

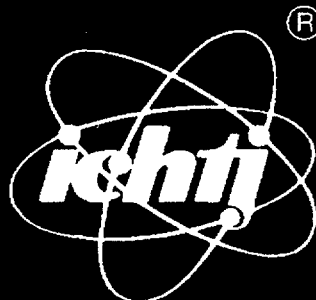


INCT-1/B/01

RAPORTY IChTJ. SERIA B nr 1/2001

**STAN OBECNY  
ORAZ PERSPEKTYWY ROZWOJU  
RADIOCHEMII I CHEMII JĄDROWEJ  
W POLSCE**

Jerzy Narbutt, Andrzej G. Chmielewski



**INSTYTUT CHEMII  
I TECHNIKI JĄDROWEJ**

**INSTITUTE OF NUCLEAR  
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY**

. . 33 / 33

INCT--1/13/01

PL0200

PL0200363

**Rada do Spraw Atomistyki  
Komisja Chemii Jądrowej i Radiacyjnej**

**RAPORTY IChTJ. SERIA B nr 1/2001**

**STAN OBECNY  
ORAZ PERSPEKTYWY ROZWOJU  
RADIOCHEMII I CHEMII JĄDROWEJ  
W POLSCE**

**Jerzy Narbutt, Andrzej G. Chmielewski**

**Warszawa 2001**

**Dr hab. Jerzy Narbutt, prof. IChTJ**

*Zakład Radiochemii, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej*

**Prof. dr hab. inż. Andrzej G. Chmielewski**

*Zakład Jądrowych Metod Inżynierii Procesowej, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej*

## **WYDAWCA**

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa

tel.: (0-22) 811 06 56, fax: (0-22) 811 15 32, e-mail: [sekdyrn@orange.ichtj.waw.pl](mailto:sekdyrn@orange.ichtj.waw.pl)

*Raport został wydany w postaci otrzymanej od Autorów*

UKD: 544.58.001.5"71"(438)

INIS: S38

SŁOWA KLUCZOWE: RADIOCHEMIA, CHEMIA JĄDROWA, BADANIA PODSTAWOWE, BADANIA APLIKACYJNE, PRACE TECHNOLOGICZNE, DZIAŁALNOŚĆ EDUKACYJNA, OŚRODKI NAUKOWE, PERSPEKTYWY ROZWOJU, POLSKA

## **Stan obecny oraz perspektywy rozwoju radiochemii i chemii jądrowej w Polsce**

W raporcie przedstawiono pokrótce rys historyczny, dorobek i aktualne trendy rozwojowe szeroko rozumianej radiochemii i chemii jądrowej na świecie, a także główne osiągnięcia oraz programy badań podstawowych i stosowanych ponad 30. krajowych ośrodków badawczych. Omówiono również w skrócie działalność dydaktyczną kilkunastu wyższych uczelni. Szerszy obraz działalności i osiągnięć ośrodków naukowo-badawczych w Polsce, jak również ich potencjalnych możliwości i perspektyw przynosi lektura załączników: wykazów publikacji w latach 1997-2000 oraz składów zespołów badawczych i wyposażenia aparaturowego tych ośrodków.

## **The present status and prospects for the development of radiochemistry and nuclear chemistry in Poland**

The report deals with a short history, achievements and trends of development of radiochemistry and nuclear chemistry in the world. It also presents the main achievements and short programmes of fundamental and applied research, as well as works on technology, as delivered by more than thirty research institutes and universities in Poland. The related teaching activities of Polish academic centres has been briefly discussed. The documents enclosed [list of publications (1997-2000); list of research groups; list of apparatus] bring a more detailed representation of the Polish research centres' activity in this field.

## SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	7
2. BADANIA PODSTAWOWE I APLIKACYJNE – PERSPEKTYWY ROZWOJU	10
2.1. Chemia pierwiastków promieniotwórczych. Transaktynowce	10
2.2. Chemia jądrowa. Chemia izotopów	11
2.3. Radioekologia	12
2.4. Chemia w energetyce jądrowej. Odpady promieniotwórcze	13
2.5. Metody radioanalityczne	14
2.6. Chemia radiofarmaceutyków	15
3. PROGRAMY BADAŃ PODSTAWOWYCH I APLIKACYJNYCH OŚRODKÓW NAUKOWYCH	16
3.1. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie	16
3.2. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie	18
3.3. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM w Świerku	19
3.4. Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Świerku, Zakład Spektroskopii i Techniki Jądrowej, Pracownia Radiochemii i Radioekologii	21
3.5. Instytut Energii Atomowej w Świerku, Zakład Doświadczalny Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych i Pracownia Metod Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych Zakładu Energetyki Jądrowej	21
3.6. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie	21
3.7. Uniwersytet Warszawski, Wydział Chemii, Pracownia Radiochemii	22
3.8. Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii, Zespół Naukowy Chemia Uranu	24
3.9. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii, Zakład Radiochemii i Chemii Koloidów	24
3.10. Uniwersytet Śląski, Zakład Fizyki Jądrowej i jej Zastosowań; Laboratorium Badania Niskich Aktywności	25
3.11. Uniwersytet Gdański, Wydział Chemii, Katedra Chemii Analitycznej	25
3.12. Uniwersytet Jagielloński, Wydział Chemii, Pracownia Chemii Jądrowej	26
3.13. Politechnika Łódzka, Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej	26
3.14. Politechnika Wrocławska, Laboratorium Badań Izotopowych	27
3.15. Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Fizyki, Zakład Zastosowań Radioizotopów	28
3.16. Politechnika Poznańska, Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej, Zakład Radio i Fotochemii	29
3.17. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej, Zakład Geofizyki Jądrowej	29
3.18. Akademia Medyczna w Łodzi, Zakład Medycyny Nuklearnej	29
3.19. Akademia Medyczna w Łodzi, Zakład Chemii Farmaceutycznej i Analizy Leków	30

3.20. Pomorska Akademia Medyczna w Szczecinie, Zakład Medycyny Nuklearnej	31
3.21. Akademia Medyczna w Białymstoku, Zakład Biofizyki	31
3.22. Centrum Medyczne Kształcenia Podyplomowego w Warszawie, Zakład Biochemii Klinicznej	31
3.23. Centrum Onkologii - Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie, Zakład Medycyny Nuklearnej	31
3.24. Instytut Medycyny Pracy im. prof. Jerzego Nofera w Łodzi, Zakład Ochrony Radiologicznej	32
3.25. Instytut Leków w Warszawie, Zakład Leków Izotopowych w Świerku	32
3.26. Instytut Oceanologii PAN, Sopot, Pracownia Radiochemii	33
3.27. Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, Laboratorium Radiometrii	34
3.28. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski w Gdyni, Ośrodek Oceanografii i Monitoringu Bałtyku	35
3.29. Państwowy Instytut Weterynaryjny, Puławy, Pracownia Ochrony Radiologicznej i Badań Izotopowych	36
3.30. Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii w Warszawie, Zakład Ochrony Radiologicznej i Radiobiologii, Pracownia Oceny Skażeń Środowiska	36
3.31. Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, Ośrodek Badań Weterynaryjnych, Puławy	36
3.32. Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii w Warszawie, Zakład Pomiarów Dozymetrycznych i Sprzętu Radiometrycznego	36
<b>4. PRACE TECHNOLOGICZNE – PERSPEKTYWY ROZWOJU</b>	<b>38</b>
4.1. Chemia cyklu paliwowego i odpadów promieniotwórczych	38
4.2. Produkcja radionuklidów i związków znakowanych	39
<b>5. PROGRAMY PRAC TECHNOLOGICZNYCH OŚRODKÓW NAUKOWYCH</b>	<b>40</b>
5.1. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie	40
5.2. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie	41
5.3. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM w Świerku	41
5.4. Instytut Energii Atomowej w Świerku, Zakład Doświadczalny Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych	42
5.5. Akademia Medyczna w Łodzi, Zakład Medycyny Nuklearnej	44
5.6. Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, Laboratorium Radiometrii	44
<b>6. DZIAŁALNOŚĆ EDUKACYJNA</b>	<b>45</b>
<b>7. PODSUMOWANIE</b>	<b>47</b>
<b>PODZIĘKOWANIE</b>	<b>48</b>

# 1. WSTĘP

Istnieje obecnie wiele różnych definicji terminów *radiochemia* i *chemia jądrowa*. Zgodnie z rozumieniem autorów niniejszego raportu, radiochemia jest jedną z dziedzin badań jądrowych, wśród których wyróżnić możemy jeszcze chemię radiacyjną, chemię jądrową, jądrową inżynierię chemiczną, fizykę jądrową i fizykę cząstek elementarnych. Radiochemia zajmuje się głównie otrzymywaniem układów chemicznych zawierających nuklidy promieniotwórcze i badaniem ich właściwości na podstawie pomiarów emitowanego promieniowania jądrowego. Ściśle związana z radiochemią chemia jądrowa koncentruje się na problematyce chemicznych aspektów własności jąder - ich struktury, stabilności, wzbudzeń, rozpadów, oddziaływań nukleonów i reakcji jądrowych. Obszary zainteresowań chemii jądrowej i radiochemii często się pokrywają, ale w odróżnieniu od radiochemii chemia jądrowa zajmuje się nie tylko nuklidami promieniotwórczymi, lecz obejmuje również całą tematykę efektów izotopowych w chemii oraz zagadnienia rozdzielania i wzbogacania izotopów trwałych i promieniotwórczych. Chemia radiacyjna, która zajmuje się badaniem wpływu promieniowania jonizującego na własności materii (radioliza, synteza radiacyjna itp.), ma wyodrębniony od radiochemii obszar zainteresowań i jest przedmiotem innego opracowania (J. Kroh, K. Bobrowski, A. G. Chmielewski, M. Foryś, J. Kaleciński, J. Rosiak, M. Wolszczak, Z. Zimek: *Stan obecny oraz perspektywy rozwoju chemii i technologii radiacyjnej w Polsce*, Raport IChTJ, Seria B, nr. 9/2000, Warszawa, 2000).

Tradycje badań w dziedzinie chemii jądrowej i radiochemii w Polsce sięgają wczesnych lat międzywojennych. Szybki rozwój tych badań nastąpił jednak dopiero po roku 1955, kiedy to utworzony został Instytut Badań Jądrowych i oddany do użytku reaktor jądrowy EWA, produkujący radionuklidy do celów badawczych. Badania prowadzone były głównie w ośrodkach warszawskim, krakowskim, wrocławskim i łódzkim, oraz w kilku mniejszych.

Podstawowe badania radiochemiczne obejmowały przede wszystkim chemię pierwiastków promieniotwórczych, chemię radionuklidów i efekty chemiczne reakcji oraz przemian jądrowych, radiochemiczne metody rozdzielcze, zastosowanie radioizotopów do badania mechanizmów reakcji i struktur związków chemicznych, radiometryczne metody analizy i chemię analityczną materiałów jądrowych łącznie z oznaczaniem ich składu izotopowego. W kilku ośrodkach prowadzono badania efektów izotopowych, które są jednym z obszarów zainteresowań chemii jądrowej. Wykonywano też analizę składu izotopowego próbek środowiskowych.

Ważne znaczenie, związane z istnieniem promieniotwórczości naturalnej, rozwojem energetyki jądrowej i przechowywaniem odpadów promieniotwórczych, koniecznością monitoringu środowiska po wybuchach jądrowych oraz zdarzających się - niestety - awariach obiektów jądrowych, mają badania migracji radionuklidów w środowisku i oznaczanie promieniotwórczych skażeń środowiska. Pomiarami radionuklidów (łącznie z niezbędnym niekiedy ich zateżaniem) w próbkach środowiskowych, żywności itp., ich specjacją oraz badaniem dynamiki procesów środowiskowych zajmowały się i zajmują liczne laboratoria radiometryczne oraz radiochemiczne w Polsce.

Prace ukierunkowane na zastosowania technologiczne koncentrowały się na przygotowaniu do wdrożenia w kraju energetyki jądrowej, a w szczególności nad rozwiązaniem problemu surowcowego (technologia przerobu rud uranowych), wzbogacaniem izotopowym uranu, wytwarzaniem reaktorowych materiałów paliwowych, analizą i próbami przerobu wypalonego paliwa jądrowego, przerobem odpadów promieniotwórczych umożliwiającym ich bezpieczne składowanie. Te kierunki prac radiochemicznych często

więzały się silnie z badaniami w dziedzinie chemii radiacyjnej. Opracowane zostały całe zestawy metod kontroli analitycznej dla jądrowej technologii chemicznej. Liczne techniki jądrowe zastosowane w chemii analitycznej umożliwiły znaczne rozszerzenie możliwości klasycznych metod analitycznych. Na szczególne podkreślenie zasługuje tu rozwój neutronowej analizy aktywacyjnej (NAA), która w połączeniu z radiochemicznymi metodami rozdzielania jonów metali należy do grupy metod nieorganicznej analizy śladów o najlepszych dolnych granicach wykrywalności i oznaczalności.

Prowadzono również badania i wdrażano nowe technologie produkcji radionuklidów i związków znakowanych do celów badawczych i technologicznych oraz nowe technologie stosowania radioznaczników, zwłaszcza źródeł otwartych, w przemyśle i medycynie. Warto dodać, że dodatkowym wynikiem prac nad technologiami jądrowymi było opracowanie lub rozwinięcie szeregu technologii rozdzielania substancji (np. metali), które znalazły szerokie zastosowania w gospodarce, a w szczególności w ochronie środowiska. Można tu wymienić technologie ekstrakcji ciecz-ciecz, wymiany jonowej, wymiany chemicznej itp., które stały się podstawą hydrometalurgii oraz wielu metod ochrony środowiska. Rozwijane dla potrzeb przemysłu jądrowego metody ceramiki mokrej, np. metoda zol-żel, stały się podstawą wytwarzania materiałów ceramicznych o specjalnych własnościach. W dziedzinie tej polscy uczeni mają pionierskie, znaczące dla jej światowego rozwoju osiągnięcia.

Pod koniec lat 70. nastąpił wyraźny regres badań w dziedzinie chemii jądrowej i radiochemii w Polsce, który odzwierciedlał aktualną sytuację na świecie. W okresie późniejszym dużą szkodę przyniosła tu decyzja Rządu RP (1991) o zaniechaniu budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. Spowodowała ona przerwanie prac badawczych i odstąpienie od wdrożenia wielu oryginalnych technologii chemicznych i radiochemicznych ukierunkowanych na potrzeby energetyki jądrowej.

Analiza obecnego stanu badań i przewidywanych perspektyw radiochemii oraz chemii jądrowej na świecie pozwala jednak na optymistyczny wniosek, że kryzys tych dyscyplin mamy już za sobą. Celem niniejszego opracowania jest próba oceny aktualnej sytuacji i perspektyw rozwoju obu tych dyscyplin w naszym kraju.

\*\*\*\*\*

Badania w dziedzinie chemii jądrowej i radiochemii w Polsce prowadzone są przez wyspecjalizowane instytuty naukowe działające pod auspicjami Państwowej Agencji Atomistyki i Ministerstwa Obrony Narodowej oraz przez wyższe uczelnie (Ministerstwo Edukacji Narodowej). Przy Państwowej Agencji Atomistyki działa opiniotwórcza Rada ds. Atomistyki. Badaniami aplikacyjnymi i technologicznymi zainteresowana jest Sekcja Zastosowań Polskiego Towarzystwa Nukleonowego.

W skali światowej centralną rolę odgrywa Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, która inicjuje, organizuje i dofinansowuje badania oraz prace wdrożeniowe w szerokim zakresie badań jądrowych; również radiochemicznych. Badania takie coraz częściej prowadzone są we współpracy międzynarodowej w ramach umów bilateralnych oraz dużych programów międzynarodowych, np. programów finansowanych przez Unię Europejską. Umożliwia to naukowcom krajów mniej inwestujących w naukę dostęp do bardzo kosztownych unikalnych urządzeń badawczych, bez których trudno dziś prowadzić zaawansowane badania jądrowe. Niestety, Polska nie zgłosiła swego udziału do programu badań jądrowych Euroatomu, wchodzących w skład 5. Programu Ramowego UE.



W ramach Federacji Europejskich Towarzystw Chemicznych (FECS) od roku 2000 działa grupa robocza chemii jądrowej i radiochemii, z udziałem m.in. przedstawiciela PTCh.

W kraju wydawane są dwa czasopisma poświęcone wyłącznie zagadnieniom atomistyki, które m.in. publikują prace z chemii jądrowej i radiochemii: specjalistyczna anglojęzyczna *Nukleonika*, notowana na liście filadelfijskiej, i popularno-naukowe *Postępy Techniki Jądrowej*, a także dwa czasopisma poświęcone zagadnieniom medycyny nuklearnej i radiofarmacji: półrocznik *Problemy Medycyny Nuklearnej* i wydawane od roku 1999 *Nuclear Medicine Review Central & Eastern Europe*. Prace z dziedziny chemii jądrowej i radiochemii są też okazjonalnie publikowane w innych polskich czasopismach naukowych (*Chemia Analityczna*, *Polish Journal of Chemistry* i in.). Niedawno ukazał się numer *Wiadomości Chemicznych* (Nr 9/10, 1999) w całości poświęcony problematyce radiochemii i chemii jądrowej. Większość polskich prac badawczych z obu tych dziedzin publikowana jest jednak w czasopismach międzynarodowych, np. *Radiochimica Acta*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *Applied Radiation and Isotopes*, *Separation Sciences and Technology*, *Solvent Extraction and Ion Exchange*, *Journal of Nuclear Medicine*, *European Journal of Nuclear Medicine*, *Journal of Environmental Radioactivity*, *The Sciences of the Total Environment* i in. W skład rad redakcyjnych wielu tych czasopism (*Nukleonika*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *Chemia Analityczna*) wchodzi polscy chemicy działający w dziedzinach chemii jądrowej i radiochemii.

Od kilku lat w kraju odbywają się i cieszą dużym zainteresowaniem kolejne konferencje radiochemii i chemii jądrowej (poprzednia w 1998, następna w 2001 roku), organizowane przez Zakład Radiochemii Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej.

\*\*\*\*\*

Raport niniejszy prezentuje pokrótce rys historyczny, dorobek i aktualne trendy rozwojowe szeroko rozumianej radiochemii i chemii jądrowej na świecie. W dalszych rozdziałach przedstawia on także główne osiągnięcia i krótkie programy badań podstawowych i aplikacyjnych oraz programy prac technologicznych w tej dziedzinie ponad 30. krajowych ośrodków badawczych: instytutów resortu atomistyki, wyższych uczelni i innych jednostek, łącznie z instytutami wojskowymi. Pobieźnie omówiona została też działalność dydaktyczna kilkunastu wyższych uczelni w dziedzinie radiochemii i chemii jądrowej lub dyscyplin pokrewnych. Pełniejszy obraz osiągnięć ośrodków naukowo-badawczych w Polsce, jak również ich potencjalnych możliwości i perspektyw w omawianej dziedzinie przynosi lektura załączników do niniejszego opracowania:

1. Zespoły badawcze;
2. Wyposażenie aparaturowe;
3. Publikacje ośrodków w latach 1997-2000.

Załączniki te dostępne są w Dziale Informacji Naukowo-Technicznej IChTJ.

