

# BADANIA NIENISZCZĄCE - WERYFIKACJA MATERIAŁÓW JĄDROWYCH

## *Non destructive Analysis – verification of Nuclear Materials*

Krzysztof Rzymkowski

**Streszczenie:** W opracowaniu przedstawiono systemy pomiarowe stosowane do weryfikacji materiałów jądrowych w systemie zabezpieczeń.

**Abstract:** The study presents measuring systems used for verification of nuclear materials in the Safeguards.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, pomiar promieniowania gamma, analizator wielokanałowy, wypalone paliwo, system zabezpieczeń MAEA.

**Keywords:** non destructive analysis, gamma ray measurement, multichannel analyser, irradiated fuel, IAEA safeguards.

Zadaniem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej jest kontrola wypełniania warunków Traktatu o Nie-rozprzestrzenianiu Broni Jądrowej (*Non-Proliferation of Nuclear Weapons Treaty - NPT*), przez sygnatariuszy układu. Realizacja tego celu jest osiągnięta przez długoterminowe, okresowe sprawdzanie, czy nie nastąpiło przesunięcie materiałów jądrowych z zastosowań pokojowych do militarnych umożliwiające wytworzenie jądrowych urządzeń wybuchowych. Podstawą systemu kontroli jest **ewidencja materiałów jądrowych**, prowadzona oddzielnie dla każdego rejonu bilansu materiałowego, zawierająca informacje o materiale jądrowym (składzie, ilości, lokalizacji, zmianach składu, ruchu materiału). Potwierdzenie deklarowanych informacji uzyskuje się poprzez dokonywanie w czasie inspekcji różnego rodzaju pomiarów tzw. badań nieniszczących (*non – destructive analysis – NDA*), począwszy od elementarnego policzenia sztuk materiałów jądrowych (np. zastawów paliwowych), bezpośrednich pomiarów właściwości fizycznych, składu izotopowego, odczytu monitorów pracujących w systemie ciągłym, sprawdzenia plomb.

Badania nieniszczące polegają na pomiarze właściwości fizycznych materiałów jądrowych bez naruszania ich postaci fizycznej. Pomiar przeprowadzane są z różnym poziomem dokładności zależnym od aktualnie obowiązujących kryteriów. Celem badań jest wykrycie ewentualnych niezgodności z deklarowanym stanem bilansu. Najmniej dokładna metoda pomiarowa ma na celu wykrycie dużego niedoboru (*gross defect*) materiału jądrowego.

Pomiary podlegają sprawdzeniu, czy nie nastąpiło ukrycie kilku elementów (sztuk) zawierających materiał jądrowy i zastąpienie ich odpowiednio skonstruowanymi atrapami. W wielu przypadkach wystarczy potwierdzenie obecności materiału jądrowego w deklarowanym rejonie. Dokładniejsza metoda pomiarowa ma na celu wykrycie częściowego niedoboru (*partial defect*) i pozwala sprawdzić, czy w poszczególnych elementach znajduje się deklarowana ilość materiału jądrowego i czy jego skład izotopowy oraz rozmieszczenie w np. w pręcie paliwowym oraz waga, odpowiadają wartościom deklarowanym.

Najdokładniejszą metodą pomiarową mającą na celu wykrycie małego niedoboru (*small defect*) jest przeprowadzenie metodą badań niszczących (*destructive analysis – DA*). Wymaga to pobrania próbek materiału jądrowego i przesyłanie ich do niezależnych ośrodków badawczych w celu przeprowadzenia dokładnej analizy spektralnej i chemicznej. Ta metoda pozwala wykryć, czy nie nastąpiło usunięcie niewielkiej ilości materiału jądrowego z wielu elementów.

Bardzo istotne dla wiarygodności przeprowadzanej kontroli jest określenie ilości badanych elementów zawierających materiał jądrowy. W tym celu opracowano wzór umożliwiający określenie statystycznie znaczącej ilości elementów (**Sample Size**), wiążący całkowitą ilość elementów danego typu zawierających jednakowe materiały jądrowe, znaczącą ilość (SQ) dla tego rodzaju materiału jądrowego, oraz spodziewane prawdopodobieństwo

bieństwo wykrycia braku materiału określającą dokładność metody pomiarów. Dokładność pomiarów w tej metodzie jest bardzo wysoka (błąd pomiaru jest poniżej 1%)<sup>1</sup>.

Nową bardzo efektywną metodą wykrywania niezadeklarowanych czynności z udziałem materiałów jądrowych jest **analiza próbek środowiskowych** (*Environmental sampling ES*). Próbki środowiskowe są to „wymazy” pobierane w obszarze spodziewanej obecności materiału jądrowego pozwalające odtworzyć działania z nim związane i porównać z oficjalnymi deklaracjami. Próbki pobierane są z powierzchni różnych przyrządów, ścian budynków, osadów w zbiornikach, roślin gleby, filtrów, wody, powietrza. Brak jakichkolwiek śladów materiału jądrowego potwierdza brak nielegalnych działań.

Należy podkreślić, że prace badawcze nad ulepszeniem metod pomiarowych, ich dokładności, wielowymiarowości są nieustannie prowadzone w państwach sygnatariuszach NPT i przedstawiane do akceptacji przez MAEA. Różnorodność obiektów narzuca dodatkowo wymóg dostosowania metod pomiarowych do specyficznych technologii wykorzystywanych w tych obiektach.

MAEA powinna mieć możliwość: obserwacji, czy próbki materiału (do badań nieniszczących, niszczących) w kluczowych punktach pomiarowych wykorzystywanych do celów ewidencji były pobierane tak, by zapewnić ich reprezentatywność, obserwacji obróbki i analizy próbki, czy przeprowadzane pomiary są dla celów ewidencji reprezentatywne, obserwacji prawidłowości skalowania przyrządów, poprawności ich pracy i innego używanego sprzętu. W razie konieczności MAEA powinna uzgodnić z Państwem przeprowadzenie dodatkowych pomiarów, pobrania dodatkowych próbek przeprowadzenia ich analizy stosując uzgodnione metody skalowania i pomiaru. Ponadto w celu zapewnienia niezależności badań MAEA może wykorzystywać własny sprzęt pomiarowy i monitorujący, stosować własny system plombowania urządzeń magazynów pojemników transportowych itp.

