



Dr inż. Krzysztof Rzymkowski

16-02-2021

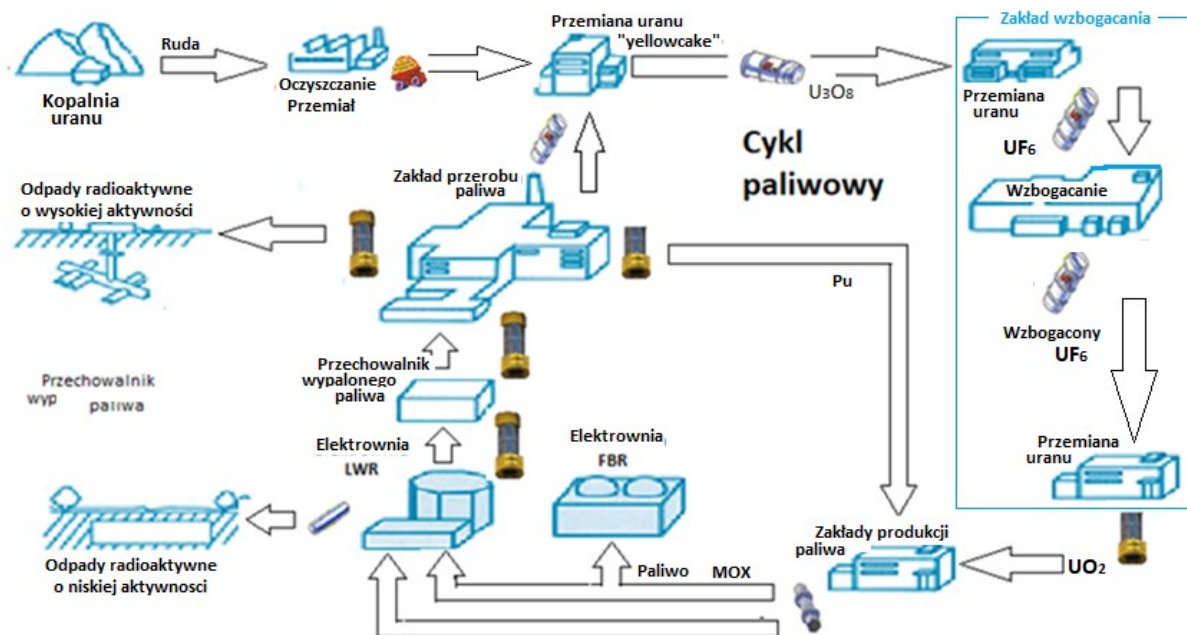
## Przerób wypalonego paliwa

Konieczność oszczędzania naturalnych zasobów materiałów używanych w energetyce – głównie węgla, gazu, ropy – zainicjowała próby wykorzystania do wytwarzania energii elektrycznej energii słonecznej, wiatru, a nawet pływów morskich. Nie wszystkie rozwiązania okazały się uzasadnione ekonomicznie i nie mogą, za wyjątkiem hydroelektrowni, dostarczać energii elektrycznej w sposób ciągły. Dodatkowym powodem szukania nowych rozwiązań jest również chęć uniezależnienia się od kopalnych nośników energii.

Jednym z najmniej szkodzących środowisku i najekonomiczniejszych sposobów wytwarzania energii elektrycznej jest energetyka jądrowa. Rozwój energetyki jądrowej jest utrudniony, ponieważ działalność dotycząca techniki jądrowej jest kojarzona ze skutkami użycia broni jądrowej i wyolbrzymianymi skutkami awarii jądrowych. Dodatkowym powodem lęków jest również promieniowanie – dominują tu obawy związane z transportem paliwa, składowaniem odpadów, oraz, nierzadko, z samą obecnością obiektu jądrowego na danym terenie. Należy podkreślić, że wpływ zjawiska promieniowania, w czasie normalnej pracy zakładów związanych z energetyką jądrową jest pomijalny – pomiary tego promieniowania w ich pobliżu nie wykazują istotnej zmiany w stosunku do naturalnego promieniowania tła. Większy wpływ na środowisko mają natomiast inne czynniki, wspólne dla wszystkich gałęzi związanych z energetyką np. budowa nowego obiektu wymaga przygotowania obszaru o powierzchni około 2 km<sup>2</sup> włączając w to powstanie nowych dróg, budynków, przystosowanie zbiorników wodnych, tam, ujęć wodnych. Powoduje to zwiększenie natężenia ruchu na istniejących już drogach, hałasu, wycinkę drzew, migracji zwierząt itp. Dodatkowym utrudnieniem może być konieczność prowadzenia archeologicznych i innych prac pomocniczych.

