

# POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ

VOL. 64 Z. 2 ISSN 0551-6846 WARSZAWA 2021



## 60-LECIE KRAJOWEGO SKŁADOWISKA ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

czytaj na str. 2, (fot.ZUOP)

# 2-2021

INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JĄDROWEJ  
POLSKIE TOWARZYSTWO NUKLEONICZNE

## SPIS TREŚCI NR 2/2021

WYWIAD Z BURMISTRZEM GMINY RÓŻAN PIOTREM ŚWIDERSKIM .....	2
60 LAT POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI W POLSCE Krzysztof Madaj .....	4
ROZWÓJ METOD POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI I WYPALONYM PALIWEM JĄDROWYM – PRACE BADAWCZO-ROZWOJOWE W IChTJ Grażyna Zakrzewska-Kołatuniewicz .....	11
NIEZNANI POLSCY NAUKOWCY W PROJEKCIE MANHATTAN Anna Kawalec, Łukasz Sawicki .....	22
MODELOWANIE BIOFIZYCZNE POPROMIENNEGO EFEKTU SĄSIEDZTWA – CZĘŚĆ I Paweł Wysocki, Krzysztof W. Fornalski .....	27
WIADOMOŚCI Z KRAJU .....	36
WIADOMOŚCI ZE ŚWIATA .....	39
WYDARZENIA .....	41
INFORMACJE O KSIĄŻKACH A CO CIEBIE OBCHODZI, CO MYŚLĄ INNI? DALSZY PRZYPADKI CIEKAWEGO CZŁOWIEKA Richard P. Feynman .....	47
FELIETON ŁUCZYWO, CZYLI KOGO NIE STAĆ NA ENERGETYKĘ JĄDROWĄ? Marek Bielski .....	48
IN MEMORIAM DOC. TADEUSZ MUSIAŁOWICZ (10.02.1928 – 09.03.2021) – WSPOMNIENIE Paweł Krajewski .....	50
PROF. DR HAB. STANISŁAW KULIŃSKI (08.10.1928 – 18.01.2021) – WSPOMNIENIE Anna Wysocka-Rabin .....	52
DR ANDRZEJ DEPTUŁA (27.05.1935 – 15.06.2021) – WSPOMNIENIE Andrzej Chmielewski .....	55



Kwartalnik naukowo-informacyjny  
Postępy Techniki Jądrowej

Wydawca:  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej  
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa,

Kontakt Telefoniczny:  
Tel. 22 504 12 48  
Fax.: 22 811 15 32

Redaktor naczelny:  
Stanisław Latek  
S.Latek@ichtj.waw.pl

Komitet redakcyjny:  
Wojciech Głuszewski  
Marek Rabiński  
Łukasz Sawicki  
Elżbieta Zalewska

Współpracują z nami:  
Andrzej Mikulski  
Małgorzata Nowina-Konopka  
Małgorzata Sobieszczyk-Marciniak

Redakcja:  
PTJ-redakcja@ichtj.waw.pl

Adres strony internetowej PTJ:  
<http://ptj.waw.pl>

Opracowanie graficzne:  
Daniel Jaskóła (Agencja Reklamowa TOP)

Zastrzegamy sobie prawo skracania i adjustacji  
tekstów oraz zmian tytułów.

Recenzowanie artykułów  
Większość manuskryptów przesyłana jest do recenzowania  
przez 1-2 ekspertów z dziedziny, której dotyczy artykuł. Na  
podstawie opinii recenzentów artykuły są akceptowane do  
druku, kierowane do poprawy, lub odrzucane.

Prenumerata  
Zamówienia na prenumeratę kwartalnika  
POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ  
należy składać na adres redakcji jak wyżej.  
Wpłaty proszę przekazać na konto:  
Bank Pekao SA,  
45 1240 3480 1111 0000 4278 2935  
Koszt prenumeraty rocznej  
(4 zeszyty łącznie z kosztami przesyłki) wynosi 52 zł.  
Składając zamówienie należy podać adres osoby  
lub instytucji zamawiającej, na który  
ma być przesłane czasopismo oraz numer NIP.

Skład i druk:  
Agencja Reklamowa TOP,  
ul. Toruńska 148, 87-800 Włocławek



## Szanowni Państwo

W poprzednim numerze PTJ odnotowaliśmy ważny jubileusz: **60-lecie powstania Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP)** znajdującego się w Różanie nad Narwią (90 km od Warszawy). Rocznicę powstania składowiska poświęcona jest znaczna część bieżącego drugiego, tegorocznego numeru PTJ.

Numer otwiera wywiad redakcji z Burmistrzem Gminy Różan p. **Piotrem Swiderskim**. A oto pytania:

1. Jak na sytuację finansową Gminy Różan wpływa obecność na jej terenie Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych?
2. Czy są inne zalety, oprócz finansowych, dla Gminy Różan z racji obecności na jej terenie Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych?
3. Jak według Pana zmieniła się na przestrzeni lat opinia społeczeństwa na temat obecności na terenie Różana Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych?
4. Czy uważa Pan, że działania edukacyjne prowadzone przez Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych wpływają na zwiększenie wiedzy o składowisku wśród lokalnej społeczności?
5. Czy dotychczasowa współpraca Gminy Różan i ZUOP jest efektywna? Czy należy coś zmienić?

Odpowiedzi na te pytania znajdują Czytelnicy na pierwszych stronach naszego czasopisma.

Ja zwracam uwagę na odpowiedź na ostatnie pytanie. Oto jak ocenia Pan Burmistrz współpracę Gminy Różan z ZUOP-em: „Współpraca Gminy Różan z ZUOP jest wzorowa i ma wieloletnią tradycję. Od prawie trzech dekad przy Radzie Miejskiej działa Komisja Ochrony Radiologicznej. Każdy kolejny burmistrz, nie wyłączając mnie, miał i ma doskonałe kontakty z kierownictwem Zakładu. Wypracowaliśmy system wzajemnych relacji, który zbudowany na zaufaniu sprawdza się bez względu na okoliczności zewnętrzne. To budujące i nie widzę konieczności zmian”.

„**60 lat postępowania z odpadami promieniotwórczymi w Polsce**”. Taki jest tytuł artykułu dyrektora Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych Krzysztofa Madaja.

W streszczeniu artykułu autor pisze: „Druga połowa lat 50. ubiegłego wieku była bardzo owocna w sukcesy dla polskiej atomistyki. W roku 1956 r. rozpoczęto budowę badawczego reaktora jądrowego EWA (nazwa to akronim: Eksperymentalny, Wodny, Atomowy), którego uroczyste otwarcie miało miejsce już dwa lata później 14 czerwca 1958 r. Reaktor ten wykorzystywany był do produkcji izotopów promieniotwórczych oraz do prac badawczych. Każdej działalności związanej z produkcją bądź stosowaniem izotopów promieniotwórczych towarzyszy powstawanie odpadów promieniotwórczych, które już od 60 lat są bezpiecznie gospodarowane w Polsce. W artykule przedstawiono historię powstania Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych, źródła i rodzaje odpadów promieniotwórczych powstających w Polsce, kryteria ich podziału i klasyfikacji oraz podstawowe zasady postępowania z nimi”.

Kolejny artykuł również dotyczy odpadów. Prof. Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz przygotowała obszerny artykuł pod tytułem: „**Rozwój metod postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym – prace badawczo-rozwojowe w IChTJ**”.

Okazuje się, że bezpieczne zagospodarowanie odpadów promieniotwórczych, a zwłaszcza wypalonego paliwa jądrowego, jest jedną z najczęściej podnoszonych kwestii przeciwników dalszego rozwoju energetyki jądrowej i stosowania radioizotopów w różnych dziedzinach życia. Prowadzenie zaawansowanych prac badawczych wspierających program jądrowy kraju i pozwalających na dalszy rozwój metod izotopowych w medycynie, przemyśle i ochronie środowiska naturalnego, jest zadaniem nauki. Jest również jednym z podstawowych celów działania instytutów związanych z atomistyką.

W podsumowaniu artykułu autorka pisze: „Rozwiązanie problemu bezpiecznego zagospodarowania odpadów promieniotwórczych wydaje się obecnie kluczowe dla szerokiego wykorzystania reaktorów jądrowych, jako głównego bezemisyjnego, trwałego i niezawodnego źródła energii. Udział nauki w rozwijaniu nowych technologii efektywnego przetwarzania i bezpiecznego składowania odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa jądrowego połączone z włączaniem ekspertów do debaty publicznej wydaje się jedynym właściwym podejściem i gwarancją powodzenia programów jądrowych”.

O nieznanym Polakach uczestniczących w projekcie **Manhattan** piszą Anna Kawalec i Łukasz Sawicki. Amerykański Projekt Manhattan był jednym z największych na świecie programów badawczych przemysłu zbrojeniowego. Zaangażowano do niego ponad 100 000 osób – naukowców, inżynierów, techników i лаборantów, robotników, pracowników administracji oraz żołnierzy.

Program, pomimo swojego wojskowego charakteru i celów, dał podstawy do pokojowego wykorzystania energii jądrowej. Niestety w Polsce brak jest świadomości, nie tylko powszechnej, ale również w środowisku atomistycznym, że oprócz Józefa Rotblata i Stanisława Ulama, istotny wkład do Projektu wnieśli również trzej inni Polacy, a dokładniej potomkowie polskich emigrantów. Sylwetki tych nieznanymi naukowców przedstawiono w artykule.

Ostatni tekst w części artykułowej czasopisma zatytułowany jest: **Modelowanie biofizyczne popromiennego efektu sąsiedztwa – część I**. Autorami artykułu są Paweł Wysocki, Krzysztof W. Fornalski.

A oto fragment streszczenia: Powszechnie wiadomo, że promieniowanie jonizujące może wywoływać uszkodzenia w komórkach, które z nim bezpośrednio oddziaływały. Jednakże ostatnie badania wykazały, że uszkodzenia pojawiają się również w komórkach, które nie doświadczyły bezpośredniej interakcji. Jest to związane z występowaniem tak zwanego efektu sąsiedztwa (ang. bystander effect), który polega na wysyłaniu przez komórkę napromienioną sygnałów, które mogą uszkadzać komórki sąsiednie. Ze względu na złożoność tego efektu, nie jest on prosty do ścisłego biofizycznego opisu, a co za tym idzie, także do symulacji.

W niniejszym artykule przedstawiony został przegląd różnych podejść do modelowania i symulowania efektu sąsiedztwa z punktu widzenia biofizyki radiacyjnej (część I). W szczególności ostatni z przedstawionych modeli jest częścią większego projektu symulacji odpowiedzi grupy komórek na promieniowanie jonizujące z wykorzystaniem metod Monte Carlo (część II).

W części informacyjnej numeru znajdują Państwo kilkanaście doniesień oraz informacji o wydarzeniach, które warto przeczytać.

Pierwsze doniesienie dotyczy podpisania ważnej umowy, a mianowicie: Narodowe Centrum Badań Jądrowych oraz Ministerstwo Edukacji i Nauki podpisały umowę na realizację kolejnej partii prac projektowych wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem (ang. High Temperature Gas cooled Reactor, HTGR). W wydarzeniu, które odbyło się 12 maja 2021 r. w Otwocku-Swierku, uczestniczyli minister edukacji i nauki Przemysław Czarnek, minister klimatu i środowiska Michał Kurtyka oraz dyrektor Narodowego Centrum Badań Jądrowych Krzysztof Kurek.

Umowa przewiduje, że w ciągu trzech lat w Narodowym Centrum Badań Jądrowych zostaną przygotowane warunki do wybudowania w Polsce badawczego reaktora wysokotemperaturowego. NCBJ opracuje projekt podstawowy takiego urządzenia na wstępnym poziomie szczegółowości. Na ten cel MEiN w porozumieniu z Ministerstwem Klimatu i Środowiska przeznaczy 60,5 mln zł.

Inne ważne doniesienie krajowe dotyczy Zjazdu PTN. Otóż 17 kwietnia 2021 r. odbył się XV Zjazd Polskiego Towarzystwa Nukleonowego. W związku z ograniczeniami wywołanymi epidemią koronawirusa COVID-19, przeprowadzono go w trybie telekonferencji zorganizowanej przez Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. Zjazd otworzyła prezentacja kończąca drugą kadencję prezes PTN prof. dr hab. Grażyny Zakrzewskiej-Kołtuniewicz. Przymożniła ona najważniejsze wydarzenia ostatnich lat działalności organizacji. Zjazd udzielił absolutorium ustępującemu zarządowi. Następnie odbyły się wybory władz PTN. Prezesem na kolejną kadencję został Marek Rabiński. Wiceprezesami wybrano: Agnieszkę Korgul i Grażynę Zakrzewską-Kołtuniewicz. Funkcje Sekretarza Generalnego powierzono Pawłowi Gajdzie. Skarbnikiem ponownie została Dagmara Chmielewska-Śmietanko. W skład Zarządu Głównego weszli ponadto: Andrzej G. Chmielewski, Andrzej Cholerzyński, Wojciech Głuszewski, Andrzej Mikulski, Agnieszka Miśkiewicz, Krzysztof Rzymowski, Jan Składzien.

Spośród doniesień z zagranicy, które szczególnie polecam naszym Czytelnikom jest informacja o tym, że rozpoczynają się prace nad tunelem pierwszej ostatecznej utylizacji w fińskim składowisku zużytego paliwa.

W części Wydarzenia naszego kwartalnika znajdują Czytelnicy informacje o blokowaniu terapii protonowej w krakowskich Bronowicach oraz o tegorocznej konferencji Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej.

Kolejną książkę Richarda Feynmana omawia Krzysztof Rzymowski, a Marek Bielski w swoim wielowątkowym, erudycyjnym felietonie pisze o łucywie, czyli kogo nie stać na energetykę jądrową.

Na ostatnich stronach, co stało się już tradycją, publikujemy wspomnienia o Zmarłych. Tym razem żegnamy trzech znanych ludzi atomistyki: doc. Tadeusza Musiałowicza, prof. Stanisława Kułińskiego i dr. Andrzeja Deptułę.

Życzę naszym Czytelnikom spokojnego, wolnego od pandemii lata – ale też wolnego od upałów, które dokuczały nam w czerwcu!

Stanisław Latek,  
redaktor naczelny

## Wywiad z burmistrzem Gminy Różan Piotrem Świdorskim

**Redakcja PTJ: Jak na sytuację finansową Gminy Różan wpływa obecność na jej terenie Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych?**

**Piotr Świdorski:** Obecność na terenie Gminy Różan Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych gwarantuje nam stabilność finansową i pewien, nie do końca oczywisty w samorządach – szczególnie ostatnio – spokój. Po nowelizacji Prawa atomowego w 2014 r., maksymalna wysokość opłaty z budżetu państwa z tytułu lokalizacji KSOP wynosi 10,5 mln zł. Taka też kwota corocznie, począwszy od 2016 r. wpływa na konto gminy. Stały charakter rekompensaty powoduje, że jej udział w dochodach budżetu spada. Ma to przede wszystkim związek ze zwiększającymi się dochodami podatkowymi. Duża w tym również zasługa Rady Miejskiej w Różanie, która podchodzi ze zrozumieniem do proponowanych przeze mnie zmian, mających stopniowo uniezależnić gminę od tego ustawowego odszkodowania. Nie zwiększamy wydatków bieżących i zaczęliśmy uważnie przyglądać się kosztom funkcjonowania różnych sfer życia publicznego. Gmina wciąż dotuje sprzedaż wody i odbiór ścieków, dokłada do systemu gospodarowania odpadami komunalnymi, utrzymuje podatki i opłaty lokalne na możliwie niskim poziomie, ale nie szalejemy już z brakiem podwyżek, przy rosnących kosztach funkcjonowania np. wywozu śmieci. W chwili obecnej opłata z tytułu lokalizacji KSOP stanowi już mniej niż 30% budżetu gminy, z blisko 40% w 2015 r.

Wspomniane 10,5 mln zł przeznaczone jest w większości na inwestycje. Gmina ma w tym zakresie ogromne potrzeby, a mieszkańcy nie słabnące oczekiwania. Wydatki majątkowe wahają się w zależności od roku od 6 do 9 mln zł. Pozostała kwota opłaty zabezpiecza inne potrzeby socjalne i bytowe mieszkańców, od przywołanych dopłat do wody i ścieków poczynając, a na wakacyjnym wyjeździe wszystkich chętnych dzieci z terenu gminy kończąc.

**Czy są inne zalety, oprócz finansowych, dla Gminy Różan z racji obecności na jej terenie Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych?**

**P. Ś.** Trudno mówić o innych, niż finansowe, zaletach dla Gminy Różan z tytułu lokalizacji KSOP. Pokazała to zresztą historia mojej poprzedniej kadencji, kiedy grupa awanturników chciała zorganizować referendum w sprawie budowy nowego składowiska odpadów. Cał-



Fot. 1. Burmistrz Gminy Różan

kiem spora grupa osób dała się wciągnąć w wojenkę, na której nikt nie zyskał, a straciła cała społeczność, ostrzegana odtąd przez władze państwowe przez przyzmat kilku krzykaczy, którzy nie wstydzili się podczas publicznych prezentacji projektu badań geologicznych wymachiwać rękami i pleść bzdury o promieniotwórczości, i związanych z nią zagrożeniach, o których, jak się łatwo domyślić, nie mieli i wciąż nie mają pojęcia.

Pomysł referendum upadł, pomysł badań geologicznych upadł, ale pozostała fatalna atmosfera. Przy kolejnej nowelizacji Prawa atomowego nikt już nie chciał słuchać mojego apelu o podwyżkę maksymalnej wysokości opłaty za lokalizację KSOP. Dodano za to przepisy nakładające na gminę obowiązek tłumaczenia się z wydatkowania środków przekazanych przez państwo.

Gdyby chcieć jednak znaleźć jakieś pozytywne lokalizacji KSOP, tą z mojego punktu widzenia, jest to niewątpliwie kwestia bezpieczeństwa. Różan i okolice są stale monitorowane pod kątem zagrożenia radiologicznego. Brak tego zagrożenia działa kojąco na spokój ducha. W ogóle w ostatnim czasie, przełamał się pewien trend związany z budownictwem mieszkaniowym. W okolicach KSOP powstaje nowe osiedle, co wcześniej wydawało się nie do pomyślenia. Niektóre z domów będą miały bezpośredni widok na składowisko.



### Jak według Pana zmieniła się na przestrzeni lat opinia społeczeństwa na temat obecności na terenie Różana Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych?

**P. Ś.** Opinia na temat KSOP jest dobra, co nie oznacza, że mieszkańcy pozwoliliby na budowę nowego składowiska w niedalekiej okolicy. Większość społeczeństwa wie, że coś ze składowiska ma. Wystarczy rzucić okiem na decyzję podatkową, czy rachunek za wodę, a jeśli i to nie przekonuje, to szybkość z jaką uzbrajamy nieruchomości w nową infrastrukturę już tak. W Różanie nikt nie czeka latami na wodociąg, kanalizację, oświetlenie ulic czy utwardzoną drogę. W ciągu roku, dwóch lat zapewniamy dostęp do mediów i zabezpieczamy potrzeby mieszkańców.

Po prawdzie myślę, że ludzie przyzwyczaili się do składowiska. Nikt już nie zwraca uwagi na kolejne przesuwane terminy jego zamknięcia, pod kątem radości z tego powodu. Jeśli się pojawia, to raczej obawa, co potem? Nie będzie kasy? A przecież część odpadów zostanie? Co z gminą? Skąd będą pieniądze na inwestycje?

Cóż... Cytując wrogów KSOP, dla których to takie oczywiste: „będziemy żyć, jak w innych gminach”. Tylko, że to myślenie pozbawione troski. Dla mnie KSOP to element większej całości, jeśli chodzi o gminę i jej mieszkańców. Jego potencjał należy maksymalnie wykorzystać, nawet dla promocji miasta.

### Czy uważa Pan, że działania edukacyjne prowadzone przez Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych wpływają na zwiększenie wiedzy o składowisku wśród lokalnej społeczności?

**P. Ś.** Niewątpliwie. Działania ZUOP wpływają pozytywnie na zwiększenie wiedzy o składowisku wśród mieszkańców. Strzałem w dziesiątkę był pomysł połączenia Pikniku Militarnego, który organizujemy we wrześniu każdego roku na forcie nr 1 z wyjazdami na zwiedzanie KSOP. Zorganizowane grupy mają okazję obejrzeć składowisko od środka i posłuchać o sposobie przetwarzania oraz składowania odpadów promieniotwórczych. Fantastyczna sprawa,

niektórym otwierają się oczy ze zdumienia, że nie taki diabeł straszny, jak go malują.

### Czy dotychczasowa współpraca Gminy Różan i ZUOP jest efektywna? Czy należy coś zmienić?

**P. Ś.** Współpraca Gminy Różan z ZUOP jest wzorowa i ma wieloletnie tradycje. Od prawie trzech dekad przy Radzie Miejskiej działa Komisja Ochrony Radiologicznej. Każdy kolejny burmistrz, nie wyłączając mnie, miał i ma doskonałe kontakty z kierownictwem Zakładu. Wypracowaliśmy system wzajemnych relacji, który zbudowany na zaufaniu sprawdza się bez względu na okoliczności zewnętrzne. To budujące i nie widzę konieczności zmian.

*Redakcja Postępów Techniki Jądrowej dziękuje  
Burmistrzowi Gminy Różan  
Piotrowi Świdierskiemu za udzielenie wywiadu*



Fot. 2. Dzień otwarty w KSOP w Różanie (fot. ZUOP)

# 60 LAT POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI W POLSCE

## 60 years of radioactive waste management in Poland

Krzysztof Madaj

**Streszczenie:** Druga połowa lat 50. ubiegłego wieku była bardzo owocna w sukcesy dla polskiej atomistyki. W roku 1956 rozpoczęto budowę badawczego reaktora jądrowego EWA (nazwa to akronim: Eksperymentalny, Wodny, Atomowy), którego uroczyste otwarcie miało miejsce już dwa lata później 14 czerwca 1958 r. Reaktor ten wykorzystywany był do produkcji izotopów promieniotwórczych oraz do prac badawczych. Każdej działalności związanej z produkcją bądź stosowaniem izotopów promieniotwórczych towarzyszy powstawanie odpadów promieniotwórczych, które już od 60 lat są bezpiecznie gospodarowane w Polsce. W artykule przedstawiono historię powstania Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych, źródła i rodzaje odpadów promieniotwórczych powstających w Polsce, kryteria ich podziału i klasyfikacji oraz podstawowe zasady postępowania z nimi.

**Abstract:** The second half of the 1950s was very successful for the Polish atomic industry. In 1956, the construction of the EWA nuclear research reactor (the name is the acronym: Experimental, Water, Atomic) started and its ceremonial opening took place two years later on June 14, 1958. This reactor was being used for the production of radioactive isotopes and for research. Each activity related to the production or use of radioactive isotopes is accompanied by the generation of radioactive waste which has been safely managed in Poland for 60 years. The article presents the history of origin of the Radioactive Waste Management Plant, sources and types of radioactive waste generated in Poland, criteria for their division and classification as well as basic principles of their management.

**Słowa kluczowe:** odpady promieniotwórcze, Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP)

**Keywords:** radioactive waste, Radioactive Waste Management Plant (RWMP)

### Wprowadzenie

W 1958 r. uruchomiono w Świerku reaktor EWA (nazwa to akronim: Eksperymentalny, Wodny, Atomowy) co zainicjowało badania w dziedzinie fizyki teoretycznej i doświadczalnej jądra atomowego, chemii jądrowej, inżynierii jądrowej, elektroniki reaktorowej, technologii paliw i materiałów reaktorowych, technologii i zastosowania izotopów promieniotwórczych, ochrony zdrowia i ochrony przed promieniowaniem. W skład Instytutu Badań Jądrowych (IBJ), którego dyrektorem naczelnym w latach 1955–1958 był prof. Andrzej Sołtan wchodziły: ośrodek w Świerku, ośrodek w Warszawie, na Żeraniu, i ośrodek w Krakowie. W Bronowicach pod Krakowem w 1955 r. powstał Zakład II Instytutu Badań Jądrowych, kierowany przez Henryka Niewodniczańskiego, wyposażony w cyklotron U120. W roku 1960 został on przekształcony w samodzielną jednostkę naukową pod nazwą Instytut Fizyki Jądrowej (IFJ). W początkowym okresie postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi zajmowała się Centrala Odpadów Promieniotwórczych IBJ, będąca w jego strukturze organizacyjnej gospodarstwem pomocniczym. Po wielu

przekształceniach organizacyjnych od dnia 1 stycznia 2002 r. za postępowanie z odpadami promieniotwórczymi od chwili ich przejęcia od wytwórcy odpowiada przedsiębiorstwo państwowe użyteczności publicznej pod nazwą Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP), które w tej formie prawnej funkcjonuje do dnia dzisiejszego. Stosowane w ZUOP metody przetwarzania odpadów promieniotwórczych, pozwalają na uzyskiwanie wysokich współczynników redukcji objętości i wysokich współczynników dekontaminacji oraz na przygotowanie odpadów w sposób zapewniający bezpieczeństwo ludności i środowiska w całym okresie składowania odpadów.

### Historia powstania Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych

Historia postępowania z odpadami promieniotwórczymi w Polsce liczy ponad 60 lat. Jej początki wiążą się nierozdzielnie z uruchomieniem w dniu 14 czerwca 1958 r. badawczego reaktora jądrowego EWA w IBJ w Świerku. W przemówieniu wygłoszonym w dniu uruchomienia reaktora przez ówczesnego dyrektora



IBJ prof. Andrzej Sołtan przedstawił korzyści płynące z badań jądrowych: „Byliśmy świadkami uruchomienia wielkiego nowego narzędzia pracy w IBJ. [...] Wielki strumień neutronów umożliwi nam nie tylko badania w zakresie praw podstawowych rządzących materią. Dzięki temu strumieniowi będziemy wytwarzać szereg izotopów promieniotwórczych, które dotąd sprowadzamy z zagranicy i których niezliczone zastosowania są wszystkim znane, będziemy badać praktycznie działanie promieni jonizujących na różne materiały, otwierając drogę do szybkiego postępu technologicznego w chemii, metalurgii, no i w technologii samych reaktorów, będziemy prowadzić prace z dziedziny radiobiologii, nauki stawiającej obecnie pierwsze kroki i ważnej zwłaszcza teraz, gdy ilość promieniowań jonizujących, działających przeważnie destrukcyjnie na organizmy żywe, silnie wzrasta i to nie tylko w laboratoriach.”

W latach 60. nastąpił znaczący rozwój technik izotopowych i związany z tym wzrost zastosowań izotopów promieniotwórczych w różnych dziedzinach gospodarki kraju. W związku z tym zachodziła pilna potrzeba ustalenia zasad gospodarki odpadami promieniotwórczymi. Skutecznym rozwiązaniem tego zagadnienia była decyzja na szczeblu rządowym o poszukiwaniu lokalizacji składowisk odpadów promieniotwórczych. Po wykonaniu wymaganych wówczas badań, analiz i ekspertyz podjęto decyzję o lokalizacji składowiska odpadów promieniotwórczych w Różanie. Eksploatacja składowiska rozpoczęła się w 1961 r. W początkowym okresie postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi zajmowała się Centrala Odpadów Promieniotwórczych (COP) IBJ, będąca w strukturze organizacyjnej Instytutu gospodarstwem pomocniczym. Rozpoczęcie eksploatacji Centralnej Składowicy Odpadów Promieniotwórczych (CSOP) w Różaniu spowodowało konieczność opracowania i wdrożenia pełnej technologii przetwarzania odpadów. Wdrożone metody pozwalały redukować objętość odpadów, a procesy zestalania umożliwiały przekształcanie odpadów w formę dogodną do bezpiecznego transportu, przechowywania lub długotrwałego składowania. Wymagało to również budowy nowych obiektów i instalacji unieszkodliwiania odpadów. W roku 1970 COP została przekształcona w Zakład Unieszkodliwiania Substancji Promieniotwórczych (ZUSP), który w roku 1983 włączony został do nowo utworzonego Ośrodka Reaktorów i Produkcji Izotopów (ORiPI) w Instytucie Energii Atomowej (IEA), powstałym po likwidacji IBJ. W roku 1988, po wyodrębnieniu się ORiPI z IEA i utworzeniu Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Izotopów, ZUSP znalazł się w strukturze Instytutu Energii Atomowej. Decyzją Dyrektora IEA, z dniem 1 stycznia 1994 r. został przekształcony w Zakład Doświadczalny Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZDUOP) z rozszerzoną, w stosunku do innych zakładów instytutu, samodzielnością finansową. 1 stycznia 2002 r. ZDUOP został

wydzielony z IEA i kontynuuje działalność jako przedsiębiorstwo państwowe użyteczności publicznej - Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP). Zgodnie z ustawą z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe, nadzór nad ZUOP oraz funkcję organu założycielskiego sprawuje minister właściwy do spraw energii. Obecnie pełni tą funkcję minister klimatu i środowiska. Zgodnie z zapisami cytowanej wcześniej ustawy ZUOP powołany jest do wykonywania działalności w zakresie postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym, a przede wszystkim do zapewnienia stałej możliwości składowania odpadów promieniotwórczych i wypalnego paliwa jądrowego. Wypełniając swoje ustawowe i statutowe zadania ZUOP zajmuje ważną rolę w służbie społeczeństwu, gwarantując, iż odpady promieniotwórcze wytwarzane na terenie Polski pochodzące z medycyny np. z leczenia nowotworów czy diagnostyki, będą w sposób bezpieczny poddawane procesom przetwarzania oraz składowania.

Realizacja powyższych zadań opiera się o 2 fundamentalnych zasadach:

- bezpieczeństwo ludzi,
- bezpieczeństwo środowiska naturalnego.



Fot. 1. Siedziba ZUOP (fot. ZUOP)  
Photo 1. The seat of the ZUOP (photo: ZUOP)

Siedziba ZUOP znajduje się w Otwocku-Świerku przy ulicy Andrzeja Sołtana 7, około 25 km od Warszawy, na terenie Kompleksu Świerk.

Jednostką zamiejscową przedsiębiorstwa jest Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych (KSOP). ZUOP jest operatorem tego składowiska.

Misją ZUOP jest pełnienie służby na rzecz całego społeczeństwa zapewniając bezpieczne postępowanie z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym.

### Źródła i rodzaje odpadów promieniotwórczych odbieranych przez ZUOP

Odpady promieniotwórcze odbierane przez ZUOP powstają w wyniku stosowania izotopów promieniotwórczych w medycynie nuklearnej, przemyśle, badaniach naukowych, podczas produkcji otwartych i zamkniętych źródeł promieniotwórczych w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) oraz w trakcie eksploatacji reaktora MARIA służącego między innymi do produkcji radioizotopów.

Odpady te występują zarówno w postaci ciekłej, jak i stałej.

Głównym źródłem ciekłych odpadów niskoaktywnych jest reaktor MARIA. Ciekłe odpady średnioaktywne powstają przy produkcji źródeł promieniotwórczych i w niektórych przypadkach podczas dekontaminacji skażonych powierzchni.

Źródłem odpadów stałych są: reaktor MARIA oraz zakład produkcji izotopów promieniotwórczych (NCBJ Ośrodek Radioizotopów POLATOM). Odpadami promieniotwórczymi pochodzenia reaktorowego są m.in. filtry (z układów oczyszczania chłodziwa i wentylacji), odpady podekontaminacyjne, zużyte elementy aparatów i urządzeń reaktorowych.

Do odpadów z produkcji izotopów należą:

- niewykorzystane materiały aktywne,
- odpady podekontaminacyjne,
- zużyte skażone elementy aparatów i urządzeń.



Fot. 2. Odbiór odpadów promieniotwórczych (fot. ZUOP)  
Photo 2. Reception of radioactive waste (photo: ZUOP)

Ponadto odpady stałe pochodzą również ze szpitali, klinik i innych instytucji wykorzystujących techniki izotopowe, znajdujących się na terenie całego kraju. Odpady powstałe podczas stosowania substancji promieniotwórczych do celów medycznych, w szczególności do diagnostyki i terapii nowotworowej, to przede wszystkim ampułki po preparatach promieniotwórczych, a także strzykawki, lignina, folia, odzież ochronna, zużyte elementy wyposażenia oraz odpady z dekontaminacji. Specjalną grupę odpadów medycznych stanowią źródła radowe (Ra-226). Odbiór tych odpadów od użytkowników wymaga odpowiedniego przygotowania (zabezpieczenia) podczas transportu, a następnie przechowywania. Ma to szczególne znaczenie, w sytuacji, gdy źródła uległy rozszczelnieniu.

Zużyte zamknięte źródła promieniotwórcze, w tym izotopowe czujki dymu odbierane są głównie z instytucji spoza Kompleksu Jądrowego Świerk. Ich dostawcami są zazwyczaj firmy instalujące nowe urządzenia alarmowe, które również demontują stare instalacje alarmowe, odbierają wycofane czujki i magazynują je do czasu przekazania do ZUOP.

### Kwalifikacja odpadów promieniotwórczych

Odpadami promieniotwórczymi są materiały stałe, ciekłe lub gazowe, zawierające substancje promieniotwórcze lub skażone tymi substancjami, których wykorzystanie nie jest przewidywane ani rozważane. Odpady kwalifikuje się ze względu na stężenie promieniotwórcze zawartych w tych odpadach izotopów promieniotwórczych do następujących kategorii:

- niskoaktywnych;
- średnioaktywnych;
- wysokoaktywnych.

Kategorie odpadów promieniotwórczych mogą być podzielone na podkategorie ze względu na okres połowicznego rozpadu i stężenie promieniotwórcze zawartych w tych odpadach izotopów promieniotwórczych.

Kryteria podziału odpadów promieniotwórczych na kategorie i podkategorie przedstawione są w Tabeli 1.

Wartości aktywności i stężenia promieniotwórczego dla poszczególnych izotopów, stanowiące podstawę kwalifikowania odpadów do kategorii odpadów promieniotwórczych określa Załącznik Nr 1 do rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 14 grudnia 2015 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz.U. 2015 poz. 2267).

Ciekłe odpady promieniotwórcze kwalifikuje się dodatkowo ze względu na aktywność izotopów promieniotwórczych zawartych w tych odpadach. Wypalone paliwo jądrowe przeznaczone do składowania kwalifikuje się do kategorii odpadów promieniotwórczych wysokoaktywnych.

Wycofane z użytkowania zamknięte źródła promieniotwórcze tworzą dodatkową kategorię odpadów



**Tabela 1.** Kategorie i podkategorie odpadów promieniotwórczych**Table 1.** Categories and subcategories of radioactive waste

Kategoria		Podkategoria		
		Przejściowe	Krótkożyciowe	Długożyciowe
Odpady niskoaktywne	$EAC < A \leq 10^4 EAC$	Po trzech latach stężenie izotopów spadnie poniżej wartości określonej dla odpadów niskoaktywnych	$t_{1/2} \leq 30$ lat - $A \leq 400$ kBq/kg dla izotopów długożyciowych - max $A \leq 4000$ kBq w 1 kg reprezentatywnej próbki dla izotopów długożyciowych lub $t_{1/2} > 30$ lat $A \leq 400$ kBq/kg	$t_{1/2} > 30$ lat $A > 400$ kBq/kg dla izotopów długożyciowych
Odpady średnioaktywne	$10^4 EAC < A \leq 10^7 EAC$			
Odpady wysokoaktywne	$A > 10^7 EAC$			

gdzie: A – stężenie promieniotwórcze izotopu w odpadzie (kBq/kg), EAC – wartość stężenia promieniotwórczego izotopu stanowiąca podstawę kwalifikowania odpadów do kategorii odpadów promieniotwórczych (kBq/kg), EA – wartość aktywności stanowiącą podstawę kwalifikowania odpadów do kategorii odpadów promieniotwórczych (Bq).

