

Energetyka jądrowa – konieczność, a nie zagrożenie

Roman Domański

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono w skrócie potrzeby energetyczne świata, podział zużycia energii pierwotnej z punktu widzenia paliw oraz 3 podstawowe scenariusze rozwoju świata prezentowane przez Międzynarodową Agencję Energii. Omówiono podstawowe procesy dotyczące wytwarzania energii jądrowej i jej konwersji na energię wewnętrzną. Przedstawiono najważniejsze typy reaktorów jądrowych podając ich podstawowe parametry pracy. W posumowaniu przedstawiono zasadnicze wnioski.

Słowa kluczowe: promieniowanie, rozpad promieniotwórczy, reaktor jądrowy, chłodziwo, moderator, moc cieplna, moc elektryczna, awaria, obieg parowy, paliwo jądrowe, sprawność

Wprowadzenie

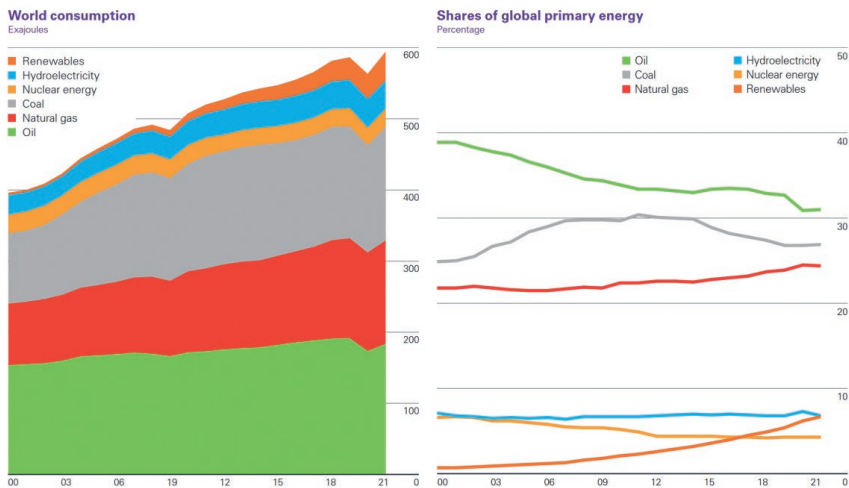
Dostęp do energii w różnych formach jest wymogiem rozwoju współczesnego świata. Bezpieczeństwo energetyczne powinno być zapewnione nie tylko lokalnie, ale także dla poszczególnych krajów, a nawet, jak widać z ostatnich sytuacji, dla kontynentów.

Z pojęciem bezpieczeństwa energetycznego związany jest dostęp do energii pierwotnej – do paliw kopalnych, w tym także paliw organicznych. Obecny kryzys polityczny oraz wojna na Ukrainie pokazuje, jak silnie gospodarka i bezpieczeństwo energetyczne krajów zależne są od kontraktowanych paliw organicznych i bezpiecznego ich przesyłania.

Z tego doświadczenia wynika, że powinniśmy, tak jak to mówi wielu specjalistów, sięgać po rozwiązania wykorzystujące paliwa jądrowe, które są zdecydowanie mniej zależne od przepływu paliw organicznych. W ocenie bezpieczeństwa energetycznego świata należy brać także pod uwagę fakt wyczerpywania się określonych paliw organicznych. Występuje konieczność zbudowania nowych scenariuszy rozwoju energetycznego świata. Muszą być one oparte na powiązaniu odnawialnych źródeł energii z bardzo stabilną, pracującą w bazie energetycznej energetyką jądrową i to nie tylko wielką energetyką jądrową, ale z szeregiem małych modularnych reaktorów jądrowych.

W celu zrozumienia procesów konwersji energii i metod jej wykorzystania w przyszłości należy rozpocząć od informacji o zużyciu energii pierwotnej w ostatnich latach, poprzednich i zawartych w obecnych scenariuszach.

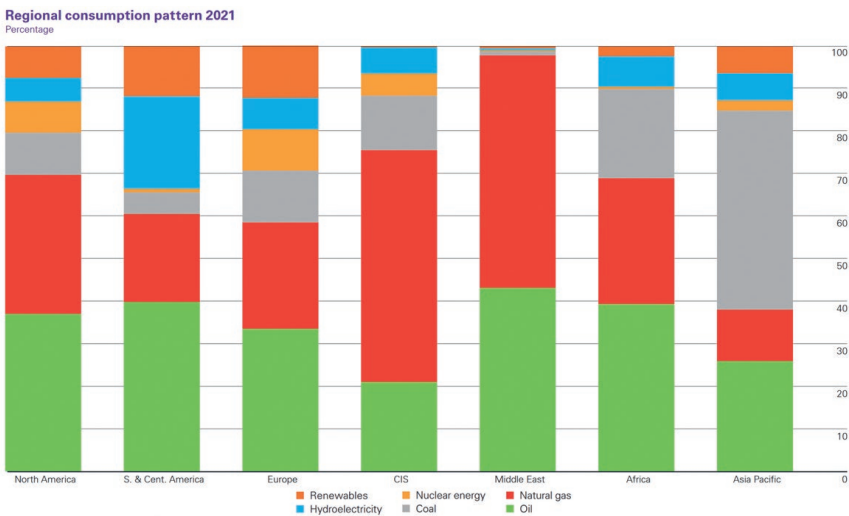
Na rycinie 1 przedstawiono zużycie energii pierwotnej od roku 2000 do roku 2021. Na wykresie widać wpływ pandemii na zużycie energii.



Ryc. 1. Zużycie energii pierwotnej na świecie w Exajoulach i procentowo

Źródło: *bp Statistical Review of World Energy 2022*

Z przedstawionych danych wynika, że po stronie źródeł pierwotnych mamy pełną dominację paliw organicznych kopalnych. Na kolejnej rycinie (ryc. 2.) przedstawiono zużycie energii pierwotnej z różnych źródeł w podziale na regiony świata.



Ryc. 2. Zużycie paliw pierwotnych w regionach

Źródło: *bp Statistical Review, bp Energy Outlook 2022*

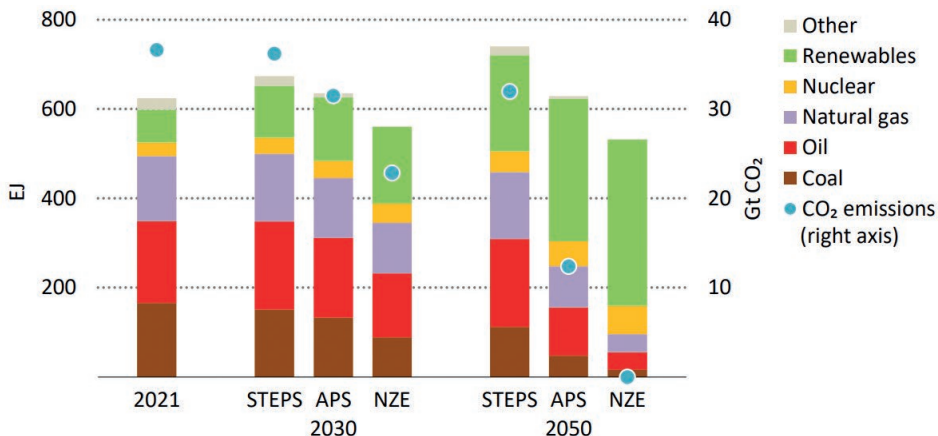
Z danych przedstawionych na rycinie 2 wynika, że wykorzystanie energii jądrowej jest bardzo zróżnicowane. Warto zauważyć pełną dominację węgla (CIS i Middle East).

W ramach prac wielu organizacji rządowych i pozarządowych przygotowano są wielowariantowe scenariusze rozwoju energetycznego świata, czasami bardzo zróżnicowane. W najnowszym *World Energy Outlook 2022* uwzględniono skutki pandemii i sytuację związaną z politycznym ograniczeniem dostępu do źródeł kopalnych organicznych, przedstawiono trzy bardzo zróżnicowane scenariusze rozwoju do roku 2050, oparte na różnych wizjach rozwiązania obecnego kryzysu. W scenariuszu **Stated Policies Scenario** (STEPS), rozważa się, jak zmieni się system energetyczny jeżeli utrzymane zostaną obecne uwarunkowania i ustalenia polityczne. W scenariuszu **Announced Pledges Scenario** (APS), zakłada się realizację przyjętych przez rządy zobowiązań w obszarze polityki klimatycznej, energetycznej, dostępu do energii. Scenariusz **Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario** zakłada jako główny cel ograniczenie globalnego ocieplenia do konkretnej wartości 1,5°C. Szczegółowy opis scenariuszy można znaleźć na stronach 29–32 (*IEA World Energy Outlook 2022*).

Jak wynika z rycin 3 i 4 scenariusze są bardzo zróżnicowane, a udział energetyki jądrowej nawet w scenariuszu NZE jest zadziwiająco mały. Z przedstawionych danych wynika, że udział energii odnawialnej wzrasta bardziej niż jakiegokolwiek inne źródło energii w każdym scenariuszu; Emisje CO₂ utrzymują się na obecnym poziomie w STEPS do 2030 r., ale spadają o 14% w scenariuszu APS. Przedstawione scenariusze na rok 2050 są dość dyskusyjne, szczególnie scenariusz NZE, który zakłada pełną dominację źródeł odnawialnych. Realizacja takiego scenariusza wymaga nie tylko ogromnych nakładów finansowych, ale także budowy wielkiej liczby magazynów energii lub dodatkowych mocy w bazie energetycznej uruchamianych w przypadku braku wytwarzania energii w układach fotowoltaicznych i wiatrowych. Nasuwa się pytanie, jakie będzie źródło energii w tych układach dodatkowych? Jak można stwierdzić na podstawie danych z *Electricity Maps* są dni, w których źródła odnawialne praktycznie nie dostarczają energii w danym kraju (Niemcy) lub regionie. Miarą bezpieczeństwa energetycznego jest nie tylko moc zainstalowana, ale realna produkcja energii elektrycznej dopasowana do potrzeb. Tak więc wydaje się, że rola energetyki jądrowej (bardzo stabilnego źródła energii) jest niedoceniana, szczególnie w horyzoncie czasowym do roku 2050.

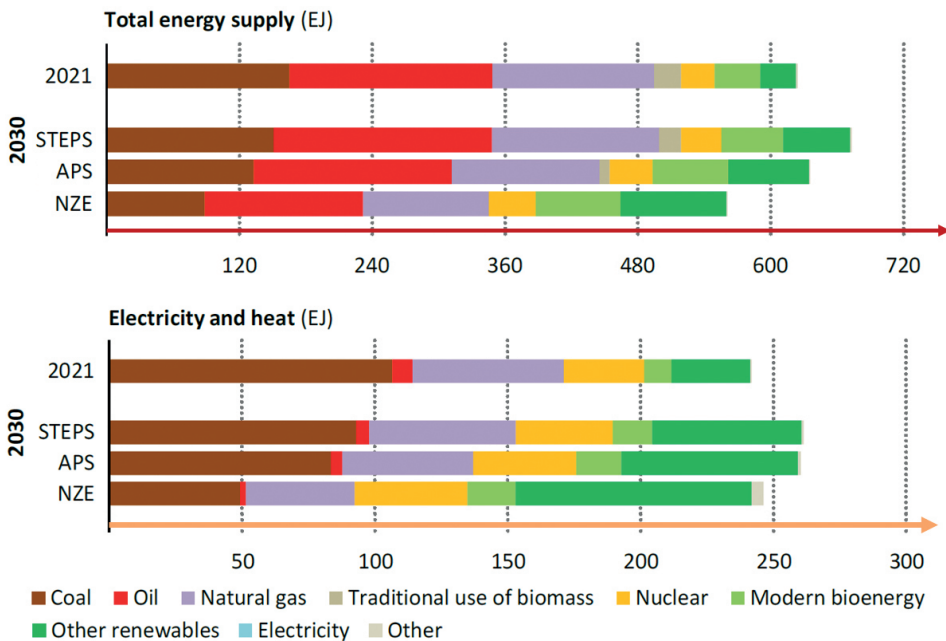
W *Outlook 2022* przedstawiono także emisję CO₂ przy produkcji energii elektrycznej z różnych źródeł. Jak wynika z danych przedstawionych na rycinie 5 emisja przy wykorzystaniu źródeł jądrowych jest najniższa i to źródło energii powinno być wdrażane.

Przewaga siłowni jądrowych jednoznacznie wynika z wartości współczynnika wykorzystania mocy. Bowiem z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego w tym „blackoutów” istotna jest nie moc zainstalowana, ale zdolność realna do produkcji energii elektrycznej. Na rycinie 6 przedstawiono dane opublikowane w lutym 2020 przez U.S. Energy Information Administration z okresu prawie dwóch lat dotyczące współczynnika wykorzystania mocy dla różnych użytkowych generatorów energii oraz ich udziału w bilansie dostarczanej mocy. Z danych wynika, że energetyka jądrowa ma ogromną przewagę nad innymi źródłami, w tym szczególnie źródłami odnawialnymi.



