

PROBLEMY OCZYSZCZANIA WODY JAKO ELEMENT USUWANIA SKUTKÓW AWARII W ELEKTROWNI JĄDROWEJ FUKUSHIMA

Water purification as part of Fukushima power plant breakdown associated nuclear waste removal process

Krzysztof Rzymkowski

The article discusses the problems related to nuclear pollution purification with respect to liquid waste and water, especially water used for cooling damaged reactors and natural watercourses in the area.

W opracowaniu przedstawiono problemy związane z usuwaniem skażeń radioaktywnych z wody używanej do chłodzenia uszkodzonych reaktorów spotęgowane wpływem naturalnych cieków wodnych na terenie elektrowni.

Zanieczyszczenia

Zanieczyszczenia wody powstające w wyniku działalności człowieka są problemem ogólnoświatowym dotyczącym wszystkich zbiorników wodnych – zarówno mórz, jak i wód śródlądowych. Źródłem zanieczyszczeń są systemy komunalne, rolnicze i przemysłowe.

Zanieczyszczenia mają różną postać fizyczną i chemiczną. Niektóre z nich np. komunalne lub niektóre rolnicze, związane są przede wszystkim z zagrożeniem bakteriologicznym. Ulegają one naturalnej filtracji i rozkładowi przez środowisko naturalne i nie wpływają znacząco na jego stan. Najgroźniejsze dla środowiska oraz zdrowia człowieka są zanieczyszczenia przemysłowe zawierające między innymi metale ciężkie oraz szkodliwe, trudno rozkładające się substancje organiczne i mineralne, w tym związki nierozpuszczalne. Niestety pomimo zabezpieczeń mogą one przedostać się do wód powierzchniowych.

Choć kwestia zanieczyszczeń radioaktywnych budzi być może najwięcej emocji, należy uzmysłowić sobie, że przy normalnej pracy prawidłowo zaprojektowanych, wykonanych, oraz prowadzonych obiektów jądrowych kwestia tych zanieczyszczeń jest praktycznie pomijalna. Z reguły występują w niewielkich ilościach i małej koncentracji /aktywności, choć istotnie mogą być przenoszone przez

cieki wodne. Zwykle jednak duże obiekty jądrowe (zakłady wzbogacania lub przerobu paliwa, elektrownie jądrowe) pracują w szczelnym wodnym obiegu zamkniętym. Założenie takiego obiegu polega na tym, że woda używana do celów technologicznych nie jest odprowadzana do środowiska, lecz powtórnie wykorzystywana w procesie technologicznym.

Elektrownia Jądrowa Fukushima podobnie, jak wszystkie pracujące i projektowane japońskie elektrownie jądrowe jest wybudowana bezpośrednio nad brzegiem Oceanu Spokojnego. Taka lokalizacja posiada szereg zalet, przede wszystkim umożliwia wykorzystanie wody morskiej jako wody chłodzącej, co przy ograniczonej ilości słodkowodnych zbiorników wodnych w głębi lądu jest najlepszym i ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem. Wszystkie japońskie elektrownie jądrowe posiadają własne porty, ułatwiające transport świeżego, jak i wypalnego paliwa bezpośrednio z/do elektrowni lub z innych zakładów przemysłowych (zakładów produkcji paliwa, zakładów przerobu) odciążając lądowe drogi komunikacyjne. Istotną wadą takiego usytuowania elektrowni jądrowej jest trudna do przewidzenia (jak to było podczas ostatniego trzęsienia ziemi, które nawiedziło Japonię) wysokość ewentualnej fali tsunami. Elektrownia jądrowa Fukushima

Daiichi jest położona na wysokości ok. 5 m nad lustrem wody w fazie przyływu i miała opierać się fali tsunami o wysokości do 5 m. Elektrownia Fukushima Daiichi położona w odległości ok. 12 km na południe od Fukushimy Daiichi przy podobnej zabudowie i usytuowaniu nie uległa tak silnym zniszczeniom wywołanym falą tsunami ze względu na bardziej nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne.