Źródło: Uchwała Nr 154 Rady Ministrów z dnia 21 października 2020 r. w sprawie aktualizacji „Krajowego planu postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym”

Source: Resolution No. 154 of the Council of Ministers of October 21, 2020 on updating the „National plan for dealing with radioactive waste and spent nuclear fuel”

**Tabela 2.** Zużyte zamknięte źródła promieniotwórcze**Table 2.** Sealing with radioactive waste and spent nuclear fuel

Zużyte zamknięte źródła promieniotwórcze	Podkategoria			
	Niskoaktywne	Średnioaktywne	Wysokoaktywne	
	$EA < A \leq 10^8 Bq$	$10^8 < A \leq 10^{12} Bq$	$A > 10^{12} Bq$	Krótkożyciowe $t_{1/2} \leq 30$ lat
				Długożyciowe $t_{1/2} > 30$ lat

gdzie: A – aktywność zawartych izotopów w źródle (Bq), EA – wartość aktywności stanowiącą podstawę kwalifikowania odpadów do kategorii odpadów promieniotwórczych (Bq).

Źródło: Uchwała Nr 154 Rady Ministrów z dnia 21 października 2020 r. w sprawie aktualizacji „Krajowego planu postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym”

Source: Resolution No. 154 of the Council of Ministers of October 21, 2020 on updating the „National plan for dealing with radioactive waste and spent nuclear fuel”

promieniotwórczych, które kwalifikowane są ze względu na poziom aktywności do podkategorii zużytych zamkniętych źródeł: niskoaktywnych, średnioaktywnych i wysokoaktywnych. Ze względu na okres połowicznego rozpadu zawartych w nich izotopów dzieli się je na krótkożyciowe i długożyciowe. Kryteria podziału zużytych zamkniętych źródeł promieniotwórczych na kategorię i podkategorię przedstawione są w Tabeli 2.

### Podstawowe zasady postępowania z odpadami promieniotwórczymi

Jednostka organizacyjna, w której powstają odpady promieniotwórcze, odpowiada za zapewnienie możliwości postępowania z nimi, w tym za jego finan-

sowanie, od momentu ich powstania aż po składowanie. Kierownik jednostki organizacyjnej prowadzącej działalność związaną z narażeniem na promieniowanie jonizujące jest zobowiązany do dokonania kwalifikacji odpadów promieniotwórczych do odpowiedniej kategorii i podkategorii oraz do prowadzenia ich ewidencji. Ma on również obowiązek nie rzadziej niż raz w roku, przeprowadzić kontrolę stanu odpadów, aby były przechowywane w sposób zapewniający ochronę ludzi i środowiska. Wytwórca odpadów zobowiązany jest do ich przekazania do ZUOP, który posiada stosowne Zezwolenia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki na prowadzenie działań związanych z postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi. Przed przekazaniem odpadów należy przesłać do ZUOP zlecenie odbioru

takiego odpadu poprzez podanie informacji takich jak: charakterystyka przekazywanego odpadu (rodzaj odpadu, kategoria/podkategoria odpadu, ilość/objętość, objętość całego opakowania, masa, opis przedmiotu odbioru), dane szczegółowe zlecniodawcy oraz informacje na temat transportu przekazywanego odpadu. Wzór zlecenia znajduje się na stronie [www.zuop.pl](http://www.zuop.pl). Zlecniodawca ma również obowiązek przygotować wypełnioną kartę ewidencyjną dla opakowania z odpadami promieniotwórczymi.

Transport odpadów promieniotwórczych może wykonać ZUOP lub inny podmiot gospodarczy, który posiada zezwolenie Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki na wykonywanie tego rodzaju działalności.

Na terenie Kompleksu Jądrowego Świerk znajdują się obiekty należące do ZUOP wykorzystywane do przechowywania i przetwarzania odpadów promieniotwórczych. W celu przygotowania odpadów promieniotwórczych do przechowywania oraz składowania, poddaje się je przetworzeniu, czyli działaniu zmierzającemu do minimalizacji objętości odpadów, segregacji odpadów według kategorii oraz przygotowaniu ich do transportu lub składowania. Celem tych działań jest odpowiednie zabezpieczenie odpadów promieniotwórczych, aby nie stwarzały zagrożeń dla człowieka i środowiska.

Odpady promieniotwórcze należy przechowywać w sposób zapewniający ochronę ludzi i środowiska przed oddziaływaniem promieniowania jonizującego w warunkach normalnych, jak i w sytuacjach powodujących zagrożenie, w szczególności poprzez zabezpieczenie ich przed rozlaniem, rozproszeniem lub uwolnieniem. W przypadku odpadów promieniotwórczych przejściowych są one przechowywane w celu umożliwienia rozpadu zawartych w nich radioizotopów do poziomu, przy którym odpady te mogą być wyłączone spod kontroli dozorowej i nie będzie konieczne umieszczenie ich na składowisku odpadów promieniotwórczych.



**Fot. 3.** Przechowywanie odpadów promieniotwórczych  
**Photo 3.** Storage of radioactive waste

Stałe i zestalone odpady kierowane są do składowania lub przechowywania w KSOP w Różanie.

Transport odpadów promieniotwórczych na składowisko odpadów promieniotwórczych wykonuje wyłącznie ZUOP.



**Fot. 4.** Pojazd służący do transportu odpadów promieniotwórczych do KSOP w Różanie

**Photo 4.** Vehicle used to transport radioactive waste to the NRWR in Różan

Przygotowanie odpadów do składowania poprzez redukcję ich objętości. Ułatwia to dalsze operacje z odpadami oraz ogranicza ich ilości przeznaczone do przechowywania, czy składowania. Pozwala to również na zoptymalizowanie procesu tworzenia barier ochronnych, a także obniża ogólne koszty przetwarzania i składowania odpadów. Bariery sztuczne i naturalne należy rozpatrywać zawsze jako układy dopełniające się i tworzące system multibarier dający skuteczne zabezpieczenie.

Składowanie odpadów promieniotwórczych oznacza złożenie tych odpadów w składowisku odpadów promieniotwórczych bez zamiaru ponownego ich wydobycia. Jego celem jest izolowanie ich w taki sposób, aby były bezpieczne dla ludzi i środowiska naturalnego. Odpady promieniotwórcze można składować wyłącznie w stanie stałym, w opakowaniach zapewniających bezpieczeństwo ludzi i środowiska przed oddziaływaniem promieniowania jonizującego, oraz przy stałym prowadzeniu kontroli tych czynników w okresie składowania, a także po zamknięciu składowiska.

Izolacja odpadów promieniotwórczych jest możliwa dzięki barierom ochronnym (układowi barier) zabezpieczającym przed uwalnianiem się substancji promieniotwórczych w miejscu ich składowania i zapobiegającym ich migracji do środowiska, co w konsekwencji stwarzałoby zagrożenie dla ludzi. Bariery ochronne są fizycznymi przeszkodami mającymi uniemożliwić uwalnianie i rozprzestrzenianie się substancji promieniotwórczych.



W celu właściwego zabezpieczenia i składowania odpadów promieniotwórczych należy spełnić podstawowe wymagania:

- w możliwie maksymalnym stopniu zredukować ich objętość,
- nadać im formę odporną na działanie wody i rozpraszanie się,
- przechowywać w sposób niezagrażający środowisku.

Dla spełnienia tych warunków stosuje się nie jedną, lecz najczęściej wiele barier zabezpieczających, tzw. system multibarier.

Na system multibarier zapobiegających rozprzestrzenianiu się substancji promieniotwórczych oraz pochłaniających promieniowanie składają się bariery sztuczne, tj. wykonane przez człowieka:

- trudnorozpuszczalne związki chemiczne (koncentraty) wiążące odpady promieniotwórcze;
- materiały wiążące (spoiwa), które służą do zestania odpadów promieniotwórczych, w celu przeciwdziałania rozsypaniu, rozproszeniu, rozpyleniu i wymywaniu substancji promieniotwórczych. Najczęściej stosowanymi materiałami wiążącymi są beton, asfalt, polimery organiczne i masy ceramiczne;
- opakowanie bezpośrednie odpadów promieniotwórczych, które izoluje je od otoczenia, zabezpiecza przed uszkodzeniami mechanicznymi, działaniem czynników atmosferycznych i kontaktem z wodą. Na opakowania bezpośrednie stosowane są najczęściej pojemniki metalowe, rzadziej beto-

nowe. W pojemnikach tych odpady są przewożone, magazynowane i składowane;

- betonowa konstrukcja składowiska, która stanowi dodatkowe zabezpieczenie odpadów, szczególnie przed działaniem czynników atmosferycznych, zapobiega korozji opakowań bezpośrednich, a przez to migracji substancji promieniotwórczych z miejsca ich składowania;
- impregnująca warstwa bitumiczna pokrywająca wierzchnią warstwę betonu, której podstawowym zadaniem jest zapobieganie przenikaniu wód opadowych do strefy składowania odpadów, a także uniemożliwianie korozji opakowań i wymywanie substancji promieniotwórczych; oraz bariery naturalne, to głównie struktura geologiczna i ukształtowanie terenu, a także jego asejsmiczność i korzystne usytuowanie w miejscu tzw. wyniosłości topograficznej. Odpowiednie warunki geologiczne i hydrogeologiczne mają zapobiegać rozprzestrzenianiu się radionuklidów w glebie i przenikaniu ich do wód gruntowych i powierzchniowych.

W przypadku KSOP w Różaniu poziom wód gruntowych jest niższy od poziomu składowiska, a struktura podłoża przeciwdziała migracji radionuklidów.

Wielostopniowość systemu barier to zasadniczy warunek ich skuteczności przed rozsypaniem, rozproszeniem, rozpyleniem i wymywaniem substancji promieniotwórczych, a co za tym idzie, niedopuszczeniem do ich migracji w składowisku i jego otoczeniu.



**Fot. 5.** Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różaniu (fot. ZUOP)  
**Photo 5.** The National Radioactive Waste Repository in Różan (photo: ZUOP)

W odniesieniu do KSOP skuteczność ta jest potwierdzona wieloletnimi już wynikami kontroli, mającymi na celu dokumentowanie jego wpływu na środowisko naturalne.

KSOP położone jest w miejscowości Różan nad Narwią w odległości około 90 km od Warszawy i zajmuje powierzchnię 3,045 ha. KSOP funkcjonuje już od 1961 r. i według klasyfikacji Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej jest typem składowiska powierzchniowego. Składowisko znajduje się w jednym z dawnych fortów wojskowych, wybudowanych przez władze rosyjskie w latach 1905-1908. Składowisko to przeznaczone jest do składowania krótkożyciowych odpadów nisko- i średnioaktywnych oraz do przechowywania odpadów długożyciowych.

### Podsumowanie

Technologie jądrowe przynoszą korzyści ludziom na całym świecie. Źródła promieniotwórcze są wykorzystywane do sterylizacji żywności i narzędzi medycznych oraz diagnozowania i leczenia pacjentów. Reaktory badawcze są wykorzystywane w nauce i do produkcji radioizotopów do użytku medycznego. Zastosowania tych technologii jądrowych powoduje powstawanie odpadów, podobnie jak w wielu innych działalnościach. Aby zapewnić, że nie stanowi to żadnego zagrożenia zarówno dla ludzi, jak i środowiska, teraz i w przyszłości, wszystkie kraje stosujące technologie jądrowe są odpowiedzialne za bezpieczne zarządzanie odpadami promieniotwórczymi.

Właściwe postępowanie z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym jest również jedną z najważniejszych kwestii związanych z wdrożeniem energetyki jądrowej. Nie jest możliwe stosowanie energii jądrowej bez wprowadzenia akceptowalnego społecznie, efektywnego i bezpiecznego postępowania z odpadami promieniotwórczymi.

W związku z tym, prawidłowe postępowanie z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym jest szczególnie istotne zarówno dla użytkowników materiałów promieniotwórczych, jak i dla społeczeństwa. Pomimo że w Polsce nie mamy energetyki jądrowej, to jako kraj posiadamy ponad 60-letnie praktyczne doświadczenie w bezpiecznym postępowaniu zarówno z odpadami promieniotwórczymi, jak i wypalonym paliwem jądrowym pochodzącymi w wyniku stosowania izotopów promieniotwórczych w medycynie, przemyśle, badaniach naukowych oraz podczas ich wytwarzania, a także w wyniku pracy reaktorów badawczo-produkcyjnych EWA czy MARIA (obecnie jedyny czynny reaktor w kraju). Przemysł jądrowy bierze pełną odpowiedzialność za powstające odpady promieniotwórcze, co według ekspertów może być wzorem do naśladowania dla innych gałęzi przemysłu.

*Krzysztof Madaj,  
Zakład Unieszkodliwiania  
Opadów Promieniotwórczych,  
Otwock-Świerk*

### Literatura:

- [1] Doświadczenia z 50 lat unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych w Polsce, K. Madaj.
- [2] Unieszkodliwianie i składowanie odpadów promieniotwórczych w Polsce, W. Tomczak, A. Cholerzyński.
- [3] Uchwała Nr 154 Rady Ministrów z dnia 21 października 2020 r. w sprawie aktualizacji „Krajowego planu postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym”.
- [4] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (Dz. U. 2021 poz. 623 t.j.).
- [5] <https://www.iaea.org>



# ROZWÓJ METOD POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI I WYPALONYM PALIWEM JĄDROWYM – PRACE BADAWCZO-ROZWOJOWE W IChTJ

## *Development of methods for managing radioactive waste and spent nuclear fuel - research and development works at IChTJ*

Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz

**Streszczenie:** Bezpieczne zagospodarowanie odpadów promieniotwórczych, a zwłaszcza wypalonego paliwa jądrowego, jest jedną z najczęściej podnoszonych kwestii przeciwników dalszego rozwoju energetyki jądrowej i stosowania radioizotopów w różnych dziedzinach życia. Prowadzenie zaawansowanych prac badawczych wspierających program jądrowy kraju i pozwalających na dalszy rozwój metod izotopowych w medycynie, przemyśle i ochronie środowiska naturalnego, jest zadaniem nauki. Jest również jednym z podstawowych celów działania instytutów związanych z atomistyką.

**Abstract:** Safe management of radioactive waste, especially spent nuclear fuel, is one of the most frequently raised issues of opponents of further development of nuclear energy and the use of radioisotopes in various areas of life. Conducting advanced research works supporting the country's nuclear program and enabling further development of isotope methods in medicine, industry and environmental protection is the responsibility of science. It is also one of the main goals of the institutes related to atomic science.

**Słowa kluczowe:** odpady promieniotwórcze, wypalone paliwo jądrowe, składowiska odpadów promieniotwórczych, badania i rozwój

**Keywords:** Radioactive waste, spent nuclear fuel, radioactive waste repositories, research and development

### **Bezpieczne odpady**

Kwestia bezpiecznego zagospodarowania odpadów promieniotwórczych, a zwłaszcza wypalonego paliwa jądrowego, jest często podnoszona przez przeciwników energetyki jądrowej. Stosowanie radioizotopów w różnych dziedzinach nauki, w medycynie i przemyśle również nie zawsze spotyka się ze społecznym zrozumieniem. Szczególne wątpliwości społeczeństwa budzi głębokie składowanie długożyjących odpadów wysokoaktywnych.

Aktualnie na świecie zaawansowanych jest kilka projektów głębokich składowisk geologicznych. Pomimo technicznej dojrzałości technologii składowania, do tej pory nie oddano jeszcze do użytku składowiska ostatecznego dla wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego.

Sprzeciw społeczny budzi również budowa składowisk płytkich dla odpadów nisko i średnio-aktywnych. Nawet, jeśli wiąże się z tym większe zrozumienie

i akceptacja dla stosowania izotopów krótko życiowych, np. do celów medycznych, to jednak lokalizacja składowiska na własnym terenie nie budzi entuzjazmu społeczności lokalnych.

Dla zwiększenia zrozumienia problemów postępowania z odpadami promieniotwórczymi potrzebna jest efektywna informacja i edukacja społeczeństwa, jak również odpowiednie zademonstrowanie bezpieczeństwa proponowanych rozwiązań technicznych. Właściwe zagospodarowanie odpadów promieniotwórczych, powstających w badaniach naukowych, w licznych zastosowaniach technik izotopowych w przemyśle i medycynie, a także w tzw. cyklu paliwowym, jest problemem ważnym dla dalszego rozwoju technik jądrowych i energetyki opartej na reaktorach jądrowych. Stałe ulepszanie metod przeróbki, ciągły ich rozwój podążający za bieżącymi osiągnięciami światowej nauki, jest podstawowym zadaniem dla badaczy i inżynierów pracujących w różnych dyscyplinach nauki. Polska, która posiada reaktor

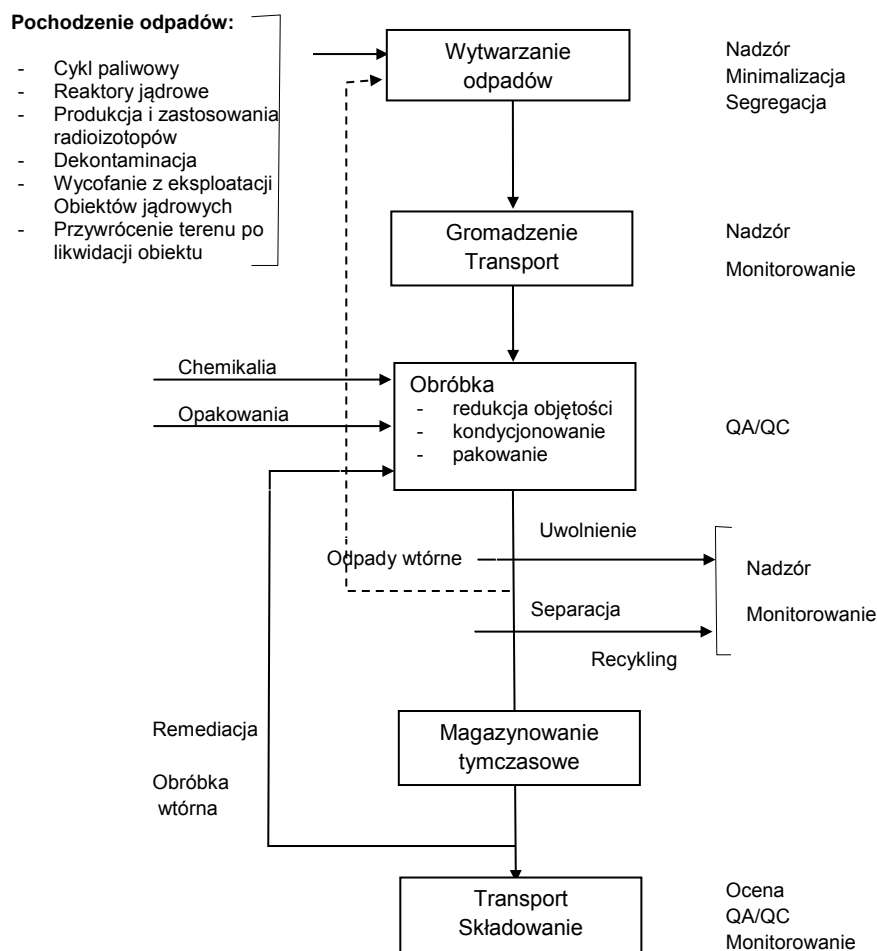
badawczy i stosuje techniki jądrowe, a także zarządza od wielu lat składowiskiem powierzchniowym odpadów promieniotwórczych, ma bogate doświadczenie w ich prawidłowym zagospodarowaniu. Wprowadzenie energetyki jądrowej i budowa w kraju pierwszej elektrowni jądrowej stawia jednak nowe wymagania i jest dużym wyzwaniem zarówno dla Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Radioaktywnych (ZUOP), jak i naukowców pracujących nad nowymi metodami zagospodarowania powstających odpadów. Prowadzenie zaawansowanych prac badawczych wspierających program jądrowy kraju i pozwalających na dalszy rozwój zastosowań technik izotopowych jest obowiązkiem nauki, a instytutów związanych z atomistyką w szczególności. Pomocne wydaje się wykorzystanie doświadczeń krajów przodujących w dziedzinie energetyki jądrowej i pokojowego wykorzystania technik jądrowych. Aby zagwarantować pełne bezpieczeństwo postępowania z odpadami promieniotwórczymi, prace badawcze powinny objąć wszystkie etapy cyklu.

Przyjęty ogólnie schemat zagospodarowania odpadów promieniotwórczych, stosowany również w Polsce, składa się z kilku etapów (rys.1), z których każdy wymaga wiedzy i praktyki. Są to:

**Zbieranie i segregacja**, najpierw w miejscu powstania, u producenta odpadów, a następnie w agencji odpadów radioaktywnych; w Polsce w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Radioaktywnych, instytucji odpowiedzialnej za gromadzenie, transport, przetwarzanie i składowanie odpadów promieniotwórczych pochodzących z całego kraju.

**Przetwarzanie, obróbka**, sprowadzające się do redukcji objętości, czasami zmiany formy odpadu i oddzielenia określonych składników, np. nieradioaktywnych, w celu recyklingu, bądź zmniejszenia toksyczności odpadów przeznaczonych do dalszej obróbki. W zależności od stanu skupienia odpadu mogą być stosowane różne metody obróbki.

Przetwarzanie obejmuje również **kondycjonowanie**, czyli nadanie odpadom formy stosownej do wy-



Rys. 1. Ogólny schemat postępowania z odpadami promieniotwórczymi. Na podstawie *Radioactive Waste Management, An IAEA Source Book*. IAEA, Vienna 1992.

Fig. 1. General scheme for management of radioactive waste. Adapted from *Radioactive Waste Management, An IAEA Source Book*. IAEA, Vienna 1992.



magań transportu, poprzez stabilizację za pomocą adekwatnych substancji wiążących (cement, asfalt, żywice) i zastosowanie odpowiednich, standardowych opakowań. Jest to, więc ostatni etap przed przewiezieniem odpadów do przechowalnika lub na składowisko ostateczne.

Kolejnym etapem może być czasowe **przechowywanie** w celu rozpadu izotopów krótkożyciowych bądź z uwagi na inne techniczne lub organizacyjne względy. Czasowe przechowywanie w specjalnie zaprojektowanych przechowalnikach (suchych lub mokrych) jest zwykłą procedurą stosowaną wobec wypalonego paliwa bądź odpadów wysokoaktywnych, długożyciowych, dla których składowiska ostateczne nie zostały jeszcze zbudowane.

**Składowanie** ostateczne, w odpowiednio zaprojektowanych składowiskach, jest ostatnim etapem zagospodarowania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego. W zależności od charakterystyki odpadu, sprowadzającej się głównie do poziomu aktywności i czasu półrozpadu obecnych w nim radioizotopów, składowanie ma miejsce w składowiskach naziemnych, płytkich przypowierzchniowych, bądź głębokich. Głębokość składowiska powinna być dostosowana do poziomu aktywności składowanych w nim odpadów: odpady średnioaktywne mogą być umieszczane na głębokości kilkudziesięciu-kilkuset metrów, podczas gdy odpady wysokoaktywne, bądź wypalone paliwo jądrowe, wymaga składowania na głębokości około 1000 m pod powierzchnią ziemi.

Z tym bezpośrednio wiąże się przyjęta obecnie klasyfikacja. Proponowany obecnie przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA) system klasyfikacji odpadów promieniotwórczych opiera się na kryteriach ilościowych, w których odpady są pogrupowane według aspektów bezpieczeństwa, związanych z ich zarządzaniem, a w szczególności według opcji ich składowania [1]. Klasyfikacja ta zakłada istnienie 6 grup odpadów (Tabela 1). Są to odpady wyłączone spod kontroli regulatora, odpady bardzo krótkożyciowe, bardzo niskoaktywne, niskoaktywne, średnioaktywne i wysokoaktywne. Oddzielną gru-

pę stanowi wypalone paliwo, które w zależności od przyjętej w kraju strategii postępowania, może być traktowane, jako odpad, bądź materiał, który podlega przetwarzaniu w celu odzyskania i recyklingu aktywności. Każdej z tych grup odpadów przypisana jest odpowiednia opcja postępowania, zakończona etapem składowania w specjalnie zaprojektowanym obiekcie inżynierskim. W Polsce jest nim Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie, które wprawdzie wykorzystuje istniejący fort wojskowy z początków XX w., ale zostało dostosowane do wymogów bezpieczeństwa stawianych podobnym obiektom inżynierskim.

### Badania naukowe gwarancją bezpieczeństwa

Prace badawcze nad metodami przetwarzania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego prowadzone są w kraju od wielu lat, m.in. w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ), w którym wchodzi w skład bloku badań statutowych pt. Badania w dziedzinie chemicznych aspektów energetyki jądrowej. Ich plany przyszłościowe zostały ujęte w „Perspektywicznych kierunkach działalności naukowej, rozwojowej i wdrożeniowej”, przyjętych przez Radę Naukową IChTJ w 2019 [2]. Dokument przedstawiający przyszłe kierunki działalności naukowej, rozwojowej i wdrożeniowej IChTJ, o których mowa w art. 29 ust. 2 pkt 5 i 6 ustawy o instytutach badawczych, powiązany jest ściśle z krajowymi oraz unijnymi programami strategii i rozwoju takimi, jak: Konstytucja dla Nauki powstała w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego, przygotowana przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska „Polityka energetyczna Polski do 2040 roku” (PEP2040), zaktualizowany „Program Polskiej Energetyki Jądrowej” (PPEJ), a także zaktualizowany w roku 2020 „Krajowy Plan postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym” (Krajowy Plan), wymagany wdrożeniem do krajowego prawodawstwa Dyrektywy Rady 2011/70/Euratom z dnia 19 lipca 2011 r. ustanawiającej ramy wspólnotowe w zakresie odpowiedzialnego i bezpiecznego gospodarowania wpa-

**Tabela 1.** Opcje postępowania z różnymi rodzajami odpadów promieniotwórczych  
**Table 1.** Options for management of different types of radioactive waste

Rodzaj odpadów	Opcja postępowania
Odpady wyłączone	Brak ograniczeń, wyłączenie spod kontroli
Odpady bardzo krótkożyciowe	Przechowywanie do wygaśnięcia
Odpady bardzo niskoaktywne	Składowiska powierzchniowe
Odpady niskoaktywne	Składowiska przypowierzchniowe, płytke
Odpady średnioaktywne	Składowiska głębokie
Odpady wysokoaktywne	Składowiska głębokie
Wypalone paliwo	Przechowalniki, składowiska głębokie / przeróbka (reprocessing)

lonym paliwem jądrowym i odpadami promieniotwórczymi. PPEJ i Krajowy Plan zawierają odniesienia do programu badawczego towarzyszącego zarówno rozwojowi energetyki jądrowej w kraju, jak i kontynuacji prac związanych z opracowaniem nowych metod postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym. Zgodnie z powyższymi dokumentami metody te powinny być stale rozwijane i aktualizowane.

Opracowywanie nowych metod i technologii unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych generowanych przez elektrownie jądrowe, to jeden z celów statutowych IChTJ powiązanych z PPEJ i szerokim programem unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych w Polsce podjętym przez ZUOP i opisanym w Krajowym Planie. Od lat prowadzone są w instytucie prace nakierowane na pozyskiwanie nowej wiedzy w dziedzinie odpadów promieniotwórczych i cyklu paliwowego. Obszar badań obejmuje m.in. następujące zagadnienia:

- Prace nad nowymi metodami unieszkodliwiania odpadów ciekłych z użyciem procesów separacyjnych, takich jak: metody membranowe, sorpcyjne, jonowymiennie, ekstrakcyjne); zmniejszanie radioaktywności odpadów metodami radiochemicznymi przy użyciu m.in. nowych materiałów: selektywnych ekstrahentów, wymienników jonowych, nanosorbentów oraz zaawansowanych materiałów membranowych [3-8]. Prace prowadzone są przy współpracy ZUOP; w przyszłości mogą dotyczyć opracowania kompleksowych metod unieszkodliwiania ciekłych, niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych powstających w elektrowni jądrowej. Badania są wykonywane od lat w ramach licznych projektów badawczych, grantów instytucji zewnętrznych, projektów strategicznych i na bezpośrednie zlecenie ZUOP.
- Rozwój nowoczesnych metod kondycjonowania i zestawiania odpadów promieniotwórczych; badania nad zestawianiem odpadów radioaktywnych o różnej aktywności w szklach krzemionkowych oraz matrycach ceramicznych (np. materiały typu Synroc) [9, 10]. Prace te były prowadzone m.in. w zadaniu badawczym Nr 4 „Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi”, w ramach Strategicznego Programu Badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”.
- Badania nad unieszkodliwianiem odpadów stałych wybranych kategorii [11]; prace we współpracy z ZUOP i innymi ośrodkami badawczymi w kraju i na świecie. W roku 2020 ZUOP, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla wraz IChTJ, przygotowali wstępny raport dotyczący budowy doświadczalnej instalacji spalania odpadów, która miała-

by poprzedzić wdrożenie metody termicznego unieszkodliwiania promieniotwórczych odpadów organicznych w ZUOP.

- Badania nad nowoczesnymi metodami przeróbki wypalonego paliwa jądrowego, uwzględniające oddzielenie aktywności mniejszościowych od produktów rozszczepienia. Prace nad nowymi ligandami umożliwiającymi separację La/Ac oraz ewentualny rozdział aktywności (np. kiur od ameryku); ekstrakcja technetu, udział w opracowaniu schematu procesu EURO-GANEX w celu recyklingu plutonu i aktywności mniejszościowych. Badania nad zagadnieniami ekstrakcji rozpuszczalnikowej zastosowanej w zaawansowanych procesach przeróbki wypalonego paliwa są od lat prowadzone przez IChTJ m.in. w ramach projektów europejskich, w konsorcjach prowadzonych przez produkuje instytucje francuskie (projekty EUROPART, ASGARD, SACSESS, GENIORS) [12, 13].
- Prace nad rozwojem technologii składowania odpadów promieniotwórczych z uwzględnieniem badań nad nowymi barierami ochronnymi (chemicznymi, fizycznymi oraz inżynierskimi). IChTJ w konsorcjum złożonym z instytucji krajowych kierowanych przez Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) wykonał pracę „Opracowanie metodyki oceny bezpieczeństwa i wskazanie optymalnej lokalizacji płytkiego składowania odpadów promieniotwórczych nisko- i średnioaktywnych”. Dalsze prace naukowo-badawcze dotyczące technologii składowania są rozwijane w miarę postępu projektu. Trwają również badania nad nowymi barierami ochronnymi opartymi m.in. na materiałach pochodzenia naturalnego [14, 15]. Zapewnienie bezpieczeństwa zamkniętych i nowych składowisk odpadów promieniotwórczych leży w zakresie zainteresowań IChTJ i jest jednym z celów prowadzonych w instytucie badań. Prowadzona jest ocena migracji radionuklidów i innych zanieczyszczeń w sąsiedztwie składowisk odpadów radioaktywnych przy użyciu adekwatnego oprogramowania, z wykorzystaniem kodów obliczeniowych do symulacji ruchu zanieczyszczeń w geosferze i modelowania transportu [16]. Wyniki symulacji pozwalają prognozować zachowanie repozytorium podczas długotrwałej eksploatacji.
- IChTJ jest również zainteresowany pracami nad składowiskiem głębokim, które mogłyby być zainicjowane budową Polskiego Podziemnego Laboratorium Badawczego (PURL), na wzór podobnych stacji doświadczalnych w krajach rozwijających technologie składowania geologicznego. W roku 2014 powstała grupa inicjatywna zrzeszająca instytucje mające wymagane do budowy takiego laboratorium kompetencje i doświadczenie wy-

niesione z przeszłości, m.in. ze realizowanego w latach 1997-1999 Strategicznego Programu Rządowego „Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym”, w którym IChTJ również uczestniczył. Jednym z celów przyszłościowych będzie opracowanie programu badań dla PURL. Program taki był zarysowany już w roku 2014; plan budowy podziemnego laboratorium został włączony do Krajowego Planu i ma być kontynuowany w przyszłości. IChTJ jest członkiem Platformy Składowania Geologicznego, w ramach, której współpracuje z instytucjami europejskimi, zajmującymi się problemami składowania wypalonego paliwa jądrowego.

- Opracowanie metod fizyko-chemicznych wytwarzania paliw dla reaktorów II i III generacji z uwzględnieniem recyklingu uranu i plutonu [17]. Prace dotyczą rozwoju technologii produkcji spiekalnego ditlenku uranu w postaci paliw klasycznych (pastylki) i paliw sferycznych, a także opracowania metod chemicznych wytwarzania prekursorów paliw mieszanych typu MOX oraz analizy możliwości stosowania paliw mieszanych o różnym składzie. Były prowadzone w projekcie ACSEPT [18] i w Etapie Nr 4 pt. „Opracowanie metod chemicznych wytwarzania tlenkowych prekursorów paliwa jądrowego”, w ramach zadania badawczego Nr 3 „Podstawy zabezpieczenia potrzeb paliwowych polskiej energetyki jądrowej” realizowanego przez IChTJ w ramach strategicznego projektu badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”.
- Prace nad rozwojem technologii produkcji nowych paliw do reaktorów III+ i IV generacji w powiązaniu z separacją i recyklingiem aktywności. Prace były prowadzone w ramach różnych projektów krajowych i europejskich. W przyszłości mogą być dalej rozwijane w kierunkach:
  - dalszego rozwoju technologii produkcji sferycznych paliw jądrowych – ditlenku uranu i węgla uranu, zawierających aktywność mniejszościowe wydzielone z wypalonego paliwa jądrowego, w celu transmutacji jądrowej długożyciowych aktywności do izotopów krótkożyciowych w reaktorach prędkich IV generacji;
  - opracowania metod chemicznych wytwarzania paliw mieszanych z aktywnościami mniejszościowymi oraz analizy możliwości stosowania różnego ich składu;
  - prac nad wykorzystaniem wyodrębnionych pierwiastków z wypalonego paliwa do wytwarzania matryc inertnych (np. stabilizowany ditlenek cyrkonu) w celu transmutacji długożyciowych produktów rozszczepienia oraz aktywności w reaktorach prędkich oraz w re-

aktorach podkrytycznych sterowanych przez zewnętrzne źródło neutronów (ADS);

- prac nad rozwojem technologii wykorzystania wyodrębnionych pierwiastków z wypalonego paliwa do wytwarzania prekursorów paliw do reaktorów nowej generacji – uranowych paliw węglkowych i azotkowych;
- badań dotyczących fizyko-chemicznych aspektów technologii produkcji nowoczesnych paliw jądrowych (paliwa sferyczne, pastylki).