Ryc. 3. Całkowita podaż energii wg paliw i emisja CO₂ wg poszczególnych scenariuszy
 Uwaga: EJ = exajoule; Gt CO₂ = gigatonnes of carbon dioxide; STEPS = Stated Policies Scenario;
 APS = Announced Pledges Scenario; NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario

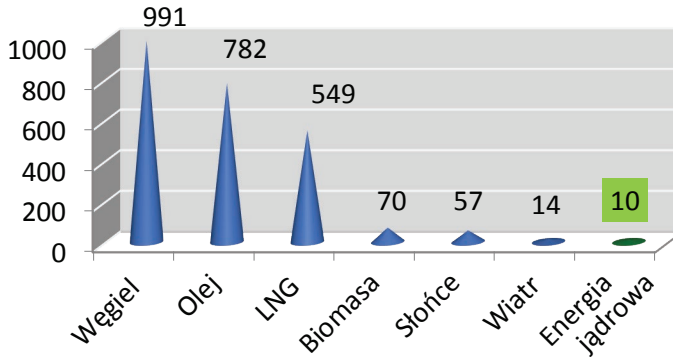
Źródło: World Energy Outlook 2022



Ryc. 4. Globalna podaż i popyt na energię całkowitą oraz energię elektryczną i ciepło wg scenariuszy i paliw

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Energy Outlook 2022

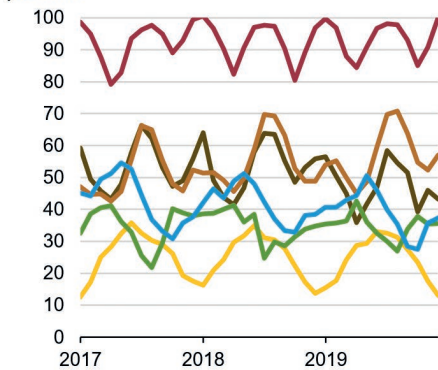
Emisja CO₂ przy produkcji energii elektrycznej (g/kWh)



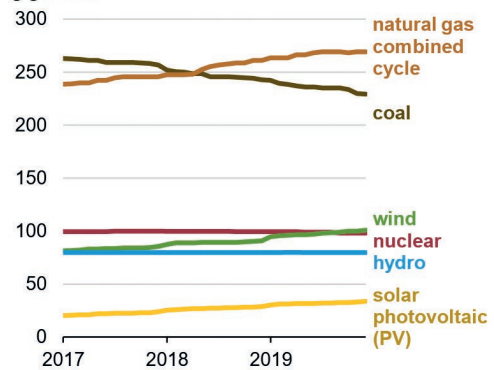
Ryc. 5. Emisja CO₂ przy produkcji energii elektrycznej g/kWh
Źródło: IAEA

EIA expands data on capacity and usage of power plants, electricity storage systems

Monthly capacity factors for select utility-scale generators (Jan 2017– Dec 2019)



Monthly time-adjusted capacity (Jan 2017– Dec 2019)



Ryc. 6. Zmiany współczynnika wykorzystania mocy w % i moc dostarczana w GW w USA
Źródło: U.S. Energy Information Administration, *Electric Power Monthly*

W 2018 r. współczynnik wykorzystania mocy w amerykańskich elektrowniach jądrowych osiągnął wartość 92,6 % [US EIA, 2020].

Na kolejnej rycinie (ryc. 7.) przedstawiono w uproszczeniu Mity i Prawdę o energetyce jądrowej.



Ryc. 7. Prawda i mity dotyczące energetyki jądrowej

Źródło: opracowanie własne

Rycina 7 przedstawia najbardziej rozpowszechnione zarzuty stawiane energetyce jądrowej bez dyskusji o realnych wielkościach promieniowania, skażenia, ich rzeczywistych skutków na tle innych zagrożeń od katastrof przemysłowych, działań militarnych i katastrofach naturalnych.

W dalszej części opracowania zostaną przedstawione bardziej szczegółowo zalety energetyki jądrowej, podstawowe typy reaktorów energetycznych i ich warunki pracy.

Podstawy teoretyczne konwersji jądrowej

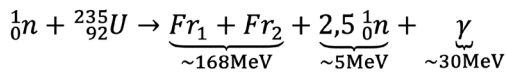
Konwersja energii jądrowej na inne formy energii może opierać się na dwóch podstawowych zjawiskach jądrowych. Na zjawisku fuzji nuklearnej lub na zjawisku rozszczepienia atomu przez cząstkę materialną o odpowiedniej energii.

Pierwsze zjawisko dotyczy połączenia w odpowiednich warunkach 2 lekkich atomów i uzyskania produktu, którego masa jest mniejsza niż masa produktów wejściowych do reakcji jądrowej. Fuzja nuklearna w chwili obecnej nie jest realizowana w realnych układach do generacji energii użytkowej, lecz jedynie potrafimy ją wykorzystać do celów destrukcyjnych – patrz bomby jądrowe fuzyjne.

Drugie zjawisko pozwalające na konwersję energii jądrowej na inne formy energii to proces rozszczepienia atomów o dużej masie w wyniku uderzenia ich przez neutron o określonej energii.

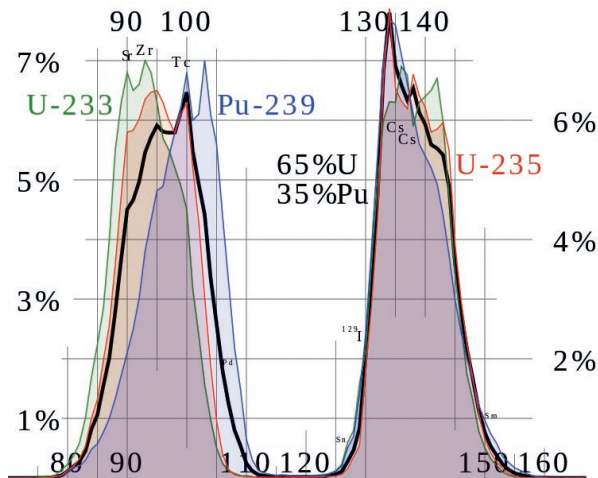
W procesach rozszczepienia możemy jako element aktywny, uderzający w jądro wykorzystywać neutrony o różnych energiach. W praktyce stosujemy procesy oparte na grupie neutronów termicznych i na grupie neutronów prędkich, a więc neutronów o większych energiach. Ogólny proces rozszczepienia przedstawiony jest na rycinie i opisany równaniem (Fr_1 , Fr_2 – fragmenty rozszczepienia). Należy zwrócić uwagę na fakt, że proces ten może być sterowany przez odpowiedni wychwyty neutronów, co zapobiega niekontrolowanemu jego przebiegowi. Szczegółowe informacje na temat budowy atomu, promieniotwórczości naturalnej i sztucznej, procesów rozszczepienia można znaleźć w wielu pracach, w tym np. w pracach Strupczewskiego [1990], Domańskiego [2022].

Ogólną postać zależności opisującej proces rozszczepienia przedstawia równanie



Elektronowolt (eV) – energia, którą uzyskuje elektron przechodząc przez pole elektryczne o różnicy potencjałów 1 wolt: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

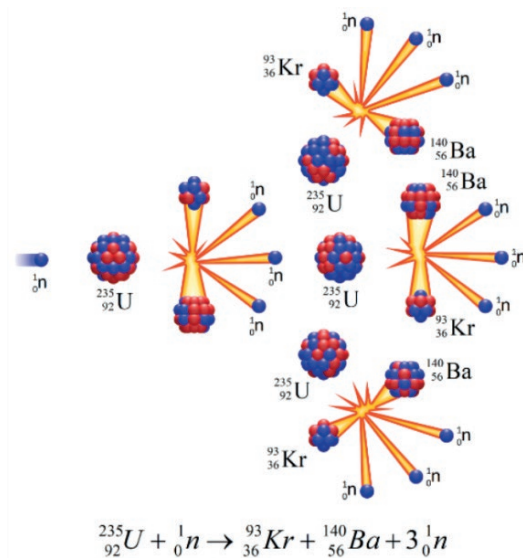
Rozkład masowy fragmentów rozszczepienia neutronami o energii 1,5 MeV dla 3 różnych materiałów rozszczepialnych przedstawiono na rycinie 8. Jak widać masy produktów rozszczepienia są zróżnicowane.



Ryc. 8. Rozkład masowy fragmentów rozszczepienia neutronami o energii 1,5 MeV dla 3 różnych materiałów rozszczepialnych z ryc. 10

Źródło: plik Thermal Fission Yield.svg, Wikimedia Commons

W przypadku niekontrolowanego procesu rozszczepienia atomów może dojść do reakcji łańcuchowej przedstawionej na rycinie 9.



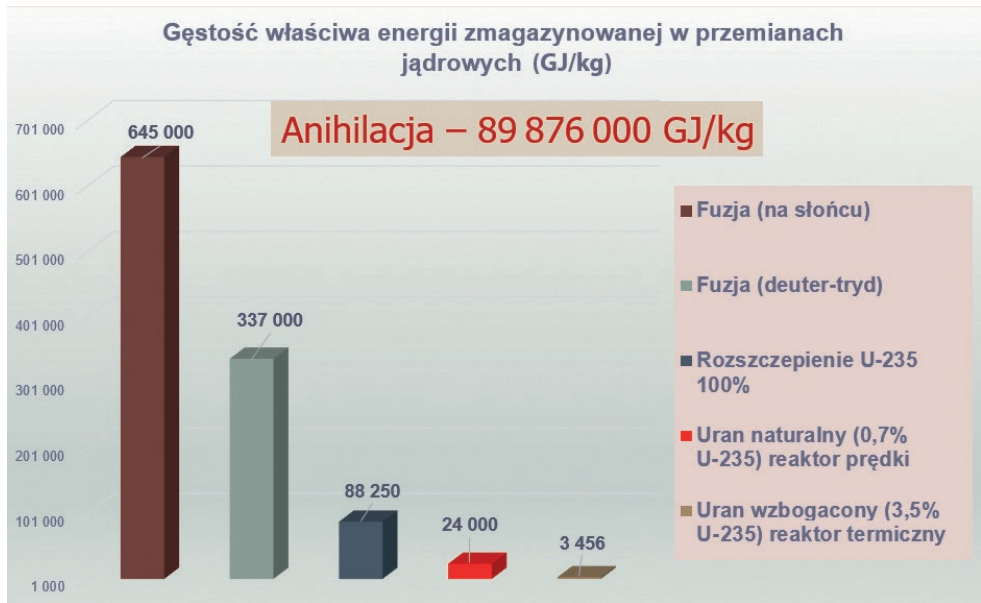
Ryc. 9. Reakcja łańcuchowa dla uranu 235
 Źródło: Domański 2022

Do zajścia reakcji łańcuchowej potrzebna jest **Masa Krytyczna** (definicja masy krytycznej jest podawana w każdym podręczniku z fizyki jądrowej i bardzo wielu opracowaniach, np. Wikipedii, ale warto ją przypomnieć). **Masa krytyczna** materiału rozszczepialnego – minimalna masa, w której reakcja rozszczepienia przebiega w sposób łańcuchowy. Każde jedno rozszczepienie jądra atomowego inicjuje dokładnie jedno następne rozszczepienie (patrz ryc. 9). W masie mniejszej od masy krytycznej reakcja zainicjowana rozszczepieniem spontanicznym wygaśnie, w masie która jest większa od masy krytycznej reakcja będzie przebiegała w sposób lawinowy, ilość rozszczepień będzie wzrastała lawinowo. To znaczy, że jedno rozszczepienie wywoła kolejno więcej niż jedno rozszczepienie. W materiale rozszczepialnym reakcja rozszczepienia może zajść w wyniku samorzutnego rozszczepienia jądra atomowego. W wyniku tego procesu rozszczepienia emitowanych jest kilka neutronów; część z tych neutronów może opuścić materiał, część zostanie pochłonięta przez jądra nieulegające rozszczepieniu, a tylko niektóre wywołają rozszczepienie następnego jądra. Tak więc masa krytyczna materiału rozszczepialnego zależy od zanieczyszczeń danego materiału, geometrii próbki oraz od jej otoczenia i jego ukształtowania. Najmniejszą masę ma oczywiście próbka o kształcie kuli otoczonej materiałem odbijającym i moderującym neutrony. Masa krytyczna dla kuli, nieotoczonej innymi substancjami, dla czystego izotopu

uranu 235 wynosi 52 kg, dla uranu 233 ma wartość 16 kg, zaś dla plutonu (238 i 239) jest to 10 kilogramów. W reaktorze jądrowym ilość materiału rozszczepialnego przekracza masę krytyczną, ale jego rozkład w przestrzeni, pręty pochłaniające, osłony zapewniają możliwość prowadzenia gospodarki neutronowej i kontrolowanie procesów rozszczepienia przy jednoczesnej kontroli rozkładu przestrzennego i czasowego neutronów i prowadzenia w sposób właściwy procesu wypalenia paliwa jądrowego.

Należy pamiętać, że procesy rozszczepienia mogą być efektywnie prowadzone przez neutrony o różnych energiach.

Procesy jądrowe pozwalają na uwolnienie ogromnych energii z jednostki masy określonego paliwa jądrowego. Porównanie gęstości energii uwalnianej w przemianach jądrowych i akumulowanych w paliwach i układach do magazynowania energii (zebrane i porównane z szeregu prac) przedstawiono na rycinach 10 i 11 [Domański 2022].



