



PAŃSTWOWA
AGENCJA
ATOMISTYKI

e-ISSN 2353-9062
ISSN 0867-4752

BIULETYN

BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

2 (136) 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 JANECEK** – przewodniczący Rady

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

prof. dr hab. n. med. **Marek K. JANIĄK** – 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 2 (136) 2025
Warszawa

Spis treści

- 5** Redakcja Biuletynu BjiOR PAA
Zmarł Witold Łada
- 7** Andrzej G. Chmielewski
Technology Readiness Level indicators, and the nuclear technologies currently being offered
- 20** Anna Łuczak
Charakterystyka neutronowa kaset paliwowych w reaktorze PWR na przykładzie modelu BEAVRS
- 34** Wojciech Głuszewski
Radioliza polimerowych wyrobów medycznych na przykładzie polipropylenu
- 40** Robert Bobkier, Ewa Katarzyna Czech
Radon w jednostkach systemu oświaty. Część I: obowiązki kierowników jednostek systemu oświaty względem uczniów na gruncie art. 23c ust. 1-2 Prawa atomowego
- 61** Maria Kubicka, Wojciech Głuszewski
Konferencja SIOR 2025

Szanowni Państwo

Bieżący numer otwiera wspomnienie o wieloletnim Wiceprezecie i Głównym Inspektorze Dozoru Jądrowego, Witoldzie Ładzie, zmarłym w czerwcu bieżącego roku. Przez wiele lat był on także przewodniczącym komisji egzaminacyjnej Prezesa PAA na uprawnienia inspektorów ochrony radiologicznej (IOR) jak również w latach 1994–2008 sprawował nadzór merytoryczny nad naszym Biuletynem.

Pierwszym z opublikowanych artykułów jest wersja anglojęzyczna opracowania, poświęconego zagadnieniu oceny poziomu gotowości technologicznej nowo wdrażanych technologii, opublikowanego w poprzednim numerze. **Andrzej Chmielewski** podejmuje w nim temat konieczności oceny dojrzałości technologicznej nowych technologii radiacyjnych czy jądrowych przed podjęciem decyzji o ich wdrożeniu. Autor podaje przykład wdrożenia skomplikowanej technologii radiacyjnej poprzedzonej oszacowaniem poziomu jej gotowości technologicznej według skali TRL (*Technical Readiness Level*) oraz przytacza rezultaty oceny z wykorzystaniem TRL postępow prac w zakresie rozwoju nowych technologii jądrowych, jakimi są małe reaktory modułowe SMR.

Drugi z opublikowanych artykułów stanowi przykład zastosowania współczesnych kodów obliczeniowych w analizach reaktywnościowych reaktorów chłodzonych i moderowanych wodą, prowadzonych m.in. w ramach dozoru jądrowego. **Anna Łuczak** porównuje w nim wyniki obliczeń neutronowych, które wykonała przy pomocy modułu Polaris pakietu SCALE, dla dziewięciu typów kaset paliwowych, różniących się wzbogaceniem paliwa i liczbą prętów z wypalającą się trucizną. Analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem dwóch wersji bibliotek przekrojów czynnych: 56- i 252-grupowej. Na podstawie wyników obliczeń, zaprezentowanych w artykule na kilku nastu wykresach, autorka dokonała oceny wpływu wyboru wersji biblioteki na otrzymywane wartości współczynnika mnożenia neutronów i reaktywności w funkcji wypalenia paliwa, oraz na czas obliczeń.

W trzecim artykule **Wojciech Głuszewski**, przy okazji relacji wyników konferencji poświęconej (prowadzonym przez ostatnich kilka lat w ramach projektu Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej – MAEA) badaniom radiolizy polimerów stosowanych w wyrobach medycznych, przedstawia wyniki i wnioski z własnego eksperymentu, potwierdzającego podatność polipropylenu na postradiacyjną oksydegradację, z czego wynika konieczność odpowiedniego doboru materiału szczelnych opakowań wyrobów medycznych przed poddaniem ich sterylizacji radiacyjnej. Cenną wartością dodatnią artykułu jest zwięzły lecz wyczerpujący rys historyczny badań nad radiacyjną modyfikacją polimerów, stanowiący ciekawy kontekst dla przedstawionych badań własnych.

Ostatni artykuł dotyczy zapewnienia pomiarów stężenia radonu oraz realizacji działań optymalizacyjnych i informacyjnych. **Robert Bobkier i Ewa Katrzyna Czech** analizują w nim obowiązki kierowników jednostek systemu oświaty (dyrektorów szkół i przedszkoli), wynikające z nowelizacji ustawy Prawo atomowe w 2019 roku, dotyczące sytuacji narażenia na radon, w kontekście ich odpowiedniego stosowania do uczniów.

Numer zamyka informacja o konferencji Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej (SIOR), która odbyła się w czerwcu bieżącego roku w Katowicach.



Życzymy Państwu owocnej lektury,
Redaktor naczelny
Maciej Jurkowski

Zmarł Witold Łada

Ze smutkiem przyjęliśmy informację o śmierci w dniu 7 czerwca 2025 roku pana Witolda Łady, wieloletniego Wiceprezesa Państwowej Agencji Atomistyki i Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego. Pochowany został na cmentarzu grabowskiej parafii św. Zofii Barat przy ul. Poloneza w dzielnicy Ursynów w Warszawie.

Witold Łada był absolwentem Wydziału Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie w 1959 roku uzyskał tytuł magistra fizyki. Już podczas studiów rozpoczął pracę zawodową w Instytucie Badań Jądrowych, pracując od jego powstania (1955) w Świerku, w dziale odpowiadającym za produkcję i dystrybucję izotopów. W 1980 roku, podobnie jak większość pracowników IBJ, zaangażował się w ruch „Solidarność”. Po wprowadzeniu stanu wojennego w grudniu 1981 roku i likwidacji instytutu w 1982, musiał poszukać nowego miejsca zatrudnienia. W rezultacie, w 1983 roku podjął pracę w Zakładzie Dozymetrii Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej, angażując się również w działalność społeczną na rzecz obrony praw pracowniczych, jako mąż zaufania załogi CLOR.



W połowie 1992 roku nowo powołany wówczas Prezes PAA, prof. Jerzy Niewodniczański, zaproponował mu stanowisko wiceprezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Funkcję tę Witold Łada pełnił przez ponad 15 lat, obejmując również w 1993 roku funkcję Głównego Inspektora Dozoru Jądrowego (GIDJ). W 1994 roku przejął także pieczę nad wydawaniem naszego Biuletynu informacyjnego PAA „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna”. Wszystkie te funkcje te sprawował nieprzerwanie aż do przejścia na emeryturę w roku 2008.

Jako GIDJ, bezpośrednio odpowiedzialny za zorganizowanie i prowadzenie nadzoru i kontroli w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej działalności związanych z narażeniem na promieniowanie jonizujące w Polsce, Witold Łada stanął przed trudnym i często niewdzięcznym zadaniem dostosowania organizacji i priorytetów sprawowania dozoru jądrowego do nowej sytuacji, jaka wystąpiła po załamaniu się polskiego programu jądrowego, w wyniku traumy poczynobylskiej i przemian ustrojowych dokonujących się w Polsce po 1989 roku. Nowe wyzwania tworzyła także konieczność dokonania zmian ram prawnych i organizacyjnych dozoru, wynikająca z ubiegania się o członkostwo Polski w Unii Europejskiej. Niewątpliwą zasługą Witolda Łady było włączenie przy niewielkich stratach osobowych i z zachowaniem ciągłości prac, niemal całego zespołu dozoru jądrowego ze zlikwidowanego w końcu 1996 roku Państwowego Inspektoratu Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej (PIBJiOR) bezpośrednio w strukturę organizacyjną Państwowej Agencji Atomistyki, przy równoczesnej gruntownej reorganizacji samej Agencji. W PAA utworzono wtedy dwa departamenty „dozorowe”: departament bezpieczeństwa jądrowego i radiacyjnego (DBJiR) wykonujący dozór obiektów¹ oraz departament nadzoru zastosowań promieniowania jonizującego (DNZPJ) wykonujący dozór pozostałych działalności z promieniowaniem jonizującym, oba pod bezpośrednim nadzorem GIDJ. W DBJiR podjęto prace nad zorganizowaniem Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych (CEZAR), które w 2002 roku wyodrębniono jako trzeci departament „dozorowy” w PAA. Sukcesem Witolda Łady było także przeniesienie do PAA z instytutu naukowo-badawczego, jakim stał się wtedy CLOR, zadań właściwych urzędowi administracji rządowej, takich jak ocena sytuacji radiacyjnej kraju i wczesne powiadamianie o zdarzeniach radiacyjnych mogących powodować skutki transgraniczne. Zasługą Witolda Łady było wyposażenie CEZAR w niezbędne narzędzia poprzez nawiązanie i rozwinięcie współpracy z Danią w zakresie

¹ Reaktorów jądrowych oraz obiektów przechowywania lub składowania odpadów promieniotwórczych.

systemów monitoringu radiacyjnego środowiska, co pozwoliło na zainstalowanie na terenie Polski sieci duńskich automatycznych stacji monitoringu radiacyjnego, rejestrujących i przekazujących *on-line* w czasie rzeczywistym dane pomiarowe do CEZAR w PAA. W ramach nawiązanej współpracy PAA z duńską agencją zarządzania kryzysowego DEMA (*Danish Emergency Management Agency*) zainstalowano także w CEZAR system ARGOS, pozwalający na prognozowanie rozprzestrzeniania się skażeń promieniotwórczych uwolnionych na terenie Europy Środkowej lub Wschodniej do środowiska w wyniku zdarzenia radiacyjnego. Pod kierownictwem W. Łady dokonano także znacznego usprawnienia procesu kontroli prowadzonych przez inspektorów dozoru jądowego i szczególnie w DNZPJ z roku na rok wydawnictwo zwiększano ich liczbę.

Nadzorując wydawanie Biuletynu Witold Łada zadbał o publikację w nim tłumaczeń uchwalanych w tym czasie dyrektyw EURATOM, międzynarodowych konwencji i umów dotyczących bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej. Przez wiele lat osobiście dbał także o poziom wyszkolenie inspektorów ochrony radiologicznej (IOR), jako przewodniczący komisji egzaminacyjnej Prezesa PAA na to uprawnienie.

Był specjalistą o ogromnym doświadczeniu i wiedzy praktycznej w zakresie produkcji i wykorzystania źródeł promieniotwórczych oraz dozymetrii promieniowania jonizującego i metod stosowanych w ochronie radiologicznej. W innych dziedzinach potrafił wykorzystać wiedzę i umiejętności najlepszych specjalistów, do których umiał dotrzeć i znając się na ludziach, stworzyć im dobre warunki współpracy, gwarantujące efektywne wykonanie stawianych przed dozorem zadań.

Dbął o pracowników, stawiał im zadania dość ambitne, ale możliwe do wykonania. Doceniał znaczenie pracy zespołowej, w dobrej atmosferze, tworzącej pozytywne nastawienie do wykonywanych zadań w zgranym zespole. Dbął także o indywidualny rozwój zawodowy pracowników, umożliwiając im udział w kursach i stażach zawodowych, międzynarodowych grupach roboczych i konferencjach.

Był człowiekiem otwartym, z poczuciem humoru, łatwo nawiązującym kontakty, a przy tym stanowczym, potrafiącym trzeźwo ocenić sytuację i konsekwentnie dążyć do osiągnięcia postawionych celów. W swojej ponad piętnastoletniej służbie na rządowym stanowisku musiał czasem podejmować trudne decyzje, nie przysparzające mu przyjaciół, ale przeciwności pokonywał z podniesionym czołem i osiągał sukcesy. A celem nadrzędnym było dla niego zawsze zapewnienie bezpieczeństwa Polsce i Polakom. Cześć Jego pamięci! *Requiescat in pace!*

**Kierownictwo i pracownicy Państwowej Agencji Atomistyki,
były Główny Inspektor i inspektorzy dozoru jądowego,
Redakcja Biuletynu BjiOR PAA**

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

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

Andrzej G. Chmielewski
Institute of Nuclear Chemistry and Technology
(Instytut Chemii i Techniki Jądrowej)

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.

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 referatu 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.

1. Introduction

The process based on the *Technology Readiness Level* (TRL) scale is used to quantitatively and qualitatively assess the maturity of a given technology. The TRL process was developed and is therefore used by the US *Department of Defense* (DoD) for the development and implementation of new technologies and systems for defence applications. In the 1980s, NASA successfully used the TRL process to develop and implement new systems for space applications. TRLs, i.e. the technology readiness levels, are used to define the degree of advancement of technology and enable a comparison of the state of advancement of work on technologies. The introduction of new technologies from the laboratory to the market

requires a transition through the continuum of research, development, demonstration and implementation of RDDD (*Research, Development, Demonstration & Deployment*). This is successfully used by the Office of Technology Transitions of the Department of Energy (DoE), which is tasked with overseeing commercialization activities across the department and beyond. In order to implement new solutions on a commercial scale, both technical and ecosystem-related obstacles must be overcome. The management of modern technology portfolios can be improved by complementing the widely used technological readiness level framework. However, technical feasibility is only half the battle when it comes to implementing a product on a commercial scale. Other

adoption issues – such as product matching, demand, supply chain, regulatory risk, and workforce availability – play a role in the likelihood of successful implementation of technology.

The need to create such a scale results from the fact that currently decisions regarding the financing of projects and the commercialization of technology are decided by industrialists, economists, lawyers, and in the case of defence or large projects that are complex technical activities and of great social importance, such as the construction of nuclear power plants, also politicians. The sequencing of activities similar to TRL results from the knowledge passed on to students, future engineers during lectures at technical universities. This direction was created for people who want to be a bridge between scientists, creators of new solutions and engineers from other fields, combining, when implementing the project, their skills and an interdisciplinary view of industrial processes.

The diagram of activities taught to students includes all stages listed on the TRL scale: Laboratory research and development of selected technology elements; Technology optimization; Miniature model installation; Semi-technical installation – scale-up; Industrial installation – production [1].

2. Definitions of Technology Readiness Levels (TRLs) in the World, the EU and Poland

The TRL scale has been designed to streamline decision-making processes and technology development from idea to implementation. Firstly, the main advantage of the TRL scale is that it establishes a universal framework for assessing the level of maturity of technology. Therefore, it promotes a common understanding among various stakeholders in the field of technological maturity assessment, serving them as a common language in project evaluation and making appropriate decisions.

The use of TRLs currently serves as an eligibility criterion for certain EU programmes, providing a clear indication of the level of technological maturity required to qualify a project for funding. EU funding programmes have different objectives that require different levels of TRL, and an in-depth understanding of TRL can help to provide the necessary funding for a project. Applicants may use this information to ensure that their project meets the necessary requirements and evaluators shall use it to assess the project.

The TRL also allows project managers to identify and predict potential risks in the initial stages of the project, through the initial stages of testing the proposed solutions and processes. Lower TRLs are typically associated with higher risk. Various processes and milestones integrated into the TRL scale allow managers to address potential

risks, reducing the possibility of encountering significant problems in the later stages of the project. In this way, the TRL indicators help to ensure that the technology is properly tested and verified before it is deployed on a large scale.

The TRL serves not only as a tool for managing and mitigating risk, but also as a valuable planning tool in decision-making in general. It defines a roadmap, allowing project managers to set realistic goals and identify key milestones to be achieved before the technology is ready for commercialization. Although projects with lower TRLs typically experience more missed deadlines than projects with higher TRLs, the TRL scale still proves useful in setting achievable targets.

Definition and description of individual indicators of technological readiness (TRL) developed and adopted by the said Office for Technological Transitions of the DOE are presented in Table 1.

This document gives the development to achieve TRL 8, commercialization takes place in TRL 9. Usually in the USA, the EU and Poland, a scale from TRL 1 to TRL 9 is used.

In the “Horizon Europe” programme, the technological readiness levels are used as an indicator for a better classification of presented projects [3]. Technological readiness levels enable applicants and evaluators to adapt project applications to the expectations of the European Commission by providing a common unit of measure of their progress and value. For example, in the guidelines of various financing programmes, a higher level of technological readiness means that projects in the area of submitting applications are sought. On the other hand, the low level of technological readiness may indicate that the invitation focuses on research and development projects. With regard to its financing instruments, the European Commission has adapted the definition of TRL. TRLs describe different stages of technology, product or service development on a scale of 1 to 9. Technology readiness levels are a way of describing the maturity of technology and a tool for comparing the state of advancement of work on various technologies. According to this scale, the maturity of the technology is described from the conceptualization phase of a specific solution (TRL 1) to the stage of maturity (TRL 9), when this concept (as a result of scientific research and development works) takes the form of a technological solution that can be applied in practice – e.g. in the form of launching market production. This scale makes it easier for external investors to track the progress of product development and is a helpful tool and indicator of KPI (*Key Performance Indicator*) development. From the point of view of the investor, the higher the TRL, the greater the chance of success and the lower the investment risk.

The Polish National Centre for Research and Development (NCBR) co-finances projects according to the TRL

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

EEER R 540.112 – 02 [2]: Technology Readiness Levels (TRL): It is necessary to determine the level of readiness of the technology related to the project, as well as the planned progress during the project implementation. A detailed explanation of the rationale for the estimated technology readiness level should be provided. Specific criteria for entering the next higher technology readiness level should be defined. The following definitions apply:

TRL-1. Basic principles observed and reported: Scientific problem or phenomenon identified. Essential characteristics and behaviors of systems and architectures are identified using mathematical formulations or algorithms. The observation of basic scientific principles or phenomena has been validated through peer-reviewed research. Technology is ready to transition from scientific research to applied research.

TRL-2. Technology concept and/or application formulated: Applied research activity. Theory and scientific principles are focused on specific application areas to define the concept. Characteristics of the application are described. Analytical tools are developed for simulation or analysis of the application.

TRL-3. Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept: Proof of concept validation has been achieved at this level. Experimental research and development is initiated with analytical and laboratory studies. System/integrated process requirements for the overall system application are well known. Demonstration of technical feasibility using immature prototype implementations are exercised with representative interface inputs to include electrical, mechanical, or controlling elements to validate predictions.

TRL-4. Component and/or process validation in laboratory environment- Alpha prototype (component): Standalone prototyping implementation and testing in laboratory environment demonstrates the concept. Integration and testing of component technology elements are sufficient to validate feasibility.

TRL-5. Component and/or process validation in relevant environment- Beta prototype (component): Thorough prototype testing of the component/process in relevant environment to the end user is performed. Basic technology elements are integrated with reasonably realistic supporting elements based on available technologies. Prototyping implementations conform to the target environment and interfaces.

TRL-6. System/process model or prototype demonstration in a relevant environment- Beta prototype (system): Prototyping implementations are partially integrated with existing systems. Engineering feasibility fully demonstrated in actual or high fidelity system applications in an environment relevant to the end user.

TRL-7. System/process prototype demonstration in an operational environment- Integrated pilot (system): System prototyping demonstration in operational environment. System is at or near full scale (pilot or engineering scale) of the operational system, with most functions available for demonstration and test. The system, component, or process is integrated with collateral and ancillary systems in a near production quality prototype.

TRL-8. Actual system/process completed and qualified through test and demonstration- Pre-commercial demonstration: End of system development. Full-scale system is fully integrated into operational environment with fully operational hardware and software systems. All functionality is tested in simulated and operational scenarios with demonstrated achievement of end-user specifications. Technology is ready to move from development to commercialization.

logic – the aim of most programmes is to refine the technology so that it can be applied in real conditions (i.e. so that it reaches the technological readiness level 9). Of course, one should also remember about its own IT Due Diligence, because companies offering a product or technology do not always rate TRL well, and even increase the scale of product maturity. NCBR uses a nine-level system of classification of technological readiness to evaluate research and development and innovation projects, determining their degree of advancement and readiness for practical application. This classification of levels helps in identifying areas where technologies require further development and support, as well as facilitates decision-making on financing and investing in projects of various technological advancement [4].

It should be mentioned that the Regulation on defence projects mentions the need to use the proposed projects according to the TRL scale [5], undoubtedly this scale should be used in projects related to radiation and nuclear technologies.

3. An example of the use of TRL in scale-up in the case of the implementation of radiation technology in the power industry

A good example of the procedure in accordance with the recommendations of the TRL scale was the process of implementing nuclear and radiation technologies in the power industry, it concerned the use of the radiation method of treatment of waste gases from coal-fired boilers [6]. The design offices Energoprojekt Warsaw and Katowice, Proatom BP, and contractors Energobudowa, ELWO Pszczyna and others were involved in the implementation of the project by the employees of the Institute of Nuclear Chemistry and Technology.

The projects were carried out by the investment departments of EPS Kąwęczyn and the Dolna Odra Power Station. Industrial installations, pilot and full-scale, required the issuance of permits by the PAA, the Ministry of the Environment, the Ministry of Health and the voivodship authorities. It was the largest radiation installation ever

built in the world; the power of the installed accelerators was 1.2 MW.

TRL 1–2 (i) was observed and the primary principles of the process were announced, (ii) the basics of the technology were defined); this stage was based on the observed phenomena of creating low-temperature plasma in a gas irradiated with an electron beam, and the basis of the technology resulted from the knowledge about the possibility of oxidation non-reactive and poorly water-soluble NO and SO₂ forming harmful sulphites, to anhydrides of nitric (NO₂) and sulphuric (SO₃) acids. Further confirmation of the effectiveness and creation of technical assumptions for the implementation of the process required laboratory tests [7].

TRL 3–4 (i) verification of the concept confirming analytically and experimentally critical functions or character-

istics of the technology, (ii) verification of components of the technology in laboratory conditions; this stage requires the construction of a laboratory installation in the ICHTJ and conducting appropriate experiments. Such installations were also created in Japan and Germany, and later in other countries of the world: South Korea, China, Malaysia, Turkey. The ICHTJ installation used an ILU-6 electron accelerator with a beam power of 20 kW and regulated electron energy up to 2 MeV. The flue gases were produced in an oil burner, and the concentration of gaseous pollutants was regulated by additional dosing of gases (– nitrogen oxide and sulphur dioxide), the volumetric flow of gases reached 400 Nm³/h. The diagram and photo of the laboratory installation are presented in Figure 1 [8]. The effect of the dose on the efficiency of the process of removing acidic gas pollutants was determined. During

Table 2. Technology Readiness Levels (according to the National Centre for Research and Developments).

Tabela 2. Poziomy gotowości technologicznej (wg Narodowego Centrum Badań i Rozwoju).

The TRL scale can be divided into three groups:

TRL I: Conceptual works, analysis of the idea, product, feasibility of its creation

TRL II-VI: Industrial research on the product

TRL VII-IX: Product development

Level I – basic principles of technology. Observation and description of the basic principles related to the functioning of a given

technology: Technological readiness examples at this level may include studies on the basic properties of technology. This level indicates the actual beginning of the development of technology understood as formulated theoretical knowledge that can be verified measurably.

Level II – definition of the technology concept. This means the commencement of activities related to the future application of

technology: The identified theoretical foundations of the new technology allow for the formulation of the assumptions of its practical application. Planned future applications are based on predictions. There may not yet be any evidence or detailed analysis confirming the adopted assumptions of the practical application of the technology. Activities are limited to analytical studies. These studies may include publications or other materials that present the possibility of applying the technology, while providing analyses confirming the concept of technology. However, it is important that the new technology is described consistently and in detail.

Level III – verification of the concept confirming analytically and experimentally the critical functions or characteristics of the

technology: Active activities are initiated, including analytical studies and laboratory tests to physically confirm the analytical predictions regarding different elements of the technology. Technological readiness examples at this level include components that are not yet integrated in their entirety or are not representative of the entire technology.

Level IV – verification of technology components in laboratory conditions: The basic technology components are integrated to confirm that they will work together. General (low fidelity compared to the target system) mapping of the technology in laboratory conditions is obtained. Technological readiness examples at this level include ad hoc integrated equipment in the laboratory.

Level V – verification of technology components in an environment close to the real one: The fidelity of technology mapping increases significantly. Basic components of the technology are integrated with supporting elements, imitating real elements. The technology can be tested under simulated operating conditions. The verification of the new technology should be carried out in the context of its specific use in a future system or equipment and use elements reflecting the specific, intended use in the tests.

Level VI – demonstration of technology in conditions close to real: A significant progress in the field of technological readiness is achieved. The representative technology, which is much more advanced than the one at level V, is subjected to research and testing. Research at this level includes research on a model or technology demonstrator in laboratory conditions mapping real conditions with high fidelity or under simulated operating conditions. The use of commercially available components with reduced immunity is still possible if it is not contrary to the type of environmental conditions in which the model or technology demonstrator will be tested.

Level VII – demonstration of the technology prototype in operational conditions: The prototype is almost at the operating system level or at the achieved level. This level of technological readiness represents a significant progress in relation to level VI and requires demonstration of the developed technology prototype in operational conditions, e.g. on an aircraft, in a vehicle, in an IT operating environment or in space. Achievement of this level should be justified by the activities carried out in the field of system engineering and management of the development process.

Level VIII – completing and checking the developed technology as a result of tests and demonstrations: It was confirmed that the technology can be used in its final form and under the conditions expected for it. Technological readiness examples at this level include research, validation and assessment of technology in the conditions intended for its use, e.g. as part of the weapon system, in order to confirm the design assumptions. Practically (in almost all cases) this level represents the end of actual technology development.

Level IX – checking the developed technology in the operational environment: The technology is used in its final form and under the expected operating conditions, e.g. in the operational conditions of the mission or in the actual operational environment.

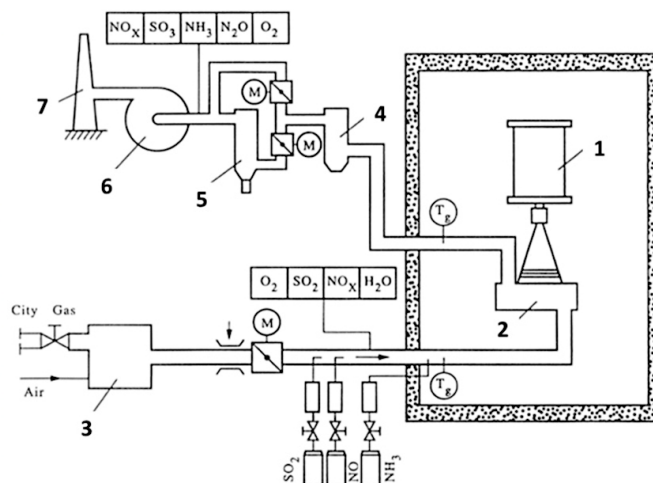
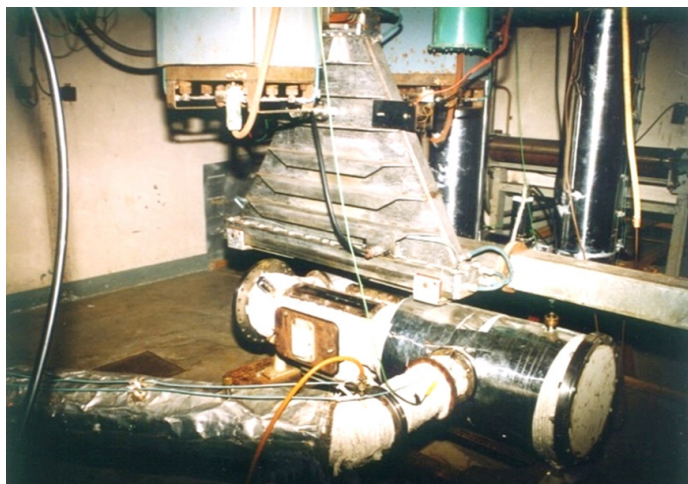


Fig. 1. Photo and scheme of laboratory installation for flue gas treatment. 1 – accelerator ILU – 6; 2 – process vessel; 3 – gas mixer; 4 – retention vessel; 5 – bag filter; 6 – ID fan; 7 – stack (author's own work).

Rys. 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).

our own experiments and those conducted on other installations, it was found that the mixture of the resulting acids (related to the presence of water vapour in the gas) creates a mist, the removal of which from the gas is not possible with the use of known devices (demisters). Therefore, the idea of adding gas ammonia and producing solid particles in the form of a mixture of sulphate and ammonium nitrate was created. An additional advantage of this solution was the production of valuable fertilizer.

TRL 5–6–7 (i) verification of technology components in an environment similar to the real one, (ii) demonstration of the technology in conditions similar to real ones, (iii) demonstration of the technology prototype in

operational conditions; this stage required the construction of a pilot plant in a coal-fired power plant. This installation was built in EPS Kawęczyn, the flow of flue gases was 20,000 Nm³/h, two ELV – 6 accelerators were used with a power of 50 kW each and a beam energy of 600 keV. A photo of the power plant and the water block building, at which the building containing accelerators and other elements of flue gas cleaning was built, is presented in Figure 2 [9]. During the tests required to be carried out under TRL 7, three types of devices for removing suspended solids of the product were tested: bag fabric filter, wet bed filter and electrostatic precipitator (ESP). It was found that the best solution is the ESP, however, although

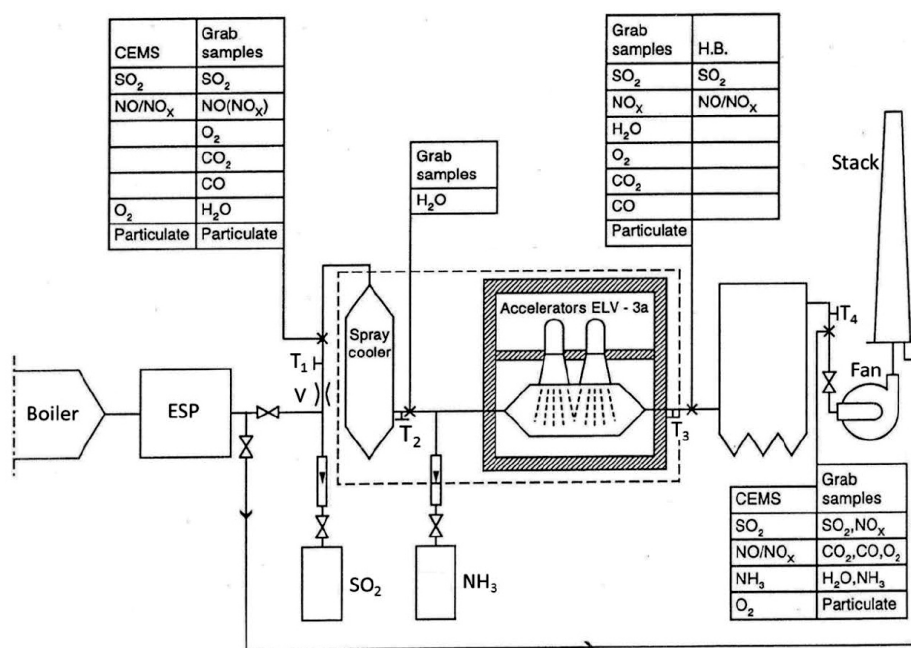


Fig. 2. Photo of EPS Kawęczyn complex and layout of pilot plant for electron beam flue gas treatment (author's own work).

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

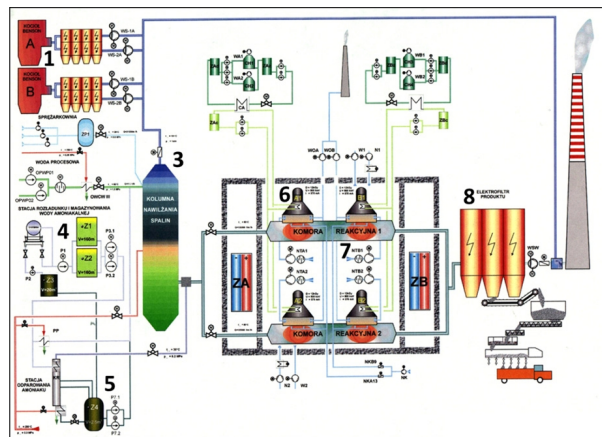


Fig. 3. Photo of EPS Pomorzany, gas humidification tower in front and EPS belonging to EB flue gas treatment plant in a photo centre. A scheme of installation for radiation flue gas purification at right (author's own work).

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).

it is a commercial product, it has required many improvements to obtain the correct operating conditions for this device.

After reaching TRL7, confirming all technological and engineering assumptions, the next stages of the project were implemented. It was necessary to prepare a document describing the impact of the facility on the environment, design taking into account the safety report in terms of radiological protection, the use of hazardous chemicals and explosion (ammonia). The arrangements and consents concerned the Ministry of the Environment, the Chief Inspectorate for Environmental Protection, the National Atomic Energy Agency, the Ministry of Health and the relevant provincial authorities. After approving the technical designs, conducting tenders and the selection of the accelerator manufacturer, the next stages leading to the implementation of the technology in the power industry in full technical scale began.

TRL 8–9 (i) completing and checking the developed technology as a result of tests and demonstrations, (ii) controlling the developed technology in the operating environment, this stage required construction on a full industrial scale with a gas flow at least 10 times greater than that obtained in the pilot plant. Such an installation was built in EPS Pomorzany belonging to the Dolna Odra Power Plant Complex [10]. The flue gas from the WP-100 coal-fired boiler was cleaned, the flue gas flow was 270,000 Nm³/h, four accelerators (600 keV) were used with a power of 300 kW each, powered by two power supplies with a power of 600 kW each. The photo of the power plant with the flue gas humidification column belonging to the flue gas cleaning system visible on the photo front and the installation diagram are presented in Figure 3.

The technology developed in the above activities removes both acid contaminants at the same time, which is not possible in the case of other conventional technologies. During the implementation of the project, a number

of new solutions were developed that were patented and have a broader value, regarding their use in other pollution control technologies. It should be emphasized that the ionizing radiation emitted by one 15 kW accelerator delivers a dose equal to the dose provided by a Co-60 source with an activity of 1 MCi. Thus, in this case, it was a source of radiation equivalent to 80 MCi Co-60. In practice, the activity of most sources used in radiation processing does not exceed 1 MCi, in rare cases it reaches 4 MCi.

The implementation of individual stages of this project indicated the importance of applying the recommendations resulting from the implementation of activities according to the TRL scale. The type of accelerators used in the pilot plant (EPS Kawęczyn) was different from those provided by the supplier selected for the implementation of the industrial plant (EPS Pomorzany). It turned out that 600 kW power supplies (transformer with oil insulation) had not been tested before. There was a break in the insulation in one of the two devices supplied. It has been sent back for repair. This error was strange, because the construction of oil transformers is a classic of the technique used in this field. It is the only device that has not been prepared using the TRL scale requirements and it is a warning not to use short cuts in any new technology, even if it is not about the technical principles of solution used, but only about changing the scale of the solution.

An additional observation, important in the implementation of new technologies, was the statement that such activities attract suppliers offering products that do not yet exist on a technical scale. The principle of operation offered by the third of the possible accelerator suppliers was fascinating, but unfortunately it has not been built to this day. The letter from the sales office about considering the possibility of using this device in our project was only used to present it at the meeting of the company's shareholders.

4. Technology Readiness Levels (TRLs) for SMRs

Small modular reactors have an output power below 300 MW [11]. The term “modular” in the context of small modular reactors refers to their scalability and the possibility of producing the main elements of the nuclear reactor in the factory environment and then transferring them to the site. Moreover, it is a design concept in which reactors are built as a series of small, self-contained units. They can be combined to create a larger power plant. The modular design of SMR reactors allows for greater flexibility in the construction and operation of the reactor. The modular approach allows for standardized designs that can be replicated across multiple units, reducing the costs and time required for licensing, construction and operation. In addition, the modular design of SMRs allows for scalability, within which additional modules can be added to increase plant efficiency. This flexibility and scalability make SMRs well suited to meet the energy needs of small communities or for use in remote or isolated areas.

One of the very important barriers to the development of SMRs is the licensing of new reactor designs. For example, by regulating the design, site, construction and operation of new commercial nuclear power plants, the US NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) currently applies a combination of regulatory, licensing and oversight requirements. Historically, the licensing process was developed for large commercial reactors. The process of licensing new reactor designs is lengthy and expensive.

A very good and up-to-date assessment of the situation was presented by the Pacific Northwest Laboratory in the report “*Emerging Technologies Review: Small Modular Reactors*” [12] made for the Air Force Civil Engineer Centre under a Work-For-Others Agreement with the U.S. Department of Energy. The importance of this documentarises, among others, from the fact that from the very beginning of its creation, the idea of building SMRs con-

cerned the possibility of their use in hard-to-reach regions of our globe (e.g. the Arctic regions of Canada) and for good security of the source of power supply for military bases.

Designers and suppliers offer SMRs that have reached different levels of design maturity. Light water (LWR) SMRs are the most mature in terms of technology and production. The projects originate from the existing large LWR structures. SMRs other than LWR are still considered to be under development, far from the stages of implementation and commercialization, as they are based on reactor designs for which there are few actual implementations and even fewer of them are explored as long as large LWR nuclear power plants are in operation.

