

# ARTYKUŁY

## OD INSTYTUTU RADOWEGO W WARSZAWIE DO WSPÓŁCZESNYCH ZASTOSOWAŃ TECHNOLOGII RADIACYJNYCH

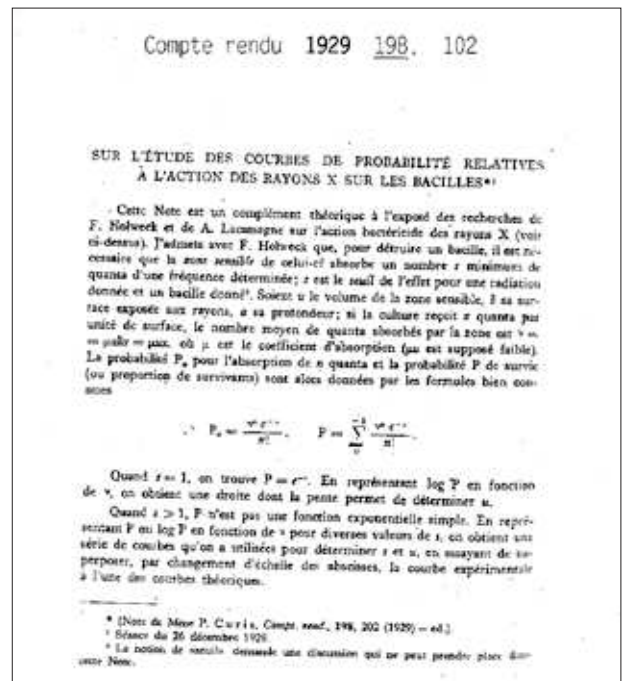
Wojciech Głuszewski

### WPROWADZENIE

80. rocznica otwarcia w Warszawie Instytutu Radowego jest dobrą okazją do przypomnienia dorobku naukowego Marii Skłodowskiej-Curie i jego znaczenia dla rozwoju cywilizacyjnego<sup>1,2</sup>. Stwierdzenie przez uczoną, że promieniowanie *alfa* ( $\alpha$ ) powoduje wydzielanie wodoru i tlenu z wody, które przez analogię do elektrolizy nazwała *radiolizą*, dało początek chemii radiacyjnej. Trudno oczywiście znaleźć prosty związek pionierskich prac Marii z licznymi obecnie zastosowaniami techniki radiacyjnych w przemyśle, medycynie, rolnictwie, ochronie środowiska, badaniach kosmicznych i nauce. Autentyczny rozwój wielu z tych dziedzin, np. chemii i przetwórstwa polimerów, miał bowiem miejsce wiele lat po śmierci genialnej uczoney. Nie sposób sobie wyobrazić, aby w latach 30. ubiegłego wieku ktokolwiek przewidywał, że promieniowanie jonizujące zostanie wykorzystane do radiacyjnej modyfikacji elastomerów, np. w produkcji opon samochodowych. Zdarza się, że pewne odkrycia, które za życia odkrywcy nie mają praktycznego znaczenia i pozostają w sferze akademickich dyskusji i dopiero po wielu latach przy odpowiednim rozwoju środków technicznych mogą zostać realizowane.

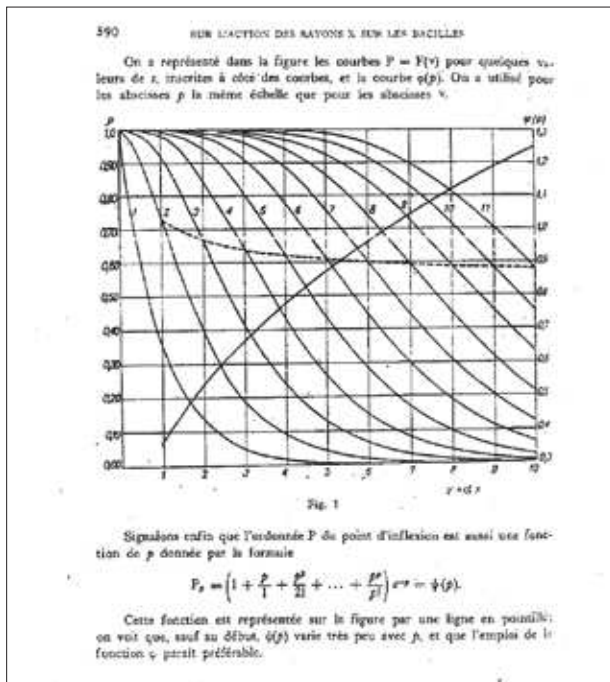
Warto w tym kontekście zwrócić uwagę na pracę *Sur l'étude des courbes de probabilité relatives a l'action des rayons X sur les bacilles*, którą Skłodowska-Curie opublikowała w roku 1929 w „Compte rendu”.