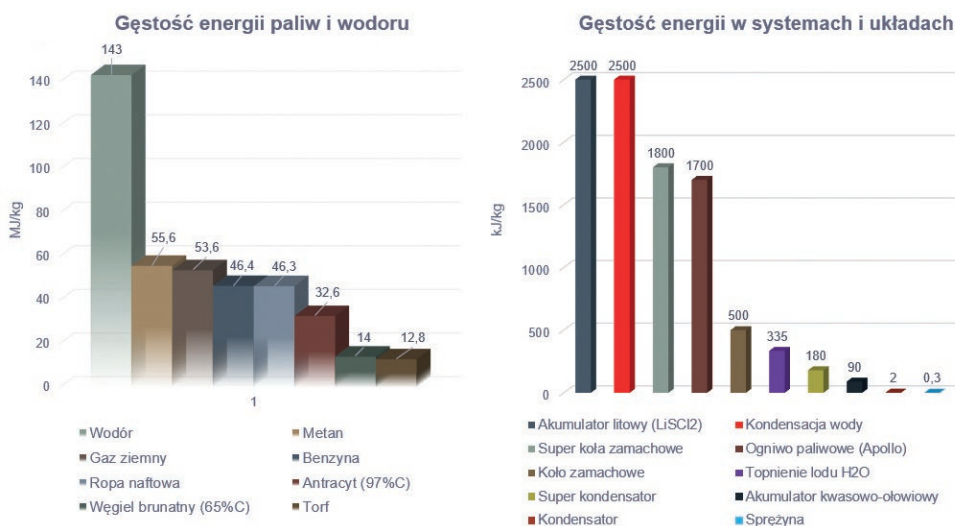
Ryc. 10. Akumulacja energii w przemianach jądrowych

Źródło: Domański 2022

Z przedstawionych danych wynika, że przemiany jądrowe dostarczają nieporównanie więcej energii z jednostki masy.

Energia przemian jądrowych zachodzących w paliwie jest konwertowana lokalnie w skali mikro na energię wewnętrzną. Powstaje objętościowe źródło ciepła o bardzo dużej gęstości mocy. Energia wewnętrzna generowana w paliwie (w elemencie paliwowym) jest przekazywana z wnętrza tego elementu na zewnątrz do jego powierzchni na drodze procesów przewodzenia ciepła. Z powierzchni elementów paliwowych

odbierana jest przez czynnik chłodzący w procesach konwekcji wymuszonej, bardzo rzadko w procesach konwekcji swobodnej. Najbardziej istotnym elementem jest utrzymanie równowagi na powierzchniach elementów paliwowych, tak, aby ich temperatura nie przekroczyła dopuszczalnych wartości i nie nastąpiło uwolnienie produktów rozpadu promieniotwórczego do czynnika chłodzącego. Energia wewnętrzna czynnika chłodzącego przekazywana jest następnie do układu konwersji energii wewnętrznej na energię kinetyczną makroskopową, a następnie na energię elektryczną w układzie generatora. Bardzo istotnym elementem jest kontrolowanie procesu równowagi energii wytwarzanej w elementach paliwowych (ten proces kontrolujemy przez odpowiednie zmiany strumienia neutronów – pręty regulacyjne, w skrajnych wypadkach przez pręty bezpieczeństwa) i energii odbieranej przez chłodziwo. W klasycznych reaktorach odbywa to się na drodze ogrzewania czynnika lub jego odparowania. Współczynniki przejmowania ciepła na powierzchniach elementów paliwowych bardzo się różnią w procesach konwekcji wymuszonej i w procesach wrzenia (kilkunastu do ponad 100 tys. W / (m²K)), dlatego też należy kontrolować starannie procesy wrzenia, aby nie nastąpiło odsłonięcie powierzchni elementu paliwowego i temperatury nie przekroczyły dopuszczalnych temperatur pracy [Domański 2019].



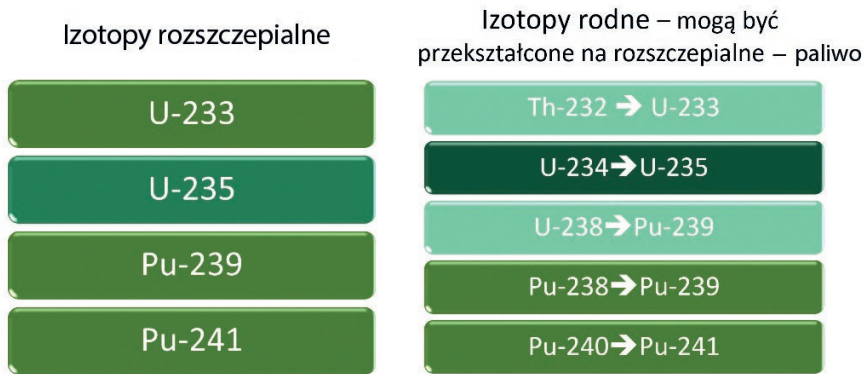
Ryc. 11. Gęstości energii dla wybranych paliw oraz układów do akumulacji energii

Źródło: Domański 2022

Zagrożenia związane z energetyką jądrową wynikają przede wszystkim z możliwości wydostawania się produktów rozszczepienia z rdzenia reaktora do otoczenia. Awaryjne w elektrowniach jądrowych łączą się najczęściej z zakłóceniami w przepływie chłodziwa lub całkowitą utratą chłodziwa zmniejszającymi odbiór ciepła od paliwa

lub niekontrolowanym wzrostem mocy reaktora uniemożliwiającymi skutecznie odprowadzanie ciepła. W skrajnych przypadkach może nastąpić stopienie rdzenia reaktora. W razie takiej awarii konieczne jest błyskawiczne (możliwie szybkie) przerwanie reakcji rozszczepienia, co obniży ilość wytwarzanej energii i włączenie dodatkowych systemów chłodzenia. Zadanie to spełnia układ prętów silnie pochłaniających neutrony, które są wprowadzone do rdzenia, wychwytyjąc je i wygaszając reakcję łańcuchową. W reaktorach z moderatorem wodnym, jak już powiedziano, istnieje sprzężenie zwrotne zapewniające obniżenie mocy reaktora, przy wystąpieniu istotnego przegrzewu wody. W dalszej części opracowania zostaną przedstawione najbardziej powszechne reaktory energetyczne i badawcze.

Na rycinie 12 przedstawiono izotopy rozszczepialne i izotopy rodne, które mogą być przekształcone na paliwo jądrowe.

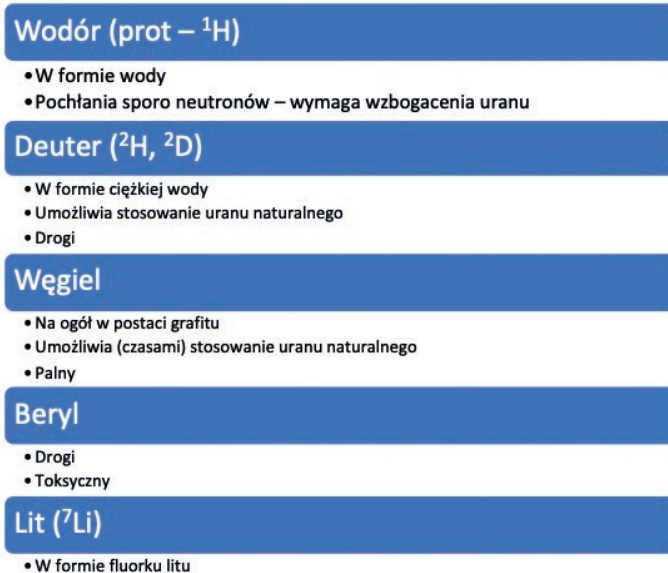


Ryc. 12. Wykaz izotopów rozszczepialnych i izotopów rodnych
 Źródło: opracowanie własne

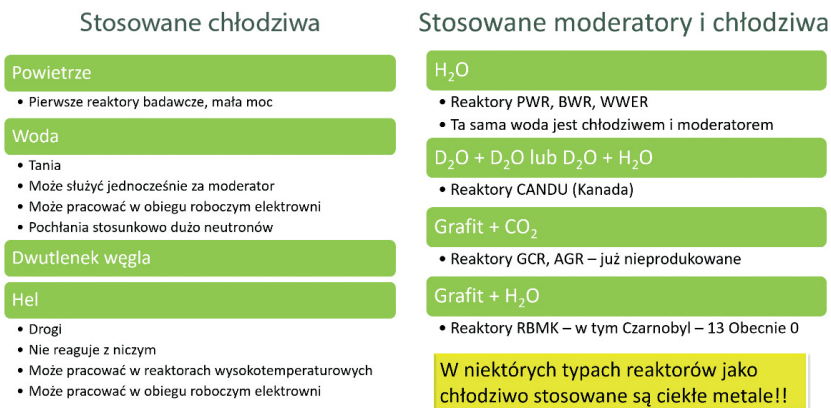
Praktycznie stosowane moderatory i ich wybrane cechy przedstawiono w uproszczeniu na rycinie 13.

Bardzo istotny jest dobór chłodziwa do danego rozwiązania reaktora jądrowego. Podstawowe cechy wymagane od chłodziwa to duża pojemność cieplna, niepochłanianie neutronów, dobra przewodność cieplna, mała agresywność chemiczna. Ta ostatnia cecha nie jest spełniana w przypadku stosowania jako chłodziwa ciekłych metali i stopionych soli (ryc. 14).

Z przedstawionych rozważań wynika, że istnieje możliwość budowy bardzo różnych układów do konwersji energii przemian jądrowych na inne formy energii.



Ryc. 13. Stosowane moderatory i ich wybrane cechy
 Źródło: opracowanie własne



Ryc. 14. Zestawienie stosowanych chłodziw i układów moderator – chłodziwo
 Źródło: opracowanie własne

Energetyka jądrowa – stan obecny i kierunki rozwoju

Pierwszą na świecie elektrownię jądrową uruchomiono w czerwcu 1954 r. w Obińsku w Związku Radzieckim. Od samego początku istnienia elektrowni jądrowych i ich projektowania brano pod uwagę występowanie potencjalnych zagrożeń i podejmowano działania na rzecz ochrony personelu siłowni jądrowej i społeczeństwa przed skutkami różnych możliwych awarii, w tym awarii ze stopieniem rdzenia reaktora. Jako podstawowe kryterium przyjęto założenie, że ryzyko związane z energetyką jądrową powinno być mniejsze niż ryzyko związane z innymi metodami konwersji energii i wytwarzania energii elektrycznej.

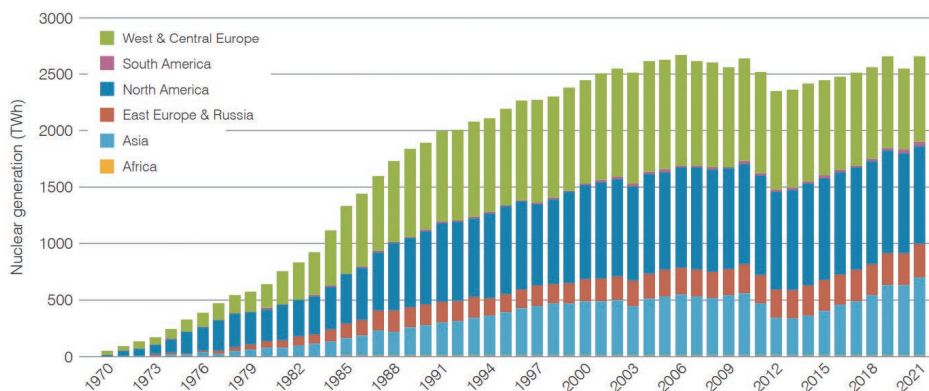
Energetyka jądrowa w roku 2022

Energetyka jądrowa w roku 2022 może być scharakteryzowana przez następujące podstawowe informacje:

- 441 pracujące reaktory energetyczne,
- **393 316 MWe zainstalowana moc elektryczna netto**,
- 51 Energetycznych reaktorów jądrowych w budowie,
- 53 644 MWe projektowana moc netto,
- 19 268 Reaktor- lat pracy reaktorów energetycznych,
- ponad 220 reaktorów napędowych – operujących od ponad 40 lat,
- ponad 50 krajów wykorzystuje energię jądrową w około 220 reaktorach badawczych. Reaktory te są także wykorzystywane do produkcji izotopów medycznych i przemysłowych, oraz prowadzenia szkoleń.

Na kolejnych rycinach na podstawie różnych źródeł przedstawiono miejsce i znaczenie energetyki jądrowej w bilansie energetycznym świata i poszczególnych krajów. Na rycinie 15 przedstawiono produkcję energii elektrycznej w TWh w funkcji czasu w różnych regionach świata.

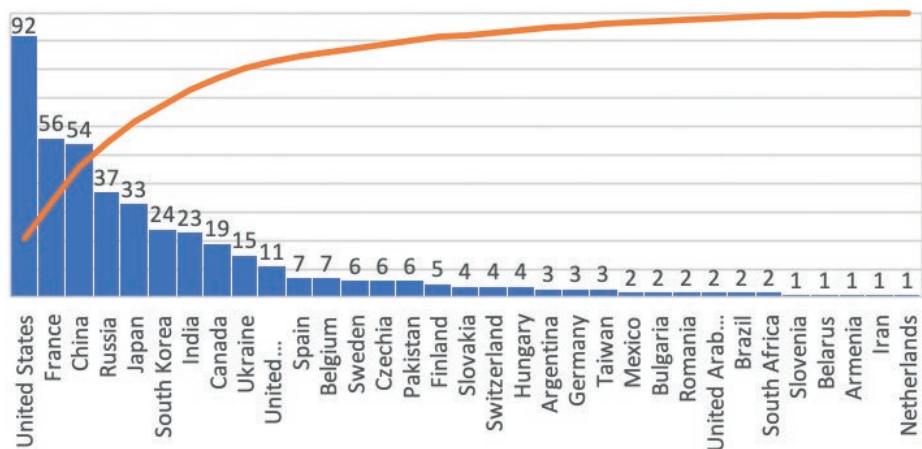
Widać załamanie tej produkcji 2012 r. w wyniku wyłączenia wszystkich reaktorów w Japonii po katastrofie w Fukushima (bez istotnych przyczyn technicznych). Na rycinie 16 przedstawiono liczbę reaktorów jądrowych pracujących w poszczególnych krajach (dane z maja 2022). Krzywa pomarańczowa wskazuje przyrost procentowy liczby reaktorów. W szesnastu krajach mamy około 85% pracujących reaktorów.



