radiacyjnej nie przekracza 1 MCi, w rzadkich przypadkach sięga ona 4 MCi.

Realizacja poszczególnych etapów tego projektu wskazała na to, jak ważne jest stosowanie zaleceń wynikających z realizacji działań według skali TRL. Typ akceleratorów zastosowanych w instalacji pilotowej (EC Kawęczyn) był inny od dostarczonych przez dostawcę wybranego do realizacji instalacji przemysłowej (EC Pomorzany). Okazało się, że nie przebadano wcześniej zasilaczy o mocy 600 kW



Rys. 3. Fotografia EC Pomorzany – na planie frontowym kolumna nawilżania, na środku zdjęcia EF należące do instalacji oczyszczania spalin. Obok schemat instalacji radiacyjnego oczyszczania spalin (opracowanie własne autora).

Fig. 3. Photo of EPS Pomorzany, gas humidification tower in front and EPS belonging to EB flue gas treatment plant in a photo centre. A scheme of installation for radiation flue gas purification at right (author's own work).

(transformator z izolacją olejową). Nastąpiło przebicie izolacji w jednym z dwu dostarczonych urządzeń. Został on odesłany do naprawy. Błąd ten był dziwny, bo konstrukcja transformatorów olejowych jest klasyką techniki stosowanej w tej dziedzinie. To jedyne urządzenie, które nie zostało przygotowane z wykorzystaniem wymogów skali TRL i jest to ostrzeżenie, aby w jakiegokolwiek nowej technologii nie stosować skrótów, nawet jeśli nie chodzi o typ stosowanego rozwiązania, lecz tylko o zmianę skali rozwiązania.

Dodatkową obserwacją, ważną przy wdrażaniu nowych technologii, było stwierdzenie, że takie działania („nowalijki”) przyciągają dostawców, oferujących nieistniejące jeszcze w skali technicznej rozwiązania. Zasada działania oferowanego przez trzeciego z możliwych dostawców akceleratora była fascynująca, ale niestety nie został on zbudowany do dnia dzisiejszego. Pismo z biura handlowego o rozpatrywaniu możliwości zastosowania tego urządzenia w naszym projekcie posłużyło jedynie do jego prezentacji na zebraniu akcjonariuszy firmy.

4. Poziomy gotowości technologicznej (TRL) w odniesieniu do SMR

Małe reaktory modułowe mają moc wyjściową poniżej 300 MW [11]. Termin „modułowy” w kontekście małych reaktorów modułowych odnosi się do ich skalowalności i możliwości wytwarzania głównych elementów reaktora jądrowego w środowisku fabrycznym, a następnie transportowania ich na miejsce. Termin „modułowy” w małych reaktorach modułowych (SMR) odnosi się do koncepcji projektowej, w której reaktor jest zbudowany jako seria małych, samodzielnych jednostek. Można je łączyć w celu utworzenia większej elektrowni. Modułowa konstrukcja reaktorów SMR pozwala na większą elastyczność w budowie i eksploatacji reaktora. Podejście modułowe pozwala na standaryzowane projekty, które mogą być powielane

w wielu jednostkach, zmniejszając koszty i czas wymagany do uzyskania licencji, budowy i eksploatacji. Dodatkowo, modułowa konstrukcja reaktorów SMR pozwala na skalowalność, w ramach której można dodawać dodatkowe moduły w celu zwiększenia wydajności elektrowni. Ta elastyczność i skalowalność sprawiają, że reaktory SMR dobrze nadają się do zaspokajania potrzeb energetycznych małych społeczności lub do użytku w odległych bądź odizolowanych obszarach.

Jedną z bardzo ważnych barier rozwoju SMR jest licencjonowanie nowych projektów reaktorów. Na przykład, regulując projektowanie, lokalizację, budowę i eksploatację nowych komercyjnych elektrowni jądrowych, NRC stosuje obecnie połączenie wymogów regulacyjnych, licencjonowania i nadzoru. Historycznie proces licencjonowania został opracowany dla dużych reaktorów komercyjnych. Proces licencjonowania nowych projektów reaktorów jest długotrwały i kosztowny.

Bardzo dobrą i aktualną ocenę sytuacji przedstawiło Pacific Northwest Laboratory w raporcie „Emerging Technologies Review: Small Modular Reactors” [12] wykonanym dla Air Force Civil Engineer Center under a Work-For-Others Agreement with the U.S. Department of Energy. Waga tego dokumentu wynika między innymi z tego, że od samego początku jej powstania idea budowy SMR-ów dotyczyła możliwości ich stosowania w trudno dostępnych regionach naszego globu (np. arktyczne rejony Kanady) i do dobrego zabezpieczenia źródła zasilania w energię elektryczną baz wojskowych.

Projektanci i dostawcy oferują SMR-y, które osiągnęły różne poziomy dojrzałości projektowej. Lekkowodne (LWR) SMR są najbardziej dojrzałe pod względem technologicznym i produkcyjnym. Projekty wywodzą się z istniejących dużych konstrukcji LWR. SMR-y inne niż LWR są dalej uważane za będące w rozwoju, daleko od etapów wdrożenia i komercjalizacji, ponieważ opierają się one na projektach reaktorów, dla których istnieje niewiele faktycznych wdrożeń, a jeszcze mniej z nich jest eksplo-

Tabela 3. Główne typy reaktorów jądrowych [12].**Table 3.** Most common nuclear reactors [12].

Typ reaktora	Chłodziwo	Moderator	Spektrum neutronów
Reaktory – ciśnieniowe (PWR)	Woda lekka (H ₂ O)	Woda lekka (H ₂ O)	Termiczne
Reaktory – wrzące (BWR)	Woda lekka (H ₂ O)	Woda lekka (H ₂ O)	Termiczne
Reaktory – stopione metale	Płynny sód, ołów lub ołów-bizmut	Grafit	Termiczne
		Brak	Prędkie
Reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HGTR)	Hel (wodór, ditlenek węgla)	Grafit	Termiczne
		Brak	Prędkie
Reaktory – stopione sole	Mieszanina soli – chlorków lub fluorków	Brak	Prędkie

atowanych tak długo, jak są eksploatowane duże LWR elektrownie jądrowe. Według raportu istnieje wiele czynników ograniczających związanych z wdrażaniem technologii SMR. A ograniczona liczba specjalistów oraz ograniczona podaż komponentów produkcyjnych i dedykowanego SMR-om paliwa jądrowego wpływają na stopień zaawansowania technologii. Żaden z nich nie został wdrożony w sposób komercyjny w Stanach Zjednoczonych.

NRC przywiązuje dużą wagę do oceny proponowanej lokalizacji budowy SMR-ów: „Przy wyborze lokalizacji należy wziąć pod uwagę środowisko ludzkie, zdrowie i bezpieczeństwo publiczne, inżynierię i projekt, ekonomię, wymogi instytucjonalne, wpływ na środowisko i inne czynniki. Potencjalny wpływ budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych na środowisko ludzkie oraz cechy społeczne, kulturowe i ekonomiczne (w tym sprawiedliwość środowiskową) jest zwykle podobny do potencjalnego wpływu każdego dużego obiektu przemysłowego, ale elektrownie jądrowe są wyjątkowe pod względem stopnia, w jakim należy wziąć pod uwagę potencjalny wpływ środowiska na ich bezpieczeństwo. Wymogi bezpieczeństwa są głównymi wyznacznikami przydatności lokalizacji dla elektrowni jądrowych, ale wpływ na środowisko jest również ważny i musi zostać oceniony.”

W ostatnim siedemdziesięcioleciu wiele rodzajów technologii reaktorów jądrowych zostało sprawdzonych i charakteryzuje się wysokim poziomem gotowości technologicznej. W Stanach Zjednoczonych i na całym świecie zbudowano, licencjonowano i eksploatowano reaktory lekkowodne, reaktory z wykorzystaniem ciekłego metalu, wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem (HTGR) i reaktory ze stopioną solą (MSR). Tabela 3 zawiera przegląd różnych głównych typów reaktorów. Wartości ciśnień i temperatur roboczych w opisach są przybliżone i reprezentatywne dla różnych typów, a konkretne wartości mogą się różnić w zależności od projektu, w ramach każdego typu. Na przykład, jeśli chodzi o ciśnienie robocze reaktory PWR działają zwykle przy około 150 atmosferach (150-krotność normalnego ciśnienia

atmosferycznego), podczas gdy reaktory wykorzystujące płynne metale działają nieco powyżej ciśnienia atmosferycznego. Są to prekursorzy głównych rodzin oferowanych obecnie SMR-ów, warto zatem je przypomnieć.

Sytuacja dotycząca licencjonowania SMR-ów będących klonami powyższych rozwiązań jest przedstawiona poniżej.

a) Reaktory – ciśnieniowe (PWR)

Prawie dwie trzecie reaktorów eksploatowanych komercyjnie to reaktory tego typu. Wszystkie reaktory Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych to reaktory PWR. Program energetyki jądrowej armii amerykańskiej obsługiwały reaktory PWR eksploatowane od 1954 do 1974 roku.

Konstrukcja NuScale PWR (ponieważ wytwornica pary i reaktor dzielą ten sam zbiornik reaktora, ta szczególna cecha konstrukcyjna jest powszechnie określana jako zintegrowany reaktor PWR (iPWR) jest jedyną amerykańską konstrukcją SMR, która posiada certyfikat projektu wydany przez amerykańską Komisję Dozoru Jądrowego (NRC) oraz standardowe zatwierdzenie projektu.

b) Reaktory – wrzące (BWR)

Reaktory BWR pracują pod wysokim ciśnieniem, zazwyczaj około 68 atmosfer i w temperaturze około 285°C. Wykorzystują one jednopętlowy system zasilania parą, w którym para opuszcza reaktor i przepływa do turbiny generatora.

Według raportu obecnie w NRC nie ma żadnych wniosków projektowych dotyczących reaktorów BWR SMR.

c) Reaktory na neutrony prężne (SFR) – stopione metale

Ponieważ reaktory SFR są zaprojektowane tak, aby wykorzystywać szybkie neutrony do rozszczepienia uranu/plutonu, nie używają one moderatora. SFR działają przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego, nadciśnienie wynosi około 0,1 atmosfery. W innych podtypach reaktorów wykorzystujących ciekłe metale może być stosowany ołów lub ołów-bizmut jako chłodziwo.

Obecnie działają japońskie testowe reaktory SFR Joyo (1977–1997 i 2004–2007), dwa rosyjskie komercyjne reaktory SFR BN-600 (1980–obecnie) i BN-800 (2014–obecnie) oraz chiński eksperymentalny reaktor „prędki” (2011–obecnie). BN-600 i BN-800 to jedyne dwa działające komercyjne reaktory SFR na świecie.

Do NRC nie złożono żadnych wniosków projektowych dotyczących SFR SMR.

d) Reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HGTR)

Reaktory HTGR to reaktory jądrowe wykorzystujące gazy, takie jak hel, jako chłodziwo. Ponieważ większą część reaktorów HTGR zaprojektowano z myślą o wykorzystaniu neutronów termicznych do rozszczepienia uranu, większość z nich wykorzystuje grafit jako moderator. Moderator nie jest stosowany w reaktorach HTGR wykorzystujących neutrony prężkie. Reaktory HTGR pracują przy niższych ciśnieniach niż ciśnienia projektowe reaktorów PWR i BWR, wynoszą one około 60 atmosfer. Istnieją dwa główne projekty HTGR oparte na konfiguracji moderatora: (1) blok pryzmatyczny, w którym rdzeń reaktora jest skonfigurowany w grafitowych blokach pryzmatycznych oraz (2) HTGR ze złożem nasypowym, w którym moderator i paliwo są uformowane w struktury kuliste.

W 1958 roku Philadelphia Electric Company zamówiła reaktor Peach Bottom 1, eksperymentalny, chłodzony helem, moderowany grafitem prototyp jądrowy HTGR o mocy 40 MWe. Budowa Peach Bottom 1 rozpoczęła się w 1962 roku. Został on oddany do użytku w 1967 roku i działał do 1974 roku, został zamknięty po pomyślnym zademonstrowaniu opłacalności HTGR.

Firma General Atomics zaprojektowała również reaktor Fort St. Vrain jako sprawdzony, chłodzony helem, moderowany grafitem, komercyjny reaktor HTGR o mocy 330 MWe. Budowa rozpoczęła się w 1968 roku, a wstępne testy rozpoczęły się w 1972 roku. Elektrownia zaczęła dostarczać energię elektryczną do sieci w 1979 roku. Chociaż projekt z powodzeniem udowodnił charakterystykę operacyjną HTGR i innych technologii, do jego utrzymania wymagana była konserwacja i rozległe modyfikacje instalacji. Ze względu na niekorzystne w ocenie kwestie ekonomiczne i techniczne elektrownia została wycofana z eksploatacji w 1989 roku.

Na całym świecie zaprojektowano i eksploatowano inne eksperymentalne reaktory HTGR. Brytyjski Urząd Energii Atomowej eksploatował reaktor Dragon. Reaktor Dragon testował paliwo i materiały dla europejskiego programu reaktorów wysokotemperaturowych Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju/Agencji Energii Jądrowej NEA/OECD w latach 1965–1976. Konstrukcja reaktora wykorzystywała wczesną formę trójstrukturalnego paliwa izotropowego (TRISO) o różnych kształtach. Reaktor nie jest już użytkowany i jest obecnie wycofywany z eksploatacji.

Niemcy zaprojektowały reaktor Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) oraz wysokotemperaturowy reaktor THTR-300. AVR był reaktorem testowym o mocy 15 MWe, który działał w latach 1967–1988. Reaktor THTR-300 był elektrownią o mocy 300 MWe, która działała w latach 1985–1989. Nie jest on już eksploatowany.

Japońska Agencja Energii Atomowej eksploatuje wysokotemperaturowy inżynierski reaktor testowy. Chłodzony gazem, moderowany grafitem reaktor został zaprojektowany do dostarczania 30 MWe. Jego działanie zostało zawieszone w 2011 i wznowione w 2021 roku.

Pierwszy w Chinach wysokotemperaturowy, chłodzony gazem reaktor testowy HTR-10 ze złożem nasypowym działa na Uniwersytecie Tsinghua. Został on zaprojektowany do testowania koncepcji i ma moc 10 megawatów termicznych (MWt). Ponadto w 2021 roku w Chinach rozpoczęły pracę dwa wysokotemperaturowe, chłodzone gazem reaktory HTR-PM o mocy 100 MWe.

NRC nie udzieliła licencji na reaktory HTGR i żadne z nich nie działają obecnie w Stanach Zjednoczonych.

e) Reaktory – stopione sole

Reaktory MSR to reaktory, które jako chłodziwo wykorzystują ciekłe mieszaniny chlorków lub soli fluorkowych. Reaktory MSR mogą wykorzystywać paliwo ciekłe, w którym uran-235 jest domieszką w mieszaninie soli i krąży w reaktorze, lub stosowane jest paliwo stałe. Reaktory MSR mogą być również reaktorami termicznymi, wykorzystującymi grafit jako moderator lub reaktorami prężnymi, w których moderator nie jest potrzebny.

Ponadto reaktory MSR pracują przy niższych ciśnieniach niż ciśnienia projektowe reaktorów PWR i BWR; wynosi ono około 2 atmosfery.

W Stanach Zjednoczonych AEC przeprowadziła dwa eksperymenty z wykorzystaniem MSR: jeden dla Sił Powietrznych Armii Stanów Zjednoczonych (które stały się Siłami Powietrznymi Stanów Zjednoczonych w 1947 roku), a drugi wewnętrzny, aby ustalić, czy MSR mogą być komercyjnie obsługiwane bezpiecznie i są niezawodne oraz ich utrzymanie w ruchu jest możliwe bez nadmiernych trudności.

Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) był reaktorem testowym obsługiwany przez ORNL w celu zademonstrowania, że reaktory zasilane stopioną solą wykorzystywane głównie do wytwarzania energii elektrycznej mogą być obsługiwane bezpiecznie i niezawodnie. Reaktor powielający o mocy 7,4 MWt, chłodzony stopioną solą i moderowany grafitem, został zbudowany w 1964 roku i działał do 1969 roku. Wykorzystywał on mieszaninę izotopów uranu, toru i soli fluorkowych plutonu.

Obecnie przedłożono przed NRC dwa projekty reaktorów MSR. We wrześniu 2021 roku firma Kairos Power, LLC złożyła do NRC wniosek o pozwolenie na budowę reaktora testowego HERMES. W sierpniu 2022 roku Abilene Christian University złożył do NRC wniosek

o pozwolenie na budowę reaktora badawczego ze stopioną solą. NRC analizuje oba wnioski i nie podjęła jeszcze decyzji w sprawie żadnego z nich.

Opierając się na definicjach poziomu gotowości technologicznej (TRL) przyjętych przez Department of Defence (DoD), a opublikowanych przez Government Accountability Office (GAO) [13], TRL SMR może wynosić 5 lub 6. TRL na poziomie 5 oznacza, że podstawowe komponenty technologiczne są zintegrowane z dość realistycznymi elementami wspierającymi, dzięki czemu można je testować w symulowanym środowisku. TRL na poziomie 6 oznacza, że systemy lub podsystemy zostały zademonstrowane w odpowiednim środowisku.

NRC ustaliła ogólne kamienie milowe dotyczące ukończenia przeglądów wniosków dla różnych działań regulacyjnych. Pełna lista działań licencyjnych i regulacyjnych oraz odpowiadających im ogólnych kamieni milowych została opublikowana na publicznej stronie internetowej NRC [14]. Okres przeglądu rozpoczyna się po zakończeniu przez NRC przeglądu akceptacyjnego i przyjęciu wniosku do przeglądu, a kończy się, gdy personel sporządzi raport z oceny bezpieczeństwa. Przeglądy wcześniejszych zezwoleń na budowę trwają 24 miesiące; przeglądy licencji łączonych trwają od 30 do 42 miesięcy.

W 1989 roku NRC ustanowiła alternatywny proces licencjonowania, który łączy pozwolenie na budowę i licencję operacyjną, z pewnymi warunkami, w jedną licencję. Licencja ta nazywana jest połączonym pozwoleniem na budowę i licencją operacyjną (licencja łączona) lub Combined License Application (COL).¹ Przepis zapisany w 10 Code of Federal Regulations (CFR) część 52 pozwala również właścicielowi/operatorowi na złożenie wniosku o wczesne zezwolenie na lokalizację Early Site Permit (ESP)², w którym NRC określi, czy teren jest odpowiedni dla elektrowni jądrowej. Jeśli właściciel/operator chce ubiegać się o ESP, wniosek będzie dotyczył kwestii bezpieczeństwa terenu, ochrony środowiska i planów reagowania na sytuacje awaryjne bez konieczności przeglądu konkretnego projektu elektrowni jądrowej. W ramach wniosku właściciel/operator może również wystąpić o wydanie Limited Work Authorizations (LWA). ESP nie jest wymagana przed złożeniem przez właściciela/operatora wniosku o COL, ale może być korzystna, ponieważ pozwoli rozstrzygnąć wszelkie szczególne kwestie związane z bezpieczeństwem obiektu przed złożeniem wniosku o COL. W obecnej chwili NRC wydała 6 opinii ESP, a jeden będący w ocenie został wycofany przez wnioskodawcę. Spośród sześciu opinii ESP ostatnia została wydana w grudniu 2019 roku, a jej podjęcie było żmudnym działaniem trwającym 3,5 roku; w przypadku przedostatniej było to 6 lat (2016); czwartej 3 lata (2009), trzeciej, podobnie jak drugiej oraz pierwszej raportowanej w tym wieku – 3,5 roku (wszystkie wydane w roku 2007). Proces podjęcia

decyzji składa się z trzech faz: ocena bezpieczeństwa jądrowego, ocena środowiskowa, obowiązkowe przesłuchania przed komisją.

W przypadku COL złożony w 2020 roku wniosek dotyczący mikroreaktora, który miał być budowany na terenie Idaho National Laboratory (firma Oklo Power LLC), został odrzucony w roku 2022 ze względu na to, że Oklo nie dostarczyło NRC niezbędnych informacji na temat reaktora, co nie pozwoliło personelowi NRC na ustalenie harmonogramu działań i przeprowadzenie pełnego przeglądu niestandardowej aplikacji licencji łączonej reaktora Aurora.

Najbardziej interesujący jest przypadek wniosku, który złożyła firma Southern Nuclear Operating Company (SNC) 28 marca 2008 roku o licencje łączone na dwa zaawansowane pasywne reaktory wodne AP1000 dla bloków 3 i 4 elektrowni Vogtle Electric Generating Plant (VEGP). W dniu 22 października 2009 roku SNC uzupełniła swój wniosek o COL, składając wniosek o udzielenie ograniczonego zezwolenia na prowadzenie działań w celu uzyskania zgody na wykonanie wybranych prac budowlanych. COL i LWA wydano dla elektrowni Vogtle Electric Generating Plant (VEGP) – bloki 3 i 4, w dniu 10 lutego 2012 roku. Vogtle Unit 3 rozpoczął komercyjną eksploatację w lipcu 2023, a Unit 4 w marcu 2024 roku.

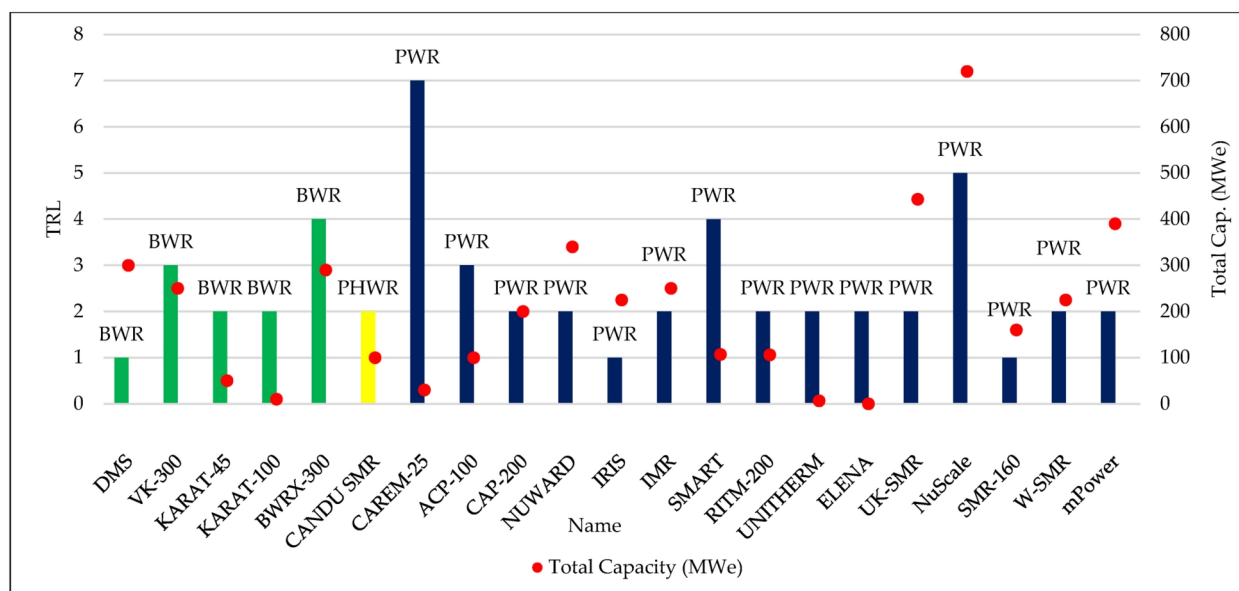
Ciekawym uzupełnieniem wcześniej omówionego raportu NW Pacific NL jest publikacja [15] szeregująca proponowane rozwiązania SMR według ich statusu w skali TRL i mocy (rys. 4, 5, 6). Ponieważ jest ich zbyt wiele, aby je opisywać w niniejszym artykule, odsyłamy czytelnika do publikacji IAEA katalogującej te rozwiązania [16].

HGTR-PM o mocy 210 MWe, który pracuje w Shidao Bay, ma najwyższą wartość TRL wynoszącą 8. Ten demonstracyjny moduł reaktora chłodzonego gazem ze złożem nasypowym został podłączony do sieci.

Rosyjski reaktor BREST-OD-300 jest w fazie rozwoju TRL 3. Jest to reaktor na prędkich neutronach chłodzony ołowiem, który jest obecnie budowany w Siewiersku w Federacji Rosyjskiej i ma być uruchomiony w roku 2026. Jest to próba demonstracji prototypu architektury przyszłego reaktora o dużej mocy, która pozwoli na zastosowanie zamkniętego jądrowego cyklu paliwowego. W reaktorze na stopionych solach typu SMR jest stosowana sól otrzymana na bazie fluorku lub chlorku. Paliwo może być paliwem w formie struktury stałej lub płynnej, gdy paliwo jest rozpuszczone w soli nośnej. Naturalne bezpieczeństwo stosowania soli, dla stworzenia niskociśnieniowego, jednofazowego układu chłodzenia, który nie wymaga pełnej hermetyzacji tego wysokotemperaturowego systemu, zapewniającego wysoką wydajność procesu, oraz zamknięty cykl paliwowy to tylko kilka z korzyści, jakie wykazują tego typu SMR-y. W Kanadzie, Wielkiej Brytanii i w Stanach Zjednoczonych kilka projektów takich SMR-ów jest

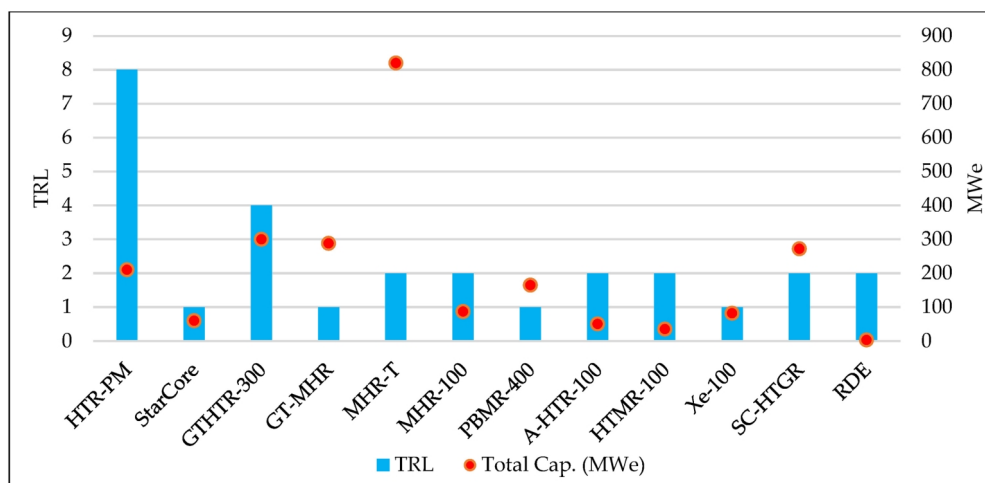
¹ <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/col.html>

² <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/esp.html>



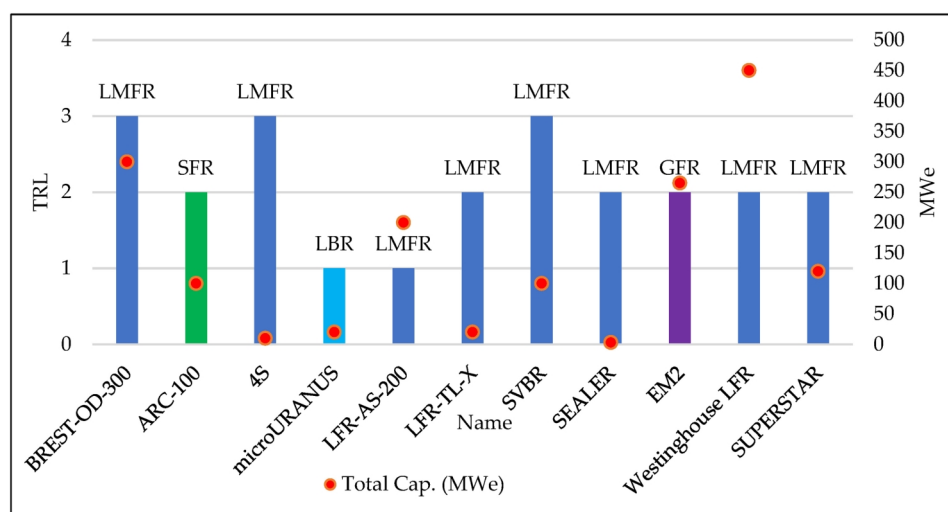
Rys. 4. Ocena poziomu TRL dla wybranych SMR [15].

Fig. 4. Evaluation of TRL for selected SMRs [15].



Rys. 5. Ocena poziomu TRL dla HTGR SMR [15].

Fig. 5. Evaluation of TRL for HTGR SMR [15].



Rys. 6. Poziom TRL dla reaktorów wykorzystujących neutrony prędkie [15].

Fig. 6. TRL for fast neutrons reactors [15].

we wstępnej fazie analiz licencyjnych. Większość SMR-ów tej technologii jest nadal w fazie projektowania koncepcyjnego (TRL 2). Tylko jeden reaktor, Fuji, zaprojektowany przez Międzynarodowe Forum Stopionej Soli Toru (ITMSF), ma wskaźnik TRL 3.

Podsumowując ten przegląd, można stwierdzić, że jest kilka SMR-ów, które znajdują się w facy rozwoju TRL 5 (tab. 4).

Oczywiście w tym przypadku najlepsza dostępna wiedza dotyczy pierwszego z SMR-ów na tej liście.

Warto też wspomnieć o raporcie NEA (I tom), który ta Agencja nazywa pulpitem nawigacyjnym po małych reaktorach modułowych. Pierwszy z nich zawiera analizę 21 projektów SMR oraz opis postępów na drodze do ich wdrożenia i komercjalizacji [17]. Zestawienie tablicy wskaźników NEA SMR wykracza poza poziom gotowości technologicznej i ocenia postępy w zakresie sześciu dodatkowych warunków podstawowych: gotowości do licencjonowania, lokalizacji, finansowania, łańcucha dostaw, zaangażowania i paliwa. W połączeniu z ocenami gotowości technicznej ujawnia on, które technologie i projekty SMR szybko przechodzą od koncepcji do komercjalizacji, na różnych rynkach na całym świecie. Drugi tom [18] jest kolejnym kamieniem milowym w bieżących wysiłkach Agencji Energii Jądrowej OECD (NEA) na rzecz kompleksowej oceny osiągniętego postępu na drodze do komercjalizacji i wdrożenia technologii SMR. Drugi tom nie stanowi aktualizacji zestawu reaktorów ocenianych w tomie pierwszym, zawarte w nim informacje rozszerzają tę samą metodologię na kolejne 21 projektów SMR z całego świata, według stanu wiedzy uzyskanej na 21 kwietnia 2023 roku. Oceny w żaden sposób nie odzwierciedlają opinii OECD lub NEA, lecz są oparte na ocenach przygotowanych wspólnie z projektantami poszczególnych rozwiązań. Publikacje te nie podają wartości TRL dla poszczególnych rozwiązań, ale wzbogacają taką ocenę w dodatkowe, wyżej wymienione informacje. Łącznie zatem z wcześniej przytoczonymi wartościami TRL stanowią wartościowy materiał porównawczy pomocny w działaniach analityków i instytucji zainteresowanych przyszłościowym wdrożeniem SMR-ów w różnych dziedzinach gospodarki.

5. Podsumowanie

Autor tej pracy miał okazję wysłuchać wykładu pana Davida A. Wrighta, komisarza Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (*Nuclear Regulatory Commission* – NRC). Pięciu komisarzy jest wyznaczanych przez prezydenta USA i ich kandydatury są zatwierdzane przez Kongres, podobne systemy kontroli społecznej i politycznej istnieją we Francji, Japonii i innych krajach. Komisja ta zajmuje się jedynie pokojowymi zastosowaniami technologii jądrowych, zatrudnia około 3000 pracowników i jej budżet roczny sięga miliarda dolarów. W każdej elektrowni jądrowej utrzymuje dwu rezydentów – inspektorów dozoru jądrowego. Proces licencjonowania elektrowni jądrowej z reaktorami nowego rodzaju (FOAK – *first of a kind*) trwa długo i jest kosztowny (*too long* według D.A. Wrighta, który nie zaprzeczył też, że licencjonowanie takiego pojedynczego obiektu (obejmujące związane z tym konieczne badania i prace rozwojowe) kosztuje wnioskodawcę około 15 milionów dolarów). NRC współpracuje blisko z National Laboratories, a projekty jądrowe są finansowane przez Department of Energy.

Trudno sobie wyobrazić wprowadzenie takiego systemu działania w Polsce, ale powinien on być analogiczny do stosowanego w państwach ościennych, takich jak Słowacja, Czechy czy Węgry. Tam odpowiedniki NRC są wspierane przez instytuty badawcze i uczelnie. Regulatorzy w tych krajach nie są w stanie zgromadzić takich środków ekonomicznych i ludzkich jak NRC, a sami nie mogą we właściwy sposób sprostać stawianym przed nimi zadaniom, nawet w mniejszej skali, ale o takiej samej wadze i odpowiedzialności w zakresie podejmowanych decyzji.

Wskazane w opracowaniu fakty wskazują na to, że działania dotyczące budowy elektrowni jądrowych muszą być dobrze przygotowane, a główny aspekt tych działań ma charakter techniczno-ekonomiczny (w nomenklaturze inżynierskiej muszą być opracowane założenia techniczno-ekonomiczne – ZTE). Dokument ten w dużej mierze obejmuje też oceny ekologiczno-społeczne. Jeśli chodzi o rozwój SMR, kluczowy dla wdrożenia jest poziom ich rozwoju określany w skali TRL. Przedstawiony w rozdziale 3 przykład ma naturę dydaktyczną, ilustruje etapy wdra-

Tabela 4. Wybrane SMR-y o TRL 5 [15].

Table 4. Selected SMRs at TRL 5 [15].

Nazwa	Typ	Moc (MWe)	Producent	Kraj	TRL
NuScale	PWR	12×60	GE-Hitachi Nuclear Energy	USA i Japonia	5
VBER-300	PWR (FNPP)	325	JSC "Afrikantov OKBM"	Rosja	6
CAREM-25	PWR	30	IRIS Consorsium	Argentyna	7
KLT-40S	PWR (FNPP)	2×35	JSC "Afrikantov OKBM"	Rosja	8
HTR-PM HTGR		210	INET, Tsinghua University	Chiny	8

zania trudnej technologii radiacyjnej według kolejnych punktów skali TRL, z wykorzystaniem zasad realizacji projektów inżynierskich, analogicznych do tych, które są stosowane w budowie elektrowni jądrowych.

