

Spis treści

	strona
1. Zadania i misja społeczna Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) w skali kraju i Europy	3
2. Struktura organizacyjna CLOR i posiadana aparatura	6
3. Organizacja radiacyjnego monitoringu Polski	8
3.1. Monitoring powietrza – stacje ASS-500/NASS-500	8
3.1.1. Stacja ASS-500 – Informacje ogólne	10
3.1.2. System on-line w stacji ASS-500	10
3.1.3. Procedura pomiarów laboratoryjnych filtrów ze stacji ASS-500	11
3.1.4. Sieć stacji ASS-500 w Polsce	12
3.1.5. Przykładowe wyniki otrzymane w sieci stacji ASS-500	14
3.1.6. Podsumowanie – plany na przyszłość	15
3.2. Monitoring gleby – radiologiczna mapa Polski	17
3.2.1. Metoda poboru próbek gleby	17
3.2.2. Metodyka przygotowania próbek oraz ich pomiaru	18
3.2.3. Metoda prezentacji wyników pomiarów	19
3.3. Monitoring żywności	20
3.3.1. Produkty żywnościowe	21
3.3.2. Dania gotowe	22
3.4. Monitoring wód rzek i jezior Polski	23
4. Badanie promieniotwórczości surowców i materiałów budowlanych	25
4.1. Możliwość różnych zastosowań surowców i materiałów budowlanych na podstawie istniejących w Polsce przepisów prawnych	25
4.2. Przykładowe wyniki badań promieniotwórczości naturalnej w surowcach odpadowych	26
4.3. Zastosowanie surowców i materiałów budowlanych w budownictwie mieszkaniowym i drogowym	27

	strona
4.4. Ocena narażenia osób wynikająca z zastosowania pewnych surowców do budowy dróg – na przykładzie surowców odpadowych	30
4.5. Surowce i materiały budowlane nie nadające się do budownictwa drogowego	31
5. Analiza zawartości jodu promieniotwórczego w tarczycy	32
6. Szkolenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej	36
7. Dozymetria radonu	37
7.1. Wstęp	37
7.2. Metody i aparatura pomiarowa	38
7.3. Metody pomiaru stężenia pochodnych radonu	39
7.4. Dawka od radonu i jego krótkożyciowych pochodnych	40
8. Dozymetria cytogenetyczna	42
9. Dozymetria indywidualna	45
10. Wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych i radonowych	46
10.1. Stanowisko kalibracyjne gamma	47
10.2. Stanowisko kalibracyjne RTG	47
10.3. Stanowisko kalibracyjne skażeń powierzchniowych	48
10.4. Stanowisko kalibracyjne radonowe	48
10.5. Stanowisko kalibracyjne beta	49
11. Zespół Prewencji i Służby Dozymetrycznej	49
12. Współpraca krajowa i międzynarodowa	51
12.1. Projekty strategiczne i międzynarodowe	51
12.2. Współpraca z ośrodkami zagranicznymi	52
12.3. Współpraca z ośrodkami krajowymi	53
Literatura	54

1. **Zadania i misja społeczna Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) w skali kraju i Europy**

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) jest wiodącą jednostką badawczo-rozwojową powołaną w 1957 roku przez Prezesa Rady Ministrów do wykonywania zadań operacyjnych oraz prowadzenia badań naukowych i prac rozwojowych w zakresie ochrony przed promieniowaniem jonizującym. Od 1 października 2010 r., w związku z wprowadzoną przez Rząd reorganizacją nauki polskiej, staje się Instytutem Badawczym i w wyniku kategoryzacji przeprowadzanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego uzyskuje kategorię II.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, jako specjalistyczny instytut badawczy powołany zarządzeniem Prezesa Rady ministrów Nr 164 z dn. 13-06-1957 r. do prowadzenie prac operacyjnych i naukowych związanych z bezpieczeństwem radiacyjnym kraju, stanowi istotne ogniwo Monitoringu Ogólnokrajowego.

Wzmocnienie pozycji CLOR w strukturze ochrony radiologicznej w Polsce nastąpiło 3 kwietnia 2012 r. w wyniku podpisania Umowy Ramowej z Prezesem Państwowej Agencji Atomistyki, dotyczącej wykonywania ekspertyz i zaplecza merytorycznego oraz finansowania prac operacyjnych i naukowych związanych z bezpieczeństwem radiacyjnym kraju.

Ostatnio aktywność CLOR w szerokim zakresie działań eksperckich uległa rozszerzeniu na rzecz Pełnomocnika rządu ds. Energetyki Jądrowej oraz Departamentu Energetyki Jądrowej Ministerstwa Gospodarki, w zakresie np. Komisji Ochrony Radiologicznej NEA (*Nuclear Energy Agency* – Agencja Energii Jądrowej), uzgodnieniem terminologii i słownictwa na rzecz Komisji Unii Europejskiej, przygotowań w związku z Misją Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej MAEA (INIR – *Integrated Nuclear Infrastructure Review* – Misja Zintegrowanego Przeglądu Infrastruktury Jądrowej), jak również uczestnictwie w rozpoczętych negocjacjach transgranicznych ze Słowacją, Danią, Austrią oraz Niemcami [CLOR-1].

Zadania badawcze realizowane obecnie przez Centralne Laboratorium powiązane są w znacznej mierze z zadaniami Państwa ujętymi w Programie Polskiej Energetyki Jądrowej. Mają też związek z koniecznością rozszerzenia, unowocześnienia i dostosowania krajowego systemu ochrony radiologicznej do podwyższonych standardów bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej wynikających z zaleceń i dyrektyw UE oraz rządowych zobowiązań międzynarodowych.

CLOR jest jedyną w Polsce instytucją, która w swoim statucie ma operacyjną ochronę radiologiczną. Do zakresu działania CLOR należą w szczególności [CLOR-2]:

- **Prowadzenie badań naukowych i prac rozwojowych w zakresie:**
 - ochrony przed promieniowaniem jonizującym człowieka i środowiska;
 - radiobiologii;
 - radioekologii;
 - radiotoksykologii;

- doskonalenia metod pomiarowych w dziedzinie radiometrii i dozymetrii promieniowania jonizującego oraz radiochemicznych metod analitycznych;
 - doskonalenia metod oceny narażenia populacji i indywidualnego osób w warunkach normalnych i awaryjnych;
 - doskonalenia metod wykrywania i identyfikacji pochodzenia materiałów jądrowych i innych substancji promieniotwórczych;
- Przystosowanie wyników badań naukowych i prac rozwojowych do potrzeb praktyki;
- Wdrażanie wyników badań naukowych i prac rozwojowych.

W związku z prowadzoną działalnością podstawową Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej realizuje następujące prace [CLOR-2]:

- upowszechnia wyniki badań naukowych i prac rozwojowych;
- wykonuje badania i analizy oraz opracowuje oceny skażeń promieniotwórczych komponentów środowiska, człowieka oraz artykułów żywnościowych;
- wykonuje badania oraz opracowuje oceny i ekspertyzy związane z użytkowaniem, przechowywaniem oraz transportem materiałów promieniotwórczych;
- prowadzi i rozwija bazy danych dotyczące źródeł promieniowania jonizującego, dawek indywidualnych oraz wyników pomiarów radiometrycznych i innych zgodnie z obowiązującymi przepisami;
- wytwarza w związku z prowadzonymi badaniami naukowymi i pracami rozwojowymi aparaturę, urządzenia lub inne wyroby oraz prowadzi walidację metod badawczych, pomiarowych oraz wzorcowanie aparatury;
- wykonuje zadania operacyjne związane z ochroną przed promieniowaniem jonizującym osób narażonych zawodowo, ogółu ludności i środowiska kraju w warunkach normalnych oraz nadzwyczajnych zdarzeń radiacyjnych;
- prowadzi działalność normalizacyjną związaną z ochroną radiologiczną oraz informacyjną w zakresie promieniowania jonizującego;
- prowadzi działalność wydawniczą związaną z prowadzonymi badaniami naukowymi i pracami rozwojowymi;
- prowadzi seminaria, szkolenia specjalistyczne na inspektorów ochrony radiologicznej, pracujących z różnymi rodzajami promieniowania oraz inne formy kształcenia ustawicznego;
- prowadzi badania i analizy żywności związane z jakością;
- opracowuje opinie i ekspertyzy nie mające charakteru badań naukowych i prac rozwojowych;
- prowadzi badania bezpieczeństwa użytkowania wyrobów;
- prowadzi działalność w zakresie inżynierii i związane z nią doradztwo techniczne, w tym wzorcowanie aparatury dozymetrycznej i radiometrycznej, nie związane z przystosowaniem wyników badań naukowych i prac rozwojowych do potrzeb praktyki;
- produkuje aparaturę i urządzenia pomiarowe.

W oparciu o własne opatentowane rozwiązania konstrukcyjne, CLOR jest znanym producentem wysokoczułych polskich stacji wykrywania skażeń radioaktywnych powietrza ASS-500 (dokładna informacja o stacjach będzie zamieszczona w dalszej części opracowania). Poza Polską zainstalowano je w kilkunastu krajach, m.in. w Niemczech, Francji, Danii, Austrii, Hiszpanii, a także na poligonie atomowym Mururoa. W latach 2007-2008 stacje ASS-500 sprzedano do czterech krajów: Cypr, Bośnia i Hercegowina, Turcja oraz Chorwacja. Stacje ASS-500, nadzorowane przez CLOR, stanowią główny trzon sieci radiacyjnego monitoringu Polski i należą do najlepszych i najczulszych tego typu urządzeń na świecie. W okresie 20.03.2011 – 1.05.2011, po awarii w elektrowni Fukushima Dai-ichi, sieć stacji ASS-500 jako jedyna z istniejących sieci monitoringu w Polsce, przekazywała dane o poziomie skażeń promieniotwórczych w powietrzu nad Polską do Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych PAA i w oparciu o wyniki tej sieci eksperci ochrony radiologicznej mogli z pełną odpowiedzialnością formułować oświadczenia o braku zagrożenia radiacyjnego dla Polski.

Prowadzony od 1970 r. w CLOR monitoring zawartości pierwiastków promieniotwórczych w produktach żywnościowych przez akredytowane Laboratoria, zapewnia wiarygodny pomiar i fachową ekspertyzę, uznawaną przez kraje UE, co zabezpiecza polski eksport produktów żywnościowych przed zarzutami nie spełniania kryteriów sanitarnych, jak również zapobiega próbom wprowadzenia na polski rynek skażonych produktów z innych krajów (Dyrektywa UE Unii Europejskiej 93/47/EURATOM i CODEX ALIMENTARIUS WHO). W badaniach porównawczych organizowanych przez PROCORAD (Francja) w 2012 roku Akredytowane Laboratorium Analiz Radiochemicznych i Spektrometrycznych powtórzyło sukces z 2011 roku uzyskując status „**Top Laboratory**”.

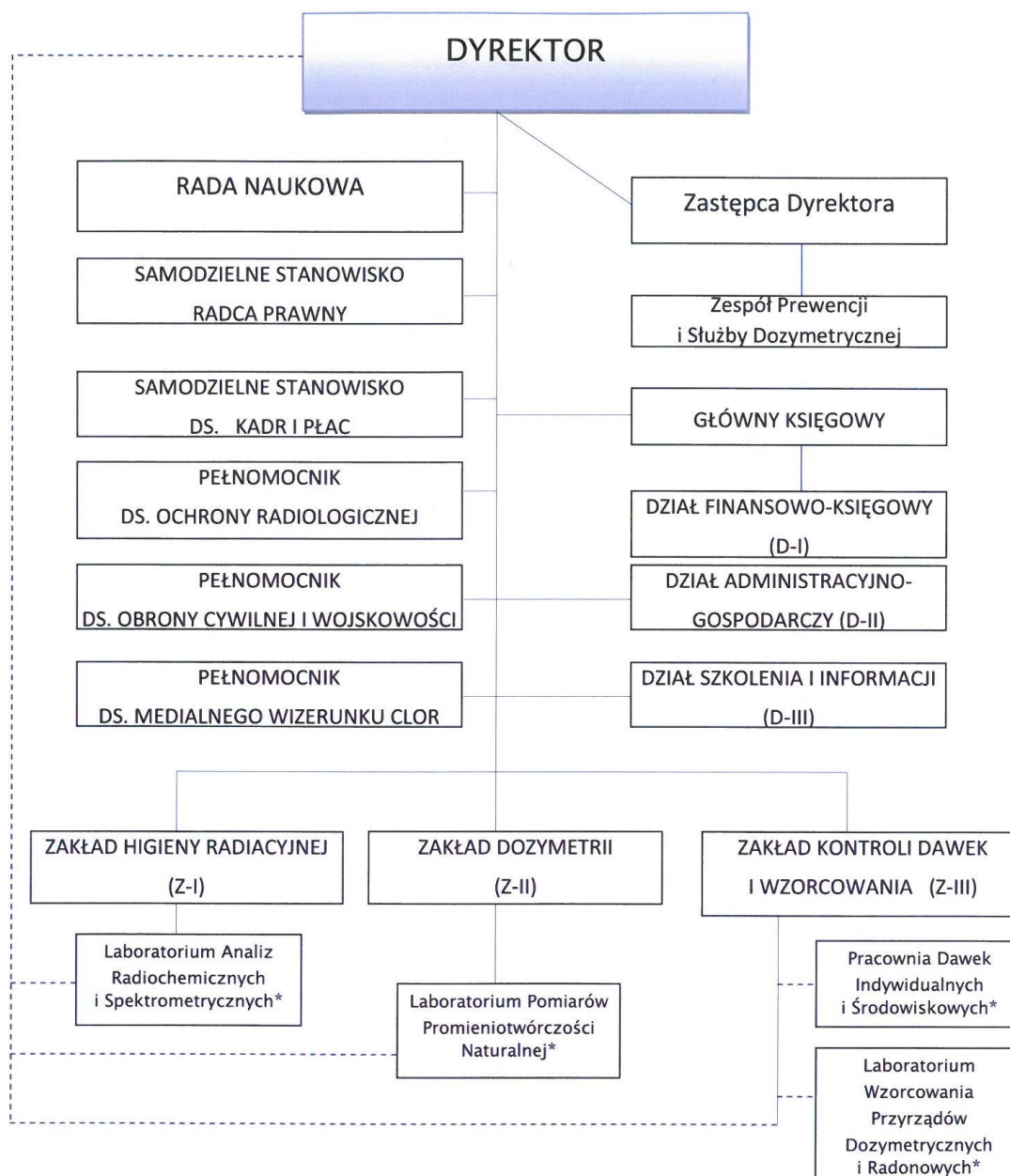
Prowadzone przez akredytowane laboratoria w CLOR wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych oraz kontrola narażenia zawodowego stanowi niezbędny element programu utrzymania wysokiego standardu aparatów radiodiagnostycznych i bezpieczeństwa radiacyjnego narażonych zawodowo w Zakładach Medycyny Nuklearnej w Resorcie Zdrowia (zgodnie z Dyrektywą UE 93/47/EURATOM) [CLOR-1].

Wyniki prac prowadzonych w CLOR są publikowane w raportach wewnętrznych i innych wydawnictwach naukowych. Stanowią materiał wykorzystywany przez wykładowców wyższych uczelni i innych jednostek zainteresowanych tematyką ochrony radiologicznej. W samym tylko 2012 r. pracownicy CLOR uczestniczyli w wielu imprezach krajowych lub międzynarodowych popularyzujących naukę min.

- 70th Meeting of the CRPPH, NEA, Paryż, 21 – 23 March 2012
- Seminarium ICRU, Instytut Fizyki Jądrowej PAN, 2 kwietnia 2012, Kraków
- Piknik Naukowy Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik, 12 maja 2012 roku.
- 13th International Congress of the International Radiation Protection Association”, Glasgow, Szkocja, 13-18 maj 2012 r.
- 2nd INTERNATIONAL NUCLEAR ENERGY CONGRESS, Politechnika Warszawska, Warszawa, 24 maja 2012 r
- 25-te Sympozjum Fizyki Plazmy i Technologii (25th Symposium on Plasma Physics and Technology), CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE, Praga, Czechy, 17-22 czerwca 2012r.

2. Struktura organizacyjna CLOR i posiadana aparatura

Na rysunku CLOR-1 przedstawiony został schemat organizacyjny Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej. Strukturę CLOR tworzą 3 Zakłady (Zakład Higieny Radiacyjnej, Zakład Dozymetrii i Zakład Kontroli Dawek i Wzorcowania) oraz jeden Dział (Dział Szkolenia i Informacji) zajmujące się sprawami merytorycznymi.



*Laboratoria akredytowane

Rys. CLOR-1. Schemat organizacyjny Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej posiada cztery akredytowane laboratoria. Są to:

- Laboratorium Analiz Radiochemicznych i Spektrometrycznych (w ramach Zakładu Higieny Radiacyjnej Z-I);
- Laboratorium Pomiarów Promieniotwórczości Naturalnej (wchodzące w skład Zakładu Dozymetrii Z-II);
- Pracownia Dawek Indywidualnych i Środowiskowych (działająca w strukturze Zakładu Kontroli Dawek i Wzorcowania Z-III);
- Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych (również w Zakładzie Kontroli Dawek i Wzorcowania Z-III).

CLOR posiada bardzo nowoczesną (często unikalną w skali kraju i Europy) aparaturę pomiarową i pomiarowo-badawczą. Można do niej zaliczyć m.in.

- 1) **Stacja ASS-500/NASS-500 (New Aerosol Sampling Station)** – jest to wolnostojące urządzenie do ciągłego poboru próbek aerozoli z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego. Rutynowo do zbierania aerozoli stosowany jest filtr Petrianowa typu FPP-15-1.5 o wysokiej wydajności wychwyty aerozoli. Dodatkowo stacja wyposażona jest w detektor scyntylacyjny NaI(Tl), pracujący w zestawie ze spektrometrem AS-01, umożliwiającą pomiar „on-line” aktywności aerozoli zbieranych na filtry.
- 2) **Stacja MASS-1000 (Mobile Aerosol Sampling Station)** – stacja przewoźna przeznaczona do poboru próbek powietrza w celu określenia jego promieniotwórczych zanieczyszczeń w terenie (np. w miejscu wystąpienia zdarzenia radiacyjnego). Stacja wyposażona jest w detektor LaBr, który wraz z oprogramowaniem pozwala na pomiary „on-line” promieniotwórczych zanieczyszczeń powietrza w miejscu pobierania próby do badań laboratoryjnych.
- 3) **Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych** z pełnym wyposażeniem, do którego można zaliczyć m.in. stanowisko do wzorcowania przyrządów mierzących promieniowanie rentgenowskie, promieniowanie beta, ławy kalibracyjne (Rys. CLOR-2) wykorzystywane przy wzorcowaniu przyrządów do pomiarów mocy dawki i dawki oraz promieniowania gamma. Laboratorium prowadzi również prace w zakresie napromieniowywania wzorcowymi dawkami pasywnych dawkomierzy filmowych i termoluminescencyjnych (TLD).



Rys. CLOR-2. Ława kalibracyjna w Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych (fot. prof. J. Pluta)

- 4) **Radonowe Stanowisko Wzorcowe** (Rys. CLOR-3) służące do pomiarów kalibracyjnych na potrzeby dozymetrii radonowej jak i do prowadzenia prac badawczych w zakresie fizyki aerozoli. Stanowisko to wyposażone jest w nowoczesną kalibracyjną komorę radonową, która poza tym, że daje możliwość wytwarzania wzorcowych wartości stężeń radonu oraz produktów jego rozpadu, pozwala również określać rozkład średnic aerozoli będących nośnikami pochodnych radonu.



*Rys. CLOR-3. Radonowe Stanowisko Wzorcowe –
Komora radonowa.
(fot. prof. J. Pluta)*

- 5) **Laboratorium Pomiarów Jodu Promieniotwórczego w Tarczycy (wraz z wyposażeniem)** działające dla potrzeb służb awaryjnych oraz na wypadek zagrożenia radiacyjnego. Laboratorium prowadzi systematyczne pomiary kontrolne napromienienia tarczycy jodem promieniotwórczym pracowników zakładów medycyny nuklearnej oraz ocenę dawek od wchłonięć jodu promieniotwórczego. Laboratorium posiada dwa zestawy aparatury pomiarowej do pomiarów jodu – zestaw stacjonarny oraz przewoźny.
- 6) **Laboratorium Dozymetrii Biologicznej** wyposażone w profesjonalne urządzenia do prowadzenia pomiarów i badań na poziomie komórkowym. Biologiczna ocena dawki pochłoniętej dokonywana jest w przypadku wypadków radiacyjnych z udziałem osób, które w chwili zdarzenia nie posiadały dawkomierza indywidualnego, lub gdy dawkomierz osobisty uległ uszkodzeniu bądź skażeniu promieniotwórczemu, a w miejscu zdarzenia nie prowadzone były pomiary radiometryczne.

