

BADANIA NISZCZĄCE I WSPOMAGANIE WERYFIKACJI MATERIAŁÓW JĄDROWYCH

Destructive analysis and supporting systems for verification of nuclear materials

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono systemy pomiarowe i wspomagające stosowane do weryfikacji materiałów jądrowych w systemie Zabezpieczeń. Opisano metody pobierania próbek do badań niszczących oraz metody ich analizy. Omówiono systemy wspomagające obserwacyjno – rejestrujące i systemy zamykania – plombowania.

Abstract: The study presents the measurement and support systems used for verification nuclear materials in the Safeguards system. Methods of sampling for destructive testing and methods of their analysis are described. Supporting systems monitoring and surveillance as well as sealing systems are discussed.

Słowa kluczowe: badania niszczące, pomiar promieniowania gamma, analizator wielokanałowy, wypalone paliwo, system zabezpieczeń MAEA, systemy monitorujące

Keywords: destructive analysis, gamma ray measurement, multichannel analyser, spent nuclear fuel, IAEA safeguards, monitoring systems

Zadaniem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) jest kontrola wypełniania warunków Traktatu o Nierozprzestrzenianiu 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*) i niszczących (*destructive analysis*) poczynając od elementarnego policzenia sztuk materiałów jądrowych (np. zastawów paliwowych), bezpośrednich pomiarów właściwości fizycznych, składu izotopowego, odczytu monitorów pracujących w systemie ciągłym, sprawdzenia plomb.

Badania niszczące polegają na pomiarze właściwości fizycznych materiałów jądrowych z naruszeniem ich postaci fizycznej. Badania niszczące są najdokładniejszą metodą pomiarową mającą na celu wykrycie małego niedoboru (*small defect.*). Wymaga to pobrania próbek materiału jądrowego i przesyłanie ich do niezależnych ośrodków badawczych w celu przeprowadzenia dokładnej analizy spektralnej i chemicznej. Ta metoda

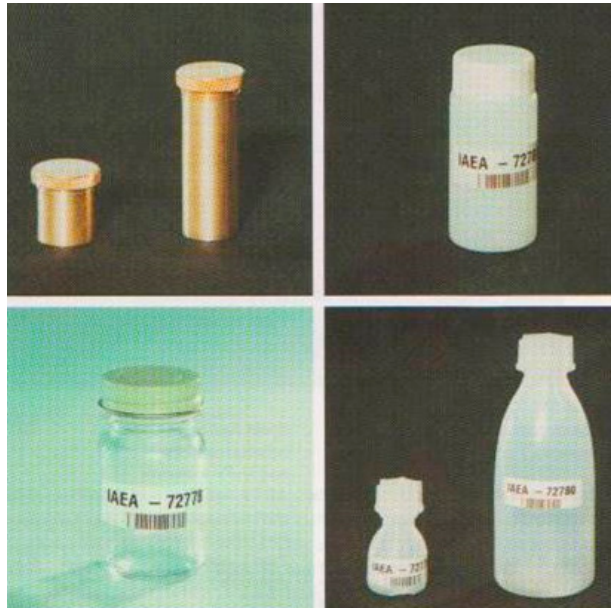
pozwała wykryć czy nie nastąpiło usunięcie niewielkiej ilości materiału jądrowego z wielu elementów.

Bardzo istotne dla wiarygodności przeprowadzanej kontroli jest określenie ilości badanych elementów zawierających materiał jądrowy. Dokładność pomiarów w tej metodzie jest bardzo wysoka (błąd pomiaru jest poniżej 1%).

Uzupełnieniem ewidencji materiałowej są **systemy obserwacyjno-rejestrujące** umożliwiające zachowanie ciągłości informacji o materiale jądrowym, śledzenie jego transportu wewnątrz obiektu po ustalonych trasach, sprawdzenie, czy materiał jest testowany w wyznaczonych miejscach pomiarowych, potwierdzenie nienaruszalności plombowanych partii materiału, rejestracje ewentualnych ingerencji w systemy zamykania (plombowania) lub manipulacji przy zainstalowanych urządzeniach MAEA, próbkach.

Szczegółowa procedura postępowania w procesie pobierania próbek, przygotowania do transportu i przesłania pocztą dyplomatyczną ma na celu zapewnienie autentyczności pobranego materiału i uchronienie go przed podmianą.

Do każdej próbki dołączana jest dokumentacja zawierająca informacje o masie, objętości pobranej próbki, miejsca jej pobrania oraz deklaracje operatora o składzie chemicznym. Ilość pobieranych próbek miejsce ich pobrania wraz ze szczegółową instrukcją, jakich należy użyć dla danej próbki pojemników, jest ustalana przy opracowywaniu planu inspekcji. Procedury pobierania próbek są tak opracowane, by przy analizie podzielonej na części próbki można było oszacować



Fot. 1. Pojemniki do pobierania próbek do badań niszczących (fot. MAEA)

Photo 1. Sampling containers for destructive analysis (photo IAEA)

niedokładność pomiaru. Części próbki mogą być badane różnymi metodami. Pomiary wykonywane przez operatora i pomiary kontrolne muszą spełniać międzynarodowe standardy dokładności i muszą być okresowo sprawdzane. Wybór metody analizy zależy od masy dostarczanej próbki.

Podstawowe badania analityczne koncentrują się na wykryciu i oszacowaniu ilości uranu lub plutonu w próbce. Wykorzystywane są wszystkie znane metody analizy chemicznej. Ze względu na dużą ilość badanych próbek i na konieczność eliminacji indywidualnych błędów popełnianych przez analityka dąży się do zautomatyzowania pomiarów.