Autorka przedstawiła wówczas po raz pierwszy krzywe tzw. radiacyjnej inaktywacji, czyli zależności między przeżywalnością bakterii a wielkością pochłoniętej dawki promieniowania. Eksperymentalnie wykazała, nie znając istoty samego zjawiska, statystyczny charakter skutków oddziaływania promieniowania jonizującego na materię. Publikacja ta z dzisiejszego punktu widzenia jest pierwszą pracą kompleksowo przedstawiającą zagadnienia z dziedziny radiacyjnej sterylizacji.



**Fot. 1.** Pierwsza strona artykułu *Sur l'étude des courbes de probabilité relatives a l'action des rayons x sur les, bacilles* opublikowanego przez Marię, żonę Piotra Curie

Pomysł, aby patogeny zwalczać za pomocą promieniowania, nie miał wówczas praktycznego znaczenia. Przede wszystkim nie było odpowiednio dużych źródeł promieniowania, a ówczesny sprzęt medyczny tania i wygodnie sterylizowano w sposób termiczny. Dopiero postęp w dziedzinie chemii i przetwórstwa materiałów polimerowych w latach 50., który spowodował upowszechnienie się w szpitalnictwie wyrobów jednorazowego użytku, stworzył zapotrzebowanie na tzw. zimne metody sterylizacji. Dotyczyło to zwłaszcza tanich utensyliów medycznych, które odegrały znaczącą rolę w wyeliminowaniu wielu epidemiologicznych chorób. Tradycyjne metody termiczne nie nadają się, jak wiadomo, do wyjaławiania nieodpornych na podwyższone temperatury tworzyw sztucznych.



**Fot.2.** Druga strona artykułu z ryciną przedstawiającą krzywe inaktywacji radiacyjnej

Wrócono więc, do prac Skłodowskiej-Curie i zaczęto na skalę przemysłową prowadzić sterylizację z użyciem promieniowania  $\gamma$  i wiązki elektronów<sup>3</sup>. Tak więc, po przeszło 40 latach w praktyce zrealizowano koncepcję, którą, jak się wydaje zupełnie nieświadomie Skłodowska-Curie zgłosiła w cytowanej publikacji.

## POCZĄTKI RADIACYJNYCH TECHNOLOGII

Przez wiele lat rynek wyrobów medycznych produkowanych z tanich tworzyw sztucznych stymulował rozwój chemii radiacyjnej polimerów, a w zasadzie postęp w technologii radiacyjnej w ogóle. Powstawały przemysłowe instalacje wyjaławiania, wyposażone w kobaltowe źródła promieniowania  $\gamma$  i akceleratory elektronów. Obecnie coraz częściej wykorzystuje się dla tych celów promieniowania rentgenowskie i synchrotronowe. Sterylizacja radiacyjna zaczęła skutecznie konkurować z chemicznymi metodami wyjaławiania stosującymi toksyczny i wybuchowy tlenek etylenu. Dało to impuls do prac badawczych nad nowymi rozwiązaniami w zakresie akceleratorów elektronów, co w krótkim czasie obniżyło koszty radiacyjnej obróbki<sup>4</sup>. Zaczęto również intensywnie poszukiwać odpornych radiacyjnie tworzyw, czego wynikiem było powstanie nowej specjalności naukowej chemii radiacyjnej polimerów. Ten kierunek badawczy jest dynamicznie rozwijany do dnia dzisiejszego, o czym świadczy fakt, że co dwa lata odbywają się międzynarodowe konferencje

(IRaP – Ionization Radiation and Polymers) poświęcone wyłącznie problematyce oddziaływania promieniowania jonizującego na materiały polimerowe. W stosunkowo krótkim czasie obróbka radiacyjna stała się ogólnie dostępna i obecnie jest traktowana niemal jak rutynowa usługa. W naszym kraju, który ma duże osiągnięcia w dziedzinie przemysłowych zastosowań technik radiacyjnych, postawiono głównie na promieniowanie elektronowe. Podstawową zaletą technik akceleratorowych w porównaniu ze źródłami radioizotopowymi, wyposażonymi najczęściej w promieniotwórczy kobalt ( $^{60}\text{Co}$ ) jest dużo większa moc dawki, a co za tym idzie możliwość dostarczenia energii promieniowania w bardzo krótkim czasie. Pozwala to zmniejszyć wydajność procesów postradiacyjnego utleniania, będących głównym czynnikiem degradacji polimerów. Akceleratory są również lepiej postrzegane w opinii społecznej, jako w pewnym sensie zwykle urządzenia elektryczne, które po wyłączeniu nie stwarzają radiologicznego zagrożenia. Unikatowość radiacyjnych technologii polega na tym, że dany materiał można wyjaławiać i modyfikować w całej objętości, w opakowaniu jednostkowym i zbiorczym w praktycznie dowolnej temperaturze. W przypadku np. implantów kostnych, żywności lub obiektów archeologicznych może to być ujemna temperatura. Jak się ocenia, przeszło 50% wyrobów medycznych jednorazowego użytku na świecie jest obecnie radiacyjnie sterylizowanych.