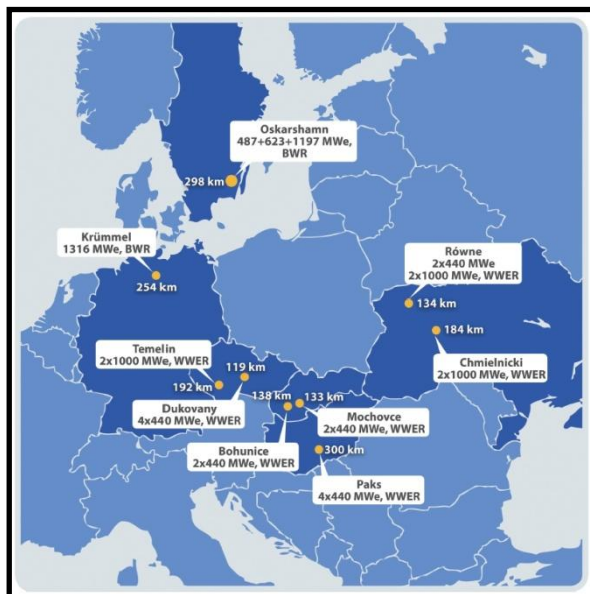
3. **Organizacja radiacyjnego monitoringu Polski**

3.1. Monitoring powietrza – stacje ASS-500/NASS-500

W celu nadzoru nad przestrzeganiem traktatu „O Całkowitym Zakazie Prób Jądrowych” (zidentyfikowania i określenia miejsca potencjalnej eksplozji oraz awarii jądrowej na świecie) powstał międzynarodowy system monitoringu, w skład którego wchodzi 337 stacji monitorujących naszą planetę (są to stacje sejsmologiczne, radiologiczne, hydroakustyczne, infradźwiękowe).

Atomowym aniołem stróżem w Polsce jest Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, które jest właścicielem sieci stacji wchodzących w skład polskiego systemu wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych. W skład sieci wchodzi 12 stacji ASS-500 (Aerosol Sampling Stations - stacje ciągłego monitoringu) rozmieszczonych na terenie kraju. Można zadać sobie pytanie, czy w kraju, który nie posiada energetyki jądrowej, taki system jest rzeczywiście potrzebny. Otóż Polska nie posiada (jak na razie) elektrowni jądrowych, ale u naszych najbliższych sąsiadów jest ich dość dużo. Na Rys. CLOR-4 przedstawiono elektrownie jądrowe pracujące w odległości nie większej niż 300 km od granic naszego kraju. W sumie w takiej odległości od naszych granic pracują 24 reaktory jądrowe zlokalizowane w 9 elektrowniach:

- **Oskarshamn (Szwecja)** – 3 reaktory typu BWR (Boiling Water Reactor – reaktor wodny wrzący) o mocach 487, 623 oraz 1197 MWe;
- **Równe (Ukraina)** – 2 reaktory WWER-440 – są to reaktory typu PWR (Pressurized Water Reactor – reaktor wodny ciśnieniowy) zaprojektowane w ZSRR (WWER – Wodo-Wodianoj Energietyczeskiej Rieaktor – wodno-wodny reaktor energetyczny) o mocy energetycznej 411 MWe każdy oraz 2 reaktory WWER-1000 o mocach 950 MWe każdy;
- **Chmielnicki (Ukraina)** – 2 reaktory WWER-1000;
- **Mochowce (Słowacja)** – 2 reaktory WWER-440;
- **Bohunice (Słowacja)** – 2 reaktory WWER-440;
- **Paks (Węgry)** – 4 reaktory WWER-440;
- **Dukovany (Czechy)** – 4 reaktory WWER-440;
- **Temelin (Czechy)** – 2 reaktory WWER-1000;
- **Krümmel (Niemcy)** – reaktor typu BWR o mocy 1316 MWe.



Rys. CLOR-4. Elektrownie jądrowe (wraz z pracującymi w nich reaktorami) w odległościach nie większych niż 300 km od granic naszego kraju.

(Źródło: Państwowa Agencja Atomistyki)

Łączna moc energetyczna powyższych reaktorów to ponad 15 GWe. Mogą one stanowić potencjalne źródła skażeń w naszym kraju. Poza tym Polska, jako członek m.in. Paktu Północnoatlantyckiego (NATO) narażona jest na ataki terrorystyczne (także z użyciem materiałów jądrowych czy promieniotwórczych). I nad tymi potencjalnymi źródłami zagrożeń musi czuwać nasza sieć pomiarów skażeń promieniotwórczych powietrza.

3.1.1. Stacja ASS-500 – Informacje ogólne

Stacja ASS-500 (Aerosol Sampling Station), przedstawiona na Rys. CLOR-5, jest przeznaczona do monitoringu zanieczyszczeń powietrza w sytuacji normalnej i zagrożenia radiacyjnego. Pobór aerozoli z objętości powietrza rzędu nawet 10^5 m^3 pozwala na wykonywanie precyzyjnych pomiarów spektrometrycznych naturalnych i sztucznych radionuklidów (rejestracja stężeń na poziomie od dziesiątych części $\mu\text{Bq/m}^3$). Pobór próbek

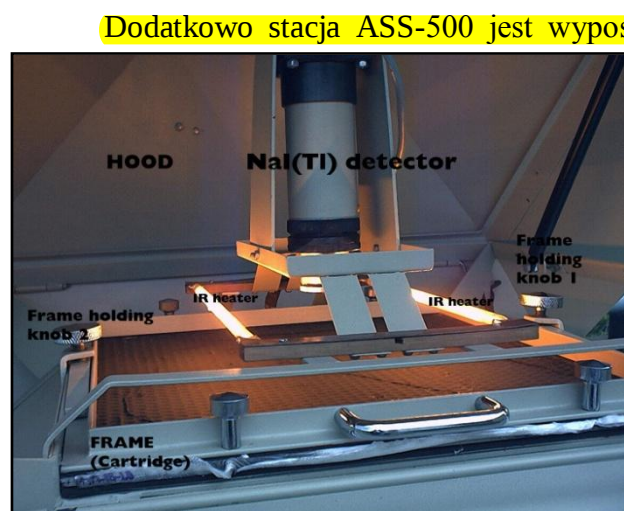


aerozoli może być prowadzony w zmiennych warunkach atmosferycznych, w dużym zakresie różnicy temperatur, przy zmieniającym się ciśnieniu czy wilgotności, a także przy mniejszym lub większym zapyleniu.

Rys. CLOR-5. Nowy model stacji ASS-500 (stacja NASS-500 – New Aerosol Sampling Station)

Stacja ASS-500 jest wolnostojącym urządzeniem do ciągłego poboru próbek aerozoli z powietrza. Rutynowo do poboru aerozoli stosowany jest filtr Petrianowa typu FPP-15-1.5 o wysokiej wydajności zbierania. W normalnej sytuacji radiologicznej prowadzony jest tygodniowy okres poboru próbki. W tym czasie objętość przepływającego przez filtr powietrza wynosi nawet do ponad 10^5 m^3 . W przypadku obecności sztucznych izotopów promieniotwórczych w powietrzu lub zaistnienia przesłanek do intensyfikacji badań, częstotliwość pozyskiwania próbek powinna być odpowiednio zwiększona przez skrócenie czasu ich poboru nawet do kilkunastu minut (np. jak w okresie po awarii czarnobylskiej).

3.1.2. System on-line w stacji ASS-500



Dodatkowo stacja ASS-500 jest wyposażona w sondę scyntylacyjną, która on-line rejestruje sytuację radiologiczną w miejscu lokalizacji stacji (Rys. CLOR-6). Oczywiście poziom wykrywalności izotopów pochodzenia sztucznego w powietrzu rejestrowany przez system on-line jest dużo gorszy od pomiarów laboratoryjnych (ok. 2 Bq/m^3 dla cezu ^{137}Cs oraz ok. 1 Bq/m^3 dla jodu ^{131}I).

Rys. CLOR-6. Sonda scyntylacyjna NaI(Tl) umieszczona nad filtrem powietrza w stacji ASS-500 (element systemu on-line)

Sonda połączona jest ze sterownikiem (Rys. CLOR-7), w którym rejestrowane jest widmo promieniowania pobieranych na filtr zanieczyszczeń promieniotwórczych powietrza. Sterownik obsługiwany jest przez komputer, do którego raz na godzinę przesyłane jest zebrane widmo (w sytuacji zagrożenia radiologicznego czas ten może zostać skrócony do 10 minut). **Wszystkie komputery stacyjne połączone są siecią komputerową z serwerem nadzorowanym przez CLOR.**

Rys. CLOR-7. Sterownik AS-01 obsługujący sondę scyntylacyjną – sterownik umieszczony jest w stacji ASS-500 (element systemu on-line)



Warto tutaj podkreślić fakt, że działający w stacji system on-line, pełni jedynie funkcję „wskaźnika” pojawienia się sytuacji zagrożenia radiologicznego. Nie podaje on rzeczywistych stężeń radionuklidów pochodzenia sztucznego w powietrzu. Informacja otrzymana z systemu on-line (mówiąca o możliwym pojawieniu się skażeń w powietrzu) jest jedynie podstawą do zdjęcia filtra ze stacji i zmierzeniu go w warunkach laboratoryjnych.

Wzorcowanie spektrometru dla radionuklidów pochodzenia sztucznego zebranych na filtrze stacji ASS-500 przeprowadzono za pomocą powierzchniowych źródeł baru ^{133}Ba (o energii zbliżonej do energii fotonów promieniowania gamma ^{131}I) oraz cezu ^{137}Cs o aktywnościach odpowiednio 3000 Bq i 1000 Bq. Powierzchnia źródeł była równa powierzchni filtra stosowanego w stacji ASS-500 (44 cm x 44 cm). Bezpośrednio na kryształ pod jego osłoną aluminiową znajduje się źródło ^{241}Am układu stabilizacji pracy spektrometru. Zdolność rozdzielcza spektrometru dla promieniowania ^{137}Cs o energii 661,6 keV wynosi 9,5%. Liczba kanałów analizatora amplitudy impulsów wynosi 2048. Spektrometr w ASS-500 jest połączony z komputerem co pozwala na zbieranie i obróbkę danych pomiarowych. Komputer terenowej stacji ASS-500 może być połączony z centralnym serwerem przy użyciu modemu i publicznej sieci telefonicznej lub sieci LAN. Korzystając ze spektrometrów HPGe można wykrywać i oznaczać ilościowo radionuklidy naturalne i pochodzenia sztucznego na poziomie ich stężeń w powietrzu rzędu $1\ \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, co pozwala na prowadzenie szczegółowych badań np. dla potrzeb systemu kontroli przestrzegania Układu o Całkowitym Zakazie Prób Jądrowych.

3.1.3. Procedura pomiarów laboratoryjnych filtrów ze stacji ASS-500

Do pomiarów oznaczeń ilościowych wykorzystuje się laboratoryjną spektrometrię promieniowania gamma z użyciem detektora HPGe. Zakres energii fotonów badanych radionuklidów zawiera się w granicach: od kilkunastu do ponad 2000 keV. Detektor umieszczony jest w niskotłowym domku osłonnym (Rys. CLOR-8), który zapewnia zmniejszenie, przynajmniej o dwa rzędy wielkości, zewnętrznego tła promieniowania gamma. Każda próbka jest mierzona dwukrotnie.



Rys. CLOR-8. Germanowy detektor półprzewodnikowy HPGe umieszczony w ołowianym domku osłonnym

Wstępny pomiar próbki trwający 3000 s jest przeprowadzany bezpośrednio po zakończeniu ekspozycji (poboru zanieczyszczeń na filtr) próbki. Celem tego pomiaru jest stwierdzenie ewentualnej obecności radionuklidów pochodzenia sztucznego, przy dolnym limicie detekcji wynoszącym 20 – 50 mBq/m³.

Jeżeli pomiar wstępny nie wykazał podwyższonej aktywności radionuklidów pochodzenia sztucznego, wówczas pomiar drugi (podstawowy – trwający 80 000 s) wykonywany jest po 2 dobach licząc od momentu zakończenia poboru. W ciągu tego czasu ulegają rozpadowi osadzone na filtrze krótko-życiowe pochodne produkty rozpadu radonu, których obecność wpływa niekorzystnie na wartość dolnego progu detekcji pozostałych radionuklidów. Przygotowanie próbki do pomiaru podstawowego polega na doprowadzeniu jej do odpowiedniej geometrii pomiarowej, czyli sprasowaniu jej do postaci krążka o średnicy 51 mm i grubości od 4 do 8 mm (zależnie od ilości zebranego pyłu).

Wielokanałowy analizator amplitudy impulsów współpracuje z komputerem wyposażonym w oprogramowanie umożliwiające obliczenie stężeń radionuklidów występujących w badanej próbce (oprogramowanie GENIE-2000). Program ten określa również dolne limity detekcji dla zanieczyszczeń radionuklidami naturalnymi i pochodzenia sztucznego. W oparciu o podstawowy pomiar są określane stężenia każdego radionuklidu występującego w badanym powietrzu.

Oczywiście, jeśli pierwszy pomiar pokaże podwyższoną zawartość radionuklidów pochodzenia sztucznego na filtrze, wtedy zarówno prasowanie filtrów jak i drugi pomiar następują natychmiast po zakończeniu pomiaru pierwszego. W przypadku, gdy stacja pracuje w systemie alarmowym, bezpośrednio po zdjęciu filtru ze stacji, następuje jego sprasowanie i pomiar (w odpowiedniej geometrii pomiarowej).

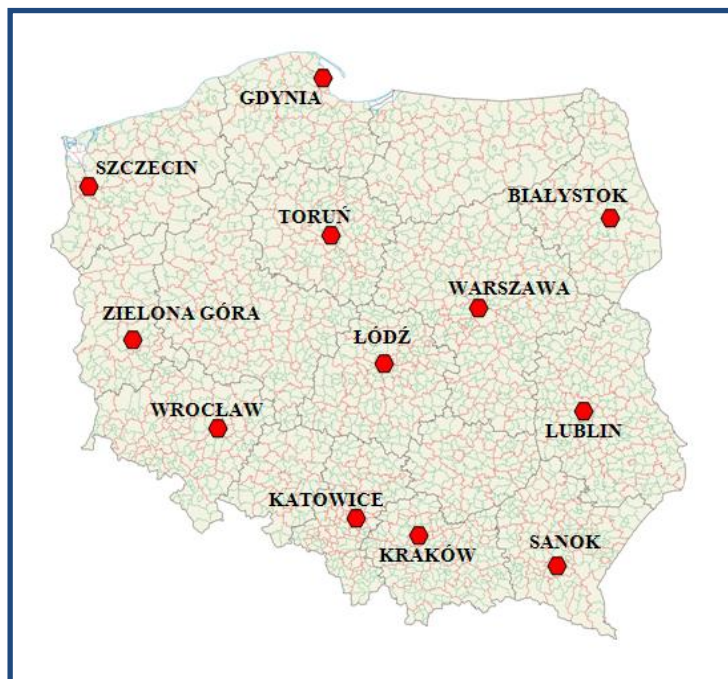
3.1.4. Sieć stacji ASS-500 w Polsce

Sieć stacji ASS-500 w Polsce stanowi wyspecjalizowaną podsieć działającą w ramach Systemu Wczesnego Ostrzegania o Skażeniach Promieniotwórczych (SWO). Stacje działające w ramach SWO zlokalizowane są w następujących instytucjach:

- **Warszawa** – Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, Zakład Dozymetrii
- **Białystok** – Akademia Medyczna, Zakład Biofizyki
- **Gdynia** – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski

- **Katowice** – Główny Instytut Górnictwa, Zakład Akustyki Technicznej, Techniki Laserowej i Radiometrii, Laboratorium Radiometrii
- **Kraków** – Instytut Fizyki Jądrowej, Zakład Fizykochemii Jądrowej, Pracownia Badań Skażeń Promieniotwórczych Środowiska
- **Lublin** – Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Zakład Radiochemii i Chemii Koloidów
- **Łódź** – Politechnika Łódzka, Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej
- **Sanok** – Wojewódzka Stacja Sanitarно-Epidemiologiczna w Rzeszowie, Laboratorium Pomiarów Promieniowania
- **Szczecin** – Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Chemii Fizycznej
- **Toruń** – Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Instytut Fizyki
- **Wrocław** – Politechnika Wrocławska, Instytut Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich
- **Zielona Góra** – Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska i Budownictwa, Zakład Odnowy Środowiska.

Ich rozmieszczenie zostało przedstawione na Rys. CLOR-9.



Rys. CLOR-9. Rozmieszczenie stacji ASS-500 na terenie naszego kraju.

Większość instytucji, w których zlokalizowane są stacje działające w ramach SWO posiada wysokorozdzielczą spektrometrię promieniowania gamma (półprzewodnikową, opartą na germanowych detektorach HPGe), pozwalającą na pomiary stężeń radionuklidów naturalnych i pochodzenia sztucznego pobranych z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego. Pomiary filtrów z ośrodków nie posiadających detektorów półprzewodnikowych wykonywane są w Zakładzie Dozymetrii CLOR. Działalność sieci nadzorowana jest przez CLOR. Wyniki w postaci raportów miesięcznych, kwartalnych i rocznych przekazywane są do Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych (CEZAR) w Państwowej Agencji Atomistyki.

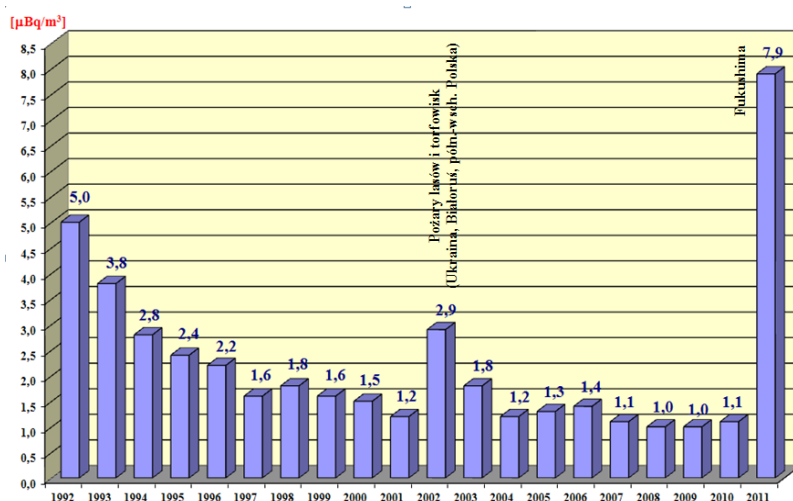
3.1.5. Przykładowe wyniki otrzymane w sieci stacji ASS-500

Sieć stacji ASS-500 pozwoliła na wykrycie kilku incydentalnych zdarzeń w Europie. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- Incydent w hucie Algeciras na południu Hiszpanii (czerwiec 1998), gdzie nastąpiło nieświadome stopienie źródła ^{137}Cs , które spowodowało wzrost aktywności tego radionuklidu w powietrzu w Polsce do ponad $22,5 \mu\text{Bq/m}^3$ (w Katowicach). Maksymalną wartość zarejestrowano na terenie południowej Francji (ponad $2400 \mu\text{Bq/m}^3$).
- W 15 tygodniu 2003 roku stacja w Sanoku zmierzyła ^{131}I o stężeniu $43,6 \mu\text{Bq/m}^3$. Jak się okazało przyczyną obecności ^{131}I w powietrzu w Sanoku był incydent 3 stopnia, jaki miał miejsce w elektrowni jądrowej w Paks na Węgrzech w dniu 10 kwietnia 2003r.
- W maju i czerwcu 1992 roku zanotowano znaczny wzrost (do maksymalnej wartości $33,5 \mu\text{Bq/m}^3$ zarejestrowanej przez stację w CLOR) stężenia ^{137}Cs w powietrzu spowodowany pożarami lasów w okolicach Czarnobyla.
- W lipcu i sierpniu 2002 roku zaobserwowano podwyższone stężenia ^{137}Cs szczególnie w Białymstoku i Lublinie. Przyczyną takiej sytuacji była resuspensja poczarnobyłowskiego ^{137}Cs pochodząca z palących się torfowisk i lasów na terenie Ukrainy, Białorusi oraz na środkowym wschodzie Polski (np. Biebrzański Park Narodowy) i towarzyszącą temu przewagą wiatrów z kierunków wschodnich.