According to the report, there are many limiting factors related to the implementation of SMR technology. And a limited number of specialists and a limited supply of production components and nuclear fuel dedicated to SMRs affect the degree of advancement of technology. None of them has been implemented commercially in the United States. The NRC attaches great importance to the evaluation of the proposed SMR construction site: “The human environment, public health and safety, engineering and design, economics, institutional requirements, environmental impact and other factors should be taken into account in the selection of the site. The potential impact of the construction and operation of nuclear power plants on the human environment and on social, cultural and economic characteristics (including environmental fairness) is usually similar to the potential impact of any large industrial facility, but nuclear power plants are unique in the extent to which the potential impact of the environment on their safety needs to be taken into account. Safety requirements are the main determinants of suitability of the site for nuclear power plants, but the environmental impact is also valid and must be assessed.”

In the last seventy years, many types of nuclear reactor technologies have been tested and are characterized by a high technological readiness level. Light-water reactors, liquid-metal reactors, high-temperature gas-cooled reac-

Table 3. Most common nuclear reactors [12].

Tabela 3. Głównie typy reaktorów jądrowych [12].

Reactor type	Coolant	Moderator	Neutron spectrum
Pressurized water reactors (PWR)	Light water (H ₂ O)	Light water (H ₂ O)	Thermal
Boiling water reactors (BWR)	Light water (H ₂ O)	Light water (H ₂ O)	Thermal
Reactors – molten metals	Liquid sodium, lead or bismuth lead	Graphite	Thermal
		None	Fast
Gas Cooled High Temperature Reactors (HGTR)	Helium (hydrogen, carbon dioxide)	Graphite	Thermal
		None	Fast
Reactors – molten salts	Mixture of salts – chlorides or fluorides	None	Fast

tors (HTGRs) and molten salt reactors (MSRs) were built, licensed and operated in the United States and around the world. Table 3 provides an overview of the different main reactor types. The values of operating pressures and temperatures in the descriptions are approximate and representative for different types, and specific values can vary depending on the design, within each type. For example, when it comes to operating pressure, PWR reactors usually operate at about 150 atmospheres (150 times the normal atmospheric pressure), while reactors using liquid metals operate slightly above the atmospheric pressure. These are the precursors of the main families of currently offered SMRs, so it is worth recalling them.

The situation regarding the licensing of SMRs that are clones of the above solutions is presented below.

a) Pressurized water reactors (PWR)

Almost two-thirds of commercially operated reactors are of this type. All reactors of the United States Navy are PWR. The US Army's nuclear power programme was operated by PWRs operated from 1954 to 1974.

The NuScale PWR design (since the steam generator and reactor share the same reactor tank, this particular design feature is commonly referred to as Integrated PWR (iPWR)) is the only American SMR design that has a design certificate issued by the NRC and the standard design certification.

b) Boiling water reactors (BWR)

BWRs operate at high pressure, typically about 68 atmospheres and at a temperature of about 285°C. They use a single-loop steam supply system in which steam leaves the reactor and flows to the generator turbine.

According to the report, there are currently (the end of 2024) no design proposals for BWR SMR reactors in the NRC.

c) Sodium fast reactors (SFRs) – molten metals

Since SFRs are designed to use fast neutrons to fission uranium/plutonium, they do not use a moderator. SFRs operate at a pressure similar to the atmospheric pressure, the overpressure is about 0.1 atmosphere. Other subtypes of reactors using liquid metals, can use lead or lead-bismuth as a coolant.

Japan's Joyo SFR test reactors (1977–1997 and 2004–2007), two Russian commercial reactors SFR BN-600 (1980-present) and BN-800 (2014-present), and China's experimental fast reactor (2011-present) are currently operating. The BN-600 and BN-800 are the only two operating commercial SFRs in the world.

No project applications for SFR SMR have been submitted to the NRC.

d) High-temperature gas-cooled reactors (HTGR)

HTGRs are nuclear reactors using gases, such as helium, as a coolant. Since most HTGRs are designed to use

thermal neutrons to fission uranium, most use graphite as a moderator. The moderator is not used in HTGRs using fast neutrons. HTGRs operate at lower pressures than the design pressures of PWRs and BWRs, they amount to about 60 atmospheres. There are two main HTGR designs based on the moderator configuration: (1) a prismatic block in which the reactor core is configured in graphite prismatic blocks and (2) a bulk-bed HTGR, in which the moderator and the fuel are formed into spherical structures.

In 1958, the Philadelphia Electric Company ordered the Peach Bottom 1 reactor, an experimental, helium-cooled, graphite-moderated 40 MWe HTGR nuclear prototype. The construction of Peach Bottom 1 began in 1962. It was commissioned in 1967 and operated until 1974; it was closed after successfully demonstrating the viability of HTGR.

General Atomics also designed the Fort St. Vrain reactor as a proven, helium-cooled, graphite-moderated, 330 MWe commercial HTGR. The construction began in 1968, and preliminary tests began in 1972. The power plant began supplying electricity to the grid in 1979. Although the project successfully proved the operational character of HTGR and other technologies, maintenance and extensive modifications of the installation were required to maintain it. Due to unfavourable economic and technical issues, the power plant was decommissioned in 1989.

Other experimental HTGRs have been designed and operated worldwide. The British Atomic Energy Authority operated the Dragon reactor. The Dragon reactor tested fuel and materials for the European high-temperature reactor programme of the Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency NEA/OECD in 1965–1976. The reactor design used an early form of tri-structured isotropic fuel (TRISO) of various shapes. The reactor is no longer in service and is currently decommissioned.

Germany designed the Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) and the high-temperature THTR 3000 reactor. The AVR was a test reactor with a power of 15 MWe, which operated in the years 1967–1988. The THTR-300 reactor was a 300 MWe power plant that operated from 1985–1989. It is no longer in use. Japan's Atomic Energy Agency operates a high-temperature engineering test reactor. The gas-cooled, graphite-moderated reactor was designed to supply 30 MWe.

Its operation was suspended in 2011 and resumed in 2021.

China's first high-temperature, gas-cooled, bulk-bed HTR-10 test reactor operates at Tsinghua University. It has been designed to test the concept and has a power of 10 megawatts of thermal power (MWt). In addition, in 2021, two high-temperature, gas-cooled HTR-PM reactors with a capacity of 100 MWe began operation in China.

The NRC has not licensed HTGRs and none of them currently operates in the United States.

e) Reactors – molten salts

MSRs are reactors that use liquid mixtures of chlorides or fluoride salts as a coolant. MSRs can use liquid fuel in which uranium-235 is admixed in a salt mixture and circulates in the reactor, or solid fuel is used. MSRs can also be thermal reactors using graphite as a moderator or fast reactors in which a moderator is not needed.

In addition, MSRs operate at lower pressures than the design pressures of PWRs and BWRs; it amounts to about 2 atmospheres.

In the United States, the AEC conducted two experiments using MSRs: one for the United States Army Air Force (which became the United States Air Force in 1947) and the other internally to determine whether MSRs can be commercially operated safely and are reliable and can be maintained in motion without undue difficulty.

The Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) was a test reactor operated by Oak Ridge National Laboratory (ORNL) to demonstrate that molten salt reactors mainly used to generate electricity can be operated safely and reliably. The 7.4 MWt breeding reactor, cooled with molten salt and moderated with graphite, was built in 1964 and operated until 1969. It used a mixture of uranium, thorium and plutonium fluoride isotopes.

Currently, two projects of MSRs have been submitted to the NRC. In September 2021, Kairos Power, LLC submitted an application to the NRC for permission to build the HERMES test reactor. In August 2022, Abilene Christian University submitted an application to the NRC for permission to build a molten salt research reactor. The NRC is reviewing both applications and has not yet (the end of 2024) made a decision on either of them.

Based on the definitions of the TRL adopted by the Department of Defense (DoD) and published by the Government Accountability Office (GAO) [13], the TRL SMR can be 5 or 6. TRL level 5 means that the basic technological components are integrated with quite realistic supporting elements, so that they can be tested in a simulated environment. TRL level 6 means that the systems or subsystems have been demonstrated in the appropriate environment.

The NRC has set overall milestones for the completion of the proposal's reviews for the different regulatory actions. The full list of licensing and regulatory activities and the corresponding general milestones has been published on the public NRC website [14]. The review period begins when the NRC has completed the acceptance review and accepted the application for review, and ends when the personnel have completed the safety assessment report. Reviews of early construction licenses last 24 months; reviews of combined licenses last from 30 to 42 months.

In 1989, the NRC established an alternative licensing process that combines construction and operating license, with certain conditions, into a single license. This license is called a Combined Construction License and Operational License (Combined License) or Combined License Application (COL)¹. The provision in 10 Code of Federal Regulations (CFR) Part 52 also allows the owner/operator to apply for an Early Site Permit (ESP)², in which the NRC will determine whether the site is suitable for a nuclear power plant. If the owner/operator wants to apply for ESP, the application will address site safety, environmental protection and emergency response plans without the

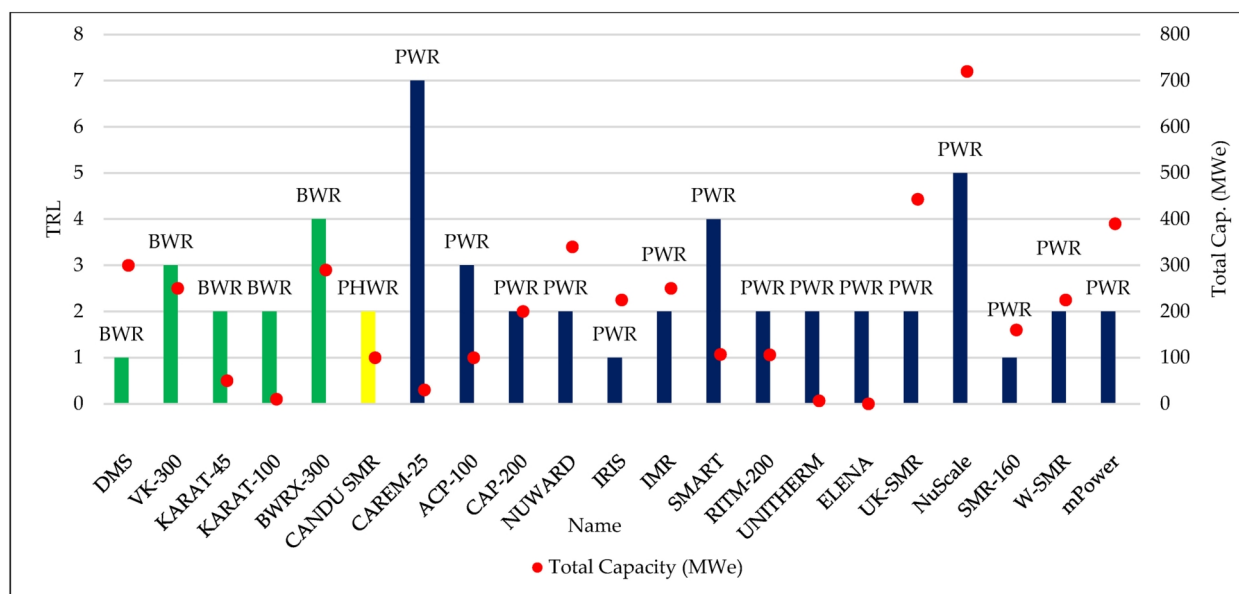


Fig. 4. Evaluation of the TRL for selected SMRs [15].

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

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

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

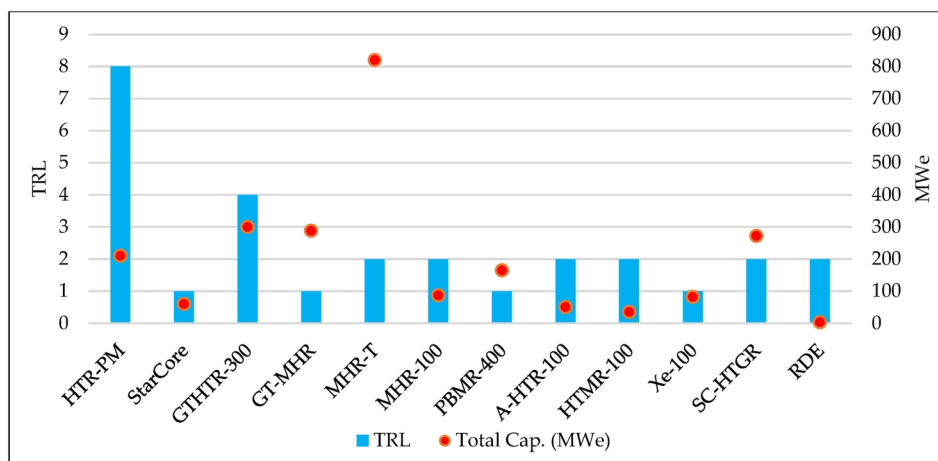


Fig. 5. Evaluation of the TRL for HTGR SMR [15].

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

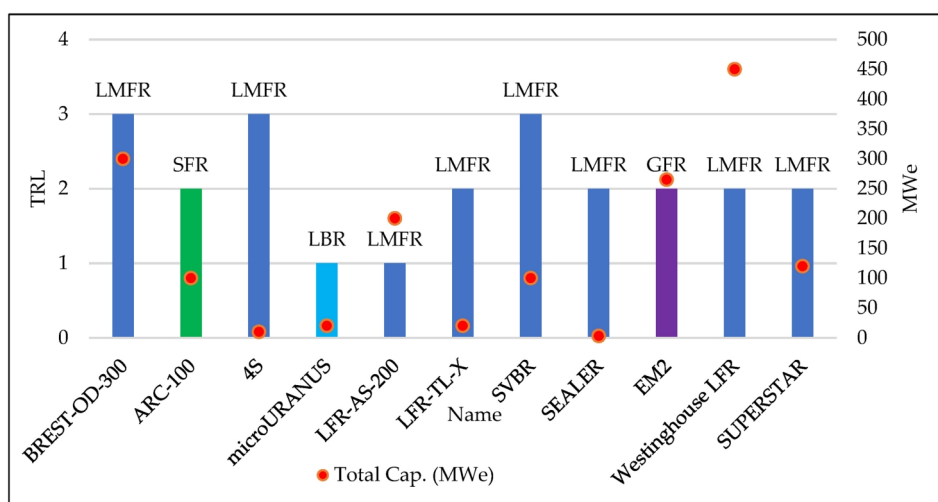


Fig. 6. TRL for fast neutrons reactors [15].

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

need to review the specific design of the nuclear power plant. As part of the application, the owner/operator may also apply for Limited Work Authorization (LWA). The ESP is not required before the owner/operator submits a COL request, but it can be beneficial as it will resolve any specific issues related to the security of the facility before submitting a COL request. At the moment, the NRC has issued 6 ESP opinions, and one in the evaluation has been withdrawn by the applicant. Of the six ESP opinions, the last was issued in December 2019, and its adoption was a tedious action lasting 3.5 years; in the case of the latter, it was 6 years (2016); for the fourth – 3 years (2009), for the third, as well as the second and the first reported at this age – 3.5 years (all issued in 2007). The decision-making process consists of three phases: nuclear safety analysis, environmental assessment, mandatory hearings before the commission.

In the case of COL, the application submitted in 2020 regarding the microreactor, which was to be built on the premises of the Idaho National Laboratory (Oklo Power LLC), was rejected in 2022 due to the fact that Oklo did

not provide the NRC with the necessary information about the reactor, which did not allow the NRC personnel to establish a schedule of activities and conduct a full review of the custom Aurora Combined Reactor License Application.

Most interesting is the case of the application filed by the Southern Nuclear Operating Company (SNC) on March 28, 2008 for combined licenses for two advanced AP1000 passive water reactors for units 3 and 4 of the Vogtle Electric Generating Plant (VEGP). On 22 October 2009, SNC granted its request for COL by submitting an application for a limited authorization to carry out activities in order to obtain consent to perform selected construction works. COL and LWA were issued for the Vogtle Electric Generating Plant (VEGP) – units 3 and 4, on February 10, 2012. Vogtle Unit 3 began commercial operation in July 2023, and Unit 4 in March 2024.

An interesting complement to the previously discussed NW Pacific NL report is the publication [15] ranking the proposed SMR solutions according to their status on the TRL scale and power (Fig. 4, 5, 6). Since there are too

Table 4. Selected SMRs at TRL 5 [15].**Tabela 4.** Wybrane SMR-y o TRL 5 [15].

Name	Type	Power (MWe)	Manufacturer	Country	TRL
NuScale	PWR	12×60	GE-Hitachi Nuclear Energy	United States and Japan	5
VBER-300	PWR (FNPP)	325	JSC “Afrikantov OKBM”	Russian Federation	6
CAREM-25	PWR	30	IRIS Consortium	Argentina	7
KLT-40S	PWR (FNPP)	2×35	JSC “Afrikantov OKBM”	Russian Federation	8
HTR-PM HTGR		210	INET, Tsinghua University	China	8

many of them to describe them in this article, we refer the reader to the IAEA publication cataloguing these solutions [16].

The 210 MWe HGTR-PM, which works in Shidao Bay, has the highest TRL of 8. This demo gas-cooled bulk-bed reactor module has been connected to the grid.

Russia’s BREST-OD-300 reactor is in the development phase of TRL 3. It is a lead-cooled reactor on fast neutrons, which is currently being built in Seversk in the Russian Federation and is to be commissioned in 2026. This is an attempt to demonstrate a prototype of the architecture of the incoming high-power reactor, which will allow the use of a closed nuclear fuel cycle. In the reactors on molten salts of the SMR type, a salt obtained on the basis of fluoride or chloride is used. The fuel can be solid or liquid when the fuel is dissolved in the carrier salt. Natural salt safety, for the creation of a low-pressure, single-phase cooling system that does not require the full encapsulation of this high-temperature system, ensuring high process efficiency, and closed fuel cycle are just a few of the benefits of this type of SMRs. In Canada, the United Kingdom and the United States, several projects of such SMRs are in the initial phase of licensing analyses. Most SMRs of this technology are still in the conceptual design phase (TRL 2). Only one reactor, Fuji, designed by the International Thorium Molten Salt Forum (ITMSF), has a TRL 3 indicator.

Summing up this review, it can be concluded that there are several SMRs that are in the development phase of TRL 5 (Tab. 4).

Of course, in this case, the best available knowledge concerns the first SMR on this list.

It is also worth mentioning the NEA report (Volume I), which this Agency calls a dashboard for small modular reactors. The first one contains an analysis of 21 SMR projects and a description of progress on their implementation and commercialization [17]. The summary of the NEA SMR dashboard goes beyond the level of technological readiness and assesses progress on six additional basic conditions: readiness for licensing, location, financing, supply chain, commitment and fuel. In combination with the assessments of technical readiness, it

reveals which SMR technologies and projects are rapidly moving from concept to commercialization in various markets around the world. The second volume [18] is another milestone in the ongoing efforts of the Nuclear Energy Agency (NEA) of the OECD for a comprehensive assessment of the progress made towards the commercialization and implementation of SMR technology. The second volume does not constitute an update of the set of reactors assessed in the first volume, the information contained in it extends the same methodology to another 21 SMR projects from around the world, according to the state of knowledge obtained on April 21, 2023. The assessments do not in any way reflect the opinions of the OECD or NEA, but are based on assessments prepared jointly with the designers of individual solutions. These publications do not provide TRL values for individual solutions, but enrich such an assessment with additional, above-mentioned information. Therefore, together with the previously cited TRL values, they constitute a valuable comparative material helpful in the activities of analysts and institutions interested in the future implementation of SMRs in various areas of the economy.

5. Summary

The facts indicated in the study show that the activities related to the construction of nuclear power plants must be well prepared, and the main aspect of these activities is of a technical and economic nature (in the engineering nomenclature, technical and economic assumptions must be developed). This document also covers ecological and social assessments to a large extent. When it comes to the development of SMRs, the level of their development determined on the TRL scale is crucial for the implementation. The example presented in Chapter 3 is of a didactic nature, illustrating the stages of implementing difficult radiation technology according to successive points of the TRL scale, using the principles of engineering projects, analogous to those used in the construction of nuclear power plants.

Proof of the importance and necessity of performing a technical assessment of SMRs are the actions taken by

the Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), which implements the “Small Modular Reactor Readiness project overview”. It started in 2023 and will last for five years. The project fund is 50.7 million Canadian dollars. Many different parameters and procedures will be taken into account in the assessment [19]. The CNSC wants to prepare for effective and efficient regulation of SMRs without any damage to the developed safety rules, will also sponsor the conduct of independent research by external entities, obtaining internal expertise and the preparation of documented regulatory rules, in the areas listed in the document under the above link, so as to support the licensing activities carried out by this institution. Similar activities should also be carried out in Poland, and the activities of external TSO institutions financed, for example, from the National Centre for Research and Development programmes established for this purpose.

The report of the Presidential Commission on the Three Mile Island accident, Publishing House of the US Government, stated [20]: “Nuclear energy requires broad,

organized support from scientists and engineers.” It was emphasized that special attention should be paid to the development, review and supervision of the procedures used in the power plant so that they are based on both engineering thinking and operational experience”. In addition, after the Chernobyl accident, the investigation carried out by IAEA advisers found that the operating procedures were not satisfactorily based on technical analyses. It was found that the exchange of important safety information between operators and the technical support organization (TSO) was insufficient and did not lead to their full use.

Acknowledgements. I would like to thank Mr. Maciej Jurkowski, retired Deputy President of PAA, former Chief Nuclear Regulatory Inspector for pointing out this important and interesting topic. He was the director of the National Nuclear and Radiation Safety Inspectorate in the years when the radiological industrial facilities described in chapter three were implemented in Poland.

About the author

Prof. dr hab. inż. Andrzej G. Chmielewski is the director of the Institute of Nuclear Chemistry and Technology, which is the IAEA Collaborating Centre, and the deputy chairman of the Council for Nuclear Safety and Radiological Protection with the President of the PAA. For many years he worked at the Warsaw University of Technology, the University of Tennessee, the USA and the International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. In the years 1990–2011, he was the deputy chairman and chairman of the Council for Atomic Sciences with the President of the PAA. He served as President of PTN and SEREN, and for a number of years was a member of SAGNA, an advisory body to DDG NA IAEA.

6. References

1. Projektowanie procesów technologicznych: od laboratorium do instalacji przemysłowej.; praca zbiorowa / edited by Ludwik Synoradzki and Jerzy Wisiański Edition I – Publishing House of the Warsaw University of Technology, Warsaw, 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, DOI:10.2777/577767
4. Poziomy gotowości technologicznej we wnioskach NCBR. Ordinance of December 1, 2023, <https://osf.opi.org.pl/baza-wiedzy/poziomy-gotowosci-technologicznej-wnioski-ncbr/>
5. Regulation of the Minister of Science and Higher Education of 28 August 2020 on the tasks of the National Centre for Research and Development related to the implementation of scientific research or development works for state defence and security. <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. DOI: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. Series B No. 1/99; Warsaw. 1999, https://www.researchgate.net/publication/274125203_ELECTRON_BEAM_GASEOUS_POLLUTANTS_TREATMENT/fullTextFileContent
9. Chmielewski A.G., Tymiański 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., Tymiański 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.
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. DOI: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

Charakterystyka neutronowa kaset paliwowych w reaktorze PWR na przykładzie modelu BEAVRS

Neutronic characteristics of fuel assemblies in a PWR based on the BEAVRS benchmark

Anna Łuczak
Państwowa Agencja Atomistyki

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę charakterystyk neutronowych dziewięciu typów kaset paliwowych z reaktora PWR BEAVRS z użyciem modułu Polaris z pakietu kodów SCALE. Porównano wyniki obliczeń otrzymanych przy zastosowaniu bibliotek przekrojów czynnych o podziale na 56 i 252 grupy energetyczne. Oceniono wpływ rodzaju biblioteki na współczynnik mnożenia neutronów oraz reaktywność w funkcji stopnia wypalenia paliwa. Zbadano również różnice czasowe w przeprowadzaniu obliczeń. Wyniki wskazują, że biblioteka 56-grupowa zapewnia satysfakcjonującą dokładność przy znacząco krótszym czasie obliczeń, co czyni ją odpowiednią dla większości zastosowań. Bibliotekę 252-grupową rekomenduje się natomiast tam, gdzie priorytetem jest najwyższa precyzja.

Słowa kluczowe: PWR, reaktor jądrowy, BEAVRS, SCALE, Polaris, biblioteki przekrojów czynnych.

Abstract: The study analyzes the neutronic characteristics of nine types of fuel assemblies from the BEAVRS PWR benchmark using the Polaris module from the SCALE code system. The results obtained with 56-group and 252-group cross-section data libraries were compared. The impact of library choice on the neutron multiplication factor and reactivity as a function of fuel burnup was assessed. Differences in computation time were also examined. The results indicate that, for most applications, the 56-group library provides sufficient accuracy while significantly reducing simulation time, whereas the 252-group library should be used in cases requiring the highest level of precision.

Keywords: PWR, nuclear reactor, BEAVRS, SCALE, Polaris, cross-section libraries.

1. Wstęp

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na niskoemisyjne źródła energii energetyka jądrowa ponownie zyskuje na znaczeniu. W Polsce planowana jest budowa pierwszej elektrowni jądrowej z reaktorami typu AP1000. Reaktory te należą do grupy ciśnieniowych reaktorów wodnych (PWR), które stanowią najczęściej wykorzystywany typ reaktorów jądrowych na świecie.

Wraz z rozwojem energetyki jądrowej w Polsce wzrasta znaczenie analiz, istotnych dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego, dotyczących działania i bezpieczeństwa reaktorów, wykonywanych m.in. w ramach dozoru jądrowego.

Jednym z podstawowych elementów takich analiz są obliczenia neutronowe, w tym wyznaczanie współczynnika mnożenia neutronów, wielkości kluczowej dla oceny stanu krytyczności reaktora.

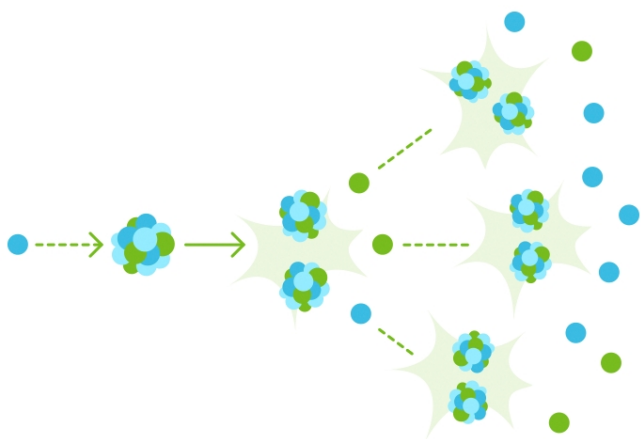
Celem pracy było porównanie wyników obliczeń neutronowych dla dziewięciu typów kaset paliwowych z modelu reaktora PWR BEAVRS, wykonanych z użyciem modułu Polaris pakietu SCALE. Analiza została przeprowadzona z zastosowaniem dwóch wersji bibliotek przekrojów czynnych: 56- i 252-grupowej. Oceniono wpływ wyboru biblioteki na wartość współczynnika mnożenia neutronów oraz czas trwania obliczeń.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Reakcja łańcuchowa

Rozszczepienie jądrowe to reakcja jądrowa, na skutek której jądro atomu rozpada się na co najmniej dwa jądra atomowe. Reakcji tej towarzyszy emisja neutronów, promieniowania gamma oraz związane z tym uwolnienie energii. W reaktorze jądrowym energię generuje się w wyniku samopodtrzymującej się łańcuchowej reakcji rozszczepienia ciężkich jąder, najczęściej uranu-235. Na rysunku 1 przedstawiono mechanizm reakcji łańcuchowej. Neutron pochodzący z zewnętrznego źródła lub spontanicznej reakcji rozszczepienia inicjuje rozszczepienia pierwszego jądra atomowego, a neutrony emitowane przy tym rozszczepieniu powodują rozszczepienia kolejnych jąder.

Poniżej przedstawiono dwie wielkości fizyczne kluczowe z punktu widzenia samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej – współczynnik mnożenia neutronów i reaktywność.



Rys. 1. Schemat reakcji łańcuchowej [1].

Fig. 1. Chain reaction scheme [1].

2.2. Współczynnik mnożenia neutronów

Współczynnik mnożenia neutronów k to podstawowa wielkość, która określa stabilność reakcji łańcuchowej i jest ona wyrażana przez stosunek liczby neutronów w danym pokoleniu do liczby neutronów w poprzednim pokoleniu. Wyróżnia się 3 stany reaktora w zależności od wartości k :

- dla $k < 1$ produkcja neutronów jest mniejsza od straty, więc reaktor znajduje się w stanie podkrytycznym,
- dla $k = 1$ produkcja jest równa stracie, więc reaktor znajduje się w stanie krytycznym,
- dla $k > 1$ produkcja neutronów przewyższa stratę, więc reaktor znajduje się w stanie nadkrytycznym.

Współczynnik mnożenia neutronów można podzielić na dwa rodzaje: efektywny współczynnik mnożenia k_{eff} i nieskończony współczynnik mnożenia k_{inf} . Różnią się one tym, że k_{eff} uwzględnia ucieczkę neutronów, natomiast k_{inf} odnosi się do nieskończonego ośrodka i nie uwzględnia ucieczki [2].

2.3. Reaktywność

Reaktywność to wartość, która opisuje względne odchylenie reaktora od stanu krytycznego i jest ona dana wzorem

$$\frac{(k - 1)}{k}, \quad (1)$$

gdzie k to współczynnik mnożenia neutronów.

Reaktywność jest wartością bezwymiarową, natomiast dla ułatwienia używa się często do jej przedstawienia następujących jednostek:

- 1% = 0,01 ,
- 1 pcm = 10^{-5} .

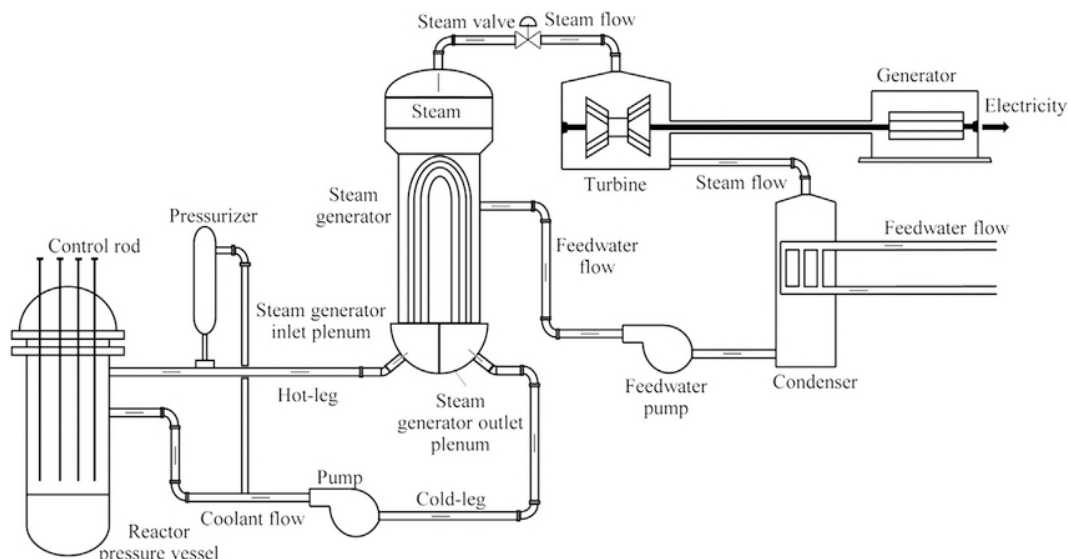
Reaktor, którego $\rho = 0$ jest w stanie krytycznym. Dla $\rho < 0$ lub $\rho > 0$ reaktor jest kolejno w stanie podkrytycznym lub nadkrytycznym [3].

3. Reaktory PWR

Reaktory wodne ciśnieniowe (ang. *Pressurized Water Reactor*, PWR) to najpopularniejszy typ reaktorów jądrowych na świecie. Pierwszy tego typu reaktor o mocy elektrycznej 68 MWe i termicznej 231 MWth znajdujący się w elektrowni jądrowej Shippingport zaprojektowany oraz zbudowany został przez firmę Westinghouse Electric Company, a następnie był eksploatowany od 1957 roku przez firmę Duquesne Light Company [4].

Reaktory PWR do działania zgodnie z nazwą wykorzystują wodę pod wysokim ciśnieniem (zwykle około 15,5 MPa), która odgrywa rolę moderatora i chłodziwa. Dzięki wysokiemu ciśnieniu, które zapewnia praca pomp i utrzymuje stabilizator ciśnienia (ang. *pressurizer*), woda w obiegu pierwotnym nie zamienia się w parę wodną, jak ma to miejsce w reaktorach wodnych wrzących (ang. *Boiling Water Reactor*, BWR). Elektrownie z reaktorami PWR charakteryzują się występowaniem trzech obiegów, których zadaniem jest konwersja energii cieplnej na energię elektryczną.

Na rysunku 2 pokazano schemat reaktora wodnego ciśnieniowego. W zbiorniku ciśnieniowym reaktora (ang. *reactor pressure vessel*) znajduje się rdzeń reaktora, w którym zachodzi reakcja jądrowa. Podgrzana woda wypływa ze zbiornika ciśnieniowego i trafia do wytwornicy pary (ang. *steam generator*), gdzie zachodzi wymiana ciepła między obiegiem pierwotnym a wtórnym, schłodzona woda z obiegu pierwotnego trafia następnie do zbiornika reaktora. Woda z obiegu wtórnego w wytwornicy pary zamienia się w parę wodną, która napędza turbinę, która współpracuje z generatorem, dzięki czemu możliwa jest produkcja energii elektrycznej. Para z turbiny trafia dalej do skraplacza (ang. *condenser*), gdzie w wyniku wymiany ciepła zachodzi jej skraplanie. Schłodzona woda trafia dalej do wytwornicy pary i cykl się zamyka [6].



Rys. 2. Schemat elektrowni z reaktorem typu PWR [5].

Fig. 2. Diagram of a PWR power plant [5].

3.1. Budowa rdzenia

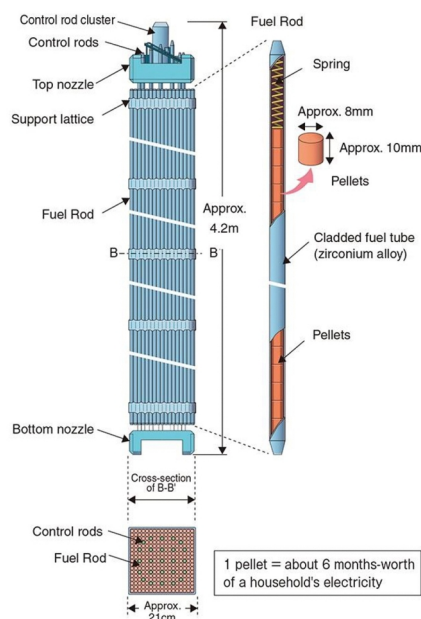
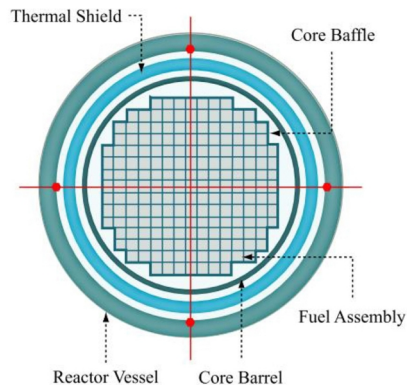
Podstawowymi elementami rdzenia są: paliwo, moderator, chłodziwo, pręty kontrolne i reflektor. W paliwie zachodzi reakcja rozszczepienia. Powstają tam neutrony, które spowalniane zostają przez moderator, z kolei reflektor ma za zadanie ograniczyć możliwość ucieczki tych neutronów z rdzenia. Pręty kontrolne służą do regulowania mocy reaktora i w razie potrzeby służą również do jego wyłączenia. Zadaniem chłodziwa jest odbiór ciepła z rdzenia [7].

