

BASEN WYPALONEGO PALIWA

Spent fuel pool

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono podstawowe problemy związane z przechowywaniem zestawów wypalonego paliwa w basenie.

Abstract: The paper presents the basic problems associated with the storage of spent fuel clusters in the pool.

Słowa kluczowe: basen wypalonego paliwa, wypalone paliwo, przechowalnik mokry

Key words: spent fuel pond, spent fuel pool, spent fuel, wet storage

Stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną przy jednoczesnym dążeniu do oszczędzania surowców kopalnych i ochrony środowiska wymaga poszukiwania najlepszych rozwiązań.

Jednym z najmniej szkodzących środowisku i najbardziej wydajnych ekonomicznie sposobów wytwarzania energii elektrycznej jest energetyka jądrowa. Jednak rozwój energetyki jądrowej jest obecnie utrudniony z uwagi na negatywne emocje związane z tą technologią. Obawy te wynikają z kojarzenia technologii jądrowej z bronią jądrową i wyolbrzymianymi często skutkami awarii jądrowych.

Powodem lęków jest przede wszystkim kwestia promieniowania związanego z transportem paliwa, składowaniem odpadów, oraz nierzadko, z samą obecnością obiektu jądrowego na danym terenie i ewentualnością zamachów terrorystycznych na te obiekty.

Paliwo wypalone

Energetyka jądrowa opiera się na możliwie jak najwydajniejszym wykorzystaniu uranu jako źródła energii. Charakterystyczną cechą energetyki jądrowej jest cykl paliwowy polegający na obiegu paliwa uranowego, przetwarzanego po jego wykorzystaniu w reaktorze do postaci umożliwiającej powtórne wykorzystanie jego elementów do wytwarzania energii elektrycznej. Pełny cykl paliwowy stanowi ciąg operacji obejmujących wydobywanie uranu, jego wzbogacanie, produkcję paliwa i jego wykorzystanie w elektrowni, następnie przechowywanie wypalonego paliwa, przerób, oraz składowanie odpadów. Cykl ten jest realizowany w niezależnych zakładach, tworzących przemysł jądrowy.

Są dwa rodzaje cyklu paliwowego: cykl zamknięty i otwarty. Różnica między zamkniętym i otwartym cyklem paliwowym polega na sposobie wykorzystania paliwa po jego użyciu w reaktorze. I tak w cyklu

zamkniętym paliwo jest poddawane recyklingowi (ponownemu wykorzystaniu), podczas gdy w cyklu otwartym wypalone paliwo traktuje się jako odpad.

Wypalone w reaktorze paliwo jest wysokoradioaktywne i przed dalszym przetwarzaniem w zakładach przerobu paliwa, w cyklu zamkniętym, musi być ono „schładzane”. Odnosi się to zarówno do bardzo wysokiego poziomu radioaktywności, jak i temperatury. Schładzanie polega na wieloletnim przechowywaniu w tymczasowym składowisku, którym jest początkowo w basenie wypalonego paliwa (tzw. mokry przechowalnik) usytuowany zwykle w pobliżu reaktora.

Czas składowania (schładzania) pozwala na umożliwienie transportu i dalszej obróbki wypalonego paliwa. Odnosnie promieniowania najistotniejszy jest postępujący w sposób naturalny rozpad krótkożytywowych (o krótkim czasie półtrwania) izotopów promieniotwórczych. Odnosnie temperatury, paliwo musi w sensie fizycznym oddać ciepło wytworzone podczas pracy w reaktorze. Paliwo pracujące w reaktorze ulega bowiem 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 mokrym, wypalone paliwo może być następnie przechowywane w przechowalniku suchym skąd jest transportowane do zakładów przerobu paliwa – jest to cykl paliwowy otwarty. W cyklu zamkniętym w procesie przerobu paliwa odzyskiwane są przede wszystkim dwa pierwiastki – uran i pluton – które mogą być następnie użyte do produkcji nowego paliwa.

Należy też wspomnieć, że przed okresem wymiany paliwa w rdzeniu, w basenie przechowywane jest czasowo również świeże paliwo.

Basen wypalonego paliwa

Wypalone w reaktorze paliwo jest źródłem promieniowania, ponieważ zawiera produkty rozszczepienia, które powinny pozostawać w strukturze paliwowej przez cały okres składowania.

Tymczasowe mokre przechowalniki paliwa – baseny, przeznaczone do schładzania wypalonego paliwa, są najczęściej lokalizowane w pobliżu reaktora, lub innych miejscach na terenie elektrowni. W elektrowniach typu BWR (*Boiling Water Reactor*) baseny są umieszczane w budynku reaktora i połączone z reaktorem bezpośrednim kanałem, co bardzo upraszcza wymianę paliwa w reaktorze. W elektrowniach typu PWR (*Pressurised Water Reactor*) najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest umieszczenie basenu w budynku przylegającym do budynku reaktora, co pociąga za sobą konieczność stosowania specjalnych urządzeń umożliwiających wymianę paliwa. Przykładem takiego rozwiązania jest elektrownia TAKAHAMA w Japonii. Czasami jeden basen jest wspólny dla dwóch reaktorów (np. elektrownia OHI w Japonii). Mokre przechowalniki paliwa są dostosowywane do indywidualnych wymagań bloku energetycznego.

Wymiary basenu zależą głównie od:

