

Reaktory ciekłosolne na tor

Molten Salt Reactors MSR

Wojciech Kramarek*

Słowa kluczowe: Reaktory na ciekłą sól, reaktory torowe, bezpieczeństwo, systemy bezpieczeństwa pasywne i aktywne, normowanie europejskie i światowe

Streszczenie

Większość pracujących reaktorów nuklearnych używa uranu jako paliwa. Użycie toru jako nowego źródła paliwa było kuszące od wielu lat. Tor jest występującym w stanie naturalnym lekko radioaktywnym metalem odkrytym w 1828 roku. Tor (Th-232) nie jest materiałem rozszczepialnym i nie nadaje się do użycia w termicznych reaktorach. Tor jest jednak pierwiastkiem „płodnym” i po wchłonięciu neutronu przekształca się w uran 233 (U-233), który jest doskonałym materiałem rozszczepialnym. Od przeszło 50 lat trwają próby nad zastosowaniem toru jako paliwa jądrowego, aczkolwiek z mniejszą intensywnością niż badania nad zastosowaniem uranu czy plutonu. Aktualnie istnieje siedem typów reaktorów w których możliwe jest zastosowanie toru jako paliwa nuklearnego. Reaktory na stopioną sól (MSR) są ciągle na etapie prób i badań ale prawdopodobnie nadają się najbardziej do zastosowania w nich toru jako paliwa. Unikalne płynne paliwo może zawierać fluorki toru i uranu (U-233 lub/oraz U-235) jako część solnej mieszaniny która topi się w zakresie temperatur 400-700°C. Ta ciecz służy zarówno jako chłodziwo jak i nośnik paliwa rozszczepialnego. Płyn krąży przez obszar rdzenia reaktora a później przez obszar chemicznego procesingu w którym są usuwane „trujące” produkty rozpadu radioaktywnego oraz cenny wytworzony U-233 kierowany z powrotem do rdzenia reaktora jako paliwo. Poziom moderacji neutronów zależy od ilości grafitu wbudowanego w rdzeń reaktora. MSR są zdecydowanie bardziej bezpieczne niż klasyczne uranowe reaktory. W reaktorze używającym toru nie jest możliwe stopienie rdzenia reaktora. Wyłączenie zasilania elektrycznego skutkuje samoczynnym zatrzymaniem reaktora. Reaktory stosujące płynne torowe paliwo są 200 do 300 razy bardziej wydajne energetycznie niż najlepsze reaktory uranowe. Tor daje znacznie mniej radioaktywnych odpadów w porównaniu z uranem wytwarzając tylko 1% odpadów. Większość odpadów reaktorów torowych jest do wykorzystania. W ostatnich latach konieczność blokowania proliferacji, potrzeba lepszego wykorzystania paliwa nuklearnego oraz zwiększenia długości cyklu paliwowego, potrzeba poprawy charakterystyk odpadów radioaktywnych oraz minimalizacji zapasów plutonu doprowadziło do zwiększonego zainteresowania torem jako paliwem nuklearnym w kilku rozwiniętych krajach. Dwa główne programy międzynarodowe a mianowicie Innowacyjne Nuklearne Reaktory oraz Program Cykli Paliwowych zainicjowane przez IAEA (Międzynarodową Agencję Atomistyki) oraz prowadzone przez USA Międzynarodowe Forum IV Generacji testują paliwo torowe oraz paliwowe cykle torowe.

Keywords: Molten salt reactor, thorium reactors, safety, active and passive safety systems, European and world standards

Abstract

Most operating nuclear reactors use uranium as a fuel. The use of thorium as a new primary energy source has been a tantalizing prospect for many years. Thorium is a naturally-occurring, slightly radioactive metal discovered in 1828. Thorium (Th-232) is not itself fissile and so is not directly usable in a thermal neutron reactor. However, it is 'fertile' and upon absorbing a neutron will transmute to uranium-233 (U-233) which is an excellent fissile fuel material. Research into the use of thorium as a nuclear fuel has been taking place for over 50 years, though with much less intensity than that for uranium or uranium-plutonium fuels. There are seven types of reactor into which thorium can be introduced as a nuclear fuel. Molten Salt Reactors (MSRs) are still at the design stage but are likely to be very well suited for using thorium as a fuel. The unique fluid fuel can incorporate thorium and uranium (U-233 and/or U-235) fluorides as part of a salt mixture that melts in the range 400-700°C, and this liquid serves as both heat transfer fluid and the matrix for the fission fuel. The fluid circulates through a core region and then through a chemical processing circuit that removes various fission products (poisons) and/or the valuable U-233. The level of moderation is given by the amount of graphite built into the core. MSR are safer than classical uranium reactors. Within a thorium reactor, a 'melt-down' simply isn't possible – turn the power supply off and the reaction just stops. Liquid fuel means thorium reactors are 200-300 times more efficient than even the best uranium reactor. Thorium 'burns' much more cleanly than uranium, and only produces 1% of the waste. Much of the 'waste' from a Thorium reactor is actually quite useful. In recent times the need for proliferation-resistance, longer fuel cycles, higher burnup, improved waste form characteristics, reduction of plutonium inventories and in situ use of bred-in fissile material has led to renewed interest in thorium-based fuels and fuel cycles in several developed countries. The two main international projects, namely Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Programme (INPRO) initiated by the IAEA and the US-led Generation IV International Forum (GIF), are also considering thorium fuels and fuel cycles.

Wprowadzenie, działy energetyki

Energetyka, czyli dziedzina wytwarzania i dystrybucji energii, jest dzielona na energetykę konwencjonalną oraz niekonwencjonalną. W energetyce konwencjonalnej wytwarzanie energii następuje

poprzez spalanie paliw, np. węgla, gazu, ropy, biomasy. Jest to proces bardzo szkodliwy dla środowiska naturalnego, zużywający tlen i nieodnawialne paliwa naturalne oraz wytwarzający szkodliwe odpady.

* Wojciech Kramarek, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych Im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie



Rys.1. Niemiecka elektrownia węglowa Frimmersdorf[9]
Fig.1.German coal power plant Frimmersdorf [9]

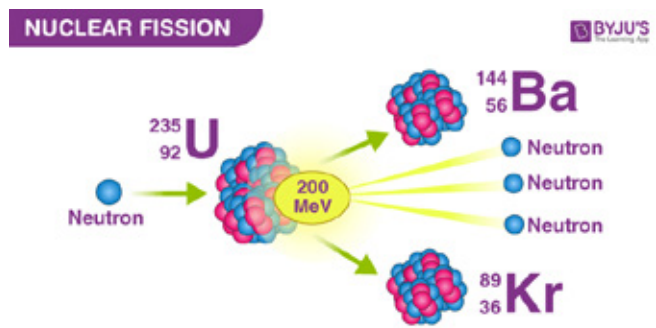
W energetyce niekonwencjonalnej energię wytwarza się ze źródeł jak wiatr, woda, słońce. Są to odnawialne źródła energii (OZE), których wykorzystanie nie stanowi dużego obciążenia dla środowiska. Ponieważ zarówno słońce jak i wiatr nie działają w sposób ciągły, nie zapewniają jednak one stabilnej ciągłości dostaw energii.



Rys. 2. Farma fotowoltaiczna[10]
Fig.2. Photovoltaic ferm [10]

Energetyka jądrowa, zasady pracy reaktorów

Do energetyki niekonwencjonalnej zaliczamy również nowoczesny dział, nazywany energetyką jądrową, wykorzystujący proces rozpadu pewnych pierwiastków promieniotwórczych. Wszystkie działające obecnie elektrownie jądrowe pracują na zasadzie rozszczepiania jąder ciężkich atomów. Zjawisko rozszczepienia charakterystyczne jest dla izotopów ciężkich pierwiastków. Do pierwiastków tych zaliczamy przede wszystkim uran, pluton, tor, kaliforn, ameryk, kiur czy neptun. W praktyce izotopem wykorzystywanym w reaktorach jądrowych jest uran-235, z uwagi na jego dostępność w przyrodzie, wysokie prawdopodobieństwo rozszczepienia i możliwość stosunkowo łatwego kontrolowania całej reakcji. Rozszczepienie jądra atomowego to przemiana jądra polegająca na rozpadzie jądra na dwa (czasami na więcej) fragmenty o zbliżonych masach. Zjawisku towarzyszy emisja neutronów a także wydzielenie dużej ilości energii.