Sieć stacji ASS-500, jako jedyna w Polsce zarejestrowała przemieszczające się nad naszym krajem skażone masy powietrza pochodzące z Japonii po awarii japońskiej elektrowni jądrowej Fukushima Dai-ichi (marzec 2011). Wyniki, jakie były w tym czasie przekazywane społeczeństwu pochodziły z sieci stacji ASS-500.

Obok (na Rys. CLOR-10) przedstawione zostały średnie roczne wartości stężeń promieni otwórczych cezu ^{137}Cs dla wszystkich stacji od roku 1992 (rok uruchomienia sieci stacji ASS-500).



Rys. CLOR-10. Średnie roczne stężenie promieniotwórcze cezu ^{137}Cs zmierzone w sieci stacji ASS-500 w Polsce w latach 1992 – 2011.

3.1.6. Podsumowanie – plany na przyszłość

Stacje ASS-500 w miarę posiadanych możliwości finansowych są modernizowane i rozbudowywane. W roku 2011 w Zakładzie Dozymetrii CLOR został opracowany nowy model stacji (NASS-500 – New Aerosol Sampling Station – Rys. CLOR-11). W 2011 roku zostały także wyprodukowane i uruchomione dwa pierwsze egzemplarze nowej stacji (w Warszawie i Lublinie).



Rys. CLOR-11. Nowy model stacji NASS-500 pracujący w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie.

Podstawowym celem opracowania nowej stacji było ograniczenie kosztów eksploatacji. Rozwiązania stosowane w stacjach, pracujących dotychczas w Polsce, były bardzo energochłonne, co przy wciąż rosnących cenach energii elektrycznej miały ogromne znaczenie w kosztach obsługi stacji.

Zmiany jakie zastosowano w stosunku do stacji pracujących w sieci wczesnego wykrywania skażeń dotychczas:

- zastosowano wentylator napięcia jednofazowego (zamiast stosowanych dotychczas trójfazowych) o dużo mniejszych gabarytach i mniejszej mocy;
- zastosowano falownik sterujący wentylatorem – co zdecydowanie zmniejszyło energochłonność;
- zastosowano układ pomiarów warunków atmosferycznych (temperatura oraz wilgotność). Parametry te są wykorzystywane do ewentualnej aktywacji układu podgrzewania filtru;
- stabilizacja wielkości przepływu – przez cały okres pracy stacji (tydzień) przez filtr pompowane jest powietrze o stałej objętości jednostkowej – dodatkowo wielkość przepływu może być programowana w zakresie od 100 do 500 m³/h (a nawet więcej, ale nie jest to zalecane ze względu na stosowane filtry Petrianowa);
- stosowany do pomiarów on-line detektor scyntylacyjny, został umieszczony w specjalnej obudowie, w której została wprowadzona stabilizacja temperaturowa, dzięki której detektor pracuje dużo bardziej stabilnie;
- zastosowano cylindryczny przelotowy tłumik hałasu, który zdecydowanie zmniejszył opory przepływu powietrza przez stację oraz zdecydowanie zmniejszył głośność pracy stacji;

- do podgrzewania filtru zastosowano ceramiczne promienniki podczerwieni o ukierunkowanej wiązce, pozwalające na dużo bardziej efektywne suszenie filtru;
- wprowadzono stabilizację temperatury układów odpowiedzialnych za pomiar przepływu powietrza;
- konstrukcja nośna wraz z płaszczem zewnętrznym została wykonana z blach kwasoodpornych.

Planowane jest stopniowe zastąpienie wszystkich stacji pracujących w sieci SWO nowymi stacjami NASS-500 (w miarę możliwości finansowych).

Dodatkowo w latach 2009-2010 w Zakładzie Dozymetrii CLOR opracowano i zbudowano przewoźną stację do poboru aerozoli (o nieoficjalnej nazwie MASS-1000 – Mobile Aerosol Sampling Station – Rys. CLOR-12). Prototyp stacji został zgłoszony do opatentowania do Urzędu Patentowego RP, w związku z czym nie podajemy żadnych szczegółów technicznych stacji.



Rys. CLOR-12. Stacja przewoźna MASS-1000.

Wytworzone przewoźne urządzenie do poboru dużych próbek aerozoli powietrza z jednoczesną analizą γ -spektryczną może być wykorzystane do badania aerozolowych zanieczyszczeń powietrza zarówno wokół obiektów jądrowych jak i przemysłowych. Mobilność urządzenia pozwala na szybki pobór próbek z dużej objętości powietrza w dowolnie wskazanym miejscu i kontrolę uwalnianych do atmosfery radionuklidów, co z kolei jest ważne z punktu widzenia ochrony radiologicznej.

Stacja MASS-1000 została już kilkakrotnie sprawdzona w następujących działaniach:

- ☐ Kontrola otoczenia Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie – Umowy z Państwową Agencją Atomistyki w latach 2010 oraz 2011 (stacja była wykorzystana do określenia zawartości sztucznych aerozoli atmosferycznych na poziomie kilku $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).
- ☐ Ekspertyza radiologiczna pomieszczeń Zakładu Medycyny Nuklearnej Wojewódzkiego Szpitala Specjalistycznego w Siedlcach – zlecenie z października 2010 r. (w pomieszczeniach sprawdzano obecność izotopów promieniotwórczych pochodzenia sztucznego w powietrzu).

- ❑ Testowanie stacji w czasie przechodzenia nad Polską masy powietrza z nad elektrowni jądrowej Fukushima w Japonii – na podstawie pomiarów filtrów powietrza eksponowanych w stacji określaliśmy stężenia izotopów promieniotwórczych pochodzenia sztucznego w powietrzu (jod ^{131}I , cez ^{134}Cs , cez ^{137}Cs)

Obecnie w Zakładzie Dozymetrii CLOR rozpoczęto prace nad opracowaniem założeń technicznych i stworzeniem pierwszych przewoźnych stacji do poboru i pomiaru stężeń gazowej postaci jodu w przyziemnej warstwie powietrza atmosferycznego. Prace zakończą się w roku 2014.

3.2. Monitoring gleby – radiologiczna mapa Polski

Praca, w ramach której powstają radiologiczne mapy Polski, jest prowadzona w ramach Programu Państwowego Monitoringu Środowiska. Jest ona finansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Praca ma na celu określanie rozkładu terytorialnego, dla obszaru całej Polski, depozycji ^{137}Cs [kBq/m^2] dla powierzchniowej warstwy gleby oraz stężeń radionuklidów naturalnych w [Bq/kg]. Potrzebę monitoringu promieniowania jonizującego w środowisku, w tym monitoringu skażeń promieniotwórczych gleby, określają regulacje prawne obowiązujące w Europie i Polsce, takie jak:

- Traktat Euratomu, Art. 35
- Ustawa Prawo Atomowe z dnia 29 listopada 2000 r. (Dz. U. z 2001r Nr 3 poz. 18 z późniejszymi zmianami);
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. Nr 62 poz. 627 z późniejszymi zmianami) art. 26;
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 grudnia 2002 r. w sprawie stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych i placówek prowadzących pomiary skażeń promieniotwórczych. (Dz. U. Nr 239, poz. 2030).

To ostatnie Rozporządzenie podaje, iż do zadań placówek specjalistycznych (a jedną z takich placówek jest Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej) należy prowadzenie pomiarów zawartości izotopów promieniotwórczych w próbkach środowiskowych m.in. gleby, w tym cezu o aktywności powyżej $1 \text{ kBq}/\text{m}^2$.

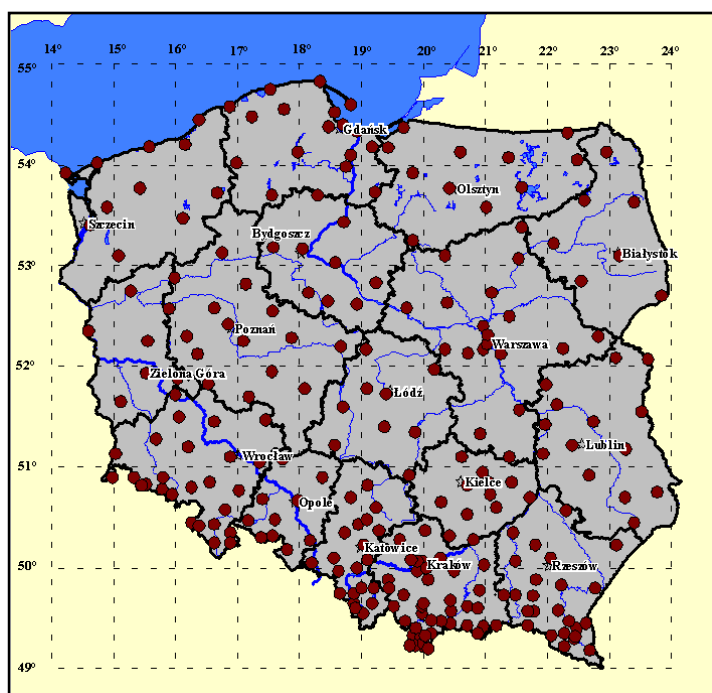
Jak wynika z dotychczasowych badań średnie stężenie ^{137}Cs w powierzchniowej warstwie gleby w Polsce jest ciągle powyżej $1 \text{ kBq}/\text{m}^2$ i wynosi $1,93 \text{ kBq}/\text{m}^2$ (dane z jesieni 2010 r. – była to ostatnia przeprowadzona dotychczas seria pomiarowa).

3.2.1. Metoda poboru próbek gleby

Punkty poboru próbek gleby (254 punkty) są rozmieszczone na terenie całej Polski i zlokalizowane w ogródkach meteorologicznych stacji i posterunków Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (Rys. CLOR-13). Próbki gleby pobierane są w miejscach, gdzie mikrośrodowisko nie jest zniekształcane lub zmieniane np. przez oranie lub nawożenie, co umożliwia ocenę nawet niewielkich zmian poziomu skażeń. Taka lokalizacja punktów poboru posiada szereg zalet, a mianowicie:

- stałość punktów poboru (możliwość powtarzania badań dla tych samych miejsc, co pozwoli na uchwycenie nawet niewielkich zmian poziomu skażeń);
- w miarę równomierne rozmieszczenie punktów poboru na terenie całego kraju;
- stała obsługa co w przypadku awarii czy wypadku radiacyjnego umożliwia szybkie i sprawne pobranie próbek do badań;
- pobieranie próbek z terenu, gdzie gleba nie była i nie będzie w przyszłości przemieszana (np. orana lub przekopywana) i nawożona, co umożliwia dostarczenie reprezentatywnego materiału do określania stężeń izotopów promieniotwórczych w powierzchniowej warstwie gleby;
- w razie potrzeby możliwość uzyskiwania danych meteorologicznych pozwalających na prowadzenie analiz rozkładów przestrzennych skażeń na danym terenie.

Każda pobierana próbka składa się z 7 porcji wziętych z 6 miejsc leżących na obwodzie i 1 w środku koła o promieniu 2 m, co zapewnia reprezentatywny materiał do analizy. Porcje gleby są pobierane przy użyciu specjalnego próbnika o średnicy 6,9 cm, zapewniającego pobór warstwy powierzchniowej o grubości 10 cm.



Rys. CLOR-13. Lokalizacja punktów poboru próbek gleby na terenie Polski jesienią 2010 roku.

3.2.2. Metodyka przygotowania próbek oraz ich pomiaru

Po wstępnym wysuszeniu próbki gleby w temperaturze pokojowej, a następnie w piecu w temperaturze 105°C, gleba jest rozdrabniana i „uśredniana” dla każdego punktu poboru przez dokładne wymieszanie. W ten sposób zapewnia się uzyskanie reprezentatywnego materiału do analizy. Próbkę umieszczane są w 0,5 litrowych naczyniach Marinelli, a następnie mierzone metodą analizy spektrometrycznej promieniowania gamma w zakresie energii fotonów od 50 do 1800 keV. Pomiary wykonywane są przy użyciu detektorów półprzewodnikowych HPGe współpracujących z systemem GENIE 2000 firmy Canberra. Czas pomiaru każdej próbki to 80 000 sek. Całkowita niepewność określenia stężenia poszczególnych radionuklidów nie przekracza $\pm 20\%$.

Do kalibracji spektrometru używane było źródło referencyjne w geometrii naczynia Marinelli o objętości $0,5 \text{ dm}^3$, gęstości $1,3 \text{ g/cm}^3$, zawierające mieszaninę następujących radionuklidów promieniotwórczych: Cd-109, Co-57, Ce-139, Hg-203, Sn-113, Sr-85, Cs-137, Y-88, Co-60. Niepewność określenia poszczególnych radionuklidów we wzorcu wynosiła 3%.

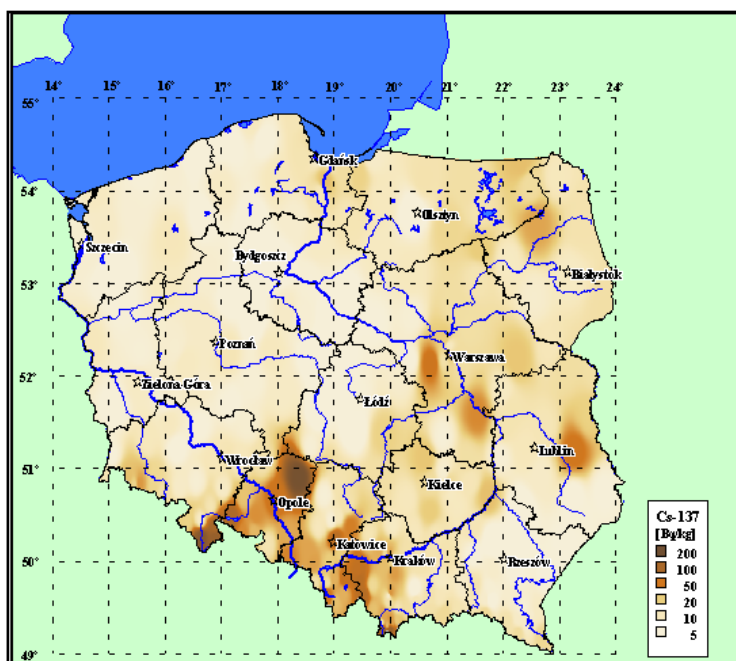
Detektor w celu zmniejszenia wielkości zewnętrznego tła promieniowania był umieszczony w domku osłonowym o ściankach złożonych z trzech warstw kolejno: zewnętrznej 100 mm Pb, następnej 1 mm Cd i wewnętrznej 2 mm Cu.

Niepewność określenia stężenia poszczególnych radionuklidów w mierzonej próbce nie przekraczała 20%. Dolna granica detekcji dla czasu pomiaru 80000s wynosiła:

- $0,15 \text{ Bq/kg}$ ($0,02 \text{ kBq/m}^2$) dla ^{137}Cs ,
- $2,5 \text{ Bq/kg}$ dla ^{40}K ,
- $2,0 \text{ Bq/kg}$ dla ^{226}Ra ,
- $0,5 \text{ Bq/kg}$ dla ^{228}Ac .

Metoda powyższa pozwala na określenie zarówno stężenia cezu ^{137}Cs , jak i radionuklidów naturalnych w badanych próbkach. Zastosowana do pomiarów spektrometryczna metoda oznaczeń stężeń radionuklidów w próbkach gleby (jak również opisana powyżej metoda poboru próbek gleby) jest zalecana przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu i opisana w Guidebook IAEA. Technical Reports Series No 295 pt. „Measurement of Radionuclides in Food and the Environment”. Metoda ta została również zatwierdzona przez Prezesa PAA na początku roku 2010.

3.2.3. Metoda prezentacji wyników pomiarów



Rys. CLOR-14. Mapa rastrowa przedstawiająca depozycję cezu ^{137}Cs w glebach w Polsce (próbki pobrane jesienią 2010 roku).

Wyniki pomiarów prezentowane są w formie tabel – z danymi dla poszczególnych punktów pomiarowych oraz województw – jak również w postaci histogramów, wykresów i

map radiologicznych Polski utworzonych z wykorzystaniem oprogramowania typu GIS MapInfo PL umożliwiającego pracę z mapami numerycznymi. Mapy są wykonywane metodą kartodiagramu kołowego z zastosowaniem różnych powierzchni kół obrazujących pomierzoną wartość stężenia danego radionuklidu. Innym zastosowanym sposobem prezentacji wyników badań jest metoda rastrowa polegająca na ekstrapolacji wartości punktowych na obszar całego kraju. Przykładowa mapa rastrowa została przedstawiona na rysunku CLOR-14.

Oprogramowanie MapInfo pozwala na wizualizację danych pomiarowych na tle większych rzek i miejscowości w Polsce oraz granic województw. Mapy radiologiczne utworzone są na siatce geograficznej.

Dodatkowo w ramach tej pracy, tworzone są różnego rodzaju tabele i wykresy. Poniżej przedstawiona jest przykładowa tabela obrazująca zmiany stężeń promieniotwórczych cezów (^{134}Cs oraz ^{137}Cs) w powierzchniowej warstwie gleby w Polsce od roku 1988, czyli od chwili, gdy CLOR zaczął prowadzić tę tematykę.

Tabela CLOR-1. Zmiany w czasie średnich stężeń radionuklidów pochodzenia sztucznego (^{137}Cs i ^{134}Cs) w powierzchniowej warstwie gleby w Polsce w latach 1988-2010.

Rok		1988	1989	1990	1992	1996	1998
Średnie stężenie izotopów cezu [kBq/m ²]	^{137}Cs	4,64	4,68	4,72	4,24	3,65	3,49
	^{134}Cs	0,99	0,72	0,51	0,25	0,30	0,18
Rok		2000	2004	2006	2008	2010	
Średnie stężenie izotopów cezu [kBq/m ²]	^{137}Cs	3,20	2,54	2,41	2,10	1,93	
	^{134}Cs	<LLD	<LLD	<LLD	<LLD	<LLD	

Wyniki otrzymywane w ramach tej pracy były przedstawiane w Radiologicznym Atlasie Polski. Dotychczas ukazały się cztery wydania takiego Atlasu (1991, 1997, 2005, 2011).

3.3. Monitoring żywności

Celem pracy jest ocena wchłonięć izotopów ^{137}Cs i ^{90}Sr z żywnością na podstawie analizy stężeń tych izotopów w produktach żywnościowych, dostępnych w sieci sklepów na terenie Warszawy, a także izotopów zawartych w całodziennych zestawach posiłków pobranych w zakładach żywienia zbiorowego. Do oznaczeń ^{137}Cs stosowane są metody: spektrometryczna i radiochemiczna a do ^{90}Sr metoda radiochemiczna (Rys. CLOR-15).

3.3.1. Produkty żywnościowe



Rys. CLOR-15. Piec do palenia próbek żywnościowych przed obróbką radiochemiczną.

Próbki do badań pobierane są na terenie Warszawy w sieci dużych sklepów (Auchan, Carrefour) oraz targowisk. Próbki do badań pobierane są według harmonogramu (np. mleko raz w miesiącu). Ilościowy udział produktów w każdej próbie średniej jest obliczony wg danych dotyczących spożycia poszczególnych produktów na podstawie Rocznika Statystycznego (np. w skład średniej próby produktów zbożowych wchodzi kasza, pieczywo, maki, makarony, pieczywo cukiernicze). Analizowane są próby mleka, mięsa, drobiu, warzyw, owoców, produktów zbożowych, jaj, ryb.

Próby były pobierane według harmonogramu: mleko 2 próby półroczne składające się z próbek miesięcznych, mięso, jaja, drób, produkty zbożowe, warzywa, owoce, ziemniaki – jedna roczna próba uwzględniająca spożycie poszczególnych gatunków, ryby – 2 gatunki raz w roku.