### Badania nieniszczące

Badania nieniszczące są podstawowym rodzajem badań materiałów jądrowych wykorzystywanym do weryfikacji informacji o materiałach jądrowych deklarowanych przez państwo. Ze względu na dużą rozpiętość

mierzonych parametrów wykorzystywanych jest bardzo wiele systemów pomiarowych. Inną ważną przyczyną różnorodności aparatury jest sposób wykorzystania przyrządów pomiarowych. Czasem do mierzenia tej samej wielkości fizycznej można użyć przyrządów o różnych konstrukcjach. Zależy to od rodzaju konstrukcji elementów zawierających materiały jądrowe, od materiałów jądrowych i ich postaci, fazy cyklu paliwowego itp. Są to na ogół przyrządy przenośne o małych rozmiarach używane w czasie inspekcji zwykłych lub bardziej rozbudowane używane przy inspekcjach sprawdzających stan inwentarza jak urządzenia stacjonarne wykorzystywane w cyklu technologicznym. Oprócz pomiarów związanych ściśle z promieniowaniem konieczne jest również wykorzystanie mierników ciepła masy, objętości cieczy zawierających materiały jądrowe, grubości ścian zbiorników, absorpcji światła, temperatury. Szacuje się, że ilość różnorodnych systemów pomiarowych jest bliska 100.

Ze względu na różnorodność pomiarów jednoznaczna klasyfikacja pomiarowych przyrządów NDA jest utrudniona. Zwykle przyjmuje się podział na cztery podstawowe grupy:

- ze względu na rodzaj użytego promieniowania
- systemy pomiarowe wykorzystujące promieniowanie  $\gamma$ ,
- systemy pomiarowe wykorzystujące promieniowanie neutronowe i uwzględniając przeznaczenie,
- systemy pomiarowe wypalonego paliwa,
- systemy pomiarowe różnych wielkości fizycznych.

W każdej grupie systemów pomiarowych wydzielono sześć rodzin przyrządów pomiarowych, uwzględniając ich specyficzne właściwości powiązane z dokładnością pomiarów i rodzajem badanego materiału jądrowego.

### Systemy pomiarowe wykorzystujące promieniowanie $\gamma$

Promieniowanie  $\gamma$  jest promieniowaniem elektromagnetycznym o wysokiej częstotliwości. Spektrometria promieniowania  $\gamma$  polega na ilościowym badaniu widma energetycznego promieniowania gamma. Spektrometria promieniowania  $\gamma$  jest jedną z najlepiej opracowanych i szeroko wykorzystywanych technik pomiarowych szczególnie użytecznych w badaniach nieniszczących. Pozwala ona ustalić z bardzo dużą dokładnością skład izotopowy materiałów jądrowych (uranu i plutonu) i może w pewnych warunkach umożliwić określenie ilości materiału. Istotną zaletą tej metody pomiarowej jest możliwość weryfikacji wzbogacenia uranu. Ponadto pomiary spektrometryczne intensywności promieniowania  $\gamma$  mogą być wykorzystane do weryfikacji daty wyładowania wypalonego paliwa z reaktora.

<sup>1</sup> Ilość badanych elementów, rozmiar próbki (*Sample size*) jest określana według wzoru będącego przybliżeniem hipergeometrycznego rozkładu prawdopodobieństwa.  $n = N(1 - \beta^{x/M})$ , gdzie N jest liczbą oddzielnych elementów (sztuk) w partii posiadających ten sam skład chemiczny (skład izotopowy),  $\beta$  jest prawdopodobieństwem nie wykrycia braku materiału, x jest średnią ilością materiału jądrowego w elemencie (kg), M odpowiada znaczącej ilości materiału jądrowego SQ (kg).

System spektrometrii gamma składa się z detektora, przetworników analogowo cyfrowych formujących sygnały otrzymywane z detektora, komputera, pamięci oraz oprogramowania pozwalającego na przetworzenie zebranych danych i ich wizualizację. Energia fotonu promieniowania docierającego do detektora zostaje zamieniona na impuls elektryczny, którego amplituda jest proporcjonalna do energii fotonu. Następnie przeprowadzana jest segregacja sygnałów według wielkości amplitudy. Analizujący wyniki program komputerowy zapisuje sygnały o zbliżonych amplitudach w jednym kanale (liczniku) i przygotowuje wizualizację widma energii. Program może być rozbudowany, tak że przy zastosowaniu odpowiednich przeliczeń można uzyskać bardzo wiele dodatkowych informacji o materiale, a sama obsługa przyrządu powinna być łatwa. W nowoczesnych spektrometrach gamma liczba kanałów jest zmieniana programowo. Powszechne używane wartości to 512, 1024, 2048, 4096, 8192 lub 16384 kanałów. Wybór liczby kanałów zależy od rozdzielczości systemu detekcyjnego i zakresu energetycznego promieniowania.

Analizatory wielokanałowe – spektrometry, wykorzystywane w systemach pomiarowych międzynarodowego systemu zabezpieczeń są przede wszystkim przeznaczone do wykrywania i pomiaru materiałów jądrowych, które mogą być potencjalnie użyte do budowy jądrowych urządzeń wybuchowych. Dlatego też wysiłek konstruktorów tej aparatury został skoncentrowany na osiągnięciu jak najdokładniejszych pomiarów izotopów uranu i plutonu. Aparatura wraz z postępem technicznym staje się też coraz bardziej zminiaturyzowana i skomputeryzowana. Miniaturyzacja i zmniejszenie wagi przyrządu stanowią ważną cechę szczególnie dla inspektorów, przeprowadzających inspekcje niezapowiedziane, w których czasie muszą przeprowadzić pomiary, przywożąc z sobą aparaturę pomiarową. Wcześniej jej wysłanie do obiektu zapowiedziało by inspekcję. Zastosowana w nowoczesnych analizatorach technika cyfrowa pozwala na znaczną eliminację układów analogowych, zwiększając stabilność, dokładność i powtarzalność przetwarzanych danych. O dokładności pomiaru decydują detektory promieniowania  $\gamma$ . Obecnie dopuszczone do pomiarów spektrometrycznych w MAEA są detektory NaI, CdZnTe, HPGe, detektory gazowe (np. typu Licznika Geigera-Müllera, lub detektory ksenonowe).

Najstarszym typem detektora promieniowania  $\gamma$  w MAEA jest detektor scyntylacyjny NaI. Jego duża objętość wynika ze znacznych wymiarów scyntylatora i fotonowielacza. Rozdzielczość energetyczna detektora jest mała, mimo to ma on szerokie zastosowanie w wykrywaniu promieniowania  $\gamma$  np. przy określaniu wymiarów aktywnej części pręta paliwowego.



**Fot. 1.** Miniaturowy wielokanałowy analizator z detektorem NaI i mini komputerem

**Photo. 1.** Miniature Multichannel Analyser – MMCN with NaI detector (IAEA)

Znacznie lepszą rozdzielczość energetyczną mają germanowe detektory półprzewodnikowe. Inną bardzo istotną ich zaletą są małe wymiary i możliwość wykonania w postaci płaskich płytek lub długich walców co ułatwia ich wprowadzenie do mierzonego obszaru. Istotną wadą tego rodzaju detektorów jest to, że powinny pracować w niskich temperaturach, co wymaga chłodzenia azotem. W nowoczesnych rozwiązaniach stosowane jest chłodzenie wymuszane przez systemy elektryczne.