Source: World Nuclear Association and IAEA Power Reactor Information Service (PRIS)

Ryc. 15. Produkcja energii elektrycznej w układach jądrowych w regionach świata

Źródło: World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

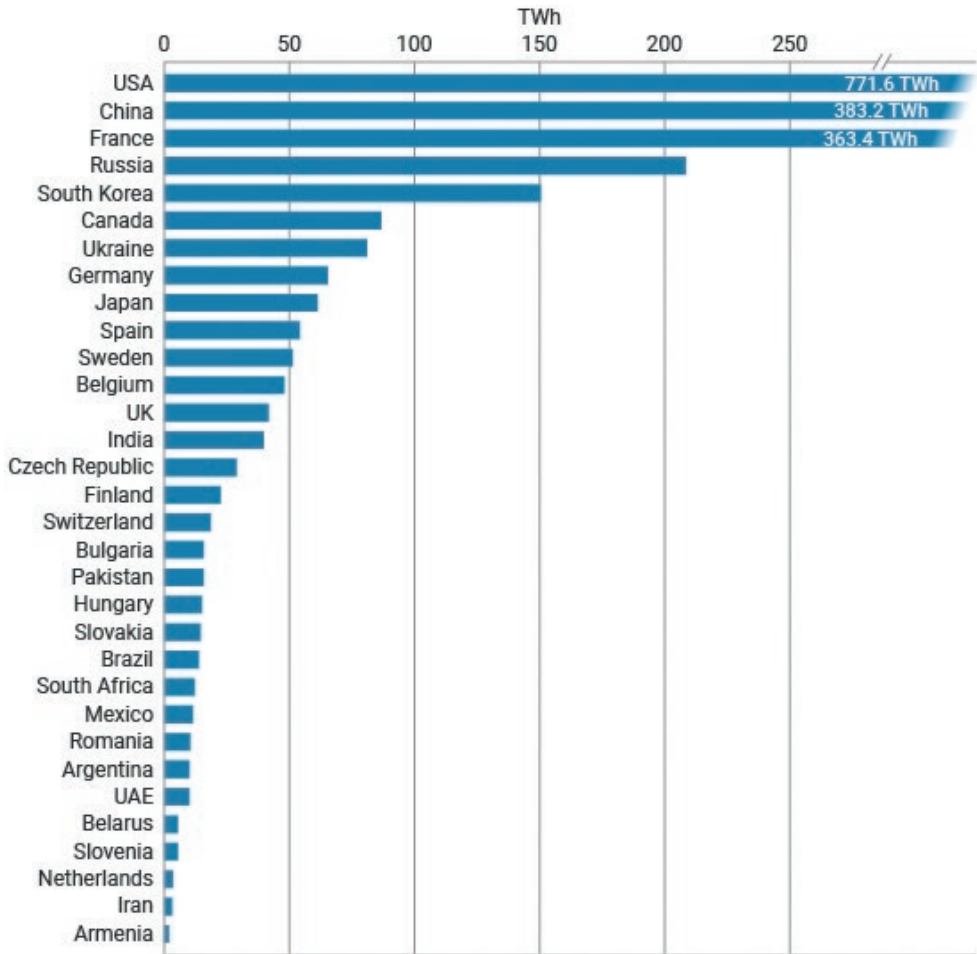


Ryc. 16. Liczba reaktorów jądrowych pracujących w poszczególnych krajach

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Na rycinie 17 pokazano wytwarzanie energii elektrycznej w siłowniach jądrowych TWh w 2021 r. w poszczególnych krajach.

Jak wynika z przedstawionych danych jest pełna dominacja 3 krajów, a Chiny wyprzedziły Francję w ilości wyprodukowanej energii elektrycznej w układach jądrowych. Na rycinie 18 przedstawiono wykorzystanie energii jądrowej na świecie w 2021 r. w procentach.



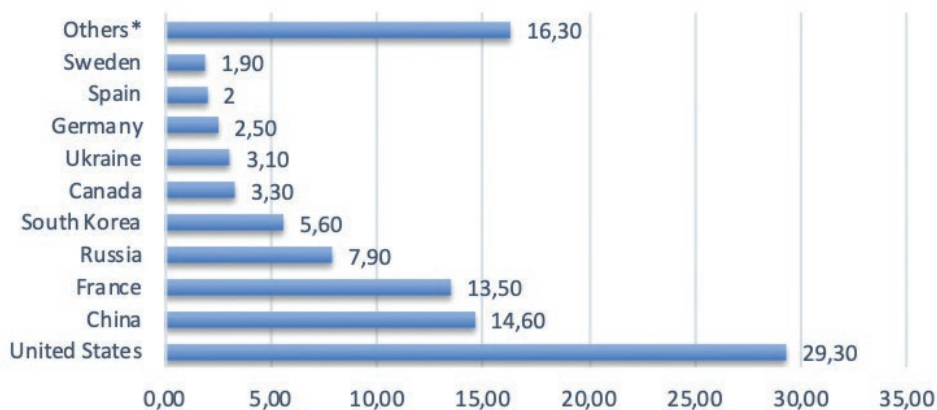
Rys. 17. Generacja energii elektrycznej w siłowniach jądrowych TWh w 2021 r.

Źródło: IAEA, 2022

Jak podaje IAEA wg stanu na maj 2022 r. na całym świecie w budowie są 53 reaktory jądrowe. Na czele listy znalazły się Chiny z 15 jednostkami, zaraz za nimi uplasowały się Indie, gdzie w budowie jest 8 reaktorów (ryc. 19).

Dla porównania, w poprzednim roku na całym świecie na stałe zamknięto 10 reaktorów jądrowych. Istotne znaczenie ma cykl życia reaktorów jądrowych wynoszący od 40 do nawet 60 lat. Ponieważ średni wiek ponad 200 sprawnych reaktorów jądrowych na świecie przekracza 30 lat, niektóre z nich wkrótce zostaną wycofane z eksploatacji. Okres eksploatacji większości typowych elektrowni jądrowych wynosi od 30 do 40 lat. Możliwa jest jednak wymiana głównych elementów reaktora, a niektóre kraje odnowiły po badaniach licencje (np. USA), aby przedłużyć żywotność istniejących elektrowni.

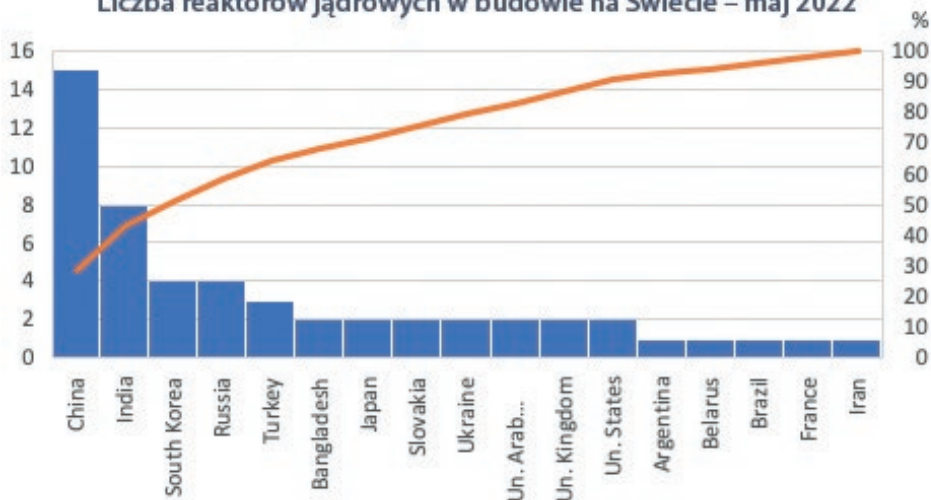
Rozkład wykorzystania energii jądrowej na świecie w 2021 r. według wybranych krajów w %



Ryc. 18. Rozkład wykorzystania energii jądrowej na świecie w % w roku 2021

Źródło: opracowanie własne na podstawie IAEA, 2022

Liczba reaktorów jądrowych w budowie na Świecie – maj 2022



Ryc. 19. Liczba reaktorów jądrowych w budowie na świecie – maj 2022

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Większość planowanych nowych mocy jądrowych zlokalizowana jest w Azji. Istotny nacisk kładzie się na zwiększenie wydajność starych (modernizacja) i nowych układów reaktorowych. Kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa jądrowego ma projekt, proces

budowy, w tym zastosowanie właściwych materiałów. Czas potrzebny do budowy reaktorów jądrowych może się znacznie różnić, średnio wynosi około siedmiu lat. Okresy przemian w energetyce jądrowej przedstawiono w skrócie na rycinie 20.

Należy także podkreślić, że kolejny fatalny wpływ na rozwój energetyki jądrowej miała katastrofa Elektrowni jądrowej Fukushima-Daiichi, *Fukushima I* (11 marca 2011 roku) spowodowana trzęsieniem ziemi i falą tsunami. W wyniku tej katastrofy bez realnych przyczyn technicznych zostały wyłączone wszystkie reaktory w Japonii.

Podstawowe informacje o typach, pracy i budowie reaktorów jądrowych w tym reaktorów energetycznych

Podział reaktorów jądrowych można przeprowadzić, jak już pokazano, na podstawie bardzo różnych kryteriów. W tym podrozdziale zostaną omówione najbardziej typowe reaktory jądrowe, które pracują w bazie energetycznej lub są reaktorami badawczymi.

Klasyfikację reaktorów jądrowych można przeprowadzić w zależności od różnych kryteriów. Przykład takich kryteriów przedstawiono na rycinie 21.

Lata 80./90. Załamanie przemysłu jądrowego

- Wypadki w Three Miles Island (1979) i Czarnobyli
- Nasylenie na niektórych rynkach (szczególnie Francja) – spadek popytu
- Zaniechanie dalszego rozwoju EJ (Szwecja, Niemcy, Wlk. Brytania, USA)
- Rezygnacja z energetyki jądrowej (Austria, Włochy)
- Zaniechanie rozwoju nowych technologii (THTR – Niemcy, HTGR – USA)

Pierwsze lata XXI wieku

- Wzrost zapotrzebowania na energię
- Rosnący popyt an energię niekonwencjonalną
- „Walka” z globalnym ociepleniem



Renesans energetyki jądrowej – obecnie

- Niestabilność w dostępie do organicznych paliw kopalnych
- Nowe programy energetyki jądrowej – rozwój (Chiny, Indie, Polska?)
- Programy zastępowania istniejących bloków (np. Wlk. Brytania)
- Udoskonalone typy reaktorów (EPR, AP-1000, APR-1400, WWER-1200, APWR, ABWR, ESBWR), małe reaktory modułarne

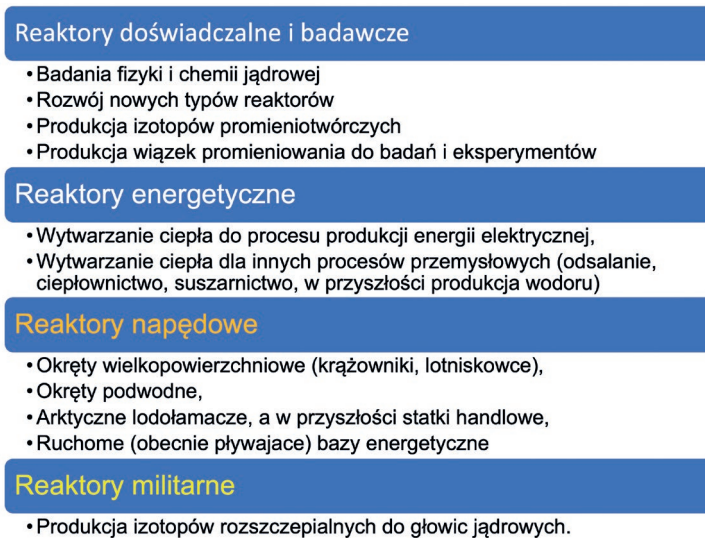
Ryc. 20. Schematyczne przedstawienie okresów przemian i przyczyn zmian przemysłu jądrowego

Źródło: opracowanie własne



Ry. 21. Schemat podziału reaktorów wg różnych kryteriów
Źródło: opracowanie własne

Każde z tych kryteriów może być rozpisane w sposób bardziej szczegółowy. Przykład dla reaktorów termicznych przedstawiono na rycinie 30. Na rycinie 22 przedstawiono w uproszczeniu obszary zastosowania różnych typów reaktorów.



Ryc. 22. Podstawowe obszary zastosowania różnych typów reaktorów
Źródło: opracowanie własne

Nie ulega wątpliwości, że znaczenie małych reaktorów opartych na obecnych reaktorach napędowych i na nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych będzie rosło.

Siłownia jądrowa a siłownia klasyczna

Typowy schemat elektrowni cieplnej koncertującej klasyczne paliwo kopalne na energię elektryczną przedstawiono na rycinie 23. Siłownia taka pracuje zgodnie z obiegiem Rankine’a, czynnikiem roboczym jest woda, która w kotle w procesie spalania ogrzewana jest przez mieszaninę gazów spalinowych z powietrzem do wysokiej

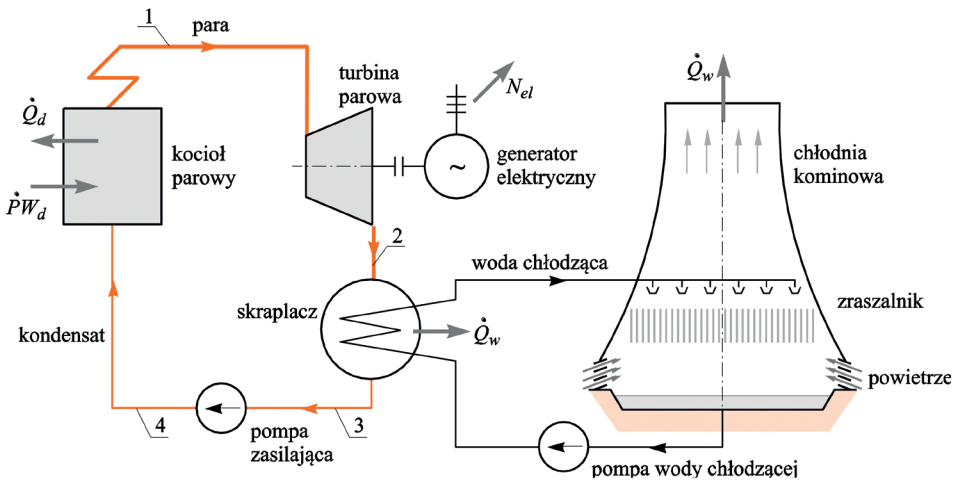
temperatury, a następnie w wytwornicy pary zamieniona na parę. Para napędza turbinę i po schodzeniu w chłodni kominowej wraca do kotła.