Oznaczone stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w poszczególnych produktach nie różnią się w sposób znaczący od stężeń oznaczanych w ciągu ostatnich 2 lat. Wyniki zestawiono w tabeli CLOR-2

Tabela CLOR-2. Stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs i ^{90}Sr w próbach produktów żywnościowych pobranych na terenie Warszawy, 2011.

Produkt	Stężenie promieniotwórcze Cs-137 [Bq/kg, Bq/l]	Stężenie promieniotwórcze Sr-90 [Bq/kg, Bq/l]
Mleko I półrocze	$0,28 \pm 4,1\%$	$0,03 \pm 11\%$
Mleko II półrocze	$0,11 \pm 8,1\%$	$0,03 \pm 11\%$
Mięso	$0,22 \pm 9,2\%$	$<0,02$
Drób	$0,14 \pm 9,9\%$	$<0,02$
Jaja	$0,11 \pm 8,1\%$	$<0,02$
Ryby:		
Dorsz	$0,14 \pm 14\%$	$0,03 \pm 0,01$
Śledź	$0,20 \pm 15\%$	$<0,02$
Owoce	$0,08 \pm 9,4\%$	$0,02 \pm 10,2\%$
Warzywa	$0,12 \pm 8,1\%$	$0,07 \pm 8,3\%$
Ziemniaki	$0,14 \pm 10,3\%$	$0,01 \pm 15\%$
Produkty zbożowe	$0,09 \pm 10,8\%$	$0,08 \pm 9,9\%$
Pieczywo	$0,28 \pm 7,3\%$	$0,08 \pm 10,5\%$

3.3.2. Dania gotowe

Całodzienne posiłki (śniadania, obiady i kolacje) pobierane są ze stołówek prowadzących takie żywienie na terenie Warszawy (corocznie) i dwóch wybranych miastach Polski. Posiłki pobierane są od osób dorosłych. Na podstawie danych szacuje się roczne wchłonięcia izotopów ^{137}Cs i ^{90}Sr z żywnością.

Ponadto przeprowadza się oznaczenia stężenia promieniotwórczego izotopów promieniotwórczych w produktach żywnościowych przeznaczonych na eksport. Badania te obejmują oznaczenia ^{137}Cs , ^{90}Sr , w mniejszym zakresie ^{131}I , ^{241}Am , ^{239}Pu .

W Tabeli CLOR-3 przedstawione są przykładowe wyniki otrzymywane w ramach tej pracy (pochodzące z września 2011 roku).

Tabela CLOR-3. Zawartość ^{137}Cs i ^{90}Sr w całodziennych posiłkach pobranych w lutym i we wrześniu 2011 w Warszawie.

	Zawartość ^{137}Cs [Bq/dzień]		Zawartość ^{90}Sr [Bq/dzień]	
	luty	wrzesień	luty	wrzesień
1	$0,47 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$
2	$0,39 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$
3	$0,36 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$
4	$0,25 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,04$	$0,04 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$
5	$0,19 \pm 0,02$	$0,24 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$

Na podstawie otrzymanych zawartości ^{137}Cs i ^{90}Sr w całodziennych posiłkach i stężeniu promieniotwórczego tych izotopów w grupach produktów żywnościowych oraz wielkości ich spożycia oceniono roczne wchłonięcia izotopów ^{137}Cs i ^{90}Sr . Dane zestawiono w tabeli CLOR-4.

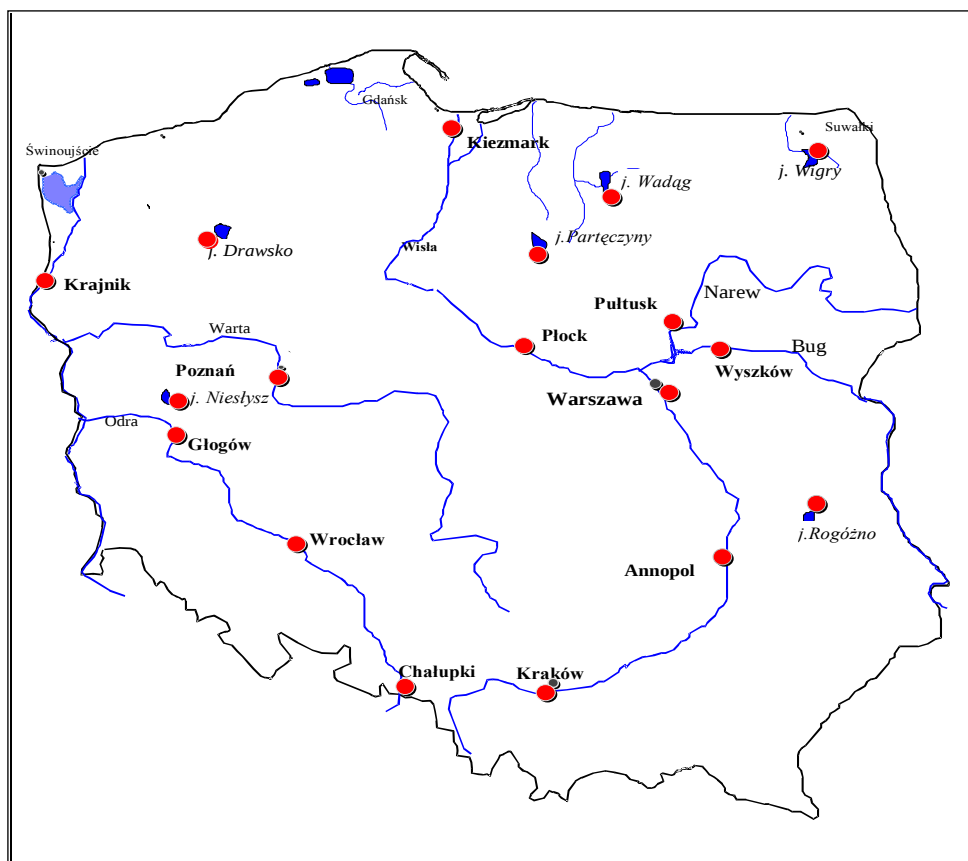
Tabela CLOR-4. Roczne wchłonięcia ^{137}Cs i ^{90}Sr z żywnością przez mieszkańców Warszawy w roku 2011

Metoda oceny:	Cs-137 [Bq/osobę,rok]	Sr-90 [Bq/osobę,rok]
Na podstawie analizy produktów żywnościowych i średniego spożycia	110	26
Na podstawie analizy całodziennych posiłków	120	25

Oszacowane roczne wchłonięcia izotopów ^{137}Cs i ^{90}Sr na podstawie analizy całodziennych posiłków i na podstawie analizy produktów żywnościowych i średniego ich spożycia są na identycznym poziomie i nie odbiegają od oszacowanych rocznych wchłonieć dla mieszkańców Bydgoszczy i Poznania. Roczne wchłonięcia na podstawie analizy całodziennych posiłków wynosiły dla Bydgoszczy 106 Bq/rok (bez uwzględnienia potraw z grzybów) i 120 Bq/rok dla Poznania w 2011 roku.

3.4. Monitoring wód rzek i jezior Polski

Monitoring wód rzek i jezior Polski prowadzony jest w ramach Programu Państwowego Monitoringu Środowiska. Tematyka ta jest finansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. W ramach tego monitoringu dwukrotnie w ciągu roku (wiosna i jesień) pobierane są próbki wody i osadów dennych z 18 miejsc w Polsce. Są to punkty zlokalizowane w dorzeczu Wisły (7 punktów), w dorzeczu Odry (5 punktów poboru) oraz w wybranych jeziorach (punkty zlokalizowane na 6 jeziorach w Polsce).



Rys. CLOR-16. Usytuowanie miejsc poboru wód i osadów dennych w Polsce.

Woda z rzek pobierana jest z głównego nurtu, natomiast wody z jezior pobierane są z pomostów. Objętość każdej próbki to 20 litrów. Osady dennie pobierane są za pomocą czepaka typu Van Veena, a gdy dno było kamieniste osad pobiera się szufelką w odległości 3–5 m od brzegu. Osady dennie pobierane są w każdym punkcie z trzech miejsc odległych od siebie o 30–50 m. Tak pobrane próbki tworzą jedną próbkę zbiorczą osadów (o masie ok. 1 kg) odpowiadającą danemu miejscu poboru (Rys. CLOR-16). W wodzie oznaczany jest ^{137}Cs i ^{90}Sr , natomiast w osadach dennych oznaczano ^{137}Cs i $^{239,240}\text{Pu}$.

Stężenie promieniotwórcze cezu ^{137}Cs oraz strontu ^{90}Sr w wodach oraz izotopów plutonu w osadach dennych oznacza się metodami radiochemicznymi. Metoda oznaczania ^{137}Cs polega na selektywnej sorpcji cezu na złożu fosforomolibdenianu amonu (AMP) i pomiarze aktywności beta preparatu. Granica detekcji ^{137}Cs wynosi 0,32 mBq/l. Do oznaczeń

^{90}Sr stosowano zmodyfikowaną metodę Volchoka, polegającą na oznaczeniu krótkożyciowego izotopu ^{90}Y ($T_{1/2} = 64,2 \text{ h}$) będącego w równowadze z ^{90}Sr . Granica detekcji ^{90}Sr wynosi 0,45 mBq/l. Do pomiaru aktywności beta stosuje się niskotłowy zestaw aparaturowy, oparty na licznikach przepływowych GM (Riso GM-25-5) o biegu własnym około 0,2 imp/min i wydajności pomiaru ok. 40%. Stężenie promieniotwórcze cezu ^{137}Cs w osadach dennych oznaczamy metodą wysokorozdzielczej spektrometrii promieniowania gamma. Osady suszono w temperaturze pokojowej, a następnie w temperaturze 105°C przez 16 godz., usuwano kamienie i resztki roślin, przesiewano przez sito o wielkości oczek 2 mm i umieszczano w naczyniu typu Marinelli o objętości 500 cm³. Objętość próbki przeznaczanej do pomiaru wynosiła 450 cm³. Oznaczania $^{239,240}\text{Pu}$ wykonywano według zmodyfikowanej metody Taipale i Tuomainen. Pluton wydzielano z próbki osadów o masie 50 g, elektrodeponowano i mierzono aktywność metodą spektrometrii alfa. Analizę prowadzono w obecności znacznika (^{242}Pu), co pozwalało na określenie wydajności chemicznej. Granica detekcji $^{239,240}\text{Pu}$ przy czasie pomiaru 164 000 s wynosiła 4 mBq/kg. Do ogólnej oceny sytuacji radiologicznej porównywane są wartości średnie.

Jednoznaczna ocena i porównanie wyników uzyskanych dla poszczególnych pierwiastków wiosną i jesienią przysparza duże trudności, wynikają one przede wszystkim z różnych warunków atmosferycznych w jakich dokonywany jest pobór prób.

Średnie roczne stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs w wodach dorzecza Wisły, Odry i wodach jezior w roku 2011 był na bardzo wyrównanym poziomie i zawierały się w granicach od 2,13 mBq/l (dla dorzecza Wisły) do 3,11 mBq/l (dla jezior). Podobną sytuację obserwowano w przypadku średnich rocznych stężeń promieniotwórczych ^{90}Sr , które zawierały się w granicach, 4,24 mBq/l dla jezior – 4,77 mBq/l dla dorzecza Wisły.

Średnie roczne stężenie promieniotwórcze ^{137}Cs w osadach dennych były zróżnicowane: najniższe w dorzeczu Wisły 3,23 Bq/kg, a najwyższe w dorzeczu Odry 14,28 Bq/kg.

W przypadku $^{239,240}\text{Pu}$ najniższe wartości średnich rocznych stężeń promieniotwórczych obserwowano w osadach dennych jezior - 27,91 mBq/kg, a najwyższe w dorzeczu Odry – 46,87 mBq/kg.

Zarówno średnie roczne stężenia promieniotwórcze wszystkich badanych nuklidów jak i dane uzyskane dla pojedynczych próbek badanej wody i osadów dennych nie odbiegają od wyników uzyskiwanych w poprzednich latach.

Monitoring skażeń promieniotwórczych wód powierzchniowych i osadów dennych pozwala na stwierdzenie, że skażenie wód powierzchniowych takimi nuklidami jak ^{137}Cs i ^{90}Sr jest niewielkie. **Podobnie stężenia promieniotwórcze ^{137}Cs i $^{239,240}\text{Pu}$ w osadach dennych rzek i jezior pozostaje na niskim poziomie.**

Uzyskane wyniki potwierdzają, że nie wystąpiły nowe uwolnienia izotopów promieniotwórczych do środowiska.

4. **Badanie promieniotwórczości surowców i materiałów budowlanych**

4.1. **Możliwość różnych zastosowań surowców i materiałów budowlanych na podstawie istniejących w Polsce przepisów prawnych**

Podstawowym aktem prawnym określającym wymagania stawiane surowcom i materiałom budowlanym stosowanym w różnych rodzajach budownictwa jest **Rozporządzenie Rady Ministrów** z dnia 2 stycznia 2007 roku „w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi i inwentarza żywego, a także w odpadach przemysłowych stosowanych w budownictwie oraz kontroli zawartości tych izotopów” (Dz.U. nr 4/2007 poz. 29).

Rozporządzenie to klasyfikuje możliwość zastosowania różnych surowców i materiałów budowlanych w różnych typach budownictwa poprzez określenie dwóch parametrów:

- 1.) Wskaźnika aktywności f_1 , określającego zawartość naturalnych izotopów promieniotwórczych (jest to **wskaźnik narażenia całego ciała na promieniowanie gamma**), zdefiniowanego za pomocą wzoru:

$$f_1 = \frac{S_K}{3000} + \frac{S_{Ra}}{300} + \frac{S_{Th}}{200}$$

gdzie: S_K , S_{Ra} , S_{Th} - oznaczają odpowiednio stężenie promieniotwórcze izotopów potasu K-40, radu Ra-226 oraz toru Th-228 wyrażone w [Bq/kg].

- 2.) Wskaźnika aktywności f_2 , który określa zawartość radu Ra-226 (jest to **wskaźnik narażenia nabłonka płuc na promieniowanie alfa** emitowane przez produkty rozpadu radonu pobrane wraz z powietrzem przez układ oddechowy człowieka):

$$f_2 = S_{Ra}$$

W zależności od wartości tych dwóch wskaźników, badany materiał może być stosowany w różnych typach budownictwa. I tak wartości wskaźników f_1 oraz f_2 nie mogą przekraczać o więcej niż 20% wartości:

- 1.) $f_1=1$ i $f_2=200$ [Bq/kg] w odniesieniu do surowców i materiałów budowlanych stosowanych **w budynkach przeznaczonych na pobyt ludzi lub inwentarza żywego**;
- 2.) $f_1=2$ i $f_2=400$ [Bq/kg] **w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w obiektach budowlanych naziemnych** wznoszonych na terenach zabudowanych lub przeznaczonych do zabudowy w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz do niwelacji takich terenów;
- 3.) $f_1=3,5$ i $f_2=1000$ [Bq/kg] w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w częściach naziemnych obiektów budowlanych niewymienionych w punkcie 2 oraz do niwelacji terenów niewymienionych w punkcie 2;
- 4.) $f_1=7$ i $f_2=2000$ [Bq/kg] w odniesieniu do odpadów przemysłowych stosowanych w częściach podziemnych obiektów budowlanych, o których mowa w punkcie 3, oraz w

budowlach podziemnych, w tym w tunelach kolejowych i drogowych, z wyłączeniem odpadów przemysłowych wykorzystywanych w podziemnych wyrobiskach górniczych.

Dodatkowo przy stosowaniu odpadów przemysłowych do niwelacji terenów, o których mowa w punktach 2 i 3, oraz do budowy dróg, obiektów sportowych i rekreacyjnych zapewnia się, przy zachowaniu wymaganych wartości wskaźników f_1 i f_2 , obniżenie mocy dawki pochłoniętej na wysokości 1 m nad powierzchnią terenu, drogi lub obiektu do wartości nieprzekraczającej $0,3 \mu\text{Gy/h}$, w szczególności przez położenie dodatkowej warstwy innego materiału.

4.2. Przykładowe wyniki badań promieniotwórczości naturalnej w surowcach odpadowych.

Węgiel kamienny charakteryzuje się stężeniami naturalnych radionuklidów zbliżonymi do wartości średnich określonych dla gleb w Polsce. W popiołach lotnych i żużlach powstałych w wyniku spalania węgla w elektrowniach następuje kilkakrotne zagęszczenie zawartości radionuklidów, przy czym jego stopień zależny jest od jakości spalane go węgla, sprawności spalania, rodzaju kotłów i wielu innych czynników.

Tabela CLOR-5. Stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych: potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w produktach ubocznych spalania węgla w latach 1980 - 2009

Rodzaj materiału lub surowca odpadowego	Liczba próbek	Stężenie [Bq/kg]					
		K-40		Ra-226		Th-228	
		średnie	zakres (min - max)	średnie	zakres (min - max)	średnie	zakres (min - max)
Węgiel	469	198,95	0 - 776	28,19	2 - 90,5	22,13	0 - 95
Popiół elektrowniany	11730	702,65	6,6 - 1664	120,11	0,1 - 876	91,06	1 - 206
Żużel elektrowniany	2641	583,77	4,9 - 1436	87,97	4,6 - 468,7	73,12	0,1 - 185
Mieszanina popiołowo-żużłowa	1319	597,21	29,8 - 1146	97,97	10 - 286	73,55	4 - 155
Mikrosfery- glinokrzemian	158	859,97	58,8 - 1589,5	107,91	17,5 - 255,9	84,18	11,2 - 140
Gips elektrowniany	86	41,4	2,2 - 147,4	9,4	0,1 - 72,0	3,7	0,1 - 30,0

Najmniejsze wartości stężeń obserwuje się w żużlach elektrownianych, dla których średni stopień wzbogacenia naturalnych izotopów promieniotwórczych w stosunku do zawartości tych izotopów w węglu wynosi ok. 3,1. Z kolei, największe wartości stężeń występują w popiołach elektrownianych i mikrosferach, dla których średni stopień wzbogacenia wynosi ok. 4,0. Jedynie dla gipsów elektrownianych, uzyskiwanych w procesie odsiarczania, stężenia naturalnych radionuklidów są mniejsze niż w spalonym węglu.

Podobnie wysokie wartości stężeń naturalnych radionuklidów występują w niektórych produktach odpadowych przemysłu hutniczego. Dla porównania (patrz Tabela CLOR-6) podano wartości stężeń naturalnych radionuklidów w żużlach wielkopieczowych, pomiedziowych, poniklowych.

Największe wartości stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych zawierają żużle pomiedziowe.

Tabela CLOR-6. Wartości stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych: potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach odpadowych przemysłu hutniczego.

Rodzaj surowca odpadowego	Liczba próbek	Stężenie [Bq/kg]					
		K-40		Ra-226		Th-228	
		średnie	zakres (min - max)	średnie	zakres (min - max)	średnie	zakres (min - max)
Żużel pomiedziowy	80	886,46	615,4 – 1250,6	316,78	236,6 – 517,8	54,16	25,7 - 183
Żużel ponikłowy	3	604,70	78,1 - 888	234,57	16,7 - 364	44,90	7,9 - 82
Żużel wielkopieczowy	368	192,33	18 - 1400	115,33	12,4 – 351,1	34,55	2,2 - 115

4.3. Zastosowanie surowców i materiałów budowlanych w budownictwie mieszkaniowym i drogowym

Z uwagi na to, że pobyt ludzi w mieszkaniach szacuje się na 80 % spędzanego czasu życia, regulacja prawna dotycząca parametrów przydatności surowców i materiałów budowlanych przeznaczonych dla budownictwa mieszkaniowego pod względem radiologicznym jest w pełni uzasadniona. Do oceny przydatności materiałów korzysta się z obliczanych wskaźników aktywności f_1 i f_2 .

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań radioaktywności naturalnej surowców i materiałów budowlanych, w Tabeli CLOR-7 zamieszczono informacje o ilości próbek, których wartości wskaźników aktywności f_1 i f_2 spełniają normy dopuszczające zastosowanie tych materiałów oraz surowców do budownictwa mieszkaniowego (zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 2007 r.). W tabeli podano również procentową ilość próbek dla każdego rodzaju surowców i materiałów budowlanych, które (zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami) można bezpośrednio zastosować do budownictwa mieszkaniowego.

Tabela CLOR-7. Ilości próbek surowców i materiałów budowlanych, które mogą być zastosowane w budownictwie mieszkaniowym – wskaźniki aktywności nieprzekraczające wartości $f_1 < 1,2$ oraz $f_2 < 240$ [Bq/kg].