## ODKRYCIE ZJAWISKA RADIACYJNEGO SIECIOWANIA POLIMERÓW

Wiedza, jaką zdobyto badając radiolizę polimerów, zaowocowała zastosowaniami obróbki radiacyjnej tworzyw sztucznych w innych dziedzinach. Przełomowe okazało się odkrycie zjawiska sieciowania radiacyjnego polietylenu<sup>5</sup>. Dokonano go „przypadkowo” badając możliwości wykorzystania tworzyw polimerowych w energetyce jądrowej. Ze zdziwieniem stwierdzono, że w wyniku działania promieniowania jonizującego polietylen nie tylko nie pogarszał, ale przeciwnie polepszał właściwości użytkowe. Podważyło to panującą wówczas opinię, że w wyniku radiacyjnej obróbki zachodzą wyłącznie procesy degradacji polimerowych łańcuchów. Radiacyjna modyfikacja polietylenu zrobiła karierę. Obecnie na skalę przemysłową za pomocą promieniowania elektronowego i  $\gamma$  sieciuje się kable i przewody elektryczne, rury i taśmy termokurczliwe, rury do przesyłu ciepłej wody, implanty chirurgiczne itd.

Komercyjnie działające instalacje radiacyjne pozwoliły na prowadzenie badań doświadczalnych nad

zastosowaniem radiacyjnej modyfikacji materiałów w innych dziedzinach, np. w elektronice, konserwacji dzieł sztuki<sup>6</sup>, oczyszczaniu wody i gazów spalinowych. W niedługim czasie zaowocowało to przemysłowym wykorzystaniem instalacji np. wyposażonych w wiązkę elektronów do modyfikacji układów elektronicznych na monokrystalicznym krzemie i sieciowania kauczuku we wspomnianych już oponach samochodowych<sup>7</sup>. We Francji zaczęto konserwować obiekty o znaczeniu historycznym poprzez tzw. radiacyjną konsolidację, czyli sieciowanie za pomocą promieniowania jonizującego roztworu polimeru w monomerze, którym wcześniej nasączono np. stare drewno.



**Fot. 3.** Przykład obiektu drewnianego poddawanego konserwacji przez radiacyjną konsolidację

### ODDZIAŁYWANIE PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO NA ORGANIZMY ŻYWE

Na cytowany artykuł Skłodowskiej-Curie można spojrzeć również od strony radiobiologii, a ściślej mówiąc ochrony radiologicznej. Nawet pod koniec lat 20. XX w. wiedza na temat szkodliwości działania promieniowania jonizującego na organizm ludzki nie była wcale powszechna. Doświadczenia uczoney z bakteriami potwierdzały więc, że promieniowanie, w tym przypadku rentgenowskie może być groźne, a nawet śmiertelne dla żywych komórek. Pewnym paradoksem jest to, że sama uczona najprawdopodobniej otrzymała duże dawki promieniowania X prześwietlając żołnierzy na froncie I wojny światowej. Nie wszyscy wiedzą, że była pierwszą kobietą, która ukończyła kurs prawa jazdy na samochód ciężarowy, aby móc podróżować ambulansem marki *Renault* wyposażonym w aparat rentgenowski. Razem z córką Ireną zajmowała się głównie szkoleniem wojskowego personelu medycznego. Nie wiadomo jak duże dawki promieniowania otrzymała wtedy uczona.



**Fot. 4.** Maria Skłodowska-Curie w ambulansie wojskowym z aparatem rentgenowskim



**Fot. 5.** Maria Skłodowska-Curie wśród żołnierzy amerykańskich na froncie I wojny światowej



**Fot. 6.** Gabinet do prześwietleń rentgenowskich. Miały one na celu poszukiwanie odłamków w ciałach pacjentów

Jednak warto zaznaczyć, że obecnie dysponujemy technikami analitycznymi, za pomocą, których można byłoby spróbować je oszacować. Metoda Elektronowego Rezonansu Paramagnetycznego (EPR) pozwala ocenić liczbę wolnych rodników powstających w wyniku działania jonizującego promieniowania. Tak się składa, że kości i zęby są bardzo dobrymi naturalnymi dozymetrami, które nie tylko zbierają, ale również przechowują informacje o wielkości dawki promieniowania, jaką otrzymaliśmy za życia, a nasze doczesne szczątki po śmierci. Tę właściwość można wykorzystać dla celów datowania archeologicznych wykopaliisk. Taka praca została wykonana swego czasu w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie<sup>8</sup>. Wówczas określono wiek szczątków odkrytych w megalitycznych warunkach nuragi na Sardynii. Punktem odniesienia był grób rzymski, na którym zapisano datę śmierci zmarłego. Badając kawałek zęba rzymskiego legionisty, policzono średnią wielkość dawki, jaką od źródeł zewnętrznych (głównie radionuklidów obecnych w ziemi) otrzymuje się w tym rejonie. Analiza kości z wykopaliska nuragi pozwoliły oszacować wiek grobu na 1160 lat przed naszą erą. W podobny sposób określono również wielkości dawki promieniowania, jakie otrzymały pacjentki poszkodowane w 2001r. w czasie awarii urządzenia do terapii nowotworowej w Białymstoku. Poparzenie wywołane promieniowaniem jonizującym było na tyle poważne, że pacjentki wymagały interwencji chirurgicznej. W wyniku tych zabiegów usunięto fragmenty żeber, w których zapisana została informacja o wielkości pochłoniętej dawki. Oceniono ją na około 80 Gy<sup>9</sup>. Warto wyjaśnić, że ta bardzo duża dawka (większa od śmiertelnej) podana lokalnie nie spowodowała śmierci kobiet.