Na rysunku 3 przedstawiony został przekrój poziomy rdzenia reaktora oraz schemat budowy kasety i pręta paliwowego. Rdzeń reaktora, który znajduje się w zbiorniku ciśnieniowym, tworzą kasety paliwowe (ang. *fuel assemblies*), przegroda rdzenia (ang. *core baffle*) pełniąca

funkcję reflektora, obudowa rdzenia (ang. *core barrel*) oraz osłona termiczna (ang. *thermal shield*). Kaseta paliwowa składa się z:

- siatki prętów 17x17, gdzie 1 pręt ma około 1 cm średnicy. W siatce znajdować się mogą: pręty paliwowe (ang. *fuel rods*), rury wiodące (ang. *guide tubes*), rurki instrumentów pomiarowych (ang. *instrument tubes*), pręty z truczną wypalającą się BA (ang. *burnable absorber rods*) oraz pręty ze źródłem neutronowym (ang. *neutron source rods*),
- zespołu prętów kontrolnych (ang. *control rod cluster*), który służy do kontroli reaktywności,
- górnej i dolnej dyszy (ang. *top and bottom nozzle*), które za zadanie mają m.in. odpowiednio kierować przepływ chłodziwa,

Cross Section (193 Fuel Assemblies)



Rys. 3. Przykładowy schemat rdzenia i kasety paliwowej [8]. Znaczenie oznaczeń przedstawiono w tekście.

Fig. 3. Example diagram of core and fuel assembly [8].

- siatek dystansujących (ang. *support lattices*), które utrzymują pręty w odpowiedniej pozycji.

Pręty paliwowe składają z pastylek paliwowych (ang. *fuel pellets*), koszulek paliwowych (ang. *cladding*) i sprężyny (ang. *spring*). Pastylki paliwowe mają cylindryczny kształt i są ułożone jedna na drugiej. Średnica każdej z nich to około 8 mm, a wysokość to około 1 cm. Wykonane są one najczęściej z dwutlenku uranu (UO_2) o wzbogaceniu 3–5%. Sprężyna poprzez nacisk na pastylki ma zapobiegać ich przemieszczaniu się. Pastylki paliwowe umieszczone są w koszulkach, zazwyczaj wykonanych ze stopu cyrkonu. Przestrzeń pomiędzy pastylkami a koszulką wypełniona jest gazem, np. helem.

4. Reaktor BEAVRS

BEAVRS (ang. *Benchmark for Evaluation and Validation of Reactor Simulations*) [9] to model reaktora ciśnieniowego lekkowodnego, który bazuje na istniejącym w USA reaktorze firmy Westinghouse o mocy 1100 MWe. Model ten stworzony został przez inżynierów z Massachusetts Institute of Technology w celu umożliwienia testowania narzędzi symulacyjnych rdzenia jądrowego. Benchmark jest dostępny publicznie na stronie MIT oraz jest aktualizowany co kilka lat [10].

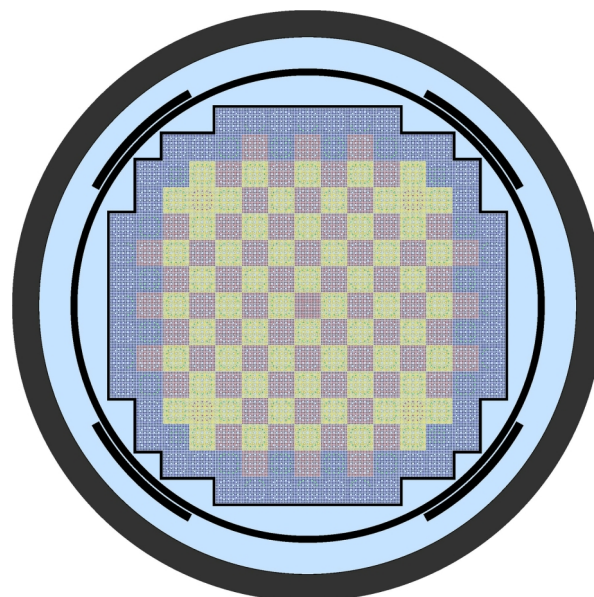
Najważniejsze parametry reaktora zostały przedstawione w tabeli 1. Więcej informacji można znaleźć w benchmarku. W ramach tej pracy analizowany był jedynie pierwszy cykl działania reaktora na pełnej mocy (ang. *hot full power*, HFP).

Tabela 1. Podstawowe parametry reaktora BEAVRS [10].

Table 1. Basic parameters of BEAVRS reactor [10].

Liczba kaset paliwowych	193
Typ kaset paliwowych	17x17
Liczba prętów paliwowych w kasecie	264
Liczba prętów z trucizną wypalającą	1266
Początkowa masa ciężkiego metalu	81,8 MT
Moc elektryczna	1100 MWe
Moc cieplna	3410 MWth
Rodzaj paliwa	UO_2

Na rysunku 4 przedstawiono przekrój poprzeczny reaktora BEAVRS. Reaktor BEAVRS składa się z rdzenia, przegrody rdzenia, obudowy rdzenia, osłony neutronowej oraz zbiornika ciśnieniowego reaktora. Dodatkowo, niebieskim kolorem została zaznaczona woda znajdująca się w reaktorze. Czerwonym kolorem zaznaczone zostały kasetki paliwowe ze średnim wzbogaceniem paliwa 1,6%, żółtym – 2,4%, a granatowym – 3,1%.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny reaktora BEAVRS [10].

Fig. 4. Cross-section of the BEAVRS reactor [10].

4.1. Elementy kaset paliwowych

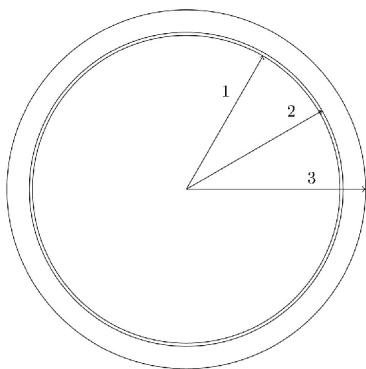
Kasetki paliwowe reaktora BEAVRS składają się z sześciu rodzajów prętów: pręta paliwowego, rury wiodącej, rurki instrumentów pomiarowych, pręta z trucizną wypalającą się oraz górnej i dolnej części pręta kontrolnego. W modelu stworzonym w ramach tej pracy nie uwzględniono obecności prętów kontrolnych w kasecie paliwowej, aby uzyskać możliwie największą reaktywność. Geometria prętów użytych do obliczeń zostały przedstawione na rysunkach 5–8 (praca własna), a materiały zawarte są w tabelach 2–5.

4.2. Materiały

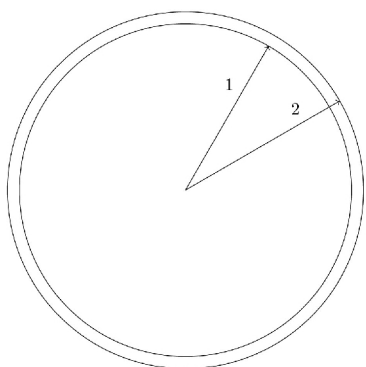
W poniższych tabelach 6–14 przedstawiono materiały, które znajdują się w elementach kaset paliwowych i reflektorze reaktora BEAVRS, wraz z ich gęstościami masowymi oraz gęstościami atomowymi poszczególnych izotopów. Dane dla wody borowej zostały odpowiednio przeliczone względem tych z benchmarku. Było to spowodowane koniecznością przyjęcia innej zawartości boru – benchmark określał tę wartość dla pracy reaktora na zerowej mocy (ang. *Hot Zero Power*, HZP), natomiast w tej pracy badano reaktor pracujący na pełnej mocy. Zawartość boru została więc zmieniona z 975 ppm na 378 ppm, zgodnie z wyjaśnieniem znajdującym się w innej pracy [11], która skupia się na tym samym reaktorze.

4.3. Kasetki paliwowe

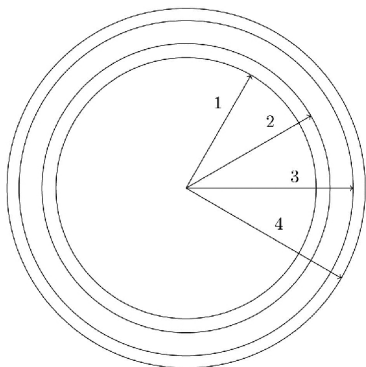
Kasetki paliwowe mają siatkę 17 17. Ich aktywna długość wynosi 365,76 cm. Skok siatki elementu paliwowego to 1,25984 cm, a długość boku kasetki paliwowej to 21,50364 cm. Pręty z trucizną wypalającą się (ang. *Burn-*



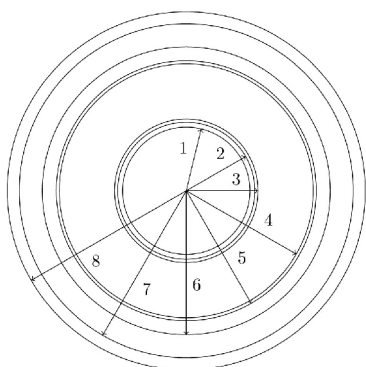
Rys. 5. Wymiary pręta paliwowego.
Fig. 5. Fuel pin geometry.



Rys. 6. Wymiary rury wodącej.
Fig. 6. Guide tube geometry.



Rys. 7. Wymiary rurki instrumentów pomiarowych.
Fig. 7. Instrument tube geometry.



Rys. 8. Wymiary pręta z trucizną wypalającą się.
Fig. 8. Burnable absorber rod geometry.

able Absorber, BA) mają aktywną długość 360,68 cm i jest ich w rdzeniu 1266. Zadaniem wypalającej się trucizny jest pochłanianie neutronów w celu zrównoważenia reaktywności w świeżym paliwie. W kasetach paliwowych może znajdować się 0, 6, 12, 15, 16 lub 20 prętów z trucizną wypalającą się, oznaczanych skrótem BA, zgodnie z następującym zestawieniem liczby prętów i stopnia wzbogacenia paliwa:

- 1,6% wzbogacenia – 0 BA,
- 2,4% wzbogacenia – 0, 12 lub 16 BA,
- 3,1% wzbogacenia – 0, 6, 15, 16 lub 20 BA.

W każdej z kaset znajdują się 264 pręty paliwowe i 25 rur wodących. Graficzne przedstawienie każdej z kaset paliwowych otrzymane za pomocą kodu Polaris znajduje się w dalszej części pracy.

Tabela 2. Materiały pręta paliwowego.
Table 2. Fuel pin materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,39218	Paliwo
2	0,40005	Hel
3	0,45720	Stop cyrkonu

Tabela 3. Materiały rury wodącej.
Table 3. Guide tube materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,56134	Woda borowa
2	0,60198	Stop cyrkonu

Tabela 4. Materiały rurki instrumentów pomiarowych.
Table 4. Instrument tube materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,43688	Powietrze
2	0,48387	Stop cyrkonu
3	0,56134	Woda borowa
4	0,60198	Stop cyrkonu

Tabela 5. Materiały pręta z trucizną wypalającą się.
Table 5. Burnable absorber rod materials.

Nr strzałki	Promień (cm)	Materiał
1	0,21400	Powietrze
2	0,23051	Stal nierdzewna 304
3	0,24130	Hel
4	0,42672	Szkoło boro-krzemowe
5	0,43688	Hel
6	0,48387	SS304
7	0,56134	Woda borowa
8	0,60198	Stop cyrkonu

Tabela 6. Paliwo o wzbogaceniu 1,6%.**Table 6.** 1.6% enrichment fuel.

Gęstość	10,31341 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
O16	4,5897e-02
O17	1,7436e-05
O18	9,2032e-05
U234	3,0131e-06
U235	3,7503e-04
U238	2,2625e-02

Tabela 7. Paliwo o wzbogaceniu 2,4%.**Table 7.** 2.4% enrichment fuel.

Gęstość	10,29748 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
O16	4,5830e-02
O17	1,7411e-05
O18	9,1898e-05
U234	4,4842e-06
U235	5,5814e-04
U238	2,2407e-02

Tabela 8. Paliwo o wzbogaceniu 3,1%.**Table 8.** 3.1% enrichment fuel.

Gęstość	10,30166 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
O16	4,5853e-02
O17	1,7420e-05
O18	9,1942e-05
U234	5,7987e-06
U235	7,2175e-04
U238	2,2253e-02

Tabela 9. Woda borowa.**Table 9.** Borated water.

Gęstość	0,71217 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
B10	2,9719e-06
B11	1,2022e-05
H1	4,7559e-02
H2	7,408e-06
O16	2,3726e-02
O17	9,0138e-06
O18	4,7576e-05

Tabela 10. Powietrze.**Table 10.** Air.

Gęstość	0,00616 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Ar36	7,8730e-09
Ar40	1,4844e-09
Ar40	2,3506e-06
C12	6,7539e-08
C13	7,5658e-10
N14	1,9680e-04
N15	7,2354e-07
O16	5,2866e-05
O17	2,0084e-08
O18	1,0601e-07

Tabela 11. Szkło boro-krzemowe.**Table 11.** Borosilicate glass.

Gęstość	2,26 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Al27	1,7352e-03
B10	9,6506e-04
B11	3,9189e-03
O16	4,6514e-02
O17	1,7671e-05
O18	9,3268e-05
Si28	1,6926e-02
Si29	8,5944e-04
Si30	5,6654e-04

Tabela 12. Hel.**Table 12.** Helium.

Gęstość	0,0015981 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
He3	4,8089e-10
He4	2,4044e04

Tabela 13. Stal nierdzewna 304.**Table 13.** Stainless steel 304.

Gęstość	8,03 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Cr50	7,6778e-04
Cr52	1,4806e-02
Cr53	1,6789e-03
Cr54	4,1791e-04
Fe54	3,4620e-03
Fe56	5,4345e-02

Fe57	1,2551e-03
Fe58	1,6703e-04
Mn55	1,7604e-03
Ni58	5,6089e-03
Ni60	2,1605e-03
Ni61	9,3917e-05
Ni62	2,9945e-04
Ni64	7,6261e-05
Si28	9,5281e-05
Si29	4,8381e-05
Si30	3,1893e-05

Tabela 14. Stop cyrkonu.**Table 14.** Zirconium alloy.

Gęstość	6,55 g/cc
Izotop	Gęstość atomowa [atom/b-cm]
Cr50	3,2962e-06
Cr52	6,3564e-05
Cr53	7,2076e-06
Cr54	1,7941e-06
Fe54	8,6698e-06
Fe56	1,3610e-04
Fe57	3,1431e-06
Fe58	4,1829e-07
O16	3,0744e-04
O17	1,1680e-07
O18	6,1648e-07
Sn112	4,6735e-06
Sn114	3,1799e-06
Sn115	1,6381e-06
Sn116	7,0055e-05
Sn117	3,7003e-05
Sn118	1,1669e-04
Sn119	4,1387e-05
Sn120	1,5697e-04
Sn122	2,2308e-02
Sn124	2,7897e-05
Zr90	2,1828e-02
Zr91	4,7601e-03
Zr92	7,2759e-03
Zr94	7,3734e-03
Zr96	1,1879e-03

5. SCALE

SCALE [12] (ang. *Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*) to narzędzie rozwijane w Narodowym Laboratorium Oak Ridge ORNL, służące do różnego rodzaju analiz związanych z bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną, takich jak obliczanie krytyczności, składu izotopowego paliwa, stopnia wypalenia paliwa itp. Korzysta z niego wiele dozorów jądrowych, takich jak amerykański NRC czy polska Państwowa Agencja Atomistyki oraz wiele firm na całym świecie.

5.1. Polaris

Do wykonania obliczeń wykorzystano kod Polaris z pakietu SCALE 6.2.4 [13]. Przeznaczony jest on do analiz neutronowych reaktorów lekkowodnych (LWR) i stanowi alternatywę dla starszego kodu TRITON, umożliwiając szybsze i prostsze modelowanie problemów. W ramach tej pracy do obliczeń w kodzie Polaris wykorzystano zestawy danych jądrowych, tzw. biblioteki przekrojów czynnych ENDF/B-V7.1, w wersji 252-grupowej oraz 56-grupowej, a także dane wprowadzone przez użytkownika w plikach wejściowych z rozszerzeniem.inp. Pliki wyjściowe mogą zostać wykorzystane do stworzenia trójwymiarowego modelu reaktora w innym kodzie obliczeniowym, np. PARCS [14]. Wyniki uzyskane z użyciem biblioteki 252-grupowej cechują się większą dokładnością niż te otrzymane na podstawie biblioteki 56-grupowej, jednak wyższa dokładność wiąże się z istotnym wydłużeniem czasu obliczeń. W pracy porównano rezultaty uzyskane dla obu bibliotek.

6. Modelowanie kaset paliwowych

Plik wejściowy kodu Polaris składa się z bloków, w których należy wskazać rodzaj reaktora, geometrię kasy paliwowej, skład, właściwości materiałów, typy elementów kasy wraz z rozmieszczeniem oraz inne parametry w zależności od rodzaju obliczeń, które są do wykonania. Zastosowano domyślne warunki refleksyjne na brzegach modelu, co odpowiada nieskończonej siatce kaset. Obliczenia wykonano dla kroków stopnia wypalenia: 0, 0,1, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 25, 30, 35, 40 i 45 GWd/tHM. W tabeli 15 przedstawione zostały parametry wejściowe, które przyjęto w ramach tej pracy. Gęstość mocy została wyliczona, korzystając ze wzoru: $P = P_{th}/M_{HM}$, gdzie M_{HM} – początkowa masa ciężkiego metalu, P_{th} – moc cieplna reaktora. Obie te wartości znaleźć można w tabeli 1. Temperatury i zawartość boru dla pracy reaktora na pełnej mocy zaczerpnięte zostały ze wspomnianej wcześniej pracy [11].

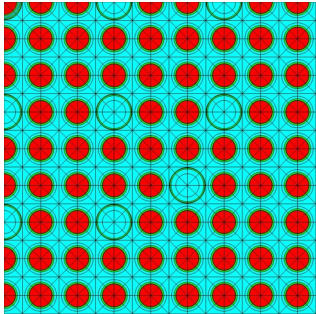
W reaktorze znajduje się 9 rodzajów kaset paliwowych, które różnią się wzbogaceniem paliwa lub liczbą prętów

Tabela 15. Parametry użyte w plikach wejściowych dla konwencjonalnego paliwa.

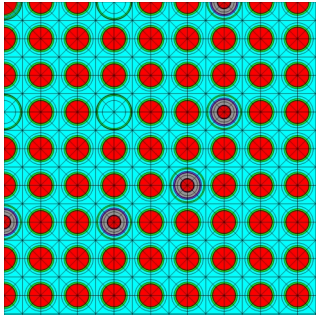
Table 15. Parameters used in the input files for conventional fuel.

Temperatura paliwa	900 K
Temperatura pozostałych materiałów	580 K
Zawartość boru	378 ppm
Gęstość mocy	41,699 MWth/tHM

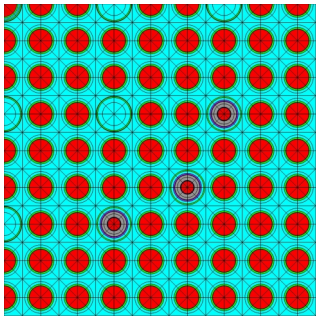
z wypalającą się trucizną. Dla każdego rodzaju kasety stworzone zostały 2 pliki wejściowe Polaris – jeden dla biblioteki 56-grupowej i drugi dla biblioteki 252-grupowej. W ramach symulacji Polaris utworzył pliki graficzne przedstawiające geometrię kaset. Te, których geometria jest symetryczna, przedstawione zostały w postaci ćwiartek. Grafiki widoczne są na rysunkach 9–15 (praca własna).



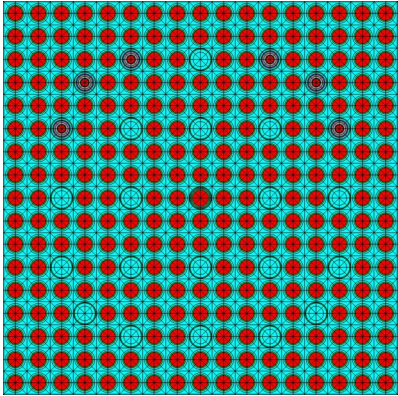
Rys. 9. Ćwiartka kaset: 1,6% OBA, 2,4% OBA i 3,1% OBA.
Fig. 9. Quarter of the assemblies: 1.6% OBA, 2.4% OBA and 3.1% OBA.% OBA



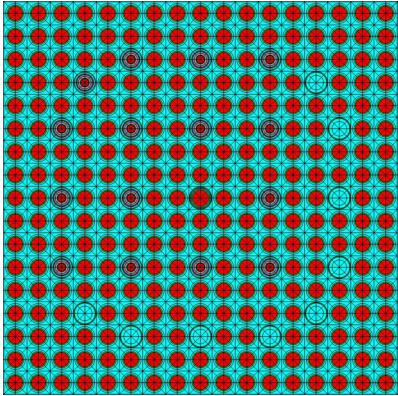
Rys. 10. Ćwiartka kasety 2,4% 16BA.
Fig. 10. Quarter of assembly 2.4% 16BA.



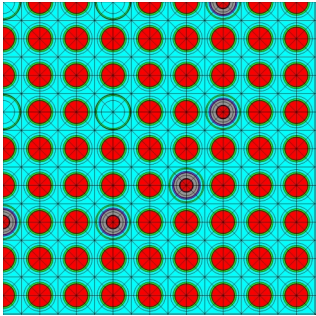
Rys. 11. Ćwiartka kasety 2,4% 12BA.
Fig. 11. Quarter of assembly 2.4% 12BA.



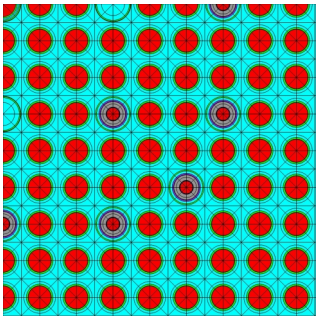
Rys. 12. Kaseta paliwowa 3,1% 6 BA.
Fig. 12. Fuel assembly 3,1% 6 BA.



Rys. 13. Kaseta paliwowa 3,1% 15BA.
Fig. 13. Fuel assembly 3.1% 15BA.



Rys. 14. Ćwiartka kasety 3,1% 16BA.
Fig. 14. Quarter of 3.1% 16BA assembly.



Rys. 15. Ćwiartka kasety 3,1% 20BA.
Fig. 15. Quarter of assembly 3.1% 20BA.

7. Analiza wyników

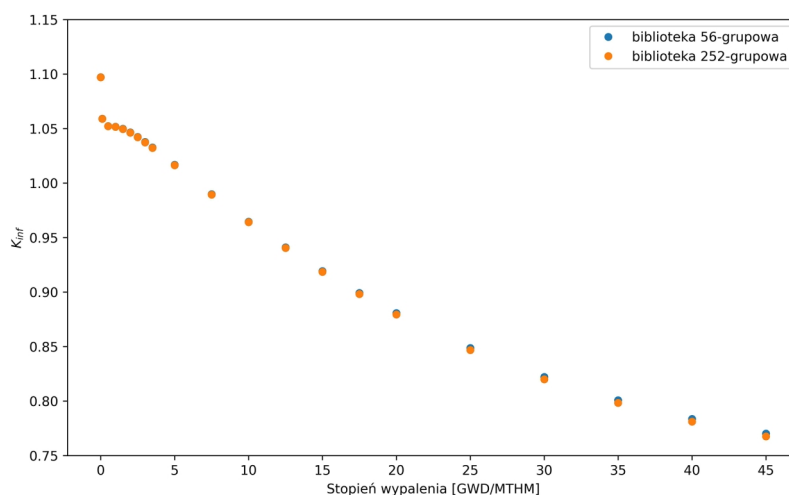
Do przeprowadzenia obliczeń krytycznościowych dla każdej kasety wykorzystano kod Polaris. Pliki wyjściowe zawierały m.in. wartość nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów dla kolejnych kroków stopnia wypalenia. Stopień wypalenia to miara ilości energii uwolnionej podczas wypalania paliwa w reaktorze i jest on proporcjonalny do czasu wypalania.

Na wykresach 16–24 (praca własna) przedstawiono porównanie zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla biblioteki 56- i 252-grupowej. Z wykresów odczytać można, że wyniki dla obu rodzajów bibliotek na wszystkich wykresach w większości dobrze się pokrywają. Różnica zaczyna być widoczna dopiero dla bardzo dużych wartości stopnia wypalenia kaset – w okolicy punktu głębokiego stopnia

wypalenia, tzn. kiedy $k_{inf} < 0,95$, co oznacza, że reaktor jest w stanie głęboko podkrytycznym.

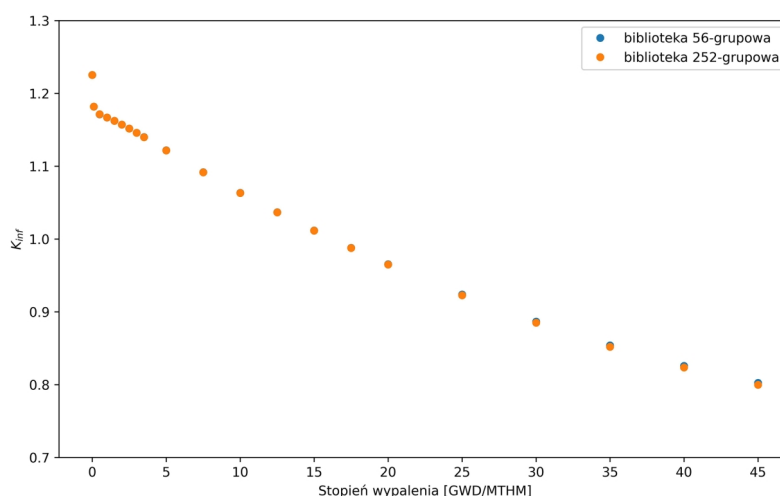
W celu lepszego zobrazowania tych różnic, na rysunku 25 przedstawiono wykres względnej różnicy nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów, obliczonej wg wzoru $(k_{inf-56} - k_{inf-252}) / k_{inf-252}$ w funkcji stopnia wypalenia dla wszystkich typów kaset. Wartość tej różnicy osiąga maksymalnie wartość około 0,33%, co mogłoby się wydawać bardzo dobrym wynikiem.

W celu porównania wyników przygotowano również widoczny na rysunku 26 wykres, który przedstawia w skali logarytmicznej zależność różnicy w reaktywności w pcm dla obu bibliotek w funkcji stopnia wypalenia. Odczytać z niego można, że maksymalna wartość różnicy to około 450 pcm, co jest sporą wartością z punktu widzenia działania reaktora.



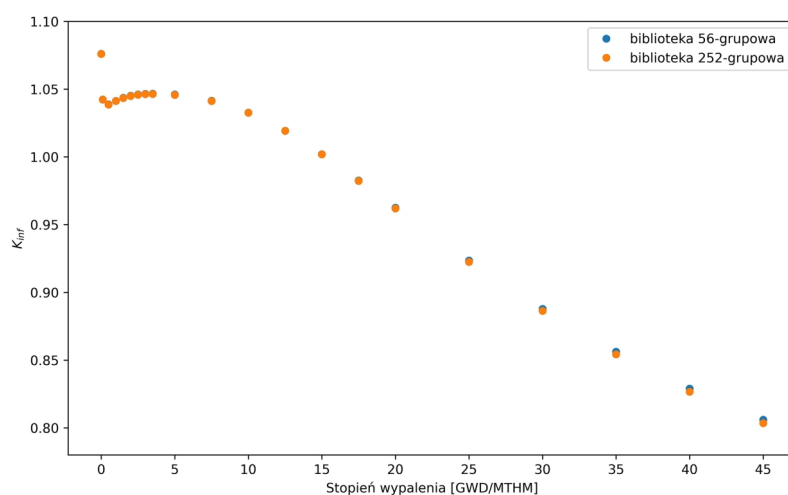
Rys. 16. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 1,6% bez prętów z wypalającą się trucizną.

Fig. 16. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on fuel burnup for a fuel assembly with 1.6% enrichment, without burnable absorber rods.



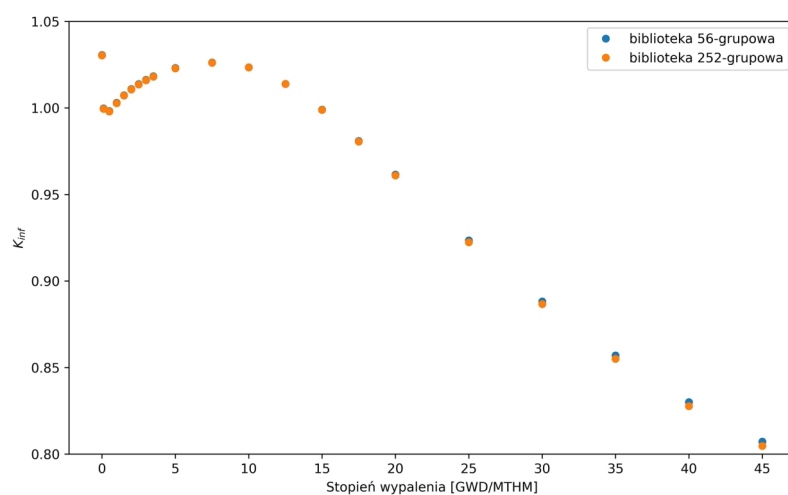
Rys. 17. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 2,4% bez prętów z wypalającą się trucizną.

Fig. 17. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 2.4% enriched fuel assembly without burnable absorber rods.



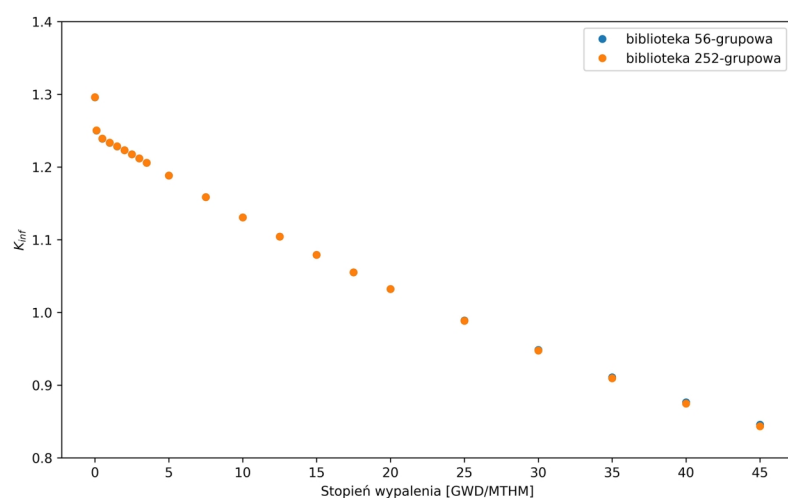
Rys. 18. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 2,4% z 12 prętami z wypalającą się trutyczną.

Fig. 18. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 2.4% enriched fuel assembly with 12 burnable absorber rods.



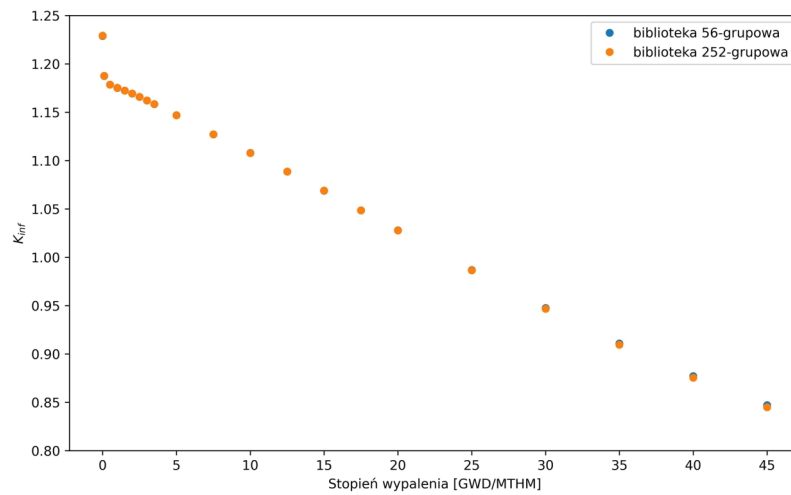
Rys. 19. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 2,4% z 16 prętami z wypalającą się trutyczną.

Fig. 19. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 2.4% enriched fuel assembly with 16 burnable absorber rods.



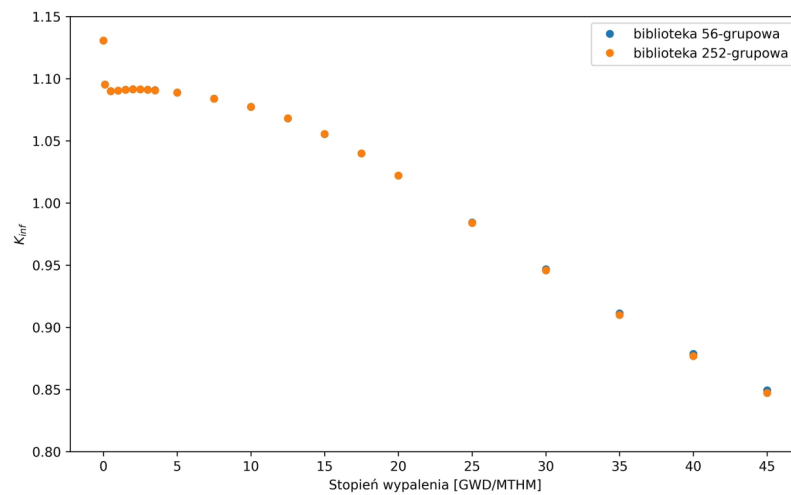
Rys. 20. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% bez prętów z wypalającą się trutyczną.

Fig. 20. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly without burnable absorber rods.



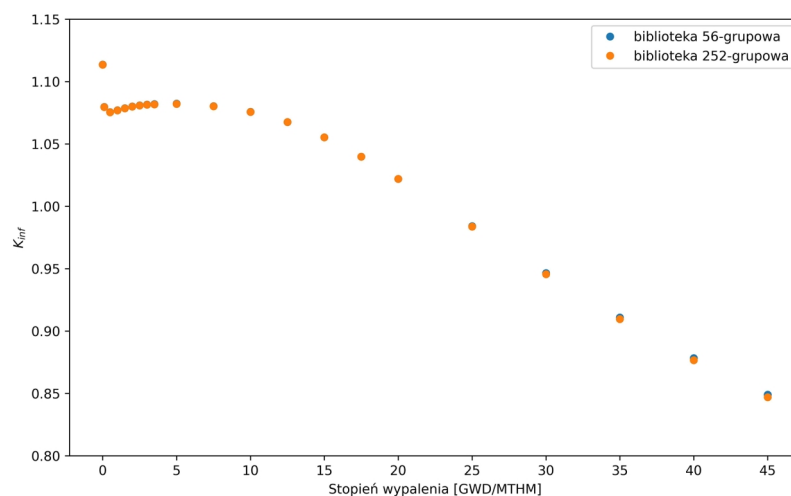
Rys. 21. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 6 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 21. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 6 burnable absorber rods.



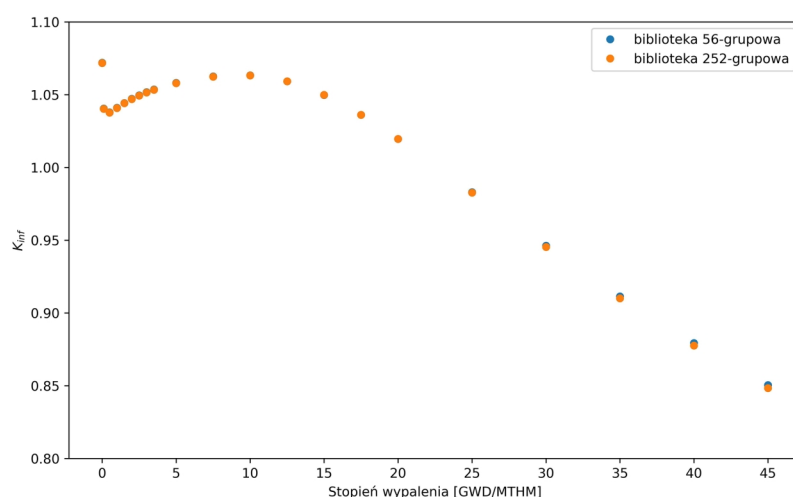
Rys. 22. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 15 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 22. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 15 burnable absorber rods.



Rys. 23. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 16 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 23. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 16 burnable absorber rods.