## 2. BADANIA PODSTAWOWE I APLIKACYJNE – PERSPEKTYWY ROZWOJU

Okresem najpłodniejszego rozwoju badań podstawowych w dziedzinie radiochemii i chemii jądrowej były pierwsze cztery - pięć dziesięcioleci ubiegłego wieku, jeżeli za czas narodzin tych dyscyplin naukowych przyjmiemy rok 1898 - rok odkrycia polonu i radu. Uczestnicząc w dokonywaniu wielkich odkryć fizyki subatomowej i interpretując je w specyficzny chemiczny sposób radiochemia umożliwiła właściwe zrozumienie zaskakujących wyników doświadczeń fizycznych i odkryła przed badaczami nową dziedzinę chemii substancji promieniotwórczych. Dzięki temu można było nie tylko otrzymywać i badać zupełnie nowe substancje, ale też badać nowe właściwości znanych substancji w dotąd niedostępnym obszarze stężeń śladowych, gdzie własności te są często odmienne od obserwowanych w obszarze klasycznej chemii makroilości. Koniec tego okresu wielkich odkryć wyznaczyło odkrycie energii jądrowej i sformułowanie podstawowych praw fizyki jądrowej - przełomowe dla świata osiągnięcie nauki XX wieku.

Prowadzone obecnie badania podstawowe w dziedzinie radiochemii i chemii jądrowej są w dalszym ciągu powiązane z rozwojem fizyki: odkrywaniem nowych pierwiastków, nowych typów rozpadu promieniotwórczego i nowych, nieznanych jeszcze prawidłowości określających wpływ budowy jądra atomowego na właściwości substancji (efekty izotopowe); i mają duże znaczenie dla samej chemii. Ciągły rozwój wiedzy w dziedzinie chemii nowych najcięższych pierwiastków pozwala na lepsze rozumienie regularności w okresie okresowym, a w szczególności wpływu efektów relatywistycznych na właściwości chemiczne pierwiastków. Stosunkowo dużym zainteresowaniem cieszą się prace ukierunkowane na badanie chemii środowiska, w tym oznaczanie skażeń promieniotwórczych i badanie migracji radionuklidów. Poniżej omówione zostaną najważniejsze aktualne kierunki rozwoju badań podstawowych i aplikacyjnych w dziedzinie radiochemii i chemii jądrowej

### 2.1. Chemia pierwiastków promieniotwórczych. Transaktynowce

Jednym z głównych bodźców rozwoju radiochemii i chemii jądrowej na przełomie XX i XXI wieku jest wciąż istniejące sprzężenie zwrotne między nimi a fizyką jądrową. Coraz potężniejsze akceleratory ciężkich jonów umożliwiają syntezę nowych pierwiastków promieniotwórczych - transaktynowcowych ( $Z > 103$ ), a w szczególności ich coraz dłużej żyjących izotopów, co stwarza szansę na badanie właściwości chemicznych tych pierwiastków. Co prawda, pierwiastki transaktynowcowe otrzymywane są w ilościach pojedynczych atomów i to atomów żyjących najwyżej od kilku do kilkudziesięciu sekund, ale z tym radiochemia nauczyła się już sobie radzić. Opracowywane są coraz bardziej efektywne szybkie metody rozdzielcze, proste lecz często wykorzystujące potężną, bardzo skomplikowaną aparaturę. Kluczem do projektowania nowych, bardzo kosztownych reakcji syntez jądrowych są obliczenia fizyków teoretyków, pozwalające przewidywać, które izotopy danego pierwiastka promieniotwórczego powinny być wystarczająco trwale nie tylko do celów ich identyfikacji, lecz i do wykonania choćby prymitywnych eksperymentów chemicznych. Wiodącą rolę w tej dziedzinie odgrywają fizycy polscy: profesor Adam Sobiczewski i jego współpracownicy.

Radiochemicy i chemicy jądrowi nie są jednak wyłącznie "konsumentami" badającymi nowe pierwiastki "wyprodukowane" przez fizyków. Ich zadaniem jest bowiem nie tylko badanie własności nowych pierwiastków, lecz i przygotowanie w ilościach wagowych

substratów projektowanych reakcji jądrowych - zarówno tarcz, często z ciężkich pierwiastków promieniotwórczych ( $Z \leq 99$ ), które należy wydzielić w odpowiedniej formie chemicznej, jak i określonych izotopów ciężkich atomów bombardujących, np.  $^{48}\text{Ca}$ . Równie odpowiedzialnym zadaniem jest zaprojektowanie układu do transportu powstałych jąder, zwykle strumienia gazu lub aerozolu, i układu do badania własności chemicznych tych pierwiastków. Nie łatwa jest też interpretacja wyników doświadczeń wykonanych z pojedynczymi atomami. Ze względu na krótki czas życia doświadczenia muszą być bardzo proste (np. pomiar podziału radionuklidów między dwiema fazami lub pomiar prędkości ich przemieszczania się w układzie), a ponadto klasyczna statystyka dużej liczby atomów musi być zastąpiona statystyką liczby zdarzeń (procesów jednostkowych), w których uczestniczy każdy atom do momentu rozpadu promieniotwórczego. Szczególnie przydatne do tego celu są więc szybkie wielostopniowe procesy chromatograficzne w układach gaz - ciało stałe lub ciecz - ciecz.

Rozwój badań w dziedzinie chemii pierwiastków najcięższych jest spowodowany głównie czynnikiem ciekawości poznawczej. Od niedawna ważną rolę zaczął tu odgrywać nowy element. Chemicy wreszcie docenili znaczenie wielkiego odkrycia fizyki z początku XX wieku i zrozumieli, że w świecie, w którym żyjemy, prędkość światła jest wielkością skończoną, a fakt ten ma ważne konsekwencje w chemii. Relatywistyczny wzrost masy elektronów poruszających się wokół ciężkich jąder z prędkościami porównywalnymi z prędkością światła prowadzi do stabilizacji orbitali  $s$  i  $p_{1/2}$ , a efekt ten przejawia się szczególnie silnie w przypadku pierwiastków ciężkich, zwłaszcza pierwiastków okresu 6. i 7. Wynika stąd zakłócenie regularności zmian własności chemicznych i fizycznych w grupach układu okresowego: stabilizacja niższych stopni utlenienia i różne nieoczekiwane własności pierwiastków najcięższych. Choć efekty relatywistyczne nie są związane z promieniotwórczością, to nietrwałość jąder pierwiastków najcięższych tłumaczy szczególne znaczenie tych efektów dla radiochemii. Efekty relatywistyczne nie tylko wyjaśniają, dlaczego tak trudne jest przewidywanie właściwości pierwiastków transaktynowcowych, lecz przede wszystkim wskazują, jak ukierunkować badania nad ich chemią. Dotyczy to nie tylko pierwiastków okresu 7. lecz i 6., a więc wyraźnie pod tym względem zaniedbanych polonu, astatu i radonu. Chemia tych pierwiastków jest wciąż za mało poznana, a zainteresowanie nią niewielkie. Nowe poglądy wynikające z uwzględnienia efektów relatywistycznych powinny stać się bodźcem do zmiany tego stanu rzeczy i umożliwić zarówno właściwe projektowanie dalszych badań własności chemicznych ciężkich pierwiastków promieniotwórczych, jak i interpretację wyników doświadczeń.

## 2.2. Chemia jądrowa. Chemia izotopów

Ostatnie lata przyniosły ważne nowe odkrycia w chemii izotopów. Okazało się, że powszechnie przyjęta teoria tłumacząca subtelne różnice właściwości chemicznych izotopów jako efekty różnic ich mas atomowych i wynikających stąd różnic energii oscylacji wiązań w cząsteczce uniemożliwia interpretację wielu faktów doświadczalnych. Konieczne stało się uwzględnienie dodatkowo efektu pola jądrowego. Stwierdzono, że rozmiar i kształt jądra oraz rozkład ładunku w jądrze mają wpływ na równowagi chemiczne w reakcjach wymiany elektronów i ligandów. Dzieje się tak za sprawą różnic pola elektromagnetycznego jąder izotopowych, które wpływając na energie orbitali elektronowych atomu powodują zmianę własności chemicznych cząsteczek.

Niezwykle ważny dla medycyny nuklearnej radionuklid  $^{18}\text{F}$ , stosowany w pozytonowej tomografii emisyjnej (PET), otrzymuje się z trwałego izotopu tlenu  $^{18}\text{O}$ . Rozwój tej niezwykle skutecznej metody diagnostycznej jest ograniczony małą dostępnością na rynku światowym

wody wzbogaconej w izotop  $^{18}\text{O}$ . Najnowsze badania polskie (IChTJ) wskazują, że stosowana dotychczas do wzbogacania wody energochłonna metoda destylacji może być zastąpiona bardziej wydajnymi metodami membranowymi. Pomiar stosunku izotopowego  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  pozwala na określenie pochodzenia oraz autentyczności soków owocowych i win. Metoda ta została przyjęta jako podstawa stosowania odpowiednich dwóch norm obowiązujących w Unii Europejskiej.

Ostatnio ujawnione zostały koncepcje stworzenia nowej generacji procesorów mikroelektronicznych zawierających krzem o kontrolowanym składzie izotopowym, w miejsce dotychczas stosowanego krzemu o składzie naturalnym:  $^{28}\text{Si}$ (92,23%),  $^{29}\text{Si}$ (4,67%),  $^{30}\text{Si}$ (3,10%). Sytuacja taka sprawia, że metody rozdzielania izotopów krzemu stały się ostatnio przedmiotem zainteresowania na świecie.

Stosunkowo niedawno fizycy odkryli nowe typy rozpadów jąder. Jednym z nich jest rozpad klasterowy, w wyniku którego ciężkie jądra emitują cząstki ciężkie, np. izotopy od C do Si. Jest to jednak zjawisko tak rzadkie (od  $10^9$  do  $10^{16}$  razy mniej prawdopodobne od rozpadu  $\alpha$  danego nuklidu), że dla jąder szczególnie długożyciowych metody fizyczne są zbyt mało czułe, by je wykryć. Czynione są próby zastosowania metod radiochemicznych do wydzielania i zateżania promieniotwórczych produktów oczekiwanego rozpadu klasterowego takich jąder, np.  $^{232}\text{Th}$ .

### 2.3. Radioekologia

Skażenie środowiska naturalnego toksycznymi chemikaliami, produktami spalania węgla oraz skażenia promieniotwórcze stanowią bardzo poważny problem ekologiczny. Groźne, zwłaszcza w skali lokalnej, skażenia promieniotwórcze występują głównie w rejonach, gdzie zlokalizowane są lub były zakłady przerobu wypalonego paliwa jądrowego i produkcji broni jądrowej, w rejonach prób jądrowych, w rejonach katastrof jądrowych, a także w rejonach wydobywania rud uranowych. Natomiast radiochemiczne badania rozkładu geograficznego skażeń radionuklidami i metalami ciężkimi na przestrzeni lat i wieków prowadzą do zaskakujących wniosków obalających mit, że i w tej dziedzinie współczesna cywilizacja ma szczególnie szkodliwy wpływ na środowisko w skali globalnej. Także badanie skutków procesów zachodzących przed dwoma miliardami lat w naturalnych reaktorach jądrowych w rejonie Oklo w Gabonie pokazało, że zasięg rozprzestrzeniania się produktów rozszczepienia uranu w środowisku jest niewielki.

Badanie zachowania się w środowisku śladowych ilości radionuklidów, zarówno naturalnych - pochodzenia kosmicznego i ziemskiego, jak i sztucznych - wprowadzonych przez człowieka, ma na celu nie tylko oznaczanie ewentualnych skażeń, lecz również badanie i modelowanie procesów środowiskowych. Na przykład badanie dystrybucji kosmogenicznego  $^{32}\text{P}$  umożliwia zbadanie obiegu fosforu w ekosystemie. Dobrze znane są metody datowania obiektów geologicznych, archeologicznych itp. za pomocą znaczników promieniotwórczych, przede wszystkim (ale nie tylko)  $^{14}\text{C}$ , lub za pomocą oznaczania składu izotopowego próbki. Metody te wymagają stosowania subtelnych radiochemicznych metod wydzielania śladowych ilości określonych pierwiastków z próbek. Do badań takich stosowane są również metody polegające na wyznaczaniu zawartości w próbce określonych izotopów trwałych. Pomiar stosunku izotopowego  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  okazał się znakomitą metodą bilansowania środowiskowych strumieni siarki i jest to jedyna metoda określania związków siarki pochodzenia antropogenicznego. Pomiar zawartości trytu w próbkach wodnych, poprzedzony zateżaniem elektrolitycznym, pozwala na rozróżnienie i zbilansowanie zanieczyszczenia wód gruntowych wodami kopalnianymi oraz na określenie wieku wód.

Ciągły monitoring stężenia w powietrzu atmosferycznym promieniotwórczych izotopów gazów (głównie Kr, Xe i I) uwalniających się podczas podziemnych prób jądrowych umożliwia wykrywanie i potwierdzanie tych prób i stanowi narzędzie nadzoru przestrzegania Traktatu o Całkowitym Zakazie Prób Jądrowych. Pomiary zmian stężenia izotopów ksenonu ( $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ) w czasie pozwalają wnioskować o rodzaju źródła powodującego skażenie promieniotwórcze atmosfery (awaria reaktora jądrowego, produkcja paliwa jądrowego, czy eksplozja nuklearna). W przypadku eksplozji możliwe jest określenie nie tylko typu ładunku (pluton, uran), ale również sposobu przeprowadzenia eksplozji. Głównym źródłem  $^{133}\text{Xe}$  ( $T_{1/2} = 5,3$  dnia) są uwolnienia z elektrowni jądrowych.

Głównymi źródłami  $^{85}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 10,8$  lat) są zakłady przerobcze paliwa jądrowego. Dobrze określone parametry źródła i obojętność chemiczna czynią z  $^{85}\text{Kr}$  użyteczny znacznik do badań regionalnej i globalnej cyrkulacji powietrza. Monitoring  $^{85}\text{Kr}$  jest ważny do nadzorowania bezpieczeństwa nuklearnego; umożliwia m.in. wykrycie potajemnej produkcji plutonu do broni nuklearnej.

Jednym z najważniejszych zadań badawczych współczesnej radiochemii środowiska i radioekologii jest nie tylko kontrola radioaktywnego skażenia środowiska naturalnego oraz rozpoznanie procesów geochemicznego obiegu i nagromadzania radionuklidów w materii żywej, ale także poznanie wielkości dawki radiacyjnej oraz szacowanie długoterminowych skutków radiologicznych spowodowanych przyswajaniem przez ludzi śladowych ilości pierwiastków promieniotwórczych zawartych w powietrzu, wodzie i żywności, zwłaszcza silnie radiotoksycznych emiterów cząstek alfa; zarówno naturalnych, jak i sztucznych. W wielu krajowych placówkach badawczych prowadzone są badania nad oznaczaniem radionuklidów Ra-226, Pb-210, Po-210, Sr-90, Cs-137 oraz Pu-239+240 w składnikach ekosystemów naturalnych, ich przenoszenia wzdłuż łańcuchów troficznych i przedostawania się drogą pokarmową do ciała ludzkiego.

## 2.4. Chemia w energetyce jądrowej. Odpady promieniotwórcze

Skażenie promieniotwórcze środowiska ma - w erze nuklearnej - charakter zarówno naturalny, jak i antropogeniczny. Źródłem skażeń naturalnych są długożyciowe radionuklidy znajdujące się w skorupie ziemskiej od czasu jej powstania oraz promieniotwórcze produkty ich rozpadu, natomiast skażenia sztuczne (antropogeniczne) są spowodowane działalnością człowieka. Zaliczamy tu skażenia wywołane wybuchami jądrowymi, produkcją broni jądrowej, produkcją energii jądrowej oraz produkcją i wykorzystaniem radionuklidów jako źródeł i znaczników promieniotwórczych. Charakter antropogeniczny mają też skażenia wywołane rozproszaniem w środowisku radionuklidów naturalnych w wyniku spalania paliw kopalnych. Praktycznie jedyny strumień radionuklidów, który możemy kontrolować, stanowią radionuklidy powstające w wyniku produkcji energii jądrowej oraz produkcji źródeł i znaczników promieniotwórczych. Radionuklidy powstające w procesie produkcji energii jądrowej oraz pozostające po wykorzystaniu źródeł i znaczników noszą nazwę odpadów promieniotwórczych.

Główne źródło odpadów promieniotwórczych na świecie stanowią reaktory jądrowe - energetyczne (obecnie kilkaset) i w mniejszym stopniu badawcze. Zagadnienia przerobu wypalonego paliwa jądrowego oraz przerobu i składowania odpadów promieniotwórczych stanowią dziś główny problem hamując rozwój energetyki jądrowej. Ich rozwiązanie, warunkujące dalszy postęp w tej dziedzinie nie będzie jednak możliwe bez udziału radiochemii i chemii jądrowej. Ranga problemu unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych jest w różnych krajach odmienna. Konieczność ich przerobu i

unieszkodliwiania stanowi wielki problem praktyczny w krajach, które mają rozwiniętą energetykę jądrową, a zwłaszcza w tych, które w wyniku wieloletniej produkcji broni jądrowej nagromadziły ogromne ilości niezagospodarowanych jeszcze odpadów promieniotwórczych. W pozostałych krajach, które produkowały i stosowały radionuklidy do celów badawczych, przemysłowych i medycznych, w tym i w Polsce, waga problemu jest mniejsza. Tym nie mniej, wyniki realizowanego w latach 1997 - 1999 Strategicznego Programu Rządowego SPR-4 pt. "Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym" pokazały, że nie jest ona wcale mała. Jednakże można oczekiwać, że ze względu na brak w planach rządowych do roku 2020 programu dotyczącego produkcji energii jądrowej w Polsce, problemy związane z przerobem i unieszkodliwianiem odpadów promieniotwórczych nie będą miały charakteru priorytetowego.

## 2.5. Metody radioanalityczne

Potrzeby wynikające z rozwoju prac badawczych, zarówno o charakterze podstawowym, jak i technologicznym, a przede wszystkim konieczność monitoringu radionuklidów w środowisku, stymulują szybki rozwój metod radioanalitycznych. Rozwój technologii nowych materiałów (np. półprzewodniki), zanieczyszczenie środowiska naturalnego oraz rozwój nauk biomedycznych stwarzają zapotrzebowanie na oznaczanie coraz to niższych zawartości pierwiastków śladowych w różnorodnych matrycach. Neutronowa analiza aktywacyjna (NAA) z wykorzystaniem reaktora jądrowego jako źródła neutronów, z racji dobrych granic detekcji i oznaczalności w stosunku do dużej liczby pierwiastków, niewielkich efektów matrycowych oraz braku ślepej próby, co korzystnie odróżnia NAA od innych metod, zajmuje wciąż wybitną pozycję wśród innych metod nieorganicznej analizy śladowej. Zakres zastosowań tej metody jest bardzo szeroki - od kontroli poziomu zanieczyszczeń bardzo czystych metali, stopów, półprzewodników, poprzez oznaczanie w tkankach i płynach ustrojowych pierwiastków ważnych dla życia i pierwiastków toksycznych, poprzez geologię, kosmochemię, ochronę środowiska, nauki sądowe aż do historii sztuki. Bardzo ważną rolę odgrywa NAA w atestacji (certyfikacji) materiałów odniesienia (CRM) oraz ogólnie w zapewnieniu jakości w analizie śladowej. Szczególną rolę w tym zakresie mogą odegrać tzw. "metody definitywne" lub "bardzo dokładne" oparte na kombinacji aktywacji neutronowej z selektywnym i ilościowym wydzieleniem danego pierwiastka za pomocą chromatografii kolumnowej z końcowym pomiarem gamma-spektrometrycznym. Metody takie, których opracowanie zapoczątkowano w Zakładzie Chemii Analitycznej IChTJ nie są przeznaczone do analiz rutynowych ale do weryfikacji dokładności innych metod analizy śladowej oraz do atestacji materiałów odniesienia. Metody instrumentalne umożliwiają zwiększanie czułości i dokładności oznaczeń substancji śladowych tylko do pewnej granicy, określanej zwykle obecnością interferentów. Wynika stąd konieczność selektywnego wydzielenia lub zateżania oznaczanego pierwiastka, najczęściej metodami chemicznymi.