Rodzaj surowca lub materiału budowlanego	Liczba próbek	Próbki, dla których $f_1 < 1,2$ i $f_2 < 240$ [Bq/kg]	
		Ilość	%
SUROWCE POCHODZENIA NATURALNEGO			
Żwir	17	17	100,0
SUROWCE POCHODZENIA PRZEMYSŁOWEGO			
Popiół elektrowniany	11730	8905	75,9
Popiół	666	570	85,6
Żużel elektrowniany	2641	2571	97,3
Żużel pomiedziowy	80	1	1,3
Żużel ponikłowy	3	1	33,3
Żużel wielkopiecowy	368	365	99,2
Żużel	1312	1211	92,3
Mieszanina popiołowo-żużłowa	1319	1275	96,7
Mikrosfery-glinokrzemian	158	142	89,9
Gips elektrowniany	86	86	100,0
Gips	207	207	100,0
Kruszywo	70	67	95,7
Kruszywo domieszkowane	6	6	100,0
Kruszywo z żużli pomiedziowych	35	1	2,9
Kruszywo z żużli	14	14	100,0
Kruszywo z popiołów	2219	2184	98,4
Odpad węglowy	40	40	100,0
MATERIAŁY BUDOWLANE			
Cement	135	135	100,0
Beton lekki	2934	2934	100,0
Beton tradycyjny	105	104	90,0
Cegła	1383	1382	99,9
Dachówka	67	67	100,0
Styropopoliobeton	3	3	100,0
Pustak betonowy	340	340	100,0
Wapno palone	104	104	100,0

Jak można zauważyć w powyższej tabeli, prawie 100 % surowców pochodzenia naturalnego i gotowych materiałów budowlanych może być wykorzystanych w budownictwie mieszkaniowym. W przypadku surowców pochodzenia przemysłowego najlepszymi

wskaźnikami aktywności charakteryzują się: gips (100 % badanych próbek może być zastosowana w budownictwie mieszkaniowym), kruszywo z żużli (100 %), kruszywo domieszkowane (100 %) i kruszywo z popiołów (98,4 %), żużel wielkopiecowy (99,2 %), żużel elektrowniany (97,3 %).

Z kolei, najmniejszą możliwość wykorzystania surowców budowlanych pochodzenia przemysłowego do celów mieszkaniowych mają żużel pomiedziowy (tylko 1,3 % ogólnej ilości próbek nadaje się do budownictwa mieszkaniowego) i kruszywo z żużli pomiedziowych (2,9 %).

Jednak w praktyce surowce odpadowe pochodzenia przemysłowego mają zastosowanie przede wszystkim w budownictwie drogowym. Zgodnie z obowiązującymi przepisami wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości wskaźników aktywności dla tego rodzaju budownictwa są mniej rygorystyczne i wynoszą odpowiednio $f_1 < 2,4$ i $f_2 < 480$ [Bq/kg] (z uwzględnieniem 20 % przekroczenia wartości granicznych podanych w Rozporządzeniu Rady Ministrów z 2007 r.). Na podstawie zebranych wyników badań znajdujących się w naszej bazie danych, w Tabeli CLOR-8 zestawiono liczby próbek, dla których wskaźniki aktywności ograniczone są wartościami $f_1 < 2,4$ oraz $f_2 < 480$ [Bq/kg] i które nie nadają się do budownictwa mieszkaniowego (tzn. $f_1 > 1,2$ lub $f_2 > 240$ [Bq/kg]).

Tabela CLOR-8. Ilości próbek surowców odpadowych, które mogą być zastosowane w budownictwie drogowym – wskaźniki aktywności nieprzekraczające wartości $f_1 < 2,4$ oraz $f_2 < 480$ Bq/kg – nienadające się do budownictwa mieszkaniowego.

Rodzaj surowca odpadowego	Liczba próbek	Ilość (%) próbek, które mogą być zastosowane w budownictwie mieszkaniowym	Próbki, dla których $f_1 < 2,4$ i $f_2 < 480$ [Bq/kg] i które nie mogą być zastosowane do budownictwa mieszkaniowego	
			Ilość	%
Popiół elektrowniany	11730	8905 (75,9 %)	2823	24,06
Popiół	666	570 (85,6 %)	96	14,4
Żużel elektrowniany	2641	2571 (97,3 %)	70	2,7
Żużel pomiedziowy	80	1 (1,3 %)	79	98,7
Żużel ponikłowy	3	1 (33,3 %)	2	66,7
Żużel wielkopiecowy	368	365 (99,2 %)	3	0,8
Żużel	1312	1211 (92,3 %)	100	7,62
Mieszanina popiołowo-żużłowa	1319	1275 (96,7 %)	44	3,3
Mikrosfery-glinokrzemian	158	142 (89,9 %)	16	10,1
Gips elektrowniany	86	86 (100 %)	0	0
Gips	207	207 (100 %)	0	0
Kruszywo	70	67 (95,7 %)	3	4,3
Kruszywo domieszkowane	6	6 (100 %)	0	0
Kruszywo z żużli pomiedziowych	35	1 (2,9 %)	34	97,1
Kruszywo z żużli	14	14 (100 %)	0	0
Kruszywo z popiołów	2219	2184 (98,4 %)	35	1,6
Odpad węglowy	40	40 (100 %)	0	0

Jeśli weźmiemy pod uwagę fakt, że surowce odpadowe, które spełniają warunki dla możliwości ich zastosowania w budownictwie mieszkaniowym ($f_1 < 1,2$ i $f_2 < 240$ [Bq/kg]), mogą być oczywiście zastosowane w budownictwie drogowym, to z powyższej tabeli widzimy, że większość surowców może być w 100 % stosowana w budownictwie drogowym.

Oczywiście takie surowce jak żużel pomiedziowy (98,7 % próbek może być wykorzystanych tylko w budownictwie drogowym – nie może być stosowana w budownictwie mieszkaniowym), kruszywo z żużli pomiedziowych (97,1 %) czy żużel ponikłowy (66,7 %) mogą mieć zastosowanie przede wszystkim w budownictwie drogowym.

4.4. Ocena narażenia osób wynikająca z zastosowania pewnych surowców do budowy dróg – na przykładzie surowców odpadowych.

Według danych opublikowanych w raportach UNSCEAR standardowy człowiek spędza średnio poza budynkiem 20% rocznego czasu, tzn. około 1750 godzin. Jeżeli w wyniku zastosowania substancji o podwyższonej radioaktywności część tego czasu spędzi on w miejscach o zwiększonej wartości mocy dawki (ponad wartość mocy dawki tła naturalnego), to w takim przypadku może wystąpić dodatkowe narażenie całego ciała spowodowane zewnętrznym promieniowaniem jonizującym. Radionuklidy zawarte w tych substancjach mogą również przedostać się do łańcucha pokarmowego ludzi i zwierząt zwiększając w ten sposób narażenie wewnętrzne. Ludzi narażonych na promieniowanie jonizujące można podzielić na trzy grupy. Są to: osoby zatrudnione przy budowie dróg, kierowcy zawodowi oraz inni użytkownicy dróg. Do obliczeń narażenia przyjmuje się, że dla budowniczych i kierowców roczny czas narażenia wynosi 2100 godzin, zaś dla innych użytkowników nie przekracza on 750 godzin.

Moc dawki promieniowania gamma na wysokości 1 m nad nieograniczoną płaską powierzchnią terenu o średniej gęstości $\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$ określa w przybliżeniu wzór półempiryczny:

$$D = 0,043 S_K + 0,43 S_{Ra} + 0,66 S_{Th}$$

gdzie S_K , S_{Ra} , S_{Th} – stężenia w [Bq/kg] odpowiednio ^{40}K , ^{226}Ra (w równowadze promieniotwórczej z jego izotopami pochodnymi) oraz ^{228}Th (w równowadze promieniotwórczej z jego izotopami pochodnymi).

Na podstawie pomierzonych wartości stężeń naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach odpadowych i przy uwzględnieniu podanego powyżej czasu przebywania dla trzech w/w grup obliczono średnią i maksymalną wartość narażenia od różnych materiałów odpadowych. Wyniki mocy dawki przedstawiono w tabeli CLOR-9.

Tabela CLOR-9. *Wielkość narażenia osób (obliczona wartość mocy dawki) wynikająca z zastosowania surowców odpadowych do budowy dróg – wartości średnie i maksymalne.*

Rodzaj surowca lub materiału budowlanego	Roczny czas narażenia [h]			
	2100		750	
	Wartość narażenia [mSv/rok]			
	średnia	maksymalna	średnia	maksymalna
Popiół elektrowniany	0,203	0,985	0,072	0,352
Żużel elektrowniany	0,159	0,650	0,056	0,232
Mieszanka popiołowo- żużlowa	0,166	0,463	0,059	0,165
Mikrosfery-glinokrzemian	0,199	0,456	0,070	0,163
Gips elektrowniany	0,012	0,096	0,004	0,034

Z powyższej tabeli wynika, że średnie wartości obliczonej mocy dawki (czyli narażenia na oddziaływanie zewnętrznego promieniowania gamma) dla osób narażonych z tytułu wykonywanego zawodu (budowniczy dróg oraz zawodowi kierowcy) zawiera się w granicach od 0,012 do 0,203 mSv/rok. Maksymalna wartość została obliczona dla popiołu elektrownianego i wynosi 0,985 mSv/rok.

Średnie wartości narażenia na promieniowanie gamma dla ludności są mniejsze i zawierają się w granicach od 0,004 do 0,072 mSv/rok (przy maksymalnej obliczonej wartości wynoszącej 0,352 mSv/rok).

4.5. Surowce i materiały budowlane nie nadające się do budownictwa drogowego.

Tabela CLOR-10 podaje ilości poszczególnych surowców odpadowych, które nie mogą być zastosowane w budownictwie drogowym, czyli takie, dla których, zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 2007 roku, wskaźniki aktywności wynoszą $f_1 > 2,4$ lub $f_2 > 480$ [Bq/kg].

Tabela CLOR-10. Ilość przekroczeń wartości granicznych wskaźników aktywności $f_1 > 2,4$ lub $f_2 > 480$ [Bq/kg] określonych dla odpadów przemysłowych i materiałów budowlanych - surowce te nie powinny mieć zastosowania w obiektach budowlanych naziemnych wznoszonych na terenach zabudowanych lub przeznaczonych do zabudowy w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego w latach 1980 - 2009.

Rodzaj surowca lub materiału budowlanego	Liczba próbek	Próbki, dla których $f_1 > 2,4$ lub $f_2 > 480$ [Bq/kg]	
		Ilość	%
SUROWCE POCHODZENIA PRZEMYSŁOWEGO			
Popiół elektrowniany	11730	3	0,03
Żużel pomiedziowy	80	1	1,25
Żużel	1312	2	0,15
MATERIAŁY BUDOWLANE			
Beton tradycyjny	105	1	0,95

Jak widzimy z powyższej tabelki, prawie wszystkie surowce i materiały budowlane (także surowce odpadowe) mogą być zastosowane w budownictwie drogowym. Należy tutaj jeszcze zwrócić uwagę na fakt, że wszystkie podane w tym opracowaniu wyniki dotyczą „czystych” materiałów i surowców. Wiadomo że zarówno w budownictwie mieszkaniowym jak i w budownictwie drogowym wykorzystuje się odpady przemysłowe zmieszane z materiałami o dużo niższych stężeniach naturalnych izotopów promieniotwórczych, nie ma więc możliwości aby dla tak przygotowanego materiału nastąpiło przekroczenie wartości wskaźników aktywności podanych w cytowanym już kilkakrotnie Rozporządzeniu Rady Ministrów.

Także hałdy odpadów przemysłowych, pochodzących z pobliskich elektrowni, elektrociepłowni czy hut nie stanowią zbyt dużego zagrożenia dla okolicznych mieszkańców.

5. Analiza zawartości jodu promieniotwórczego w tarczycy

W roku 1998 zainstalowano w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej aparaturę do pomiaru zawartości jodu promieniotwórczego w tarczycy u ludności w sytuacjach wystąpienia awarii jądrowej oraz u pracowników zakładów medycyny nuklearnej i pracujących z izotopami ^{125}I oraz ^{131}I . Aparatura ta stanowi ważny element systemu pomiaru skażeń promieniotwórczych na wypadek wystąpienia w kraju wielkoskalowego zagrożenia radiacyjnego lub lokalnych zdarzeń radiacyjnych, mogących wystąpić w zakładach stosujących otwarte źródła jodu promieniotwórczego [CLOR-3].

Utworzone stanowiska pomiarowe pozwalają mierzyć jod promieniotwórczy w Laboratorium (stanowisko stacjonarne) oraz poza nim, np. w miejscu wystąpienia awarii (stanowisko przenośne).

Laboratorium posiada następującą aparaturę pomiarową (prod. firma Cancerra-Packard):

1. **Stacjonarny Zestaw Spektrometru Promieniowania Gamma (Rys. CLOR-17)**

Zestaw składa się z następujących elementów:

- detektor Na(Tl) (typ 8024) - kryształ 3 x 3 cale, rozdzielczość 7.5% dla 661.6 keV, wbudowany fotopowielacz i wewnętrzna osłona antymagnetyczna ,
- przedwzmacniacz ładunkowy (typ 2007P) - montowany bezpośrednio na sondzie typu „kompakt”, z płynną regulacją wzmocnienia, zasilany z płyty AccuSpecNaI+ lub z INSpector,
- detektor NaI(Tl) (typ 51SL12) - kryształ 2 x 0.5 cala, przeznaczony do pomiaru niskich energii gamma, zdolność rozdzielcza 15 % dla Co-57 (122 keV) z przedwzmacniaczem AS-15, wbudowany fotopowielacz i wewnętrzna osłona antymagnetyczna,
- karta komputerowa AccuSpect NaI Plus Board , stanowiąca wielokanałowy analizator spektrometryczny (4096 kanałów),
- pakiet oprogramowania do analizy i akwizycji widm GENIE-2000 Basic Spectroskopy .



Rys. CLOR-17. Widok ogólny zestawu stacjonarnego (sonda do pomiaru ^{131}I)

2. **Przenośny Zestaw Spektrometru Promieniowania Gamma (Rys. CLOR-18)**

Zestaw składa się z następujących elementów:

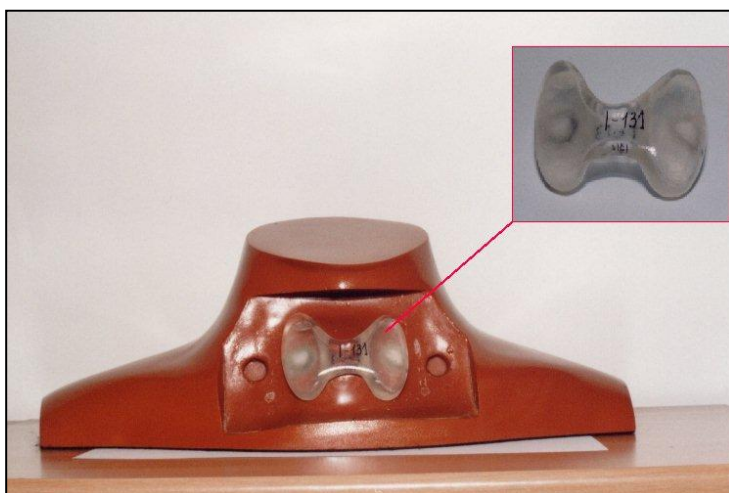
- detektor NaI(Tl) (typ 8024) – kryształ 3 x 3 cale, rozdzielczość 7.5% dla 661.6 keV, wbudowany fotopowielacz i wewnętrzna osłona antymagnetyczna,



Rys. CLOR-18. Zestaw przenośny.

- przedwzmacniacz ładunkowy (typ 2007P) - montowany bezpośrednio na sondzie typu „kompakt”, z płynną regulacją wzmocnienia, zasilany z płyty AccuSpecNaI+ lub z INSpector,
- analizator NaI INSpector - zintegrowany przenośny analizator wielokanałowy do spektroskopii gamma detektorami NaJ, posiada MCA, wzmacniacz spektrometryczny przetwornik analogowo-cyfrowy ADC, zasilacz wysokiego napięcia HV oraz zasilacz niskiego napięcia do przedwzmacniacza sondy NaJ, sterowany z zewnętrznego komputera typu notebook lub PC za pomocą szybkiego interfejsu RS-232 i pakietu oprogramowania do analizy i akwizycji widm GENIE-2000 Basic Spectroskopy,
- przenośny notebook - kolorowy wyświetlacz, HD540MB, FDD1.44MB, RAM20MB.

Laboratorium wyposażone jest w fantom tarczycy typ RS-232 firmy RSD (Radiology Support Devices Inc USA) – Rys. CLOR-19. Fantom tarczycy, bez modelu głowy, składający się z szyi, 2 pojemników tarczycopodobnych (wkładek), pokrywy tarczycowej, odcinka szyjnego kręgosłupa, mostka i obojczyka, zaprojektowano według standardu „The Lawrence Livermore Realistic Phantom” (Rys. 8). Fantom wykonany został z poliuretanu z dodatkiem CaCO_3 , o stężeniu niezbędnym dla symulacji gęstości tkanek ciała ludzkiego. Pojemniki tarczycowe zostały napełnione roztworem ^{131}I oraz ^{125}I (roztwory wzorcowe – Radioisotope Centre – Polatom) o aktywności 200 kBq i 20 kBq odpowiednio).



Rys. CLOR-19. Fantom tarczycy typ RS-232 (widok ogólny) oraz zbliżenie tarczycy.

Przy pomocy radioaktywnych roztworów jodu i fantomu tarczycy przeprowadzane są kalibracje wydajnościowe zestawu przenośnego dla ^{131}I i ^{125}I oraz optymalizacja odległości położenia detektorów względem tarczycy w obu układach (stacjonarnym i przenośnym).

Współczynnik kalibracji określano według równania:

$$K = \frac{\left[\frac{C_{pik} - B_{tlo}}{T_{pomiar}} \right]}{A_{fantom}}$$

gdzie :

K- współczynnik kalibracji [$\text{imps}^{-1}/\text{Bq}$]

C_{pik} – liczba zliczeń pod pikiem (^{131}I 364 keV; ^{125}I 28.5 keV) [imp]

B_{tlo} – liczba zliczeń tła w ustalonym zakresie pików [imp]

T_{pomiar} – czas pomiaru [s]

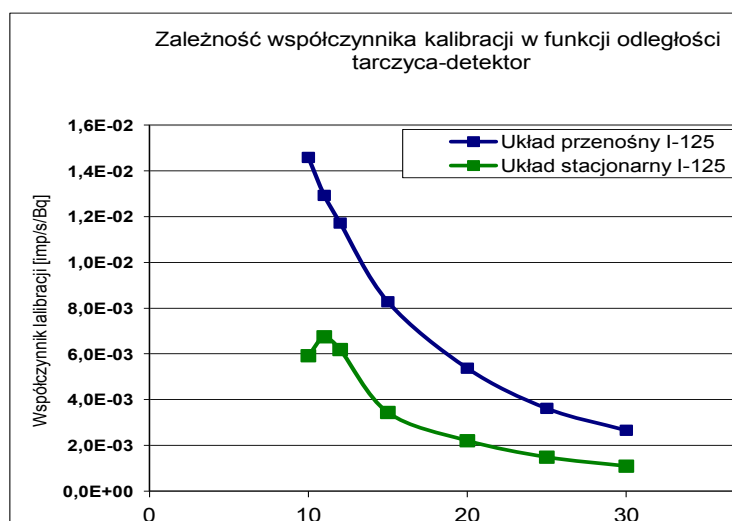
A_{fantom} – aktywność wzorca przeliczona na datę pomiaru.

Pomiary z użyciem fantomu tarczycy wykonywane są przy standardowym czasie pomiaru równym 1000 sekund.

