



Spektrometria całego ciała w Polsce – nauka, medycyna, dozymetria

Whole body spectrometry in Poland – science, medicine, dosimetry

Jakub Ośko¹, Renata Kierepko²

¹Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul. Soltana 7, 05-400 Otwock, tel. +48 22 273 10 32, e-mail: jakub.osko@ncbj.gov.pl

²Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk im. H. Niewodniczańskiego, ul. Radzikowskiego 152, Kraków

Narażenie wewnętrzne

Podczas prowadzenia prac z otwartymi źródłami promieniotwórczymi lub w sytuacjach awaryjnych związanych z uwolnieniem substancji promieniotwórczych do środowiska, możliwe jest wniknięcie radionuklidów drogą oddechową lub pokarmową do organizmu człowieka. Mamy wówczas do czynienia ze skażeniem promieniotwórczym, czyli niepożądaną obecnością substancji promieniotwórczej w ciele człowieka. Za skażenia nie uznaje się natomiast pożądanej obecności izotopów promieniotwórczych. Sytuacja taka ma miejsce w przypadku naturalnych radionuklidów, np.: ⁴⁰K, ³H, ¹⁴C, ²¹⁰Po, izotopów radonu, radu, uranu etc., których źródłem jest środowisko naturalne lub izotopów promieniotwórczych celowo wprowadzonych do

organizmu człowieka z powodów medycznych, tj. w celach diagnostycznych lub terapeutycznych. W takim przypadku mamy oczywiście do czynienia z narażeniem pacjenta, ale z formalnego punktu widzenia obecność tych radioizotopów nie jest klasyfikowana jako skażenie wewnętrzne.

Na mocy obowiązujących w Polsce przepisów [1] istnieje obowiązek prowadzenia środowiskowego lub indywidualnego monitoringu narażenia wewnętrznego wówczas, gdy wykonywana praca może skutkować kontaktem pracownika z substancją promieniotwórczą. Jednocześnie przepisy narzucają na laboratoria wykonujące takie badania obowiązek posiadania akredytacji. W praktyce, w Polsce, ów monitoring jest dedykowany pracownikom obiektów jądrowych (NCBJ i ZUOP) oraz górnikom (narażenie na promieniotwórcze izotopy radonu w powietrzu).

28

Streszczenie

Spektrometria całego ciała realizowana jest na terenie Polski w oparciu o dwa urządzenia zlokalizowane w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku oraz w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Ta technika pomiarowa, stosowana w powiązaniu z odpowiednio przygotowanymi kalibracjami wydajnościowymi (opracowanymi w oparciu o wykorzystanie fantomów antropometrycznych i/lub modeli numerycznych), umożliwia jakościową i ilościową analizę izotopów gamma – promieniotwórczych zdeponowanych w ciele człowieka. Spektrometria całego ciała w Polsce wykorzystywane są do rutynowego monitoringu osób narażonych zawodowo, monitoringu pracowników i pacjentów medycyny nuklearnej oraz ich rodzin, a także badań osób potencjalnie skażonych w wyniku incydentów/zdarzeń jądrowych.

Słowa kluczowe: spektrometria całego ciała, LPCC NCBJ, SCC IFJ PAN, badania *in vivo*

Abstract

Whole body spectrometry is carried out in Poland based on two devices located in the National Center for Nuclear Research in Świerk and the Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences in Krakow. This measuring technique, used together with properly prepared performance calibrations (developed based on anthropometric phantoms and / or numerical models), enables qualitative and quantitative analysis of gamma-radioactive isotopes deposited in the human body. Whole body spectrometers in Poland are used for routine monitoring of occupationally exposed personnel, monitoring of employees and patients in the field of nuclear medicine and their families, as well as research on persons potentially contaminated as a result of nuclear incidents / events.