Do wykrywania i pomiaru uranu stosowana jest **metoda miareczkowania potencjometrycznego** (miareczkowanie Daviesa i Graya) polegająca na pomiarze zmian napięcia elektrycznego generowanego przez ogniwo złożone z elektrody wskaźnikowej i elektrody odniesienia. Pluton jest wykrywany metodą **kontrolowanej potencjalnej kulometrii** wykorzystującej zjawisko elektrolizy. Technikę tę stosuje się również do oznaczania masy plutonu w np. roztworach produktu plutonowego, proszkach lub pastylkach paliwa jądrowego zawierających pluton, lub jego tlenki bądź tlenki plutonu i uranu jak w paliwie MOX.

Podstawową techniką weryfikacji zawartości uranu i/lub plutonu w roztworach jest **spektrometria masowa**. Może być ona wykorzystana do analizy próbek zarówno o wysokiej, jak i niskiej zawartości uranu i plutonu. Jest to metoda szczególnie użyteczna do badania próbek, dla których nie można użyć innych metod analizy: miareczkowania, kulometrii, grawimetrii zapłonu.

Metoda spektrometryczna najczęściej jest stosowana do pomiarów weryfikacyjnych wypalonego paliwa w procesie jego przerobu. Przygotowanie próbek do pomiarów wymaga ciągu złożonych operacji.

Jedną z metod analizy próbek jest **grawimetria zapłonowa** polegająca na określeniu masy oznaczanej poprzez usuwanie oznaczanego składnika z próbki przez zapłon. Grawimetria zapłonowa jest niezawodną i dokładną metodą analityczną do oznaczania stężenia uranu w mieszaninie tlenków uranu i plutonu (np. MOX). Stosowane metody obliczeniowe pozwalają określić ilość uranu i plutonu w próbce.

Do wykrywania uranu, toru i plutonu w mieszanych próbkach uranowo – torowych lub uranowo – plutonowych stosowana jest **metoda densytometrii K-edge** polegająca na wybijaniu elektronów z powłoki K atomu, które są zastępowane elektronami z dalszych powłok, powodując emisję promieniowania rentgenowskiego charakterystyczną dla danego pierwiastka. Pozwala to określić gęstość i skład pierwiastkowy próbki. Systemy densytometryczne są instalowane i używane przede wszystkim w laboratoriach analitycznych zakładów przerobu paliwa.

Podobną metodę wykorzystującą **fluorescencję rentgenowską** (*fluorescencji K X ray*) stosuje się do próbek PuO_2 i roztworów azotanu plutonu oraz próbek MOX.

Analiza izotopowa próbek materiałów jądrowych jest przeprowadzana za pomocą spektrometrów mas i uzupełniana spektrometrią γ i α . Spektrometria mas jest oparta na jonizacji cząsteczek lub atomów, a następnie detekcji liczby jonów w funkcji ich stosunku masy do ładunku jonu. Istnieje wiele wariantów dostosowanych do wymagań użytkownika. W badaniach próbek spektrometria mas są wyspecjalizowane do pomiaru składu izotopowego uranu i plutonu. Za pomocą **spektrometrii gamma** o wysokiej rozdzielczości poszukiwany w próbkach jest neptun traktowany, jako potencjalny materiał jądrowy, który może być wykorzystywany do celów militarnych.

Spektrometria alfa jest używana równolegle ze spektrometrią mas z jonizacją termiczną do oznaczania ^{238}Pu lub do pomiaru plutonu w próbkach wypalonego paliwa.

W badaniach niszczących stosowane są wyjątkowo jeszcze inne metody o bardzo wysokiej dokładności. Są one stosowane do oznaczania zanieczyszczeń w koncentracji uranu umożliwiające sprawdzenie, czy materiał jądrowy ma skład i czystość odpowiednią do wytwarzania paliwa lub do jego wzbogacenia.

W wypalonym paliwie znajdują się izotopy innych pierwiastków neptuna, ameryku, kiuru. W połowie lat 90 uznano, że neptun i ameryk mogą również być wykorzystywane do budowy jądrowych urządzeń wybuchowych i uznano za celowe włączenie tych pierwiastków do systemu zabezpieczeń.

Systemy obserwacyjno-rejestrujące i zamykające (System of Containment/Surveillance measures (C/S system))

Środki zamykania oraz obserwacyjno-rejestrujące są stosowane w celu wzmocnienia kontroli ewidencji materiałowej poprzez weryfikację informacji o przemieszczaniu materiałów jądrowych i sprawdzaniu integralności zbieranych danych.

Ograniczanie (zamykanie – *Containment*) wykorzystuje strukturalną właściwość obiektu, pojemników lub przyrządów i jest wykorzystywane do ustalania integralności (zamykania – plombowania) obszaru lub elementu (włączając zabezpieczenia przyrządu lub danych). Umożliwia to utrzymanie ciągłości wiedzy o zamkniętym obszarze, elemencie i umożliwia wykrycie nieautoryzowanego dostępu do obszaru, przemieszczeń materiałów jądrowych lub innych wrażliwych z punktu widzenia systemu zabezpieczeń elementów oraz wykrycie innych nieautoryzowanych działań.