Zastosowanie wskaźników promieniotwórczych jest niezwykle cennym narzędziem przy opracowywaniu nowych metod rozdzielczych dla potrzeb nie tylko NAA i badań radiochemicznych, ale także dla zastosowania w sprzężeniu z innymi technikami analizy instrumentalnej. Promieniotwórcze izotopy wielu pierwiastków stosowane są też w licznych wariantach metody rozcieńczenia izotopowego. Substancje znakowane radionuklidami stosowane są w elektrochemii, np. do badania procesów elektrosorpcji czy reakcji elektrodowych.

## 2.6. Chemia radiofarmaceutyków

Największe chyba wyzwanie stawia współczesnej radiochemii medycyna nuklearna. Ogromny postęp, jaki w ostatnich latach dokonał się w technice detekcji i komputerowym przetwarzaniu danych, spowodował burzliwy rozwój tej dyscypliny, a to z kolei doprowadziło do wzrostu potrzeb praktycznych i postawiło przed radiochemią nowe zadania. Wysoko specyficzne radiofarmaceutyki nowej generacji, lokujące się w organizmie w określonych tkankach na zasadzie rozpoznania molekularnego, są na ogół związkami kompleksowymi lub biochemicznymi, znakowanymi radionuklidami. Ich otrzymywanie wymaga rozwiązania wielu trudnych problemów z zakresu radiochemii, chemii koordynacyjnej, oraz radiochemicznej syntezy organicznej lub biosyntezy. W zależności od postawionych zadań, a w szczególności od celu (diagnostyczny czy terapeutyczny) potrzebne są radionuklidy, zwykle krótkożyciowe, o ściśle określonej charakterystyce promieniotwórczej, a często i o określonych własnościach chemicznych. Zastosowanie w medycynie pozytonowej tomografii emisyjnej (PET) i emiterów pozytonów o czasach połowicznego zaniku rzędu minut ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$  itp.) spowodowało rozwój szybkich automatycznych metod syntezy i analizy chemicznej znakowanych nimi związków.

Niemal idealne dla diagnostyki medycznej właściwości jądrowe izotopu  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , jego niski koszt i powszechne stosowanie w medycynie nuklearnej przyczyniły się do ogromnego rozwoju chemii koordynacyjnej technetu. Liczne zastosowania znajdują i inne radionuklidy. Potrzebne i poszukiwane są wciąż nowe, coraz bardziej specyficzne radiofarmaceutyki i nowe metody ich syntezy. Coraz większą rolę w medycynie nuklearnej zaczyna odgrywać radioterapia, a z nią radionuklidy beta- i alfa-promieniotwórcze oraz wysokoselektywne radiofarmaceutyki terapeutyczne trzeciej generacji. Szeroki obszar multidyscyplinarnych badań i zastosowań wciąż czeka na nowych odkrywców.

### 3. PROGRAMY BADAŃ PODSTAWOWYCH I APLIKACYJNYCH OŚRODKÓW NAUKOWYCH

#### 3.1. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie

IChTJ jest jedyną jednostką w Polsce prowadzącą badania nad chemią pierwiastków transuranowych, wyposażoną w sprzęt do pracy z emiterami alfa (niestety, mocno już przestarzały), posiadającą odpowiednie laboratoria i wciąż jeszcze czynną zawodowo wykwalifikowaną kadrę. W ramach współpracy międzynarodowej Instytut uczestniczy w badaniach właściwości chemicznych pierwiastków najcięższych: nobelu, lorensu i rutherfordu, a także prowadzi unikalne badania efektów izotopowych w chemicznych procesach rozdzielczych. Warto podkreślić uznane w świecie wcześniejsze osiągnięcia Instytutu w dziedzinie radiochemicznych metod rozdzielczych, teorii ekstrakcji jonów metali oraz chemii pierwiastków f-elektronowych: lantanowców i aktynowców.

Obecny program podstawowych badań radiochemicznych Instytutu obejmuje prace nad chemią ciężkich pierwiastków promieniotwórczych, w szczególności badania efektów relatywistycznych na ich własności chemiczne. Zbadano eksperymentalnie hydrolizę jonu  $Rf^{4+}$  i zinterpretowano jej wielkość jako wynik silnych efektów relatywistycznych. Na podstawie prostych przesłanek teoretycznych obliczono nowe wartości promieni jonów pierwiastków 104 - 106. Prowadzone są badania nad eksperymentalnym wyznaczeniem promienia jonu  $No^{3+}$ . Badany jest także wpływ efektu relatywistycznego na hydrolityczne własności pierwiastków 7 okresu takich jak  $Fr^+$ ,  $Ra^{2+}$ ,  $Ac^{3+}$  i  $Cm^{3+}$ . W roku 1997 Instytut wraz z Państwową Agencją Atomistyki przeprowadził pierwszy w Polsce międzylaboratoryjny eksperyment porównawczy metod oznaczania  $^{226}Ra$  i  $^{228}Ra$  w próbkach modelujących zasolone wody kopalni węgla, w którym uczestniczyło 9 laboratoriów krajowych.

Znaczniki promieniotwórcze stosowane są w badaniach podstawowych obejmujących chemię koordynacyjną oraz w badaniach aplikacyjnych dotyczących nowych procesów rozdzielczych, w szczególności opracowywania nowych metod radioanalitycznych i procesów unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych. Metodą znaczników promieniotwórczych zbadano procesy ekstrakcji i hydratacji licznych chelatowych kompleksów metali oraz czynniki wpływające na liczbę koordynacyjną jonu metalu w tych kompleksach. Zbadano też procesy wymiany jonów i sorpcji wielu radionuklidów występujących w odpadach promieniotwórczych na selektywnych sorbentach nieorganicznych. Niedawno rozpoczęto prace w dziedzinie chemii radiofarmaceutyków. Przewiduje się otrzymanie i zbadanie nowych kompleksów technetu-99m z ligandami umożliwiającymi znakowanie leukocytów do obrazowania stanów zapalnych.

IChTJ jako jedyna instytucja w Polsce stosuje metodę neutronowej analizy aktywacyjnej (NAA). Metoda ta stosowana jest m. in. do oznaczania pierwiastków śladowych w materiałach biologicznych, geologicznych, środowiskowych (w tym również analizy aerozoli osadzonych na filtrach), meteorytach, półprzewodnikach i innych materiałach wysokiej czystości. NAA jest także niezbędnym elementem procesu weryfikacji dokładności innych metod instrumentalnych oraz atestacji materiałów odniesienia, a także pozwala na ocenę stopnia jednorodności tych materiałów, co umożliwia ocenę ich przydatności w technikach mikrochemicznych.

Badania w zakresie metod pomiaru stężeń promieniotwórczego radonu i jego pochodnych w powietrzu oraz ich praktycznego zastosowania doprowadziły do opracowania szeregu



metod i przyrządów (m.in. mierniki stężenia radonu w powietrzu i produktów rozpadu radonu w powietrzu, zestaw do ciągłego badania zmian stężenia radonu w kopalniach i in.) oraz programów symulacji komputerowej umożliwiających ocenę metod pomiarowych i wielowymiarowych metod przetwarzania sygnału głowicy pomiarowej wydatnie zmniejszających błąd przypadkowy pomiaru. W najbliższym okresie przewiduje się zbadanie zależności pomiędzy stężeniem produktów rozpadu radonu a zapyleniem i wilgotnością powietrza.

Instytut rozpoczął proces przygotowania do akredytacji laboratorium jądrowych technik analitycznych (NAA, XRF), niskotłowych pomiarów promieniowania, oznaczania stężeń radu i trytu oraz spektrometrii masowej lekkich izotopów trwałych. Będzie to najbardziej kompleksowe laboratorium tego typu w kraju i umożliwi wprowadzenie wielu norm Unii Europejskiej. Oznaczania stężeń trytu w wodach podziemnych wykorzystywane są do prognozowania zagrożeń wodnych kopalń surowców energetycznych. Ułatwiają one również rozpoznanie hydrogeologiczne, m.in. przy opracowywaniu mapy hydrogeologicznej Polski, i bilansowaniu zasobów dyspozycyjnych głównych zbiorników wód podziemnych. Pracownia trytowa Instytutu uzyskuje dobre wyniki w międzynarodowych testach niskotrytowych, przeprowadzanych przez MAEA.

W Instytucie prowadzone są badania efektów izotopowych pierwiastków f-elektronowych w równowagach fizykochemicznych z udziałem związków kompleksowych. Wykazano istnienie istotnych różnic współczynników separacji par izotopów parzysto-nieparzystych i parzysto-parzystych w układach dwufazowych, w których następuje zmiana otoczenia koordynacyjnego jonu centralnego, co wytłumaczono istnieniem wpływu pola jądrowego jonu na własności chemiczne jonu.

Prowadzone są także badania efektów izotopowych pierwiastków lekkich. Instytut jest wyposażony w najnowocześniejszy w kraju spektrometr masowy (Finigan DeltaPlus) do pomiaru składu izotopowego pierwiastków lekkich. Badane są równowagowe efekty izotopowe siarki w reakcjach ciecż-gaz oraz wzbogacanie izotopu  $^{18}\text{O}$  w procesie permeacji z przemianą fazową. Instytut uzyskał dwa patenty polskie i dwa amerykańskie dotyczące zastosowań procesu. Prace nad rozwojem technologii (budowa kaskady rozdzielczej) prowadzone są we współpracy z Uniwersytetem Tennessee, Knoxville, USA, oraz z Instytutem Badań Jądrowych w Vinca, Jugosławia. Wynalazek został wyróżniony srebrnym medalem na wystawie w Genewie w 2000 roku. Rozwijana jest metoda pomiaru stosunku izotopowego  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  jako znacznika środowiskowego pozwalającego na określanie rozkładu antropogenicznego strumienia siarki. Prowadzone są też prace nad przygotowaniem metod dotyczących wykorzystania izotopów tlenu i wodoru do badania jakości win i soków, mające na celu wdrożenie wspomnianych norm UE w Polsce.

W ostatnich latach przywiązuje się duże znaczenie do technik usuwania trytu wydzielanego do środowiska naturalnego. Tryt, miękki emiter beta, powstaje w reaktorach jądrowych. Duże ilości tego izotopu uwalniane są w zakładach przerabiających paliwo jądrowe. Ilość wydzielanego trytu może wzrosnąć znacznie w chwili wprowadzenia do produkcji energii reaktorów termojądrowych. W Zakładzie Jądrowych Metod Inżynierii Procesowej IChTJ prowadzone są próby wydzielania śladowych ilości trytu z wody przy pomocy permeacji membranowej. Sprawdzane są różne typy membran polimerowych, takie jak PTFE, regenerowana celuloza, polisulfon i polisulfon modyfikowany. Prace są w toku i ich kontynuacja planowana jest w przyszłych latach. Badacze amerykańscy prowadzący badania w tej dziedzinie powołują się na opracowania polskich uczonych - prekursorów metody.

W IChTJ prowadzone są studia doktoranckie w zakresie chemii, obejmujące wszystkie przedstawione wyżej dziedziny. Wykładowcami są pracownicy Instytutu oraz jednostek zewnętrznych, głównie akademickich.

### **3.2. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie**

#### **Chemia pierwiastków transaktynowcowych**

Od wielu lat w Instytucie Fizyki Jądrowej prowadzone są badania chemicznych właściwości pierwiastków transuranowych i transplutonowych, a także pierwiastków ziem rzadkich. Doprowadziły one do opracowania pod koniec lat 80. szybkiej wielokolumnowej chromatograficznej metody ciągłego wydzielenia pierwiastków transaktynowcowych i ich homologów z produktów reakcji jądrowych zachodzących podczas bombardowania tarcz ciężkimi jonami, a także z produktów rozszczepienia uranu-235. Metoda ta umożliwia badanie krótkożyciowych radionuklidów w rozmaitych układach chemicznych. Zastosowano ją po raz pierwszy do wydzielenia Rf (pierwiastek 104) z roztworów kwasu fluorowodorowego w układzie trzech kolumn (kationit – anionit – kationit) podczas bombardowania tarczy Cm-248 jonami O-18 na cyklotronie U-400 w ZIBJ w Dubnie. Wykazano, że Rf zachowuje się w roztworach kwasu fluorowodorowego podobnie jak Hf (zgodnie z prawem okresowości) i tworzy z jonami fluorkowymi trwałe aniony kompleksowe, nie wykazując w badanym układzie wpływu efektów relatywistycznych. Przeprowadzono także podobne eksperymenty w modelowych układach pierwiastków przejściowych grup 4, 5 i 6 układu okresowego (Zr, Hf, Nb, Mo, W) jako homologów Rf, Db, i Sg oraz modelowe badania nad wydzieleniem krótkożyciowych izotopów Tc, Re, Os, Hg i Pb jako homologów pierwiastków transaktynowcowych 107 (Bh), 108 (Hs), 112, i 114. Wykazano, że opracowana metodyka badawcza umożliwia wydzielenie i rejestrowanie radionuklidów o okresie półrozpadu około 3 sekundy.

Omówione wyżej badania ilustrują fundamentalny problem współczesnej radiochemii. Pozwalają one określić podstawowe właściwości chemiczne krótkożyciowych pierwiastków transaktynowcowych, dostępnych w ilościach niewagowych, pozwalają prognozować ich zachowanie się w badanych układach, a także określać odchylenia tych właściwości od prawidłowości, wywołane efektami relatywistycznymi. Badania te otwierają nową dziedzinę chemii - "chemię pojedynczych atomów".

#### **Radiofarmaceutyki**

Program badań podstawowych obejmuje prace nad otrzymaniem, wydzieleniem i przeprowadzeniem w odpowiednie postaci chemiczne neutronodeficytowych radionuklidów diagnostycznych (zwłaszcza  $^{11}\text{C}$ ), diagnostyczno-terapeutycznych, (np.  $^{67}\text{Ga}$  i  $^{111}\text{In}$ ), wyłącznie terapeutycznych ( $^{103}\text{Pd}$  i  $^{211}\text{At}$ ) oraz innych ważnych nuklidów (m.in.  $^{88}\text{Y}$  i  $^{139}\text{Ce}$ , szeroko stosowanych jako składniki wieloizotopowych źródeł kalibracyjnych). Do otrzymywania tych radionuklidów wykorzystywany będzie cyklotron AIC-144, zaprojektowany i zbudowany w IFJ (1998). Otrzymano już preparaty  $^{11}\text{C}$  oraz m.in.  $^{111}\text{In}$ . Niezależnie od prac badawczo-rozwojowych dotyczących radiofarmaceutyków prowadzone są prace dotyczące preparatyki i kalibracji źródeł promieniowania  $\beta^-$  dla brachyterapii śródnaczyniowej; wykorzystania izotopów neutronodeficytowych w badaniach materiałowych, w tym w badaniach materiałów na endoprotezy; a także zastosowanie metod

izotopowych w oznaczaniu aktywności niektórych enzymów, zwłaszcza enzymów selenozależnych.

### Radioekologia

Laboratorium Badań Skażeń Radioaktywnych Środowiska prowadzi badania wybranych zagadnień radiologicznych w skali całego kraju, a nawet badania próbek antarktycznych, oraz (we współpracy z CLOR) ciągły monitoring radioaktywności powietrza i tła promieniowania gamma. W badaniach środowiskowych, stosując radiochemiczne metody zagęszczania i wydzielania radionuklidów z różnych materiałów matrycowych, wykorzystuje się niskotłową i ultraniskotłową spektrometrię promieniowania gamma i alfa przy użyciu spektrometrów z detektorami półprzewodnikowymi oraz spektrometrię beta i alfa przy użyciu spektrometru z ciekłym scyntylatorem.

Wykonano m.in. pomiary skażeń radioaktywnych w środowiskach leśnych Polski, czego rezultatem było powstanie map skażeń terenu Polski izotopami gamma-promieniotwórczymi ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  i  $^{60}\text{Co}$ ), a także rozpoznanie skażeń izotopami alfa-promieniotwórczymi:  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  i  $^{243,244}\text{Cm}$  oraz beta promieniotwórczymi:  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{241}\text{Pu}$ . W północno-wschodniej Polsce stwierdzono odmienny, niż na pozostałych terenach, skład izotopowy opadu promieniotwórczego z katastrofy czarnobylskiej, charakteryzujący się obecnością  $^{90}\text{Sr}$  oraz izotopów europu, plutonu, ameryku i kiuru. Wynika on z powszechnej depozycji na tych terenach małych "gorących cząstek" pochodzenia czarnobylskiego, stanowiących opad quasi-ciągły. We współpracy z Instytutem Geografii UJ wykonano mapę skażeń izotopami cezu na Pogórzu Karpackim pomiędzy Rabą a Uszvicą oraz prowadzi się prace nad określaniem stężenia radu w Wiśle. Obecnie prowadzone są również badania nad przenikaniem przez łańcuch pokarmowy radionuklidów pochodzących z "gorących cząstek", głównie izotopów plutonu,  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . Prowadzi się też prace nad rozwojem metod pomiarowych i analitycznych i planuje się przeprowadzenie akredytacji Laboratorium.

Pracownia Fizyki Transportu Promieniowania i Modelowania prowadzi badania mające na celu lepsze rozpoznanie występowania lokalnie podwyższonych stężeń radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ). Wykonywane są pomiary stężeń radonu w budynkach mieszkalnych i w powietrzu glebowym wokół budynków. W wytypowanych budynkach prowadzone są badania zmienności stężeń radonu w czasie (zmienność dobową i sezonową). Przy pomocy kodu komputerowego modelowany jest proces migracji Rn z gruntu do budynku. Zakres prac badawczych jest tak dobrany, by doprowadził w niedalekiej przyszłości do prognozowania stężeń Rn w nowo wybudowanych budynkach mieszkalnych. Prowadzone są także pomiary stężeń radonu w wodzie.

Wykonuje się również pomiary stężeń naturalnych pierwiastków promieniotwórczych  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  w próbkach geologicznych, surowcach i materiałach budowlanych pochodzenia mineralnego. Wykorzystuje się do tego celu scyntylacyjną i półprzewodnikową spektrometrię  $\gamma$ . Metodyka badań zgodna z wytycznymi Instrukcji ITB 234/95 pozwala na włączenie się w krajowy system kontroli promieniotwórczości naturalnej surowców i materiałów budowlanych.

### 3.3. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM w Świerku

OBRI-POLATOM jest jedynym profesjonalnym krajowym producentem preparatów promieniotwórczych dla medycyny, przemysłu, nauki i ochrony środowiska. Ośrodek ma ponad 30-letnie doświadczenie w zakresie produkcji preparatów promieniotwórczych, własne

opracowania technologiczne, będące wynikiem realizacji własnego programu badawczego, a także urządzenia badawczo-produkcyjne opracowywane i wytwarzane przez własne biuro konstrukcyjne i warsztat. OBRI POLATOM świadczy również usługi napromieniania materiałów tarczowych w reaktorze. W przypadku użytkowników zewnętrznych są to głównie materiały geologiczne i biologiczne. Zapotrzebowania dotyczą większości radionuklidów powstających w reakcjach jądrowych ( $n,\gamma$ ) i ( $n,p$ ).