Reasumując można przyjąć, że dysponując niewielkimi próbkami kości małżonków Curie przechowywanymi w Panteonie francuskim, jesteśmy w stanie oszacować, na ile wielkości pochłoniętych przez nie dawek promieniowania odbiegają od przeciętnych i ocenić, jaki mogły one mieć wpływ na zdrowie uczonych. Oferta takich badań jest oczywiście stale aktualna wymaga jednak w pierwszej kolejności zgody rodziny na pobranie próbek.

### KRZYWE INAKTYWACJI W ŚWIETLE WSPÓŁCZESNEJ CHEMII RADIACYJNEJ

Wracając do przytaczanej na wstępie publikacji Skłodowskiej-Curie, warto raz jeszcze zauważyć, że prezentowane tam krzywe inaktywacji uczona uzyskała w wyniku eksperymentalnych badań. Wykorzystując współczesną wiedzę zdobytą przez wiele lat rozwo-

ju chemii radiacyjnej możemy podjąć się analizy tego problemu od teoretycznej strony. Punktem wyjścia jest zrozumienie niehomogeniczności oddziaływania promieniowania jonizującego z materią<sup>10</sup>. Elektrony przyspieszone w akceleratorze lub promieniowanie elektromagnetyczne dużej energii, wnikając do materiału, wywołują wtórną kaskadę elektronów, których pierwsze generacje powodują pojedyncze jonizacje w stosunkowo dużej odległości, nazywane „gniazdami jednojonizacyjnymi”. W miarę jak elektrony ulegają energetycznej degradacji odległości między jonizacjami zaczynają się zmniejszać, a elektrony ostatnich generacji powodują tak duże ich nagromadzenie, że stwarza to zupełnie nową sytuację z punktu widzenia zachodzących procesów chemicznych w materiale. Zjawisko odkładania energii przez elektrony o dużym *LET* (*Linear Energy Transfer*) opisywane jest za pomocą wyrażenia „gniazda wielojonizacyjnego”. W efekcie w napromienianej próbce uzyskujemy widmo uszkodzeń radiacyjnych o różnej wielkości odłożonej energii. Stąd różnorodność procesów chemicznych mogących przebiegać w następstwie zjawisk pierwotnych jest bardzo duża. W polimerach należy brać pod uwagę tworzenie się obok gniazd jednojonizacyjnych również powstawanie gniazd wielojonizacyjnych. W pewnym przybliżeniu można założyć, że około 20% energii zostanie odłożona w ten właśnie sposób. Produkty gniazd wielojonizacyjnych i jednojonizacyjnych różnią się w sposób zasadniczy. W pierwszym przypadku dochodzi do przerwania łańcucha i powstania produktów małowielkościowych, w drugim do oderwania najczęściej wodoru, po ewentualnym przemieszczeniu pierwotnego efektu (dziury lub stanu wzbudzonego).

Możliwość przemieszczania się energii i ładunku po łańcuchu tłumaczy bardzo interesujące zjawisko efektu ochronnego, jakie w organicznej chemii radiacyjnej wykazują związki aromatyczne<sup>11,12</sup>. Aromatyczne pierścienie mają zdolność do rozpraszania energii pochłoniętego promieniowania jonizującego, same nie ulegają degradacji. Co więcej, działają również ochronnie na najbliższe otoczenie odbierając część energii od sąsiadujących polimerów alifatycznych. W niektórych publikacjach tłumaczy się efekt ochronny przeniesieniem wolnych rodników, co jest mniej prawdopodobne od wędrówki dodatniej dziury powstałej w wyniku pierwotnego aktu jonizacji. Przykład ten pokazuje, że nawet współcześnie toczy się wiele dyskusji na temat mechanizmów radiolizy, co podkreśla wagę i w pewnym sensie aktualność wyników prac eksperymentalnych Skłodowskiej-Curie.