W trakcie ostatniej awarii właśnie wdzierająca się woda była przyczyną unieruchomienia systemów chłodzenia reaktorów, w tym awaryjnego systemu chłodzenia, co pociągnęło za sobą dalsze skutki. Do tych należało przede wszystkim przegrzanie i jak się później okazało nadtopienie rdzeni reaktorów. Dodatkowe zniszczenia powstały w wyniku eksplozji H_2 wytworzonego w wyniku reakcji z wodą koszulek cyrkonowych w wysokiej temperaturze.

Podstawowym problemem było więc odtworzenie, choćby prowizorycznie, warunków chłodzenia we wszystkich zbiornikach, w których zmagazynowane było paliwo jądrowe. Konieczne było przede wszystkim zapewnienie chłodzenia reaktorów i basenów, w których przechowywane było wypalone paliwo. Świeże (nieużywane) paliwo nie wymaga specjalnego chłodzenia i jest zwykle przechowywane w suchych magazynach, jego zabezpieczenie stanowiło więc odrębny i znacznie mniejszy problem.

W elektrowni jądrowej Fukushima stosowany był system chłodzenia w obiegu otwartym. **Chłodzenie w obiegu otwartym** polega na jednokrotnym przepływie wody (pobieranej z rzeki, jeziora, sztucznego zbiornika wodnego, lub morza) chłodzącej przez chłodnice. W celu uzyskania dobrej wydajności chłodzenia w tym systemie konieczne jest przepompowywanie przez układ wymienników ciepła ogromnych ilości wody. W tym miejscu należy podkreślić, że woda ta nie ulega skażeniu substancjami promieniotwórczymi, gdyż nie miała kontaktu z elementami radioaktywnymi. Do chłodzenia, w elektrowni Fukushima, w tym systemie w obiegu wtórnym wykorzystywano wodę morską. Analogiczne systemy są stosowane we wszystkich elektrowniach jądrowych w Japonii.

Usuwanie skutków awarii

Zasadniczym celem usuwania skutków awarii było osiągnięcie tzw. stanu zimnego wyłączenia reaktora, tzn. stanu, w którym temperatura rdzenia spadnie poniżej 100 °C. Stan taki osiągnięto we wrześniu 2011 r. Pełna stabilizacja temperatury reaktorów i basenów wypalonego paliwa została osiągnięta w styczniu 2012 r. Kluczowym elementem systemów chłodzenia pozostaje oczywiście woda słodka.

W najtrudniejszym, początkowym okresie, uszkodzenie systemu awaryjnego chłodzenia oraz możliwość wystąpienia stanu krytycznego wymusiły konieczność użycia do bezpośredniego chłodzenia reaktorów wody morskiej z dodatkiem kwasu borowego umożliwiającego absorpcję neutronów. Jednocześnie obudowy reaktorów były schładzane przy użyciu sprzętu straży pożarnej. W tej fazie konieczne było również uzupełnienie wody w basenach wypalonego paliwa, ponieważ jej poziom uległ znacznemu obniżeniu wskutek przecieków i parowania. Ponieważ dostęp do budynków reaktorów 3 i 4 był utrudniony i spodziewano się kolejnych eksplozji lub pożarów, wodę dostarczano za pomocą helikopterów i armatek wodnych straży pożarnej, co mieliśmy okazję śledzić na ekranach telewizorów.

Użycie do chłodzenia wody morskiej było w początkowej fazie konieczne, jednakże jej użycie spowodowało np. w reaktorze Nr 1 osadzenie się 26 ton soli. Sól osadzając się na ściankach rur systemu chłodzenia zmniejszała wydajność przepływu, a tym samym chłodzenia, oraz była przyczyną przyspieszonej korozji koszulek cyrkonowych prętów paliwowych w reaktorze. Dlatego też konieczne było jak najszybsze wprowadzenie do obiegu wody słodkiej, której zapasy w elektrowni były ograniczone. Po ok. 12 dniach od początku awarii zaczęto chłodzić reaktory wodą słodką, dostarczaną początkowo barkami marynarki wojennej Stanów Zjednoczonych.