Najlepsze właściwości pomiarowe posiadają detektory półprzewodnikowe z telurkiem kadmu CdZnTe (wcześniejsza wersja CdTe). Nie wymagają chłodzenia, a właściwości telurku kadmu pozwalają na budowę detektora o naprawdę miniaturowych wymiarach co umożliwia umieszczenie go w różnych sondach i dokonanie pomiarów w trudno dostępnych obszarach. Kontynuacją tego typu detektorów są próby wykorzystania bromku lantanu LaBr<sub>3</sub>, którego właściwości mają mieć zalety detektorów z telurkiem kadmu i jodkiem sodu NaI.



**Rys. 2.** Miniaturowy wielokanałowy analizator z detektorem CdZnTe i mini komputerem (Miniature multichannel analyser with CdZnTe detector – MMCC) (IAEA)

**Fig. 2.** Miniature multichannel analyser with CdZnTe detector – MMCC (IAEA)

Detektory gazowe charakteryzują się długotrwałą stabilnością. Wynika to z braku wpływu zmian temperatury lub promieniowania na przenoszenie ładunku elektrycznego w gazie. Wysoka stabilność detektorów jest istotna w systemach monitorowanych bez nadzoru, gdzie temperatura tła i promieniowanie różnią się znacznie.

Nowością jest zastosowanie wysokociśnieniowych komór jonizacji ksenonowej jako detektorów  $\gamma$  o niskiej rozdzielczości.

Spektrometria  $\gamma$  o niskiej i średniej rozdzielczości jest głównie wykorzystywana do ilościowych weryfikacji materiałów jądrowych. Przeważają, jednakże badania jakościowe. Do badań wykorzystywane są specjalizowane zestawy aparatury. Przykładowo: znajdują się one w zestawie do weryfikacji wzbogacania  $UF_6$ , gdzie stosowany jest detektor typu HPGe, sprawdzenie obecności izotopów  $^{235}U$  i  $^{241}Pu$  w świeżym paliwie MOX, dokonuje się przy użyciu detektora CdZnTe. Do wyznaczania długości aktywnej i weryfikacji wzbogacania U wykorzystuje się detektor NaI, do weryfikacji wzbogacania U i składu izotopowego Pu detektor HPGe chłodzony przez system elektryczny.

Spektrometria  $\gamma$  o wysokiej rozdzielczości jest wykorzystywana przede wszystkim w zakładach wzbogacania uranu zawartego w  $UF_6$  do kontroli w czasie procesu wzbogacania, jak i wzbogacania uranu zawartego w  $UF_6$  w pojemnikach transportowych. Przy pomiarze  $UF_6$  w pojemniku należy uwzględnić grubość ścianki pojemnika, co wymaga dodatkowych pomiarów z użyciem mierników ultradźwiękowych. Ten dodatkowy pomiar jest konieczny do wprowadzenia korekt niwelujących efekty tłumienia i rozproszenia promieniowania. Uzyskiwana dokładność pomiaru wzbogacania uranu przy grubości ścianki pojemnika mniejszej niż 1 cm wynosi 1-2%.

Nowo opracowana metoda pomiaru  $UF_6$  w pojemniku (*Multi-Group Analysis for Uranium*) pozwala uprościć pomiary, eliminując pomiar (bardzo uciążliwy, ponieważ wymaga kilkakrotnego sprawdzenia poprawności) grubości ścianki i ułatwia kalibrację.

Innym ważnym zastosowaniem spektrometrii  $\gamma$  o wysokiej rozdzielczości jest określenie składu izotopowego plutonu. Pluton emituje złożone spektrum promieniowania rentgenowskiego X i wyniki pomiarów są po zebraniu widma analizowane przez specjalistyczne programy. Do najnowszych należy program FRAM (*Response Function Analysis with Multiple Efficiency FRAM*).

W spektrometrii  $\gamma$  o wysokiej rozdzielczości wykorzystywane są systemy stacjonarne, w których stosowane jest stałe chłodzenie detektora. W różnych procesach technologicznych materiały jądrowe występu-

ją w postaci roztworów, w których też jest konieczne określenie składu izotopowego uranu i plutonu oraz stopnia wzbogacenia uranu, co jest ważne dla systemu weryfikacji.

### Systemy pomiarowe wykorzystujące promieniowanie neutronowe

Pomiary promieniowania neutronowego są bardzo szeroko wykorzystywane w badaniach nieniszczących szczególnie do weryfikacji materiałów zawierających pluton. Jednym z ważniejszych badań, w których zastosowano pomiary promieniowania neutronowego, jest weryfikacja ilości plutonu i składu izotopowego w świeżym nienapromieniowanym materiale zawierającym pluton tzn. materiale, który nie był jeszcze używany - wypalany. Pluton używany jest w badaniach laboratoryjnych, reaktorach doświadczalnych, zakładach produkcji paliwa, w paliwie MOX, zakładach doświadczalnych, magazynach świeżych materiałów jądrowych, zakładach przerobu paliwa, zakładach unieszkodliwiania odpadów. Dla każdego rodzaju takiego materiału, jego postaci fizycznej (proszek, ciecz), kształt geometryczny (płytki, sztabki, kulki, pręty) opracowany jest indywidualny sposób pomiaru czasem łącznie ze specjalną konstrukcją detektora. Świeże paliwo MOX jest zwykle przechowywane w zbiornikach basenowych. Weryfikacja plutonu w takim paliwie wymagała opracowania specjalnej metody pomiarowej łącznie z detektorem przystosowanym do pracy w zanurzeniu. W liniach produkcyjnych zakładów jądrowych materiały jądrowe są częściowo przetwarzane w komorach rękawicowych. Występujące tam materiały najczęściej w postaci proszku zawierają również pluton. Opracowano specjalną metodę pozwalającą oszacować jego ilość, dostosowując system detektorów do wymagań procesu produkcyjnego. Mimo ogromnej różnorodności systemów (około 20) pomiarowych zasada pomiaru jest wspólna.

W świeżym nienapromieniowanym materiale emisja neutronów może być spowodowana spontanicznym rozszczepieniem uranu i plutonu, wywołana sztucznie przez strumień neutronów pochodzący ze źródła zewnętrznego lub być wywołana promieniowaniem  $\alpha$  i neutronowym pochodzącym również ze źródeł zewnętrznych.

Zasada pomiaru plutonu polega na wykrywaniu „koincydencji” neutronów.