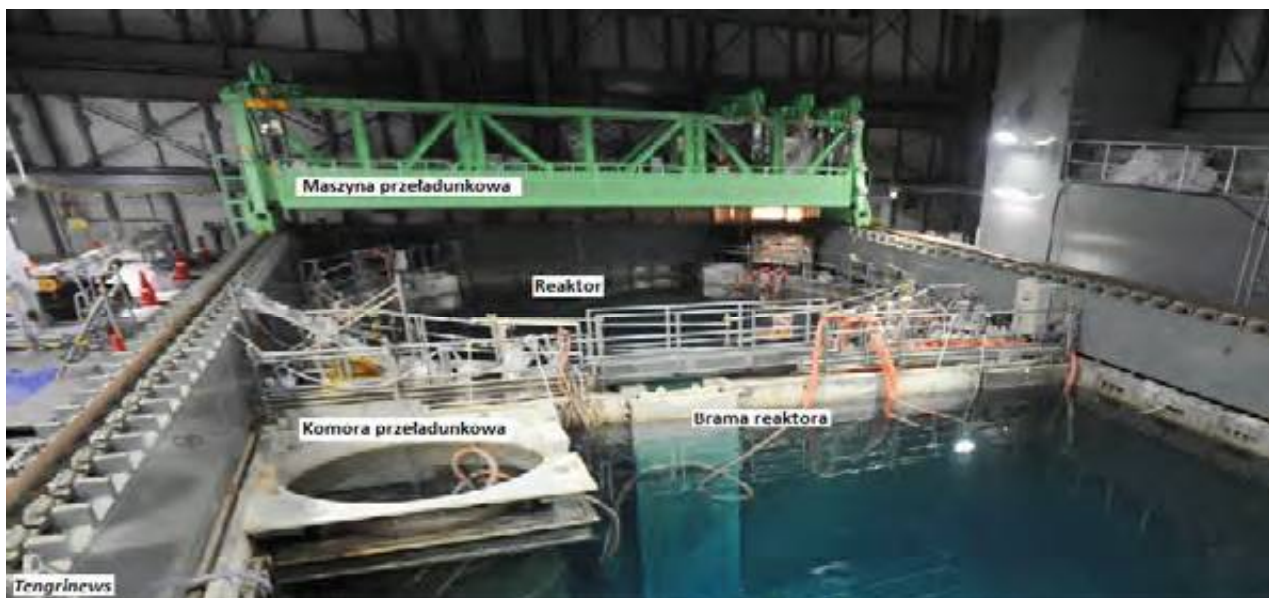
- przewidywanego czasu eksploatacji elektrowni,
- przewidywanej częstotliwości wymiany paliwa (w czasie jednego przeładunku rdzenia wymieniana jest zwykle jedna trzecia paliwa w rdzeniu),
- czasu przechowywania paliwa (czasem nawet 10 lat),

- przewidywanych ilości składowanych zestawów paliwowych,
- specjalnie wydzielonego miejsca (komory przeładunkowej) do załadowywania pojemników transportowych,
- ilości koniecznych stałych urządzeń pomocniczych, pomiarowych itp.

W praktyce zwykle baseny wypalonego paliwa w elektrowniach mają rozmiary zbliżone do rozmiarów basenów olimpijskich. Głębokość basenu wynosi jednak około 12 m, co jest związane z długością zestawu paliwowego (ok. 5 m), koniecznej warstwy wody (ok. 6 m) nad paliwem zapewniającej ochronę przed promieniowaniem oraz przestrzeni (ok. 0,3 m) pod zestawami paliwowymi umożliwiającej swobodny przepływ wody. Waga jednego zestawu paliwowego wynosi średnio około 0,5 t (o jego wadze decyduje ilość uranu, różna dla reaktorów PWR i BWR). Zestawy paliwowe są ustawiane w stojakach w pozycji pionowej. Ich położenie jest precyzyjnie wyznaczone, co umożliwia automatyczne naprowadzanie maszyny przeładunkowej do wybranej pozycji i ułatwia kontrolę przemieszczania materiału jądrowego dla celów ewidencyjnych.

Dno i wewnętrzne ściany basenu i komory przeładunkowej są wykonane ze stali nierdzewnej o grubości od 6 do 13 mm. Ściany zewnętrzne, dno, komora przeładunkowa są wykonane ze zbrojonego betonu o grubości od 1,2 m do 2,4 m.

Na fot. 1 przedstawiono basen wypalonego paliwa w elektrowni typu BWR.



Fot. 1. Basen wypalonego paliwa Fukushima Daichi blok 4 (fot. Tengrinews)

Photo 1. Spent Fuel Pond Fukushima Daichi Unit 4 (fot. Tengrinews)

Według klasyfikacji przyjętej w zaleceniach ochrony fizycznej obiektów jądrowych, wypalone paliwo jest materiałem Kategorii I. W związku z tym zaklasyfikowaniem, obszar (budynek, pomieszczenia związane z obsługą basenu) należą do tzw. obszaru istotnego. Oznacza to przede wszystkim restrykcje w dostępie do tego obszaru. Według przyjętych standardów, do pomieszczeń, w których przechowywane jest wypalone paliwo, jak i do pomieszczeń z aparaturą pomiarową i urządzeniami pomocniczymi np. pompowni, filtrów oraz do aparatury do badania składu chemicznego, właściwości elektrycznych, zawartości związków organicznych, dostęp mają tylko osoby posiadające specjalną autoryzację. Ponadto dostęp musi spełniać restrykcyjne warunki ochrony fizycznej. Obszar istotny jest też objęty stałą obserwacją przez urządzenia obserwacyjno – rejestrujące i pomiarowe, kontrolowanych jednocześnie i w sposób ciągły przez dwie niezależne osoby. Wszelkie wejścia i wyjścia muszą być monitorowane i rejestrowane przez systemy identyfikacji osób (w bardziej zaawansowanych systemach przez komputerową identyfikację odcisków palców czy rysów twarzy), wraz z kontrolą wnoszonych i wynoszonych przedmiotów (np. przy użyciu detektorów metali, detektorów promieniowania) i co niezwykle ważne wyłącznie w odzieży dostarczanej przez operatora systemu, zobowiązanego do zapewnienia ochrony radiologicznej. Nie jest możliwe wyjście nawet na chwilę ze strefy objętej specjalną ochroną w ubiorze innej strefy. Podobnie nie jest możliwe użycie przyrządów pomiarowych bez poprzedniej weryfikacji ich kontaminacji. Za bezpieczną pracę osób znajdujących się na terenie przechowalnika odpowiada operator obiektu.

Ponadto muszą być wprowadzone odpowiednie procedury operacyjne w sytuacjach awaryjnych (pożary, wstrząsy sejsmiczne, huragany) i awarii projektowych, uwzględniające możliwość powstania reakcji łańcuchowej, utraty zdolności odprowadzania ciepła, przeciążenia systemów, oraz utraty zasilania przy zachowaniu wymogów ochrony radiologicznej. Każde wydarzenie powinno uruchamiać odpowiednie systemy alarmowe. Największym zagrożeniem (w tym związanym z terroryzmem) przewidywanym dla basenu wypalonego paliwa byłaby niemożność utrzymania stanu podkrytycznego.