Key words: whole body spectrometry, NCBJ whole body counter, IFJ PAN whole body spectrometer, *in vivo* measurements

otrzymano / received:

26.11.2019

poprawiono / corrected:

03.12.2019

zaakceptowano / accepted:

16.12.2019

Monitorowanie promieniotwórczych skażeń wewnętrznych

W celu monitorowania narażenia wewnętrznego człowieka stosuje się metody *in vitro* (pomiar aktywności promieniotwórczej w próbkach, np. wydalini i wydzielini pobranych od osoby monitorowanej) lub *in vivo* (bezpośredni pomiar aktywności promieniotwórczej w ciele człowieka). Badania *in vivo*, z uwagi na właściwości fizyczne promieniowania jądrowego, ograniczają się praktycznie do monitorowania skażeń wewnętrznych emiterami promieniowania gamma. Zaletą ich jest możliwość oznaczania izotopów gamma – promieniotwórczych wchodzących w skład związków nierozpuszczalnych, a zdeponowanych np. w płucach [2]. W badaniach tych używa się spektrometrów całego ciała lub spektrometrów pojedynczych narządów (np. tarczyca, płuca).

W Polsce istnieją dwa urządzenia służące do oznaczeń radionuklidów gamma promieniotwórczych w całym ciele człowieka, tj. Licznik Promieniowania Całego Ciała (LPCC) w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) oraz Spektrometr Całego Ciała (SCC) w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN). Na podstawie pomiarów przeprowadzonych przy ich zastosowaniu można nie tylko dokonać identyfikacji izotopów gamma – promieniotwórczych, ale także oszacować pochodzącą od nich obciążającą dawkę efektywną.

Spektrometria całego ciała

Spektrometria całego ciała jest techniką pomiarową, która powstała w okresie zimnej wojny, w odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie kontroli skażeń wewnętrznych i zewnętrznych człowieka. Pierwszy spektrometr całego ciała został zaprezentowany opinii publicznej na konferencji w Genewie w 1955 roku [3]. Od tego czasu powstało wiele autorskich konstrukcji tych

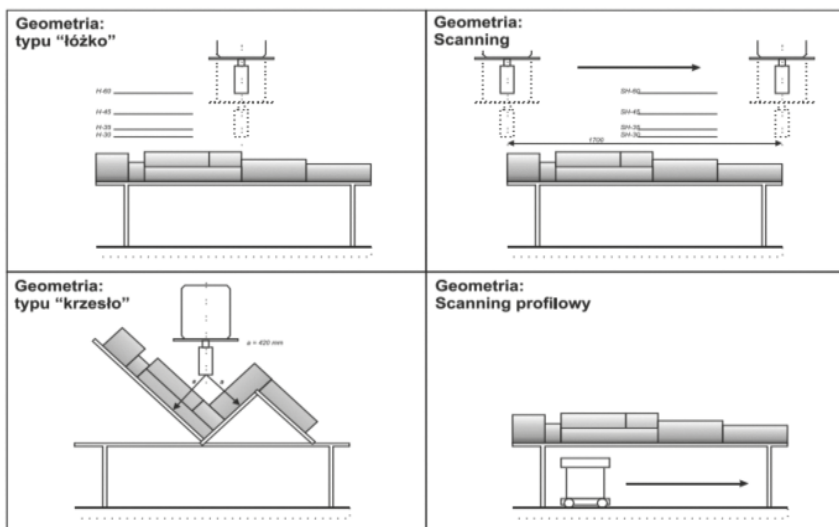
urządzeń (zanim pojawiły się egzemplarze komercyjne) różniących się, jak w przypadku „tradycyjnej” spektrometrii promieniowania gamma, nie tylko budową osłony biernej spektrometru, ale także geometrią pomiaru (Rys. 1) czy zastosowanym układem detekcji (np. detektory NaI(Tl) czy HPGe).

Licznik Promieniowania Całego Ciała w NCBJ

Licznik Promieniowania Całego Ciała w NCBJ został uruchomiony w 1968 roku. Pomiar przy jego wykorzystaniu są wykonywane za pomocą pojedynczego detektora germanowego HPGe, który jest umieszczony w kabinie osłonnej. Na rysunku 2 przedstawiono wewnątrz kabiny LPCC, a na rysunku 3 schemat budowy jej ściany.