Systemy obserwacyjno – rejestrujące są bardzo szeroko stosowane w systemie zabezpieczeń i pozwalają w sposób niezakłócający pracy obiektu uzyskać informację o działalności zakładu, przemieszczaniu materiałów jądrowych, a rejestracja obrazów pozwala na otworzenie historii działań. Kamery rejestrujące systemów są ustawiane w takich miejscach, by był widoczny cały interesujący obszar. Szerokie zastosowanie systemów obserwacyjno – rejestrujących jest szczególnie korzystne w rozległych obiektach przemysłowych. Należy podkreślić, że niezależnych systemów obserwacyjno – rejestrujących jest w obiekcie jądrowym kilka i nie wszystkie są przeznaczone do obserwacji materiałów, chociaż w pewnych warunkach mogą stanowić uzupełnienia. Systemy MAEA są pod kontrolą tej Agencji i są przez nią obsługiwane. Zarejestrowane informacje mogą być na zasadzie specjalnej umowy udostępnione inspektoratowi krajowemu. Jest to próba uniknięcia dublowania aparatury. Początkowo była dublowana. Oprócz systemu MAEA jest wewnętrzny system obserwacyjny należący do właściciela obiektu związany z funkcjonowaniem obiektu (windy, wejścia pomieszczenia biurowe itp.). Trzecim systemem jest system zabezpieczeń antyterrorystycznych.

Systemy obserwacyjno – rejestrujące są najbardziej skuteczne w obszarach magazynowych np. baseny wypalonego paliwa. Pole widzenia kamer jest takie, że łatwo można zidentyfikować każdy ruch obiektów,

Systemy obserwacyjno – rejestrujące pracują bez nadzoru i mogą łatwo być dostosowane do zdalnej transmisji danych. Konstrukcja kamer i powiązanych z nimi urządzeń sterujących powinna być taka, by jakkolwiek ingerencja mająca na celu manipulację zapisanymi danymi była niemożliwa.

Technologia systemów obserwacyjno – rejestrujących

Początkowo podstawowym urządzeniem obserwacyjno – rejestrującym były kamery filmowe, następnie wykorzystywano systemy oparte na technologii kaset wideo. Obecnie powszechnie stosowane są systemy cyfrowe (*digital image surveillance – DIS*). Zaletą tych systemów jest niezawodność, lepsza jakość obrazów, możliwość cyfrowej obróbki obrazu, częściowe zautomatyzowanie przeglądu zarejestrowanych zdarzeń, możliwość zdalnego sterowania, potwierdzenie autentyczności (*authentication*). Potwierdzenie takie jest wymagane dla wszystkich urządzeń wykorzystywanych w MAEA. Polega na wprowadzeniu zespołu środków zapewniających, że oryginalna informacja pochodzi ze znanego źródła (czujnika) i nie była zmieniana, usunięta lub zamieniona.

Efektywny system obserwacyjny powinien zapewnić szerokie pole widzenia kamery, tak by widoczny był cały obszar ważny dla systemu zabezpieczeń i by można było zaobserwować każdy ruch elementów mogących zawierać materiał jądrowy. Ważnym parametrem systemu jest czas między kolejnymi rejestrowanymi obrazami. Dobór odpowiedniego czasu powinien umożliwić określenie kierunku ruchu przedmiotów. Czas może być ustawiony arbitralnie przy założeniu maksymalnej przewidywanej szybkości ruchu przedmiotów lub system rejestrujący może być uruchamiany przez czujniki ruchu, lub czujniki wykrywania zmiany sceny np. oświetlenia. Niektóre systemy obserwacyjne są przewidziane do bezpośredniej transmisji obrazów do centrali MAEA za pomocą systemów satelitarnych.

Aparatura używana do obserwacji i rejestracji jest opracowywana specjalnie dla systemu zabezpieczeń i stale ulepszana. Musi ona spełniać określone warunki fizyczne, np. być nieczuła na promieniowanie jonizacyjne, spełniać wymagania dotyczące, jakości obrazu, pojemności pamięci, szybkości rejestracji z uwzględnieniem daty i czasu wykonania zdjęcia, niezawodność ze szczególnym uwzględnieniem warunku pracy ciągłej, wymagania temperaturowe, odporności wilgotnościowej oraz mieć możliwość długotrwałej pracy przy zasilaniu awaryjnym z wewnętrznej baterii itd. Ponadto aparatura musi spełniać konkretne wymagania systemu zabezpieczeń stosowanych w danym obiekcie. Kamery rejestrujące są umieszczane w różnych miejscach i w zależności od dostępu do kamery musi być uwzględniona łatwość jej obsługi inna dla miejsc trudno dostępnych, inna dla łatwych. Niekiedy kamery są instalowane, jako urządzenia czasowe tylko na krótki okres w celu uzupełnienia systemu stacjonarnego. Czasem wymagane są systemy wielokamerowe sterowane za pomocą specjalnie opracowanej jednostki centralnej. Sposób zapisu obrazów w takich systemach wymaga specjalnego przygotowania zarejestrowanych infor-

macji przed jej analizą. Stosowane są również systemy zdalnie sterowane obserwujące procesy produkcyjne, jak i systemy do obserwacji podwodnych w basenach wypalonego paliwa.

Obecnie większość systemów obserwacyjnych w MAEA wykorzystuje kamerę cyfrową DCM 14 (*digital camera – DCM*). Spełnia ona wszystkie podstawowe wymagania systemu zabezpieczeń: zapis cyfrowy obrazu kompresję obrazu, potwierdzenie autentyczności (*authentication*) obrazu i danych, wykrywanie zmian sceny, szyfrowanie obrazu, pamięć wewnętrzną, optymalizację wykorzystania baterii w przypadku awarii, możliwość zdalnego sterowania.

Ponieważ kamera DCM 14 spełnia większość wymagań systemu zabezpieczeń, a elastyczność zastosowanych rozwiązań pozwala na jej wykorzystanie w wielu różnych konfiguracjach, stanowi ona wewnętrzny standard MAEA. Kamera używana jest, jako samodzielny zestaw obserwacyjno – rejestrujący w różnych lokalizacjach trudno i łatwo dostępnych, jak i w systemach wielokamerowych. Wykorzystując właściwości kamery, opracowano szereg zestawów obserwacyjnych w pełni realizujących wymagania systemu zabezpieczeń.