Uważa się, że bezpośredni atak tylko na basen wypalonego paliwa jest, z punktu widzenia działań grup terrorystycznych, mało atrakcyjny. Jednakże w standardach bezpieczeństwa uwzględniane są oczywiście również scenariusze ataków terrorystycznych na przechowalniki wypalonego paliwa. W każdym uwzględnia się zakres potencjalnych skutków np. zamach na basen wypalonego paliwa polegający na wyłączeniu systemu chłodzenia mógłby doprowadzić do skutków podobnych do katastrofy w Czarnobyliu.

Scenariusze ataku terrorystycznego muszą uwzględniać indywidualne cechy przechowalnika. Scenariusze przewidują:

- atak z powietrza przy użyciu samolotu pasażerskiego,
- małego samolotu z ładunkiem wybuchowym,
- bezpośredni atak dobrze uzbrojonej i wyszkolonej grupy,
- połączenie obu ataków,
- kradzież paliwa wymagający współdziałania z osobą lub osobami z załogi elektrowni jądrowej,
- atak hakerski.

Składowanie wypalonego paliwa w basenie

Schładzanie wypalonego paliwa jest złożonym procesem, wymagającym obserwacji i kontroli wielu parametrów związanych bezpośrednio z właściwościami fizycznymi paliwa i warunkami jego długo-okresowego przechowywania.

Ze względów bezpieczeństwa, przy wszelkich działaniach związanych z wypalonym paliwem jądrowym i jego składowaniem muszą być spełnione następujące warunki:

- zestawy paliwowe należy utrzymywać w stanie uniemożliwiającym podtrzymanie reakcji łańcuchowej – tzw. stanie podkrytycznym (zob. niżej),
- należy zastosować zabezpieczenia fizyczne zapobiegające uszkodzeniom zestawów paliwowych i prętów paliwowych,
- należy zapewnić odpowiednie warunki usuwania ciepła,
- należy wprowadzić zabezpieczenia przed przypadkowym uwolnieniem substancji promieniotwórczych,
- należy spełnić wymagania ochrony radiologicznej pracowników.

Wszystkie działania związane z wypalonym paliwem jądrowym muszą być wykonywane przez specjalnie przygotowany personel i zgodnie z opracowanymi procedurami, przy użyciu specjalizowanych i sprawdzonych urządzeń.

Stan podkrytyczny w przechowalniku

Jak wspomniano wyżej, stan podkrytyczny to stan, w którym w paliwie nie dochodzi do reakcji łańcuchowej. Warunkiem utrzymania tego stanu jest wychwytywanie tzw. neutronów termicznych. Użytkuje się to przez wprowadzenie substancji pochłaniającej neutrony termiczne.

W latach 1970-1980 wykorzystywano do tego celu związki boru (B^{10}). Zestawy paliwowe są umieszczane w stojakach ze stali nierdzewnej. Powierzchnię stojaków pokrywano związkami boru. Bor I dodawano również do stali nierdzewnej. Wydajność pochłaniania neu-

tronów przy metodzie wykorzystującej związek boru w postaci stałej zależy od powierzchni pokrytej borem. Najwcześniej zastosowanym materiałem pochłaniającym neutrony w basenie wypalonego paliwa był Boraflex. Jest to mieszanina węgla bora (B_4C – około 50%) i związków polimerowych krzemu. Wydajność pochłaniania neutronów zależy od powierzchni substancji pochłaniającej. Zaobserwowano, że zdolność pochłaniania neutronów z upływem czasu zmalała, a płytki Boraflexu otaczające kanały stojaków z paliwem ulegają degradacji i deformacji. Płytki Boraflexu są narażone również na inne rodzaje promieniowania (α , β , γ) oraz substancje znajdujące się w wodzie.

Uruchomiono rozległe programy badawcze mające na celu ulepszenie materiału pochłaniającego. Nowo powstałe materiały (Carborundum i Tetrabor) pochłaniające neutrony również zawierały węgiel bora, jednakże powiązany ze związkami chemicznymi z grupy żywic fenolowych. Nadało to mieszaninie większą odporność na czynniki niszczące. Od tego czasu zastosowano różne rozwiązania osłon pochłaniających, próbując ograniczyć ich kontakt z wodą, zmieniono grubość pokrywy pochłaniającej stosując system wielowarstwowy, wprowadzono dodatkowe związki chemiczne itp. Wypracowane w czasie programów badawczych normy zalecają stałą kontrolę stanu osłon i składu chemicznego wody, których zmiany wskazywałby stopień degradacji materiału pochłaniającego.

Uzupełniającym sposobem pochłaniania neutronów w basenach wypalonego paliwa reaktorów PWR jest dodawanie kwasu borowego (H_2BO_3) do wody, w której zanurzone jest paliwo. Kwas borowy używany jest również w obiegu pierwotnym tych reaktorów, do regulacji reakcji łańcuchowej. Ważną rolę odgrywa również sposób rozmieszczenia wypalonego paliwa w basenie. Zestawy o dużej aktywności są przechowywane z dala od siebie.

Zabezpieczenia fizyczne wypalonego paliwa

Jak wspomniano wyżej, zestawy wypalonego paliwa zabezpieczane są przed mechanicznymi uszkodzeniami przez przechowywanie w pionowych stojakach, tworzących gęstą sieć składającą się z nawet z kilku tysięcy indywidualnych stanowisk. Ich ilość zależy od przewidywanego czasu składowania paliwa w basenie, zaprojektowanych warunków chłodzenia wymagających niekiedy zwiększenia odległości pomiędzy gorącymi zestawami, przechowywania całego paliwa w rdzeniu w czasie okresowych kontroli stanu rdzenia, jak i prac serwisowych dokonywanych w okresie przeładunku. Pionowe ustawienie zestawów wynika z rozwiązań technicznych i operacyjnych. Składowania poziomego unika się z obawy przed możliwym odkształceniem zestawów przy ich układaniu w pozycji horyzontalnej.