Dowodem na ważność i konieczność wykonania technicznej oceny SMR są działania podjęte przez Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), która wdraża projekt „*Small Modular Reactor Readiness project overview*”. Wystartował on w 2023 roku i potrwa pięć lat. Fundusz projektu wynosi 50,7 milionów dolarów kanadyjskich. W ocenie wziętych zostanie pod uwagę wiele różnych parametrów i procedur [19].³ CNSC chce się przygotować do skutecznego i wydajnego regulowania SMR bez jakiegokolwiek uszczerbku dla wypracowanych zasad bezpieczeństwa, będzie też sponsorowało prowadzenie niezależnych badań przez jednostki zewnętrzne, uzyskanie wewnętrznej wiedzy specjalistycznej i przygotowania udokumentowanych zasad regulacyjnych, w obszarach wymienionych w dokumencie pod podanym powyżej linkiem tak, aby wspierać prowadzone przez tę instytucję działania licencjonowania. Podobne działania powinny być prowadzone i w Polsce, a działania zewnętrznych instytucji TSO finansowane np. z ustanowionych w tym celu programów NCBiR.

W raporcie Komisji Prezydenckiej w sprawie wypadku w Three Mile Island, Wydawnictwo Rządu USA, stwierdzono [20]: „Energetyka jądrowa wymaga szerokiego, zorganizowanego wsparcia naukowców i inżynierów”. Podkreślono, że należy zwrócić szczególną uwagę na

opracowanie, przegląd i nadzór nad procedurami stosowanymi w elektrowni tak, aby opierały się one zarówno na myśleniu inżynierskim, jak i na doświadczeniu eksploatacyjnym”. Ponadto, po awarii w Czarnobylu przeprowadzone przez doradców IAEA dochodzenie ustaliło, że procedury operacyjne nie zostały w zadowalający sposób oparte na analizach technicznych. Stwierdzono, że wymiana ważnych informacji dotyczących bezpieczeństwa między operatorami a organizacją wsparcia technicznego (TSO) była niewystarczająca i nie prowadziła do ich pełnego wykorzystania.

Podziękowanie. Dziękuję Panu Maciejowi Jurkowskemu, emerytowanemu Wiceprezesowi PAA, byłemu Głównemu Inspektorowi Dozoru Jądrowego, za wskazanie tego ważnego i ciekawego tematu. Był On dyrektorem Państwowego Inspektoratu Bezpieczeństwa Jądrowego i Radiacyjnego w latach, kiedy w Polsce były realizowane radiacyjne obiekty przemysłowe opisane w rozdziale trzecim.

Notka o autorze

Prof. dr hab. inż. Andrzej G. Chmielewski jest dyrektorem Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, będącego Collaborating Centre IAEA oraz wiceprzewodniczącym Rady Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej przy Prezesie PAA. Przez wiele lat pracował w Politechnice Warszawskiej, University of Tennessee, USA oraz Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, Wiedeń, Austria. W latach 1990–2011 był wiceprzewodniczącym i przewodniczącym Rady ds. Atomistyki przy Prezesie PAA. Pełnił funkcje prezesa PTN i SEREN, a także przez szereg lat był członkiem SAGNA, organu doradczego DDG NA IAEA.

Literatura

1. Projektowanie procesów technologicznych: od laboratorium do instalacji przemysłowej: praca zbiorowa pod redakcją Ludwika Synoradzkiego i Jerzego Wisiańskiego. Wydanie I – Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2019.
2. EERE R 540.112 -02: Technology Readiness Levels (TRLs), https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-08/EERE_R_540.11202_Technology_Readiness_Levels_%28TRLs%29.pdf
3. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Strazza C., Olivieri N., De Rose A., Stevens T. et al., Technology readiness level – Guidance principles for renewable energy technologies – Final report, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/577767>
4. Poziomy gotowości technologicznej we wnioskach NCBR. Rozporządzenie 1 grudnia 2023 <https://osf.opi.org.pl/baza-wiedzy/poziomy-gotowosci-technologicznej-wnioski-ncbr/>
5. Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 28 sierpnia 2020 r. w sprawie zadań Narodowego Centrum Badań i Rozwoju związanych z realizacją badań naukowych lub prac rozwojowych na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20200001495/O/D20201495.pdf>
6. Chmielewski A. G. & Zimek Z. (2019). Electron Accelerators for Research, Industry and Environment – the INCT Perspective. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237554>
7. Chmielewski A.G. (1995) Technological development of EB flue gas treatment based on physics and chemistry of the process. Radiat Phys Chem 46:1057–1062.
8. Chmielewski A.G. Electron Beam Gaseous Pollutants Treatment Raporty IChTJ. Seria B nr 1/99; Warszawa. 1999. https://www.researchgate.net/publication/274125203_ELECTRON_BEAM_GASEOUS_POLLUTANTS_TREATMENT#fullTextFileContent
9. Chmielewski A.G., Tyminski B., Licki J., Iller E., Zimek Z., Radzio B. (1995). Pilot plant for flue gas treatment-continuous operation tests. Radiat Phys Chem 46:1067–1070.
10. Chmielewski A.G., Licki J., Pawelec A., Tyminski B., Zimek Z. (2004). Operational experience of the industrial plant for electron beam flue gas treatment. Radiat Phys Chem 71:441–444.
11. Chmielewska D., Miskiewicz A., Smoliński T. Dynamiczny rozwój małych reaktorów modułowych (SMR) – sytuacja na świecie i w Polsce. Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna, 3/2023: 7–10.
12. Thomas K., Gunzel Ch., Lahaye N. Emerging Technologies Review: Small Modular Reactors, Northwest Pacific Laboratory, Richland, Washington April 2023.

³ <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/smr/four-pillars/#sec3>

13. GAO (Government Accountability Office). 2020. Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects. Accessed online on 4 February 2023 at <https://www.gao.gov/assets/gao-20-48g.pdf>.
14. NRC (Nuclear Regulatory Commission). 2021. Generic Schedules. Accessed online on 25 March 2023 at <https://www.nrc.gov/about-nrc/generic-schedules.html>.
15. Rahmanta M.A., Harto A.W., Agung A., Ridwan M.K. Nuclear Power Plant to Support Indonesia's Net Zero Emissions: A Case Study of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness Level and Levelized Cost of Electricity Comparing Method. *Energies* 2023,16, 3752. <https://doi.org/10.3390/en16093752>
16. SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY CATALOGUE 2024 Edition A Supplement to the non-serial publication: Small Modular Reactors: Advances in Developments 2024, https://aris.iaea.org/publications/SMR_catalogue_2024.pdf
17. The NEA Small Modular Reactor Dashboard. OECD 2023, NEA No. 7650, NUCLEAR ENERGY AGENCY ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_78743/the-nea-small-modular-reactor-dashboard?details=true
18. The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Volume II. OECD 2023 NEA No. 7657, NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2023-07/nea_7657_smr_dashboard_vol.2.pdf
19. Small Modular Reactor Readiness – 4 pillars, Canadian Nuclear Safety Commission, Date modified: 2024-12-19, <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/smr/four-pillars/#sec3>
20. Technical Support to Nuclear Power Plants and Programmes. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-3.28. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. VIENNA, 2018. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1824_web.pdf

Radiologiczny monitoring gleby w otoczeniu Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie w latach 2014–2023

Radiological monitoring of the soil in the proximity of National Radioactive Waste Repository in Różan in years 2014–2023

Michał Ochmański¹, Krzysztof Isajenko², Barbara Piotrowska²

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska

² Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Konwaliowa 7, 03-194 Warszawa, Polska

Streszczenie: W Polsce pomimo braku elektrowni jądrowych istnieją dwa miejsca związane z przetwarzaniem lub przechowywaniem substancji promieniotwórczych, które podlegają nadzorowi oraz kontroli radiologicznej w otoczeniu tu wymienionych ośrodków, tj.: Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku oraz Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Róźnie. Obydwa te ośrodki są monitorowane przez niezależne laboratoria. Badane są m.in. gleba, roślinność, aerozole z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego oraz wody źródlane i gruntowe. Przez długi okres takie badania prowadziło Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR). W pracy zamieszczono wyniki badań gleby z ostatnich 10 lat. Dzięki stałemu monitoringowi radiologicznemu otoczenia KSOP można określić, czy składowane tam odpady wpływają na skażenie promieniotwórcze otoczenia. W pracy położono nacisk na analizę badań gleby z lat 2014–2023 poprzez porównanie stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych, takich jak: rad ^{226}Ra , aktywność ^{228}Ac oraz potas ^{40}K , do średnich stężeń w Polsce oraz w województwie mazowieckim, w którym KSOP jest umiejscowiony. Dodatkowo, zbadana została depozycja ceszu ^{137}Cs , który jest sztucznym izotopem promieniotwórczym pozostałym jeszcze z czasów awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu, ale i obecnym w składowanych w KSOP zużytych sztucznych źródłach promieniotwórczych.

Słowa kluczowe: Promieniotwórczość gleby, cesz ^{137}Cs , rad ^{226}Ra , potas ^{40}K .

Abstract: Despite the lack of the nuclear power plant in Poland there are two facilities connected to processing or storing of the radioactive substances, which must be under radiological supervision and control. These facilities are National Nuclear Research Center (NCBJ) in Świerk and National Radioactive Waste Repository (KSOP) in Różan. Both of these facilities are monitored by independent laboratories. The concentrations of radionuclides in soil, vegetation, aerosols from the ground layer of air, groundwater and springwater are all assessed in those studies. For a long time such research was conducted by CLOR. This work compiles the results of such studies from the last 10 years. Thanks to continuous radiological monitoring of the proximity of the KSOP it is possible to determine, whether nuclear waste stockpiled there has an effect on the immediate environment. This work focuses on the analysis of the radiological measurements of soil samples from years 2014–2023 by comparing the concentration of the natural radionuclides, such as ^{226}Ra , ^{228}Ac and ^{40}K to average concentration in Poland and Mazowieckie Voivodeship in which KSOP is situated. Additionally, the deposition of ^{137}Cs , which is an artificial radionuclide left in soil as an aftermath of the Chernobyl Nuclear Power Plant accident, is also measured.

Keywords: Radioactivity of soil, caesium ^{137}Cs , radium ^{226}Ra , potassium ^{40}K .

Wprowadzenie

Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie jest jedynym obiektem w Polsce służącym do składowania krótkożyciowych, nisko- i średnioaktywnych

odpadów promieniotwórczych oraz do okresowego przechowywania odpadów długożyciowych. Dodatkowo, w KSOP składowane są również zużyte i zamknięte źródła promieniotwórcze o krótkim czasie życia i o niskiej lub średniej aktywności.

Głównym sposobem zapobiegania przedostawaniu się odpadów do otoczenia, np. do wód gruntowych i do gleby, są warstwy betonu, oddzielające odpady od otoczenia. Odpady krótkożyciowe umieszcza się w metalowych bębnach, które następnie układa się w przeznaczonym dla nich miejscu i zalewa się betonem. Dodatkowo zabezpiecza się je przed opadami w taki sposób, aby woda nie przeniknęła do wnętrza betonu i nie powodowała korozji konstrukcji oraz przenikania odpadów do gleby.

Zgodnie z obowiązującymi w Polsce i Europie przepisami prawnymi dotyczącymi przechowywania odpadów promieniotwórczych obiekty jądrowe, takie jak Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, muszą być monitorowane radiologicznie. Monitoringiem objęte są zarówno teren składowiska, jak i bliskie jego otoczenie.

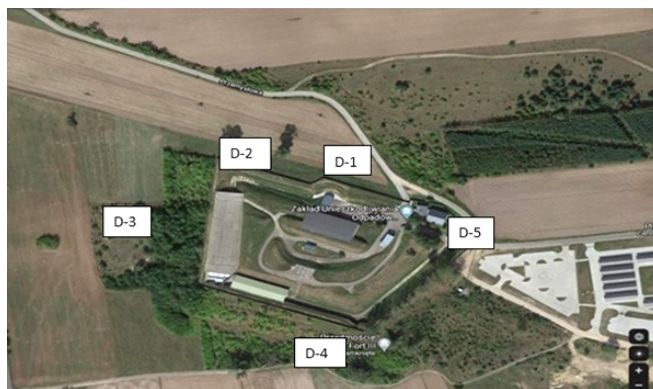
Na zlecenie Państwowej Agencji Atomistyki Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej wykonuje kompleksowe pomiary, mające na celu ocenę sytuacji radiacyjnej w pobliżu KSOP. Pomiary te obejmują próbki gleby, trawy, aerozoli z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego oraz wód źródłanych i gruntowych. W pracy zamieszczono wyniki pomiarów próbek gleby z otoczenia KSOP z okresu 2014–2023.

Badanie gleby

W ramach oceny radiologicznej środowiska w otoczeniu KSOP pobierano próbki gleby. Miejsca poboru próbek zostały wybrane tak, aby z każdej strony składowiska odpadów była możliwość oceny jego wpływu na środowisko (rys. 1). Pobór próbek odbywał się 2 razy w roku, przez co rocznie pobieranych było 10 próbek gleby. W próbkach rejestrowano izotopy gamma promieniotwórcze pochodzenia naturalnego, tj. dwóch naturalnych szeregów promieniotwórczych oraz potas ^{40}K , a także izotopy gamma promieniotwórcze pochodzenia sztucznego. Z izotopów sztucznych rejestrowany był głównie cez ^{137}Cs oraz w jednym roku odnotowano obecność ameryku ^{241}Am i ceru ^{141}Ce .

Pobieranie prób

Próbki gleby były pobierane w 5 miejscach pokazanych na rysunku 1 (oznaczonych symbolami od D-1 do D-5) z powierzchniowej warstwy gleby (o głębokości 10 cm) za pomocą metalowych wykrojników. Jedna z siedmiu części pobranej próby (pochodząca z jednego wykrojnika) znajdowała się w środku okręgu o promieniu 1 m, natomiast pozostałe sześć części na obwodzie tego okręgu. Pobrane w ten sposób składowe próbki były mieszane w worku i odpowiednio opisywane. Taki sposób poboru jest zalecany przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu [1].



Rys. 1. Miejsca poboru próbek gleby w otoczeniu KSOP w Różanie (źródło: GoogleMaps).

Fig. 1. Soil sampling sites in the vicinity of the KSOP in Różan.

Przygotowanie prób

Przed wykonaniem pomiarów pobrane próbki należało w odpowiedni sposób przygotować. W pierwszym kroku próbki rozdrobniono i pozbawiono zanieczyszczeń. Następnie tak przygotowaną glebę suszono w suszarce w temperaturze 105°C przez 16 h, po czym studzono do temperatury pokojowej. Po wyznaczeniu masy całkowitej próby oraz po rozdrobnieniu przesiewano przez sito o grubości oczek 2 mm i przesypywano do pojemników typu Marinelli o pojemności $0,5\text{ dm}^3$.

Wykonanie pomiarów

Pomiary wykonywano metodą spektrometrii promieniowania gamma z użyciem detektora półprzewodnikowego HPGe o wydajności względnej około 40%, współpracującego z oprogramowaniem GENIE-2000. Czas pomiaru każdej próbki wynosił 80 000 sekund, przy którym dolny próg detekcji stężenia promieniotwórczego w próbkach gleby osiągany jest na poziomie $0,05\text{ Bq/kg}$ dla cezu ^{137}Cs oraz 1 Bq/kg dla potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i aktynu ^{228}Ac .

Wyniki pomiarów

Widmo promieniowania gamma każdej próbki zostało przeanalizowane za pomocą programu GENIE-2000, gdzie uwzględniono również odpowiednią kalibrację wydajnościową i wcześniejszy pomiar tła.

W tabelach 1–3 zamieszczono stężenia promieniotwórcze naturalnych izotopów promieniotwórczych odpowiednio ^{226}Ra , ^{228}Ac i ^{40}K wraz z niepewnościami oraz wartości średnie tych stężeń dla pięciu punktów poboru w latach 2014–2023 podane w Bq/kg .

Na rysunkach 2–5 przedstawiono wykresy stężeń promieniotwórczych ^{226}Ra , ^{228}Ac , ^{40}K oraz ^{137}Cs w zależności

Tabela 1. Stężenie promieniotwórcze ^{226}Ra w próbkach gleby pomierzone w latach 2014–2023 wyrażone w Bq/kg.**Table 1.** Radioactive concentration of ^{226}Ra in soil samples measured in 2014–2023, in Bq/kg.

Rad ^{226}Ra	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	18,1±0,7 20,4±0,7	14,9±0,6 18,3±0,7	10,6±0,4 11,9±0,5	13±0,4 14,6±0,6	15,9±0,6 16,1±0,6	21-05-2014 09-09-2014
2015	21,9±0,8 33,4±1,3	31,0±0,9 30,6±1,2	28,5±0,8 22,9±1,0	17,0±0,7 27,6±0,9	38,6±1,0 30,2±0,9	26-05-2015 09-09-2015
2016	18,7±0,5 21,9±0,8	16,4±0,5 18,1±0,7	11,5±0,5 16,7±0,6	15,4±0,5 16,3±0,7	21,0±0,5 18,2±0,7	12-05-2016 06-09-2016
2017	23,3±1,9 22,4±1,9	22,7±0,8 21,9±1,0	21,3±1,0 11,1±0,7	18,8±1,5 20,0±1,0	28,3±1,2 22,6±1,0	30-05-2017 27-09-2017
2018	24,4±1,0 21,4±1,0	19,6±0,9 19,7±0,9	11,9±0,6 13,9±0,7	21,0±0,9 17,1±0,8	18,4±1,5 12,1±0,6	26-06-2018 18-10-2018
2019	22,6±1,8 27,3±1,2	22,7±1,8 22,5±1,0	13,6±0,7 20,1±0,9	19,0±1,6 20,9±0,9	15,4±0,8 14,2±0,8	04-06-2019 17-09-2019
2020	43,0±3,5 23,1±1,9	40,8±3,3 21,9±1,8	20,1±1,7 17,0±1,4	15,8±1,3 18,5±1,5	20,8±1,7 14,6±1,2	05-05-2020 09-09-2020
2021	21,4±1,1 20,8±1,0	18,6±1,0 19,9±1,0	10,8±0,6 10,8±0,6	18,2±1,0 17,8±0,9	14,0±0,8 14,8±0,8	13-08-2021 11-09-2021
2022	22,1±0,9 22,8±1,0	18,4±0,8 18,1±0,8	9,0±0,4 9,1±0,5	18,0±0,7 15,3±0,7	13,0±0,6 13,5±0,6	24-06-2022 14-09-2022
2023	36,1±1,8 20,5±1,0	32,4±1,6 18,8±0,9	30,3±1,6 17,2±0,8	18,6±0,8 16,0±0,8	24,1±1,3 13,3±0,7	04-08-2023 13-09-2023
Średnie stężenie	24,3±1,3	22,4±1,1	15,9±0,8	18,0±0,9	19,0±0,9	-

Tabela 2. Stężenie promieniotwórcze ^{228}Ac w próbkach gleby pomierzone w latach 2014–2023 wyrażone w Bq/kg.**Table 2.** Radioactive concentration of ^{228}Ac in soil samples measured in 2014–2023, in Bq/kg.

Aktywność ^{228}Ac	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	23,5±0,6 23,7±0,6	18,0±0,5 20,2±0,5	10,5±0,3 14,1±0,4	16,5±0,4 16,1±0,5	15,4±0,4 16,6±0,5	21-05-2014 09-09-2014
2015	25,5±0,6 22,1±0,8	20,7±0,6 20,3±0,7	18,7±0,6 14,3±0,5	19,2±0,5 18±0,6	20,7±0,6 18,5±0,6	26-05-2015 09-09-2015
2016	23,2±0,5 24,5±0,6	20,1±0,4 21,3±0,5	13,4±0,4 18,6±0,5	18,1±0,4 19,2±0,6	21,9±0,5 18,4±0,5	12-05-2016 06-09-2016
2017	24,3±0,6 23,9±0,7	21,7±0,6 21,0±0,6	16,8±0,5 10,7±0,3	17,4±0,5 19,4±0,5	21,8±0,6 20,3±0,6	30-05-2017 27-09-2017
2018	23,9±0,6 24,1±0,6	20,5±0,6 19,0±0,5	11,1±0,3 13,1±0,4	18,6±0,5 15,9±0,4	18,3±0,5 11,9±0,4	26-06-2018 18-10-2018
2019	23,6±0,6 25,3±0,7	21,0±0,6 21,3±0,6	12,9±0,4 19,5±0,5	17,3±0,5 17,9±0,5	14,0±0,4 13,9±0,4	04-06-2019 17-09-2019
2020	23,6±0,9 23,9±0,6	20,1±0,7 20,9±0,6	11,8±0,5 16,0±0,4	13,3±0,4 16,4±0,5	18,6±0,5 13,7±0,4	05-05-2020 09-09-2020
2021	24,4±0,6 25,1±0,6	21,1±0,8 21,5±0,5	11,7±0,3 11,2±0,3	18,4±0,6 17,1±0,4	13,7±0,4 13,4±0,4	13-08-2021 11-09-2021
2022	23,8±0,6 24,7±0,8	20,3±0,5 18,6±0,6	8,4±0,2 9,4±0,3	17,3±0,4 13,6±0,4	12,3±0,3 11,9±0,4	24-06-2022 14-09-2022
2023	23,1±0,8 24,0±0,6	20,0±0,7 19,5±0,5	17,9±0,6 17,0±0,4	18,1±0,5 16,2±0,4	12,5±0,4 13,1±0,3	04-08-2023 13-09-2023
Średnie stężenie	24,0±0,7	20,4±0,6	13,9±0,4	17,2±0,5	16,0±0,5	-

Tabela 3. Stężenie promieniotwórcze ^{40}K w próbkach gleby pomierzone w latach 2014–2023 wyrażone w Bq/kg.

Table 3. Radioactive concentration of ^{40}K in soil samples measured in 2014–2023, in Bq/kg.

Potas ^{40}K	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	588±13 618±14	506±13 562±13	383±9 426±10	453±12 475±11	388±9 424±10	21-05-2014 09-09-2014
2015	598±13 533±12	535±7 495±11	488±6 402±9	491±11 434±7	394±5 387±5	26-05-2015 09-09-2015
2016	547±7 569±13	504±7 534±12	381±9 421±11	462±6 483±13	400±5 406±9	12-05-2016 06-09-2016
2017	596±34 569±34	538±20 528±20	411±16 343±13	461±26 477±18	401±15 442±17	30-05-2017 27-09-2017
2018	578±21 567±21	491±19 460±17	336±13 387±15	468±18 404±15	444±26 358±14	26-06-2018 18-10-2018
2019	573±33 596±23	538±31 533±20	371±14 411±16	456±26 453±17	390±15 398±15	04-06-2019 17-09-2019
2020	587±33 572±33	543±31 546±31	363±21 410±23	398±23 430±25	478±27 388±22	05-05-2020 09-09-2020
2021	517±13 572±13	526±15 535±12	362±8 329±7	469±13 430±10	392±11 386±9	13-08-2021 11-09-2021
2022	541±11 566±16	497±10 481±12	280±6 301±7	417±9 360±9	338±7 345±8	24-06-2022 14-09-2022
2023	551±12 557±12	497±11 509±11	473±10 433±9	458±9 421±9	370±8 380±8	04-08-2023 13-09-2023
Średnie stężenie	570±19	518±16	386±12	445±14	395±12	-

od punktu, z którego były pobierane próby. Dane do wykresów zostały wzięte z trzech losowo wybranych lat.

Na rysunkach 2–4 stężenia promieniotwórcze izotopów naturalnych nie wykazują dużych zmian dla poszczególnych punktów pomiarowych (zwłaszcza stężenia ^{228}Ac i ^{40}K). Niewielkie fluktuacje zauważyć można dla stężeń ^{226}Ra , jednak w zestawieniu 10-letnim możemy wyznaczyć wartości średnie stężeń promieniotwórczych poprzez obliczenie wartości średniej z 5 punktów. Dla ^{137}Cs sytu-

acja wygląda nieco inaczej. Stężenia promieniotwórcze mogą znacząco się różnić w zależności od miejsca poboru, dlatego w tym przypadku kolejne serie danych będą odpowiadały innym miejscom pomiaru.

Z uwagi na to, że w wyniku działalności człowieka (np. katastrofa w Czarnobylu) w środowisku naturalnym jest obecny cez, w opracowaniu przedstawiono depozycję cesu w 10 cm warstwie gleby dla badanych punktów D-1–D-5 pokazanych na rysunku 1.

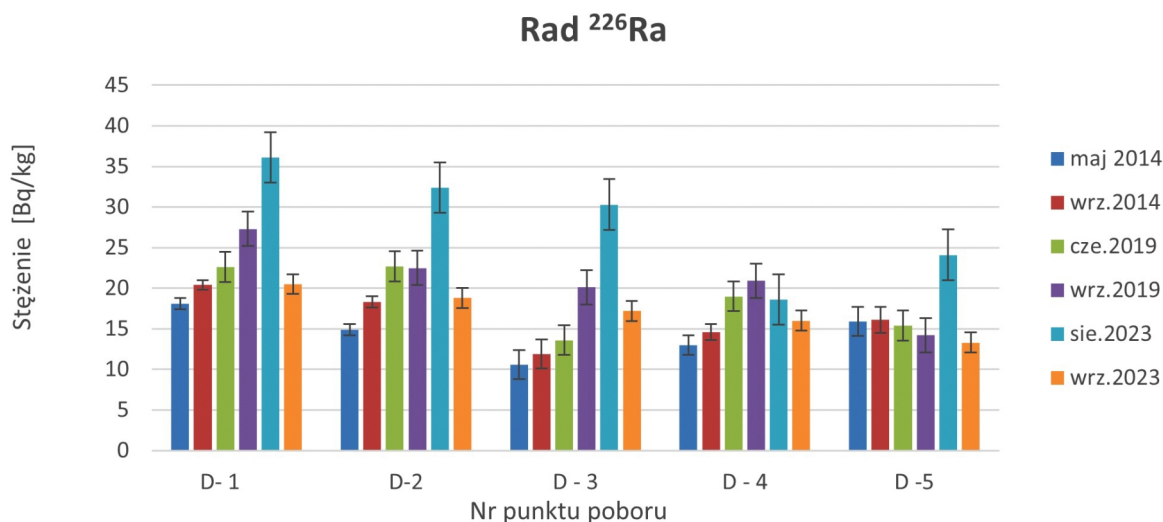
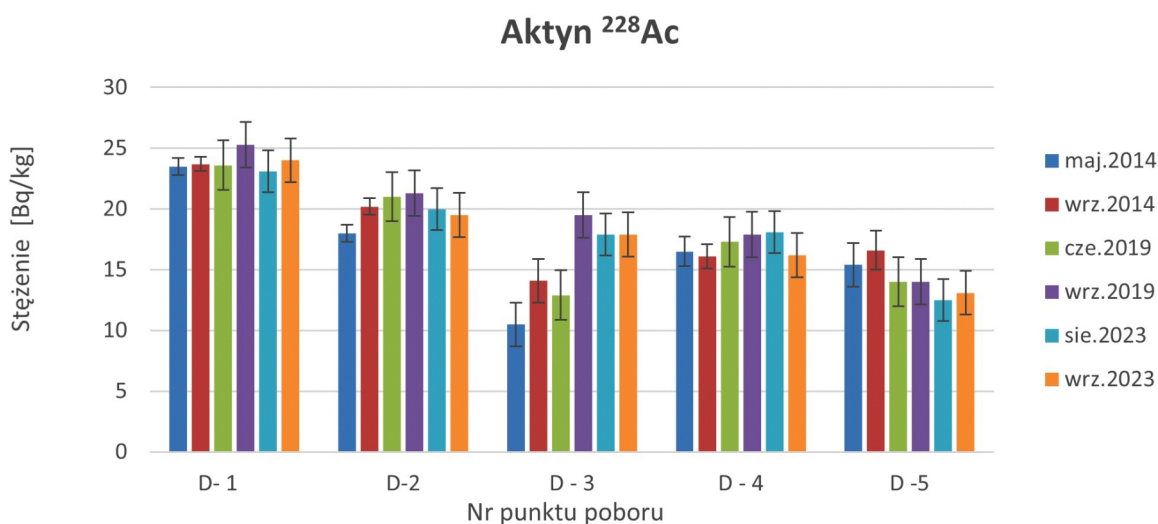
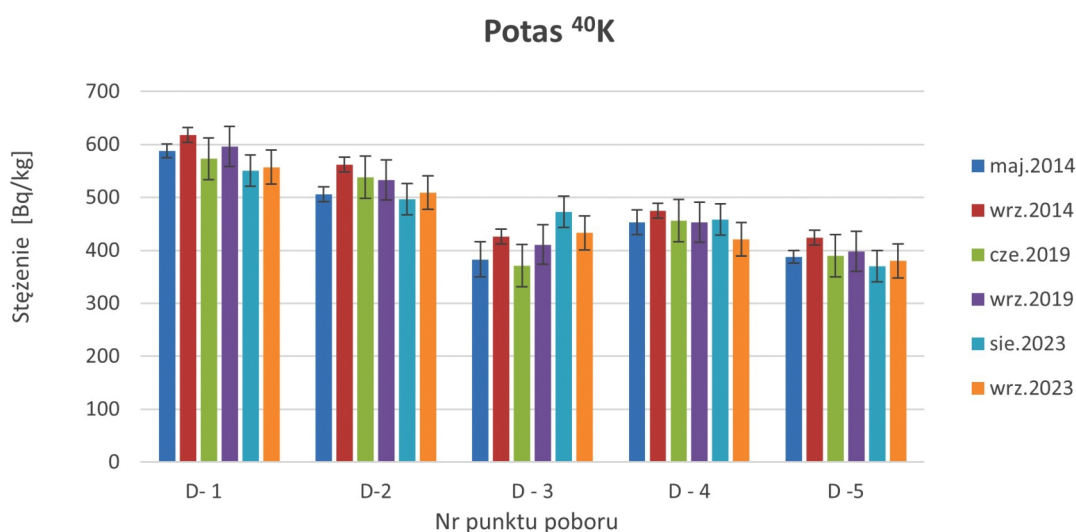

Rys. 2. Stężenie promieniotwórcze radu ^{226}Ra w kolejnych punktach poboru próbek w losowo wybranych trzech latach: 2014, 2019 i 2023 (autor: Michał Ochmański).

Fig. 2. Radioactive concentration of radium ^{226}Ra at subsequent sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023 (author: Michał Ochmański).



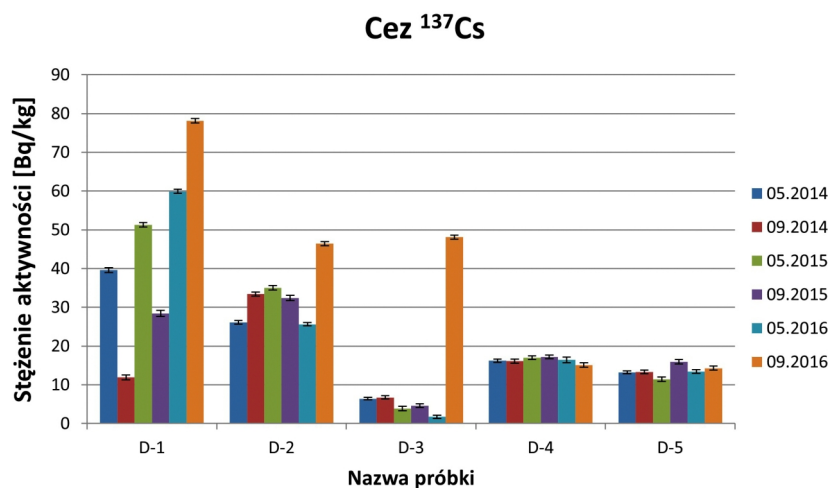
Rys. 3. Stężenie promieniotwórcze aktywności ^{228}Ac w kolejnych punktach poboru próbek w losowo wybranych trzech latach: 2014, 2019 i 2023 (autor: Michał Ochmański).

Fig. 3. Radioactive concentration of actinium ^{228}Ac at subsequent sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023 (author: Michał Ochmański).



Rys. 4. Stężenie promieniotwórcze potasu ^{40}K w kolejnych punktach poboru próbek w losowo wybranych trzech latach: 2014, 2019 i 2023 (autor: Michał Ochmański).

Fig. 4. Radioactive concentration of potassium ^{40}K at subsequent sampling points in three randomly selected years: 2014, 2019 and 2023 (author: Michał Ochmański).



Rys. 5. Stężenie promieniotwórcze cezu ^{137}Cs w miejscach poboru próbek w latach 2014–2016 (autor: Michał Ochmański).

Fig. 5. Radioactive concentration of caesium ^{137}Cs at sampling sites in 2014–2016 (author: Michał Ochmański).

Stężenie cezu ^{137}Cs zostało przeliczone na depozycję wyrażaną w kBq/m^2 za pomocą wzoru:

$$Dep \frac{\text{kBq}}{\text{m}^2} = \frac{S \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}}{1000} \cdot \frac{M[\text{kg}]}{7 P[\text{m}^2]} = \frac{S}{1750} \cdot \frac{M}{D^2} \frac{\text{kBq}}{\text{m}^2}$$

gdzie: $S \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ oznacza stężenie promieniotwórcze cezu

^{137}Cs ,

$M[\text{kg}]$ to całkowita masa pobranej próbki, a

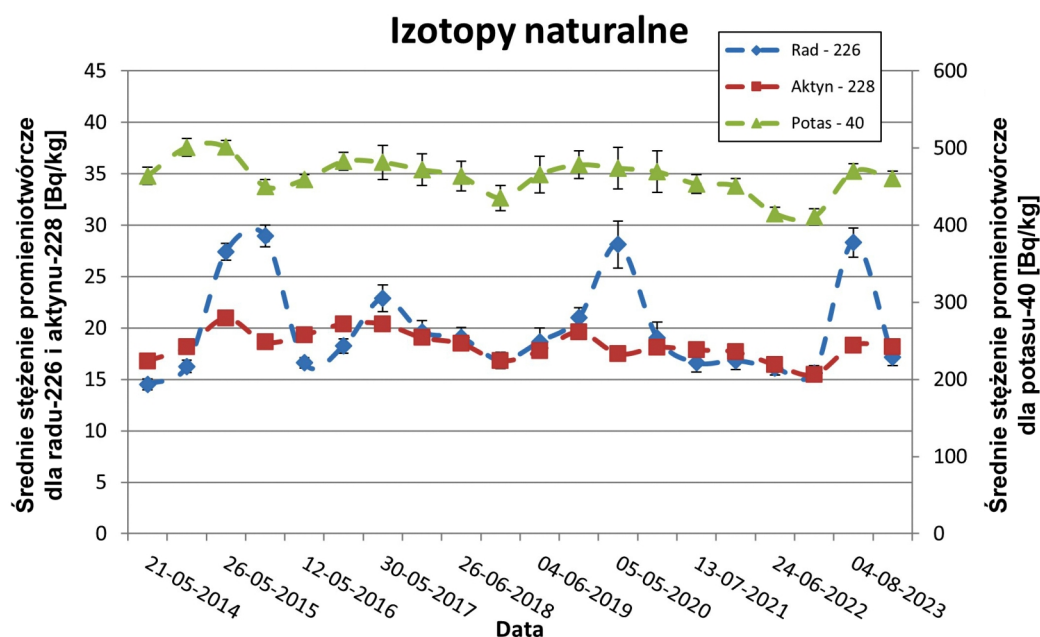
$P = \frac{D^2}{4} [\text{m}^2]$ jest polem powierzchni, z której pobie-

rana jest gleba za pomocą wykrojnika o średnicy D .