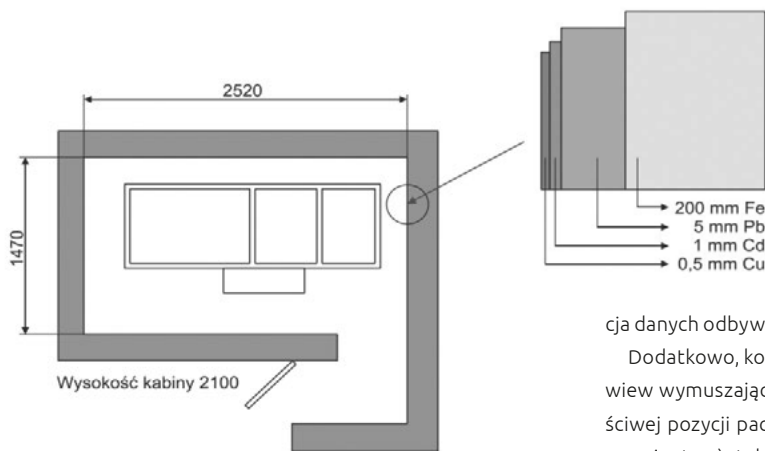
Rys. 2 Wnętrze komory Licznika Całego Ciała w NCBJ
Źródło: Archiwum autorów.



Rys. 1 Przykłady geometrii pomiarowych stosowanych w spektrometrach całego ciała
Źródło: [4].

Konstrukcja taka umożliwia obniżenie poziomu naturalnego tła promieniowania gamma do poziomu ok. 40 razy niższego w stosunku do tego występującego w otoczeniu kabiny.

Obecna konstrukcja kabiny osłonnej LPCC powstała w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Jest to labiryntowa kabina z osłoną wykonaną z 200 mm stali, 5 mm ołowiu, 1 mm kadmu i 0,5 mm miedzi (licząc od zewnątrz). Stal wykorzystana do budowy osłony pochodzi z wraku okrętu wojennego zatopionego w zatoce Puckiej podczas II wojny światowej. Okręt został wybudowany przed wojną i dzięki temu materiały, z których został wykonany, nie zawierają promieniotwórczych domieszek pochodzących z prób broni jądrowej oraz awarii elektrowni jądrowych. Wewnątrz kabiny umieszczona jest leżanka, która umożliwia pomiar w geometrii: krzesła i łóżka oraz pomiar scanningowy.



Rys. 3 Schemat budowy ściany ostony Licznika Cętego Ciała w NCBJ
Źródło: [4].

W LPCC do detekcji promieniowania gamma wykorzystywany jest detektor germanowy wysokiej czystości (Canberra, typ GX4018) o energetycznej zdolności rozdzielczej ok. 1,8 keV dla energii 1,33 MeV izotopu Co-60 i względnej wydajności 40%. Detektor jest umieszczony statycznie nad leżanką z pacjentem. Drugim detektorem jest scyntylator NaI(Tl) o objętości 6000 cm³ umieszczony na ruchomym wózku pod leżanką pacjenta, który umożliwia lokalizację przestrzenną izotopu w ciele pacjenta. Nie jest on jednak używany podczas rutynowych pomiarów.

Spektrometr Cętego Ciała w IFJ PAN

Spektrometr Cętego Ciała istniejący w IFJ PAN został skonstruowany w 1963 roku w Łodzi, a w 2008 roku przekazany do Krakowa. Ostona bierna SCC wykonana jest z 18 ton stali pochodzącej z dziewiętnastowiecznych kotłów parowych. Stal ta jest więc wolna od domieszek ⁶⁰Co. Ostona ma kształt prostopadłościanu, którego wymiary wewnętrzne wynoszą 1,1 m x 1,2 m x 1,9 m (szer. x wys. x dług.). Ściany ostony mają grubość ok. 17 cm. Od wewnątrz komora spektrometru została wyłożona miedzią o grubości 3 mm [5].