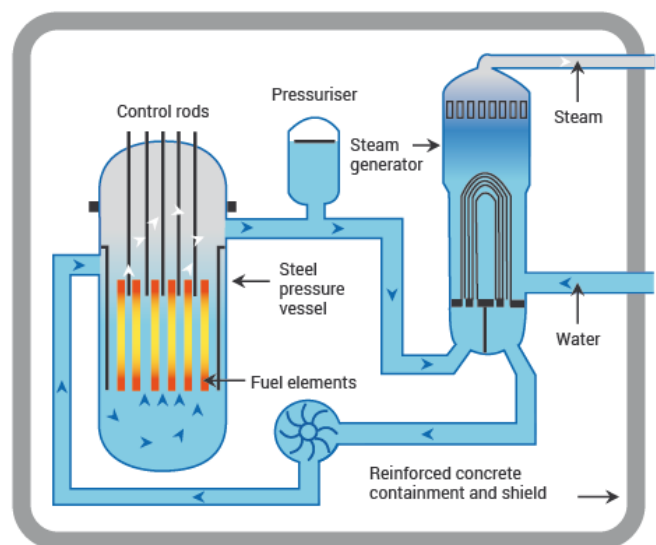


Rys. 3. Proces rozszczepienia jądra atomowego[8]
Fig.3. Nuclear fission process [8]

Jądra atomowe ulegają rozszczepieniu, zarówno w sposób samistny, jak i wymuszony. W tym drugim przypadku rozszczepiają się w wyniku zderzenia z neutronami, protonami, kwantami gamma lub innymi cząstkami.

Kiedy jądro rozszczepialne, takie jak uran-235 lub pluton-239, pochłania neutron, rozpada się na lżejsze jądra, uwalniając energię, promieniowanie gamma i wolne neutrony, które mogą wywołać dalsze rozszczepienie w samopodtrzymującej się bardzo szybkiej reakcji łańcuchowej. Aby doprowadzić do reakcji rozszczepieniowej, należy spowolnić neutrony. Spowolnione neutrony tzw. neutrony termiczne powstają przy przepuszczaniu neutronów prędkich przez materiał zwany moderatorem, materiałem tym może być woda, ciężka woda lub grafit. W wyniku rozszczepienia atomów uranu na mniejsze fragmenty, zgodnie z zasadą defektu masy, w granulach paliwa wytwarza się dużo ciepła. Ten proces w reaktorach jest rygorystycznie kontrolowany, przy pomocy prętów kontrolnych pochłaniających neutrony, w celu utrzymania liczby neutronów na stałym poziomie. Pręty kontrolne wykonane są z materiałów pochłaniających neutrony, takich jak kadm, hafn lub bor, i są wkładane lub wyjmowane z rdzenia, w celu kontrolowania szybkości reakcji lub jej zatrzymania. Rozwiązanie takie zapewnia stabilną i bezpieczną pracę reaktora.

W nowym reaktorze, z nowym paliwem, potrzebne jest źródło neutronów, aby rozpocząć reakcję rozszczepienia. Zazwyczaj jest to beryl zmieszany z polonem, radem lub innym emiterym alfa. Ponowne uruchomienie reaktora, z częściowo zużytym paliwem, może nie wymagać źródła neutronów, gdyż zapewnia je zużyte paliwo po wycofaniu prętów kontrolnych.

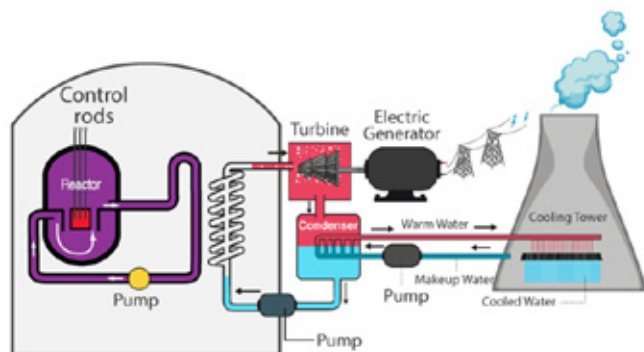


Rys. 4 Zasada działania reaktora jądrowego [12]
Fig.4 Principle of work of nuclear reactor [12]

Ciepło z rozszczepienia jądowego przekazywane jest do chłodziwa roboczego (wody, gazu lub ciekłych metali)) opływającego elementy paliwowe, które z kolei w wymiennikach ciepła przekazują energię wodzie w kolejnym obiegu.

W obiegu tym powstaje para wodna o wysokiej temperaturze i ciśnieniu która jest kierowana na łopatki turbiny napędzającej generator elektryczny.

Wydajność konwersji energii w reaktorach jądowych jest znacznie wyższa w porównaniu do konwencjonalnych elektrowni opalanych paliwami kopalnymi; kilogram uranu-235 może uwolnić miliony razy więcej energii niż kilogram węgla.



Rys. 5. Schemat działania nuklearnego bloku energetycznego typu PWR [11]
Fig.5. Block diagram of PWR nuclear power plant [11]

U-235 występuje w niewielkim procencie (ok. 0,7%) w naturalnym uranie U-238 (który nie jest paliwem jądowym). W reaktorach jako paliwa używa się wzbogaconego uranu. Wzbogacenie polega na zwiększeniu zawartości rozszczepialnego U-235 do około 3–5% w uranie naturalnym.

Dla reaktorów pracujących w technologii LWR (light-water-cooled and moderated reactor) uran jest wydobywany, oczyszczany i chemicznie przekształcany w sześćfluorek uranu przed wzbogaceniem. W procesie wzbogacania powstają dwa strumienie produktu. Jeden to wzbogacony uran, drugi to uran ubogi. Większość występującego w naturalnym uranie izotopu U-235 trafia do strumienia wzbogaconego. Wzbogacony sześćfluorek uranu jest chemicznie przekształcany z powrotem na dwutlenek uranu, prasowany w pastylki, ładowany do rur cyrkonowych, w celu utworzenia prętów paliwowych. Zespoły prętów są ładowane do rdzenia reaktora, w którym przepracują kilka lat, wytwarzając energię jądową.

Po okresie pracy są one usuwane z reaktora i pozostawiane na okres kilku miesięcy do ostygnięcia w zbiorniku wodnym na zużyte paliwo, usytuowanym w pobliżu reaktora. Część uranu U-235 została zużyta (uległa rozszczepieniu). Część obecnego w paliwie uranu-238 została przekształcona w pluton-239, a część z niego również uległa rozszczepieniu wytwarzając ciepło.

Większość materiałów pozostałych w rdzeniu reaktora (w elementach paliwowych) to produkty rozszczepienia. Powstały one z rozszczepienia zarówno uranu-235, jak i plutonu-239. Kilka długowiecznych izotopów plutonu, ameryku i kiuru powstało, gdy pluton 239 pochłonął neutron, a nie uległ rozszczepieniu. Powstałe w czasie pracy reaktora długowieczne aktywnowce stanowią problem w zakresie utylizacji.

Pewne typy reaktorów, mniej rozpowszechnione (ciężkowodne CANDU, PHWR) pracują przy naturalnym udziale izotopów, tzn. na niewzbogaconym uranie, czyli z małą zawartością U-235.

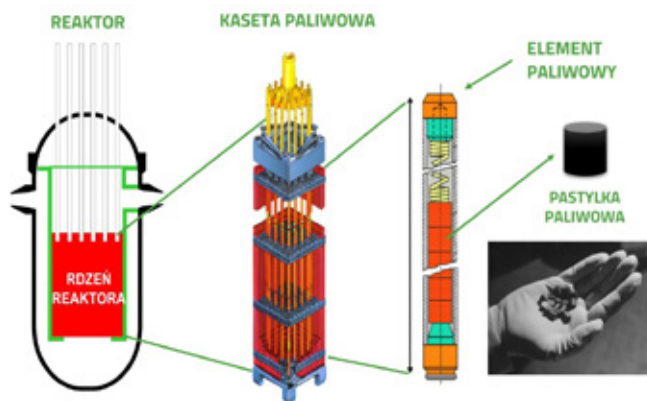
Inne typy reaktorów, tzw. reaktory prędkie wykorzystujące szybkie neutrony (nie spowolnione), wymagają jako paliwa bardziej wzbogaconego uranu (do 20%), bądź plutonu, powstającego w czasie rozszczepienia uranu U-238. W trakcie wychwytu neutronu uderzającego w atom uranu U-238, może być wytworzony pluton-239. Pluton produkowany jest w każdym reaktorze jądowym, pracującym na paliwie uranowym. Ze względu na wymóg dużej zawartości U-238, najlepiej do tego celu

nadają się reaktory pracujące na uranie naturalnym. Aby uzyskać dużą wydajność i wysoką czystość plutonu, paliwo w reaktorach energetycznych musi być często wymieniane. Oznacza to, że musi istnieć możliwość jego przeładunku, bez przerywania pracy reaktora. Z tego powodu reaktory lekkowodne LWR, które dominują wśród reaktorów energetycznych, nie nadają się do produkcji plutonu dla celów militarnych. Traktuje się je jako odporne na rozprzestrzenianie broni jądowej.

Wytworzony pluton może być następnie, po wydzieleniu ze zużytego paliwa, używany jako czynnik rozszczepialny. Uzyskanie plutonu z przerobionego paliwa uranowego jest bardzo trudne. Tylko kilka wyspecjalizowanych firm na świecie potrafi wydzielić pluton ze zużytego paliwa. Wydzielony pluton może być użyty w pracujących reaktorach jako paliwo ale może być niestety użyty jako materiał do budowy bomb atomowych.