W roku 2022 wykryto 2 dodatkowe sztuczne izotopy promieniotwórcze, tj. ameryk ^{241}Am oraz cer ^{141}Ce .

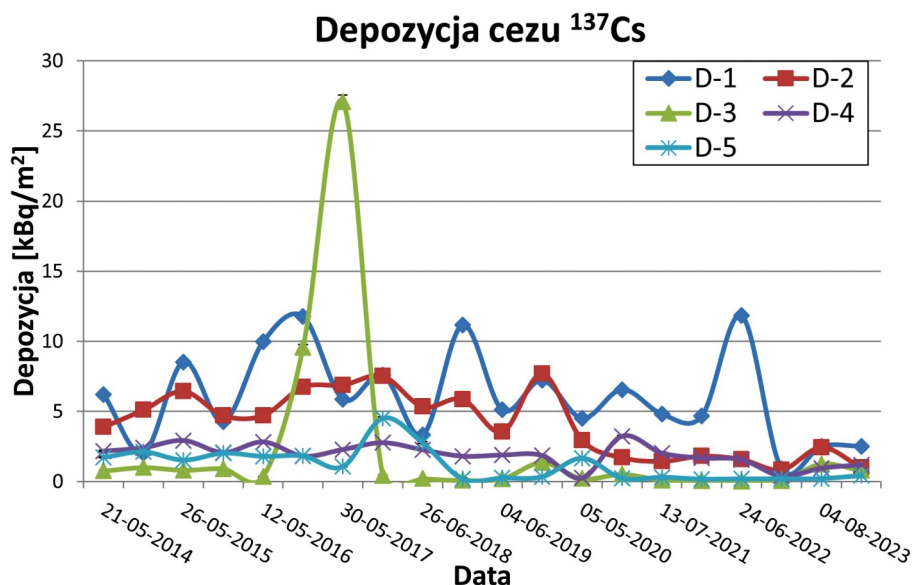
Ameryk został wykryty tylko w próbce pochodzącej z punktu D-1, jego stężenie promieniotwórcze wynosiło $0,88 \pm 0,22 \text{ Bq/kg}$ w próbce pobranej dnia 24.06.2022, natomiast stężenie promieniotwórcze w próbce z dnia 14.09.2022 znajdowało się poniżej granicy detekcji wynoszącej $0,58 \text{ Bq/kg}$.

Sztuczny izotop ceru ^{141}Ce został wykryty w próbach pochodzących z punktów D-2, D-3 i D-4. Jego stężenia zawierają się w tabeli 5.



Rys. 6. Średnie stężenie promieniotwórcze potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i aktynu ^{228}Ac w próbkach gleby w latach 2014–2023 (autor: Michał Ochmański).

Fig. 6. Average radioactive concentration of potassium ^{40}K , radium ^{226}Ra and actinium ^{228}Ac in soil samples in 2014–2023 (author: Michał Ochmański).



Rys. 7. Depozycja cezu ^{137}Cs w latach 2014–2023 w kolejnych miejscach poboru próbek pokazanych na rysunku 1 (autor: Michał Ochmański).

Fig. 7. Deposition of cesium ^{137}Cs in the years 2014–2023 at the subsequent sampling locations shown in Fig. 1 (author: Michał Ochmański).

Tabela 4. Stężenie promieniotwórcze ceru ^{141}Ce w próbkach gleby pomierzone w roku 2022 wyrażone w Bq/kg.**Table 4.** Deposition of cesium ^{137}Cs in soil samples from subsequent sampling sites, in kBq/m².

Cez ^{137}Cs	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Data poboru
2014	6,20±0,11 2,02±0,03	3,89±0,10 5,10±0,09	0,76±0,01 1,00±0,02	2,17±0,05 2,40±0,04	1,71±0,03 2,11±0,05	21-05-2014 09-09-2014
2015	8,53±0,15 4,27±0,08	6,45±0,04 4,70±0,09	0,81±0,01 0,91±0,02	2,92±0,05 2,06±0,01	1,52±0,01 2,02±0,01	26-05-2015 09-09-2015
2016	9,95±0,05 11,76±0,20	4,71±0,04 6,74±0,12	0,36±0,01 9,56±0,20	2,82±0,02 1,81±0,05	1,79±0,01 1,82±0,04	12-05-2016 06-09-2016
2017	5,86±0,13 7,60±0,20	6,89±0,14 7,52±0,15	27,07±0,47 0,43±0,02	2,28±0,06 2,76±0,07	1,06±0,02 4,52±0,08	30-05-2017 27-09-2017
2018	3,31±0,07 11,15±0,22	5,34±0,11 5,87±0,11	0,21±0,01 0,09±0,01	2,26±0,05 1,80±0,03	2,76±0,07 0,18±0,07	26-06-2018 18-10-2018
2019	5,10±0,12 7,23±0,14	3,55±0,08 7,69±0,15	0,21±0,01 1,36±0,03	1,89±0,05 1,85±0,04	0,25±0,01 0,33±0,01	04-06-2019 17-09-2019
2020	4,50±0,10 6,56±0,15	2,95±0,07 1,71±0,04	0,21±0,01 0,52±0,01	0,25±0,01 3,23±0,07	1,66±0,04 0,22±0,01	05-05-2020 09-09-2020
2021	4,81±0,10 4,66±0,08	1,44±0,04 1,82±0,04	0,11±0,01 0,05±0,01	2,03±0,05 1,68±0,04	0,30±0,01 0,17±0,01	13-08-2021 11-09-2021
2022	11,82±0,17 0,90±0,02	1,59±0,03 0,84±0,02	0,03±0,01 0,04±0,01	1,56±0,02 0,40±0,02	0,18±0,01 0,19±0,01	24-06-2022 14-09-2022
2023	2,50±0,05 2,52±0,05	2,44±0,04 0,99±0,02	1,25±0,02 0,79±0,02	0,95±0,02 1,19±0,02	0,20±0,01 0,42±0,01	04-08-2023 13-09-2023

Tabela 5. Stężenie promieniotwórcze ceru ^{141}Ce w próbkach gleby pomierzone w roku 2022 wyrażone w Bq/kg.**Table 5.** Radioactive concentration of cerium ^{141}Ce in soil samples measured in 2022, in Bq/kg.

Cer ^{141}Ce	D-2	D-3	D-4
24-06-2022	0,32±0,06	0,15±0,04	0,38±0,06
14-09-2022	0,79±0,13	0,20	0,25

Analiza wyników

Stężenie promieniotwórcze potasu ^{40}K w latach 2014–2023 zawierało się w granicach od 280 Bq/kg zarejestrowane w 2022 roku dla punktu D-3 do 618 Bq/kg uzyskane w 2014 roku w punkcie D-1. Stężenie promieniotwórcze radu ^{226}Ra wahało się od 9 Bq/kg zarejestrowane w 2022 roku w punkcie D-3 do 43 Bq/kg w 2020 roku w punkcie D-1, natomiast w przypadku aktynu ^{228}Ac stężenie promieniotwórcze wynosiło od około 8,4 Bq/kg w 2022 roku w punkcie D-3 do 25,5 Bq/kg w 2015 roku w punkcie D-1.

Poziom stężenia promieniotwórczego izotopów naturalnych utrzymuje się na dość stałym poziomie, jednakże widać pewne piki na wykresie radu ^{226}Ra . Skoki te utrzymują się jednak w zakresie stężeń standardowym dla tego izotopu radu, więc nie poświęcono im więcej uwagi.

Poziomy stężen promieniotwórczych izotopów naturalnych nie odbiegają znacząco od wartości średnich dla Polski. Średnie stężenie radu ^{226}Ra w Polsce wynosi: $31 \pm 1,6$ Bq/kg w zakresie od 6,4 do 154,7 Bq/kg, natomiast w województwie mazowieckim, w którym znajduje się też

KSOP, średnie stężenie wynosi 15,9 Bq/kg. W przypadku aktynu ^{228}Ac w Polsce średnie stężenie wynosi 30,5 Bq/kg w zakresie od 6 do 129,2 Bq/kg, a w województwie mazowieckim średnie stężenie wynosi 15,9 Bq/kg. Średnie stężenia promieniotwórcze dla województwa mazowieckiego są przekraczane w pewnych miejscach, ale z racji tego, że poziomy stężen oscylują wokół pewnych wartości średnich, to samo miejsce, w którym były wykonywane pomiary, raz ten poziom średni przekracza, a w następnym roku znajduje się poniżej wartości średniej. Zmiany takie są normalne dla gleby, ponieważ izotopy promieniotwórcze przemieszczają się wraz z glebą i ich poziomy będą się wahać wraz z upływem czasu.

W przypadku potasu ^{40}K średnie stężenie promieniotwórcze w Polsce wynosi 497 ± 15 Bq/kg w zakresie od 138 do 1046 Bq/kg, gdzie w województwie mazowieckim średnie stężenie wynosi 382 Bq/kg. Jest to jedyny izotop, który przekracza średnie stężenie w województwie mazowieckim dla każdego miejsca pomiarowego, jednakże przekracza go o wartości, które mogą być przypisane innej strukturze gleby.

Średnie stężenie promieniotwórcze izotopów naturalnych w województwie mazowieckim jest mniejsze niż średnie stężenie dla całej Polski, co widać również w zmierzonych średnich stężeniach radu oraz aktynu, które były mniejsze niż średnie stężenia w Polsce. Wyjątkiem tutaj jest potas, którego stężenie jest bliskie stężeniom krajowym i przekraczało średnie stężenia w województwie mazowieckim.

W przypadku depozycji cezu ^{137}Cs widoczne są znaczne wahania w czasie oraz duża zależność wartości depozycji od badanego miejsca. Sugeruje to, że w niektórych miejscach, tj. tych, w których poziom ten jest dość stały, zawartość cezu w glebie jest wynikiem wcześniejszych zdarzeń, np. awarii w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, natomiast punkty, w których depozycja jest większa (punkt D-1) i zmienna w czasie (punkt D-3), mogą sugerować, że „nadmiarowy” cez pochodzi ze składowiska.

Średnia wartość depozycji cezu ^{137}Cs w Polsce wynosi $1,96 \pm 0,19 \text{ kBq/m}^2$ w zakresie od 0,20 do $16,63 \text{ kBq/m}^2$, natomiast w województwie mazowieckim średnia depozycja wynosi $1,58 \pm 0,39 \text{ kBq/m}^2$ w zakresie od 0,25 do $7,09 \text{ kBq/m}^2$, a więc wartość średnia jest mniejsza dla województwa mazowieckiego niż ta z całego kraju. Biorąc pod uwagę, że ten izotop cezu nie występuje naturalnie, możemy spodziewać się większych wartości depozycji na skoncentrowanych obszarach, co może być spowodowane np. miejscowymi opadami deszczu z chmur skażonych po awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu lub skażeniem wynikającym np. z uszkodzonego źródła cezowego. Wartości depozycji w otoczeniu KSOP są generalnie większe niż wartości średnie zarówno dla Polski, jak i województwa mazowieckiego, jednakże są to dalej wartości, które nie wpływają w znaczący sposób negatywnie na człowieka i środowisko.

Podsumowanie

Monitoring radiologiczny gleby w otoczeniu Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie wykazał obecność we wszystkich pięciu próbkach izotopów pochodzenia naturalnego, tj. potasu ^{40}K , radu ^{226}Ra i aktynu ^{228}Ac oraz jednego izotopu pochodzenia sztucznego – cezu ^{137}Cs . Stężenia promieniotwórcze izotopów naturalnych utrzymują się na stałym poziomie i związane są z budową geologiczną terenu. Natomiast obecność

depozycji cezu ^{137}Cs powodowana działalnością człowieka utrzymuje się na niskim poziomie. Obliczona depozycja ^{137}Cs w badanych próbkach gleby jest porównywalna z depozycją tego izotopu otrzymaną dla gleby województwa mazowieckiego (z wyjątkiem punktu D-1), co świadczy o możliwości jego pochodzenia z czasu awarii elektrowni jądrowej w Czarnobylu [2].

Biorąc pod uwagę powyższe badania, obecność Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie nie wpływa niekorzystnie pod względem gamma promieniotwórczym na otoczenie wspomnianej lokalizacji.

Notka o autorach

Michał Ochmański – student 3-go roku Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej (PW), kierunek fizyka techniczna, specjalność fizyka komputerowa. Odbывał praktyki studenckie w Zakładzie Dozymetrii Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) – w czasie praktyk zajmował się pracami związanymi z radiologicznym monitoringiem otoczenia Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Różanie.

Krzysztof Isajenko – kierownik Zakładu Dozymetrii CLOR, zastępca dyrektora CLOR w latach 2006–2019, kierownik akredytowanego Laboratorium Pomiarów Promieniotwórczości Naturalnej. Absolwent Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej (PW), wieloletni członek Komisji Badania Morza Polskiej Akademii Nauk, wykładowca na Wydziale Fizyki PW, uczestnik wielu szkoleń dotyczących ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądrowego (zarówno krajowych, jak i zagranicznych), autor lub współautor wielu publikacji związanych z tą tematyką.

Barbara Piotrowska – absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (specjalność: fizyka jądrowa). Pracownik Wojskowego Instytutu Chemii i Radiometrii (WiChIR) w latach 1996–2009. Od 2009 roku pracownik CLOR, zastępca kierownika Zakładu Dozymetrii i kierownik ds. technicznych w akredytowanym Laboratorium Pomiarów Promieniotwórczości Naturalnej CLOR. Od wielu lat zajmuje się spektrometrią promieniowania gamma. Prowadzi badania i szkolenia w zakresie pomiarów promieniotwórczości naturalnej w surowcach i materiałach budowlanych. Przeprowadza ekspertyzy radiologiczne.

Literatura

1. „Measurement of Radionuclides In Food and the Environment”, A Guidebook IAEA, Technical Reports Series No. 295, 1989.
2. „Monitoring promieniowania jonizującego realizowany w ramach państwowego monitoringu środowiska w latach 2022–2024, Zadanie 3: Monitoring stężenia cezu-137 w glebie” – K. Isajenko, O. Stawarz, B. Piotrowska, K. Wojtkowski, praca dla GIOŚ luty-marzec 2024 r.
3. <https://www.gov.pl/web/polski-atom/krajowe-skladowisko-odpadow-promieniotworczych> dostęp dnia 12.08.2024.

Wpływ reflektora SiO_2 na bezpieczeństwo krytycznościowe bezpośredniego (geologicznego) składowania wypalonego paliwa jądrowego – benchmark Japońskiej Agencji Energii Atomowej

The effect of SiO_2 reflector on the criticality safety of direct (geological) disposal of spent nuclear fuel – a benchmark by the Japan Atomic Energy Agency

Łukasz Koszucki
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki benchmarku opracowanego przez Japońską Agencję Energii Atomowej i NEA OECD (*Nuclear Energy Agency of Organisation for Economic Co-operation and Development*), badającego wpływ dwutlenku krzemu (SiO_2) jako reflektora neutronów na bezpieczeństwo krytycznościowe wypalonego paliwa jądrowego, składowanego bezpośrednio w formacjach geologicznych. W obliczeniach uwzględniono zarówno świeże, jak i wypalone paliwo jądrowe, z zastosowaniem efektu zmniejszenia reaktywności związanego z wypaleniem (*burnup credit*). Przeanalizowano wpływ grubości oraz stanu nawodnienia reflektora na wartość współczynnika mnożenia neutronów. Wyniki potwierdziły, że przy realistycznym uwzględnieniu wypalenia paliwa wszystkie układy pozostają bezpiecznie podkrytyczne, choć stwierdzono istotny wzrost reaktywności w przypadku użycia suchego SiO_2 . Wyniki uzyskane przez uczestników benchmarku korzystających z różnych kodów i bibliotek danych jądrowych wykazały dobrą zgodność.

Słowa kluczowe: Bezpieczeństwo krytycznościowe, składowanie geologiczne, wypalone paliwo jądrowe, współczynnik mnożenia neutronów, reflektor neutronów, SiO_2 , burnup credit, benchmark OECD/NEA.

Abstract: The paper presents results from a benchmark developed by the Japan Atomic Energy Agency and OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) NEA (Nuclear Energy Agency) examining the impact of silicon dioxide (SiO_2) as a neutron reflector on criticality safety of spent nuclear fuel directly disposed in geological formations. Calculations considered both fresh and spent nuclear fuel, incorporating burnup credit effects. The study analyzed how reflector thickness and water saturation influenced the effective neutron multiplication factor. Results confirmed that all configurations remain safely subcritical when realistic spent fuel compositions are considered. However, a significant reactivity increase was observed with dry SiO_2 reflectors. Benchmark outcomes showed good consistency among participants using various computational codes and nuclear data libraries.

Keywords: Criticality safety, geological disposal, spent nuclear fuel, neutron multiplication factor, neutron reflector, SiO_2 , burnup credit, OECD/NEA benchmark.

1. Wstęp

Bezpieczeństwo krytycznościowe jest jednym z kluczowych aspektów zapewnienia długoterminowej bezpiecznej izolacji wypalonego paliwa jądrowego, składowanego bez-

pośrednio w formacjach geologicznych¹. Podstawowym celem analiz jest upewnienie się, że w składowisku nie nastąpi przypadkowe osiągnięcie stanu krytycznego, czyli sytuacja, w której efektywny współczynnik mnożenia neutronów (k_{eff}) osiąga wartość równą 1. Stan krytyczny

¹ Bezpośrednie składowanie polega na trwałym umieszczeniu wypalonego paliwa jądrowego w formacjach geologicznych bez wcześniejszego procesu przerobu chemicznego. Paliwo jest odpowiednio zabezpieczone w specjalnych pojemnikach (kapsułach lub zasobnikach), które zapewniają długoterminową izolację radiologiczną i cieplną od środowiska naturalnego.

($k\text{-eff} = 1$) oznacza, że układ jest zdolny do samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej. Stan podkrytyczny ($k\text{-eff} < 1$) jest warunkiem bezpieczeństwa wymagany dla systemów przechowywania oraz składowania paliwa jądrowego.

Zasadniczym zagrożeniem związanym z bezpośrednim składowaniem wypalonego paliwa jądrowego jest możliwość nieprzewidzianej zmiany konfiguracji geometrycznej i materiałowej w wyniku naturalnych procesów zachodzących na przestrzeni tysięcy, a nawet milionów lat. Kluczowym elementem zabezpieczenia paliwa przed interakcją z otoczeniem są szczelne stalowe pojemniki, które jednak wraz z upływem czasu mogą ulegać korozji, zmniejszając swoją grubość. To powoduje, że materiały otaczające pojemniki, takie jak skały i substancje ilaste bogate w dwutlenek krzemu (SiO_2), mogą zacząć pełnić funkcję reflektora neutronów. Potencjalnie może to prowadzić do wzrostu reaktywności układu zawierającego wypalone paliwo jądrowe, biorąc pod uwagę bardzo długie skale czasowe.

W typowych analizach bezpieczeństwa krytycznościowego za najgorszy przypadek przyjmuje się sytuację zalania paliwa wodą, ze względu na jej silne właściwości moderujące i odbijające neutrony. Jednakże, w rzeczywistych warunkach składowania w formacjach geologicznych, bardziej realistycznym przypadkiem jest otoczenie pojemnika z wypalonym paliwem substancjami mineralnymi, w szczególności zawierającymi znaczną ilość SiO_2 . Dwutlenek krzemu charakteryzuje się innymi właściwościami neutronowymi niż woda, co może prowadzić do sytuacji, w której efekt neutronowy reflektora skalnego przekracza typowo analizowany przypadek reflektora wodnego. Do tej pory reflektor neutronów z SiO_2 oraz jego wpływ na bezpieczeństwo krytycznościowe nie był zbadany.

Niniejszy benchmark – **Wpływ SiO_2 jako reflektora na bezpośrednie (geologiczne) składowanie wypalonego paliwa jądrowego** [1] – opracowany przez Japońską Agencję Energii Atomowej we współpracy z Nuclear Energy Agency (NEA) OECD, jest odpowiedzią na potrzebę walidacji narzędzi obliczeniowych oraz bibliotek danych jądrowych używanych w analizach krytycznościowych w kontekście składowania geologicznego. Poprzez porównanie odpowiednich istotnych wielkości, takich jak efektywny współczynnik mnożenia neutronów lub szybkości reakcji, należy zapewnić, że właściwości wymienionych materiałów (SiO_2 i wody) są zgodne dla różnych zestawów danych jądrowych i dla różnych narzędzi obliczeniowych. Ponieważ SiO_2 stanowi główny składnik materiału otaczającego pojemnik z wypalonym paliwem jądrowym, w benchmarku skupiono się na dwutlenku krzemu jako przedmiocie obliczeń porównawczych. Benchmark koncentruje się na porównaniu efektów odbicia neutronów przez SiO_2 w dwóch scenariuszach: uproszczonym (świeże paliwo jądrowe) oraz realistycznym (wypalone paliwo jądrowe, z uwzględnieniem zmniejszenia reaktyw-

ności spowodowanego jego wypaleniem – tzw. efekt *burnup credit*).

Benchmark został zrealizowany w ramach grupy roboczej NEA *Working Party on Nuclear Criticality Safety*. Niniejszy artykuł prezentuje szczegółowe wyniki uzyskane przez autora w ramach tego zadania. Przedstawiono analizę wpływu różnych grubości reflektora z SiO_2 (w dwóch wariantach – suchy i mokry) oraz reflektora wodnego na efektywny współczynnik mnożenia neutronów i wybrane parametry neutronowe, przy różnych głębokościach wypalenia paliwa oraz dla różnych okresów jego składowania. Celem tej pracy jest podkreślenie znaczenia precyzyjnego uwzględnienia właściwości neutronowych SiO_2 dla realistycznej oceny bezpieczeństwa długoterminowego składowania wypalonego paliwa jądrowego.

2. Bezpieczeństwo krytycznościowe głębokiego (geologicznego) składowania wypalonego paliwa jądrowego

Stan krytyczny to sytuacja, w której efektywny współczynnik mnożenia neutronów jest równy jedności. W praktyce oznacza to, że liczba neutronów emitowanych w wyniku rozszczepienia jąder atomowych jest dokładnie równa liczbie neutronów traconych wskutek absorpcji oraz ucieczki z układu. Jeżeli $k\text{-eff} < 1$, układ znajduje się w stanie podkrytycznym, co oznacza stopniowe zanikanie reakcji łańcuchowej rozszczepienia – stan ten jest bezpieczny i pożądaný w praktycznych zastosowaniach w przemyśle jądrowym. Natomiast gdy $k\text{-eff} > 1$, reakcja łańcuchowa rozszczepienia przyspiesza w sposób niekontrolowany, prowadząc do sytuacji potencjalnie niebezpiecznej (stan nadkrytyczny).

Bezpieczeństwo krytycznościowe głębokiego (geologicznego) składowania wypalonego paliwa jądrowego polega na zapewnieniu, że w żadnych okolicznościach nie dojdzie do niekontrolowanej samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej rozszczepienia (czyli stanu krytycznego lub nadkrytycznego) po zamknięciu składowiska odpadów promieniotwórczych, w którym byłoby składowane takie paliwo. Wypalone paliwo jądrowe, mimo że jest zużyte, nadal zawiera materiały rozszczepialne (np. U-235 czy Pu-239) i przy sprzyjających warunkach (nagromadzenie odpowiedniej masy, moderacja neutronów przez wodę itd.) może potencjalnie doprowadzić do reakcji łańcuchowej rozszczepienia.

Efektywny współczynnik mnożenia neutronów jest kluczowym parametrem w analizach bezpieczeństwa krytycznościowego. Jego wartość jest funkcją wielu czynników, takich jak skład izotopowy materiału, geometria układu, obecność moderatora i absorbentów neutronów. Dokładne obliczenie tego współczynnika wymaga uwzględnienia wszystkich istotnych mechanizmów oddziaływania neutronów z materią. Do nich zaliczamy:

- rozpraszanie neutronów – neutrony mogą być rozpraszane elastycznie (typowe zwłaszcza przy oddziaływaniach z lekkimi jądrami), lub nieelastycznie (przeważnie przy rozpraszaniu na jądach ciężkich),
- oraz absorpcję neutronów – neutrony mogą być pochłaniane dwoma głównymi sposobami: absorpcja nieproduktywna prowadzi do powstania izotopów promieniotwórczych (bez rozszczepienia) lub absorpcja produktywna prowadząca bezpośrednio do rozszczepienia jąder izotopów rozszczepialnych.

Czynniki wpływające na wartość współczynnika mnożenia neutronów i tym samym na krytyczność układu można usystematyzować za pomocą popularnego w literaturze angielskiej skrótu MERMAIDS [2]:

- masa (*mass*) – całkowita ilość materiału rozszczepialnego,
- wzbogacenie (*enrichment*) – procentowy udział izotopów rozszczepialnych w materiale,
- reflektor neutronów (*reflection*) – materiały otaczające układ, odbijające neutrony z powrotem do obszaru zawierającego materiał rozszczepialny (wnętrza układu rozszczepialnego),
- moderacja neutronów (*moderation*) – spowalnianie neutronów, zwiększające prawdopodobieństwo rozszczepienia,
- absorpcja neutronów (*absorption*) – obecność materiałów pochłaniających neutrony,
- oddziaływanie między układami (*interaction*) – wzajemne oddziaływanie między układami materiałów rozszczepialnych,
- gęstość i koncentracja materiału (*density and concentration*) – wpływ gęstości i rozmieszczenia materiałów na reaktywność układu,
- kształt i rozmiar (*shape and size*) – geometria układu, wpływająca na ucieczkę neutronów.

Zrozumienie tych czynników umożliwia przeprowadzenie wiarygodnych analiz i ocenę, czy dany układ z materiałem rozszczepialnym pozostanie bezpieczny (czyli podkrytyczny) w przewidywanym okresie eksploatacji lub składowania.

Bezpieczeństwo krytycznościowe ma szczególne znaczenie w kontekście składowania wypalonego paliwa jądrowego, gdyż konsekwencje ewentualnego osiągnięcia stanu krytycznego mogą być bardzo poważne, prowadząc do niekontrolowanego uwolnienia energii, ciepła oraz promieniowania jonizującego. Składowanie wypalonego paliwa jądrowego wymaga szczegółowych analiz bezpieczeństwa, które pozwalają uniknąć sytuacji mogących doprowadzić do niepożądanego wzrostu efektywnego współczynnika mnożenia. Obejmuje to uwzględnienie długoterminowych zmian środowiskowych, procesów

geologicznych oraz oddziaływania otoczenia na układ paliwowy.

Wymogi bezpieczeństwa zmuszają projektantów składowisk do uwzględnienia nawet bardzo mało prawdopodobnych scenariuszy krytyczności. Regulacje różnią się w zależności od kraju, ale generalnie wymagają wykazania, że albo krytyczność jest wykluczona z pewnym marginesem (np. utrzymanie $k_{\text{eff}} < 0,95$ z uwzględnieniem niepewności), albo że potencjalne zdarzenie krytyczne nie pogorszy bezpieczeństwa składowiska [3]. Na przykład w Szwecji wymaga się, aby $k_{\text{eff}} < 0,95$ w normalnych warunkach i $< 0,98$ w sytuacjach awaryjnych, a w Finlandii przewiduje się, że „zużyte paliwo w pojemniku musi pozostać podkrytyczne również w perspektywie długoterminowej, nawet jeśli pojemnik utraci szczelność i ulegnie deformacji” [3].

3. Specyfika bezpośredniego składowania wypalonego paliwa jądrowego w utworach geologicznych

Bezpośrednie składowanie geologiczne jest jedną z najczęściej rozważanych metod długoterminowego zagospodarowania wypalonego paliwa jądrowego. Koncepcja ta polega na trwałym umieszczeniu wypalonego paliwa w głębokich formacjach geologicznych, które zapewniają izolację materiałów promieniotwórczych od środowiska naturalnego przez setki tysięcy, a nawet miliony lat. Takie rozwiązanie wymaga szczegółowej analizy długoterminowych scenariuszy ewolucji materiałowej i geometrycznej całego układu, obejmującego pojemniki, materiały otoczenia i samo paliwo jądrowe.

Głównymi zagrożeniami związanymi z długoterminowym składowaniem wypalonego paliwa jądrowego są procesy degradacji pojemników z tym paliwem, w szczególności korozja stali. W pierwszym okresie po zamknięciu składowiska obecność tlenu może prowadzić do korozji aerobowej, jednak jest to krótkotrwałe zjawisko, gdyż dostępny tlen szybko ulega zużyciu (typowo do kilkudziesięciu lat). Następnie środowisko staje się anoksydacyjne (beztlenowe), a szybkość korozji stali gwałtownie maleje, osiągając wartości rzędu 0,1–1 m/rok, co umożliwia utrzymanie integralności stalowych pojemników nawet przez miliony lat [4]. Lokalna korozja (wżery, korozja szczelinowa), szczególnie wynikająca z aktywności mikrobiologicznej, może jednak przyspieszyć lokalnie procesy degradacji, co stanowi istotne wyzwanie dla oceny długoterminowej stabilności pojemników [5].

Oprócz korozji stali, istotnym zagadnieniem jest oddziaływanie neutronów z otoczeniem geologicznym. Skały oraz materiały ilaste, szczególnie bentonit² nasycony wodą, mogą skutecznie pełnić funkcję reflektora neutronów [6].

² Bentonit to skała ilasta, której głównym składnikiem jest montmorylonit, czyli minerał z grupy smektytów. Oprócz tego zawiera różne domieszki, w tym krzemionkę (SiO₂), tlenki glinu (Al₂O₃), tlenki żelaza (Fe₂O₃), a także inne składniki zależne od pochodzenia geologicznego. Zawartość SiO₂ w bentonicie może wynosić od 40% do nawet 60%, w zależności od składu i domieszek mineralnych, takich jak kwarc czy inne krzemiany.

Odbicie neutronów przez te materiały może istotnie zwiększyć współczynnik mnożenia neutronów. Z tego względu w analizach bezpieczeństwa krytycznościowego przyjmuje się konserwatywne założenia o pełnym nasyceniu układu wodą, maksymalnej moderacji neutronów oraz obecności silnego reflektora neutronów w postaci otaczających skał i glin bentonitowych. Projektanci składowisk odpadów promieniotwórczych stosują wielopoziomową strategię zapobiegania krytyczności, łącząc rozwiązania inżynierskie z ograniczeniami administracyjnymi. Poniżej przedstawiono kluczowe metody:

- Pojedyncze pojemniki na wypalone paliwo są projektowane tak, aby pozostały podkrytyczne nawet w razie pełnego zalania wodą. Stosuje się wewnętrzne struktury pochłaniające neutrony (np. płyty, kosze lub pręty z materiałami zawierającymi bor, kadm czy gadolin) rozdzielające elementy paliwowe [3]. Ważne jest, aby te absorbery były długowieczne i odporne na korozję w środowisku podziemnym. Dodatkowe koncepcje to umieszczenie w pojemniku „awaryjnych” prętów pochłaniających (analogicznych do prętów kontrolnych w reaktorze) w wolnych kanałach przeznaczonych pierwotnie na przyrządy czy prowadnice prętów kontrolnych [7].
- Innym środkiem zapobiegawczym jest ograniczenie maksymalnej liczby elementów paliwowych umieszczanych w jednym pojemniku oraz zachowanie odpowiednich rozmiarów pojemnika. Mniej paliwa w jednym opakowaniu to mniejsza możliwość osiągnięcia masy krytycznej. Gdyby użyć więcej paliwa lub gęściej je upakować, ryzyko krytyczności rosłoby. Dlatego już na wczesnym etapie projektowania pojemników prowadzi się analizy krytyczności dla różnych konfiguracji elementów/kaset paliwowych, aby dobrać bezpieczny wariant [3]. Ponadto w projekcie rozmieszczenia pojemników w składowisku zachowuje się odpowiednie odległości między pojemnikami, aby zapobiec interakcji neutronowej między sąsiadującymi układami z materiałem rozszczepialnym.
- Wspomniany efekt *burnup credit* to uwzględnienie w analizach faktu, że zużyte paliwo ma mniejszą reaktywność niż świeże, gdyż część materiału rozszczepialnego została zużyta, a jednocześnie w paliwie pojawiły się trwałe produkty pochłaniające neutrony (np. niektóre lantanowce). *Burnup credit* umożliwia bezpieczne zwiększenie załadunku pojemników zgodnie z faktycznym stanem paliwa, zamiast konserwatywnego traktowania go jak świeże. W wielu krajach organy dozoru jądrowego dopuszczają takie podejście (w tym w Polsce³), jednak wymagane są duże marginesy i dokładne oszacowanie składu izotopowego w czasie [3] (w Polsce brak szczegółowych regulacji w tym zakresie). Trzeba także uwzględnić, że część absorbe-

rów ulega rozpadowi po setkach lat, co może zwiększać reaktywność układu w odległej przyszłości. Z tego powodu zazwyczaj wymagany jest większy margines bezpieczeństwa.