Mimo wielu zalet kamery DCM 14 opracowano nową jej wersję kamerę NGSS (*Next Generation Surveillance System – NGSS*). Kamera NGSS umożliwia zapis obrazów kolorowych (5 Mpix). Minimalny czas pomiędzy kolejnymi zdjęciami wynosi 1 sek. Pole widzenia kamery obejmuje 180°. Kamera posiada bardzo rozbudowaną elektronikę umożliwiającą ustawienie różnych wariantów rejestracji, szyfrowanie informacji, ustawienie wysokiej rozdzielczości wybranego segmentu w polu widzenia, jak również umożliwia korektę obrazu na skrajach pola widzenia. Kamera może wykonywać zdjęcia nawet przy bardzo słabym oświetleniu. Kamera posiada system wykrywania włamań do wnętrza obudowy kamery. Oczywiście wszystkie rozwiązania są kompatybilne do wcześniejszych konstrukcji.

Ze względu na możliwość prawie ciągłej obserwacji i kontroli ruchu materiałów jądrowych, jak i obserwacji różnych działań z nimi związanych systemy obserwacyjno – rejestrujące stały się jednym z najważniejszych sposobów kontroli. Aktywnych jest ponad 1000 kamer w różnych systemach kontroli. Do końca roku 2020 przewidziana była wymiana wszystkich kamer DCM 14 na NGSS. Szczególny wpływ na rozwój tej metody kontroli ma możliwość obserwacji zdalnej działań w obiekcie, czasem nawet w czasie rzeczywistym, dzięki łączności satelitarnej.

Zebrane dane przez systemy obserwacyjne muszą być porównane z deklaracjami operatora obiektu. Jest to najbardziej czasochłonna i jednocześnie najważniejsza część systemu kontroli optycznej. Początkowo, gdy były w tych systemach używane kamery filmowe była to bardzo uciążliwa praca wymagająca wiele uwagi utrudniona przez konieczność identyfikacji odpowied-

niej klatki filmu i daty wykonania zdjęcia. Na taśmie nie było zapisu daty. W miarę wprowadzania technik cyfrowych zaczęto wprowadzać i testować systemy automatycznego wyszukiwania działań prowadzonych przez operatora. System wyszukiwania wykrywa zmiany zapisanych scen. Początkowo aparatura umożliwiająca przeglądanie była dostępna tylko w centrali MAEA. Ponieważ wyniki kontroli powinny być znane jak najszybciej, nowoczesny program (*General Advanced Receiving Station – GARS*) umożliwia przeglądanie zapisanych wyników przy pomocy komputera osobistego, w który obecnie wyposażony jest każdy inspektor.

Jednokamerowe systemy obserwacyjno – rejestrujące mogą być połączone bezpośrednio z systemami pomiarowymi, tworząc złożony system kontrolny. Systemy takie są wykorzystywane w zakładach produkcji paliwa. Przykładem może być system identyfikacji próbek paliwa MOX (SIDS) powstały z połączenia kamery z rejestratorem i zestawem pomiarowym wykorzystującym promieniowanie neutronowe. Kamera jest uruchamiana przez zestaw pomiarowy do obserwacji produkcji paliwa MOX i jej obecność jest ważna ze względu na zawartość plutonu w tym paliwie. Jednokamerowe systemy obserwacyjne są powszechnie stosowane do krótkoterminowych (kilku dniowych lub kilku godzinnych) obserwacji działań operatora w przypadku przemieszczania materiału jądrowego w obszarach nieobjętych stałą obserwacją, instalacji pomiarowych lub innych czynności mogących mieć wpływ na zmiany stanu materiału jądrowego.

Kamery do obserwacji podwodnych są używane do identyfikacji paliwa jądrowego w otwartym reaktorze lub w basenie wypalonego paliwa. Czasem zachodzi konieczność użycia TV podwodnej w basenie wypalonego paliwa do sprawdzenia innych przechowywanych tam elementów, w których mógłby być ukryty materiał jądrowy. Zwykle połączone jest to z innymi pomiarami. Często w czasie inspekcji używane są przenośne systemy obserwacyjne.

Jednakże najszersze zastosowanie mają skomputeryzowane kompaktowe urządzenia obserwacyjno – rejestrujące z własnym zasilaniem dostosowane do różnych wymagań i używane w trudno dostępnych miejscach. Najszersze zastosowanie ma kamera DCM 14 i jej różne wersje.

Tego typu kamery są podstawą budowy systemów wielokamerowych (od 4 do 16) stosowanych przede wszystkim do obserwacji linii produkcyjnych w zakładach produkcji paliwa, zakładach przerobu paliwa w miejscach przechowywania materiałów jądrowych. Sterowanie takim systemem jest dokonywane przy pomocy specjalnego oprogramowania i specjalizowanego sterownika. Istotą programu jest ustalenie sekwencji zapisu informacji i takie przygotowanie zebranego materiału, by można było, przeglądając zapis obserwować oddzielnie materiał zebrany przez każdą kamerę.