Głównymi kierunkami działalności badawczej Ośrodka są chemia jądrowa, radiochemia, fizykochemia pierwiastków promieniotwórczych, chemia analityczna, biochemia medyczna i metrologia promieniowania jonizującego. Aktualny program badawczy Ośrodka obejmuje m.in. badania nad opracowaniem nowych i modernizacją już stosowanych technologii wytwarzania radiofarmaceutyków do diagnostyki i terapii *in vivo* a także zestawów i znaczników stosowanych w immunodiagnostyce medycznej *in vitro* do oznaczania hormonów i markerów nowotworowych zawartych w surowicy krwi i płynach ustrojowych. Prowadzone są także badania nad nowymi metodami i technologiami wytwarzania zamkniętych źródeł promieniotwórczych dla brachyterapii oraz używanych w aparaturze izotopowej przeznaczonej do kontroli i sterowania procesami przemysłowymi i monitoringu zanieczyszczeń środowiska.

Nowym kierunkiem badań są prace nad otrzymywaniem radiofarmaceutyków nowej generacji, opartych na wyznakowanych substancjach biologicznie aktywnych, takich jak peptydy, hormony, przeciwciała monoklonalne i ich fragmenty. Radiofarmaceutyki znakowane  $^{111}\text{In}$  i  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  wykorzystywane są m.in. do diagnostyki centralnego układu nerwowego oraz do diagnostyki onkologicznej przerzutów rozsianych nowotworów głównie pochodzenia endokrynologicznego, poprzez wykorzystanie własności obwodowych receptorów komórkowych.

W ostatnim okresie rozpoczęto prace nad otrzymywaniem emiterów  $\beta$ , głównie itru-90 i renu-188. W Ośrodku opracowano własną oryginalną metodę wydzielania  $^{90}\text{Y}$  ze  $^{90}\text{Sr}$ . Itr-90 jest coraz powszechniej stosowany w leczeniu stanów zapalnych stawów oraz do znakowania peptydów, przeciwciał monoklonalnych i ich fragmentów służących do immunoradioterapii różnych nowotworów. Zaawansowane są prace nad opracowaniem technologii otrzymywania generatora  $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$ . Opanowanie w Ośrodku tej technologii pozwoli na podjęcie prac nad opracowaniem metod otrzymywania nowych radiofarmaceutyków znakowanych  $^{188}\text{Re}$  do terapii onkologicznej i paliatywnego leczenia przerzutów nowotworowych do kości. Do rejestracji przez Komisję Leków MZiOŚ przygotowany jest kolejny radiofarmaceutyk do leczenia paliatywnego - EDTMP znakowany  $^{153}\text{Sm}$

Dużym zainteresowanie medycyny cieszy się obecnie cyklotronowy izotop  $^{123}\text{I}$ . Do czasu uruchomienia w kraju izotopów cyklotronowych OBRI musi opierać się na kosztownym imporcie. Opanowana w OBRI POLATOM metoda wytwarzania metajodobenzylguanidyny- $^{123}\text{I}$  pozwala na jej stosowanie w onkologii, kardiologii i neurologii. MIBG znakowana izotopami  $^{123}\text{I}$  i  $^{131}\text{I}$  spełnia ważną rolę jako radiofarmaceutyk stosowany w scyntygraficznej lokalizacji i terapii guzów chromochłonnych położonych w nadnerczach i pozanadnerczowo, przerzutów złośliwych *phoehromocytoma* i obrazowania *neuroblastoma*.

Nową dziedziną wymagającą podjęcia badań w najbliższej przyszłości są radiofarmaceutyki znakowane technetem-99m, służące do obrazowania stanów zapalnych np. u pacjentów z gorączką nieznanego pochodzenia. Przypadki takie są bardzo trudne do diagnozowania dotychczas stosowanymi metodami.

Wszystkie prace badawczo-rozwojowe prowadzone w OBRI-POLATOM mają charakter aplikacyjny i są podejmowane pod kątem zapotrzebowania użytkowników na produkty

izotopowe. Warunkiem ich podjęcia jest realna perspektywa wdrożenia wyników do praktyki produkcyjnej.

### **3.4. Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Świerku, Zakład Spektroskopii i Techniki Jądrowej, Pracownia Radiochemii i Radioekologii**

Pracownia istnieje około 40 lat. Jej działalność badawcza była początkowo skoncentrowana na wydzielaniu radioaktywnych izotopów ziem rzadkich z tarcz naświetlanych protonami o energiach  $\sim 600$  MeV. Prowadzono również prace związane z aktywacją różnych materiałów neutronami termicznymi i o energii 14 MeV. Obecnie głównym tematem prac jest monitoring radioaktywnych skażeń powietrza, gleby i wybranych surowców roślinnych. Prowadzi się również prace nad otrzymywaniem radionuklidów dla diagnostyki medycznej.

### **3.5. Instytut Energii Atomowej w Świerku, Zakład Doświadczalny Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych i Pracownia Metod Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych Zakładu Energetyki Jądrowej**

Pracownia i Zakład Doświadczalny prowadzą w ścisłej współpracy badania nad oczyszczaniem, przetwarzaniem i zestalaniem odpadów promieniotwórczych, ukierunkowane na opracowywanie i wdrażanie technologii przerobu, unieszkodliwiania i składowania odpadów promieniotwórczych w Polsce. Bliższe szczegóły prac podane są w programie badań technologicznych, p. 5.4.

### **3.6. Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie**

CLOR stosuje metody radiochemiczne, pozwalające na oznaczanie wielu izotopów promieniotwórczych, zwłaszcza w próbkach środowiskowych. Prace z wykorzystaniem tych metod obejmują następujące grupy tematów:

- Ocena zawartości izotopów promieniotwórczych sztucznych i naturalnych w środowisku lądowym (naturalnym i wykorzystywanym rolniczo), wodnym (wody śródlądowe, morze Bałtyckie) i w powietrzu atmosferycznym (warstwa przyziemna, troposfera i dolna stratosfera); oznaczane izotopy:  $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ , izotopy uranu i toru;

- Badanie zachowania się radionuklidów w środowisku lądowym, ich migracja wzdłuż profili glebowych w zależności od rodzaju gleby (głównie  $^{137}\text{Cs}$ ), przechodzenie do roślin jadalnych i pastewnych przez system korzeniowy i części nadziemne roślin ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ , izotopy uranu i toru);

- Ocena wielkości wchłonieć z pożywieniem izotopów promieniotwórczych, oparta na oznaczeniach izotopów w poszczególnych artykułach żywnościowych i w całodziennym pożywieniu oraz ocena dawek skutecznych od skażeń wewnętrznych dla populacji Polski ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ , izotopy uranu i toru).

Większość metod radiochemicznych stosowanych w CLOR została zebrana i opublikowana w pracy zbiorowej pod redakcją J. Bilkiewicza: *“Procedures for radiochemical and chemical analysis of environmental and biological samples”*, Report No. CLOR-110/D, Warszawa, 1978. W pracy tej przedstawione są również niektóre metody pobierania próbek środowiskowych i ich wstępnej preparatyki, a także metody oznaczeń następujących izotopów promieniotwórczych:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ .

Ponadto, w CLOR wykonywane są oznaczenia trytu w wodzie metodą elektrolitycznego wzbogacania trytu i pomiaru jego aktywności przy pomocy spektrometru z ciekłym scyntylatorem. Metoda ta została szczegółowo opisana w pracy I. Radwan i wsp., *“Tritium in surface waters, tap water and in precipitation in Poland in the period of 1994-1999”*, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2000).

Oznaczanie izotopów uranu ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ) i toru ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ) prowadzi się w obecności znaczników -  $^{232}\text{U}$  i  $^{229}\text{Th}$ . Uran i tor deponuje się elektrolitycznie na krążkach stalowych, a pomiar aktywności wykonuje metodą spektrometrii alfa. Metoda opisana jest w publikacji Z. Pietrzak-Flis i wsp., *“Dietary intake of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$  and  $^{226}\text{Ra}$  from food and drinking water by inhabitants of the Walbrzych region”*, J. Radioanal. Nucl. Chem., 222, 189 (1997).

Oznaczanie plutonu ( $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ) wykonuje się w obecności znacznika -  $^{242}\text{Pu}$ . Pluton wydziela się metodą chromatografii jonowymiennej, a następnie deponuje się elektrolitycznie na krążkach stalowych. Do pomiaru aktywności stosuje się spektrometrię alfa. Metoda ta jest opisana w pracy M.M. Suplińskiej *“Plutonium in sediments of the Baltic Sea in the period of 1991-1993”*, Nukleonika, 40, 33 (1995).

### 3.7. Uniwersytet Warszawski, Wydział Chemii, Pracownia Radiochemii

W Pracowni Radiochemii Wydziału Chemii UW prowadzone są badania z zastosowaniem izotopów trwałych i promieniotwórczych, w których można wyróżnić cztery główne kierunki: efekty izotopowe; nuklidy promieniotwórcze w elektrochemii; synteza i właściwości radiofarmaceutyków; mechanizmy reakcji związków biologicznie czynnych.

#### Efekty izotopowe

Badane są głównie efekty izotopowe wodoru, towarzyszące reakcjom wymiany izotopowej wodoru oraz efekty charakteryzujące przemiany fazowe. Pierwsza grupa obejmuje badanie kinetycznych i termodynamicznych efektów izotopowych w procesach przenoszenia wodoru w układach zawierających wiązanie wodorowe. Kinetyczne efekty izotopowe są wykorzystywane jako narzędzie pomocne do określania mechanizmu reakcji chemicznej, a efekty termodynamiczne służą jako źródło informacji o strukturze cząsteczek i oddziaływaniach międzycząsteczkowych. Druga grupa, czyli efekty izotopowe w równowagach fazowych, dotyczą równowag ciecz – para oraz równowag ciecz – ciecz. W tym przypadku badania efektów izotopowych mają na celu dostarczenie informacji o charakterze faz skondensowanych. Metoda efektów izotopowych jest użytecznym narzędziem służącym do testowania modeli struktury cieczy i ich mieszanin, a także ich zachowania się w pobliżu punktu krytycznego. W najbliższej przyszłości badania te będą kontynuowane, ze szczególnym uwzględnieniem roztworów polimerów i biopolimerów.

## Nuklidy promieniotwórcze w elektrochemii

Radionuklidy stosuje się do badania procesów adsorpcji i reakcji elektrochemicznych na elektrodach stałych. Opracowano dwie wersje metod radiochemicznych, przeznaczonych odpowiednio dla elektrod o powierzchniach szorstkich i gładkich. Metody te pozwalają na bezpośrednie określenie ilości substancji znakowanej radionuklidem, zaadsorbowanej na elektrodzie. Metody radiochemiczne połączone z różnymi technikami elektrochemicznymi pozwalają także określić skład zaadsorbowanych produktów chemisorpcji, gdy adsorbowana substancja ulega rozkładowi. Przedmiotem badań są metale z grupy 10 i 11, krystalizujące w układzie regularnym, płasko centrowanym (Ni, Pt, Cu, Ag i Au), oraz różne substancje organiczne i jony. Celem badań jest określenie wzajemnego wpływu struktury metalu i adsorbatu na procesy adsorpcji (tzw. elektrokataliza strukturalna).

## Synteza i właściwości radiofarmaceutyków

Prowadzone są syntezy i badania właściwości potencjalnych radiofarmaceutyków stosowanych w scyntygraficznej diagnostyce medycznej. Są to organiczne kompleksy technetu ( $^{99m}\text{Tc}$ ) o ukierunkowanym powinowactwie narządowym, a także kompleksy Pt(II) i Pd(II) z ligandami o znaczeniu biologicznym (aminokwasy, aminocukry, peptydy, antybiotyki). Kompleksy platynowców służą jako łączniki pomiędzy znacznikiem promieniotwórczym a przeciwciałem lub hormonem, które kierowane są do odpowiednich antygenów lub receptorów. Poznanie struktury i właściwości fizykochemicznych tych kompleksów pozwoli na zrozumienie ich działania biologicznego. Innym kierunkiem badań wspomnianych kompleksów Pt i Pd jest poznanie mechanizmu działania promienioczułającego cytostatyków platynowych, zwiększających efekt radioterapii nowotworowej. Badania dotyczą oddziaływania produktów radiolizy wody (głównie rodnika OH) z kompleksami platynowców. Kinetyka zmiatania rodników OH pozwoli określić rolę tych kompleksów jako promienioczułaczy w radioterapii nowotworowej.

## Mechanizmy reakcji związków biologicznie czynnych

Program badawczy jest ukierunkowany na poznanie mechanizmów reakcji katalizowanych przez enzymy w szczególności z klasy liaz i oksyreduktaz. W tym celu stosuje się różne techniki izotopowe, m.in. metodę kinetycznych efektów izotopowych. Liczbowe wartości kinetycznych efektów izotopowych pozwalają wydzielić z sekwencji przemian chemicznych etap decydujący o szybkości reakcji, a nawet określić strukturę stanu przejściowego. Do realizacji postawionych celów stosuje się niedostępne w sprzedaży związki biologicznie czynne, wielokrotnie znakowane izotopami węgla i wodoru. Integralną częścią projektu jest więc opracowanie metod syntezy i otrzymanie związków znakowanych. Znakowane związki biologicznie czynne otrzymuje się kombinowanymi metodami zarówno chemicznymi, jak i enzymatycznymi. Wiele syntez jest opracowywanych pod kątem zastosowania tych związków w medycynie nuklearnej, a zwłaszcza w technice PET. Badania realizowane są wspólnie z Pracownią Peptydów Wydziału Chemii UW.

W ramach działalności dydaktycznej zespół Pracowni prowadzi wykłady z chemii jądrowej i pracownię kursową z radiochemii (III rok studiów) oraz specjalizację z radiochemii (IV rok studiów).

### **3.8. Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii, Zespół Naukowy Chemia Uranu**

Program badań podstawowych obejmuje następującą problematykę: opracowanie metod syntezy nowych związków uranu(III); badania struktury krystalicznej związków uranu(III); badania procesów transferu energii w monokryształach kompleksowych halogenków lantanowców domieszkowanych lub współdomieszkowanych związkami uranu(III), uranu(IV), neodymu(III), erbu(III) i chromu(III); badania struktury poziomów Starkowskich oraz obliczenia parametrów pola krystalicznego dla jonów  $U^{3+}$  i  $U^{4+}$  w matrycach kompleksowych halogenków lantanowców; badania intensywności przejść f-f; określenie procesów prowadzących do obsadzenia poziomów wzbudzonych i mechanizmów oddziaływań donor-akceptor w procesach transferu energii oraz badania fotoprzewodnictwa.

Zjawiska transferu energii wzbudzenia z udziałem jonów aktywności nie były dotąd przedmiotem badań naukowych. Wykazano jednak, że jony te są potencjalnymi aktywatorami mogącymi mieć zastosowanie przy wytwarzaniu luminoforów i materiałów laserowych emitujących w widzialnym zakresie widma. Obecnie rozpoczęto prace mające na celu syntezę i ocenę przydatności ww. układów jako materiałów luminescencyjnych w zakresie widzialnym oraz dostarczenie nowych informacji dotyczących transferu energii między zlokalizowanymi poziomami jonów aktywatorów. Projektowane badania fotoprzewodnictwa mają na celu określenie położenia poziomów energetycznych jonów  $U^{3+}$  i  $U^{4+}$  względem pasm matrycy, a przez to wyjaśnienie możliwego udziału tych ostatnich w procesach transferu energii wzbudzenia.

Zespół prowadzi zajęcia dydaktyczne z chemii jądrowej dla studentów Uniwersytetu.

### **3.9. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Chemii, Zakład Radiochemii i Chemii Koloidów**

W Zakładzie prowadzone są badania fizykochemiczne z wykorzystaniem radioizotopów w charakterze znaczników. Badania te obejmują:

- wyznaczenie parametrów podwójnej warstwy elektrycznej na granicy faz tlenki metali / roztwory elektrolitów,
- śledzenie mechanizmu adsorpcji surfaktantów i substancji wielkocząsteczkowych na granicy faz tlenki metali / roztwory elektrolitów.

Jednym z głównych kierunków działalności Zakładu są badania nad skażeniem środowiska izotopami  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ -promieniotwórczymi. Aktualnie badania te obejmują:

- monitoring skażeń przyziemnej warstwy powietrza (we współpracy z CLOR),
- migrację radionuklidów z gleby do cieków wodnych (we współpracy z MAEA),
- opracowanie nowych metod analizy radionuklidów beta-promieniotwórczych:  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{241}\text{Pu}$  w próbkach środowiskowych,
- określanie skażeń gleb i roślin radioizotopami:  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$  oraz izotopami plutonu, a także określanie współczynników transferu izotopów z gleb do roślin,
- określanie stężeń radonu w budynkach staromiejskich dzielnic miast Lubelszczyzny (badania finansowane przez KBN).

Pracownicy Zakładu mają duże doświadczenie w pracy z izotopami promieniotwórczymi i w obsłudze aparatury pomiarowej. Zakład dysponuje nowymi spektrometrami promieniowania gamma i alfa firmy Canberra, a także licznikiem z ciekłym scyntylatorem.



Do pomiarów radonu wykorzystywana jest bierna metoda sorpcji na węglu aktywnym oraz metoda ciągłego pomiaru produktów rozpadu radonu.

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości wyników pomiarowych Zakład stosuje odpowiednie procedury analityczne, bierze również udział w międzylaboratoryjnych badaniach organizowanych przez CLOR i MAEA.

Zakład prowadzi szeroką działalność dydaktyczną, głównie w dziedzinie radiochemii środowiska, ochrony radiologicznej i metod radioanalitycznych.

### **3.10. Uniwersytet Śląski; Zakład Fizyki Jądrowej i jej Zastosowań; Laboratorium Badania Niskich Aktywności**

Laboratorium prowadzi badania naturalnej i sztucznej promieniotwórczości w próbkach środowiskowych z wykorzystaniem spektrometrii gamma i techniki ciekłoscyntylacyjnej, a w szczególności badania:

- podwyższonej zawartości izotopów  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  w materiałach odpadowych towarzyszących wydobyciu, przeróbce i spalaniu węgla kamiennego (osady, pyły, popioły). Badania prowadzone są nie tylko na terenach kopalnianych, ale także na składowiskach zewnętrznych i posesjach prywatnych w okolicach kopalń;
- obecności izotopów radu w odprowadzanych do środowiska wodach kopalnianych;
- występowania izotopów radu w środowisku wokół kopalnianych osadników wód dołowych;
- stężenia radonu-222 w podziemnych wodach leczniczych Sudetów polskich w zależności od stopnia jego emanacji ze skał;
- stężenia radonu w powietrzu z wykorzystaniem detektorów PICO-RAD.

Laboratorium działa dopiero od pięciu lat i prowadzi prace nie tylko badawcze, ale również dydaktyczne.