Aby nie dopuścić do wydostania się na zewnątrz reaktora produktów rozszczepienia, paliwo jądowe jest zamknięte wewnątrz elementów paliwowych, mających najczęściej postać walcowych, kulistych lub płytowych elementów.

Walcowy element paliwowy, najczęściej stosowany, składa się ze szczelnej, cienkościennej rurki tzw. koszulki (stop cyrkonu, stal nierdzewna) oraz z umieszczonych w jej wnętrzu pastylek paliwowych. Zestawy (kilkudziesięciu lub więcej) elementów paliwowych tworzą zespoły, tzw. kasety paliwowe, stanowiące zasadniczą część rdzenia reaktora.



Rys.6. Paliwo nuklearne w reaktorach LWR[11]
Fig.6. Nuclear fuel at LWR reactors [11]

W procesie produkcji energii jądowej powstają niebezpieczne odpady radioaktywne (zużyte elementy paliwowe, napromieniowane elementy konstrukcyjne). Odpady te stanowią zagrożenie dla człowieka i środowiska, przez bardzo długie okresy czasu (rzędu tysięcy lat). Składowanie odpadów stanowi duże wyzwanie, zarówno pod względem technicznym, jak i politycznym. W przypadku niezachowania odpowiednich warunków, może dojść do skażenia ziemi, wody lub powietrza.

Możliwe jest odzyskiwanie materiałów rozszczepialnych ze zużytych elementów paliwowych, aczkolwiek jest to proces kosztowny. Odzyskiwanie jest prowadzone w Europie (głównie we Francji), Indiach i Japonii. W USA zużyte paliwa, ze względów ekonomicznych, nie poddaje się takiej obróbce i jest ono jedynie składowane.

W wyniku recyklingu elementu paliwowego w zasadzie można odzyskać cały uran i pluton, które są ponownie używane jako paliwo w reaktorach. Pozostaje jedynie kilka procent radioaktywnych odpadów, które muszą być składowane. Obecnie opracowywane są metody „wypalania” także tych izotopów, np. w reaktorach wykorzystujących neutrony prędkie.

Aktualnie radioaktywne pozostałości umieszcza się w specjalnych pojemnikach, zalewa szkłem oraz betonem, które następnie składa się pod ziemią lub w sadzawkach wodnych.



Rys. 7. Składowisko odpadów radioaktywnych we Francji[12]
Fig.7.,Radioactive Waste Disposal Plant in France [12]

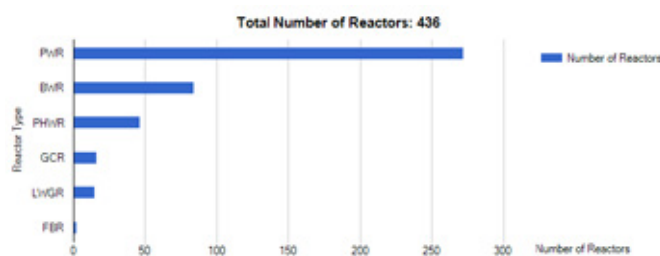
Energetyka jądrowa, jej zalety i wady

W przeciwieństwie do energetyki klasycznej, bazującej na paliwach kopalnych, energetyka jądrowa zapewnia nieemisyjne źródła energii elektrycznej i ciepła.

Odnawialne źródła energii w postaci elektrowni wiatrowych oraz fotowoltaiki, w sytuacjach braku słońca i wiatru zawiodą, natomiast energetyka jądrowa zapewnia stabilne, ciągłe dostawy energii. Ponadto, w obecnie pracujących reaktorach jądrowych, istnieje możliwość zmiany ich mocy o kilkadziesiąt procent w ciągu kilku minut, w przeciwieństwie do tradycyjnych bloków energetycznych, stosujących do spalania paliwa kopalne, w których zmiana mocy w takim samym procencie wymaga kilku godzin.

Energetyka jądrowa zapewnia aktualnie około 17% światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Energia jądrowa jest największym źródłem (około 26%) nisko węglowej energii elektrycznej.

Na świecie pracuje obecnie około 440 reaktorów energetycznych dużej mocy (rzędu 1000 do 1600 MW).



Rys. 8. Liczby pracujących reaktorów na świecie w 2013 r. w zależności od typu
.: PWR – Pressurized Water Reactor, BWR – Boiling Water Reactor, PHWR – Pressurized Heavy Water Reactor, GCR-Gas-Cooled Reactor, LWGR – Light Water Graphite Reactor, FBR – Fast Breeder Reactor

Fig.8.Total numbers of working reactors depending on type [12]

Przeszło 50 krajów prowadzi prace w zakresie energii nuklearnej, wykorzystując około 220 badawczych reaktorów jądrowych, również używanych do produkcji izotopów wykorzystywanych w medycynie i przemyśle. Należy również wymienić około 160 reaktorów mniejszych mocy, pracujących na okrętach wojennych różnych krajów.

Do najważniejszych przyczyn rozwoju energetyki jądrowej zaliczamy:

- ugruntowaną wiedzę na temat energetyki jądrowej,
- istniejące i sprawdzone przepisy prawne dotyczące zasad budowy i eksploatacji obiektów nuklearnych,
- nieumiejętność magazynowania wyprodukowanej energii elektrycznej dużej mocy, (przy sprzyjających warunkach atmosferycznych OZE zapewniają duże nadwyżki produkowanej energii),
- niewystarczające moce przesyłowe krajowych sieci energetycznych, uniemożliwiające przesłanie energii z obszarów o nadwyżkach produkcyjnych do obszarów ubogich w produkowaną energię,

- wymóg prawny zmniejszania udziału paliw kopalnych w miksie energetycznym,
- elektrownie jądrowe nie emitują do atmosfery dwutlenku węgla oraz generują małe ilości szkodliwych pyłów,
- obawę przed uzależnieniem od dostaw energii z zagranicy w warunkach jej niedoboru,
- rosnące ceny węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego,
- brak monopolizacji rynku dostaw paliwa jądrowego przy jego obfitości na rynku światowym.

Do problemów klasycznych elektrowni jądrowych zaliczamy:

- globalne zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi w przypadku awarii reaktorów,
- problem powstawania, transportu i składowania oraz utylizacji odpadów radioaktywnych,
- możliwość skażenia powietrza, gleb i wód w sąsiedztwie obszarów składowania odpadów,
- długie czasy budowy oraz bardzo wysokie koszty budowy i likwidacji elektrowni,
- możliwość pozyskania przez osoby nieuprawnione paliwa jądrowego, zwłaszcza plutonu, w celu stworzenia broni jądrowej,
- niebezpieczeństwo przeprowadzenia zamachów terrorystycznych na obiekty nuklearne.

Zdecydowana większość aktualnie pracujących elektrowni jądrowych stosuje klasyczne reaktory uranowe chłodzone wodą (LWR, Light Water Reactors w których wyróżniamy: PWR Pressurized Water Reactors lub BWR Boiling Water Reactors). Głównym paliwem jest w nich uran U-235.

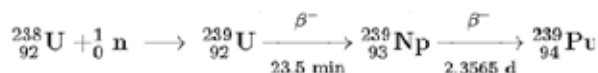
Reaktory te mają następujące negatywne cechy:

- nowe paliwo musi być wymieniane co kilka lat, ze względu na zużycie elementów paliwowych elementami rozpadu jak ksenon, zaburzającymi gospodarkę neutronami,
- efektywność wykorzystania energii zawartej w uranie wynosi poniżej 2%,
- występujący w zużytych paliwie pluton Pu-239 może posłużyć instytucjom niepowołanym do produkcji broni atomowej,
- temperatury pracy reaktora limitują sprawność energetyczną reaktora do poziomu poniżej 35%,
- występuje niebezpieczeństwo powstania nadmiernego ciśnienia pary w wodnych obiegach chłodzących i jej wybuchu (Czarnobyl),
- wysokie ciśnienia pracy chłodziwa mogą doprowadzić do uszkodzenia rurociągów i zbiornika reaktora,
- reaktory są obiektami ciśnieniowymi, pracującymi najczęściej w temperaturze około 315°C pod ciśnieniem rzędu 150 bar,
- występuje niebezpieczeństwo wybuchu wytworzonego w czasie awarii reaktora wodoru, wytworzonego wskutek elektrolizy wody,
- wysoka radioaktywność rdzenia reaktora oraz metalowych elementów konstrukcyjnych,
- reaktor wytwarza duże ilości niebezpiecznych radioaktywnych odpadów o długim okresie rozpadu (kilka tysięcy lat),
- możliwość przegrzania (stopienia) rdzenia reaktora oraz paliwa w czasie awarii obiektu (Three Mile Island, Fukushima),
- uzupełnianie paliwa wymaga długotrwałego zatrzymania reaktora.