W czasie jednego zdarzenia rozpadu emitowanych jest 0-10 neutronów. W 75% rozpadów emitowane są 2 lub więcej neutronów. Przyjmuje się, że średnio w jednym rozpadzie emitowane są w tym samym czasie 2 neutrony. Zadaniem detektora koincydencji jest wyodrębnienie neutronów pochodzących z rozpadu w materiale od neutronów pochodzących z innych źródeł włączając w to neutrony wtórne. Wszystkie izotopy uranu, plutonu i transuranowców emitują również promieniowanie  $\alpha$ , którego

cząstki reagują z lekkimi pierwiastkami (tlenki, fluorki) lub z innymi zanieczyszczeniami materiału beryl, bor przy pewnych energiach powodują dodatkową emisję neutronów. Wykrycie 2 neutronów – koincydencja w tym samym czasie pozwala sądzić, że pochodzą one z tego samego rozpadu i wszystkie inne neutrony wychwycone w przypadkowych chwilach czasowych stanowią tło.

Znając ilość neutronów powstałych w spontanicznych procesach rozpadu  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  oraz znając skład izotopowy, zweryfikowany za pomocą spektrometrii  $\gamma$  o wysokiej rozdzielczości, można określić masę plutonu. Wpływ  $^{239}\text{Pu}$ , mimo że stanowi on około 60% ilości plutonu w materiale, na sygnał powstały z rozpadów spontanicznych jest nieduży. Uzyskiwana tą metodą dokładność dochodzi do 1%. Powyższa metoda pomiarowa nazywana jest metodą pasywną, ponieważ do wykrycia koincydencji nie jest używane żadne źródło pomocnicze wzmagające proces samoistnego rozpadu. Ponieważ rozszczepialny izotop  $^{235}\text{U}$  nie wytwarza dostatecznej ilości samoistnych rozpadów koniecznych do wykrycia koincydencji, do zestawu pomiarowego dołączane jest źródło neutronowe ameryku-litu (AmLi) wywołujące rozszczepienia w uranie. Powoduje to jakby wzbogacenie uranu  $^{238}\text{U}$  w próbce, ale nie wpływa w sposób istotny na wynik pomiaru. Ta metoda nazywana jest metodą aktywną.

Budowa detektora do pomiarów koincydencyjnych jest bardzo złożona i samo przeprowadzenie pomiarów wymaga ogromnej staranności ze względu na wysoką czułość.

Detektory neutronów wykorzystują różne reakcje wychwytywania neutronów, aby wytworzyć odpowiedni sygnał elektryczny. Materiałami używanymi do detekcji promieniowania neutronowego są lit, beryl lub hel. W systemach weryfikacji stosowanych w MAEA wykorzystywane są detektory helowe. W wyniku działania promieniowania neutronowego i  $\alpha$  cząstka rozpada się, emitując proton ( $\text{H}_3 \rightarrow 3\text{H} + \text{proton}$ ). Proton jonizuje gaz, wytwarzając sygnał elektryczny. Ta reakcja zachodzi dla neutronów termicznych o niewysokiej energii. Przekrój absorpcji neutronów zmniejsza się o rzędy wielkości wraz ze wzrostem energii neutronu. Aby powiększyć zdolności absorpcyjne detektora przed rozpoczęciem detekcji, zmniejsza się energię neutronów. W detektorach realizowane jest to poprzez spowalnianie neutronów na lekkich jądrach wodoru, umieszczając detektor w obudowie polietylenowej.

Rzadziej stosowane są detektory wykorzystujące trójfluorek boru, mniej wydajne, ale też mniej wrażliwe na promieniowanie  $\gamma$ . Prowadzone są badania zastosowania materiałów półprzewodnikowych (węglika boru), które mogą doprowadzić do znacznego zminiaturyzowania aparatury pomiarowej.

Do detekcji promieniowania neutronowego wysokich energii używa się komór jonizacyjnych o zmodyfikowanej konstrukcji. W komorze umieszczana jest folia

$\text{U}^{235}$ . Neutrony padając na folię, wytwarzają fragmenty rozpadu o wysokich energiach powodujących szybką jonizację gazu i powstanie sygnału elektrycznego. Wysokie energie powodują nieczułość komory na promieniowanie  $\gamma$ . Są one używane do pomiarów wypalonego paliwa.

Promieniowanie neutronowe jest czasem wykorzystywane do wykrycia dużego niedoboru (*gross defect*) materiału jądrowego. Stwierdzenie obecności promieniowania neutronowego w przedstawionym materiale jest wystarczającym wskaźnikiem obecności materiału rozszczepialnego. Do tego celu używany jest ręczny przenośny przyrząd (*Hand-held Neutron Monitor – HHNM*) wyposażony w trzy liczniki helowe, licznik Geigera-Müllera powiązane z zintegrowaną elektroniką, umożliwiającą wyszukiwanie i lokalizowanie źródeł promieniowania neutronowego. Inna wersja podobnego przenośnego przyrządu pomiarowego jest przeznaczona do badania przepływu materiału jądrowego w zakładach wzbogacania. Analogiczne systemy są również stosowane w systemach monitorowych bez nadzoru.

Aktywne systemy pomiarowe wykorzystywane są do pomiarów zestawów paliwowych w celu weryfikacji zawartości uranu  $\text{U}^{235}$  w zestawie paliwowym zawierającym wysoko-wzbogacony uran lub do wyznaczania liniowej gęstości masy uranu w świeżych zestawach paliwowych. Pomiaru te wymagają detektorów o specjalnym kształcie otaczających badany element ze wszystkich stron.

Dodatkowe informacje, ułatwiające znacznie proces oznaczenia efektywnej masy plutonu, można uzyskać, wychwytyjąc koincydencje wielokrotne. W badaniach wykorzystuje się zjawisko potrójnej koincydencji. Pozwala to na bezpośrednie oszacowanie masy bez dokładnej znajomości składu izotopowego. Wychwycenie potrójnej koincydencji wymaga wysokiej wydajności detekcji. Wymusza to specjalną konstrukcję detektora zapewniającą małe straty (ucieczki) neutronów i mały czas martwy. Zwykle detektory mogą być używane do wychwytywania koincydencji potrójnych, ale ze względu na małą wydajność czas zbierania danych jest bardzo długi.

### Systemy pomiarowe wypalonego paliwa

Są dwa rodzaje cyklu paliwowego: cykl zamknięty i otwarty. W **cyklu zamkniętym** paliwo jest poddawane recyklingowi (ponownemu wykorzystaniu), w **cyklu otwartym** wypalone paliwo traktuje się, jako odpad.

Wypalone w reaktorze paliwo jest wysoce radioaktywne i przed dalszym przetwarzaniem w zakładach przerobu paliwa, musi być „schładzane”. Odnosi się to zarówno do bardzo wysokiego poziomu radioaktywności, jak i temperatury. Schładzanie polega na wieloletnim przetrzymywaniu w tymczasowym przechowalni-

ku, którym jest początkowo basen wypalonego paliwa (tzw. mokry przechowalnik) usytuowany w pobliżu reaktora.