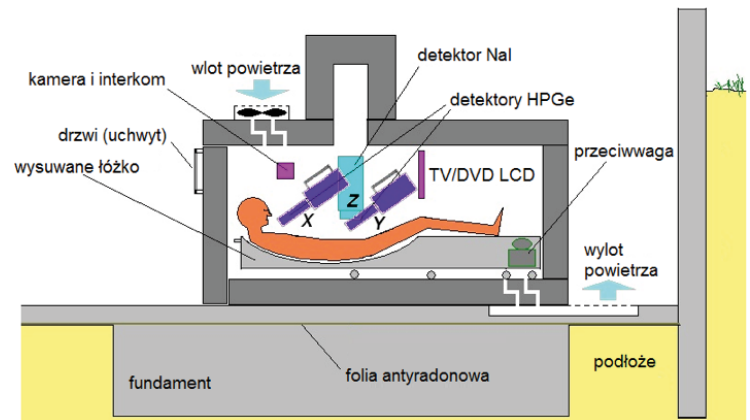
Zastosowany w SCC system detekcji promieniowania gamma składa się z 2 koaksjalnych detektorów HPGe (jeden z okienkiem Be, drugi z okienkiem Al, oba o 30% wydajności względnej,

produkcji firmy ORTEC) oraz pięciocalowy NaI (Tl) licznik scyntylacyjny (pozostałość pierwotnego układu pomiarowego) [6].

Pomiar pacjentów odbywa się w pozycji leżącej, a detektory zlokalizowane są odpowiednio nad górną (HPGe) oraz nad dolną częścią ciała (HPGe i NaI(Tl)). Układ spektrometryczny uzupełnia elektronika firmy CANBERRA (Multiport II), zaś akwizycja danych odbywa się przy użyciu oprogramowania Genie 2000.

Dodatkowo, komora spektrometru została wyposażona w nawiew wymuszający przepływ powietrza, kamerę (kontrola właściwej pozycji pacjenta), system interkom (porozumiewanie się z pacjentem), telewizor oraz oświetlenie LED [6]. Przekrój SCC i jego wnętrza zostały pokazane na rysunkach 4 i 5.

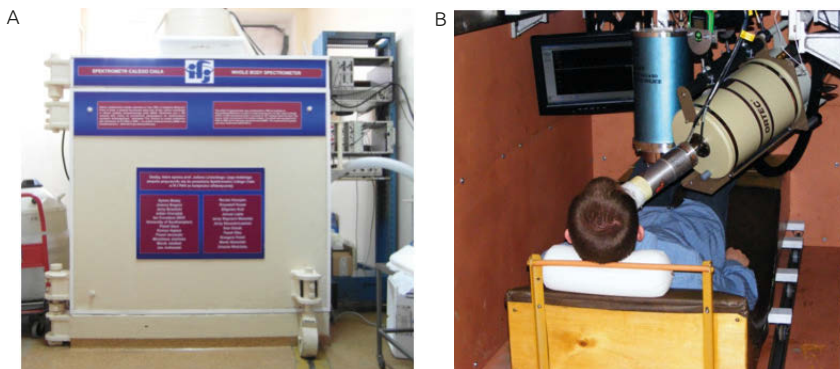
SCC w IFJ PAN został uruchomiony i wdrożony do badań skażeń promieniotwórczych ludzi w lutym 2011 roku.



Rys. 5 Przekrój Spektrometru Cętego Ciała w IFJ PAN (autor: J.W. Mieliski)
Źródło: [6].

Kalibracje spektrometrów

Analizy gamma – spektrometryczne przy użyciu obu wymienionych powyżej spektrometrów (w NCBJ i IFJ PAN) odbywają się w oparciu o kalibracje wydajnościowe dla geometrii cętego ciała oraz dodatkowo w IFJ PAN – tarczycy. Zostały one przygotowane na podstawie pomiarów fantomów wypełnionych pojedynczymi izotopami promieniotwórczymi lub ich mieszaniną. Kalibracja w geometrii tarczycy w IFJ PAN została wykonana przy użyciu komercyjnego fantomu RS-232 firmy Radiology Support Devices Inc. (USA), zaś kalibracje w geometrii cętego ciała opracowano na podstawie pomiarów fantomów antropometrycznych skonstruowanych dla tych potrzeb w każdym z instytutów.