Opisy te potwierdzają, że zjawiska chemiczne wywołane promieniowaniem jonizującym mają charakter

statystyczny. Krzywe inaktywacji można więc opisać zależnościami matematycznymi w oparciu o rachunek prawdopodobieństwa. Ilość gniazd jonizacyjnych o różnej ilości energii jest wprost proporcjonalna do dawki pochłoniętego promieniowania. Możemy więc w objętości obrabianego radiacyjnie materiału znaleźć miejsca, w których ilość energii wystarcza do spowodowania śmierci bakterii. Prawdopodobieństwo takiego zjawiska  $P1$  obliczymy jako stosunek sumy objętości gniazd jonizacyjnych o odpowiednio dużej energii do całkowitej objętości zawierającej bakterie. Jednocześnie w komórce patogenu znajdują się miejsca czułe na promieniowanie jonizujące, których uszkodzenie prowadzi do efektu letalnego. Stosunek objętości takich wrażliwych organów do całkowitej objętości zawierającej bakterie jest prawdopodobieństwem  $P2$ , które zawiera w sobie parametr indywidualny związany z opornością danego szczepu komórek. Aby spowodować śmierć bakterii, muszą zajść obydwie zjawiska, tzn. określona ilość energii musi się znaleźć w odpowiednim miejscu bakterii. Prawdopodobieństwo efektu letalnego jest, więc iloczynem  $P1$  i  $P2$  i zależy od dawki promieniowania  $D$  oraz indywidualnych cech organizmu opisanych stałą  $k$ . Po prostych przeliczeniach otrzymuje się zależność przeżywalności bakterii od dawki promieniowania, czyli krzywą inaktywacji opisaną wzorem logarytmicznym:

$$N = N_0 e^{(-kD)},$$

w którym  $N$  to liczba bakterii, które przeżyły obróbkę radiacyjną materiału w stosunku do początkowej ich liczby oznaczonej jako  $N_0$ . Łatwo zrozumieć, że trudniej jest radiacyjnie pozbyć się mniejszych obiektów (np. wirusów) i należy w tym celu użyć dużo większych dawek promieniowania. Widać również, że niezbędna do sterylizacji dawka promieniowania zależy od wstępnego skażenia wyrobu. Przy zastosowaniu podstawowej wiedzy z zakresu współczesnej chemii radiacyjnej udało się nam wyprowadzić teoretycznie zależność, która dobrze opisuje krzywe inaktywacji otrzymane przez Skłodowską-Curie. Należy jednak pamiętać, że na przełomie XIX i XX w. dokonywano dopiero fundamentalnych odkryć, które radykalnie zmieniły pogląd na budowę atomu. Na poznanie mechanizmów oddziaływania promieniowania na materiały trzeba było poczekać parę lat. Można dodać, że koncepcja gniazd jonizacyjnych w szczególności gniazd wielojonizacyjnych jest nadal przedmiotem dyskusji. Wielu autorów poważnych publikacji nadal pomija w swoich rozważaniach zjawiska zachodzące w wyniku oddziaływania elektronów o dużym  $LET$  z materią.

## STERYLIZACJA RADIACYJNA

W chwili obecnej ponad tysiąc akceleratorów na całym świecie jest wykorzystywanych do prowadzenia prac z zakresu chemii i techniki radiacyjnej. Współczesne akceleratory charakteryzują się parametrami odpowiednio do potrzeb w danej dziedzinie zastosowań, przy czym energia elektronów nie przekracza 10 MeV. To ograniczenie daje gwarancję, że radiacyjna obróbka nie wywoła radioaktywności napromienionego materiału. Teoretycznie biorąc, w reakcjach fotojądrowych wysokoenergetycznego promieniowania  $gamma$  z jądrami niektórych pierwiastków mogą tworzyć się izotopy radioaktywne (tabela 1). Dlaczego więc formalne ograniczenia dotyczą wiązki elektronów, a nie źródeł kobaltowych i cezowych? Otóż w kobaltowych instalacjach stosuje się kwanty promieniowania  $gamma$  o energiach 1,33 MeV i 1,17 MeV, emitowane przez wzbudzone jądra  $^{60}Ni$ , powstające w wyniku  $beta$  rozpadu  $^{60}Co$ . W przypadku bardzo nielicznych już źródeł cezowych do radiacyjnej obróbki wykorzystuje się kwanty promieniowania  $gamma$  o jeszcze mniejszej energii. Wszystkie te energie są o rząd wielkości mniejsze od progów energetycznych aktywacji jądrowej. Radiacyjna obróbka w źródłach  $gamma$  nie stwarza pod względem radiologicznym zagrożeń dla wyrobów. Oczywiście, z samymi źródłami należy obchodzić się ostrożnie i z tego powodu niekiedy cieszą się gorszą społeczną opinią niż urządzenia akceleratorowe.

Promieniowanie  $gamma$  o dużej energii, z niewielką zresztą wydajnością powstaje, natomiast jako wynik hamowania elektronów. Szansa na to, że materiał po napromienieniu wiązką elektronów będzie radioaktywny, jest jednak bardzo mała. Po pierwsze, musiałby on zawierać miedź, ale i wówczas radionuklidy uległyby rozpadowi bardzo szybko. Tak więc, w zasadzie do sterylizacji polimerów można byłoby bezpiecznie wykorzystywać wiązki elektronów o energii np. 13 MeV. Jednak, aby zapobiec wszelkim nawet czysto hipotetycznym podejrzeniom o wzbudzenie radioaktywności w przypadku żywności, zwłaszcza konserwowanej za pomocą promieniowania elektronowego, wprowadzono restrykcyjne ograniczenia energii elektronów do wspomnianych już 10 MeV.