Czas składowania (schładzania) powinien być wystarczająco długi, by umożliwić bezpieczny transport i dalszą bezpieczną „obróbkę” wypalonego paliwa. Poziom promieniowania obniża się w wyniku naturalnego rozpadu krótko żyjących (o krótkim czasie półtrwania) izotopów promieniotwórczych. Temperatura powinna osiągnąć poziom zbliżony do temperatury otoczenia, by nie było konieczności dodatkowego chłodzenia przy dalszej obróbce. Paliwo pracujące w reaktorze ulega bowiem bardzo znacznemu rozgrzaniu i wysoką temperaturę może utrzymywać jeszcze przez długi okres. Określa się, że nawet po upływie 10 lat 1 tona wypalonego paliwa nadal wydziela około 1 kW ciepła.

W zależności od przyjętych rozwiązań technologicznych, po pobycie i wystudzeniu w przechowalniku **mo-krym**, wypalone paliwo może być następnie przechowywane w przechowalniku **suchym**, skąd jest transportowane do zakładów przerobu paliwa, gdzie odzyskiwane są przede wszystkim dwa pierwiastki – uran i pluton – używane do produkcji nowego paliwa. Tymczasowe mokre przechowalniki paliwa – baseny, przeznaczone do schładzania wypalonego paliwa, są zwykle lokalizowane w pobliżu reaktora. W przypadku, gdy na terenie elektrowni znajduje się kilka reaktorów, może być wybudowany dodatkowy basen wspólny dla wszystkich reaktorów, w którym jest przechowywane paliwo poprzednio już bardzo wystudzone w basenach przy reaktorowych. Jest to przechowalnik pośredni pozwalający czasowo opróżnić baseny przyreaktorowe, z którego paliwo jest transportowane do zakładów przerobu.

Do weryfikacji materiałów jądrowych w wypalonym paliwie wykorzystywane jest promieniowanie neutronowe i  $\gamma$ .

Głównym źródłem promieniowania neutronowego w wypalonym paliwie są izotopy kiuru, które są produktem wypalenia. Wysoki poziom promieniowania neutronowego i  $\gamma$  wypalonego paliwa ma wpływ na wybór sposobów weryfikacji. Powoduje to zastosowanie różnego rodzaju przyrządów wykorzystujących tylko jeden z rodzajów promieniowania lub oba. Wykorzystywane jest również promieniowanie świetlne (ultra fiolet – promieniowanie Czerenkowa) będące najczęściej stosowaną metodą weryfikacji wypalonego paliwa. Badając widmo energetyczne wypalonego paliwa, można uzyskać bardzo wiele informacji o stopniu wypalenia, czasie chłodzenia, początkowej zawartości paliwa i liczbie cykli prac w reaktorze. Do weryfikacji wypalonego paliwa używanych jest około 10 wyspecjalizowanych przyrządów.

Ze względu na wysoki poziom promieniowania pomiary zestawów pomiarowych są przeprowadzane w zanurzeniu. System pomiarowy zamontowany jest na brzegu basenu i zestawy paliwowe są przenoszone z pozycji magazynowania pomiędzy zestaw detektorów składający się z komory jonizacyjnej niewrażliwej na promieniowanie  $\gamma$  oraz niezależnych detektorów promieniowania  $\gamma$ . Sygnały z systemu detektorów po przetworzeniu są analizowane przez komputer, pozwalając zweryfikować dane przedstawione przez operatora obiektu. Pomiary wykonywane w kilku pozycjach wzdłuż zestawu paliwowego, który przez cały czas operacji jest zawieszony na dźwigu. Zestawy detektorów są inne dla reaktorów BWR, PWR ze względu na różne wymiary geometryczne zestawów paliwowych. Ten rodzaj konstrukcji detektora znany jest pod nazwą FDET – Fork Detektor, w którym między widełkami widełca przesuwana się zestaw paliwowy.



Fot. 3. Pomiar wypalonego paliwa Fork Detector  
Photo 3. Fork detector irradiated fuel measuring system - FDET) (IAEA)

Specjalną konstrukcję sondy pomiarowej składającej się z detektora półprzewodnikowego CdZnTe promieniowania  $\gamma$  i komory jonizacyjnej zastosowano w systemie pomiarowym do weryfikacji Paliwa MOX przechowywanego w basenie. Wymiary sondy są tak dopasowane, by mieściła się ona w kanale stojaka paliwa, przy czym może ona pracować w systemie pasywnym lub aktywnym.

Basen wypalonego paliwa jest przechowalnikiem przejściowym, ale w pewnych przypadkach w wyniku wad mechanicznych lub korozji zestawy paliwowe ulegają trwałemu uszkodzeniu, uniemożliwiając ich usunięcie z basenu. Istnieje scenariusz przewidujący zamianę takiego zestawu lub innego zestawu nieuszkodzonego i zastąpienie ich atrapami. Wypalone paliwo jest źródłem materiałów jądrowych, które mogą mieć znaczenie militarne. Opracowano szereg metod potwierdzenia, że obserwowany zestaw jest zestawem paliwowym. Podstawową metodą jest obserwacja promieniowania Czerenkowa. Przyrząd do obserwacji promieni jest stale udoskonalany np. przez połączenie go z systemem fotograficznym, umożliwia identyfikację bardzo starego paliwa przechowywanego przez długi okres. Promieniowanie Czerenkowa słabnie wraz z chłodzeniem paliwa i może stać się niewidoczne. Długotrwałe naświetlanie płyty fotograficznej pozwala odtworzyć słabo widoczny obraz.



**Fot. 4.** Pomiar wypalonego paliwa detektor promieniowania Czerenkowa  
**Photo 4.** Improved Cerenkov viewing device – ICVD for irradiated fuel verification (IAEA)

Inną metodą potwierdzenia, że w ściśle wypełnionym basenie poszczególne elementy są paliwem, jest dokonanie pomiaru widma energetycznego na szczycie stojaka z paliwem przy pomocy zestawu pomiarowego składającego się z analizatora wielokanałowego wyposażonego w detektor (NaI lub CdZnTe) ustawionego nad podejrzanym zestawem. Zebranie widma jest ważne, ponieważ atrapa mogłaby zawierać wyłącznie izotop wywołujący promieniowanie Czerenkowa. Analogiczną metodą można sprawdzić zestawy paliwowe w nieprzeładowanym stojaku posiadającym wolne kanały, do których można wprowadzić detektor.

W reaktorach w ośrodkach badawczych używane są różne rodzaje zestawów paliwowych, które po wykorzystaniu są składowane w lokalnych basenach. W tych ośrodkach konieczna jest dokładna znajomość i historia wypalonego paliwa dla celów badawczych. Weryfikacja dokonywana jest przez MAEA z wykorzystaniem indywidualnie opracowanych metod przy zastosowaniu specjalnych wodoodpornych konstrukcji detektorów. Podobnie specyfika konstrukcji reaktorów CANDU i sposobu składowania wypalonego paliwa wymagała opracowania metody pomiaru pozwalającej dokonywać weryfikacji w basenie z uwzględnieniem miejsca składowania.