Rys. 4 Spektrometr Cętego Ciała w IFJ PAN: A. widok z zewnątrz, B. wnętrze spektrometru
Źródło: [7].



W NCBJ wykorzystano w tym celu fantomy butelkowe (butle laboratoryjne wypełnione roztworem wzorcowym izotopów promieniotwórczych [7]) w IFJ PAN fantom butelkowy (butle laboratoryjne wypełnione żelatyną z izotopami promieniotwórczymi) oraz fantom POLA o zmiennej geometrii (typu klockowego, wypełniony żelatyną z mobilnymi źródłami promieniotwórczymi). We wszystkich wymienionych przypadkach założono izotropowy rozkład izotopów promieniotwórczych w ludzkim organizmie lub organie (fantomy były wypełnione jednorodnymi substancjami promieniotwórczymi lub w fantomach zastosowano jednorodny rozkład źródeł promieniotwórczych).

Zastosowanie spektrometrii całego ciała w Polsce

Wykorzystanie istniejących w Polsce spektrometrów całego ciała podyktowane jest profilem naukowym instytucji, w których są one zlokalizowane, a także zapotrzebowaniem społecznym.


LPCC w NCBJ znajduje zastosowanie przede wszystkim w rutynowym monitoringu narażenia pracowników NCBJ (głównie personelu reaktora MARIA i Ośrodka Radioizotopów POLATOM) oraz Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych. Wyżej wymienione badania są wykonywane w ramach zakresu akredytacji Polskiego Centrum Akredytacji, nr certyfikatu AB 567. Roczna liczba badań wynosi ok. 500 i obejmuje grupę ok. 250 pracowników. Każdego roku badanych jest również kilka osób nienarażonych zawodowo, które zgłaszają się do Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych NCBJ. Licznik Promieniotworzenia Całego Ciała wykorzystywany jest także do prowadzenia badań naukowych, mających na celu rozwój metod oceny skażeń wewnętrznych. W ramach prac badawczych wykonano np. serię pomiarów fantomów czaszki zawierających ^{241}Am [8].

Spektrometr Całego Ciała w IFJ PAN wykorzystywany jest przede wszystkim do weryfikacji promieniotwórczych skażeń wewnętrznych i zewnętrznych personelu medycznego (lekarzy, pielęgniarek, fizyków medycznych) mającego kontakt z radionuklidami podczas terapii i diagnostyki, pacjentów poddanych np. terapii ^{131}I [9, 10, 11], badań przesiewowych ludności zamieszkującej teren Małopolski (wolontariusze), badań metodycznych nad właściwą aplikacją spektrometrii całego ciała w zależności od profilu projektowanych analiz [12].

Oba urządzenia stanowią również swego rodzaju rezerwę wykorzystywaną do badań spektrometrycznych różnego rodzaju próbek, np. takich, które ze względu na swoje gabaryty nie mieszczą się w typowych ostonach w układach przeznaczonych do badań próbek środowiskowych, materiałowych itp.

Przedstawione systemy pomiarowe (spektrometry całego ciała) stanowią infrastrukturalną bazę Polski (choć niesformalizowaną), która może być wykorzystana w przypadku powstania skażeń ludności w razie zdarzeń jądrowych (intencyjnych lub nieintencyjnych uwolnień radionuklidów o środowiska). NCBJ oraz IFJ PAN mogłyby w takiej sytuacji wykonywać badania narażenia wewnętrznego osób z ogółu ludności.