Tor jako materiał do budowy reaktorów

W czasie drugiej wojny światowej, przy realizacji projektu budowy bomby atomowej (projekt Manhattan), w obawie o braki w dostawach uranu, rozpoczęto prace poszukiwawcze innych zastępczych pierwiastków promieniotwórczych. Do roku 1946, a więc w osiem lat po odkryciu rozszczepienia jądra atomowego, zidentyfikowano trzy izotopy rozszczepialne, które mogły posłużyć jako paliwo jądrowe:

- Uran-235 – występuje w naturze, ale stanowi tylko 0,72% uranu naturalnego U-238,
- Pluton-239 – praktycznie nie występuje w naturze, ale można go wytwarzać przez bombardowanie neutronami uranu U-238,



- Uran-233 – nie występuje w naturze, otrzymywany jest z nierozszczepialnego toru Th-232 stanowiącego niemal 100% naturalnego



Rys. 9. Cykl powstawania z toru rozszczepialnego uranu U-233 [13]

Fig. 9. Transmutation of thorium for uranium U-233 [13]

Tor występuje powszechnie w skorupie ziemskiej i może być pozyskiwany ze skał granitowych, złóż fosforytów, złóż metali ziem rzadkich, rud cyny, a nawet z popiołu z elektrowni węglowych.

International Atomic Energy Agency (IAEA) z siedzibą w Wiedniu, (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA)) jest światowym centrum współpracy w dziedzinie energetyki jądrowej, a jej misją jest propagowanie bezpiecznego, pewnego i pokojowego wykorzystania technologii nuklearnych. MAEA będąc agendą ONZ wspomaga Kraje Członkowskie w rozwoju zaawansowanych technologii reaktorów. Agencja pomaga przy wymianie informacji oraz współpracy międzynarodowej z tej dziedziny pomiędzy krajami członkowskim.

W ciągu ostatnich kilku lat wzrosło ponownie światowe zainteresowanie tematyką reaktorów pracujących na stopionych solach (molten salt reactors). Reaktor ze stopioną solą

(MSR) to klasa reaktorów rozszczepienia jądrowego, w których głównym chłodziwem i/lub paliwem reaktora jądrowego jest mieszanina stopionej soli z materiałem rozszczepialnym.

Reaktory wykorzystujące stopione sole pojawiły się w latach 60. XX wieku ale po kilku latach zostały uznane za gorsze rozwiązania niż uranowe reaktory wodne. Pomysł wykorzystania toru jako paliwa jądrowego został w przeszłości w dużej mierze porzucony, ponieważ rozwój energii jądrowej był związany z wojskowymi badaniami, mającymi w pierwszej kolejności doprowadzić do powstania bomby atomowej. Wymaganym materiałem był uran rozszczepialny oraz pluton (powstający w reaktorach uranowych).

Stopiona sól jako chłodziwo może pracować w wysokich temperaturach, co skutkuje wysoką wydajnością termodynamiczną. Sól pracuje przy niskim ciśnieniu pary, co zmniejsza skutki naprężeń mechanicznych w korpusie reaktora i rurociągach płynów, zwiększając bezpieczeństwo systemu. Przenoszenie ciepła przez stopioną sól jest bardzo wydajne, zatem projektowane reaktory mogą posiadać mniejsze rdzenie i prostszy system rurociągów. Dla pewnych rozwiązań paliwo, mieszanina fluorków sodu, cyrkonu i uranu, plutonu i toru – może być rozpuszczone w samym płynie chłodzącym.

Obecnie uważa się je za obiecującą technologię, głównie z powodu cyklu paliwowego torowego lub wykorzystania zużytego paliwa z reaktorów LWR.

Opracowywane są różne projekty, niektóre z nich wykorzystują neutrony termiczne (spowolnione), inne neutrony szybkie. Aktualnie istnieje na świecie kilkanaście różnych projektów MSR, z czego większość jest na etapie koncepcji, modelowania cyfrowego bądź budowy laboratoryjnego prototypu.

Nie należy mylić ciekłosolnych i jednocześnie ciekłopaliwowych konstrukcji z odmiennymi typami reaktorów wysokotemperaturowych (Fluoride High-temperature Reactors, FHR), w których paliwo występuje w postaci stałej i które chłodzone są ciekłymi solami.

Reaktory na stopioną sól należą do sześciu rodzajów reaktorów rekomendowanych przez Generation IV International Forum do dalszych badań i prac rozwojowych.

Międzynarodowe Forum Generacji IV (GIF) powstało jako kooperatywne przedsięwzięcie międzynarodowe pod egidą ONZ, mające na celu rozwijanie badań niezbędnych do testowania wykonalności i wydajności systemów jądrowych czwartej generacji (systemów Gen-IV) oraz udostępnienie ich do zastosowań przemysłowych do 2030 r. Generation-IV International Forum GIF rozpoczęło od 2014 r. prace porównawcze około 100 koncepcji reak-

torów proponowanych przez różne kraje. W wyniku wybrano sześć technologii reaktorów rekomendowanych do dalszych badań i rozwoju: reaktor prędkości chłodzony gazem (GFR), reaktor prędkości chłodzony ołowiem (LFR), reaktor na stopionych solach (MSR), reaktor prędkości chłodzony sodem (SFR), reaktor chłodzony wodą nadkrytyczną (SCWR) i reaktor bardzo wysokotemperaturowy (VHTR).

GIF ocenia, że technologie małych modularnych reaktorów oraz reaktorów na stopione sole będą miały przewagę nad reaktorami wodnymi w zagadnieniach bezpieczeństwa, eksploatacji, ochrony środowiska, ekonomii oraz nierozprzestrzeniania broni nuklearnej.

Kategoria reaktorów ciekłosolnych (Molten Salt Reactor, MSR) obejmuje reaktory konwencjonalne (spalające), jak i powielające, stosujące szybkie bądź spowolnione (termiczne) neutrony, z zastosowaniem soli fluorków lub chlorków oraz różnych kombinacji materiału rozszczepialnego i paliworodnego.

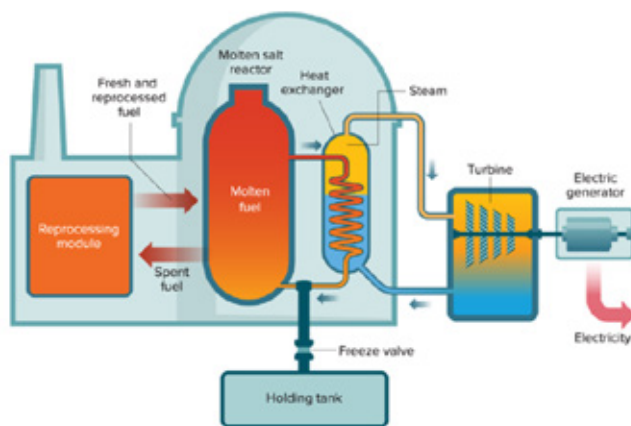
Wersją uznawaną obecnie za najbardziej obiecującą w kategorii reaktorów ciekłosolnych MSR, jest projekt LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor) oferujący wytwarzanie Uranu-233 z toru w solach fluorków z wykorzystaniem neutronów termicznych. (spowolnionych przez moderator).

Reaktor torowy z ciekłym fluorkiem (LFTR – Liquid Fluoride Thorium Reactor)

W obecnej chwili na świecie istnieje kilka wariantów koncepcji reaktora torowego z ciekłym fluorkiem będącym mieszaniną paliwa nuklearnego i chłodziwa. Jedną z możliwych wersji reaktora ciekłosolnego, najczęściej omawiana, ma pracować na paliwie w postaci ciekłej soli oraz powielać uran U-233 z toru występującego w chłodziwie wykorzystując termiczne (spowolnione) neutrony. Koncepcja ta oraz jej warianty są na etapie analiz, modelowania cyfrowego, bądź budowy prototypowych rozwiązań laboratoryjnych reaktorów o małej mocy. Nie istnieje jeszcze na świecie działający reaktor torowy o dużej mocy do zastosowań energetycznych.

W reaktorze LFTR, ze stopioną solą, paliwo nie występuje w postaci stałej (pastylek). Paliwo, czyli mieszanina toru z uranem U-235 lub plutonem Pu-239, rozpuszczane jest w ciekłej mieszaninie soli. Wytwarzanie energii jądrowej na bazie toru jest napędzane głównie przez rozszczepienie jądrowe izotopu uranu, wytwarzanego z pierwiastka płodnego toru. W czasie pracy reaktora chłodziwo, czyli stopione sole, uzyskują temperaturę rzędu 450 do 750 stopni. Klasyczne reaktory uranowe uzyskują temperatury rzędu 300 do 400 stopni, czyli niższą. Cechą charakterystyczną rozwiązań MSR jest zbiornik o dużej pojemności, umieszczony poniżej poziomu reaktora.