### Systemy pomiarowe różnych wielkości fizycznych

W zakresie badań nieniszczących w czasie inspekcji dokonywane są również pomiary pomocnicze wielkości fizycznych, pośrednio związane z pomiarami weryfikacyjnymi materiałów jądrowych. Najczęściej wykorzystuje się wagi. MAEA przyjęła kilka typów wag. Są one wykorzystywane do precyzyjnego pomiaru wagi próbek przeznaczonych do badań niszczących, wag do pomiaru ciężaru pojemników z sypkimi materiałami jądrowymi (np.  $UF_6$  w pojemnikach transportowych) w zakresie do 5t i 20t, wagi do sprawdzenia ogólnej masy zestawu paliwowego, jak i specjalnych urządzeń do określania masy przedmiotów lub elementów paliwowych zanurzonych w basenie. Przed użyciem każdego z rodzajów wag, konieczne jest przeprowadzenie kalibracji przy użyciu wzorców wagi zapieczętowanych i przechowywanych w obiekcie.

Przy pomiarach materiałów w pojemnikach konieczne jest określenie grubości ścianki pojemnika, co jest dokonywane za pomocą ultradźwiękowych mierników grubości.

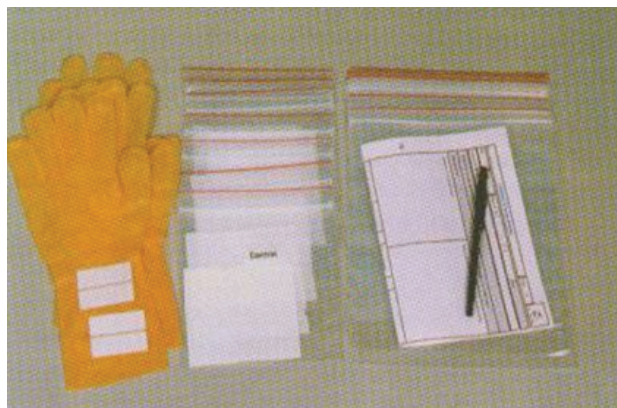
Stosowane są mierniki pozwalające zmierzyć poziom cieczy w zamkniętych kadziach i określić jej objętość. Bardziej wyrafinowane technologie pomiarowe są wykorzystywane do określania koncentracji uranu i jego wzbogacenie w świeżym roztworze tzn. roztworze jeszcze nieużywanym.

Jednym z nowych wymagań kontrolnych wynikających z Protokołu Dodatkowego do traktatu NPT jest przeprowadzanie okresowej kontroli informacji projektowej (*design information verification* DIV). Weryfikacja prowadzona jest przez inspektorów przez MAEA bezpośrednio na terenie obiektu. Celem jest sprawdzenie poprawności i kompletności przedstawionej informacji projektowej. W przypadku nowo powstającego obiektu sprawdzenie, czy budowa przebiega zgodnie z informacją projektową. Weryfikacja jest prowadzona na każdym etapie budowy, powtarzana okresowo aż do rozbiórki obiektu. W czasie weryfikacji okresowej sprawdzana jest jej dokładność, dokładność opi-

su wprowadzonych zmian i tego, czy wszystkie zmiany deklarowane zostały naniesione na planie obiektu oraz, czy nie dokonano zmian nieuwzględnionych w deklaracji. Wspomożeniem w pracach sprawdzających są laserowe dalmierze. Czasem dla potwierdzenia zgodności przedstawionej dokumentacji może być używany georadar (*Ground-penetrating radar GPR*) pozwalający stwierdzić, że nie powstały żadne podziemne instalacje lub pomieszczenia.

### Badanie próbek środowiskowych

Jedną z najnowocześniejszych metod badań niszczących uzupełniającą inne metody pomiarowe jest wprowadzanie jako standardu badań, zbieranie próbek środowiskowych – wymazowych (*Environmental Sampling – ES*). Pobieranie próbek polega na przetarciu badanej powierzchni sterylnie czystym próbnikiem – szmatką, gąbką lub w inny sposób np. pobranie próbki powietrza (są to tzw. próbki wymazowe). Następnie przy zachowaniu wszystkich zasad zachowania sterylności próbniaki są przesyłane do specjalistycznego laboratorium MAEA, gdzie są one poddane niezwykle dokładnej analizie. Pobieranie próbek wymazowych jest przeprowadzane w obszarze spodziewanej obecności materiału jądrowego, pozwalając odtworzyć działania z nim związane i porównać z oficjalnymi deklaracjami. Próbki pobierane są z różnych powierzchni, przyrządów, ścian budynków, osadów w zbiornikach, roślin gleby, filtrów wody i powietrza. Analizę próbek środowiskowych wprowadzono jako jeden ze standardów inspekcji w roku 1996. Przy jej opracowaniu brali czynny udział specjaliści z Polski. Pobieranie próbek wymazowych przyczyniło się znacznie do podniesienia efektywności systemu zabezpieczeń poprzez bardzo precyzyjne zbadanie i potwierdzenie nieobecności materiału jądrowego w miejscach ewentualnego jego ukrycia i potwierdzenie deklarowanego jego wykorzystywania w okresie międzyinspekcyjnym. Próbki środowiskowe są pobierane głównie w zakładach wzbogacania uranu, produkcji i przerobu paliwa, oraz jako kontrolny element uzupełniający w ramach Protokołu Dodatkowego.



Fot. 5. Zestaw do pobierania próbek wymazowych  
Photo 5. Set for environmental sampling (IAEA)

Analiza próbek jest przeprowadzana w pomieszczeniu czystym o kontrolowanych parametrach środowiskowych, w szczególności pozbawionym zanieczyszczeń typu: pył, kurz, bakterie, opary chemiczne itp. W zależności od wymaganej czystości atmosfery pomieszczenia czyste są dzielone na klasy w MAEA według standardów ISO. Decydującym wskaźnikiem czystości pomieszczenia jest czystość powietrza. Czystość powietrza w laboratorium MAEA w Seibersdorfie koło Wiednia odpowiada klasie 5 w skali ISO.

W laboratorium wykorzystuje się wiele technik analitycznych w tym spektrometrię fluorescencyjną  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i rentgenowską, mikroskopię elektronową z analizą elektronową i spektrometrię masową o wysokiej czułości. Podobnie, jak przy badaniach niszczących, w celu zachowania poufności pochodzenia próbki przydzielane są im numery kodowe.