- Jedną z nowatorskich metod fizycznego zabezpieczenia pojemników jest dodawanie specjalnych wypełniaczy do ich wnętrza (między elementy paliwowe). Takie wypełniacze w postaci ciekłej są wtłaczane do zamkniętego już pojemnika i tam krzepną, trwale wypełniając puste przestrzenie [7]. Celem jest wypchnięcie wody (czyli moderatora) z wnętrza pojemnika oraz ewentualne zapewnienie dodatkowej absorpcji neutronów. Badania amerykańskie sugerują użycie np. stopionych metali o niskiej temperaturze topnienia (cyny, cynku) lub zawieszin cementowych, które po zastygnięciu stworzą zwartą strukturę wewnątrz pojemnika [7]. Identyfikuje się szereg pożądanych właściwości takiego wypełniacza: powinien on minimalizować moderację neutronów, ewentualnie zawierać materiały silnie pochłaniające neutrony (np. dodatkowy bor), być stabilny chemicznie i radiacyjnie, nie generować zbyt dużo gazów i ciepła, a także nie kurczyć się nadmiernie, aby nie powstały wolne przestrzenie.
- Dobór formacji geologicznej i materiałów wypełniających może wspomagać bezpieczeństwo krytycznościowe. Na przykład głębokie składowiska odpadów promieniotwórczych w złożach soli kamiennej lub solankowych mają naturalną przewagę – woda solankowa zawiera duże stężenia chloru (izotop Cl-35 stanowi ~75% i ma przekrój czynny na wychwyt neutronów około 43,7 barnów) [3]. W efekcie, jeśli nawet woda przeniknie do komory z odpadami promieniotwórczymi, jej właściwości będą hamować możliwość krytyczności. Również skład chemiczny materiałów inżynierskich może być ukierunkowany na bezpieczeństwo krytycznościowe – np. Niemcy rozważają wypełnienie pustych przestrzeni wewnątrz masywnego pojemnika typu CASTOR magnetytem, który nie tylko wyprze wodę, ale też poprzez obecność żelaza będzie dodatkowo pochłaniał neutrony [3].

Aktualne prace badawcze sugerują, że wystąpienie krytyczności nie powinno zagrozić ogólnej izolacyjnej funkcji głębokiego składowiska odpadów promieniotwórczych (w którym składowane jest bezpośrednio wypalone paliwo jądrowe). W badaniach Oak Ridge National Laboratory [8], które symulowały scenariusz stałej krytyczności w hipotetycznym składowisku w skałach ilastych, stwierdzono, że „krytyczność po zamknięciu nie wpływa na funkcjonowanie składowiska” w stopniu pogarszającym jego zdolność do ochrony ludzi i środowiska. Innymi słowy, nawet gdy w modelu wymuszono ciągłą reakcję rozszczepienia w jednym z pojemników, różnice w ogólnym uwalnianiu radionuklidów czy tempe-

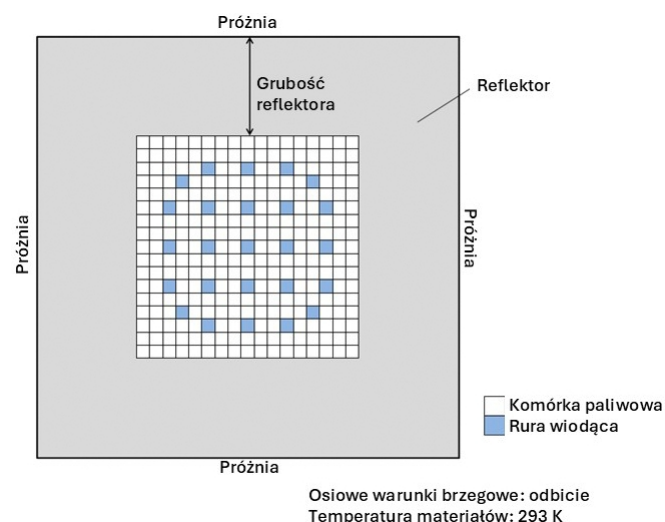
³ Ustawa Prawo atomowe, art. 50a ust. 2. Dz.U.2024.1277 t.j., „W obliczeniach wykazujących zachowanie podkrytyczności jest dozwolone uwzględnienie wypalenia przechowywanego wypalonego paliwa jądrowego.”

raturach były tak niewielkie, że scenariusz ten mieścił się w granicach bezpieczeństwa. Oczywiście warunkiem jest bardzo małe prawdopodobieństwo wystąpienia takiego zdarzenia – dlatego nacisk w regulacjach kładziony jest na prewencję. Podsumowując, długoterminowym skutkiem największego „problemu” krytyczności jest głównie konieczność prowadzenia zaawansowanych analiz i utrzymywania odpowiednich zabezpieczeń w przyszłych głębokich składowiskach odpadów promieniotwórczych, gdzie składowane będzie wypalone paliwo jądrowe.

4. Specyfikacja benchmarku

4.1. Model geometryczny

W benchmarku Japońskiej Agencji Energii Atomowej [1] rozpatrywany jest dwuwymiarowy model kasety paliwowej 17 17 reaktora wodno-ciśnieniowego PWR z reflektorem, pokazany na rysunku 1. Jako warunek brzegowy w kierunku radialnym przyjmowana jest próżnia oraz zakłada się nieskończoną długość układu w kierunku osiowym. Zastosowano trzy rodzaje materiału i kilka grubości reflektora.



Rys. 1. Zastosowany w benchmarku model geometryczny zasobnika z kasetą paliwową PWR (opracowanie własne autora).

Specyfikacja pręta paliwowego i rury wiodącej przedstawiona jest na rysunku 2. Zakłada się, że obszar moderatora na rysunku 2 jest wypełniony wodą lub materiałem ilastym zawierającym wodę. Woda została wybrana jako ciężki przypadek, pod względem możliwości wystąpienia stanu krytycznego. Materiał ilasty, jako moderator, jest bardziej realistycznym przypadkiem konfiguracji składowanego wypalonego paliwa jądrowego. Dla wszystkich materiałów zakłada się temperaturę 293 K.

4.2. Skład materiałowy

A. Materiał reflektora

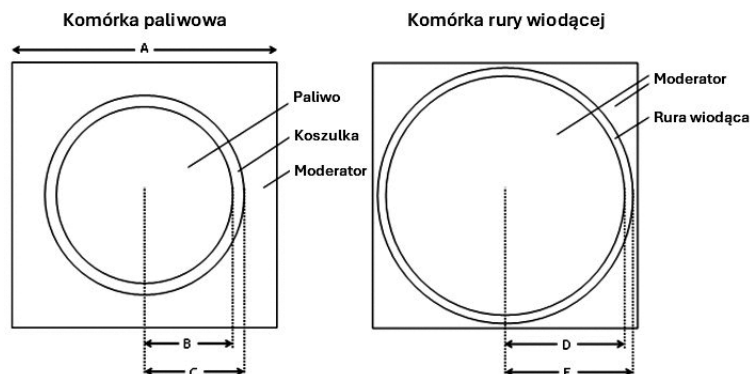
W benchmarku rozważa się trzy rodzaje materiału reflektora:

- Suchy SiO₂ o gęstości 1,6 g/cm³. Dla uproszczenia założono zupełny brak wody w tym materiale. Taka gęstość suchego SiO₂ odpowiada materiałowi składającemu się z 70% bentonitu i 30% piasku krzemowego, który ma stanowić warstwę buforową w składowiskach geologicznych. Dla uproszczenia założono, że materiał składa się w stu procentach z SiO₂. Według wstępnych ocen jest to założenie pesymistyczne, jeśli chodzi o bezpieczeństwo krytycznościowe.
- SiO₂ całkowicie nasycony wodą, tzn. wszystkie puste przestrzenie w materiale ilastym są wypełnione wodą. Jest to bardziej realistyczny model materiału.
- Woda jako materiał odniesienia, aby porównać różnicę między SiO₂ i wodą.

Specyfikacje dla wszystkich materiałów reflektora zawarte są w tabeli 1.

B. Materiały moderatora i koszulki paliwowej

Skład obszaru moderatora i koszulki paliwowej zawarty jest w tabeli 2. Skład materiałowy obszaru moderatora jest taki sam jak skład reflektora przedstawiony w tabeli 1. Dla uproszczenia przyjmuje się, że koszulka składa się z naturalnego cyrkonu zamiast zircaloy'u. Również dla uproszczenia zaniedbuje się siatki dystansujące, istniejące w rzeczywistej kasce paliwowej, utrzymujące pręty paliwowe i chroniące je przed wyginaniem.



Rys. 2. Geometria komórki paliwowej i komórki rury wiodącej pręta kontrolnego (opracowanie własne autora).

Fig. 2. Fuel cell and control rod guide tube cell geometry (author's own work).

Symbol	Opis	Wartość [cm]
A	Skok siatki	1,265
Pręt paliwowy		
B	Promień pastylki paliwowej	0,412
C	Zewnętrzny promień koszulki	0,476
Rura wiodąca		
D	Promień wewnętrzny rury	0,570
E	Promień zewnętrzny rury	0,610

Tabela 1. Specyfikacja materiałów reflektora.**Table 1.** Reflector material specification.

	SiO ₂ (dry) – suchy	SiO ₂ (wet) – mokry	H ₂ O
Gęstość, g/cm³			
SiO ₂	1,6	1,6	–
H ₂ O	0	0,4067	0,9983
Gęstość jądrowa, #/barn cm			
H	–	2,71190E-02	6,6742E-02
O	3,2073E-02	4,5668E-02	3,3371E-02
Si	1,6037E-02	1,6037E-02	–

1 barn = 10⁻²⁴ cm²**Tabela 2.** Specyfikacja materiałów moderatora i koszulki.**Table 2.** Moderator and fuel cladding material specifications.

	Moderator		Koszulka
Materiał	H ₂ O	SiO ₂ (wet) – mokry	Zr-nat
Gęstość jądrowa, #/barn cm			
H	6,6742E-02	2,7190E-02	
O	3,3371E-02	4,5668E-02	
Si	–	1,6037E-02	
Zr	–	–	4,3108E-02

C. Skład paliwa

Świeże paliwo

W benchmarku wybrano paliwo UO₂ reaktora PWR o wzbogaceniu 4,5% (wagowo) w U-235. Gęstość jądrowa świeżego paliwa jest określona w tabeli 3.

Tabela 3. Gęstość jądrowa świeżego paliwa.**Table 3.** Fresh fuel nuclear density.

	Gęstość jądrowa, #/barn cm
U-235	1,0468E-03
U-238	2,1935E-02
O-16	4,5963E-02

Wypalone paliwo

Wybrano kilka wartości wypalenia i czasu składowania zestawu paliwowego:

- Wypalenie

Wybrano dwie wartości wypalenia 30 i 45 GWd/t. 45 GWd/t zostało wybrane jako typowe wypalenie paliwa, a 30 GWd/t jest rozważane jako przypadek

pośredni w celu zrozumienia wpływu wypalenia na efekt, jaki daje reflektor.

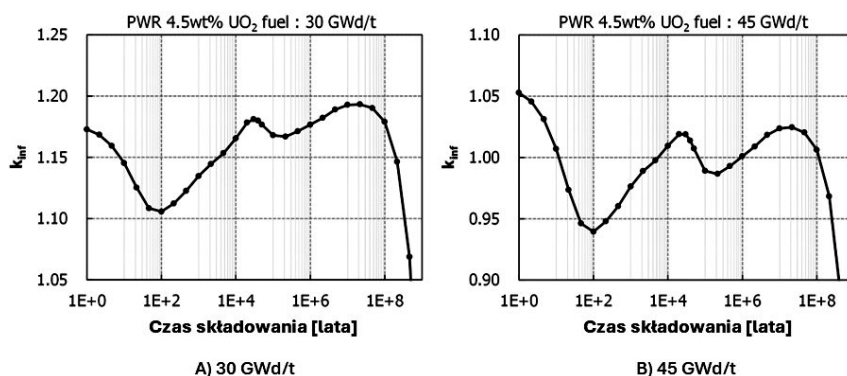
- Czas składowania

Należy zwrócić uwagę na to, że współczynnik mnożenia silnie zmienia się w długim okresie składowania w formacjach geologicznych, ponieważ w wyniku rozpadu promieniotwórczego zmienia się zawartość nuklidów rozszczepialnych i nuklidów będących absorberami neutronów. Przykłady dla paliwa o wypaleniu 30 i 45 GWd/t pokazane są na rysunku 3. Aby zrozumieć zależność od czasu współczynnika mnożenia, współczynnik k-inf (nieskończony współczynnik mnożenia) z rysunku 3 był obliczony dla nieskończonego układu komórek paliwowych, uwzględniając wszystkie ważne nuklidy, wymienione w tabeli 4. Dla obu przypadków współczynnik mnożenia neutronów ma dwa maksima około 30 tysięcy i 20 mln lat. W związku z tym w benchmarku obliczenia prowadzone są dla paliwa składowanego przez okres 0, 30 tys. i 20 mln lat.

W benchmarku, w przypadku wypalonego paliwa, uwzględnia się wypalenie oraz zakłada się, że skład materiałowy jest jednakowy w całej kasecie. Do przygotowania składu wypalonego paliwa przeprowadzono obliczenia wypaleniowe za pomocą kodu ORIGEN2.2 [9, 10], stosując bibliotekę przekrojów czynnych ORLIBJ40 [11]. Do obliczeń krytyczności w benchmarku uwzględniono 13 aktynowców i 15 produktów rozszczepienia, tabela 5. Zostały one wybrane we wcześniejszych benchmarkach OECD/NEA [12] dotyczących uwzględnienia wypalenia. U-233 został wybrany, wzięwszy pod uwagę jego narastanie w wyniku długotrwałych rozpadów promieniotwórczych. Gęstości jądrowe izotopów zawartych w wypalonym paliwie dla 30 i 45 GWd/t przedstawiają odpowiednio tabele 6 i 7.

Tabela 4. Lista nuklidów używanych do obliczeń nieskończonego współczynnika mnożenia.**Table 4.** List of nuclides used for the calculation of the infinite multiplication factor.

	Nuklidy
20 aktynowców	U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Am-242, Am-242m, Am-243, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Cm-245, Cm-246
47 produktów rozszczepienia	Kr-83, Mo-95, Mo-97, Mo-98, Tc-99, Ru-101, Ru-103, Rh-103, Rh-105, Pd-105, Pd-107, Pd-108, Ag-109, Cd-113, In-115, Xe-131, Xe-133, Xe-135, Cs-133, Cs-134, Cs-135, Pr-141, Pr-143, Nd-143, Nd-145, Nd-147, Pm-147, Pm-148, Pm-148m, Pm-149, Sm-147, Sm-148, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Eu-153, Eu-154, Eu-155, Eu-156, Gd-152, Gd-154, Gd-155, Gd-156, Gd-157, Gd-158, Gd-160



Rys. 3. Współczynnik mnożenia neutronów nieskończonej siatki komórek paliwowych w funkcji czasu składowania [1].

Fig. 3. Neutron multiplication factor of infinite grid of fuel cells as a function of storage time [1]

Tabela 5. Lista nuklidów używanych do obliczeń krytyczności w benchmarku.

Table 5. List of nuclides used for criticality calculations in the benchmark.

Nuklidy	
13 aktynowców	U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Am-243
15 produktów rozszczepienia	Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Nd-143, Nd-145, Eu-153, Gd-155

4.3. Przypadki rozpatrywane w benchmarku

A. Świeże paliwo jądrowe

Dla świeżego paliwa jądrowego rozpatrywane były następujące przypadki:

1. Moderator – woda
Reflektor – suchy SiO₂ – SiO₂-dry
– mokry SiO₂ – SiO₂-wet
– woda
2. Moderator – SiO₂-wet
Reflektor – SiO₂-wet

W celu zbadania wpływu grubości reflektora na krytyczność układu przyjęto kilka jego grubości. Przypadki obliczeniowe i odpowiadające im oznaczenia zawarte są w tabeli 8.

B. Wypalone paliwo jądrowe

Dla wypalonego paliwa jądrowego wybrano kilka reprezentatywnych grubości reflektora i przyjęto sześć różnych składów paliwa opisanych w punkcie 4.2 podpunkt C. W obliczeniach zastosowano wodę jako moderator. Przypadki obliczeniowe i odpowiadające im symbole znajdują się w tabeli 9. Każdy skład materiałowy (zależny od wypalenia i czasu składowania) jest identyfikowany poprzez

swój symbol ($a \div f$). Symbol identyfikacyjny przypadku jest kombinacją identyfikatora paliwa i reflektora. Łączna liczba przypadków drugiej części benchmarku wynosi 48.

4.4. Wyniki wymagane do benchmarku

A. Świeże paliwo jądrowe

Dla świeżego paliwa wymagane było dostarczenie następujących danych:

1. Efektywny współczynnik mnożenia – k_{eff} .
2. Szybkości reakcji w obszarze reflektora dla:
 - rozpraszania na O-16.
 - rozpraszania na Si-28.
 - wychwytu ($capture$)⁴ na Si-28.
 - rozpraszania na H-1.
 - wychwytu ($capture$) na H-1.
3. Stosunek szybkości absorpcji do szybkości produkcji neutronów w układzie (wielkość podobna do $1/k_{inf}$).
4. Udział strumienia termicznego ($thermal\ spectrum\ index$) w obszarze paliwa.

Wymagane szybkości reakcji zdefiniowane odpowiednio:

rozpraszanie neutronów na O-16:

$$R_S^{O-16} = \frac{V_R \int_S^{O-16} (\bar{r}, E) dV dE}{P} \quad (1)$$

rozpraszanie neutronów na Si-28:

$$R_S^{Si-28} = \frac{V_R \int_S^{Si-28} (\bar{r}, E) dV dE}{P} \quad (2)$$

wychwyt neutronów w Si-28:

$$R_C^{Si-28} = \frac{V_R \int_C^{Si-28} (\bar{r}, E) dV dE}{P} \quad (3)$$

rozpraszanie neutronów na H-1:

$$R_S^{H-1} = \frac{V_R \int_S^{H-1} (\bar{r}, E) dV dE}{P} \quad (4)$$

⁴ Należy rozróżnić pojęcia: absorpcja neutronów (ang. *neutron absorption*) od wychwyt neutronów (ang. *neutron capture*). Absorpcja neutronów to ogólny proces, w którym neutron zostaje pochłonięty przez jądro atomowe. Może obejmować zarówno wychwyt radiacyjny, jak i reakcję rozszczepienia lub inne reakcje, w których neutron zostaje trwale związany w jądrze docelowym. Z kolei wychwyt neutronów to specyficzny przypadek absorpcji neutronów, w którym neutron jest pochłonięty przez jądro atomowe, prowadząc do emisji kwantu gamma (tzw. wychwyt radiacyjny), ale bez wystąpienia rozszczepienia. Produktem tej reakcji jest cięższy izotop tego samego pierwiastka.

Tabela 6. Gęstości jądrowe nuklidów w paliwie o wypaleniu 30 GWd/t.**Table 6.** Nuclear densities of nuclides in fuel with a burn-up of 30 GWd/t.

Nuklid	Gęstość jądrowa, #/barn/cm		
	0 lat	30 tys, lat	20 mln lat
Aktynowce			
U-233	3,5590E-11	3,1581E-07	4,0816E-09
U-234	6,3908E-08	2,4520E-06	1,1776E-06
U-235	4,4013E-04	5,1974E-04	5,6688E-04
U-236	1,0735E-04	1,4487E-04	8,1136E-05
U-238	2,1492E-02	2,1492E-02	2,1431E-02
Np-237	8,5259E-06	3,4994E-05	5,4966E-08
Pu-238	2,2935E-06	0	0
Pu-239	1,3530E-04	5,8346E-05	2,1611E-15
Pu-240	3,9089E-05	1,6514E-06	1,3861E-14
Pu-241	2,5945E-05	1,4039E-12	0
Pu-242	5,9083E-06	5,5910E-06	0
Am-241	6,2531E-07	4,2499E-11	0
Am-243	8,4105E-07	5,0147E-08	6,6060E-16
Produkty rozszczepienia			
Mo-95	3,4410E-05	4,1747E-05	4,1747E-05
Tc-99	4,1123E-05	3,7478E-05	0
Ru-101	3,8223E-05	3,8224E-05	3,8224E-05
Rh-103	2,1211E-05	2,3714E-05	2,3714E-05
Ag-109	2,6601E-06	2,6665E-06	2,6665E-06
Cs-133	4,3335E-05	4,3874E-05	4,3874E-05
Sm-147	2,3798E-06	1,0535E-05	1,0534E-05
Sm-149	1,1202E-07	1,6000E-07	1,6000E-07
Sm-150	9,4144E-06	9,4145E-06	9,4145E-06
Sm-151	4,8645E-07	0	0
Sm-152	3,5278E-06	3,5282E-06	3,5282E-06
Nd-143	3,1569E-05	3,2553E-05	3,2554E-05
Nd-145	2,4498E-05	2,4510E-05	2,4510E-05
Eu-153	3,3567E-06	3,3870E-06	3,3870E-06
Gd-155	1,9812E-09	2,0368E-07	2,0368E-07
O-16	4,5960E-02	4,5960E-02	4,5960E-02

Tabela 7. Gęstości jądrowe nuklidów w paliwie o wypaleniu 45 GWd/t.**Table 7.** Nuclear densities of nuclides in fuel with a burn-up of 45 GWd/t.

Nuklid	Gęstość jądrowa, #/barn/cm		
	0 lat	30 tys. lat	20 mln lat
Aktynowce			
U-233	3,5120E-11	4,9070E-07	6,3435E-09
U-234	1,0024E-07	6,4456E-06	1,1636E-06
U-235	2,5992E-04	3,4617E-04	4,0208E-04
U-236	1,3269E-04	1,8831E-04	1,0563E-04
U-238	2,1227E-02	2,1227E-02	2,1176E-02
Np-237	1,4257E-05	5,4379E-05	8,5427E-08
Pu-238	6,2772E-06	0,0000E+00	0,0000E+00
Pu-239	1,4480E-04	6,3700E-05	5,9639E-14
Pu-240	5,6911E-05	2,4471E-06	7,8754E-14
Pu-241	3,9099E-05	1,3414E-11	0,0000E+00
Pu-242	1,5184E-05	1,4373E-05	0,0000E+00
Am-241	1,1751E-06	4,0607E-10	0,0000E+00
Am-243	3,2111E-06	1,9136E-07	1,8230E-14
Produkty rozszczepienia			
Mo-95	5,2295E-05	5,9184E-05	5,9184E-05
Tc-99	5,8734E-05	5,3436E-05	0,0000E+00
Ru-101	5,6898E-05	5,6900E-05	5,6900E-05
Rh-103	2,9856E-05	3,2651E-05	3,2651E-05
Ag-109	4,8499E-06	4,8592E-06	4,8592E-06
Cs-133	6,0902E-05	6,1439E-05	6,1439E-05
Sm-147	3,8097E-06	1,2592E-05	1,2590E-05
Sm-149	1,0999E-07	1,6246E-07	1,6246E-07
Sm-150	1,4649E-05	1,4649E-05	1,4649E-05
Sm-151	5,6117E-07	0,0000E+00	0,0000E+00
Sm-152	4,5354E-06	4,5359E-06	4,5359E-06
Nd-143	4,1013E-05	4,1949E-05	4,1950E-05
Nd-145	3,4106E-05	3,4117E-05	3,4117E-05
Eu-153	5,6088E-06	5,6507E-06	5,6507E-06
Gd-155	3,7644E-09	3,8253E-07	3,8253E-07
O-16	4,5960E-02	4,5960E-02	4,5960E-02

Tabela 8. Przypadki obliczeniowe i ich symbole dla świeżego paliwa jądrowego.**Table 8.** Calculation cases and their symbols for fresh nuclear fuel.

Moderator	Reflektor	Grubość reflektora, cm						
		0	10	20	40	60	90	120
H ₂ O	SiO ₂ -dry	zero	sd10	sd20	sd40	sd60	sd90	sd120
	SiO ₂ -wet		sw10	sw20	sw40	sw60	-	-
	H ₂ O		lw10	lw20	lw40	-	-	-
SiO ₂ -wet	SiO ₂ -wet	zero	sw10s	sw20s	sw40s	sw60s	-	-

Tabela 9. Przypadki obliczeniowe i ich symbole dla wypalonego paliwa jądrowego.

Table 9. Calculation cases and their symbols for spent nuclear fuel.

Symbol paliwa	Wypalenie	Czas składowania [lata]	Materiał reflektora/Grubość reflektora, cm							
			0	SiO ₂ -dry			SiO ₂ -wet		H ₂ O	
				10	40	120	10	40	10	40
a	30 GWd/t	0	a-zero	a-sd10	a-sd40	a-sd120	a-sw10	a-sw40	a-lw10	a-lw40
b		30 tys.	b-zero	b-sd10	b-sd40	b-sd120	b-sw10	b-sw40	b-lw10	b-lw40
c		20 milionów	c-zero	c-sd10	c-sd40	c-sd120	c-sw10	c-sw40	c-lw10	c-lw40
d	45GWd/t	0	d-zero	d-sd10	d-sd40	d-sd120	d-sw10	d-sw40	d-lw10	d-lw40
e		30 tys.	e-zero	e-sd10	e-sd40	e-sd120	e-sw10	e-sw40	e-lw10	e-lw40
f		20 milionów	f-zero	f-sd10	f-sd40	f-sd120	f-sw10	f-sw40	f-lw10	f-lw40

wychwyt neutronów w H-1:

$$R_C^{H-1} = \frac{V_R \int_C^{H-1} (\vec{r}, E) dV dE}{P} \quad (5)$$

gdzie P jest szybkością produkcji neutronów w całym układzie, a w praktyce tylko w kasce paliwowej.

$$P = \int_{V_A} \int_{V_R} v (\vec{r}, E) dV dE \quad (6)$$

V_R – objętość reflektora,

V_{FA} – objętość elementu paliwowego,

$(\vec{r}, E)$ – strumień neutronów w punkcie $\vec{r}$ i o energii E ,

– liczba neutronów uwalnianych w jednym rozszczepieniu,

i_f – makroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie dla nuklidu i ,

i_s – makroskopowy przekrój czynny na rozpraszanie,

i_c – makroskopowy przekrój czynny na wychwyt.

Przekrój czynny na rozpraszanie oznacza sumę przekrojów czynnych na rozpraszanie sprężyste i niesprężyste.

Stosunek szybkości absorpcji neutronów do szybkości ich produkcji (6) jest zdefiniowany następująco:

$$\frac{A}{P} = \frac{V_{FA} \int_{V_R} a (\vec{r}, E) dV dE}{V_{FA} \int_{V_R} f (\vec{r}, E) dV dE} \quad (7)$$

gdzie A to szybkość absorpcji, a P jest szybkością produkcji neutronów w całym układzie. Wielkość ta może być użyta do obliczenia prawdopodobieństwa ucieczki neutronów z układu.

Stosunek szybkości ucieczki (L) do szybkości produkcji (P), obliczony z równania zamieszczonego poniżej, używany jest w benchmarku do porównań. Jest to ważna wielkość w badaniach efektu reflektora.

$$\frac{L}{P} = \frac{1}{k_{eff}} \frac{A}{P} \quad (8)$$

Równanie to wywodzi się z podstawowej definicji k-eff:

$$k_{eff} = \frac{P}{A} \frac{A}{L} \quad (9)$$

W benchmarku zadaniem koordynatora było policzenie stosunku szybkości ucieczki do szybkości produkcji (L/P), z użyciem danych dostarczonych przez uczestników.

Udział strumienia termicznego, wymagany w punkcie 4, jest zdefiniowany jako stosunek strumienia termicznego do całkowitego strumienia neutronów, przy czym graniczną wartością energii neutronów termicznych jest 0,625 eV. Udział strumienia termicznego w obszarze paliwowym jest zdefiniowany następująco:

$$SI_{th} = \frac{\int_{thermal}^{total} \int_{thermal}^{fast} v_{FA} (\vec{r}, E) dV dE}{\int_{thermal}^{total} \int_{thermal}^{fast} v_{FA} (\vec{r}, E) dV dE} \quad (10)$$

gdzie całkowanie po objętości odbywa się po wszystkich elementach zestawu paliwowego V_{FA} : pastylki paliwowe, koszulki, rury wiodące i obszary moderatora,

$\int_{thermal}^{total}$ – oznacza całkę po zakresie energii termicznej,

$\int_{thermal}^{fast}$ – oznacza całkę po całym zakresie energii.

B. Wypalone paliwo jądrowe

Dla przypadków wypalonego paliwa wymagane było dostarczenie:

1. Efektywnego współczynnika mnożenia (k-eff).

5. Model obliczeniowy zasobnika z kasetą paliwową w programie KENO-VI/SCALE

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem kodu Monte Carlo KENO-VI z pakietu kodów SCALE6.1 [13]. System kodów SCALE (*Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*), opracowywany w Oak Ridge National Laboratory, jest szeroko stosowany na świecie m.in. do analiz krytyczności.

Ze względu na warunek benchmarku dwuwymiarowego modelowania rozpatrywanego układu, tzn. kasety paliwowej w bloku reflektora, w opracowanym modelu przyjęto odbicie (*mirror*), jako osiowy warunek brzegowy. Na bocznych ścianach bloku, zgodnie ze specyfikacją benchmarku, jako warunek brzegowy przyjęto próżnię (*vacuum*). Obli-

czenia były wykonywane z użyciem 238-grupowej biblioteki ENDF/B-VII, oznaczonej w pakiecie SCALE jako v7-238.

Wszystkie przypadki obliczeniowe prowadzono dla następujących parametrów:

- NGEN=50000 – liczba neutronów na generację,
- NPG= 250 – liczba generacji,
- NSK=10 – liczba pierwszych generacji opuszczanych w obliczeniach k-eff.

Aby wyznaczyć wymagane w benchmarku szybkości rozpraszania i absorpcji oraz udział strumienia neutronów termicznych, użyto modułu KMART6 (*Keno Module for Activity-Reaction Rate Tabulation*). Moduł KMART produkuje osobny plik wynikowy z rozszerzeniem .kmt. W pliku znajdują się przedziały grup energetycznych i odpowiadające im przedziały letargii, szybkości reakcji w poszczególnych obszarach komórki paliwowej dla wybranych w pliku wejściowym reakcji, rozpisane na grupy energetyczne oraz wartość ich sumy po wszystkich grupach. Poza tym KMART podaje wartości gęstości strumienia neutronów dla każdej grupy energetycznej oraz ich sumę po grupach dla poszczególnych obszarów.

5.1. Szybkość rozpraszania i absorpcji neutronów na wybranych nuklidach w reflektorze odniesiona do szybkości ich produkcji w całym zasobniku

Szybkość reakcji rozpraszania i wychwytu w reflektorze, wyrażone wzorami (1)÷(5), i stosunek szybkości absorpcji do szybkości produkcji neutronów (7) w całym układzie zawierają odniesienie do wielkości P określonej wzorem (6). Jest ona równa iloczynowi średniej liczby neutronów wyzwanych w rozszczepieniu i liczby rozszczepień $\int_f (\bar{r}, t)$, scałkowanemu po objętości, w której zachodzą rozszczepienia, i po energii (grupach energetycznych). Rozszczepieniom w świeżym paliwie podlegają wyłącznie U-235 i U-238, znajdujące się w komórce paliwowej. Identyfikatorem szybkości produkcji neutronów rozszczepieniowych, $\int_f (\bar{r}, t)$, jest MT = 1452. Po wybraniu tej reakcji dla obu nuklidów uranu KMART podaje dla nich wartości całek (6) w obszarze paliwowym. Suma tych całek jest szybkością produkcji neutronów w układzie – P.

Szybkości reakcji rozpraszania, wyrażone wzorami (1), (2) i (4), obejmują rozpraszanie sprężyste i niesprężyste. Rozpraszanie sprężyste ma identyfikator MT = 2, a niesprężyste – MT = 4. Suma szybkości obu typów rozpraszania odpowiada wartości licznika we wzorach (1), (2) i (4). Szybkości reakcji wychwytu neutronów w reflektorze, wyrażone wzorami (3) i (5), zawierają wszystkie te reakcje, w których w kanale wyjściowym znika neutron.

5.2. Całkowita szybkość absorpcji neutronów odniesiona do ich produkcji w całym zasobniku

Szybkość absorpcji neutronów w całym układzie – A, wyrażona licznikiem wzoru (7), musi obejmować wszystkie reakcje, w których jest tracony neutron, na wszystkich

nuklidach znajdujących się w układzie. Ponieważ w benchmarku szybkość absorpcji była wymagana tylko dla świeżego paliwa, do jej obliczenia w całym zasobniku należało uwzględnić pochłanianie na wszystkich nuklidach tego paliwa, tzn. H-1, O-16, Si-28, Zr-40, U-235 i U-238, a następnie je zsumować. Dla nuklidów rozszczepialnych należy wybrać zespół reakcji o identyfikatorze MT = 27, ponieważ obejmują one także absorpcję neutronów prowadzącą do rozszczepienia. Dla pozostałych nuklidów można wybrać zespół MT = 27 lub MT = 101. Jeżeli jakiś nuklid występuje w różnych miejscach układu, do sumowania należy przyjąć wielkość oznaczoną w pliku wynikowym jako *total*.

5.3. Udział strumienia neutronów termicznych

W rozpatrywanym układzie pojemnika z kasetą paliwową różne od zera strumienie neutronów są w komórce odpowiadającej prętowi paliwowemu oraz komórce odpowiadającej rurze wiodącej pręta kontrolnego. Aby obliczyć udział strumienia termicznego SI^{th} , w tym przypadku wzór (10) przyjmie postać:

$$SI^{th} = \frac{\frac{th}{3.1} V_{3.1}}{\frac{tot}{3.1} V_{3.1}} + \frac{\frac{th}{3.2} V_{3.2}}{\frac{tot}{3.2} V_{3.2}} + \frac{\frac{th}{3.3} V_{3.3}}{\frac{tot}{3.3} V_{3.3}} + \frac{\frac{th}{4.1} V_{4.1}}{\frac{tot}{4.1} V_{4.1}} + \frac{\frac{th}{4.2} V_{4.2}}{\frac{tot}{4.2} V_{4.2}} + \frac{\frac{th}{4.3} V_{4.3}}{\frac{tot}{4.3} V_{4.3}} \quad (10')$$

gdzie

$\frac{th}{i,j}$ – gęstość strumienia neutronów termicznych w regionie j komórki i ,

$\frac{tot}{i,j}$ – gęstość całkowitego strumienia neutronów w regionie j komórki i ,

$V_{i,j}$ – objętość regionu j w komórce i .

W tym przypadku $i = 3$ oznacza komórkę paliwową, a w niej odpowiednie materiały: $j = 1$ – paliwo, $j = 2$ – koszulkę, $j = 3$ – moderator, z kolei $i = 4$ oznacza komórkę rury wiodącej, a w niej materiały: $j = 1$ – moderator, $j = 2$ – rura wiodąca, $j = 3$ – moderator.