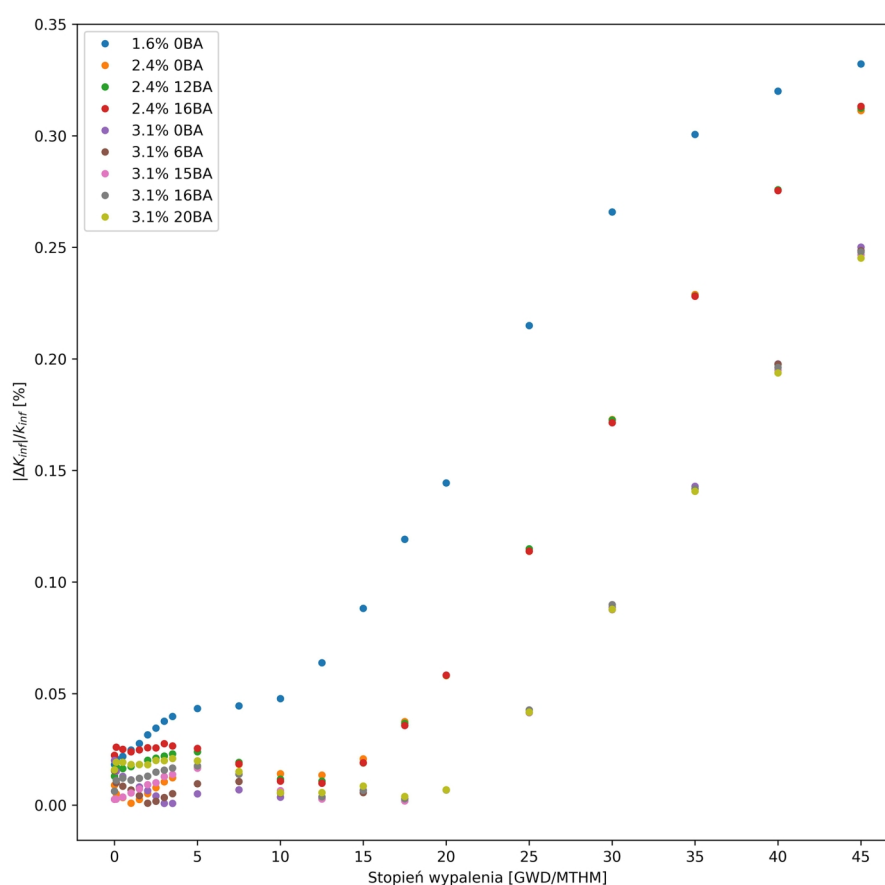


Rys. 24. Wykres zależności nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla kasety o wzbogaceniu paliwa 3,1% z 20 prętami z wypalającą się trucizną.

Fig. 24. Graph showing the dependence of the infinite neutron multiplication factor on burnup for a 3.1% enriched fuel assembly with 20 burnable absorber rods.

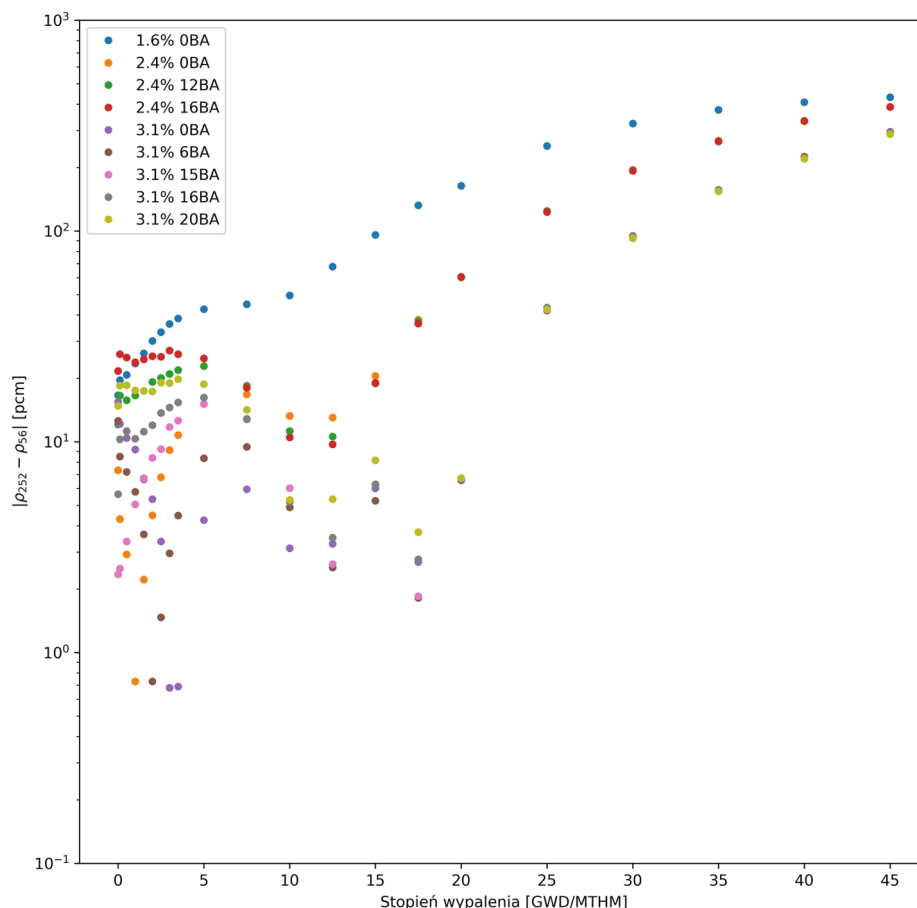
W większości różnica nie przekracza jednak wartości 18 pcm. Można więc uznać, że otrzymane wartości są szczególnie satysfakcjonujące dla mniejszych stopni wypalenia. Na obu wykresach widać, że różnica bardzo mocno zależy od wzbogacenia paliwa – im wyższe wzbogacenie, tym bardziej wyniki dla obu bibliotek są do siebie zbliżone.

Jedną z przyczyn mniejszych różnic między bibliotekami przy wyższym wzbogaceniu paliwa jest wyższa energia neutronów. Wynika to z mniejszej zawartości U-238, który w znacznym stopniu odpowiada za pochłanianie neutronów w obszarze rezonansowym widma. Gdy U-238 jest mniej, spada liczba pochłonieć w tym zakresie, a średnia



Rys. 25. Wykres zależności względnej różnicy nieskończonego współczynnika mnożenia neutronów od stopnia wypalenia dla wszystkich typów kaset (praca własna).

Fig. 25. Graph showing the dependence of the relative difference in the infinite neutron multiplication factor on burnup for all fuel assembly types (own work).



Rys. 26. Wykres zależności bezwzględnej różnicy reaktywności od stopnia wypalenia dla wszystkich typów kaset (praca własna).

Fig. 26. Graph showing the dependence of the absolute reactivity difference on burnup for all fuel assembly types (own work).

energia neutronów rośnie. W rezultacie wpływ tego obszaru widma, w którym różnice między bibliotekami są największe, staje się mniej istotny. Dlatego wraz ze wzrostem wzbogacenia obserwuje się zmniejszenie różnic w wartościach k_{inf} pomiędzy bibliotekami.

Zauważyć można też, że do pewnego stopnia wypalenia (w zależności od stopnia wzbogacenia paliwa) różnica jest większa dla kaset, które mają większą liczbę prętów z trucizną wypalającą się. Natomiast powyżej tego stopnia wypalenia większa liczba prętów z trucizną daje mniejszą różnicę. Wypalające się trucizny, takie jak gadolin, charakteryzują się bardzo silnymi i złożonymi rezonansami absorpcyjnymi. Na początku cyklu wypalania, przy ich wysokim stężeniu, znacząco wpływają na absorpcję neutronów. Dokładność odwzorowania tych rezonansów przez bibliotekę przekrojów ma istotny wpływ na wartość współczynnika mnożenia. Biblioteka 56-grupowa odwzorowuje je z mniejszą precyzją niż biblioteka 252-grupowa, co prowadzi do większych różnic w wynikach. Wraz z wypalaniem trucizn ich wpływ maleje, a różnice między wynikami dla obu bibliotek stają się mniej wyraźne. Pliki wyjściowe poza wyliczeniami rejestrowały również czas trwania obliczeń. Porównanie czasów dla obu bibliotek pokazało, że w zależności od rodzaju kasyety czas obliczeń dla biblioteki 252-grupowej może być nawet ponad 6 razy

dłuższy niż dla biblioteki 56-grupowej. Warto tutaj wspomnieć, że najdłuższy czas obliczeń dla jednej kasyety wyniósł prawie 82 godziny. Można zatem wywnioskować, że w przypadku bardzo dużej liczby przypadków do przeanalizowania, ograniczonej wydajności sprzętu lub w przypadku gdy nie ma potrzeby, aby wyniki były bardzo dokładne (zwłaszcza dla dużych stopni wypalenia), lepszym wyborem będzie skorzystanie z biblioteki 56-grupowej. Natomiast w pozostałych przypadkach warto rozważyć wydłużenie obliczeń i otrzymanie bardziej dokładnych wyników z użyciem biblioteki 252-grupowej. Warto zaznaczyć, że głównym celem przeprowadzonych obliczeń nie była realizacja benchmarku w jego klasycznym rozumieniu, lecz analiza wpływu zastosowanej biblioteki przekrojów na wyniki uzyskiwane dla pojedynczych kaset paliwowych. Tego rodzaju porównanie umożliwia ocenę niepewności związanej z wyborem biblioteki, co ma istotne znaczenie przy podejmowaniu decyzji dotyczących dalszych obliczeń na poziomie całego rdzenia. Choć model geometryczny oparto na danych z benchmarku BEAVRS, należy podkreślić, że nie zawiera on danych referencyjnych – ani pomiarowych, ani obliczeniowych – dotyczących pojedynczych kaset. Z tego względu przeprowadzenie walidacji na tym poziomie nie było możliwe i nie stanowiło zakresu niniejszej pracy.

8. Podsumowanie

Celem pracy było określenie wpływu doboru biblioteki przekrojów czynnych na wyniki obliczeń dla pojedynczych kaset paliwowych. Analiza wykazała, że różnice między wynikami uzyskanymi z bibliotek 56- i 252-grupowych są minimalne w zakresie niskich i średnich stopni wypalenia. Dla zastosowań wymagających najwyższej precyzji, zwłaszcza przy dużych stopniach wypalenia zalecana jest biblioteka 252-grupowa. Jednak w większości przypadków, gdzie kluczowe jest szybkie wykonanie obliczeń przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia zasobów sprzętowych, biblioteka 56-grupowa stanowi optymalny wybór, szcze-

gólnie że czas obliczeń może być nawet sześciokrotnie krótszy. Brak danych dla pojedynczych kaset w benchmarku BEAVRS uniemożliwił bezpośrednią walidację, jednak wyniki są zgodne z przewidywanym zachowaniem fizycznym kaset paliwowych podczas wypalania.

O autorze

Anna Łuczak – mgr fizyki, od trzech lat pracuje w Państwowej Agencji Atomistyki (PAA), w Departamencie Bezpieczeństwa Jądrowego. Specjalizuje się w analizach bezpieczeństwa obiektów jądrowych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień neutroniki. Absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Literatura

1. <https://www.fornuclear.org/en/nuclear-power/questions-and-answers/on-nuclear-power/how-does-a-nuclear-reaction-take-place/>, dostęp: 4 lipca 2025 r.
2. Dobrzyński L., Podstawy fizyki reaktorów jądrowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku oraz Wydział Matematyczno-Fizyczny Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Świerk, 2013.
3. U.S. Department of Energy, DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory, t. 2, Waszyngton DC, 1993.
4. Kok K. D. Nuclear Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2016.
5. El-Sefy, M., Ezzeldin M., El-Dakhakhni W., Wiebe L., Nagasaki S., System dynamics simulation of the thermal dynamic processes in nuclear power plants, Nuclear Engineering and Technology, t. 51, 6, 2019, 1540-1553.
6. U.S. NRC, NRC Reactor Concepts (R-100) Training Course, 2017.
7. International Atomic Energy Agency, Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-52, IAEA, Wiedeń, 2019.
8. Darnowski P., 3-fizyka reaktorów jądrowych, materiały szkoleniowe, Politechnika Warszawska, Warszawa, 12-16.12.2022.
9. Kumar S., Liang J., Forget B., Smith K., BEAVRS: An integral full core multi-physics PWR benchmark with measurements and uncertainties, Progress in Nuclear Energy, 129, 103488, 2020.
10. Horelik N., Herman B., Ellis M., Kumar S., Liang J., Forget B., Smith K., MIT Benchmark for Evaluation and Validation of Reactor Simulations (BEAVRS) Rev. 2.0.2. MIT Computational Reactor Physics Group, 2018.
11. Darnowski P., Pawulczyk M., Analysis of the BEAVRS PWR benchmark using SCALE and PARCS, Nukleonika, t. 64, 3, 2019.
12. Wieselquist W. A., Lefebvre R. A., Jessee M. A., SCALE Code System Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2020.
13. Jessee, M. A., Wieselquist, W. A., Evans, T. M., Hamilton, S. P., Jarrell, J. J., Kim, K. S., Lefebvre, J. P., Lefebvre, R. A., Mertyurek, U., Thompson, A. B., Williams, M. L., Polaris: A new two-dimensional lattice physics analysis capability for the SCALE code system, Paper presented at 2014 International Conference on Physics of Reactors, PHYSOR 2014, Kyoto, 2014.
14. Downar T., Ward A., Seker V., Hudson N., Barber D., Larsen L., Neykov B., Roth G., Xu Y., PARCS v3.4.3 Release, t. 1, 2022.

Radioliza polimerowych wyrobów medycznych na przykładzie polipropylenu

Radiolysis of polymer medical products on the example of polypropylene

Wojciech Głuszewski
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

Streszczenie: Unikatową cechą radiacyjnej chemii jest możliwość przeprowadzenia w praktycznie dowolnej temperaturze wielu procesów zachodzących tradycyjnie przy skrajnie wysokich parametrach technologicznych. Szczególnym przypadkiem jest radioliza tworzyw polimerowych, badana w kontekście zimnej sterylizacji wyrobów medycznych. Krótko przypomniano historię chemii radiacyjnej polimerów. Wspomniano o naukowym projekcie Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) dotyczącym wpływu promieniowania jonizującego na medyczne tworzywa polimerowe. Przykładowo omówiono wpływ opakowania na postradiacyjne efekty utleniania sterylizowanego radiacyjnie polipropylenu.

Słowa kluczowe: Polimery, radioliza, sterylizacja, polipropylen, wiązka elektronów, chromatografia gazowa.

Abstract: A unique feature of radiation chemistry is the ability to carry out many processes at virtually any temperature that occur at extremely high parameters in traditional chemistry. A special case is the radiolysis of polymer materials, studied, for example, in the context of cold sterilization of medical devices. The history of radiation chemistry of polymers is briefly recalled. The scientific project of the International Atomic Energy Agency (IAEA) on the effects of ionizing radiation on medical polymer materials is mentioned. For example, the influence of packaging on the post-radiation effects of oxidation of radiation-sterilized polypropylene is discussed.

Keywords: Polymers, radiolysis, sterilization, polypropylene, electron beam, gas chromatography.

Badania radiolizy polimerów

W Bombaju w Indiach w dniach 18–22 listopada 2024 roku odbyła się konferencja, na której podsumowano wyniki projektu MAEA – CRP F23035 “Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices”. W badaniach uczestniczyli przedstawiciele: Argentyny, Brazylii, Egiptu, Francji, Indonezji, Indii, Filipin, Polski, Portugalii, Rosji, Serbii, Tunezji, Turcji i USA. We wszystkich tych krajach działają radiacyjne instalacje wykorzystywane komercyjnie do wyjaławiania wyrobów medycznych. Spotkanie zorganizował Kishinchand Chellaram College, HSNC University we współpracy z Taj President Hotel Mumbai India. Uczestnicy omówili wyniki badań radiolizy medycznych polimerów prowadzonych przez ostatnie kilka lat. Do radiacyjnej obróbki polimerów używano wiązki elektronów (EB) i promieniowanie

gamma (γ). Wyjątkiem były francuskie prace, w których zastosowano dla porównania również promieniowanie hamowania (X). Doświadczenia zdobyte w badaniach radiolizy polimerów są obecnie wykorzystywane również w wielu innych dziedzinach np. energetyce jądrowej. Radiacyjnie korzystnie modyfikuje się izolacje kabli i przewodów elektrycznych, wytwarza się barierowe dla promieniowań jonizujących polimerowe kompozyty, bada wydajności radiolitycznie uwalnianego wodoru w składówkach odpadów promieniotwórczych.

Historia radiacyjnej modyfikacji polimerów

W roku 1899 małżeństwo Piotra Curie i Marii ze Skłodowskich opublikowało pierwszą w naukowej literaturze pracę z zakresu chemii radiacyjnej [1]. Uczeń opisali między



Fot. 1. Gubernator Maharasztry i jednocześnie Kanclerz Uniwersytetu HSNC Shri CP Radhakrishnan w otoczeniu uczestników konferencji.

Photo 1. Governor of Maharashtra and Chancellor of HSNC University Shri CP Radhakrishnan surrounded by the conference participants.

innymi: wydzielanie gazów ze stężonych roztworów pierwiastków promieniotwórczych, utlenianie tlenu do ozonu, żółknięcie i kruszenie się papieru oraz barwienie szkła i porcelany pod wpływem promieniowania jonizującego. Analizując wyniki prowadzonych na początku XX wieku prac Maria Skłodowska-Curie wywiodła podstawową dla chemii radiacyjnej jonową koncepcję zjawisk wywołanych działaniem na materię promieniowania emitowanego przez radionuklidy. Wykazała, że wtórne procesy chemiczne mają swój początek w jonizacji (wybiciu elektronu). W roku 1929 Mme P. Curie (tak się wówczas uczona podpisała) opublikowała artykuł na temat wpływu promieniowania X na bakterie. Przedstawiła po raz pierwszy tzw. krzywe radiacyjnej inaktywacji, czyli zależności przeżywalności bakterii od dawki promieniowania jonizującego. Zgłosiła w ten sposób koncepcję zwalczania patogenów za pomocą promieniowania rentgenowskiego. Pomysł nie miał w tym czasie praktycznego znaczenia głównie z powodu braku źródeł promieniowania o dużej mocy a poza tym ówczesny sprzęt medyczny tanio i wygodnie wyjaławiano termicznie. Dopiero upowszechnienie się wykonanych z tworzyw polimerowych wyrobów medycznych jednorazowego użytku stworzyło zapotrzebowanie na tzw. zimne metody sterylizacji. Opłaczalne stało się konstruowanie i budowanie stosunkowo kosztownych źródeł promieniowania jonizującego wielkiej mocy. Kolejnym przełomem było odkrycie zjawiska radiacyjnego sieciowania polimerów. Na efekt ten zwrócono uwagę przy okazji obserwacji izolacji kabli używanych w pomieszczeniach reaktorów jądrowych. Wielkości dawek promieniowania jonizującego były w tych przypadkach wielokrotnie wyższe od stosowanych zwykle w pracach badawczych z naturalnymi izotopami promieniotwórczymi. Niska wiedza na temat radiolizy polimerów na początku lat

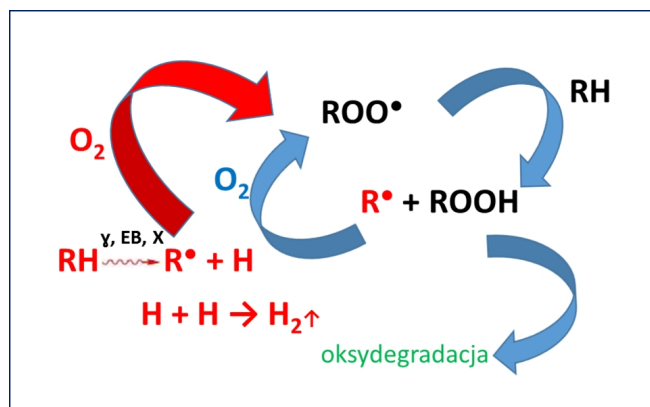
czterdziestych pozwalała przypuszczać, że promieniowanie jonizujące w wyniku degradacji izolacji będzie prowadzić do pogorszenia własności użytkowych kabli. Zupełnie nieoczekiwanie napromieniowany polietylen (PE) nie tylko nie obniżał parametrów, a przeciwnie zwiększał odporność mechaniczną i termiczną. Zjawisko takie można było wytłumaczyć tylko powstawaniem wiązań poprzecznych między sąsiednimi łańcuchami polimeru. Za odkrywcę radiacyjnego sieciowania polietylenu uważa się ostatecznie Charlesby'ego (z wykształcenia fizyka z wyboru chemika) z jego fundamentalną publikacją w *Nucleonics* [2]. Tezy autora były tak przekonywujące, że weszły szybko do literatury popularnonaukowej i podręczników. Dla formalności należy jednak dodać, że wcześniej badania własności wytrzymałościowych folii z PE w reaktorze jądrowym Argonne National Laboratory prowadził Malcolm Dole. Prace te jednak uszły szerszej uwadze i nie były cytowane przez Charlesby'ego, który po roku 1955 dokonał zasadniczego postępu w poznaniu zjawisk sieciowania, opisując je w sposób ilościowy. Zależność ta znana jest od 1959 roku, jako równanie Charlesby'ego i Pinnera. Wracając do Dole'a warto jeszcze wspomnieć, że jako typowy chemik wykazał, że sieciowaniu PE towarzyszy wydzielanie wodoru. Udowodnił również, że w procesie radiolizy głównie pękają wiązania węgiel-wodór, a nie jak można było przypuszczać węgiel-węgiel. Towarzystwo temu powstanie na łańcuchu wolnego rodnika alkilowego. Pierwsze publikacje Charlesby'ego i Dole'a nie spowodowały od razu komercyjnego wykorzystania sieciowania polietylenu i innych polimerów. Przełomem dla komercjalizacji była publikacja (zresztą niemal równoległa do artykułu Charlesby'ego) przedstawiająca badania wykonane w laboratorium General Electric (GE) w Schenectady w stanie Nowy Jork. Zbudowano tam i zastosowano do

obróbki materiałów akcelerator elektronów. Duża moc dawki, jaką można uzyskać w przypadku wiązki elektronów ograniczała powierzchniowe utlenianie polietylenu. Rewelacją tego, opublikowanego w prestiżowym *Nature* artykułu, było nie tylko wprowadzenie do obróbki radiacyjnej polimerów, ale przebadanie typowych z nich pod kątem sieciowania [3]. Lista wówczas opublikowana jest do dziś aktualna i wymienia 7 polimerów, jako niesieciujące i 14 jako sieciujące. PE zdobył szybko dominującą pozycję wśród grupy modyfikowanych radiacyjnie polimerów i już w latach pięćdziesiątych zaczął być z powodzeniem komercyjnie napromieniowywany głównie wiązką elektronów.

Mimo, że w produkcji wyrobów medycznych wykorzystujemy formalnie te same polimery to w zależności od producenta ich podatność na działanie promieniowania jonizującego może się różnić. W szczególności dotyczyło to mało odpornego na promieniowanie jonizujące polipropylenu (PP) [4]. Generalnie związane jest to z wykorzystywaniem w przetwórstwie tworzyw sztucznych różnego rodzaju nowych antyutleniaczy, fotostabilizatorów oraz barwników [5]. W zdecydowanej większości są to związki aromatyczne, które wykazują w radiolizie organicznych materiałów efekt ochronny. Postęp w zakresie chemii i technologii polimerów powoduje, że należy testować nowe odmiany tworzyw polimerowych [6]. Badania funkcjonalnych dodatków stosowanych w różnych krajach pozwalają rekomendować niektóre z nich specjalnie dla tworzyw poddawanych sterylizacji radiacyjnej. Wyniki badań nad radiolizą współczesnych medycznych polimerów zostaną podsumowane w publikacji przygotowywanej przez MAEA z udziałem autora.

Sterylizacja radiacyjna

Promieniowanie jonizujące jest obecnie powszechnie stosowane do wyjaławiania wyrobów medycznych i przeszczepów na całym świecie [7, 8, 9]. W szczególności jest niezastąpione przy sterylizacji nieodpornych na wysokie temperatury tworzyw polimerowych. Unikatowość metody polega na tym, że w bardzo krótkim czasie obróbce radiacyjnej można poddać materiał w: dowolnej temperaturze, całej objętości, opakowaniu jednostkowym i zbiorczym. W odróżnieniu od konkurencyjnej chemicznej metody wykorzystującej najczęściej tlenek etylenu nie wprowadza się do wyrobu zanieczyszczeń. Dodatkowo w przypadku nawet niewielkich ilości monomeru są one spolimeryzowane w procesach indukowanych radiacyjnie. Warto jeszcze raz podkreślić krótki czas procesu, który w przypadku wiązki elektronów liczony jest w sekundach. Tak, więc nawet bardzo duże partie materiałów, utensyliów, pojemników i medycznych substancji ekspresowo wyjaławia się w ciągu kilku godzin. Bezpośrednio po napromieniowaniu bez dodatkowych zabiegów można wyroby transportować do aptek, hurtowni lub szpitali.



Rys. 1. Schemat procesu łańcuchowego postradiacyjnego utleniania PP poprzez odtwarzany wolny rodnik.

Fig. 1. Schematic diagram of the chain process of post-radiation oxidation of PP by a regenerated free radical.

Radioliza polipropylenu

Chemia radiacyjna polipropylenu (PP) jest interesująca poznawczo ze względu na specyficzny, mechanizm post-radiacyjnej oksydegradacji [10]. Pierwotne zjawiska inicjowane promieniowaniem zachodzą z małą energią aktywacji jednak wtórne procesy, zwłaszcza te na powierzchni wykazują zależność od temperatury [11]. Polipropylen w atmosferze powietrza praktycznie nie ulega radiacyjnemu sieciowaniu a promieniowanie jonizujące zapoczątkowuje proces łańcuchowego utleniania. Z tych powodów często rezygnuje się ze radiacyjnej sterylizacji wyrobów medycznych jednorazowego użytku wykonanych z PP (np. strzykawek). Należy jednak zwrócić uwagę, że badania zjawisk degradacji polimeru wykonuje się najczęściej w powietrzu. Nawet wtedy, gdy samo napromieniowanie przeprowadza się w atmosferze beztlenuowej. Badania radiolizy PP z wykorzystaniem chromatografii gazowej pokazały, że wydajny proces postradiacyjnego utleniania prowadzi w krótkim czasie do praktycznie całkowitego zużycia tlenu w analitycznej butelce.

Tak więc w praktyce, przy zastosowaniu szczelnego polimerowego opakowania wyroby z PP będą przechowywane w atmosferze azotu (na początku z pewnym dodatkiem wodoru) a nie, jak się w starzeniowych eksperymentach zakłada, w powietrzu [12, 13]. W takich warunkach procesy destrukcji oksydacyjnej będą ograniczone, a powstające wtórnie wolne rodniki mogą tworzyć korzystne z użytkowego punktu widzenia wiązania poprzeczne.

Materiały

W eksperymencie użyto pierwotny polipropylen Moplen HP 400H pobrany z linii technologicznej Zakładów Basell Orlen Polyolefins. Nie zawierał on standardowo stosowanych aromatycznych fotostabilizatorów i antyutleniaczy.

Chromatografia gazowa

W trakcie realizacji pracy korzystano z urządzenia GC Shimadzu 2014 (z detektorem ciepło – przewodnościowym (TCD-2014) i kolumną pakowaną – sita molekularne 5A). Układ chromatograficzny aparatu projektowany był pod kątem oznaczania głównego produktu radiolizy polimerów – wodoru. Na tej samej kolumnie w trakcie jednego pomiaru oznacza się równolegle tlen, tlenek węgla i metan [14].

Źródła promieniowania

W badaniach wykorzystano źródło promieniowania gamma produkcji indyjskiej o mocy dawki około 1,5 kGy/h oraz wiązkę przemianą przemysłowego akceleratora Elektronika 10/10 o mocy dawki 14 000 kGy/h. Wielkość dawki oceniano za pomocą kalorymetru grafitowego oraz dozymetrów alaninowych z wykorzystaniem EPR (elektromagnetyczny rezonans paramagnetyczny).

Eksperyment

Próbki polimeru o masie 1 g umieszczano w fiolkach szklanych (penicylinówkach) o objętości 3,1 ml i zamykano korkiem gumowym. Korek osłaniany przed promieniowaniem kapturkiem ołowianym. Próbki dopromieniowywano kolejnymi dawkami w źródle promieniowania gamma GC 5000, o mocy dawki 1,5 kGy/h. Buteleczki z próbką PP nie były otwierane przed kolejnym napromieniowaniem. Po każdej dawce oznaczano sumaryczną ilość wodoru powstającego w wyniku radiolizy polimeru (tab. 1).

Po pierwszych dawkach w wyniku procesu postradacyjnego utleniania PP ilość tlenu w buteleczce zmniejszała

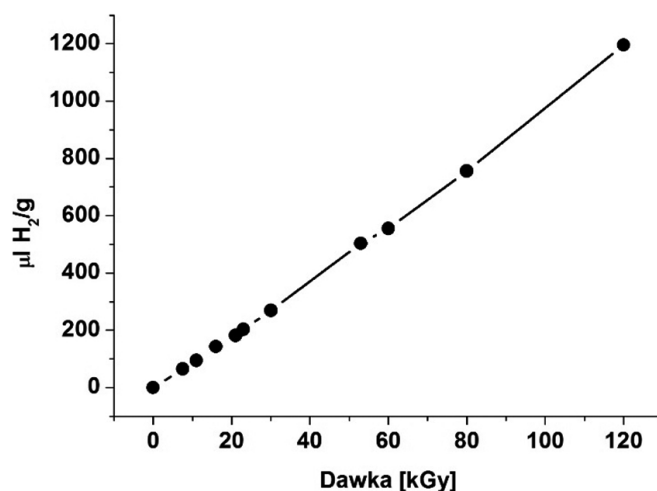
Tabela 1. Wyniki chromatograficznych analiz przeliczone na radiolityczną wydajność wydzielania wodoru wyrażaną w μmol na J pochłoniętej energii promieniowania.

Table 1. Results of chromatographic analyses converted into radiolytic hydrogen evolution efficiency expressed in μmol per J of absorbed radiation energy.

kGy	GH ₂ [$\mu\text{mol}/\text{J}$]
7,5	0,388
11	0,390
16	0,395
21	0,400
23	0,401
30	0,405
53	0,410
60	0,413
80	0,422
120	0,445

się praktycznie do zera. W warunkach beztlenowych zaobserwowano wzrost radiolitycznej wydajności wodoru (rys. 2). Postulowaną przyczyną tego zjawiska jest możliwość sieciowania PP z udziałem tylko jednego makrorodnika. Można założyć, że dziura powstająca w wyniku jonizacji (lub stan wzbudzony) jest transportowana do miejsca wygodnego energetycznie i tam inicjuje oderwanie atomu wodoru z innego łańcucha tworząc wiązanie poprzeczne. W celu sprawdzenia czy wzrost wydajności wydzielania wodoru nie jest wynikiem jego dyfuzji z ziaren polimeru wykonano kolejne doświadczenie. Próbki PP napromieniowano wiązką elektronów dawką 56 kGy w powietrzu i pod azotem. Różnica była niewielka, gdyż po krótkim czasie tlen w próbce z powietrzem był zużyty (tab. 2).

Następnie otwarto buteleczki i po uwolnieniu produktów radiolizy zamknięto je ponownie. Polipropylen starzono 24 h w temperaturze 40°C. Po tym czasie wykonano analizy chromatograficzne. Oznaczono jedynie niewielkie ilości wodoru. Wykazano również znaczny ubytek tlenu w procesach postradacyjnych. Nieco większy dla próbek napromieniowanych w azocie.



Rys. 2. Wydajności radiolitycznie wydzielanego wodoru w funkcji dawek promieniowania gamma.

Fig. 2. Yields of radiolytically evolved hydrogen as a function of gamma radiation doses.

Tabela 2. Wydajności wydzielania wodoru i pochłaniania tlenu dla próbki napromieniowanej w powietrzu.

Table 2. Hydrogen evolution and oxygen absorption efficiencies for the sample irradiated in air.

Nr	N ₂	Powietrze	
	GH ₂	GO ₂	
	μmol/J		
1	0,287	0,283	0,254
2	0,286	0,284	0,256
3	0,288	0,285	0,251
średnia	0,287	0,284	0,254

Wydzielanie się wodoru w czasie starzenia PP można tłumaczyć jednorodnikowym sieciowaniem polimeru z udziałem wolnych rodników powstałych zarówno w efekcie pierwotnych zjawisk radiolizy jak i odtwarzanych w łańcuchowym postradiacyjnym utlenianiu (rys. 1). Sieciowanie jest możliwe dopiero po zmniejszeniu się zawartości tlenu wewnątrz opakowania (w tym przypadku butelczki). Należy przyjąć, że liczba trwałych wolnych rodników będzie większa, gdy napromieniamy PP w atmosferze azotu. W przypadku atmosfery powietrza część z nich przereaguje z tlenem. Z tych powodów postradiacyjne utlenianie próbek napromieniowanych w azocie może mieć początkowo większą wydajność. Duże wartości wydajności utleniania PP pokazują jak destrukcyjne są procesy postradiacyjnego łańcuchowego utleniania polimeru (tab. 3).

Na koniec porównano wydajności postradiacyjnej degradacji próbek PP nienapromieniowanych (NR) i napromieniowanych (R) w powietrzu dawką 56 kGy. Podobnie jak w poprzednim eksperymencie butelczkę z próbką po napromienianiu otworzono a następnie zamknięto i razem z próbką odniesienia starzono 24 h w temperaturze pokojowej.

Obróbka radiacyjna uruchomiła szybki proces łańcuchowego utleniania PP, który zachodzi również po zakończeniu napromieniania. Wydajność tego zjawiska jest niemal 10 krotnie większa w porównaniu z próbkami nienapromieniowanymi. Utworzony pierwotnie na węglu wolny rodnik przylacza tlen a powstały w efekcie rodnik nadtlenkowy odrywa atom wodoru z innego miejsca łańcucha polimeru tworząc hydroksynadtlenek i odtwarzając wolny rodnik. Taka łańcuchowa postradiacyjna oksydegradacja w stosunkowo krótkim czasie prowadzi do obniżenia właściwości użytkowych wyrobów z PP. Jaszczke raz należy podkreślić, że w badaniach wykorzystano pierwotny PP (bez dodatków antyoksydantów). Jednak nawet najlepsze stabilizatory ograniczają jedynie procesy radiacyjnej degradacji i dlatego należy szukać innych sposobów ochrony przed wtórnymi procesami utleniania.

Tabela 3. Wydajności postradiacyjnie wydzielanego wodoru i pochłanianego przez PP tlenu.

Table 3. Efficiencies of post-radiation hydrogen released and oxygen absorbed by PP.

Nr	N ₂	Powietrze	N ₂	Powietrze
	GH ₂		GO ₂	
	μmol/J			
1	0,0024	0,0017	0,252	0,235
2	0,0025	0,0016	0,268	0,227
3	0,0028	0,0015	0,245	0,231
średnia	0,0026	0,0016	0,255	0,231

Tabela 4. Porównanie postradiacyjnej degradacji PP napromieniowanego i starzonego w powietrzu z oksydegradacją próbki nienapromieniowanej i starzonej w tych samych warunkach.

Table 4. Comparison of post-radiation degradation of PP irradiated and aged in air with the oxy-degradation of the non-irradiated sample and aged under the same conditions.

Nr	GH ₂	R	NR	O ₂ R/NR
	[μmol/J]	ubytek O ₂ [μl/g]		
1	0,0013	73,74	7,42	9,9
2	0,0012	71,39	7,75	9,2
3	0,0014	72,93	8,08	9,0
średnia	0,0013	72,69	7,75	9,4

Wnioski

Jedną z unikatowych zalet promieniowań jonizujących jest możliwość sterylizacji wyrobów w szczelnych opakowaniach np. z folii polimerowych. Tym między innymi radiacyjne technologie różnią się od metod gazowych stosujących półprzepuszczalne materiały papierowe. Obróbka radiacyjna gwarantuje dłuższe terminy zachowania jakości wyrobów i mniejsze prawdopodobieństwo przypadkowego uszkodzenia opakowania.

Wykazano eksperymentalnie, że radioliza PP napromieniowywanego w zamkniętych fiolkach odbywa się po stosunkowo krótkim czasie w warunkach beztlenowych. W warunkach opisanych doświadczeń radykalne zmniejszenie zawartości tlenu w opakowaniu następowało już po kilkunastu godzinach. Tak, więc przechowywanie wyrobów z PP w opakowaniach z tworzyw polimerowych powinno ograniczyć procesy postradiacyjnego utleniania i umożliwić tworzenie wiązań poprzecznych. Zagadnienie to wymaga dodatkowych badań z wykorzystaniem różnych materiałów opakowaniowych. Prace takie zostały zaplanowane we współpracy z Instytutem Tworzyw Polimerowych w Algierii (Université de Béjaïa).

Obserwowany eksperymentalnie wzrost wydajności wydzielania radiolitycznego wodoru w warunkach beztlenowych może być wynikiem jednorodnikowego sieciowania. Wodór cząsteczkowy wydziela się również w zjawisku tworzenia poprzecznych wiązań typu Y z udziałem końców łańcuchów powstających w wyniku bezpośredniej degradacji polimeru w gniazdach wielojonizacyjnych.