Badania nad nowoczesnymi paliwami były już prowadzone w ramach europejskiego 7 Programu Ramowego UE (EURATOM) – projektu Advanced fuels for Generation IV reActors: Reprocessing and Dissolution (ASGARD), a także w ramach strategicznego projektu badawczego.

W powiązaniu z PPEJ został ustanowiony w 2011 r. przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) Strategiczny Program badawczy „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”, którego zadanie nr 4 „Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi” było koordynowane i w dużym zakresie wykonywane, w IChTJ [19]. Głównym celem tego zadania były badania naukowe i prace rozwojowe nad metodami przerobu, przetwarzania, przechowywania i ostatecznego składowania wypalonego paliwa jądrowego oraz odpadów promieniotwórczych, które powstaną w trakcie eksploatacji przyszłych elektrowni jądrowych w kraju. W ramach zadania nr 4 zrealizowano następujące prace:

- Rozwój technik i technologii w zakresie wyodrębnienia plutonu i długożyciowych aktywności;
- Techniki i technologie przeróbki wypalonego paliwa poprzez transmutację jego komponentów w reaktorach na neutrony prędkie;
- Rozwój technologii przerobu nisko i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych;
- Zmniejszenie radiotoksyczności odpadów promieniotwórczych, w tym metodami radiochemicznymi;
- Fizykochemiczne technologie kondycjonowania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa;
- Wykorzystywanie wyodrębnionych pierwiastków z wypalonego paliwa do wytwarzania prekursorów paliwa dla reaktorów nowej generacji.

Strategiczny Program Badawczy był ważnym elementem inwentaryzacji i konsolidacji badań prowadzonych w kraju; miał w swoim założeniu być również istotnym wsparciem dla rozpoczętego PPEJ. Wiadomo, że zasadniczym krokiem w definiowaniu strategii i formowaniu odpowiednich przepisów dotyczących unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych jest równoległy plan badań naukowych i rozwoju w zakresie charakterystyki, przetwarzania i składowania



tychże odpadów. Program strategiczny zakładał pozyskanie wyników, które mogłyby zostać wykorzystane przez szerokie grupy odbiorców, m.in. organy administracji państwowej, osoby podejmujące decyzje o budowie elektrowni jądrowych w kraju i zakresie zastosowania w nich krajowych technologii przeróbki odpadów promieniotwórczych, ośrodki zajmujące się zastosowaniem izotopów, jednostki produkujące izotopy i substancje znaczone, zakłady medycyny nuklearnej, a w przyszłości elektrownie jądrowe, w których zagospodarowanie ciekłych, niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych będzie ważnym problemem do rozwiązania.

Realizacja różnorodnych zadań związanych z Programem Polskiej Energetyki Jądrowej nakłada nowe obowiązki na organizacje zajmujące się problematyką odpadów promieniotwórczych. Do tych obowiązków należy przede wszystkim budowa nowego składowiska odpadów nisko i średnioaktywnych, w którą muszą być zaangażowane instytucje i eksperci z różnych dziedzin. Prace nad składowiskiem zaowocowały ści-

śle współpracą pomiędzy instytucjami: Instytutem Chemii i Techniki Jądrowej, Państwowym Instytutem Geologicznym-Państwowym Instytutem Badawczym (PIG-PIB) oraz ZUOP. Instytucje te wspólnie pracują nad zagadnieniami związanymi z zamknięciem starego obiektu w Róźnie i wyborem lokalizacji dla nowego składowiska. IChTJ i ZUOP ustaliły wstępnie wspólny program badawczy dotyczący opracowania procedur przetwarzania odpadów składowanych w nowym obiekcie oraz kryteriów akceptacji odpadów w przypowierzchniowym składowisku dla nisko i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych. Aby zapewnić długoterminowe wymagania bezpieczeństwa eksploatacyjnego, należy opracować odpowiednie procedury przyjmowania odpadów na składowisko oraz metodologię procesu odbioru. Stanowi to niezbędny etap, konieczny do opracowania analizy bezpieczeństwa przedkładanej do oceny regulatora, Państwowej Agencji Atomistyki.

**Tabela 2.** Projekty związane z odpadami promieniotwórczymi w 6 i 7 Programie Ramowym UE (FP6, FP7)

**Table 2.** Projects related to radioactive waste in the 6th and 7th Framework Programs of the EU (FP6, FP7)

Akronim, strona www	Projekt	Komentarz
EUROPART (FP6) <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/508854">https://cordis.europa.eu/project/id/508854</a>	EUROpean research program for the PARTitioning of minor actinides and some long-lived fission products from high active wastes issuing the reprocessing of spent nuclear fuels	Opracowanie strategii postępowania z odpadami wysokoaktywnymi pochodzącymi z przerobu wypalonego paliwa jądrowego, separacja aktywności
ACSEPT <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/211267/fr">https://cordis.europa.eu/project/id/211267/fr</a>	Actinide recycling by separation and transmutation	Przerób wypalonego paliwa, separacja aktywności
SACSESS <a href="http://www.sacsess.eu/">http://www.sacsess.eu/</a>	Safety of actinide separation processes	Przerób wypalonego paliwa, separacja aktywności
ASGARD <a href="http://www.asgard-project.eu/">http://www.asgard-project.eu/</a>	Advanced fuels for Generation IV reactors: reprocessing and dissolution	Przerób wypalonego paliwa, separacja aktywności; nowoczesne paliwa jądrowe
IPPA <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/269849">https://cordis.europa.eu/project/id/269849</a>	Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal	Wprowadzanie składowisk do przestrzeni publicznej debaty, zagadnienia społeczne związane ze składowaniem geologicznym
NEWLANCER <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/295826">https://cordis.europa.eu/project/id/295826</a>	New MS linking for an advanced cohesion in Euratom research	M.in. studia dotyczące ryzyka, bezpieczeństwa i aspektów środowiskowych odpadów promieniotwórczych (powstała grupa pracująca nad odpadami)
PLATENSO <a href="https://igdtp.eu/activity/platenso-building-a-platform-for-enhanced-societal-research-related-to-nuclear-energy-in-central-and-eastern-europe/">https://igdtp.eu/activity/platenso-building-a-platform-for-enhanced-societal-research-related-to-nuclear-energy-in-central-and-eastern-europe/</a>	Building a platform for enhanced societal research related to nuclear energy in Central and Eastern Europe	Pośrednio dotykał kwestii odpadów radioaktywnych (niektóre fragmenty dotyczyły odpadów promieniotwórczych, zagadnień bezpieczeństwa)
EAGLE <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/604521">https://cordis.europa.eu/project/id/604521</a>	Enhancing education, training and communication processes for informed behaviors and decision-making related to ionizing radiation risks	Pośrednio dotykał kwestii odpadów radioaktywnych (niektóre fragmenty dotyczyły odpadów promieniotwórczych, zarządzania ryzykiem przy składowaniu)

ARCADIA <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/605116">https://cordis.europa.eu/project/id/605116</a>	Assessment of regional capabilities for new reactors development through an integrated approach	Pośrednio dotyczył kwestii odpadów radioaktywnych (niektóre fragmenty dotyczyły odpadów; aspekty bezpieczeństwa i odpadów promieniotwórczych przy wdrażaniu reaktora prędkiego chłodzonego ołowiem, ALFRED)
TALISMAN <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/323300/pl">https://cordis.europa.eu/project/id/323300/pl</a>	Transnational Access to Large Infrastructure for a Safe Management of ActiNide	Tworzenie sieci między istniejącymi europejskimi infrastrukturami w dziedzinie nauk o aktywnościach i ich zachowaniu w materiałach paliwowych podczas procesów separacji i po umieszczeniu w składowisku geologicznym

**Tabela 3.** Projekty związane z odpadami promieniotwórczymi w programie Horyzont 2020 (H2020)**Table 3.** Projects related to radioactive waste in the Horizon 2020 program (H2020)

Akronim, strona www	Projekt	Komentarz
CHANCE <a href="https://www.chance-h2020.eu/">https://www.chance-h2020.eu/</a>	Characterization of conditioned nuclear waste for its safe disposal in Europe	Opracowanie nowych metod charakteryzowania kondycjonowanych odpadów promieniotwórczych
GENIORS GEN IV <a href="http://www.geniors.eu/">http://www.geniors.eu/</a>	Integrated Oxide fuels recycling strategies	Poprawa obecnego recyklingu wypalonego paliwa jądrowego i przyszłych strategii wielokrotnego recyklingu, które mają zostać wdrożone w reaktorach czwartej generacji
EURAD <a href="https://cordis.europa.eu/project/id/847593">https://cordis.europa.eu/project/id/847593</a>	European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD)	Europejski Wspólny Program Gospodarki Odpadami Promieniotwórczymi, który ma pomóc państwom członkowskim UE wdrożyć dyrektywę 2011/70 / Euratom poprzez współpracę z ich programami krajowymi
DISCO <a href="https://www.disco-h2020.eu/">https://www.disco-h2020.eu/</a>	Modern Spent Fuel Dissolution and Chemistry in Failed Container Conditions	Zagadnienia składowania odpadów, IChTJ – w Grupie Stowarzyszonej
SHARE <a href="https://share-h2020.eu/">https://share-h2020.eu/</a>	A Roadmap for Research in Decommissioning	Koordinacja działań w dziedzinie likwidacji obiektu jądrowego i jego późniejszego demontażu: ustanowienie mapy drogowej i strategicznej agendy badawczej

### Współpraca międzynarodowa – projekty UE

Prace badawcze w IChTJ wspierane są silnie przez rozwiniętą współpracę międzynarodową, m.in. w ramach projektów ramowych UE, Euratomu i projektów IAEA (Tabela 2, Tabela 3). Obecnie instytut jest partnerem w dwóch projektach dotyczących odpadów promieniotwórczych: EURAD i CHANCE. W dalszych dwóch: DISCO i SHARE, uczestniczy w innej formie.

Inicjatywa EURAD, nie jest w zasadzie pojedynczym projektem badawczym w tradycyjnym rozumieniu, ale grupuje w sobie wiele projektów dotyczących zagadnień i problemów nurtujących kraje członkowskie UE, do tej pory nie do końca rozwiązanych. Europejski wspólny program zarządzania odpadami promieniotwórczymi (EURAD) powstał w oparciu o wcześniejsze prace przygotowawcze projektu Komisji Europejskiej JOPRAD (Towards Joint Programming on Radioactive Waste Disposal), wsparte dekadami prac badawczo-rozwojowych wspierających bezpieczne gospodarowanie

odpadami promieniotwórczymi i ich składowanie. Celem EURAD jest koordynowanie działań na podstawie uzgodnionych priorytetów i wspólnych interesów europejskich organizacji gospodarki odpadami (WMO), organizacji wsparcia technicznego (TSO) i jednostek badawczych (RE). Taki program ma za zadanie uzupełniać krajowe programy badawczo-rozwojowe poprzez wspólne ustanawianie i wspólne prowadzenie działań o wartości dodanej na poziomie europejskim. Opiera się on na już istniejących i powstających sieciach podmiotów europejskich (sieć IGD-TP, SITEX i sieć REs) poprzedzających działania koordynacyjne i wspierające (w szczególności sekretariat Platformy Składowania Geologicznego SeclGD2, projekty SITEX-II i JOPRAD). Wspólny program, pogłębiający współpracę między europejskimi podmiotami w dziedzinie gospodarki odpadami promieniotwórczymi, ma generować wiedzę i zarządzać nią w celu wsparcia państw członkowskich UE we wdrażaniu dyrektywy 2011/70/Euratom (dyrektywa w sprawie odpadów), uwzględniając różny zakres

i etapy zaawansowania programów krajowych państw członkowskich. Obejmuje to:

- Wspieranie państw członkowskich w opracowywaniu i wdrażaniu ich krajowych programów badań i rozwoju w celu bezpiecznego, długoterminowego gospodarowania pełną gamą różnych odpadów promieniotwórczych, poprzez udział we wspólnym programie RWM;
- Konsolidację istniejącej wiedzy w celu bezpiecznego rozpoczęcia eksploatacji pierwszych obiektów geologicznego składowania wypalonego paliwa jądrowego, odpadów wysokoaktywnych i innych długożyciowych odpadów promieniotwórczych oraz wspieranie optymalizacji związanej ze stopniową realizacją składowania geologicznego;
- Poprawę zarządzania wiedzą i jej transferu między organizacjami, państwami członkowskimi i pokoleniami.

Pracom badawczo-rozwojowym zaplanowanym w projekcie EURAD towarzyszą studia strategiczne i programy zarządzania wiedzą, m.in. poprzez szkolenia i mobilność młodych pracowników nauki.

Projekt CHANCE (Characterization of Conditioned Nuclear Waste for its Safe Disposal in Europe) dotyczy charakteryzowania kondycjonowanych odpadów promieniotwórczych w celu ich bezpiecznego przechowywania i składowania w istniejących już składowiskach ostatecznych. Zarówno czasowe przechowywanie, jak i ostateczne składowanie wymaga pełnej charakterystyki i stałej kontroli jakości odpadów kondycjonowanych. Projekt CHANCE ma na celu skuteczne rozwiązanie złożonego problemu charakteryzacji tych odpadów za pomocą nieniszczących technik i metod analitycznych. Metody charakteryzowania opracowywane w ramach projektu obejmują zarówno charakterystykę fizyko-chemiczną, jak i radiologiczną. Projekt, poprzez odpowiednie ankiety i analizy, ma pozwolić na kompleksowe zrozumienie obecnie stosowanych metod charakteryzacji i schematów kontroli jakości kondycjonowanych odpadów promieniotwórczych w Europie. Ponadto, w ramach projektu, są opracowywane, testowane i weryfikowane nowe techniki analityczne, które mają poprawić i uzupełnić charakterystykę odpadów. Są to:

- Kalorymetria, jako innowacyjna, nieniszcząca technika zmniejszająca niepewność identyfikacji obecnych w odpadach radionuklidów i ich stężeń;
- Tomografia mionowa opracowana w celu rozwiązania problemu nieniszczącej kontroli zawartości objętościowo dużych odpadów jądrowych;
- Pierścieniowa spektroskopia węglowa (CRDS), innowacyjna technika charakteryzująca gazy emitowane przez odpady radioaktywne.

ICHJT posiada również rozwiniętą współpracę w zakresie technologii przeróbki odpadów nisko i średnioaktywnych oraz metod ich składowania.

W ramach projektu Euratomu, NEWLACER, współpracował z ośrodkami z regionu: z Rumunii, Słowenii, Litwy, Węgier, które również budują składowiska odpadów nisko i średnioaktywnych, a także z Francji, Belgii i Włoch. Wszystkie te kraje prowadzą zaawansowane prace badawcze nad technologiami postępowania z odpadami promieniotwórczymi, m.in. dotyczące procesów towarzyszących składowaniu, wsparte modelowaniem i symulacjami komputerowymi oraz badaniem migracji już na etapie projektowania składowisk odpadów oraz w trakcie ich działania. Współpraca z tymi krajami jest kontynuowana w ramach kolejnych projektów europejskich.

Zajęcie się problematyką składowania odpadów promieniotwórczych stwarza możliwość pełnego włączenia się ICHJT w europejski nurt badawczy poprzez wejście w konsorcja realizujące duże projekty naukowe finansowane z funduszy europejskich. Kontakty w ramach ewentualnych umów bilateralnych, wizyty w instytucjach europejskich oraz udział w międzynarodowych konferencjach naukowych, poszerzają paletę zainteresowań i rozwijają istniejące kompetencje o nowe, przydatne przy budowie nowego składowiska płytkiego i realizacji programu składowania geologicznego, umiejętności.

Prace związane z przerobem wypalonego paliwa jądrowego prowadzone są w ICHJT głównie w powiązaniu z projektami Euratomu i z udziałem w programach ramowych UE. Pierwszy projekt Europejski dotyczący separacji aktynowców, w którym uczestniczyły zespoły ICHJT, EUROPART (EUROPEAN research program for the PARTitioning of minor actinides and some long-lived fission products from high active wastes issuing the reprocessing of spent nuclear fuels), realizowany był w 6 Ramowym Programie (FP6). Kolejne projekty to ACSEPT (Actinide recycling by separation and transmutation), SACSESS (Safety of actinide separation processes), ASGARD (Advanced fuels for Generation IV reactors: reprocessing and dissolution) i obecnie, wykonywany w ramach Horyzontu 2020 GENIORS (GEN IV Integrated oxide fuels recycling strategies).

Projekty Euratomu stanowiły kontynuację prowadzonych wcześniej w ICHJT prac nad ekstrakcyjnymi metodami oddzielania aktynowców od lantanowców i innych produktów rozszczepienia uranu. Badania ukierunkowane były m.in. na optymalizację procesu selektywnego wydzielania długożyciowych aktynowców (ameryk, kiur) z wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych za pomocą nowych ekstrahentów poli-N-heterocyklicznych. Prace uzupełnione były badaniami odporności radiacyjnej ekstrahentów oraz opracowaniem metod konwersji ameryku i kiuru z roztworów wodnych w tlenki dodawane do paliwa typu MOX w celu transmutacji radiotoksycznych aktynowców w reaktorach IV generacji.



## Współpraca naukowa w ramach MAEA

Ważny rozdział w pracach IChTJ stanowi udział w projektach koordynowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA-CRP). Projekty MAEA posiadające szerszy niż europejski wymiar, umożliwiają stały kontakt z nauką światową i wymianę doświadczeń pomiędzy zespołami; stanowią bazę do dalszej współpracy. Podejmują również wyzwania globalne, często niewidoczne z poziomu krajowego, a niejednokrotnie inspirujące do nowych działań. Bywają również potwierdzeniem słuszności wybranych w kraju kierunków badawczych i rozwojowych. Przykładem tego, są poszukiwane od paru lat przez ZUOP metody unieszkodliwiania odpadów organicznych. Efektywnym rozwiązaniem wydają się metody termiczne, rozpoznane poprzez zorganizowany dialog techniczny, wizyty studyjne w ośrodkach zagranicznych, wreszcie podjęcie współpracy z krajowymi, wyspecjalizowanymi instytutami, m.in. z IChTJ. Rozważając zastosowanie metod termicznych do przetwarzania odpadów organicznych, IChTJ podjął prace w ramach IAEA CRP T13017 "Management of Wastes Containing Long-lived Alpha Emitters: Characterization, Processing and Storage" zgłaszając projekt pt. „Management of Radioactive Organic Waste Containing Long-lived Alpha Emitters”. Celem CRP jest lepsze poznanie istniejącego inwentarza odpadów alfa-promieniotwórczych i jego różnorodności, a następnie metod postępowania, zwłaszcza z odpadami o wysokiej zawartości radionuklidów alfa, tak, aby końcowy produkt, mógł spełnić kryteria przyjęcia odpadów do przechowywania i ostatecznego składowania. Ważną kategorią odpadów alfa-promieniotwórczych są odpady organiczne będące przedmiotem zainteresowania ZUOP, jak również CRP T13017. Zrozumienie zakresu problemów związanych z zagospodarowaniem odpadów alfa-promieniotwórczych i ich wspólne rozwiązywanie przez naukowców, dostawców technologii oraz właścicieli i operatorów składowisk odpadów jądrowych, ma umożliwić łatwiejsze sprostanie wyzwaniom stawianym przez współczesną energetykę jądrową. Stworzenie katalogu obiecujących rozwiązań pozwoli partnerom projektu wybrać podejście zgodne z istniejącym stanem techniki i adekwatne do ich aktualnych potrzeb.

Innym przykładem dostosowania działań w ramach IAEA CRP do potrzeb krajowych był projekt I35005 „Application of Advanced Low Temperature Desalination Systems to Support Nuclear Power Plants and Non-electric Applications”, do którego IChTJ dołączył. Celem ogólnym CRP była poprawa ekonomiki i możliwości chłodzenia współczesnych reaktorów jądrowych. Wytwarzane w nich ciepło może być wykorzystane w systemach odsalających zaopatrujących elektrownie w wodę wykorzystywaną do chłodzenia

reaktora, również w przypadku wystąpienia awarii. W pracach IChTJ zaproponowano użycie ciepła z reaktorów jądrowych do wykorzystania w systemach membranowych odsalania, produkujących wodę na potrzeby elektrowni jądrowej, a także do oczyszczania ciekłych niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych.

## Społeczny wymiar zarządzania odpadami radioaktywnymi

Nieodłącznym elementem zarządzania odpadami promieniotwórczymi na wszystkich etapach ich zagospodarowania jest dialog ze społeczeństwem. Osiągnięcie porozumienia ze społecznościami lokalnymi i uzyskanie ich akceptacji dla budowy obiektów przechowywania i składowania odpadów radioaktywnych jest warunkiem powodzenia takich projektów.

Zagadnienia związane z zagospodarowaniem odpadów promieniotwórczych, podobnie jak i energetyka jądrowa, budzą kontrowersje ograniczające możliwość działania realizatorów takich projektów. Jest to szczególnie trudne przy projektowaniu składowisk odpadów wysokoaktywnych i wypalonego paliwa jądrowego. Kraje z zaawansowanymi programami składowania geologicznego (np. Finlandia, Szwecja) musiały przejść przez etap żmudnych działań społecznych na rzecz budowy tych obiektów. Nie wszędzie takie działania kończą się sukcesem. Przykłady krajów, takich jak: Niemcy, Francja, Szwajcaria czy Belgia mówią same za siebie: ambitne podejście zaangażowania społeczeństwa obywatelskiego poprzez konsultacje, debaty publiczne czy tworzenie specjalnych komitetów na rzecz porozumienia nie doprowadziły dotąd do społecznej zgody, a realizacja inwestycji w tych krajach może potrwać jeszcze długie lata.

Działania w społecznościach lokalnych muszą być również podjęte w Polsce, przy wyborze lokalizacji dla nowego składowiska nisko i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych. Wybór powinien zostać poprzedzony rozmowami z władzami lokalnymi, konsultacjami społecznymi i debatami publicznymi, które są rutynowymi działaniami angażowania społeczeństwa w procesy decyzyjne.

Aspekt społeczny, jako ważny element w postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi jest uwzględniany przy ustalaniu programów Euratomu. IChTJ brał udział w kilku projektach europejskich dotyczących tej tematyki. Metody i sposoby prowadzenia dialogu społecznego przy wdrażaniu składowisk odpadów promieniotwórczych były szeroko dyskutowane w ramach projektu IPPA (Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal). W projekcie została utworzona tzw. grupa referencyjna złożona z interesariuszy zaangażowanych w budowę nowego składowiska i przedstawicieli społeczeństwa, m.in.

organizacji proekologicznych. Grupa ta zorganizowała pierwsze wysłuchanie publiczne pod hasłem: Czy potrzebujemy nowego składowiska odpadów promieniotwórczych? Zgodnie z przyjętymi założeniami wysłuchanie miało na celu poinformowanie wszystkich interesariuszy o stanie przygotowań do budowy składowiska i złożoności związanych z tym zagadnień. Uczestnicy wysłuchania mogli znaleźć odpowiedzi na nurtujące ich pytania oraz przedstawić własne poglądy i oczekiwania organom odpowiedzialnym za przygotowanie inwestycji. Rozmowa miała na celu dostarczyć potrzebnych informacji, złagodzić obawy przed ewentualnymi zagrożeniami, a w konsekwencji zwiększyć zrozumienie dla planowanych działań. Dzięki obecności mediów publicznych (prasa, radio) informacja o wysłuchaniu dotarła do szerokich grup społecznych. Uczestnicy spotkania mogli zapoznać się nie tylko z opiniami na temat budowy składowiska, ale także z szerokim zakresem prac, które muszą poprzedzić jego budowę, w tym w obszarach komunikacji ze społeczeństwem. Potwierdzono również, że odpowiednia komunikacja społeczna jest przedmiotem troski państwa, a przejrzystość procesów decyzyjnych

jest nieodzownym elementem prawidłowego funkcjonowania społeczeństwa obywatelskiego [20].

Sposoby komunikacji społecznej wypracowane w ramach projektu IPPA mogą być zastosowane przy wyborze lokalizacji składowiska dla odpadów radioaktywnych w Polsce, a także w innych działaniach związanych z wdrażaniem instalacji zagospodarowania odpadów.

Metody komunikacji ze społeczeństwem, sposoby edukacji i informowania, były dalej rozwijane w ramach kolejnych projektów Euratomu: PLATENSO i EAGLE (Tabela 2), a obecnie również w projekcie EURAD realizowane jest zadanie poświęcone tym zagadnieniom.

### Podsumowanie

Rozwiązanie problemu bezpiecznego zagospodarowania odpadów promieniotwórczych wydaje się obecnie kluczowe dla szerokiego wykorzystania reaktorów jądrowych, jako głównego bezemisyjnego, trwałego i niezawodnego źródła energii. Prawidłowa informacja i komunikacja społeczna może ułatwić re-



Fot. 1. Czy potrzebujemy nowego składowiska odpadów promieniotwórczych? (fot. ICHTJ)

Photo 2. Do we need a new radioactive waste repository?

alizację projektów jądrowych i wypracować konsens wokół tak kontrowersyjnych obiektów, jak składowiska geologiczne. Udział nauki w rozwijaniu nowych technologii efektywnego przetwarzania i bezpiecznego składowania odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa jądrowego połączony z włączeniem ekspertów do debaty publicznej, wydaje się jedynym właściwym podejściem i gwarancją powodzenia programów jądrowych.

prof. dr hab. inż. Grażyna Zakrzewska,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa

#### Literatura:

- [1] IAEA, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards, No GSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [2] Perspektywiczne kierunki działalności naukowej, rozwojowej i wdrożeniowej Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, 27 czerwca 2019.
- [3] A. Miśkiewicz, A. Nowak, J. Pałka, G. Zakrzewska-Kołtuniewicz, Liquid Low-Level Radioactive Waste Treatment Using an Electrodialysis Process. *Membranes* 2021, 11, 324. <https://doi.org/10.3390/membranes11050324>
- [4] Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz, Advancement in Membrane Methods for Liquid Radioactive Waste Processing: Current Opportunities, Challenges, and the Global Scenario. In: Handbook of Membrane Separations, Chemical, Pharmaceutical, Food and Biotechnological Applications, Second Edition, ed. by A.K. Pabby, S. S.H. Rizvi, A.M. Sastre, CRC Press Taylor & Francis Group (2015), Pages 665-708.
- [5] Grażyna Zakrzewska-Trznadel, Advances in membrane technologies for the treatment of liquid radioactive waste, *Desalination*, 321 (2013) 119-130.
- [6] L. Fuks, A. Oszczak, E. Gniazdowska, D. Sternik, Calcium alginate and chitosan as potential sorbents for strontium radionuclide, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* (2014) 304(1):15-20.
- [7] Agnieszka Jaworska-Sobczak, Agnieszka Miśkiewicz, Grażyna Zakrzewska-Trznadel, Marian Harasimowicz, Koncepcja układu hybrydowego do przerobu ścieków radioaktywnych, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, vol.96 Membrany i Procesy Membranowe w Ochronie Środowiska, pod redakcją Michała Bodzka i Jacka Pelczera, Gliwice 2012, s. 181-186.
- [8] B. Danko, R.S. Dybczyński, Z. Samczyński, D. Gajda, I. Herdzik-Koniecko, G. Zakrzewska-Kołtuniewicz, E. Chajduk, K. Kulisa, Ion exchange investigation for recovery of uranium from acidic pregnant-leach solution, *Nukleonika*, 2017;62(3):213-221; doi: 10.1515/nuka-2017-0031.
- [9] Andrzej Deptuła, Magdalena Miłkowska, Wiesława Łada, Tadeusz Olczak, Danuta Wawszczak, Tomasz Smolinski, Fabio Zaza, Marcin Brykała, Andrzej G. Chmielewski, Kenneth C. Goretta, Sol-Gel Processing of Silica Nuclear Waste Glasses, *New Journal of Glass and Ceramics*, 2011, 1, 105-111.
- [10] T. Smolinski, A. Deptuła, T. Olczak, W. Łada, M. Brykała, P. Wojtowicz, D. Wawszczak, M. Rogowski, Fabio Zaza, Perovskite synthesis via complex sol-gel process to immobilize radioactive waste elements, January 2014, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 299(1):675-680.
- [11] L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, K. Kiegiel, G. Zakrzewska-Kołtuniewicz, Management of radioactive waste containing graphite: overview of methods, *Energies* 2020, 13(18), 4638; <https://doi.org/10.3390/en13184638> (registering DOI).
- [12] I. Herdzik-Koniecko, C. Wagner, M. Trumm, U. Mullich, B. Schimmelpfennig, J. Narbutt, A. Geist, P. J. Panak, "Do An(III) and Ln(III) ions form heteroleptic complexes with diglycolamide and hydrophilic BT(B)P ligands in solvent extraction systems? A spectroscopic and DFT study". *New J. Chem.*, 2019, 43, 6314-6322. DOI: 10.1039/c9nj00651f.
- [13] Ł. Steczek, J. Narbutt, M.-Ch. Charbonnel, P. Moisy: "Solvent extraction investigations on Pu(IV) and Th(IV) complexes with hydrophilic SO<sub>3</sub>-Ph-BTP and SO<sub>3</sub>-Ph-BTBP ligands", *Solv. Extr. Ion Exch.*, 2019, 37, 259-268. DOI: 10.1080/07366299.2019.1639366.
- [14] L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories (2018) *Applied Clay Science* 161:139-150.
- [15] L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, L. Maskalchuk, T. Leontieva, Clay-salt slimes of the JSC "Belaruskali" as potential engineering barriers in the radioactive waste repositories: sorption of Cs(I), Sr(II), Eu(III) and Am(III), (2017), *International journal of Environmental Science and Technology* 15(3).
- [16] Wioleta Olszewska, Agnieszka Miśkiewicz, Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz, Leszek Lankof, Leszek Pająk, Multi-barrier system preventing migration of radionuclides from radioactive waste repository, *Nukleonika* 2015;60(3):557-563.
- [17] M. Brykała, A. Deptuła, M. Rogowski, W. Łada, T. Olczak, D. Wawszczak, T. Smolinski, P. Wojtowicz, G. Modolo, Synthesis of microspheres of triuranium octaoxide by simultaneous water and nitrate extraction from ascorbate-uranyl sols, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, March 2014 DOI: 10.1007/s10967-013-2763-9
- [18] A. Deptuła, M. Brykała, W. Łada, T. Olczak, D. Wawszczak, G. Modolo, H. Daniels, A.G. Chmielewski, Synthesis of uranium and thorium dioxides by Complex Sol-Gel Processes (CSGP) Proceedings of the First ACSEPT International Workshop Lisbon, Portugal, 31 March – 2 April 2010.
- [19] Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi, Zadanie wykonane w ramach projektu strategicznego NCBR, Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej, raport pod redakcją Leona Fuksa, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2014.
- [20] Katarzyna Szczygłówna, Grażyna Zakrzewska. Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal (IPPA) FP7-269849, Deliverable 6.6 (2.9), Report summarizing hearing in Poland, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2013.



# ARTYKUŁY

## NIEZNANI POLSCY NAUKOWCY W PROJEKCIE MANHATTAN

### *Unknown Polish scientists in Manhattan Project*

Anna Kawalec, Łukasz Sawicki

**Streszczenie:** Amerykański Projekt Manhattan był jednym z największych na świecie programów badawczych przemysłu zbrojeniowego. Zaangażowano do niego ponad 100 000 osób – naukowców, inżynierów, techników i laborantów, robotników, pracowników administracji oraz żołnierzy. Program, pomimo swojego wojskowego charakteru i celów, dał podstawy do pokojowego wykorzystania energii jądrowej. Niestety w Polsce brak jest świadomości, nie tylko powszechnej, ale również w środowisku atomistycznym, że oprócz Józefa Rotblata i Stanisława Ulama, istotny wkład do Projektu wnieśli również trzej inni Polacy, a dokładniej potomkowie polskich emigrantów.

**Abstract:** The American Manhattan Project was one of the largest military research programs in the world. It engaged more than 100,000 individuals – scientists, engineers, technicians and laboratory staff, craft labour, administration and soldiers. The Project, despite its military character and aims, created a baseground for peaceful use of nuclear energy. Unfortunately, in Poland there is no awareness both in public and in nuclear society, that next to Joseph Rotblat and Stanislaw Ulam, a relevant contribution to the Project was given by three other Poles, precisely the descendants of Polish emigrants.

**Słowa kluczowe:** Projekt Manhattan, polscy naukowcy, Pawlicki, Konopiński, Cieśliński

**Keywords:** Manhattan Project, Polish scientists, Pawlicki, Konopinski, Cieslicki

#### Wstęp

Historia energetyki jądrowej oraz jej niechlubnej siostry, czyli broni jądrowej, na dobre rozpoczęła się w grudniu 1938 r. To właśnie wówczas niemieccy chemicy, Otto Hahn i Fritz Strassmann, bazując na badaniach zapoczątkowanych przez Włocha Enrico Fermiego, dokonali odkrycia zjawiska rozszczepienia jądra atomowego. Analizując uzyskane przez nich rezultaty, Lise Meitner oraz jej siostrzeniec Otto Frisch wysnuli hipotezę, że bombardując jądra uranu neutronami, rozbili je oni na dwa mniejsze jądra czemu, co niezwykle istotne, towarzyszyła emisja ogromnej ilości energii. Wiadomość o odkryciu wywołała wśród naukowców z całego świata wielkie poruszenie i rozpoczęła dyskusje nad możliwościami jego technicznego zastosowania. Energia jądrowa mogła bowiem zostać wykorzystana w sposób pokojowy, jako nowe źródło energii, ale również militarnie, do stworzenia broni o nieznanej jak dotąd sile rażenia. Obawy dotyczące tego drugiego pojawiły się wśród naukowców niemal od razu, szczególnie biorąc pod uwagę ogromne zainteresowanie, jakie wzbudziło ono wśród naukowców oraz wojskowych z nazistowskich Niemiec. Wybuch II wojny światowej, zaledwie kilka miesięcy po oficjalnym ogłoszeniu odkrycia, niesamowicie przyspieszył tempo badań prowadzonych nad nowo odkrytą reakcją, jak również w dużej mierze zdecydował o ich kierunku.