W obliczeniach korzystano z 238-grupowej biblioteki ENDF/B-VII. W specyfikacji benchmarku przyjęto, że neutrony o energii do 0,625 eV to neutrony termiczne. Odpowiadają im grupy energetyczne od 200 do 238.

W celu usprawnienia obliczeń udziału strumienia neutronów termicznych SI^{th} napisano specjalny program, do którego wczytywano gęstości strumienia dla 238 grup energetycznych, kolejno dla poszczególnych obszarów (3.1), (3.2), ..., (4.3). Następnie program obliczał sumy $\frac{th}{i,j}$ po grupach termicznych, sumy $\frac{tot}{i,j}$ po wszystkich grupach energetycznych, a następnie obliczał SI^{th} według wzoru (10').

6. Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń zebrano w tabelach 10–13 oraz na wykresach – rysunki 4–12.

Tabela 10. Obliczone efektywne współczynniki mnożenia dla świeżego paliwa jądrowego.

Table 10. Calculated effective multiplication factors for fresh nuclear fuel.

Moderator	Reflektor	Grubość reflektora cm	Przypadek	k-eff	k-eff
H ₂ O	-	0	zero	0,65433	0,00024
	SiO ₂ -dry	10	sd10	0,7975	0,00023
		20	sd20	0,8648	0,00028
		40	sd40	0,93683	0,00022
		60	sd60	0,97253	0,00030
		90	sd90	0,99091	0,00022
		120	sd120	0,99418	0,00023
	SiO ₂ -wet	10	sw10	0,93932	0,00025
		20	sw20	0,9721	0,00023
		40	sw40	0,97442	0,00022
		60	sw60	0,97426	0,00023
	H ₂ O	10	lw10	0,92471	0,00027
		20	lw20	0,92763	0,00023
		40	lw40	0,92785	0,00027
SiO ₂ -wet	-	0	zeros	0,30748	0,00016
	SiO ₂ -wet	10	sw10s	0,68641	0,00022
		20	sw20s	0,74013	0,00022
		40	sw40s	0,74323	0,00023
		60	sw60s	0,74335	0,00026

Tabela 11. Obliczone efektywne współczynniki mnożenia dla wypalonego paliwa jądrowego.

Table 11. Calculated effective multiplication factors for spent nuclear fuel.

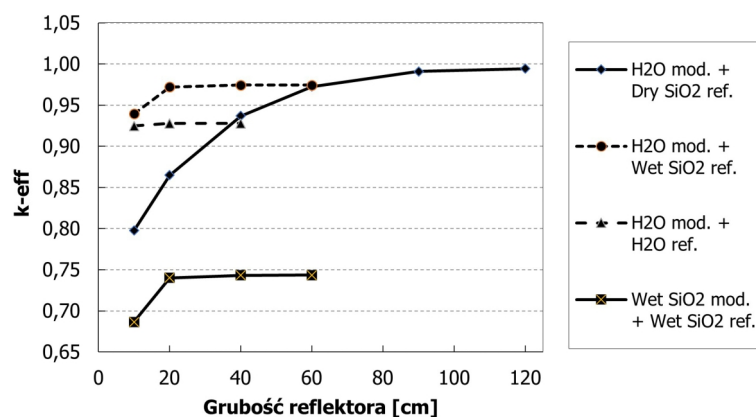
Moderator	Reflektor	Przypadek	k-eff					
			30 GWd/t			45 GWd/t		
			0 lat	30 tys. lat	20 mln lat	0 lat	30 tys. lat	20 mln lat
			a	b	c	d	e	f
H ₂ O	-	zero	0,54004	0,52456	0,52077	0,49136	0,45370	0,44549
	SiO ₂ -dry	sd10	0,65706	0,63915	0,63634	0,59803	0,55271	0,54430
		sd40	0,77144	0,75126	0,74817	0,72055	0,64901	0,64001
		sd120	0,81878	0,79690	0,79327	0,76466	0,68811	0,67835
	SiO ₂ -wet	sw10	0,77880	0,75840	0,75694	0,70972	0,65702	0,64916
		sw40	0,80867	0,78698	0,78468	0,73767	0,68166	0,67333
	H ₂ O	lw10	0,76844	0,74842	0,74657	0,70119	0,64868	0,64077
		lw40	0,77125	0,75066	0,74902	0,70375	0,65056	0,64357

Tabela 12. Niepewności efektywnych współczynników mnożenia dla wypalonego paliwa jądrowego.**Table 12.** Uncertainties of effective multiplication factors for spent nuclear fuel.

Moderator	Reflektor	Przypadek	k-eff					
			30 GWd/t			45 GWd/t		
			0 lat	30 tys. lat	20 mln lat	0 lat	30 tys. lat	20 mln lat
			a	b	c	d	e	f
H ₂ O	-	zero	0,00023	0,00020	0,00019	0,00023	0,00017	0,00018
	SiO ₂ dry	sd10	0,00021	0,00019	0,00021	0,00020	0,00018	0,00018
		sd40	0,00021	0,00020	0,00021	0,00019	0,00018	0,00018
		sd120	0,00021	0,00020	0,00022	0,00020	0,00017	0,00017
	SiO ₂ -wet	sw10	0,00019	0,00018	0,00023	0,00018	0,00021	0,00018
		sw40	0,00021	0,00021	0,00021	0,00018	0,00022	0,00017
	H ₂ O	lw10	0,00020	0,00018	0,00017	0,00020	0,00020	0,00017
		lw40	0,00024	0,00022	0,00018	0,00017	0,00018	0,00016

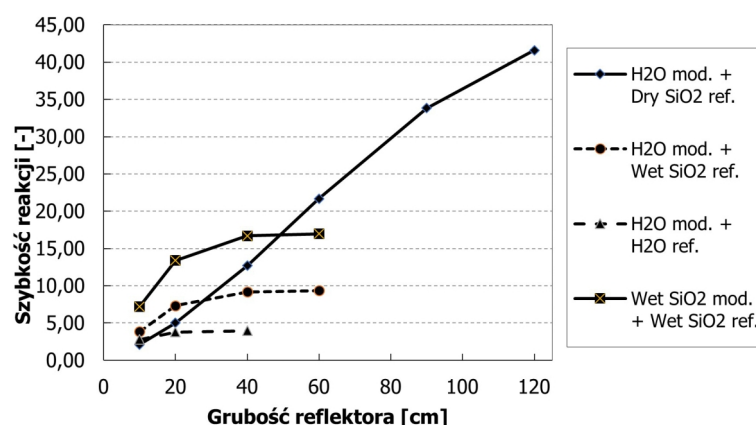
Tabela 13. Obliczony udział strumieni neutronów termicznych dla kasety ze świeżym paliwem jądrowym.**Table 13.** Calculated share of thermal neutron fluxes for the fresh nuclear fuel assembly.

Moderator	Reflektor	Grubość Reflektora [cm]	Przypadek	SI-th
H ₂ O	-	0	zero	0,1196797
	SiO ₂ -dry	10	sd10	0,130268
		20	sd20	0,1359356
		40	sd40	0,1431436
		60	sd60	0,1475783
		90	sd90	0,1500567
		120	sd120	0,1505556
H ₂ O	SiO ₂ -wet	10	sw10	0,1582634
		20	sw20	0,1632351
		40	sw40	0,1635956
		60	sw60	0,1634879
H ₂ O	H ₂ O	10	lw10	0,1650069
		20	lw20	0,165509
		40	lw40	0,1655504
SiO ₂ -wet	-	0	zeros	0,03628713
	SiO ₂ -wet	10	sw10s	0,08551001
		20	sw20s	0,09248181
		40	sw40s	0,09282792
		60	sw60s	0,09286775



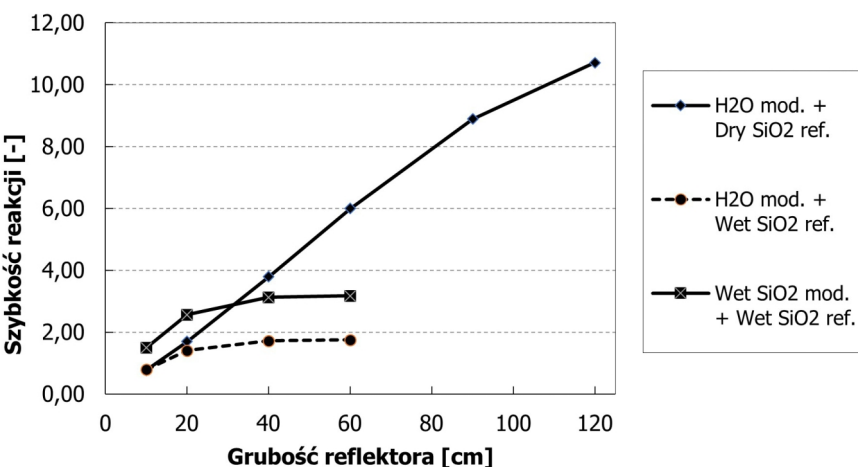
Rys. 4. Efektywne współczynniki mnożenia neutronów kasety ze świeżym paliwem jądrowym umieszczonej w zasobniku (opracowanie własne autora).

Fig. 4. Effective neutron multiplication factors of the fresh nuclear fuel assembly placed in the storage container (author's own work).



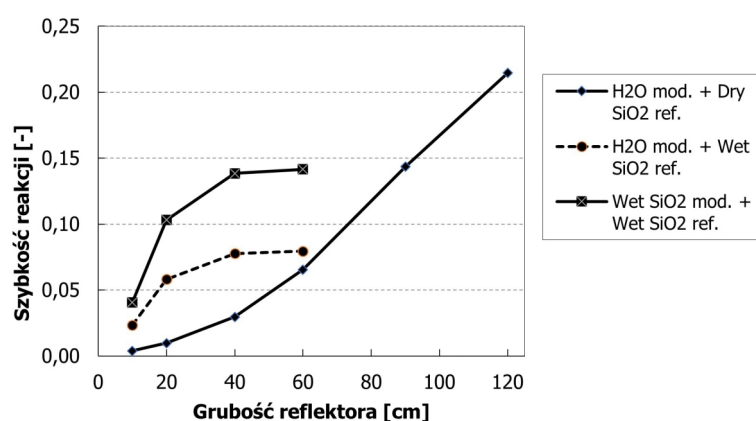
Rys. 5. Szybkość rozpraszania neutronów na O-16 w reflektorze zasobnika z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 5. Neutron scattering rate on O-16 in the reflector of the container with a fresh fuel nuclear assembly (author's own work).



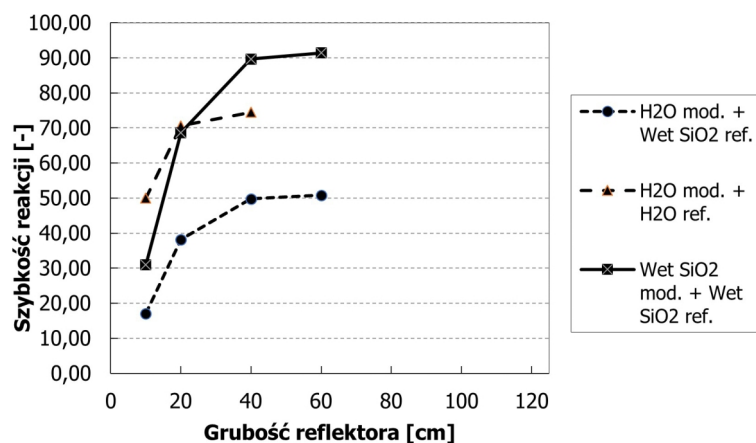
Rys. 6. Szybkość rozpraszania neutronów na Si-28 w reflektorze zasobnika z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 6. Neutron scattering rate on Si-28 in the reflector of the container with a fresh nuclear fuel assembly (author's own work).



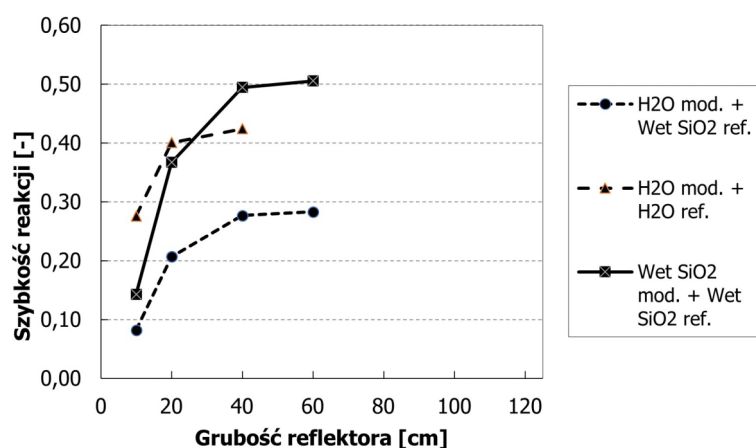
Rys. 7. Szybkość absorpcji neutronów na Si-28 w reflektorze zasobnika z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 7. The rate of neutron absorption on Si-28 in the reflector of the container with a fresh nuclear fuel assembly (author's own work).



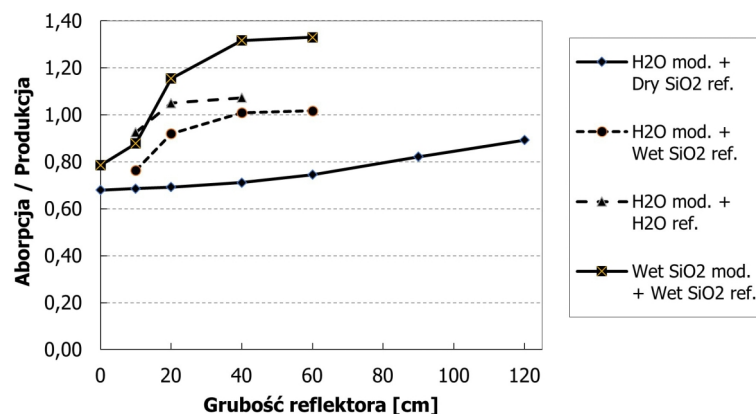
Rys. 8. Szybkość rozpraszania neutronów na H-1 w reflektorze zasobnika z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 8. Neutron scattering rate on H-1 in the reflector of the container with a fresh nuclear fuel assembly (author's own work).



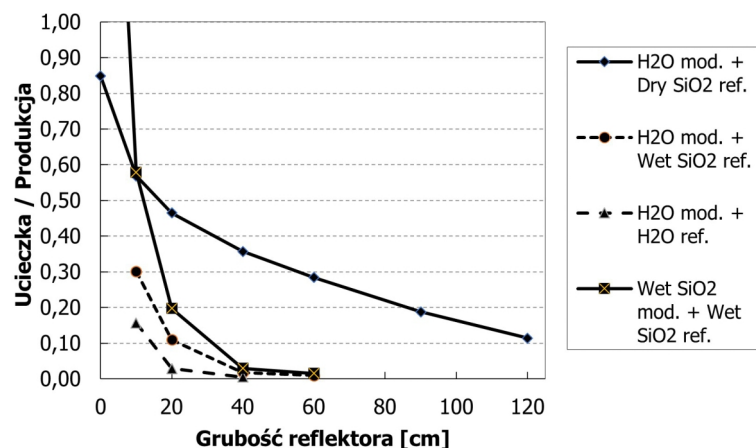
Rys. 9. Szybkość absorpcji neutronów na H-1 w reflektorze zasobnika z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 9. Neutron absorption rate on H-1 in the reflector of the container with a fresh nuclear fuel assembly (author's own work).



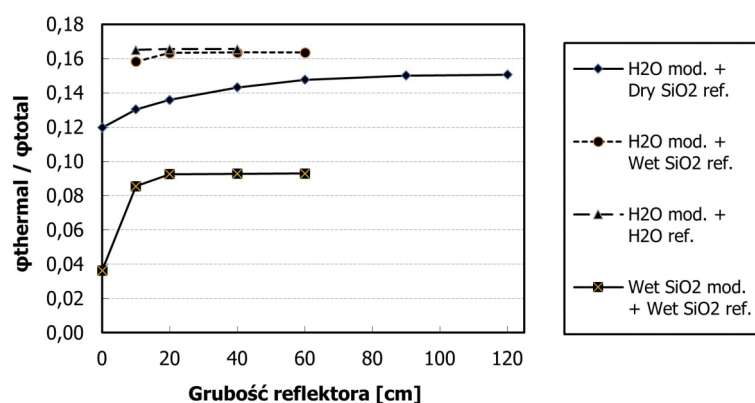
Rys. 10. Stosunek całkowitej szybkości absorpcji neutronów do ich produkcji w całym zasobniku z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 10. The ratio of the total neutron absorption rate to neutron production rate in the entire fresh nuclear fuel assembly (author's own work).



Rys. 11. Stosunek szybkości ucieczki neutronów do ich produkcji dla zasobnika z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 11. The ratio of neutron escape rate to neutron production for a container with a fresh nuclear fuel assembly (author's own work).



Rys. 12. Udział strumienia neutronów termicznych w zasobniku z kasetą ze świeżym paliwem jądrowym (opracowanie własne autora).

Fig. 12. The fraction of thermal neutron flux in the container with the fresh nuclear fuel assembly (author's own work).

7. Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że w żadnym z rozpatrywanych przypadków nie wystąpił stan krytyczny. Najbliższe stanu krytycznego przypadki (k_{eff} ponad 0,99) zaobserwowano dla świeżego paliwa jądrowego z wodą jako moderatorem oraz suchym SiO₂ jako reflektorem, szczególnie dla dużych grubości reflektora – 90 i 120 cm. Wszystkie analizowane konfiguracje wypalonego paliwa jądrowego, zarówno dla wypalenia 30 GWd/t, jak i 45 GWd/t, charakteryzowały się współczynnikiem mnożenia neutronów znacznie poniżej wartości 1.

W wynikach benchmarku OECD [1], obejmujących łącznie dziewięć instytutów z ośmiu krajów, zaobserwowano jednoznaczną tendencję wzrostu współczynnika mnożenia neutronów wraz ze zwiększaniem grubości reflektora SiO₂. Wszystkie układy z reflektorem wykazywały wyższe wartości k_{eff} niż analogiczne układy bez reflektora. W szczególności reflektor SiO₂-wet wykazywał istotnie wyższy efekt odbicia niż woda, co potwierdza potrzebę jego szczegółowej analizy w ocenach bezpieczeństwa krytycznościowego.

Benchmark potwierdził również znaczne zmniejszenie współczynnika mnożenia neutronów przy uwzględnieniu wypalenia paliwa (*burnup credit*). Realistyczne składy izotopowe paliwa wypalonego prowadzą do istotnego obniżenia wartości k_{eff} , zapewniając utrzymanie podkrytyczności przez cały przewidywany okres składowania, nawet w najbardziej pesymistycznych scenariuszach (pełne zalanie, silne odbicie neutronów).

Uzyskana zgodność wyników obliczeń prowadzonych przez uczestników benchmarku różnymi kodami komputerowymi (MVP, SCALE, MONK, MCNP, SERPENT, MORET) i z wykorzystaniem różnych bibliotek danych jądrowych (ENDF/B, JENDL, JEFF, CENDL) potwierdziła ich wiarygodność i spójność. Niewielkie rozbieżności wynikające z zastosowania starszych bibliotek danych jądrowych lub uproszczonych modeli materiałowych nie wpłynęły istotnie na ogólną ocenę krytyczności.

Podsumowując, przeprowadzone badania wykazały, że uwzględnienie realistycznych właściwości reflektora SiO₂ w analizach krytyczności jest istotne dla rzetelnej oceny bezpieczeństwa głębokiego składowania wypalonego paliwa jądrowego. Mimo konserwatywnych założeń stosowanych w analizach, uzyskane wyniki wskazują na wysoki poziom bezpieczeństwa proponowanych rozwiązań, zapewniając dużą odporność na potencjalne zmiany konfiguracji geometrii i materiału w długim okresie składowania.

Notka o autorze

mgr Łukasz Koszuk – fizyk jądrowy, absolwent Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, obecnie pracownik Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, współzałożyciel i prezes Fundacji Forum Atomowe, prowadzi także własną firmę doradczą „AI and Nuclear”. Jest także delegatem do grupy roboczej NEA/OECD Working Party on Nuclear Criticality Safety.

Literatura

1. NEA, *Used Nuclear Fuel Criticality Safety Benchmark SiO₂ Reflector Effect: The Reflector Effect of Silicon Dioxide (SiO₂) for the Criticality Safety of Direct Disposal of Used Nuclear Fuel* (OECD Publishing, Paris, 2020).
2. V. L. Putman, *Criticality Safety Basics, a Study Guide* (1999), <https://doi.org/10.2172/751136>.
3. OECD-NEA, *Summary Record of the IGSC Topical Session 2017* (Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2017).
4. F. Johansson *et al.*, *Criticality Effects of Long-Term Changes in Material Compositions and Geometry in Disposal Canisters with Insert Rebus Concept 1 P355N and P460N* (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2024).
5. R. Shrestha *et al.*, “Anaerobic microbial corrosion of carbon steel under conditions relevant for deep geological repository of nuclear waste,” *Sci. Total Environ.* 800, 149539 (2021).
6. Nuclear Decommissioning Authority, *Geological Disposal: Criticality Safety Status Report (DSSC/458/01)* (United Kingdom, 2016).
7. L. Price, *International Approaches to Postclosure Criticality Safety – United States* (Sandia National Laboratories, 2022).

8. L. Price, H. Alsaed, E. Basurto, A. Salazar, G. Davidson, and M. Swinney, "Assessing the Consequences of Postclosure Criticality in Spent Nuclear Fuel," *Nucl. Technol.* 210(9), 1549–1566 (2024).
9. A. G. Croff, "ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials," *Nucl. Technol.* 62, 335 (1983).
10. S. B. Ludwig and A. G. Croff, "Revision to ORIGEN2 – Version 2.2," Transmittal Memo of CCC-0371/17 (Oak Ridge National Laboratory, 2002).
11. K. Okumura, K. Sugino, K. Kojima, T. Jin, T. Okamoto and J. Katakura, "A set of ORIGEN2 cross section libraries based on JENDL-4.0: ORLIBJ40," *JAEA Data/Code* 2012-032 (2012) [in Japanese].
12. M. Takano, *OECD/NEA Bunnup Credit Criticality Benchmark – Result of Phase-1A*, *JAERI-M* 94-003 (1994).
13. SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1 (June 2011).

Radon in Educational Institutions. Part I: Obligations of Heads of Educational Institutions Towards Pupils under Article 23c (1–2) of Polish Atomic Law

Radon w jednostkach systemu oświaty. Część I: obowiązki kierowników jednostek systemu oświaty względem uczniów na gruncie art. 23c ust. 1-2 Prawa atomowego

Robert Bobkier¹, Ewa Katarzyna Czech²

¹*Abraham & Ben Hadar Law and Audit*

²*Faculty of Law, University of Białystok, Poland*

Abstract: The article presents an analysis of the obligations of educational institution directors arising from Article 23c(1) and (2) of the Atomic Law in the context of their appropriate application to pupils under Article 32a. The authors focus on the duty to ensure radon concentration measurements and the implementation of optimization and informational measures, highlighting their significance for protecting the health of children in educational institutions. The interpretation of the term "pupil" and the scope of recipients of information on radon-related risks are also discussed. The analysis underscores the importance of transparent communication regarding exposure data and the necessity of appropriately adapting protective mechanisms to the specific conditions of educational facilities.

Keywords: radon, Atomic Law, radiological protection, educational institutions, exposure information, radon concentration measurements, exposure optimization

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę obowiązków kierowników jednostek systemu oświaty wynikających z art. 23c ust. 1 i 2 Prawa atomowego w kontekście ich odpowiedniego stosowania do uczniów, zgodnie z art. 32a P.a. Autorzy koncentrują się na obowiązku zapewnienia pomiarów stężenia radonu oraz realizacji działań optymalizacyjnych i informacyjnych, wskazując na ich znaczenie dla ochrony zdrowia dzieci przebywających w jednostkach systemu oświaty. Omówiona zostaje również problematyka wykładni pojęcia "ucznia" oraz zakresu adresatów informacji o zagrożeniu radonowym. Analiza podkreśla istotność transparentnego przekazywania danych o narażeniu oraz wskazuje na konieczność odpowiedniego dostosowania mechanizmów ochronnych do specyfiki placówek edukacyjnych.

Słowa kluczowe: radon, Prawo atomowe, ochrona radiologiczna, jednostki systemu oświaty, informowanie o narażeniu, pomiary stężenia radonu, optymalizacja narażenia

1. Introduction

Regulations concerning radon, a radioactive noble gas¹ and a natural source of ionizing radiation², were introduced into the Polish Atomic Law³ (hereinafter referred

to as A.L.) through its extensive amendment in 2019⁴. This amendment was a result of the transposition of Council Directive 2013/59/Euratom⁵ (hereinafter referred to as the BSS Directive).

¹ Skłodowska-Curie, M., 1926. Stan obecny chemji polonu [The Current State of Polonium Chemistry]. *Roczniki Chemii / Annals of Chemistry*, vol. 6, pp. 357–358.

² Barbosa, S.M., Donner, R.V., Steinitz, G., 2015. Radon applications in geosciences – Progress & perspectives. *The European Physical Journal Special Topics*, nr 224, s. 597.

³ Act of 29 November 2000 – Atomic Law (Journal of Laws of 2024, item 1277, as amended).

⁴ Act of 13 June 2019 amending the Atomic Law and the Fire Protection Act (Journal of Laws, item 1593, as amended).

⁵ Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the risks arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom (OJ L 2014 No. 13, p. 1, as amended).

Because of this change, terms such as "radon exposure" (Article 3, point 15a A.L.), "reference level" (Article 3, point 26a A.L.), and "annual average radon concentration" (Article 3, point 47a A.L.) became elements of Polish legal terminology. Provision of Article 23b A.L. establishes a norm setting the reference level for the annual average concentration of radioactive radon in indoor workplaces and indoor spaces intended for human occupancy at 300 Bq/m³.

The newly introduced provisions of Article 23c A.L. establishes a range of obligations for unit managers concerning radon. In particular, the norm set out in Article 23c(1)(1) A.L. imposes on managers of units engaged in activities where workplaces are located indoors on the ground floor or basement level in areas where the annual average radioactive radon concentration in a significant number of buildings may exceed the reference level specified in Article 23b, the duty to ensure the measurement of radon concentration in these workplaces⁶. Such areas, hereinafter referred to as "radon counties," were designated by the Regulation of the Minister of Health of 18 June 2020⁷. They encompass a total of 27 counties⁸ (186 municipalities) inhabited by approximately 2 million people⁹, collectively referred to as "radon counties". These areas were delineated independently of the actual geological structures¹⁰. Among the "radon counties", only two are former provincial capitals (Wałbrzych, Jelenia Góra). However, most of these areas consist of rural and semi-rural municipalities characterized by dispersed housing, with a significant proportion of single-story buildings,

including those serving as offices or educational institutions¹¹.

However, Article 23c(2) A.L. imposes on unit managers a series of duties that can be classified as optimization and informational obligations. These include ensuring the optimization of employee exposure and providing them with ongoing written information, which encompasses not only the results of radon concentration measurements in the workplace, but the values of radiation doses received by employees. Notably, the latter requirement, which necessitates conducting a specific and highly complex calculation, appears to extend beyond the competency horizon of employers (unit managers)¹².

Failure to fulfill the obligations is subject to administrative financial penalties, as outlined in the extensive catalogue of Article 123(1) A.L., whereby both the manager of the organizational unit and the unit itself may be penalized. Regarding the provisions on radon introduced in 2019, penalties may apply to: failure to fulfill the obligation of dosimetric monitoring due to the lack of radon concentration measurement in the workplace (Article 123(1)(8) A.L.); failure to provide information on radiological protection by neglecting to inform employees as required by Article 23c(2) A.L. (Article 123(1)(9) A.L.). Each of these offenses is punishable by a financial penalty of up to 40,908.60 PLN¹³ for the unit manager (Article 123(1), final clause A.L.). Additionally, the organizational unit conducting activities involving exposure may be subject to a financial penalty of up to 409,086 PLN (Article 123(1b) A.L.).

⁶ For the sake of clarification, we intentionally omit other structural elements of the norm in Article 23c(1) A.L. that are unrelated to the subject matter of this publication, such as the remaining enumerated workplaces (those underground and related to the treatment of groundwater) or the alternative measurement method involving the potential alpha energy concentration of short-lived radon decay products instead of direct radon concentration measurements. Therefore, any further references to "workplaces" in this discussion pertain exclusively to those specified in Article 23c(1)(1) A.L. – i.e., those located indoors on the ground floor or basement level.

⁷ Regulation of the Minister of Health of 18 June 2020 on areas where the average annual radioactive concentration of radon in indoor air in a significant number of buildings may exceed the reference level (Journal of Laws, item 1139).

⁸ A contiguous, latitudinally aligned area of 14 Sudeten counties in the Lower Silesian Voivodeship (Dzierżoniów County, Karkonosze County, the city with county rights Jelenia Góra, Kamienna Góra County, Kłodzko County, Lubań County, Lwówek Śląski County, Polkowice County, Trzebnica County, Wałbrzych County, the city with county rights Wałbrzych, Ząbkowice Śląskie County, Zgorzelec County, Złotoryja County); additionally, in the Lublin Voivodeship—Tomaszów County; in the Opole Voivodeship—Nysa County and Prudnik County; in the Subcarpathian Voivodeship—Bieszczady County, Jasło County, Krosno County, Lesko County, Mielec County, Sanok County; in the Silesian Voivodeship—Cieszyn County; and in the Świętokrzyskie Voivodeship—Kielce County, Opatów County, and Skarżysko County.

⁹ Central Statistical Office, 2024. *Administrative division of Poland*.

<https://stat.gov.pl/statystyka-regionalna/jednostki-terytorialne/podzial-administracyjny-polski/>, [accessed: 22.01.2025].

¹⁰ Significant exceedances of permissible radon concentrations have also been identified in Poland outside the designated "radon counties", Kovler K., A. Tsapalov, R. Bobkier, R. Wiegiers, W. Schroeyers, T. Kovács, E. Toth-Bodrogi, O. El Bounagui, A. Babczuk, 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*, No. 285, 107668.

¹¹ Feltynowski, M., 2018. *Planowanie przestrzenne gmin wiejskich. Zastosowanie koncepcji polityki opartej na dowodach [Spatial planning of rural communes. Application of the Concept of Evidence-Based Politics]*. Publishing House of the University of Łódź, Łódź, p. 23.

¹² The subsequent obligations of unit directors related to radon exposure are set forth in Articles 23c(3)-(6) A.L. However, these provisions will be the subject of a separate study.

¹³ The Atomic Law ties the amount of fines to a specific multiple of the average salary in the national economy for the calendar year preceding the offense, as announced by the President of the Central Statistical Office pursuant to Article 20(1)(a) of the Act of 17 December 1998, on Pensions and Disability Benefits from the Social Insurance Fund (consolidated text: Journal of Laws of 2024, item 1631). The average salary for 2024 amounted to 8,181.72 PLN, as stated in the Announcement of the President of the Central Statistical Office of 11 February 2025, on the average salary in the national economy in 2024 (Official Gazette of 2025, item 125). Thus, financial penalties imposed for offenses committed in subsequent years will have different statutory upper limits. To ensure clarity in the argumentation, we provide the specific amount resulting from the calculation.

Crucially, from the perspective of this publication, the 2019 amendment also revised Article 32a A.L., introducing a new wording: "The provisions of Articles 10, 11, 14, 17, 21, 22, 23c, 26, and 29–32 shall apply accordingly to pupils, students, and trainees".

This publication examines the implications of the revised Article 32a A.L. regarding radon from the perspective of educational system institutions. These consequences are particularly significant for the managers of such institutions (e.g., school principals), who find themselves in a unique situation. They are obligated to ensure radiological protection not only for employees (in the broad sense derived from the Atomic Law's own definition of this term in Article 3(29) A.L.) and external workers (Article 3(30) in conjunction with Article 29(1) A.L.) but also for pupils. However, while the Act provides its own *sui generis* definition of a trainee (Article 3(31) A.L.), decoding the meaning of the term "pupil" requires stepping beyond its terminological framework.

Undoubtedly, the inclusion of Article 23c A.L., concerning radon, in the catalogue of provisions of this Law that, as required by Article 32a, must be applied "accordingly" to pupils should be unequivocally assessed as positive, as it represents an extension of protection against radon exposure. Nevertheless, this positive assessment does not overshadow several uncertainties that arise during the exegesis of the Atomic Law's provisions. In this article, we attempt a *sui generis* review of the provisions of Article 23c(1) and (2) A.L. referred to in Article 32a A.L., each time considering the requirement of their "accordingly" adjusted application.

This issue warrants attention not only due to the number of educational institutions in the "radon counties" but also considering the health implications of prolonged radon exposure, which are particularly severe in the case of children.

In February 2025, the National Atomic Energy Agency published the handbook *Radon in Buildings*¹⁴, in which a co-author of this article participated as a consultant. This handbook, likely representing the first comprehensive presentation of the issue in Polish literature, synthetically signaled the relationship between radon-related regulations and educational institutions¹⁵. The 2019 amendment to the Atomic Law has been the subject of only a few analyses in domestic legal literature¹⁶. However, the deficit in this literature is particularly evident in studies specifically addressing regulations concerning radon, as nearly all available publications in this field originate from the natural and technical sciences. Within these disciplines, numerous, often valuable, efforts have been made in Polish scholarship to assess these regulations¹⁷. This article represents an attempt to bridge this research gap.

2. Radon

Since the 1950s, radon has been recognized as a confirmed cause of lung cancer. This gas infiltrates buildings from the ground, accumulating due to the so-called stack effect—a mechanism in which gases are drawn from the ground into buildings because of pressure differences. Since 1988, radon has been classified as a first-class carcinogen, being the second leading cause of lung cancer worldwide, following exposure to tobacco smoke¹⁸.

Given that most people spend up to 90% of their time indoors¹⁹, where radon concentrations are always higher than in outdoor atmospheric air, radon constitutes the primary source of population exposure to ionizing radiation²⁰. Research findings published in 2018, which estimated lung cancer mortality rates attributable to indoor radon exposure for individual countries, indicate that Poland ranks at the top of this undesirable list (with

¹⁴ Cf. Koszuk, Ł., 2025. *Radon in buildings*. National Atomic Energy Agency, Warsaw.

¹⁵ Ibid., pp. 67–68.