Zjawisko radiacyjnego sieciowania odkryto badając polimery dla energetyki jądrowej, które wykorzystano w produkcji wyrobów medycznych, tworzyw z pamięcią kształtu, kompozytów polimerowych, wałków dylatacyjnych, opakowań itd. Historia zatoczyła w pewnym sensie koło i współcześnie to badania radiolizy tworzyw polimerowych dla różnych nieenergetycznych zastosowań są wykorzystywane do bezpiecznej eksploatacji kabli i przewodów elektrycznych w energetyce jądrowej [9].

Notka o autorze

Dr inż. Wojciech Głuszewski, adiunkt w Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Chemik radiacyjny. Obecnie zajmuje się problematyką radiacyjnej modyfikacji tworzyw polimerowych. Specjalista w zakresie technologii radiacyjnych i dozimetrii promieniowania jonizującego. Zajmuje się zagadnieniami wykorzystania technik jądrowych w identyfikacji i konserwacji obiektów o znaczeniu historycznym. Sekretarz Towarzystwa Marii Skłodowskiej-Curie w Hołdzie.

Literatura

1. Skłodowska-Curie M., Curie P., *Effects chimiques produits par les rayons de Becquerel*, Comptes Rendus, t. 129 (1899), p. 823.
2. Charlesby A., "How radiation affects long-chain polymers", *Nucleonics*, 12 (6), 1954, 18–25.
3. Lawton E. J., Bueche A.M., Balwit J.S., "Irradiation of polymers by high-energy electrons", *Nature* 172, 1953, 76–77.
4. Głuszewski W., *Zastosowania radiacyjnej modyfikacji polimerów w medycynie*, *Materiały Medyczne*, 1, 22, 76–81, (2022).
5. Zimek Z., Panta P.P., Głuszewski W., "Radiation Processing for Pharmaceuticals" *Acta Poloniae Pharmaceutica* vol. 56 Supplement, pp. 5–6 (1999).
6. Głuszewski W., Lewandowska H., Malinowski R., Krasieńska O., *Radiolysis of composite polypropylene/hemp fibers*, *Nukleonika*, 2 (69), (2024).
7. Głuszewski W., *Unikatowe cechy radiacyjnych technologii sterylizacji i higienizacji*, *Hygeia Public Health*, 56(1): 24–30, (2021).
8. Głuszewski W., *Radiacyjna sterylizacja polimerowych wyrobów medycznych*, *Tworzywa Sztuczne w Przemysle* 1, 81, 68–70, (2025).
9. Głuszewski W., *Wiązki szybkich elektronów (EB)*, *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 3, 83, 54–56, (2025).
10. Głuszewski W., *Zjawiska ochronne w chemii radiacyjnej polipropylenu*, Praca doktorska, IChTJ, Warszawa, (2009).
11. Głuszewski W., Zagórski Z.P., Rajkiewicz M., *Protective Effects in Radiation Modification of Elastomers*, *Radiation Physics and Chemistry*, 105, 53–56, (2014).
12. Głuszewski W., Panta P., Kubera H., *Wpływ promieniowania jonizującego na materiały opakowaniowe*, *Opakowanie* Nr 9, 433, 24–26, (2007).
13. Głuszewski W., *Sterylicacja radiacyjna opakowań farmaceutycznych*, *Świat Przemysłu Farmaceutycznego*, 2, 16–18, (2022).
14. Głuszewski W., *The use of gas chromatography for the determination of radiolytic molecular hydrogen, the detachment of which initiates secondary phenomena in the radiation modification of polymers*, *Polimery*, 64, 10, 44–49, (2019).

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

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

Robert Bobkier¹, Ewa Katarzyna Czech²

¹ *Abraham & Ben Hadar Law and Audit*

² *Wydział Prawa, Uniwersytet w Białymstoku*

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

Abstract: The article analyzes the obligations of heads of educational institutions arising from Article 23c(1) and (2) of the Polish Nuclear Law in the context of their appropriate application to preschoolers and primary school students under Article 32a. The authors focus on the duty to ensure radon concentration measurements and to implement optimization and information measures, emphasizing their significance for protecting children in educational institutions. The study also examines the interpretation of the term „student” and the scope of recipients of radon-related information. The analysis underscores the importance of transparent data communication regarding exposure and highlights the need to adapt protective mechanisms to the specific nature of educational facilities.

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

1. Wprowadzenie

Przepisy dotyczące radonu, promieniotwórczego gazu szlachetnego¹ i naturalnego źródła promieniowania jonizu-

jącego², wprowadzono do Prawa atomowego³ (dalej P.a.) jego obszerną nowelizacją z 2019 r.⁴ Nowelizacja ta stanowiła efekt transpozycji dyrektywy Rady 2013/59/Euratom⁵ (dalej dyrektywa BSS).

¹ Zob. M. Skłodowska-Curie, *Stan obecny chemii polonu*, „Roczniki Chemii” 1926, tom 6, s. 357–358.

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

³ Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277 z późn. zm.).

⁴ Ustawa z dnia 13 czerwca 2019 r. o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej (Dz. U. poz. 1593 z późn. zm.).

⁵ Dyrektywa Rady 2013/59/Euratom z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom (Dz. U. UE. L. z 2014 r. Nr 13, str. 1 z późn. zm.).

W wyniku tej zmiany elementami polskiego języka prawnego stały się, m.in., pojęcia „narażenia na radon” (art. 3 pkt 15a P.a.), „poziomu odniesienia” (art. 3 pkt 26a P.a.) i „średniorocznego stężenia radonu” (art. 3 pkt 47a P.a.). Wprowadzony przepis art. 23b P.a. zawiera normę ustalającą poziom odniesienia dla średniorocznego stężenia promieniotwórczego radonu w powietrzu w miejscach pracy wewnątrz pomieszczeń oraz pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi – w wysokości 300 Bq/m³.

Dodany przepis art. 23c P.a. ustanawia szereg, odnoszących się do radonu, obowiązków kierowników jednostek. W szczególności norma art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. nakłada na kierowników jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu w znacznej liczbie budynków może przekroczyć poziom odniesienia, o którym mowa w art. 23b, obowiązek zapewnienia w tych miejscach pracy pomiaru stężenia radonu⁶. Tereny takie, dalej określane jako „powiaty radonowe”, wskazano w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r.⁷. Obejmują one obszar 27 powiatów⁸ (186 gmin), zamieszkały przez około 2 mln ludzi⁹, dalej określane zbiorczo mianem „powiatów radonowych”, a wyznaczony zresztą niezależnie od faktycznego przebiegu struktur geologicznych¹⁰. Na terenie „powiatów radonowych” położone są jedynie dwa dawne miasta wojewódzkie (Wałbrzych, Jelenia Góra). Większość tych obszarów stanowią jednak jednostki gminne wiejskie i wiejsko-miejskie, cechujące się rozproszoną zabudową ze znaczącym odsetkiem budynków jednokon-

dygnacyjnych, także w przypadku siedzib urzędów czy jednostek systemu oświaty¹¹.

Natomiast w art. 23c ust. 2 P.a. kierowników jednostek zobowiązano do wykonywania szeregu powinności, które określić można mianem optymalizacyjno-informacyjnych. Obejmują one zapewnienie optymalizacji narażenia pracowników i udzielanie im na bieżąco na piśmie szeregu informacji, obejmujących nie tylko same wyniki pomiarów stężenia radonu w miejscu pracy, lecz także zwłaszcza wartości otrzymanych przez nich dawek promieniowania. Zwłaszcza ta ostatnia czynność, wymagająca przeprowadzenia specyficznej kalkulacji o dużym stopniu skomplikowania, wydaje się pozostawać poza horyzontem kompetencyjnym pracodawców (kierowników jednostek)¹².

Niedopełnienie powyższych obowiązków zagrożone jest administracyjnymi karami pieniężnymi, ujętymi w obszernym katalogu z art. 123 ust. 1 P.a., przy czym podmiotem ukaranym jest tu zarówno kierownik jednostki organizacyjnej, jak i sama jednostka. W zakresie wprowadzonych w 2019 roku przepisów dotyczących radonu, może być tu mowa o potencjalnej penalizacji: niedopełnienia obowiązku kontroli dozymetrycznej wskutek niezapewnienia pomiaru stężenia radonu w miejscu pracy (art. 123 ust. 1 pkt 8 P.a.); nieudzielania informacji w zakresie ochrony radiologicznej poprzez zaniechanie udzielenia pracownikom informacji, wymaganych przepisem art. 23c ust. 2 P.a. (art. 123 ust. 1 pkt 9 P.a.). Każdy z powyższych czynów zagrożony jest karą pieniężną dla kierownika jednostki w kwocie nawet do 40.908,60 zł¹³ (art. 123 ust. 1 tiret *in fine* P.a.). Natomiast samej jednostce organizacyjnej wykonującej działalność związaną z narażeniem, wymierza się

⁶ Klasyfikując, intencjonalnie pomijamy tutaj inne, pozostające bez związku z problematyką niniejszej publikacji, elementy konstrukcyjne normy art. 23c ust. 1 P.a., takie jak pozostałe, enumeratywnie wymienione miejsca pracy (pod ziemią i związane z uzdatnianiem wód podziemnych), czy też alternatywny względem pomiaru samego stężenia radonu – pomiar stężenia energii potencjalnej alfa krótkożyłowych produktów rozpadu radonu. Dalsze wywody, o ile używamy w nich określenia „miejsca pracy”, dotyczą więc wyłącznie tych, o których mowa w art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. – zlokalizowanych wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy.

⁷ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz. U. poz. 1139).

⁸ Zwarty, równoleżnikowy obszar 14 sudeckich powiatów województwa dolnośląskiego (powiat dzierżoniowski, powiat karkonoski, miasto na prawach powiatu Jelenia Góra, powiat kamiennogórski, powiat kłodzki, powiat lubański, powiat lwówecki, powiat polkowicki, powiat trzebnicki, powiat wałbrzyski, miasto na prawach powiatu Wałbrzych, powiat ząbkowicki, powiat zgorzelecki, powiat złotoryjski); ponadto w województwie lubelskim – powiat tomaszowski; w województwie opolskim – powiat nyski, powiat prudnicki; w województwie podkarpackim: powiat bieszczadzki, powiat jasielski, powiat krośnieński, powiat leski, powiat mielecki, powiat sanocki; w województwie śląskim – powiat cieszyński; a w województwie świętokrzyskim: powiat kielecki, powiat opatowski oraz powiat skarżyski.

⁹ Zob. Główny Urząd Statystyczny, *Podział administracyjny Polski*, 1 stycznia 2024 r., <https://stat.gov.pl/statystyka-regionalna/jednostki-terytorialne/podzial-administracyjny-polski/>, [dostęp: 22.01.2025].

¹⁰ Istotne przekroczenia dopuszczalnych stężeń radonu zidentyfikowano w Polsce również poza „powiatami radonowymi”, por. K. Kovler, A. Tsapalov, R. Bobkier, R. Wiegiers, W. Schroeyers, T. Kovács, E. Toth-Bodrogi, O. El Bounagui, A. Babczuk, *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” 2025, nr 285, nr publ. 107668.

¹¹ Zob. M. Feltyński, *Planowanie przestrzenne gmin wiejskich. Zastosowanie koncepcji polityki opartej na dowodach*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2018, s. 23.

¹² Kolejne obowiązki kierowników jednostek, związane z narażeniem na radon, ujęto w przepisach art. 23c ust. 3-6 P.a. Te stanowią jednak przedmiot odrębnego opracowania.

¹³ Prawo atomowe odnosi wysokość kar do określonej wielokrotności kwoty przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej w roku kalendarzowym poprzedzającym popełnienie czynu, ogłaszanego przez Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego na podstawie art. 20 pkt 1 lit. a ustawy z dnia 17 grudnia 1998 r. o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1631). Takie przeciętne wynagrodzenie wynosiło w roku 2024 kwotę 8.181,72 zł, zob. Komunikat Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego z dnia 11 lutego 2025 r. w sprawie przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej w 2024 r. (M. P. z 2025 r. poz. 125). Tym samym kary pieniężne wymierzane za czyny popełniane w kolejnych latach posiadają różne górne granice ustawowego ich wymiaru. Celem zachowania jasności wyводу podajemy już konkretną kwotę, stanowiącą efekt wyliczenia.

z karę pieniężną w wysokości nawet do 409.086 zł (art. 123 ust. 1b P.a.).

Co kluczowe z perspektywy niniejszej publikacji, nowelizacja z 2019 roku zmieniła również przepis art. 32a ustawy atomowej¹⁴, nadając mu nowe brzmienie: Przepisy art. 10, art. 11, art. 14, art. 17, art. 21, art. 22, art. 23c, art. 26 i art. 29-32 stosuje się odpowiednio do uczniów, studentów i praktykantów.

Publikacja niniejsza zawiera rozważania odnośnie do konsekwencji nowego kształtu art. 32a P.a. w zakresie radonu – z perspektywy jednostek systemu oświaty. Następstwa te są znamienne, w szczególności z perspektywy kierowników tych jednostek (np. dyrektorów szkół). Ci znaleźli się bowiem w specyficznej sytuacji. Są bowiem zobowiązani do zapewnienia ochrony radiologicznej nie tylko pracownikom (w szerokim, wynikającym z własnej na gruncie Prawa atomowego definicji tego pojęcia, art. 3 pkt 29 P.a.) i pracownikom zewnętrznym (art. 3 pkt 30 w zw. z art. 29 ust. 1 P.a.), lecz także uczniom, przy czym o ile ustawa ta zawiera własną, *suo proprio*, definicję praktykanta (art. 3 pkt 31 P.a.), o tyle dekodowanie znaczenia pojęcia „ucznia” wymaga wyjścia poza jej siatkę terminologiczną.

Niewątpliwie włączenie dotyczącego radonu art. 23c P.a. do katalogu przepisów tego Prawa, stosowanych, jak wymaga norma art. 32a, „odpowiednio” do uczniów ocenić należy jednoznacznie pozytywnie, jako wyraz rozszerzenia zakresu ochrony przed narażeniem na radon. Niemniej jednak ta pozytywna ocena nie przesłania szeregu wątpliwości, nasuwających się podczas egzegezy przepisów ustawy atomowej. W artykule podejmujemy próbę *sui generis* przeglądu objętych odesłaniem z art. 32a P.a. przepisów art. 23c ust. 1 i 2 P.a., każdorazowo uwzględniając wymóg stosowania ich „odpowiednio”.

Zagadnienie powyższe wymaga uwagi nie tylko ze względu na liczbę placówek oświatowych w „powiatach

radonowych”, lecz także bacząc na implikacje zdrowotne długotrwałej ekspozycji na radon, szczególnie dotkliwe zwłaszcza w przypadku dzieci.

W lutym 2025 roku PAA wydała podręcznik „Radon w budynkach”¹⁵, w powstawaniu którego współautor niniejszego artykułu brał udział jako konsultant. Podręcznik ten, stanowiąc chyba pierwsze w polskim piśmiennictwie podejście do całościowej prezentacji zagadnienia, sygnalizował, siłą rzeczy syntetycznie¹⁶, relację przepisów dotyczących radonu z jednostkami systemu oświaty. Sama nowelizacja Prawa atomowego z 2019 roku była przedmiotem nielicznych analiz w rodzimej literaturze prawniczej¹⁷. W szczególności jednak deficyt w tej literaturze dotyczy już *in concreto* opracowań dotyczących unormowań związanych z radonem, gdyż niemal wszystkie dostępne publikacje w tej dziedzinie wywodzą się z dorobku nauk przyrodniczych i technicznych, na gruncie których podjęto zresztą w polskim piśmiennictwie liczne, niejednokrotnie wartościowe usiłowania w przedmiocie oceny tych regulacji¹⁸. Niniejszy artykuł stanowi próbę wypełnienia tej luki badawczej.

2. Radon

Od lat 50. XX w. radon uznawany jest za potwierdzoną przyczynę rozwoju nowotworów płuc. Gaz ten przenika z podłoża do budynków, gromadząc się w nich wskutek tzw. efektu kominowego, czyli mechanizmu polegającego na zasysaniu gazów z podłoża do budynku na skutek różnicy ciśnień. Od 1988 roku radon uznawany jest za czynnik rakotwórczy pierwszej klasy, stanowiąc w skali świata drugą, po ekspozycji na dym tytoniowy, przyczynę raka płuc u ludzi¹⁹.

¹⁴ Takie określenie Prawa atomowego jest powszechnie obecne w rodzimym języku prawniczym, por. chociażby D. Danecka, W. Radecki, *Odpowiedzialność prawna organów publicznych oraz przedsiębiorców zajmujących się odpadami*, Wolters Kluwer, Warszawa 2024, s. 163; A. Szafranski, *Niemieckie wyjście z atomu jako prawny przejaw populizmu*, [w:] *Prawo w epoce populizmu*, red. P. Grzebyk, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2023, s. 312; D. Danecka, W. Radecki, *Prawo karne środowiska w Niemczech, w Austrii i w Polsce*, [w:] *Prokuratura i Prawo* 2022, nr 7-8, s. 192-194; W. Radecki, *Ochrona środowiska w polskim, czeskim i słowackim prawie karnym*, Wolters Kluwer, Warszawa 2013, s. 116; M. Adynkiewicz-Piragas, I. Zdralewicz, *Prawodawstwo dotyczące ochrony gleb w Polsce*, [w:] *Polsko-niemiecki podręcznik teoretyczno-metodyczny do tworzenia systemów identyfikacji obszarów zanieczyszczonych*, red. M. Adynkiewicz-Piragas, I. Lejcuś, S. Pitzschke, J. Witkoś, Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej we Wrocławiu, Wrocław 2013, s. 18; W. Radecki, *Prawna ochrona przyrody w Polsce, Czechach i Słowacji. Studium porównawcze*, Wolters Kluwer, Warszawa 2010, s. 316.

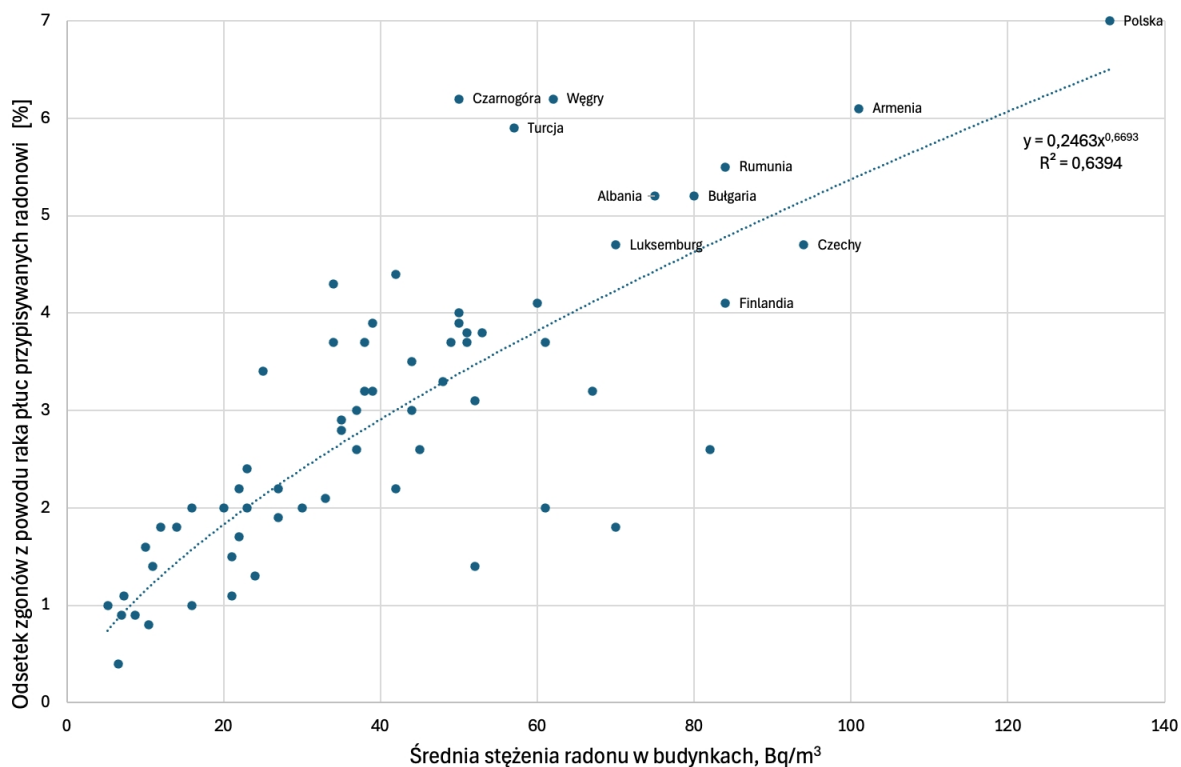
¹⁵ Por. Ł. Koszucki, *Radon w budynkach*, Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 2025.

¹⁶ Tamże, s. 67-68.

¹⁷ Por. C. Mik, *Ocena rządowego projektu nowelizacji ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej*, „Zeszyty Prawnicze Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 2019, nr 2, s. 90-111; M. Jokiel, G. Jokiel, R. Bobkier, A. Babczuk, *The Impact of New Legal Regulations on The Functioning of Businesses Based on The Example of Atomic Law in Poland*, „Communications of International Proceedings” 2023, nr 6, <https://ibimapublishing.com/p-articles/42MGT/2023/4246623/4246623.pdf>, [dostęp: 29.01.2025].

¹⁸ Por. J. Olszewski, K. Walczak, *Radon in houses of Kowary–Sudety Mountains, Poland*, „Nukleonika” 2020, nr 2, s. 150-151; J. Mazur, K. Kozak, *Nowe regulacje dotyczące stężeń radonu (Rn-222) w budynkach i miejscach pracy w zapisach znowelizowanej ustawy Prawo atomowe*, „Inżynier i Fizyk Medyczny” 2020, nr 3, s. 169-172; M. Wysocka, K. Skubacz, I. Chmielewska, P. Urban, M. Bonczyk, *Radon migration in the area around the coal mine during closing process*, „International Journal of Coal Geology” 2019, nr 212, s. 1-9; Z. Podgórska, *Metody pomiaru radonu w powietrzu, glebie i wodzie*, „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki” 2022, nr 1, s. 3-10.

¹⁹ Zob. R. Bobkier, *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” 2024, nr 4, s. 37-56.



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.

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.

Z uwagi na okoliczność, że większość ludzi spędza nawet 90% czasu wewnątrz pomieszczeń²⁰, gdzie stężenia radonu są zawsze wyższe niż w powietrzu atmosferycznym na zewnątrz, radon stanowi główne źródło populacyjnego narażenia na promieniowanie jonizujące²¹. Wyniki badań opublikowanych w 2018 roku, w których określano współczynniki śmiertelności z powodu raka płuc spowodowanego narażeniem na radon w pomieszczeniach dla poszczególnych krajów, wskazują, że liderem tej niechlubnej listy jest Polska (7% zgonów na raka płuc przypisywanych radonowi), kolejno Czarnogóra i Węgry (6,2%), Armenia (6,1%), Turcja (5,9%), Rumunia (5,5%), Albania i Bułgaria (5,2%). Średnia stężenia radonu w budynkach w tych krajach mieści się w przedziale od 50 Bq/m³ (Czarnogóra) do 133 Bq/m³ (Polska)²².

Warto podkreślić, że przy stężeniach radonu przekraczających 100 Bq/m³, każde dodatkowe 100 Bq/m³ zwiększa ryzyko zachorowania na raka płuc o około 16%²³, stąd Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) rekomenduje wartość 100 Bq/m³ jako dopuszczalne stężenie radonu w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi²⁴.

Wraz z postępowaniem badań naukowych ewoluowała również ocena kluczowych czynników wpływających na stopień niebezpieczeństwa związany z narażeniem na radon.

Przykładowo, o ile w 1994 roku kalkulowano, że przy długotrwałej ekspozycji na stężenie radonu wynoszące 740 Bq/m³ prawdopodobieństwo zachorowania na raka płuc wynosiło 135 przypadków na 1000 osób palących i 8 przypadków na 1000 osób niepalących²⁵, o tyle już w 2020

²⁰ Zob. A. Cincinelli, T. Martellini, *Indoor air quality and health*, "International Journal of Environmental Research and Public Health" 2017, nr 14, s. 1286.

²¹ Zob. 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. 1.

²² Zob. J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, D. Krewski, *Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon*, "Environmental Health Perspectives" 2018, nr 5, s. 3–4.

²³ Zob. L. Corechi, A. Overcenco, A. Ababii, A. Capatina, V. Bilba, I. Salaru, *Contribution to the study of "smoking and radon" interaction in the lung cancer development across the Republic of Moldova*, "One Health & Risk Management" 2024, nr 1, s. 10.

²⁴ Zob. H. Zeeb, F. Shannoun (red.), *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*, World Health Organization, Geneva 2009, s. ix; por. D.J. Pawel, J.S. Puskin, *The U.S. Environmental Protection Agency's Assessment of Risks from Indoor Radon*, "Health Physics" 2004, nr 1, s. 68–74.

²⁵ Zob. S. Page, *EPA's strategy to reduce risk of radon*, [w:] *Radon. Prevalence, measurements, health risks and control*, red. N.L. Nagda, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1994, s. 137.

roku analizy wskazywały wartości wynoszące odpowiednio 260 palących i 36 niepalących²⁶. Tu zaznaczamy, że prezentowane badania wskazywały również analogiczne współczynniki także i dla niższych stężeń radonu. Zdecydowaliśmy jednak o przywołaniu wartości 740 Bq/m³ z uwagi na podobne wyniki pomiarów stężeń radonu w szkołach w Polsce, które dalej przytaczamy. Podkreślenia wymaga, że w szeregu krajowych jednostek systemu oświaty stwierdzono wartości stężeń sięgające nawet kilku tysięcy Bq/m³, jednak cytowani amerykańscy autorzy nie dokonywali nawet kalkulacji prawdopodobieństwa rozwoju choroby nowotworowej dla takich wartości. Uznali bowiem za nieakceptowalne doprowadzenie do przebywania dzieci w warunkach takiego narażenia. Warto przytoczyć, że władze stanowe Arkansas, po wykryciu w 2019 roku w części szkół stężeń radonu wynoszących ponad 1100 Bq/m³, podjęły decyzję o wysiedleniu tych budynków i ich wyburzeniu²⁷.

Analogicznie na przestrzeni lat zmianom ulegała estymacja okresu ekspozycji na radon, niezbędnego do wywołania szkodliwych, nowotworowych skutków zdrowotnych. Jeszcze w XIX w., przez poznanie zjawiska promieniowania jonizującego i odkryciem radonu, gdy jedynie spostrzeżono korelację między pracą w kopalniach a zapadalnością na raka płuc, oceniano, że choroba ta rozwija się po okresie ekspozycji trwającym od 20 do 50 lat. W latach 30. i 40. XX w., gdy już przypisywano *causę* choroby nowotworowej narażeniu na radon, mówiono o okresie ekspozycji wynoszącym nieco ponad dekadę²⁸. Natomiast w XXI w. dowiedziono, że rozwój raka płuc może nastąpić już po kilkuletnim narażeniu na ten promieniotwórczy gaz²⁹. Dostrzegalne więc jest, że wraz z rozwojem wiedzy szacowany czas ekspozycji, niezbędny do wywołania szkodliwych skutków zdrowotnych, systematycznie się skraca. Spostrzeżenie to ma poważne implikacje dla oceny ryzyka i kształtowania polityki regulacyjnej,

podważając adekwatność dotychczasowych norm bezpieczeństwa i skłaniając do ciągłej oceny dopuszczalnych limitów ekspozycji w środowisku pracy i nauki³⁰.

Pomimo ewolucji w estymacji zagrożeń związanych z radonem, jeden aspekt pozostaje w opinii piśmiennictwa niezmienny – szczególna wrażliwość dzieci na promieniowanie jonizujące. Ich organizmy, charakteryzujące się intensywnymi procesami wzrostu i podziału komórkowego, są znacznie bardziej podatne na skutki ekspozycji, co czyni konieczność redukcji stężeń radonu w środowiskach edukacyjnych priorytetem polityki zdrowia publicznego.

3. Wpływ radonu na zdrowie dzieci

Wpływ promieniowania jonizującego na organizm ludzki zależy nie tylko od wielkości dawki³¹, rodzaju promieniowania i jego natężenia oraz czasu ekspozycji, lecz także od cech biologicznych konkretnej jednostki, poddanej temu działaniu³².

W kontekście polskich regulacji prawnych, zgodnie z którymi dopuszczalna dawka graniczna promieniowania jonizującego dla dzieci do 16. roku życia jest aż dwudziestokrotnie niższa niż dla narażonych zawodowo osób dorosłych, należy podkreślić, że rozwijające się organizmy dzieci wykazują znacznie większą wrażliwość na działanie tego promieniowania³³. Dłuższa przewidywana długość życia dziecka zwiększa prawdopodobieństwo ujawnienia się negatywnych skutków zdrowotnych, w tym nowotworów o długim okresie kancerogenezy³⁴. Dodatkowym czynnikiem ryzyka jest tryb życia dzieci, które w strefie klimatycznej obejmującej Polskę spędzają znaczną część czasu w zamkniętych pomieszczeniach – do ukończenia ósmego roku życia przebywają w nich średnio około 15 godzin dziennie, a niemowlęta nawet do 20 godzin³⁵. Takie długotrwałe przebywanie w pomieszczeniach zwiększa

²⁶ Zob. R.W. Field, *Reducing the risks from radon: Information and interventions. A guide for health care providers*, "Conference of Radiation Control Program Directors Publication" 2020, nr 3, s. 4, <https://portal.ct.gov/-/media/DPH/Radon-Program/HCPProvGuide-Update-9-17-20.pdf>, [dostęp: 16.01.2025].

²⁷ Zob. Arkansas Department of Health, *Lonoke Community Radon Exposure Investigation*, 4 września 2019 r., s. 3-4, <https://static1.squarespace.com/static/5ec3ec333d5e1123089fd333/t/624222f79ee7786534f8170d/1648501501549/AHD+Letter%2C+CO2+%26+Radon+Guide.pdf>, [dostęp: 24.01.2024].

²⁸ Zob. R. Bobkier, K. Kovler, A. Tsapalov, "Fusion of Horizons": Part I..., wyd. cyt.

²⁹ Zob. M.M. Dobrzyńska, A. Gajowik, K. Wieprzowski, *Radon-occurrence and impact on the health*, „Roczniki Państwowego Zakładu Higieny” 2023, nr 1, s. 9-10; C.L. Rääf, M. Tondel, M. Isaksson, R. Wlinder, *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" 2023, nr 855, s. 3-5; R.W. Field, *Reducing...*, wyd. cyt., s. 4.

³⁰ Zob. R. Bobkier, K. Kovler, A. Tsapalov, E.K. Czech, "Fusion of Horizons": Part III. Rethinking Radon Risk: Scientific Advances and Regulatory Implications (since 1990s), "Journal of Environmental Radioactivity" 2025, nr 286, s. 1-12.

³¹ Por. W. Przybyszewski, M. Wideł, A. Szurko, Z. Maniakowski, *Wpływ mocy dawki na komórkowe, biochemiczne i molekularne efekty promieniowania jonizującego*, „Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej” 2008, nr 62, s. 468-477.

³² Zob. A. Turczyńska, P. Kułak, E. Gościak, E. Krajewska-Kułak, *Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku*, „Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne” 2016, nr 1, s. 30.

³³ Zob. A.S. Brody, D.P. Frush, W. Hunda, R.L. Brent, *Radiation risk to children from computed tomography*, "Pediatrics" 2007, nr 3, s. 678.

³⁴ Zob. M. Żelechowicz, *List do Redakcji dotyczący pracy pt. „Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku”*, „Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne” 2017, nr 1, s. 90.

³⁵ Zob. S. Abdul-Wahab, E. Ikhile, L. Ahmadi, A. Elkamel, K. Yetilmezsoy, *Radon In The Indoor Environment-A Review*, "Fresenius Environmental Bulletin" 2016, nr 10, s. 4410. Konieczne jest jednak wyrażenie krytyki względem omańskich autorów z uwagi na użyte przez nich określenie Państwa Izrael mianem "Isreal", tamże, s. 4418. Obrażliwe sformułowanie "Isreal" jest angielską zbitką słów, pochodzącą od pytania *is real?*, sugerującą, że Izrael jest państwem nieistniejącym, nierealnym. Zabieg taki nosi jednoznaczne znamiona antysemityzmu, zob.

narażenie dzieci na radon, zwłaszcza że oddychają one szybciej niż dorośli, co prowadzi do większego poboru powietrza i potencjalnie większej absorpcji szkodliwych substancji. Co więcej, ich układ oddechowy rozwija się do około szóstego roku życia, co czyni go bardziej podatnym na uszkodzenia spowodowane wdychanymi zanieczyszczeniami. Z tego względu ryzyko zachorowania na raka płuc u dzieci narażonych na radon może być niemal dwukrotnie wyższe niż u dorosłych przy tej samej ilości wdychanego gazu³⁶. Okoliczności te dodatkowo podkreślają konieczność priorytetowego traktowania ochrony dzieci przed narażeniem na promieniowanie jonizujące w środowisku zamkniętym.

4. Stężenia radonu w jednostkach systemu oświaty (*casus* miasta na prawach powiatu Jelenia Góra oraz powiatu karkonoskiego)

Zgodnie z wprowadzonym do Prawa atomowego w 2019 roku art. 23e ust. 1, GIS został zobowiązany do identyfikacji obszarów, na których w znacznej liczbie budynków stężenie radonu w powietrzu wewnętrznym może przekraczać ustalony poziom odniesienia. W ramach realizacji tego obowiązku, w latach 2020-2023 na zlecenie GIS przeprowadzono w Polsce szeroko zakrojone pomiary stężenia radonu w budynkach użyteczności publicznej³⁷. Choć przeprowadzone badania mają istotne znaczenie dla oceny ryzyka związanego z ekspozycją na radon, należy z żalem wyrazić opinię, że uzyskanie dostępu do pełnych wyników tych pomiarów stanowi – dyplomatycznie określając – specyficzne wyzwanie wymagające szczególnej determinacji.

W ramach procedury dostępu do informacji publicznej uzyskano od GIS wyniki pomiarów stężeń radonu w sze-

regu jednostek położonych na terenie miasta na prawach powiatu Jelenia Góra i powiatu karkonoskiego³⁸. Poniżej prezentujemy, w formie tabelarycznej, każdorazowo najwyższy w danej jednostce wynik pomiaru, hołdując w tym zakresie, fundamentalnej w ochronie radiologicznej, zasadzie pesymizacji (*principle of pessimization*). W ujęciu epistemologicznym zasada ta wyraża konieczność uwzględniania w procesie oceny ryzyka wartości skrajnych³⁹, gdyż to one konstytuują graniczną perspektywę zagrożenia i odzwierciedlają potencjalnie najbardziej niekorzystny scenariusz oddziaływania⁴⁰. Stanowi to wyraz szerzej pojmowanej metodologii przewidywania ryzyka, w której dominująca jest heurystyka ostrożnościowa – każde obliczenie musi zakładać, że rzeczywistość może skłaniać się ku ekstremom, a nie wartościom uśrednionym. Dlatego w określaniu zagrożenia związanego z ekspozycją na promieniowanie jonizujące operuje się zawsze wartościami maksymalnymi⁴¹. Przyjęcie ich jako podstawy wnioskowania ma na celu nie tylko określenie górnego progu niebezpieczeństwa⁴², ale również zabezpieczenie przed błędami wynikającymi z potencjalnych niepewności pomiarowych oraz złożoności interakcji promieniowania jonizującego z organizmem ludzkim. W poniższej tabeli uwzględniono te jednostki, w których stwierdzone stężenia radonu przekraczają poziom odniesienia z art. 23b P.a. o co najmniej 150%. Przegląd poniższych danych poprzedzić należy przypomnieniem, że ten poziom odniesienia wynosi 300 Bq/m³, a WHO rekomenduje jeszcze niższą wartość (100 Bq/m³) jako dopuszczalne stężenie radonu w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi⁴³.

Uśrednione przekroczenie poziomu odniesienia z art. 23b P.a. (300 Bq/m³) dla wyżej podanych jednostek wynosi 311,33%. W 2025 roku opublikowano wyniki badań stężeń radonu w Polsce, przeprowadzonych przez Instytut Medycyny Pracy w Łodzi, które potwierdzają opisany

G.M. Steinberg, *The apartheid and racism campaigns-the NGO contribution to antisemitism*, "Israel Affairs" 2023, nr 1, s. 52. Jest on stosowany przez autorów islamskiego kręgu kulturowego celem podkreślenia, że obszar Państwa Izrael jest rzekomo obcym tworem na łonie otaczających go państw arabskich, por. C. Berkley, O. Ahmed, *Tayeb Salih Speaks: Four Interviews with the Sudanese Novelist*, Embassy of the Democratic Republic of the Sudan, Washington 1982, s. 16.