#### Projekt Manhattan a polskie akcenty

Tuż po wybuchu II wojny światowej pojawiły się głosy sugerujące, że w Niemczech rozpoczęto już prace nad militarnym wykorzystaniem reakcji rozszczepienia, a tym samym skonstruowaniem broni jądrowej. Posiadanie broni o tak wielkiej mocy wybuchu mogłoby zdecydować o wyniku dopiero co rozpoczętego konfliktu, jak również znacząco wpłynąć na panujący na świecie układ sił w perspektywie wielu lat. W tamtym czasie wielu europejskich naukowców zmuszonych zostało do emigracji, a miejscem, gdzie większość z nich znalazła zarówno schronienie, jak i pracę okazały się Stany Zjednoczone. To właśnie ci europejscy uczeni, w obawie, że to właśnie Niemcom, jako pierwszym uda się skonstruować broń jądrową (więcej na ten temat w artykule prof. Z. P. Zagórskiego w numerze 1/2007 PTJ), postanowili nakłonić amerykańskiego prezydenta do podjęcia działań, co zakończyło się sukcesem. Pierwsze prace za oceanem, wspierane w latach późniejszych również przez naukowców z Wielkiej Brytanii, rozpoczęły się już pod koniec października 1939 r. Z początku skromne przedsięwzięcie z niewielkim budżetem, z czasem przerodziło się w ogromny wojskowy i ściśle tajny projekt badawczo-konstrukcyjny o kryptonimie Projekt Manhattan. Jego głównym celem stało się opracowanie i skonstruowanie nowego typu broni, co miało zapobiec ewentualnemu powstaniu niemieckiego monopolu na broń jądrową. W Projekcie Manhattan wzięło udział łącznie ponad 100 tys. osób, wśród których, o czym niewiele wie, możemy znaleźć liczną reprezen-

tację osób o polskich korzeniach. Do najwybitniejszych, a tym samym najbardziej znanych należą oczywiście – urodzony we lwowskiej rodzinie żydowskiej matematyk Stanisław Ulam oraz pochodzący z Warszawy, również z rodziny polskich Żydów fizyk Józef Rotblat, późniejszy laureat Pokojowej Nagrody Nobla (wraz z ruchem Pugwash, 1995 r.). Polscy emigranci, a także ich potomkowie stanowili grupę co najmniej kilkudziesięciu osób, które znalazły zatrudnienie w laboratoriach, zakładach produkcyjnych, administracji, jak również w wojskowej ochronie terenów i obiektów objętych Projektem Manhattan. Pośród nich na szczególną uwagę zasługują – fizyk prof. Emil J. Konopiński, fizyk dr Gerard Pawlicki oraz metalurg inż. Marion Edward Cieślicki, wszyscy oni urodzili się w rodzinach polskich emigrantów.

### Dr Gerard Pawlicki – konstruktor aparatury dla pierwszego reaktora jądrowego

Dr Gerard Pawlicki urodzony w 1921 r., w rodzinie polskich emigrantów, którzy osiedlili się w Chicago, został fizykiem eksperymentalnym. Krótco po tym, jak uzyskał dyplom z fizyki na Uniwersytecie De Paul w Chicago, mając zaledwie 21 lat, został zatrudniony przy Projekcie Manhattan, jako członek działu oprzyrządowania Chicago Met Lab (Metallurgical Laboratory na

Uniwersytecie Chicago). Kluczowe okazało się tu jego doświadczenie w pracy z licznikami Geigera, którego nabrał podczas studiów. Znalazł się on w niezwykłym gronie 49 osób, pośród wybitnych naukowców, które miały możliwość na żywo obserwować uruchamianie pierwszego reaktora jądrowego stworzonego przez człowieka – Chicago Pile -1. Miało to miejsce dokładnie 2 grudnia 1942 r. na Uniwersytecie w Chicago. Grafitowo-uranowy stos, pozbawiony chłodzenia, wyposażony jedynie w pręty kontrolne osiągnął krytyczność o 15:25 czasu lokalnego i przez kilka minut pracował z mocą zaledwie 0,5 W. Dr Pawlicki był jednym z dwóch operatorów konsoli ze sprzętem pomiarowym. Sam po latach tak wspominał to wydarzenie:

*„Nasza dwójka siedziała przy konsoli sterowniczej reaktora. Konsola znajdowała się pod najwyższymi siedzeniami na północnym krańcu stadionu, około 200 stóp (red. około 61 m) od reaktora. Z naszej pozycji, widzieliśmy postępy eksperymentu poprzez wskazania mierników oraz rejestratorów. Słyszeliśmy przez intercom, co działo się w pomieszczeniu reaktora. Przyszliśmy elegancko ubrani na to specjalne wydarzenie i mieliśmy nadzieję, że sprzęt, za który nasza grupa była odpowiedzialna, nie zawiedzie, i nie zakłóci eksperymentu dra Fermiego”.*



Fot. 1. Zdjęcie grupowe wykonane podczas 20. rocznicy uruchomienia CP-1, 1962 r.; Gerard Pawlicki - najwyższy rząd, 4 od lewej [6]

Photo. 1. Group portrait taken on occasion of 20th anniversary of chain reaction initiation in CP-1, 1962; Gerard Pawlicki - the highest row, 4<sup>th</sup> from left [6]

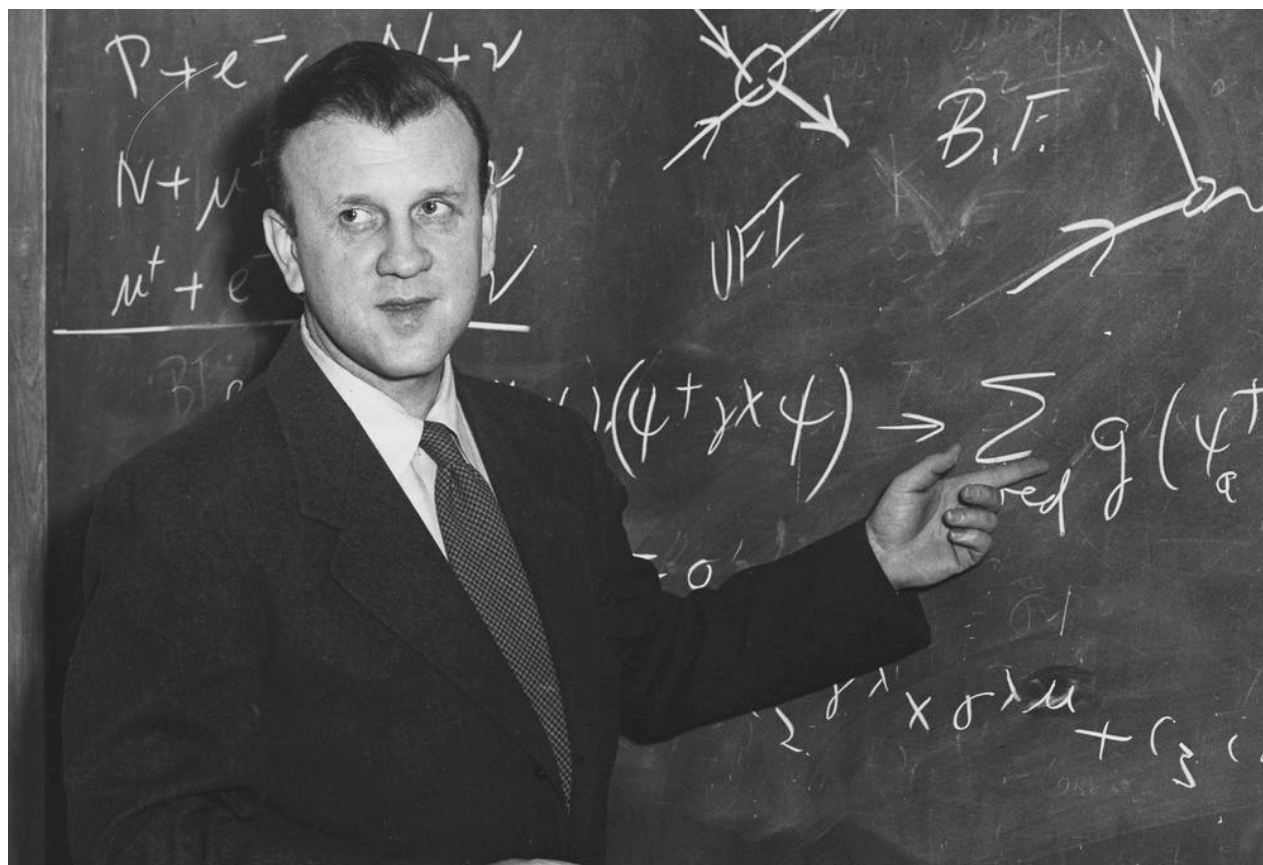
W późniejszym czasie dr Pawlicki był również uczestnikiem próbnej eksplozji pierwszej bomby wodorowej na atolu Bikini. Po wojnie pracował w Oak Ridge National Laboratory, gdzie zajmował się badaniami nad reakcjami wywołanymi neutronami powolnymi. Po ukończeniu studiów magisterskich oraz uzyskaniu stopnia doktora został wykładowcą na Argonne International School, gdzie prowadził pionierskie prace w zakresie analizy rdzenia reaktora, wykorzystując do tego wczesne komputery analogowe oraz cyfrowe. Zmarł w maju 2013 r.

### **Prof. Emil J. Konopiński – współautor koncepcji bomby jądrowej i termojądrowej**

**Prof. Emil J. Konopiński** urodzony w 1911 r, to kolejny naukowiec, fizyk teoretyk, z rodziny polskich emigrantów. Po uzyskaniu doktoratu na Uniwersytecie Michigan pracował jako stypendysta National Research Council w zespole Hans'a Bethe (Nagroda Nobla z fizyki z 1967 r.). W 1938 r. objął stanowisko profesora na Uniwersytecie Indiana. Znany był z badań nad oddziaływaniami słabymi oraz strukturami jądrowymi. Po wybuchu II wojny światowej dołączył do zespołu Enrico Fermiego w Chicago Met Lab na Uniwersytecie Chicago. Mniej więcej w tym samym czasie został również

członkiem zespołu badań teoretycznych założonego przez dyrektora naukowego Projektu Manhattan, Roberta Oppenheimera. Grupa ta prowadziła badania nad konstrukcją bomby jądrowej. Wykonane przez nich obliczenia wykazały, że zbudowanie bomby jest możliwe, co miało kluczowe znaczenie dla przyszłości całego Projektu Manhattan. Konopiński był również współautorem, obok Cloyda Marvina Jr oraz Edwarda Tellera, obecnie odtajnionej już pracy dowodzącej, że eksplozja broni jądrowej czy też termojądrowej nie spowoduje zapalenia się atmosfery i tym samym nie zniszczy Ziemi. Przypisuje się mu również pomysł wykorzystania trytu, jako elementu broni termojądrowej, który zresztą później zrealizowano. Tryt jest bowiem kluczowym składnikiem każdej bomby tego typu oraz podstawowym „paliwem” do pracy eksperymentalnych reaktorów fuzyjnych, w tym budowanego we Francji reaktora ITER, a w przyszłości również elektrowni termojądrowych.

Po wojnie powrócił do wcześniej prowadzonych przez siebie badań oraz nauczania. Dodatkowo w latach 1946-1968 pełnił funkcję konsultanta amerykańskiej Komisji Energii Atomowej, poprzednika dzisiejszej Komisji Dozoru Jądrowego (US Nuclear Regulatory Commission). Prowadzony na uczelni przez niego ze-



Fot. 2. Emil J. Konopiński [11]

Photo. 2. Emil J. Konopinski [11]



spół wniósł istotny wkład w analizie eksperymentów dotyczących rozpadów beta, koncepcję leptonów oraz w relację pomiędzy modelami jądrowymi a rozpadami beta [oryg. *He and his students made major contributions to the analysis of beta-decay experiments in terms of fundamental couplings, to the concept of lepton conservation and to the relations between nuclear models and beta decay*]. Prowadzone przez niego badania zwieńczyła wydana w 1966 roku monografia – *The Theory of Beta Radioactivity*. Był on również autorem dwóch cenionych podręczników – *Classical Descriptions of Motion* (1966) oraz *Electromagnetic Fields and Relativistic Particles* (1981). Jako nauczyciel akademicki był uwielbiany przez studentów, co również przełożyło się na przyznanie mu uniwersyteckiej nagrody dla najlepszego dydaktyka, jak również specjalnej nagrody przygotowanej przez samych absolwentów jego kursów. Na tej drugiej widniał napis:

*„[Prof. Konopińskiego charakteryzuje] niezwykła zdolność przekazywania trudnych tematów z entuzjazmem i jasnością. Na zajęciach kładzie nacisk na zrozumienie podstawowych idei fizyki, jak również ich ważnych zastosowań. Ponadto, jego przyjazny stosunek do studentów zachęca do zadawania pytań oraz dyskusji, które pomagają zrozumieć [omawiane tematy]”.*

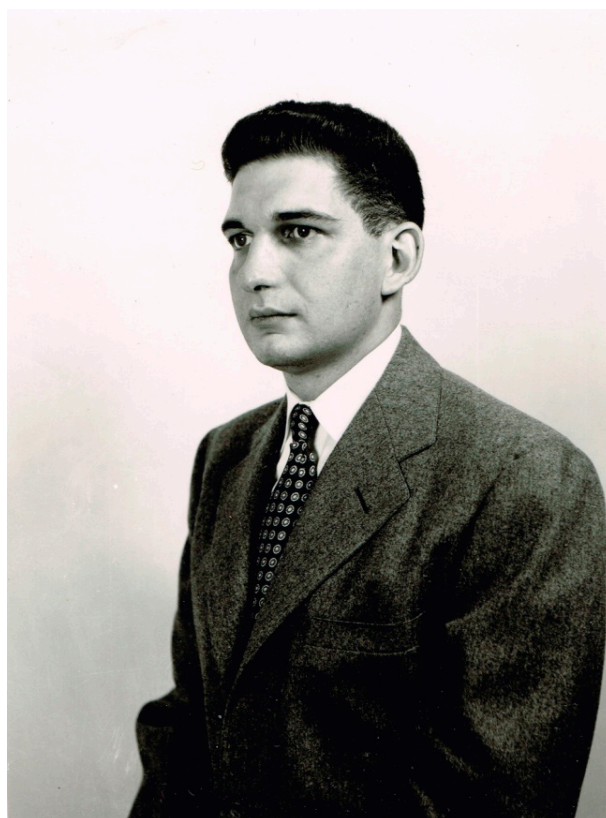
Zmarł w maju 1990 r. z powodu problemów kardiologicznych.

### Inż. Marion Edward Cieśllicki – badacz masy krytycznej oraz inicjacji wybuchu bomby

**Inż. Marion<sup>1</sup> Edward Cieśllicki** to urodzony w 1923 r., polsko-amerykański inżynier metalurg. Tuż po uzyskaniu dyplomu w zakresie metalurgii na Carnegie Institute of Technology, został zwerbowany do pracy przy Projekcie Manhattan, w którym uczestniczył w latach 1944-1946, pracując zarówno na Uniwersytecie Chicago, jak i w Los Alamos. Zajmował się opracowaniem sposobu zainicjowania wybuchu bomby jądrowej oraz badaniami prowadzonymi nad tematem masy krytycznej.

Był jedną z ośmiu osób obecnych w laboratorium w Los Alamos, podczas przeprowadzania feralnego w skutkach doświadczenia nad masą krytyczną, do którego doszło 21 maja 1946 r. W wyniku nieszczęśliwego wypadku, Louis Slotin, odpowiedzialny za przebieg eksperymentu, doprowadził do przypadkowego

przekroczenia masy krytycznej, co poskutkowało emisją dużej dawki promieniowania jonizującego gamma oraz neutronowego. Mający wówczas zaledwie 23 lata Cieśllicki otrzymał, jak podaje sporządzony w 1972 r. raport, relatywnie małą dawkę, a mianowicie: 0,12 Gy od promieniowania neutronowego oraz 0,04 Gy od promieniowania gamma [13]. Zaledwie cztery dni po wypadku, gazety powiadomiły, że tuż po incydencie Cieśllicki zapewnił telefonicznie swoją matkę, że jego stan nie jest zbyt poważny i opuści on szpital po zaledwie jednodniowej obserwacji. W trakcie rozmowy nie mógł on ujawnić dokładnej przyczyny wypadku ani również tego, w jakim stopniu został on nim dotknięty. Biuro ochrony projektu wydało natomiast oświadczenie wskazujące, że wypadek miał miejsce „podczas pracy z materiałem rozszczepialnym”, jednocześnie przekonując, że nie towarzyszyła mu żadna eksplozja. Wspomniany wcześniej raport podaje również, że Cieśllicki cieszył się dobrym zdrowiem aż do roku 1964 (18 lat po incydencie). Wówczas to właśnie zdiagnozowano u niego ostrą białaczkę szpikową. Pierwsze miesiące leczenia przyniosły wprawdzie remisję, lecz z czasem jego stan ponownie zaczął się pogarszać. Zmarł w wieku 42 lat, czyli 19 lat po incydencie w Los Alamos, przy czym nie można jednoznacznie stwierdzić, że wypadek z 1946 r. był jedyną przyczyną jego śmierci. Zanim to jednak nastąpiło, tuż po wojnie powrócił na uczelnię, po czym



Fot. 3. Marion Edward Cieśllicki [12]  
Photo. 3. Marion Edward Cieslicki [12]

<sup>1</sup> Możliwe, że imię nadane przez polskich rodziców brzmiało „Marian”, jednak z uwagi na jego anglojęzyczną wymowę, która mogłaby sugerować żeńską płeć (podobieństwo do popularnego wówczas „Mary Ann”) zostało ono nieco zmienione przez rodziców lub samego Cieśllickiego. Niestety brak jest ogólnodostępnych informacji na ten temat.

podjął pracę dla Wyman-Gordon oraz General Electric, zostając ważną postacią przemysłu metalurgicznego. W 1957 r. opracował bezpośrednią metodę kucia berylu, a także był autorem, bądź współautorem kilku patentów, jak na przykład stopu uranowo-niklowego czy stopu na bazie niklu.

### Podsumowanie

Artykuł przedstawia sylwetki trzech nieznanymi dotąd szerzej w naszym kraju naukowców, którzy znacząco przyczynili się do poznania możliwości, jakie niesie ze sobą energia jądrowa, uczestnicząc przy tym w najważniejszych wydarzeniach Projektu Manhattan. Byli oni ważnymi postaciami świata nauki i techniki jądrowej, jednak z uwagi na to, gdzie przyszli na świat oraz ich obywatelstwo nie mogli znaleźć miejsca w panteonie sławnych polskich naukowców w okresie PRL, a i w pierwszym 30-leciu III RP również byli w ogóle nieznanymi, nawet w krajowym środowisku atomistycznym (w zasadzie aż dotąd). Autorzy są zdania, że warto rozpropagować wiedzę o ich osiągnięciach, co dobrze wpisywałoby się w realizowaną obecnie przez IPN kampanię „Zapomniani polscy naukowcy i wynalazcy”.

Pawlicki, Konopiński i Cieśliski nie są jednak jedynymi osobami o polskich korzeniach, które brały udział w Projekcie Manhattan. Aby odnaleźć inne z postaci oraz zapoznać się z notkami na ich temat (wiele z biografii jest nadal uzupełnianych bądź dodawanych), autorzy polecają zajrzeć na stronę fundacji Atomic Heritage: [www.atomicheritage.org](http://www.atomicheritage.org).

*Anna Kowalec,  
Polskie Towarzystwo Nukleoniczne,  
Warszawa*

*Łukasz Sawicki,  
Departament Energii Jądrowej  
Ministerstwo Klimatu i Środowiska,  
Warszawa*

### Literatura:

- [1] The History of Nuclear Energy DOE/NE-0088, [online] [https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf) [dostęp: 17.11.2020]
- [2] G. Jezierski, Energia jądrowa wczoraj i dziś, Wydawnictwo WNT(2014)
- [3] Atomic Heritage Foundation, [online] <https://www.atomicheritage.org/profile/gerard-pawlicki>[dostęp: 17.11.2020]
- [4] Chicago Tribune, [online] <https://www.chicagotribune.com/news/ct-xpm-2013-05-24-ct-met-pawlicki-obit-20130524-story.html>[dostęp: 17.11.2020]
- [5] Westmont Progress 22.05.2013, [online] <https://issuu.com/shawmedia/docs/130522092928-731976effd9e47f-58145ceb62f57d5f4/24>[dostęp: 17.11.2020]
- [6] University of Chicago Photographic Archive, [apf3-00242], Special Collections Research Center, University of Chicago Library.
- [7] Atomic Heritage Foundation, [online] <https://www.atomicheritage.org/profile/emil-j-konopinski>[dostęp: 17.11.2020]
- [8] Indiana University, University Honors and Awards, [online] <https://honorsandawards.iu.edu/awards/honoree/3485.html> [dostęp: 17.11.2020]
- [9] The New York Times, 28.05.1990, [online] <https://www.nytimes.com/1990/05/28/obituaries/emil-konopinski-78-atomic-bomb-scientist.html>[dostęp: 17.11.2020]
- [10] Physics Today 44, 10, 144 (1991), [online] <https://physicstoday.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.2810306>[dostęp: 17.11.2020]
- [11] „Emil J. Konopinski,” Indiana University Archives Exhibits, accessed January 10, 2021, <http://collections.libraries.indiana.edu/iubarchives/items/show/611> [dostęp: 17.11.2020]
- [12] Atomic Heritage Foundation, [online] <https://www.atomicheritage.org/profile/marion-edward-cieslicki>[dostęp: 17.11.2020 oraz 10.01.2021]
- [13] Hempelman L. H., Lushbaugh C. C., Voelz G. L., What has happened to the survivors of the early Los Alamos nuclear accidents?(1979), [online][dostęp: 18.11.2020]
- [14] Carnegie Alumnus, Carnegie Institute of Technology, Vol 3, No 4, str. 4, czerwiec 1946 [online]<http://digitalcollections.library.cmu.edu/awweb/awarchive?type=file&item=75565> [dostęp: 18.11.2020]
- [15] Pittsburgh Post-Gazette(Pittsburgh, Pennsylvania), str. 4, 25.05.1946 [online]<https://www.newspapers.com/image/90289603> [dostęp: 10.01.2021]

# MODELOWANIE BIOFIZYCZNE POPROMIENNEGO EFEKTU SĄSIEDZTWA – CZĘŚĆ I

## Biophysical modeling of the radiation bystander effect - part I

Paweł Wysocki, Krzysztof W. Fornalski

**Streszczenie:** Powszechnie wiadomo, że promieniowanie jonizujące może wywoływać uszkodzenia w komórkach, które z nim bezpośrednio oddziaływały. Jednakże ostatnie badania wykazały, że uszkodzenia pojawiają się również w komórkach, które nie doświadczyły bezpośredniej interakcji. Jest to związane z występowaniem tak zwanego efektu sąsiedztwa (ang. bystander effect), który polega na wysyłaniu przez komórkę napromienioną sygnałów, które mogą uszkadzać komórki sąsiednie. Ze względu na złożoność tego efektu, nie jest on prosty do ścisłego biofizycznego opisu, a co za tym idzie, także do symulacji.

W niniejszym artykule przedstawiony został przegląd różnych podejść do modelowania i symulowania efektu sąsiedztwa z punktu widzenia biofizyki radiacyjnej (część I). W szczególności ostatni z przedstawionych modeli jest częścią większego projektu symulacji odpowiedzi grupy komórek na promieniowanie jonizujące z wykorzystaniem metod Monte Carlo (część II).

**Abstract:** It is well known that ionizing radiation can cause damages to cells that interact with it directly. However, recent studies have shown that damages also occur in cells that have not experienced direct interaction. This is due to the so-called bystander effect, which is observed when the irradiated cell sends signals that can damage neighboring cells. Due to the complexity of this effect, it is not easy to strictly describe it biophysically, and thus also to simulate.

This article reviews various approaches to modeling and simulating the bystander effect from the point of view of radiation biophysics (Part I). In particular, the last model presented within this article is part of a larger project of modeling the response of a group of cells to ionizing radiation using Monte Carlo methods (Part II).

**Słowa kluczowe:** efekt sąsiedztwa, efekt widza, modelowanie, biofizyka radiacyjna

**Keywords:** bystander effect, modelling, radiation biophysics

### 1. Wstęp

Efekt sąsiedztwa, zwany też efektem widza (ang. bystander effect), jest jednym ze skutków niebezpiecznych (ang. non-targeted effects) oddziaływania promieniowania jonizującego z komórkami. Na skutek jego zajścia różnego rodzaju uszkodzenia (w tym mutacje) pojawiają się nie tylko w komórce bezpośrednio napromienionej, ale też wśród jej nienapromieniowanych sąsiadów. Jeden z pierwszych eksperymentów, który potwierdził występowanie efektu sąsiedztwa, odbył się na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Polegał on na napromienieniu 1% komórek jajnikowych chomika chińskiego niską dawką promieniowania jonizującego. W wyniku tego naświetlenia aż 30% komórek uległo uszkodzeniu [24] [1]. Co więcej, zwiększając dawkę od 0,3 do 2,5 mGy liczba uszkodzeń rosła, zaś dla większych dawek ich liczba pozostawała stała. Wyniki te były pierwszymi obserwacjami dotyczącymi efektu sąsiedztwa, choć początkowo nie do końca rozumiano jego mechanizm. Generalizując, zjawisko to polega na pojawieniu się różnego rodzaju skutków

napromienienia, takich jak: zmniejszenie przeżywalności, kancerogeneza czy apoptoza w komórkach, które nie były bezpośrednio poddane działaniu promieniowania jonizującego. W komórkach napromienionych, poza bezpośrednią jonizacją makrocząsteczek, mogą pojawić się m.in. długo żyjące rodniki (atomy lub cząsteczki zawierające niesparowane elektrony), których okres półtrwania wynosi około 20 godzin. I to właśnie głównie one mogą indukować uszkodzenia DNA w komórkach sąsiednich. Ponadto dodatkowe badania [1] pokazały, że tlenek azotu wywiera również istotny wpływ na napromieniowanie komórki, powodując ich uszkodzenia. Będąc wolnym rodnikiem cząsteczka ta pełni ważną rolę w wielu procesach biologicznych np. pobudza apoptozę.

W odniesieniu do mechanizmu rozchodzenia się sygnałów efektu sąsiedztwa do innych komórek wyróżniamy dwa sposoby jego zachodzenia:

- drogą połączeń szczelinowych;
- na zasadzie wydzielania do otaczającego środowiska i aktywowania w komórkach sąsiednich kinazy MAP [2], która odgrywa rolę w regulacji odpowie-



dzi na sygnały zewnętrzne dochodzące do komórki w postaci białek NF- $\kappa$ B [3], które działają jako czynniki transkrypcji (wiążą DNA w odpowiednim obszarze).

Sam proces rozchodzenia się sygnałów od komórki napromienionej do komórki sąsiadującej można opisać równaniem dyfuzji, która jest procesem samorzutnego rozprzestrzeniania i przenikania się cząsteczek w ośrodku, będący konsekwencją chaotycznych zderzeń cząstek dyfundujących między sobą.

Prawdopodobieństwo wystąpienia tego efektu rośnie quasi-liniowo w przypadku wzrostu dawki w obszarze niskich dawek, po czym wysycza się i utrzymuje na stałym poziomie dla dawek większych. Jest również zauważalny w przypadku oddziaływania na komórki promieniowania o niskim współczynniku liniowego przekazu energii (LET).

Efekt sąsiedztwa może mieć zarówno pozytywne, jak i negatywne skutki. W przypadku uszkodzenia zdrowych komórek efekt jest negatywny. Może on prowadzić do powstania nowotworów wtórnych i innego rodzaju powikłań popromiennych. Jednakże jeśli komórka napromieniona będzie swoimi sygnałami uszkadzała komórki nowotworowe, to będzie to rezultat jak najbardziej pożądany. Ponadto efekt sąsiedztwa może w pewnych warunkach prowadzić do wytworzenia odpowiedzi adaptacyjnej [4], powszechnie uważanej za pozytywny skutek.

Co ciekawe efekt sąsiedztwa obserwowany jest nie tylko pomiędzy komórkami, w obrębie jednego organizmu, ale również pomiędzy całymi organizmami. Dowodzi tego eksperyment, w którym pewna część populacji ryb została poddana działaniu promieniowania X o dawce 0,5 Gy. W kolejnym kroku doprowadzono do kontaktu powyższej grupy z osobnikami nienapromienianymi. Po pewnym czasie wśród ryb nie mających bezpośredniego kontaktu z promieniowaniem zauważono efekty, które powinny wystąpić tylko u ryb napromienionych. Jest to jeden z pierwszych dowodów na to, że efekt sąsiedztwa może występować również pomiędzy organizmami, a nie, jak uważano dotychczas, tylko pomiędzy komórkami w obrębie jednego organizmu. W tym konkretnym przypadku istotne było to, że otoczeniem była woda, która w łatwy i szybki sposób umożliwiała rozchodzenie się sygnałów fizykochemicznych [5].

## 2. Istniejące modele symulujące efekt sąsiedztwa

Chociaż efekt sąsiedztwa badany jest przede wszystkim przez radiobiologów, to z uwagi na specyficzne procesy rozchodzenia się sygnałów fizykochemicznych, które mogą być zapisane ściśle, również fizycy zaczęli zajmować się tą tematyką. W szczególności w ciągu ostatnich lat powstało wiele modeli biofizycznych, które implementując dane biologiczne oraz me-

chanizmy fizyczne do kodu komputerowego z sukcesem generują wyniki, które pomagają lepiej zrozumieć ten relatywnie niedawno odkryty efekt.

Poniżej opisano najważniejsze z modeli opisujące popromienny efekt sąsiedztwa.

### 2.1. Model chiński Xia-Liu Xue-Wang-WU

Jest to jeden z pierwszych modeli symulujących odpowiedź komórek na promieniowanie jonizujące z uwzględnieniem efektu sąsiedztwa [6]. Zakłada on, że komórka będąca bezpośrednio napromieniona może wysłać sygnały do swoich sąsiadów powodując u nich uszkodzenia pośrednie. Nazywane są one przez autorów sygnałami efektu sąsiedztwa. Rozchodzenie ich jest ściśle określone i opisane przy pomocy uproszczonego równania dyfuzji Einsteina:

$$\langle r^2 \rangle = 6D\Delta t \quad (2.1)$$

gdzie:

$D$  – mobilność translacyjna;

$\Delta t$  – interwał czasowy;

$\langle r \rangle$  – odległość jaką pokonuje sygnał po upływie interwału czasowego.

Mobilność translacyjna związana z rozchodzeniem się sygnału zależy między innymi od masy molekuly przenoszącej sygnał. W przypadku efektu sąsiedztwa mogą to być cytokiny [7], których masa wynosi około 10 kDa [8]. W związku z tym mobilność translacyjna  $D$  w przybliżeniu równa się  $10^8 \frac{nm^2}{s}$ .

Za każdym razem po upływie czasu  $\Delta t$  zakładamy, że sygnał przemieszcza się na określoną odległość w dowolnym kierunku. Sygnał znajdujący się w odpowiedniej odległości od komórki może spowodować pojawienie się między nimi reakcji. W modelu przyjęto założenie, że odległość  $a$  jest równa rozmiarowi komórki, czyli w przybliżeniu 10  $\mu$ m. W takim wypadku założono w modelu dwie możliwości:

- sygnał uderzając w komórkę, która jest już uszkodzona, zniknie z symulacji na skutek pochłonięcia przez komórkę;
- w momencie uderzenia sygnału w komórkę, która nie jest uszkodzona, będzie wędrował dalej w dowolnym kierunku.

Ponadto każda komórka mająca kontakt z sygnałami efektu sąsiedztwa może z prawdopodobieństwem  $P_{em}$  wysłać kolejny sygnał. Uszkodzenia pojawiają się z prawdopodobieństwem oznaczonym jako  $P_{dam}$ . Czas życia sygnału, po upływie którego znika on z symulacji, również jest ściśle określony. Jednakże z biologicznego punktu widzenia nie ma on nic wspólnego z czasem życia cytokiny, a jest jedynie fenomenologicznym założeniem modelu.

W opisywanym modelu chińskim, poza uszkodzeniami związanymi z bezpośrednim napromienieniem i na skutek reakcji z sygnałami efektu sąsiedztwa, uwzględnione zostały również naturalne uszkodzenia, które zostały opisane rozkładem Gaussa.

W celu oszacowania poszczególnych parametrów autorzy modelu wykonali symulacje, w których liczba generowanych sygnałów była ściśle określona. Dla każdej z nich wartości prawdopodobieństw oraz czas życia zostały dopasowane tak, aby ich wyniki zgadzały się z danymi eksperymentalnymi. Wartości poszczególnych parametrów zostały przedstawione w tabeli 2.1.

**Tabela 2.1.** Wartości poszczególnych parametrów dla różnej liczby sygnałów w modelu chińskim [6]

**Table 2.1.** Values of individual parameters for a different number of signals in the Chinese model [6]

Liczba sygnałów	$P_{dam}$	$P_{em}$	Czas życia
10	0,0040	0,9	1,5 h
20	0,0018	0,95	1,5 h
30	0,0020	0,15	1,5 h

Wyniki symulacji pokazują, że uszkodzenia pojawiają się nie tylko wśród sąsiednich komórek, ale również w tych od siebie odległych, co jest zgodnie z założeniami i danymi eksperymentalnymi.

## 2.2. Model BSDM

BSDM (Bystander Diffusion Model) jest kolejnym biofizycznym modelem symulującym pojawienie się efektu sąsiedztwa wśród komórek nienapromienionych [10] [11] [12] [13]. Zakłada, że wyłącznie komórki uśmiercone przez bezpośrednie trafienie promieniowaniem jonizującym wysyłają molekuly zwane sygnałami efektu sąsiedztwa do swoich sąsiadów. Sposób ich rozchodzenia związany jest z dyfuzją i może być opisany równaniem analogicznym do (2.1), a opisującym średni zasięg jako:

$$\langle l \rangle = \sqrt{6Dt} \quad (2.2)$$

gdzie:

$D$  – oznacza mobilność białek przenoszących sygnały.  
 $t$  – czas.

Wartość mobilności jest ściśle powiązana z masą i rozmiarem białek, analogicznie jak w modelu chińskim. Autorzy modelu założyli, że ich masa wynosi od 400 Da do 40 kDa, a promień 0,67 – 6,7 nm, przyjmując sferyczny kształt. W związku z tym wartość  $D$  została oszacowana pomiędzy  $(4 - 200)10 \frac{nm^2}{s}$ . Jest to wartość zbliżona do tej wykorzystanej w modelu opisanym w poprzednim punkcie. Dla typowego czasu naświetlania, czyli około 10 – 15 min, średnia droga pokonywana

przez sygnał obliczona za pomocą równania (2.2) wynosi od 120 do 1000  $\mu m$ .

Ponadto w modelu przyjęto założenie, że:

- czas życia sygnałów jest większy niż przewidywany czas dyfuzji;
- reakcja pomiędzy sygnałem a komórką pojawia się w momencie, gdy odległość między nimi jest mniejsza niż połowa rozmiaru komórki ( $R$ );
- komórka może emitować dwa rodzaje sygnałów efektu sąsiedztwa;
  - Sygnały typu S – powodujące śmierć komórki;
  - Sygnały typu T – powodujące transformację w komórkę nowotworową.
- sygnały efektu sąsiedztwa nie reagują ze sobą;
- dyfuzyjne ruchy komórek są pomijane;
- sygnały efektu sąsiedztwa nie reagują z komórkami, które je wysyłają.

Do obliczenia frakcji komórek, które przeżyły naświetlanie brana jest pod uwagę nie tylko bezpośrednia interakcja z promieniowaniem, ale również kontakt z sygnałami efektu sąsiedztwa. Tę zależność opisano następującym równaniem:

$$S_F = S_d (1 - B_s) \quad (2.3)$$

gdzie:

$S_F$  – to frakcja komórek, które przeżyły;

$S_d$  – to frakcja komórek, które przeżyły bezpośrednie napromienienie promieniowaniem jonizującym, czyli relatywna liczba odbiorców sygnałów efektu sąsiedztwa;

$B_s$  – to frakcja komórek, które otrzymały sygnały efektu sąsiedztwa, w wyniku czego obumarły.