Analiza próbek jest wielostopniowa. Początkowo dokonywana jest selekcja próbek. Za pomocą spektrometrii promieniowania  $\gamma$  wykrywane są aktywności (uran i pluton) oraz produkty rozszczepienia lub aktywacji  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{106}\text{Ru}$ . Próbki, których aktywność przekracza dozwolony poziom, są przekazywane bezpośrednio do laboratorium materiałów jądrowych (*Nuclear Material Laboratory – NML*), ponieważ czyste Laboratorium nie ma uprawnień do przechowywania takich próbek. We wstępnym badaniu próbek przeprowadzane jest badanie krzyżowe (*Cross-examination*) sprawdzające, czy pobrane próbki nie zostały przypadkowo zanieczyszczone. Wyselekcjonowane wstępnie próbki są następnie badane za pomocą spektrometru XRF w celu identyfikacji uranu i innych pierwiastków w próbce oraz określenia ich ilości.

Po pomiarach wstępnych fragmenty próbek są przekazywane do dalszej szczegółowej analizy do wybranego laboratorium w sieci laboratoriów analitycznych współpracujących z MAEA (*network of analytical laboratories worldwide -NWAL*). Wybrane próbki są przekazywane do dalszych pomiarów w Czystym Laboratorium przez IDMS (*Isotope dilution mass spectrometry*), bardzo czuły spektrometr masowy. Czułość wykrywania uranu i plutonu pomiaru wynosi  $10^{-15}\text{g}$ .

Innym zadaniem Czystego Laboratorium MAEA jest przygotowywanie sterylnych zestawów inspekcyjnych zawierających wszystkie elementy potrzebne inspektorom pobierającym próbki środowiskowe. W zestawie znajdują się czyste szmatki do pobierania wymazów plastikowe szczelnie zamykane torebki do przechowywania pobranych próbek, etykiety, długopis i rękawiczki. Dodatkowo dołączona jest czysta folia aluminiowa jako rodzaj „obrusu”, na którym wykonywane są wszystkie operacje, by uniknąć przypadkowego zanieczyszczenia próbek. Czasem przy pobieraniu wymazów konieczne jest uży-



cie manipulatorów do zdalnego przygotowania próbek. Jeden zestaw jest używany w jednym pomieszczeniu. Przy konieczności pobrania próbek w różnych miejscach powinny być używane różne zestawy, by uniknąć zanieczyszczeń przenoszonych np. na rękawicach.

Do analizy próbek środowiskowych wykorzystywane są różne metody pomiarów spektrometrycznych, przede wszystkim promieniowania  $\gamma$  i rentgenowskiego. W mniejszym stopniu wykorzystywane są również promieniowania  $\alpha$  i  $\beta$ . Stosowane są również metody mikroskopowe, łączone zwykle ze spektrometrią promieniowania rentgenowskiego. Część pomiarów może być dokonywana bez specjalnego przygotowania próbek. Niektóre pomiary wymagają długotrwałego przygotowywania obejmującego np. spopielenie próbki (szmatki) w określonej temperaturze i przygotowanie roztworu, z którego metodą wymiany jonowej uzyskiwana jest próbka pomiarowa. Przygotowanie próbki pomiarowej i sam pomiar, są procesem wielogodzinnym. Badania koncentrują się głównie na wydzieleniu w pomiarze izotopów uranu i plutonu. Wyselekcjonowane są i inne pierwiastki. Pozwala to potwierdzić z dużą precyzją zgodność przeprowadzonych procesów, którym poddane są materiały jądrowe, z deklaracjami operatora obiektu. Ma to szczególne znaczenie w procesie wzbogacania i przerobu paliwa. Metody zbierania próbek środowiskowych mogą też być pomocne przy sprawdzaniu ewentualnych dróg nielegalnego wyprowadzania materiału jądrowego z obiektu. W celu potwierdzenia informacji o nieobecności niezgłoszonych materiałów jądrowych lub działalności powiązanej z energetyką jądrową pobierane są próbki środowiskowe we wskazanej przez MEAE lokalizacji (*location specific environmental sampling*).

### Nowa aparatura pomiarowa

Stale rosnąca ilość obiektów jądrowych związana z ze wzrostem zapotrzebowania na energię i coraz szerszym wykorzystaniem technik jądrowych w różnych dziedzinach gospodarki powoduje również wzrost ilości materiałów jądrowych, które powinny być objęte międzynarodowym systemem zabezpieczeń. Nowoczesne rozwiązania techniczne wymagają sprawniejszych, nowocześniejszych, bardziej wyrafinowanych mechanizmów kontroli. Wynika to również z możliwości unowocześnienia sposobów nielegalnego pozyskiwania materiałów jądrowych. System weryfikacji powinien być stale rozwijany i powinien wykorzystywać najnowocześniejsze dostępne metody, nawet takie, które są przedmiotem badań niepowiązanych z techniką jądrową. Głównym celem nowego podejścia do realizacji zadań systemu zabezpieczeń jest wczesne uzyskanie informacji o możliwości powstania niedeklarowanych obiektów jądrowych, działań lub używania niedeklarowanych materiałów jądrowych. Jest to ważne w działaniach związanych

ze wzbogacaniem oraz przerobem wypalonego paliwa, oraz innych działaniach związanych z energetyką jądrową. Prowadzenie systemu niezapowiedzianych inspekcji powiązanych z dodatkowym dostępem do wybranych etapów procesu przetwarzania materiałów jądrowych powinno być wspomagane nowoczesną aparaturą pomiarową wykrywającą i mierzącą szerszy zestaw izotopów np. tryt, izotopy berylu, neptunu, ameryku. Przewidywana jest dokładniejsza kontrola procesów powiązanych z materiałami jądrowymi w różnej postaci fizycznej proszków, roztworów, gazów itd.

Okres przygotowania nowej aparatury pomiarowej wymaga rozległych badań nad przydatnością nowej metody, jej niezawodnością, dokładnością i powtarzalnością pomiarów. Większość powstających nowych opracowań jest nową ulepszoną wersją już istniejących i sprawdzonych rozwiązań. Modyfikacja polega na dodaniu nowej generacji elektroniki lub wykorzystaniu nowszych technologii. Prowadzone są np. badania wykorzystania w kamerach systemów obserwacyjnych inteligentnych czujników opracowanych do celów militarnych integrujących różne metody analizy obrazów.

Ważnym parametrem weryfikacyjnym jest określenie zawartości plutonu w wypalonym paliwie. W nowo powstającym przyrządzie wykorzystane do tego celu będzie samorzutne promieniowanie neutronowe kiuru wzbudzające neutrony plutonu, których ilość informuje o zawartości plutonu w badanym materiale. Rozbudowana metoda pomiaru zwiększa jego dokładność.

Projektowana jest budowa przenośnych przyrządów laserowych do identyfikacji pojemników w zakładach wzbogacania, detektorów do wykrywania glinowodoru w powietrzu w przyrządach naziemnych lub lotniczych. Przyrząd zapewnia szybką identyfikację gazu i pomiar o wysokiej dokładności. Czułość przyrządu jest poniżej 0,1 ppb (części na miliard).