Wartości współczynnika kalibracji dla układu przenośnego wskazują na 40% większą wydajność detekcji w stosunku do układu stacjonarnego. Wynika to z większej objętości kryształu NaI w sondzie pomiarowej. Przy odległości fantom tarczycy-detektor 10-15 cm zaznacza się dużą fluktuację współczynnika kalibracji dla układu stacjonarnego spowodowana mniejszą średnicą kryształu (2 cale) oraz osłoną kolimatora. Dla odległości tarczycy-detektor 20-30 cm błąd pomiaru nie przekracza 10%. Próg detekcji dla układu stacjonarnego wynosi około 15 Bq przy czasie pomiaru 1000 s. Próg detekcji dla układu przenośnego jest około 30 Bq dla warunków tła pracowni lecz może się zmieniać w zależności od warunków w których będzie wykonywany pomiar. Wartości te przedstawia Tabela CLOR-11 oraz wykres na rysunku CLOR-20.

Tabela CLOR-11. Zależność współczynnika kalibracji od odległości detektor-tarczyca.

Położenie sondy x [cm]	Współczynnik kalibracji [[imp/s]/[Bq]]			
	Układ przenośny ^{125}I		Układ stacjonarny ^{125}I	
	Średni współczynnik kalibracji	Błąd procentowy pomiaru σ	Średni współczynnik kalibracji	Błąd procentowy pomiaru σ
10	1.46E-02	3.00%	5.92E-03	2.90%
11	1.29E-02	2.50%	6.75E-03	2.80%
12	1.17E-02	3.00%	6.19E-03	2.80%
15	8.28E-03	1.60%	3.44E-03	2.10%
20	5.37E-03	2.70%	2.20E-03	2.20%
25	3.62E-03	2.40%	1.48E-03	2.05%
30	2.66E-03	2.10%	1.09E-03	2.10%



Rys. CLOR-20. Zależność współczynnika kalibracji w funkcji odległości fantom tarczycy - detektor.

Układ przenośny służy obecnie CLOR do przeprowadzania pomiarów interkalibracyjnych z jednostkami, które w przyszłości stworzą system monitoringu jodu w tarczycy w Polsce na wypadek awarii wielkoskalowej połączonej a uwolnieniem jodu promieniotwórczego do powietrza. Ponadto prowadzone są pomiary zawartości jodu u pracowników zakładów medycyny nuklearnej i jednostek stosujących izotopy jodu promieniotwórczego, gdzie może wystąpić skażenie tymi izotopami w wyniku działalności zawodowej.

6. Szkolenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej

Najważniejszym zadaniem Działu Szkolenia i Informacji Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej jest działalność szkoleniowa. Instytucje, w których prowadzone są prace z promieniowaniem jonizującym, zobowiązane są do zatrudnienia osób o odpowiednich kwalifikacjach posiadających uprawnienia inspektora ochrony radiologicznej nadawane przez Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Osoba taka sprawuje wewnętrzny nadzór nad przestrzeganiem wymagań bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej w takiej jednostce. Niektóre instytucje zobowiązane są również zatrudniać na stanowiskach mających istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej osoby posiadające odpowiednie uprawnienia nadawane przez Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Dział Szkolenia i Informacji Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej od ponad 40 lat zajmuje się szkoleniem takich osób. W 2007 roku uzyskaliśmy możliwość szkolenia osób chcących uzyskać uprawnienia inspektorów radiologicznej w pracowniach stosujących aparaty rentgenowskie w celach medycznych. Osobom tym uprawnienia nadaje Główny Inspektor Sanitarny.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej prowadzi następujące rodzaje szkoleń:

- na uprawnienia inspektora ochrony radiologicznej typu **IOR-O, IOR-1, IOR-3**;
- szkolenia typu **A-A** dla operatorów akceleratorów stosowanych do celów innych niż medyczne oraz dla operatorów akceleratorów stosowanych do kontroli na przejściach granicznych;
- szkolenia **S-A, S-Z** dla operatorów akceleratorów w celach medycznych lub urządzeń do teleterapii i brachyterapii;
- na uprawnienia inspektora ochrony radiologicznej typu **R i S** dla osób pracujących w pracowniach rentgenowskich stosujących aparaty rentgenowskie w celach medycznych;

Szkolenia kończą się egzaminem zdawanym - w zależności od typu uprawnień - przed Komisją powołaną przez Prezesa PAA lub Głównego Inspektora Sanitarnego.

Warunkiem uczestnictwa w szkoleniu jest przedstawienie **zaświadczenia lekarskiego** (wydanego przez uprawnionego lekarza) stwierdzającego, że uczestnik może pracować w warunkach narażenia na promieniowanie jonizujące.

Przypominamy, że jednym z istotnych wymagań na uzyskanie uprawnień jest posiadanie odpowiedniego **wykształcenia** oraz **stażu pracy** z promieniowaniem jonizującym.

Szczegółowe wymagania dotyczące prowadzonych szkoleń, ich zasadności i przebiegu można znaleźć w dwóch aktach prawnych, a mianowicie:

- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 roku w sprawie stanowisk mających istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej oraz inspektorów ochrony radiologicznej (**Dz. U. nr 21/2005, poz. 173**);
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 1 grudnia 2006 roku w sprawie nadawania uprawnień inspektora ochrony radiologicznej w pracowniach stosujących aparaty rentgenowskie w celach medycznych (**Dz. U. nr 239/2006, poz. 1737**)

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej prowadzi również szkolenia aktualizujące wiedzę dla osób, które pełnią funkcje Inspektorów Ochrony Radiologicznej (IOR) w zakładach pracy, i którym uprawnienia IOR wygasają. W takim przypadku należy pamiętać, że po ukończeniu takiego szkolenia, ale przed upływem ważności posiadanego uprawnienia, należy wystąpić do Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki o wyznaczenie terminu egzaminu sprawdzającego wiedzę.

Poza tym Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej prowadzi szkolenia dla różnych grup zawodowych, dla których znajomość zasad ochrony radiologicznej jest potrzebna do bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego. Są to między innymi funkcjonariusze Straży Granicznej i Urzędów Celných, pracownicy Straży Pożarnej czy funkcjonariusze Biura Organizacji Antyterrorystycznych (BOA).

7. Dozymetria radonu

7.1. Wstęp.

W dozymetrii radonowej oceny dawki dokonuje się na podstawie pomiaru stężenia gazowego radonu albo jego krótkożyciowych produktów rozpadu, którą opisuje specyficzna dla metrologii radonowej wielkość - energia potencjalnej α . Jest ona zdefiniowana jako całkowita energia cząstek α emitowanych podczas rozpadu pochodnych radonu-222 w szeregu promieniotwórczym aż do ołowiu Pb-210 (z wyłączeniem tego nuklidu) albo rozpadu pochodnych toronu – aż do stabilnego ołowiu Pb-208. Drugą specyficzną dla metrologii radonowej wielkością jest współczynnik równowagi pomiędzy radonem a jego krótkożyciowymi pochodnymi F, znajomość którego umożliwia przeliczenie stężenia radonu na stężenie energii potencjalnej α i odwrotnie. Współczynnik F jest stosunkiem aktywności pochodnych do aktywności macierzystego radonu wyrażonej za pomocą stężenia energii potencjalnej α pochodnych, które byłyby z nim w pełnej równowadze. Najczęściej, jeśli współczynnik ten jest nieznany dla konkretnego miejsca, przyjmuje się na podstawie doświadczenia, że jest on równy 0,4.

7.2. Metody i aparatura pomiarowa.

W mieszkaniach stosuje się najczęściej pomiary za pomocą różnego rodzaju detektorów, ponieważ są znacznie łatwiejsze i tańsze niż przyrządy do zastosowania jednocześnie w wielu miejscach, nie wymagają obecności laboranta i dają wynik uśredniony w krótszym lub dłuższym, zależnie od wymagań, czasie ekspozycji. Detektory radonowe ustawia się w wybranym bezpiecznym miejscu z dala od przeciągu, źródła ciepła i od zewnętrznej ściany na okres kilku dni lub kilku miesięcy, zależnie od rodzaju i oczekiwanej wartości stężenia a następnie odsyła się je do laboratorium, gdzie poddawane są analizie.

Najczęściej stosuje się trzy rodzaje detektorów radonowych. Jeśli chcemy dostać wynik szybko, stosujemy detektory z węglem aktywowanym wykorzystujące zdolności adsorpcyjne węgla w stosunku do radonu. Detektory węglowe wymagają ekspozycji od 2 do 7 dni. Po okresie ekspozycji są one poddane analizie pomiarowej. Można mierzyć albo promieniowanie γ , emitowane przez produkty rozpadu radonu powstałe w węglu, w spektrometrze gamma albo promieniowania α i β emitowane przez radon i jego pochodne w liczniku ciekłoscyntylacyjnym. W drugiej metodzie do naczynka z węglem aktywowanym po skończonej ekspozycji nalewa się ciekłego radonolubnego scyntylatora, który ma właściwość „odbierania” radonu z węgla. Układ radonu i jego produktów rozpadu powstałych w scyntylatorze emituje cząstki α i β , które wywołują scyntylacje. Scyntylacje te zliczane są w liczniku z fotopowielaczem z blisko stuprocentową wydajnością. Częstość scyntylacji jest miarą liczby cząstek α i β wyemitowanych w jednostce czasu a więc zależy od stężenia radonu w mierzonym powietrzu. Powszechnie używany jest na świecie i w Polsce amerykański system pomiarowy PicoRad, w którym wykorzystuje się komercyjnie dostępne detektory węglowe firmy Accuspec oraz skomputeryzowany licznik ciekłoscyntylacyjny firmy Packard-Canberra wyposażony w program o nazwie PicoRad [CLOR-6].

Stosuje się również detektory węglowe w połączeniu z detektorami termoluminescencyjnymi (TLD), które, umieszczone w węglu, magazynują energię promieniowania gamma emitowanego przez produkty rozpadu radonu zaadsorbowanego w węglu. Detektory węglowe z TLD mogą być ekspozycyjne przez okres miesiąca i dają informację o średnim stężeniu radonu w okresie ekspozycji.

Jeśli chcemy mieć wynik uśredniony z dłuższego czasu ekspozycji, od trzech miesięcy do roku, używamy detektorów śladowych. Detektory śladowe składają się z małego kawałka specjalnego plastiku umieszczonego na dnie niewielkiego pojemnika wykonanego z przewodzącego ładunki elektryczne tworzywa (komora dyfuzyjna). Najczęściej obecnie używa się folii o firmowej nazwie CR-39, stosowanej zamiast szkła w okularach optycznych. Folia ta ma taką właściwość, że cząstki α padając na nią burzą jej strukturę na swojej drodze tworząc tor utajony, który jest niewidoczny ale w wyniku wytrawienia chemicznego czyli poddania działaniu stężonej zasady sodowej w temperaturze 70-80° C staje się widoczny pod mikroskopem. Gęstość śladów na jednostkę powierzchni odpowiada ilości cząstek α , które je wytworzyły a więc jest proporcjonalna do stężenia radonu w pojemniku.

Trzecią grupę detektorów radonowych stosowanych do pomiaru radonu w domach, dającą możliwość odczytu uśrednionej wartości stężenia radonu w dłuższym okresie czasu stanowią detektory na bazie elektretów. Elektrety są teflonowymi dyskami fabrycznie naładowanymi ładunkiem elektrycznym o początkowym potencjale ok. 700 V. Pełnią one dwie funkcje: źródła pola elektrostatycznego i czujnika. Umieszcza się je na dnie niewielkiego pojemnika wykonanego z przewodzącego plastiku (komora dyfuzyjna). W czasie ekspozycji badane powietrze dyfunduje swobodnie do pojemnika poprzez filtr

odcinający aerozole, w tym produkty rozpadu radonu. W pojemniku-komorze dyfuzyjnej radon rozpadając się powoduje jonizację powietrza. Powstałe ujemne jony są przyciągane do dodatnio naładowanego dysku powodując spadek jego powierzchniowego potencjału. Po skończonej ekspozycji mierzy się za pomocą specjalnego woltomierza potencjał dysku. Różnica potencjałów przed i po ekspozycji w określonym czasie jest miarą stężenia radonu w badanym powietrzu. Amerykańska firma E-PERM jest producentem systemu pomiarowego opartego na elektretach.

7.3. Metody pomiaru stężenia pochodnych radonu.



Rys. CLOR-21. Przyrządy stosowane do pomiarów radonu w CLOR (wyposażenie komory radonowej).

Do pomiaru stężenia krótkożyciowych produktów rozpadu, stosuje się niekiedy metodę otwartych detektorów śladowych. **Najczęściej jednak**

stosowaną metodą jest pomiar aktywności α filtru, przez który przepompowano znaną objętość badanego powietrza. Technika ta została użyta w dwu powszechnie stosowanych w polskich kopalniach metodach. W metodzie tzw. przystawki alfa-31, współpracującej z pyłomierzem Barbara 3A jako pompką (5l/min.). W metodzie tej energia cząstek α emitowanych przez produkty rozpadu radonu zgromadzone na membranowym filtrze jest magazynowana w dawkomierzach termoluminescencyjnych (TLD) w sposób ciągły w czasie przepompowywania oraz przez kilkanaście godzin po jego zakończeniu. Druga metoda pomiaru produktów rozpadu radonu stosowana powszechnie w kopalniach to radiometr górniczy RGR - 40 produkowany w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Radiometr ten zasysa w ciągu 5 min. 10 litrów powietrza przez filtr z włókniny szklanej, na którym zatrzymywane są aerozole będące nośnikiem krótkożyciowych produktów rozpadu radonu. Emitowane przez nie promieniowanie α jest rejestrowane za pomocą zliczającego układu z detektorem półprzewodnikowym umieszczonym w bliskim sąsiedztwie filtra (Rys. CLOR-21). Wykonywane są dwa pomiary 3-minutowe zgodnie z cyklem Markowa: pierwszy jedną minutę po 5-minutowym poborze próby powietrza (N1 zliczeń) i drugi 3 minuty po skończonym pierwszym pomiarze (N2 zliczeń). W sumie cykl Markowa trwa 15 min. i jest całkowicie sterowany automatycznie mikrokomputerem, który po pomiarze przelicza zmierzone liczby zliczeń N1 i N2 na stężenia energii potencjalnej α (E) w $\mu\text{J}/\text{m}^3$ i stężenia poszczególnych produktów rozpadu: A (^{218}Po tradycyjna nazwa RaA), B (^{214}Pb inaczej RaB) oraz C (^{214}Bi inaczej RaC i ^{214}Po inaczej RaC') wyrażone w Bq/m^3 wg następujących wzorów:

$$E(C_\alpha) = 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot N_2 \cdot k;$$

$$A = 2,19 \cdot (N_1 - N_2) \cdot k;$$

$$B = 0,55 \cdot N_2 \cdot k;$$

$$C = (1,1 \cdot N_2 - 0,45 \cdot N_1) \cdot k,$$

gdzie N_1 i N_2 jest liczbą zliczeń kolejno w I i II okresie zliczania a k jest współczynnikiem kalibracji przyporządkowującym stężenia wyrażone w Bq/m^3 lub J/m^3 liczbie zliczeń [CLOR-6].

7.4. Dawka od radonu i jego krótkożytych pochodnych.

Ekspozycja na radon i jego produkty rozpadu w domu i w miejscach pracy stanowi największe narażenie człowieka na promieniowanie jonizujące. Wynika to po pierwsze z tego, że w przestrzeniach zamkniętych radon kumuluje się do poziomu wyższego a często znacznie wyższego niż naturalny a my spędzamy w nich ok. 80 % czasu, oraz z tego, że radon i jego pochodne występują w powietrzu, które wdychamy skażając nasz układ oddechowy ciężkimi metalami emitującymi najbardziej szkodliwe dla zdrowia promieniowanie α . Na szczególną uwagę zasługują takie miejsca pracy jak kopalnie, zakłady lecznicze stosujące terapię radonową, podziemne trasy turystyczne, w których pracownicy spędzają regularnie swój czas pracy. Należy pamiętać, że nie sam gazowy radon, który wdychamy i szybko wydychamy ale przede wszystkim jego metaliczne promieniotwórcze pochodne, zawsze mu towarzyszące, zostają w naszych płucach i są głównym źródłem dawki promieniowania jonizującego, stwarzając zagrożenie rakiem płuc i krtani. Dlatego dla oceny dawki bezpośrednią wielkością fizyczną, od której dawka zależy jest stężenie energii potencjalnej α pochodnych radonu. Stężenie energii potencjalnej α C_α jest liczbowo równe sumarycznej energii cząstek α wyemitowanych przez pochodne radonu w następstwie ich całkowitego rozpadu w jednostce objętości. Jednostką C_α w układzie SI jest dżul na m^3 (J/m^3). W użyciu są zwykle pochodne tej jednostki: nJ/m^3 i $\mu J/m^3$. Jeśli jednak dysponujemy zmierzoną wartością tylko stężenia radonu, możemy obliczyć odpowiadające mu stężenie energii potencjalnej α korzystając ze współczynnika równowagi F z następującego wzoru:

$$C_\alpha = \frac{C_{Rn} \cdot F}{180 \cdot 10^6}, \quad \text{gdzie } C_{Rn} \text{ wyrażone jest w } Bq/m^3 \text{ a } C_\alpha \text{ w } J/m^3.$$

Współczynnik F jest wartością niemianowaną, czasem wyrażaną w procentach. Współczynnik liczbowy $180 \cdot 10^{-6}$ służy do wyrażenia stężenia gazowego radonu za pomocą odpowiadającego mu stężenia energii potencjalnej α pochodnych, które pozostawałyby z nim w równowadze i ma miano $[(J/m^3)/(Bq/m^3)]$. Wartość współczynnika równowagi F odpowiadająca danemu stężeniu radonu może zmieniać się w granicach od prawie 0 do 1 i zależy od stopnia zanieczyszczenia powietrza aerozolami, ponieważ powstające w wyniku rozpadu promieniotwórczego atomów radonu dodatnie jony pochodnych radonu mają skłonność do szybkiego osadzania się na najbliższych molekułach gazów, pary wodnej i aerozoli tworząc klastry i aerozole promieniotwórcze. W bardzo czystym powietrzu współczynnik F jest niski, ponieważ w sytuacji braku aerozoli powstające jony pochodnych radonu są usuwane z powietrza w wyniku depozycji na otaczających powierzchniach (tzw. efekt plate out). W obecności dymu papierosowego lub innych zanieczyszczeń aerozolowych

pozostają one w powietrzu osadzone na aerozolu powodując wysoką wartość stężenia energii potencjalnej α i współczynnika F.

Polskie badania wykazały, że w budynkach mieszkalnych wartości współczynnika równowagi F mieszczą się w bardzo szerokim przedziale od 0,09 do 0,64, zależnie od naszego zachowania - od tego czy palimy papierosy, smażymy lub gotujemy, palimy w piecu itd. Przyjęto, że najczęściej wynosi on 0,4 i takiej wartości używamy do obliczenia stężenia potencjalnej energii α i następnie dawki, jeśli zmierzono było stężenie gazowego radonu. W jeszcze szerszym zakresie mieszczą się wartości współczynnika równowagi w kopalniach i mogą podlegać dużej zmienności. Dlatego w kopalniach praktykowane są raczej bezpośrednie pomiary stężenia energii potencjalnej α , podczas gdy w budynkach, zwłaszcza w badaniach przesiewowych, stosuje się zwykle detektory radonowe. Są one znacznie tańsze i mniej kłopotliwe w stosowaniu.

Całkowite narażenie organizmu człowieka na promieniowanie jonizujące opisywane jest w ochronie radiologicznej za pomocą wielkości zwanej roczną dawką efektywną (skuteczną) E, która jest tym większa im większe jest średnie stężenie energii potencjalnej α (lub stężenie radonu) i czas narażenia t na to stężenie w ciągu roku. Dla narażenia od radonu i jego krótkożyciowych pochodnych oblicza się ją z jednego z następujących wzorów, zależnie od tego czy zmierzono zostało C_α -stężenie energii potencjalnej α czy stężenie gazowego radonu (C_{Rn}):

$$E = C_\alpha \cdot t \cdot DCF$$

$$\text{albo} \quad E = \frac{C_{Rn} \cdot F}{180 \cdot 10^6} \cdot t \cdot DCF$$

gdzie: E jest roczną dawką efektywną w mSv
 C_α jest średnim stężeniem energii potencjalnej α w J/m³
t jest czasem ekspozycji w godz.
DCF jest współczynnikiem konwersji w Sv/(J·h/m³)
 C_{Rn} jest średnim stężeniem radonu
F jest współczynnikiem równowagi
 $180 \cdot 10^6$ współczynnik przeliczeniowy ma miano (J/m³)/(Bq/m³).