Proces chłodzenia wymagał i nadal wymaga ciągłej dostawy słodkiej wody, która w tej okolicy jest trudno dostępna. Właśnie z uwagi na tę ograniczoną dostępność podlega ona procesowi uzdatniania i ponownego wykorzystywania.

Skażenie cieków wodnych i obecne zabezpieczenia

Początkowo woda obmywająca elementy skażone nie była oczyszczana i zbierała się w dolnych częściach budynków, przesączając się do morza. Od początku prowadzenia akcji usuwania skutków awarii przewidywano też konieczność usunięcia skażonej wysokoaktywnymi zanieczyszczeniami wody (ok. 110 ton) zalegającej w budynkach reaktorów, turbinach, oraz tunelach, pochodzącej z przecieków systemów chłodzenia, a następnie zmagazynowaniem jej w zbiornikach, by nie przedostała się do środowiska. Skonstruowano specjalne systemy oczyszczania tych zasobów. Wydajność ich była jednak zbyt niska, by można było uniknąć tymczasowego magazynowania.

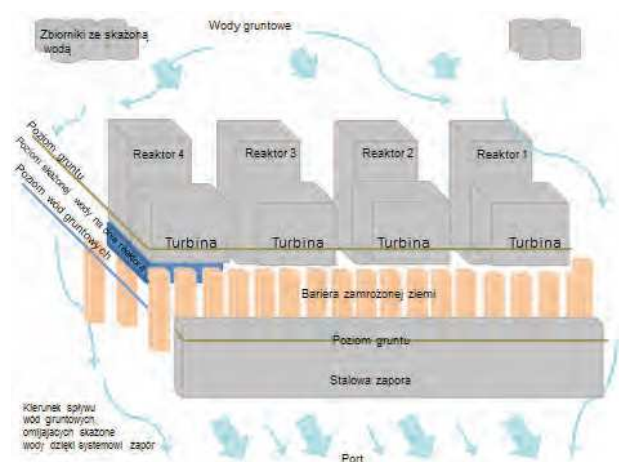
Dodatkowym problemem, który szczególnie wyraźnie wystąpił w okresie pory deszczowej, było podniesie-

nie poziomu wód gruntowych. Problem wynikał z niedostosowania wydajności systemów melioracyjnych (rowy i podziemne kanały) na terenie elektrowni jądrowej do objętości zużywanej wody. W efekcie woda przenikała do podziemnych części budynków reaktorów i turbin, wpływając do portu. Dziennie przez obszar elektrowni przepływa pod ziemią ok. 400 m³ wody, która ulega zmieszaniu z wodą skażoną zalegającą w instalacjach elektrowni. Z tego wynika konieczność oczyszczania również tej dodatkowej objętości. Tymczasem dziennie oczyszczano zaledwie ok. 100 m³.

Zasadniczym celem opracowanego planu postępowania awaryjnego było możliwie szybkie usunięcie źródeł skażeń i odizolowanie ich od kontaktu z wodami gruntowymi, jak również zabezpieczenie przechowywanych ciekłych odpadów radioaktywnych przed przeciekami. W pierwszym etapie realizacji planu postanowiono:

- usunąć silnie skażoną wodę z systemu melioracyjnego elektrowni jądrowej,
- likwidować powstające przecieki, oraz usprawnić metody ich wykrywania, oraz
- zbudować system kanalizacyjny umożliwiający omijanie przez wody gruntowe terenu skażeń.

W drugim etapie przewidziano budowę szczelnych barier ochronnych otaczających skażony teren oraz stopniowe przepompowywanie i uzdatnianie wody na tym, szczelnie odgradzonym, obszarze. Termin realizacji drugiego etapu zaplanowano na dwa lata.