Schemat obiegu Rankine’a dla pary wodnej (typowy obieg dla podstawowej siłowni parowej) przedstawiono na kolejnej rycinie 24.

Obieg przedstawiony jest w układzie T – temperatura, s – entropia właściwa. Obieg składa się z przemiany 3–4, sprężania wody przez pompę (w układzie T,s punkty 3 i 4 praktycznie się pokrywają, sprężanie wywołuje znikomy przyrost temperatury), przemiany 4–1 izobarycznego ogrzewania i odparowania czynnika roboczego, przemiany 1–2 izentropowego rozprężania pary nasyconej mokrej (w turbinie) oraz przemiany 2–3 izobarycznego skraplania. W rzeczywistej siłowni proces rozprężania adiabatycznego przebiega w sposób nieodwracalny, a podczas przepływu czynnika występują straty ciśnienia. W tym obiegu w przemianie 4–1 następuje przekroczenie krzywej granicznej $x=1$ i przegrzewanie pary. Przy realizacji takiego procesu można przy tym samym ciśnieniu p_1 uzyskać większą pracę obiegu. Schemat konwersji energii w elektrowni wykorzystującej paliwo organiczne pokazano na rycinie 25.

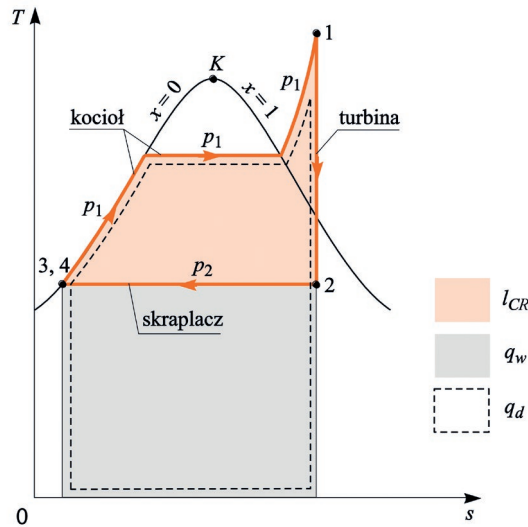
W układach jądrowych mamy inny system zaopatrzenia w paliwo, całkowity brak produktów spalania i strat ciepła związanych z wyprowadzaniem spalin z układu kotła. Paliwo do pracy reaktora może być zmagazynowane na terenie elektrowni na parę lat pracy (długoterminowe uniezależnienie od dostaw).

W klasycznej siłowni jądrowej, w której czynnikiem roboczym i moderatorem jest woda, kocioł zastąpiony jest reaktorem jądrowym, a więc źródłem energii jest nie paliwo organiczne, a paliwo jądrowe. Uproszczony schemat takiej elektrowni pokazano na rycinie 26.

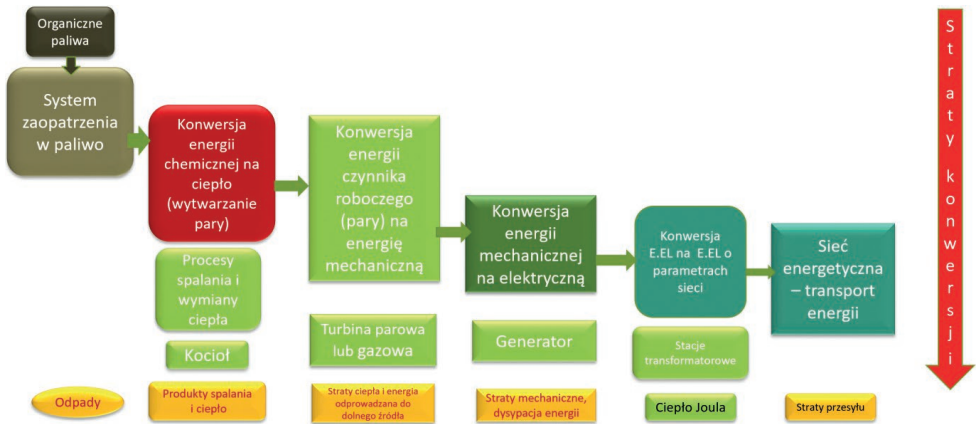


Ryc. 23. Uproszczony schemat siłowni parowej

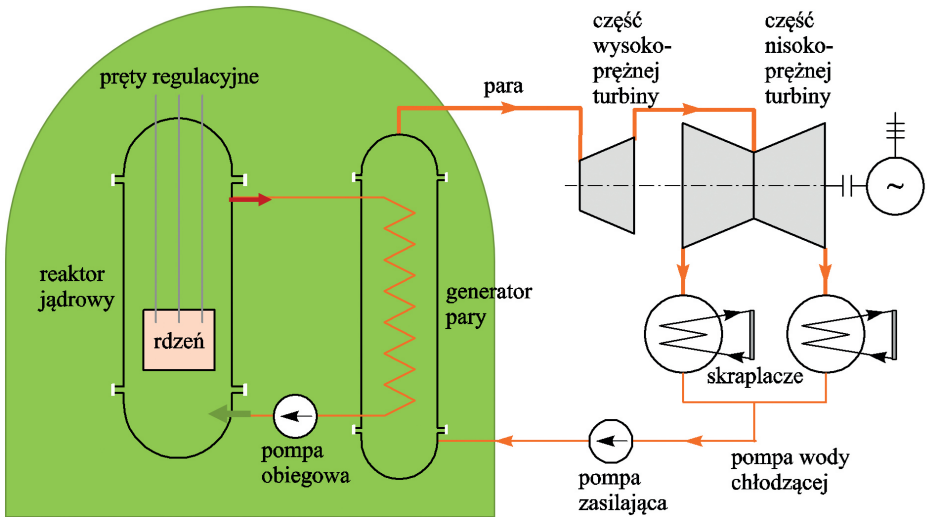
Źródło: Domański 2022



Ryc. 24. Obieg Clausiusa-Rankine'a dla pary przegrzanej we współrzędnych T – temperatura, s – entropia właściwa. Oznaczenia: l_{CR} – praca obiegu, q_d – ciepło doprowadzone, q_w – ciepło wyprowadzone
 Źródło: Domański 2022



Ryc. 25. Schemat konwersji energii paliwa organicznego na energię elektryczną
 Źródło: opracowanie własne



Ryc. 26. Uproszczony schemat konwersji energii w siłowni parowej z reaktorem jądrowym typu **PWR** (Pressurized Water Reactor) – odpowiednikiem reaktora rosyjskiego **WWER**

Źródło: Domański 2022

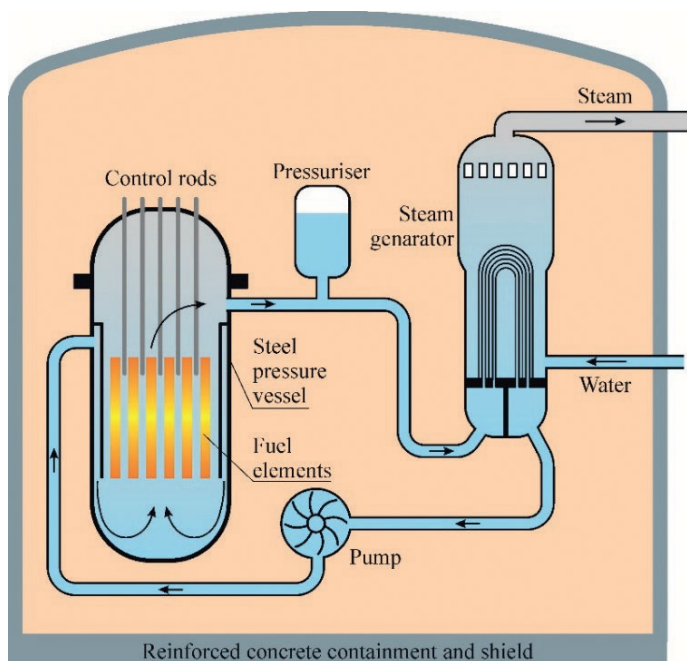
Podstawowe typy reaktorów

Około 425 reaktorów na całym świecie o mocy od 30 do 1660 MW jest chłodzonych wodą. Istnieją dwa główne typy reaktorów chłodzonych wodą: reaktory na lekką wodę, które wykorzystują zwykłą wodę i reaktory na ciężką wodę, które wykorzystują chemicznie odrębny rodzaj wody.

Reaktorów jądrowych, w których czynnikiem roboczym (chłodziwem) i jednocześnie moderatorem jest woda lub ciężka woda jest kilka różnych typów. Najbardziej powszechnym reaktorem jest reaktor typu **PWR** (Pressurised Water Reactor), którego schemat przedstawiono na rycinie 27.

Konstrukcja ta charakteryzuje się tym, że w budynku szczelnym reaktora zamknięty jest całkowicie obieg pierwotny wody, która w tym układzie jest podgrzewana pod wysokim ciśnieniem do wysokiej temperatury, a para wytwarzana jest w generatorze pary z wody pracującej w obiegu wtórnym. Mamy dwie pętle wodne oddzielone od siebie. Układ pozwala więc na zamknięcie czynnika roboczego (wody obiegu pierwotnego), który styka się z materiałem radioaktywnym czyli prętami paliwowymi, w obiegu w budynku szczelnym reaktora. Stanowi to dodatkowe zabezpieczenie, to znaczy w przypadku uwolnienia elementów promieniotwórczych (uszkodzenia koszulek paliwa jądrowego) i wejście tych elementów w kontakt z czynnikiem roboczym, woda skażona elementami promieniotwórczymi nie jest wyprowadzona poza budynek szczelny reaktora. Woda w obiegu pierwotnym jest chroniona przed wrzeniem poprzez zwiększenie ciśnienia w obiegu reaktora. W reaktorach tego typu woda pod ciśnieniem

12–17 MPa jest jednocześnie chłodziwem, spowalniczem neutronów i reflektorem. Z rycin 26 i 27 wynika, że nie ma możliwości stosowania przegrzewu pary – stąd stosunkowo niska sprawność układu ok. 30%. Woda w obiegu wtórnym jest pod niższym ciśnieniem i w generatorze pary następuje proces wrzenia, a uzyskana para przesyłana jest poza budynek szczelny do układu wytwarzania energii elektrycznej (patrz ryc. 27).



Ryc. 27. Schemat układu reaktora wodno ciśnieniowego – PWR

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Reaktory wodne ciśnieniowe (PWR) stanowią prawie 70% światowej floty reaktorów. Najbardziej znane reaktory z tej grupy PWR to: EPR, AP-1000, ATMEA, APWR APR-1400, WWER-1200 (AES-2006), WWER (starsze). Przykładowe parametry wybranych reaktorów przedstawiono w dalszej części opracowania [Power Reactors 2022].

AP-1000 – Jest to dwupętłowy reaktor opracowany przez amerykańską firmę Westinghouse na bazie wcześniejszego projektu AP-600. Głównymi cechami reaktora jest uproszczona konstrukcja, budowa modułowa oraz zastosowanie pasywnych systemów bezpieczeństwa. Moc reaktora, według założeń, wynosi 3400 MWt / 1200 MWe (netto 1117 MWe). Szereg jednostek tego typu powstaje w Chinach (elektrownie Sanmen i Haiyang), a ich moc została zwiększona do 1250 MWe (netto 1154 MWe). Dwa reaktory AP-1000 są w budowie w USA, planowana była budowa następnych dwóch na Ukrainie. Reaktor tego typu ma być podstawą pierwszych elektrowni jądrowych w Polsce.