¹⁶ Cf. Mik, C., 2019. Ocena rządowego projektu nowelizacji ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej [Assessment of the Government's Draft Amendment to the Atomic Law and the Fire Protection Act]. *Zeszyty Prawnicze Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu / Legal Papers of the Bureau of Research of the Chancellery of the Sejm*, No. 2, pp. 90–111; Jokiel, M., Jokiel, G., Bobkier, R., Babczuk, A., 2023. The Impact of New Legal Regulations on The Functioning of Businesses Based on The Example of Atomic Law in Poland. *Communications of International Proceedings*, No. 6, <https://ibimapublishing.com/p-articles/42MGT/2023/4246623/4246623.pdf>, [accessed: 29.01.2025].

¹⁷ Cf. Olszewski, J., Walczak, K., 2020. Radon in houses of Kowary–Sudety Mountains, Poland. *Nukleonika*, No. 2, pp. 150–151; Mazur, J., Kozak, K., 2020. Nowe regulacje dotyczące stężeń radonu (Rn-222) w budynkach i miejscach pracy w zapisach znowelizowanej ustawy Prawo atomowe [New regulations on radon (Rn-222) concentrations in buildings and workplaces in the provisions of the amended Atomic Law]. *Inżynier i Fizyk Medyczny / Engineer and Medical Physicist*, No. 3, pp. 169–172; Wysocka, M., Skubacz, K., Chmielewska, I., Urban, P., Bonczyk, M., 2019. Radon migration in the area around the coal mine during closing process. *International Journal of Coal Geology*, No. 212, pp. 1–9; Podgórska, Z., 2022. Metody pomiaru radonu w powietrzu, glebie i wodzie [Methods of measuring radon in air, soil, and water]. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki / Nuclear Safety and Radiological Protection. Information Bulletin of the National Atomic Energy Agency*, No. 1, pp. 3–10.

¹⁸ Bobkier, R., 2024. Ewolucja badań i regulacji prawnych radonu do 1980 r. jako przykład gadamerowskiego „stapiania horyzontów”. Wstęp do problematyki filozoficznego wymiaru prawa atomowego [Evolution of Research and Legal Regulations of Radon until 1980 as an Example of Gadamerian "Fusion of Horizons": A Introduction to the Philosophical Dimension of Atomic Law]. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki / Nuclear Safety and Radiological Protection. Information Bulletin of the National Atomic Energy Agency*, No. 4, pp. 37–56.

¹⁹ Cincinelli, A., Martellini, T., 2017. Indoor air quality and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, No. 14, p. 1286.

²⁰ Bobkier, R., Kovler, K., Tsapalov, A., 2025. "Fusion of Horizons": Part I. Historical context and early radon discoveries (until 1951). *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 283, p. 1.

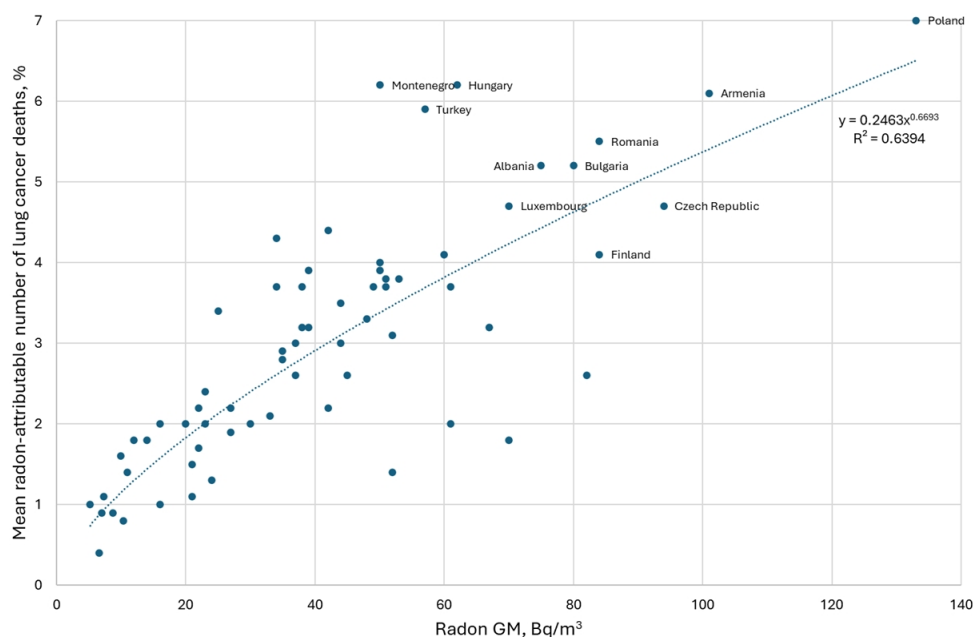


Fig. 1. Average number of lung cancer deaths attributable to radon (vertical axis, %) and average radon concentrations in buildings (horizontal axis, Bq/m³), source: Bobkier, R., Kovler, K., Tsapalov, A., 2025. "Fusion of Horizons": Part I. Historical context and early radon discoveries (until 1951). *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 283, p. 3.

Rys. 1. Odsetek zgonów z powodu raka płuc przypisywanych radonowi (oś pionowa, %) i średnia stężenia radonu w budynkach (oś pozioma, Bq/m³), źródło: R. Bobkier, K. Kovler, A. Tsapalov, "Fusion of Horizons": Part I. Historical context and early radon discoveries (until 1951), "Journal of Environmental Radioactivity" 2025, nr 283, s. 3.

7% of lung cancer deaths attributed to radon), followed by Montenegro and Hungary (6.2%), Armenia (6.1%), Turkey (5.9%), Romania (5.5%), and Albania and Bulgaria (5.2%). The average indoor radon concentration in these countries ranges from 50 Bq/m³ (Montenegro) to 133 Bq/m³ (Poland)²¹.

It is worth emphasizing that at radon concentrations exceeding 100 Bq/m³, each additional 100 Bq/m³ increases the risk of lung cancer by approximately 16%²². Therefore, the World Health Organization (WHO) recommends 100 Bq/m³ as the permissible radon concentration in indoor spaces intended for human occupancy²³.

With the advancement of scientific research, the assessment of key factors influencing the degree of risk associated with radon exposure has also evolved.

For example, while in 1994 it was estimated that prolonged exposure to a radon concentration of 740 Bq/m³ resulted in a lung cancer probability of 135 cases per 1,000 smokers and 8 cases per 1,000 non-smokers²⁴, by 2020,

analyses indicated respective values of 260 for smokers and 36 for non-smokers²⁵. Notably, the cited studies also provided analogous risk coefficients for lower radon concentrations. However, we have chosen to reference the 740 Bq/m³ value due to its similarity to radon concentration measurements in Polish schools, which we will discuss further. It is important to highlight that in several domestic educational institutions, radon concentrations have been found to reach several thousand Bq/m³. However, the American authors cited in the studies did not even calculate the probability of cancer development for such values, considering it unacceptable for children to remain in such exposure conditions. Notably, in 2019, state authorities in Arkansas, upon detecting radon concentrations exceeding 1,100 Bq/m³ in some schools, decided to evacuate and demolish those buildings²⁶.

Similarly, over the years, estimations of the exposure period necessary for radon to cause harmful, carcinogenic health effects have evolved. In the 19th century, before the

²¹ Gaskin, J., Coyle, D., Whyte, J., Krewski, D., 2018. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon. *Environmental Health Perspectives*, No. 5, pp. 3–4.

²² Coretchi, L., Overenco, A., Ababii, A., Capatina, A., Bilba, V., Salaru, I., 2024. Contribution to the study of "smoking and radon" interaction in the lung cancer development across the Republic of Moldova. *One Health & Risk Management*, No. 1, p. 10.

²³ Zeeb, H., Shannoun, F. (eds.), 2009. *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. World Health Organization, Geneva, p. ix; cf. Pawel, D.J., Puskin, J.S., 2004. The U.S. Environmental Protection Agency's Assessment of Risks from Indoor Radon. *Health Physics*, No. 1, pp. 68–74.

²⁴ Page, S., 1994. EPA's strategy to reduce risk of radon. [In:] *Radon. Prevalence, measurements, health risks and control*, ed. N.L. Nagda. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 137.

²⁵ Field, R.W., 2020. Reducing the risks from radon: Information and interventions. A guide for health care providers. *Conference of Radiation Control Program Directors Publication*, No. 3, pp. 4, <https://portal.ct.gov/-/media/DPH/Radon-Program/HCProvGuide-Update-9-17-20.pdf>, [accessed: 16.01.2025].

²⁶ Arkansas Department of Health, 2019. *Lonoke Community Radon Exposure Investigation*, September 4, 2019, pp. 3–4, <https://static1.squarespace.com/static/5ec3ec333d5e1123089fd333/t/624222f79ee7786534f8170d/1648501501549/AHD+Letter%2C+CO2+%26+Radon+Guide.pdf>, [accessed: 24.01.2024].

discovery of ionizing radiation and radon, when only a correlation between working in mines and lung cancer incidence had been observed, it was estimated that the disease developed after an exposure period of 20 to 50 years. In the 1930s and 1940s, when radon exposure was already identified as the causative factor of cancer, the estimated exposure period was slightly over a decade²⁷. In the 21st century, however, it has been proven that lung cancer can develop after only a few years of exposure to this radioactive gas²⁸. It is evident that as scientific knowledge has advanced, the estimated exposure time necessary to induce harmful health effects has systematically decreased. This observation carries significant implications for risk assessment and regulatory policy, challenging the adequacy of existing safety standards and necessitating the continuous evaluation of permissible exposure limits in both work and educational environments.

Despite the evolution in the estimation of radon-related risks, one aspect remains unchanged in scholarly literature—the sensitivity of children to ionizing radiation. Their organisms, characterized by intense growth and cellular division processes, are significantly more susceptible to the effects of exposure, making the reduction of radon concentrations in educational environments a priority in public health policy.

3. The Impact of Radon on Children's Health

The effect of ionizing radiation on the human body depends not only on the dose²⁹, radiation type and intensity, and exposure duration but also on the biological characteristics of the individual subjected to this exposure³⁰.

In the context of Polish legal regulations, according to which the permissible ionizing radiation dose limit for

children under the age of 16 is as much as twenty times lower than for occupationally exposed adults, it is essential to emphasize that developing children's organisms exhibit significantly greater sensitivity to the effects of this radiation³¹. The longer expected lifespan of a child increases the likelihood of adverse health effects manifesting, including cancers with prolonged carcinogenesis periods³². An additional risk factor is children's lifestyle, as in the climatic zone encompassing Poland, they spend a substantial amount of time indoors—on average, around 15 hours per day until the age of eight, and infants up to 20 hours daily³³. This prolonged indoor stay increases children's exposure to radon, particularly since they breathe more rapidly than adults, leading to a higher intake of air and potentially greater absorption of harmful substances. Moreover, their respiratory system continues to develop until approximately the age of six, making it more vulnerable to damage caused by inhaled pollutants. As a result, the risk of lung cancer in children exposed to radon may be nearly twice as high as in adults for the same amount of inhaled gas³⁴. These circumstances further underscore the necessity of prioritizing children's protection from ionizing radiation exposure in indoor environments.

4. Radon Concentrations in Educational Institutions (Case Study of the City with County Rights Jelenia Góra and Karkonosze County)

According to Article 23e(1) of the Atomic Law, introduced in 2019, the Chief Sanitary Inspector (GIS) was mandated to identify areas where radon concentrations in

²⁷ Bobkier, R., Kovler, K., Tsapalov, A., "Fusion of Horizons": Part I..., op. cit.

²⁸ Dobrzyńska, M.M., Gajowik A., Wieprzowski, K., 2023. Radon-occurrence and impact on the health. *Roczniki Państwowego Instytut Higieny / Annals of the National Institute of Hygiene*, No. 1, pp. 9–10; Rääf, C.L., Tondel, M., Isaksson, M., Wålander, R., 2023. Average uranium bedrock concentration in Swedish municipalities predicts male lung cancer incidence rate when adjusted for smoking prevalence: Indication of a cumulative radon induced detriment. *Science of the Total Environment*, No. 855, pp. 3–5; R.W. Field, Reducing..., op. cit., p. 4.

²⁹ Cf. Przybyszewski, W., Widel, M., Szurko, A., Maniakowski, Z., 2008. Wpływ mocy dawki na komórkowe, biochemiczne i molekularne efekty promieniowania jonizującego [The influence of dose strength on the cellular, biochemical, and molecular effects of ionizing radiation]. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej / Advances in Hygiene and Experimental Medicine*, No. 62, pp. 468–477.

³⁰ Turczyńska, A., Kułak, P., Gościak, E., Krajewska-Kułak, E., 2016. Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku [Radiological protection from the point of view of patients of the Department of Radiology of the University Clinical Hospital in Białystok]. *Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne / Nursing and Public Health*, No. 1, p. 30.

³¹ Brody, A.S., Frush, D.P., Hunda, W., Brent, R.L., 2007. Radiation risk to children from computed tomography. *Pediatrics*, No. 3, p. 678.

³² Żelechowicz M., 2017. List do Redakcji dotyczący pracy pt. „Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku [Letter to the Editor regarding the work entitled "Radiological protection from the point of view of patients of the Department of Radiology of the University Clinical Hospital in Białystok"]. *Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne / Nursing and Public Health*, No. 1, p. 90.

³³ Abdul-Wahab, S., Ikhile, E., Ahmadi, L., Elkamel, A., and Yetilmezsoy, K., 2016. Radon In The Indoor Environment-A Review. *Fresenius Environmental Bulletin*, No. 10, p. 4410. However, criticism must be directed at the Omani authors for their use of the term "Isreal" instead of "Israel", ibid., p. 4418. The derogatory term "Isreal" is an English wordplay derived from the question "is real?", implying that Israel is a non-existent, unreal state. Such a formulation bears clear hallmarks of antisemitism, Steinberg, G.M., 2023. The apartheid and racism campaigns—the NGO contribution to antisemitism. *Israel Affairs*, No. 1, p. 52. It is commonly used by authors from the Islamic cultural sphere to emphasize the claim that the territory of the State of Israel is allegedly an artificial entity within the surrounding Arab states, cf. Berkley, C., Ahmed, O., 1982. *Tayeb Salih Speaks: Four Interviews with the Sudanese Novelist*. Embassy of the Democratic Republic of the Sudan, Washington, p. 16.

³⁴ Poku, B., Hussaini, S., 2021. Radon in child care centers: An examination of state laws and regulations in the United States. *GSC Advanced Research and Reviews*, No. 3, p. 6.

indoor air may exceed the established reference level in a significant number of buildings. In fulfilling this obligation, extensive radon concentration measurements were conducted in public utility buildings across Poland between 2020 and 2023 at the request of GIS³⁵. Although the conducted studies are significant for assessing the risks associated with radon exposure, it must be regrettably noted that obtaining full access to the results of these measurements constitutes, to put it diplomatically, a specific challenge requiring particular determination.

As part of the public information access procedure, radon concentration measurement results from several institutions located in the city with county rights Jelenia Góra and Karkonosze County were obtained from the (GIS)³⁶. Below, we present, in tabular form, the highest measurement recorded in each institution, adhering to the fundamental principle of pessimization in radiological protection. Epistemologically, this principle reflects the necessity of considering extreme values in risk assessment³⁷, as they define the boundary perspective of the threat and represent the potentially most adverse impact scenario³⁸. This approach aligns with a broader risk prediction methodology, where precautionary heuristics dominate—every calculation must assume that reality may tend toward extremes rather than average values. Consequently, in assessing the risks associated with ionizing radiation exposure, maximum values are always used³⁹. The adoption of this approach aims not only to determine the upper threshold of danger⁴⁰ but also to safeguard against errors arising from potential measurement uncertainties and the complex interactions between ionizing radiation and the human body. The following table includes only those institutions where radon concentrations exceed the reference level established in

Article 23b A.L. by at least 150%. Before reviewing these data, it is essential to recall that this reference level is set at 300 Bq/m³, while the WHO recommends an even lower value (100 Bq/m³) as the permissible radon concentration in indoor spaces intended for human occupancy⁴¹.

The average exceedance of the reference level from Article 23b A.L. (300 Bq/m³) for the above-listed educational institutions is 311.33%. In 2025, a study on radon concentrations in Poland, conducted by the Nofer Institute of Occupational Medicine in Łódź, was published, confirming the conditions described above. The authors indicated that the highest percentage of measurements exceeding the reference level – up to 60% – was recorded in the Karkonosze County. Moreover, the highest measured radon concentration (2720 Bq/m³) was registered in Jelenia Góra, while concentrations exceeding 1000 Bq/m³ were also found in other locations within the Jelenia Góra Basin, including Podgórzyn and Szklarska Poręba⁴².

The significant exceedances of permissible radon concentration levels observed in educational institutions within the analyzed area constitute a serious issue, both in terms of public health and legal implications, the detailed discussion of which falls beyond the scope of this publication. The scale of these exceedances necessitates a thorough analysis and the implementation of appropriate corrective measures by all entities responsible for ensuring the safe operation of educational facilities. Three key groups of entities must be particularly emphasized in this regard.

The first group consists of the heads of educational institutions (school and facility directors). Under Article 7(1b) A.L., they bear responsibility for ensuring radiological protection against radon exposure and hold personal, including financial, liability in this respect. The

³⁵ Chief Sanitary Inspector, *Komunikat w sprawie kontynuacji w 2022 r. wykonywania, przez spółkę ACTE sp. z o.o. z siedzibą w Warszawie przy ul. Krańcowej 49, na zlecenie Głównego Inspektora Sanitarnego, pomiarów średniorocznego stężenia radonu w budynkach* [Announcement on the continuation in 2022 of measurements of the average annual concentration of radon in buildings by ACTE sp. z o.o. with its registered office in Warsaw at 49 Krańcowa Street, at the request of the Chief Sanitary Inspector], 22 September 2022, <https://www.gov.pl/web/gis/komunikat-w-sprawie-kontynuacji-w-2022-r--wykonywania-przez-spolke-acte-sp-z-oo-z-siedziba-w-warszawie-przy-ul-krancowej-49-zlecenie-glownego-inspektora-sanitarnego-pomiarow-sredniorocznego-stezenia-radonu-w-budynkach>, [accessed: 30.12.2024].

³⁶ *Pismo Głównego Inspektora Sanitarnego z dnia 8 lipca 2024 r. – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej* [Letter of the Chief Sanitary Inspector of 8 July 2024 – response to the request for access to public information], BI. OI.0134.92.2024. The names and addresses of the institutions are provided in accordance with this letter.

³⁷ Bielewski W., Fornalski, K.W., 2018. Obliczenia obszaru ograniczonego użytkowania wokół pierwszej polskiej elektrowni jądrowej [Calculations of the Limited Use Area Around the First Polish Nuclear Power Plant]. *Postępy Techniki Jądrowej / Advances in Nuclear Technology*, No. 2, p. 25.

³⁸ Niewiadomski, T., Wąsiołek, P., Olszewska, M., Ryba, E., Godek, J., Waligorski, M., 1984. *Oszacowanie radiacyjnych skutków działalności człowieka dla mieszkańców woj. m. krakowskiego* [Estimation of the radiative effects of human activity on the inhabitants of the Kraków Province]. Institute of Nuclear Technology, Kraków, p. 13; Matuła, J., 1977. Ocena zasobów produktów rozszczepienia w paliwie jądrowych reaktorów energetycznych [Assessment of fission product resources in the fuel of nuclear power reactors]. *Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej / Information Bulletin of the Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology*, No. 49, p. 8.

³⁹ Tervinder, M.S., Oborska-Kumaszynska, D., Ratcliffe, A., 2013. Testy akceptacyjne i dopuszczające dla systemu PDR [Acceptance and acceptance tests for the PDR system]. *Inżynier i Fizyk Medyczny / Engineer and Medical Physicist*, No. 2, p. 124.

⁴⁰ Cf. Niewiadomski, T., Godek, J., Jasińska M., Wąsiołek, P., 1983. *Ocena wielkości natężenia promieniowania jonizującego w obszarze strefy ochronnej Huty im. Lenina i Cementowni N.H. i jego skutków w odniesieniu do: gleb, wód i upraw roślinnych* [Assessment of the ionizing radiation intensity in the protection zone of the Lenin Steelworks and the N.H. Cement Plant and its effects in relation to: soils, waters and plant crops]. Institute of Nuclear Technology, Kraków, p. 13.

⁴¹ Zeeb H., Shannoun, F. (eds.), *WHO...*, op. cit., p. ix.

⁴² Bulewicz, K., Olszewski, J., Domienik-Andrzejewska, J., 2025. Analiza wyników komercyjnych pomiarów radonu w latach 2022–2023 [Analysis of commercial radon measurement results in 2022–2023]. *Medycyna Pracy / Workers' Health and Safety*, No. 1, p. 31–40.

Table 1. Radon concentrations in educational institutions and child-occupied facilities in the city with county rights Jelenia Góra and Karkonosze County, along with the percentage exceedance of the reference level. Data source [institution names and addresses, radon concentration values]: *Letter of the Chief Sanitary Inspector of 8 July 2024 – response to the request for public information*, BI.OI.0134.92.2024.

Tabela 1. Stężenia radonu w jednostkach oświatowych i miejscach przebywania dzieci na terenie miasta na prawach powiatu Jelenia Góra i powiatu karkonoskiego wraz z procentowym wskazaniem przekroczenia poziomu odniesienia. Opracowanie własne. Źródło danych [nazwy i adresy jednostek, wartości stężeń radonu]: *Pismo Głównego Inspektora Sanitarnego z dnia 8 lipca 2024 r. – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej*, BI.OI.0134.92.2024.

Institution Name and Address	Radon Concentration [Bq/m ³]	Exceedance of the WHO recommended value (100 Bq/m ³), [%]	Exceedance of Reference Level from Article 23b A.L. (300 Bq/m ³) [%]
Municipal Integrated Kindergarten, Junaków 2a St., 58-560 Jelenia Góra	3080	3080%	1026,67%
Local Government Kindergarten No. 2, Nadrzeczna 1 St., 58-573 Piechowice	1860	1860%	620,00%
School and Kindergarten Complex, Szkolna 2 St., 58-535 Miłków	1570	1570%	523,33%
Youth Socioterapy Center, Sprzymierzonych 9 St., 58-560 Jelenia Góra	1220	1220%	406,67%
Primary School No. 13, Piotra Skargi 19 St., 58-500 Jelenia Góra	1030	1030%	343,33%
Technical School Complex, Obrońców Pokoju 10 St., 58-500 Jelenia Góra	1030	1030%	343,33%
General and Technical Schools Complex in Jelenia Góra, John Paul II Avenue 25, 58-506 Jelenia Góra	920	920%	306,67%
Extracurricular Institutions Complex - Talent Support Center, Skłodowska-Curie 12 St., 58-500 Jelenia Góra	790	790%	263,33%
General and Vocational School Complex No. 2, 1 Maja 39/41 St., 58-500 Jelenia Góra	750	750%	250,00%
General and Sports Championship School Complex, Franciszkańska 34 St., 58-580 Szklarska Poręba	690	690%	230,00%
Psychological and Pedagogical Counseling Center, Wolności 259 St., 58-560 Jelenia Góra	660	660%	220,00%
Primary School, Kopaniec 78, 58-512 Stara Kamienica	640	640%	213,33%
Primary School, Jeleniogórska 37 St., 58-533 Kostrzyca	630	630%	210,00%
Youth Educational Center, Górna 29 St., 58-580 Szklarska Poręba	630	630%	210,00%
White Eagle Primary School, Szkolna 1 St., 58-562 Podgórzyn	610	610%	203,33%
Primary School No. 3, 1 Maja 72 St., 58-530 Kowary	600	600%	200,00%
General School Complex No. 2, Gimnazjalna 2 St., 58-560 Jelenia Góra	570	570%	190,00%
Primary School in Ściegny, 58-535 Ściegny 110a	490	490%	163,33%
Primary School, Szkolna 2 St., 58-560 Wojcieszyce	460	460%	153,33%
Public Kindergarten No. 1, Kryształowa 77 St., 58-573 Piechowice	450	450%	150,00%

sanction for failing to meet these obligations may include administrative fines, as stipulated in Article 123(1) A.L.

The second group comprises the governing bodies of schools and educational institutions, which, according to Article 4(16) of the Education Law, primarily include local government units. Their responsibilities, as outlined in Article 10(1)(1) of this Law, involve ensuring safe and

hygienic conditions for education, and care. In this context, Article 123(1b) A.L. is also of critical importance, as it stipulates that administrative fines may be imposed not only on the heads of organizational units but also directly on the educational institutions themselves (schools and kindergartens), which are predominantly financed by local government units. Furthermore, it should be noted that if

an administrative fine is imposed on an educational institution under Article 123(1b) of the Atomic Law, its director also bears additional liability for violating public finance discipline.

The third group consists of radiation hygiene authorities, specifically the state provincial sanitary inspectors, who are responsible for overseeing compliance with regulations concerning radiological protection.

The assessment of the specific probability of lung cancer incidence among pupils (and staff) of the aforementioned educational institutions, exposed to elevated radon concentrations, falls within the domain of epidemiology as a subdiscipline of medical sciences. At the same time, it is worth noting that the above measurements conducted by GIS have led to a significant shift in the evaluation of radon exposure in the Jelenia Góra Basin. Since the 20th century, scholarly literature on this issue has primarily focused—perhaps not entirely justifiably—on the case of the town of Kowary⁴³, where mining industries, including uranium mining⁴⁴, had been operating for several centuries⁴⁵. Even in the third decade of the 21st century, Kowary remained the subject of dedicated publications expressing concerns about the challenges radon concentrations in local buildings might pose for municipal authorities⁴⁶. However, the results presented above indicate that the situation is significantly worse in other localities within the Jelenia Góra Basin, which undoubtedly necessitates a paradigm shift and presents a considerable challenge for local authorities.

The graphical representation of data on the exceedance levels of permissible radon concentrations in educational institutions within the Jelenia Góra Basin is presented in the figure below. This visualization highlights both the scale of the identified issue and its distribution across the analyzed facilities.

Additionally, as one of the co-authors of this article has only briefly indicated in a previous publication⁴⁷, at least those cases listed above where radon concentrations exceed 1000 Bq/m³ require significant analysis by both

radiation hygiene authorities and the heads of institutions (school principals) regarding the potential exceedance of ionizing radiation dose limits⁴⁸. It is important to recall that, according to Annex No. 4 of the Atomic Law (“Ionizing Radiation Dose Limits”), these annual dose limits are as follows: for employees as well as pupils, students, and trainees aged 18 and above: 20 mSv; for pupils, students, and trainees aged 16 to 18: 6 mSv; and for pupils, students, and trainees under 16: 1 mSv.

This value, applicable to individuals under the age of 16, remains significantly lower than the dose limits established for adults, reflecting the previously discussed heightened susceptibility of this youngest age group. According to Article 14(1) A.L., which, as mandated by Article 32a A.L., must be applied accordingly to pupils, the total ionizing radiation dose for employees and the general public must not exceed the established dose limits. The conclusion that these limits—particularly for children under the age of 16—have been exceeded in cases of year-round, prolonged exposure to the high radon concentrations indicated above (even when accounting for school breaks, holidays, and vacations) is readily verifiable. The methodology for determining the effective dose burden in cases of internal exposure to radon and its progeny has already been defined within the Polish regulatory framework⁴⁹. However, these conclusions are not merely theoretical but open the field for further considerations regarding the potential liability of educational institution administrators under Article 123(1)(5) A.L., which penalizes the failure of an organizational unit’s director, responsible for radiological protection, to prevent exposure of an employee or another person in violation of Article 14(1) A.L.

A further analysis in this regard, however, requires a prior examination of the semantic scope of the term “pupil”, which lacks a definition within the Atomic Law, to verify whether and to what extent individuals attending educational institutions are subject to the mechanisms established by the 2019 regulatory framework for radio-

⁴³ Cf. Mosch, C.F., 1829. *Zur Geschichte des Bergbaues in Deutschland [On the History of Mining in Germany]*. Regierungs-Buchdruckerei, Liegnitz, pp. 63–64, 224.

⁴⁴ Adamski, W., 1988. *Miasto górników i tkaczy [The City of Miners and Weavers]*. [In:] *Kowary. Szkice z dziejów miasta. Tom 1 [Kowary. Sketches from the history of the city. Volume 1]*, eds. T. Bugaj. Karkonosze Scientific Society, Jelenia Góra, pp. 29–30.

⁴⁵ Hess, F.L., 1932. Radium, Uranium, and Vanadium. [In:] *Mineral Resources of the United States, 1933, Part I – Metals*. Government Printing Office, Washington, p. 504; Karlsch, R., Zeman, Z.A., 2002. *Uranageheimnisse: das Erzgebirge im Brennpunkt der Weltpolitik 1933-1960 [Uranium Secrets: The Ore Mountains in the Focus of World Politics 1933-1960]*. Ch. Links Verlag, Berlin, p. 11; Borzęcki, R., Wójcik, D., Kalisz, M., 2018. Przetwarzanie rud uranu w rejonie Kowar [Processing of uranium ores in the region of Kowary]. *Hereditas Minariorum*, No. 5, pp. 181–213.

⁴⁶ Olszewski, J., Walczak, K., Radon..., op. cit., pp. 150–151; cf. Sukanya, S., Sabu, J., 2023. *Environmental Radon: A Tracer for Hydrological Studies*. Springer, Singapore, pp. 145–166.

⁴⁷ Cf. Bobkier, R., Ewolucja..., op. cit., p. 39.

⁴⁸ Regarding the uncertainties surrounding the definition of this term in the Atomic Law, cf. Bobkier, R., 2024. Problematyka interpretacyjna pojęcia „kontrolowanej działalności zawodowej”. Rozważania na tle definicji dawki granicznej w Prawie atomowym [Interpretative Issues of the Concept of „Controlled Occupational Activity”. Considerations on the Definition of Dose Limit in the Atomic Law]. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki / Nuclear Safety and Radiation Protection. Information Bulletin of the National Atomic Energy Agency*, No. 2, pp. 14–29.

⁴⁹ This methodology is derived from point 4 of the annex „Quantities and Indicator Values for Determining Ionizing Radiation Doses Used in Exposure Assessment” to the Regulation of the Council of Ministers of 11 August 2021, on indicators for determining ionizing radiation doses used in exposure assessment (Journal of Laws, item 1657).

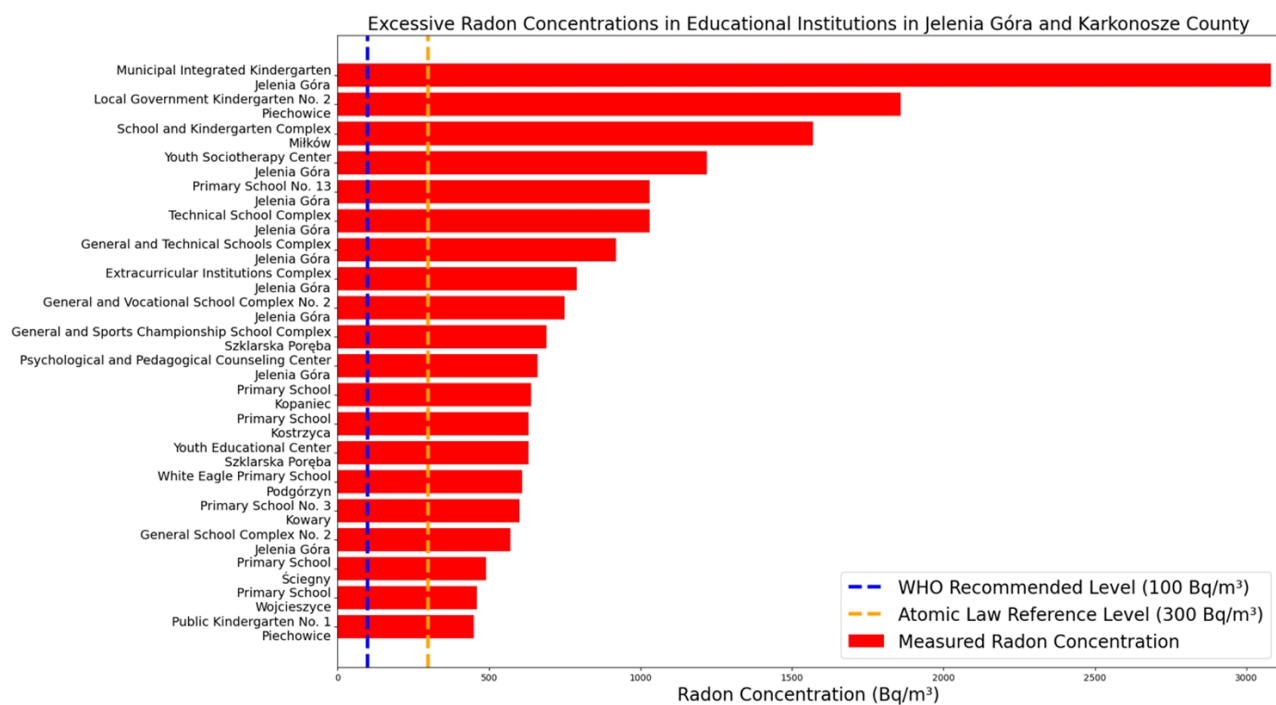


Fig. 2. Exceedance of permissible radon concentrations in educational institutions in the Jelenia Góra Basin. Own compilation, based on: *Letter of the Chief Sanitary Inspector of 8 July 2024 – response to the request for public information*, BI. OI.0134.92.2024.

Rys. 2. Przekroczenia dopuszczalnych stężeń radonu w jednostkach systemu oświaty w Kotlinie Jeleniogórskiej. Opracowanie własne na podst.: *Pismo Głównego Inspektora Sanitarnego z dnia 8 lipca 2024 r. – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej*, BI.OI.0134.92.2024.

logical protection against radon. Only after clarifying this category can the extent of liability for institution administrators be determined.

5. The Concept of "Pupil"

Article 32a A.L. mandates the application of the provisions of the Atomic Law listed therein, including the key "radon-related" Article 23c, accordingly to pupils.

As R. Budzisz aptly noted in 2023, "one searches in vain for a definition of the term pupil"⁵⁰ in the Education

Law⁵¹, which in Article 4(20) merely indicates that this term should also be understood to include listeners and wards⁵². This law contains in Article 2 an extensive enumerative list of educational system institutions⁵³.

Legislative acts within the broader field of education law contain their own definitions of the term "pupil". However, these definitions are tailored to the specific needs of those regulations⁵⁴ and can only be applied subsidiarily to terms used in the Atomic Law. Article 3(3)(1) in conjunction with Article 3(2)(1) of the Act of 15

⁵⁰ Budzisz, R. 2023. *Badania sanitarno-epidemiologiczne [Sanitary and epidemiological research]. [In:] Zapobieganie oraz zwalczanie zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi. Zagadnienia prawne [Prevention and combating infections and infectious diseases in humans. Legal Issues]*, ed. R. Budzisz. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 72.