Rys. 1. Wody gruntowe oraz projektowane bariery zaporowe (opracowanie własne K. Rzymkowski i J. Rzymkowska)
Fig. 1. Ground water and designed prohibitive barriers

Uznano, iż system melioracyjny elektrowni jądrowej Fukushima został *de facto* zniszczony w czasie trzęsienia ziemi oraz przez falę tsunami. Plany jego odbudowy w zmodernizo-

wanej wersji powstały w październiku 2011 r. Odbudowa ruszyła w kwietniu 2012 r., a zakończono ją w roku 2014. Podstawą nowego systemu jest nowe nadbrzeże o długości ok. 8 km zbudowane ze stalowo – betonowej, nieprzepuszczalnej ściany, sięgającej 30m poniżej lustra wody. Ma to na celu przede wszystkim zatrzymanie wód gruntowych przepływających przez wysoko skażone budynki reaktorów i turbin oraz najbliższe otoczenie (mających styczność z wodami skażonymi). Ściana może zatrzymać ok. 500 – 700 m³ wody/dobę o małym stężeniu zanieczyszczeń radioaktywnych. Po oczyszczeniu woda będzie odprowadzana do morza. Nowy system melioracyjny ma obniżyć poziom wód gruntowych na terenie elektrowni, w szczególności w pobliżu reaktorów, gdzie jak do tej pory poziom ten przewyższał poziom wysoko skażonej wody w budynkach reaktorów i turbin aż o 4m.

Dodatkowo zaplanowano odseparowanie skażonego obszaru od wód gruntowych. Początkowe plany obejmowały budowę tzw. „ściany lodowej” wokół budynków reaktorów, czyli zamrożeniu gruntu wokół reaktorów do poziomu 30 m w głąb. Metoda zamrażania gleby w celu odseparowania się od wód gruntowych jest już znana i aktualnie wykorzystywana w górnictwie. Łączna długość ściany miałyby wynosić 1500 m. Założenie przewidywało powstanie 1550 „studzien”, w których miały być zamontowane systemy mrozzące glebę do -30C⁰. Roczne zapotrzebowanie energii konieczne do utrzymania ściany odpowiadałoby zapotrzebowaniu 13 000 gospodarstw domowych. Budowę miano ukończyć w kwietniu 2015 r., jednakże po przeprowadzeniu testów na skonstruowanym do kwietnia 2014 r. 100 metrowym odcinku ostatecznie odstąpiono od tego projektu i postanowiono zbudować ścianę betonową. Ściana ma być wykorzystywana do 2020 r.

Jak wspomniano wyżej, systemy oczyszczania wymagają czasowego magazynowania skażonej wody przed jej oczyszczeniem i zwróceniem do systemów chłodzenia. Wymaga to użycia ogromnej ilości zbiorników o wysokiej pojemności. Obecnie w elektrowni jądrowej używane są trzy generacje zbiorników, przy czym dokonuje się stopniowej wymiany zbiorników tymczasowych na docelowe. Niestety często zdarzają się przecieki skażonej wody do wód gruntowych, co wymaga stałego monitorowania szczelności zbiorników. W celu uniknięcia przecieku skażonej wody do morza, zbiorniki usytuowane są powyżej elektrowni.



Fot. 1 Rozmieszczenie zbiorników ze skażoną wodą (TEPCO, Reuters)
Photo. 1. Arrangement of the tanks with contaminated water

Oczyszczanie wody

Obecnie nowoczesne metody oczyszczania odpadów ciekłych, są oparte o wyrafinowane procesy chemiczne, z wykorzystaniem wielu związków i procesów chemicznych, połączonych w systemach katalizatorów. Są to złożone i wielostopniowe systemy, o wysokiej wydajności stosowanych procesów. Do najczęściej stosowanych metod oczyszczania (separacji i zagęszczania substancji toksycznych i radioaktywnych) odpadów ciekłych w obiektach przemysłu jądrowego należą między innymi:

- **ekstrakcja**, polegająca na wyodrębnieniu poszczególnych pierwiastków (składników) z ich mieszanin, najczęściej drogą dyfuzji do cieczy lepiej rozpuszczających te związki chemiczne.