Energia, powstająca w wyniku rozszczepienia atomów uranu powstałego z toru, jest wykorzystywana do bezpośredniego podgrzewania stopionej soli. Do inicjacji przemiany w rozszczepialny uran tor potrzebuje czegoś jeszcze, swoistego "startera" zapoczątkowującego i pobudzającego reakcję. Takim inicjatorem może być, w niewielkich ilościach, ten sam uran 233U lub izotop 235U bądź też pluton 239Pu.



Rys. 10. Uproszczony schemat działania reaktora na stopionych solach [2]

Fig.10.Simplified diagram molten salt reactor [2]

W paliwie omawianych reaktorów jądrowych występują dwa rodzaje izotopów, które prowadzą do rozszczepienia. Pierwszym z nich jest występujący w niewielkich ilościach materiał rozszczepialny, który ulega rozszczepieniu (produkując też ciepło) pod wpływem bombardowania neutronami, czemu towarzyszy wywołanie dużej ilości energii i emisja dwóch lub trzech następných neutronów. Przykładowym materiałem rozszczepialnym (paliwem) są U-233, U-235 i Pu-239.

Drugi typem jest materiał zwany paliworodnym. Materiał paliworodny stanowią na przykład Th-232 (tor naturalny) i U-238 (uran naturalny). Ilość materiału paliworodnego w reaktorze znacznie przewyższa ilość rozszczepialnego paliwa, ale ten pierwszy nie ulega bezpośrednio rozszczepieniu. Musi najpierw wychwycić neutron, powstały w wyniku innego rozszczepienia, po czym staje się rozszczepialnym izotopem stanowiącym paliwo. Proces ten zwany jest powielaniem paliwa. Zachodzi on w każdym z typów reaktorów, ale współczesne reaktory termiczne na paliwo stałe (uran) nie są w stanie wytwarzać dostatecznej ilości paliwa z materiału paliworodnego, aby móc uzupełniać izotopy rozszczepialne w trakcie ich wypalania. Dzieje się tak, ponieważ reaktory, w których głównym paliwem jest uran-235 lub pluton-239, wykorzystują neutrony spowolnione. W cyklu życia neutronów w tych reaktorach, od wytworzenia ich w rozszczepieniu aż do wytworzenia kolejnego rozszczepienia, powstaje zbyt mało neutronów, by w kolejnym etapie wytworzyć co najmniej tyle samo rozszczepień.

W reaktorze, który wytwarza co najmniej tyle nowego paliwa, ile zużywa, nie trzeba dodawać nowego paliwa rozszczepialnego. Dodawane jest tylko nowe paliwo rozrodcze, które rozmnaża się do rozszczepialnego wewnątrz reaktora. Ten typ reaktora nazywa się reaktorem powielającym. Ten cykl może trwać do wyczerpania paliwa rozrodczego.

Neutrony są pochłaniane przez materiały obecne w rdzeniu takie jak moderator, elementy konstrukcyjne, chłodziwo oraz elementy reakcji rozszczepienia. Produkty rozszczepienia, zwłaszcza ksenon, które pochłaniają neutrony, muszą zostać usunięte z pracującego paliwa. Z tego powodu konieczne staje się okresowe usuwanie części zużytego paliwa, aby w to miejsce dołożyć paliwa świeżego.

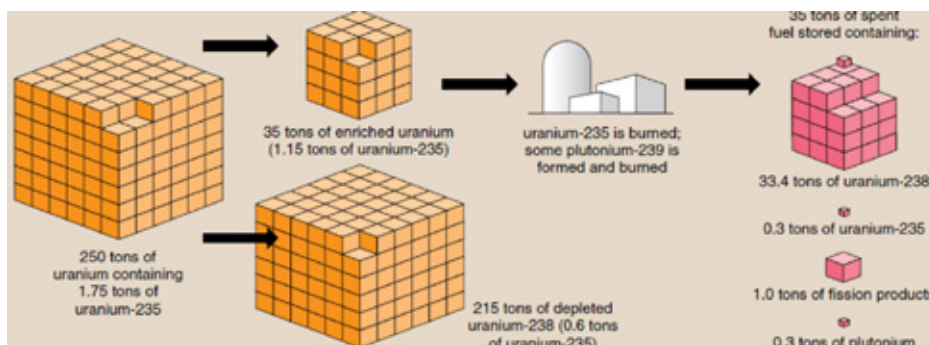
Olbrzymią zaletą reaktorów ciekłosolnych jest ich zdolność do bieżącego oczyszczania soli z izotopów, powstających w czasie reakcji rozszczepienia. Bieżące usuwanie produktów rozszczepienia z soli jest analogią do reprocessingu paliwa stałego ale bez konieczności zatrzymywania reaktora. Postać płynna paliwa LFTR w roztworze stopionych soli, umożliwia zastosowanie wysokotemperaturowej technologii piroprocessingu. Piroprzetwarzanie to proces, w którym materiały poddaje się działaniu wysokich temperatur, w celu wywołania zmiany chemicznej lub fizycznej. Uwolnione gazy (głównie He, Xe i Kr) są składowane przez ok. 2 dni, do czasu aż większa część Xe-135 i innych krótko żyjących izotopów ulegnie rozpadowi. Piroprocesing może być zastosowany wobec wysoce radioaktywnego materiału, bezpośrednio pobieranego z reaktora. Ta metoda umożliwi chemiczny przerób soli na miejscu, bez kłopotliwego transportu do zakładu przerabającego paliwo. Zakłada się, że piroprocessing przebiegać będzie w sposób ciągły na miejscu i podlegać mu będą codziennie niewielkie partie soli z regularnym oddawaniem ich na powrót do reaktora. Ważne szczególnie jest szybkie odprowadzanie ksenonu Xe-135, gdyż jest on bardzo silną trucizną neutronową (pochłaniającą neutrony), do tego utrudniającą sterowanie reaktorem. Uwolnione gazy (głównie He, Xe i Kr) są składowane przez ok. 2 dni do czasu, aż większa część Xe-135 i innych krótko żyjących izotopów ulegnie rozpadowi.

Gorąca sól chłodząca rdzeń reaktora jest następnie wykorzystywana w następnym obiegu do grzania wody, w celu uzyskania pary, która jest kierowana na łopatki turbiny napędzającej generator elektryczny. Ze względu na wyższe temperatury pracy, w porównaniu z klasycznymi reaktorami wodnymi, przewiduje się w przyszłości alternatywne wykorzystanie wytworzonej pary do celów technologicznych. Zaletą reaktorów ciekłosolnych, w porównaniu do klasycznych reaktorów, jest ich wyższa wydajność produkcji energii (ponieważ wydajność rośnie wraz z temperaturą). Efektywność wykorzystywania paliworodnego toru w mieszkach małosolnych w eksperymentalnych reaktorach powielających, według niektórych źródeł, przekracza 90%. Dla współczesnych klasycznych reaktorów jądrowych, pracujących na uranie, współczynnik ten wynosi około 2 proc. Ocenia się, że tona toru wyprodukuje tyle energii co 35 ton wzbogaconego uranu (wymagającego wydobycia 250 ton naturalnego uranu).

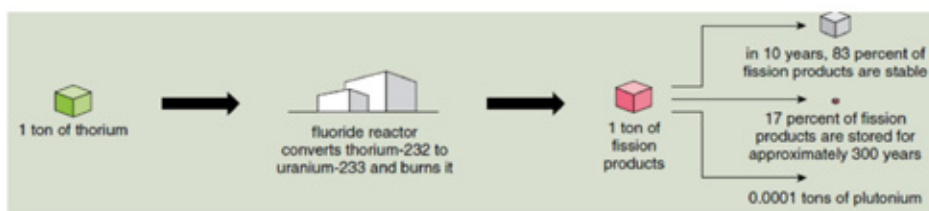
Ilość odpadów w reaktorach TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) jest 200 razy mniejsza niż w reaktorach klasycznych. W wyniku rozszczepienia toru, powstają jądra atomowe o mniejszej masie niż przy rozszczepieniu uranu lub plutonu i jest wśród nich więcej jąder trwałych. Odpady z reaktorów uranowych składają się z izotopów, takich jak jod, pluton i ameryk, które pozostaną radioaktywne nawet przez dziesięć tysięcy lat. Reaktory oparte na torze wytwarzają tysiąc razy mniej odpadów, choćby ze względu na wysoką wydajność, izotopy powstałe wskutek zachodzących w nich reakcji są promieniotwórcze o rząd wielkości krócej, czyli nie tysiące, a setki lat.

Istnieją dwie główne koncepcje konstrukcji reaktorów LFTR, mających powielać paliwo. Jedną to reaktor jednocieczowy, natomiast drugą to reaktor dwucieczowy.