⁵¹ Act of 14 December 2016 – Education Law (consolidated text: Journal of Laws of 2024, item 737, as amended).

⁵² A similar approach was applied in Article 3(11) of the Act of 7 September 1991, on the Education System (consolidated text: Journal of Laws of 2022, item 2230, as amended).

⁵³ According to this provision, the education system includes: preschools, including special, integrative, those with special or integrative sections, as well as other forms of preschool education (point 1); schools: primary schools, including special, integrative, those with preschool, integrative, special, vocational preparation, bilingual, sports, and sports championship sections (point 2a); secondary schools, including special, integrative, bilingual, those with integrative, special, bilingual, military preparation, uniformed profile, sports, and sports championship sections, as well as agricultural, forestry, maritime, inland navigation, and fisheries schools (point 2b); artistic schools (point 2c); educational and care institutions, including school youth hostels, enabling the development of interests and talents as well as participation in various forms of leisure and free time activities (point 3); continuing education institutions, vocational training centers, and sectoral skills centers, allowing the acquisition and enhancement of knowledge, skills, and professional qualifications or career changes (point 4); artistic institutions—art centers that support the development of artistic interests and talents (point 5); psychological and pedagogical counseling centers, including specialized counseling centers providing psychological and pedagogical support to children, youth, parents, and teachers, as well as assisting students in choosing their educational path and profession (point 6); youth educational centers, youth sociotherapy centers, special educational and care centers, and special care centers for children and youth requiring a special organization of education, teaching methods, and upbringing, as well as rehabilitation and educational centers enabling children and youth referred to in Article 36(17), as well as children and youth with multiple disabilities, where one of the disabilities is intellectual disability, to fulfill the obligations specified in Article 31(4), compulsory schooling, and compulsory education (point 7); institutions providing care and upbringing to students during their education outside their permanent place of residence (point 8); teacher training institutions (point 9); pedagogical libraries (point 10); colleges for social service workers (point 11).

⁵⁴ Budzisz R., *Badania...*, [In:] *Zapobieganie...*, ed. R. Budzisz, op. cit., p. 73.

April 2011, on the Educational Information System⁵⁵ defines a "pupil" as children receiving early developmental support in schools and educational institutions, children enrolled in preschool education in kindergartens, pre-school departments organized in primary schools, and other forms of preschool education, as well as pupils, listeners, wards, and graduates of schools and educational institutions. Meanwhile, Article 2(33) of the Act of 27 October 2017, on the Financing of Educational Tasks⁵⁶ states that the scope of the term "pupil" also includes adult school listeners, students at second-degree vocational schools and post-secondary schools, and children attending preschool education⁵⁷.

Considering the catalogue of educational system institutions (Article 2 of the Education Law, footnote 53), we argue that the interpretation of the term "pupil" under Article 32a A.L. should consider not only the formal organizational structure of educational institutions but, above all, their ontological purpose, which is to shape and educate individuals in conditions that ensure their safety. Consequently, the criterion for applying the radon protection norms of the Atomic Law must be the functional participation in the educational process (educational, therapeutic, etc.), regardless of the organizational form of a given institution. According to Article 3(20) A.L., radiological protection is intended to prevent exposure to radiation for all people, not just selected groups. Limiting the scope of such protection concerning radon only to pupils of institutions formally classified as schools would result in the normative depreciation of other wards and contradict the principle of equal value of life and health. The economic analysis of law provides grounds for asserting that protection against hazards should be guided by the principle of maximizing welfare based on actual needs rather than definitional boundaries set by administrative terminology⁵⁸. The concept of safety culture, defined in Article 3(8c) A.L., prioritizes protection and security over other values, which necessitates treating children as a particularly protected group, regardless of whether they are formally classified as pupils, listeners, or

wards. Indeed, Article 68(3) in principio of the Constitution of the Republic of Poland⁵⁹ imposes an obligation on public authorities to provide special healthcare to children, without any basis for differentiating their rights depending on their administrative affiliation with a specific type of institution. From this perspective, the interpretation of the term "pupil" in Article 32a A.L. must encompass all children covered by the education and upbringing system within the institutions listed in the catalogue of Article 2 of the Education Law. Any *interpretatio restrictiva* that narrows this scope would lead to an arbitrary and axiologically unjustified division, contradicting the fundamental principle of equality in health protection as a supreme value.

However, even this extensive interpretation does not eliminate a certain dissonance. This arises from a *sui generis* "ontological rupture"⁶⁰ within the structure of legal protection, which becomes evident concerning nurseries—institutions regulated by the Act of 4 February 2011, on the Care of Children Under the Age of Three⁶¹. Although, according to Article 2(1) of this legal act, they fulfill care, educational, and instructional functions, they are not part of the educational system, and children attending them are certainly not considered pupils. In this case, axiological reality exists on a plane separate from positive law. The statutory classification of institutions does not change the fact that children in nurseries and their older peers in schools and kindergartens are exposed to the same ionizing radiation. This formalism leads to a situation in which the protection provided by Article 32a A.L. applies only to individuals meeting the criterion of "pupil", leaving out children under the age of three, who are not significantly different from a biological and health perspective. From the standpoint of legal teleology, this protection gap is difficult to justify—if the *ratio legis* of Article 32a A.L. is the protection of particularly vulnerable groups against radon, the exclusion of the youngest children from this protection becomes a form of "normative aporia"⁶², lacking any rational justification.

⁵⁵ Act of 15 April 2011 on the Education Information System (Journal of Laws of 2024, item 152, as amended).

⁵⁶ Act of 27 October 2017 on the Financing of Educational Tasks (Journal of Laws of 2023, item 1400).

⁵⁷ This definitional ambiguity resonates within legal doctrine and jurisprudence in areas of law beyond the Atomic Law as well, cf. Wolanin, M., 2022. Dzieci i młodzież w rozumieniu ustawy o systemie oświaty. Glosa częściowo krytyczna do wyroku Wojewódzkiego Sądu Administracyjnego w Gliwicach z 2 lipca 2019 r. (III SA/GI 426/19) [Children and youth within the meaning of the Education System Act. Partially critical commentary on the judgment of the Provincial Administrative Court in Gliwice of 2 July 2019 (III SA/GI 426/19)]. *Orzecznictwo w Sprawach Samorządowych / Case Law in Local Government Matters*, No. 2, pp. 116–122; Judgment of the Provincial Administrative Court in Gliwice of 2 July 2019, III SA/GI 426/19, LEX No. 2706528.

⁵⁸ Cf. Golecki, M.J., 2019. W poszukiwaniu optymalnego prawodawcy. Dylematy regulacji i deregulacji z perspektywy ekonomicznej analizy prawa [In search of the optimal legislator. Dilemmas of regulation and deregulation from the perspective of economic analysis of law]. *internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny / Internet Antitrust and Regulatory Quarterly*, No. 8, pp. 11–22.

⁵⁹ The Constitution of the Republic of Poland of 2 April 1997 (Journal of Laws No. 78, item 483, as amended).

⁶⁰ Cf. Heller, M., 2008. Granice czasu, przestrzeni i prawdopodobieństwa [The Limits of Time, Space and Probability]. *Filozofia Nauki / Philosophy of Science*, No. 3–4, p. 8.

⁶¹ Act of 4 February 2011 on Care for Children up to the age of 3 (Journal of Laws of 2024, item 338, as amended).

⁶² Aporia (Greek: ἀπορία, wilderness, difficulty, doubt) is a philosophical term denoting a problematic situation in which solutions seem to be internally contradictory or irreconcilable, cf. Linhares, J.M.A. 2013. Pojęcie dowodu jako otwarta rana prawa: niezmiennie błędna aporia? [The Concept of Evidence as an Open Wound of the Law: An Invariably Erroneous Aporia?]. *Archiwum Filozofii Prawa i Filozofii Społecznej /*

With full conviction, we express a competency-based compliment to the Polish legislator, who, by emphasizing in Article 32a A.L. the necessity of extending normative protection against radon to "pupils", has gone beyond the minimum requirements established by the BSS Directive. The directive itself does not emphasize as explicitly as domestic Polish law the need to protect children from exposure to this gas⁶³, instead focusing clearly on trainees and students aged 16 and above (Article 33). Nevertheless, this normative gap in Polish law concerning children in nurseries leaves—so to speak, in four dimensions—a certain insufficiency. First, it arises from a peculiar asymmetry in legal protection against radon exposure, whereby nursery caregivers (employees) are covered by legal safeguards, whereas children, whose bodies are significantly more vulnerable to the effects of ionizing radiation, are not. This contradicts the principle of proportionality and the fundamental assumption that the more susceptible a group is to harmful factors, the more intensive its legal protection should be. Second, the situation in which a child in a kindergarten is protected under Article 32a A.L., but the same child, just a few months younger and attending a nursery, is not, is internally inconsistent and arbitrary. There is no biological or medical difference justifying the exclusion of the latter group from protection. Third, an evident issue here is the disproportion in access to information. While kindergartens are required to provide information on radon exposure (Article 23c(2) in conjunction with Article 32a A.L.), the lack of an analogous requirement for nurseries leaves parents unaware of potential risks. Fourth, in practice, it is common for nurseries and kindergartens to function within the same building as separate organizational units⁶⁴. The children attending these institutions are subject to different protective regimes based on the formal classification of the institution rather than the actual level of risk. Given the weight of this argumentation, the current situation is, from the perspective of the principle of equality before the law, clearly flawed and warrants legislative intervention.

The above analysis necessitates a deeper examination of the protective mechanisms that arise for "pupils" from the key radon-related provision of Article 23c A.L.

6. Article 23c(1)(1) A.L. – Ensuring Radon Concentration Measurements (Appropriate Application)

The fundamental issue in the appropriate application of Article 23c A.L. to pupils is that its provisions refer to employees rather than individuals present in educational institutions as pupils. It is therefore necessary to determine how the obligations specified in this provision should be shaped when carried out by school principals as unit managers within the meaning of the Atomic Law. Naturally, it must be considered that the duties described in this subsection are also fulfilled concerning employees and external workers.

6.1. Locations Subject to the Measurement Requirement

The provision of Article 23c(1)(1) A.L., referenced in the introduction to this article, imposes an obligation on unit managers conducting activities in which workplaces are located indoors on the ground floor or basement level in areas classified as "radon counties" to ensure the measurement of radon concentration in these workplaces⁶⁵.

A workplace is a legal term used in the Labour Code⁶⁶, though it lacks a statutory definition within that act⁶⁷ and is interpreted inconsistently in legal doctrine and case law⁶⁸. Given the subject matter of this analysis, it is necessary to refer to definitions according to which a workplace is a designated space where an employee, typically on a regular basis, begins and ends their daily work⁶⁹, or the location where routine tasks forming part of the agreed scope of work are performed⁷⁰. The only legal act that explicitly defines the term "workplace" is the Regulation of the Minister of Labour and Social Policy of 26 September 1997, on General Occupational Health and

Archives of the Philosophy of Law and Social Philosophy, No. 1, pp. 5–20; Kaczmarczyk, M.R., 2019. *Aporia of Freedom. Critique of Social Theory*. Nicolaus Copernicus University Publishing House, Toruń.

⁶³ Although it does so, for example, in Article 61(1)(1) regarding medical exposure.

⁶⁴ Topolewska, M., 2019. *Żłobek i przedszkole nie mogą być zespołem [Nursery and kindergarten cannot be a unit]*, *Gazeta Prawna*, 4 February 2019, <https://serwisy.gazetaprawna.pl/samorzad/artykuly/1395862,zlobek-i-przedszkole-nie-moga-byc-zespolem.html> (accessed: 28.02.2025).

⁶⁵ We note here that the provisions of the Atomic Law concerning radon, from the perspective of remote work and remote learning, are left outside the scope of this discussion. Due to its complexity, this issue requires a separate publication.

⁶⁶ Act of 26 June 1974 Labour Code (Journal of Laws of 2023, item 1465).

⁶⁷ Goździewicz, G., Zieliński, T., 2017. [In:] *Kodeks pracy. Komentarz [Labour Code. Commentary]*, ed. L. Florek. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 1496.

⁶⁸ Rycak, A., 2013. *Powszechna ochrona trwałości stosunku pracy [Universal Protection of the Durability of the Employment Relationship]*. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 50; cf. Książek, D., 2013. Pojęcie i podział wyrażenia „miejsce pracy” [The Concept and Division of the Expression ‘Place of Work’]. *Studia z Zakresu Prawa Pracy i Polityki Społecznej / Studies in Labour Law and Social Policy*, No. 1, pp. 219–242.

⁶⁹ Goździewicz, G., Zieliński, T., [In:] *Kodeks...*, ed. L. Florek, op. cit., p. 1496. Similarly, Wiśniewski, J., 2023. Miejsce wykonywania pracy w świetle przepisów prawa pracy [Place of work in the light of labour law]. *Studia Prawnoustrojowe / Legal and Political Studies*, No. 60, p. 382.

⁷⁰ Tomaszewska, M., 2022. [In:] *Kodeks pracy. Komentarz. Tom I. Art. 1-93 [Labour Code. Commentary. Volume I. Art. 1-93]*, ed. K.W. Baran. Wolters Kluwer, Warsaw, LEX/el, comm. to Art. 29, pt. 10.

Safety Regulations⁷¹ (hereinafter G.H.S.R.). According to § 2(7b) G.H.S.R., a workplace is a location designated by the employer to which an employee has access in connection with their job duties. At the same time, it should be emphasized that this regulation also defines the term "workroom" in § 2(3), first sentence, as a room intended for the presence of employees where work is performed. However, the legislator did not choose to reference this latter concept in the Atomic Law, juxtaposing only the terms "workplace" and "room" in Article 23c(1)(1) A.L., which creates interpretative difficulties.

The term "room" itself also lacks a statutory definition in Polish law, leading legal scholars to construct various, often divergent, interpretations of its meaning. The most comprehensive description appears to be the one defining a room as a part of a building enclosed by walls or other partitions, including a premises as well as its constituent chambers or a set of chambers.

The term "room" itself also lacks a statutory definition in Polish law⁷², leading legal scholars to construct various, often divergent, interpretations of its meaning⁷³. The most comprehensive description appears to be the one defining a room as a part of a building enclosed by walls or other partitions, including a premises as well as its constituent chambers⁷⁴ or a set of chambers⁷⁵.

The provision of Article 23c(1)(1) A.L. mandates the measurement of radon concentrations in rooms "at the ground floor or basement level". The interpretation of this part of the provision also raises certain doubts due to the use of the term "ground floor". The Construction Technical Conditions Regulation defines in § 3(16-18) and (21) the terms: storey, underground storey, above-ground storey, and basement. However, the concept of "ground floor" lacks a definition within the construction law sys-

tem. In this regard, following administrative court rulings, the ground floor can be interpreted as the lowest, first above-ground storey, CONSTITUTING the level where the main entrance to the building is located⁷⁶. Nevertheless, it would be advisable for the legislator to explicitly align the terminology used in the Atomic Law with the conceptual framework of the construction law. Doing so would not only prevent interpretative discrepancies but also eliminate the ambiguity in the Atomic Law provision, an issue that should not characterize legal language⁷⁷.

A functional transposition of the provision of Article 23c(1)(1) A.L. to the realities of educational system institutions is necessary to fulfill the requirement of their "appropriate" application to pupils, as mandated by Article 32a A.L. It must therefore be concluded that in areas classified as "radon counties", the directors of these institutions are obligated to ensure radon concentration measurements in all rooms located in basements and on the first above-ground storey that are designated for educational, instructional, or care-related activities where pupils, wards, or listeners regularly remain during mandatory and additional classes organized by the institution. These spaces explicitly include classrooms, subject laboratories, preschool rooms, rooms designated for practical training, lecture halls in post-secondary schools and continuing education institutions, other rooms where regular didactic activities take place (e.g., common rooms, libraries serving an educational function), and gymnasiums.

⁷¹ Regulation of the Minister of Labour and Social Policy of 26 September 1997 on general occupational health and safety regulations (Journal of Laws of 2003 No. 169, item 1650 as amended).

⁷² The literature emphasizes that such a definition is not provided in the provisions of the Construction Law, Zelek, M., 2022. [In:] *Kodeks cywilny. Tom II. Komentarz. Art. 353–626 [Civil Code. Volume II. Commentary. Art. 353–626]*, ed. M. Gutowski. Beck, Warsaw, Legalis, comm. to Art. 433. It is not included in the glossary of statutory terms contained in Article 3 of the Act of 7 July 1994 – Construction Law. The Regulation of the Minister of Infrastructure of April 12, 2002, on the technical conditions that buildings and their location must meet (consolidated text: Journal of Laws of 2022, item 1225), contains a range of definitions for specific types of rooms (§ 3 points 10-14), yet it does not define the fundamental concept itself.

⁷³ Cf. Kuźmicka-Sulikowska, J., 2024. [In:] *Zobowiązania. Część ogólna. Tom II. Komentarz [Obligations. General part. Volume II. Commentary]*, ed. P. Machnikowski. Beck, Warsaw, Legalis, comm. to Art. 433; Warciński, M., 2005. Glosa do wyroku SN z dnia 5 marca 2002 r., I CKN 1156/99 [Commentary on the Supreme Court Judgment of 5 March 2002, I CKN 1156/99]. *Orzecznictwo Sądów Polskich / Case Law of Polish Courts*, No. 10, p. 116; Karaszewski, G., 2023. [In:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany [Civil Code. Updated Commentary]*, eds. J. Ciszewski, P. Nazaruk. Wolters Kluwer, LEX/el., comm. to Art. 433, pt. 4; Wałachowska, M., Ziemiak, M.P., 2018. [In:] *Kodeks cywilny. Komentarz. Tom III. Zobowiązania. Część ogólna (art. 353–534) [Civil Code. Commentary. Volume III. Obligations. General Part (Art. 353–534)]*, eds. M. Frasz, M. Hądas. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 493; Jantowski, L., 2024. [In:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany [Civil Code. Updated commentary]*, eds. M. Balwicka-Szczyrba, A. Sylwestrzak. Wolters Kluwer, LEX/el., comm. to Article 433, point 3.

⁷⁴ Machnikowski, P., Śmieja, A., 2023. [In:] *Prawo zobowiązań – część ogólna. System Prawa Prywatnego. Tom 6 [Law of Obligations – General Part. Private Law System. Volume 6]*, ed. A. Olejniczak. Beck, Warsaw, p. 584.

⁷⁵ Rogoziński, P., 2021. Ograniczenie prawa do rozporządzania i korzystania przez właściciela z lokalu w razie zastosowania wobec niego środka zapobiegawczego z art. 275a K.p.k. [Restriction of the Owner's Right to Dispose of and Use a Premises in the Event of the Application of a Preventive Measure under Article 275a of the Code of Criminal Procedure]. *Nieruchomości. Kwartalnik Ministerstwa Sprawiedliwości / Real Estate. Quarterly of the Ministry of Justice*, No. 1, p. 184.

⁷⁶ Judgment of the Supreme Administrative Court of 19.10.2021, II OSK 400/21, LEX No. 3319061; Judgment of the Provincial Administrative Court in Gliwice of 21.10.2020, II SA/GI 640/20, LEX No. 3096456; Judgment of the Provincial Administrative Court in Rzeszów of 28.06.2023, II SA/Rz 43/23, LEX No. 3600292.

⁷⁷ Doczekalska, A., 2021. *Język prawny w tworzeniu i transpozycji prawa Unii Europejskiej. Procesy hybrydyzacji [Legal Language in the Creation and Transposition of European Union Law. Hybridization Processes]*. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 75.

6.2. Measurement Methodology

The Environmental Protection Law⁷⁸ (hereinafter: E.P.L.) defines in Article 3(9) a reference methodology as a legally established measurement or testing method, which may include the method of sample collection, the interpretation of obtained data, as well as modeling methodologies for the dispersion of substances and energy in the environment. This set of requirements must be derived from a statutory provision or be authorized by such a provision⁷⁹. Entities utilizing the environment and administrative authorities are obliged to apply reference methodologies if such methodologies have been established under statutory provisions (Article 12(1) E.P.L.). Jurisprudence emphasizes that the obligation to make determinations based on studies conducted by accredited entities applies not only to environmental protection authorities resolving a given case but also extends beyond entities utilizing the environment⁸⁰. It is essential to underline that this provision does not explicitly limit its application to environmental protection authorities (as referred to in Article 376 E.P.L.). Therefore, it should be assumed that its scope encompasses all authorities responsible for emission measurements⁸¹. Furthermore, Article 12(2) E.P.L. allows for exceptions to the obligation of applying reference methodologies, permitting the use of alternative methodologies under specific conditions. These conditions require that the alternative methodology yields more accurate results and that its justification is grounded in meteorological phenomena, physical mechanisms, or chemical processes affecting substances or energy—particularly in the case of modeling methodologies for the dispersion of substances or energy in the environment. Additionally, in the case of

other methodologies, full equivalence of the obtained results must be demonstrated.

This principle of result comparability ensures their reliability⁸². The Atomic Law does not contain a similar regulation. It does not establish a legally required method for conducting measurements, except for the requirement in Article 3(47a) that the annual average radon concentration must be estimated based on measurements conducted over a period of no less than one month. The only relevant provisions on this matter are found in the National Action Plan for Long-Term Hazards Resulting from Radon Exposure in Buildings Intended for Human Occupancy and Workplaces⁸³ (hereinafter: the Plan), which has been issued in the form of an announcement. However, Article 87(1) of the Polish Constitution excludes announcements from the sources of universally binding law in the Republic of Poland, which include the Constitution, statutes, ratified international agreements, and regulations. An announcement, in contrast, has only a declaratory character⁸⁴, serving as an official explanation of legal provisions⁸⁵. The provisions of the Plan do not constitute legal norms that could serve as the basis for issuing individual decisions⁸⁶. The Plan merely presents the viewpoint of the issuing authority (the Minister of Health) regarding the interpretation of Atomic Law provisions, and compliance with it "is voluntary"⁸⁷.

It is nevertheless advisable for the heads of educational institutions to adhere to the recommendations of the Plan, which, despite their general nature, provide valuable guidance. The Plan specifies in point 4.1 of Part II ("Descriptive Section") that for measuring the annual average radon concentration indoors, track detectors in a diffusion chamber should be used. Moreover, "in the

⁷⁸ Act of 27 April 2001 – Environmental Protection Law (Journal of Laws of 2024, item 54, as amended).

⁷⁹ Długosz, T., Swora, M., Walaszek-Pyziół, A., Wludyka, T., Żurawik, A., 2013. Szczególna regulacja działalności przedsiębiorstw w sektorach sieciowych [Particular regulation of the activity of enterprises in network sectors]. [In:] *Publiczne prawo gospodarcze. Tom 8B. System Prawa Administracyjnego* [Public economic law. Volume 8B. Administrative Law System], eds. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel. Beck, Warsaw, p. 424.

⁸⁰ Judgment of the Provincial Administrative Court in Warsaw of 19.02.2019, IV SA/Wa 1763/18, LEX No. 3060124.

⁸¹ Gruszecki, K., 2022. *Prawo ochrony środowiska. Komentarz* [Environmental Protection Law: Commentary]. Wolters Kluwer, Warsaw, LEX/el, comm. to Art. 12, pt. 2.

⁸² Barczak, A. 2020. *Kontrola podmiotów korzystających ze środowiska* [Control of Entities Using the Environment]. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 41.

⁸³ The Announcement of the Minister of Health of 22 January 2021, on the publication of the National Action Plan for Long-Term Risks Arising from Radon Exposure in Buildings Intended for Human Occupancy and Workplaces (Official Gazette of 2021, item 169).

⁸⁴ Kazalska, O., 2018. Zwolnienie z konstytucyjnego wymogu kontrasygnaty – rozważania na tle niekontrasygnowanych obwieszczeń Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej o wolnych stanowiskach sędziego w Sądzie Najwyższym i Nacelnym Sądzie Administracyjnym [Exemption from the Constitutional Requirement of Countersignature – Reflections on the Non-Countersigned Announcements of the President of the Republic of Poland on Vacant Judicial Positions in the Supreme Court and the Supreme Administrative Court]. *Studia Iuridica*, vol. 56, p. 238.

⁸⁵ Błachucki, M., 2014. Urzędowe wyjaśnienia przepisów prawa wydawane przez organy administracji publicznej [Official Interpretations of Legal Provisions Issued by Public Administration Authorities]. [In:] *Źródła prawa administracyjnego a ochrona wolności i praw obywateli* [Sources of Administrative Law and the Protection of Citizens' Freedoms and Rights], eds. M. Błachucki, T. Górczyńska. Supreme Administrative Court, Warsaw, pp. 122–123.

⁸⁶ Cf. Stankiewicz, R., 2012. Prawotwórcza rola administracji w kształtowaniu sektora energetycznego (na przykładzie polityki energetycznej państwa) [The Law-Making Role of the Administration in Shaping the Energy Sector (Based on the Example of State Energy Policy)]. [In:] *Legislacja administracyjna. Teoria, orzecznictwo, praktyka* [Administrative Legislation. Theory, Case Law, Practice], eds. M. Stahl, Z. Duniewska. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 267.

⁸⁷ Błachucki, M., 2015. Wytyczne w sprawie nakładania administracyjnych kar pieniężnych (na przykładzie wytycznych wydawanych przez prezesa UOKiK) [Guidelines on the Imposition of Administrative Fines (Based on the Example of Guidelines Issued by the President of the Office of Competition and Consumer Protection)]. [In:] *Administracyjne kary pieniężne w demokratycznym państwie prawa* [Administrative Fines in a Democratic State of Law], ed. M. Błachucki. Office of the Commissioner for Human Rights, Warsaw, pp. 46–47.

opinion of experts conducting radon concentration measurements, to obtain the annual average radon concentration in a room intended for human occupancy, it is recommended to perform measurements during the heating season (recommended period in Poland: October – March)⁸⁸.

It must be emphasized, however, that since these recommendations are set out exclusively in the Plan, which is not a source of universally binding law, a radon concentration measurement conducted using a different method or even outside the heating season still meets the statutory requirement established for schools and kindergartens under Article 23c(1)(1) in conjunction with Article 32a A.L.

Polish law does not impose a requirement that radon measurement itself (such as the placement of detectors or documentation of the measurement process) be conducted by a specialized, licensed entity. A suggested procedure for such measurements (*"Rational Method of Indoor Radon Measurements"*) is outlined in a 2025 publication⁸⁹.

6.3. Frequency of Measurements

The Atomic Law does not explicitly specify the frequency with which unit managers are required to fulfill the obligation to ensure radon concentration measurements. The provision of Article 17(2) A.L., applied accordingly to pupils under the requirement of Article 32a A.L., determines that the assessment of pupil exposure is conducted based on control measurements of individual doses or dosimetric measurements in the learning environment. It seems appropriate to refer subsidiarily to the Regulation of the Council of Ministers of August 11, 2021, on indicators for determining ionizing radiation doses used in exposure assessment. According to § 2(4) of this regulation, the determination of these doses is based on dosimetric measurements. Additionally, § 3(1) states that exposure assessments **must be conducted for each calendar year** by determining ionizing radiation doses based on dosimetric measurements performed at intervals not exceeding three months. If the period of exposure-related activity is shorter than three months, the assessment must be conducted upon completion of that period.

6.4. Entry into Force of the Measurement Obligation

The provisions of Article 23c A.L. came into force on September 23, 2019 (Article 39 of the Act of June 13, 2019, amending the Atomic Law and the Fire Protection Act). Article 20(2) of this Act contained a transitional provision

postponing the application of Articles 23c(2)-(4) A.L. for a period of two years. Since this deferral did not include Article 23c(1) A.L., which concerns the obligation to ensure radon concentration measurements, the actual date of its entry into force should be considered as July 31, 2020. On that date, the "radon counties" were designated by the Regulation of the Minister of Health of June 18, 2020, on areas where the annual average radioactive radon concentration in indoor air may exceed the reference level in a significant number of buildings.

Consequently, as of July 31, 2020, school, and kindergarten directors (unit managers) were required to ensure radon concentration measurements for pupils. This date also marks the beginning of the period relevant for potential violations of this obligation, triggering liability under Article 123(1)(8) A.L. in cases of non-compliance.

7. Article 23c(2) A.L. – Optimization and Information Obligations (Appropriate Application)

Article 23c(2) A.L. imposes one preventive obligation and four informational obligations on the directors of educational institutions. Some of these normative duties can be applied directly to pupils, while others require modifications.

7.1. Obligation to Ensure Optimization of Pupil Exposure

Article 23c(2) *in pr.* A.L., interpreted through the lens of Article 32a A.L., obliges the directors of educational institutions to ensure the optimization of pupil exposure in the locations identified in subsection 6.1 of this publication. The content of the optimization principle is derived from Article 9(1) A.L. This principle, applied to the present context, requires that an institution's activities be conducted in such a way that, with reasonable consideration of economic and social factors and the current state of technical knowledge, the number of exposed pupils and the probability of their exposure are minimized, and the ionizing radiation doses they receive are as low as possible. This optimization, based on Article 23c(2) A.L., is subject to the criterion of due diligence, as it is carried out "to reduce" exposure. Only Article 23c(3) A.L. is based on an effectiveness criterion, as it requires actions that "ensure" exposure reduction.

⁸⁸ The Regulation of the Minister of Economy of 15 January 2007, on the detailed conditions for the operation of heating systems (Journal of Laws No. 16, item 92) defines in § 2 point 20 the *heating season* (rather than the *heating period*, as used in the Plan) as the period during which atmospheric conditions necessitate the continuous supply of heat for heating buildings.

⁸⁹ Cf. 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*, No. 16, pp. 1–46.

7.2. Informational Obligations

The first of these, undoubtedly the easiest to fulfill, concerns increased radon exposure. Neither the Atomic Law nor the Plan specifies its scope; however, as part of so-called "good practices", it should include an acknowledgment that the pupil attends an educational institution located in a "radon county" and a reference to the legal basis for this classification (Regulation of the Minister of Health of June 18, 2020). Additionally, it should at least briefly outline the health effects of radon exposure.

Regarding the second obligation, concerning the results of radon concentration measurements, this presents a particular issue in the case of pupils. While early primary education (grades I-III) takes place within the framework of integrated learning in a single instructional room (a "classroom")⁹⁰, subject-based education for older pupils is conducted in various rooms. In such cases, it is undoubtedly necessary to provide information on the measurement results for each room subject to the measurement obligation in which a given pupil is present. Considering legal metrology⁹¹, the result of the radon concentration measurement should be presented in becquerels per cubic meter [Bq/m³]⁹². At the same time, it should be noted—albeit marginally—that Article 23d(3)(2) A.L., which specifies the requirements for an analogous type of information provided in the context of real estate transactions, includes a requirement that the reported measured value be compared with the reference level specified in Article 23b. This requirement is not included in the provision of Article 23c(2) A.L., which is a clear weakness in terms of the informational imbalance between a real estate buyer and a pupil. Therefore, a *de lege ferenda* proposal deserves recognition, aiming to eliminate this informational inequality by ensuring that the information provided to pupils (or more broadly, based on the general wording of Article 23c(2) A.L., to employees) also includes a comparison of the measurement result with the normative reference level (300 Bq/m³).

Certainly, one of the greatest challenges for school and kindergarten directors will be fulfilling the third requirement—providing pupils with information about the radiation doses they have received. This value is expressed

in sieverts [S.v.]⁹³. The annex titled "Quantities and Indicator Values for Determining Ionizing Radiation Doses Used in Exposure Assessment" to the Regulation of the Council of Ministers of 11 August 2021⁹⁴, specifies in point 4 the method for determining the effective dose burden if the source of internal exposure is radon and its progeny present in the air. This dose is determined by measuring or calculating the potential alpha energy as the total energy of alpha particles emitted during the decay of radon-222 progeny in the radioactive series up to lead-210 (excluding this isotope) and the decay of thoron-220 progeny in the radioactive series up to lead-208, expressed in joules (J). The value of the effective dose burden, expressed in sieverts (Sv), is determined as the product of the potential alpha energy concentration, expressed in joules per cubic meter (J·m⁻³), the exposure time, expressed in hours (h), and the appropriate conversion coefficient. The appropriate application of Article 23c(2) A.L. to pupils requires the adoption of the conversion coefficients for radon and thoron at the workplace specified in this regulation, which are 1.4 [Sv/J·h·m⁻³] and 0.5 [Sv/J·h·m⁻³]⁹⁵, respectively. Carrying out this calculation requires school directors not only to have knowledge of specialized parameters (energy values, radioactive series) but also to perform separate calculations for each pupil (or at least each class group) regarding the time spent in specific rooms, converted from lesson hours (45 minutes) to standard hours (60 minutes). It is a well-established fact that radon concentrations, which serve as the baseline parameter for determining radiation doses, can vary across different classrooms that a pupil occupies throughout the day.

The final requirement, contained in Article 23c(2) in fine A.L., entails informing pupils about "actions taken to reduce radon exposure in the learning environment". Undoubtedly, this refers to describing the measures outlined in section 7.1 of this article – namely, detailing the steps taken to optimize pupil exposure.

Concluding the description of the informational obligations imposed on school and kindergarten directors under Article 23c(2) A.L., it should be noted that these

⁹⁰ The Regulation of the Minister of National Education of 27 August 2012, on the core curriculum for preschool education and general education in various types of schools (Journal of Laws, item 977, as amended), Annex No. 2.

⁹¹ Cf. Pasaribu, M., Sirait, N., 2020. Harmonization of Law in the Application of Legal Metrology. *Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities*, No. 2, pp. 1199-1214; Popiolek, W., 2004. Metrologia prawna w Polsce – wczoraj, dziś, jutro [Legal Metrology in Poland – Yesterday, Today, Tomorrow]. *Pomiary Automatyka Kontrola / Measurements Automation Control*, No. 4, pp. 9–12.

⁹² Regulation of the Council of Ministers of 5 June 2020 on legal units of measurement (Journal of Laws, item 1024, as amended), Annex No. 1, item 19.

⁹³ Point 21 of Annex No. 1 to the regulation indicated in the preceding footnote.

⁹⁴ Regulation of the Council of Ministers of 11 August 2021, on indicators for determining ionizing radiation doses used in exposure assessment.

⁹⁵ The conversion factor for radon in residential homes provided in the regulation must be excluded in this context. In the home environment, particularly during sleep, physical activity decreases, and respiratory rate slows, affecting the rate of air exchange in the lungs and, consequently, the dose of inhaled radon. Applying a conversion factor designed for residential homes to pupils could lead to an underestimation of the actual radiation dose absorbed in the school environment. This approach would also be unjustified and disproportionate, as the dose for teachers is calculated based on the conversion factors specified for workplaces.

obligations are structured as a conjunctive list⁹⁶, meaning that unit managers do not have the discretion to selectively provide only certain pieces of information while omitting others.