Obecnie promieniowanie jonizujące stosuje się również do sterylizacji farmaceutyków, kosmetyków, ziół, przypraw ziołowych, żywności, dezynfekcji zboża i dzieł sztuki. Ze względu na historyczny charakter publikacji, zwracamy uwagę na zastosowanie technik radiacyjnych do konserwacji obiektów zabytkowych. Za pomocą promieniowania jonizującego w prosty i skuteczny sposób możemy pozbyć się np. insektów z obiektów drewnianych.

**Tabela 1.** Pierwiastki o najniższych progach energetycznych dla reakcji fotojądrowych

Reakcja fotojądrowa	Próg energetyczny	Półokres rozpadu
$^{65}\text{Cu}(\gamma,n)^{64}\text{Cu}$	10,2 MeV	12 godzin
$^{63}\text{Cu}(\gamma,n)^{62}\text{Cu}$	10,9 MeV	10 minut
$^{64}\text{Zn}(\gamma,n)^{63}\text{Zn}$	13,8 MeV	9 minut
$^{16}\text{O}(\gamma,n)^{15}\text{O}$	16,3 MeV	2,1 minuty
$^{12}\text{C}(\gamma,n)^{11}\text{C}$	18,7 MeV	21 minut

W odróżnieniu od metod chemicznych, sposoby radiacyjne eliminują również jaja szkodników. Za pomocą tlenu etylenu unieszkodliwiamy larwy i chrabąszcze, ryzykując jednak, że szkodniki wyklują się ponownie z nieuszkodzonych jaj owadów. Spektakularnym przykładem radiacyjnej konserwacji było wyjałowienie za pomocą promieniowania *gamma* młodego mamuta z przed 50 tysięcy lat<sup>13,14,15</sup>. Zabiegu tego dokonano w ośrodku NucleArt w Grenobl we Francji.

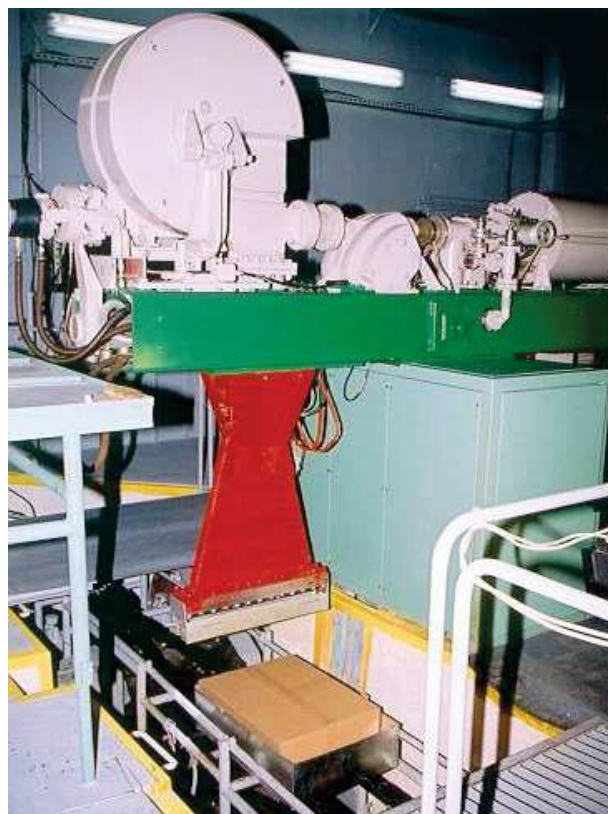


**Fot. 7.** Dziecko mamuta przygotowywane do radiacyjnego zabiegu wyjaławiania w temperaturze  $-22^{\circ}\text{C}$

### PIERWSZA POLSKA INSTALACJA AKCELERATOROWA DO RADIACYJNEJ MODYFIKACJI MATERIAŁÓW

Radiacyjną sterylizację z historycznego punktu widzenia możemy traktować jako polską specjalność. Warto więc wspomnieć na koniec o pierwszej krajowej instalacji akceleratorowej do radiacyjnej obróbki materiałów. Z inicjatywą budowy w Polsce akceleratora elektronów, przeznaczonego dla potrzeb chemii i techniki radiacyjnej, wystąpił prof. Z.P. Zagórski pod koniec lat 60. Wykorzystał on doświadczenia kilku staży zagranicz-

nych, w szczególności pobyt w ośrodku Risø w Danii, gdzie już od kilku lat działał taki właśnie akcelerator amerykańskiej produkcji. Wykonanie konstrukcji akceleratora zlecono Instytutowi Aparatury Elektrofizycznej im. Jefremowa w Leningradzie (obecnie *Sankt - Petersburg*). Prototyp wykonano szybko i pierwsze próby przeprowadzono w 1969 r. 17 stycznia 1971 r. akcelerator LAE 13/9 oficjalnie został oddany do użytku w Instytucie Badań Jądrowych na Żeraniu (obecnie Instytut Chemii i Techniki Jądrowej). Wszystkie urządzenia pomocnicze jak transporter, osłony przed promieniowaniem, śluzę itd. zostały wykonane w kraju. Akcelerator ten, co warto podkreślić, stał się dla Rosjan wyjściowym modelem dla konstrukcji przemysłowych akceleratorów elektronów. W wersjach przemysłowych, znacznie uproszczonych, nie stosowano na przykład odchylenia wiązki o  $270^{\circ}$ , aby nie tracić części energii.