### **3.11. Uniwersytet Gdański, Wydział Chemii, Katedra Chemii Analitycznej**

Tematyka badawcza dotyczy radiochemii środowiska. Główne zagadnienia badawcze to:

- Rozwój radiochemicznych metod oznaczania pierwiastków promieniotwórczych w próbkach środowiskowych;
- Pomiary aktywności naturalnych ( $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ ) oraz sztucznych ( $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$ ) izotopów promieniotwórczych w próbkach środowiskowych;
- Badanie rozmieszczenia radionuklidów polonu ( $^{210}\text{Po}$ ), radioołowiu ( $^{210}\text{Pb}$ ), uranu ( $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ ) oraz plutonu ( $^{238}\text{Pu}$  i  $^{239+240}\text{Pu}$ ) w ekosystemach lądowych i morskich oraz ich nagromadzenia w organizmach roślinnych i zwierzęcych;
- Badanie nierównowagi promieniotwórczej pomiędzy izotopami uranu  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  w przyrodzie;
- Badanie radiologicznych skutków spożywania i wdychania radionuklidów (głównie  $^{210}\text{Po}$  i  $^{210}\text{Pb}$ ) dla organizmu człowieka

Zespół prowadzi szeroką działalność dydaktyczną, głównie w dziedzinie radiochemii środowiska, ochrony radiologicznej i metod radioanalitycznych.

### 3.12. Uniwersytet Jagielloński, Wydział Chemii, Pracownia Chemii Jądrowej

Działalność Pracowni Chemii Jądrowej (Pracowni Izotopowej) Wydziału Chemii UJ skupiała się w ostatnich latach wokół badań podstawowych efektów izotopowych węgla-13 i deuteru w możliwie prostych reakcjach dekarbonylacji, dekarboksylacji i utleniania kwasów karboksylowych. Badania kinetycznych efektów izotopowych deuteru, poprzedzone wcześniejszymi pracami dotyczącymi wymian i efektów izotopowych trytu i węgla-14, były w całości prowadzone na miejscu przy wykorzystaniu własnej aparatury. Badania kinetycznych efektów izotopowych  $^{13}\text{C}$  prowadzone były początkowo w ramach współpracy z Pracownią Izotopów Stabilnych Politechniki (ETH) w Zurychu, a później we współpracy z Instytutem J. Stefana w Ljubljanie, co umożliwiło korzystanie z precyzyjnych spektrometrów masowych. W toku intensywnych badań izotopowych udało się wydzielić obszary kinetyczne, w których wyznaczone doświadczalnie efekty  $^{13}\text{C}$  pokrywają się z efektami  $^{13}\text{C}$  obliczonymi w oparciu o modele pojedynczych wiązań C-C, C-O lub C-H. Ponadto wykryto duże efekty izotopowe deuteru w reakcjach utleniania deuterowanych kwasów alifatycznych manganianem w środowisku alkalicznym, świadczące o istnieniu efektów tunelowych w tych reakcjach.

Ponadto na zamówienie Polfy-Kraków prowadzono sporadyczne prace radioanalityczne przy zastosowaniu kompleksowych związków toru, które stymulowały systematyczne badania analityków UJ i Polfy (D.Janecki, T.Michałowski, M.Zieliński: *A simple method of etidronate disodium determination in commercial preparations of the salt*, Chem. Anal., 45 (2000) 659).

Pracownia Chemii Jądrowej Wydziału Chemii UJ została rozwiązana w lutym 2000.

### 3.13. Politechnika Łódzka, Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej

Typowa radiochemia nie jest w MITR uprawiana od kilku lat. Jednak metody radiochemiczne i stosowanie radioaktywnych wskaźników izotopowych są wysoce przydatne w badaniach promieniotwórczości środowiska, badaniach struktury ciekłych mieszanin i roztworów oraz w badaniach mechanizmów reakcji.

W Łodzi działają trzy duże elektrociepłownie emitujące do atmosfery radon i naturalne radionuklidy zawarte w popiołach lotnych. Powietrze jest też zanieczyszczane radionuklidami z elektrociepłowni w Pabianicach i Zgierzu oraz z licznych palenisk domowych, w których jest spalany tani węgiel (około 30% popiołu). Na ryzyko radiacyjne ludności składa się narażenie zewnętrzne od radionuklidów w powietrzu i opadzie oraz narażenie wewnętrzne od wdychanego radonu i pyłów. Aglomeracja łódzka ma największy w kraju promieniotwórczy opad  $\beta$ , konkurujący z Kasprowym Wierchem, oraz największe zanieczyszczenie powietrza, porównywalne ze Śląskiem. Celem oceny radiacyjnego narażenia mieszkańców podjęto systematyczne pomiary radioaktywności środowiska łódzkiego. Mierzy się moc dawki promieniowania  $\gamma$  pochodzącego z ziemi oraz wyznacza rozkład aktywności radionuklidów pod jej powierzchnią. Wyniki tych pomiarów wykazały, że na terenie miasta moc dawki promieniowania radionuklidów pochodzących ze spalonego węgla nie przewyższa 20% łącznej mocy dawki nad powierzchnią ziemi. Dodawanie popiołów lotnych do materiałów budowlanych nie zwiększa istotnie stężenia radonu w mieszkaniach, przedszkolach i szkołach. Średnie stężenie radonu w pomieszczeniach, około  $21 \text{ Bq/m}^3$ , jest stosunkowo małe w porównaniu z przeciętnym w Polsce. Opracowaną w MITR oryginalną metodą są

wykonywane systematyczne pomiary stężenia radionuklidów w pyłe zawieszonym w powietrzu.

Celem badań struktury i własności wodnych roztworów związków niepolarnych lub zawierających grupy niepolarne jest poznanie zjawisk hydrofobowej hydratacji i hydrofobowej asocjacji. Odgrywają one ważną rolę w procesach biologicznych i uczestniczą w tworzeniu micel, błon komórkowych, stabilizacji białek i kwasów nukleinowych. Dotychczas nie wiadomo, czy przyczyną tych zjawisk są hydrofobowe oddziaływania pomiędzy cząsteczkami składników, czy też oba zjawiska wynikające ze struktury przestrzennej sieci wiązań wodorowych. Do badania struktury roztworów wykorzystuje się wielkości opisujące procesy transportu masy i ładunku. W badaniach dyfuzji stosowane są radioaktywne wskaźniki izotopowe. Wykazano, że w roztworach wodnych hydratacja cząsteczek wyższych alkoholi i kationów tetrametyloamoniowych ma charakter hydrofobowy, a utworzone struktury mają charakter klatratowy. Możliwe jest też tworzenie się krótkożyciowych agregatów molekularnych. Zjawisko preferencyjnej solwatacji jonów metali alkalicznych w rozpuszczalnikach wodno-alkoholowych wynika z niedopasowania struktur solwatowanego jonu i rozpuszczalnika. Obecność struktur klatratowych powoduje częściową dehydratację jonów hydrofilowych. Symulacje komputerowe metodą dynamiki molekularnej potwierdziły ten wniosek. Ruchy molekularne cząsteczek rozpuszczalnika w pierwszej sferze solwatacyjnej jonów są silnie skorelowane z ruchami jonów, co znajduje odzwierciedlenie w eksperymentalnie oznaczanych współczynnikach samodyfuzji.

W badaniach mechanizmów reakcji metodą kinetycznych efektów izotopowych badane są reakcje enzymatyczne i reakcje chemiczne jako modele reakcji enzymatycznych. Do oceny struktury stanu przejściowego reakcji elementarnej oraz wnioskowania o mechanizmie reakcji kinetycznie złożonej doświadczalnie wyznacza się wypadkowy kinetyczny efekt izotopowy dla badanych reakcji oraz oszacowuje się jego teoretyczne wartości dla alternatywnych struktur przejściowych i alternatywnych mechanizmów. W celu wykazania przydatności uproszczeń zawartych w obliczeniowych metodach oceny efektów izotopowych (półempirycznej, DFT i *ab initio*) dla kilku modelowych reakcji chemicznych porównano obliczone efekty izotopowe z wartościami doświadczalnymi dla wodoru  $k_1/k_2$ , węgla  $k_{12}/k_{13}$ , azotu  $k_{14}/k_{15}$ , tlenu  $k_{16}/k_{18}$  i chloru  $k_{35}/k_{37}$ . Wnioski z tych porównań są wykorzystywane w międzynarodowym projekcie badawczym zmierzającym do opracowania uniwersalnego i praktycznie przydatnego programu komputerowego, który pozwalałby przewidywać efekty izotopowe dowolnej reakcji chemicznej. Badano także równowagowe i kinetyczne efekty izotopowe wybranych reakcji enzymatycznych. Wykazano, że wiązanie reagentów przez enzymy charakteryzuje się mierzalnym efektem izotopowym atomów ciężkich. Wykazano również przydatność efektów izotopowych węgla i azotu do ustalenia struktury produktów pośrednich, które ze względu na krótkie czasy życia są niewykrywalne eksperymentalnie. Radiometrycznie oznaczony efekt izotopowy trytu pozwolił określić mechanizm reakcji katalizowanej przez enzym. Do tak dokładnych pomiarów przystosowano unikalny spektrometr mas MI 1201 E (P.O. Elektron, ZSRR) wyposażony w źródło jonów FAB, który umożliwia wyznaczanie wartości efektów izotopowych o precyzji lepszej od 0,01 %.

### **3.14. Politechnika Wroclawska, Laboratorium Badań Izotopowych**

Laboratorium prowadzi badania podstawowe obejmujące radioznacznikowe badania metod separacyjnych, tj. przenoszenia jonów metali w nowych układach ekstrakcyjnych, jonowymiennych, flotacyjnych i membranowych, oraz metody radiometryczne (spektroskopia promieniowania gamma) małych stężeń radionuklidów.

Badania w zakresie chemii środowiska obejmują: monitoring radiometryczny powietrza atmosferycznego; monitoring radiometryczny rekultywacji terenów po wydobyciu uranu w Kowarach; radiometryczne atestowanie materiałów budowlanych.

W Laboratorium opracowano udoskonaloną metodę oznaczania zawartości radionuklidów w surowcach i w materiałach budowlanych z wykorzystaniem wielokanałowej spektrometrii promieniowania gamma. Wykazano, że uzyskiwane wyniki odpowiadają wartościom otrzymywanym metodą spektrometrii trójkanałowej, zalecaną przez Instytut Techniki Budowlanej, ale proponowana nowa metoda pozwala dodatkowo wykrywać obecność sztucznych izotopów promieniotwórczych.

Laboratorium prowadzi działalność dydaktyczną na poziomie uniwersyteckim w dziedzinie chemii jądrowej i radiochemii.

### **3.15. Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Fizyki, Zakład Zastosowań Radioizotopów**

Zakład prowadzi badania obejmujące:

1. Pomiary skrajnie niskich radioaktywności izotopów radiowęglu, trytu, uranu, toru, potasu, cezu oraz ołowiu w różnych elementach środowiska naturalnego i przekształconego przemysłowo. Pomiary wykonywane są w ramach badań dozymetrycznych z wykorzystaniem metod spektrometrii alfa i gamma oraz dozymetrii termo- i optoluminescencyjnej.
2. Datowanie osadów organogenicznych metodą radiowęglową oraz skał i minerałów metodą termo- i optoluminescencyjną. Prace z tej dziedziny służą do konstrukcji skal czasu dla różnych zdarzeń zachodzących na Ziemi w ostatnich około sześciuset tysiącach lat. Wymieniona działalność naukowa prowadzona jest w Laboratorium Radiowęglowym oraz Laboratorium Datowania Luminescencyjnego.

Podstawowym zadaniem prac wymienionych w punkcie 1 jest przeciwdziałanie skutkom zagrożeń radioizotopowych, jakie mogą występować na terenie o bardzo wysokiej gęstości zaludnienia, silnie przetworzonym wieloletnią, intensywną działalnością przemysłu ciężkiego, w tym przede wszystkim przemysłu wydobywczego i energetycznego. Laboratorium stwarza możliwości interdyscyplinarnych badań zagrożeń radioizotopowych, w tym pomiarów radioaktywności powietrza i aerozoli, wody, żywności, gleby, materiałów budowlanych i odpadów przemysłowych.

Laboratorium radiowęglowe wykonuje pomiary stężenia izotopu węgla  $^{14}\text{C}$  w różnych elementach środowiska. Pozwalają one na rekonstrukcję zmian środowiska naturalnego w przeszłości (ostatnie 50 000 lat), śledzenie obiegu węgla w środowisku współczesnym, badanie skażeń środowiska nadmierną ilością związków węgla produkowanych w procesach przemysłowych, jak również skażeń po wybuchach jądrowych i wskutek awarii elektrowni jądrowych. Ważnym elementem działalności Laboratorium są datowania radiowęglowe, które mają charakter badań interdyscyplinarnych prowadzonych od wielu lat w ramach prac naukowo-badawczych, finansowanych przez różne placówki naukowe w kraju i za granicą. Znajdują one swoje zastosowanie w geologii, paleohydrologii, paleogeografii, paleobotanice i archeologii.

Zespół prowadzi szeroką działalność dydaktyczną.

### **3.16. Politechnika Poznańska, Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej, Zakład Radio i Fotochemii**

Zakład prowadzi radioizotopowe badania składników zespołu sieciującego stosowanych w produkcji opon samochodowych. Równomierność rozmieszczenia składników zespołu sieciującego (siarka, tlenek cynku, kwas stearynowy, stearynian cynku) w matrycy polimerowej zależy od ilości składników oraz od ich stanu fizycznego (ciało stałe, ciecz). Temperatura topnienia tych związków zależy od ich właściwości fizykochemicznych, a także od tego, czy występują one jako pojedyncze związki, czy jako mieszaniny eutektyczne. Tworzenie mieszanin eutektycznych może powodować lepszą jednorodność mieszanek gumowych, lepsze ich właściwości przy stosowaniu mniejszych ilości poszczególnych składników. Daje to wymierne efekty ekonomiczne, a także może wyjaśnić wiele zjawisk fizykochemicznych zachodzących w czasie przygotowywania mieszanek gumowych i produkcji opon samochodowych, co stanowi znaczący problem technologiczny (np. wykwitanie siarki na powierzchni mieszanki w czasie jej magazynowania). Wiadomo również, że siarkę stosuje się w postaci past w olejach mineralnych co może poprawiać dyspersję składników w mieszance gumowej jako skutek zwilżania przez olej. Uzyskiwanie past, jak i ich stosowanie stwarza wiele trudności technologicznych. Wielu producentów zaobserwowało, że dyspersja oleju w siarce nie jest zadowalająca. Może to w istotny sposób wpływać zarówno na rozmieszczenie składników w mieszance gumowej, jak i na powstawanie mieszanin eutektycznych.

W zakładzie przeprowadzono badania nad: tworzeniem mieszanin eutektycznych przez składniki zespołu sieciującego; dyspersją i wykwitaniem siarki rozpuszczalnej i polimerycznej (stosując w warunkach laboratoryjnych i technologicznych promieniotwórczy znacznik  $^{35}\text{S}$ ); dyspersją tlenku cynku i stearynianu cynku (stosując promieniotwórczy znacznik  $^{65}\text{Zn}$ ); dyspersją oleju w siarce rozpuszczalnej i polimerycznej (przez pomiar i analizę ultrasłabej chemiluminescencji powstałej po ozonowaniu próbek). Uzyskano szereg cennych wniosków technologicznych, które przekazano współpracującym technologom z Olsztyńskiej Fabryki Opon Samochodowych oraz przedstawicielom firmy Kali-Chemie Akzo z Hannoveru.

### **3.17. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej, Zakład Geofizyki Jądrowej**

Zakład wykonuje oznaczenia radiometryczne radionuklidów naturalnych i sztucznych w wodach, w próbkach geologicznych i środowiskowych. Opracowano technikę oznaczania następujących izotopów: U-238, U-235, U-234, Ra-226, Ra-228, Rn-222, Pb-210, Pu-242, Am-241 i Sr-90.

Pracownicy Zakładu prowadzą zajęcia dydaktyczne z radiochemii dla studentów Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej AGH i studentów Wydziału Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego.

### **3.18. Akademia Medyczna w Łodzi, Zakład Medycyny Nuklearnej**

W Zakładzie od wielu lat prowadzone są badania ukierunkowane na opracowywanie i wdrażanie do diagnostyki scyntygraficznej nowych radiofarmaceutyków. Zakład zatrudnia radiofarmaceutów i radiochemików o wysokich kwalifikacjach i dużym doświadczeniu w znakowaniu różnych preparatów izotopami promieniotwórczymi oraz w produkcji zestawów

do znakowania technetem-99m. Zakład dysponuje pracownią chemiczną oraz specjalnie przygotowanym ciągiem nowoczesnych pomieszczeń laboratoryjnych o wysokiej czystości z nadmuchem sterylnego powietrza, z boksem jałowym, wyposażonym w łożo laminarne i inne niezbędne urządzenia.

W ramach projektów finansowanych lub współfinansowanych przez KBN opracowano i wdrożono do diagnostyki medycznej wiele preparatów. W Pracowni Radiofarmacji ZMN wytwarzane są dla własnych potrzeb zestawy do znakowania technetem-99m, używane w scyntygraficznej diagnostyce schorzeń wątroby, dróg żółciowych, nerek, serca, mózgu, kośćca, stanów zapalnych i zmian nowotworowych; łącznie 11 różnych zestawów, z których pięć wdrożono do produkcji. Cztery z nich mają rejestrację MZiOŚ, a piąty jest w trakcie rejestracji.

W latach ubiegłych na zlecenia Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Izotopów w Świerku (OBRI) opracowano technologie produkcji pięciu preparatów radiofarmaceutycznych:

- PTP (kwas propanotetrafosfonowy) - do scyntygrafii statycznej wątroby;
- HMPAO (heksametylenopropylenoaminoosym) - do badania ukrwienia mózgu;
- MIBI (2-metoksy-2-metylopropanoizonytryl) - do scyntygrafii perfuzyjnej mięśnia sercowego;
- MBF - Mebrofenina (kwas N-3-bromo-2,4,6-trimetyloacetanilidoiminodioctowy) do scyntygrafii wątroby i dróg żółciowych;
- MAG<sub>3</sub> (benzoilomerkaptoacetyloglicyloglicyloglicyna) - do renoscyntygrafii.

Trzy z tych preparatów (PTP, MIBI, Mebrofenina) zostały wdrożone do produkcji w Świerku. Zakład uczestniczył również w badaniach klinicznej przydatności większości radiofarmaceutyków produkowanych przez OBRI.

Od wielu lat Zakład prowadzi prace dotyczące doskonalenia scyntygraficznej diagnostyki guzów nowotworowych. Podejmowane są badania nad przygotowaniem oraz wdrożeniem do praktyki klinicznej radiofarmaceutyków znakowanych cyklotronowym izotopem <sup>123</sup>I lub <sup>111</sup>In dla potrzeb diagnostyki onkologicznej i neurologicznej, co umożliwi kontynuację i dalszy rozwój głównych kierunków działalności naukowej naszego Zakładu.

Wykorzystując posiadane warunki aparaturowe i lokalowe, boks jałowy i pracownię radiochemiczną dostosowane do badań w warunkach sterylnych, wysokie kwalifikacje i doświadczenie zespołu badawczego Zakład podjął badania nad wdrożeniem do diagnostyki medycznej nowych, oryginalnych preparatów do badań scyntygraficznych na potrzeby onkologii i kardiologii. Możliwe to jest dzięki podjętej już współpracy z Zakładem Chemii Farmaceutycznej Akademii Medycznej (p. 3.19) oraz z Centrum Badań Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk Oddział w Łodzi.