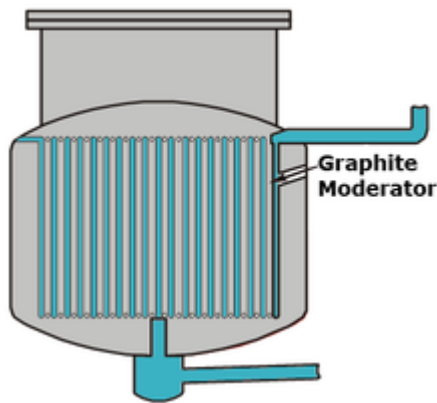
W reaktorze reaktor jednocieczowy materiał paliworodny (tor) i rozszczepialny są umieszczone razem ze sobą, skutkiem czego procesy powielania i rozszczepiania przebiegają w tym samym obszarze. Reaktor z pojedynczą cieczą, czyli „jednocieczowy”, jest konstrukcją prostszą, w porównaniu z dwucieczowym. Składa się on z obszernego zbiornika wypełnionego solami fluorków, z zawartymi w nich torem i uranem. W testowanej przez USA konstrukcji MSBR (molten salt breeding reactor) rolę moderatora pełniły grafitowe pręty zanurzone w solach, kierując zarazem przepływem soli. Koncepcja powielająca tego typu reaktor przewidywała złożone procesy przetwarzania paliwa, celem wydzielania „trujących” produktów rozszczepienia z soli zawierającej paliwo.



Rys. 11. Roczne zapotrzebowania na paliwo i wielkości odpadów w reaktorze LWR zasilanym uranem o mocy 1GW [14]
Fig. 11. Annual fuel requirements and waste products of a 1 GW uranium-fueled LWR. [14]



Rys. 12. Roczne zapotrzebowania na paliwo i wielkości odpadów w torowym reaktorze LFTR o mocy 1GW [14]
Fig. 12. Annual fuel requirements and waste products of a 1 GW thorium-fueled LFTR power plant. [14]



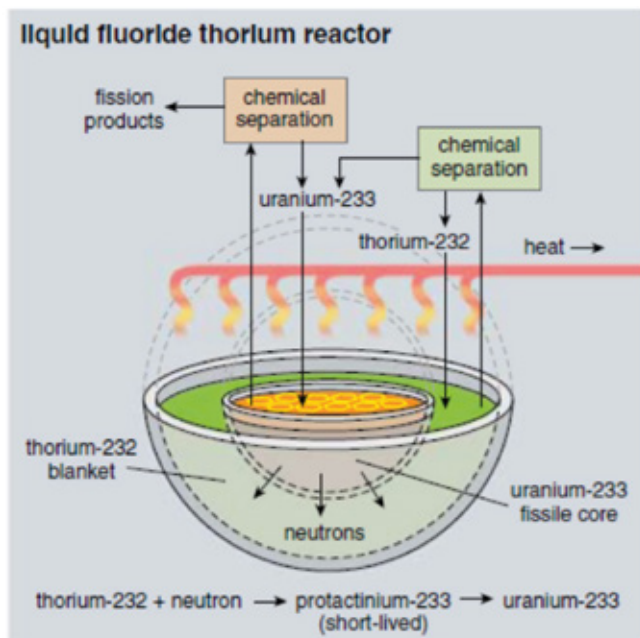
Rys.13. Uproszczony schemat reaktora jednocieczowego [14]

Fig. 13. Simplified schematic of a single fluid reactor. [14]

W koncepcji reaktora „dwucieczowego” (lub 2-cieczowego) materiał paliworodny jest oddzielony od rozszczepialnego. Taka wersja zwana jest konstrukcją rdzenia i płaszczu. Rozszczepienie paliwa i wytwarzanie ciepła zachodzi w środkowej części rdzenia, a w otaczającym go płaszczu zachodzą głównie procesy powielania.

W tym wariantcie w rdzeniu o dużej gęstości neutronów następuje rozszczepienie atomów uranu-233, wytworzonych w wyniku przemiany toru w uran.. Rdzeń składa się z rozszczepialnego U-233, rozpuszczonego w ciekłej soli litu i berylu płynącej przez strukturę grafitową, pełniącą rolę moderatora i reflektora neutronów.

W płaszczu soli torowej, oddzielonej fizycznie od rdzenia, następuje wchłonięcie neutronów, prowadząc do transmutacji toru w protaktyn-233. Protaktyn-233 pozostaje przez krótki czas w obszarze płaszczu, ulegając powolnemu rozpadowi na rozszczepialne paliwo U-233. Powielony izotop rozszczepialny U-233 zostaje chemicznie odseparowany od płaszczu soli, przy wykorzystaniu prostego procesu fluorowania, a następnie przetransportowany do rdzenia. W rdzeniu materiał ten jest spalany jako paliwo, wytwarzając ciepło oraz nowe neutrony przy rozszczepieniu. Wytworzone neutrony produkują nowe porcje paliwa w płaszczu i cykl się powtarza.



Rys. 14. Schemat reaktora „dwucieczowego” [14]

Fig.14. Simplified schematic of a two fluid reactor [14]

Reaktory torowe i ich bezpieczeństwo

Zagadnienia bezpieczeństwa instalacji procesowych są objęte normami IEC 61508 oraz IEC 61511, dotyczącymi bezpieczeństwa procesów oraz normą IEC 61513, dotyczącą zagadnień energetyki jądrowej.

Normy te definiują wymagany stopień ograniczenia ryzyka oraz zdolność systemu do ograniczania ryzyka (niezawodność układów sterujących do wykonywania poleceń związanych z bezpieczeństwem) przez podanie parametru SIL (ang. Safety Integrity Level) nazywanego poziomem nienaruszalności bezpieczeństwa.). Poziom nienaruszalności bezpieczeństwa jest zdefiniowany jako prawdopodobieństwo, że system związany z bezpieczeństwem wykona w sposób zadowalający wymagane funkcje bezpieczeństwa, we wszystkich określonych warunkach i w określonym przedziale. Norma 61511 definiuje cztery poziomy SIL. Poziom SIL 1 daje najmniejsze gwarancje poprawnego zachowania układu sterującego, w warunkach przywołania funkcji bezpieczeństwa, natomiast SIL 4 daje najwyższe gwarancje zadziałania.

Oceny związane z niezawodnością działania układów sterujących, zwłaszcza odpowiedzialnych za bezpieczeństwo, doprowadziły do wytworzenia pojęć aktywnych i pasywnych systemów bezpieczeństwa. Pojęcia te nie są odpowiednikami kategorii bezpieczeństwa czy wskaźników niezawodności działania (PL lub SIL), aczkolwiek dotyczą tych samych problemów. Aktywny system bezpieczeństwa to klasyczny układ, złożony z odpowiednich czujników, informujących o stanach procesu lub maszyny, układu logicznego przetwarzającego uzyskane informacje i podejmującego odpowiednie decyzje przesyłane do zespołów wykonawczych, realizujących wytworzone decyzje. W klasycznych układach podukłady całego łańcucha są zasilane energią z zewnątrz, najczęściej elektryczną. W przypadku uszkodzenia zasilania, cały układ odpowiedzialny za bezpieczeństwo, nawet jeśli jest wielokanałowy, redundancyjny, zawodzi, przestaje działać prawidłowo.

Metody pasywne zwiększania bezpieczeństwa polegają na zastosowaniu takich rozwiązań, które w sytuacjach niebezpiecznych nie wymagają działania układów elektrycznych czy elektronicznych, nie wymagają działania układów logicznych ani zasilających powstałe zagrożenie ani nie wymagają źródeł zasilania. W układach biernego bezpieczeństwa, w przypadkach zagrożenia, następują jednak pewne działania elementów układu bezpieczeństwa, jak zmiana otwarcie szczelin dławiących, zalanie układu, wprowadzenie prętów kontrolnych w rdzeniu reaktorów, itp.

Zastosowane w maszynach i instalacjach pasywne systemy bezpieczeństwa nie wymagają zasilania w energię elektryczną lub inną. Wykorzystuje się w nich zjawiska fizyczne, takie jak siła grawitacji, konwekcja naturalna lub zmiana właściwości niektórych materiałów wraz z temperaturą. Takie systemy bezpieczeństwa są bardziej niezawodne, w porównaniu z systemami aktywnymi. Prawdopodobieństwo zablokowania takiego systemu lub jego uszkodzenia jest bardzo małe.

W energetyce jądrowej, gdzie zagadnienia bezpieczeństwa są stawiane absolutnie priorytetowo, od wielu lat trwają prace nad tworzeniem układów, zapewniających bezpieczną pracę reaktorów. Podstawowe problemy, związane z bezpieczną pracą elektrowni jądrowej, sygnalizowane wcześniej, to awaryjne zatrzymanie reaktora, odbiór ciepła w czasie pracy normalnej oraz odbiór ciepła po zatrzymaniu reaktora a także zabezpieczenie przed wydostaniem się produktów radioaktywnych poza obszar elektrowni.