Europejski reaktor ciśnieniowy – European Pressurized Reactor – EPR

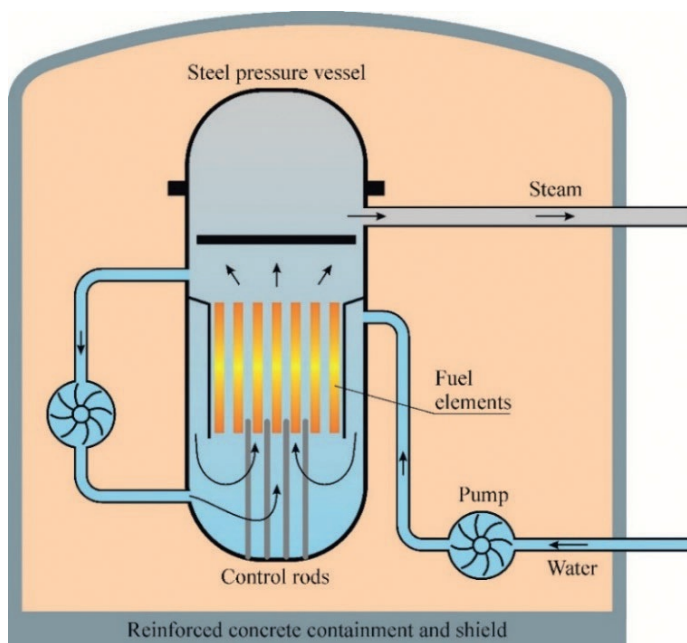
EPR – jest zaawansowanym reaktorem ciśnieniowym o mocy 4590 MWt/1750 MWe (netto 1630 MWe), moderowanym i chłodzonym lekką wodą, opracowanym przez francuski koncern Areva NR, EDF i koncern Siemens. Międzynarodowa nazwa Evolutionary Power Reactor (EPR). W 2011 r. Siemens wycofał się z tego europejskiego projektu. Reaktor ma cztery pętle obiegu pierwotnego. Paliwem w reaktorze może być lekko wzbogacony uran lub mieszane paliwo plutonowo-uranowe. Sprawność cieplna wynosi 37%, sprawność netto jest równa 35%. Czas życia rdzenia ma wynosić 60 lat. Obecnie w budowie w Europie jest EPR we Francji (Flamanville), załadunek paliwa przewidziano na koniec 2022, a uruchomienie na 2023 r. W Stanach Zjednoczonych opracowywany jest wariant *US-EPR* o mocy nominalnej 1710 MWe. Pierwszą jednostką pracującą był reaktor Taishan 1 (Chiny) – start komercyjny grudzień 2018, drugą Taihan 2 – wrzesień 2019 r. Dwie jednostki w Hinkley Point (UK) mają wystartować w 2027 r. W styczniu 2022 r., po kilkunastu latach opóźnienia ruszył reaktor w Finlandii (Olkiluoto) 1600 MWe. We wrześniu 2021 EDF przedstawił Polsce propozycję zbudowania 4 lub 6 reaktorów EPR (o mocy 6,6 lub 9,9 GWe).

Wodno-wodny reaktor WWER-1200 – (ros. *wodo-wodianojenergičeskiej rieaktor* – wodno-wodny reaktor energetyczny). VVER (WWER) to rodzina reaktorów średniej i dużej mocy, produkowanych przez Rosatom. Są to jedne z najczęściej stosowanych reaktorów, rozwijane od lat 50. XX w. Na świecie uruchomiono aż 80 jednostek tego typu, a niedługo kolejne dwie zostaną uruchomione w pierwszej białoruskiej EJ Ostrowiec. Rosyjski reaktor ciśnieniowy WWER-1200 jest rozwinięciem sprawdzonego WWER-1000, opracowanego jeszcze w Związku Radzieckim. Jest to konstrukcja o zwiększonej mocy – 3200 MWt/1290 MWe, netto 1170 MWe, wydłużonym czasie funkcjonowania – do 50 lat, zwiększonej sprawności – powyżej 36% i poprawionych systemach bezpieczeństwa. Wariant /392M opiera się na pasywnych systemach bezpieczeństwa, wariant /491 – aktywnych i poza Rosją oznaczany jest jako *Modernised International Reactor MIR-1200*. Reaktor będzie mieć cztery pętle obiegu chłodzącego, tak, jak w poprzedniej wersji. W istniejącej elektrowni Leningrad I dotychczas działały cztery reaktory RBMK-1000, z których pierwszy został wyłączony 21 grudnia ubiegłego roku, a pozostałe trzy bloki mają zostać zamknięte do 2025 r. EJ Leningrad II będzie wyposażona w cztery nowoczesne jednostki generacji III+ typu WWER-1200/V-491 (AES-2006). Blok Leningrad II-1 został podłączony do sieci w dniu 9 marca 2018 r. Rozwijany jest także projekt reaktora WWER-1500 o mocy 4250 MWt/1500 MWe.

Zaawansowany reaktor ciśnieniowy – Advanced Pressurized Reactor – APR-1400 – Projekt południowokoreańskiego reaktora ciśnieniowego, zaprojektowany przez Korea Electric Power Corporation (KEPCO), bazujący na wcześniejszym amerykańskim projekcie *System 80+*. Reaktor ma poprawione systemy bezpieczeństwa, zwiększoną odporność na wstrząsy sejsmiczne. Obieg pierwotny składa się z dwóch pętli, moc reaktora wynosi 3983 MWt/1455 MWe. Bardziej zaawansowany wariant APR+ miałby mieć moc 1550 MWe. Obecnie użytkowane są dwa takie reaktory w Korei Południowej

(Shin Kori 3 i 4), a kolejne cztery są w budowie (Shin Hanul 1 i 2, Shin Kori 5 i 6). Dwa bloki są użytkowane przez Zjednoczone Emiraty Arabskie w Barakah, przy czym kolejne trzy są w budowie [Power Reactors 2022].

Reaktory wodne wrzące (BWR) są drugim najpowszechniejszym typem reaktorów na świecie, stanowiąc około 15% światowych reaktorów. W przeciwieństwie do PWR, ta konstrukcja ma pojedynczy obieg, w którym woda jest utrzymywana pod ciśnieniem umożliwiającym jej odparowanie wewnątrz stalowego zbiornika reaktora. Para wytworzona w układzie reaktora podawana jest bezpośrednio do turbiny. Reaktory BWR znajdują się głównie w USA, Japonii, Szwecji i na Tajwanie. Reaktory z grupy BWR to: BWR, ABWR, ESBWR, SWR-1000 (Kerena) (ryc. 28).



Ryc. 28. Uproszczony schemat reaktora **BWR**

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

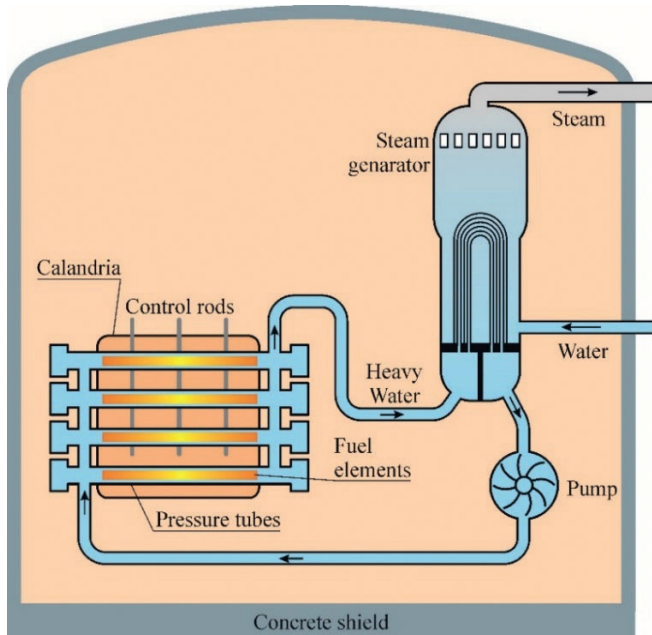
W reaktorach wodnych wprowadzane są ciągle dodatkowe zabezpieczenia, które mają na celu zapobieżenie stopieniu rdzenia reaktora, co częściowo miało miejsce w elektrowni Three Mile Island (niedaleko Harrisburga) i w 3 reaktorach w Fukushima. W blokach z reaktorami typu BWR do turbiny dopływa dość silnie radioaktywna para wodna, co w przypadku rozszczelnienia obiegu stwarza dodatkowe zagrożenie.

Ciśnieniowe reaktory ciężkowodne (PWR) są trzecim najczęściej stosowanym typem reaktora, stanowiąc około 11% światowej floty reaktorów. W tym typie reaktorów do chłodzenia i moderowania (kontrolowania reakcji jądrowych) wykorzystywana jest

ciężka woda D_2O . W tym typie reaktorów jako paliwa można użyć uranu naturalnego, nie ma konieczności wzbogacania paliwa tak, jak w reaktorach PWR i BWR. Reaktory ciężkowodne kojarzą się głównie z Kanadą, ale są również wykorzystywane w Indiach, Argentynie, Rumunii, Pakistanie i Chinach.

Zaawansowany reaktor typu CANDU – Advanced CANDU Reactor – ACR

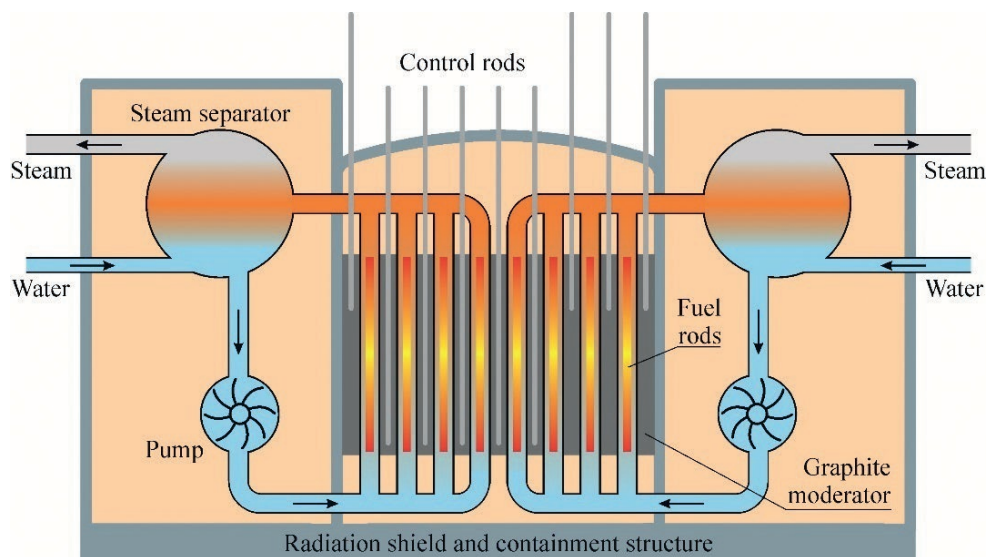
Projekt reaktorów *CANDU* (ryc. 29), w których ciężka woda pod niskim ciśnieniem pozostaje moderatorem, natomiast chłodziwem stałaby się lekka woda pod wyższym ciśnieniem. Operując w wyższym zakresie temperatur, reaktor miałby wyższą sprawność cieplną niż poprzednie konstrukcje. Zastosowanie lekkiej wody pozwoliłoby zmniejszyć rozmiary reaktora i koszt jego budowy. Reaktor miałby moc 3200 MWt/ 1080–1200 MWe. Paliwem byłby nisko wzbogacony uran, tor lub paliwo plutonowo-uranowe. Pierwsze konstrukcje tego typu miały zostać uruchomione w 2016 r. w kanadyjskim Ontario. Wariant *CANDU X* zakłada wykorzystanie jako chłodziwa lekkiej wody o parametrach nadkrytycznych, co zapewniłoby sprawność cieplną na poziomie 40%. Moc reaktorów mogłaby wynosić od 350 do 1150 MWe. Czas wdrożenia nie jest jednoznacznie określony. Reaktory z tej grupy to: *CANDU/ACR* i *PHWR:ACR-1000*, *CANDU EC-6*, *CANDU 6*, *CANDU 9*, *CANDU X*, Indyjskie *PHWR/AHWR*.



Ryc. 29. Schemat reaktora typu Candu (reaktor ciężkowodny)

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Osobnym typem reaktorów były budowane w byłym Związku Radzieckim reaktory wrzące z moderatorem grafitowym chłodzone wodą. Przykładem jest reaktor RBMK. Opis tego reaktora jest istotny z punktu widzenia największej katastrofy jądrowej. **Reaktor Bolszoy Moszcznosti Kanalnyj (RBMK)** (Реактор Большой Мощности Канальный). Pierwszy reaktor tego typu uruchomiono w Leningradzkiej Elektrowni Jądrowej. RBMK był elementem programu budowy reaktorów służących nie tylko do produkcji energii, ale także produkcji plutonu do celów militarnych. Zastosowanie chłodzenia lekką wodą i moderowanie grafitem pozwala na stosowanie jako paliwa naturalnego uranu, bez jego uprzedniego wzbogacania. To sprawia, że reaktor RBMK jest jednym z najekonomiczniejszych reaktorów. Jednak taki układ chłodziwa z moderatorem powoduje wzrost reaktywności przy zwiększaniu się ilości pary w rdzeniu reaktora, co utrudnia jego sterowanie i może doprowadzić do utraty stabilności reaktora. Właśnie ta cecha była jedną z przyczyn katastrofy w Czarnobylu. Po katastrofie trzy bloki RBMK zostały zamknięte w latach 1991, 1996, 2000 (ryc. 30).



Ryc. 30. Uproszczony schemat reaktora RBMK

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Szczegółowe opisy katastrof w Czarnobylu (26 kwiecień 1986) i Three Miles Island (1979) można znaleźć w wielu opracowaniach, z których warto wymienić bardzo obszerne w języku polskim [Strupczewski 1990]. W nocy z 25 na 26 kwietnia 1986 r. w reaktorze jądrowym bloku energetycznego nr 4 Czarnobylskiej Elektrowni Jądrowej nastąpiła awaria, w wyniku której nastąpiło przegrzanie się rdzenia reaktora, doszło do wybuchu wodoru, pożaru oraz rozprzestrzenienia się substancji promieniotwórczych.