Kanały paliwowe są ściśle dopasowane do wymiarów paliwa i stanowią sztywną konstrukcję kratową,

umożliwiającą swobodny przepływ wody pomiędzy prętami paliwowymi zestawu. Przy dnie basenu pod całą konstrukcją stojaków jest zachowana wolna przestrzeń dla przepływu wody i automatycznego usuwania zanieczyszczeń. Cała konstrukcja musi być odporna na wstrząsy sejsmiczne, podobnie jak pomieszczenie, w którym znajduje się basen. Baseny są otwarte, dlatego nad basenem nie mogą znajdować się elementy wiszące lub niestabilne, których upadek mógłby spowodować uszkodzenie zestawów paliwowych lub konstrukcji stojaków. Do przeładunku paliwa w rdzeniu lub ładowania do kontenerów transportowych używane są specjalne maszyny przeładunkowe. Do przenoszenia kontenerów transportowych używane są suwnice o nośności czasem powyżej 10 t. Urządzenia te są obsługiwane wyłącznie przez wyspecjalizowane zespoły.

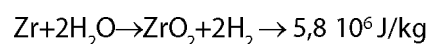
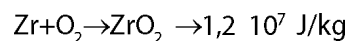
System chłodzenia

Głównym celem tymczasowego składowania paliwa w przechowalniku jest jego stopniowe „schładzanie”. Chłodziwem jest woda. Na rys. 1 przedstawiono schemat rozmieszczenia zestawów paliwowych ułatwiający chłodzenie. Przepływ wody pomiędzy poszczególnymi elementami systemu jest wymuszony. Szybkość przepływu zależy od wydajności urządzeń.

Utrzymywanie ustalonego składu chemicznego wody wypełniającej basen wpływa na spowolnienie reakcji chemicznych powodujących degenerację elementów paliwowych, stojaków, urządzeń pomocniczych i pomiarowych zanurzonych w basenie. Skład chemiczny jest kontrolowany w sposób ciągły.

Drugim elementem wymagającym ciągłej kontroli jest poziom wody w basenie, mający zasadniczy wpływ na proces schładzania i bezpieczeństwo składowania materiałów jądrowych oraz personelu.

Utrata chłodziwa skutkująca obniżeniem poziomu wody może doprowadzić do dużych awarii zagrażających zarówno obiektowi, jak i jego otoczeniu. Pierwszym zauważalnym skutkiem utraty nawet niewielkiej ilości wody jest wzrost poziomu promieniowania wewnątrz budynku. Znaczne obniżenie poziomu wody może spowodować podwyższenie poziomu promieniowania do stanu utrudniającego dostęp do basenu i prowadzenie akcji naprawczej. Sytuacja staje się groźna, gdy poziom wody spada tak, że zostają odsłonięte górne części zestawów paliwowych. Chłodzenie staje się niewydajne, wzrasta temperatura prętów paliwowych w zestawach, których cyrkonowa powłoka może reagować zarówno z tlenem z powietrza, jak i parą wodną wydzielając znaczne ilości ciepła według wzorów przedstawionych poniżej:



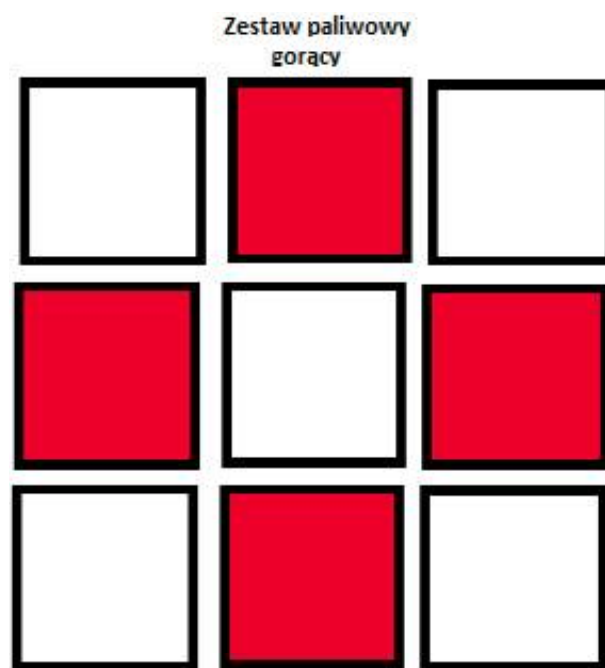
Reakcja może stać się reakcją samopodtrzymującą, doprowadzając do pożaru. Ponadto wysoka temperatura może powodować zwiększenie ciśnienia gazów wewnątrz prętów, doprowadzając w konsekwencji do rozerwania ich obudowy. Przy temperaturach powyżej 1800 °C następuje stopienie obudowy cyrkonowej i tlenku uranu stanowiącego paliwo jądrowe. W wyniku tych zjawisk uwolnione zostają gazy i materiały radioaktywne, przede wszystkim do budynku basenu, ale istnieje wówczas niebezpieczeństwo zagrożenia dla środowiska. Taka właśnie awaria miała miejsce w elektrowni jądrowej Fukushima Daichii w Japonii w wyniku trzęsienia ziemi. Z analizy symulacyjnej różnych ewentualności powstania takiego zagrożenia wynika, że oprócz trzęsienia ziemi w czasie normalnej pracy elektrowni, podobny wypadek mógłby być spowodowany przez błędy ludzkie.

Temperatura wody w basenie powinna być utrzymywana znacznie poniżej temperatury wrzenia i systemy chłodzenia są zaprojektowane tak, by nie przekraczała ona 50 °C (w przypadkach awaryjnych 70 °C). Zakłada się, że we wszystkich przypadkach awaryjnych systemu, w których nie doszło do utraty chłodziwa, bezpieczny czas usunięcia awarii wynosi około 100 godz. Awaria systemu chłodzenia może prowadzić do wrzenia wody, co bez jej uzupełniania prowadziłoby do przyspieszonego parowania i odsłonięcia gorących zestawów. Dostęp do basenu byłby w takiej sytuacji zabroniony ze względu na wysokie poziomy promieniowania. Konieczne jest wówczas uruchomienie awaryjnych systemów uzupełniania wody i użycie bardzo wydajnych systemów zraszających. W skrajnych warunkach powinno być możliwe użycie sprzętu pożarowego.

Parowanie może być przyczyną rozprzestrzenienia się niewielkich ilości substancji radioaktywnych znajdujących się zwykle w basenie. Koncentracja tych substancji przy normalnej pracy elektrowni jądrowej jest jednak niewielka i nie stanowi zagrożenia. Gazy zbierające się nad powierzchnią wody powinny być usuwane przez systemy wentylacyjne.