Awaryjne wyłączenie reaktora polega na zwolnienie procesu powielania neutronów, najczęściej przez wprowadzenie do reaktora prętów z borazonu zatrzymujących proces. Pręty awaryjne wykonane są z materiałów silnie pochłaniających neutrony lub (w nowszych rozwiązaniach) z materiałów słabiej pochłaniających neutrony, lecz rozmieszczonych w rdzeniu w zoptymalizowany sposób. Po wsunięciu (lub najczęściej zrzućeniu z elektromagnetycznych zaczepów) prętów awaryjnych do rdzenia reaktora, ustają w nim reakcje rozszczepień wymuszonych.

Odrębną sprawą stanowi natomiast chłodzenie rdzenia reaktora. W czasie normalnej pracy reaktora ciepło wydzielane w stosie jest odbierane przez wodę, (zwykłą lub ciężką), płynny metal (sód lub mieszanina ołowiu z bizmutem), stopione sole ewentualnie gaz (hel, dwutlenek węgla lub gaz dysocjujący). W reaktorach pierwszej i drugiej generacji do odbioru ciepła od stosu były stosowane aktywne układy chłodzenia.



Rys. 15. Przykład aktywnego systemu bezpieczeństwa [7]
 Fig.15. An example of active safety system [7]

W reaktorach, jak i innych obiektach procesowych, są stosowane zarówno aktywne jak i pasywne systemy bezpieczeństwa. Układy aktywne zawierają trzy lub cztery równoległe podukłady chłodzenia reaktora ze zbiornikami chłodziwa, pompami, i zaworami. Są to więc układy redundancyjne z funkcjami samonadzoru. Tylko jeden z kilku podukładów wystarcza do zalania rdzenia wodą i skutecznego chłodzenia. W przypadku awarii podukładu jego zadania przejmuje podukład równoległy. Układy aktywne wymagają jednak elektrycznych systemów zasilających (napędy pomp, zasilanie czujników, napędy zaworów, itp.). Wszystkie reaktory posiadają niezależne źródła energii elektrycznej, niezbędne do sterowania pracą reaktora. (awaryjne generatory elektryczne napędzane silnikami spalinowymi, baterie akumulatorów, hydroelektrownia). Wydarzenia w Fukushima pokazały, że awaryjne systemy zasilania w sytuacjach skrajnych również mogą przestać działać, co prowadzi do katastrofy obiektu.

W najnowszych typach pracujących reaktorów (reaktorach III generacji) coraz częściej są stosowane, poza aktywnymi systemami, również pasywne układy bezpieczeństwa. (głównie systemy awaryjnego chłodzenia rdzenia).

Pasywne bezpieczeństwo nie wymaga interwencji ani człowieka, ani urządzenia pośredniczącego.

Omawiane powyżej LFTR wysoki poziom bezpieczeństwa mają zawdzięczać głównie pasywnym rozwiązaniom systemów bezpieczeństwa. Poza systemami odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo, reaktory są chronione zgodnie z normą EN-61513 wielopoziomymi systemami zabezpieczeń. Nowoczesne reaktory jądrowe, wyposażone w zwielokrotniony system barier bezpieczeństwa, chronią przed uwolnieniem z obszaru reaktora materiałów radioaktywnych.

Bariery te tworzone są przez:

- osłonę pastylek paliwowych,
- oszulki paliwowe,
- obieg pierwotny chłodziwa wraz ze stalowym korpusem reaktora,
- żelbetonową obudowę bezpieczeństwa.

Cechy bezpieczeństwa przy stosowania toru jako paliwa jądrowego

Reaktory MSR eliminują scenariusz stopienia jądrowego występujący w reaktorach chłodzonych wodą, ponieważ mieszanina paliwowa jest utrzymywana w stanie stopionym. Mieszaną paliwową zaprojektowano tak, aby w sytuacjach awaryjnych spływała bez pompowania z rdzenia do zbiornika zabezpieczającego, gdzie paliwo krzepnie, zatrzymując reakcję. Ponadto nie zachodzi wydzielanie wodoru. Eliminuje to ryzyko eksplozji wodoru (jak w przypadku katastrofy nuklearnej w Fukushima). MSR wykorzystują ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności i duży dopuszczalny wzrost temperatury, aby zapobiec wypadkom krytycznym. W przypadku projektów z paliwem w soli, w przypadku wzrostu temperatury w reaktorze, sól rozszerza się natychmiast termicznie, zmniejszając intensywność rozszczepienia

Reaktory MSR działają pod ciśnieniem atmosferycznym lub blisko niego, a nie 75 do 150 razy większym niż ciśnienie atmosferyczne, w typowym reaktorze lekkowodnym (LWR). Zmniejsza to koszt zbiorników ciśnieniowych reaktora oraz systemu rurociągów oraz zdecydowanie zwiększa bezpieczeństwo obiektu.

Produkty rozszczepienia gazowego (Xe i Kr) mają niewielką rozpuszczalność w soli paliwowej i można je bezpiecznie wychwycić, gdy wydostają się z paliwa, zamiast zwiększać ciśnienie wewnątrz rurek paliwowych, jak ma to miejsce w konwencjonalnych reaktorach. Reaktory MSR można uzupełniać paliwem podczas pracy, gdy konwencjonalne reaktory są wyłączane, w celu uzupełnienia paliwa (godne uwagi wyjątki obejmują mało rozpowszechnione reaktory ciężkowodne z rurą ciśnieniową, takie jak CANDU lub PHWR klasy Atucha, oraz reaktory chłodzone gazem uruchomione w Wielkiej Brytanii, takie jak Magnox, AGR). Temperatury robocze MSR wynoszą około 700 °C (1292 °F), znacznie wyższe niż w przypadku tradycyjnych LWR w których wynoszą około 300 °C (572 °F). Zwiększa to efektywność wytwarzania energii elektrycznej.

Reaktory LFTR różnią się od innych pod niemal każdym względem, wykorzystują torowy cykl paliwowy, pracują przy niskim ciśnieniu chłodziwa, paliwo ma postać płynną, chłodziwem są stopione sole, umożliwiające wysokie temperatury eksploatacji, a uzupełnianie paliwa i wykorzystanie paliwa następują bez przerywania pracy reaktora.

Zalety reaktorów torowych

Jedną z najważniejszych zalet reaktorów torowych jest ich ujemna reaktywność. MSR mają duże ujemne współczynniki reaktywności temperatury. Wzrost temperatury, poza granicę projektową, powoduje rozszerzanie się soli paliwowej i zmniejszenie intensywności działania reaktora.

W części projektów LFTR są przewidziane w układzie tzw. korki przeciwzamrożeniowe. Są to specjalne spusty cieczy chłodzącej, dzięki którym, w przypadku powstania nadmiernych temperatur w reaktorze, następuje samoczynne temperaturowe zniszczenie korka. Otwarcie połączenia reaktora ze zbiornikiem zrzutowym powoduje grawitacyjne odpływ soli z obiegu. Odprowadzenie paliwa z rdzenia następuje w sposób samoczynny, bez udziału pomp i sygnałów z układu sterującego. Opróżnienie rdzenia z chłodziwa wymieszanego z paliwem skutkuje bezpiecznym przerwaniem pracy reaktora.

Projekt MSR często obejmują reaktory powielające z zamkniętym cyklem paliwowym. Rozwiązanie to jest przeciwieństwem paliwa jednorazowego, stosowanego obecnie w konwencjonalnych rozwiązaniach energii jądrowej.

Produkty przemiany toru praktycznie nie nadają się, w odróżnieniu od plutonu, do konstruowania broni atomowej. Teoretycznie jest to możliwe, ale wymaga dużej wiedzy i specjalistycznej, drogiej i skomplikowanej aparatury.

Tor stosowany jako paliwo w reaktorze z ciekłym fluorkiem toru, daje znacznie mniej, w porównaniu z paliwem uranowym, odpadów nuklearnych. Radioaktywność tych odpadów spada do bezpiecznego poziomu już po kilkunastu lub kilkuset latach, w przeciwieństwie do tysięcy lat promieniowania odpadów uranowych.

Ciekłosolne reaktory torowe spalając 99 proc. Paliwa, są praktycznie bezodpadowe. Technologie te mogą odegrać ogromną rolę w likwidowaniu cementarysk radioaktywnych odpadów, zmniejszając ilość niezbędnego paliwa oraz usuwając napromieniowane, promieniotwórcze elementy składowane w różnych miejscach naszego globu.

Problemy reaktorów torowych

W konstrukcjach z krążącym paliwem i solą radionuklidy reagują na urządzenia mające kontakt z paliwem, takie jak zbiorniki reaktora, pompy, rurociągi i wymienniki ciepła. Zespoły te wymagają zdalnej konserwacji.

Niektóre MSR wymagają obróbki chemicznej na miejscu, w celu zarządzania mieszaniną rdzeniową i usunięcia produktów rozszczepienia.