### **3.19. Akademia Medyczna w Łodzi, Zakład Chemii Farmaceutycznej i Analizy Leków**

Wiodącą tematyką badawczą Zakładu jest badanie zależności między budową, a działaniem biologicznym substancji aktywnych na ośrodkowy układ nerwowy oraz poszukiwanie związków o selektywnym powinowactwie do niedotlenionych komórek nowotworowych jako potencjalnych związków diagnostycznych względnie terapeutycznych. Znaczne miejsce w prowadzonych pracach zajmują tutaj potencjalne radiofarmaceutyki do diagnostyki ośrodkowego układu nerwowego. Narzędziem w prowadzonych badaniach są między innymi nowoczesne metody modelowania cząsteczkowego oraz techniki nowoczesnej analizy farmaceutycznej.

W ramach współpracy z Zakładem Medycyny Nuklearnej Akademii Medycznej (p. 3.18) Zakład włączył się w badania ukierunkowane na wdrożenie w diagnostyce medycznej nowych, oryginalnych preparatów do badań scyntygraficznych na potrzeby onkologii i kardiologii.

### **3.20. Pomorska Akademia Medyczna w Szczecinie, Zakład Medycyny Nuklearnej**

W zakładzie prowadzone są prace nad otrzymywaniem radiofarmaceutyków do diagnostyki scyntygraficznej (np. leukocyty znakowane  $^{99m}\text{Tc}$ ) i terapii radioizotopowej (bleomycyna znakowana  $^{186}\text{Re}$  i  $^{188}\text{Re}$ ). Procesy znakowania prowadzi się różnymi technikami: konwencjonalną z użyciem jako reduktora roztworu  $\text{SnCl}_2$ ; zmodyfikowaną - reduktorem jest kompleks Kationit-Sn i elektrolityczną. Dużą uwagę poświęca się pracom związanym z opracowaniem metod kontroli czystości radionuklidowej i radiochemicznej. Zakład uczestniczy w międzynarodowych programach badawczych finansowanych przez MAEA.

W ramach zajęć dydaktycznych dla studentów IV roku Wydziału Lekarskiego omawiane są między innymi: podstawy fizyki jądrowej, zagadnienia związane z ochroną radiologiczną, podstawy radiofarmacji, nowoczesne techniki obrazowania, itd.

### **3.21. Akademia Medyczna w Białymstoku, Zakład Biofizyki**

Jednym z kierunków badawczych Zakładu są środowiskowe badania radioekologiczne regionu północno-wschodniej Polski. Dotyczą one pomiarów naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w środowisku (np. radon) oraz skażeń będących wynikiem awarii jądrowej w Czarnobylu (np.  $^{137}\text{Cs}$ ). Stosowane są głównie techniki pomiarowe oparte na półprzewodnikowej spektrometrii gamma oraz pomiary ciekło-scyntylacyjne przy wykorzystaniu licznika TRI-CARB.

### **3.22. Centrum Medyczne Kształcenia Podyplomowego w Warszawie, Zakład Biochemii Klinicznej**

Jednym z kierunków prac Zakładu są badania podstawowe dotyczące biologicznych funkcji glikosfingolipidów, a zwłaszcza gangliozydów. Celem tych badań jest wykrycie, poprzez fotoznakowanie, białek błon komórkowych występujących w bezpośrednim sąsiedztwie glikosfingolipidów. Stosowane są tu związki znakowane promieniotwórczym  $^{125}\text{I}$  o wysokiej radioaktywności właściwej - fotoaktywne pochodne glikosfingolipidów acylowane kwasem 4-azydosalicylowym, znakowane  $^{125}\text{I}$ . Promieniotwórczy  $^{125}\text{I}$  wprowadzany jest do pierścienia aromatycznego kwasu za pomocą chloraminy-T. Znaczniki te wykorzystuje się do fotoznakowania białek błon komórkowych.

### **3.23. Centrum Onkologii - Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie, Zakład Medycyny Nuklearnej**

Zakład prowadzi badania radiochemiczne nad nowymi radiofarmaceutykami o powinowactwie do tkanek nowotworowych. Badania obejmują syntezę, charakterystykę

fizykochemiczną i biologiczną oraz ocenę kliniczną przydatności chelatów  $^{99m}\text{Tc}$  i Re, potencjalnych radiofarmaceutyków. Szczególna uwaga jest skierowana na ligandy z donorowymi atomami siarki i azotu:  $(\text{S,S})_2$  i  $(\text{S,N})_2$ . Chelaty  $^{99m}\text{Tc}$  z takimi ligandami badane są jako potencjalne radiofarmaceutyki do diagnostyki nowotworowej, a chelaty zawierające ren – jako radioterapeutyki.

### **3.24. Instytut Medycyny Pracy im. prof. Jerzego Nofera w Łodzi, Zakład Ochrony Radiologicznej**

Głównym kierunkiem działalności Zakładu w sferze radioekologii są badania nad występowaniem radionuklidów naturalnych w środowisku oraz w miejscach pracy i budynkach mieszkalnych. Od ponad 30 lat prowadzone są pomiary stężeń radonu i jego pochodnych w różnych kopalniach w Polsce za pomocą oryginalnej metody otwartego detektora śladowego LR-115. Zakład posiada radiochemiczną pracownię izotopową klasy III ze spektrometrem typu Tukan do pomiaru stężeń aktywności naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w próbach środowiskowych, oraz specjalnym układem pomiarowym własnej konstrukcji do pomiaru aktywności radonu-222 i radu-226 w próbach wody metodą emanacyjną.

Zakład dysponuje też własną bazą laboratoryjną do wzorcowania metod pomiaru stężeń radonu i jego pochodnych w postaci komór radonowych oraz wzorców radonu firmy Pylon i Amersham. Dla zapewnienia odpowiedniej jakości i wiarygodności prowadzonych pomiarów Zakład uczestniczy w corocznych testach porównawczych organizowanych przez NRPB dla dozymetrów integrujących. Pomiary w środowisku naturalnym i w mieszkaniach wykonywane są za pomocą wysokoczułych detektorów śladowych CR 39 w kasetach zamkniętych typu NRPB. Do analizy detektorów śladowych stosowane są komputerowe analizatory obrazu mikroskopowego, zapewniające wysoką czułość i precyzję oznaczeń. Metoda pomiaru stężeń radonu za pomocą mierników integrujących uzyskała akredytację PCBC (L 327/1/2000). Na niewielką skalę prowadzone są również pomiary mocy dawki w powietrzu atmosferycznym oraz w budynkach mieszkalnych, wykonywane za pomocą dozymetrów TL typu MCP-N oraz czytników TLD produkcji Mikrolab.

Ostatnio opracowana została metoda badania retrospektywnej ekspozycji radonowej w okresie do kilkadziesiąt lat wstecz, polegająca na analizie aktywności izotopu polonu-210 w próbach szkła pochodzącego z badanych mieszkań. Przewidujemy dalsze rozwijanie i doskonalenie tej techniki, oraz próby włączenia jej do badań epidemiologicznych ludności.

W najbliższych latach działalność Zakładu koncentrować się będzie na badaniach skutków, jakie dla środowiska i ludności powodują medyczne zastosowania promieniowania jonizującego. Celem tych badań jest zmniejszenie dawki dla ludności z tytułu zastosowań promieniowania w diagnostyce i terapii. W związku z art. 23 nowej ustawy Prawo Atomowe planowane jest również rozszerzenie działalności związanej z badaniami występowania promieniowania naturalnego w zakresie nie ocenianych dotąd działalności w miejscach pod powierzchnią ziemi. Badania te, ze względu na małe ich poparcie w Polsce, włączone będą do programów międzynarodowych.

### **3.25. Instytut Leków w Warszawie, Zakład Leków Izotopowych w Świerku**

Zakład Leków Izotopowych jest zakładem Instytutu Leków w Warszawie powołanym do kontroli leków izotopowych produkowanych w kraju bądź importowanych. Zakład Leków



Izotopowych prowadzi działalność rejestracyjną obejmującą opiniowanie i ocenę dokumentacji chemiczno-biologiczno-farmaceutycznej radiofarmaceutyków wnioskowanych do rejestracji w Polsce, oraz wykonuje badania analityczne mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa i skuteczności stosowania leku w leczeniu zamkniętym.

Działalność kontrolno-badawcza ZLI obejmuje bieżącą kontrolę seryjną i związane z tym dopuszczenie do użytku radiofarmaceutyków produkowanych przez OBRI-POLATOM np.: kontrolę jakości eluatu z generatora  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , zestawów do znakowania Tc-99m, oraz radiofarmaceutyków znaczonych  $^{131}\text{I}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{32}\text{P}$ . Do statutowej działalności zakładu należy również dokonywanie zmian porejestracyjnych: przedłużanie okresu ważności, zatwierdzanie zmian składu oraz metod wytwarzania leków izotopowych.

W skład zakładu wchodzi dwie pracownie: radiochemiczna i radiobiologiczna. Do szczegółowych zadań pracowni radiochemicznej należą badania identyfikacji substancji czynnej i zanieczyszczeń radiochemicznych, ilościowe badania czystości radiochemicznej metodami chromatograficznymi, pomiar aktywności próbek badanych, adaptacja nowych metod analitycznych itp. Pracownia biologiczna wykonuje badania jałowości i apirogenności przy pomocy metod konwencjonalnych, oraz badania na zwierzętach nieszkodliwości oraz przydatności biologicznej leków izotopowych dla celów klinicznych.

Zakład prowadzi także działalność naukową w ramach badań statutowych Instytutu Leków i w ramach grantów badawczych finansowanych przez KBN. Prace naukowe ZLI dotyczą głównie opracowywania nowych leków izotopowych, oceny ich parametrów fizykochemicznych, badania losów i zachowania w ustroju, przydatności do statycznej i dynamicznej diagnostyki, oraz terapii radioizotopowej. We współpracy z Instytutem Transplantologii Akademii Medycznej w Warszawie oraz Zakładem Chirurgii Columbia Presbyterian Medical Center w Nowym Jorku Zakład Leków Izotopowych prowadzi badania nad opracowaniem preparatu scyntygraficznego do diagnostyki trzustki. Uzyskane dotychczas wyniki pozwalają wnioskować, że nowo opracowany radioizotopowy preparat będący połączeniem ditazonu ze znakowaną jodohistaminą może stanowić potencjalne narzędzie diagnostyczne do identyfikacji i oceny funkcji przeszczepionych wysepek trzustkowych.

Zakład prowadzi również wieloletnią współpracę naukową z najważniejszym polskim producentem radiofarmaceutyków: Ośrodkiem Badawczo-Rozwojowym Izotopów POLATOM w Świerku. Obecnie przedmiotem wspólnych badań są kompleksy EDTMP z radionuklidami medycznymi. Efektem tych badań jest opracowanie uniwersalnego zestawu do otrzymywania kompleksów EDTMP z technetem-99m oraz radiolantanowcami: samarem-153 i lutetem-177, z przeznaczeniem do scyntygraficznej diagnostyki układu kostnego oraz paliatywnej terapii przerzutów nowotworowych do kości.

### **3.26. Instytut Oceanologii PAN, Sopot, Pracownia Radiochemii**

Tematyka badawcza Pracowni obejmuje zagadnienia pomiarowe niskich aktywności radionuklidów w środowisku morskim. Przedmiotem badań było m.in. rozmieszczenie strontu-90, cezu-137, plutonu-239,240 i plutonu-238 oraz naturalnego polonu-210 w rozmaitych materiałach, jak woda morska, osady dennie i organizmy żywe, oraz przepływ tych radionuklidów między poszczególnymi komponentami środowiska.

Obecne prace obejmują śledzenie losów wybranych radionuklidów w Morzu Bałtyckim, inwentaryzacji ważniejszych radionuklidów ze źródeł antropogenicznych, wykorzystanie radionuklidów naturalnych i antropogenicznych do badania tempa współczesnej sedymentacji w Bałtyku i ruchu rumowiska w strefie przybrzeżnej (współpraca z geologami z PIG).

Udoskonalane są metody pomiarów małych aktywności (usuwanie źródeł błędów systematycznych). Prowadzona jest współpraca z producentami materiałów referencyjnych przez współuczestnictwo w ich charakteryzacji i atestacji.

Laboratorium prowadzi też współpracę z MAEA w zakresie organizowania testów biegłości (proficiency testing) dla krajów członkowskich i przy wytwarzaniu próbek testowych o znanym stężeniu radionuklidów. Pracownicy laboratorium są zapraszani do wykonywania ocen wyników międzynarodowych badań porównawczych. Laboratorium jest - obok CLOR - jednym ze światowych laboratoriów referencyjnych, tworzących sieć wczesnego ostrzegania przed skażeniami radioaktywnymi (ALMERA Network). W tej roli systematycznie i z dobrymi ocenami uczestniczy w testach sprawdzających jakość pomiarów. Pracownicy laboratorium są ekspertami MAEA w zakresie organizowania laboratoriów do pomiarów radioaktywności środowiskowej i prowadzą szkolenia (magistranci z lokalnych ośrodków uniwersyteckich, zagraniczni stypendyści MAEA) w zakresie analiz radiochemicznych.

Laboratorium uzyskuje dotacje MAEA oraz UE z tytułu uczestnictwa w realizacji projektów międzynarodowych (np. zakończonego w r. 1999 trzyletniego programu badania dawek otrzymywanych przez mieszkańców krajów UE na skutek kontaktu z radioaktywnymi materiałami, np. ryby, wody, osady itp., pochodzącymi z Bałtyku). Laboratorium współpracuje z 11 sąsiadami z krajów bałtyckich w monitorowaniu stanu morza pod względem poziomu radionuklidów, uczestnicząc (wolontariat) w programie "MORS" - organizacji d/s radionuklidów w ramach Komisji Helsińskiej.

### **3.27. Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, Laboratorium Radiometrii**

Laboratorium Radiometrii wykonuje oznaczenia zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w próbkach wodnych. Zawartość izotopów radu, uranu i ołowiu ( $^{210}\text{Pb}$ ) oraz całkowite aktywności promieniowania  $\alpha$  i  $\beta$  oznaczane są metodami wykorzystującymi spektroskopię ciekłoscintylacyjną. Stosowane metody nadają się również do badania próbek wód zasolonych i umożliwiają badania m.in. nad ługowalnością radionuklidów z materiałów odpadowych znajdujących się na składowiskach. Przy oznaczaniu stężeń izotopów radu w zawiesinach i polonu ( $^{210}\text{Po}$ ) wykorzystywana jest spektrometria promieniowania alfa.

Laboratorium stosuje metodę wysokorozdzielczej spektrometrii promieniowania gamma do określania stężeń izotopów promieniotwórczych w próbkach środowiskowych i odpadach przemysłowych. Posiadana aparatura pozwala praktycznie na oznaczanie wszystkich izotopów gamma-promieniotwórczych.

Oznaczenia stężeń radonu prowadzone są za pomocą własnej metody, z wykorzystaniem detektorów z węglem aktywnym, komór Lucasa i za pomocą metody z zastosowaniem detektorów śladowych (pomiaru uśrednione dla dłuższych okresów czasu).

Laboratorium Radiometrii GIG posiada wdrożony system jakości zgodny z normą PN-EN 45001 i przewodnikiem ISO/IEC nr 25. Na zgodność z normami systemu jakości Laboratorium posiada od roku 1993 certyfikat akredytacji PCBC (aktualnie numer 5/4/99). Laboratorium - jako pierwsze w kraju laboratorium radiometryczne - już w 1993 uzyskało akredytację Polskiego Centrum Badań i Certyfikacji na kompleksowe badania promieniotwórczości naturalnej i sztucznej (aktualny certyfikat akredytacji nr L 5/4/99).

Laboratorium dysponuje pracownią izotopową kl. II, co umożliwi prowadzenie badań z wysokimi aktywnościami promieniotwórczymi. Laboratorium wykonuje pomiary stężenia izotopów radu w wodach. W typowych badaniach metodą ciekłych scyntylatorów oznaczane są w wodzie izotopy radu:  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ . Stosowana aparatura pomiarowa i dobrany czas pomiaru zapewniają detekcję  $^{226}\text{Ra}$  na poziomie 5 mBq/l oraz  $^{228}\text{Ra}$  na poziomie 50 mBq/l. Oznacza się także całkowite aktywności alfa i beta i aktywności izotopu ołowiu  $^{210}\text{Pb}$ . Możliwe są również pomiary stężenia w wodzie radonu  $^{222}\text{Rn}$ , trytu  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ , znaczników izotopowych stosowanych w hydrogeologii, jak również innych izotopów alfa i beta promieniotwórczych.

Laboratorium oznacza również stężenia radionuklidów w próbkach stałych. Zakres mierzonych energii gamma (40 - 2000 keV) praktycznie pozwala oznaczać wszystkie izotopy gamma promieniotwórcze. Wzorcowanie systemów pomiarowych wykonywane jest w oparciu o materiały referencyjne pochodzące z MAEA. Wyniki badań są weryfikowane w pomiarach porównawczych prowadzonych m.in. wraz z amerykańską Agencją Ochrony Środowiska (EPA) oraz National Physics Laboratory w Wielkiej Brytanii. Pomiary wykonywane są zgodnie z wewnętrznymi procedurami systemu jakości laboratorium oraz polskimi normami.

Laboratorium wykonuje także oznaczenia stężeń radonu w budynkach mieszkalnych oraz pomiary stężeń pochodnych radonu i dawki promieniowania gamma. Opracowany został miernik ekspozycji indywidualnej na pochodne radonu, przystosowany do współpracy z indywidualnym pyłomierzem SKC produkcji angielskiej. Za jego pomocą możliwy jest równoczesny pomiar zapylenia i pochodnych radonu, również w środowisku pracy, w zakładach balneologicznych, w jaskiniach, czy w budowanych tunelach. Opracowana została metoda pomiaru frakcji wolnej krótkożyciowych produktów rozpadu radonu w powietrzu. Współczynniki konwersji stężenia na równoważnik dawki w przypadku frakcji wolnej są znacznie wyższe niż dla frakcji związanej. Dzięki tej metodzie możliwe jest określenie udziału frakcji wolnej w całkowitym stężeniu energii potencjalnej alfa pochodnych radonu i jej wkładu do dawki całkowitej. Pomiar dawek promieniowania gamma wykonywany jest za pomocą opracowanych w GIG dawkomierzy indywidualnych GAMMA-31 z detektorami termoluminescencyjnymi.

Laboratorium może podjąć się wykonania różnych innych oznaczeń stężeń radionuklidów, przydatnych np. dla inżynierii i chemii środowiska. Przykładem może być wykorzystanie spektrometrii promieniowania alfa do ustalania stężenia izotopu  $^{210}\text{Po}$  w glebie, roślinach czy osadach dennych z rzek i jezior (metoda może być zastosowana do badania migracji radionuklidów w środowisku naturalnym).

### **3.28. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski w Gdyni, Ośrodek Oceanografii i Monitoringu Bałtyku**

Ośrodek prowadzi badania skażeń w środowisku morskim Bałtyku, wywołanych obecnością radionuklidów naturalnych i sztucznych, a także badania promieniotwórczych zanieczyszczeń przyziemnej warstwy powietrza w strefie brzegowej Bałtyku: naturalnych i sztucznych radionuklidów gamma-promieniotwórczych w powietrzu, osadzie atmosferycznym oraz w wodzie wiślanej ( $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ ). Ośrodek opracowuje okresowe oceny poziomów skażeń środowiska morskiego oraz oceny stopnia dopływu radionuklidów naturalnych i sztucznych z atmosfery i dopływu wód śródlądowych na formowanie się współczesnego pola skażeń promieniotwórczych Bałtyku.