Chłodzenie paliwa, pod warunkiem utrzymania niskiej równomiernej temperatury w basenie wymaga umiejętnego rozmieszczenia bardzo gorących zestawów. Przede wszystkim unika się ich koncentracji w jednym miejscu. Wokół bardzo gorącego zestawu wyjątego z reaktora umieszczane są zestawy już wychłodzone lub jest on ustawiany w pozycji oddalonej od innych zestawów tak, by otaczające go komory paliwowe były puste (rys. 1). Często gorące zestawy są ustawiane w pozycjach bliskich do ścian basenu. Takie rozmieszczenie paliwa ułatwia również utrzymywanie stanu podkrytycznego. Trudna sytuacja powstaje przy konieczności wyładowania całego rdzenia. Plan rozmieszczenia zestawów jest przygotowywany z wyprzedzeniem tak, by zminimalizować manewrowanie zestawami. Plan przewiduje również

podział na strefy w zależności od stopnia wychłodzenia paliwa, uwzględniające czas składowania.



Rys. 1. Rozmieszczenie zestawów paliwowych w basenie
Fig. 1. Arrangement of fuel assemblies in the pond

Woda

Woda jest substancją pozostającą w stałym kontakcie z elementami paliwowymi przez cały czas wykorzystywania paliwa w elektrowni, a nawet dłużej w czasie jego transportu do zakładów przerobu. Utrzymanie bardzo wysokiej jakości (tzn. czystości chemicznej) wody jest najważniejszym czynnikiem, zapobiegającym degradacji zestawów paliwowych oraz przechowalników.

Rodzaj i zakres oddziaływania różnych substancji na materiały zanurzone w wodzie zależy między innymi od jej składu, temperatury, ciśnienia i czasu. Długotrwałe reakcje mogą prowadzić do degradacji (korozji) oraz utraty integralności strukturalnej zanurzonych elementów. Woda zawiera zwykle szereg rozpuszczonych i nierozpuszczonych substancji w różnych stężeniach: jony metali, koloidy, gazy, pyły, substancje organiczne. W zwykłej wodzie (H₂O) na każde 6500 atomów H znajduje się jeden atom deuteru. Część cząsteczek wody ulega w każdej temperaturze rozpadowi na jony H⁺ i OH⁻ jest to proces odwracalny. Zawiera ona również (ok. 1%) różnych domieszek np. jony K⁺, Ca⁺, Na⁺, Cl⁻, CO₃²⁻ etc. Nadmiar domieszek wytrąca się w postaci osadu. Dodatkowo istnieje ciągle oddziaływanie między wodą a atmosferą. Gazy atmosferyczne, np. O₂ i CO₂ rozpuszczają się w wodzie i mają wpływ na zachodzące reakcje oraz pH. Wzrost temperatury może przyspieszać zachodzące reakcje chemiczne. Zachowanie odpowiedniego składu chemicznego wody w basenie

wypalonego paliwa i w reaktorze wymaga ciągłego sprawdzania podstawowych parametrów wody. Umożliwia to określenie jej właściwości destrukcyjnych. Podstawowe informacje są uzyskiwane przez pomiar pH i przewodności elektrycznej.

pH

Klasyczna definicja pH (kwasowości/zasadowości) roztworów wodnych podana w 1909 r. przez uczonego duńskiego Sørena Sørensen opierała się na wielkości stężenia jonów H^+ w molach/litr. Jednakże, według współczesnych badań ustalono, że wolne jony wodorowe (protony) w wodzie de facto nie występują, ponieważ skutek słabych wiązań elektrostatycznych przyłączają się do cząsteczek wody tworząc jony H_3O^+ .

Dlatego nowa definicja pH to:

$$pH = -\log(H_3O^+ \text{ mol/l}) \text{ dla czystej chemicznie wody } pH = -\log 10^{-7} = 7$$

pH zależy od temperatury i dla temperatury wynoszącej $0^\circ C$ pH czystej chemicznie wody to $\sim 7,47$, dla $25^\circ C$ $pH \sim 7,0$, dla $50^\circ C$ $pH \sim 6,63$, a dla $100^\circ C$ $pH \sim 6,14$. Pomiarów pH można przeprowadzać metodą analityczną, badając próbki wody, jest to jednak czasochłonne. Dlatego pomiary wykonuje się przy pomocy mierników elektronicznych. Metody analityczne stosowane są obecnie sporadycznie.

Rozpuszczenie się cząsteczek CO_2 w wodzie również wpływa na pH wody. Powoduje zwiększenie ilości jonów H^+ obniżając pH, co dodatkowo może przyczynić się do destrukcji zanurzonych w niej elementów. Na rozpuszczalność CO_2 wpływ mają ciśnienie i temperatura panujące w budynku, w którym znajduje otwarty basen.

Na zmiany pH w basenie wypalonego paliwa mają wpływ również inne substancje znajdujące się w wodzie, a pochodzące z systemów pomocniczych pomp, rurociągów. Podobnie wpływ ma zanieczyszczenie powietrza. Przy długoterminowym przechowywaniu wypalonego paliwa w basenie pH powinno się utrzymywać na poziomie $pH = 7,0$ zapewniając obojętność wody. Z tego względu należy utrzymywać stabilne warunki w budynku basenu.

Przewodność – Konduktywność

Ważnym parametrem roztworów wodnych przydatnym w monitorowaniu stanu wody jest jej konduktywność, czyli przewodnictwo elektryczne. Czysta chemicznie woda bardzo słabo przewodzi prąd, ponieważ znajduje się w niej niewiele jonów H^+ i OH^- . Przewodnictwo elektryczne wody wzrasta w efekcie obecności w niej swobodnych zjonizowanych cząstek. Woda w basenie wypalonego paliwa przewodzi prąd znacznie lepiej niż woda destylowana ze względu na obecność jonów różnych pierwiastków.

Korozja metalu zanurzonego w elektrolicie jest wynikiem procesów elektrochemicznych wywołanych różnicą potencjałów występującą między różnymi obszarami na jego powierzchni. Powstałe różnice potencjałów mogą być spowodowane: defektami sieci krystalicznej, domieszkami chemicznymi w metalu, naprężeniami wywołanymi działaniami zewnętrznymi, właściwościami elektrolitu, indukowanym polem elektrycznym, promieniowaniem.