Energetyka jądrowa opiera się na możliwie jak najwydajniejszym wykorzystaniu uranu, jako źródła energii. Uran jest pierwiastkiem powszechnie występującym w skorupie ziemskiej. Charakterystyczną cechą energetyki jądrowej jest cykl paliwowy polegający na zamkniętym 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, przechowywanie wypalonego paliwa, przerób, 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.



Rys. 1 Zakłady cyklu paliwowego (K. Rzymkowski)

W **cyklu zamkniętym** paliwo jest poddawane przerobowi (recyklingowi).

W **cyklu otwartym** wypalone paliwo traktuje się jako odpad.

Wypalone w reaktorze paliwo jest wysoko radioaktywne i przed dalszym przetwarzaniem w zakładach przerobu paliwa (tzw. cykl zamknięty) musi być „schładzane”, (czego nie należy mylić z chłodzeniem reaktora lub paliwa). Schładzanie polega na wieloletnim przechowywaniu wypalonego paliwa w basenie. W tym czasie krótko żyjące promieniotwórcze izotopy ulegają znacznej redukcji, co ułatwia transport i dalszą obróbkę wypalonego paliwa.

Ponadto paliwo pracujące w reaktorze ulega również bardzo znacznemu rozgrzaniu. Wysoką temperaturę może ono utrzymywać przez długi okres czasu – określa się, że nawet po upływie 10 lat 1 tona wypalonego paliwa nadal wydziela około 1 kW ciepła. Przed poddaniem go dalszym procesom musi ono zostać wychłodzone w sensie cieplnym (wystudzone) i również dlatego konieczne jest jego długoterminowe przechowywanie w mokrym przechowalniku usytuowanym najczęściej w pobliżu reaktora.

**Składowiska tymczasowe** przeznaczone do schładzania wypalonego paliwa są najczęściej lokalizowane w pobliżu reaktora lub innych miejscach na terenie elektrowni. Alternatywą jest przechowywanie całych zestawów paliwowych w magazynach wypalonego paliwa (tzw. cykl otwarty) – tak składowane paliwo (**składowiska ostateczne**, np. wyrobiska kopalniane) nie jest już wykorzystywane.

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. W takim wypadku około 97% wypalonego paliwa wraca do elektrowni, a tylko 3% stanowi odpady wysokoaktywne. Proces przerobu umożliwia również wyodrębnić inne użyteczne pierwiastki np. metale ziem rzadkich,  $Cs^{137}$ ,  $Te^{99}$  (otrzymywany praktycznie tylko tą drogą),  $Sr^{147}$ . Są one zagęszczane i magazynowane. Odpady wysokoaktywne są składowane w specjalnie wyznaczonych i przystosowanych do tego centralnych magazynach kraju.