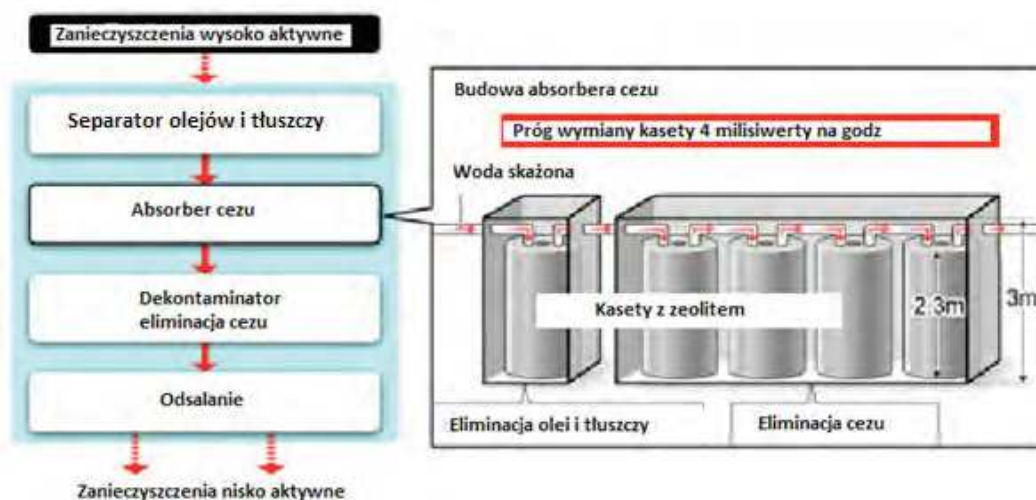
- **wytrącanie**, polegające na wytworzeniu nierozpuszczalnych osadów w procesie reakcji chemicznych. Proces wytrącania jest zazwyczaj wielostopniowy i dopasowywany do rodzaju zanieczyszczeń.

- **wymiana jonowa** polega na wymianie ruchliwych jonów jednej substancji na inne jony tego samego znaku, pochodzących z substancji filtrowanej. Proces zachodzi w wymienniczu jonowym (jonicie) na powierzchni porowatej substancji lub żelu, których cząsteczki chemiczne ulegają dysocjacji elektrolitycznej pod wpływem rozpuszczalnika, którym może być,

np. woda. Jonitami mogą być substancje organiczne i nieorganiczne. Wymiana jonowa jest stosowana bardzo szeroko ze względu na jej możliwości selektywnej separacji pierwiastków i względnie niskie koszty. Systemy wymiany jonowej są często wspomagane przez systemy filtrów membranowych, tworząc bardziej rozbudowane instalacje oczyszczające wykorzystujące zjawisko tzw. **odwróconej osmozy**. Jest to proces polegający na oddzieleniu, cząsteczek wody od rozpuszczonych w niej substancji. Membrana przepuszczająca cząsteczki wody może być jednocześnie jonitem. Niezwykle mała porowatość membran pozwala na bardzo skuteczne oczyszczanie.



Rys. 2. Zbiorniki ścieków radioaktywnych (Fot. Ho/Reuters oraz referat A.Toby Seminarium Tepco Warszawa 19 Marzec 2014)
Photo. 2. Radioactive waste tanks



Rys. 2. System oczyszczania wody zastosowany w elektrowni jądrowej Fukushima (Toshiba, AREVA, KURION)

Fig. 2. Water purification system used in the Fukushima power plant

Zbiorniki pośrednie zastępujące tymczasowe. Do końca 2015 r. zostaną wymienione wszystkie zbiorniki. Prace są prowadzone równoległe przez szereg firm w kilku lokalizacjach na terenie elektrowni jądrowej.