Przewodnictwo elektrolitu określa się przez przewodność właściwą. Przewodność jest odwrotnością oporu $1S = \text{Przewodność właściwa}$ jest odwrotnością oporu właściwego. Opór właściwy elektrolitu jest to opór elektrolitu zawartego między elektrodami o powierzchni 1 m^2 i odległych o 1 m . Jednostką przewodnictwa właściwego w układzie SI jest $1S/m$ (Simens/m). W temperaturze $25^\circ C$ przewodność czystej chemicznie wody wynosi $5,48 \mu S/m$.

Źródłem zanieczyszczeń i korozji elementów paliwowych, stojaków, układu chłodzenia, systemów pomocniczych są zanieczyszczenia pochodzące z rurociągu, kurzu, z powietrza w kontakcie z wodą na powierzchni basenu, aerozoli, detergentów. Zanieczyszczeniami dominującymi są jony K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , NO_2^- , HSO_3^- , NO_3^- , SO_4^{3-} , oraz Cl^- . Każdy jon ma wpływ na całkowitą przewodność roztworu wodnego. W celu określenia całkowitej przewodności roztworu określa się molową przewodność każdego rodzaju jonów zdefiniowanych jako $\Lambda = [(S/m)/(mol/m^3)]$. Znając ilość moli danej substancji i jej przewodność molową można określić, które jony mają decydujący wpływ na całkowitą przewodność. Jedną z metod monitorowania jakości wody jest szczegółowa analiza chemiczna często pobieranych próbek. Szczegółowe informacje dotyczące stężeń wszystkich elementów, jest czasochłonne i nie jest praktycznym rozwiązaniem dla systemu pomiaru on-line. Dlatego najczęściej dokonywany jest pomiar całkowitej uśrednionej przewodności wody.

Ciągłe lub częste pomiary przewodności są dobrą metodą do wykrywania nagłego lub stopniowego wzrostu stężenia jonów. Szczegółowa analiza chemiczna z uwzględnieniem gęstości jonowej pozwala wykryć powód pojawienia się zanieczyszczenia i jego źródło.

Zmniejszenie przewodności (celem przywrócenia warunków wymaganych standardami) uzyskuje się poprzez wprowadzenie do basenu dużej ilości niezanieczyszczonej wody o małej koncentracji jonów, szczególnie tych, których obecność pierwotnie zwiększała przewodność. Wodę zanieczyszczoną przepuszcza się przez system filtrujący tak długo, aż osiągnie ona wymaganą czystość. Unika się dodawania substancji neutralizujących, które mogą powodować inne skutki uboczne.

Z powyższych informacji wynika, że pH i przewodność są uzależnione od koncentracji jonów i można poszukiwać takiej koncentracji aktywnych

jonów, przy której korozja będzie najmniejsza. Z doświadczeń wynika, że np. przy wartości pH pomiędzy 4,5 a 7,0 i przewodności 100 $\mu\text{S}/\text{m}$ dla jonów H^+ i Cl^- ryzyko korozji jest najmniejsze.

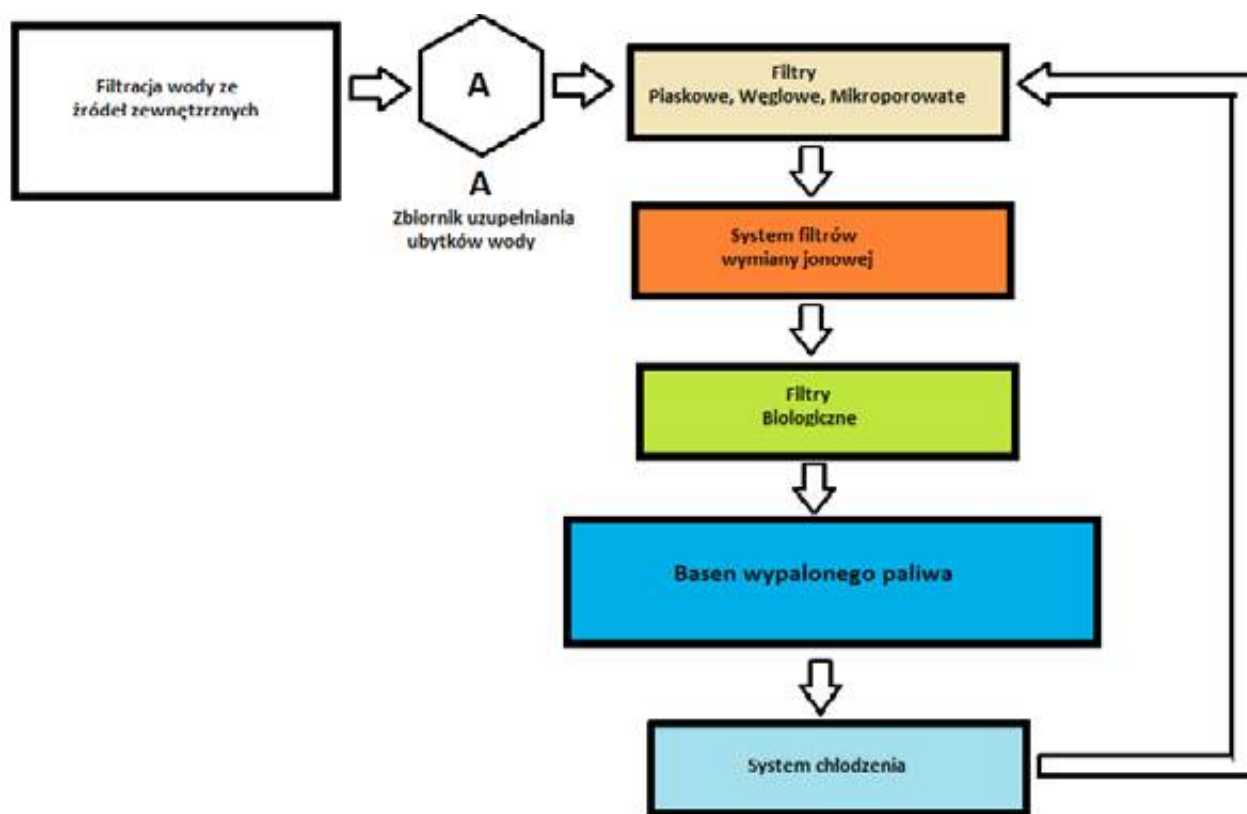
Uzdatnianie i oczyszczanie wody

Źródłem wody używanej w elektrowniach jądrowych może być woda pobierana z sieci wodociągowej, studni zbudowanych dla potrzeb elektrowni jądrowej, rzeki lub jeziora znajdujących się w pobliżu elektrowni i wykorzystywanych również do chłodzenia. Przed jej wprowadzeniem do obiegu systemów chłodzenia reaktora i basenu wypalonego paliwa musi być ona poddana analizie w celu ustalenia jej składu chemicznego i rodzaju zanieczyszczeń. Pozwala to na dobór odpowiednich technik oczyszczania. Procesy wstępnego oczyszczania obejmują:

- usuwanie cząsteczek stałych, np. piasku,
- identyfikacja i usuwanie niepożądanych rozpuszczalnych związków chemicznych,
- usuwanie zanieczyszczeń biologicznych.