### **3.29. Państwowy Instytut Weterynaryjny, Puławy, Pracownia Ochrony Radiologicznej i Badań Izotopowych**

Pracownia ma status pracowni izotopowej klasy II. Głównymi obszarami badań są: a) opracowywanie i doskonalenie metod przeżyciowej dekontaminacji zwierząt żywnościowych skażonych radioizotopami, b) zastosowanie metod radioizotopowych w badaniach interakcji makro- i mikroelementów oraz toksykologii metali ciężkich, c) identyfikacja napromienionej żywności pochodzenia zwierzęcego z wykorzystaniem oznaczania cyklobutanonów jako markerów, d) badania toksykokinetyczne znakowanych preparatów weterynaryjnych. Obok działalności naukowej Pracownia świadczy również prace usługowe w zakresie pomiarów radiometrycznych żywności, pasz oraz prób środowiskowych.

### **3.30. Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii w Warszawie, Zakład Ochrony Radiologicznej i Radiobiologii, Pracownia Oceny Skażeń Środowiska**

Pracownia monitoruje skażenia promieniotwórcze w środowisku. Naturalne i sztuczne izotopy  $\gamma$ - i  $\beta$ -promieniotwórcze oznaczane są bądź bezpośrednio w pobranej próbce środowiskowej, bądź - w przypadku ich bardzo niskiego stężenia - stosuje się metody zateżania lub wydzielania poszczególnych radioizotopów z wykorzystaniem standardowych metod radiochemicznych opracowanych przez CLOR (np. oznaczanie  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}$  i  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ).

We współpracy z Zakładem Medycyny Nuklearnej oraz z Kliniką Nefrologii ze Stacją Dializ Centralnego Szpitala Klinicznego Wojskowej Akademii Medycznej oznaczana jest trwałość i czystość radiochemiczna znaczników izotopowych stosowanych w badaniach scyntygraficznych (radiofarmaceutyki znakowane  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{125}\text{I}$ ). Najczęściej stosowanymi metodami są metody chromatografii bibułowej, cienkwarstwowej bądź kolumnowej.

### **3.31. Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, Ośrodek Badań Weterynaryjnych, Puławy**

Pracownia Radiotoksykologii OBW zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi chemicznych i promieniotwórczych zanieczyszczeń żywności pochodzenia zwierzęcego. Ośrodek prowadzi także monitoring skażeń promieniotwórczych powietrza.

### **3.32. Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii w Warszawie, Zakład Pomiarów Dozymetrycznych i Sprzętu Radiometrycznego**

Do zadań Zakładu należą prace naukowo-badawcze i rozwojowe w zakresie:

- metod i sprzętu do detekcji promieniowania jądrowego oraz pomiaru wybranych parametrów pól promieniowania jonizującego;
- propagacji promieniowania gamma i neutronowego w materiałach osłonowych;
- metod i aparatury wykrywania wybuchów jądrowych;

- specjalistycznych aparatowni i oprogramowania systemów zbierania oraz przetwarzania informacji z rozpoznania skażeń;
- sprawdzania, kalibracji i naprawy mierników stosowanych w ochronie radiologicznej;
- sprzętu i metod szkolenia wojsk w dziedzinie ochrony przed czynnikami rażenia broni jądrowej;
- badania wpływu promieniowania na własności różnych materiałów i urządzeń.

W Zakładzie prowadzone są ponadto rutynowe pomiary związane z oceną skażenia aerozolami promieniotwórczymi atmosfery w oparciu o stacje ASS-500 oraz okresowe próby związane z oceną koncentracji promieniotwórczych izotopów ksenonu w powietrzu atmosferycznym w oparciu o aparaturę własną.

## 4. PRACE TECHNOLOGICZNE – PERSPEKTYWY ROZWOJU

### 4.1. Chemia cyklu paliwowego i odpadów promieniotwórczych

Bez wątplenia głównym zadaniem w skali światowej współczesnej radiochemii stosowanej jest opracowanie skutecznych technologii przerobu i unieszkodliwiania różnorodnych odpadów promieniotwórczych. W wielu krajach, również naszym, badane są nowe metody trwałego zestalania długożyciowych radionuklidów oraz układy licznych barier zapobiegających wydostawaniu się radionuklidów ze składowisk odpadów i ich rozprzestrzenianiu się w środowisku. Istotną rolę odgrywają tu naturalne i syntetyczne nieorganiczne sorbenty radionuklidów. Niektóre technologie sorpcji radionuklidów i zestalania odpadów mogą być stosowane do unieszkodliwiania odpadów niepromieniotwórczych zawierających toksyczne metale ciężkie.

Ważne znaczenie dla bezpiecznego długotrwałego składowania odpadów promieniotwórczych ma segregacja nuklidów średnio- i długożyciowych; w tym celu opracowuje się odpowiednie radiochemiczne metody rozdzielcze. Ciekawą propozycją alternatywną w stosunku do długotrwałego składowania radiotoksycznych długożyciowych izotopów aktywności, nagromadzających się w znacznych ilościach w wypalonym paliwie jądrowym, jest ich rozszczepianie (transmutacja) w reaktorach jądrowych, co ponadto pozwala na uzyskiwanie znacznych ilości energii. Już obecnie w niektórych typach reaktorów stosowane jest mieszane paliwo uranowo-plutonowe i w ten sposób zużywany zostaje pluton. Podobna transmutacja ameryku i kiuru, ewentualnie również neptunu, powinna przebiegać w układach podkrytycznych. Zadaniem radiochemików byłoby wówczas selektywne wydzielenie tych aktywności z odpadów po przerobie paliwa. Obecnie, w krajach mających duże ilości zmagazynowanych odpadów wysokoaktywnych, realizowane są szerokie programy badawcze ukierunkowane m.in. na otrzymanie ekstrahentów fosforoorganicznych z donorowymi atomami azotu lub siarki, wysoko selektywnych względem Am i Cm.

Bogatą tematykę radiochemiczną mają również prowadzone w niektórych krajach prace rozwojowe w dziedzinie energetyki jądrowej, np. nad nowymi typami prędkich reaktorów powielających czy nad paliwowym cyklem torowym.

Problem odpadów promieniotwórczych w Polsce znalazł właściwe rozwiązanie dopiero w drugiej połowie lat sześćdziesiątych. W ramach ówczesnego Instytutu Badań Jądrowych powstał zakład unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych, a przede wszystkim zorganizowano centralne składowisko odpadów promieniotwórczych w miejscowości Różan. Integralną częścią tego zakładu była komórka badawcza, której zadaniem było doskonalenie stosowanych technologii i opracowywanie nowych. Wszystkie stosowane w kraju technologie unieszkodliwiania i składowania odpadów promieniotwórczych opracowywali i wdrażali pracownicy obecnego Instytutu Energii Atomowej (IEA).

Odrębną kategorię odpadów promieniotwórczych stanowią skażenia powstałe w wyniku wydobycia w latach 50. rud uranowych w Kowarach, a wymagające rekultywacji skażonych terenów, a także - w znacznie mniejszym stopniu - lokalne skażenia środowiska radem z wód niektórych kopalni węgla kamiennego na Śląsku.

## 4.2. Produkcja radionuklidów i związków znakowanych

Liczne i wszechstronne zastosowania radionuklidów jako źródeł promieniowania jonizującego oraz znaczników promieniotwórczych w przemyśle, medycynie, badaniach naukowych stały się możliwe po rozpoczęciu ich produkcji na skalę technologiczną. Głównym źródłem radionuklidów są reaktory jądrowe, ale znaczące ich ilości otrzymuje się również w akceleratorach cząstek naładowanych, np. w cyklotronach. Zadaniem radiochemików jest selektywne wydzielenie określonych radionuklidów z napromienionego materiału tarczy oraz przeprowadzenie ich w pożądane formy chemiczne. Specjalnym problemem jest otrzymywanie związków znakowanych radionuklidami o dużej aktywności właściwej. Niektóre z tych związków znajdują zastosowanie w medycynie nuklearnej jako radiofarmaceutyki.

Radionuklidy i preparaty promieniotwórcze dla medycyny, przemysłu i nauki są w Polsce produkowane głównie przez OBRI-POLATOM w Świerku, który otrzymuje radionuklidy reaktorowe, wytwarzane w reakcjach jądrowych ( $n,\gamma$ ), ( $n,p$ ) i ( $n,f$ ), kładąc największy nacisk na produkcję radiofarmaceutyków. Izotopy cyklotronowe, przeznaczone głównie dla medycyny nuklearnej, produkowane są - na razie w niewielkich ilościach - przez Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie na zaprojektowanym i zbudowanym przez własny zespół cyklotronie AIC-144, oddanym do eksploatacji w roku 1998.

Poza radionuklidami i preparatami promieniotwórczymi do zastosowań medycznych wytwarzane są w kraju zestawy do znakowania (np. technetem-99m), które umożliwiają otrzymywanie radiofarmaceutyków w klinice, bezpośrednio przed użyciem. Zestawy takie produkuje głównie OBRI-POLATOM oraz Zakład Medycyny Nuklearnej Akademii Medycznej w Łodzi. Kontrolę radiofarmaceutyków (krajowych i importowanych) oraz odpowiednią działalność rejestracyjną prowadzi Zakład Leków Izotopowych Instytutu Leków w Warszawie.

Produkcja radionuklidów dla potrzeb diagnostyki medycznej i terapii w Polsce jest jednym z kierunków nowego Programu Wieloletniego "Izotopy i Akceleratory", koordynowanego przez Państwową Agencję Atomistyki. Niestety, realizacja Programu nie rozpoczęła się - jak planowano - w roku 2000 i termin jej rozpoczęcia wciąż jeszcze (kwiecień 2001) nie jest znany.

## 5. PROGRAMY PRAC TECHNOLOGICZNYCH OŚRODKÓW NAUKOWYCH

### 5.1. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie

W Instytucie prowadzone są prace związane z wykorzystaniem metod znacznikowych (znaczniki radioizotopowe, np.  $^{82}\text{Br}$  i  $^{140}\text{La}$ , naturalne izotopy promieniotwórcze i stabilne, np. D,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{32}\text{S}$ ) do diagnostyki parametrów pracy instalacji przemysłowych oraz w ochronie środowiska (parametry ruchu wód powierzchniowych i podziemnych oraz parametry rozptyłu zanieczyszczeń w naturalnych odbieralnikach wodnych - rzekach, zbiornikach).

Opracowywane są metody radiochemicznego przetwarzania znaczników w celu uzyskania ich odpowiednich właściwości fizykochemicznych oraz wielopunktowe układy pomiarowe do określania zmian stężenia znacznika w funkcji czasu.

W ostatnich latach prowadzono badania radioznacznikowe i znacznikowe stacji oczyszczania ścieków przemysłowych, w szczególności petrochemicznych, oraz badania reaktorów chemicznych. Określono charakterystyki dynamiczne takich urządzeń przemysłowych jak piece metalurgiczne i szklarskie, uśredniacze, odstojniki, komory aeracyjne, osadniki finalne, krystalizatory, reaktory biologiczne. W wyniku tych prac sformułowano wnioski dotyczące wymaganych zmian konstrukcyjnych bądź technologicznych.

Prace ukierunkowane na ochronę środowiska dotyczą bilansowania ilości ścieków, określania parametrów opisujących dyspersję zanieczyszczeń w rzekach i lokalizowania miejsca zrzutu ścieków do rzek z punktu widzenia minimalizacji skutków oddziaływania ścieków na środowisko.

W najbliższym czasie metody znacznikowe znajdą szersze zastosowanie w badaniach procesów przepływów wielofazowych jako metoda testująca i sprawdzająca wyniki komputerowego modelowania przepływów. Pomiarów tego typu wymagać będą wyspecjalizowanej wielopunktowej aparatury pomiarowej wraz z rozbudowanym oprogramowaniem równoczesnego przetwarzania wielu sygnałów. Kompleksowa interpretacja wyników badań środowiskowych z zastosowaniem znaczników promieniotwórczych  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  i krótkożyciowych izotopów szeregu uranowego, a także pomiarów zmian równowagowych stosunków stabilnych izotopów wodoru, węgla, tlenu i siarki umożliwi precyzyjne określanie genezy zanieczyszczeń wód podziemnych oraz bilansowanie ładunków zanieczyszczeń geo- i antropogenicznych odprowadzanych do wód powierzchniowych.

Instytut opracowuje fizykochemiczne metody i technologie przerobu i unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych. W szczególności badane są możliwości selektywnego lub grupowego wydzielania z roztworów wodnych i zateżenia określonych radionuklidów, zwłaszcza długożyciowych, metodami sorpcyjnymi i membranowymi (ciśnieniowymi i destylacyjnymi).

W ramach zadania 4.1 Strategicznego Programu Rządowego SPR-4 "Gospodarka Odpadami Promieniotwórczymi i Wypalonym Paliwem Jądrowym", realizowanego w latach 1997-99, przygotowano (wspólnie z Zakładem Doświadczalnym Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych Instytutu Energii Atomowej w Świerku) założenia projektowe i zbudowano pilotową instalację membranową JP3RO do zateżenia ciekłych odpadów radioaktywnych o wydajności  $1\text{ m}^3/\text{h}$ . Instalacja ta została włączona do układu przerobu nisko



i średnio aktywnych odpadów ciekłych w ZDUOP IEA i będzie zatężała większość powstających w kraju ciekłych odpadów promieniotwórczych. Może być ona także podstawą budowy podobnych instalacji dla potrzeb energetyki jądrowej.

W ramach zadania 4.4b SPR-4 opracowane zostały i przebadane selektywne sorbenty nieorganiczne i kompozytowe. Wytypowano i zbadano właściwości sorbentów stanowiących potencjalny materiał wypełnienia pierwszej i dalszych barier inżynierskich zapobiegających migracji najważniejszych radionuklidów długożyciowych ( $^{90}\text{Sr}$ , aktynowce) ze składowisk odpadów promieniotwórczych. Przewidywana jest kontynuacja badań ukierunkowana na wdrożenie ich wyników.

Opracowana w Zakładzie Radiochemii IChTJ chemiczna technologia dekontaminacji została z powodzeniem zastosowana do dezaktywacji stalowych i aluminiowych elementów obiegów chłodzenia zlikwidowanego badawczego reaktora jądrowego EWA w Świerku.

## **5.2. Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie**

Instytut prowadzi produkcję radionuklidów i radiofarmaceutyków. W roku 1998 został oddany do eksploatacji cyklotron AIC-144, zaprojektowany i zbudowany w IFJ. Jednym z zadań cyklotronu będzie wytwarzanie izotopów promieniotwórczych, stosowanych m.in. w badaniach biomedycznych. Pierwszym radionuklidem otrzymanym za pomocą cyklotronu AIC-144 był  $^{11}\text{C}$ , emiter pozytonów, wytworzony w grudniu 1998 z tarczy  $\text{B}_2\text{O}_3$  w reakcji z protonami. Do końca marca 2000 otrzymano kolejne porcje  $^{11}\text{C}$  oraz m.in.  $^{111}\text{In}$  w reakcji metalicznego srebra z cząstkami  $\alpha$ . Jak dotąd nuklidy te wytwarzano w IFJ na skalę laboratoryjną, używając prowizorycznego stanowiska do aktywacji tarcz wiązką wewnętrzną. Obecnie w Instytucie budowane jest zautomatyzowane stanowisko do otrzymywania większych aktywności izotopów cyklotronowych.

## **5.3. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM w Świerku**

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM jest głównym krajowym producentem preparatów promieniotwórczych - radionuklidów, związków znakowanych i radiofarmaceutyków - dla medycyny, przemysłu, nauki i ochrony środowiska. Unikalne wyposażenie techniczne umożliwia prowadzenie prac produkcyjnych i badawczo-rozwojowych ze źródłami na średnim i wysokim poziomie aktywności. Wykorzystywane w praktyce produkcyjnej procesy technologiczne opierają się głównie na własnych opracowaniach badawczych, rozwojowych i modernizacyjnych.

Podstawowe grupy asortymentowe produktów wytwarzanych w OBRI to:

- radioizotopowe preparaty do diagnostyki i terapii medycznej *in vivo* (diagnostyka chorób nerek, wątroby, płuc, mózgu, śledziony oraz układu kostnego i żółciowego, terapia tarczycy),
- zestawy radioimmunologiczne stosowane w badaniach *in vitro* do oznaczania hormonów, markerów nowotworowych i innych substancji biologicznie czynnych zawartych w surowicy krwi i płynach ustrojowych człowieka stosowane przede wszystkim w onkologii, endokrynologii i ginekologii,
- zamknięte źródła promieniotwórcze stosowane w gammagrafii przemysłowej, urządzeniach sygnalizacyjnych i kontrolnych oraz medycynie,
- źródła i roztwory wzorcowe do kalibracji aparatury pomiarowej,

- związki nieorganiczne znakowane różnymi izotopami promieniotwórczymi.

OBRI POLATOM rozwija i upowszechnienia nowoczesną diagnostykę medyczną w kraju, zaopatrując w preparaty izotopowe około 1100 odbiorców, głównie ośrodki medyczne, i pokrywając ok. 65% krajowego zapotrzebowania na preparaty medyczne do diagnostyki izotopowej. Ponadto OBRI POLATOM eksportuje swoje wyroby do Anglii, Chin, Litwy, Ukrainy, Czech, Słowacji, Bułgarii, Belgii, Francji, Łotwy, Węgier, Pakistanu, Jugosławii, Niemiec, Finlandii (podano w kolejności wg wielkości eksportu w 1999 r.) oraz sporadycznie do kilku innych krajów. Eksport w 1999 r. stanowił 32% sprzedaży wyrobów ogółem.

Ośrodek oferuje także usługi analityczne w dziedzinie immunodiagnostyki, w zakresie metrologicznej kontroli materiałów promieniotwórczych i kalibracji układów pomiarowych, pomiarów, przeładunku i przechowywania materiałów promieniotwórczych oraz ich transportu.

Coraz powszechniejsze stosowanie technik i metod izotopowych, głównie w medycynie nuklearnej, wymaga stosowania wysokiej klasy źródeł wzorcowych różnych radionuklidów do kalibracji aparatury pomiarowej i kontrolnej. Od roku 1999 OBRI POLATOM jest depozytariuszem Państwowego Wzorca Jednostki Miary Aktywności Promieniotwórczej Radionuklidów, ustanowionego przez Prezesa Głównego Urzędu Miar. Zakład Metrologii Materiałów Promieniotwórczych OBRI POLATOM w Świerku jest jedynym w Polsce laboratorium zajmującym się wytwarzaniem wzorców aktywności promieniotwórczej oraz w szerokim zakresie metrologią radionuklidów. Wzorce promieniotwórczości są odnoszone do Państwowego Wzorca w hierarchicznym układzie sprawdzeń powiązanych z międzynarodowym systemem porównań w ramach BIPM oraz Eurometu.

Perspektywy dalszego postępu w dziedzinie metod wytwarzania zamkniętych źródeł promieniotwórczych dla medycyny związane są z rozwojem brachyterapii. Izotopowe aplikatory oftalmiczne rutenu-106 wytwarzane w OBRI POLATOM są już stosowane w terapii nowotworów złośliwych gałki ocznej. Kontynuowane będą prace nad technologią wytwarzania nowych aplikatorów umożliwiających ich aplikację w pobliżu nerwu wzrokowego. Planowane jest opracowanie technologii i uruchomienie produkcji aplikatorów jodu-125 o własnej, oryginalnej konstrukcji, która powinna zapewnić znaczne obniżenie ich ceny w stosunku do obecnie dostępnych.