System zamykania – pieczętowania

Uzupełnieniem systemu obserwacji jest tzw. system zamykania – pieczętowania (plombowania). System zamykania oraz obserwacyjno – rejestrujący jest kombinacją środków wykorzystujących kilka różnych technik plombowania i różnych elementów śledzących (optycznych, detektorów ruchu, detektorów promieniowania itd.). W systemie zabezpieczeń wykorzystywanych jest kilka rodzajów plomb (*Seal*) stosowanych do plombowania ruchomych elementów pojemników lub przyrządów, tak by ich otwarcie nie było możliwe bez naruszenia integralności plomb. Większość zamknięć stosowana jest przez dłuższy czas, często kilka miesięcy lub nawet lat. Stosowanych jest kilka rodzajów plomb. Weryfikacja niektórych plomb jest przeprowadzana bezpośrednio w obiekcie w czasie inspekcji zwykłych. Weryfikacja plomb stosowanych w obszarach, gdzie transfer materiałów jądrowych jest przeprowadzany bardzo rzadko, zależy od rodzaju stosowanych plomb. W przypadku plomb metalowych musi być ona przeprowadzana w laboratorium i w takich miejscach plomb są wymieniane według określonego planu, na ogół najstarsze. Dla zwiększenia pewności zamykania, szczególnie w miejscach, w których dostęp do materiału jądrowego jest utrudniony, przewidywane scenariusze ukrycia materiałów jądrowych zalecają stosowanie zwielokrotnionych systemów C/S, działających niezależnie. Oprócz stosowania systemów obserwacyjnych wprowadza się czasem podwójny system plombowania przy zastosowaniu różnych rodzajów plomb.

W zależności od potrzeb stosowane są plombki papierowe (tymczasowe), metalowe, elektroniczne, optoelektroniczne.

Plombki tymczasowe są wykorzystywane do chwilowego zabezpieczenia materiałów jądrowych lub przyrządów pomiarowych w czasie, gdy inspektorzy nie mogą bezpośrednio ich obserwować. Plombki tymczasowe stosowane są w czasie inspekcji np. w celu zaplombowania pojemnika z materiałem jądrowym przenoszonym do innego pomieszczenia wewnątrz obiektu. Plombka tymczasowa jest zwykle wykonana z bardzo cienkiej samoprzylepnej folii plastikowej, której naruszenie powoduje jej zniszczenie i pozostawia widoczne ślady na podłożu.

Innym rodzajem plombki jednorazowej są plombki metalowe. Plombowanie polega na przełożeniu specjalnego wieloprzewodowego drutu pokrytego lakierem, na którym widoczne byłyby wszelkie próby manipulacji przy plombie, przez otwory plombowanego przedmiotu i otwory w plombie. Oba końce przewodu są po założeniu plombki niedostępne. Wstępna weryfikacja skuteczności plombowania polega na dokładnym zbadaniu obudowy plombowanego przedmiotu i integralności plombki pod kątem jakichkolwiek oznak ingerencji i manipulacji. Weryfikacja plombki (czy nie została naruszona,

podmieniona, lub przełożona z innej lokalizacji) jest dokonywana w laboratorium. Laboratorium przygotowuje nowe plombki, nadając im specjalne znaki identyfikacyjne. Plombki metalowe są najpowszechniej używanymi plombkami do plombowania aparatury pomiarowej, systemów obserwacyjnych, drzwi, pojemników itd.

W czasie inspekcji pobierane są próbki niewielkiej ilości materiału jądrowego do badań niszczących. Zwykle są to pastylki uranowe umieszczane w prętach paliwowych (walec o wysokości ok. 10 mm i średnicy podstawy 10 mm) lub niewielkie ilości sproszkowanego uranu. Próbkę umieszczaną są w fiolkach, które następnie na czas transportu do laboratorium badawczego pakowane są do specjalnych pojemników (*Secure Vial Sealing Container – SVSC*). Każdy pojemnik posiada swój charakterystyczny znak identyfikacji wypalany w czasie produkcji pojemnika. Zamknięcie pojemnika jest jednocześnie jego zaplombowaniem. Obrazy referencyjne znaku są przekazywane do laboratorium, w którym przeprowadzana jest weryfikacja analogiczna jak badanie autentyczności plomb metalowych.

Bardziej skomplikowane są plombki elektroniczne wyposażone w pamięć elektroniczną, zegar, kalendarz i własne zasilanie bateryjne zapewniające ciągłą pracę przez dwa lata. Są to plombki o zmiennym kodowaniu (*VACOSS – Variable Coding Seal System*). Plombowanie polega na przełożeniu elastycznego przewodu światłowodowego przez otwory przedmiotu plombowanego. Oba końce przewodu są włączone do gniazd plombki. Plombki te zakładane są w miejscach, w których kontrolowany jest transport materiałów np. w kanałach pomiędzy sektorami basenu wypalonego paliwa. Plombka w chwili transportu paliwa może zostać zdjęta przez operatora obiektu. Czas, data oraz okres zdjęcia plombki są rejestrowane w pamięci i muszą się zgadzać z deklaracją operatora. Plombki tego typu stosowane są również w magazynach materiałów jądrowych. W razie potrzeby pobrania materiału plombka jest rozłączana. Plombki te mogą być łączone łańcuchowo. Weryfikacja – odczyt pamięci plombki wymaga specjalnego przyrządu i oprogramowania. Do weryfikacji przeznaczone jest odrębne gniazdo tak, że praca plombki nie jest zakłócana. Dane dotyczące weryfikacji (data i czas) są również zapisywane w pamięci. Weryfikacja przeprowadzana jest zwykle w czasie inspekcji. W bardziej rozbudowanych systemach kontroli wykorzystujących łącza satelitarne, prowadzone są próby zdalnego odczytu plomb w centrali MAEA. Obecnie system plomb *VACOSS* jest zastępowany przez nowocześniejszy system *EOSS (Electronic Optical Sealing System)* Elektroniczny optyczny system plombowania posiada udoskonalony system potwierdzenia autentyczności (*authentication*), szyfrowania, sygnalizacji włamań do systemu, oraz system optymalizacji wykorzystania energii. Potwierdzenia zamknięcia pętli światłowodowej (do 1000 m) jest sygnalizowane impulsami świetlnymi na obudowie plombki. Konstrukcja obudowy rejestruje każ-

dą próbę ingerencji mechanicznej, a nieautoryzowane otwarcie obudowy powoduje automatyczne wyzerowanie kodów identyfikacji i szyfrowania. Trwałość baterii jest przewidziana na 10 lat.