W powyższych wzorach występuje współczynnik konwersji ekspozycji na dawkę DCF, który stanowi dawkę odpowiadającą jednostce wchłoniętej aktywności czyli jednogodzinnej ekspozycji na jednostkowe stężenie energii potencjalnej α : 1 J h/m³.

Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) w swoim dokumencie Nr 65 z 1994r. rekomenduje dwa współczynniki konwersji, jeden dla pracujących fizycznie równy:

$$DCF = 1,4 \text{ Sv} / (\text{J h/m}^3)$$

i drugi dla ogólnej populacji:

$$DCF = 1,1 \text{ Sv} / (\text{J h/m}^3).$$

Współczynniki te zostały wyznaczone na podstawie licznych badań epidemiologicznych na grupach górników pracujących w podziemnych kopalniach, głównie uranowych, w USA, Kanadzie, Czechach, Francji i Szwecji. Badania te, wykonane łącznie na ok. 31 000 górników w latach 1946 - 1985, potwierdziły, obserwowaną od XIX stulecia, znacząco podwyższoną śmiertelność wśród górników na nowotwory płuc i krtani w stosunku do ogólnej populacji. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej na podstawie

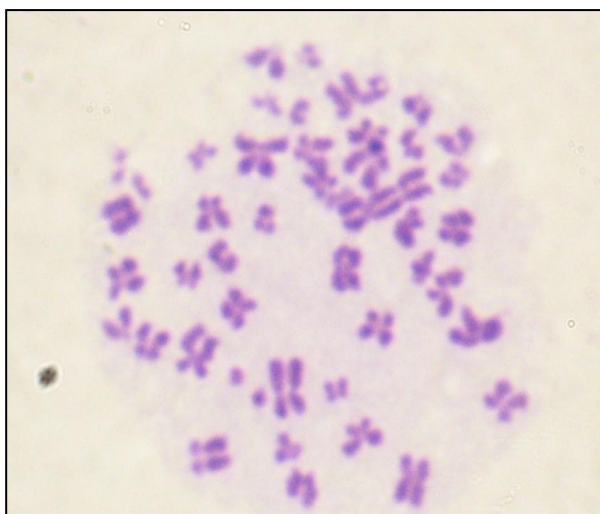
wyników tych badań przyjęła, że ryzyko zachorowania na nowotwory układu oddechowego odpowiadające ekspozycji na krótkożyciowe produkty rozpadu radonu równej $1 \text{ J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ wynosi $R_1 = 8,0 \cdot 10^{-2}$.

Przyjęte we wcześniejszej Publikacji (Nr 60) Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP) współczynniki ryzyka zachorowania od promieniowania jonizującego odpowiadające efektywnej dawce równej 1 Sv wynoszą: $R_{2\text{zaw}} = 5,6 \cdot 10^{-2}$ dla robotników i $R_{2\text{pop}} = 7,3 \cdot 10^{-2}$ dla ogółu populacji. Z podzielenia tych dwu współczynników przez siebie: $R_1/R_{2\text{zaw}}$ i $R_1/R_{2\text{pop}}$ otrzymujemy współczynniki konwersji DCF równe 1,4 i 1,1 Sv/(J·h·m⁻³) kolejno dla robotników i dla populacji, określające relację pomiędzy ekspozycją na pochodne radonu i dawką efektywną. Współczynniki konwersji odpowiadające ekspozycji rocznej na stężenie gazowego radonu 1 Bq/m³ przy założeniu, że współczynnik równowagi $F=0,4$ oraz że czas ekspozycji w skali roku spędzany w domu wynosi 7000 h a w pracy 2000 godz., wynoszą odpowiednio: dla pracowników 6,23 μSv/rok i dla ogólnej populacji 17,2 μSv/rok [CLOR-6].

8. Dozymetria cytogenetyczna

W warunkach zagrożenia radiacyjnego (wypadek przy pracy, awaria urządzenia, atak terrorystyczny) ocena dawki pochłoniętej metodami dozymetrii fizycznej nie zawsze jest dokładna i możliwa do przeprowadzenia. W wiarygodny sposób można ją jednak wykonać metodami dozymetrii biologicznej.

Skutkiem działania promieniowania jonizującego na człowieka są różnego rodzaju zmiany w cząsteczkach, komórkach i tkankach organizmu. Zmiany, które cechuje trwałość, swoistość na promieniowanie i proporcjonalność do ilości energii pochłoniętej w jednostce masy ciała człowieka narażonego na działanie promieniowania mogą stanowić użyteczne biologiczne markery ekspozycji i dawki pochłoniętej. Najdokładniejszym biomarkerem dawki jest częstość występowania chromosomów dicentrycznych (dicentryków) w limfocytach krwi obwodowej osoby narażonej (Rys. CLOR-22).



Rys. CLOR-22. Obraz limfocytów ludzkich zawierających chromosom dicentryczny.

Dicentryki to chromosomy, które zamiast jednego mają dwa centromery. Ten rodzaj strukturalnych aberracji chromosomowych powstaje w wyniku błędnej naprawy dwóch pęknięć obu nici DNA na dwóch różnych chromosomach. Dicentryki pojawiają się w komórkach wkrótce po ekspozycji na promieniowanie i utrzymują do czasu pierwszego popromiennego podziału komórkowego, kiedy to chromosomy można oglądać za pomocą mikroskopu świetlnego. Po równomiernym napromienieniu całego ciała dicentryki powstają we wszystkich komórkach organizmu, a ich częstość jest proporcjonalna do otrzymanej dawki

promieniowania. Jednak do celów dozymetrii biologicznej najlepiej analizować je w dojrzałych limfocytach krwi obwodowej. Komórki te krążą po całym ciele i nie dzielą się w organizmie tylko w hodowli. Dzięki tej własności limfocytów wartość dawki pochłoniętej przez te komórki może zostać odtworzona w laboratorium. Do tego są to komórki, które łatwo pobrać, przechować, a w razie potrzeby przetransportować w ciągu 48 godzin od pobrania. Ich hodowla nie wymaga dużej objętości krwi. Jest nieskomplikowana i nie powoduje dodatkowego uszkodzenia chromosomów.

W celu wykonania biologicznej rekonstrukcji dawki krew pobraną z żyły w zgięciu łokciowym umieszcza się w pożywce z dodatkiem fitohemaglutyniny, która stymuluje dojrzałe limfocyty do wznowienia podziałów komórkowych, i hoduje przez 48 godzin w temperaturze 37 stopni C. Na ostatnie 24 godziny hodowli dodawany jest kolcemid, który zatrzymuje podział limfocytów w stadium metafazy. Chromosomy są wówczas maksymalnie skondensowane i szczegóły ich morfologii najlepiej widoczne pod mikroskopem. Limfocyty izoluje się z hodowli przez wirowanie. Następnie utrzuca się je przez kilkakrotne dodawanie mieszaniny kwasu octowego i metanolu (1:3), nanosi na szkiełka mikroskopowe i po wysuszeniu barwi roztworem barwnika Giemsy. Analizę dicentryków rozpoczyna się od znalezienia komórki, która znajduje się w stadium metafazy. Następnie obiektyw mikroskopu przełącza się na powiększenie x 100 i oblicza liczbę chromosomów w komórce. Jeżeli wynosi ona 46 to przystępuje się do szukania chromosomów dicentrycznych i towarzyszących im fragmentów acentrycznych. Dokładna ocena dawki wymaga przeanalizowania 1000 komórek metafazowych lub znalezienia 200 dicentryków. Obserwowana częstość występowania dicentryków jest następnie przeliczana na wartość dawki pochłoniętej za pomocą współczynników liczbowych odpowiedniej krzywej wzorcowej, formuł (wzorów) matematycznych i programu komputerowego Chromosomal ABerration cAlculation Software (CABAS). Krzywe wzorcowe wyznaczane są w oparciu o wartości częstości występowania chromosomów dicentrycznych w limfocytach otrzymanych od kontrolnych osób i napromienionych *in vitro* wzorcowymi dawkami promieniowania, którego fizyczna jakość powinna być jak najbardziej zbliżona do promieniowania będącego przedmiotem oceny. Postępowanie takie jest możliwe dzięki podobieństwu częstości występowania chromosomów dicentrycznych na jednostkę dawki pochłoniętej po napromienieniu populacji limfocytów *in vivo* i *in vitro*.

Próbka krwi użyta do rekonstrukcji dawki nie musi być świeżo pobrana. Między pobraniem a rozpoczęciem hodowli może upłynąć 24-48 godzin, co oznacza, że krew można wysłać do laboratorium pocztą kurierską lub dostarczyć osobiście, przez inspektora ochrony radiologicznej lub inną upoważnioną osobę. W przypadku narażenia całego ciała na dawki promieniowania X lub γ większe od 1 Gy, próbki krwi powinny być pobierane już po 24 godzinach od zdarzenia, gdyż popromienne przesunięcie limfocytów z krwi do innych tkanek powoduje spadek ich liczby we krwi obwodowej. Przy narażeniu na dawki mniejsze od 1 Gy ocena dawki jest tym mniej dokładna, im więcej czasu upłynęło między napromienieniem a pobraniem próbki krwi. Dzieje się tak dlatego, że stare limfocyty są usuwane z organizmu i zastępowane przez młode komórki ze szpiku kostnego, które dicentryków nie zawierają. Dicentryki należą do tzw. niestabilnych aberracji chromosomowych, gdyż obecność dwóch centromerów utrudnia rozdzielenie się chromatyd chromosomu i ich przemieszanie do nowo powstających jąder komórek potomnych. Skutkiem ubytku informacji genetycznej jest mitotyczna śmierć komórek potomnych, a to powoduje, że w układzie krwiotwórczym komórki zawierające dicentryki z czasem znikają z populacji komórek dzielących się. We krwi obwodowej liczba komórek zawierających dicentryki maleje wykładniczo z czasem

($N=N_0e^{-\ln 2t/T}$). Połowiecny czas życia limfocytów z dicentrykami (T) ocenia się na ok. 130 dni, a jego zakres na 95-220 dni. Dla cytogenetycznej dozymetrii biologicznej oznacza to, że częstość występowania chromosomów dicentrycznych w limfocytach krwi obwodowej jest biomarkerem dawek niezbyt odległych w czasie i materiał do oceny dawki powinien być pobierany nie później niż 6 miesięcy po narażeniu. W przeciwnym wypadku wynik oceny dawki może być obarczony dużym marginesem niepewności w związku z dużym, osobniczym zróżnicowaniem połowiecny czasu życia limfocytów z dicentrykami i jego zależnością od chwilowego zapotrzebowania organizmu na komórki układu odpornościowego [CLOR-7].

Cytogenetyczna rekonstrukcja dawki jest szczególnie przydatna wtedy, kiedy ofiara zdarzenia radiacyjnego wymaga specjalistycznego leczenia, a w czasie zdarzenia nie posiadała dawkomierza osobistego, albo uległ on uszkodzeniu lub skażeniu substancjami promieniotwórczymi, a w czasie zdarzenia nie były prowadzone kontrolne pomiary promieniowania. Kolejne przykłady zastosowania to: ekspozycja dużej liczby osób i konieczność ustalenia kto został narażony, a kto nie oraz postępowanie wyjaśniające w związku z zarejestrowaniem przez dawkomierz osobisty pracownika dawki promieniowania przekraczającej limit roczny.

Pracownia Dawek Indywidualnych i Środowiskowych CLOR posiada wprowadzony i udokumentowany system jakości, który spełnia wymagania Normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005. W grudniu 2010 roku, pracownia uzyskała z Państwowego Centrum Akredytacji potwierdzenie rozszerzenia zakresu akredytacji o metodę wyznaczania pochłoniętych dawek promieniowania γ ^{60}Co i promieniowania X, generowanego przy napięciu zasilającym 243 kV i HVL-2,5 mm, na podstawie obserwowanej częstości występowania chromosomów dicentrycznych w limfocytach krwi obwodowej osoby narażonej (numer AB 450). Krzywe wzorcowe (krzywa X: $Y=0,001+0,0341D+0,0642D^2$ i krzywa γ : $Y=0,001+0,0119D+0,0557D^2$) zostały wykonane w oparciu o dane uzyskane z napromieniania *in vitro* limfocytów krwi obwodowej sześciu dawców wzorcowymi dawkami promieniowania X lub γ o wartościach: 0 (kontrola), 0,25; 0,50; 0,75; 1; 2; 3 i 4 Gy, przy mocy dawki 0,35Gy/min. Poza akredytacją CLOR może wyznaczać pochłonięte dawki promieniowania γ ^{192}Ir ($Y=0,001+0,0322D+0,0542D^2$), mieszanego promieniowania n+ γ ze źródła izotopowego AmBe ($Y=0,001+0,298D$), oraz innego rodzaju promieniowania o własnościach zbliżonych do promieniowania użytego w celu opracowania krzywych wzorcowych.

Oprócz działalności pomiarowej z zakresu cytogenetycznej dozymetrii biologicznej CLOR prowadzi również działalność dydaktyczną. W lipcu i sierpniu br. na praktyce wakacyjnej byli studentka Politechniki Warszawskiej i student Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Na jesieni br. student Politechniki Łódzkiej obroni pracę magisterską wykonaną w CLOR. Tematami proponowanych praktyk oraz prac licencjackich i magisterskich są badania mające na celu:

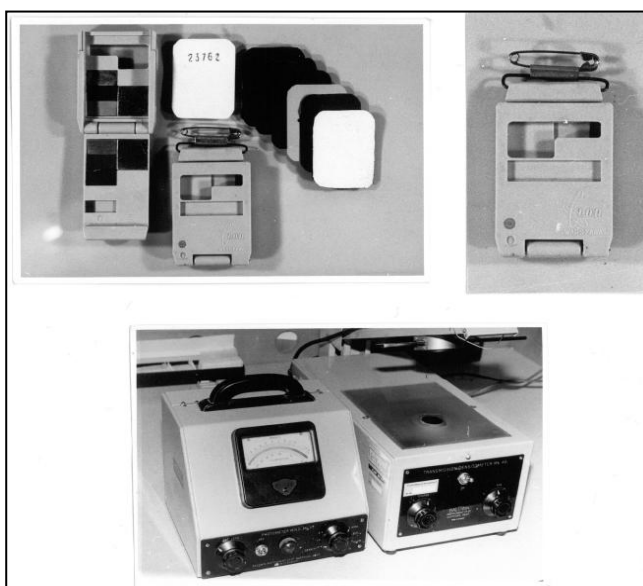
- 1) charakterystykę skuteczności biologicznej różnych rodzajów wiązek promieniowania w indukcji chromosomów dicentrycznych w ludzkich limfocytach krwi obwodowej,
- 2) opracowanie krzywych zależności dawka-skutek dla dicentryków indukowanych przez te wiązki promieniowania.

9. Dozymetria indywidualna

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie było pierwszą instytucją w Polsce prowadzącą kontrolę dawek indywidualnych pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące. Serwis dozymetryczny został uruchomiony w 1956 roku. W 2003 roku Pracownia Dawek Indywidualnych i Środowiskowych otrzymała akredytację Laboratorium Badawczego nr AB 450 [CLOR-4].

Obecnie Pracownia prowadzi kontrolę dawek około 5000 osób narażonych na promieniowanie jonizujące. Kontrolowane osoby zatrudnione są w większości w medycynie, przemyśle oraz sektorze naukowym.

Pracownia wdrożyła dwie metody pomiaru dawek indywidualnych, pierwsza oparta na kliszach fotometrycznych (Rys. CLOR-23) druga wykorzystująca do detekcji promieniowania materiały termoluminescencyjne (TLD) – Rys. CLOR-24.



Rys. CLOR-23. Pierwszy system dozymetrii indywidualnej oparty na kliszach fotometrycznych (z prawej) [CLOR-4].



Rys. CLOR-24. Trzy rodzaje dozymetrów używanych w CLOR [CLOR-4].

Dawki indywidualne wyznaczone są w wielkości operacyjnej indywidualnego równoważnika dawki $H_p(10)$ dla dozymetrów całego ciała oraz $H_p(0,07)$ dla dozymetrów naręcznych. W przypadku dawek środowiskowych używaną wielkością operacyjną jest przestrzenny równoważnik dawki $H_p^*(10)$. Dolny próg detekcji wynosi 0,2 mSv.

Kontrola dawek indywidualnych zależna jest od warunków pracy osób narażonych oraz rodzaju promieniowania. Zgodnie z wymogami Polskiego Prawa Atomowego pracownicy narażeni na promieniowanie jonizujące podzieleni są na dwie kategorie:

- **Kategoria A**, dla pracowników którzy w przeciągu roku mogą otrzymać dawkę efektywną powyżej 6mSv lub dawkę równoważną dla soczewek oczu, skóry oraz kończyn przekraczającą jedną trzecią dozwolonych limitów, które odpowiednio wynoszą 150mSv, 500mSv oraz 500mSv,
- **Kategoria B**, dla pracowników którzy w przeciągu roku mogą otrzymać dawkę efektywną powyżej 1mSv lub dawkę równoważną dla soczewek oczu, skóry oraz kończyn przekraczającą jedną dwunastą dozwolonych limitów, które odpowiednio wynoszą 150mSv, 500mSv oraz 500mSv.

10. Wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych i radonowych

Laboratorium Wzorcowania funkcjonuje w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej od 1967 r., kiedy to zostało upoważnione przez prezesa CUJM do kalibracji dawkomierzy stosowanych w ochronie radiologicznej. W latach 1995 – 1999, została zrealizowana inwestycja pt. „Modernizacja Laboratorium Wzorcowania dla uzyskania poziomu Dozymetrycznego Laboratorium Wzorców Wtórnych”, która była prowadzona w ramach umów inwestycyjnych z Państwową Agencją Atomistyki oraz projektu pomocy technicznej Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Modernizacja Laboratorium umożliwiła spełnienie wymagań określonych dla Dozymetrycznych Laboratoriów Wzorców Wtórnych działających w sieci Secondary Standard Dosimetry Laboratories (SSDL's) pod auspicjami IAEA/WHO. W 2003 roku Laboratorium uzyskuje Certyfikat Akredytacji Laboratorium Wzorcującego Nr AP 057 potwierdzony przez Polskie Centrum Akredytacji. Od tego czasu wykonuje wzorcowania zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005+AP1:2007 [CLOR-5].

W 2010 roku Pracownia Wzorcowania połączyła się z Pracownią Dozymetrii Radonu. Powstało Laboratorium Wzorcowania Przyrządów Dozymetrycznych i Radonowych (LWPDiR), będące komórką Zakładu Kontroli Dawek i Wzorcowania.

Zadaniem LWPDiR jest wzorcowanie dawkomierzy z komorami jonizacyjnymi, mierników mocy dawki i dawki promieniowania jonizującego, mierników powierzchniowych skażeń promieniotwórczych alfa i beta oraz działalności w zakresie ekspozycji wzorcowymi stężeniami detektorów i przyrządów do pomiaru stężenia radonu oraz wzorcowania przyrządów do pomiaru stężenia radonu i stężenia energii potencjalnej α produktów rozpadu radonu. Laboratorium prowadzi również prace w zakresie napromieniania wzorcowymi dawkami pasywnych dawkomierzy – filmowych i termoluminescencyjnych (TLD).

Laboratorium wyposażone jest w nowoczesne stanowiska kalibracyjne promieniowania rentgenowskiego, gamma, beta, dwa elektrometry z zestawem komór jonizacyjnych oraz wzorcowe źródła powierzchniowe alfa i beta.

Pomiary wykonywane są dla następujących wielkości fizycznych i operacyjnych:

- dawki ekspozycyjnej i mocy dawki ekspozycyjnej;
- kerry w powietrzu i mocy kerry w powietrzu;
- dawki pochłoniętej w powietrzu i mocy dawki pochłoniętej w powietrzu;
- równoważnika dawki i mocy równoważnika dawki;
- fotonowego równoważnika dawki i mocy fotonowego równoważnika dawki;
- przestrzennego równoważnika dawki i mocy przestrzennego równoważnika dawki;
- kierunkowego równoważnika dawki i mocy kierunkowego równoważnika dawki;
- indywidualnego równoważnika dawki i mocy indywidualnego równoważnika dawki;
- emisji powierzchniowej,
- stężenia radonu w powietrzu;
- ekspozycji na radon;
- stężenia energii potencjalnej α

10.1. Stanowisko kalibracyjne gamma

Stanowisko umożliwia wzorcowanie przyrządów dozymetrycznych w polu promieniowania gamma. Wyposażone jest w ławę kalibracyjną długości 6m, z systemem automatycznego pozycjonowania, urządzenie do napromieniania (iradiator) wyposażone jest w trzy zamknięte źródła: Co-60, Cs-137 i Am-241. W celu rozszerzenia możliwości pomiarowych w zakresie mocy dawek promieniowania gamma iradiator wyposażono w trzy dyski pochłaniające zwiększające zakres wzorcowanych przyrządów na 0,5 $\mu\text{Gy/h}$ do 100 mGy/h.