**Fot. 8.** Liniowy akcelerator elektronów LAE 13/9. Urządzenie jest nadal sprawne i wykorzystywane zarówno dla celów technologicznych, jak i naukowych

Warto wyjaśnić, że wybór wykonawcy akceleratora miał w tym czasie polityczny charakter. Amerykanie nałożyli embargo na klitrony (lampy elektronowe generujące mikrofałe dużej mocy) będące istotną częścią akceleratora, które można było również stosować w radarach dalekiego zasięgu. Z tego powodu Zakład Chemii Radiacyjnej nie mógł zakupić bardzo dobrego akce-

leratora oferowanego przez francuską CSF – Thomson, specjalnie zaprojektowanego dla naszych wymagań w ramach projektu *Varsowie*. Aby uniknąć drażliwego tematu embarga, strona francuska podniosła po prostu cenę o 0,5 miliona dolarów, co automatycznie zamknęło dyskusje prowadzone w roku 1965 w Orsay pod Paryżem przez profesora Zagórskiego i zdecydowało o wyborze kontrahenta radzieckiego.

Przez wiele lat akcelerator *LAE 13/9* był jedynym w kraju dużym źródłem promieniowania jonizującego w postaci wiązki przyspieszonych elektronów. Wykorzystywano go zarówno do komercyjnej działalności w zakresie sterylizacji radiacyjnej, jak i badań naukowych z udziałem wiązki prostej elektronów. W roku 1993 oddano do użytku pierwsze i nadal jedyne; Stację Sterylizacji Radiacyjnej Wyrobów Medycznych oraz Samodzielną Stację Utrwalania Płodów Rolnych. Obie wyposażono w przemysłowe akceleratory elektronów produkcji rosyjskiej o nazwie *Elektronika 10/10*.



**Fot. 9.** Profesor Jerzy Niewodniczański, prezes Państwowej Agencji Atomistyki dokonuje symbolicznego uruchomienia Stacji Sterylizacji Radiacyjnej Wyrobów



**Fot. 10.** Na zdjęciu pierwszy z lewej w pierwszym rzędzie ówczesny dyrektor Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej doc. dr Lech Waliś. Pierwszy z prawej w pierwszym rzędzie obecny dyrektor IChTJ prof. dr hab. Andrzej G. Chmielewski. W tle widać kartony ze strzykawkami sterylizowanymi wiązką szybkich elektronów



**Fot. 11.** W uroczystości uruchomienia Stacji Sterylizacji Radiacyjnej uczestniczyli od prawej: prof. dr hab. Zbigniew P. Zagórski, prof. dr hab. Jerzy Kroh, prof. dr hab. Jerzy Minczewski



**Fot. 12.** Uroczyste otwarcie Samodzielnej Stacji Radiacyjnego Utrwalania Płodów Rolnych. Drugi z lewej ówczesny dyrektor generalny Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej dr Hans Blix. Pierwszy z lewej dr Tadeusz Wójcik. Pierwszy z prawej dr Waław Stachowicz

\*\*\*

Radiacyjne technologie są obecnie intensywnie rozwijane na całym świecie. Powstają nowe kierunki badawcze, zwłaszcza w chemii radiacyjnej polimerów. Wspomniałem o radiacyjnej modyfikacji elastomerów intensywnie badanej głównie z punktu widzenia zastosowania w przemyśle oponiarskim. Wracam do tego tematu, gdyż w pewnym sensie autor jest prekursorem badań w tej dziedzinie w naszym kraju<sup>16,17,18</sup>. Obecnie prace nad np. synergią procesów chemicznego i radiacyjnego sieciowania są prowadzone wspólnie z dawnym Instytutem Przemysłu Gumowego w Piastowie. Ten zasłużony dla krajowej chemii instytut zmienił ostatnio nazwę na Instytut Inżynierii Materiałowej Polimerów i Barwników oddział Zamiejscowy Elastomerów i Technologii Gumi w Piastowie. Jest szansa, że to właśnie obróbka radiacyjna elastomerów zrobi podob-

na „karierę”, jak sieciowanie polietylenu. W pewnym sensie ma to już miejsce. Jeżeli wierzyć doniesieniom prasowym, większość opon samochodowych w Japonii i duża część w USA jest produkowana z udziałem radiacyjnych technologii wykorzystujących urządzenia akceleratorowe. Korzyści wynikające z zastosowania jonizującego promieniowania do modyfikacji elastomeru są na tyle istotne, że wyniki badań są pilnie strzeżone przez duże koncerny chemiczne. Stąd konieczność prowadzenia własnych badań naukowych w tej dziedzinie. Jednak nie należy zapominać, że początki tym zaawansowanym technologiom dał skromny artykuł opublikowany przez Marię Skłodowską-Curie. I nawet, jeżeli jest to teza bardzo śmiała, to mamy nadzieję, że naszym artykułem udowodnimy, że nie mija się z prawdą.