Analityczne rozwiązanie równania (2.3) jest niemożliwe, jednak twórcy modelu stworzyli prosty algorytm pozwalający obliczyć wartości  $S_d$  oraz  $B_s$ . Z definicji wzór (2.3) może zostać zapisany w postaci:

$$S_F = \frac{(N_0 - N_d - N_b)}{N_0} = S_d - B(x) \quad (2.4)$$

gdzie:

$N_0$  – początkowa liczba komórek;

$N_d$  – liczba komórek zabitych na skutek bezpośredniego napromienienia;

$N_b$  – liczba komórek, które otrzymały sygnały efektu sąsiedztwa.

Znając warunki napromienienia, całkowitą liczbę komórek, które przeżyły oraz dokładny sposób rozchodzenia się sygnału, istnieje możliwość oszacowania funkcji  $B(x)$ :

$$B(x) = c_1 x + c_2 x^2 \quad (2.5)$$

$$S_F = S_d - c_1 x - c_2 x^2 \quad (2.6)$$

gdzie:

$c_1$  i  $c_2$  – współczynniki ekspansji.

Równania (2.5) i (2.6) są to funkcje kwadratowe o określonych współczynnikach.

Przyjmując że  $S_d \equiv x = \frac{(N_0 - N_d)}{N_0}$  i stosując odpowiednie podstawienie można otrzymać następujące równania, umożliwiające obliczenie poszczególnych frakcji:

$$S_F = (1 - c_1)S_d - c_2S_d^2 \quad (2.7)$$

$$S_d = \frac{\sqrt{(4c_2S_F + (1 - c_1)^2) - (1 - c_1)}}{2c_2} \quad (2.8)$$

Z powyższych równań wynika, że frakcja komórek, które przeżyły zarówno bezpośrednią interakcję z promieniowaniem, jak i z sygnałami efektu sąsiedztwa, jest zależna od frakcji komórek trafionych wiązką promieniowania. W związku z tym posiadając odpowiednie dane można eksperymentalnie oszacować wartości stałych liczbowych  $c_1$  i  $c_2$ .

Odnosząc się do frakcji komórek, które uległy transformacji w komórki nowotworowe, w modelu założono, że ich gęstość zadana jest jako

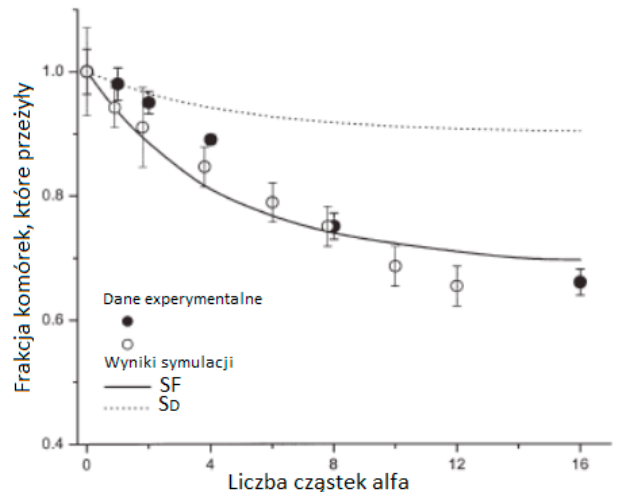
$$T_F = \frac{[bDS_d + cS_dB_S S_F]}{S_F} \quad (2.9)$$

gdzie:

$c$  i  $b$  – są stałymi dopasowanymi eksperymentalnie;  $D$  – to dawka, którą została napromieniona komórka.

Wykorzystując wcześniej wspomniane algorytmy autorzy modelu wykonali symulacje umożliwiające obliczenie liczby komórek, które otrzymały sygnały efektu sąsiedztwa oraz wartości  $B(x)$  oraz  $x$ . Wyniki zostały przedstawione w tabeli 2.2.

Na rys. 2.2. przedstawione zostały wyniki eksperymentu, w którym 10% losowo wybranych komórek C3HT10 zostało napromienione cząstkami  $\alpha$  z LET = 90  $\frac{\text{keV}}{\mu\text{m}}$ . Są to zależności frakcji komórek, które przeżyły napromienienie od liczby cząstek  $\alpha$  w nie trafiających.



**Rys. 2.1.** Zależność frakcji komórek od liczby cząstek alfa na komórkę [13] dla losowo wybranych 10% komórek poddanych napromienieniu. Kropki reprezentują dane eksperymentalne, a krzywe są wynikami symulacji otrzymanymi przy użyciu modelu BSDM - przy czym czarne kropki i czarna krzywa to frakcja komórek, które przeżyły zarówno bezpośrednio napromienienie, jak i sygnały efektu sąsiedztwa. Białe punkty i przerywana krzywa reprezentują grupę komórek, które przeżyły działania sygnału efektu sąsiedztwa (widoczne duże różnice między wynikami symulacji, a eksperymentem).

**Fig. 2.1.** The dependence of the cell fraction on the number of alpha particles per cell [13] for randomly selected 10% of irradiated cells. The dots represent experimental data and the curves are simulation results obtained using the BSDM model - with the black dots and the black curve being the fraction of cells that survived both direct irradiation and bystander effect signals. The white points and the dashed curve represent the group of cells that have survived the effects of the bystander effect signal (visible large differences between the simulation results and the experiment).

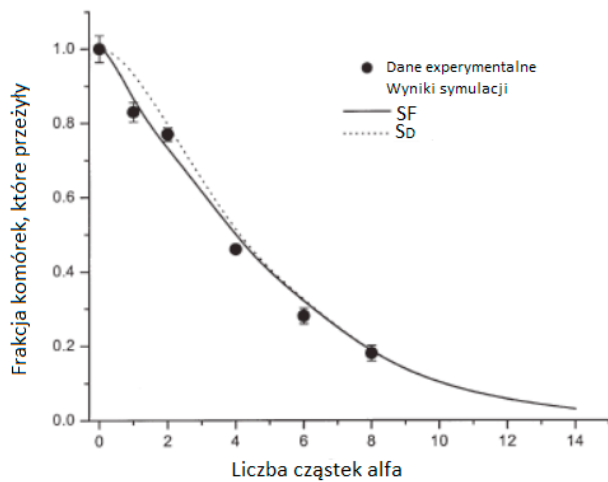
Na rys. 2.2. przedstawione zostały wyniki eksperymentu, w którym komórki zostały poddane wpływowi promieniowania o dawce opisanej rozkładem Poissona względem głównej osi wiązki (tj. od napromienionej komórki). Zarówno w tym przypadku, jak i na poprzednim wykresie, czarne kopki i czarna krzywa reprezentuje wyniki eksperymentu dotyczące frakcji komórek, które przeżyły bezpośrednie napromienienie i interakcję z sygnałami efektu sąsiedztwa. Krzywa przerywana dotyczy tylko efektu sąsiedztwa. Jak widać dodanie

**Tabela 2.2.** Obliczone liczby komórek, które otrzymały sygnały efektu sąsiedztwa,  $B(x)$  oraz  $x$ , dla modelu BSDM  
**Table 2.2.** Calculated numbers of cells that received bystander effect signals,  $B(x)$  and  $x$ , for the BSDM model

Liczba komórek, które przetrwały bezpośrednio napromienienie	Liczba sygnałów efektu sąsiedztwa	Średnia liczba komórek, które otrzymały sygnały efektu sąsiedztwa	$B(x)$	$x$
0	1000	0	0	0
50	1000	16,5	0,04125	0,125
100	1000	33	0,08250	0,25
200	1000	64,9	0,16225	0,5
300	1000	95,8	0,23950	0,75
400	1000	126	0,31500	1



założenia o poissonowskim rozkładzie spowodowało, iż model w pełni odzwierciedla wyniki eksperymentu.



**Rys. 2.2.** Zależność frakcji komórek od liczby cząstek alfa na komórkę [13], analogicznie jak na rys. 2.1. z tą różnicą, iż przyjęto poissonowską zależność otrzymanej dawki od osi wiązki padającego promieniowania **Fig. 2.2.** The dependence of the cell fraction on the number of alpha particles per cell [13], similarly to Fig. 2.1., with the difference that the Poisson dependence of the received dose on the axis of the incident radiation beam was assumed

Powyższe wykresy pokazują, że model ten lepiej sprawdza się w przypadku dawki opisanej rozkładem Poissona, niż w przypadku jednorodnego napromienienia komórek. Warto dodać, iż założenie o poissonowskim charakterze zależności dawki w funkcji odległości od osi wiązki ma odzwierciedlenie także w innych niezależnych badaniach nad efektem sąsiedztwa [21] [22].

### 2.3. Model BaD

Model BaD [14] (Bystander and Direct) jest ilościowym modelem badającym wpływ promieniowania jonizującego na komórki. Kładzie on szczególny nacisk na efekt sąsiedztwa i zakłada, że:

- w przypadku transformacji nowotworowej dominuje zasada „wszystko albo nic”, według której zwiększenie dawki promieniowania nie powoduje zwiększenia obserwowanych efektów nowotworowych, a jedynie sam proces transformacji;
- w przypadku komórki trafionej bezpośrednio przez promieniowanie, skutki związane z efektem sąsiedztwa są znikome.

Mechanizm rozchodzenia się sygnału w modelu BaD nie jest w żaden sposób uszczegółowiony, dzięki czemu może być stosowany zarówno w przypadku komórek stykających się, jak i od siebie oddalonych.

Założenia tego modelu zostały oparte o wyniki trzech różnych eksperymentów:

- w pierwszym z nich cała grupa komórek została poddana działaniu promieniowania jonizującego;

- w drugim tylko 10% całej populacji komórek zostało napromienione;
- w ostatnim komórki zostały napromienione, gdzie dawka opisana jest rozkładem Poissona od osi wiązki (napromienionej komórki).

Na tej podstawie określono trzy różne sposoby obliczania zarówno frakcji komórek, które przeżyły napromienianie, jak i frakcji komórek związanej zostały napromienione, obliczanie frakcji komórek, które przeżyły odbywa się za pomocą równania:

$$SF = q^N \quad (2.10)$$

gdzie:

$q$  – jest prawdopodobieństwem przeżycia komórki po napromienieniu pojedynczą cząstką;

$N$  – liczba cząstek  $\alpha$ , którymi została napromieniona komórka.

Na podstawie danych eksperymentalnych oszacowano wartość  $q \approx 0,80$ . W związku z tym, że  $q < 1$ , to frakcja komórek, które przeżyły wraz ze zwiększaniem liczby cząstek  $\alpha$ , którymi została napromieniona komórka, będzie malała.

Frakcja komórek reagujących na promieniowanie jonizujące i ulegających mutacji opisywana jest jako:

$$D = \nu N q^N \quad (2.11)$$

gdzie:

$\nu$  – to stała równa nachyleniu liniowej zależności odpowiedzi na dawkę.

Frakcja komórek, które uległy transformacji dzielona przez liczbę komórek, które przeżyły wynosi:

$$TF = \nu N \quad (2.12)$$

Powyższa zależność jest wprost proporcjonalna do liczby cząstek  $\alpha$ , którymi została napromieniona komórka.

W drugim przypadku, w którym tylko 10% komórek zostało napromienionych, frakcja komórek, które przeżyły przedstawia się jako:

$$SF = 0,1q^N + 0,9F(N) \quad (2.13)$$

gdzie:

$F(N)$  – jest to frakcja komórek, które przeżyły kontakt z sygnałami efektu sąsiedztwa.

Jak widać pierwszy człon równania (2.13) jest tożsamy z równaniem (2.10) pomnożonym przez 0,1. Jest to ściśle powiązane z tym, że tylko 10% wszystkich komórek zostało napromienionych. Druga część jest związana z efektem sąsiedztwa.

Mając wyznaczoną wartość parametru  $q$  i znając liczbę cząstek, którymi została napromieniona komórka ( $N$ ), wartość  $F(N)$  może zostać wyznaczona empirycznie, wykorzystując równanie (2.13):

$$F(N) \approx \exp(-0,0034N - 0,0027N^2) \quad (2.14)$$

gdzie ( $0 \leq N \leq 8$ ).

Powyższa funkcja potwierdza, że w przypadku śmierci komórek wywołanej sygnałami efektu sąsiedztwa, wspomniana zasada „wszystko albo nic” nie obowiązuje, co oznacza, iż wraz ze wzrostem dawki promieniowania liczba martwych komórek również rośnie.

Fracja komórek reagujących zarówno z promieniowaniem jonizującym, jak i sygnałami efektu sąsiedztwa, i które przeżyły tę interakcję, została opisana następującą zależnością:

$$D + B = 0,1vNq^N + 0,9\sigma F(N) \quad (2.15)$$

gdzie:

$\sigma$  – jest stałą skalującą liczbę transformacji nowotworowej w przypadku niskich dawek.

Analogicznie jak poprzednio pierwszy człon równania (2.15) został pomnożony przez 0,1, gdyż tylko 10% komórek zostało napromienionych. Drugi człon dotyczy pozostałych 90% komórek, do których mogą dotrzeć sygnały efektu sąsiedztwa, stąd 0,9.

Fracja komórek, które uległy transformacji nowotworowej została przedstawiona w postaci:

$$TF = \frac{[0,1vNq^N + 0,9\sigma F(N)]}{[0,1q^N + 0,9F(N)]} \quad (2.16)$$

W przypadku ostatniego eksperymentu, gdzie komórki zostały naświetlone dawką promieniowania określoną za pomocą rozkładu Poissona, frakcja komórek, które przeżyły, przedstawia się jako:

$$SF = \exp[-(1 - q)\langle N \rangle] - \exp(-\langle N \rangle)[1 - G(\langle N \rangle)] \quad (2.17)$$

gdzie:

$G\langle N \rangle$  – jest frakcją komórek, które otrzymały sygnały efektu sąsiedztwa i przeżyły.

Tak jak w przypadku frakcji komórek, znając  $q$  istniała możliwość wyznaczenia  $F(N)$ . Tutaj na podstawie danych eksperymentalnych wartość  $G\langle N \rangle$  została oszacowana i wynosi (przy czym  $\langle N \rangle$  jest średnią liczbą cząstek, którymi napromieniona została komórka):

$$G\langle N \rangle \approx 1, \quad \text{gdzie } (0 \leq \langle N \rangle \leq 8) \quad (2.18)$$

Fracja komórek, które przeżyły transformację, w przypadku napromienienia promieniowaniem

o dawce opisanej rozkładem Poissona, wygląda następująco:

$$D + B = vq\langle N \rangle \exp[-(1 - q)\langle N \rangle] + \sigma \exp(-\langle N \rangle) \quad (2.19)$$

Wykorzystując równanie (2.18) i (2.20), przy założeniu  $G = 1$ , otrzymano częstość występowania transformacji nowotworowej w przeliczeniu na żyjącą komórkę:

$$TF = vq\langle N \rangle + \sigma \exp(-q\langle N \rangle) \quad (2.20)$$

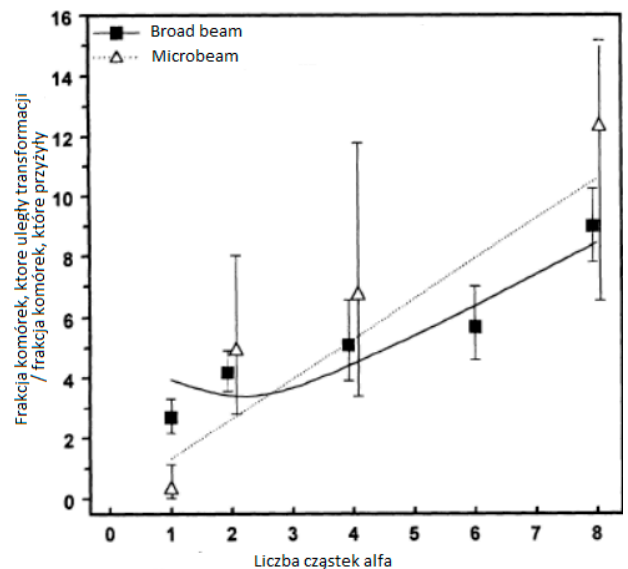
W przypadku, gdy  $\langle N \rangle$  osiąga duże wartości, cały drugi człon równania jest zaniedbywany i jest ono w całości redukowane do prostej zależności liniowej:

$$TF = vq\langle N \rangle \quad (2.21)$$

W sytuacji uzyskania niewielkich wartości parametru  $\langle N \rangle$  drugi człon związany z efektem sąsiedztwa jest znaczący i większy, niż ten związany z bezpośrednim napromienieniem.

Równania (2.15) i (2.19) pokazują główne założenia prezentowanego modelu, a mianowicie fakt, iż komórki, które są nadwrażliwe (podatne) na transformacje nowotworowe związane z sygnałami sąsiedztwa, są także nadwrażliwe na śmierć związaną z bezpośrednim napromienieniem.

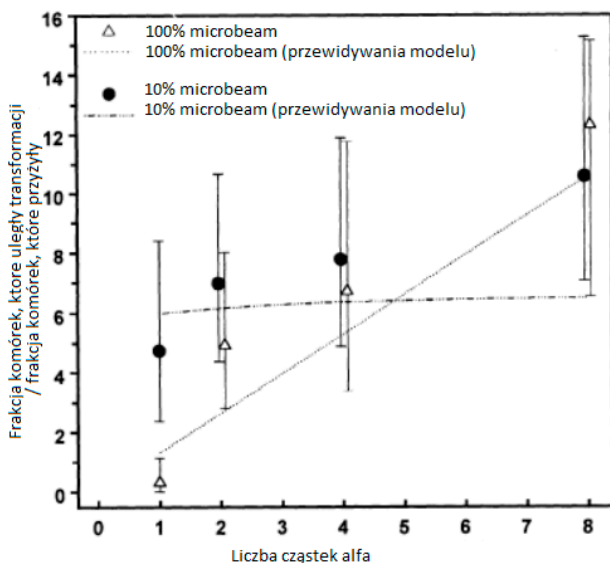
W celu przetestowania modelu autorzy oryginalnej pracy przeprowadzili symulacje, a ich wyniki porównano z danymi eksperymentalnymi. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys. 2.4 i 2.5.



**Rys. 2.3.** Przedstawiono zależność frakcji komórek ulegających transformacji nowotworowej dzielonej przez frakcję komórek, które przeżyły, od liczby cząstek  $\alpha$ . Za pomocą trójkątów i kwadratów przedstawione zostały dane eksperymentalne: trójkąty dotyczą eksperymentu, w którym 100% komórek zostało napromienione stałą mocą dawki. Kwadraty natomiast eksperymentu, w którym wszystkie komórki dawki o mocy opisanej rozkładem Poissona (wartość dawki, która rośnie wraz z czasem, po czym wysycha się i utrzymuje na stałym poziomie). Do da-

nych eksperymentalnych dopasowano prostą i krzywą wyznaczoną na podstawie równań (2.13) i (2.21). Stałe występujące w tych równaniach zostały oszacowane i osiągają wartości odpowiednio:  $\sigma = 6.4 \times 10^{-4}$  i  $\nu = 1.3 \times 10^{-4}$  [14]

**Fig. 2.3.** The relationship between the fraction of cells undergoing neoplastic transformation divided by the fraction of surviving cells and the number of a particles is presented. The experimental data are presented by means of triangles and squares: the triangles refer to an experiment in which 100% of cells were irradiated at a constant dose rate. On the other hand, the squares of an experiment in which all cells have a dose of the strength described by the Poisson distribution (dose value that increases with time, then saturates and remains constant). A straight line and a curve determined on the basis of equations (2.13) and (2.21) were fitted to the experimental data. The constants appearing in these equations have been estimated and reach the following values, respectively:  $\sigma = 6.4 \times 10^{-4}$  and  $\nu = 1.3 \times 10^{-4}$  [14]



**Rys. 2.4.** Przedstawiono taką samą zależność, jak na rys. 2-3., tj. zależność frakcji komórek ulegających transformacji dzielonej przez frakcję komórek, które przeżyły, od liczby cząstek  $\alpha$ . Trójkątami oznaczono dane uzyskane podczas eksperymentu, w którym wszystkie komórki zostały napromienione stałą mocą dawki. Znacznikami okrągłymi oznaczono dane z eksperymentu, w którym tylko 10% wszystkich komórek zostało napromienione. Ponadto do danych eksperymentalnych dopasowano prostą i krzywą teoretyczną, uzyskaną przy użyciu modelu BaD [14]

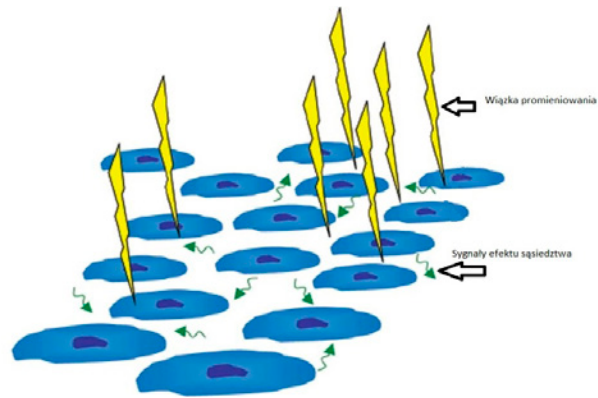
**Fig. 2.4.** The same relationship as in Fig. 2-3. is shown, i.e. the relationship between the fraction of cells undergoing transformation, divided by the fraction of surviving cells, and the number of a particles. The triangles mark the data obtained during the experiment in which all cells were irradiated at the constant dose rate. Round tags marked data from an experiment in which only 10% of all cells were irradiated. Moreover, a straight line and a theoretical curve, obtained using the BaD model, were fitted to the experimental data [14]

## 2.4. Model Ebert-Suchowerska-Jackson-McKenze

Jest to biomatematyczny model, w którym zakłada się, że odpowiedzi grupy komórek na bezpośrednie napromienienie i na sygnały efektu sąsiedztwa powstałe na skutek wcześniejszego naświetlenia są niezależne od siebie [15].

W momencie, gdy komórka zostanie trafiona, tj. oddziałuje bezpośrednio z promieniowaniem jonizującym, ma możliwość wysyłania sygnałów efektu są-

siedztwa. Rozchodzą się one drogą dyfuzji (podobnie jak w poprzednio opisanych modelach) i trafiają do sąsiednich komórek, które nie zostały bezpośrednio napromienione. Zostało to schematycznie przedstawione na rys. 2.6.



**Rys. 2.5.** Schemat odpowiedzi na bezpośrednie napromienienie i sygnały efektu sąsiedztwa [15]

**Fig. 2.5.** Scheme of response to direct irradiation and signals of the bystander effect [15]

Odpowiedź komórek na promieniowanie jonizujące z pominięciem wpływu efektu sąsiedztwa zależy tylko i wyłącznie od dawki, którą została napromieniona komórka.

Zgodnie ze wspomnianą wcześniej tezą w wyniku interakcji z promieniowaniem komórka może produkować różnego rodzaju sygnały. W modelu założono jednak, że jest to tylko jeden rodzaj sygnałów mogących powodować zarówno śmierć komórki, jej uszkodzenia, które mogą zostać naprawione, jak i może nie powodować żadnych zmian. Odpowiedź na sygnały efektu sąsiedztwa związana jest z dawką promieniowania oraz z ich liczbą zakumulowaną w komórce, co opisuje następujące równanie:

$$\rho = \int_{\text{komórki}} W(r' - r) \rho_{\sigma}(r) dr \quad (2.22)$$

gdzie:

$W$  – to niezależne prawdopodobieństwo dyfuzji sygnału z pozycji  $r$  do  $r'$ ;

$\rho_{\sigma}$  – to lokalna gęstość sygnałów efektu sąsiedztwa.

Kompletna odpowiedź komórek na promieniowanie jest związana zarówno z bezpośrednim napromienieniem, jak i reakcją na sygnały efektu sąsiedztwa i wygląda następująco:

$$S_{\text{local}} = S_{R,\text{local}} S_{B,\text{local}} \quad (2.23)$$

gdzie:

$S_{\text{local}}$  – to frakcja komórek, które przeżyły;

$S_{R,\text{local}}$  – to frakcja komórek, które przeżyły bezpośrednio napromienienie;



$S_{B,local}$  – to frakcja komórek, które przeżyły interakcję z sygnałami efektu sąsiedztwa.

Pierwszy człon równania (2.23) może być opisany za pomocą równania liniowo-kwadratowego. W takim przypadku frakcja komórek, które przeżyły bezpośrednie napromienienie, jest opisana zależnością:

$$S_{R,local} = e^{-\alpha_R d_{local} - \beta_R d_{local}^2} \quad (2.24)$$

gdzie:

$d_{local}$  – to dawka promieniowania docierająca do komórki;

$\alpha_R [Gy^{-1}]$  i  $\beta_R [Gy^{-2}]$  – to parametry zależności liniowo kwadratowej.

W odniesieniu do frakcji komórek, które przeżyły interakcję z sygnałami efektu sąsiedztwa, w niniejszym modelu rozpatrywane są trzy różne sposoby jej obliczania. Zanim zostaną one zaprezentowane, w pierwszej kolejności należy zdefiniować parametr  $\mu$ , który określa liczbę sygnałów efektu sąsiedztwa, dzięki czemu istnieje możliwość obliczenia mocy produkowanych sygnałów  $\sigma_{local}$  która jest proporcjonalna do ich gęstości.

*Sposób 1:*

W tym przypadku moc sygnału jest proporcjonalna do frakcji komórek umierających na skutek bezpośredniego napromienienia i jest określona równaniem:

$$\sigma_{local} = \mu(I - S_{R,local}) \quad (2.25)$$

*Sposób 2:*

Tutaj moc sygnału jest proporcjonalna do liczby komórek trafionych przez promieniowanie jonizujące, bez względu na to, czy skutkowało to umieraniem czy też nie:

$$\sigma_{local} = \mu e^{-\lambda d_{local}} \quad (2.26)$$

gdzie:

$\lambda [Gy^{-1}]$  – jest prawdopodobieństwem interakcji promieniowania z komórką;

*Sposób 3:*

W tym przypadku moc sygnału jest proporcjonalna do liczby komórek, które przetrwały bezpośrednie napromienienie promieniowaniem jonizującym i jest opisana następującym równaniem:

$$\sigma_{local} = \mu e^{-\lambda d_{local}} S_{R,local} \quad (2.27)$$

Dla każdego sposobu obliczania mocy sygnału poszczególne parametry zostały dopasowane tak, aby wyniki symulacji zgadzały się z danymi eksperymentalnymi. Ponadto w doświadczeniach zależnych od czasu, bądź takich, w których dyfuzja była ograniczona,

sposób rozchodzenia się sygnału był taki sam, jak ten zastosowany w modelu BSDM. W tym przypadku rozważana jest przestrzennie uśredniona gęstość sygnału, która może być obliczona przy zastosowaniu równania:

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_{komórki} \sigma_{local} dV}{\int_{komórki} dV} \quad (2.28)$$

Ostatecznie frakcja komórek, które przeżyły kontakt z sygnałami efektu sąsiedztwa, jest opisana równaniem:

$$S_{B,local} = e^{-\bar{\sigma} W} \quad (2.29)$$

Zarówno w sposobie 1 jak i sposobie 2 moc sygnału wzrasta do pewnego momentu, po czym wysycha się. Odnosząc się do sposobu 3, maksymalna wartość jest osiągana w przypadku konkretnej wartości dawki. Dzieje się tak, gdyż wraz ze spadkiem liczby komórek, które przeżyły, spada również liczba komórek mogących odbierać te sygnały.

W celu przetestowania modelu jego twórcy przeprowadzili szereg symulacji, w trakcie których dopasowali wszystkie parametry tak, aby wyniki zgadzały się z danymi eksperymentalnymi. W tabeli 2-3. i tabeli 2-4. przedstawione zostały wartości poszczególnych parametrów dla komórek typu NCI-H460 (komórki niedrobnokomórkowego raka płuc) i MM576 (komórki czerniaka).

**Tabela 2.3.** Wartości parametrów użytych w modelu symulacji efektu sąsiedztwa w przypadku komórek NCI-H460 [15].

**Table 2.3.** Values of the parameters used in the bystander effect simulation model for NCI-H460 cells [15].

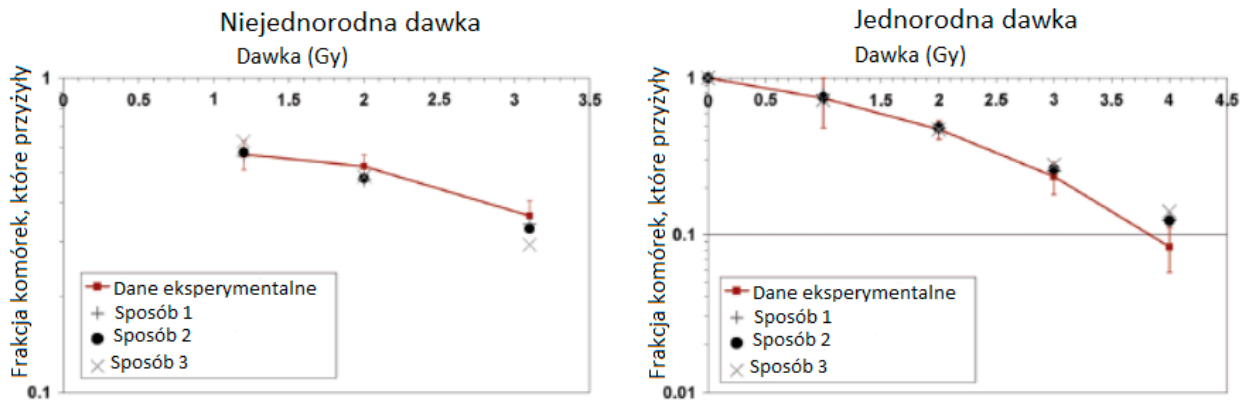
	$\alpha_R [Gy^{-1}]$	$\beta_R [Gy^{-2}]$	$\mu.W$	$\lambda (Gy^{-1})$	$X^2$
Sposób 1	0,053	0,061	1,28	N/A	0,00062
Sposób 2	0,00	0,083	6,10	0,033	0,0054
Sposób 3	0,00	0,13	20,2	0,013	0,015

**Tabela 2.4.** Wartości parametrów w modelu symulacji efektu sąsiedztwa w przypadku komórek MM576 [15].

**Table 2.4.** Parameter values in the bystander effect simulation model for MM576 cells [15].

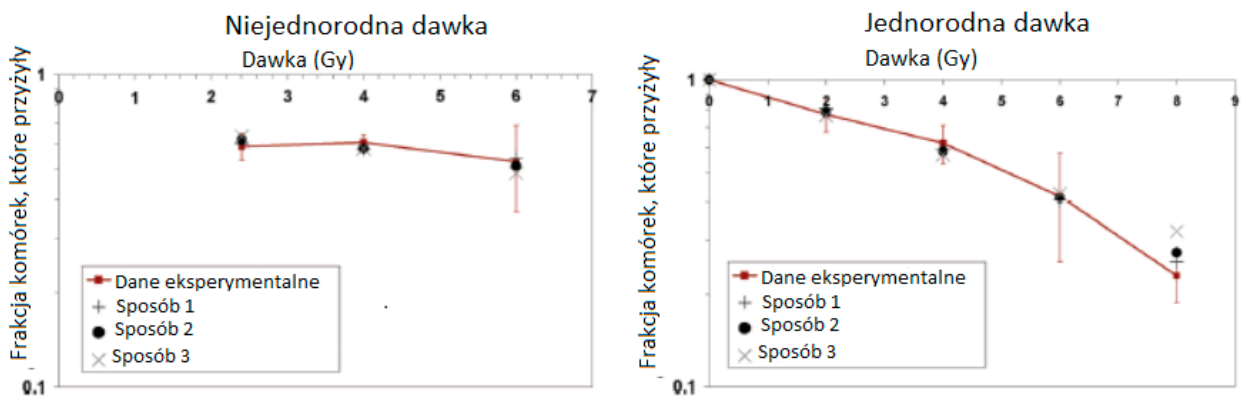
	$\alpha_R [Gy^{-1}]$	$\beta_R [Gy^{-2}]$	$\mu.W$	$\lambda (Gy^{-1})$	$X^2$
Sposób 1	0,014	0,0024	4,71	N/A	0,0041
Sposób 2	0,00	0,0070	70,12	0,0015	0,029
Sposób 3	0,00	0,010	55,00	0,0022	0,052

Na rys. 2.7. i 2.8. przedstawiono zależność frakcji komórek NCI-H460 i MM576, które przeżyły, od dawki, którą zostały napromienione. Parametry użyte w symulacji zaprezentowane zostały w tabeli 2.3. i tabeli 2.4.



**Rys. 2.6.** Zależności frakcji komórek NCI-H460, które przeżyły interakcję z promieniowaniem, od dawki promieniowania [15]. Porównanie danych eksperymentalnych z wynikami modelowania

**Fig. 2.6.** Relationships of the fraction of NCI-H460 cells, which survived the interaction with radiation, on the radiation dose [15]. Comparison of experimental data with modeling results



**Rys. 2.7.** Zależności frakcji komórek MM576, które przeżyły interakcję z promieniowaniem, od dawki promieniowania [15]. Porównanie danych eksperymentalnych z wynikami modelowania

**Fig. 2.7.** The relationship between the fraction of MM576 cells that survived the interaction with radiation and the radiation dose [15]. Comparison of experimental data with modeling results

Wszystkie trzy podejścia w modelu dają wyniki zgodne z danymi eksperymentalnymi. W tabeli 2.3. i tabeli 2.4. przedstawione zostały również wyniki testu zgodności chi-kwadrat [16]. Wynika z niego, że najlepsze uzyskano sposobem 1, najmniej zadowalające zaś sposobem 3. Jednakże, tak jak zostało już wspomniane wcześniej, wszystkie wyniki symulacji zgadzają się z eksperymentem w granicach niepewności.

Koniec części I.

Część II niniejszego artykułu ukaże się w kolejnym numerze PTJ. Przedstawiony zostanie m.in. polski model symulujący efekt sąsiedztwa i przykłady jego zastosowania.  
Paweł Wysocki<sup>1</sup>, Krzysztof W. Fornalski<sup>2,3,\*</sup>

1 – Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

2 – Narodowe Centrum Badań Jądrowych

3 – PEJ Sp. z o.o.