10.2. Stanowisko kalibracyjne RTG

Stanowisko Kalibracyjne Rentgenowskie składa się z:

- generatora promieniowania rentgenowskiego, typu HF 320C Pantak o parametrach: zakres wysokich napięć od 5 – 320 kV; zakres prądu od 0,1 – 10 mA,
- ławy pomiarowej sztywno związanej z generatorem promieniowania, złożonej z precyzyjnie wypoziomowanego systemu jezdni o długości 7m oraz wózka pomiarowego zapewniającego swobodę ruchu w trzech kierunkach;
- zestawu laserów do pozycjonowania dawkomierzy i mierników w osi wiązki,
- kamery TV do zdalnego odczytu danych pomiarowych z badanych przyrządów.

Wzorcowanie przyrządów oraz napromieniowywanie wzorcowymi dawkami indywidualnych dawkomierzy (filmy, TLD) wykonywane w polach promieniowania X spełniających wymagania norm ISO 4037-1, 2 i 3 dla dwóch serii widm:

- seria „wąskich widm”: N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150, N-200, N-250, N-300 o energiach średnich 33 keV, 48 keV, 65 keV, 83 keV, 100 keV, 118 keV, 164 keV, 208 keV i 250 keV;
- seria „szerokich widm”: W-60, W-80, W-110, W-150, W-200, W-250, W-300 o energiach średnich 45 keV, 57 keV, 79 keV, 104 keV, 137 keV i 208 keV.

10.3. Stanowisko kalibracyjne skażeń powierzchniowych

Stanowisko wyposażone jest w zestaw wzorcowych źródeł powierzchniowych alfa (^{241}Am) i beta (^{14}C , ^{36}Cl , ^{90}Sr).

10.4. Stanowisko kalibracyjne radonowe

LWPDiR wyposażone jest w nowoczesną radonową komorę kalibracyjną, która daje możliwość wytwarzania wzorcowych wartości stężeń radonu oraz jego produktów rozpadu, pozwala również określić rozkład wielkości aerozoli będących nośnikami pochodnych radonu. Dzięki temu możliwe jest poprawne oszacowanie dawki efektywnej od promieniowania α radonu na układ oddechowy.

Radonowe stanowisko kalibracyjne jest komorą klimatyczną pozwalającą na automatyczne sterowanie temperaturą w granicach od -30°C do $+60^{\circ}\text{C}$ i wilgotnością względną w granicach od 10% do 95%. Stwarza to możliwość wzorcowania przyrządów i metod w różnych warunkach klimatycznych i badanie wpływu tych warunków na ich funkcjonowanie.

Komora ma objętość $12,35\text{m}^3$ i jest wyposażona w służę i dodatkowe mniejsze drzwi. Wewnętrzne powierzchnie komory ($33,9\text{m}^2$) są przewodzące, wykonane z nierdzewnej stali, żeby nie sprzyjały gromadzeniu się ładunków elektrycznych i nie zwiększały w ten sposób zjawiska plateau (osadzanie się naładowanych produktów rozpadu radonu na powierzchniach). Daje to możliwość osiągania większego zakresu stopnia równowagi promieniotwórczej między radonem i jego pochodnymi.

Objętość komory jest na tyle duża, żeby można było kalibrować jednocześnie wiele detektorów z węglem aktywowanym absorbującym radon lub kilka przyrządów opartych na aktywnych metodach pomiaru, tzn. wymagających przeciągania badanego powietrza przez filtr, z czym związany jest w ograniczonej objętości efekt czyszczenia atmosfery z produktów rozpadu. Ważne jest, żeby efekt ten był jak najmniejszy. Najczęściej stosuje się przepływy w granicach od 0,5 do 2 l/min. Dla objętości komory $12,35\text{ m}^3$ przy założeniu przepływu 1 l/min maksymalna szybkość wymian na godzinę przy pracy jednego przyrządu wynosi 0,005 a więc

zmniejszenie stężenia jąder kondensacji o 5% w ciągu 1 godziny wystąpi przy pracy 10 przyrządów.

Komora wyposażona jest w system wentylacyjny z filtrami węglowymi, co daje możliwość uzyskania bardzo czystej pod względem zawartości radonu i aerozoli atmosfery wewnątrz komory.

Radon może być wprowadzany do komory z zewnątrz lub wewnątrz w zamkniętym obiegu, przy użyciu jednym z dwóch atestowanych źródeł przepływowych radonu ($A=137$ kBq, $A=502,5$ kBq).

10.5. Stanowisko kalibracyjne beta

Wzorzec wtórny BSS 2 (Beta Secondary Standard), produkcji QSA Global GmbH, wyposażony w trzy źródła β -promieniotwórcze:

1. Pm-147 o średniej energii promieniowania beta równej 0,06MeV
2. Kr-85 o średniej energii promieniowania beta równej 0,24MeV
3. Sr-90/Y-90 o średniej energii promieniowania beta równej 0,8MeV

System zgodny jest z wymaganiami zawartymi w normie ISO 6980. Obecnie trwają prace nad rozszerzeniem akredytacji LWPDiR o wzorcowanie przyrządów w polu promieniowania beta. Rozszerzenie planowane jest na pierwszą połowę 2013 roku.

Personel wykonujący pomiary i wzorcowanie posiada odpowiednie wykształcenie, umiejętności i doświadczenie, a także bierze czynny udział w pracach naukowych i normalizacyjnych w ramach krajowych i międzynarodowych organizacji oraz prowadzi zajęcia dydaktyczne dla inspektorów ochrony radiologicznej.

Laboratorium wykonuje rocznie około 700 wzorcowań dla około 50 typów różnych przyrządów i sond stosowanych dla potrzeb kontroli narażenia zawodowego lub monitoringu narażenia ludności i środowiska (w tym także miejsc pracy). Do naszych klientów należą ośrodki onkologiczne, szpitale w tym zakłady medycyny nuklearnej, stacje sanitarno-epidemiologiczne, ośrodki przemysłowe, szkoły wyższe i instytucje naukowe, itp.

11. Zespół Prewencji i Służby Dozymetrycznej

Krajowa Całodobowa Służba Awaryjna powstała w 1958 r., kiedy zorganizowano w CLOR centralną ewidencję użytkowników źródeł promieniotwórczych oraz centralny systemu ewidencji i kontroli dawek indywidualnych (T. Musiałowicz, S. Dyż, J. Wysopolski). We współpracy z Techniczną Inspekcją Pracy oraz Inspekcją Sanitarno-Epidemiologiczną rozpoczęto systematyczną kontrolę użytkowników źródeł promieniotwórczych w całym kraju. W 1958r. powstaje Dział Kontroli Zakładów – DKZ (Tadeusz Musiałowicz) w którym zorganizowano system kontroli oraz doradztwa technicznego w zakładach stosujących zamknięte i otwarte izotopowe źródła promieniowania jonizującego oraz zorganizowano

system pomiaru i kontroli dawek indywidualnych wśród pracowników zakładów izotopowych i jądrowych.

Krajowa Całodobowa Służba Awaryjna działała w CLOR do grudnia 2004 r. Od 2005 roku jej zadania przejęło i spełnia Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych Państwowej Agencji Atomistyki.

Na bazie istniejącej kadry i specjalistycznej aparatury w 2005r. powstał w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej **Zespół Prewencji i Służby Dozymetrycznej**, który odpłatnie zapewnia fachowe porady i kompetentną pomoc w wypadkach uzasadnionego obaw zwiększonego ryzyka napromienienia źródłami promieniowania jonizującego.

Tabela CLOR-12 przedstawia przykłady zdarzeń radiacyjnych, w usuwaniu których uczestniczyła ekipa Służby Awaryjnej CLOR. Obecnie działająca ekipa Zespołu Prewencji i Służby Dozymetrycznej, której działania nadzoruje Zastępca Dyrektora CLOR – mgr inż. Krzysztof Isajenko, współpracuje przede wszystkim z działającą w Warszawie hutą ARCELOR MITTAL (poprzednio: huta „Warszawa”, a potem huta „Lucchini”), której bramki dozymetryczne zainstalowane na wjeździe do składowiska złomu bardzo często rejestrują w złomie obecność elementów silnie promieniotwórczych.

Tabela CLOR-12. Przykłady interwencji, w których brali udział pracownicy Służby Awaryjnej CLOR w latach 2002-2004.

Rodzaj zdarzenia	Przykłady zdarzeń radiacyjnych wymagających interwencji ekipy (2002-2004)
Awarie urządzeń	• Zablockowanie się źródła w wężu przesyłowym defektoskopu. • Zablockowanie się źródła w wężu przesyłowym aparatu do brachyterapii. • Perforacja osłony w pojemniku roboczym izotopowej aparatury kontrolno pomiarowej. • W czasie prac defektoskopowych źródło nie powróciło do pojemnika magazynowego defektoskopu. (Ir-192 o aktywności ok. 40 Ci). Źródło zostało zabezpieczone z udziałem ekipy służby awaryjnej. W wyniku przeprowadzonych działań dawki na osobę ograniczono do zakresu 1 – 3 mSv/h.
Kradzież lub zagubienie źródła	• Izotopowe czujki dymu. • Pojemniki ze źródłami Co-60.
Odnalezienie substancji promieniotwórczych	• Przetopienie źródeł Co-60 w piecu hutniczym. • Odnalezienie opadów poszpitalnych skażonych izotopami J-131 i Tc-99m w odpadach komunalnych. • W wyniku pomiarów spektrometrycznych i selekcji odpadów ekipa służby awaryjnej ustaliła, że w odpadach komunalnych znajdują się podkłady higieniczne skażone izotopem J-131. Nie udało się ustalić miejsca pochodzenia skażonych przedmiotów. • Złom skażony solami Ra-226.
Podjęcie o promieniotwórczość	• Mieszkaniec osiedla wykopał z ziemi metalowy pojemnik w kolorze żółtym – badania wykazały, że pojemnik był pusty i nie był przeznaczony do przechowywania źródeł promieniotwórczych. • Służby graniczne cofnęły wagon z nawozami mineralnymi twierdząc, że wykazują one zbyt wysoki poziom promieniowania. Pomiary wykonane na miejscu przez ekipę służby awaryjnej wykazały, że poziom jest typowy dla takich materiałów a przyczyną promieniowania jest naturalny izotop K-40.

Tabela CLOR-12. c.d..

Rodzaj zdarzenia	Przykłady zdarzeń radiacyjnych wymagających interwencji ekipy (2002-2004)
Podjęcie o promieniotwórczość (c.d.)	- W wyniku pomiarów spektrometrycznych na składowisku ekipa służby awaryjnej ustaliła, że w odpadach komunalnych nie ma długo-życiowych źródeł promieniotwórczych. - Puste opakowanie z oznakowaniem „koniczynki”, - Podniesiony poziom promieniowania wokoło samochodu z odpadami komunalnymi.
Pożar obiektu ze źródłami	Pożar obiektu wyposażonego w instalację PPOŻ z izotopowymi czujkami dymu (Am-241 lub Pu-239).
Inne	- Ćwiczenie Służby Awaryjnej i Państwowej Straży Pożarnej - Ćwiczenie Państwowej Straży Pożarnej oraz Służby Awaryjnej Prezesa PAA w oparciu o symulację wypadku drogowego samochodu ZUOP przewożącego odpady promieniotwórcze do Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych. - Zalanie pracowni izotopowej wodą deszczową.

12. Współpraca krajowa i międzynarodowa.

12.1. Projekty strategiczne i międzynarodowe.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej uczestniczy w wielu projektach strategicznych i międzynarodowych. W 2012 r. tematyka głównych prac badawczych CLOR realizowana jest w ramach Strategicznego projektu badawczego NCBiR „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej” w którym (od 2011 roku) CLOR jest koordynatorem Zadania 6 pt: „**Rozwój metod zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej dla bieżących i przyszłych potrzeb energetyki jądrowej**” i koncentruje się przede wszystkim na zagadnieniach ochrony radiologicznej elektrowni jądrowej oraz organizacją i prowadzeniem monitoringu otoczenia ośrodka jądrowego i jego pracowników wokół czterech kluczowych bloków tematycznych:

1. Opracowanie ogólnej koncepcji i metod badań środowiskowych (w tym zdrowotności) dla przewidywanej lokalizacji EJ.
2. Rozwój metod dozymetrii biologicznej oraz biofizycznych markerów i indykatorów wpływu promieniowania na organizmy żywe.
3. Adaptacja istniejących i opracowanie nowych metod radiometrycznych do zastosowań w ochronie radiologicznej pracowników, ludności i środowiska wokół EJ, z uwzględnieniem pomiarów niskich aktywności izotopów emitowanych z EJ oraz dozymetrii awaryjnej i retrospektywnej.
4. Opracowanie nowych lub udoskonalenie przyrządów do pomiarów radiometrycznych.

CLOR jest również członkiem konsorcjum realizującego Zadanie 3 w/w programu pt: „**Podstawy zabezpieczenia potrzeb paliwowych polskiej energetyki jądrowej**”. Liderem konsorcjum jest Uniwersytet Warszawski.

Priorytetowe znaczenie mają również te prace badawcze i wdrożeniowe CLOR, które dotyczą bezpieczeństwa i higieny pracy oraz ochrony ludności i ochrony środowiska realizowane m.in. w ramach projektu pt. „**Badanie i ocena narażenia pracowników na promieniowanie jonizujące od izotopów promieniotwórczych w zakładach medycyny nuklearnej**” w ramach programu wieloletniego „POPRAWA BEZPIECZEŃSTWA I WARUNKÓW PRACY” kierowanego przez Centralny Instytut Ochrony Pracy-PIB.

12.2. Współpraca z ośrodkami zagranicznymi.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej współpracuje z wieloma ośrodkami zagranicznymi poprzez udział w prowadzonych przez te instytucje programami badawczymi i naukowymi. Wśród najważniejszych prac i działań można tutaj wymienić:

- Komisja Wspólnoty Europejskiej
 - Udział w programie badawczym realizowanym w ramach 6-tego programu Ramowego UE „**ERICA, Environmental Risks from Ionising Contaminants: Assessment and Management**”
 - Udział w programie badawczym realizowanym w ramach 6-tego programu Ramowego UE „**Triage, monitoring and treatment – Handbook for management of the public In the event of malevolent use of radiation**” realizowanym wspólnie z sześcioma innymi partnerami konsorcjum przez 30 miesięcy. Partnerami Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) były: Belgian Nuclear Research Centre (SCK-CEN - koordynator projektu), Health Protection Agency (HPA, UK), Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA), Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland (STUK), World Health Organization (WHO) i ENVIROS Consulting (UK).
- Agencja Energii Jądrowej (*Nuclear Energy Agency NEA*)

Eksperci z Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej brali udział w pracach Komitetu Ochrony Radiologicznej i Zdrowia Publicznego „Committee on Radiation Protection and Public Health” (CRPPH)

 - Dyrektor Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej był koordynatorem prac w Komitecie CRPPH
 - Working Party on Nuclear Emergency Matters – Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej we współpracy z Państwową Agencją Atomistyki oraz Instytutem Fizyki Jądrowej w Krakowie
 - Expert Group on the Implications of ICRP Recommendations – CLOR
 - Expert Group on Occupational Exposure – CLOR
 - Expert Group on Best Available Techniques – CLOR
- Instytut Pierwiastków Transuranowych, ITU, JRC, Unia Europejska

Współpraca w projekcie „**Harmonizacja technik i metodologii w pomiarach promieniotwórczości w środowisku**” (12 laboratoriów z 8 krajów) W ramach projektu będą prowadzone prace w zakresie weryfikacji metodok stosowanych przy oznaczeniach rutynowych oraz w warunkach alarmowych

- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, MAEA, Wiedeń, Austria
 - Udział w ćwiczeniach interkalibracyjnych: oznaczanie ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra i ^{228}Ra w wodach
 - Udział w programie EMRAS (**Environmental Modeling for Radiation Safety**): prace w ramach Grupy Roboczej zajmującej się testowaniem i walidacją modeli komputerowych służących do przewidywania dawek i skażeń środowiska przy uwolnieniach promieniotwórczego jodu z instalacji jądrowych
- Komisja Helsińska (Helsinki Commission, Baltic Marine Environmental Protection Commission, Helcom Mors)
 - Prace związane z monitoringiem substancji promieniotwórczych w Morzu Bałtyckim (współpraca wszystkich krajów nadbałtyckich)
- Physikalisch-Technische Innovation, Erlangen, Niemcy
 - Testowanie i modernizacja produkowanych w Polsce stacji poboru aerozoli z przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego, typu ASS-500
- Wymiana wyników dotyczących radioaktywności przyziemnej warstwy powietrza atmosferycznego
 - Belarus State Department for Hydrometeorology, Centre of Radiation and Environment Monitoring, Białoruś;
 - Physikalisch – Technische Bundesanstalt, Niemcy;
 - Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, Finlandia;
 - “Frederic Joliot-Curie” National Research Institute for Radiobiology and Radiohygiene, Węgry;
 - State Nuclear Regulatory Administration, Ukraina;
 - Federal Office of Public Health, Division of Radiation Protection, Szwajcaria;
- Współpraca w dziedzinie pomiarów radonu i jego produktów rozpadu
 - Czech Technical University in Prague, Faculty of Dosimetry, Czechy;
 - National Radiation Protection Institute, Development & Rn Standardization, Czechy;
 - State Metrological Center for Radon, National Authority for NBC Protection, Czechy Institute of Chemical Process Fundamentals, Aerosol Laboratory, Czechy.

12.3. Współpraca z ośrodkami krajowymi.

Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej współpracuje także z wieloma ośrodkami krajowymi. Do najważniejszych punktów takiej współpracy należy współpraca w ramach sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych (stacje ASS-500). W ramach tej sieci CLOR współpracuje z 11 instytutami i wyższymi uczelniami w Polsce. Więcej informacji na ten temat było podane w rozdziale dotyczącym radiacyjnego monitoringu powietrza w Polsce.

Drugi ważny punkt współpracy krajowej, to współpraca w ramach sieci laboratoriów prowadzących pomiary promieniotwórczości naturalnej w surowcach i materiałach budowlanych. Sieć ta zrzesza obecnie ponad 30 laboratoriów, które na terenie naszego kraju prowadzą takie pomiary. CLOR prowadzi ogólnopolską bazę danych wyników pomiarów otrzymywanych ze wszystkich laboratoriów pracujących w sieci. Dodatkowo na Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej spoczywa obowiązek prowadzenia szkoleń dla pracowników prowadzących pomiary w ramach ww. sieci a także przygotowywanie źródełek wzorcowych i sprawowanie pieczy nad aparaturą i urządzeniami wykorzystywanymi w pomiarach.

Pracownia Wzorcowania – DLWW (Dozymetryczne Laboratorium Wzorców Wtórnych) jest od wielu lat członkiem rzeczywistym (numer rejestru 507) Klubu Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB. Pracownicy z tej Pracowni biorą czynny udział w szkoleniach i zebraniach sprawozdawczych Klubu.

Literatura

- [CLOR-1] – P. Krajewski – „Informacja o działalności i najważniejszych osiągnięciach Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej w 2012 r.”
- [CLOR-2] – „Statut Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej” z dnia 11.03.2011 r.
- [CLOR-3] – G. Krajewska – „Laboratorium do pomiarów jodu promieniotwórczego w tarczycy”
- [CLOR-4] – K. Szewczak – „Kontrola dawek indywidualnych w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej”
- [CLOR-5] – K. Wołoszczuk – „Opis LWPDiR”
- [CLOR-6] – K. Mamont-Cieśla – „Radon w środowisku domu i pracy”
- [CLOR-7] – M. Kowalska – „Cytogenetyczna rekonstrukcja dawki pochłoniętej – metoda badawcza oraz usługa pomiarowa i dydaktyczna CLOR”