Przepisy regulacyjne, dotyczące rozwiązań tych reaktorów, w celu uwzględnienia nietradycyjnych cech konstrukcyjnych i sposobu działania, nie zostały jeszcze opracowane. Ich opracowanie będzie czasochłonne i pracochłonne.

Niektóre konstrukcje MSR, które zawierają stopioną sól, opierają się na drogich stopach niklu. Takie stopy są podatne na kruchość, pod wpływem dużego strumienia neutronów powstającego w rdzeniu.

Reaktory stosujące stopione sole wymagają precyzyjnego nadzoru nad stopniem utlenienia metalowych elementów konstrukcyjnych, aby zapobiec ryzyku ich korozji. Jest to szczególnie trudne w przypadku projektów z obiegiem, w którym mieszanina izotopów i produktów ich rozpadu krąży w reaktorze. Stwarza to dodatkowe problemy związane z trwałością zastosowanych elementów konstrukcyjnych.

Przegląd artykułów i literatury z 2020 r. pokazuje, że informacje na temat ekonomii i finansów MSR są bardzo ograniczone, jakość opracowań jest niska, a szacunki kosztów są niepewne

Historia rozwoju MSR

W latach 1964–1969 Amerykanie uruchomili w Oak Ridge National Laboratory reaktor MSR (Molten Salt Reactor) z paliwem w stanie płynnym. Były nim stopione sole (fluorki) toru, uranu lub plutonu. Testowy reaktor o mocy 7,4 MW wykazał możliwość ciągłego usuwania metodami chemicznymi z paliwa szkodliwych produktów rozszczepienia zwłaszcza ksenonu Xe-135. Płynne paliwo ułatwiało separowanie wytworzonego uranu

U-233 i umożliwiała pracę obiegów chłodzących w wysokich temperaturach (ok. 650°C).

W latach 1967 – 88 na paliwie torowym pracował w Niemczech prototypowy reaktor AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchs Reaktor). Jego moc termiczna wynosiła 46 MW, a elektryczna 15 MW. Paliwem były kule wielkości piłki tenisowej, wykonane z grafitu pyrolitycznego, który pełnił również funkcję moderatora. W kulach znajdowały się tysiące mikrokapsulek z materiałem rozszczepialnym w otoczce z węgla krzemu. Chłodziwo stanowił hel pracujący w temperaturze 950°C. Reaktor pracował ponad 750 tygodni na mocy 15 MW, w tym 95% czasu na paliwie torowym. Ogółem zużyto w nim 1360 kg toru, zmieszanego z wysoko wzbogaconym uranem.

W Niemczech w latach 1983–1989 pracował także reaktor THTR-300. Chłodzenie i paliwo miały podobne jak w AVR. Od 1985 r. dostarczał prąd do sieci, został jednak zatrzymany w wyniku krytyki energii jądrowej po katastrofie w Czarnobylu.

Niemcy prowadzili również eksperymenty, z wykorzystaniem toru w reaktorach lekkowodnych, m.in. w 60-megawatowym reaktorze wrzącym w Lingen.

Amerykanie w latach 1977–1982 przeprowadzili udany eksperyment z paliwem torowym, w reaktorze wodnym ciśnieniowym (PWR, 60 MW) w Shippingport, USA. Reaktor przepracował 29 tys. godzin na pełnej mocy. Po badaniach wypalonego paliwa okazało się, że po zakończeniu pracy w rdzeniu znajdowało się 1,39% więcej materiału rozszczepialnego (uranu U-233) niż na początku, czyli nastąpiło powielenie.

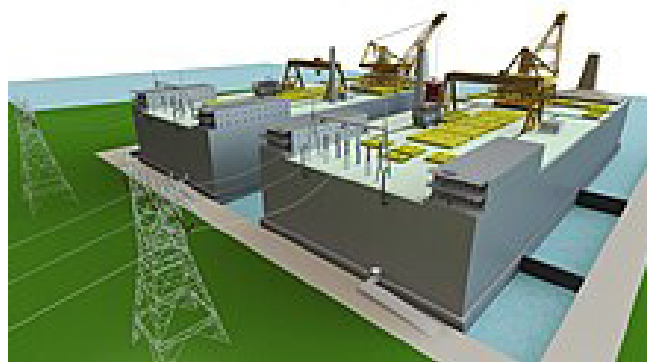
Kanada ma ponad pół wieku udanych doświadczeń z paliwem torowym. Tylko do 1987 r. przeprowadzono tam ok. 25 testów w trzech reaktorach badawczych i jednym prototypie komercyjnym. Stosowano paliwo będące mieszaniną toru i wysoko wzbogaconego uranu (1–30% UO₂).

Indie, mające duże złoża monocytyw czyli surowca zawierającego tor, prowadzą zakrojone na szeroką skalę eksperymenty z reaktorami torowymi. Hindusi korzystają z technologii reaktora ciężkowodnego PHWR, wzorowanego na kanadyjskim reaktorze CANDU i charakteryzującego się znakomitą ekonomią wykorzystania neutronów. Do końca 2025 r. planowane jest uruchomienie eksperymentalnego reaktora prędkiego na paliwie torowym w Kalapakkam. Reaktor ma mieć moc 500 MWe.

W Chinach pracuje się intensywnie nad technologią ciekłosolnych reaktorów torowych, TMSR (Thorium-based Molten Salt Reactor). Plany wdrożenia komercyjnego reaktorów torowych w Chinach uległy ostatnio przyspieszeniu. Zbudowany w 2018 r. w mieście Wuwei (prowincja Gansu) eksperymentalny reaktor o mocy 2MWt, miał być oddany do użytku w roku 2024, ale termin udało się skrócić o dwa lata. W związku z tym należy oczekiwać, że kolejne jego wersje, 10 MW i 100 MW powstaną o kilka lat wcześniej niż to pierwotnie zakładano, a więc najpóźniej za dekadę.

Tor był testowany jako paliwo w innych typach reaktorów jądrowych w krajach takich jak USA, Niemcy, Holandia i Wielka Brytania. We Francji badania są prowadzone przez CNRS, który rozwija projekt o nazwie MSFR (od Molten Salt Fast Reactor), wykorzystujący tor.

Zaawansowany projekt reaktora na stopione sole z moderatorem grafitowym przedstawiła amerykańska firma Thorcon. Prototyp o mocy wyjściowej 500 MW (TMSR-500) powinien zostać uruchomiony w Indonezji do 2029 r. Koncepcja jest dokładnie oparta na rozwiązaniu reaktora pracującego na stopionej soli w Oak Ridge National Laboratory w latach sześćdziesiątych. Reaktor ma być częścią pływającej barki, produkowany na linii montażowej w stoczni i dostarczany drogą żeglowną do dowolnego miejsca przeznaczenia, tam barka ma być osadzana w płytkim miejscu na dnie. Elektrownia miałaby zawierać dwa małe modułowe reaktory o mocy 250 MWe. Wymienne reaktory mają być wyjmowane i wymieniane co cztery lata.



Rys. 16. Projekt prototypowej elektrowni jądrowej Thorcon 500 [15]

Fig. 16. Project of prototype nuclear power plant Thorcon 500 [15]

LFTR stał się ostatnio przedmiotem odnowionego zainteresowania na całym świecie. Japonia, Chiny, Wielka Brytania oraz prywatne firmy z USA, Czech, Kanady i Australii wyraziły zainteresowanie zastosowaniem omówionych rozwiązań.

LITERATURA

- [1] Dolan Thomas j: Molten Salt Reactors and Thorium Energy, Woodhead Publishing Series in Energy 8.
- [2] Hargraves Robert and Moir Ralph: Liquid Fluoride Thorium Reactors, American Scientist, Volume 9.
- [3] International Atomic Energy Agency. 2005: Thorium fuel cycle: Potential benefits and challenges. IAEA-Teedoc-1450 Technical reports series No. 489
- [4] Kramarek W., Salaciński T. 2013. „Podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa elektrowni jądrowej”, *Przegląd Techniczny* nr 21,22, 23,24.
- [5] Kramarek W. 2016. „Warunki bezpiecznej pracy elektrowni jądrowej”, *Mechanik*, styczeń.
- [6] Safety Classification of Passive Nuclear Power Plant Electrical Systems Topical Report. TR-0815-16497-NP-A. Rev.
- [7] Status of molten salt reactor technology. International Atomic Energy Agency.
- [8] <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor>.
- [9] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=User:Stodtmeiste>.
- [10] <https://energiatanej.com.pl/czym-jest-farma-fotowoltaiczna-i-jak-dziala>.
- [11] <https://nukleo.pl/rozdzial/paliwo-jadrowe/>
- [12] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>
- [13] https://pl.wikipedia.org/wiki/Cykl_paliwowy
- [14] https://pl.wikipedia.org/wiki/Reaktor_torowy_na_cieklych_fluorkach
- [15] <https://thorconpower.com/a>