19 kwietnia 2011 r. podjęto decyzję o budowie systemu oczyszczania i magazynowania skażonej wody. Budowy takiego systemu o wielkiej wydajności, wykorzystującego najczęściej stosowane metody oczyszczania, podjęło się kilka firm:

- Toshiba - oferująca filtry do usuwania olejów i tłuszczów,
- AREVA, której system filtracyjny zawierający związki chemiczne usuwające cez, oferowany przez AREVA -Veolia Water, posiada wydajność 50 000 litrów/h
- KURION, firma specjalizująca się od awarii w Three Miles Island w oczyszczaniu ścieków zawierających cez, stront, technet, a nawet pluton i ameryk, oferująca aparaturę do filtracji jonowej jonitów nieorganicznych (jonity organiczne są wrażliwe na sól i nie przewiduje się ich wykorzystania w elektrowni jądrowej Fukushima). System filtracyjny KURION zastosowany w elektrowni jądrowej Fukushima składa się z czterech niezależnych linii, z których każda zawiera 6 wymiennych modułów (wymennych kaset) do usuwania zanieczyszczeń olejowych, usuwania technetu i czterech do usuwania cezu i jodu. Zaletą konstrukcji kasetowej jest możliwość wymiany całej kasety w chwili, gdy poziom promieniowania odfiltrowanych odpadów przekroczy określony próg.

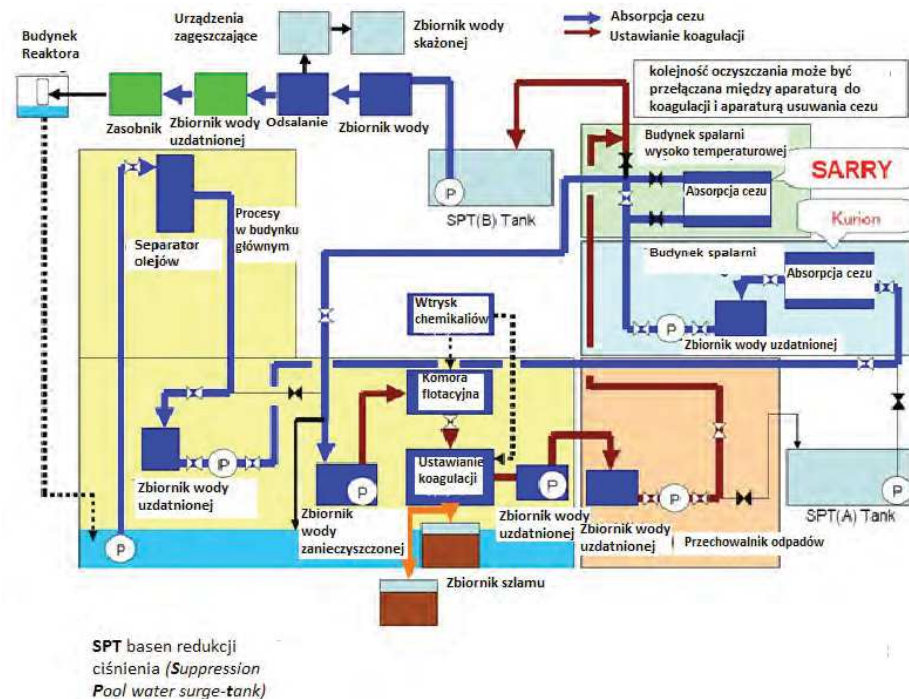


Fot. 1. Zbiornik dekontaminacyjny. Kanał wlotowy (Nuclear Engineering International www.neimagazine.com)

Photo 1. Decontamination tank. Inlet channel

Uruchomienie całości systemu sterowanego komputerowo napotykało na wiele trudności związanych przede wszystkim ze szczelnością połączeń. Początkowo system pracował nieregularnie i z długimi przerwami. Ostatecznie uzyskana wydajność oczyszczania wody wynosiła średnio 800 ton dziennie przy stopniu redukcji zawartości cezu $DF=70\ 000$.

W lipcu 2011 r. firma Toshiba zaoferowała nowy system oczyszczania pod nazwą SARRY (*Simplified Active Water Retrieve and Recovery System*), proponując jego uruchomienie równoległe do już zainstalowanego systemu. Propozycja została zaakceptowana i pierwszy system został zainstalowany we wrześniu 2012 r. Osiągnięty obecnie współczynnik dekontaminacji dla cezu wynosi $DF=50\ 000$. Planowane jest uruchomienie jeszcze dwóch takich urządzeń.