\* krzysztof.fornalski@ncbj.gov.pl

## Literatura

- [1] Wideł M., Przybyszewski W., Rzeszowska-Wolny J. *Po-promienny efekt sąsiedztwa, ważny element odpowiedzi na promieniowanie jonizujące – potencjalne implikacje kliniczne*. Post. Hig. Med. Dośw. 2009 t. 63, s. 377-388.
- [2] Bryk D., Oljarz W., Zapolska-Downar D. *Kinazy aktywowane mitogenami i ich znaczenie w patogenezie miażdżycy*. Postępy Hig Med. Dośw (online), 68: 10 – 22, e-ISSN 1732 – 2693, 2014.
- [3] Ghosh S. *Handbook of Transcription Factor NF- $\kappa$ B*. Boca Raton: CRC, 2006.
- [4] Lenarczyk M., Słoiłowska M. G., Matjle T. *Indukcja popromiennej odpowiedzi adaptacyjnej w retikulocytach krwi obwodowej myszy*. Rocznik Państwowego Zakładu Higieny, 3.48: 239 – 344, 1997.
- [5] Mothersill C., Smith R., Wang J., Rusin A., Fernandez-Palomo C., Fazzari J., Seymour C. *Biological Entanglement – Like Effect After Communication of Fish Prior to X-Ray Exposure*. Dose-Response, Volume: 16 issue: 1, 2018.
- [6] Xia J., Liu L., Xue J., Wang Y., Wu L. *Modeling of radiation-induced bystander effect using Monte Carlo methods*. Nuc-

- lear Instruments and Methods in Physics Research B 267 1015 – 1018, 2009.
- [7] Kopeć-Szlęzak J. *Cytokiny w procesach odpornościowych*. Onkol. Pol, 8,4: 217-222, 2005.
- [8] <http://publications.iupac.org/pac/1992/pdf/6410x1535.pdf> (Masa atomowa – nazwa, historia, definicja i jednostki, dokument IUPAC, 1992.)
- [9] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Rozk%C5%82ad\\_normalny#media/File:Normal\\_Distribution\\_PDF.svg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Rozk%C5%82ad_normalny#media/File:Normal_Distribution_PDF.svg) (grafika rozkładu normalnego).
- [10] Khvostunov I.K., Nikjoo H. *Computer modeling of radiation-induced bystander effect*. J.Radiol. Prot. 22 A33-A37, 2002.
- [11] Nikjoo H., Khvostunov I.K. *A theoretical approach to the role and critical issues associated with bystander effect in risk estimation*. Human & Experimental Toxicology. 23: 81-86, 2004.
- [12] Nikjoo H. *Modeling of radiation – induced bystander effect at low dose and low LET*. Int. J. Low Radiation, Vol. 3, Nos. 2/3, 2006.
- [13] Nikjoo H., Khvostunov I.K. *Biophysical model of the radiation – induced bystander effect*. Int. J. Radiat. Biol, vol 79, No. 1, 43 – 52, 2003.
- [14] Brenner D.J., Little J.B., Sachs R.K. *The bystander effect in radiation oncogenesis: II. A quantitative model*. Radiation Research, 2001; 155:402–408.
- [15] Ebert M.A., Suchowska N., Jackson M.A., McKenzie D.R. *A mathematical framework for separating the direct and bystander components of cellular radiation response*. Acta Oncologica, 49: 1334 – 1343, 2010.
- [16] Taylor J.R. *Wstęp do analizy błędów pomiarowych*. Wyd. Naukowe PWN, 2016.
- [17] Hattori Y., Yokoya A., Watanabe R. *Cellular automaton-based model for radiation-induced bystander effects*. BMC System Biology, 9:90, 2015.
- [18] Wysocki P. *Modelowanie odpowiedzi grupy komórek na promieniowanie jonizujące metodą Monte Carlo*. Praca inżynierska, Wydział Fizyki Politechnika Warszawska, 2017, promotor: K. Fornalski.
- [19] Fornalski K.W. *Mechanistic model of the cells irradiation using the stochastic biophysical input*. International Journal of Low Radiation, vol. 9, no. 5/6, pp. 370-395, 2014.
- [20] Fornalski K.W., Dobrzyński L., Janiak M.K. *Stochastyczny model odpowiedzi komórek na promieniowanie*. Postępy Techniki Jądrowej, vol. 54, no. 3, 2011, pp. 23-37.
- [21] Gaillard S., Pusset D., de Toledo S.M., Fromm M, Azzam E.I. *Propagation Distance of the  $\alpha$ -Particle-Induced Bystander Effect: The Role of Nuclear Traversal and Gap Junction Communication*. Radiat. Res., 2009, 171(5), pp. 513–520.
- [22] Sasaki K., Waku K., Tsutsumi K., Itoh A., Date H. *A Simulation Study of the Radiation-Induced Bystander Effect: Modeling with Stochastically Defined Signal Reemission*. Computational and Mathematical Methods in Medicine (Hindawi Publishing Corporation), 2012, Article ID 389095, doi:10.1155/2012/389095.
- [23] Prise K.M., Folkard M., Michael B.D. *A review of the bystander effect and its implications for low-dose exposure*. Radiation Protection Dosimetry 104(4), 2003, pp. 347-355.
- [24] Nagasawa H., Little J.B. *Induction of sister chromatid exchanges by extremely low doses of alpha-particles*. Cancer Res. 1992 Nov 15;52(22):6394-6.
- [25] Wysocki P. *Modelowanie Monte Carlo efektu sąsiedztwa oraz dynamiki procesu nowotworzenia dla grupy komórek narażonych na promieniowanie jonizujące*. Praca magisterska, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, 2019, promotor: K. Fornalski.
- [26] Fornalski K.W., Reszczyńska J., Dobrzyński L., Wysocki P., Janiak M.K. *Possible Source of the Gompertz Law of Proliferating Cancer Cells: Mechanistic Modeling of Tumor Growth*. Acta Physica Polonica A, No. 6 Vol. 138, 2020.
- [27] Dobrzyński L., Fornalski K.W., Reszczyńska J., Janiak M.K. *Modeling Cell Reactions to Ionizing Radiation: From a Lesion to a Cancer*. Dose-Response, vol. 17, no. 2, 2019.



## REALIZACJA PRAC PROJEKTOWYCH REAKTORA HTGR – UMOWA PODPISANA

Narodowe Centrum Badań Jądrowych oraz Ministerstwo Edukacji i Nauki podpisały umowę na realizację kolejnej partii prac projektowych wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem (ang. High Temperature Gas cooled Reactor, HTGR). W wydarzeniu, które odbyło się 12 maja 2021 r. w Otwocku-Świerku, uczestniczyli minister edukacji i nauki Przemysław Czarnek, minister klimatu i środowiska Michał Kurtyka oraz dyrektor Narodowego Centrum Badań Jądrowych Krzysztof Kurek.

Umowa przewiduje, że w ciągu trzech lat w Narodowym Centrum Badań Jądrowych zostaną przygotowane warunki do wybudowania w Polsce badawczego

reaktora wysokotemperaturowego. NCBJ opracuje projekt podstawowy takiego urządzenia na wstępnym poziomie szczegółowości. Na ten cel MEiN w porozumieniu z Ministerstwem Klimatu i Środowiska przeznaczy 60,5 mln zł.

- Działający od ponad 45 lat w Świerku badawczy reaktor MARIA był dziełem polskich naukowców i inżynierów. Cieszę się, że polscy naukowcy ponownie będą mogli zaprezentować swoje możliwości. Chcielibyśmy, aby stworzyli oni nową jakość – projekt urządzenia potrzebnego dla naszej gospodarki oraz stymulującego rozwój nauki. Dziś dajemy im do ręki potrzebne do tego środki – powiedział minister Przemysław Czarnek.

Jak zaznaczył minister klimatu i środowiska Michał Kurtyka reaktor HTGR to pierwszy krok w kierunku szerokiego wykorzystania reaktorów wysokotemperaturowych w gospodarce.



- Ministerstwo Klimatu i Środowiska wspiera wszelkie inicjatywy, które mogą przyczynić się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Energetyka jądrowa jest narzędziem, które pozwoli zaspokoić potrzeby nowoczesnej gospodarki i przemysłu bez szkody dla środowiska. Technologia HTGR, pod warunkiem jej przemysłowej komercjalizacji, może być takim narzędziem w przyszłości – podkreślił.

Technologia reaktorów wysokotemperaturowych otwiera nowe możliwości bezemisyjnego, stabilnego, bezpiecznego i taniego zasilania polskiego przemysłu chemicznego ciepłem przemysłowym i energią. Reaktory wysokotemperaturowe są w stanie wytwarzać ciepło dostarczane nośnikami o temperaturze od 600 nawet do 1000 stopni Celsjusza. W przyszłości mogłyby zastąpić dotychczasowe, konwencjonalne instalacje dostarczające ciepło do zakładów chemicznych. Wykorzystanie ciepła z reaktorów wysokotemperaturowych może pozwolić m.in. na produkcję wodoru dla potrzeb codziennego transportu. Uwzględniając nowatorskie podejście technologii HTGR, kompleksowość samego zadania i potencjał ośrodka NCBJ oraz wieloletni horyzont czasowy samych prac analitycznych, których część będzie realizowana w ramach podpisanej umowy, w przyszłości można będzie liczyć na uruchomienie całkowicie komercyjnego przemysłowego reaktora HTGR w Polsce.

Dyrektor Narodowego Centrum Badań Jądrowych Krzysztof Kurek wyjaśnił, że w NCBJ powstanie najpierw niezbędne zaplecze laboratoryjne, przede wszystkim do badania materiałów wykorzystywanych w technologii reaktorów wysokotemperaturowych.

- Materiały do tego typu urządzeń muszą pracować w ekstremalnych warunkach, wysokich temperaturach, poddane działaniu promieniowania neutronowego i wysokiego ciśnienia. W ramach umowy wykonamy także potrzebne analizy techniczne i symulacje oraz analizy bezpieczeństwa wymagane przed wystąpieniem z wnioskiem o wydanie zezwolenia na budowę obiektu jądrowego – poinformował dyrektor NCBJ.

*Wspólny komunikat  
MEiN, MKiŚ oraz NCBJ*



## EUROPOWER 2021

W dniach 28-29 kwietnia 2021 r. odbyła się 33. Konferencja Energetyczna EuroPower. Wydarzenia te od lat stanowią platformę dialogu będącą miejscem konsultacji społecznych przedstawicieli rządu ze wszystkimi reprezentantami branży. Celem, który przy-

świeca konferencjom, jest merytoryczna debata skupiona na aktualnej sytuacji ekonomiczno-politycznej. Tegoroczne wydarzenie zostało zrealizowane w formie online. Po raz kolejny kluczowi przedstawiciele branży dyskutowali na temat najbardziej aktualnych wyzwań i problemów dotyczących sektora energetycznego w Polsce. W części inauguracyjnej mówiono o polityce energetycznej Polski. Ekspertsi rozmawiali o „Nowym Polskim Ładzie”, jako mechanizmie adaptacji i absorpcji europejskiej strategii transformacji. Określono perspektywy polskiej energetyki do 2040 r. w kontekście dążenia do zeroemisyjności. Poruszone zostały zagadnienia dotyczące rozwoju energetyki niskoemisyjnej, integracji rozproszonych odnawialnych źródeł energii oraz potencjału wodoru w dekarbonizacji energetyki. Zaproszeni goście odnieśli się do kwestii wyzwań społecznych i gospodarczych na drodze efektywnej i sprawiedliwej transformacji regionów węglowych. Zastanawiano się także, w jakim stopniu energia jądrowa może pomóc przetransformować polską energetykę.

W wydarzeniu udział wzięli między innymi: minister klimatu i środowiska Michał Kurtyka, wiceminister Ireneusz Zyska oraz wiceminister Adam Guibourgé-Czewertyński. Udowadniali oni, że według obecnych szacunków w 2040 r. połowę mocy zainstalowanych będą stanowić źródła zeroemisyjne. Szczególną rolę odegra w tym procesie wdrożenie do polskiego systemu elektroenergetycznego morskiej energetyki wiatrowej i uruchomienie elektrowni jądrowej. Będą to dwa strategiczne nowe obszary i gałęzie przemysłu, które zostaną zbudowane w Polsce. Minister podkreślił także, że transformacja energetyczna to również szansa na rozwój krajowego przemysłu, rozwój wyspecjalizowanych kompetencji kadrowych, nowe miejsca pracy i generowanie wartości dodanej dla naszej gospodarki. Drugiego dnia wydarzenia dyskusja skierowana była w stronę cyfryzacji usług, w tym zagadnień dotyczących udziału nowoczesnej technologii w digitalizacji energetyki, ewolucji w kierunku lokalnych systemów energetycznych oraz bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej w modelu centralnym i rozproszonym. Omówione zostały również kwestie: przemysłu energochłonnego w procesie transformacji energetycznej, transformacji ciepłownictwa, morskiej energetyki wiatrowej oraz strategii nowoczesnych przedsiębiorstw energetycznych. Energetyce jądrowej poświęcona była sesja zatytułowana „Energetyka jądrowa – przełom w polskiej transformacji energetycznej”. Prezentację wprowadzającą wygłosił Vakis Ramany (Senior Vice President Development, New Nuclear Projects, EDF). Moderatorem był Jakub Wiech, z-ca redaktora naczelnego, Energetyka24.com. Dyskutowano, w jakim stopniu energia jądrowa może pomóc przetransformować polską energetykę. Zastanawiano się, jak osiągnąć ten cel? Poruszono niektóre kwestie technologiczne, fi-



Fot. 1. Panel na temat energetyki jądrowej z udziałem Vakisa Ramany z EDF, (fot. w. Głuszewski)

nansowe i polityczne. Nawiązano do międzynarodowej współpracy na rzecz klimatu i zrównoważonego rozwoju i w tym kontekście do wyzwań dla energetyki jądrowej. Jak widać, Francja nie zrezygnowała z walki o polski atom. Francuski premier Jean Castex powołał Philippe'a Crouzet na stanowisko Wysokiego Przedstawiciela ds. Współpracy w dziedzinie cywilnej energetyki jądrowej z Polską. Ma on koordynować po stronie Francji inicjatywy związane ze współpracą z Polską i wsparcie różnych ministerstw w tej sprawie. Za kwestie technologiczne ma być odpowiedzialny EDF. Firma w ciągu 12 miesięcy ma przygotować kompleksową

ofertę „wraz ze schematem finansowym na budowę reaktorów w Polsce” tak, by polski rząd mógł ją rozpatrzyć wraz z ofertą Amerykanów. Można dodać, że EDF jest największym operatorem energetyki jądrowej na świecie – zarządza 56 reaktorami we Francji i 15 w Wielkiej Brytanii. Koncern, w którym ponad 80% udziałów ma francuski rząd, traktuje Polskę, obok Czech, jako kluczowego potencjalnego klienta w Europie.

*Wojciech Głuszewski,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa*



## XV ZJAZD PTN

17 kwietnia 2021 r. odbył się XV Zjazd Polskiego Towarzystwa Nukleonowego. W związku z ograniczeniami wywołanymi epidemią koronawirusa COVID-19, przeprowadzono go w trybie telekonferencji zorganizowanej przez Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. Było to zgodne z przepisami Prawa o stowarzyszeniach wprowadzonych art. 18 Tarczy Antykryzysowej (ustawa z 17 kwietnia 2020 o szczególnych instrumentach wsparcia w związku z rozprzestrzenianiem się wirusa SARS-CoV-2). Zjazd miał charakter techniczny. Pisemne sprawozdania Zarządu Głównego, Komisji Rewizyjnej oraz Sądu Koleżeńskiego wcześniej wysłano członkom PTN. Uwagi i propozycje programowe zebrano w formie elektronicznej (mailowo). Zjazd otworzyła prezentacja kończącej drugą kadencję Prezes PTN prof. dr hab. Grażyny Zakrzewskiej-Kołtuniewicz. Przypomniała ona najważniejsze wydarzenia ostatnich lat działalności organizacji. Zjazd udzielił absolutorium

ustępującemu zarządowi. Następnie odbyły się wybory władz PTN. Prezesem na kolejną kadencję został Marek Rabiński. Wiceprezesami wybrano: Agnieszkę Korgul i Grażynę Zakrzewską-Kołtuniewicz. Funkcje Sekretarza Generalnego powierzono Pawłowi Gajdzie. Skarbnikiem ponownie została Dagmara Chmielewska-Śmietanko. W skład Zarządu Głównego weszli ponadto: Andrzej G. Chmielewski, Andrzej Cholerzyński, Wojciech Głuszewski, Andrzej Mikulski, Agnieszka Miśkiewicz, Krzysztof Rzymowski, Jan Składzień. Komisja Rewizyjna została wybrana w składzie: Adam Hryczuk, Rafał Laskowski, Stanisław Latek, Bożena Sartowska. W skład Sądu Koleżeńskiego weszli: Tomasz Jackowski, Jerzy Niewodniczański, Anna Wysocka-Rabin.

*Wojciech Głuszewski,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa*





## ROZPOCZYNAJĄ SIĘ PRACE NAD TUNELEM PIERWSZEJ OSTATECZNEJ UTYLIZACJI W FIŃSKIM SKŁADOWISKU ZUŻYTEGO PALIWA

07 MAJA 2021

W podziemnym składowisku zużytego paliwa jądrowego w Onkalo w pobliżu Olkiluoto rozpoczęto wykopywanie pierwszego tunelu do ostatecznej utylizacji, poinformowała dziś fińska firma zarządzająca odpadami promieniotwórczymi Posiva Oy. Składowisko – pierwsze na świecie składowisko zużytych paliw – ma rozpocząć działalność w połowie lat dwudziestych XXI wieku.

Zużyte paliwo jądrowe zostanie umieszczone w podłożu skalnym, na głębokości około 450 m. System utylizacji składa się ze szczelnie zamkniętego kanistra z żelaza i miedzi, buforu bentonitowego otaczającego kanister, materiału wypełniającego tunel z pęczniejącej gliny, konstrukcji uszczelniających tunele i pomieszczeń oraz otaczającej je skały.

Pierwsze pięć tuneli, które zostaną wykopane w ciągu następnych 18 miesięcy, to początek szeroko zakrojonych prac budowlanych, powiedział przedstawiciel Posiva. Szacuje się, że w ciągu 100-letniego okresu eksploatacji ostatecznego składowiska wykopanych zosta-

nie 100 tuneli do składowania o łącznej długości około 35 kilometrów. Maksymalna długość każdego tunelu wyniesie 350 m. Tunele będą miały około 4,5 m wysokości i około 3,5 m szerokości.

Wykonanie pierwszych pięciu tuneli jest częścią projektu EKA o wartości około 500 mln EUR (607 mln USD), który obejmuje wszystkie niezbędne obiekty do ostatecznej utylizacji, w tym zarówno ich budowę, jak i wyposażenie, a także rozpoczęcie ostatecznej operacji unieszkodliwiania w pierwszym składowaniu.

Firma stwierdziła, że rozpoczęcie wykopalsk jest „znaczącym kamieniem milowym” dla Posivy, ponieważ nastąpiło po latach prac rozwojowych nad badaniami i metodologią budowy skał. Fiński Urząd ds. Bezpieczeństwa Radiacyjnego i Jądrowego (STUK) przed rozpoczęciem wykopalsk uznał, że warunki wstępne określone dla rozpoczęcia prac zostały spełnione.

„Lata badań i rozwoju konstrukcji skalnej, które doprowadziły do powstania procedur budowy obiektu jądrowego dostosowanego do fińskiego podłoża skalnego, osiągnęły punkt kulminacyjny” – powiedział kierownik budowy Posiva Juha Riihimäki, dodając, że rozwój metodologii rozpoczął się wraz z budową zakładu Onkalo w 2004 r.

### Paliwo w kapsułkach

Plan Posivy zakłada pakowanie zużytego paliwa do miedziano-stalowych kanistrów w naziemnym zakładzie hermetyzacji, którego budowa rozpoczęła się



Fot.1. Wykopywanie pierwszego tunelu osadczego, który docelowo będzie miał długość nawet 350 m, rozpoczyna się w Onkalo (fot.: Posiva)



we wrześniu 2019 r. i ma zostać zakończona w połowie 2022 r.

W każdym tunelu zostanie umieszczonych około 30 kanistrów, powiedział Riihimäki. Liczba ta zależy od tego, ile otworów osadowych znajduje się w tunelu, co jest określane na podstawie objętości odpowiedniej skały oraz spękań skał. 30 kanistrów umieszczonych w każdym tunelu może pomieścić łącznie około 65 ton zużytego paliwa jądrowego.

Posiva zauważa, że hermetyzacja zużytego paliwa jądrowego i umieszczanie kanistrów w otworach do składowania rozpocznie się po wydaniu przez rząd Finlandii zezwolenia na eksploatację obiektu do ostatecznego unieszkodliwiania.

„Obecnie szacuje się, że ostateczna operacja utylizacji rozpocznie się w połowie lat 20”. – powiedział Kimmo Kemppainen, kierownik programu Posiva. „Wykopywanie i wzmacnianie tuneli, które rozpoczęto zgodnie z rygorystycznymi wymogami regulacyjnymi, oznacza dla Posivy przejście do realizacji najbardziej złożonego i wymagającego systemu konstrukcji skalnej w Onkalo”.

W marcu tego roku Posiva ogłosiła, że w Onkalo rozpoczęto prace związane z wykopaniem tunelu w celu przeprowadzenia „wspólnego testu funkcjonalnego”, który obejmuje ostateczną utylizację na małą skalę w rzeczywistych warunkach i jest częścią uruchomienia składowiska geologicznego. Tunel ten będzie miał około 80 m długości i zostaną w nim wywiercone cztery otwory do osadzania podczas wspólnego testu funkcjonalnego, który odbędzie się w 2023 r. Test ten pokaże, że procesy i procedury związane z ostateczną utylizacją są prawidłowe i dopiero wtedy zapadnie decyzja czy obiekt unieszkodliwiania może otrzymać koncesję na prowadzenie działalności.

Miejsce dla repozytorium Posivy zostało wybrane w 2000 r. Fiński parlament zatwierdził zasadniczą decyzję dotyczącą projektu repozytorium w następnym roku. Posiva – współwłasność fińskich zakładów jądrowych Fortum i Teollisuuden Voima Oyj – złożyła wniosek o pozwolenie na budowę do Ministerstwa Pracy i Gospodarki w grudniu 2013 r. Posiva zbadała skałę w Olkiluoto i przygotowała wniosek o zezwolenie na podstawie wyników z podziemnego laboratorium Onkalo, który jest rozbudowywany, aby stworzyć podstawę repozytorium.

Rząd udzielił koncesji na budowę w listopadzie 2015 r. Prace budowlane na składowisku rozpoczęły się rok później.

Składowisko geologiczne Onkalo będzie pierwszym na świecie składowiskiem zużytego paliwa jądrowego. Podobne repozytorium planowane jest w Forsmark w Szwecji.

*Opracowane i napisane przez  
World Nuclear News*



## FUKUSHIMA DAIICHI, WODA KTÓRA MA ZOSTAĆ ZRZUCONA DO MORZA

Japoński rząd ogłosił dziś formalną decyzję, że oczyszczona woda przechowywana w Fukushima Daiichi zostanie odprowadzona do morza. Oczekuje się, że Tokyo Electric Power Company (Tepco) zacznie odprowadzać lekko radioaktywną wodę w 2023 r. Zgodnie z międzynarodowymi normami i przepisami.

W zakładzie Fukushima Daiichi skażona woda jest oczyszczana przez Advanced Liquid Processing System (ALPS), który usuwa większość skażeń radioaktywnych, z wyjątkiem trytu. Ta uzdatniona woda jest obecnie przechowywana w zbiornikach na miejscu. Całkowita pojemność zbiorników wynosi około 1,37 mil m<sup>3</sup>, a wszystkie zbiorniki mają być pełne około lata 2022 r.

Japońskie Ministerstwo Gospodarki, Handlu i Przemysłu wydało dziś podstawową politykę utylizacji zmagazynowanej uzdatnionej wody.

„Jeśli chodzi o zbiorniki zainstalowane na terenie elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi, wskazano, że istnienie samych zbiorników jest przyczyną niekorzystnego wpływu na reputację oraz ryzyko wycieku i innych zagrożeń związanych z pogorszeniem stanu lub katastrofą, która może wzrosnąć wraz z długotrwałym przechowywaniem” – czytamy w dokumencie. „Co więcej, budowa dodatkowych zbiorników na otaczających terenach poza fabryką Fukushima Daiichi w celu dodatkowego magazynowania wymagałaby większej powierzchni i spowodowałyby dodatkowe obciążenie dla ludzi, którzy pilnie pracują nad odbudową”.

Podstawowa polityka wymaga, aby woda uzdatniona ALPS była zrzucana do morza „pod warunkiem zachowania pełnej zgodności z prawem i przepisami oraz gruntownego wdrożenia środków minimalizujących negatywny wpływ na reputację”.

Przed wypuszczeniem zmagazynowanej wody Tepco jest zobowiązane do uzyskania zgody Urzędu Regulacji Jądrowej na szczegółowy plan w tym zakresie, jak również na budowę niezbędnych obiektów.

Oczekuje się, że rozpoczęcie zrzutu wody poddanej obróbce ALPS do morza nastąpi za około dwa lata. Początkowo uwolniona zostanie niewielka ilość wody, a jej wpływ na otaczające środowisko zostanie oceniony.

## Poziomy trytu

Zgodnie z dokumentem politycznym tryt zostanie rozcieńczony do 1500 bekereli na liter, co stanowi jedną czterdziestą stężenia dozwolonego zgodnie z japońskimi normami bezpieczeństwa i jedną siódmą wytycznych Światowej Organizacji Zdrowia dotyczących wody pitnej. Całkowita roczna ilość uwalnianego trytu „będzie na poziomie poniżej docelowej wartości operacyjnej dla zrzutów trytu z elektrowni Fukushima Daiichi przed awarią (22 biliony bekereli rocznie)”. Kwota będzie okresowo weryfikowana. „Ta operacyjna wartość emisji trytu mieści się w przedziale wielkości zrzutów z każdej elektrowni jądrowej w hrabstwie i poza nim”.

„Utylizacja uzdatnionej wody jest nieuniknionym wyzwaniem dla likwidacji elektrowni” – powiedział premier Yoshihide Suga, cytowany przez Jiji Press. „Rząd doszedł do wniosku, że uwolnienie wody do oceanu jest metodą realistyczną”.

W ramach podstawowej polityki rząd zapewni wsparcie dla różnych branż, takich jak przemysł rybny w prefekturze Fukushima, sąsiednie prefektury i inne. Wsparcie to obejmuje tworzenie i rozwijanie kanałów sprzedaży zarówno na obszarach lokalnych, jak i na obszarach o dużej konsumpcji, w tym za granicą.

W oświadczeniu Tepco przekazała, że decyzję rządu o odprowadzaniu wody traktuje „bardzo poważnie”. Tepco będzie „ściśle przestrzegać wszystkich praw i przepisów, takich jak przepisy bezpieczeństwa jądrowego, które są zgodne z międzynarodowymi standardami, a także dokładnie wdrażać środki w celu zminimalizowania negatywnego wpływu na reputację”.

„Tepco niezwłocznie powiadomi opinię publiczną po sformułowaniu odpowiedzi opartej na podstawowej polityce rządu” – podała firma.

## Współpraca międzynarodowa

Decyzja o uwolnieniu wody do morza została przyjęta przez dyrektora generalnego Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) Rafaela Mariano Grossiego. Grossi powiedział, że MAEA jest gotowa udzielić wsparcia technicznego w monitorowaniu i przeglądzie bezpiecznego i przejrzystego wdrażania planu.

„Dzisiejsza decyzja rządu Japonii jest kamieniem milowym, który pomoże utworzyć drogę do dalszego postępu w likwidacji elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi” – powiedział Grossi. „Zbiorniki z wodą zajmują duże obszary terenu, a zarządzanie wodą, w tym usuwanie uzdatnionej wody w bezpieczny i przejrzysty sposób z udziałem wszystkich zainteresowanych stron, ma kluczowe znaczenie dla trwałości tych działań likwidacyjnych”.

Dodał: „Decyzja japońskiego rządu jest zgodna z praktyką na całym świecie, mimo że duża ilość wody w elektrowni w Fukushimie sprawia, że jest to wyjątkowy i złożony przypadek”.

MAEA zauważyła, że Japonia zwróciła się do MAEA o współpracę w zakresie usuwania wody, wysyłając międzynarodowe misje eksperckie w celu przeglądu planów i działań tego kraju pod kątem standardów bezpieczeństwa MAEA, a także wspierając i uczestnicząc w tamtejszych operacjach monitorowania środowiska.

„Będziemy ściśle współpracować z Japonią przed, w trakcie i po wypuszczeniu wody” – powiedział Grossi. „Nasza współpraca i nasza obecność pomoże zbudować zaufanie – w Japonii i poza nią – że odprowadzanie wody odbywa się bez negatywnego wpływu na zdrowie ludzi i środowisko”.

*World Nuclear News*

## ABSURDALNA BLOKADA TERAPII PROTONOWEJ W BRONOWICACH

Centrum Cyklotronowe Bronowice (CCB) przy Instytucie Fizyki Jądrowej powstało głównie w celu leczenia pacjentów z nowotworami najnowocześniejszą na świecie metodą, jaką jest protonoterapia. Polega ona na tym, że nowotwory naświetla się wiązką protonów bez naruszenia zdrowych tkanek. Energia protonów musi być dopasowana do wielkości i usytu-

owania guza w organizmie. Urządzeniem bazowym CCB jest cyklotron C-235 przyspieszający protony do energii 235 MeV, czyli wystarczającej na ich penetrację w ciele chorego do głębokości około 30 cm. Nowotwory zlokalizowane na mniejszych głębokościach naświetla się wiązką o niższej energii wydzieloną z pełnego widma za pomocą precyzyjnego selektora. W CCB można naświetlać guzy położone w dowolnym miejscu ciała pacjenta, a co najważniejsze w najtrudniej dostępnych, delikatnych narządach jak oko czy mózg, nawet u dzieci. Użycie wiązki skanującej oraz odpowiednich przesłon eliminujących promieniowanie rozproszone, dodatkowo maksymalnie ogranicza

uszkodzenie zdrowych tkanek wokół guza. Metoda jest bezkrawowa: protony niszczą DNA komórek rakowych. Po ich naświetleniu nowotwór się obkurcza, aż do całkowitego zaniku.

Centrum Cyklotronowe Bronowice jest jedynym takim ośrodkiem w Polsce, a także w Europie Środkowej. Koszt jego budowy wyniósł 265 mln zł. Pierwszy pacjent został naświetlony w 2016 r. Centrum bronowickie od powstania współpracowało z Centrum Onkologii przy ul. Garncarskiej w Krakowie oraz Uniwersyteckim Szpitalem Dziecięcym w Prokocimiu, który działał jako podwykonawca Centrum Onkologii. Początkowo radioterapia protonowa oka była finansowana jako badania pilotażowe. Następnie po trudnych negocjacjach udało się kilkakrotnie podpisać krótkotrwałe kontrakty na naświetlanie oka i bardzo rzadko występujących nowotworów okolicy głowy, szyi, ślinianek, podstawy czaszki, mózgowia i rdzenia kręgowego. CCB jest gotowe do objęcia leczeniem co najmniej kilkuset dzieci rocznie, a np. w 2018 r. naświetlono zaledwie jedno, zakwalifikowane medycznie do leczenia rok wcześniej! Liczba dorosłych leczonych protonami mogłaby być znacznie większa.

W marcu 2020 r. wygasł kontrakt Uniwersyteckiego Szpitala Dziecięcego w Krakowie-Prokocimiu (USDK) z Centrum Onkologii na finansowanie protonoterapii przez NFZ. Dyrekcja USDK zastrzegła w preambule ostatniej umowy z Centrum Onkologii (ze stycznia 2019 r.), że szpital nie będzie kontynuować protonoterapii u dzieci na niezmiennych warunkach. Jak dotąd Centrum Onkologii, razem ze Szpitalem w Prokocimiu, jako podwykonawcą, miał monopol na kierowanie pacjentów do leczenia protonami.

Ogłoszono konkurs na podwykonawstwo protonoterapii w Bronowicach, niestety nikt do niego nie przystąpił, mimo że był kilkakrotnie wznawiany. Powstała sytuacja patowa, zwłaszcza że komercyjna terapia protonami również nie jest możliwa, bo nie istnieją żadne procedury zarówno przepływu pieniędzy, jak i dyrektywy, kto ma je przyjmować.

A statystyka nowotworów jest zastraszająca. W Polsce rocznie umiera na raka 100 tys. osób. W 2020 r. zarejestrowano 196 tys. nowych zachorowań, co oznacza, że rak jest groźniejszy niż epidemia COVID-19. Dzieci chorują inaczej niż dorośli. U nich rozpoznanie nowotworu następuje zwykle dopiero w III i IV stadium choroby, kiedy rak rozwija się w piorunującym tempie. Gdyby rozpoznanie nastąpiło w pierwszym, czy drugim stadium 80% chorych dzieci dałoby się uratować. Tak więc czas jest tu niezwykle ważnym parametrem.

Sprawą organizacji, wdrożenia i upowszechnienia najnowocześniejszej na świecie metody leczenia raka w Centrum Cyklotronowym Bronowice zajęła się Najwyższa Izba Kontroli, przeprowadzając drobiazgową kontrolę. Kontrola trwała od marca do sierpnia 2020 r. W połowie kwietnia 2021 r. NIK opublikowała raport dotyczący dostępności terapii protonowej i wykorzystania cyklotronów, w którym między innymi czytamy: **„Wyposażenie CCB oraz kadra fizyków medycznych i techników elektroradiologii spełniały wymogi rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 22 listopada 2013 r. w sprawie świadczeń gwarantowanych z zakresu leczenia szpitalnego”** i dalej: **„nieprawidłowości brak”**. Wszystko, co zależało od Instytutu Fizyki Jądrowej, zostało ocenione pozytywnie. Zastrzeżenia dotyczyły jedynie aspektów medycznych, na które Instytut Fizyki Jądrowej nie miał wpływu.

„Niektórzy przedstawiciele środowiska medycznego, środowiska onkologicznego, niezwykle opiniotwórczego i wpływowego, po prostu nas oczerniali [...] Przez kilka lat dało się odczuć, że zarówno w Ministerstwie Zdrowia, jak i w Instytucie Onkologii czy nawet w Szpitalu Uniwersyteckim w Krakowie ugruntowała się taka opinia, że najlepiej byłoby protonoterapię fizykom zabrać. Po części rozumiem ten tok myślenia – lekarze źle znoszą, jak w proces leczenia zaangażowany jest ktoś z zewnątrz”. – mówi prof. Marek Jeżabek – były dyrektor Instytutu Fizyki Jądrowej.

Ta sytuacja wywołuje skrajne oburzenie społeczne: krzyk rozpaczliwych rodziców dzieci konających na raka, protesty prasy, radia, telewizji, radnych (niestety tylko części) miasta Krakowa. Wysłano petycje do ministra zdrowia...

Pytanie, czy i kiedy odniosą skutek? Państwo medycy, jak widać, bardziej walczą o ochronę swojego zawodu niż o ratowanie zdrowia i życia pacjentów, nawet bezbronnych dzieci! Jak pies ogrodnika. Zamiast dopuścić fizyków do nowoczesnego leczenia dzieci i dorosłych stosują stare, bardzo inwazyjne i mało skuteczne metody. Najwyraźniej zapomnieli przysięgę Hipokratesa. Przypomnę: *primum non nocere*, Panowie.

dr Małgorzata Nowina Konopka,  
Oddział Krakowski Polskiego  
Towarzystwa Fizycznego,  
Kraków



## KONFERENCJA SIOR 2021

Coroczne spotkanie inspektorów ochrony radiologicznej z powodu stanu epidemii zostało zorganizowane (27 kwietnia 2021 r.) w formie on-line. Konferencja została objęta patronatem Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Wzięło w niej udział ponad 160 zalogowanych uczestników. W rzeczywistości uczestników było znacznie więcej, ponieważ w wielu przypadkach transmisję na jednym komputerze śledziło kilka osób. Webinarium prowadziła Prezes SIOR Maria Kubicka.