Ta katastrofa jądrowa została zakwalifikowana do siódmego, najwyższego stopnia w skali INES. **Należy jednak wyraźnie podkreślić, że reaktor RBMK w skali świata nie był typowym reaktorem energetycznym.**

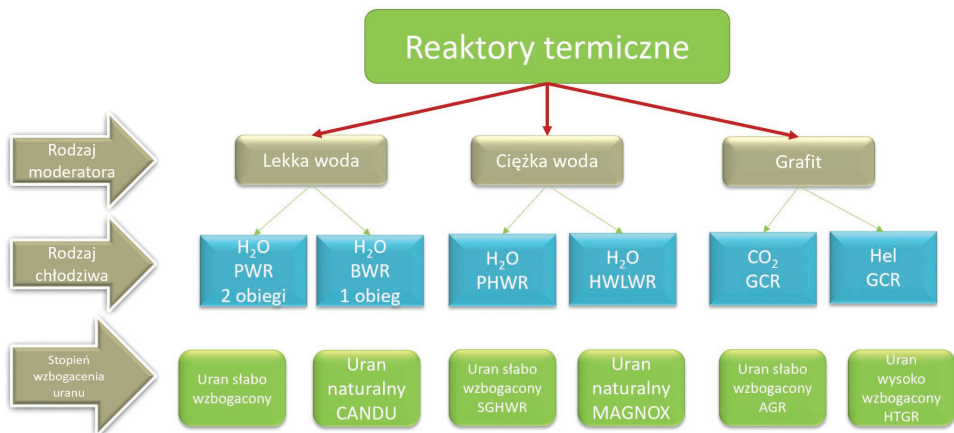
Podstawowe parametry pracy reaktorów RBMK przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry pracy reaktorów RBMK

Parametr	RBMK-1000	RBMK-1500	RBMK-2000
Moc cieplna	3200 MWt	4800 MWt	5400 MWt
Moc elektryczna	1000 MWe	1500 MWe	2000 MWe
Sprawność bloku	31,3%	31,3%	37%
Temperatura pary przed turbiną	280°C	280°C	450°C
Masa uranu w rdzeniu	192 t	189 t	226 t
Kanałów odparowujących	1693	1661	1744
Kanałów przegrzewających	–	–	872
Wzbogacenie uranu	1,8%	1,8%	1,8–2,2%

Źródło: na podstawie literatury

Na rycinie 31 przedstawiono podział reaktorów termicznych (reaktorów, w których proces rozszczepienia wywołany jest przez neutrony termiczne – energia w zakresie 1–100 meV) chłodzonych wodą lub ciężką wodą. Reaktory termiczne chłodzone wodą i ciężką wodą są podstawą współczesnej energetyki jądrowej.



Ryc. 31. Schemat podziału reaktorów termicznych w zależności od rodzaju moderatora, chłodziwa i paliwa

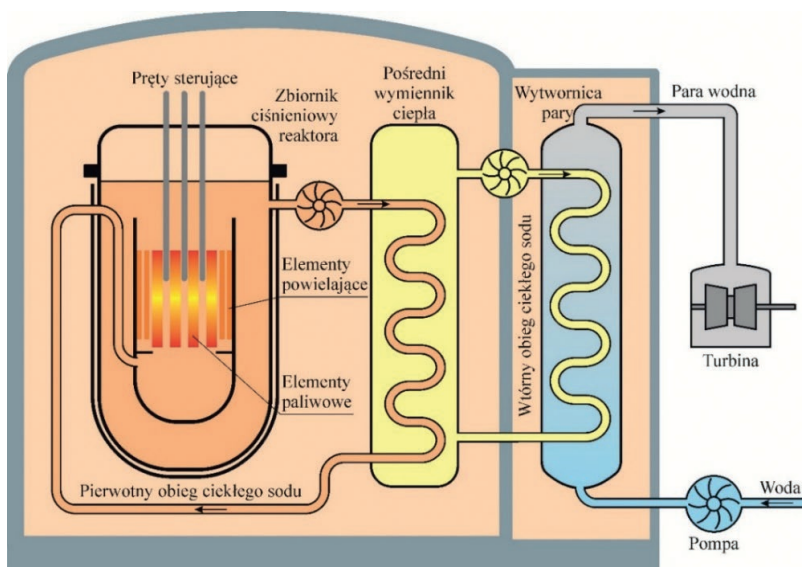
Źródło: opracowanie własne

Inne reaktory jądrowe

Podczas gdy większość obecnych reaktorów do chłodzenia rdzenia wykorzystuje wodę, trwają prace badawczo-rozwojowe nad reaktorami, w których jako chłodziwo stosuje się ciekłe metale, stopione sole lub gazy. Opracowanie tych reaktorów może zapewnić bardziej wydajną konwersję energii jądrowej oraz poszerzenie zastosowań. Wiele typów reaktorów bezwodnych jest z powodzeniem eksploatowanych na całym świecie od wielu lat, głównie na poziomie eksperymentalnym.

Wiele opracowywanych reaktorów to tak zwane reaktory „prędkie”, w których neutrony z reakcji łańcucha jądrowego nie są spowalniane, w przeciwieństwie do konwencjonalnych reaktorów, w których reakcja jest moderowana przez wodę i/lub grafit. Reaktory prędkie stanowią technologiczny krok naprzód i będą zdolne do recyklingu odpadów jądrowych z obecnych reaktorów jądrowych oraz radykalnego zwiększenia ilości energii, jaką możemy uzyskać z paliwa jądrowego – z około 5% obecnie do 90%+.

Reaktory prędkie z ciekłym metalem (LMFR) wykorzystują do chłodzenia rdzenia różne ciekłe metale (np. sód, ołów) (ryc. 32). Reaktory z ciekłym metalem mogą być zasilane uranem w postaci metalicznej (obecne reaktory najczęściej wykorzystują uran w postaci ceramicznej), jak również z recyklingu odpadów jądrowych (np. pluton, drobne aktynowce). Jedyne obecnie działające reaktory prędkie na świecie to chłodzone sodem reaktory BN-600 i BN-800 – oba zlokalizowane w Elektrowni Jądrowej Bielejarsk w Rosji.



Ryc. 32. Schemat układu reaktora chłodzonego ciekłym metalem (LMFR)

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Obecnie najbardziej zaawansowanym w rozwoju spośród reaktorów prędkich powielających *FBR* jest reaktor chłodzony ciekłym sodem *LMFBR*. W reaktorach sodowych (jak widać na rycinie) zastosowano dwa obiegi sodowe i obieg sodowo-parowy. Obiegi chłodzenia to: obieg pierwotny – zawierający sód radioaktywny, pośredni – zawierający sód nieaktywny i obieg roboczy parowo-wodny. W pierwszych dwóch obiegach sodowych mamy niskie ciśnienie, co radykalnie zmniejsza prawdopodobieństwo uszkodzenia wymienników sód-sód i przedostania się radioaktywnego sodu do obiegu pośredniego. Temperatura topnienia sodu wynosi 98°C, tak więc oba obiegi sodowe muszą być podgrzewane (także przy wyłączonym reaktorze), aby nie dopuścić do zestalenia się sodu i zablokowania przewodów i pomp. W układach tych muszą być stosowane także specjalne układy do czyszczenia sodu. Warto zauważyć, że w układach reaktorów chłodzonych ciekłymi metalami stosowane są także inne chłodziwa np. roztwór ołów-bismut (w reaktorach napędowych łodzi podwodnych).

Reaktory ze stopionymi solami (MSR) wykorzystują ciekłe sole jako chłodziwo, z prętami na paliwo stałe (podobne do obecnych reaktorów) lub z paliwem rozpuszczonym w samej soli. Reaktory MSR mogą wykorzystywać szereg paliw, takich jak uran, pluton, aktynowce z odpadów jądrowych i tor, w zależności od tego, czy działają jako reaktory prędkie czy jako reaktory termiczne. Ponieważ reaktory MSR mogą działać w wysokich temperaturach, można je wykorzystywać do wytwarzania wodoru i ciepła do różnych zastosowań przemysłowych.

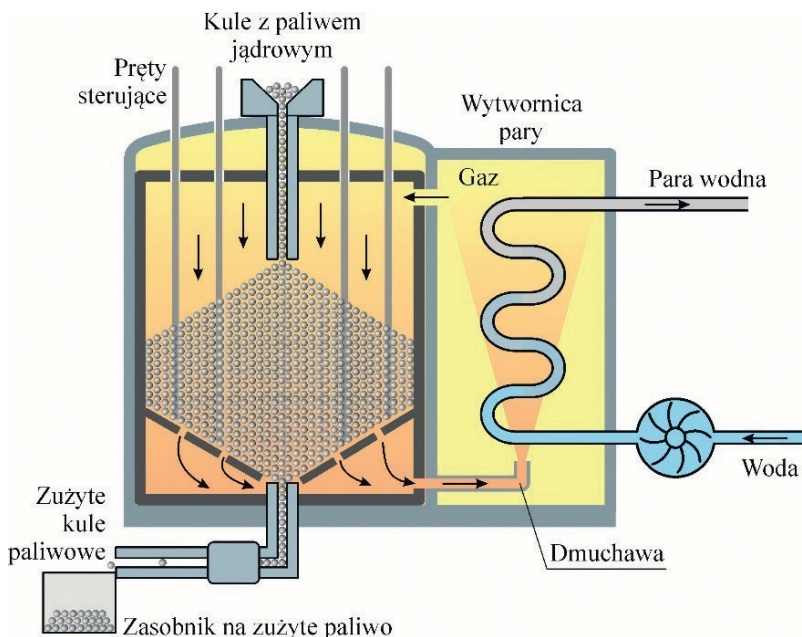
Reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HTGR) są chłodzone chemicznie obojętnym gazem (np. hel, dwutlenek węgla), a żaroodporne paliwo jądrowe ma postać prętów paliwowych (otoczonych blokami grafitowymi) lub kul. HTGR działają w bardzo wysokich temperaturach (>800°C) i dobrze nadają się do wytwarzania paliw syntetycznych oraz ciepła komunalnego i przemysłowego. Jako paliwo w HTGR stosuje się wysoko wzbogacony uran, zwykle wzbogacanie wynosi do 5%–8%. Jeżeli w reaktorach tego typu zamiast uranu używa się mieszaniny tlenków rozszczepialnego uranu i paliwo rodnego toru ($UO_2 + ThO_2$) lub węglików uranu i toru (UC+ThC), to wtedy wymagane jest zastosowanie wyższego wzbogacenie uranu na poziomie 15–18%. Wyróżniamy dwa główne typy reaktorów HTGR:

- z rdzeniem usypanym (*pebblebedx*) – konstrukcja niemiecka z paliwem w postaci kul grafitowych o średnicy 6 cm (w jednej kuli 10 000 do 11 000 granulek paliwowych TRISO). Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość ciągłej pracy reaktora bez przestojów potrzebnych do przeładunku paliwa,
- przyzmatyczne (*prismatic*) – konstrukcja amerykańska z paliwem w postaci kolumn zbudowanych z sześciokątnych bloków grafitowych.

Warto podkreślić, że w obu typach reaktorów HTGR uzyskuje się głębokie wypalenie paliwa, znacznie większe niż w powszechnie stosowanych reaktorach PWR i BWR. W reaktorach HTGR osiągane jest wypalenie paliwa na poziomie 100 000 MWd/t (lub więcej), w reaktorach PWR wartości te są na poziomie – 45 000–55 000 MWd/t, a w BWR wynoszą 37 000–45 000 MWd/t. Reaktory ze złożem usypanym z kul osiągają moc

do 250 MW, a pryzmatyczne nawet do 600 MW. Schemat uproszczony reaktora HTGR ze złożem usypanym z kul przedstawiono na rycinie 33.

Granulki paliwowe TRISO stosowane w tego typu reaktorach są odporne na bardzo wysokie temperatury. Temperatury w rdzeniu mogą przekraczać 1100°C.



Ryc. 33. Reaktor HTGR ze złożem usypanym z kul

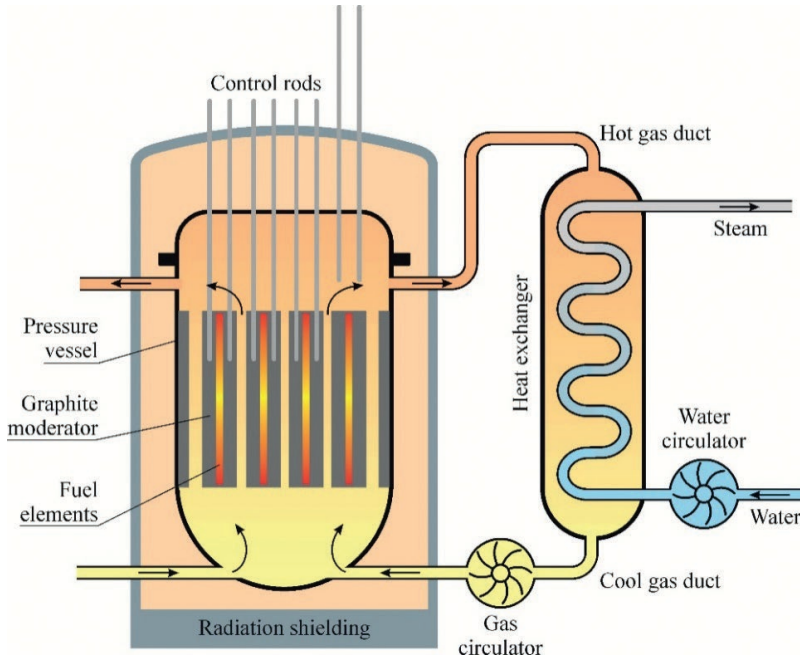
Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

Reaktor modułowy ze złożem usypanym – Pebble-bed Modular Reactor – PBMR

Konstrukcja opracowywana w Republice Południowej Afryki. W projekcie tym reaktor o mocy 165 MWe połączony jest bezpośrednim obiegiem z turbiną gazową, pracującą wg cyklu Braytona. Sprawność układu ma wynosić 41%, przy osiągnięciu temperatury chłodzącego reaktor helu na poziomie 900°C. Moc reaktora w zakresie od 40 do 100% byłaby regulowana poprzez zmianę ciśnienia. Czas życia rdzenia wynosiłby 40 lat, w czasie których 13 razy byłoby uzupełnianie paliwo. Poza produkcją energii elektrycznej, reaktor mógłby dostarczać ciepła do procesu wytwarzania wodoru lub innych procesów technologicznych.