³⁶ Zob. B. Poku, S. Hussaini, *Radon in child care centers: An examination of state laws and regulations in the United States*, „GSC Advanced Research and Reviews” 2021, nr 3, s. 6.

³⁷ Zob. Główny Inspektor Sanitarny, *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*, 22 września 2022 r., <https://www.gov.pl/web/gis/komunikat-w-sprawie-kontynuacji-w-2022-r-wykonywania-przez-spolke-acte-sp-z-oo-z-siedziba-w-warszawie-glownego-inspektora-sanitarnego-pomiarow-sredniorocznego-stezenia-radonu-w-budynkach>, [dostęp: 30.12.2024].

³⁸ Zob. *Pismo Głównego Inspektora Sanitarnego z dnia 8 lipca 2024 r. – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej*, BI.OI.0134.92.2024. Nazwy i adresy jednostek podano zgodnie z tymże pismem.

³⁹ Zob. W. Bielewski, K.W. Fornalski, *Obliczenia obszaru ograniczonego użytkowania wokół pierwszej polskiej elektrowni jądrowej*, „Postępy Techniki Jądrowej” 2018, nr 2, s. 25.

⁴⁰ Zob. T. Niewiadomski, P. Wąsiołek, M. Olszewska, E. Ryba, J. Godek, M. Waligorski, *Oszacowanie radiacyjnych skutków działalności człowieka dla mieszkańców woj. m. krakowskiego*, Instytut Techniki Jądrowej, Kraków 1984, s. 13; J. Matuła, *Ocena zasobów produktów rozszczepienia w paliwie jądrowych reaktorów energetycznych*, „Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej” 1977, nr 49, s. 8.

⁴¹ Zob. M.S. Tervinder, D. Oborska-Kumaszynska, A. Ratcliffe, *Testy akceptacyjne i dopuszczające dla systemu PDR*, „Inżynier i Fizyk Medyczny” 2013, nr 2, s. 124.

⁴² Por. T. Niewiadomski, J. Godek, M. Jasińska, P. Wąsiołek, *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*, Instytut Techniki Jądrowej, Kraków 1983, s. 13.

⁴³ Zob. H. Zeeb, F. Shannoun (red.), *WHO...*, wyd. cyt., s. ix.

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 roku – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej*, BI.OI.0134.92.2024.

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.

Nazwa i adres jednostki	Stężenie radonu [Bq/m ³]	Przekroczenie wartości rekomendowanej przez WHO (100 Bq/m ³), [%]	Przekroczenie poziomu odniesienia z art. 23b P.a. (300 Bq/m ³), [%]
Miejskie Integracyjne Przedszkole, ul. Junaków 2a, 58-560 Jelenia Góra	3080	3080	1026,67
Przedszkole Samorządowe nr 2, ul. Nadrzeczna 1, 58-573 Piechowice	1860	1860	620,00
Zespół Szkolno-Przedszkolny w Miłkowie, ul. Szkolna 2, 58-535 Miłków	1570	1570	523,33
Młodzieżowy Ośrodek Socjoterapii, ul. Sprzymierzonych 9, 58-560 Jelenia Góra	1220	1220	406,67
Szkoła Podstawowa nr 13 im. KEN, ul. Piotra Skargi 19, 58-500 Jelenia Góra	1030	1030	343,33
Zespół Szkół Technicznych, ul. Obrońców Pokoju 10, 58-500 Jelenia Góra	1030	1030	343,33
Zespół Szkół Ogólnokształcących i Technicznych w Jeleniej Górze, aleja Jana Pawła II 25, 58-506 Jelenia Góra	920	920	306,67
Zespół Placówek Pozaszkolnych – Centrum Wspierania Uzdolnień, ul. Skłodowskiej-Curie 12, 58-500 Jelenia Góra	790	790	263,33
Zespół Szkół Licealnych i Zawodowych nr 2, ul. 1 Maja 39/41, 58-500 Jelenia Góra	750	750	250,00
Zespół Szkół Ogólnokształcących i Mistrzostwa Sportowego, ul. Franciszkańska 34, 58-580 Szklarska Poręba	690	690	230,00
Poradnia Psychologiczno-Pedagogiczna, ul. Wolności 259, 58-560 Jelenia Góra	660	660	220,00
Szkoła Podstawowa im. C.D. Friedricha, Kopaniec 78, 58-512 Stara Kamienica	640	640	213,33
Szkoła Podstawowa im. gen. Wł. Sikorskiego, ul. Jeleniogórska 37, 58-533 Kostrzyca	630	630	210,00
Młodzieżowy Ośrodek Wychowawczy, ul. Górna 29, 58-580 Szklarska Poręba	630	630	210,00
Szkoła Podstawowa im. Orła Białego, ul. Szkolna 1, 58-562 Podgórzyn	610	610	203,33
Szkoła Podstawowa nr 3 im. J. Gielniaka ul. 1 Maja 72, 58-530 Kowary	600	600	200,00
Zespół Szkół Ogólnokształcących nr 2, ul. Gimnazjalna 2, 58-560 Jelenia Góra	570	570	190,00
Szkoła Podstawowa w Ściegnach, 58-535 Ściegny 110a	490	490	163,33
Szkoła Podstawowa im. Jana Pawła II, ul. Szkolna 2, 58-560 Wojcieszyce	460	460	153,33
Przedszkole Samorządowe nr 1, ul. Kryształowa 77, 58-573 Piechowice	450	450	150,00

powyżej stan. Autorzy wskazali, że najwyższy odsetek pomiarów przekraczających poziom odniesienia – aż 60% – odnotowano właśnie w powiecie karkonoskim. Ponadto, najwyższe zmierzone stężenie radonu (2720 Bq/m³) zarejestrowano w Jeleniej Górze, a stężenia przekraczające 1000 Bq/m³ wystąpiły również w innych miejscowościach Kotliny Jeleniogórskiej, w tym w Podgórzynie i Szklarskiej Porębie⁴⁴.

Zaobserwowane w placówkach oświatowych na analizowanym obszarze istotne przekroczenia dopuszczalnych poziomów stężeń radonu stanowią poważny problem

o charakterze zarówno zdrowotnym, jak i prawnym, którego szczegółowe omówienie wykracza poza ramy niniejszej publikacji. Skala tych przekroczeń wymaga dogłębnej analizy oraz wdrożenia adekwatnych działań naprawczych przez wszystkie podmioty zobowiązane do zapewnienia bezpiecznych warunków funkcjonowania placówek oświatowych. W szczególności należy wskazać trzy kluczowe grupy podmiotów.

Pierwszą z nich stanowią kierownicy jednostek systemu oświaty (dyrektorzy szkół i innych placówek). Zgodnie z art. 7 ust. 1b P.a., to oni są odpowiedzialni za zapew-

⁴⁴ Zob. K. Bulewicz, J. Olszewski, J. Domienik-Andrzejewska, *Analiza wyników komercyjnych pomiarów radonu w latach 2022–2023*, „Medycyna Pracy” 2025, nr 1, s. 34–35.

nienie ochrony radiologicznej w zakresie narażenia na radon i ponoszą osobistą, również finansową, odpowiedzialność w tym zakresie. Sankcją przewidzianą za naruszenie tych obowiązków mogą być administracyjne kary pieniężne, o których mowa w art. 123 ust. 1 P.a.

Drugą grupę stanowią organy prowadzące szkoły i placówki, którymi – zgodnie z art. 4 pkt 16 Prawa oświatowego⁴⁵ – są w szczególności jednostki samorządu terytorialnego. Do ich obowiązków, wynikających z art. 10 ust. 1 pkt 1 tego Prawa, należy zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków nauki, wychowania i opieki. W tym kontekście kluczowe znaczenie ma również art. 123 ust. 1b P.a., zgodnie z którym administracyjne kary pieniężne mogą być nałożone nie tylko na kierowników jednostek organizacyjnych, ale także bezpośrednio na same placówki oświatowe (szkoły i przedszkola), które w przeważającej mierze są finansowane przez jednostki samorządu terytorialnego. Warto zaznaczyć, że w przypadku nałożenia kary pieniężnej na jednostkę systemu oświaty na podstawie art. 123 ust. 1b P.a., jej dyrektor ponosi także dodatkową odpowiedzialność z tytułu naruszenia dyscypliny finansów publicznych⁴⁶.

Trzecia grupa to organy higieny radiacyjnej – w tym przypadku państwowi wojewódzcy inspektorowie sanitarni, odpowiedzialni za nadzór nad przestrzeganiem przepisów dotyczących ochrony radiologicznej.

Ocena konkretnego prawdopodobieństwa zachorowania na raka płuc wśród uczniów, wychowanków (i pracowników) wyżej wskazanych jednostek systemu oświaty, narażonych na oddziaływanie podwyższonych stężeń radonu, należy już do domeny epidemiologii jako subdyscypliny nauk medycznych. Zarazem warto tu wskazać, że powyższe pomiary prowadzone przez GIS doprowadziły do istotnej zmiany w ocenie narażenia na radon w Kotlinie Jeleniogórskiej. W ramach tej oceny, od XX w., w piśmiennictwie koncentrowano się przede wszystkim – jak się okazuje, nie do końca zasadnie – na przypadku miasta Kowary, gdzie od kilkuset lat⁴⁷ funkcjonował przemysł wydobywczy⁴⁸, w tym górnictwo uranowe⁴⁹. Jeszcze w trzeciej dekadzie XXI w. przypadkowi Kowar poświęcano odrębne publikacje, w których wyrażano pogląd o problemie, jaki może stanowić dla władz miasta poziom stężeń

radonu w tamtejszych budynkach⁵⁰. Niemniej jednak wyżej przytoczone wyniki wskazują, że znacznie gorsza sytuacja zachodzi w innych miejscowościach Kotliny, w szczególności w samym mieście Jelenia Góra, co niewątpliwie skutkuje zmianą paradygmatów i tworzy równie oczywiste wyzwanie dla władz tych miejscowości.

Graficzna prezentacja danych dotyczących poziomów przekroczenia dopuszczalnych stężeń radonu w jednostkach systemu oświaty na obszarze Kotliny Jeleniogórskiej została przedstawiona na poniższym wykresie. Wizualizacja ta uwidacznia skalę zidentyfikowanego problemu oraz jego rozkład w analizowanych placówkach.

Dodatkowo, co współautor niniejszego artykułu tylko sygnałnie poruszył w jednej z poprzednich publikacji⁵¹, przynajmniej te z wyżej wymienionych przypadków, w których wykazano stężenia radonu przekraczające 1000 Bq/m³, wymagają istotnej analizy, zarówno ze strony organów higieny radiacyjnej, jak i samych kierowników jednostek (dyrektorów szkół) pod kątem możliwości przekroczenia dawek granicznych promieniowania jonizującego⁵². Warto przypomnieć, że zgodnie z Załącznikiem nr 4 do Prawa atomowego („Dawki graniczne promieniowania jonizującego”), dawki te wynoszą w ciągu roku kalendarzowego: dla pracowników oraz uczniów, studentów i praktykantów w wieku 18 lat i powyżej: 20 mSv; dla uczniów, studentów i praktykantów w wieku od 16 lat do 18 lat: 6 mSv; natomiast dla uczniów, studentów i praktykantów w wieku poniżej 16 lat: 1 mSv.

Wartość ta, odnosząca się do osób poniżej 16. roku życia, pozostaje wielokrotnie niższa od dawek granicznych określonych dla osób dorosłych, co wynika z opisanej już szczególnej wrażliwości tej grupy wiekowej na promieniowanie jonizujące. W myśl przepisu art. 14 ust. 1 P.a., którego odpowiednie stosowanie do uczniów nakazuje przecież norma art. 32a P.a., suma dawek promieniowania jonizującego dla pracowników oraz osób z ogółu ludności nie może przekraczać dawek granicznych. Konstatacja, że dawki te – zwłaszcza w przypadku dzieci w wieku do lat 16 – uległy przekroczeniu w przypadku całorocznego (nawet z uwzględnieniem kalendarzowych przerw, wakacji, ferii, itd.), wielogodzinnego przebywania w warunkach narażenia na tak wysokie, jak wyżej wskazane, stężenia radonu,

⁴⁵ Ustawa z dnia 14 grudnia 2016 r. – Prawo oświatowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 737 z późn. zm.).

⁴⁶ Art. 16 ust. 1 ustawy z dnia 17 grudnia 2004 r. o odpowiedzialności za naruszenie dyscypliny finansów publicznych (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 104).

⁴⁷ Por. C.F. Mosch, *Zur Geschichte des Bergbaues in Deutschland*, Regierungs-Buchdruckerei, Liegnitz 1829, s. 63–64, 224.

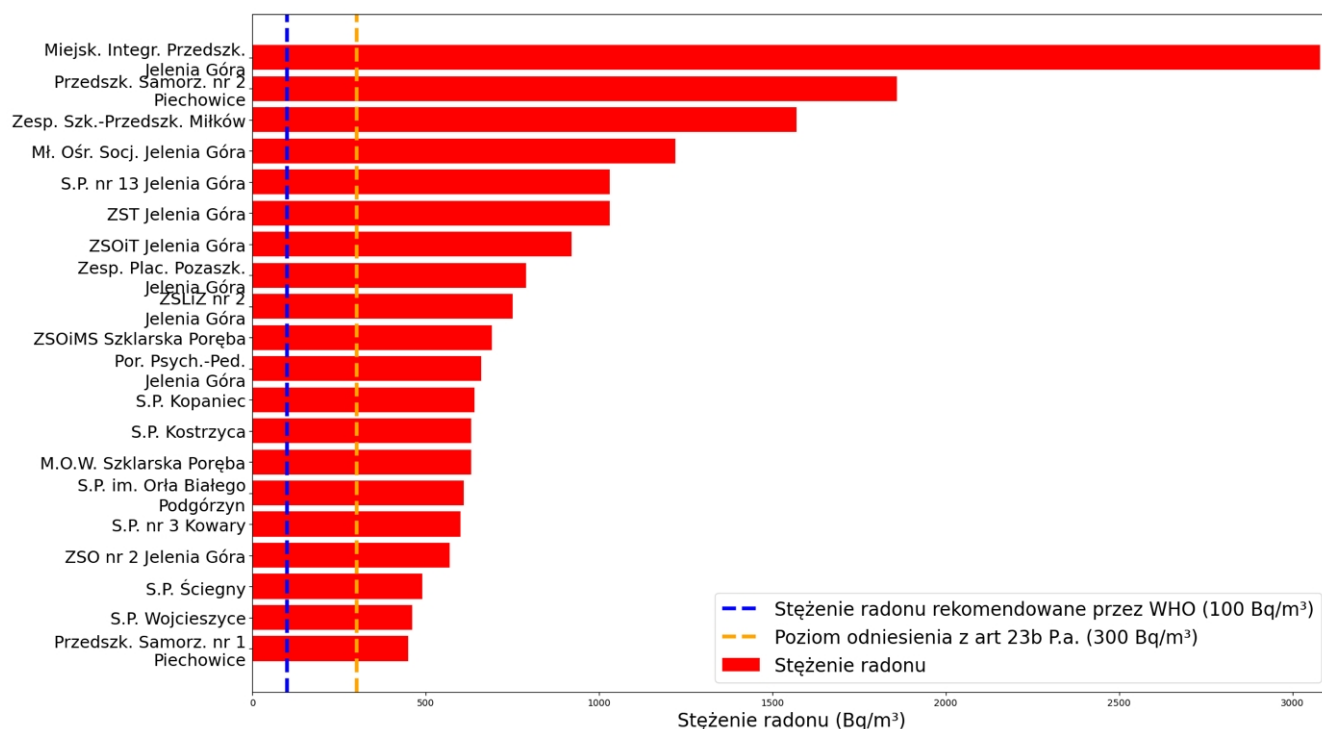
⁴⁸ Zob. W. Adamski, *Miasto górników i tkaczy*, [w:] Kowary. Szkice z dziejów miasta. Tom 1, red. T. Bugaj, Karkonoskie Towarzystwo Naukowe, Jelenia Góra 1988, s. 29–30.

⁴⁹ Zob. F.L. Hess, *Radium, Uranium, and Vanadium*, [w:] *Mineral Resources of the United States, 1933, Part I – Metals*, Government Printing Office, Washington 1932, s. 504; R. Karlsch, Z.A. Zeman, *Orangeheimnisse: das Erzgebirge im Brennpunkt der Weltpolitik 1933–1960*, Ch. Links Verlag, Berlin 2002, s. 11; R. Borzęcki, D. Wójcik, M. Kalisz, *Przeróbka rud uranu w rejonie Kowar*, „Hereditas Minariorum” 2018, nr 5, s. 181–213.

⁵⁰ Zob. J. Olszewski, K. Walczak, *Radon...*, wyd. cyt., s. 150–151; por. S. Sukanya, J. Sabu, *Environmental Radon: A Tracer for Hydrological Studies*, Springer, Singapore 2023, s. 145–166.

⁵¹ Por. R. Bobkier, *Ewolucja...*, wyd. cyt., s. 39.

⁵² Odnośnie do wątpliwości na tle definicji tego pojęcia w Prawie atomowym, por. R. Bobkier, *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” 2024, nr 2, s. 14–29.



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.

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.

łatwa jest do pozytywnej weryfikacji. Metodologia wyznaczania obciążającej dawki skutecznej (efektywnej) w przypadku ekspozycji wewnętrznej na radon i jego pochodne została przecież określona w polskim porządku normatywnym⁵³. Jednak wnioski te nie pozostają jedynie w sferze teoretycznej analizy, lecz otwierają obszar dalszych rozważań nad potencjalną odpowiedzialnością osób zarządzających jednostkami systemu oświaty za czyn z art. 123 ust. 1 pkt 5 P.a., penalizujący dopuszczenie przez kierownika jednostki organizacyjnej, odpowiedzialnego za ochronę radiologiczną, do narażenia pracownika lub innej osoby z naruszeniem przepisu art. 14 ust. 1 P.a.

Dalsza analiza w tym zakresie wymaga jednak uprzedniego rozważenia zakresu znaczeniowego pojęcia „ucznia”, pozbawionego definicji na gruncie Prawa atomowego, celem weryfikacji, czy i w jakim stopniu osoby uczęszczające do placówek oświatowych objęte są mechanizmami wynikającymi z ukształtowanego w 2019 roku reżimu

ochrony radiologicznej przez radonem. Dopiero po sprecyzowaniu tej kategorii możliwe jest określenie zakresu odpowiedzialności kierowników jednostek.

5. Pojęcie „ucznia”

Art. 32a P.a. nakazuje stosowanie wskazanych w nim przepisów Prawa atomowego, w tym kluczowego, „radonowego” art. 23c, odpowiednio do uczniów.

Jak celnie wskazał w 2023 roku R. Budzisz, „w odniesieniu do pojęcia ucznia próżno szukać jego definicji”⁵⁴ w Prawie oświatowym, które w art. 4 pkt 20 naprowadza jedynie, że pod pojęciem tym należy rozumieć także słuchaczy i wychowanków⁵⁵. Prawo to zawiera w art. 2 enumeratywny, obszerny katalog jednostek systemu oświaty⁵⁶.

⁵³ Metodologia ta wynika z pkt 4 załącznika „Wielkości i wartości wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące” do rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz. U. poz. 1657).

⁵⁴ R. Budzisz, *Badania sanitarno-epidemiologiczne*, [w:] *Zapobieganie oraz zwalczanie zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi. Zagadnienia prawne*, red. R. Budzisz, Wolters Kluwer, Warszawa 2023, s. 72.

⁵⁵ Podobny zresztą zabieg zastosowano w art. 3 pkt 11 ustawy z dnia 7 września 1991 r. o systemie oświaty (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 2230 z późn. zm.).

⁵⁶ W myśl tego przepisu system oświaty obejmuje: przedszkola, w tym: specjalne, integracyjne, z oddziałami specjalnymi lub integracyjnymi, a także inne formy wychowania przedszkolnego (pkt 1); szkoły: podstawowe, w tym: specjalne, integracyjne, z oddziałami przedszkolnymi, integracyjnymi, specjalnymi, przysposabiającymi do pracy, dwujęzycznymi, sportowymi i mistrzostwa sportowego, sportowe i mistrzostwa sportowego (pkt 2a), ponadpodstawowe, w tym: specjalne, integracyjne, dwujęzyczne, z oddziałami integracyjnymi, specjalnymi, dwujęzycznymi, przygotowania wojskowego, o profilu mundurowym, sportowymi i mistrzostwa sportowego, sportowe, mistrzostwa sportowego, rolnicze, leśne, morskie, żegluga śródlądowej oraz rybołówstwa (pkt 2b), artystyczne (pkt 2c); placówki oświatowo-wychowawcze, w tym szkolne

Własne definicje pojęcia „ucznia” zawierają ustawy z zakresu prawa oświatowego sensu *largo*. Są to jednak definicje na potrzeby tych regulacji⁵⁷. Jedynie posiłkowo można je stosować w odniesieniu do pojęć używanych w Prawie atomowym. Art. 3 ust. 3 pkt 1 w zw. z art. 3 ust. 2 pkt 1 ustawy z dnia 15 kwietnia 2011 roku o systemie informacji oświatowej⁵⁸ nakazuje rozumieć pod pojęciem „ucznia”: dzieci objętych wczesnym wspomaganie rozwoju w szkołach i placówkach oświatowych, dzieci objętych wychowaniem przedszkolnym w przedszkolach, oddziałach przedszkolnych zorganizowanych w szkołach podstawowych i innych formach wychowania przedszkolnego oraz uczniów, słuchaczy, wychowanków i absolwentów szkół i placówek oświatowych. Z kolei art. 2 pkt 33 ustawy z dnia 27 października 2017 roku o finansowaniu zadań oświatowych⁵⁹ stanowi, że do zakresu znaczeniowego określenia „uczeń” zaliczyć należy także słuchacza szkoły dla dorosłych, branżowej szkoły II stopnia i szkoły policealnej oraz dziecko korzystające z wychowania przedszkolnego⁶⁰.

Uwzględniając katalog jednostek systemu oświaty (art. 2 Prawa oświatowego, *vide* przypis 53), stoimy na stanowisku, że wykładnia pojęcia „ucznia” na gruncie art. 32a P.a. powinna uwzględniać nie tylko formalną strukturę organizacyjną placówek edukacyjnych, lecz także przede wszystkim ich cel ontologiczny, którym jest kształtowanie i wychowanie człowieka w warunkach zapewniających jego bezpieczeństwo. Tym samym przesłanką do stosowania zapewniających ochronę przed radonem norm Prawa atomowego musi być funkcjonalne uczestnictwo w procesie edukacyjnym (wychowawczym, terapeutycznym, itd.), niezależnie od formy organizacyjnej danej placówki. Zgodnie z art. 3 pkt 20 P.a., ochrona radiologiczna to zapobieganie narażeniu ludzi, a nie jedynie wybranych grup. Redukowanie zakresu takiej ochrony w odniesieniu do radonu jedynie do uczniów placówek o formalnym statusie szkoły oznaczałoby normatywną

deprecjację innych wychowanków, pozostając w sprzeczności z zasadą równej wartości życia i zdrowia. Ekonomiczna analiza prawa daje asumpt do stwierdzenia, że ochrona przed zagrożeniami powinna kierować się zasadą maksymalizacji dobra w oparciu o rzeczywiste potrzeby, a nie granice definicyjne wyznaczone przez terminologię administracyjną⁶¹. Kultura bezpieczeństwa, pojęcie zdefiniowane w art. 3 pkt 8c P.a., nadaje priorytet ochronie i bezpieczeństwu ponad innymi wartościami, co nakazuje traktowanie dzieci jako grupy szczególnie chronionej, niezależnie od tego, czy formalnie nazywane są uczniami, słuchaczami czy wychowankami. Wszak art. 68 ust. 3 *in pr.* Konstytucji RP⁶² nakłada na władze publiczne obowiązek zapewnienia szczególnej opieki zdrowotnej „dzieciom”, nie dając podstawy do wnioskowania o możliwości różnicowania ich uprawnień w zależności od administracyjnego przyporządkowania do określonego rodzaju instytucji. Z tej perspektywy wykładnia pojęcia „ucznia” z art. 32a P.a. musi obejmować wszystkie dzieci objęte systemem edukacji i wychowania w jednostkach systemu oświaty ujętych w katalogu z art. 2 Prawa oświatowego. Jakakolwiek bowiem zawężająca ten zakres *interpretatio restrictiva* prowadziła do arbitralnego i aksjologicznie nieuzasadnionego podziału, sprzecznego z fundamentalnym założeniem równości ochrony zdrowia jako wartości nadrzędnej.

Jednak nawet ta ekstensywna wykładnia nie uwalnia od swoistego dysonansu. Rodzi się on na tle *sui generis* „ontologicznego pęknięcia”⁶³ w strukturze ochrony prawnej, które ujawnia się w odniesieniu do żłobków – instytucji uregulowanych w ustawie z dnia 4 lutego 2011 roku o opiece nad dziećmi w wieku do lat 3⁶⁴. Pomimo, że w myśl art. 2 ust. 1 tego aktu prawnego realizują one funkcje: opiekuńczą, wychowawczą oraz edukacyjną, nie są jednostkami systemu oświaty – i z całą pewnością dzieci do nich uczęszczające nie są uczniami. W tym przypadku

schroniska młodzieżowe, umożliwiające rozwijanie zainteresowań i uzdolnień oraz korzystanie z różnych form wypoczynku i organizacji czasu wolnego (pkt 3); placówki kształcenia ustawicznego, centra kształcenia zawodowego oraz branżowe centra umiejętności, umożliwiające uzyskanie i uzupełnienie wiedzy, umiejętności i kwalifikacji zawodowych lub zmianę kwalifikacji zawodowych (pkt 4); placówki artystyczne – ogniska artystyczne umożliwiające rozwijanie zainteresowań i uzdolnień artystycznych (pkt 5); poradnie psychologiczno-pedagogiczne, w tym poradnie specjalistyczne udzielające dzieciom, młodzieży, rodzicom i nauczycielom pomocy psychologiczno-pedagogicznej, a także pomocy uczniom w wyborze kierunku kształcenia i zawodu (pkt 6); młodzieżowe ośrodki wychowawcze, młodzieżowe ośrodki socjoterapii, specjalne ośrodki szkolno-wychowawcze oraz specjalne ośrodki wychowawcze dla dzieci i młodzieży wymagających stosowania specjalnej organizacji nauki, metod pracy i wychowania, a także ośrodki rewalidacyjno-wychowawcze umożliwiające dzieciom i młodzieży, o których mowa w art. 36 ust. 17, a także dzieciom i młodzieży z niepełnosprawnościami sprzężonymi, z których jedną z niepełnosprawności jest niepełnosprawność intelektualna, realizację odpowiednio obowiązku, o którym mowa w art. 31 ust. 4, obowiązku szkolnego i obowiązku nauki (pkt 7); placówki zapewniające opiekę i wychowanie uczniom w okresie pobierania nauki poza miejscem stałego zamieszkania (pkt 8); placówki doskonalenia nauczycieli (pkt 9); biblioteki pedagogiczne (pkt 10); kolegia pracowników służb społecznych (pkt 11).

⁵⁷ Zob. R. Budzisz, *Badania...*, [w:] *Zapobieganie...*, red. R. Budzisz, wyd. cyt., s. 73.

⁵⁸ Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 r. o systemie informacji oświatowej (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 152 z późn. zm.).

⁵⁹ Ustawa z dnia 27 października 2017 r. o finansowaniu zadań oświatowych (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1400).

⁶⁰ To swoiste rozedrganie definicyjne wybrzmiewa echem w doktrynie i judykaturze również i w innych niż prawo atomowe obszarach prawa, por. Pismo z dnia 5.07.2012 r., Regionalna Izba Obrachunkowa w Katowicach, WA-0250/60/12; M. Wolanin, *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/Gl 426/19)*, „Orzecznictwo w Sprawach Samorządowych” 2022, nr 2, s. 116-122; wyrok WSA w Gliwicach z 2.07.2019 r., III SA/Gl 426/19, LEX nr 2706528.

⁶¹ Por. M.J. Golecki, *W poszukiwaniu optymalnego prawodawcy. Dylematy regulacji i deregulacji z perspektywy ekonomicznej analizy prawa*, internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny 2019, nr 8, s. 11-22.

⁶² Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 2 kwietnia 1997 r. (Dz. U. Nr 78, poz. 483 z późn. zm.).

⁶³ Por. M. Heller, *Granice czasu, przestrzeni i prawdopodobieństwa*, „Filozofia Nauki” 2008, nr 3-4, s. 8.

⁶⁴ Ustawa z dnia 4 lutego 2011 r. o opiece nad dziećmi w wieku do lat 3 (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 338 z późn. zm.).

rzeczywistość aksjologiczna pozostaje na odrębnej od prawa pozytywnego płaszczyźnie. Sama bowiem ustawowa klasyfikacja placówek nie zmienia faktu, że dzieci – tak w żłobkach, jak i te nieco starsze, w szkołach i przedszkolach, są podmiotami tego samego narażenia na promieniowanie jonizujące. Taki formalizm prowadzi do sytuacji, w której ochrona, wynikająca z art. 32a P.a., obejmuje jedynie osoby spełniające kryterium „ucznia”, pozostawiając poza tym zakresem nie różniące się istotnie z perspektywy biologicznej i zdrowotnej dzieci w wieku do lat 3. Z perspektywy teleologii prawa, ta luka ochronna jest trudna do uzasadnienia – skoro *ratio legis* art. 32a P.a. jest ochrona przed radonem grup szczególnie wrażliwych, wyłączenie spod tej ochrony najmłodszych dzieci staje się swoistą „aporią normatywną”⁶⁵, nieznajdującą jakiegokolwiek racjonalnego usprawiedliwienia.

Z pełnym przekonaniem wyrażamy komplement kompetencyjny dla polskiego ustawodawcy, który podkreślając w art. 32a P.a. konieczność rozciągnięcia normatywnej ochrony przed radonem na „uczniów” wykroczył poza minimalne wymogi statuowane przepisami dyrektywy BSS. Ta bowiem nie akcentuje w sposób tak wyraźny jak w rodzimym prawie krajowym potrzeby ochrony dzieci przed narażeniem na ten gaz⁶⁶, w czytelny sposób koncentrując uwagę na praktykantach i studentach w wieku od 16 lat (art. 33). Niemniej jednak ta normatywna luka w polskim prawie w odniesieniu do dzieci w żłobkach pozostawia – niejako w czterech wymiarach – pewien niedosyt. Rodzi się on, po pierwsze, na tle swoistej asymetrii ochrony prawnej przed narażeniem na radon, w ramach której wychowawcy (pracownicy) żłobków objęci są ochroną prawną, podczas gdy dzieci, których organizmy są znacznie bardziej podatne na skutki promieniowania jonizującego, już nie są. Pozostaje to w sprzeczności z zasadą proporcjonalności, jak i fundamentalnym założeniem, że im bardziej podatna na szkodliwe czynniki jest dana grupa, tym bardziej intensywna powinna być jej ochrona prawna. Po drugie, sytuacja, w której dziecko w przedszkolu jest chronione na mocy art. 32a P.a., ale dziecko chociażby kilka miesięcy młodsze, a uczęszczające do żłobka – już nie, jest wewnętrznie niespójna i arbitralna. W rzeczywistości nie istnieje żadna różnica biologiczna czy medyczna, która uzasadniałaby wyłączenie tej drugiej grupy spod ochrony. Po trzecie, problemem jest tu dostrzegalna dysproporcja informacyjna. O ile w przedszkolach istnieje obowiązek udzielania informacji w odniesieniu do

radonu (art. 23c ust. 2 w zw. z art. 32a P.a.), o tyle brak analogicznego wymogu w żłobkach pozostawia rodziców dzieci uczęszczających do tych placówek w niewiedzy co do potencjalnego zagrożenia. Po czwarte, w praktyce często występują sytuacje, w których w jednym budynku faktycznie funkcjonują, wyodrębnione jako jednostki organizacyjne, żłobek i przedszkole⁶⁷. Dzieci do nich uczęszczające objęte są różnymi reżimami ochronnymi w zależności od formalnej klasyfikacji instytucji, a nie rzeczywistego poziomu zagrożenia. Z uwagi na wagę powyższej argumentacji, istniejąca *de lege lata* sytuacja jest z perspektywy zasady równości wobec prawa ewidentnie wadliwa i zasługuje na reakcję ustawodawcy.

Powyższa analiza prowadzi do potrzeby głębszego zbadania mechanizmów ochronnych, które dla „uczniów” wynikają z kluczowego – w odniesieniu do radonu – przepisu art. 23c P.a.

6. Art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. – zapewnienie pomiaru stężeń radonu (odpowiednie stosowanie)

Zasadniczym problemem przy odpowiednim stosowaniu art. 23c P.a. do uczniów jest fakt, że przepisy w nim zawarte odnoszą się do pracowników, a nie osób przebywających w placówkach oświatowych w charakterze uczniów. Należy zatem określić, jak powinny kształtować się wskazane w tym przepisie obowiązki, realizowane przez dyrektorów jednostek systemu oświaty jako kierowników jednostek w rozumieniu Prawa atomowego. Oczywiście należy mieć na uwadze, że opisane w niniejszym podrozdziale powinności realizują oni również wobec pracowników i pracowników zewnętrznych.

6.1. Miejsca objęte obowiązkiem zapewnienia pomiaru

Przywołana we wprowadzeniu do niniejszego artykułu norma art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. nakłada na kierowników jednostek wykonujących działalność, w której występują miejsca pracy zlokalizowane wewnątrz pomieszczeń na poziomie parteru lub piwnicy na terenach „powiatów radonowych”, obowiązek zapewnienia w tych miejscach pracy pomiaru stężenia radonu⁶⁸.

⁶⁵ Aporia (gr. , bezdroże, trudność, wątpliwość) to termin filozoficzny oznaczający sytuację problematyczną, w której rozwiązania wydają się wewnętrznie sprzeczne lub niemożliwe do pogodzenia, por. J.M.A. Linhares, *Pojęcie dowodu jako otwarta rana prawa: niezmiennie błędna aporia?*, „Archiwum Filozofii Prawa i Filozofii Społecznej” 2013, nr 1, s. 5-20; M.R. Kaczmarczyk, *Aporia wolności. Krytyka teorii społecznej*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2019.

⁶⁶ Choć czyni to np. w art. 61 ust. 1 pkt 1 w odniesieniu do narażenia medycznego.

⁶⁷ Zob. M. Wysocka, *Czy można łączyć grupy w żłobku i przedszkolu*, „Portal Oświatowy”, 18 lutego 2025, <https://www.portaloswiatowy.pl/bezpieczenstwo-i-opieka/czy-mozna-laczyc-grupy-w-zlobku-i-przedszkolu-20059.html> (dostęp: 28.02.2025); M. Topolewska, *Żłobek i przedszkole nie mogą być zespołem*, „Gazeta Prawna”, 4 lutego 2019, <https://serwisy.gazetaprawna.pl/samorzad/artykuly/1395862,zlobek-i-przedszkole-nie-moga-byc-zespolem.html> (dostęp: 28.02.2025).

⁶⁸ Sygnalizujemy w tym miejscu, że poza ramami rozważań pozostawiamy przepisy Prawa atomowego, dotyczące radonu, z perspektywy instytucji pracy zdalnej i nauki zdalnej. Zagadnienie to, z uwagi na jego złożoność, będzie przedmiotem odrębnej publikacji.

Miejsce pracy to termin języka prawnego Kodeksu pracy⁶⁹, niezaopatrzonej jednak na gruncie tej ustawy w definicję legalną⁷⁰ i niejednolicie rozumiany w doktrynie i orzecznictwie⁷¹. Z uwagi na przedmiot niniejszych rozważań przytoczyć trzeba definicję, w myśl której miejscem pracy jest jednostka przestrzeni, w której pracownik, z reguły stale, rozpoczyna i kończy codzienną pracę⁷², czy też miejsce wykonywania zwykłych, bieżących czynności wchodzących w zakres umówionego rodzaju pracy⁷³. Jedynym aktem prawnym, który zawiera wyraźne określenie pojęcia „miejsca pracy” jest rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 roku w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy⁷⁴ (dalej r.o.p.b.h.p.). Jak wskazuje § 2 pkt 7b r.o.p.b.h.p., miejscem pracy jest miejsce wyznaczone przez pracodawcę, do którego pracownik ma dostęp w związku z wykonywaniem pracy. Zarazem trzeba podkreślić, że rozporządzenie to definiuje w § 2 pkt 3 zd. 1 również i pojęcie „pomieszczenia pracy” – jako pomieszczenia przeznaczonego na pobyt pracowników, w którym wykonywana jest praca. Ustawodawca nie zdecydował jednak na odniesienie się do tego ostatniego pojęcia w Prawie atomowym, zestawiając w normie art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. jedynie terminy „miejsce pracy” i „pomieszczenie”, co nastrocza problemów interpretacyjnych.