## Odzyskiwanie niewykorzystanych pierwiastków w procesie przerobu

Pierwsze prace związane z przerobem paliwa są ściśle związane z opracowywaniem technologii pozyskiwania plutonu potrzebnego do budowy broni jądrowej. Pluton został wykryty w czasie eksperymentów przeprowadzanych na uniwersytecie kalifornijskim Berkeley w latach 1940 -1941 w wyniku bombardowania tarczy uranowej deuterem. Badając właściwości chemiczne i fizyczne nowo odkrytego pierwiastka zwrócono uwagę na możliwość uwalniania ogromnej energii jądrowej. Zapotrzebowanie na materiał jądrowy, który mógłby być wykorzystany do budowy broni jądrowej spowodowało uruchomienie prac pozwalających wyodrębnić użyteczny do tego celu pluton. Początkowo niewielkie jego ilości uzyskiwano przy użyciu cyklotronu. W 1943 zaproponowano różne metody wydzielenia Pu<sup>239</sup> z wypalonego paliwa uranowego. Do produkcji paliwa wykorzystywano uran naturalny i aby osiągnąć możliwie dużą ilość plutonu proces wypalania paliwa był skrócony. Mimo to jego ilość była niewielka. W Narodowym Laboratorium w Oak Ridge (*Oak Ridge National Laboratory – ORNL*) w Stanach Zjednoczonych opracowano i przetestowano metodę przemysłowej ekstrakcji plutonu w tzw. procesie fosforano-bizmutowym polegającym na wielokrotnym wytrącaniu, oczyszczaniu i destylacji. Wypalone paliwo uranowe było rozpuszczane w kwasie azotowym. Następnie dodawano kwas siarkowy powstrzymujący wytrącanie się uranu oraz dodawano fosforan bizmutu reagujący z plutonem. Z powstałego fosforanu plutonu po szeregu dalszych procesach wyodrębniano pluton. Opracowana metoda pozwalała na uzyskanie znacznej większej ilości plutonu niż przy użyciu cyklotronu. Wykorzystano ją w 1943 w ośrodku badań jądrowych Hanford (Stan Waszyngton) w ramach projektu Manhattan (*Manhattan Project*) budowy bomby jądrowej. Wadą tej metody jest niewydolność odzyskiwania uranu.

Dążąc do ulepszenia metody odzyskiwania izotopów, zwiększenia jej wydajności, dokładności, zmniejszenia ilości zanieczyszczeń w 1949 roku w Narodowym Laboratorium w Oak Ridge wykorzystano metodę ekstrakcji rozpuszczalnikowej opracowaną H.H. Andresona i L.B. Aspreya z Metalurgicznego Laboratorium Uniwersytetu Chicago w ramach projektu Manhattan.

Przerób paliwa umożliwia nie tylko odzyskanie pierwiastków, które mogą być powtórnie wykorzystane w reaktorze, ale również pozwala na wyizolowanie innych odpadów powstałych przy demontażu zestawów paliwowych.

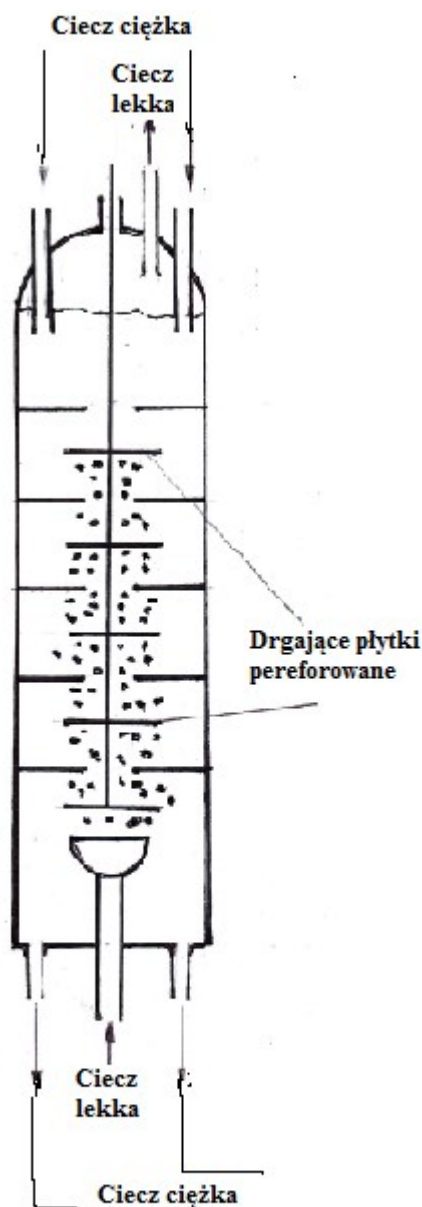
Przerób paliwa pozwalający na wydzielenie użytecznych dla produkcji nowego paliwa elementów jest przeprowadzany w następujących etapach:

- wydobycie materiału jądrowego z zestawów paliwowych (pozbycie się elementów konstrukcyjnych, koszulek cyrkonowych itd.)
- odseparowanie użytecznych dla dalszych celów izotopów od innych, traktowanych jako odpady
- wyselekcjonowanie grup izotopów wykorzystywanych do produkcji paliwa
- oczyszczenie i wytworzenie potrzebnych związków chemicznych zawierających izotopy umożliwiające powstanie reakcji łańcuchowej
- oddzielenie i przygotowanie (zagęszczanie) do składowania produktów odpadowych

## **Metoda przerobu paliwa wykorzystująca ekstrakcję rozpuszczalnikową (*Solvent Extraction*)**

Ekstrakcja polega wyodrębnianiu składnika lub kilku składników z ich mieszaniny. Ekstrakcja rozpuszczalnikowa zwana również ekstrakcją ciecz–ciecz polega na wyodrębnianiu składników z mieszaniny cieczy. Tego typu proces stanowi podstawę większości współczesnych metod odzyskiwania uranu, plutonu i innych pierwiastków z wypalonego paliwa jądrowego.

W uproszczeniu w ekstrakcji rozpuszczalnikowej biorą udział dwie niemieszające wzajemnie się ciecze (tzn. jedna nie rozpuszcza się drugiej). Może to być np. woda stanowiąca tzw. rozpuszczalnik pierwotny i jakiś rozpuszczalnik organiczny tzw. rozpuszczalnik wtórny (ekstrahent). Rozpuszczalnik wtórny powinien posiadać właściwość selektywnego pochłaniania wyodrębnianej substancji rozpuszczanej. Do roztworu w obu zmieszanych cieczy dodaje się substancję zawierającą materiały, które mają być wyodrębnione. W wyniku zachodzących reakcji po osiągnięciu stanu równowagi rozpuszczalnik pierwotny będzie zawierał mniej wyodrębnianej substancji (tzw. rafinat) w porównaniu do ilości pochłoniętej substancji zawartej w rozpuszczalniku wtórnym (ekstrahencie). Po oddzieleniu ekstrahentu, za pomocą specjalistycznych separatorów, wyodrębnianie rozpuszczonej substancji można przeprowadzać różnymi metodami np. drogą destylacji. Efektywność procesu zależy od wielu czynników przede wszystkim od rodzaju rozpuszczalników, wzajemnej powierzchni wymiany (rozpuszczalniki są niemieszające się) temperatury, wielokrotności powtarzania niektórych operacji, dodawania substancji przyspieszających wymianę jonową itd.



**Zasada działania kolumny do ekstrakcji ciągłej z perforowanymi płytkami drgającymi**

Rys 2 Zasada działania kolumny ekstrakcyjnej (K. Rzymkowski)

Ze względu na różne właściwości chemiczne uranu i plutonu podobne procesy są wykorzystywane do ich wzajemnej separacji.

Proces ekstrakcji rozpuszczalnikowej wykorzystywany w zakładach przerobu paliwa jest procesem ciągłym przeprowadzonym w aparatach kolumnowych, w których wzajemna powierzchnia wymiany substancji zawartej w obu rozpuszczalnikach zależy od wymiarów (głównie wysokości) kolumny i czasu przepływu cieczy przez kolumnę. Najczęściej ciecze biorące udział w reakcji są doprowadzane do z dwóch przeciwnych końców kolumny tworząc w jej wnętrzu dwa strumienie płynące w przeciwnych kierunkach. Wykorzystuje się siły grawitacji wprowadzając cięższy roztwór od góry. Lżejszy roztwór rozproszony do postaci kropeł prowadzony jest od dołu. W celu zapobieżenia łączenia się kropeł, co jest szczególnie istotne przy wysokich kolumnach, stosowane są dodatkowe mechaniczne urządzenia

rozpraszające ułatwiające dodatkowo wzajemne mieszanie cieczy. Innym często stosowanym rozwiązaniem jest wywoływanie pulsacji w kolumnie sprężonym powietrzem.