dr Wojciech Głuszewski,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa

## Literatura

1. M. Curie: *Sur l'étude des courbes de probabilité relatives à l'action des rayons X sur les bacilles*. *Compte rendu* 1929, **198**, s. 102.
2. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, Q.K. Tran, L. Cortella: *Maria Skłodowska Curie - the precursor of radiation sterilization methods*. „Analytical and Bioanalytical Chemistry” 2011, **400**, s. 1577-1582.
3. Z.P. Zagórski: *Sterylicacja Radiacyjna z elementami chemii radiacyjnej i badań radiacyjnych*. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2007, s. 272.
4. Z. Zimek: *Technika radiacyjna w PTJ*. „Postępy Techniki Jądrowej” 2008, **Z.4**, s. 15-22.
5. Z.P. Zagórski: *Pół wieku sieciowania radiacyjnego polietylenu, czyli pochwała nauki pozauczelnianej*. „Postępy Techniki Jądrowej” 2003, **Z.4**, s. 10-16.
6. W. Głuszewski: *Zastosowanie technik nuklearnych w identyfikacji i konserwacji dzieł sztuki*. „Postępy Techniki Jądrowej” 2009, **Z.**, 12-14.
7. W. Głuszewski: *Radiacyjnie modyfikowane polimery w motoryzacji*. „Postępy Techniki Jądrowej” 2009, **Z.2**, s. 24-28.
8. J. Sadło, J. Michalik, W. Stachowicz, G. Strzelczak, A. Dziedzic-Goćławska, K. Ostrowski: *EPR study on biominerals as materials for retrospective dosimetry*. „Radiation Physics and Chemistry” 2006, **51**, s. 421-423.
9. F. Trompier, J. Sadło, J. Michalik, W. Stachowicz, A. Mazal, I. Clairand, J. Rostkowska, W. Bulski, A. Kula-kowski, J. Słusznik, S. Gozdz and A. Wojcik: *EPR dosimetry for actual and suspected overexposures during radiotherapy treatments in Poland*. „Radiation Measurements” 2007, **2**, s. 1025-1028.
10. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski: *Application of gas chromatography to the investigations on polypropylene radiolysis*. “INCT Annual Report 2005”, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warsaw 2006, s. 42.
11. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski: *Radiation effects in polypropylene/polystyrene blends as the model of aromatic protection effects*. “Nukleonika” 2008, **53(1)**, s. 21-24.
12. T.T. Do, V.J. Tang, J.A. Aguilera, J. R. Milligan: *Structure reactivity relationship in the reaction of DNA guanyl radicals with hydroxybenzoates*. “Radiation Physics and Chemistry” 2010, **79** s. 1144-1148.
13. R. Mesquita: *Ice Age baby mammoth on display at French museum*. “Associated Press” 2010, 16/07.
14. Agence France Presse: *Le plus vieux bébé mammoth du monde sera exposé jeudi soir au Puy-en-Velay*. 13/07/2010.
15. L. Balout., C. Roubet: *La Momie de Ramsès II – Contribution scientifique à l'égyptologie*. Ch. 9 Thérapeutique par irradiation, Editions Recherche sur les Civilisations, 1985, Paris.
16. Z.P. Zagórski, M. Rajkiewicz, W. Głuszewski: *Radiacyjna modyfikacja elastomerów*, „Przemysł Chemiczny” 2011, **6**, s. 1191-1194
17. W. Głuszewski, P. Z. Zagórski: *Procesy radiacyjnego sieciowania polimerów*. „Tworzywa Sztuczne i Chemia” 2010, **2**, s. 58-60
18. J. Bik, W. Głuszewski, W.M. Rzymiski, Z.P. Zagórski: *EB radiation crosslinking of elastomers*. „Radiation Physics and Chemistry” 2003, **67**, s. 421

## STRESZCZENIE

Artykuł powstał w związku z 80. rocznicą otwarcia w Warszawie Instytutu Radowego.

Maria Skłodowska-Curie była między innymi prekursorką chemii radiacyjnej, nauki zajmującej się zjawiskami chemicznymi wywołanymi przez działanie promieniowania jonizującego na materię. Rozwój tej dziedziny wiedzy zaowocował w późniejszym okresie praktycznymi zastosowaniami technik radiacyjnych w wielu dziedzinach przemysłu, medycyny, rolnictwa, ochrony środowiska, badań kosmicznych i nauki.

Jako punkt wyjścia posłużył artykuł *Sur l'étude des courbes de probabilité relatives à l'action des rayons X sur les bacilles*, który Maria Skłodowska-Curie opublikowała w roku 1929 w Biuletynie Francuskiej Akademii Nauk. Autorka przedstawiła wówczas po raz pierwszy