W miejscach stosowania systemów plombowania sprawdzana jest nienaruszalność stanu plombowanej obudowy. Ważnym elementem jest kontrola spawanych spoin. Nowsza wersja stosowanej metody to wprowadzanie odbłaskowych znaczników nakładanych na spoinę za pomocą specjalnego nieusuwalnego kleju. Próba jego usunięcia będzie widoczna. Metoda polega na porównywaniu zdjęć z chwili zakładania plomby ze zdjęciem wykonanym w czasie kontroli.

W wielu systemach plombowania ważne elementy są rozmieszczone w różnych miejscach obiektu. Opracowano radiowy system łączności pomiędzy elektronicznymi plombami i centralną jednostką zbierającą informacje. Jednostka centralna może być zdalnie połączona z centralą MAEA. Pozwala to sprawdzać indywidualnie poszczególne zaplombowane obszary.

Dużo uwagi poświęcono pomiarom  $UF_6$ , opracowując nowe wersje jego pomiarów spektrometrycznych. Istnieje wiele prototypowych urządzeń wykorzystujących różne techniki (laserowe, magnetyczne) pozwalające mierzyć różne parametry gazu. Prowadzone są liczne prace mające na celu opracowanie technik bezpośredniej weryfikacji plutonu w wypalonym paliwie. W większości używane są zmodyfikowane liczniki koincydencji  $^3\text{He}$  specjalnie przystosowane do rozróżniania neutronów w zależności od ich energii oraz umożliwiającą analizę czasu koincydencji neutronów.

Jedną z najnowszych opracowywanych metod pomiaru mocy reaktora, wypalania paliwa jest detekcja antyneutrino. Antyneutrino są wytwarzane w reaktorach jądrowych w czasie reakcji rozszczepienia uranu i plutonu. W wyniku kolejnych reakcji generowane są błyski światła wykrywalne przez scyntylatory. Pomiaru mogą być prowadzone w znacznej odległości od reaktora poza jego osłonę biologiczną. Zastosowanie tej metody badania pracy reaktora ogranicza narażenie inspektorów na promieniowanie.

W celu wykrywania nielegalnego przetwarzania (np. powtórnego) materiałów jądrowych przeprowadzana jest analiza gazów uwalnianych do atmosfery i powstałych w czasie procesów jądrowych. Próbkowanie dokonywane jest bezpośrednio w obiekcie lub w pobliżu w analogiczny sposób jak pobieranie próbek materiału jądrowego. Technika pobierania próbek wykorzystuje również urządzenia do absorpcji kriogenicznej w celu zwiększenia zateżenia gazów szlachetnych. Badania mają na celu identyfikację podjętych nieuprawnionych działań poprzez śledzenie  $^{86}\text{Kr}$  wskazującego na czynności przetwarzania określanych za pomocą symulacji komputerowych z uwzględnieniem warunków pogodowych, zmian globalnych stężenia Kr w atmosferze itd. Pobrane próbki są badane w spektrometrze masowym.

Wykorzystywane są również przyrządy umożliwiające zdalne wykrywanie charakterystycznych związków gazowych pochodzących z procesów jądrowych. Zasada ich działania opiera się na teledetekcji optycznej wykrywania światła i oceny odległości. Laser wysyła fale świetlne o znanej długości i selektywnie stymuluje cząsteczki w powietrzu. Światłoczuły teleskop skanuje atmosferę, wykrywając obecność stymulowanych cząsteczek. Analiza sygnałów umożliwia określenie stężenia gazu. Metoda ta jest szczególnie użyteczna do badania trudno dostępnych punktów spodziewanej emisji gazów.

Do wykrywania tlenków uranu i toru ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{UO}_3$ ,  $\text{ThO}_2$ ) w mieszaninach przewidywana jest technika spektroskopowa.

W przewidywanych podziemnych komorach składowania wypalonego paliwa, jak i składowiskach średnio

i wysoko-aktywnych odpadów przewiduje się wprowadzenie i rejestrowanie mikro wstrząsów geologicznych. Ma to na celu wykrycie wszelkich nieprawidłowości, mogących wskazywać na nieautoryzowane zmiany projektu i naruszenia bezpieczeństwa w końcowych magazynach jądrowych, umożliwiające dostęp do pojemników z materiałami jądrowymi. Przewiduje się również zainstalowanie systemów zdalnego sterowania. Układ czujników powinien eliminować mikro wstrząsy naturalne.

Do wykrywania i analizy nieznanymi materiałami wykorzystywana jest spektroskopia rozproszona wywołana laserem. Dobrze zogniskowany laser pulsacyjny tworzy na powierzchni próbki mikroplazmę. Widmo analizowane jest za pomocą zintegrowanego spektrometru. Uzyskane widmo umożliwia identyfikację materiału. Przyrząd może być również wykorzystany do obserwacji procesów przepływu materiałów oraz analizy materiałów i osadów w komorach rękawicowych (*glove box*) i gorących (*hot cell*) bez konieczności fizycznego wyjmowania próbek. Przyrząd może być używany do wstępnej selekcji próbek środowiskowych.

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

#### Literatura:

- [1] J. Kaniewski, W. Kielbasa, Ł. Koszuc, A. Kuczynski, M. Rabiński, K. Rzymkowski, Ad. Strupczewski, A. Strupczewski, Leksykon angielsko-polski energetyki jądrowej, Ministerstwo Energii, Warszawa (2016)
- [2] Safeguards techniques and equipment: 2011 edition, International Nuclear Verification Series No. 1 (Rev2), IAEA Vienna 2011
- [3] Safeguards techniques and equipment: 2003 edition, International Nuclear Verification Series No. 1 (Rev 1), IAEA Vienna 2003
- [4] <https://www.scribd.com/document/89237038/Pomiary-jadrowe>
- [5] M. Moeslinger, C. Liguori, International Atomic Energy Agency, Austria G. Neumann, S. Lange, Dr. Neumann Elektronik GmbH, Germany M. Stein, Canberra, USA S. Pepper, Brookhaven National Laboratory, USA B. Richter, Forschungszentrum Juelich, Germany K. Schoop, European Commission, Luxembourg, The IAEA's XCAM next generation surveillance system, IAEA-CN-184/260
- [6] Safeguards implementation practices guide on provision of information to the IAEA IAEA Services Series No. 33, IAEA Vienna 2016
- [7] Rzymkowski Krzysztof, Kontrola materiałów jądrowych PTJ 2-2011 Vol. 54 X. 2
- [8] Rzymkowski Krzysztof, Realizacja postanowień Traktatu o nie Rozpowszechnianiu Broni Jądrowej – weryfikacja materiałów jądrowych BJOR PAA Nr 4(94)/2013, Warszawa
- [9] Rzymkowski Krzysztof, Metody weryfikacji materiałów jądrowych, BJOR PAA Nr 3(113)/2018