Filtracja wody

Do wstępnej filtracji wody wprowadzanej do systemów elektrowni, jak również w wewnętrznych niezależnych systemach filtrujących powiązanych obiegami wodnymi reaktora i basenu wypalonego paliwa, wykorzystywane są różne techniki filtrujące. Ich celem jest usunięcie nierozpuszczalnych zanieczyszczeń przez adsorpcję fizyczną, uwięzienie (filtry osadnikowe), filtrację chemiczną, filtrację wiążącą usuwaną substancję. Do najczęściej stosowanych rodzajów filtrów należą filtry piaskowe, mechaniczne (materiały porowate), węgiel aktywny, filtry wykorzystujące promieniowanie ultrafioletowe, filtry wykorzystujące odwróconą osmozę, oraz żywice jonowymiennne. Niektóre rodzaje filtrów ulegają zużyciu lub tracą swoje właściwości filtrujące wskutek pochłonięcia dużych ilości wychwytywanych substancji, dlatego konieczna jest okresowa kontrola wydajności filtrowania i wymiana elementów filtrujących rys. 2.



Rys. 2. System filtracji wody basenu wypalonego paliwa (opracował: K. Rzymkowski)

Fig. 2. The water filtration system of spent fuel pool (has developed a K. Rzymkowski)

Woda w basenie wypalonego paliwa powinna być tej samej jakości, co woda w obiegu pierwotnym reaktora. Basen wypalonego paliwa posiada własny system filtrujący o konstrukcji identycznej jak system filtracyjny obiegu pierwotnego (reaktora). Ponieważ

paliwo jest przechowywane w basenie przez wiele lat, wymagania dotyczące czystości wody, ze względu na możliwość przyspieszenia destrukcji zestawów paliwowych, są podwyższone. Odnosi się to przede wszystkim do stężenia jonów. W przypadku, gdy

zmiana stężenia jonów jest powolna, kontrola jakości wody i jej filtracja może być wykonywana okresowo. Wówczas system filtracyjny również może być wykorzystywany okresowo. Ze względów ekonomicznych można też używać przenośnego filtra dejonizującego.

Fakt, że baseny wypalonego paliwa są otwarte i mają bezpośredni kontakt z powietrzem, powoduje ich narażenie na wszelkie zanieczyszczenia krążące w budynku oraz ma wpływ na zawartość jonów w wodzie. Na powierzchni basenu osadzają się drobiny kurzu. Dlatego niekiedy pożądanym jest filtrowanie wody z dodatkiem środków pieniących wiążących drobiny. Filtrowanie wody polegające na usuwaniu cząstek stałych jest prowadzone w sposób ciągły w połączeniu z systemem regulacji temperatury. Konieczne jest również zbieranie z dna wszelkich osadów i innych zanieczyszczeń. Pełna operacja czyszczenia basenu jest przeprowadzana co 6 miesięcy lub częściej, gdy zanieczyszczenie jest znaczne. Przykrywanie powierzchni basenu w celu jego zabezpieczenia przed zanieczyszczeniami jest stosowane bardzo rzadko i właściwie jedynie przy prowadzeniu prac związanych z konserwacją budynku.

Najlepszą metodą oceny wpływu wody na korozję zestawów paliwowych jest ich okresowa kontrola. Do tego celu wykorzystuje się podwodne systemy telewizyjne z możliwością rejestracji, umożliwiając w ten sposób obserwację zachodzących zmian. Przy spodziewanym długoterminowym przechowywaniu wypalonego paliwa w basenie zaleca się opracowanie specjalnego programu obserwacji destrukcji elementów paliwowych tzw. *Corosion Surveillance Programme – CSP*, którego celem jest wczesne wykrycie zmian mogących spowodować utratę integralności zestawów paliwowych. Utrata integralności może w krańcowym przypadku uniemożliwić wyjęcie zestawu paliwowego ze stojaka.

Program taki powinien powstawać już na etapie projektowania elektrowni jądrowej. Przewidywany czas pracy elektrowni powinien być obliczony na około 60 lat. Oczywiście podstawą systemu jest zachowanie odpowiedniej jakości wody. W programie obserwacją powinny być ujęte wszystkie elementy metalowe, które będą miały bezpośredni kontakt z wodą, (w obiegu pierwotnym reaktora i w basenie), a przede wszystkim zestawy paliwowe. Musi być znana pełna specyfikacja stosowanych stopów, ich mikrostruktura, przewodnictwo cieplne. Program powinien przewidywać częstotliwość okresowych kontroli wody, zestawów paliwowych, stojaków oraz innych elementów metalowych mogących ulegać korozji. W celu precyzyjnego określenia istotnych parametrów mających wpływ na destrukcję materiałów program powinien zawierać zalecenia dotyczące badań laboratoryjnych próbek wody i osadów.

Prowadzenie dokumentacji wypalonego paliwa

Prawidłowo prowadzona dokumentacja obejmuje:

- indywidualną informację o każdym zestawie paliwowym. Każdy zestaw paliwowy posiada swój unikalny numer identyfikacyjny wytłaczany na jego górnej pokrywie tak, by mógł być łatwo odczytywany przy użyciu urządzeń optycznych. Ze względów bezpieczeństwa odczyt zawsze dokonywany jest ze znacznej odległości, dlatego numer nie może ulegać zatarciu i musi być odpowiednio eksponowany. Numer identyfikacyjny pozwala śledzić historię zestawu. Obejmuje ona jego charakterystykę początkową, pełny skład izotopowy ze szczególnym uwzględnieniem uranu, stopnia wypalenia, maksymalnej mocy cieplnej zestawu paliwowego, ciepła powyłaczeniowego, czasu wykorzystania tj. daty załadunku i wyładunku z rdzenia reaktora, informacji o uszkodzeniach, informacji dotyczących składowania, datę i czas załadunku do kontenera transportowego i jego opuszczenia pomieszczenia składowiska.