Do ekstrakcji rozpuszczalnikowej stosowane są również urządzenia o odmiennej konstrukcji. Takim urządzeniem jest zbiornik z mieszadłem, w którym dokonuje się mieszanie, a po jego zakończeniu następuje separacja albo bezpośrednio w zbiorniku albo po wyprowadzeniu mieszaniny w oddzielnym separatorze. Jeszcze innym rozwiązaniem jest zastosowanie wirówki, której zaletą jest znaczne skrócenie czasu mieszania składników ekstrakcji, co jest szczególnie istotne przy wyodrębnianiu uranu i plutonu z wysokoaktywnych związków mieszanin, w których użyto substancji organicznych ulegających degradacji pod wpływem promieniowania.

Zastosowana po raz pierwszy w Narodowym Laboratorium Oak Ridge metoda ekstrakcji rozpuszczalnikowej znana pod nazwą **PUREX** (*Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction*) jest jedną z najważniejszych i najszerzej stosowanych do dziś metod odzyskiwania uranu i plutonu z wypalonego paliwa jądrowego oraz jest powszechnie uznanym standardem. Jej istotną zaletą z punktu widzenia układu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej umożliwiającą jej rozpowszechnienie jest fakt, że odzyskany tą metodą pluton zawiera zbyt dużo izotopu  $\text{Pu}^{240}$ , co uniemożliwia jego użycie do produkcji broni jądrowej.

W wyniku modyfikacji procesu PUREX powstało szereg jego wariantów umożliwiających precyzyjniejsze odzyskiwanie różnych izotopów głównie w celu ułatwienia gospodarki odpadami radioaktywnymi, zmniejszenia ich objętości, selekcji pod względem poziomu promieniowania. Precyzyjne wydzielenie niektórych izotopów pozwala uzyskać większą czystość materiału przeznaczonego do produkcji nowego paliwa.

**UREX** (*Uranium EXtraction*) jest zmodyfikowanym procesem PUREX przystosowanym przede wszystkim do odzyskiwania uranu z pominięciem plutonu. Zmiana polega na dodaniu środków redukujących w pierwszym stopniu ekstrakcji. Proces pozwala wydobyć z wypalonego paliwa około 99,9% uranu i 95% technetu separując oba izotopy od innych produktów rozpadu i aktywności. (Dodanie w procesie kwasu acetohydroksamowego (AHA) obniża znacznie możliwość ekstrakcji plutonu i neptunu zmniejszając możliwość ich użycia do produkcji broni jądrowej.)

Innym pochodnym procesu PUREX jest **TRUEX** (*TRansUranic EXtraction*). Jego głównym przeznaczeniem jest wyodrębnianie metali transuranowych głównie ameryku (Am) i kiuru (Cm) głównie w celu obniżenia promieniowania  $\alpha$  w odpadach radioaktywnych.

Kolejnym procesem alternatywnym do TRUEX jest **DIAMEX** (*DIAMide EXtraction*) pozwalającym uniknąć powstawania odpadów zawierających węgiel, wodór, azot czy tlen, które przy spalaniu tworzą związków mogące być przyczyną tzw. kwaśnych deszczy.

Proces **SANEX** (*Selective ActiNide EXtraction*) będący uzupełnieniem TRUEX i DIAMEX umożliwia usuwanie lantanowców i niektórych aktywności w procesie PUREX szczególnie z tych partii odzyskanego materiału, która jest przygotowywana do produkcji nowego paliwa, ponieważ te pierwiastki mogą obniżyć jego wydajność. Proces jest w trakcie badań.

Opracowany w Rosji i Czechach proces **UNEX** (*Universal EXtraction*) jest procesem uniwersalnym usuwającym większość zbędnych, a czasem szkodliwych dla nowego paliwa, pierwiastków pozostałych w końcowym etapie odzyskiwania uranu i plutonu z wypalonego paliwa.

Mimo wielu zalet stosowanych obecnie metod ekstrakcji opartych o proces PUREX prowadzone są rozległe badania nad innymi metodami wykorzystującymi np. wymianę jonową, metody wysoko temperaturowe. Innym kierunkiem poszukiwań jest znalezienie takich metod przerobu wypalonego paliwa by mogło być ono przetwarzane na terenie elektrowni unikając w ten sposób problemów związanych z transportem. Problem lepszego wykorzystania paliwa i jego przerobu jest ściśle powiązany z konstrukcją reaktorów IV generacji.