Reaktor wysokotemperaturowy (HTR) – najważniejsze dane: zbiornik ciśnieniowy (stalowy lub betonowy), chłodziwo: He, moderator: grafit. Paliwo: uran lub tor w postaci kul (pebblebed). Układ dwuobiegowy: obieg pierwotny gazowy o temperaturach pracy około 750°C, obieg wtórny wodno-parowy o temperaturach >500°C. Reaktory produkowane i prowadzone w USA, DEU. Moce dość zróżnicowane: 40 MWe, 300 MWe, 330 MWe.

Zaawansowany reaktor chłodzony gazem (AGR) – jego podstawowe cechy to: zbiornik ciśnieniowy betonowy ze stalową wykładziną ze stali stopowej, zintegrowane generatory pary, chłodziwo CO_2 , moderator grafit, paliwem jest wzbogacony uran (2–3%). Układ odprowadzania energii jest dwubiegowy. Obwód pierwotny gazowy, wtórny wodno-parowy z turbiną parową (196 bar, 543°C). Sprawność ok. 41% brutto. Jednostki o mocy 550–620 MWe. Producent i użytkownik to GBR (ryc. 34).



Ryc. 34. Zaawansowany reaktor chłodzony gazem (AGR)

Źródło: opracowanie własne na podstawie World Nuclear Association, EIA, IAEA, 2022

W reaktorze AGR chłodzonym CO_2 temperatury na wyjściu z rdzenia osiągają wartości na poziomie 650°C , a sprawność siłowni wynosi około 41%. Ośiem reaktorów AGR pracuje w Wielkiej Brytanii.

Reaktory jądrowe czwartej generacji

Projekty reaktorów jądrowych czwartej generacji zostały opracowane w 2002 r. przez państwa zrzeszone w Międzynarodowym Forum Czwartej Generacji. Przedsięwzięcie zapoczątkowały: Argentyna, Brazylia, Francja, Japonia, Kanada, Korea Południowa, Republika Południowej Afryki, Stany Zjednoczone i Wielka Brytania, następnie dołączyły jeszcze Chiny, Rosja, Szwajcaria oraz Euratom. Wybrano sześć rozwiązań, mających stanowić postęp w dziedzinie zrównoważonego rozwoju, ekonomii, bezpieczeństwa,

niezawodności. Wszystkie mają działać przy wyższych temperaturach, niż obecne reaktory, co zapewni lepszą sprawność i umożliwi wykorzystanie uzyskiwanego ciepła do termochemicznej produkcji wodoru. Wdrożenie nowych reaktorów, ze względu na konieczność opracowania nowych technologii i przeprowadzenia badań (choć niektóre rozwiązania zostały już zastosowane w ramach wcześniejszych projektów), ma nastąpić w okresie 2022–2030 [Fast Reactors 2020].

Reaktor prędkie chłodzony gazem – *Gas-Cooled Fast Reactor* – GFR

System *GFR*, dzięki wysokiej temperaturze chłodzącego reaktor helu, umożliwia wytworzenie energii elektrycznej, wodoru lub ciepła technologicznego z wysoką sprawnością. W układzie tym zastosowana jest turbina helowa, pracująca w obiegu bezpośrednim, wg obiegu Braytona. Reaktor *GFR* jest reaktorem powielającym. Rdzeń może być pryzmatyczno-blokowy, co umożliwi lepszy przepływ chłodziwa. Wytwarzanie długożyjących izotopów odpadów radioaktywnych zostało zminimalizowane dzięki prędkiemu spektrum neutronów i pełnej recyklicacji aktywności. Cykl paliwowy systemu *GFR* jest zamknięty. Prędkie spektrum neutronów umożliwia wykorzystanie dostępnego materiału rozszczepialnego i rodne go bardziej wydajnie niż w reaktorach gazowych o termicznym spektrum neutronów z jednokrotnymi cyklami paliwowymi. Zakłada się, iż zużyte paliwo będzie na miejscu odzyskiwane i przetwarzane. Parametry referencyjne reaktora *GFR*: moc 2400 MWt/1100 MWe, sprawność netto około 48%, parametry chłodziwa na wlocie 490°C/90 bar na wylocie 850°C/90 bar, średnia gęstość mocy 100 MWt/m³, paliwo UPuC/SiC (w tym ok. 20% Pu). Wysoka temperatura helu wymagać będzie stosowania nowych rodzajów paliwa i zastosowania odpowiednich materiałów do konstrukcji rdzenia reaktora i turbiny. Przewiduje się wykorzystanie ceramicznego paliwa niejednorodnego, zaawansowanych cząstek paliwa lub pokrytych ceramiką aktywności. Zastosowany hel pod wysokim ciśnieniem jest gazem o słabych charakterystykach termicznych, utrudniającym – w przypadku rozszczelnienia – schłodzenie rdzenia o małej bezwładności cieplnej.

Małe reaktory modułowe (SMR)

SMR nie są odrębnym typem reaktora, ale raczej rodziną różnych konstrukcji reaktorów, które są mniejsze niż większość reaktorów obecnie działających. SMR z wodą jako chłodziwem do celów poza militarnych są przedmiotem badań i obecnie są dopuszczalne do ruchu. Szersze ich wdrożenie nastąpi na początku lat 30. Komerccjalizacja bardziej nowatorskich projektów zajmie więcej czasu. Proponowanych jest wiele różnych konstrukcji i rozmiarów, od kilku megawatów do kilkuset. SMR, które DOE definiuje jako mające moc generacyjną 300 megawatów (MW) lub mniej, byłyby znacznie mniejsze niż dzisiejsze komercyjne LWR, które średnio mają około 1000 MW mocy wytwórczej. Większość proponowanych zaawansowanych reaktorów, w tym małe LWR, spełniałaby definicję DOE dotyczącą SMR. Zwolennicy SMR twierdzą, że byłyby wystarczająco małe, aby można je było montować w fabrykach i wysyłać do miejsc reaktorów, aby

obniżyć koszty budowy. Ponadto SMR mogą zmniejszyć ryzyko finansowe związane z budową nowej elektrowni jądrowej, ponieważ każdy moduł kosztowałby mniej niż dzisiejsze duże reaktory, a przychody mogłyby rozpocząć się po ukończeniu pierwszego modułu, a nie po ukończeniu znacznie większego bloku.

Bardzo małe reaktory SMR są często nazywane „mikroreaktorami”, zdefiniowanymi przez DOE jako mające moc cieplną poniżej 20 MW. Mogą dostarczać ciepło lub energię elektryczną w odległych miejscach. Według DOE samodzielne jednostki zasilania mikroreaktorów byłyby montowane w fabryce, transportowane na miejsce w kontenerze transportowym i ustawiane do wytwarzania energii w ciągu tygodnia. Mikroreaktory byłyby „samoregulujące”, ponieważ ich konstrukcja ma zapobiegać przegrzaniu nawet bez interwencji operatora [DOE Office 2018].

Podsumowanie

Energetyka jądrowa stanowi jedyne stabilne źródło energii pierwotnej, które w procesach konwersji na energię elektryczną i ciepło nie powoduje praktycznie żadnych emisji gazów cieplarnianych i pyłów. Konwersja energii jądrowej (ze względu na fakt, że ma możliwości wielkiej koncentracji energii w jednostce masy i objętości) będzie jedynym przyszłościowym rozwiązaniem do pracy w bazie energetycznej, wspieranej lub uzupełnionej przez stochastyczne działające odnawialne źródła energii, słońce i wiatr. Taki model energetyczny wraz ze wdrożeniem nie tylko wielkiej, ale małej energetyki jądrowej będzie stanowił rozwiązanie o bardzo wysokim współczynniku bezpieczeństwa energetycznego. Zasoby paliw jądrowych są wystarczająco duże (stosunek R/P oceniany przez KEPCO wynosi ponad 150 lat) i możliwość ich powielania zapewniają dostęp do energii w długim horyzoncie czasowym [Uranium 2020].

Krótkie posumowanie cech różnych reaktorów jądrowych przedstawiono na rycinie 35.

PWR	<ul style="list-style-type: none"> • Technologia stosowana w napędach łodzi podwodnych i wielkiej energetyce • Czas życia systemu nawet do 70 lat (patrz USA)
BWR	<ul style="list-style-type: none"> • Nowoczesne rozwiązania, • Uproszczony schemat cieplny
HTGR	<ul style="list-style-type: none"> • Układy parowo – gazowe, • Docelowo produkcja wodoru
SMNR	<ul style="list-style-type: none"> • Modułowy system – dostosowanie do potrzeb • Możliwość pracy do 40 lat bez uzupełniania paliwa

Ryc. 35. Skrótowe podsumowanie cech różnych reaktorów jądrowych

Źródło: opracowanie własne

Ostateczne wnioski można sformułować w następujący sposób:

- Energetyka jądrowa to bardzo czyste i stabilne źródło energii;
- Mamy ogromne doświadczenie w budowie systemów jądrowych;
- Uzyskano wielki postęp w realizacji cykli paliwowych nowej generacji;
- Małe modułowe reaktory jądrowe (inherentnie bezpieczne) zapewnią system rozproszonych źródeł energii elektrycznej i ciepła;
- Wdrożenie energetyki jądrowej, w tym SMR, pozwoli na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego świata i ograniczenie zmian w środowisku naturalnym;
- Reaktory IV generacji (FBR – Reaktory prędkie powielające) mogą stanowić następną generację reaktorów energetycznych.

Ze zdziwieniem należy przyjąć scenariusze rozwoju energetycznego świata, w których znaczenie wielkiej i małej energetyki jądrowej jest marginalizowane lub wręcz pomijane.

Na Mazowszu istnieje ogromne zaplecze dydaktyczne i naukowe dotyczące procesów przemian jądrowych, bezpieczeństwa jądrowego i energetyki jądrowej. Warto przypomnieć, że pierwsze studia na specjalności energetyki jądrowej były uruchomione na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej we wczesnych latach 60. XX w., a w 1967 r. mury uczelni opuścili pierwsi absolwenci ze specjalnością energetyka jądrowa. Ogromny dorobek dydaktyczny wydziału Mechanicznego i Energetyki i Lotnictwa w obszarze kształcenia kadry na rzecz energetyki, jakkolwiek przerwany na pewien okres w wyniku zahamowania rozwoju tej dziedziny, pozwala nam na przygotowanie i bezpośrednie dostarczanie kadry dla przyszłej energetyki jądrowej w Polsce.

Baza naukowo-dydaktyczna Mazowska powinna być wykorzystana w okresie wdrażania energetyki jądrowej w Polsce.

Literatura

- Advanced Large Water Cooled Reactors. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*, 2020, IAEA, Vienna.
- bp Statistical Review of World Energy 2022*, 2022, bp Statistical Review of World Energy, 71st edition, London.
- bp Energy Outlook 2022*, 2022, bp Energy Outlook, <https://www.bp.com/>
- Domański R., 2019, *Wymiana ciepła. Wykorzystanie programu MathCad do obliczeń i analizy procesów wymiany ciepła*, Wydawnictwo Naukowe Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, t. 47, Warszawa.
- Domański R., 2022, *Konwersja i akumulacja energii. Wybrane zagadnienia. Wyzwania*, t. 1, wyd. II, Wydawnictwo Naukowe Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Warszawa.
- DOE Office of Nuclear Energy, "What Is a Nuclear Microreactor?," October 23, 2018, <https://www.energy.gov/ne/articles/what-nuclear-microreactor>
- Holt M., 2021, *Nuclear Energy: Overview of Congressional Issues*, CRS Report R42753.
- Nuclear Power Reactors in the World*, 2022, IAEA, Vienna, <https://www.iaea.org>
- Power Reactor Information System, Data Base on Nuclear Power Reactors*, 2022, IAEA, Vienna, <https://www.iaea.org>
- Strupczewski A., 1990, *Awarie reaktorowe a bezpieczeństwo energetyki jądrowej*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Uranium 2020, Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*, OECD, NEA No.7551.
- World Energy Outlook 2022*, 2022, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- World Nuclear Performance Report 2022*, Produced by: World Nuclear Association
Published: July 2022 Report No. 2022/003, <https://www.world-nuclear.org>
- World Nuclear Industry Status Report 2022*, 2022, <https://www.worldnuclearreport.org>
- Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities FR09*, Proceedings of an International Conference, Kyoto, Japan, 7–11 December 2009, IAEA Vienna 2012.

Nuclear power – a necessity, not a threat

ABSTRACT

The work briefly outlines the world's energy needs, the division of primary energy consumption from a fuel perspective and the three basic world development scenarios presented by the International Energy Agency. The basic processes of nuclear power production and its conversion into internal energy are discussed. The most important types of nuclear reactors are presented with their basic operating parameters. The basic conclusions are presented in the summary.

Key words: radiation, radioactive decay, nuclear reactor, coolant, moderator, thermal power, electrical power, failure, steam cycle, nuclear fuel, efficiency

Roman Domański, prof. dr hab. / Full Professor

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa / Łukasiewicz Research Network – Institute of Aviation

e-mail: Roman.Domanski@ilot.lukasiewicz.gov.pl

cytacja:

Domański R., 2022, *Energetyka jądrowa – konieczność, a nie zagrożenie*, MAZOWSZE Studia Regionalne, 42, DOI: <https://www.doi.org/10.21858/msr.42.02>, Mazowieckie Biuro Planowania Regionalnego w Warszawie, Warszawa, s. 25–60.