W przechowalnikach wypalonego paliwa, gdzie nie przewiduje się częstych transportów, stosowany jest system plombowania COBRA. System plombowania polega na przełożeniu przez wszystkie plombowane elementy elastycznego przewodu światłowodowego i przyłączeniu jego końców do specjalnego urządzenia pozwalającego na wykonanie zdjęcia światłowodu, przez który przesyłany jest sygnał. Zdjęcie jest przechowywane w archiwum. Weryfikacja polega na porównaniu zdjęcia wykonanego tą samą metodą z archiwalnym.

Całkowicie odmienny sposób plombowania wykorzystywany jest w basenach reaktora CANDU i w przechowalnikach wypalonego paliwa. Jedną z śrub pojemnika, w którym znajduje się wypalone paliwo jest zastąpiona przez śrubę o specjalnej konstrukcji. Na śrubie umieszczony jest zespół dysków tworzących unikalny wzór. Jeden z dysków jest łatwo łamliwy i jego uszkodzenie może wskazywać na próbę nielegalnego otwarcia pojemnika. Weryfikacja polega na wysłaniu impulsów ultradźwiękowych przez dyski na śrubach i obserwacją odbić fali dźwiękowej porównując je z tabelą odbić powstałych przy instalacji plomby. Zaletą tego rozwiązania jest niewrażliwość na promieniowanie i trwałość w nawet bardzo trudnych warunkach oraz długowieczność.

Należy podkreślić, że weryfikacja nienaruszalności plomb nie jest wystarczająca do uznania skuteczności systemu zamykania. Konieczne jest również wszechstronne sprawdzenie integralności całej powierzchni plombowanej obudowy, pojemnika integralności czy plombowanego pomieszczenia. Należy sprawdzić, czy nie próbowano uzyskać dostępu do zabezpieczonego materiału jądrowego bez naruszania plomb. W tym celu opracowano system laserowego sprawdzania integralności. Po założeniu plomb dokonuje się laserowego zapisu (wykonanego z wysoką precyzją) zaplombowanej obudowy lub jej fragmentów (*Laser Mapping system for Containment Verification – LMCV*), który jest później porównywany z zapisem wykonanym w czasie weryfikacji skuteczności plombowania. Metoda laserowa jest również wykorzystywana w zakładach wzbogacania uranu do identyfikacji pojemników z UF_6 .

Bezobsługowe systemy pomiarowe

Bezobsługowe systemy pomiarowe (*Unattended Monitoring System – UMS*) są przede wszystkim wykorzystywane w zakładach przemysłowych pracujących w różnych etapach cyklu paliwowego, poczynając od zakładów wzbogacania uranu, poprzez produkcję paliwa, obserwację wykorzystania paliwa w reaktorach energetycznych, badawczych i doświadczalnych, zakładach przerobu paliwa, w przechowalnikach wypalonego pali-

wa oraz na składowiskach odpadów średnio i wysokoaktywnych odpadów jądrowych kończąc. Bezobsługowe systemy pomiarowe są przeznaczone do pracy ciągłej i muszą charakteryzować się wysoką niezawodnością. Konstrukcja bezobsługowego zestawu pomiarowego powinna zapewniać wiarygodność zbieranej i przechowywanej informacji nawet w warunkach utraty zasilania. Podstawowym celem stosowania bezobsługowych systemów pomiarowych jest zapewnienie utrzymania ciągłości wiedzy o wykorzystaniu materiałów jądrowych wykonywane w granicach obiektu.

Zastosowanie systemów bezobsługowych jest związane z obniżeniem kosztów kontroli i takie jej prowadzenie by była ona efektywna i nie zakłócała pracy w obiekcie. Jest to szczególnie istotne przy stale wzrastającej ilości obiektów jądrowych i związanych z tym wzrostem ilości inspekcji ze względu na konieczność utrzymania kosztów inspekcji w rozsądnych granicach.

System sterowania pracą zestawu pomiarowego jest umieszczony w specjalnej obudowie wyposażonej w różne czujniki i detektory, których zadaniem jest wykrywanie wszelkich prób manipulacji systemem pomiarowym, ze szczególną ochroną ważnych dla systemu zabezpieczeń danych. Praca zestawu jest sterowana komputerem wyposażonym w rozbudowaną pamięć i zasilacz awaryjny na wypadek krótkotrwałych przerw w zasilaniu. Dane pomiarowe są przesyłane do komputera z zestawów pomiarowych rozmieszczonych w różnych, ważnych dla zabezpieczeń miejscach. Jeżeli system jest przystosowany do zdalnego sterowania, zebrane informacje mogą być przesyłane do centrali MAEA lub jej ośrodków regionalnych prowadzących kontrole obiektu. Dane są przesyłane cyklicznie. Wymaga to odpowiedniego szyfrowania informacji.

Wymaganie wysokiej niezawodności bezobsługowego systemu pomiarowego wymusza dokładną kontrolę zestawów systemu pomiarowego przed jego instalacją w obiekcie. System jest wszechstronnie testowany w centrali MAEA, co pozwala wykryć i usunąć usterki. Po trzy miesięcznej bezusterkowej pracy jest on gotowy do instalacji. Rozwój technik cyfrowych i dążenie do jak najprecyzyjniejszej, efektywnej kontroli oraz standaryzacji aparatury pozwala przypuszczać, że powstaną rozbudowane sieci pomiarowe sterowane zdalnie.