Bardzo wiele państw rozbudowując swoją energetykę jądrową zdecydowało się na budowę własnych zakładów przerobu paliwa. Niektóre z nich zaczęły budowę od małych pilotujących zakładów jak np. w Japonii TRP (*Tokai Reprocessing Plant*) z zamiarem wybudowania w miarę narastających potrzeb dużych zakładów przemysłowych. W 1993 w Japonii w Prefekturze Aomori rozpoczęto budowę zakładów przerobu, której zakończenie i uruchomienie przewidziano na koniec 2014 roku.

Obecnie w wielu krajach o rozwiniętej energetyce jądrowej pracuje około 10 zakładów przerobu paliwa. Głównie we Francji, Indiach, Rosji, Wielkiej Brytanii, Japonii, Chinach, Pakistanie. Część z nich wykorzystywana jest do celów militarnych (Indie, Pakistan, Rosja, Francja). W ostatnich latach wiele zakładów zostało wyłączonych i nawet likwidowanych: Niemcy, Belgia Włochy, Stany Zjednoczone, Hiszpania, Taiwan. Powodem rezygnacji było odejście od rozwijania energetyki jądrowej (Włochy, Niemcy), niedoszacowanie wpływu na środowisko (Hiszpania), zastosowanie otwartego cyklu paliwowego (Stany Zjednoczone), względy polityczne (Taiwan, Belgia). Należy podkreślić, że przerób paliwa jest procesem kosztownym i staje się opłacalny dopiero przy bardzo rozwiniętej energetyce jądrowej np. Japonia, Francja. Przerób paliwa może być czasem wymuszony względami polityki zbrojeniowej (Indie, Pakistan).

## Zakłady przerobu paliwa

Wymagania dotyczące ochrony środowiska przy projektowaniu kompleksu przemysłowego, jakim są zakłady przerobu muszą uwzględniać prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk destrukcyjnych (silnych wiatrów, opadów, trzęsień ziemi), rozkład cieków wodnych, sposobów dostarczania energii, składowania odpadów toksycznych oraz spełniać warunki bezpieczeństwa stosowanych w przemyśle chemicznym.

Zakład przerobu paliwa jest dużym zakładem przemysłowym zajmującym znaczną powierzchnię przekraczającą nawet 10 km<sup>2</sup>. W rzeczywistości na tym terenie znajduje się kilka zakładów. Najbardziej rozbudowany mieszczący się w jednym budynku jest zakład, w którym przeprowadzany jest proces przerobu nazywany często Budynkiem Przerobu. Wynika to między innymi z chęci ograniczenia transportu wysoko aktywnych materiałów jądrowych na terenie obiektu. Materiał – wypalone paliwo – jest dostarczane z przechowalników elektrowni jądrowej do magazynu w budynku przerobu. Następnie po wstępnym przygotowaniu jest poddawane rozległej obróbce chemicznej, w wyniku czego powstają produkty w płynnej postaci wymagające dalszych procesów (roztwory zawierające uran, pluton i odpady). W Budynku Przerobu znajduje się również laboratorium analityczne i oczywiście sterownia. Materiał z elektrowni dostarczany jest w specjalnych pojemnikach kontenerach wymagających do ich przenoszenia dźwigów. Kontenery muszą być opróżniane w basenie będącym magazynem paliwa. Po rozładowaniu muszą być one dekontaminowane. Kolejnym etapem jest demontaż kaset paliwowych, który jest przeprowadzany przy pomocy zdalnie sterowanych przyrządów. W następnym etapie pręty paliwowe z kaset są rozdrabniane i rozpuszczane w kwasie azotowym. Operacje są przeprowadzane automatycznie. W obu etapach powstają odpady stałe, które są transportowane do innego pomieszczenia przeznaczonego do ich przygotowania do transportu i składowania w przechowalnikach odpadów wysokoaktywnych. Odpady stałe są ładowane do specjalnych pojemników i kontenerów transportowych. Przed opuszczeniem budynku muszą być poddane dekontaminacji. Pomieszczenie jest izolowane (podobnie jak i kolejne pomieszczenie, w których przeprowadzany jest proces ekstrakcji) by promieniowanie jądrowe było wytłumione i nie wpływało podniesienie tła na zewnątrz. Powstałe w procesie roztwory są poddawane dalszym procesom polegającym na filtracji, oczyszczaniu, wytrącaniu zagęszczaniu aż do uzyskania uranu i plutonu w postaci tlenków. Odpady płynne są oczyszczane, odparowywane, zagęszczane tak by jak najbardziej zmniejszyć ich objętość. Początkowe stadia procesu ekstrakcji są wykonywane przez urządzenia automatyczne lub