Słowo wstępne wygłosił Prezes Państwowej Agencji Atomistyki dr Łukasz Młynarkiewicz. Mówiąc o wartościach jakie przyniosła 22-letnia działalność Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej, podkreślił w szczególności ostatnie lata, w czasie których doszło do ściślejszej współpracy z PAA oraz większej integracji krajowego środowiska inspektorów ochrony radiologicznej.

W otwierającym konferencję wykładzie prof. Leszek Królicki opisał rolę konsultanta krajowego w dziedzinie medycyny nuklearnej. Podkreślił, że obecnie najważniejszym zadaniem jest rozwiązanie kwestii radiofarmacji szpitalnej w kontekście nowych uwarunkowań prawnych. Przedmiotem troski są także odpowiednie wyposażenie i zapewnienie właściwych warunków bezpieczeństwa w pracowniach radiofarmaceutycznych.

Głównym celem spotkania było omówienie ustawy Prawo atomowe, która weszła w życie 23 września 2019 r. oraz aktualnych rozporządzeń wykonawczych. Inspektor Edward Radwan z Departamentu Ochrony Radiologicznej PAA poinformował, że Państwowa Agencja Atomistyki na podstawie upoważnienia ministra klimatu i środowiska prowadziła prace nad 19 projektami rozporządzeń. Aktualnie 7 weszło w życie, 4 uchwalone przez Radę Ministrów zostały ogłoszone lub oczekują na ogłoszenie w Dzienniku Ustaw, 4 zostały wstępnie przyjęte przez Radę Ministrów i skierowane do zaopiniowania przez Komisję Europejską, 2 są w trakcie rozpatrywania przez odpowiednie komitety Rady, 2 są na końcowym etapie uzgodnień. W życie weszły następujące rozporządzenia: zmieniające rozporządzenie w sprawie podstawowych wymagań dotyczących terenów kontrolowanych i nadzorowanych (Dz. U. poz. 2303); w sprawie ochrony przed promieniowaniem jonizującym pracowników zewnętrznych narażonych podczas pracy na terenie kontrolowanym lub nadzorowanym (Dz. U. poz. 2313); zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania

jonizującego (Dz. U. poz. 2300); w sprawie rodzajów działań interwencyjnych wprowadzanych w strefie zewnętrznej oraz wartości operacyjnych poziomów interwencyjnych stanowiących podstawę wprowadzenia w strefie zewnętrznej tych działań (Dz. U. poz. 2247); w sprawie materiałów budowlanych, w przypadku, których oznacza się stężenie promieniotwórcze izotopów potasu  $^{40}\text{K}$ , radu  $^{226}\text{Ra}$  i toru  $^{232}\text{Th}$ , szczegółowych wymagań dotyczących dokonywania tych oznaczeń oraz wartości wskaźnika stężenia promieniotwórczego, o którego przekroczeniu informuje się właściwe organy (Dz. U. z 2021 r. poz. 33); w sprawie wzoru legitymacji służbowej inspektora dozoru jądrowego (Dz. U. poz. 1518); zmieniające rozporządzenie w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz. U. poz. 663). W materiałach konferencyjnych znajdują się omówienia wprowadzonych rozporządzeń. Inspektor Edward Radwan w odpowiedziach na pytania, które wpłynęły do SIOR od IOR z Polski, wyjaśnił wątpliwości odnośnie przepisów dotyczących między innymi:

- pracownika i pracownika zewnętrznego;
- systemu rejestracji i analizy wystąpienia narażenia przypadkowego;
- kwalifikacji pracownika do kategorii narażenia;
- nadzoru inspektora ochrony radiologicznej;
- kontroli źródeł promieniotwórczych;
- wyłączenia działalności związanych z narażeniem z reglamentacji;
- centralnego rejestru dawek;
- pracowni rentgenowskich;
- kontroli urządzeń zawierających źródła promieniotwórcze lub wytwarzających promieniowanie jonizujące przed wprowadzeniem ich do eksploatacji;
- transportu źródeł i materiałów promieniotwórczych;
- obowiązków kierownika jednostki wykonującej działalność na podstawie zgłoszenia lub powiadomienia;



Rys. 1. Aktualny wzór tablicy informacyjnej

- ekip awaryjnych i ich członków w jednostce wykonującej działalność związaną z narażeniem;
- kwalifikacji działalności związanych z narażeniem do kategorii zagrożeń.

W kolejnym wykładzie Dorota Wróblewska z-ca Dyrektora Krajowego Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia w Łodzi omówiła wprowadzone do Prawa atomowego pojęcia ekspozycji niezamierzonych oraz narażeń przypadkowych w medycynie. Rozumie się przez nie odpowiednio ekspozycję medyczną, która w znaczącym stopniu różni się od ekspozycji medycznej przewidzianej dla danego celu (ekspozycja niezamierzona) oraz narażenie w wyniku wypadku osób innych niż członkowie ekip awaryjnych (narażenie przypadkowe). W ramach programu zapewnienia jakości, na jednostki ochrony zdrowia udzielające świadczeń zdrowotnych we wszystkich dziedzinach związanych ze stosowaniem promieniowania jonizującego nakłada się obowiązek podejmowania działań minimalizujących prawdopodobieństwo wystąpienia oraz skalę ekspozycji niezamierzonych i narażeń przypadkowych. Obowiązkiem jest wdrożenie wewnętrznego systemu rejestracji i analizy tego rodzaju ekspozycji (także o charakterze potencjalnym). Określa się także ustawową procedurę postępowania na wypadek wystąpienia takiego zdarzenia. Niezależnie od tego jednostka ma obowiązek przekazania pisemnej informacji o tym zdarzeniu oraz kategorii, do której zostało ono zakwalifikowane do właściwego konsultanta wojewódzkiego lub krajowego oraz do Krajowego Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia. Wyjaśnianie przyczyn oraz okoliczności wystąpienia zdarzeń, powinno być przeprowadzane wewnątrz w jednostce ochrony zdrowia, a wyniki w ciągu 30 dni od jego zakończenia należy przedłożyć konsultantowi lub powołanej na jego wniosek komisji. Jednocześnie w przypadku incydentów istotnych z punktu widzenia ochrony radiologicznej do wyjaśnienia zdarzenia zostaną zaangażowani konsultanci (krajowy lub wojewódzki) lub powołana przez ministra zdrowia komisja.

Mgr Tomasz Kulesza z Wojewódzkiej Stacji Sanitarnej-Epidemiologicznej w Bydgoszczy przybliżył tematy przyznawania zezwoleń na stosowanie aparatów rentgenowskich w medycznych pracowniach rentgenowskich oraz uruchamiania takich pracowni. W tym kontekście omówił istotne zmiany w ustawie Prawo atomowe. Zaprezentował propozycje wytycznych dotyczących składania wniosku o wydanie odpowiednich zezwoleń. Opisał także procedury rozpatrywania tych wniosków przez organy Państwowej Inspekcji Sanitarnej. Opracowane wytyczne są przedmiotem prac prowadzonych przez Główny Inspektorat Sanitarny. Mają one na celu unifikację procedur składania wnio-

sków i trybu ich rozpatrywania przez państwowych wojewódzkich inspektorów sanitarnych.

Jedną ze zmian wprowadzonych przez nowelizację ustawy – Prawo atomowe jest ustanowienie pojęcia ekipy awaryjnej i nałożenie obowiązku jej powołania przez kierownika jednostki organizacyjnej. Mgr inż. Bartosz Dzikowski Dyrektor Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych Państwowej Agencji Atomistyki przedstawił ten temat. Zgodnie z obowiązującym prawem członkiem ekipy awaryjnej jest osoba pełniąca określoną funkcję podczas zdarzenia radiacyjnego, która może zostać narażona podczas wykonywania zadań w związku ze zdarzeniem radiacyjnym. Może to być osoba zatrudniona w jednostce organizacyjnej na terenie, której doszło do zdarzenia radiacyjnego bądź pracownik organu, funkcjonariusz służb mundurowych czy żołnierz biorący udział w likwidacji zagrożenia (w tym w działaniach ratowniczych) czy usuwaniu skutków zdarzenia radiacyjnego. Członkowie ekip awaryjnych muszą odbyć dostosowane do specyfiki pracy odpowiednie szkolenie (z częstotliwością raz na 2 lata) w zakresie podstawowych szkoleń dla pracowników dopuszczonych do pracy przy materiale jądrowym, źródłach promieniowania jonizującego, odpadach promieniotwórczych lub wypalonym paliwie jądrowym oraz ich transporcie, a także szkolenie przygotowujące do działania w przypadku zdarzenia radiacyjnego.

Specjalista z Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych PAA Dawid Frencl wygłosił wykład na temat systemu zarządzania sytuacjami zdarzeń radiacyjnych, jako elementami programu zapewnienia jakości. Dyrektywa BSS wprowadziła dużą ilość zmian w kontekście regulacji dotyczących reagowania na zdarzenia radiacyjne. Fundamentalną zmianą była nowa definicja zdarzenia radiacyjnego. Według obecnej bardziej kompleksowej definicji jest to nietypowa sytuacja lub zdarzenie związane ze źródłem promieniowania jonizującego, wymagające podjęcia pilnych działań interwencyjnych w celu złagodzenia poważnych niepożądanych skutków dla zdrowia ludzi, ich bezpieczeństwa, jakości życia, mienia lub środowiska, lub zmniejszenia ryzyka, które mogłoby doprowadzić do ww. skutków. Jednym z elementów programu zapewnienia jakości jest system zarządzania sytuacjami zdarzeń radiacyjnych, który musi być sporządzony dla zdarzeń o zasięgu ograniczonym do jednostek organizacyjnych lub stanowiących zagrożenia o zasięgu wojewódzkim bądź krajowym.

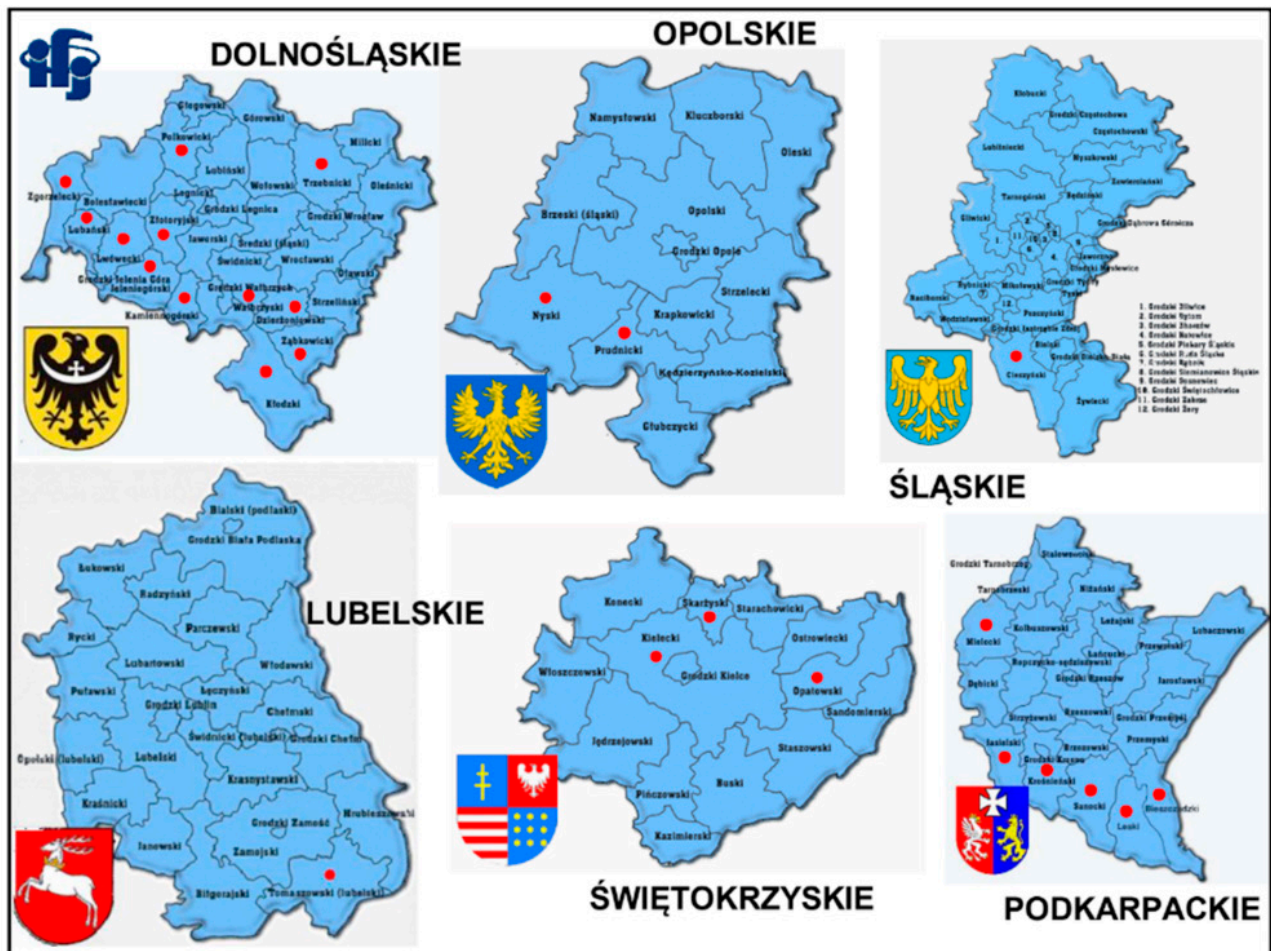
Mgr Piotr Możdżeń z Krajowego Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia w Łodzi szczegółowej analizie poddał przepisy art. 33w ustawy – Prawo

atomowe regulujące, w istotnie szerszym niż dotychczasowym wymiarze, audyty kliniczne zewnętrzne.

Inspektor Ochrony Radiologicznej Daniel Jankowski z Bydgoszczy omówił aktualne przepisy prawne dotyczące stosowania urządzeń dozymetrycznych oraz dokumenty normalizacyjne. Równie ważna, jak świadomość aktualnego prawodawstwa jest wiedza na temat źródeł promieniowania jonizującego, z jakimi pracuje użytkownik. Jeżeli parametry źródła są dobrze znane i opisane, to wybór odpowiedniego detektora jest łatwiejszy i lepiej dopasowany. W swojej prezentacji inspektor przedstawił rodzaje sprzętu dozymetrycznego w zależności od typu promieniowania, energii cząstek, zakresu pomiarowego oraz innych parametrów. Skupił się głównie na przypadkach szczególnych: detekcja niskoenergetycznego promieniowania X, impulsowego promieniowania X, lokalizacja źródeł niekontrolowanych czy też dobór dawkomierzy (aktywnych) w zależności od zdolności penetracji promieniowania. Ponadto, omówił przydatne cechy użytkowe urządzeń dedykowanych do konkretnych aplikacji, takich jak: monitory do wyszu-

kiwania materiałów promieniotwórczych w odpadach (złomie), monitory skażeń, stacjonarne monitory promieniowania, monitoring radiacyjny. Przedstawił również przykładowe modele użytkowe sprzętu dozymetrycznego producentów polskich, jak i zagranicznych: POLON-ALFA, DOZA, ATOMTEX, ROTEM. W ostatniej części prezentacji zaproponował listę dodatkowych cech i parametrów sprzętu dozymetrycznego bądź tylko wykrywającego promieniowanie jonizujące. Ponadto omówił podstawowe wiadomości o wzorcowaniu sprzętu dozymetrycznego.

Prof. Krzysztof Kozak z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN przedstawił nowe regulacje dotyczące stężeń radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) w budynkach i miejscach pracy w zapisach ustawy – Prawo atomowe. W sumarycznej dawce otrzymywanej przez populację Polski dominującym składnikiem, sięgającym około 40%, jest dawka pochodząca od gazowego izotopu radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ), który został uznany za drugi, po paleniu tytoniu, czynnik rakotwórczy. Narażenie na radon w pomieszczeniach zamkniętych (mieszkania i stanowiska pracy) rozpatrywane jest, jako sytuacja narażenia istniejące-



Rys. 2. Tereny „radonowe” w Polsce.



go i ustalony został referencyjny poziom odniesienia dla średniego rocznego stężenia promieniotwórczości radonu w powietrzu na poziomie  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Dyrektywa BSS zaleca podjąć wszelkie niezbędne działania, aby poziom ten nie był przekroczony w budynkach, gdzie przebywają ludzie. Zapisy dyrektywy zostały uwzględnione w znowelizowanej ustawie – Prawo atomowe. Jednym z wymagań ustawy jest utworzenie Krajowego Planu Działania w zakresie radonu. Plan taki został opublikowany w Obwieszczeniu Ministra Zdrowia z dnia 22.01.2021 r. Przedstawiono główne elementy tego planu i działań Głównego Inspektora Sanitarnego w tym zakresie. Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN ma wieloletnie doświadczenie w zakresie problematyki radonowej i od roku 2007 posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (AB 788) metod pomiarów radonu we wszystkich komponentach środowiska.

Na koniec mgr inż. Jerzy Chytła, mgr inż. Marek Garus oraz mgr inż. Mateusz Malicki z Wojewódzkiej Stacji Sanitarno-Epidemiologicznej w Rzeszowie omówili kilka przypadków zdarzeń radiacyjnych w instalacjach termicznego przetwarzania odpadów w Rzeszowie. W przypadku zgłoszenia zdarzenia radiacyjnego Wojewódzkie Centrum Zarządzania Kryzysowego (WCZK) przekazuje informacje do Wojewódzkiego Inspektora Sanitarnego oraz do Komendy Miejskiej Państwowej Straży Pożarnej w Rzeszowie (komórki Specjalistycznej Grupy Ratownictwa Chemiczno-Ekologicznego). W skład ekipy interwencyjnej wchodzi przeszkoleni pracownicy Laboratorium Pomiarów Promieniowania oraz Oddziału Higieny Radiacyjnej. W opracowaniu zdarzenia radiacyjnego uczestniczy dwóch pracowników będących na dyżurze po jednym z każdej komórki. Namierzone źródło promieniotwórcze będące najczęściej odpadem higienicznym umieszcza się w zamkniętym pojemniku, które jest etykietowane. Na etykiecie umieszcza się dane takie jak: data pomiaru, rodzaj źródła, moc dawki źródła, inicjały ekipy pomiarowej. Następnie pojemnik jest umieszczony w wyizolowanym pomieszczeniu. Można dodać, że wiąże się to często z koniecznością przekopania „góry śmieci” przywiezionych np. dużym tirem. Po wykonanych czynnościach pomiarowych zostaje poinformowane Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych Państwowej Agencji Atomistyki w celu podjęcia decyzji odnośnie, co do dalszego postępowania ze źródłem lub odpadami promieniotwórczymi. Zgodnie z zaleceniami dyżurnego pracownicy wykonują pomiary kontrolne źródła promieniotwórczego po upływie daty wskazanej przez CEZAR PAA. W sumie w latach 2018-2021 na terenie województwa rzeszowskiego odnotowa-

no 27 interwencji. Największe uzyskane moce dawek od poszczególnych radioizotopów wynosiły:  $^{99m}\text{Tc}$  -  $80,0 \mu\text{Sv/h}$ ,  $^{131}\text{I}$  -  $48,0 \mu\text{Sv/h}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  -  $80,0 \mu\text{Sv/h}$ . W tym kontekście przypomniano również procedury utylizacji jednorazowych środków ochrony osobistej oraz czyszczenia środków ochrony wielorazowych.



**Fot. 1.** Przyrządy pomiarowe używane w trudnych warunkach takie jak opady atmosferyczne, duże zapylenie w pobliżu odpadów przemysłowych, biologicznych itp. powinny być zabezpieczone workami strunowymi (fot. z archiwum SIOR)

Zainteresowane osoby, zwłaszcza przygotowujące się do egzaminów na różne rodzaje uprawnień związane z ochroną radiologiczną zachęcamy do zapoznania się z pełnymi materiałami konferencyjnymi, na które składa się książka streszczeń oraz prezentacje w formie slajdów.

*Maria Kubicka,  
Prezes  
Stowarzyszenia Inspektorów  
Ochrony Radiologicznej,  
Poznań*

*Wojciech Głuszewski,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa*



## A CO CIEBIE OBCHODZI, CO MYŚLĄ INNI? DALSZY PRZYPADKI CIEKAWEGO CZŁOWIEKA

Richard P. Feynman  
Wydawnictwo Znak  
Litera Nowa  
Kraków 2019

**Richard Phillips Feynman** urodził się w 1918 r. w Nowym Jorku w zsekularyzowanej rodzinie żydowskiej (zm. 15 lutego 1988 r. w Los Angeles). Był jednym z głównych twórców elektrodynamiki kwantowej, laureatem (wraz z Japończykiem Shin'ichirō Tomonagą i Amerykaninem Julianem Schwingerem) Nagrody Nobla w 1965 r. za opracowanie relatywistycznej elektrodynamiki kwantowej. Feynman wynalazł metodę także upraszczania obliczeń przy rozwiązywaniu zagadnień oddziaływania cząstek, przez rysowanie diagramów obrazujących proces (tzw. diagramy Feynmana). Jest uważany również za filozofa.

Niezwykła, interesująca publikacja będąca jakby uzupełnieniem autobiografii (*PAN RACZY ŻARTOWAĆ PANIE FEYNMAN*) jednego z największych fizyków amerykańskich, napisana również w sposób bardzo niekonwencjonalny. O ile pierwsza stwarza wrażenie zbioru żartów i anegdot tworzących pewien spójny obraz autora, o tyle druga jest poważniejsza. Książka składa się z dwóch części: CIEKAWY CZŁOWIEK i PAN FEYNMAN JEDZIE DO WASZYNGTONU. W pierwszej części będącej w jakimś stopniu kontynuacją „Pan raczy żartować...” autor opowiada o swojej młodości, o wpływie ojca na kształtowanie się jego osobowości, o bolesnych przeżyciach związanych z jego małżeństwem, o swoich podróżach do Szwajcarii, Trynidadu, Grecji, Polski, Wielkiej Brytanii, Japonii i Stanach Zjednoczonych. Druga część jest poświęcona pracy autora w komisji dochodzeniowej w sprawie katastrofy promu kosmicznego Challenger. W pierwszej części książki autor podaje genezę tytułu. Tytuł powstał mniej więcej w tym samym czasie, co tytuł pierwszej książki „Pan raczy żartować Panie Feynman”, sformułowany został nieświadomie przez żonę dziekana Uniwersytetu Princeton, w którym R. Feynman był zatrudniony. W tym okresie pewnego dnia otrzymał od żony Arlene, przebywającej w szpitalu, pudełko ołówków wszystkie z napisem „najdroższy Ryszardzie, Kocham Cię! Putsy” (Putsy domowe imię żony). Obawiając się, że może któryś z nich zgubić i narazić go na jakież uwagi, usunął napis na jednym z nich i wkrótce



Fot. 1. Projekt okładki Magda Kuc

otrzymał od żony list z wymówką i uwagą „a co Ciebie obchodzi, co myślą inni?”. Ta wymówka stała się tytułem. Opowiadania w tej części przypominają pierwszą książkę i są poświęcone głównie podróżom. Podróże R. Feynmana związane były z jego pracą zawodową, wykładami udziałem w konferencjach. Opisy podróży (Szwajcarii, Japonii) uwidaczniają jego chęć przeżywania przygód. W chwilach wolnych starał się zawsze poznać miejscowe warunki życia ludzi i przekazać swoje wrażenia i obserwacje, a czasem i własne przemyślenia w listach do żony i przyjaciół. Ciekawszym fragmentem jest jego list do żony z pobytu w Warszawie pisany w czasie obiadu niedzielny w Grand Hotelu. R. Feynman był w Polsce w lipcu 1962 r. z okazji Międzynarodowej Konferencji Teorii Grawitacji, która odbywała się w Jabłonie. Mimo że brały w niej udział znakomitości (P. Dirac, J. Wheeler, H. Bondi, V. Ginzburg, V. Fock, L. Infeld, S. Chandrasekhar) R. Feynman pisze „Konferencja nic mi nie daje. Niczego się nie uczę. Ponieważ nie robią żadnych doświadczeń, dziedziną jest martwa, więc zajmuje się nią niewiele spośród najlepszych. Skutek jest taki, że jest tu mnóstwo tumanów (126), co nie wpływa korzystnie na moje ciśnienie: wygaduje się tu takie brednie i z powagą omawia takie idiotyczne tematy, że poza oficjalnymi sesjami wdają się w sprzeczki...” w dalszym ciągu opisuje sposób przedstawiania i charakterystykę działań naukowych uczestników. List jest dość długi, opisuje Warszawę i obsługę hotelu nieco

ironicznie, ale z sympatią. Twierdzi, że „*są tu fajne miejsca, gdzie można potańczyć, niezłe kapele itd.*”.

W drugiej części R. Feynman szczegółowo opisuje swój udział w pracach komisji badającej sprawę katastrofy promu kosmicznego Challenger. Jest to jego ostatnia ważna praca, której poświęcił wiele czasu i emocjonalnego zaangażowania. Ta część książki jest niezwykle interesująca, ponieważ oprócz opisu całego złożonego biurokratycznego systemu pracy komisji, pracy NASA, zawiera wiele informacji dotyczących budowy promu, problemów materiałowych, systemów kontroli technicznej, współpracy ośrodków naukowych i produkcyjnych z NASA. Prom kosmiczny Challenger uległ katastrofie 28 stycznia 1986 r. około minuty po starcie. Komisję powołano kilka dni później i jej zadaniem było zbadanie okoliczności, określenie prawdopodobnej przyczyny wypadku, przygotowanie zaleceń na przyszłość. R. Feynman przystąpił do pracy podobnie, jak do rozwiązywania trudnego problemu naukowego, starając się dokładnie poznać: działanie promu w czasie startu, wszystkie dostępne informacje o materiałach użytych do jego budowy, specjalistów wytwarzających poszczególne elementy promu itp. Sposób organizacji pracy komisji był dla niego nie do przyjęcia i praktycznie prowadził indywidualne śledztwo. Poznał dokładnie działanie istotnych dla jego badań części, rozmawiając bezpośrednio z pracownikami, którzy jak się okazało znali dokładnie ograniczenia fizyczne używanych materiałów, o czym informowali przełożonych, niedoceniających tych informacji, a kierujących się wymogami politycznymi.

Powodem katastrofy była eksplozja silnika pomocniczego spowodowana wadą uszczelnienia gumowego o przekroju okrągłym (6,3 mm) ułożonego na walcu o średnicy 3,65 m pokrytego pastą uszczelniającą. Guma uszczelniająca nie powinna być narażona na temperatury ujemne. W nocy, przed startem był  $-5,6^{\circ}\text{C}$ , a lokalnie w różnych punktach nawet  $-13,3^{\circ}\text{C}$ . Przygotowane przez R. Feynmana sprawozdanie było bardzo szczegółowe i dobrze udokumentowane. Jednakże w projekcie końcowego sprawozdaniu komisji dodano je po modyfikacjach, jako załącznik. Przygotowanie ostatecznego końcowego raportu miało dramatyczny przebieg. Doszło do tego, że R. Feynman zażądał usunięcia jego podpisu, ale po negocjacjach, w których przyjęto jego propozycje, powstał raport końcowy. Cały proces pracy R. Feynmana wraz z opisem pracy komisji czyta się jak powieść sensacyjną pokazującą kulisy powstawania raportu. Ostatni rozdział to załącznik do raportu zawierający obserwacje autora na temat niezawodności promu będący w zasadzie opisem promu. Książka kończy się rozważaniami autora na temat wartości nauki. Naczelną zasadą Feynmana była swoboda badań poparta rzetelnością naukową.

Książka jest także dostępna w wersji elektronicznej.

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

## ŁUCZYWO, CZYLI KOGO NIE STAĆ NA ENERGETYKĘ JĄDROWĄ?

W porównaniu z czasem trwania naszej judeo-rzymskiej cywilizacji okres korzystania przez ludzkość z dobrodziejstw prądu elektrycznego jest tak krótki, że dokładnych obliczeń może dokonać już pierwszoklasista, który nie zakończył nauki matematyki na etapie kolorowania drzew i drwali w lesie i podjął trud opanowania arkanów odejmowania i dodawania.

Prawda może mało chwalebna, ale na przykład na Polesiu z łuczywa korzystano jeszcze powszechnie w II RP. A konkretną wiedzą na ten oświeceniowy temat dzielił się ze mną (już w czasach III RP) uniwersytecki profesor matematyki, w dzieciństwie odrabiający w kajecie pracę domową przy rzeczonym łuczywie, gdyż rodziców nie było stać na świece.

W tym wypadku sukces dydaktyczny został osiągnięty. Stąd wniosek, że tak bardzo ciemno jednak wtedy nie było, acz na pewno nie za bogato, choć nie jestem pewny, czy łuczywo może stanowić modelowy kaganek oświaty.

Jeszcze w drugiej połowie XX w. zdarzały się w Polsce gospodarstwa wiejskie oświetlone blaskiem lampy Łukaszevicza, com już oglądał na własne oczy podczas wakacyjnych wędrówek. Trudno po latach dociekać: czy tych gospodarzy nie stać było na podłączenie do sieci elektroenergetycznej, czy po prostu zawiodła sprawność funkcjonowania idei powszechnej elektryfikacji. Dla nas obecnie większe znaczenie ma inna zagadka poznawcza.



W trzecim dziesięcioleciu XXI w. pojawiają się głosy, że nas („obywateli” czy „państwo”?) nie stać na energetykę jądrową. Obywateli nie stać!? Retoryczne pytanie. W Polsce w roku 2020 zakupiono alkohol (na potrzeby własne szerokich rzesz obywateli tutejszych i przyjezdnych) na sumę blisko 40 mld PLN. Wystarczy tylko zmienić preferencje konsumenckie społeczeństwa – mając na myśli wyłącznie osobników dorosłych – i strumień tych pieniędzy przekierować na program „zielonej energetyki”. Co roku z tych sum można byłoby wybudować niejeden blok energetyczny i otoczyć go skrzydłami wiatraków. Fakt, budżet państwa by mocno schudł bez akcyzy, ale o ile zdrowsze i bardziej chwackie mielibyśmy społeczeństwo!

Niestety, nie udała się zachodnia prohibicja za „wielką wodą”, a w nieustępliwej walce z „wodą ogniłą” padł na Wschodzie nawet sam Gorbaczow. Pomysł, zatem skrajnie utopijny. To tak, jakby chcieć – w ramach podreperowania budżetu domowego – odzwyczaić panie od wydawania pieniędzy na kosmetyki, a wtedy np. zasilać giełdę, zamieniając oszczędności na akcje „Taurona”. Retuszowanie piękna nie wymieni się na energię. Inny jest estetyczny brand – adresowany do piękniejszej połowy krajowej populacji.

Osobiście odziedziczyłem papierowe akcje elektrowni wodnej „Gródek”. Szansa stania się właścicielem, choć jednej (najmniejszej) śrubki od turbiny Kaplana jest zerowa. Nie dla mnie spław kilowatów. Acz nie za różowo jest i tym, którzy chcieliby płynąć „pod prąd”.

Intrygujące jest natomiast, co byłoby, gdyby ludzie podejmowali zawsze racjonalne wybory? Przede wszystkim psycholog, prof. Daniel Kahneman, nie otrzymałby nagrody Nobla z ekonomii. Z badań prowadzonych przez niego i Amosa Natana Twerskiego wynika, że przy podejmowaniu decyzji – w tym także dotyczących wydatkowania pieniędzy – ulegamy emocjom, zamiast – opierać się na chłodnej analizie faktów. I najzabawniejsze, iż zazwyczaj jesteśmy przekonani, że to my właśnie nie jesteśmy dotknięci skazą błędu poznawczego. W złudnej nadziei, że złotówka zawsze przynosi dwa złote.

Niedawno prof. Władysław Mielczarski skonstatał w rozmowie z dziennikarzem BiznesAlert.pl: *W Polsce nie ma możliwości budowy elektrowni jądrowych. Po pierwsze, jest to zbyt kosztowne. Po drugie, i ważniejsze, jeżeli z góry odrzucamy takich dostawców, jak firmy chińskie czy rosyjskie to nie bardzo widzę realność budowy takiego obiektu w Polsce pod kątem logistycznym i technologicznym.*

Na pytanie Napoléona Bonaparte, dlaczego nie powitano go salwami armatnimi, komendant miasta

w randze generała zameldował: *po pierwsze nie mamy armat, po drugie...* i tu cesarz – ongiś oficer artylerii – przerwał mu słowami: *pierwsze w zupełności wystarczy.* Tyle anegdota, ale dobrze dożyć tak demokratycznych czasów, w których, po pierwsze, można wywód kontynuować nawet, kiedy „po drugie”, idąc pod prąd logiki, zaprzecza temu pierwszemu. Ale skoro „po drugie” ważniejsze jest niż „po pierwsze”, inaczej być nie może.

W czasach już nie tak bardzo zamierzchłych, jak napoleońskie, ale będąc jeszcze bardzo młodym radiowcem, zostałem poproszony przez starszych kolegów o zadanie pytania: *Dlaczego fundusz honoracyjny jest tak skromny* na spotkaniu z ówczesnym szefem Polskiego Radia. W odpowiedzi usłyszałem: *Dżentelmeni o pieniądzach nie rozmawiają.* Nie muszę dodawać, iż było to moje pierwsze i ostatnie pytanie na tejże konferencji.



Marek Bielski,  
Przegląd Techniczny,  
Warszawa



DOC. TADEUSZ  
MUSIAŁOWICZ  
(10.02.1928 – 09.03.2021) –  
WSPOMNIENIE



Fot. 1. Doc. Tadeusz Musiałowicz

W dniu 9 marca 2021 r. w wieku 93 lat odszedł od nas doc. Tadeusz Musiałowicz pionier i organizator polskiej ochrony radiologicznej, znany ekspert w zakresie przepisów dotyczących podstawowych zasad ochrony przed promieniowaniem, autor unikalnego słownika angielsko-polskiego terminów ochrony radiologicznej, wybitny specjalista, zasłużony dydaktyk.

Jego życiorys to historia powstania i rozwoju ochrony radiologicznej w Polsce, należał też do wąskiego grona osób związanych z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej – CLOR od początków jego istnienia.

Doc. Tadeusz Musiałowicz urodził się 10 lutego 1928 r. w Wołkowysku k. Grodna. Wykształcenie zdobywał na tajnych kompletach w Sandomierzu, maturę otrzymał w Liceum w Piastowie w 1946 r. W latach 1946-1951 studiował na Politechnice Warszawskiej, będąc absolwentem nowego kierunku studiów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej pod nazwą Elek-

trotechnika Medyczna zorganizowanym przez prof. Cezarego Pawłowskiego (później w 1951 r. nazwę wydziału zmieniono na Wydział Łączności).

W 1950 r. zaczął pracę w Głównym Instytucie Fizyki Technicznej w Warszawie, jako asystent prof. Witolda Łanieckiego, następnie w latach 1951-1956 pracował w „Centralnych Warsztatach Napraw i Konserwacji Sprzętu Medycznego „Centrosprzet” – zakładach produkujących i konserwujących sprzęt rentgenowski i elektromedyczny.

Były to nieliczne pierwsze po wojnie radiologiczne placówki w Polsce, załóżki późniejszych instytucji związanych z atomistyką.