Wprowadzenie systemu bezobsługowego zmniejszyło w sposób istotny narażenie na promieniowanie zarówno inspektorów, jak i pracowników obiektu pomagających w czasie inspekcji, zmniejszyło ilość niezbędnych inspekcji w obiekcie, przyczyniając się do niezakłócenia rytmu pracy zakładu, zwiększając jednocześnie efektywność systemu zabezpieczeń.

Jednym z najpowszechniejszych zastosowań systemu bezobsługowego jest kontrola ruchu paliwa świeżego i wypalonego. Wiele uwagi poświęca się obserwacji paliwa MOX zawierającego tlenki uranu i plutonu. Przewiduje się wykorzystanie tego paliwa w reaktorach LWR

(*Light Water Reactor*). System detektorów promieniowania γ i neutronowego umożliwia rozróżnienie paliwa świeżego od wypalonego. Obserwowany jest transport wypalonego paliwa z reaktora do mokrego przechowalnika (basenu wypalonego paliwa) i następnie transport świeżego paliwa do reaktora. Podobne systemy są używane do obserwacji innych napromieniowanych elementów transferowanych do basenu z reaktora. Detektory są rozmieszczone, tak by potwierdzić przemieszczanie się elementów z jednej konkretnej lokalizacji do drugiej. System jest wspomagany przez obserwację i rejestrację urządzeń optycznych. Czasem przy oddaleniu obu lokalizacji pierwotnej i docelowej używany jest mobilny system bezobsługowy obserwujący załadunek, transport i wyładowanie paliwa, aż do umieszczenia go w pozycji docelowej. W czasie transportu włączany jest dodatkowo system GPS.

Inna konstrukcja systemu bezobsługowego umożliwia śledzenie procesu produkcyjnego paliwa od chwili przekazania sproszkowanego uranu lub tlenków uranu i plutonu poprzez proces spiekania do powstania pastylek uranowych, lub MOX używanych w prętach paliwowych. W związku z tym, że proces odbywa się w zamkniętych i izolowanych komorach odpowiednio skonstruowane detektory umieszczone są na zewnątrz komory. System kamer umożliwia identyfikację pojemników, z których pochodzi materiał produkcyjny. Możliwe są różne wersje systemu pozwalające na bardzo dokładne oszacowanie ilości plutonu i uranu na każdym etapie produkcji.

Wykorzystanie bezobsługowej kontroli materiału jądrowego jest szczególnie użyteczne przy wymianie paliwa w reaktorze CANDU, która odbywa się w niedostępny dla obsługi obszarze bez wyłączania reaktora. Zespoły detektorów promieniowania γ i neutronowego pozwalają na identyfikację wypalonego paliwa i jego zliczanie. Mogą one również śledzić poziom mocy reaktora. Zapisane dane umożliwiają sprawdzenie poprawności wymiany paliwa.

System bezobsługowej kontroli wypalonego paliwa jest wykorzystywany podczas załadowywania silosów suchego przechowalnika wypalonego paliwa. Wejście silosu jest kontrolowane przez zespół detektorów γ , umożliwia zliczanie pojemników z paliwem oraz pozwala określić poziom ich przechowywania. Po zakończeniu załadunku silosów, system jest demontowany i zakładane są plomby.

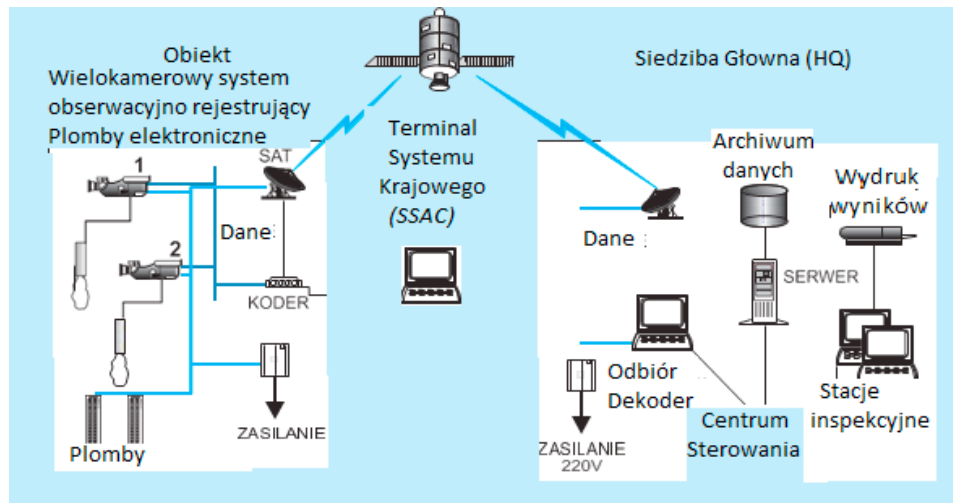
W elektrowniach jądrowych często używanym systemem bezobsługowym jest złożony system pomiarowy mocy reaktora. Do określenia mocy reaktora dokonuje się licznych pomiarów temperatury i przepływu wody w głównej pętli chłodzącej, pozwalających obliczyć moc oraz ocenić ilość wytworzonego rozszczepialnego materiału jądrowego. Wykres mocy jest porównywany z deklaracją operatora i stanowi jeden z istotnych elementów kontroli.