sterowane zdalnie. W końcowej fazie poziom promieniowania jest na tyle niski, że nie są stosowane specjalne zabezpieczenia. Wszystkie przeprowadzane czynności są kontrolowane w sterowni. Wszystkie działania w strefie podwyższonego promieniowania wymagają zdalnego sterowania i automatycznej kontroli oraz stałej obserwacji. Część procesu gdzie poziom promieniowania nie jest wysoki może być kontrolowana bezpośrednio. Wszystkie pomieszczenia i nawet ważniejsze ich części są monitorowane przez systemy TV, mierniki promieniowania, temperatury, ciśnienia i nawet wilgotności. W laboratorium analitycznym jest kilka niezależnych wyspecjalizowanych działów przeprowadzających na bieżąco kontrolę zgodności z przyjętymi standardami, analizy jakości – dokładność i precyzję metod analitycznych. Podział prac w laboratorium uwzględnia poziom promieniowania i związane z tym problemy pozyskiwania próbek do analizy i pomiarów. Budynek przerobu jest największym budynkiem wymagającym dużej przestrzeni ze względu na rozmiar używanej aparatury, używania wielu dźwigów, zabezpieczenia przed promieniowaniem itd.

W budynku pomocniczym powiązany z Budynkiem Przerobu jest dział unieszkodliwiania gazów i odzyskiwania rozpuszczalników używanych w procesie ekstrakcji.

Innym ważnym laboratorium mieszczącym się na terenie zakładu przerobu jest Laboratorium Kontroli Środowiska, którego zadaniem jest śledzenie wpływu działalności zakładu na środowisko w jego pobliżu i na jego terenie ze szczególnym uwzględnieniem poziomu promieniowania i zanieczyszczeń chemicznych. Pozwala to również wykrywać ewentualne wycieki płynów, uwolnienia gazów itp.

W zakładach przerobu paliwa, ze względu na bardzo wysoki poziom promieniowania przetwarzanych materiałów, zwraca się szczególną uwagę na bezpieczeństwo pracy. Wysoki poziom promieniowania wymusza konieczność stosowania kilku barier chroniących pracowników przed bezpośrednim kontaktem z przerabianym materiałem. Wszystkie procesy są wykonywane automatycznie przez zdalnie sterowane urządzenia, które muszą być niezawodne, przystosowane do długotrwałej pracy ciągłej i odporne na różne rodzaje promieniowania. Są to unikalne konstrukcje opracowane specjalnie dla potrzeb danego zakładu przerobu i dostosowane do rodzaju przerabianego paliwa. Nawet jeśli procesy przerobu są identyczne w dwóch budowanych zakładach urządzenia są projektowane i wykonywane niezależnie. Przed uruchomieniem przeprowadzane są rozliczne testy, co często powoduje opóźnienia ostatecznego terminu rozpoczęcia przerobu. Przy budowie muszą być uwzględnione nie tylko elementy dotyczące samego procesu przerobu, ale również kompleksy różnych systemów zabezpieczeń np. przed atakami terrorystycznymi, zabezpieczenia przed nielegalnym uprowadzeniem materiałów, zabezpieczeń awaryjnych itd. Odrębnym bardzo problemem jest zaprojektowanie sposobu prowadzenia okresowych przeglądów technicznych, wymiany uszkodzonych elementów itp. Przewidywane są różne rozwiązania operacje wykonywane zdalnie przez urządzenia automatyczne bez udziału ludzi w strefie podwyższonego promieniowania, przegląd (wymiana) bezpośrednia przez pracowników, co wymaga dodatkowych zabezpieczeń, dekontaminacji, usunięcia potencjalnych źródeł promieniowania, lub stosowania takich urządzeń, które nie wymagają konserwacji i napraw. Muszą to być urządzenia niezwykle niezawodne lub takie, które można wymienić w całości zastępując je nowymi. W celu zapewnienia większej niezawodności część urządzeń biorących bezpośredni udział w procesie jest dublowana zapewniając możliwość natychmiastowego wyeliminowania uszkodzonego fragmentu procesu bez jego przerywania. Ponadto żadna substancja mająca według obecnej wiedzy szkodliwy wpływ na środowisko nie powinna się ulatniać i przenikać do środowiska w większym stopniu niż to dopuszczają wymogi krajowe i międzynarodowe. Promieniowanie jądrowe w pobliżu obiektów jądrowych a nawet na ich terenie nie przekracza promieniowania tła.