- informacje o warunkach składowania:
- ilości i rozmieszczenia paliwa,
- parametrów wody,
- aktywności właściwej,
- temperatury,
- składu chemicznego i przewodności elektrycznej,
- poziomu wody w przechowalniku, szczelności przechowalnika,
- mocy dawki promieniowania jonizującego i skażeń promieniotwórczych w przechowalniku i w jego otoczeniu,
- informacje o przeprowadzonych okresowych kontrolach i działaniach serwisowych.

Kontrola materiałów jądrowych w basenie wypalonego paliwa

Pomieszczenie, w którym znajduje się basen wypalonego paliwa stanowi tzw. rejon bilansu materiałowego. Jest to ten obszar na terenie obiektu (elektrowni jądrowej), w którym można określić i zweryfikować bilans ilości materiału jądrowego. Bilansowanie jest prowadzone przy każdym wprowadzeniu i wyprowadzeniu materiału jądrowego i weryfikowany ze stanem faktycznym, np. podczas inspekcji obiektu. Ilość zgromadzonego materiału jądrowego w basenie zwykle znacznie przekracza 1SQ (znacząca ilość, *Significant Quantity*) tj. przybliżoną ilość materiału rozszczepialnego, dla której nie można wykluczyć prawdopodobieństwa budowy jądrowego urządzenia wybuchowego. Dlatego też ilość składowanego materiału jądrowego w basenie jest dokładnie kontrolowana.

W celu wzmocnienia kontroli ewidencji materiałowej stosowane są środki zamykania/obserwacyjno-rejestrujące, umożliwiające weryfikację informacji o przemieszczaniu materiałów jądrowych i sprawdzaniu integralności zbieranych danych. Basen jest przez cały czas monitorowany przez niezależne urządzenie obserwacyjno-rejestrujące, posiadające własne zasilanie. Bramy, przez które transportowane jest paliwo z i do reaktora po zakończeniu wymiany paliwa są plombowane. Czasem wykorzystywany jest monitor przeładowywania rdzenia. Monitor wyposażony w detektor promieniowania rejestrujący wymianę paliwa w reaktorze (wyładowanie wypalonego paliwa i załadunek świeżego). Ocena wyników stosowania systemu zamykania/obserwacyjno-rejestrującego jest pozytywna, jeżeli system działał poprawnie i nie stwierdzono prób naruszenia plomb, a wyniki obserwacji są zgodne z deklaracjami operatora.

W czasie inspekcji przeprowadzana jest m.in. weryfikacja, czy przechowywane elementy są rzeczywiście elementami paliwowymi, a nie atrapami. Atrapy są wykorzystywane do celów szkoleniowych i treningowych obsługi maszyny przeładunkowej paliwo. Weryfikacji dokonuje się poprzez obserwację promieniowania Czerenkowa przy pomocy specjalizowanego urządzenia. Badane są wszystkie zestawy paliwowe rozmieszczone zgodnie z planem przedstawionym przez operatora. Na planie zaznaczony jest okres przechowywania zestawu, stopień jego wypalenia i numer identyfikacyjny, który w razie wątpliwości można również sprawdzić używając np. lornetki. Zestawy przechowywane dłużej promieniują słabiej i czasem musi być wykorzystywane bardziej złożone urządzenie pozwalające na wykonanie zdjęcia. O jakości zdjęcia decyduje czas naświetlania.

Inną metodą, dokładniejszą, jest pomiar widma promieniowania zestawu paliwowego przy pomocy analizatora. Wybrany zestaw paliwowy jest wówczas przenoszony do stanowiska pomiarowego i zostaje umieszczony między dwoma detektorami tzw. detektor widłowy, a następnie dokonuje się kilku pomiarów w różnych punktach zestawu przesuwając detektor. Można w ten sposób badać kilka wybranych losowo zestawów. Pomiary wykonywane są pod wodą.

W pewnych przypadkach stosuje się specjalne konstrukcje uniemożliwiające przenoszenie paliwa, które musi być przechowywane pod specjalną ochroną. Konstrukcja taka umożliwia plombowanie dostępu do paliwa.

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

Literatura:

- [1] Thomas C. Haley, Boraflex, RACKLIFE and BADGER Description and Uncertainties, April L. Pulvirenti, NRC Project Manager NRC Job Code, V6073, September 2012
- [2] Matthew A. Hiser, USNRC, April L. Pulvirenti, USNRC, Mohamad Al-Sheikhly, University of Maryland College Park, Monitoring Degradation of Phenolic Resin-Based Neutron Absorbers in Spent Nuclear Fuel Pools Technical Letter Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, June 2013
- [3] Northeast Technology Corporation, Guidelines for Boraflex Use in Spent-Fuel Storage Racks, EPRI TR-103300 Project 2813-04 Interim Report, December 1993
- [4] SAFETY STANDARDS SERIES, Core Management and Fuel Handling for Nuclear Power Plants, No. NS-G-2.5, IAEA Vienna
- [5] Technical Reports, Good Practices for Water Management in Spent Fuel Storage Facilities, NP-T-5.2 IAEA Vienna
- [6] IAEA-TECDOC-786, Experience with spent fuel storage at research and test reactors,
- [7] Proceedings of an Advisory Group meeting held in Vienna, 5-8, July 1993, IAEA January 1995
- [8] IAEA-TECDOC-1100, Survey of wet and dry spent fuel storage, XA9952141 IAEA July 1999
- [9] TERRORIST ATTACKS ON SPENT FUEL STORAGE "National Research Council. 2006. Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage: Public Report. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/11263
- [10] John J. Barron Colin Ashton, Leo Geary, The Effects of Temperature on pH Measurement, Diagnostics Ltd, Shannon Free Zone. 57th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Edinburgh, September 2006
- [11] Chemistry Libre Texts, Temperature dependent of the pH in pure water, chemlibretxts.org.
- [12] Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage: Public Report (2006) <https://www.nap.edu/read/11263/chapter/7>