Podsumowanie

Spektrometria całego ciała to metoda *in vivo*, umożliwiająca jakościową i ilościową analizę izotopów gamma promieniotwórczych zdeponowanych w organizmie człowieka w wyniku ingestii lub oddychania. W Polsce ta technika pomiarowa realizowana jest przez dwa urządzenia zlokalizowane w NCBJ w Świerku oraz w IFJ PAN w Krakowie. Oba istniejące spektrometry całego ciała wykorzystywane są w celach: rutynowego monitoringu narażenia pracowników (NCBJ, ZUOP) czy monitoringu narażenia pracowników i pacjentów medycyny nuklearnej oraz ich rodzin. Rozmiary komór spektrometrów umożliwiają wykorzystanie ww. urządzeń do pomiarów próbek wielkogabarytowych. Istniejące spektrometry całego ciała w Polsce stanowią infrastrukturalne zaplecze pomiarowe dla ludności w przypadku zdarzeń jądrowych. 

Literatura

1. Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe. Dz. U. 2001 nr 3 poz. 18 (tekst jednolity z dnia 20 września 2019 r. Dz. U. 2019 poz. 1792) <http://dziennikustaw.gov.pl/DU/2019/1792/1>.
2. IAEA: *Assessment and treatment of external and internal radionuclide contamination*, Vienna, IAEA, 1996, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/047/27047317.pdf?r=1&r=1.
3. F.W. Lengemann, J.H. Woodburn: *Whole Body Counters*, w U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, 1964, 1-36.
4. Procedura pomiarów skażeń wewnętrznych za pomocą licznika promieniotworzenia całego ciała, Procedura operacyjna C-1 Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych NCBJ, 6, 2017.
5. R. Kierepko: *Identyfikacja i charakterystyka izotopowych śladów awarii elektrowni jądrowej Fukushima Daiichi*, IFJ PAN, 2019, 1-223.
6. J.W. Mietelski, P. Janowski, R. Kierepko, R. Hajduk, J. Bogacz, J. Jurkowski, E. Ochab: *A Whole-Body Spectrometer (WBS) at the institute of nuclear physics, Kraków – design and results for Polish citizens visiting Japan during the Fukushima accident*, Nukleonika, 58(4), 2013, 519-525.
7. T. Pliszczyński et al.: *Ocena narażenia wewnętrznego za pomocą licznika promieniotworzenia ciała człowieka*, Pol J Med Phys Eng, 17(4), 2011, 163-171.
8. P. Nogueira et al.: *EURADOS ^{241}Am skull measurement intercomparison*, Radiation Measurements, 82, 2015, 64-73.
9. K. Brudecki, A. Kowalska, P. Zagrodzki, A. Szczodry, T. Mróz, P. Janowski, J.W. Mietelski: *Measurement of ^{131}I activity in thyroid of nuclear medical staff and internal dose assessment in a Polish nuclear medical hospital*, Radiation and Environmental Biophysics, 56, 2017, 19-26, doi: 10.1007/s00411-016-0674-1.
10. K. Brudecki, A. Kluczewska-Gałka, T. Mróz, B. Jarzab, P. Zagrodzki, P. Janowski: *^{131}I Internal Contamination and Committed Dose Assessment Among Nuclear Medicine Medical Personnel*, Radiation Protection Dosimetry, 179, 2018, 275-281, doi: 10.1093/rpd/ncx274, tekst pracy: <https://academic.oup.com/rpd/advance-article/doi/10.1093/rpd/ncx274/4721593>.
11. K. Brudecki, A. Szczodry, T. Mróz, A. Kowalska, J.W. Mietelski: *Measurement of ^{131}I activity in air indoor Polish nuclear medical hospital as a tool for an internal dose assessment*, Radiation and Environmental Biophysics, 57, 2018, 77-82, doi: 10.1007/s00411-017-0724-3.
12. R. Kierepko, P. Janowski, M. Grochowska: *Variation of counting efficiency in determination of ^{131}I activity in the thyroid gland as a result of its position relative to the detector*, J. Radioanal. Nucl. Ch., 300, 2014, 825-828, doi: 10.1007/s10967-014-3051-z.