Każdy zakład przerobu posiada własne zakłady unieszkodliwiania odpadów wysoko i nisko aktywnych, zakład dekontaminacji zużytych lub uszkodzonych urządzeń, składowisko odpadów stałych. Odpady powstające w procesie przerobu paliwa są najbardziej uciążliwymi



i najbardziej promieniotwórczymi odpadami powstającymi w całym cyklu paliwowym. Opady wysoko aktywne pochodzące z pierwszej fazy przeroby mogą zawierać pluton i inne pierwiastki ciężkie, jak i fragmenty koszulek cyrkonowych. Odpady średnio i nisko aktywne pochodzą z dalszych etapów technologicznych i również mogą zawierać pierwiastki ciężkie. Są one łączone one z innym ściekami pochodzącymi z basenów dekontaminacyjnych, pralni, przemywania filtrów i odparowywane lub po dodatkowym filtrowaniu uwalniane do środowiska. Odpady gazowe powstają w procesach odgazowywania w czasie cięcia rurek – koszulek cyrkonowych, które były prętami paliwowymi. Uwalniane w tym procesie jod i gazy szlachetne są odzyskiwane. Po przefiltrowaniu gazy odprowadza się do kominów. Najbardziej objętościowe w procesie przerobu są odpady stałe. Jest wiele technologii ich zabezpieczania. Najpopularniejsza polega na jak największym ich rozdrobnieniu i zmieszaniu ze sproszkowanym szkłem boro-krzemianowym i stopieniu, co zapobiega wmywaniu odpadów. Największym jednak problemem związanym ze składowaniem odpadów jest utylizacja zużytych skażonych narzędzi, lub dużych urządzeń, używanych bezpośrednio w procesie technologicznym odzyskiwania plutonu.

Na terenie zakładów przerobu paliwa mieszczą się ponadto systemy wspomaganie technicznego oczyszczalni wody dla użytku zakładu, kompresory, pompownie wieże chłodnicze, pralnia, itp.

## **Bibliografia**

1. Rzymkowski Krzysztof, *Przerób wypalonego paliwa*, EKOATOM Nr 13/2014
2. G.W.Dixon, A Carson, *Reprocessing plant characteristics* IAEA 1985
3. Ekstrakcja [bcpw.bg.pw.edu.pl/Content/144/sgpp\\_II4.pdf](http://bcpw.bg.pw.edu.pl/Content/144/sgpp_II4.pdf)
4. Ekstrakcja <http://pl.wikipedia.org/wiki/Ekstrakcja>
5. Nuclear reprocessing [en.wikipedia.org/wiki Nuclear Reprocessing](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_Reprocessing)
6. Nuclear Reprocessing IAEA-TEDOC 1587 2008
7. Glen T. Seaborg, *The first nuclear reactor, the production of plutonium and its chemical extraction* [www.iaea.org/Publications/.../04004701517su.pdf](http://www.iaea.org/Publications/.../04004701517su.pdf)
8. Grzegorz Jeziński, *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, WNT Warszawa 2005
9. Krzysztof Rzymkowski, *Międzynarodowa kontrola materiałów jądrowych*, EKOATOM Nr 6/wrzesień 2012 [www.EKOATOM.com.pl](http://www.EKOATOM.com.pl)