Pracę w dziedzinie ochrony radiologicznej rozpoczął w 1956 r., jako pracownik naukowy w Zakładzie Ochrony Zdrowia Instytutu Badań Jądrowych. W Zakładzie pozostawał do 1961 r. W tym czasie zarządzeniem Prezesa Rady Ministrów Nr 164 z dnia 13 lipca 1957 r. powstaje Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, natomiast miesiąc wcześniej, Pełnomocnik Rządu do Spraw Wykorzystania Energii Jądrowej powierza Panu Tadeuszowi opracowanie projektu statutu, schematu organizacyjnego, planu etatów na rok 1957 oraz założeń do projektu lokalu CLOR.

W tym samym roku rozpoczyna pracę w nowo utworzonej instytucji, od początku pełniąc kierownicze funkcje, będąc m.in. Kierownikiem Działu Kontroli Zakładów, następnie Kierownikiem Działu Narażenia Zewnętrznego.

Od 1964 r. jest samodzielnym pracownikiem naukowo-badawczym CLOR, a w roku 1973 zostaje powołany na stanowisko docenta w CLOR.

Wyniki jego prac mają wielkie znaczenie i dzisiaj, był między innymi: współtwórcą patentu polskiej kasety dawkomierza fotometrycznego oraz organizatorem centralnego systemu Kontroli Dawek Promieniowania Jonizującego w Polsce.

Ale jego największy wkład w rozwój ochrony radiologicznej w Polsce dotyczył dziedziny przepisów prawnych ochrony radiologicznej oraz systemów zabezpieczeń materiałów jądrowych. Był współautorem wielu norm krajowych i międzynarodowych oraz prawie wszystkich przepisów krajowych wydanych w dziedzinie ochrony radiologicznej w Polsce, stając się w tej dziedzinie wybitnym autorytetem.

Był autorem i współautorem wielu publikacji w dziedzinie ochrony radiologicznej. W tym wielu wydawnictw książkowych, między innymi unikalnej publi-

kacji „ENCYKLOPEDYCZNEGO SŁOWNIKA ANGIELSKICH TERMINÓW I DEFINICJI Z DZIEDZINY OCHRONY RADIOLOGICZNEJ I WYBRANYCH TERMINÓW Z DZIEDZIN POKREWNYCH ORAZ ICH ODPOWIEDNIKÓW PRZYJĘTYCH W POLSCE”.

Słownik, którego pierwsze wydanie ukazało się w 2003 r., był wielokrotnie przez Pana Tadeusza uaktualniany, w miarę jak zmieniały się przepisy międzynarodowej ochrony radiologicznej, a ostatnią 7. edycję słownika ukończył w 2016 r.

Pełną sukcesów pracę w zakresie ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądowego umiejętnie łączył z działalnością o charakterze edukacyjnym, prowadząc od 1958 r. szereg wykładów na kursach ochrony radiologicznej CLOR.

Był laureatem wielu nagród i odznaczeń. W 1966 r. otrzymał nagrodę III stopnia Państwowej Rady ds. Pokojowego Wykorzystania Energii Jądowej za opracowanie i zorganizowanie centralnego systemu Kontroli Dawek Promieniowania Jonizującego w Polsce, a w 1974 r. nagrodę prezesa Urzędu Energii Atomowej za udział w opracowaniu automatycznego systemu dawek metodą TLD. W 1964 r. został odznaczony Złotym Krzyżem Zasług za stworzenie w Polsce służby kontroli dozymetrycznej, a w 1970 r. medalem stałej komisji RWPG, w 1974 r. medalem XXX-lecia PRL.

Był aktywnym członkiem szeregu krajowych i międzynarodowych komisji pełniących funkcje doradcze dla organów decyzyjnych. Był to, utworzony w 1958 r. – Krajowy Komitet Ochrony Radiologicznej, po jego rozwiązaniu w 1968 r., pełnił przez wiele kadencji funkcję sekretarza Komisji Ochrony Radiologicznej Państwowej Rady ds. Pokojowego Wykorzystania Energii Jądowej (1969-1974). W 1968 r. został powołany na przewodniczącego Resortowej Komisji Bezpieczeństwa Jądowego, którą to funkcję pełnił do 1972 r., następnie w 1973 r. został Przewodniczącym Międzyresortowej Komisji Bezpieczeństwa Jądowego przy Prezesie Urzędu Energii Atomowej (do 1979 r.). To dzięki Jego krytycznej postawie w Komitecie Ochrony Radiologicznej, Polska (jak również później) Stała Komisja Rady Wzajemnej Pomocy Gospodarczej, nie zaadoptowała narzucanych radzieckich przepisów ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądowego, zamiast tego, przyjęto i wdrożono przepisy zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Był również członkiem amerykańskiego HEALTH PHYSICS SOCIETY.

Pan Tadeusz pełnił również funkcje przewodniczącego w komisjach odpowiedzialnych za organizację działalności normalizacyjnej przy Polskim Komitecie Normalizacji, między innymi (od 1958 do 2004 r.): w Ko-

misji Normalizacyjnej Energii Jądowej, w Komisji Normalizacyjnej Ochrony Radiologicznej i Bezpieczeństwa Jądowego oraz w Komisji Normalizacyjnej Aparatury Jądowej. W latach 1972-1977 był członkiem Komisji Fizyki Medycznej Polskiej Akademii Nauk.

W latach 1960-1980, jako ekspert w dziedzinie ochrony radiologicznej, a także w dziedzinie ochrony fizycznej materiałów jądowych, reprezentował Polskę ponad 50-krotnie na arenie międzynarodowej, zyskując uznanie w MSZ i MAEA. Od 1971 r. jest członkiem działającej pod patronatem MAEA, Międzynarodowej Grupy ds. Przewozu Materiałów Promieniotwórczych.

W latach 1981-88 zostaje zatrudniony w Departamencie Zabezpieczeń Materiałów Jądowych w MAEA w Wiedniu.

W 1988 r. przechodzi na emeryturę, ale kontynuuje pracę w CLOR w zespole Dozoru Jądowego Pracowni Dokumentów Normatywno-Technicznych, a później, pracuje w CLOR, w charakterze konsultanta Dyrekcji ds. Norm i Przepisów Ochrony Radiologicznej i Bezpieczeństwa Jądowego.

Z Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej związał się na okres blisko 60 lat, pracę zakończył w grudniu 2016 r., kiedy stan zdrowia nie pozwolił mu już na kontynuowanie aktywności zawodowej w CLOR, natomiast do końca utrzymywał żywe kontakty z Instytutem i środowiskiem ochrony radiologicznej – niech świadczy o tym list z 24 września 2020 r., w którym informuje Dyrektora CLOR o ukazaniu się Jego artykułu w Postępkach Techniki Jądowej, z okazji 60-lecia tego periodyku.

Niestety, była to ostatnia publikacja Pana Tadeusza. Zapamiętamy Jego nie tylko, jako pioniera i organizatora polskiej ochrony radiologicznej, znakomitego fachowca, sumiennego i obowiązkowego pracownika, ale też, jako człowieka zawsze pogodnego, uśmiechniętego, życzliwego ludziom i ich sprawom, otwartego na innych ludzi, również na Instytut i jego problemy, inicjującego, ale i realizującego nowe pomysły i inicjatywy.

Żegnamy Pana Tadeusza dziś z wielkim żalem, dziękując za naukę, jaką nam przekazał.

Warszawa 30 marca 2021 r.

*Paweł Krajewski,  
Dyrektor  
Centralnego Laboratorium  
Ochrony Radiologicznej,  
Warszawa*





PROF. DR HAB. STANISŁAW  
KULIŃSKI  
(08.10.1928 – 18.01.2021) –  
WSPOMNIENIE



Fot. 1. Prof. dr hab. Stanisław Kuliński

18 stycznia 2021 r. w wieku 92 lat zmarł prof. dr hab. Stanisław Kuliński, ceniony ekspert w dziedzinie budowy akceleratorów liniowych, wieloletni kierownik Zakładu Fizyki i Techniki Akceleracji Cząstek w Instytucie Problemów Jądrowych, nauczyciel wielu pokoleń fizyków.

**Wspomnienie jego współpracowników, wychowanków i doktorantów**

Staszek Kuliński ukończył studia na Politechnice Warszawskiej, gdzie pracował w latach 1951-1956 jako asystent i starszy asystent na Wydziale Elektroniki. W roku 1957 rozpoczął pracę w Instytucie Badań Jądrowych. Lata 1961-1962 spędził w Instytucie Fizyki Plazmy w Rijnhuizen w Holandii, jako stypendysta Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Zajmował się tam zagadnieniami oddziaływania plazmy z niejednorodnymi polami elektromagnetycznymi wysokiej częstotliwości celem użycia takich pól do jednoczesnego grzania i ograniczania plazmy. Te zagadnienia były przedmiotem jego rozprawy doktorskiej, którą obronił w roku 1963 w IBJ. Studia nad konwersją fal elektromagnetycznych w niejednorodnej plazmie kontynuował w latach 1968-1969 w Saclay.

W latach 1970-1984 był kierownikiem Zakładu Fizyki i Techniki Akceleracji Cząstek Naładowanych w IBJ, a w latach 1984-2002 kierował Pracownią Teorii Akceleracji Cząstek Naładowanych w IPJ. W ciągu tych lat wypromował wielu doktorów, przekazał swoją wiedzę i podzielił się doświadczeniem z licznym gronem współpracowników, był bardzo pracowity i trudno w krótkim wspomnieniu wymienić wszystkie przedsięwzięcia, w których uczestniczył.



Fot. 2. S. Kuliński prezentuje akcelerator Lirax-4, zaprojektowany w Zakładzie XXV IBJ [R. Żelazny, S. Kuliński, J. Minczewski, os. n.n)

Brał czynny udział w zbudowaniu w Świerku liniowego akceleratora protonów o energii 10 MeV, za co otrzymał nagrodę Państwowej Rady ds. Pokojowego Wykorzystania Energii Jądrowej w 1971 r. Za prace nad izochronicznym cyklotronem U-200P uzyskał nagrodę MNiSW i Techniki w roku 1975. Za wdrożenie do produkcji struktur przyspieszających 4 i 10 MeV do liniowych akceleratorów elektronów otrzymał w roku 1984 nagrodę pierwszego stopnia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. W tym samym czasie kierował pracami nad projektem badawczym: „Rozwój metod akceleracji oraz opracowanie i uruchomienie produkcji akceleratorów cząstek naładowanych”. Na bazie tych prac powstał Polski Program Akceleratorowy (PPA), który przewidywał rozwój polskiej bazy akceleratorowej zarówno do badań podstawowych jak i zastosowań w medycynie, przemyśle i rolnictwie.

Realizacja tego programu oraz Programu Rządowego PR-6 wymagała istotnego rozwoju Zakładu, którego stan osobowy wzrósł wtedy z około 30 osób do ponad 60. Poprawiło się też wyposażenie Zakładu w aparaturę badawczą. Efektem realizacji PPA było opracowanie i zbudowanie ponad 80 akceleratorów różnych typów (2 cyklotrony U-200 i C-30, ponad 60 liniowych akceleratorów medycznych, 4 akceleratory do radiografii, 5 implantatorów jonów). Staszek Kuliński miał szerokie zainteresowania i dużą wiedzę zarówno z zakresu fizyki teoretycznej, jak i doświadczalnej, stąd jego uczestnictwo w pracach wielu zespołów, między innymi w Zespole powołanym przez PAN dla ustalenia długoletniego programu badań w dziedzinie fizyki plazmy w Polsce (1980-1984). Był członkiem wielu organizacji m.in. Polskiego Towarzystwa Fizycznego, Komitetu Organizacyjnego European Particle Accelerator Conference (EPAC) i Conference of Computing in Accelerator Design and Operation.

Był cenionym ekspertem w dziedzinach związanych z projektowaniem i budową akceleratorów, stąd jego częste wyjazdy za granicę i zatrudnienie w latach 1984-1985 w CERN na stanowisku scientific associate. Pracował nad liniowymi akceleratorami elektronów i pozytonów, służącymi jako iniektory do LEP-u (Large Electron Positron accelerator). W latach 1986-1993 pracował na kontrakcie naukowym we Włoszech w Laboratorium Narodowym Frascati (LNF) Instytutu Narodowego Fizyki Nuklearnej (INFN). Ważniejsze prace wykonane w tym okresie to systemy iniekcji elektronów i pozytonów do akceleratorów: ELETTRA-Triest, LISA-Frascati, pierścień elektronowo-pozytonowy ADONE – Frascati, PHI-FACTORY DAFNE – Frascati.

To dzięki niemu, jego sukcesom zawodowym i organizacyjnym, powstały wtedy w Polsce w Instytucie Problemów Jądrowych, na zamówienie włoskich insty-

tucji, trzy liniowe akceleratory elektronów (LNF, Irvin Electronica), działo elektronowe dużej mocy (Elettra Triest), specjalny generator mikrofalowy do ultraszybkiej diagnostyki wiązek w zakresie nanosekund (LNF Frascati). Powstanie tych urządzeń i wyeksportowanie ich do Włoch miało wymierny efekt ekonomiczny dla Instytutu.

Przez cały okres swojej pracy był członkiem Rad Naukowych w IBJ, IPJ, w Instytucie Energii Atomowej i w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów przy Uniwersytecie Warszawskim.

Był wysokiej klasy specjalistą w dziedzinie budowy akceleratorów, nowe tematy były dla niego wyzwaniem, które podejmował z entuzjazmem. Potrafił nim zarażać współpracowników i mobilizować wszystkich w Zakładzie, począwszy od doktorantów, informatyków, przez inżynierów, techników, a skończywszy na personelu pomocniczym. Miał doskonały kontakt z nami, był bardzo bezpośredni, wymagający, ale jednocześnie dbający o pracowników, koleżeński, skory do dyskusji, zabawnie zaczepny, ze szczególnym poczuciem humoru. Zachęcał nas do pisania prac doktorskich i habilitacyjnych, był dumny z naszych sukcesów i często uczestniczył w ważnych wydarzeniach naszego życia prywatnego. Co roku organizowaliśmy w zakładzie spotkanie Wielkanocne i Bożonarodzeniowe. Tę tradycję kontynuowaliśmy również, gdy Staszek, jak wielu innych kolegów przeszedł na emeryturę. Ostatnim razem na prywatnym spotkaniu Bożonarodzeniowym był w 2019 r. i jak zawsze dopytywał się z zainteresowaniem o nowe wydarzenia w Zakładzie.



Fot. 3. S. Kuliński i A. Wysocka-Rabin podczas Wielkanocnego spotkania Zakładowego (fot. z archiwum rodzinnego)

Był bardzo towarzyski, można było z nim interesująco porozmawiać właściwie na każdy temat. Podstawy jego edukacji wyniesione z Płockiego Gimnazjum



i Liceum im. Marszałka Stanisława Małachowskiego, studia na Politechnice i na Wydziale Matematyki UW, pozwalały mu na błyskotliwe komentarze, na przywoływanie faktów historycznych i cytowanie obszernej literatury, na które nieliczni tylko potrafili się zdobyć. Znał i posługiwał się czynnie angielskim, francuskim, włoskim, rosyjskim, holenderskim i niemieckim. Miał też opanowaną dobrze łacinę, często cytował starożytnych filozofów, czym nam imponował na równi z wiedzą na tematy dynamiki wiązek elektronów czy protonów. Był przedstawicielem pokolenia naprawdę dobrze i wszechstronnie wykształconego.



Fot. 4. S. Kuliński w Alpach (fot. z archiwum rodzinnego)

Staszek Kuliński był zapalonym taternikiem i alpinistą, był członkiem Polskiego Związku Alpinizmu. Jego ważniejsze osiągnięcia to szczyty w Alpach: Mont Blanc, Monte Rosa, Matterhorn, w Kaukazie: Elbrus, Szchara. Był uczestnikiem pierwszej polskiej powojennej wyprawy w Góry Wysokie w Hindukusz Afgański, miał drugie wejście na szczyt Noshaq (7500m), pierwsze wejście na szczyt Aspe Safed (7200m). Brał udział w wyprawach w Pamir, miał wejścia na szczyty Pik Komunizmu (7492 m) i Pik Lenina (7137m). Początkowo w wyprawach towarzyszyła mu również przyszła żona – Ewa Zienkiewicz, która zrezygnowała ze wspinaczki, gdy pojawiły się w ich związku dzieci (dwie córki

Agnieszka i Magdalena). Ewa wspomina go jako świetnego partnera „na linie” oraz jako wspaniałego męża, ojca i przyjaciela.

Staszek był dumny ze swojej rodziny i lubił zaskakiwać rozmówców liczbą swoich wnuków – 8 (2 wnuczki i 6 wnuków), a ostatnio jeszcze 7 prawnuków. Jeździł z dziećmi i wnukami na spływy kajakowe.

Uprawiał również narciarstwo wysokogórskie: po Instytucie w pewnym momencie szybko rozeszła się straszna wieść, że oberwało się siedzenie wyciągu na Hali Gąsiennicowej i Staszek spadł z bardzo dużej wysokości, niewiedomo, czy przeżył. Byliśmy w Zakładzie w pierwszej chwili zdruzgotani, a potem, gdy było wiadomo, że żyje, bardzo zaniepokojeni o niego. Wkrótce Staszek się pojawił i z właściwym sobie poczuciem humoru oznajmił, że czuje się dobrze, żeby się nie martwić, nawet skorzystał na tym incydencie i będzie miał darmowe wjazdy na Kasprowy przez kilka lat.

Staszek lubił ludzi, lubił ich towarzystwo, doskonale zarządzał zespołami badawczymi i potrafił, jak rzadko kto, integrować środowisko. Niektórzy z nas pamiętają go z przyjęć konferencyjnych, na których bardzo szybko nawiązywał kontakty z uczestnikami w ich ojczystych językach i zaczynał pełnić rolę wodzireja. Był prawdziwym i uznanym liderem. Był również członkiem organizacji NSZZ Solidarność Instytutu Badań Jądrowych od chwili jej powstania, zaś w stanie wojennym wspomagał działalność organizacji podziemnej. Po wznowieniu oficjalnej działalności przez Związek w 1989 r. pomógł w nawiązaniu współpracy z włoskimi chrześcijańskimi związkami zawodowymi. Do końca swojej pracy zawodowej służył radą i pomocą uczestnicząc aktywnie w życiu naukowym i społecznym swego Instytutu.

Staszek miał duże poczucie sprawiedliwości, był uczciwy i bezkompromisowy, co nie zawsze było korzystne dla nas w stosunkach z innymi Zakładami. Będziemy go pamiętać jako pracowitego, pełnego optymizmu i zaangażowania w to co robił. Wielu z nas korzystało z jego bogatej wiedzy teoretycznej i technicznej, z jego doświadczenia, a także z jego mądrości życiowej. Potrafił nas wspierać w dążeniu do celu i dawał motywację, był bardzo otwarty na ludzi i wydarzenia, towarzyski i bardzo pogodny. Takiego go zapamiętamy.

Żegnaj Staszku!

*dr hab Anna Wysocka-Rabin, prof. NCBJ,  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,  
Otwock-Świerk*





DR ANDRZEJ DEPTUŁA  
(27.05.1935 – 15.06.2021)  
– WSPOMNIENIE



Fot.1. Dr Andrzej Deptuła w latach 60.

Z żalem pożegnaliśmy dr. Andrzeja Deptułę, którego całe życie zawodowe związane było z ośrodkiem badań jądrowych na Żeraniu, gdzie najpierw istniał oddział Instytutu Badań Jądrowych, a potem od 1983 r. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. Sam dr Deptuła stwierdził, we wspomnieniach zawartych w książce, wydanej z okazji 60-lecia IBJ, że w 1955 r., w którym powstał IBJ, spełniło się Jego marzenie. Mimo że już dostał skierowanie do pracy nauczycielskiej w szkole średniej, został wybrany, w grupie kilkudziesięciu najzdolniejszych absolwentów uniwersytetów z całej Polski, do pracy w tym Instytucie. Po intensywnym szkoleniu rozpoczął pracę nad związkami uranu w zakresie wytwarzania paliw jądrowych, w tym do wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych chłodzonych gazem. Prace nad budową reaktora HTR odżyły obecnie, tak, że Jego prace są dalej aktualne. Ale największe osiągnięcie dra Deptuły, wiąże się ze stworzeniem szkoły naukowej i opracowaniem polskiej metody wytwarzania materiałów ceramicznych opartych o technikę zol – żel. Impulsem dla podjęcia tych badań stał się staż naukowy w ENEA, Włochy, który zaowocował późniejszą długotrwałą współpracą polsko – włoską. A w Instytucie została utworzona pracownia zol-żel, na kierownika której został powołany dr Deptuła. Po zarzuceniu programu jądrowego we Włoszech i w naszym kraju dr Deptuła ze swoją grupą zaadoptował opracowaną technologię do nowych warunków i wymyślił inne jego zastosowa-

nia. Dzięki temu stał się jednym z pionierów badań nad wykorzystaniem procesu zol-żel na świecie. Jego prace w zakresie wytwarzania materiałów do napylenia plazmowego, materiałów bioceramicznych oraz elektrodowych dla ogniw paliwowych są omawiane w literaturze przedmiotu, jako prace, które położyły podwaliny pod rozwój szeroko dziś uprawianej dyscypliny badawczej i technologicznej. Ze swoją utalentowaną współpracownicą, mgr Wiesławą Ładą i innymi członkami zespołu, dr Deptuła uzyskał wiele prestiżowych nagród, m.in. pierwszą nagrodę za poster wśród kilkuset prac prezentowanych na Ogólnoświatowym Zjeździe Towarzystwa Badań Materiałowych (San Francisco) oraz liczne nagrody na targach wynalazków w Brukseli (Eureka) i w Gdańsku (Innowacje).

Polsko-włoskie kontakty naukowe, nie zostały przerwane nawet po wprowadzeniu stanu wojennego, który tak bardzo, ograniczył polskie kontakty naukowe z innymi krajami. Bez wątplenia niezwykle pozytywną rolę odegrał tu dr Silvio Stramaccioni, dyrektor Departamentu Współpracy Zagranicznej ENEA i przyjaciel dr. Andrzeja Deptuły, kierownika pracowni Zol-Żel w IChTJ. Dr Deptuła wspomina w cytowanej książce oficjalne i prywatne kontakty z polskim Papieżem Janem Pawłem II.

Dzięki kontaktom z dr. Stramaccionim dr Deptuła wraz z ówczesnym sekretarzem naukowym Ambasady w Rzymie, doc. Stanisławem Wójtowiczem, doprowadził do zorganizowania oficjalnej wizyty u Papieża delegacji, której przewodniczył prof. Żelazny, ówczesny prezes Państwowej Agencji Atomistyki.

Należy też wspomnieć, że dzięki międzynarodowemu uznaniu, dr Deptuła, we współpracy z prof. Narbutem, uzyskał jeden z pierwszych projektów europejskich Instytutu, w ramach ASGARDA „Advanced Fuels for Gen IV Reactors: Reprocessing and Dissolution”.



Fot. 2. Wizyta u Papieża Jana Pawła II (1988 r.)  
Od lewej: W. Łada, H. Hahn, A. Kłos, A. Będkowska,  
A. Deptuła, B. Orzeszko, Z. Perzyńska



Fot. 3. A. Deptuła podczas audyencji prywatnej u Papieża Jana Pawła II w 1988 r. (fot. ze zbiorów prywatnych A. Deptuły)

Dr Deptuła odegrał bardzo dużą rolę w kształceniu młodych kadr, można powiedzieć, że młodzież garnęła się do Niego, chcąc pracować z uznanym autorytetem naukowym. Był promotorem pomocniczym wielu doktorantów, że wspomnę późniejszego kierownika Pracowni dr. Marcina Brykały. Niestety dwaj doktoranci mgr Tomasz Smoliński i mgr Marcin Rogowski, już

skończyli doktoraty bez Niego. Ale na pewno to będzie nieprzemijający wkład dr. Deptuły w rozwój naszego i innych instytutów, nauki w kraju. Za swoje osiągnięcia został odznaczony wysokim odznaczeniem państwowym Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski – Polonia Restituta.

Blisko współpracowałem z drem Deptułą, będąc promotorem wspomnianych doktoratów oraz współautorem wielu publikacji i patentów. Mimo że czasem nie zgadzaliśmy się w pewnych sprawach, utrzymywaliśmy przyjacielskie stosunki przez cały okres jego pracy w Instytucie. Często wpadałem do Niego na sławną, prawdziwą kawę po włosku. Dr Deptuła mówił po włosku jak rodowity Włoch i podobnie jak Włoch potrafił ją parzyć. Ostatnie emaily wymieniliśmy w końcu roku 2019, później wybuch pandemii zajął nasze myśli, czym innym.

Był osobą nietuzinkową, znaną szeroko i w Instytucie, i w kraju, i w świecie. Ponieśliśmy, zatem dużą stratę, tacy ludzie nie pojawiają się w naszych społecznościach naukowych codziennie. Będzie nam Go brakować, jego działania naukowe będą zbierane jeszcze długo – mieliśmy nadzieję, że dwaj wspomniani doktoranci obronili się jeszcze w Jego obecności.

prof. dr hab. Andrzej Chmielewski,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa

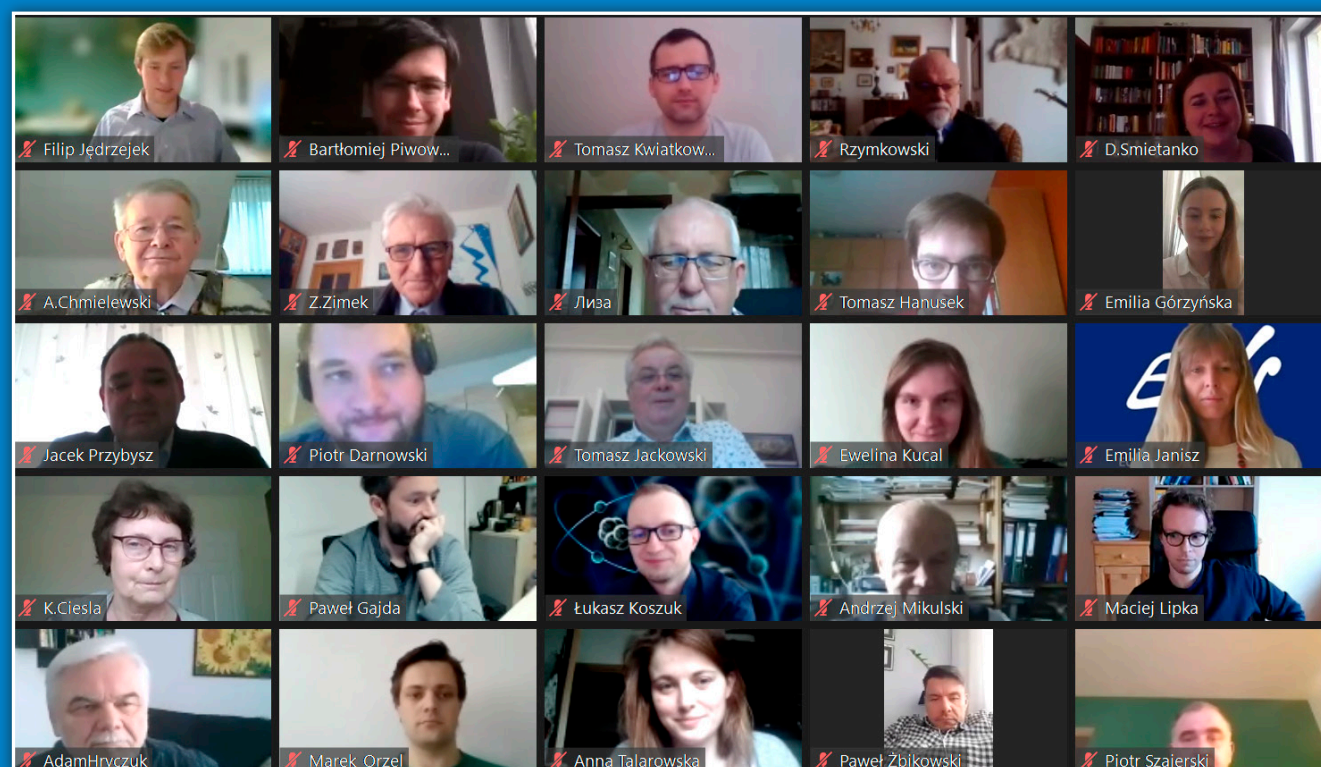
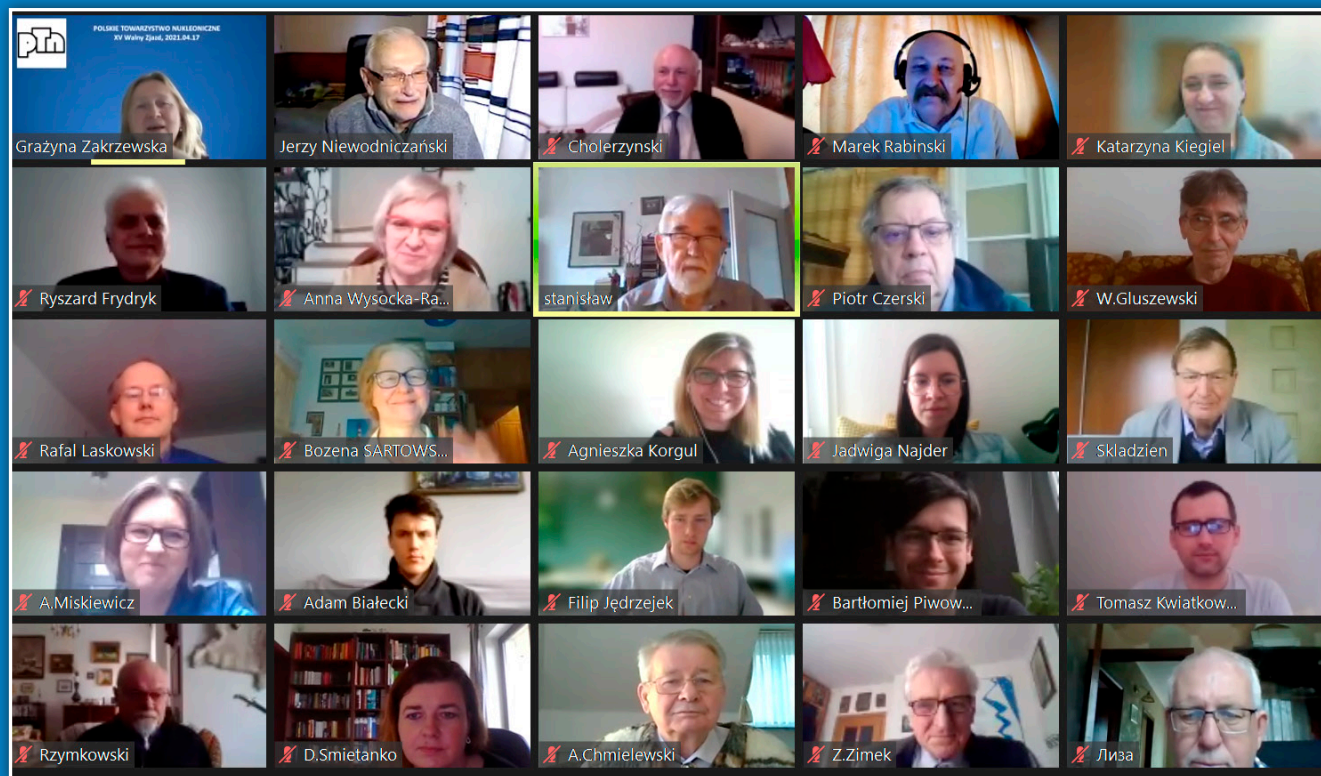


Fot. 4. W ostatnich latach (fot. Sylwester Wojtas)



# XV Zjazd Polskiego Towarzystwa Nukleonicznego

Warszawa, dnia 17 kwietnia 2021 r.

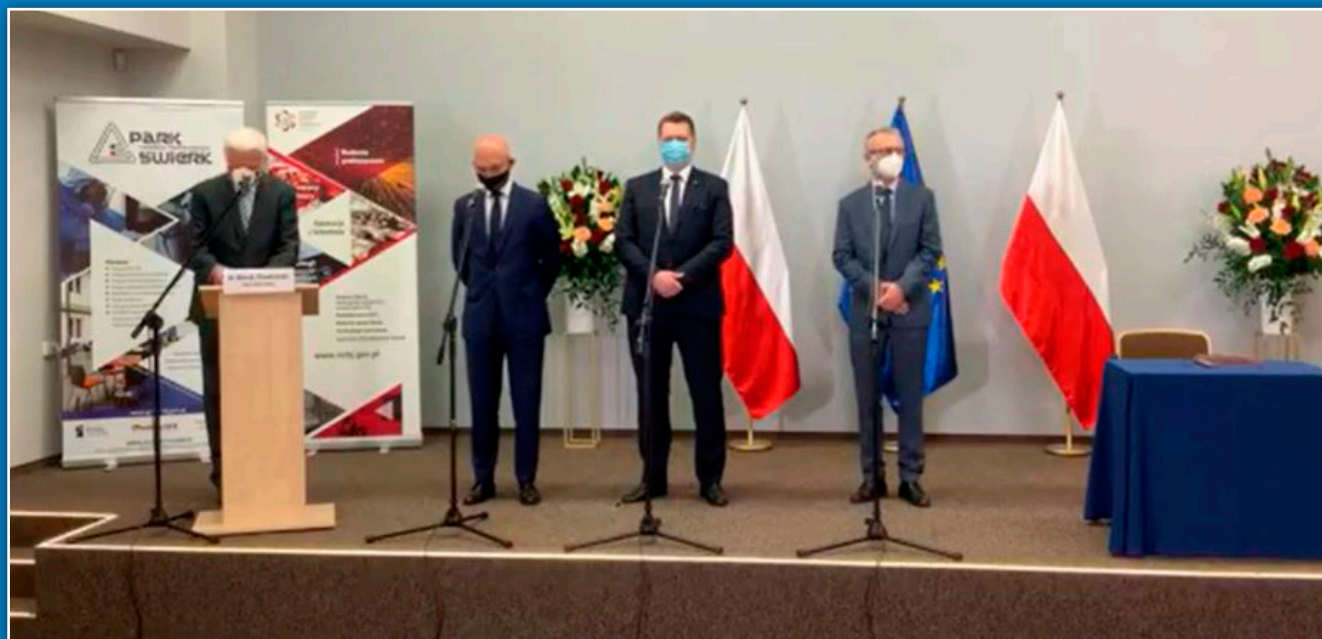


Fot. Motrenko zob. więcej na str. 38



# Brefing Ministra Edukacji i Nauki, Ministra Klimatu i Środowiska oraz Dyrektora Narodowego Centrum Badań Jądrowych

Otwock-Świerk, 12 maja 2021 r.



W wydarzeniu wzięli udział od prawej: rzecznik Narodowego Centrum Badań Jądrowych Marek Pawłowski, minister klimatu i środowiska Michał Kurtyka, minister edukacji i nauki Przemysław Czarnek oraz dyrektor Narodowego Centrum Badań Jądrowych Krzysztof Kurek.



Dyrektor NCBJ oraz Minister MEiN podpisali umowę na realizację prac projektowych wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem HTGR.

*zob. więcej na str. 36*