Definicji legalnej nie posiada również w polskim prawie samoistne pojęcie „pomieszczenia”⁷⁵, co skłania przedstawicieli doktryny do konstruowania, często odmiennych, opisów jego znaczenia⁷⁶. Wydaje się, że za najpełniejszą deskrypcję uznać należy tę, w myśl której pomieszczeniem

jest wyodrębniona ścianami lub innymi przegrodami część budynku, w tym zwłaszcza lokal, jak również wchodzące w jego skład izby⁷⁷ lub zespół izb⁷⁸.

Dyspozycja art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. nakazuje zapewnienie pomiarów w pomieszczeniach „na poziomie parteru lub piwnicy”. Również i egzegeza tej części omawianej normy rodzi pewne wątpliwości, wynikające z użycia określenia „parter”. Przepisy r.w.t. zawierają w § 3 pkt 16-18 i 21 definicje odpowiednio: kondygnacji, kondygnacji podziemnej, kondygnacji nadziemnej i piwnicy. Natomiast w systemie prawa budowlanego brak jest definicji pojęcia „parteru”. W tym zakresie, w ślad za orzecznictwem sądów administracyjnych, interpretować można parter jako najniższą, pierwszą kondygnację nadziemną, stanowiącą poziom, na którym znajduje się główne wejście do budynku⁷⁹, niemniej jednak warto tu postulować, by ustawodawca odniósł się w Prawie atomowym czytelnie do siatki pojęciowej z r.w.t., co nie tylko pozwoli na uniknięcie rozbieżności interpretacyjnych, lecz także wyeliminuje ze wskazanego przepisu Prawa atomowego wieloznaczność, która nie powinna charakteryzować języka prawnego⁸⁰.

Należy dokonać funkcjonalnej transpozycji normy art. 23c ust. 1 pkt 1 P.a. na realia jednostek systemu oświaty celem spełnienia wynikającego z art. 32a P.a. wymogu „odpowiedniego” ich stosowania do uczniów. Skonstatować więc trzeba, że na obszarze „powiatów radonowych” dyrektorzy tych jednostek zobowiązani są do zapewnienia pomiarów stężeń radonu we wszystkich, położonych w piwnicy i na pierwszej kondygnacji nadziemnej, pomieszczeniach przeznaczonych do realizacji zajęć

⁶⁹ Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1465).

⁷⁰ Zob. G. Goździewicz, T. Zieliński, [w:] *Kodeks pracy. Komentarz*, red. L. Florek, Wolters Kluwer, Warszawa 2017, s. 1496.

⁷¹ Zob. A. Rycak, *Powszechna ochrona trwałości stosunku pracy*, Wolters Kluwer, Warszawa 2013, s. 50; por. D. Książek, *Pojęcie i podział wyrażenia „miejsce pracy”*, „Studia z Zakresu Prawa Pracy i Polityki Społecznej” 2013, nr 1, s. 219–242.

⁷² Zob. G. Goździewicz, T. Zieliński, [w:] *Kodeks...*, red. L. Florek, wyd. cyt., s. 1496. Podobnie J. Wiśniewski, *Miejsce wykonywania pracy w świetle przepisów prawa pracy*, „Studia Prawnoustrojowe” 2023, nr 60, s. 382; D. Muszer, M. Krause, *Przykład oceny ryzyka zawodowego na stanowisku laboranta próbobiorcy*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2015, nr 82, s. 151.

⁷³ Zob. M. Tomaszewska, [w:] *Kodeks pracy. Komentarz. Tom I. Art. 1-93*, red. K.W. Baran, Wolters Kluwer, Warszawa 2022, LEX/el, kom. do art. 29, pkt 10.

⁷⁴ Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (t.j. Dz. U. z 2003 r. Nr 169, poz. 1650 z późn. zm.).

⁷⁵ W piśmiennictwie podkreśla się, że definicji takiej nie zawierają przepisy prawa budowlanego, zob. M. Zelek, [w:] *Kodeks cywilny. Tom II. Komentarz. Art. 353–626*, red. M. Gutowski, Beck, Warszawa 2022, kom. do art. 433, nb. 2. W szczególności nie ujęto jej w słowniku wyrazów ustawowych, zawartym w art. 3 ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 725). Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1225), dalej r.w.t., zawiera szereg definicji poszczególnych rodzajów pomieszczeń (§ 3 pkt 10-14), również jednak nie określając znaczenia pojęcia podstawowego.

⁷⁶ Por. J. Kuźmicka-Sulikowska, [w:] *Zobowiązania. Część ogólna. Tom II. Komentarz*, red. P. Machnikowski, Beck, Warszawa 2024, Legalis, kom. do art. 433, nb. 22; M. Warciński, *Glosa do wyroku SN z dnia 5 marca 2002 r., I CKN 1156/99*, „Orzecznictwo Sądów Polskich” 2005, nr 10, s. 116; G. Karaszewski, [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany*, red. J. Ciszewski, P. Nazaruk, Wolters Kluwer, LEX/el. 2023, kom. do art. 433, pkt 4; M. Wałachowska, M.P. Ziemiak, [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz. Tom III. Zobowiązania. Część ogólna (art. 353-534)*, red. M. Frasz, M. Habdas, Wolters Kluwer, Warszawa 2018, s. 493; L. Jantowski, [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany*, red. M. Balwicka-Szczyrba, A. Sylwestrzak, Wolters Kluwer, LEX/el. 2024, kom. do art. 433, pkt 3.

⁷⁷ Zob. P. Machnikowski, A. Śmieja, [w:] *Prawo zobowiązań – część ogólna. System Prawa Prywatnego. Tom 6*, red. A. Olejniczak, Beck, Warszawa 2023, s. 584.

⁷⁸ Zob. P. Rogoziński, *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” 2021, nr 1, s. 184.

⁷⁹ Wyrok NSA z 19.10.2021 r., II OSK 400/21, LEX nr 3319061; wyrok WSA w Gliwicach z 21.10.2020 r., II SA/GI 640/20, LEX nr 3096456; wyrok WSA w Rzeszowie z 28.06.2023 r., II SA/Rz 43/23, LEX nr 3600292.

⁸⁰ Zob. A. Doczekalska, *Język prawny w tworzeniu i transpozycji prawa Unii Europejskiej. Procesy hybrydyzacji*, Wolters Kluwer, Warszawa 2021, s. 75.

edukacyjnych, wychowawczych lub opiekuńczych, w którym regularnie przebywają uczniowie, wychowankowie lub słuchacze w trakcie obowiązkowych i dodatkowych zajęć organizowanych przez placówkę. Taksatywnie jedynie wymienić tu można: sale lekcyjne, pracownie przedmiotowe, sale przedszkolne, pomieszczenia przeznaczone do zajęć praktycznych, sale wykładowe w szkołach policealnych i placówkach kształcenia ustawicznego, inne pomieszczenia, w których prowadzone są regularne zajęcia dydaktyczne (np. świetlice, biblioteki pełniące funkcję edukacyjną) oraz sale gimnastyczne.

6.2. Metodyka pomiaru

Prawo ochrony środowiska⁸¹ (dalej: P.o.ś) definiuje w art. 3 pkt 9 metodykę referencyjną – określoną na podstawie ustawy metodę pomiarów lub badań, która może obejmować w szczególności sposób poboru próbek, sposób interpretacji uzyskanych danych, a także metodyki modelowania rozprzestrzeniania substancji oraz energii w środowisku. Ten zbiór wymagań musi wynikać z przepisu rangi ustawowej, bądź przepis taki ma upoważniać do jego ustanowienia⁸². Podmioty korzystające ze środowiska oraz organy administracji są obowiązane do stosowania metodyk referencyjnych, jeżeli metodyki takie zostały określone na podstawie ustaw (art. 12 ust. 1 P.o.ś.). W judykaturze podkreśla się, że obowiązek czynienia ustaleń w oparciu o badania wykonane przez akredytowane podmioty dotyczy również organów ochrony środowiska rozstrzygających daną sprawę, a nie odnosi się wyłącznie do podmiotów korzystających ze środowiska⁸³. Przepis ten nie wskazuje, że odnosi się on wyłącznie do organów ochrony środowiska (o których mowa w art. 376 P.o.ś.). Należy zatem uznać, że obejmuje swym zakresem wszystkie organy, obowiązane do pomiarów emisji⁸⁴. W art. 12 ust. 2 P.o.ś. ustawodawca przewidział też możliwość odstąpienia od stosowania obowiązku stosowania metodyk referencyjnych i stosowania innej metodyki. Wymaga to jednak zachowania określonych warunków, tj. że metodyka ta umożliwia

uzyskanie dokładniejszych wyników, a uzasadnieniem jej zastosowania są zjawiska meteorologiczne, mechanizmy fizyczne i procesy chemiczne, jakim podlegają substancje lub energie – w przypadku metodyki modelowania rozprzestrzeniania substancji lub energii w środowisku; a także o ile zostanie udowodniona pełna równoważność uzyskiwanych wyników – w przypadku pozostałych metodyk. Tak ujęta zasada porównywalności wyników (zawarta w art. 12 ust. 1 P.o.ś) zapewnia ich miarodajność, a także umożliwia uproszczenie prowadzenia kontroli⁸⁵.

Podobnego unormowania nie zawierają przepisy Prawa atomowego. Nie określają one prawnie wymaganej metody dokonywania pomiarów, z wyjątkiem zawartego w art. 3 pkt 47a wymogu, by średnioroczne stężenie radonu oszacowane było na podstawie pomiarów tego stężenia w okresie nie krótszym niż jeden miesiąc. Zapisy w tej mierze zawiera wyłącznie – ogłoszony w formie obwieszczenia – Krajowy plan działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy⁸⁶ (dalej: Plan). Jednak art. 87 ust. 1 Konstytucji RP pozostawia obwieszczenia poza zakresem źródeł powszechnie obowiązującego prawa Rzeczypospolitej Polskiej, obejmującym Konstytucję, ustawy, ratyfikowane umowy międzynarodowe oraz rozporządzenia. Obwieszczenie natomiast posiada jedynie deklaratoryjny charakter⁸⁷, stanowiąc urzędowe wyjaśnienie przepisów prawa⁸⁸. Zapisy Planu nie są normami prawnymi, które mogłyby stanowić podstawę wydawania rozstrzygnięć indywidualnych⁸⁹. Plan prezentuje jedynie pogląd organu go wydającego (Ministra Zdrowia), dotyczący rozumienia przepisów Prawa atomowego, a respektowanie go „jest dobrowolne”⁹⁰.

Nie sposób jednak nie rekomendować kierownikom jednostek systemu oświaty przestrzegania, zresztą mających charakter ogólny, zaleceń Planu. Ten zaś wskazuje w pkt 4.1 części II („Część opisowa”) że do pomiarów średniorocznego stężenia radonu wewnątrz pomieszczeń należy stosować detektory śladowe w komorze dyfuzyjnej, zaś „w opinii ekspertów wykonujących

⁸¹ Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 54 z późn. zm.).

⁸² Zob. T. Długosz, M. Swora, A. Walaszek-Pyziół, T. Włudyka, A. Żurawik, *Szczególna regulacja działalności przedsiębiorstw w sektorach sieciowych*, [w:] *Publiczne prawo gospodarcze. Tom 8B. System Prawa Administracyjnego*, red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel, Beck, Warszawa 2013, s. 424.

⁸³ Wyrok WSA w Warszawie z 19.02.2019 r., IV SA/Wa 1763/18, LEX nr 3060124.

⁸⁴ Zob. K. Gruszecki, *Prawo ochrony środowiska. Komentarz*, Wolters Kluwer, Warszawa 2025, LEX/el, kom. do art. 12, pkt. 2.

⁸⁵ Zob. A. Barczak, *Kontrola podmiotów korzystających ze środowiska*, Wolters Kluwer, Warszawa 2020, s. 41.

⁸⁶ Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy (M. P. z 2021 r. poz. 169).

⁸⁷ Zob. O. Kazalska, *Zwolnienie z konstytucyjnego wymogu kontrasygnaty – rozważania na tle niekontrasygowanych obwieszczeń Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej o wolnych stanowiskach sędziego w Sądzie Najwyższym i Naczelny Sądzie Administracyjnym*, „Studia Iuridica” 2018, tom 56, s. 238.

⁸⁸ Zob. M. Błachucki, *Urzędowe wyjaśnienia przepisów prawa wydawane przez organy administracji publicznej*, [w:] *Źródła prawa administracyjnego a ochrona wolności i praw obywateli*, red. M. Błachucki, T. Górzyńska, Naczelny Sąd Administracyjny, Warszawa 2014, s. 122–123.

⁸⁹ Por. R. Stankiewicz, *Prawotwórcza rola administracji w kształtowaniu sektora energetycznego (na przykładzie polityki energetycznej państwa)*, [w:] *Legislacja administracyjna. Teoria, orzecznictwo, praktyka*, red. M. Stahl, Z. Duniewska, Wolters Kluwer, Warszawa 2012, s. 267.

⁹⁰ Zob. M. Błachucki, *Wytyczne w sprawie nakładania administracyjnych kar pieniężnych (na przykładzie wytycznych wydawanych przez prezesa UOKiK)*, [w:] *Administracyjne kary pieniężne w demokratycznym państwie prawa*, red. M. Błachucki, Biuro Rzecznika Praw Obywatelskich, Warszawa 2015, s. 46–47.

pomiary stężenia radonu w celu uzyskania średniorocznego stężenia radonu w pomieszczeniu przeznaczonym na pobyt ludzi zalecanym jest wykonywanie pomiarów w okresie grzewczym (zalecany w Polsce okres październik – marzec)”⁹¹.

Podkreślić jednak trzeba, że określenie powyższych rekomendacji wyłącznie w Planie, nie stanowiącym źródła prawa powszechnie obowiązującego, sprawia, że pomiar stężenia radonu, przeprowadzony inną metodą, czy też nawet poza sezonem grzewczym – jest pomiarem spełniającym ustawowy wymóg, statuowany w przypadku szkół czy przedszkoli, przepisem art. 23c ust. 1 pkt 1 w zw. z art. 32a P.a.

Przepisy polskiego prawa nie kreują wymogu, by sama czynność pomiaru radonu, przeprowadzana w ramach obowiązków kierowników jednostek z art. 23c ust. 1 P.a. (rozłożenie detektorów, dokumentowanie przebiegu pomiarów) dokonywana była przez wyspecjalizowany, koncesjonowany podmiot. Sugerowany przebieg takiej procedury (*“Rational Method of Indoor Radon Measurements”*) zawarto w publikacji z 2025 roku⁹².

6.3. Częstotliwość dokonywania pomiarów

Prawo atomowe nie określa *in concreto* częstotliwości, w jakiej kierownicy jednostek zobowiązani są do realizacji wymogu zapewnienia pomiarów stężeń radonu. Stosowany zgodnie z wymogiem art. 32a P.a. odpowiednio do uczniów przepis art. 17 ust. 2 P.a. przesądza, że ocena narażenia uczniów prowadzona jest na podstawie kontrolnych pomiarów dawek indywidualnych lub pomiarów dozymetrycznych w środowisku nauki. Wydaje się, że pomocniczo należy tu odwołać się do rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 roku w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące. Zgodnie z jego § 2 ust. 4, wyznaczanie tych dawek dokonywane jest na podstawie pomiarów dozymetrycznych. Przepis § 3 ust. 1 tego rozporządzenia stanowi, że oceny narażenia dokonuje się **dla każdego roku kalendarzowego** przez wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego na podstawie pomiarów dozymetrycznych, wykonywanych w okresach nie dłuższych niż trzymiesięczne, a jeżeli okres zatrudnienia w warunkach narażenia jest krótszy niż trzy miesiące – po zakończeniu tego okresu.

6.4. Wejście w życie obowiązku dokonywania pomiarów

Przepisy art. 23c P.a. weszły w życie dniem 23 września 2019 roku (art. 39 ustawy z dnia 13 czerwca 2019 roku o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej). Art. 20 ust. 2 tej ustawy zawierał przepis przejściowy, odradzający stosowanie przepisów art. 23c ust. 2–4 P.a. na okres 2 lat. Z uwagi na nieobjęcie tą swoistą prolongatą normy art. 23c ust. 1 P.a., dotyczącej obowiązku zapewnienia pomiarów stężeń radonu, za okres faktycznego ich wejścia w życie uznać należy 31 lipca 2020 roku. Z tą bowiem datą dokonano wyznaczenia „powiatów radonowych” rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 roku w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia.

Tym samym z dniem 31 lipca 2020 roku dyrektorzy szkół i przedszkoli (kierownicy jednostek) winni byli zapewnić względem uczniów pomiary stężeń radonu. Data ta – w przypadku uchybienia temu obowiązkowi – wyznacza również początek biegu czynu z art. 123 ust. 1 pkt 8 P.a.

7. Art. 23c ust. 2 P.a. – obowiązki o charakterze optymalizacyjno-informacyjnym (odpowiednie stosowanie)

Przepis art. 23c ust. 2 P.a. nakłada na dyrektorów jednostek systemu oświaty jeden obowiązek o charakterze profilaktycznym i cztery obowiązki o charakterze informacyjnym. W odniesieniu do uczniów niektóre z tych normatywnych powinności mogą być stosowane wprost, niektóre zaś – wymagają modyfikacji.

7.1. Obowiązek zapewnienia optymalizacji narażenia uczniów

Przepis art. 23c ust. 2 *in pr.* P.a., odczytany przez pryzmat normy art. 32a tego Prawa, zobowiązuje dyrektorów jednostek systemu oświaty, by (w miejscach, zidentyfikowanych w podrozdziale 6.1 niniejszej publikacji) zapewnili optymalizację narażenia uczniów. Treść zasady optymalizacji wynika z przepisu art. 9 ust. 1 P.a. Pryncypium to, skonkretyzowane do omawianej tematyki,

⁹¹ Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych (Dz. U. Nr 16, poz. 92) określa w § 2 pkt 20 sezon (a nie, jak w Planie, „okres”) grzewczy jako okres, w którym warunki atmosferyczne powodują konieczność ciągłego dostarczania ciepła w celu ogrzewania obiektów. Podobną definicję zawiera § 2 pkt 2 rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 7 grudnia 2021 r. w sprawie warunków ustalania technicznej możliwości i opłacalności zastosowania ciepłomierzy, podzielników kosztów ogrzewania oraz wodomierzy do pomiaru ciepłej wody użytkowej, warunków wyboru metody rozliczania kosztów zakupu ciepła oraz zakresu informacji zawartych w indywidualnych rozliczeniach (Dz. U. poz. 2273).

⁹² Por. A. Tsapalov, K. Kovler, S. Kiselev, I. Yarmoshenko, R. Bobkier, P. Miklyaev, *IAEA Safety Guides vs. Actual Challenges for Design and Conduct of Indoor Radon Surveys*, „Atmosphere” 2025, nr 16, s. 1–46.

wymaga, by działalność jednostki była wykonywana w taki sposób, żeby przy rozsądnym uwzględnieniu czynników ekonomicznych i społecznych oraz aktualnego stanu wiedzy technicznej – liczba narażonych uczniów oraz prawdopodobieństwo ich narażenia były jak najmniejsze, a otrzymywane przez nich dawki promieniowania jonizującego były możliwie małe. Taka optymalizacja oparta jest na gruncie art. 23c ust. 2 P.a. na kryterium starannego działania, odbywa się bowiem „w celu ograniczenia” narażenia. Dopiero bowiem przepis art. 23c ust. 3 P.a. oparty jest na kryterium skuteczności, wymaga bowiem działań „zapewniających” ograniczenie narażenia.

7.2. Obowiązki informacyjne

Pierwszy z obowiązków informacyjnych, niewątpliwie najłatwiejszy do spełnienia, dotyczy zwiększonego narażenia na radon. Ani Prawo atomowe, ani Plan, nie precyzują jego zakresu, niemniej jednak wydaje się, że w ramach tzw. „dobrych praktyk” winien on obejmować informację, że dany uczeń uczęszcza do jednostki systemu oświaty, zlokalizowanej na obszarze „powiatów radonowych” i odwołanie do źródła prawa w tym zakresie (rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 18 czerwca 2020 roku) jak również prezentować, chociażby syntetycznie, skutki zdrowotne narażenia na radon.

W odniesieniu do drugiego obowiązku, tego dotyczącego wyników pomiarów stężeń radonu, rodzi on w przypadku uczniów pewien problem. O ile w przypadku edukacji wczesnoszkolnej (klasy I-III) nauka odbywa się w ramach tzw. kształcenia zintegrowanego⁹³ w jednym pomieszczeniu dydaktycznym („klasie”, sali lekcyjnej), o tyle w przypadku uczniów starszych zajęcia przedmiotowe odbywają się w różnych pomieszczeniach. Niewątpliwie w takim przypadku wymagane jest udzielenie informacji o wynikach pomiarów w każdym z pomieszczeń, objętych obowiązkiem ich zapewnienia, w których dany, konkretny uczeń przebywa. Uwzględniając metrologię prawną⁹⁴ wynik pomiaru stężenia radonu winien być podany w bekerelach na metr sześcienny [Bq/m^3]⁹⁵. Zarazem marginalnie trzeba podnieść, że przepis art. 23d ust. 3 pkt 2 P.a., precyzujący wymogi analogicznej informacji, przekazywanej w związku z obrotem nieruchomości, zawiera

wymóg, by wskazywała ona porównanie podawanej wartości zmierzonej z wartością poziomu odniesienia, o którym mowa w art. 23b. Zobowiązania takiego nie zawiera omawiana *explicite* norma art. 23c ust. 2 P.a., co stanowi niewątpliwie jej słabość na gruncie dysproporcji informacyjnej pomiędzy nabywcą nieruchomości a uczniem. Na uznanie zasługuje więc postulat *de lege ferenda*, zmierzający do zniwelowania tej nierównowagi informacyjnej poprzez zapewnienie, by również informacja przekazywana uczniom (czy szerzej, na gruncie podstawowego brzmienia art. 23c ust. 2 P.a.: pracownikom) obejmowała także zestawienie wyniku pomiaru – z normatywną wartością poziomu odniesienia ($300 \text{ Bq}/\text{m}^3$).

Na pewno wyzwaniem dla dyrektorów szkół i przedszkoli będzie realizacja trzeciego wymogu – udzielenia uczniom informacji o otrzymanych przez nich dawkach promieniowania. Wartość ta podawana jest w jednostkach miary – siwertach [Sv]⁹⁶. Załącznik „Wielkości i wartości wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące” do rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 roku⁹⁷ określa w punkcie 4 sposób wyznaczenia obciążającej dawki skutecznej (efektywnej) jeżeli źródłem narażenia wewnętrznego jest obecny w powietrzu radon i jego pochodne. Dawkę tę wyznacza się przez pomiar lub obliczenie potencjalnej energii alfa jako całkowitej energii cząstek alfa emitowanych podczas rozpadu pochodnych radonu Rn-222 w szeregu promieniotwórczym aż do ołowiu Pb-210 (z wyłączeniem tego izotopu) oraz rozpadu pochodnych toronu Rn-220 w szeregu promieniotwórczym aż do ołowiu Pb-208, wyrażonej w dżulach (J). Wartość obciążającej dawki skutecznej (efektywnej), wyrażonej w siwertach (Sv), wyznacza się przez iloczyn stężenia energii potencjalnej alfa, wyrażonego w dżulach na metr sześcienny ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$), czasu narażenia, wyrażonego w godzinach (h), oraz odpowiedniego współczynnika konwersji. Odpowiednie względem uczniów stosowanie normy art. 23c ust. 2 P.a. nakazuje przyjęcie podanych w tym rozporządzeniu współczynników konwersji dla radonu i toronu na stanowisku pracy, wynoszących odpowiednio $1,4 [\text{Sv}/\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}]$ oraz $[0,5 \text{ Sv}/\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}]$ ⁹⁸. Dokonanie tego obliczenia wymaga od kierowników jednostek systemu oświaty nie tylko

⁹³ Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej z dnia 27 sierpnia 2012 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz kształcenia ogólnego w poszczególnych typach szkół (Dz. U. poz. 977 z późn. zm.), załącznik nr 2.

⁹⁴ Por. M. Pasaribu, N. Sirait, *Harmonization of Law in the Application of Legal Metrology*, „Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities” 2020, nr 2, s. 1199-1214; W. Popiołek, *Metrologia prawna w Polsce-wczoraj, dziś, jutro*, „Pomiary Automatyka Kontrola” 2004, nr 4, s. 9-12.

⁹⁵ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 5 czerwca 2020 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. poz. 1024 z późn. zm.), załącznik nr 1, pkt 19.

⁹⁶ Pkt 21 załącznika nr 1 do rozporządzenia wskazanego w przypisie poprzedzającym.

⁹⁷ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące.

⁹⁸ Wykluczyć w tym zakresie należy podany w rozporządzeniu współczynnik konwersji dla radonu w domu mieszkalnym. W środowisku domowym, zwłaszcza podczas snu, dochodzi do zmniejszenia aktywności fizycznej i obniżenia częstości oddechów, co wpływa na tempo wymiany powietrza w płucach i w konsekwencji na dawkę pochłanianego radonu. Stosowanie w przypadku uczniów współczynnika konwersji opracowanego dla domów mieszkalnych mogłoby prowadzić do niedoszacowania rzeczywistej dawki promieniowania pochłanianego przez uczniów w środowisku szkolnym. Byłoby również nieuzasadnione i nieproporcjonalne, albowiem w przypadku nauczycieli dawka taka obliczana jest przecież w oparciu o współczynniki podane dla stanowisk pracy.

znajomości specjalistycznych parametrów (wartość energii, szeregi promieniotwórcze), lecz każdorazowej, odrębnej dla każdego ucznia (a przynajmniej dla każdej grupy klasowej) kalkulacji czasu przebywania w określonych pomieszczeniach, przeliczonej dodatkowo z godzin lekcyjnych (45 min.) na godziny zegarowe (60 min.). Faktem notoryjnym bowiem pozostaje, że stężenia radonu, a więc parametr wyjściowy do wyznaczenia dawki promieniowania, mogą być odrębne w poszczególnych pomieszczeniach dydaktycznych, w których uczeń w ciągu dnia przebywa.

Ostatni z wymogów, zawarty w art. 23c ust. 2 *in fine* P.a., polega na wskazywaniu uczniom działań „podejmowanych w celu ograniczenia narażenia na radon w miejscu nauki”. Niewątpliwie chodzi tu o dokonanie opisu działań, o których mowa w części 7.1 niniejszego artykułu – a więc o opis czynności podjętych w ramach optymalizacji narażenia uczniów.

Finalizując deskrypcję ujętych w art. 23c ust. 2 P.a. obowiązków informacyjnych dyrektorów szkół i przedszkoli należy wskazać, że ujęte one zostały w formie wyliczenia wierszowego (enumeracji)⁹⁹ o koniunkcyjnym charakterze, co sprawia, że kierownicy jednostek pozbawieni są możliwości uznaniowego przekazania jedynie części tych informacji, połączonego z nieprzekazaniem innych.

Prawo atomowe nie precyzuje terminu przeprowadzenia działań optymalizacyjnych, a w obniesieniu do terminu i sposobu wykonania obowiązków informacyjnych posługuje się nieostrym określeniem „na bieżąco na piśmie”.

7.3. Termin i sposób wykonania obowiązku informacyjnego

Art. 23c ust. 2 *in medio* w zw. z art. 32a P.a. nakazuje, by obowiązek informacyjny realizowany był względem uczniów „na bieżąco”. Interpretacja tego pojęcia rodzi trudności związane z jego temporalnym zakresem i praktycznym stosowaniem. Według definicji słownikowej sformułowanie to oznacza działanie niezwłoczne, dostosowane do zmieniających się okoliczności i mające na celu utrzymanie aktualności informacji¹⁰⁰. Jego zastosowanie w powołanym przepisie Prawa atomowego jednoznacznie wskazuje na proaktywny charakter obowiązku i konieczność przekazywania informacji w sposób ciągły, zgodnie z pojawiającymi się danymi (np. przekazywanie uczniom wyników pomiarów stężenia radonu w miarę ich pozyskiwania). Z filozoficznego punktu widzenia określenie „na bieżąco” nie jest jedynie kwestią techniczną, ale wynika z fundamentalnej

zasady sprawiedliwości w relacji szkoła-uczeń, wynikającej z samej już preambuły do Prawa oświatowego, a skonkretyzowanej – jako jeden z celów systemu oświaty – w art. 1 pkt 14 tego Prawa (utrzymywanie bezpiecznych i higienicznych warunków nauki, wychowania i opieki w szkołach i placówkach). Informacja o zagrożeniu zdrowotnym, opóźniona lub niepełna, prowadzi do zaburzenia epistemicznej równowagi stron, co jest sprzeczne z aksjomatem ochrony zdrowia i życia jako wartości nadrzędnych. Niejasność temporalnego wymiaru tego obowiązku ma dla dyrektorów szkół i przedszkoli istotne konsekwencje prawne, jaskrawo widoczne w kontekście przepisu art. 123 ust. 1 pkt 9 P.a., penalizującego nieudzielenie informacji w zakresie ochrony radiologicznej. Wszak wymierzenie administracyjnej kary pieniężnej wymaga ustalenia momentu popełnienia czynu, co jest kluczowe tak z perspektywy oceny czasu trwania naruszenia (dyrektywa wymiaru kary z art. 124 ust. 3 pkt 1 P.a.), jak i dla biegu pięcioletniego terminu przedawnienia karalności (art. 125 ust. 1 P.a.). Poszukując oparcia w dorobku doktryny, przywołać trzeba subsydiarnie rozważania czynione odnośnie do bliskiego określeniu „na bieżąco” terminowi „niezwłocznie”. W piśmiennictwie mowa tu o dokonywaniu czynności bez opieszałości w ich podejmowaniu¹⁰¹, nawet w jeden dzień¹⁰². Judykatura wskazuje, że termin ten należy interpretować w zależności od okoliczności sprawy i sytuacji podmiotu zobowiązanego, choć zwyczajowo przyjmuje się, że oznacza okres około dwóch tygodni¹⁰³. Niezależnie od powyższych prób wyjaśnienia znaczenia użytego w normie art. 23c ust. 2 P.a. nieprecyzyjnego określenia „na bieżąco”, jego zastosowanie ocenić należy negatywnie. Wydaje się, że w tym zakresie mógł skorzystać ustawodawca z rozwiązań normatywnych obecnych w Kodeksie pracy, w którego przepisach w sposób konkretny i precyzyjny wskazane są terminy realizacji obowiązków informacyjnych (art. 29 § 3 pkt 1 i 2, art. 29 § 3², art. 67¹⁹ § 6 zd. 2, art. 142¹ § 1 pkt 2 i 3 K.p.).

Kolejnym elementem wymogu, zawartego w art. 23c ust. 2 *in medio* w zw. z art. 32a P.a., jest udzielanie informacji „na piśmie”. I w tym zakresie warto porównawczo określić, że odnośnie do analogicznych wymogów powiadamiania o zagrożeniach dla zdrowia i życia, przepisy Kodeksu pracy (art. 207¹ § 1 pkt 1 i 2) nie precyzują w jakiej formie informacje te powinny być przekazywane, tym samym dopuszczalny jest zarówno przekaz zbiorowy¹⁰⁴, jak i każdy przyjęty u danego pracodawcy sposób (tablice ogłoszeń, poczta elektroniczna)¹⁰⁵. Z perspektywy

⁹⁹ Por. A. Malinowski, *Redagowanie tekstu prawnego. Wybrane wskazania logiczno-językowe*, Wydawnictwo Prawnicze, Warszawa 2008, s. 157.

¹⁰⁰ Zob. *Wielki Słownik Języka Polskiego*, <https://wsjp.pl/haslo/podglad/22929/na-biezaco>, [dostęp: 17.01.2025].

¹⁰¹ Zob. B. Adamiak, [w:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz*, red. B. Adamiak, J. Borkowski, Beck, Warszawa 2022, Legalis, kom. do art. 12, nb. 1.

¹⁰² J. Małanowski, [w:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz*, red. R. Hauser, M. Wierzbowski, Beck, Warszawa 2021, Legalis, kom. do art. 12, nb. 6.

¹⁰³ Por. uchwała SN z dnia 19 maja 1992 r., sygn. akt III CZP 56/92.

¹⁰⁴ Zob. T. Wyka, [w:] *Kodeks pracy. Komentarz. Tom II. Art. 94-304(5)*, red. K.W. Baran, Wolters Kluwer, Warszawa 2022, LEX/el, kom. do art. 207(1), pkt 1.

¹⁰⁵ Zob. P. Wojciechowski, [w:] *Kodeks pracy. Komentarz*, red. L. Florek, Wolters Kluwer, Warszawa 2017, s. 1205.

kierowników jednostek systemu oświaty rozwiązanie przyjęte w Prawie atomowym ma charakter gwarancyjny z uwagi na ich bezpieczeństwo prawne. Uwzględniając sankcję, grożącą za nieudzielenie informacji w zakresie ochrony radiologicznej (art. 123 ust. 1 pkt 9 P.a.) rekomendowane jest bowiem, dla celów dowodowych, przekazanie wymaganych informacji za pokwitowaniem. Jednak stwierdzenie to wymaga rozważania, kto ma być adresatem tych informacji.

7.4. Adresaci i forma informacji z art. 23c ust. 2 P.a. w przypadku jednostek systemu oświaty

Uwzględnić w tym zakresie należy, że dziecko pozostaje aż do pełnoletności pod władzą rodzicielską (art. 92 k.r.i.o.¹⁰⁶), obejmującą obowiązek i prawo rodziców do wykonywania pieczy nad dzieckiem (art. 95 § 1 k.r.i.o.) i troszczenia się o jego rozwój fizyczny (art. 95 § 1 zd. 1 *in pr.* k.r.i.o.). Z tymi unormowaniami konweniujecie zresztą norma art. 98 ust. 2 pkt 2 Prawa oświatowego, nakazująca, by w statucie szkoły określono zasady jej współdziałania z rodzicami w zakresie, m.in., opieki i profilaktyki. Już tylko z tych względów pozostaje *sine dubio*, że odpowiednie, zgodnie z wymogiem art. 32a P.a. stosowanie przepisu art. 23c ust. 2 tego Prawa wymaga, by adresatami omawianych informacji byli rodzice¹⁰⁷. Jest to konieczne również z tego względu, że narażenie na wysokie stężenia radonu w jednostce systemu oświaty wymagać może przecież również i podejmowania środków ochronnych także poza nią (np. decyzje dotyczące aktywności dziecka czy konsultacji medycznych). Tym samym informacja przekazywana jedynie uczniom byłaby niewystarczająca i aksjologicznie sprzeczna z celem ochrony radiologicznej, ponieważ to rodzice są rzeczywistymi decydentami w sprawach zdrowia dzieci. Należy jednak rozważyć, czy zasadne jest pozbawianie tych ostatnich dostępu do wiedzy o narażeniu na radon.

Największy chyba, ilościowo i jakościowo, dorobek doktryny w zakresie narażenia na radon w budynkach użyteczności publicznej, w tym w szkołach, zgromadziło, już od lat 80. XX w.¹⁰⁸, piśmiennictwo w USA. Akcentuje się w nim wagę przekazu informacyjnego, dedykowanego dzieciom¹⁰⁹, podkreślając, że – poza oczywistym uprosz-

czeniu – powinien on zawierać informacje w formie zwizualizowanej¹¹⁰, niewzbudzającej strachu¹¹¹, skróconej do co najwyżej 90 sekund i zawierającej najważniejsze, przekazywane przez budzących sympatię bohaterów¹¹². Rzecz jasna wymogu powyższego nie kreują przepisy prawa polskiego, jednak trzeba podkreślić, że w jego obrębie istnieje już istotny, analogiczny precedens. Otóż ustawa z dnia 13 maja 2016 roku o przeciwdziałaniu zagrożeniom przestępczością na tle seksualnym i ochronie małoletnich¹¹³ nakłada w art. 22b, w szczególności na organy zarządzające jednostkami systemu oświaty, obowiązek wprowadzenia standardów ochrony małoletnich. Zarazem ten akt prawny kreuje w art. 22c ust. 5 i 7 wymóg sporządzania tych standardów mając na względzie konieczność ich zrozumienia przez osoby małoletnie, w wersji pełnej oraz skróconej, przeznaczonej dla małoletnich, zawierającej istotne dla nich informacje. Precedens powyższy wskazuje, że zachodzi pewna normatywna ewolucja, zmierzająca w kierunku aktywnego upodmiotowienia dziecka, jako odbiorcy informacji dostosowanych do jego zdolności poznawczych. Wydaje się, że warto zasugerować dyrektorom szkół i przedszkoli analogiczne działanie w zakresie informacji o narażeniu na radon.