Obserwowany rozwój technik izotopowych stosowanych w sterowaniu i kontroli procesów przemysłowych, nauce i ochronie środowiska wymagać będzie dalszych badań nad nowymi metodami utrwalania i hermetyzacji radionuklidów.

OBRI-POLATOM prowadzi rozwiniętą współpracę w zakresie badawczym i produkcyjnym z licznymi partnerami krajowymi i zagranicznymi.

#### **5.4. Instytut Energii Atomowej w Świerku, Zakład Doświadczalny Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych**

Zakład Doświadczalny w ścisłej współpracy z Pracownią Metod Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych Zakładu Energetyki Jądrowej IEA prowadzi badania nad oczyszczaniem, przetwarzaniem i zestalaniem odpadów promieniotwórczych, a w ich wyniku opracowuje i wdraża technologie przerobu, unieszkodliwiania i składowania odpadów promieniotwórczych. Badania te uwzględniają warunki składowania odpadów, wymagania ochrony środowiska związane z limitami uwolnień, wymagania ochrony radiologicznej oraz kalkulację ekonomiczną.

Składowisko odpadów promieniotwórczych rozpatrywane jest jako układ multibarier zapobiegający migracji wody, a tym samym migracji radionuklidów. Pierwszą barierę stanowi forma samego odpadu, której istotnymi parametrami są m.in. rozpuszczalność, palność czy reaktywność. W ZDUOP-IEA opracowano sorbenty nieorganiczne do oczyszczania ścieków promieniotwórczych, które trwale wiążą izotopy promieniotwórcze przez tworzenie nierozpuszczalnych związków. Te same sorbenty mogą być dodawane do koncentratów powyparnych w celu uzyskania nierozpuszczalnych form zawierających radionuklidy.

Drugą barierę stanowi materiał zestalający. Do budowy tej bariery stosowane są materiały łatwo dostępne i względnie tanie. Najczęściej są to betony, asfalty i tworzywa sztuczne. W przypadku rozpatrywania pierwszej i drugiej bariery łącznie istotne jest ich wzajemne oddziaływanie: nie może dochodzić do reakcji powodujących powstanie uszkodzeń zwiększających ługowalność czy obniżenie wytrzymałości mechanicznej produktów zestalania odpadów promieniotwórczych. W IEA wykonano wiele prac badawczych dotyczących wyboru materiałów zestalających, które wynikały z bieżących potrzeb ZDUOP. Dotyczyły one m.in. doboru optymalnych marek cementu czy asfaltu, wyboru rodzaju tworzyw sztucznych (za perspektywiczne uznano dostępne na rynku żywice epoksydowe i poliestrowe). Niezależnie od tego prowadzono prace sondażowe o możliwości zastosowania innych materiałów np. betonów siarkowych.

Badania trzeciej bariery (opakowanie) i następnych (wypełnienie, konstrukcja składowiska, warstwa izolacyjna) były prowadzone w IEA pod kątem oddziaływania tych barier z układem barier I-III i bariery naturalnej.

W latach 1997-1999, w ramach Strategicznego Programu Rządowego SPR-4 realizowano prace w ramach projektu badawczego "Sztuczne bariery ochronne dla powierzchniowego i głębokiego składowiska odpadów promieniotwórczych". Były one kontynuacją wcześniej prowadzonych badań dotyczących materiałów zestalających w warunkach przyspieszonego starzenia, trwałości opakowań i oceny jakości odpadów kierowanych do składowania.

Oczekuje się, że w przyszłości z pewnością powróci się do badań na potrzeby przyszłej energetyki jądrowej. Takie prace realizowano w IEA do czasu wstrzymania budowy elektrowni atomowej w Żarnowcu. Prace takie powinny się rozpocząć z chwilą ustalenia lokalizacji nowego składowiska, które zastąpi obecnie eksploatowane składowisko w Różanie, i będzie rozszerzone na odpady z energetyki jądrowej.

Oczekuje się, że w okresie do 2005 roku zmienią się radykalnie technologie przetwarzania i zestalania odpadów promieniotwórczych. W miejsce dotychczas stosowanej technologii oczyszczania ścieków promieniotwórczych z wykorzystaniem sorbentów nieorganicznych do końca 2001 roku wdrożone zostaną metody wyparna i membranowa (odwrócona osmoza), opracowana w IChTJ. Otrzymane koncentraty będą cementowane na nowo zbudowanej instalacji cementowania. Będą czynione starania, aby do końca 2005 roku powstała instalacja spalania odpadów stałych, cieczy organicznych i odpadów biologicznych. Popioły ze spalania będą utrwalane w cemencie lub w tworzywach sztucznych.

Stałym elementem działalności ZDUOP będzie doskonalenie metod badań jakościowych i kontroli odpadów kierowanych do składowania. Dotyczyć one będą nie tylko strony radiologicznej, ale również własności fizykochemicznych i biologicznych odpadów.

Przedmiotem badań i analiz planowanych na najbliższy okres są również zagadnienia migracji radionuklidów z odpadów do środowiska w czasie długoterminowego składowania (300, 500 i 10000 lat). Powinny one uwzględniać zniszczenie sztucznych barier (materiał zestalający, opakowanie, konstrukcja składowiska itp.). Wyniki tych prac są niezbędne do przygotowania ocen bezpieczeństwa składowisk odpadów promieniotwórczych.

## 5.5. Akademia Medyczna w Łodzi, Zakład Medycyny Nuklearnej

W Zakładzie wytwarzane są zestawy do znakowania technetem-99m, używane w scyntygraficznej diagnostyce schorzeń wątroby, dróg żółciowych, nerek, serca, mózgu, kośćca, stanów zapalnych i zmian nowotworowych. W ramach koncesji produkowane są następujące zestawy zarejestrowane przez MZiOŚ:

1. zestaw do otrzymywania kompleksu  $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ ;
2. zestaw do otrzymywania kompleksu  $^{99m}\text{Tc-EC}$ ;
3. zestaw do otrzymywania kompleksu  $^{99m}\text{Tc-ECD}$ ;
4. zestaw do otrzymywania kompleksu  $^{99m}\text{Tc-IgG}$ ;
5. zestaw do otrzymywania kompleksu  $^{99m}\text{Tc-HEDP}$ .

Ponadto dla własnych potrzeb Zakład wytwarza następujące zestawy do znakowania Tc-99m: PTP, DTPA, mebrofenina (MBF), HMPAO, pirofosforan, koloid siarczkowy.

W oparciu o wytwarzane preparaty Zakład Medycyny Nuklearnej, działając w ramach Centralnego Szpitala Klinicznego AM i dysponując nowoczesną aparaturą najwyższej klasy, świadczy usługi diagnostyczne (8 - 10 tysięcy badań rocznie).

## 5.6. Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, Laboratorium Radiometrii

Zasolone wody z kopalń węgla często zawierają podwyższone stężenia izotopów radu, zwłaszcza  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ . Odprowadzanie wód radowych na powierzchnię prowadzi do skażeń promieniotwórczych środowiska naturalnego. W celu zapobieżenia skażeniom w Laboratorium opracowano współstrąceniowe metody i technologie oczyszczania wód radowych, zarówno typu A (zawierających bar), jak i typu B (niezawierających baru). Metoda oczyszczania wód radowych typu B została opatentowana. Opracowane technologie oczyszczania wdrożono w kopalniach Krupiński, 1-Maja i Piast. Technologia oczyszczania wód z radionuklidów naturalnych może być wykorzystana i w innych gałęziach przemysłu wydobywczego.

W związku z ograniczaniem wydobycia węgla w Polsce i planowaną likwidacją kopalń pojawiają się problemy związane z rekultywacją terenów składowisk odpadów kopalnianych czy też osadników wód dołowych. Ilości osadów o podwyższonej promieniotwórczości mogą dochodzić do tysięcy ton, a sposoby ich unieszkodliwiania - choćby z tego powodu - muszą być inne niż w przypadku wysokoaktywnych odpadów z cyklu paliwowego reaktorów. Ze względu na długoletnie doświadczenie w pracy z naturalnymi izotopami promieniotwórczymi, prowadzonymi badaniami nad ograniczaniem skażeń powierzchni, czy wtórnego wymywania radu z osadów kopalnianych, Laboratorium zamierza opracowywać technologie rekultywacji terenów skażonych materiałami typu NORM.

## 6. DZIAŁALNOŚĆ EDUKACYJNA

Niepokojąco niski stan wiedzy polskiego społeczeństwa o promieniowaniu jądrowym i jego skutkach, powtarzające się przypadki dezinformowania o tych problemach przez nieodpowiedzialne media, ograniczanie zakresu nauczania w tej dziedzinie dzieci, młodzieży szkolnej i studentów zostały omówione na krajowej konferencji radiochemii i chemii jądrowej w Kazimierzu w 1998 r. Stały się one jednym z głównych tematów dyskusji plenarnej zapoczątkowanej referatem prof. A. Czerwińskiego z UW (p. A. Czerwińska, A. Czerwiński, Wiadomości Chemiczne, 1999, 53, 745). Wskazywano na konieczność różnorodnego działania zmieniającego ten stan rzeczy - poprzez wyższe uczelnie (konferencje rektorów), współpracę z Polskim Towarzystwem Chemicznym, Polskim Towarzystwem Nukleonowym i Polską Agencją Atomistyki.

Obecnie zajęcia dydaktyczne dla studentów (wykłady i ćwiczenia laboratoryjne) z radiochemii i chemii jądrowej oraz dyscyplin pokrewnych (np. geochemia izotopów, techniki izotopowe itp.) - jako odrębnych przedmiotów - prowadzone są w Polsce w różnym zakresie i w różnym wymiarze przez niektóre wyższe uczelnie. Według dostępnych danych są to: Uniwersytet Warszawski, Uniwersytet Wrocławski, Politechnika Wrocławska, AGH (także dla studentów Wydziału Chemii UJ), Uniwersytet Gdański, UMCS w Lublinie, UAM w Poznaniu, Uniwersytet Toruński, Politechnika Śląska, Uniwersytet Śląski, Politechnika Łódzka, Akademia Podlaska w Siedlcach, Pomorska Akademia Medyczna oraz WSP w Częstochowie. Wiele z tych uczelni prowadzi ponadto studia doktoranckie obejmujące interesującą nas problematykę. Studia doktoranckie w dziedzinie chemii, w tym również radiochemii i chemii jądrowej, prowadzone są także przez IChTJ. Pracownia Radiochemii IOPAN prowadzi szkolenia w zakresie analiz radiochemicznych.

Na polskim rynku księgarskim dostępny jest bardzo dobry podręcznik akademicki *Chemia jądrowa*, W. Szymańskiego, wyd. II, PWN, Warszawa 1996, oraz nieliczne podręczniki anglojęzyczne. Starsze pozycje w języku polskim są wyczerpane. Przygotowywane jest nowe wydanie *Chemii jądrowej* J. Sobkowskiego. Brak jest natomiast polskich książek dotyczących radiofarmacji. Rysuje się pilna potrzeba przygotowania nowoczesnego podręcznika z tej dziedziny.

Bardzo niedobra jest sytuacja na rynku podręczników szkolnych. Aktualne i dobre, choć krótkie informacje na poziomie zaawansowanym m.in. z radiochemii i chemii jądrowej przynosi wciąż jeszcze dostępna *Energia jądrowa i promieniotwórczość*, A. Czerwiński, Oficyna Edukacyjna Krzysztof Pazdro, Warszawa 1998, ale wyczerpana jest wcześniejsza, łatwiejsza w odbiorze książka tego autora: *Blaski i cienie promieniotwórczości*, A. Czerwiński, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1995. W wyniku działalności Polskiej Agencji Atomistyki, która od wielu lat popularyzuje w kraju problematykę zastosowań radionuklidów oraz wykorzystania energii jądrowej, przetłumaczony został znakomity podręcznik dla dzieci i młodzieży, w przystępny sposób omawiający zagadnienia promieniotwórczości, opracowany przez Komisję Wspólnot Europejskich i zalecany do użytku w krajach UE: *Promieniowanie i ochrona przed promieniowaniem*, J. Draijer i J. Lakey, PAA, Warszawa 1999. Niestety, niski nakład tego podręcznika (1000 egz.) praktycznie uniemożliwia jego dotarcie do szerokiego kręgu uczniów. Bardzo pożądane byłoby jego wznowienie w znacznie większym nakładzie.

Szeroko pojęta tematyka chemii jądrowej i energetyki jądrowej upowszechniana jest przez liczne ośrodki akademickie i instytuty badawcze, w formie wykładów popularno-naukowych dla młodzieży szkół średnich, w formie pokazów na kolejnych Festiwalach Nauki

w Warszawie (zespoły z Wydziałów Fizyki i Chemii, UW, CLOR-u i IChTJ) i w innych miastach, np. w Kielcach. Pracownicy ośrodków naukowych opracowują książki i podręczniki popularyzujące zagadnienia związane z promieniotwórczością oraz udzielają okazjonalnie wywiadów reporterom prasy, radia i TV.

## 7. PODSUMOWANIE

Radiochemia i chemia jądrowa na przełomie XX i XXI wieku zaczynają przewyżczać kryzys, jaki przez dłuższy czas obejmował badania związane z promieniotwórczością. Złożyło się na to kilka przyczyn. Koniec zimnej wojny i wzrost poczucia zagrożenia ekologicznego spowodowały nasilenie prac ukierunkowanych na przerób i bezpieczne składowanie odpadów jądrowych oraz na likwidację skażeń promieniotwórczych w skali globalnej. Bardzo rozwinęły się badania chemii i radiochemii środowiska. We wszystkich tych dziedzinach prowadzona jest obecnie szeroka współpraca międzynarodowa. W dziedzinie fizyki i chemii jądrowej pojawiły się nowe odkrycia wymagające badań radiochemicznych. Konieczne stało się opracowanie nowych dokładnych metod radioanalitycznych, zwłaszcza substancji śladowych. Ogromny postęp techniczny spowodował bardzo szybki rozwój medycyny nuklearnej i otworzył przed radiochemią niezmiernie możliwości prac nad radiofarmaceutykami.

W pracach nad tymi niezbędnymi i ciekawymi zagadnieniami uczestniczą także liczne ośrodki krajowe, często we współpracy międzynarodowej. Nie ma żadnej innej dziedziny badań jądrowych, która by podobnie jak radiochemia i chemia izotopów była realizowana w tak wielu ośrodkach naukowych, zarówno w instytutach resortowych, jak i w ośrodkach akademickich. Godny podkreślenia jest fakt, że wiele jednostek prowadzi bardzo potrzebne prace rozwojowe i wdrożeniowe nad opracowywaniem radiofarmaceutyków dla potrzeb medycyny nuklearnej, i że radiofarmaceutyki są w Polsce wytwarzane również w celach handlowych. Liczne realizowane tematy badawcze dotyczą radiochemii środowiska i mają wyraźne aspekty ochrony zdrowia człowieka. Waga tych zagadnień dla potrzeb zarówno społeczeństwa, jak i państwa, pozwala na postawienie tezy o konieczności utworzenia mocnego naukowo i technicznie Państwowego Instytutu Badawczego, prowadzącego prace badawcze i prace typu "służb państwowych" w dziedzinie radiochemii i chemii jądrowej.

Niestety, wciąż jeszcze nierozwiązanym u nas problemem pozostaje sprawa informowania społeczeństwa, zwłaszcza edukacji młodzieży, w zakresie szeroko pojętej tematyki jądrowej; obiektywnego wskazywania zarówno korzyści, jak i zagrożeń wynikających ze stosowania energii jądrowej i technik jądrowych. Konieczne jest jak najszybsze podjęcie działań zmierzających do stopniowej likwidacji luki pokoleniowej, jaka wytworzyła się w środowisku polskich naukowców i technologów zajmujących się tą problematyką. Poczynaniom takim dobrze służy działalność dydaktyczna w dziedzinie radiochemii i chemii jądrowej oraz blisko powiązanych z nimi kierunkach, prowadzona przez liczne ośrodki akademickie, a także studia doktoranckie i szkolenia prowadzone przez jednostki badawcze.

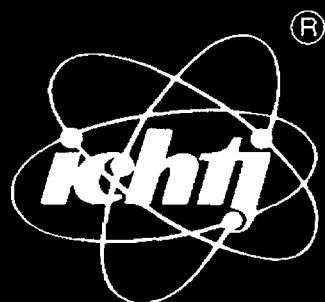
## PODZIĘKOWANIE

Materiały dotyczące poszczególnych ośrodków badawczych i wykorzystane w niniejszym opracowaniu dostarczyli autorom niżej wymienieni przedstawiciele tych ośrodków:

prof. dr hab. Rajmund Dybczyński i dr Bronisław Machaj (IChTJ),  
prof. dr hab. Zdzisław Szegłowski i dr Jerzy Wojciech Mietelski (IFJ),  
doc. dr Krzysztof Sawlewicz i doc. dr hab. Mieczysław Mielcarski (OBRI),  
dr Bogumiła Mysłek-Laurikainen (IPJ),  
mgr Włodzimierz Tomczak, mgr inż. Andrzej Cholerzyński i dr Jan Ogłaza (IEA),  
prof. dr hab. Zofia Pietrzak-Flis (CLOR),  
prof. dr hab. Jerzy Sobkowski i prof. dr hab. Jerzy Szydłowski (UW),  
prof. dr hab. Janusz Drożdżyński (UWrrocław),  
prof. dr hab. Stanisław Chibowski (UMCS), dr Jerzy Dorda (UŚI),  
prof. dr hab. Bogdan Skwarzec (UGda),  
doc. dr hab. Mieczysław Zieliński (UJ),  
prof. dr Władysław Reimschüssel (MITR),  
prof. dr hab. Witold Charewicz (PolWrocław),  
prof. dr hab. Anna Pazdur (PolŚI),  
dr Elżbieta Koczorowska (PolPozn),  
prof. dr hab. Edward Chruściel (AGH),  
prof. dr hab. Julian Liniecki i prof. dr hab. Elżbieta Mikiciuk-Olasik (AM w Łodzi),  
dr. Stanisława Szostak (PAM),  
dr Marek Zalewski (AM Białystok),  
dr Tadeusz Pacuszka (CMKP),  
prof. dr hab. Krystyna Samochocka (CentrOnk),  
dr Wojciech Chruścielewski (IMP),  
dr Piotr Garnuszek (IL-ZLI),  
dr Ryszard Bojanowski (IOPAN),  
dr hab. Jan Skowronek (GIG),  
dr inż. Romuald Dubowik (IMGW),  
lek. wet. Jarosław Rachubik (PIWet),  
dr Grażyna Mazur (WIHE-W-wa),  
mgr Beata Osiak (WIHE-Puławy),  
płk. dr inż. Wojciech Dominas (WICHiR).

Autorzy wyrażają podziękowanie wszystkim wymienionym, jak również i tym osobom, które poprzez dyskusję, pomoc techniczną lub w inny sposób przyczyniły się do powstania niniejszego opracowania.





**INSTYTUT CHEMII  
I TECHNIKI JĄDROWEJ  
INSTITUTE OF NUCLEAR  
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY**

**Dorodna 16, 03-195 Warszawa, Poland  
tel.: (+48 22) 811 06 56, fax: (+48 22) 811 15 32,  
e-mail: [sekdyrn@orange.ichtj.waw.pl](mailto:sekdyrn@orange.ichtj.waw.pl)**