Rys. 3. System oczyszczania skażonej radioaktywnie wody opracowany przez Toshiba (Ex-skfblogspot.com)
Figure 3. Contaminated water purification system developed by Toshiba

Prace nad usuwaniem skutków awarii trwają nieprzerwanie, mimo trudności wynikających z konieczności ochrony pracowników przed promieniowaniem. Stale monitorowany jest poziom promieniowania i w przypadku jego wzrostu prace są przerywane z uwagi na bezpieczeństwo załogi.

Jednocześnie prowadzone są prace przygotowawcze do demontażu uszkodzonych reaktorów (głównym problemem jest usunięcie rdzeni). Stopniowo usuwane jest paliwo z basenów wypalonego paliwa, znajdujących się przy każdym reaktorze. Wypalone paliwo z basenu bloku nr 4 zostało w całości usunięte w 2014 r. Całkowita likwidacja konstrukcji reaktorów przewidywana jest za 30 – 40 lat.

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

Literatura:

- [1] B. Dobrzańska, G. Dobrzański, D. Kielczewski, Ochrona środowiska przyrodniczego PWN Warszawa, 2009
- [2] David Lochbaum, Got Water Union Concerned Scientists, Citizens and Scientists for Environmental Solutions, Washington Oct 2007
- [3] Ex-skf.blogspot.com
- [4] Grażyna Zakrzewska-Trznadel, Procesy membranowe w technologiach jądrowych Raporty IChTJ Seria A nr. 1/2006
- [5] Grzegorz Jezierski, Energetyka Jądrowa wczoraj i dziś WNT 2005
- [6] IAEA Safety Guides Classification of radioactive Waste RADWASS Programme 1994
- [7] IAEA –TECDOC- 1336, Combined methods for radioactive waste treatment, 2003
- [8] K. Rzymkowski, Fukushima Jeden Ekoatom Kwiecień –Maj Warszawa 2011 1/1
- [9] K. Rzymkowski, Postępowanie z odpadami ciekłymi w elektrowniach jądrowych PTJ 3/2011 Warszawa
- [10] K. Rzymkowski, Refleksje po Tsunami Ekoatom Lipiec –Sierpień Warszawa 2011 2/1
- [11] K. Rzymkowski, Usuwanie skutków katastrofy ekologicznej wywołanej falą tsunami Ekoatom Luty-Marzec Warszawa 2012 4/1
- [12] K. Rzymkowski, Energetyka Jądrowa Japonii PTJ 4/2008 Romuald Szymkiewicz, Dariusz Gąsiorowski, Podstawy hydrologii dynamicznej WNT Warszawa, 2010
- [13] R.O. Abgel Rachman, H.A. Ibrahim, Yung-Tse Hung, Liquid radioactive Wastes Treatments: A Review, Water 2011 www.mdpi.com/journal/water
- [14] V. M. Efremenkov, Radioactive Waste Management at Nuclear Power Plants, IAEA Bulletin 4/1989
- [15] World Nuclear Association 2007 Nuclear Power In Japan
- [16] www.Ex-skfblogspot.com
- [17] www.guardian.co.uk
- [18] www.IAEA.org 2011.03.29
- [19] www.neimagazine.com
- [20] www.tepco.co.jp 2011.03.26
- [21] Biuletyn Kansei Nuclear Power, p. 989
- [22] Biuletyn Kansei Nuclear Power, p. 990
- [23] Biuletyn Ohi Power Station 2003
- [24] Biuletyn Kashiwazaki Kariwa 2003
- [25] Foldery: Tokyo Electric Power Company, Tokyo 1-3 Uchisawaicho 1-Chome Chyoda-ku Fukushima Daichi Power Station, 22 Kitarhara Ottozawa Ohkuma-machi Futaba-gun Fukushima-ken
- [26] Raport IAEA 2008
- [27] Materiały Seminarium TEPCO 19 Marzec 2014, Warszawa