Systemy bezobsługowej kontroli materiału jądrowego są stosowane do kontroli różnych parametrów (temperatury, objętości, gęstości roztworów, wzbogacenia uranu w gazie UF_6 , ciśnienia itd.) w procesach technologicznych, w których są one używane. Pozwala to obserwować wszelkie zmiany związane z przechowywaniem materiałów i ich wykorzystaniem w procesie produkcyjnym. Oprogramowanie systemu może automatycznie kontrolować prawidłowość wykonywanych zadeklarowanych operacji. Wymaga to dużej dokładności pomiarów. Określenie stopnia wzbogacenia oprócz pomiarów parametrów gazu wymaga dodatkowo zastosowania pomiarów spektrometrycznych i wyrafinowanej obróbki matematycznej.

Zdalne sterowanie aparaturą kontrolną

W systemie zabezpieczeń zdalne sterowanie aparaturą kontrolną początkowo polegało na przesyłaniu danych zbieranych przez systemy obserwacyjno – rejestrujące i systemy plombowania oraz pomiarowe systemy bezobsługowe poza granice obiektu do centrali MAEA lub jej ośrodków regionalnych. Pierwsze próby przeprowadzono w końcu lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Celem wprowadzenia zdalnego sterowania było zmniejszenie ilości inspekcji, z których część polegała jedynie na zebraniu danych z przyrządów pomiarowych, co wymagało dodatkowej obsługi systemu pomiarowego, wymiany plomb itd. Wprowadzenie zdalnego sterowania poprawiło terminowość opracowywania raportów, pozwoliło skrócić czas wykrywania awarii systemu pomiarowego i przyspieszyło podjęcia działań naprawczych, zwiększając efektywność systemu zabezpieczeń. Techniczne możliwości systemu umożliwiają zdalne wprowadzenie operacji korygujących pracę systemów pomiarowych bez bezpośredniej ingerencji techników w obiekcie. Dodatkową zaletą wprowadzenia zdalnego sterowania jest możliwość przeprowadzenia odczytu zebranych danych w wybranym dogodnym czasie bez angażowania personelu obiektu w przygotowanie inspekcji i podobnie jak przy użyciu systemów bezobsługowych zmniejszenie narażenia na promieniowanie członków zespołu inspekcyjnego. Dotychczasowe pozytywne wyniki stosowania zdalnego sterowania, szczególnie w powiązaniu z systemami bezobsługowymi, pozwalają przypuszczać, że systemy te będą rozwijane dynamicznie. Jednym z powodów jest wzrastająca ilość nowych obiektów jądrowych i modernizacja systemów kontroli w już istniejących. Przewiduje się, że ilość rozbudowanych systemów zdalnego sterowania w krótkim czasie wzrośnie dwukrotnie. W 2010 r. działały 93 systemy bezobsługowe i 140 systemów obserwacyjno – rejestrujących połączonych z **centrum zdalnego sterowania** RMDC (*Remote Monitoring Data Centre*) w centrali MAEA.

Zasadniczym problemem działania i rozwoju sieci zdalnego sterowania jest zapewnienie szybkiej, beza-



Rys. 1. Zdalny system zabezpieczeń (źródło: MAEA ISBN 92-0-103097-5)
 Fig. 1. Remote Safeguards system (source: MAEA ISBN 92-0-103097-5)

waryjnej komunikacji, pomiędzy obserwowanym obiektem i centralą MAEA lub jej ośrodkiem regionalnym. Dotychczasowe systemy mogą być dostosowane do współpracy z każdym serwerem pracującym w dowolnym systemie operacyjnym. Początkowo w systemach obserwacyjnych wykorzystywano zapis analogowy obrazów, co utrudniało połączenie z systemem zdalnego sterowania, ponieważ wymagało stosowania interfejsu przeprowadzającego digitalizację obrazów. Pierwszym urządzeniem zapewniającym wszystkie wymagania systemu zabezpieczeń łącznie z możliwością zdalnego sterowania była kamera DCM 14 stanowiąca obecnie podstawowy element wszystkich systemów włączonych do sieci zdalnego sterowania.

Obecnie wszystkie pracujące systemy używają do połączeń wewnątrz obiektowych różnych rozwiązań. Połączenia z centralą są dokonywane za pomocą znormalizowanych łączy naziemnych **PSTN**, **ISDN**, **ADSL** i połączeń satelitarnych.

Centrum zdalnego sterowania RMDC zapewnia rzetelne i bezpieczne przesyłanie informacji między obiektem i centralą i jest wyposażone w wiele pomocniczych funkcji ułatwiających kontrolę jakości przesyłanej informacji np. wykrywanie błędów w zapisie – braku scen. Do transmisji informacji wykorzystywane są najnowsze protokoły. Na podstawie zbieranych informacji o pracy systemów pomiarowych przeprowadzana jest na bieżąco analiza.

Dokładne pomiary materiałów jądrowych pozwalają na ciągłe kontrolowanie ich ilości. Nowoczesna aparatura pomiarowa wykorzystuje najnowsze osiągnięcia naukowe, co pozwala na uzyskanie niezwykle dokładnych wyników. Charakterystyczną cechą aparatury jest praktyczne zastosowanie współczesnych teorii fizycznych (mechaniki kwantowej, budowy atomu) do opracowania zasad pomiarowych np. detekcja neutrina przy pomiarze mocy reaktora. Wymaga to od zespołu prowadzącego pomiary dobrej znajomości tych teorii, by uniknąć

błędów przy interpretacji wyników. Warto podkreślić, że pomiary potwierdzają bezpośrednio wykorzystywanie teorii fizyki atomowej.

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

Literatura:

- [1] J. Kaniewski, W. Kielbasa, Ł. Koszok, A. Kuczynski, M. Raśniński, 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