7.5. Wejście w życie obowiązku z art. 23c ust. 2

W myśl art. 20 ust. 3 ustawy z dnia 13 czerwca 2019 roku o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej, kierownicy jednostek, o których mowa w art. 23c ust. 2-4 P.a., zapewnią optymalizację, informację i działania, o których mowa w tych przepisach, w stosunku do pracowników zatrudnionych w tych jednostkach, w terminie 2 lat od dnia wejścia w życie niniejszej ustawy. Termin ten upłynął z dniem 23 września 2021 roku.

Z tą datą kierownicy jednostek systemu oświaty winni byli, z uwagi na wymóg art. 32a P.a., rozpocząć realizowanie całości obowiązków określonych w art. 23c ust. 2 tego Prawa. Data ta określa również, w przypadkach zaniechania ich realizacji, początek biegu czynu z art. 123 ust. 1 pkt 9 P.a.

¹⁰⁶ Ustawa z dnia 25 lutego 1964 r. Kodeks rodzinny i opiekuńczy (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 2809 z późn. zm.).

¹⁰⁷ W rozumieniu tego pojęcia, wynikającym z art. 4 pkt 19 Prawa oświatowego, a więc także prawni opiekunowie dziecka oraz osoby (podmioty) sprawujące pieczę zastępczą nad dzieckiem.

¹⁰⁸ Por. R. Bobkier, K. Kovler, A. Tsapalov, "Fusion of Horizons": Part II. Modernizing radon regulation (1954–1993), "Journal of Environmental Radioactivity" 2025, nr 283, s. 4.

¹⁰⁹ Por. K. Gordon, P.D. Terry, X. Liu, T. Harris, D. Vowell, B. Yard, J. Chen, *Radon in schools: a brief review of state laws and regulations in the United States*, "International Journal of Environmental Research and Public Health" 2018, nr 10, s. 1–18.

¹¹⁰ Zob. M. LaTour, J.F. Tanner Jr, *Radon: Appealing to our fears*, "Psychology & Marketing" 2003, nr 5, s. 377–394.

¹¹¹ Zob. J. de Lemos, D. Brugge, M. Cajero, M. Downs, J. Durant, C.M. George, S. Henio-Adeky, T. Nez, T. Manning, T. Rock, B. Seschillie, C. Shuey, J. Lewis, *Development of risk maps to minimize uranium exposures in the Navajo Churchrock mining district*, "Environmental Health" 2009, nr 8, s. 13.

¹¹² Zob. R. Coates, *Alert but don't alarm: radon risk communication strategies of a UK mitigator*, [w:] *International Radon Symposium Proceedings, Charleston 2014*, American Association of Radon Scientists and Technologists, Hendersonville 2014, s. 7.

¹¹³ Ustawa z dnia 13 maja 2016 r. o przeciwdziałaniu zagrożeniom przestępczością na tle seksualnym i ochronie małoletnich (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1802 z późn. zm.).

8. Podsumowanie

Obowiązki kierowników jednostek systemu oświaty wynikające z odpowiedniego względem uczniów stosowania art. 23c ust. 1 i 2 P.a. są wyrazem fundamentalnej zasady prewencji w prawie ochrony zdrowia. Wymóg zapewnienia pomiarów stężeń radonu oraz zobowiązanie do informowania o zagrożeniu nie są jedynie technicznymi procedurami, lecz realizacją idei ochrony jednostki przed ryzykiem, które – choć niewidoczne – ma głębokie, długofalowe skutki, ujawniające się nawet po kilkudziesięciu latach. W kontekście aksjologii prawa należy podkreślić, że ochrona przed promieniowaniem jonizującym nie może ograniczać się do potocznego rozumienia terminu „uczeń”, lecz musi obejmować wszystkie osoby uczestniczące w procesie edukacyjnym i wychowawczym.

Zagadnienie dostępu do informacji o narażeniu, zarówno przez uczniów, jak i ich rodziców, ujawnia szerszy problem epistemicznej równości w kontekście ochrony zdrowia. Brak rzetelnej wiedzy o potencjalnym zagrożeniu ogranicza możliwość świadomego działania, prowadząc do

nierównowagi między instytucją a podmiotem podlegającym ochronie. W tym świetle, obowiązki informacyjne kierowników jednostek systemu oświaty nie są jedynie formalnym wymogiem, lecz stanowią gwarancję podmiotowego traktowania uczniów i ich rodzin.

Zarazem zaawizować należy, że istotne trudności interpretacyjne rodzi odpowiednie względem uczniów stosowanie pozostałych, wymienionych w art. 32a P.a. przepisów tej ustawy. Zagadnienie to stanowić będzie przedmiot odrębnego opracowania.

Notka o autorach

Robert Bobkier – prawnik, audytor wewnętrzny II stopnia, członek European Radon Association (ERA), dyrektor zarządzający w Abraham & Ben Hadar Law and Audit, autor lub współautor ponad 50 publikacji.

ORCID: 0000-0001-8212-6309; email: robert.bobkier@gmail.com

Ewa Katarzyna Czech – profesor prawa (Wydział Prawa, Uniwersytet w Białymstoku), autor lub współautor ponad 130 publikacji, adwokat.

ORCID: 0000-0001-5421-4053; email: e.czech@uwb.edu.pl

Bibliografia

- Abdul-Wahab S.**, Ikhile E., Ahmadi L., Elkamel A., Yetilmesoy K., *Radon In The Indoor Environment-A Review*, “Fresenius Environmental Bulletin” 2016, nr 10.
- Adamiak B.**, [w:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz*, red. B. Adamiak, J. Borkowski, Beck, Warszawa 2022.
- Adamski W.**, *Miasto górników i tkaczy*, [w:] *Kowary. Szkice z dziejów miasta. Tom I*, red. T. Bugaj, Karkonoskie Towarzystwo Naukowe, Jelenia Góra 1988.
- Adynkiewicz-Piragas M.**, Zdralewicz I., *Prawodawstwo dotyczące ochrony gleb w Polsce*, [w:] *Polsko-niemiecki podręcznik teoretyczno-metodyczny do tworzenia systemów identyfikacji obszarów zanieczyszczonych*, red. M. Adynkiewicz-Piragas, I. Lejcuś, S. Pitzschke, J. Witkoś, Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej we Wrocławiu, Wrocław 2013.
- Arkansas Department of Health**, *Lonoke Community Radon Exposure Investigation*, 4 września 2019 r., <https://static1.squarespace.com/static/5ec3ec333d5e1123089fd333/t/624222f79ee7786534f8170d/1648501501549/AHD+Letter%2C+CO2+%26+Radon+Guide.pdf>, [dostęp: 24.01.2024].
- Baran K.W.** (red.), *Kodeks pracy. Komentarz. Tom I. Art. 1-93*, Wolters Kluwer, Warszawa 2022.
- Barbosa S.M.**, Donner R.V., Steinitz G., *Radon applications in geosciences – Progress & perspectives*, “The European Physical Journal Special Topics” 2015, nr 224.
- Barczak A.**, *Kontrola podmiotów korzystających ze środowiska*, Wolters Kluwer, Warszawa 2020.
- Berkley C.**, Ahmed O., Tayeb Salih *Speaks: Four Interviews with the Sudanese Novelist*, Embassy of the Democratic Republic of the Sudan, Washington 1982.
- Bielewski W.**, Fornalski K.W., *Obliczenia obszaru ograniczonego użytkowania wokół pierwszej polskiej elektrowni jądrowej*, „Postępy Techniki Jądrowej” 2018, nr 2.
- Błachucki M.**, *Urzędowe wyjaśnienia przepisów prawa wydawane przez organy administracji publicznej*, [w:] *Źródła prawa administracyjnego a ochrona wolności i praw obywateli*, red. M. Błachucki, T. Górzyńska, Naczelny Sąd Administracyjny, Warszawa 2014.
- Błachucki M.**, *Wytyczne w sprawie nakładania administracyjnych kar pieniężnych (na przykładzie wytycznych wydawanych przez prezesa UOKiK)*, [w:] *Administracyjne kary pieniężne w demokratycznym państwie prawa*, red. M. Błachucki, Biuro Rzecznika Praw Obywatelskich, Warszawa 2015.
- Bobkier R.**, *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” 2024, nr 4.
- Bobkier R.**, Kovler K., Tsapalov A., *“Fusion of Horizons”: Part I. Historical context and early radon discoveries (until 1951)*, “Journal of Environmental Radioactivity” 2025, nr 283.
- Bobkier R.**, Kovler K., Tsapalov A., *“Fusion of Horizons”: Part II. Modernizing radon regulation (1954–1993)*, “Journal of Environmental Radioactivity” 2025, nr 283.
- Bobkier R.**, Kovler K., Tsapalov A., Czech E.K., *“Fusion of Horizons”: Part III. Rethinking Radon Risk: Scientific Advances and Regulatory Implications (since 1990s)*, “Journal of Environmental Radioactivity” 2025, nr 286.
- Bobkier R.**, *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” 2024, nr 2.
- Borzęcki R.**, Wójcik D., Kalisz M., *Przeróbka rud uranu w rejonie Kowar*, “Hereditas Minariorum” 2018, nr 5.
- Brody A.S.**, Frush D.P., Hunda W., Brent R.L., *Radiation risk to children from computed tomography*, “Pediatrics” 2007, nr 3.
- Budzisz R.**, *Badania sanitarno-epidemiologiczne*, [w:] *Zapobieganie oraz zwalczanie zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi. Zagadnienia prawne*, red. R. Budzisz, Wolters Kluwer, Warszawa 2023.

- Bulewicz K.**, Olszewski J., Domienik-Andrzejewska J., *Analiza wyników komercyjnych pomiarów radonu w latach 2022–2023*, „Medycyna Pracy” 2025, nr 1.
- Cincinelli A.**, Martellini T., *Indoor air quality and health*, “International Journal of Environmental Research and Public Health” 2017, nr 14.
- Coates R.**, *Alert but don't alarm: radon risk communication strategies of a UK mitigator*, [w:] *International Radon Symposium Proceedings, Charleston 2014*, American Association of Radon Scientists and Technologists, Hendersonville 2014.
- Coretchi L.**, Overcenco A., Ababii A., Capatina A., Bilba V., Salaru I., *Contribution to the study of “smoking and radon” interaction in the lung cancer development across the Republic of Moldova*, “One Health & Risk Management” 2024, nr 1, s. 10.
- Danecka D.**, Radecki W., *Odpowiedzialność prawna organów publicznych oraz przedsiębiorców zajmujących się odpadami*, Wolters Kluwer, Warszawa 2024.
- Danecka D.**, Radecki W., *Prawo karne środowiska w Niemczech, w Austrii i w Polsce*, „Prokuratura i Prawo” 2022, nr 7-8.
- de Lemos J.**, 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., *Development of risk maps to minimize uranium exposures in the Navajo Churchrock mining district*, “Environmental Health” 2009, nr 8.
- Długosz T.**, Swora M., Walaszek-Pyziół A., Włudyka T., Żurawik A., *Szczególna regulacja działalności przedsiębiorstw w sektorach sieciowych*, [w:] *Publiczne prawo gospodarcze. Tom 8B. System Prawa Administracyjnego*, red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel, Beck, Warszawa 2013.
- Dobrzyńska M.M.**, Gajownik A., Wieprzowski K., *Radon-occurrence and impact on the health*, „Roczniki Państwowego Zakładu Higieny” 2023, nr 1.
- Doczekalska A.**, *Język prawny w tworzeniu i transpozycji prawa Unii Europejskiej. Procesy hybrydyzacji*, Wolters Kluwer, Warszawa 2021.
- Dyrektiva Rady 2013/59/Euratom** z dnia 5 grudnia 2013 r. ustanawiająca podstawowe normy bezpieczeństwa w celu ochrony przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na działanie promieniowania jonizującego oraz uchylająca dyrektywy 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom (Dz. U. UE. L. z 2014 r. Nr 13, str. 1 z późn. zm.).
- Feltynowski M.**, *Planowanie przestrzenne gmin wiejskich. Zastosowanie koncepcji polityki opartej na dowodach*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2018.
- Field R.W.**, *Reducing the risks from radon: Information and interventions. A guide for health care providers*, “Conference of Radiation Control Program Directors Publication” 2020, nr 3, <https://portal.ct.gov/-/media/DPH/Radon-Program/HCPProvGuide-Update-9-17-20.pdf>, [dostęp: 16.01.2025].
- Gaskin J.**, Coyle D., Whyte J., Krewski D., *Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon*, “Environmental Health Perspectives” 2018, nr 5.
- Główny Inspektor Sanitarny**, *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*, 22 września 2022 r., <https://www.gov.pl/web/gis/komunikat-w-sprawie-kontynuacji-w-2022-r-wykonywania-przez-spolke-acte-sp-z-oo-z-siedziba-w-warszawie-prz-na-zlecenie-glownego-inspektora-sanitarnego-pomiarow-srednioroc-radonu-w-budynkach>, [dostęp: 30.12.2024].
- Główny Urząd Statystyczny**, *Podział administracyjny Polski*, 1 stycznia 2024 r., <https://stat.gov.pl/statystyka-regionalna/jednostki-terytorialne/podzial-administracyjny-polski/>, [dostęp: 22.01.2025].
- Golecki M.J.**, *W poszukiwaniu optymalnego prawodawcy. Dylematy regulacji i deregulacji z perspektywy ekonomicznej analizy prawa*, internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny 2019, nr 8.
- Gordon K.**, Terry P.D., Liu X., Harris T., Vowell D., Yard B., 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” 2018, nr 10.
- Goździewicz G.**, Zieliński T., [w:] *Kodeks pracy. Komentarz*, red. L. Florek, Wolters Kluwer, Warszawa 2017.
- Gruszecki K.**, *Prawo ochrony środowiska. Komentarz*, Wolters Kluwer, Warszawa 2025.
- Heller M.**, *Granice czasu, przestrzeni i prawdopodobieństwa*, „Filozofia Nauki” 2008, nr 3-4.
- Hess F.L.**, *Radium, Uranium, and Vanadium*, [w:] *Mineral Resources of the United States, 1933, Part I – Metals*, Government Printing Office, Washington 1932.
- Jantowski L.**, [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany*, red. M. Balwicka-Szczyrba, A. Sylwestrzak, Wolters Kluwer, LEX/el. 2025.
- Jokiel M.**, Jokiel G., Bobkier R., Babczuk A., *The Impact of New Legal Regulations on The Functioning of Businesses Based on The Example of Atomic Law in Poland*, “Communications of International Proceedings” 2023, nr 6, <https://ibimapublishing.com/p-articles/42MGT/2023/4246623/4246623.pdf>, [dostęp: 29.01.2025].
- Kaczmarczyk M.R.**, *Aporia wolności. Krytyka teorii społecznej*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2019.
- Karaszewski G.**, [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz aktualizowany*, red. J. Ciszewski, P. Nazaruk, Wolters Kluwer, LEX/el. 2025.
- Karlsch R.**, Zeman Z.A., *Orangeheimmisse: das Erzgebirge im Brennpunkt der Weltpolitik 1933-1960*, Ch. Links Verlag, Berlin 2002.
- Kazalska O.**, *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” 2018, tom 56.
- Komunikat Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego** z dnia 11 lutego 2025 r. w sprawie przeciętnego wynagrodzenia w gospodarce narodowej w 2024 r. (M. P. z 2025 r. poz. 125).
- Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej** z dnia 2 kwietnia 1997 r. (Dz. U. Nr 78, poz. 483 z późn. zm.).
- Koszuk Ł.**, *Radon w budynkach*, Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 2025.
- Kovler K.**, A. Tsapalov, R. Bobkier, R. Wiegiers, W. Schroeyers, T. Kovács, E. Toth-Bodrogi, O. El Bounagui, A. Babczuk, *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” 2025, nr 285, nr publ. 107668.
- Książek D.**, *Pojęcie i podział wyrażenia „miejsce pracy”*, „Studia z Zakresu Prawa Pracy i Polityki Społecznej” 2013, nr 1.
- Kuźmicka-Sulikowska J.**, [w:] *Zobowiązania. Część ogólna. Tom II. Komentarz*, red. P. Machnikowski, Beck, Warszawa 2024.
- LaTour M.**, Tanner Jr J.F., *Radon: Appealing to our fears*, “Psychology & Marketing” 2003, nr 5.
- Linhares J.M.A.**, *Pojęcie dowodu jako otwarta rana prawa: niezmiennie błędna aporia?*, „Archiwum Filozofii Prawa i Filozofii Społecznej” 2013, nr 1.
- Machnikowski P.**, Śmieja A., [w:] *Prawo zobowiązań – część ogólna. System Prawa Prywatnego. Tom 6*, red. A. Olejniczak, Beck, Warszawa 2023.
- Malanowski J.**, [w:] *Kodeks postępowania administracyjnego. Komentarz*, red. R. Hauser, M. Wierzbowski, Beck, Warszawa 2021.
- Malinowski A.**, *Redagowanie tekstu prawnego. Wybrane wskazania logiczno-językowe*, Wydawnictwo Prawnicze, Warszawa 2008.
- Matuła J.**, *Ocena zasobów produktów rozszczepienia w paliwie jądrowych reaktorów energetycznych*, „Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej” 1977, nr 49.
- Mazur J.**, Kozak K., *Nowe regulacje dotyczące stężeń radonu (Rn-222) w budynkach i miejscach pracy w zapisach znowelizowanej ustawy Prawo atomowe*, „Inżynier i Fizyk Medyczny” 2020, nr 3.

- Mik C.**, *Ocena rządowego projektu nowelizacji ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej*, „Zeszyty Prawnicze Biura Analiz Sejmowych Kancelarii Sejmu” 2019, nr 2.
- Mosch C.F.**, *Zur Geschichte des Bergbaues in Deutschland*, Regierungs-Buchdruckerei, Liegnitz 1829.
- Muszer D.**, Krause M., *Przykład oceny ryzyka zawodowego na stanowisku laboranta próbobiorcy*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2015, nr 82.
- Niewiadomski T.**, Godek J., Jasińska M., Wąsiółek P., *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*, Instytut Techniki Jądrowej, Kraków 1983.
- Niewiadomski T.**, Wąsiółek P., Olszewska M., Ryba E., Godek J., Waligorski M., *Oszacowanie radiacyjnych skutków działalności człowieka dla mieszkańców woj. m. krakowskiego*, Instytut Techniki Jądrowej, Kraków 1984.
- Obwieszczenie Ministra Zdrowia** z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie ogłoszenia Krajowego planu działania w przypadku długoterminowych zagrożeń wynikających z narażenia na radon w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi oraz w miejscach pracy (M. P. z 2021 r. poz. 169).
- Olszewski J.**, Walczak K., *Radon in houses of Kowary–Sudety Mountains, Poland*, „Nukleonika” 2020, nr 2.
- Page S.**, *EPA’s strategy to reduce risk of radon*, [w:] *Radon. Prevalence, measurements, health risks and control*, red. N.L. Nagda, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1994.
- Pasaribu M.**, Sirait N., *Harmonization of Law in the Application of Legal Metrology*, “Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities” 2020, nr 2.
- Pawel D.J.**, Puskin J.S., *The U.S. Environmental Protection Agency’s Assessment of Risks from Indoor Radon*, “Health Physics” 2004, nr 1.
- Pismo Głównego Inspektora Sanitarnego** z dnia 8 lipca 2024 r. – odpowiedź na wniosek o udostępnienie informacji publicznej, BI.OI.0134.92.2024.
- Pismo z dnia 5.07.2012 r.**, Regionalna Izba Obrachunkowa w Katowicach, WA-0250/60/12.
- Podgórska Z.**, *Metody pomiaru radonu w powietrzu, glebie i wodzie*, „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna. Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki” 2022, nr 1.
- Poku B.**, Hussaini S., *Radon in child care centers: An examination of state laws and regulations in the United States*, “GSC Advanced Research and Reviews” 2021, nr 3.
- Popiołek W.**, *Metrologia prawna w Polsce-wczoraj, dziś, jutro*, „Pomiary Automatyka Kontrola” 2004, nr 4.
- Przybyszewski W.**, Wiśniewski M., Szurko A., Maniakowski Z., *Wpływ mocy dawki na komórkowe, biochemiczne i molekularne efekty promieniowania jonizującego*, „Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej” 2008, nr 62.
- Räaf C.L.**, Tondel M., Isaksson M., Wålander R., *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” 2023, nr 855.
- Radecki W.**, *Ochrona środowiska w polskim, czeskim i słowackim prawie karnym*, Wolters Kluwer, Warszawa 2013.
- Radecki W.**, *Prawna ochrona przyrody w Polsce, Czechach i Słowacji. Studium prawnoporównawcze*, Wolters Kluwer, Warszawa 2010.
- Rogoziński P.**, *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” 2021, nr 1.
- Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej** z dnia 27 sierpnia 2012 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz kształcenia ogólnego w poszczególnych typach szkół (Dz. U. poz. 977 z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki** z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych (Dz. U. Nr 16, poz. 92).
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury** z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1225).
- Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska** z dnia 7 grudnia 2021 r. w sprawie warunków ustalania technicznej możliwości i opłacalności zastosowania ciepłomierzy, podzielników kosztów ogrzewania oraz wodomierzy do pomiaru ciepłej wody użytkowej, warunków wyboru metody rozliczania kosztów zakupu ciepła oraz zakresu informacji zawartych w indywidualnych rozliczeniach (Dz. U. poz. 2273).
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej** z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (t.j. Dz. U. z 2003 r. Nr 169, poz. 1650 z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia** z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie terenów, na których średnioroczne stężenie promieniotwórcze radonu w powietrzu wewnątrz pomieszczeń w znacznej liczbie budynków może przekraczać poziom odniesienia (Dz. U. poz. 1139).
- Rozporządzenie Rady Ministrów** z dnia 11 sierpnia 2021 r. w sprawie wskaźników pozwalających na wyznaczenie dawek promieniowania jonizującego stosowanych przy ocenie narażenia na promieniowanie jonizujące (Dz. U. poz. 1657).
- Rozporządzenie Rady Ministrów** z dnia 5 czerwca 2020 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. poz. 1024 z późn. zm.).
- Rycak A.**, *Powszechna ochrona trwałości stosunku pracy*, Wolters Kluwer, Warszawa 2013.
- Skłodowska-Curie M.**, *Stan obecny chemii polonu*, „Roczniki Chemii” 1926, tom 6.
- Stankiewicz R.**, *Prawotwórcza rola administracji w kształtowaniu sektora energetycznego (na przykładzie polityki energetycznej państwa)*, [w:] *Legislacja administracyjna. Teoria, orzecznictwo, praktyka*, red. M. Stahl, Z. Duniewska, Wolters Kluwer, Warszawa 2012.
- Steinberg G.M.**, *The apartheid and racism campaigns-the NGO contribution to antisemitism*, “Israel Affairs” 2023, nr 1.
- Sukanya S.**, Sabu J., *Environmental Radon: A Tracer for Hydrological Studies*, Springer, Singapore 2023.
- Szafranski A.**, *Niemieckie wyjście z atomu jako prawny przejaw populizmu*, [w:] *Prawo w epoce populizmu*, red. P. Grzebyk, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2023.
- Tervinder M.S.**, Oborska-Kumaszynska D., Ratcliffe A., *Testy akceptacyjne i dopuszczające dla systemu PDR*, „Inżynier i Fizyk Medyczny” 2013 nr 2.
- Topolewska M.**, *Żłobek i przedszkole nie mogą być zespołem*, „Gazeta Prawna”, 4 lutego 2019, <https://serwisy.gazetaprawna.pl/samorzad/artykuly/1395862,zlobek-i-przedszkole-nie-moga-byc-zespolem.html> (dostęp: 28.02.2025).
- Tsapalov A.**, Kovler K., Kiselev S., Yarmoshenko I., Bobkier R., Miklyaev P., *IAEA Safety Guides vs. Actual Challenges for Design and Conduct of Indoor Radon Surveys*, “Atmosphere” 2025, nr 16.
- Turczyńska A.**, Kułak P., Gościak E., Krajewska-Kułak E., *Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku*, „Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne” 2016, nr 1.
- Uchwała SN z dnia 19 maja 1992 r.**, sygn. akt III CZP 56/92.
- Ustawa z dnia 13 czerwca 2019 r.** o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz ustawy o ochronie przeciwpożarowej (Dz. U. poz. 1593 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 13 maja 2016 r.** o przeciwdziałaniu zagrożeniom przestępczością na tle seksualnym i ochronie małoletnich (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1802 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2016 r.** – Prawo oświatowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 737 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 r.** o systemie informacji oświatowej (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 152 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 17 grudnia 1998 r.** o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1631).

- Ustawa z dnia 25 lutego 1964 r.** Kodeks rodzinny i opiekuńczy (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 2809 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r.** Kodeks pracy (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1465).
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r.** Prawo ochrony środowiska (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 54 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 27 października 2017 r.** o finansowaniu zadań oświatowych (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 1400).
- Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r.** Prawo atomowe (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1277 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 4 lutego 2011 r.** o opiece nad dziećmi w wieku do lat 3 (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 338 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r.** Prawo budowlane (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 725).
- Ustawa z dnia 7 września 1991 r.** o systemie oświaty (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 2230 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 17 grudnia 2004 r.** o odpowiedzialności za naruszenie dyscypliny finansów publicznych (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 104).
- Wałachowska M.,** Ziemiak M.P., [w:] *Kodeks cywilny. Komentarz. Tom III. Zobowiązania. Część ogólna (art. 353-534)*, red. M. Fras, M. Habdas, Wolters Kluwer, Warszawa 2018.
- Warcński M.,** *Glosa do wyroku SN z dnia 5 marca 2002 r., I CKN 1156/99, „Orzecznictwo Sądów Polskich”* 2005, nr 10.
- Wielki Słownik Języka Polskiego**, <https://wsjp.pl/haslo/podglad/22929/na-biezaco>, [dostęp: 17.01.2025].
- Wiśniewski J.,** *Miejsce wykonywania pracy w świetle przepisów prawa pracy*, „Studia Prawnoustrojowe” 2023, nr 60.
- Wojciechowski P.,** [w:] *Kodeks pracy. Komentarz*, red. L. Florek, Wolters Kluwer, Warszawa 2017.
- Wolanin M.,** *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)*, „Orzecznictwo w Sprawach Samorządowych” 2022, nr 2.
- Wyrok NSA z 19.10.2021 r.,** II OSK 400/21, LEX nr 3319061.
- Wyrok WSA w Gliwicach z 2.07.2019 r.,** III SA/GI 426/19, LEX nr 2706528.
- Wyrok WSA w Gliwicach z 21.10.2020 r.,** II SA/GI 640/20, LEX nr 3096456.
- Wyrok WSA w Rzeszowie z 28.06.2023 r.,** II SA/Rz 43/23, LEX nr 3600292.
- Wyrok WSA w Warszawie z 19.02.2019 r.,** IV SA/Wa 1763/18, LEX nr 3060124.
- Wysocka M.,** *Czy można łączyć grupy w żłobku i przedszkolu*, „Portal Oświatowy”, 18 lutego 2025, <https://www.portaloswiatowy.pl/bezpieczenstwo-i-opieka/czy-mozna-laczyc-grupy-w-zlobku-i-przedszkolu-20059.html> (dostęp: 28.02.2025).
- Wysocka M.,** Skubacz K., Chmielewska I., Urban P., Bonczyk M., *Radon migration in the area around the coal mine during closing process*, „International Journal of Coal Geology” 2019, nr 212.
- Zeeb H.,** Shannoun F. (red.), *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*, World Health Organization, Geneva 2009, s. ix.
- Zepek M.,** [w:] *Kodeks cywilny. Tom II. Komentarz. Art. 353–626*, red. M. Gutowski, Beck, Warszawa 2022.
- Żelechowicz M.,** *List do Redakcji dotyczący pracy pt. „Ochrona radiologiczna z punktu widzenia pacjentów Zakładu Radiologii Uniwersyteckiego Szpitala Klinicznego w Białymstoku”*, „Pielęgniarstwo i Zdrowie Publiczne” 2017, nr 1.

Konferencja SIOR 2025

Maria Kubicka¹, Wojciech Głuszewski²

¹ Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej, ² Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

W dniach 11–13 czerwca w Katowicach odbyła się coroczna konferencja Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej (SIOR). Tematem przewodnim spotkania była „Od Marii Goeppert-Mayer do współczesnej atomistyki: ochrona radiologiczna w energetyce jądrowej, przemyśle i medycynie”. Duży wkład w organizację konferencji miał Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy w Katowicach (GIG-PIB), który gościł 110 uczestników. Tradycyjnie, w ramach konferencji odbyło się Walne Zebranie Członków Stowarzyszenia o charakterze sprawozdawczo-wyborczym.

Jednym z celów cyklicznych spotkań jest możliwość przedyskutowania problemów, z jakimi spotykają się inspektorzy ochrony radiologicznej w swojej pracy zawodowej, w obecności przedstawicieli Państwowej Agencji Atomistyki (PAA). Warto podkreślić, że PAA nieprzerwanie uczestniczy w organizowanych przez SIOR wydarzeniach od momentu utworzenia organizacji. Konferencje te stanowią także nieocenione wsparcie w procesie przygotowania kandydatów do egzaminów na inspektorów ochrony radiologicznej.

W tym roku w konferencji wziął udział Andrzej Głowacki, Prezes PAA. Podczas swojego wystąpienia zwrócił szczególną uwagę na rolę polskiego dozoru jądrowego w kontekście rozwoju krajowej energetyki jądrowej. Podkreślił, że jednym z najistotniejszych zadań Prezesa PAA jest zapewnienie nadzoru oraz przestrzegania przepisów bezpieczeństwa w odniesieniu do elektrowni jądrowych oraz innych obiektów jądrowych. Nadzór ten obejmuje cały cykl życia obiektów jądrowych – od oceny środowiskowej i wyboru lokalizacji, przez projektowanie, budowę, uruchomienie, aż po eksploatację i likwidację.

W ramach konferencji przedstawiciele PAA omówili również zagadnienia związane z nadzorem nad działalnością wiążącą się z narażeniem na promieniowanie jonizujące oraz kwestie oceny narażenia pracowników i społeczeństwa. Uczestnicy mieli także okazję zapoznać się z zasadami przystępowania do egzaminu na inspektora ochrony radiologicznej. Podkreślono, że tego typu tematyka jest podstawą organizowanych cyklicznie konferencji, które wnoszą istotny wkład w rozwój i doskonalenie standardów bezpieczeństwa w Polsce, przyczyniając się do



Uczestnicy konferencji (fot. Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy w Katowicach).

wzrostu kompetencji w zakresie ochrony radiologicznej na wszystkich szczeblach.

W części naukowej konferencji, dr hab. inż. Michał Bonczyk, prof. GIG-PIB ze Śląskiego Centrum Radiometrii Środowiskowej tego instytutu, omówił temat „Badanie stanu zerowego (tła radiacyjnego) w potencjalnych lokalizacjach elektrowni jądrowych – teoria, praktyka i wymagania prawne”. Wymóg przeprowadzenia takiego badania zawarty jest m.in. w tzw. „rozporządzeniu lokalizacyjnym” (Rozporządzenie Rady Ministrów z 10 sierpnia 2012 roku w sprawie szczegółowego zakresu przeprowadzania oceny terenu przeznaczonego pod lokalizację obiektu jądrowego). Zgodnie z wymaganiami prawa krajowego oraz zaleceniami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA), należy zbadać zawartość naturalnych i sztucznych nuklidów promieniotwórczych we wszystkich reprezentatywnych komponentach ekosystemu na terenie odpowiadającym co najmniej tzw. regionowi lokalizacji, tj. obszarowi o promieniu około 30 km wytyczonemu wokół granicy lokalizacji planowanego obiektu jądrowego.

Martin Holcner, gość konferencji z VF Nuclear – Czechy, przedstawił przegląd energetyki jądrowej w tym kraju z punktu widzenia ochrony radiologicznej. Zaprezentował przegląd elektrowni jądrowych w Republice Czeskiej, w tym opisy lokalizacji, liczbę bloków jądrowych, oraz typy i wydajności bloków. Omówił również wymagania w zakresie ochrony radiologicznej dla istniejących bloków w elektrowni jądrowej Dukovany w kontekście wydłużenia ich okresu eksploatacji, a także zaprezentował podstawowe środki reagowania kryzysowego.

Dr inż. Wiesław Gorączko ze Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej tradycyjnie przedstawił swoją opinię na temat scenariusza rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, wskazując na konsekwencje „specyficznego” wyboru technologii firmy Westinghouse i niedawne rozmowy z francuskim EDF.

Marta Rowińska z Uniwersyteckiego Centrum Medycznego w Gdańsku oceniła narażenie ogółu ludności w działalności medycznej i nie tylko. Ocena narażenia na promieniowanie jonizujące osób z ogółu ludności jest jednym z kluczowych elementów systemu ochrony radiologicznej. Zgodnie z przepisami prawa, obowiązek ten spoczywa na kierowniku jednostki organizacyjnej prowadzącej działalność związaną ze źródłami promieniowania jonizującego.

Grażyna Ibron ze Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej zreferowała temat „ZAP X Gyroscopic Radiosurgery: Żyroskopowy system do radiochirurgii mózgu, głowy i szyi”. Mikroakcelerator liniowy ZAP-X umożliwia prowadzenie precyzyjnych zabiegów chirurgicznych, szczególnie w leczeniu nowotworów mózgu, twarzoczaszki i szyi, a także w leczeniu padaczki lekoopornej oraz choroby Parkinsona.

Prof. dr hab. Maciej Budzanowski z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie zaprezentował pasywny dawkomierz do pomiarów dawek od nano-

greji (nGy) do megagreja (1MGy). Jednym z najciekawszych detektorów promieniowania jonizującego jest detektor termoluminescencyjny oparty na fluorku litu aktywowanym magnezem, miedzią i fosforem (LiF:Mg, Cu, P), znany handlowo jako MCP-N, wykorzystywany w różnych dziedzinach dozymetrii.

Dr Łukasz Albinia z Uniwersytetu Łódzkiego ocenił narażenie pracowników przy procedurach z podaniem Lutetu-177. Medycyna nuklearna wkracza w nową erę teranostyki dzięki szybkiemu rozwojowi nowych diagnostycznych i terapeutycznych radiofarmaceutyków, takich jak PSMA i DOTA-TATE/TOC.

Dr hab. inż. Michał Bonczyk zreferował także temat „Monitoring skażeń promieniotwórczych środowiska powstałych w wyniku działalności górniczej – zadanie statutowe Głównego Instytutu Górnictwa – Państwowego Instytutu Badawczego”.

Prof. dr hab. Krzysztof Kozak z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie przybliżył temat przygotowania kadr dla energetyki jądrowej w Polsce. W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie, wiele uczelni wprowadziło kierunki związane z energetyką jądrową na poziomie studiów inżynierskich, magisterskich i podyplomowych.

Dr hab. inż. Małgorzata Wysocka, prof. GIG-PIB, mówiła na temat zagrożeń radiacyjnych w polskich kopalniach nieuranowych.

Joanna Lemańska z Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Otwocku zreferowała temat klasyfikacji i prawidłowego wypełniania kart ewidencyjnych dla opakowań z odpadami promieniotwórczymi.

Dr Izabela Chmielewska wygłosiła referat na temat „Monitoringu promieniotwórczości w wodach przeznaczonych do spożycia”. Podczas prezentacji omówiła wymagania prawne oraz przedstawiła metody badawcze opracowane i stosowane w Śląskim Centrum Radiometrii Środowiskowej GIG-PIB, które są wykorzystywane do prowadzenia monitoringu promieniotwórczości w wodach.

Dr hab. inż. Renata Kopeć, prof. IFJ PAN z Centrum Cyklotronowego w Bronowicach Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, zaprezentowała system dozymetryczny w terapii protonowej. Ochrona radiologiczna personelu medycznego w ośrodkach terapii protonowej wymaga szczególnej uwagi. Niezbędne są odpowiednie zarządzanie oraz kontrola, w tym nad sprzętem terapeutycznym, aby zapewnić bezpieczeństwo pracy.

Agnieszka Chmura z Zakładu Radiofarmacji i Obrazowania Laboratoryjnego PET Narodowego Instytutu Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie PIB Oddział w Gliwicach przedstawiła temat nowych radioznaczników produkowanych w cyklotronach. Zastosowanie cyklotronów otwiera szerokie możliwości dalszego rozwoju nowych radioznaczników, choć wiąże się z pewnymi ograniczeniami, które muszą być uwzględnione z perspektywy ochrony radiologicznej.

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