The Atomic Law does not specify a deadline for implementing optimization measures and concerning the timing and manner of fulfilling informational obligations, it uses the vague expression "on an ongoing basis in writing".

7.3. Deadline and Method of Fulfilling the Informational Obligation

Article 23c(2) in medio in conjunction with Article 32a A.L. mandates that the informational obligation towards pupils be carried out "on an ongoing basis". The interpretation of this phrase presents challenges regarding its temporal scope and practical application. According to its dictionary definition, this term implies an immediate action, adapted to changing circumstances, and aimed at maintaining the currency of information⁹⁷. Its use in the cited provision of the Atomic Law clearly indicates a proactive obligation, requiring continuous dissemination of information as new data becomes available (e.g., providing pupils with radon concentration measurement results as they are obtained). From a philosophical perspective, the term "on an ongoing basis" is not merely a technical issue but stems from the fundamental principle of justice in the school-pupil relationship, as outlined in the preamble to the Education Law and concretized in Article 1(14) of that law (maintaining safe and hygienic learning, educational, and care conditions in schools and institutions). Delayed or incomplete information about health risks disrupts the epistemic balance between parties, contradicting the axiom of health and life protection as supreme values. The ambiguity surrounding the temporal dimension of this obligation has significant legal consequences for school and kindergarten directors, particularly in the context of Article 123(1)(9) A.L., which penalizes the failure to provide information on radiological protection. The imposition of an administrative fine requires determining the moment of the offense, which is crucial both for assessing the duration of the violation (a directive for penalty assessment under Article 124(3)(1) A.L.) and for calculating the five-year statute of

limitations for penalization (Article 125(1) A.L.). Seeking support in legal doctrine, it is relevant to refer subsidiarily to discussions regarding the term "immediately", which is closely related to "on an ongoing basis". Literature suggests that actions must be taken without undue delay⁹⁸, sometimes within a single day⁹⁹. Jurisprudence indicates that the term should be interpreted depending on the circumstances of the case and the situation of the obligated entity, though it is customarily understood to mean a period of approximately two weeks¹⁰⁰. Regardless of these attempts to clarify the imprecise wording "on an ongoing basis" in Article 23c(2) A.L., its use should be assessed negatively. The legislator could have drawn upon normative solutions from the Labour Code, which precisely and concretely specifies deadlines for fulfilling informational obligations (Article 29 § 3(1) and (2), Article 29 § 32, Article 67(19) § 6, second sentence, Article 142(1) § 1(2) and (3) of the Labour Code).

Another component of the requirement contained in Article 23c(2) in medio in conjunction with Article 32a A.L. is the obligation to provide information "in writing". In this regard, a comparative analysis is useful, as the Labour Code provisions governing analogous requirements for notifying individuals of health and life threats (Article 207a § 1(1) and (2)) do not specify the form in which such information should be communicated. Consequently, both collective notification¹⁰¹ and any method adopted by a given employer (notice boards, email) are permissible¹⁰². From the perspective of educational institution directors, the solution adopted in the Atomic Law serves as a guarantee, ensuring their legal security. Given the sanctions for failing to provide information on radiological protection (Article 123(1)(9) A.L.), it is recommended—especially for evidentiary purposes—that the required information be delivered with a receipt confirmation. However, this statement necessitates further consideration of the issue of who should be the recipient of this information.

7.4. Recipients and Form of Information Under Article 23c(2) A.L. in Educational Institutions

It must be considered that a child remains under parental authority until reaching the age of majority, which includes the duty and right of parents to exercise care over the child's person and to ensure their physical development (Article 92, 95 § 1 of the Family and Guardianship

⁹⁶ Cf. Malinowski, A., 2008. *Redagowanie tekstu prawnego. Wybrane wskazania logiczno-językowe* [Editing a Legal Text. Selected Logical and Linguistic Indications]. Legal Publishing House, Warsaw, p. 157.

⁹⁷ *Wielki Słownik Języka Polskiego* [The Great Dictionary of the Polish Language], <https://wsjp.pl/haslo/podglad/22929/na-biezaco>, [accessed: 17.01.2025].

⁹⁸ Adamiak, B., 2022. [In:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz* [Code of Administrative Procedure. Commentary], eds. B. Adamiak, J. Borkowski. Beck, Warsaw, Legalis, comm. to Article 12.

⁹⁹ Małanowski, J., 2021. [In:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz* [Code of Administrative Procedure. Commentary], eds. R. Hauser, M. Wierzbowski. Beck, Warsaw, Legalis, comm. to Article 12.

¹⁰⁰ Cf. Resolution of the Supreme Court of 19 May 1992, file No. III CZP 56/92.

¹⁰¹ Wyka, T., 2022. [In:] *Kodeks pracy. Komentarz. Tom II. Art. 94-304(5)* [Labour Code. Comment. Volume II. Art. 94-304(5)], ed. K.W. Baran. Wolters Kluwer, Warsaw, LEX/el, comm. to Art. 207(1), point 1.

¹⁰² Wojciechowski, P., 2017. [In:] *Kodeks pracy. Komentarz* [Labour Code. Commentary], ed. L. Florek. Wolters Kluwer, Warsaw, p. 1205.

Code¹⁰³). These provisions align with Article 98(2)(2) of the Education Law, which mandates that a school's statute must specify the principles of its cooperation with parents concerning, among other things, care, and prevention. For these reasons alone, it is unequivocal that the appropriate application of Article 23c(2) A.L. to pupils, as required by Article 32a A.L., necessitates that the recipients of this information be parents¹⁰⁴. This is also essential because exposure to high radon concentrations in an educational institution may require the implementation of protective measures beyond the institution itself (e.g., decisions regarding the child's activities or medical consultations). Thus, providing information solely to pupils would be insufficient and axiologically inconsistent with the purpose of radiological protection, as it is parents who are the primary decision-makers regarding their children's health. However, it remains to be considered whether denying pupils direct access to information about their exposure to radon is justified.

The most extensive body of scholarly work on radon exposure in public buildings, including schools, has been developed in the United States since the 1980s¹⁰⁵. This literature emphasizes the importance of informational communication directed at children¹⁰⁶, stressing that—aside from necessary simplifications—it should include visualized content¹⁰⁷, be non-alarming¹⁰⁸, be limited to no more than 90 seconds, and feature friendly and engaging characters as messengers¹⁰⁹. Polish law does not impose such a requirement; however, a significant analogous precedent already exists within the legal framework. The Act of May 13, 2016, on Counteracting the Threats of Sexually Motivated Crime and Protecting Minors¹¹⁰ imposes in Article 22b an obligation on the governing bodies of educational institutions to establish standards for the protection of minors. Moreover, Articles 22c(5) and 22c(7) of this law mandate that these standards be formulated with due consideration for their comprehensibility by minors, requiring both a full version and a shortened version specifically intended for children. The shortened version must include information essential to minors. This precedent indicates a normative evolution toward the active recognition of children as recipients of information tailored to their cognitive abilities. It seems advisable to recommend that school and kindergarten

directors adopt a similar approach in communicating information about radon exposure.

7.5. Entry into Force of the Obligation Under Article 23c(2)

Pursuant to Article 20(3) of the Act of June 13, 2019, amending the Atomic Law and the Fire Protection Act, the heads of units referred to in Articles 23c(2)-(4) A.L. were required to ensure optimization, information, and actions specified in these provisions for employees employed in these units within two years from the date of entry into force of this Act. This deadline expired on September 23, 2021.

As of that date, the heads of educational institutions were required, in accordance with Article 32a A.L., to begin fulfilling all obligations set forth in Article 23c(2) A.L. This date also marks the beginning of the period relevant for potential violations of these obligations, triggering liability under Article 123(1)(9) A.L. in cases of non-compliance.

8. Summary

The obligations of educational institution directors arising from the appropriate application of Articles 23c(1) and (2) A.L. to pupils reflect the fundamental principle of prevention in health protection law. The requirement to ensure radon concentration measurements and the obligation to inform about the associated risks are not merely technical procedures but rather the implementation of the idea of protecting individuals from a risk that—though invisible—has profound, long-term consequences, sometimes manifesting decades later.

From a legal axiological perspective, it must be emphasized that protection against ionizing radiation cannot be confined to the colloquial understanding of the term "pupil" but must encompass all individuals engaged in the educational and upbringing process.

The issue of access to information about exposure, both for pupils and their parents, reveals a broader problem of epistemic equality in health protection. A lack of reliable knowledge about potential hazards limits the ability to act

¹⁰³ Act of 25 February 1964 – The Family and Guardianship Code (Journal of Laws of 2023, item 2809, as amended).

¹⁰⁴ Within the meaning of this term as defined in Article 4(19) of the Education Law, this also includes the child's legal guardians as well as individuals or entities exercising foster care over the child.

¹⁰⁵ Cf. Bobkier, R., Kovler, K., Tsapalov, A., 2025 "Fusion of Horizons": Part II. Modernizing radon regulation (1954–1993). *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 283, p. 4.

¹⁰⁶ Cf. Gordon, K., Terry, P.D., Liu, X., Harris, T., Vowell, D., Yard, B., 2018. Chen J. Radon in schools: a brief review of state laws and regulations in the United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, No. 10, pp. 1-18.

¹⁰⁷ LaTour, M., Tanner Jr., J.F., 2003. Radon: Appealing to our fears. *Psychology & Marketing*, No. 5, pp. 377-394.

¹⁰⁸ 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*, No. 8, p. 13.

¹⁰⁹ Coates, R., 2014. Alert but don't alarm: radon risk communication strategies of a UK mitigator. [In:] *International Radon Symposium Proceedings, Charleston 2014*. American Association of Radon Scientists and Technologists, Hendersonville, p. 7.

¹¹⁰ Act of 13 May 2016 on Counteracting Threats of Sexual Offences and Protection of Minors (Journal of Laws of 2024, item 1802, as amended).

consciously, leading to an imbalance between the institution and those under its protection. In this light, the informational obligations of educational institution directors are not merely formal requirements but serve as a guarantee of the subjective recognition of pupils and their families.

At the same time, it should be noted that the appropriate application of the remaining provisions of the Atomic Law listed in Article 32a A.L. in relation to pupils

raises significant interpretative challenges. This issue will be the subject of a separate study.

Note about the authors

Robert Bobkier – lawyer, second-level internal auditor, member of the European Radon Association (ERA), managing director at Abraham & Ben Hadar Law and Audit. The author holds the qualifications of a senior occupational health and safety inspector.

Ewa Katarzyna Czech, DSc – professor of law (Faculty of Law, University of Białystok), author or co-author of over 130 publications, attorney-at-law.

References

- Abdul-Wahab, S.**, Ikhile, E., Ahmadi, L., Elkamel, A., and Yetilmezsoy, K., 2016. Radon In The Indoor Environment-A Review. *Fresenius Environmental Bulletin*, No. 10.
- Act of 13 June 2019** amending the Atomic Law and the Fire Protection Act (Journal of Laws, item 1593, as amended).
- Act of 13 May 2016** on Counteracting Threats of Sexual Offences and Protection of Minors (Journal of Laws of 2024, item 1802, as amended).
- Act of 14 December 2016** – Education Law (consolidated text: Journal of Laws of 2024, item 737, as amended).
- Act of 15 April 2011** on the Education Information System (Journal of Laws of 2024, item 152, as amended).
- Act of 17 December 1998**, on Pensions and Disability Benefits from the Social Insurance Fund (consolidated text: Journal of Laws of 2024, item 1631).
- Act of 25 February 1964** – The Family and Guardianship Code (Journal of Laws of 2023, item 2809, as amended).
- Act of 26 June 1974** Labour Code (Journal of Laws of 2023, item 1465).
- Act of 27 April 2001** – Environmental Protection Law (Journal of Laws of 2024, item 54, as amended).
- Act of 27 October 2017** on the Financing of Educational Tasks (Journal of Laws of 2023, item 1400).
- Act of 29 November 2000** – Atomic Law (Journal of Laws of 2024, item 1277, as amended).
- Act of 4 February 2011** on Care for Children up to the age of 3 (Journal of Laws of 2024, item 338, as amended).
- Act of 7 September 1991**, on the Education System (consolidated text: Journal of Laws of 2022, item 2230, as amended).
- Adamiak, B.**, 2022. [In:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz*, eds. B. Adamiak, J. Borkowski. Beck, Warsaw.
- Adamski, W.**, 1988. Miasto górników i tkaczy. [In:] *Kowary. Szkice z dziejów miasta. Tom 1*, eds. T. Bugaj. Karkonosze Scientific Society, Jelenia Góra.
- Announcement of the Minister of Health of 22 January 2021**, on the publication of the National Action Plan for Long-Term Risks Arising from Radon Exposure in Buildings Intended for Human Occupancy and Workplaces (Official Gazette of 2021, item 169).
- Announcement of the President of the Central Statistical Office of 11 February 2025**, on the average salary in the national economy in 2024 (Official Gazette of 2025, item 125).
- Arkansas Department of Health**, 2019. *Lonoke Community Radon Exposure Investigation*, September 4, 2019. <https://static1.squarespace.com/static/5ec3ec333d5e1123089fd333/t/624222f79ee7786534f8170d/1648501501549/AHD+Letter%2C+CO2+%26+Radon+Guide.pdf>, [accessed: 24.01.2024].
- Barbosa, S.M.**, Donner, R.V., Steinitz, G., 2015. Radon applications in geosciences – Progress & perspectives. *The European Physical Journal Special Topics*, nr 224.
- Barczak, A.**, 2020. *Kontrola podmiotów korzystających ze środowiska*. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Berkley, C.**, Ahmed, O., 1982. *Tayeb Salih Speaks: Four Interviews with the Sudanese Novelist*. Embassy of the Democratic Republic of the Sudan, Washington.
- Bielewski W.**, Fornalski, K.W., 2018. Obliczenia obszaru ograniczonego użytkowania wokół pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. *Postępy Techniki Jądrowej*, No. 2.
- Blachucki, M.**, 2015. Wytyczne w sprawie nakładania administracyjnych kar pieniężnych (na przykładzie wytycznych wydawanych przez prezesa UOKiK). [In:] *Administracyjne kary pieniężne w demokratycznym państwie prawa*, ed. M. Blachucki. Office of the Commissioner for Human Rights, Warsaw.
- Blachucki, M.**, 2014. Urzędowe wyjaśnienia przepisów prawa wydawane przez organy administracji publicznej. [In:] *Źródła prawa administracyjnego a ochrona wolności i praw obywateli*, eds. M. Blachucki, T. Górzyńska. Supreme Administrative Court, Warsaw. Stankiewicz, R., 2012. Prawotwórcza rola administracji w kształtowaniu sektora energetycznego (na przykładzie polityki energetycznej państwa). [In:] *Legislacja administracyjna. Teoria, orzecznictwo, praktyka*, eds. M. Stahl, Z. Duniewska. Wolters Kluwer, Warsaw.
- 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*, No. 4.
- Bobkier, R.**, 2024. Problematyka interpretacyjna pojęcia „kontrolowanej działalności zawodowej”. Rozważania na tle definicji dawki granicznej w Prawie atomowym. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki*, No. 2.
- Bobkier, R.**, Kovler, K., Tsapalov, A., 2025 ”Fusion of Horizons”: Part II. Modernizing radon regulation (1954–1993). *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 283.
- Bobkier, R.**, Kovler, K., Tsapalov, A., 2025. ”Fusion of Horizons”: Part I. Historical context and early radon discoveries (until 1951). *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 283.
- Borzęcki, R.**, Wójcik, D., Kalisz, M., 2018. Przeróbka rud uranu w rejonie Kowar. *Hereditas Minariorum*, No. 5.
- Brody, A.S.**, Frush, D.P., Hunda, W., Brent, R.L., 2007. Radiation risk to children from computed tomography. *Pediatrics*, No. 3.
- Budzisz, R.**, 2023. Badania sanitarno-epidemiologiczne. [In:] *Zapobieganie oraz zwalczanie zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi. Zagadnienia prawne*, ed. R. Budzisz. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Bulewicz, K.**, Olszewski, J., Domienik-Andrzejewska, J., 2025. Analiza wyników komercyjnych pomiarów radonu w latach 2022–2023. *Medycyna Pracy*, No. 1.

- Central Statistical Office**, 2024. *Administrative division of Poland*.
<https://stat.gov.pl/statystyka-regionalna/jednostki-terytorialne/podzial-administracyjny-polski/>, [accessed: 22.01.2025].
- Chief Sanitary Inspector**, *Komunikat w sprawie kontynuacji w 2022 r. wykonywania, przez spółkę ACTE sp. z o.o. z siedzibą w Warszawie przy ul. Krańcowej 49, na zlecenie Głównego Inspektora Sanitarnego, pomiarów średniorocznego stężenia radonu w budynkach* [Announcement on the continuation in 2022 of measurements of the average annual concentration of radon in buildings by ACTE sp. z o.o. with its registered office in Warsaw at 49 Krańcowa Street, at the request of the Chief Sanitary Inspector], 22 September 2022,
<https://www.gov.pl/web/gis/komunikat-w-sprawie-kontynuacji-w-2022-r-wykonywania-przez-spolke-acte-sp-z-oo-z-siedziba-w-warszawie-pr-ul-krancowej-49-na-zlecenie-glownego-inspektora-sanitarnego-pom-sredniorocznego-stezenia-radonu-w-budynkach>, [accessed: 30.12.2024].
- Cincinelli, A.**, Martellini, T., 2017. Indoor air quality and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, No. 14.
- Coates, R.**, 2014. Alert but don't alarm: radon risk communication strategies of a UK mitigator. [In:] *International Radon Symposium Proceedings, Charleston 2014*. American Association of Radon Scientists and Technologists, Hendersonville.
- Constitution of the Republic of Poland of 2 April 1997** (Journal of Laws No. 78, item 483, as amended).
- Coretchi, L.**, Overcenco, A., Ababii, A., Capatina, A., Bilba, V., Salaru, I., 2024. Contribution to the study of "smoking and radon" interaction in the lung cancer development across the Republic of Moldova. *One Health & Risk Management*, No. 1.
- Council Directive 2013/59/Euratom** of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the risks arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom (OJ L 2014 No. 13, as amended).
- Długosz, T.**, Swora, M., Walaszek-Pyziół, A., Wludyka, T., Żurawik, A., 2013. Szczególna regulacja działalności przedsiębiorstw w sektorach sieciowych. [In:] *Publiczne prawo gospodarcze. Tom 8B. System Prawa Administracyjnego*, eds. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel. Beck, Warsaw.
- Dobrzyńska, M.M.**, Gajowik A., Wieprzowski, K., 2023. Radon-occurrence and impact on the health. *Roczniki Państwowego Instytut Higieny / Annals of the National Institute of Hygiene*, No. 1.
- Doczekalska, A.**, 2021. *Język prawny w tworzeniu i transpozycji prawa Unii Europejskiej. Procesy hybrydyzacji*. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Feltynowski, M.**, 2018. *Planowanie przestrzenne gmin wiejskich. Zastosowanie koncepcji polityki opartej na dowodach*. Publishing House of the University of Łódź, Łódź.
- Field, R.W.**, 2020. Reducing the risks from radon: Information and interventions. A guide for health care providers. *Conference of Radiation Control Program Directors Publication*, No. 3, <https://portal.ct.gov/-/media/DPH/Radon-Program/HCPProvGuide-Update-9-17-20.pdf>, [accessed: 16.01.2025].
- Florek, L.**, (ed.), 2017. *Kodeks pracy. Komentarz*. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Gaskin, J.**, Coyle, D., Whyte, J., Krewski, D., 2018. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon. *Environmental Health Perspectives*, No. 5.
- Golecki, M.J.**, 2019. W poszukiwaniu optymalnego prawodawcy. Dylematy regulacji i deregulacji z perspektywy ekonomicznej analizy prawa. *Internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny*, No. 8.
- Gordon, K.**, Terry, P.D., Liu, X., Harris, T., Vowell, D., Yard, B., 2018. Chen J. Radon in schools: a brief review of state laws and regulations in the United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, No. 10.
- Gruszecki, K.**, 2022. *Prawo ochrony środowiska. Komentarz* [Environmental Protection Law: Commentary]. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Heller, M.**, 2008. Granice czasu, przestrzeni i prawdopodobieństwa. *Filozofia Nauki*, No. 3-4.
- Hess, F.L.**, 1932. Radium, Uranium, and Vanadium. [In:] *Mineral Resources of the United States, 1933, Part I – Metals*. Government Printing Office, Washington.
- Jantowski, L.**, 2024. [In:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany*, eds. M. Balwicka-Szczyrba, A. Sylwestrzak. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Jokiel, M.**, Jokiel, G., Bobkier, R., Babczuk, A., 2023. The Impact of New Legal Regulations on The Functioning of Businesses Based on The Example of Atomic Law in Poland. *Communications of International Proceedings*, No. 6,
<https://ibimapublishing.com/p-articles/42MGT/2023/4246623/4246623.pdf>, [accessed: 29.01.2025].
- Judgment of the Provincial Administrative Court in Gliwice of 2.07.2019**, III SA/GI 426/19, LEX No. 2706528.
- Judgment of the Provincial Administrative Court in Gliwice of 21.10.2020**, II SA/GI 640/20, LEX No. 3096456.
- Judgment of the Provincial Administrative Court in Rzeszów of 28.06.2023**, II SA/Rz 43/23, LEX No. 3600292.
- Judgment of the Provincial Administrative Court in Warsaw of 19.02.2019**, IV SA/Wa 1763/18, LEX No. 3060124.
- Judgment of the Supreme Administrative Court of 19.10.2021**, II OSK 400/21, LEX No. 3319061.
- Kaczmarczyk, M.R.**, 2019. *Aporia of Freedom. Critique of Social Theory*. Nicolaus Copernicus University Publishing House, Toruń.
- Karaszewski, G.**, 2023. [In:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany*, eds. J. Ciszewski, P. Nazaruk. Wolters Kluwer.
- Karlsch, R.**, Zeman, Z.A., 2002. *Orangeheime: das Erzgebirge im Brennpunkt der Weltpolitik 1933-1960*. Ch. Links Verlag, Berlin.
- Kazalska, O.**, 2018. Zwolnienie z konstytucyjnego wymogu kontrasygnaty – rozważania na tle niekontrasygnowanych obwieszczeń Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej o wolnych stanowiskach sędziego w Sądzie Najwyższym i Naczelnym Sądzie Administracyjnym. *Studia Iuridica*, vol. 56.
- Koszuk, Ł.**, 2025. *Radon in buildings*. National Atomic Energy Agency, Warsaw.
- Kovler K.**, A. Tsapalov, R. Bobkier, R. Wiegiers, W. Schroeyers, T. Kovács, E. Toth-Bodrogi, O. El Bounagui, A. Babczuk, 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*, No. 285.
- Książek, D.**, 2013. Pojęcie i podział wyrażenia „miejsce pracy”. *Studia z Zakresu Prawa Pracy i Polityki Społecznej*, No. 1.
- Kuźmicka-Sulikowska, J.**, 2024. [In:] *Zobowiązania. Część ogólna. Tom II. Komentarz*, ed. P. Machnikowski. Beck, Warsaw.
- LaTour, M.**, Tanner Jr., J.F., 2003. Radon: Appealing to our fears. *Psychology & Marketing*, No. 5.
- 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*, No. 8.
- Linhares, J.M.A.**, 2013. Pojęcie dowodu jako otwarta rana prawa: niezmiennie błędna aporia?. *Archiwum Filozofii Prawa i Filozofii Społecznej*, No. 1.
- Machnikowski, P.**, Śmieja, A., 2023. [In:] *Prawo zobowiązań – część ogólna. System Prawa Prywatnego. Tom 6*, ed. A. Olejniczak. Beck, Warsaw.
- Malanowski, J.**, 2021. [In:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz*, eds. R. Hauser, M. Wierzbowski. Beck, Warsaw.
- Malinowski, A.**, 2008. *Redagowanie tekstu prawnego. Wybrane wskazania logiczno-językowe*. Legal Publishing House, Warsaw.
- Matuła, J.**, 1977. Ocena zasobów produktów rozszczepienia w paliwie jądrowych reaktorów energetycznych. *Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej*, No. 49.

- Mazur, J., Kozak, K., 2020.** Nowe regulacje dotyczące stężeń radonu (Rn-222) w budynkach i miejscach pracy w zapisach znolizowanej ustawy Prawo atomowe. *Inżynier i Fizyk Medyczny*, No. 3.
- Mik, C., 2019.** Ocena rządowego projektu nowelizacji ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie. *Zeszyty Prawnicze Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu*, No. 2.
- Mosch, C.F., 1829.** *Zur Geschichte des Bergbaues in Deutschland*. Regierungs-Buchdruckerei, Liegnitz.
- Niewiadomski, T., Godek, J., Jasińska M., Wąsiołek, P., 1983.** Ocena wielkości natężenia promieniowania jonizującego w obszarze strefy ochronnej Huty im. Lenina i Cementowni N.H. i jego skutków w odniesieniu do: gleb, wód i upraw roślinnych. Institute of Nuclear Technology, Kraków.
- Niewiadomski, T., Wąsiołek, P., Olszewska, M., Ryba, E., Godek, J., Waligorski, M., 1984.** Oszacowanie radiacyjnych skutków działalności człowieka dla mieszkańców woj. m. krakowskiego. Institute of Nuclear Technology, Kraków.
- Olszewski, J., Walczak, K., 2020.** Radon in houses of Kowary–Sudety Mountains, Poland. *Nukleonika*, No. 2.
- Page, S., 1994.** EPA's strategy to reduce risk of radon. [In:] *Radon. Prevalence, measurements, health risks and control*, ed. N.L. Nagda. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Pasaribu, M., Sirait, N., 2020.** Harmonization of Law in the Application of Legal Metrology. *Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities*, No. 2.
- Pawel, D.J., Puskin, J.S., 2004.** The U.S. Environmental Protection Agency's Assessment of Risks from Indoor Radon. *Health Physics*, No. 1.
- Pismo Głównego Inspektora Sanitarnego z dnia 8 lipca 2024 r.** – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej, BI. OI.0134.92.2024.
- Podgórska, Z., 2022.** Metody pomiaru radonu w powietrzu, glebie i wodzie. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki*, No. 1.
- Poku, B., Hussaini, S., 2021.** Radon in child care centers: An examination of state laws and regulations in the United States. *GSC Advanced Research and Reviews*, No. 3.
- Popiołek, W., 2004.** Metrologia prawna w Polsce – wczoraj, dziś, jutro. *Pomiary Automatyka Kontrola*, No. 4.
- Przybyszewski, W., Wideł, M., Szurko, A., Maniakowski, Z., 2008.** Wpływ mocy dawki na komórkowe, biochemiczne i molekularne efekty promieniowania. *Postęp Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, No. 62.
- Rääf, C.L., Tondel, M., Isaksson, M., Wålander, R., 2023.** Average uranium bedrock concentration in Swedish municipalities predicts male lung cancer incidence rate when adjusted for smoking prevalence: Indication of a cumulative radon induced detriment. *Science of the Total Environment*, No. 855.
- Regulation of the Council of Ministers of 11 August 2021**, on indicators for determining ionizing radiation doses used in exposure assessment (Journal of Laws, item 1657).
- Regulation of the Council of Ministers of 5 June 2020** on legal units of measurement (Journal of Laws, item 1024, as amended).
- Regulation of the Minister of Economy of January 15, 2007**, on the detailed conditions for the operation of heating systems (Journal of Laws No. 16, item 92).
- Regulation of the Minister of Health of 18 June 2020** on areas where the average annual radioactive concentration of radon in indoor air in a significant number of buildings may exceed the reference level (Journal of Laws, item 1139).
- Regulation of the Minister of Infrastructure of April 12, 2002**, on the technical conditions that buildings and their location must meet (consolidated text: Journal of Laws of 2022, item 1225).
- Regulation of the Minister of Labour and Social Policy of 26 September 1997** on general occupational health and safety regulations (Journal of Laws of 2003 No. 169, item 1650 as amended).
- Regulation of the Minister of National Education of 27 August 2012**, on the core curriculum for preschool education and general education in various types of schools (Journal of Laws, item 977, as amended).
- Resolution of the Supreme Court of 19 May 1992**, file No. III CZP 56/92.
- Rogoziński, P., 2021.** Ograniczenie prawa do rozporządzania i korzystania przez właściciela z lokalu w razie zastosowania wobec niego środka zapobiegawczego z art. 275a K.p.k. *Nieruchomości. Kwartalnik Ministerstwa Sprawiedliwości*, No. 1.
- Rycak, A., 2013.** *Powszechna ochrona trwałości stosunku pracy*. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Skłodowska-Curie, M., 1926.** Stan obecny chemii polonu. *Roczniki Chemii*, vol. 6.
- Steinberg, G.M., 2023.** The apartheid and racism campaigns—the NGO contribution to antisemitism. *Israel Affairs*, No. 1.
- Sukanya, S., Sabu, J., 2023.** *Environmental Radon: A Tracer for Hydrological Studies*. Springer, Singapore.
- Tervinder, M.S., Oborska-Kumaszynska, D., Ratcliffe, A., 2013.** Testy akceptacyjne i dopuszczające dla systemu PDR. *Inżynier i Fizyk Medyczny* No. 2.
- Tomaszewska, M., 2022.** [In:] *Kodeks pracy. Komentarz. Tom I. Art. 1-93*, ed. K.W. Baran. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Topolewska, M., 2019.** *Żłobek i przedszkole nie mogą być zespołem*. Gazeta Prawna, 4 February 2019, <https://serwisy.gazetaprawna.pl/samorzad/artykuly/1395862,zlobek-i-przedszkole-nie-moga-byc-zespolem.html> (accessed: 28.02.2025).
- 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*, No. 16.
- Turczyńska, A., Kułak, P., Gościak, E., Krajewska-Kułak, E., 2016.** Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku. *Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne*, No. 1.
- Wałachowska, M., Ziemiak, M.P., 2018.** [In:] *Kodeks cywilny. Komentarz. Tom III. Zobowiązania. Część ogólna (art. 353-534)*, eds. M. Fras, M. Habdas. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Warcieński, M., 2005.** Głos do wyroku SN z dnia 5 marca 2002 r., I CKN 1156/99. *Orzecznictwo Sądów Polskich*, No. 10.
- Wielki Słownik Języka Polskiego**, <https://wsjp.pl/haslo/podglad/22929/na-biezaco>, [accessed: 17.01.2025].
- Wiśniewski, J., 2023.** Miejsce wykonywania pracy w świetle przepisów prawa pracy. *Studia Prawnoustrojowe*, No. 60.
- Wolanin, M., 2022.** Dzieci i młodzież w rozumieniu ustawy o systemie oświaty. Głos częściowo krytyczny do wyroku Wojewódzkiego Sądu Administracyjnego w Gliwicach z 2 lipca 2019 r. (III SA/GI 426/19). *Orzecznictwo w Sprawach Samorządowych*, No. 2.
- Wyka, T., 2022.** [In:] *Kodeks pracy. Komentarz. Tom II. Art. 94-304(5)* ed. K.W. Baran. Wolters Kluwer, Warsaw.
- Wysocka, M., Skubacz, K., Chmielewska, I., Urban, P., Bonczyk, M., 2019.** Radon migration in the area around the coal mine during closing process. *International Journal of Coal Geology*, No. 212.
- Zeeb, H., Shannoun, F. (eds.), 2009.** *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. World Health Organization, Geneva.
- Zepek, M., 2022.** [In:] *Kodeks cywilny. Tom II. Komentarz. Art. 353–626*, ed. M. Gutowski. Beck, Warsaw.
- Żelechowicz M., 2017.** List do Redakcji dotyczący pracy pt. „Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku. *Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne*, No. 1.

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” wydawany jest od 1989 r. Do 2013 r. był drukowany i kolportowany (ostatnio w nakładzie 700 egzemplarzy) wśród osób i instytucji zainteresowanych zagadnieniami dozoru nad bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną. Od 2014 r. biuletyn wydawany jest w nowej, elektronicznej formie. Każdy numer biuletynu zamieszczany jest na stronie internetowej.

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna” znajduje się w wykazie czasopism naukowych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Kwartalnik wydawany przez PAA otrzymał 40 pkt. w następujących dyscyplinach naukowych:

- nauki o bezpieczeństwie,
- nauki fizyczne,
- nauki chemiczne,
- nauki prawne,
- nauki medyczne.

Informacja dla autorów

Wydawca przyjmuje artykuły naukowe, których tematyka jest związana z zapewnieniem i kontrolą bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, w tym również związane z zabezpieczeniem i ochroną fizyczną materiałów jądrowych i obiektów jądrowych, technologiami jądrowymi i technikami radiacyjnymi, fizyką i chemią oraz inżynierią jądrową, naukami prawnymi, geologią i geofizyką czy bezpieczeństwem narodowym.

Każdy artykuł zamieszczony w biuletynie jest recenzowany przez dwóch recenzentów.

Zasady ogólne

Tekst artykułu powinien prezentować aktualny stan wiedzy na poruszany temat oraz najnowsze dane. Artykuł powinien być podzielony na mniejsze logiczne fragmenty redakcyjne, opatrzone śródtytułami. Artykuł nie może być wcześniej publikowany ani zgłoszony do publikacji w innym czasopiśmie. Wydawca zastrzega sobie prawo nieprzyjęcia artykułu do publikacji, dokonywania skrótów, wprowadzania poprawek stylistycznych i redakcyjnych oraz zmian w tytule artykułu. Autorzy są zobowiązani do współpracy z Wydawcą w całym procesie przygotowywania artykułu do publikacji, w tym do terminowej korekty autorskiej.

Zgłoszenie dzieła

Egzemplarze artykułu wraz z pełnym zestawem ilustracji mogą być przesyłane na adres:

Biuletyn „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”

Państwowa Agencja Atomistyki

ul. Nowy Świat 6/12,

00-400 Warszawa, Polska

E-mail: biuletyn@paa.gov.pl

Zachęcamy do przysyłania artykułów drogą elektroniczną na wyżej wskazany adres e-mail. Szczegółowe informacje można uzyskać na stronie internetowej:

<https://www.gov.pl/web/paa/biuletyn-bezpieczenstwo-jadrowe-i-ochrona-radiologiczna>



Państwowa Agencja Atomistyki
ul. Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa
www.gov.pl/web/paa