

Energetyka jądrowa

Podstawowe typy reaktorów energetycznych, szczegóły ich konstrukcji i specyfika zastosowania.

Autor: Hubert Jan Hawłas
Wydział Mechatroniki PW

Opracowanie zaliczeniowe z przedmiotu:
"Metody i Technologie Jądrowe"
Uczelniana Oferta Dydaktyczna PW,
Prowadzący: prof.dr hab. Jan Pluta
rok ak. 2008/2009

1. Wstęp.....	3
1.1. Uproszczona zasada działania elektrowni jądrowej. [1][2].....	3
1.2. Uproszczona zasada działania reaktora jądrowego. [3][4].....	3
2. Możliwe kryteria podziału na typy reaktorów energetycznych. [3].....	3
2.1. Podział według zastosowanego chłodziwa reaktora.....	4
2.2. Podział według generacji reaktora.....	4
2.3. Podział według energii neutronów.....	4
2.4. Podział według ilości obiegów.....	4
2.5. Podział ze względu na używane paliwo.....	4
2.6. Podział ze względu na rodzaj pracy.....	5
3. Omówienie najczęstszych typów elektrowni atomowych.....	5
3.1. Elektrownie wyposażone w reaktory wodne, ciśnieniowe (PWR i WWER) [5] [6].....	5
3.2. Elektrownie posiadające reaktory wodne, wrzące (BWR i RBMK).	6
3.3. Elektrownie z reaktorem ciężkowodnym.....	8
3.4. Elektrownie o reaktorze z chłodzeniem gazowym (GCR, AGR, HTGR).....	9
Typ GCR.....	10
Typ AGR.....	10
Typ HTGR. [9].....	10
3.5. Elektrownie z reaktorami prędkimi (LMFR na szybkich neutronach).....	12
3.6. Elektrownia wyposażona w reaktory solne (MSR).....	13
4. Podsumowanie.....	14
5. Słownik skróconych nazw typów reaktorów. [11].....	15
6. Spis ilustracji.....	16
7. Bibliografia.....	16

1. Wstęp

1.1. Uproszczona zasada działania elektrowni jądrowej. [1][2]

Elektrownia jądrowa jest to obiekt przemysłowy służący do wytwarzania energii elektrycznej. Jest rodzajem elektrowni ciepłej, w której ciepło pochodzi z energii rozszczepiania atomów. Ciepło to następnie zależnie od typu elektrowni pośrednio lub bezpośrednio ogrzewa i odparowuje wodę. Para wodna następnie w turbinie przekazuje energię cieplną na mechaniczną, a ta następnie napędza prądnicę przetwarzającą energię mechaniczną na elektryczną.

Ciepła elektrownia jądrowa różni się od ciepłej elektrowni klasycznej źródłem, z którego jest pobierana energia cieplna. Ujmując to w dużym uproszczeniu, aby z elektrowni klasycznej stworzyć jądrową należy zamienić palenisko (np. opalane węglem) w reaktor atomowy.

1.2. Uproszczona zasada działania reaktora jądrowego. [3][4]

Reaktor jądrowy jest urządzeniem umożliwiającym przeprowadzenie reakcji rozszczepiania jąder atomowych z kontrolowaną szybkością. Reakcja rozszczepiania jąder atomowych ma charakter lawinowy, czyli rozczepienie jednego jądra atomu w odpowiednich warunkach inicjuje rozczepienie kilku kolejnych jąder atomowych. Aby reakcja była pod kontrolą w pobliżu materiału rozszczepialnego umieszcza się materiały pochłaniające neutrony, które to powodują właśnie powodują kolejne rozpady. Materiałem tym są na ogół pręty wykonane z boru lub kadmu i poprzez ich wsuwanie w reaktor regulujemy ilość neutronów.

Jednak nie wszystkie neutrony są w stanie wywołać reakcję rozszczepienia, prawdopodobieństwo wywołania takiej reakcji jest największe dla tak zwanych neutronów termicznych. Są to neutrony o stosunkowo niskiej energii w porównaniu do energii, jaką posiadają zaraz po wygenerowaniu ich w reakcji rozszczepienia, dlatego potrzebna jest jeszcze substancja odbierająca energię neutronom i nosi ona nazwę moderatora. Moderatorem może być np. woda lub grafit.

Podczas reakcji rozszczepienia następuje uwalnianie bardzo dużej ilości energii. Dlatego aby reaktor nie uległ przegrzaniu i uszkodzeniu musi być on skutecznie odprowadzana, dlatego reaktory wymagają chłodziwa intensywnie odprowadzającego to ciepło.

2. Możliwe kryteria podziału na typy reaktorów energetycznych. [3]

Elektrownie jądrowe można podzielić na typy pod względem różnych kryteriów, większość kryteriów dotyczy zastosowanego w elektrowni reaktora jądrowego. Najczęściej stosuje się następujące kryteria podziału elektrowni atomowych.

Reaktory energetyczne są to reaktory, które są przeznaczone do zastosowań w elektrowniach jądrowych, w tym przypadku kryterium klasyfikacji jest przeznaczenie. Inne reaktory według tego kryterium to np. badawcze (naukowe), napędowe (w łodziach podwodnych), wytwórcze (produkcja plutonu), etc.

Przedstawione poniżej kryteria podziałów nie wyczerpują możliwej klasyfikacji, aczkolwiek są to najczęściej używane podziały.

2.1. Podział według zastosowanego chłodziwa reaktora.

- Elektrownie wyposażone w reaktory wodne, ciśnieniowe (tzw. PWR i WWER). Chłodziwem jest woda lekka pod dużym ciśnieniem, co zapobiega jej wrzeniu.
- Elektrownie posiadające Reaktory wodne, wrzące (BWR i RBMK). Chłodziwem jest lekka woda, która w normalnych warunkach pracy wrze.
- Elektrownie z reaktorem ciężkowodnym (PHWR np. CANDU), w którym chłodziwem jest ciężka woda.
- Elektrownie o reaktorze z chłodzeniem gazowym (GCR, AGR, HTGR), w których chłodziwem jest gaz np. dwutlenek węgla lub hel.
- Elektrownie z reaktorami prędkimi (LMFR na szybkich neutronach). Chłodziwem są najczęściej stopione metale np. sód.
- Elektrownia wyposażona w reaktory solne (MSR). Chłodziwem są stopione sole, najczęściej fluoru.

Istnieje jeszcze reaktory wodne, basenowe. W takich reaktorach pręty paliwowe znajdują się głęboko zanurzone w basenie ze zwykłą wodą i jest ona jednocześnie chłodziwem i moderatorem. Warstwa wody ponadto spełnia rolę ekranu zatrzymującego neutrony. Jednak te reaktory nie znajdują zastosowania w elektrowniach jądrowych, mogą służyć jako badawcze, czego przykładem jest polski reaktor Maria.

2.2. Podział według generacji reaktora.

- Pierwszej generacji – prototypowe
- Drugiej generacji - pierwsze reaktory przemysłowe
- Trzeciej generacji - reaktory nowszych konstrukcji
- Czwartej generacji - najnowsze, w fazie projektów

2.3. Podział według energii neutronów.

- Reaktory jądrowe prędkie - reakcja rozszczepienia jest wynikiem działania neutronom prędkim. Nie posiadają one moderatora, a chłodziwo nie może spowalniać neutronów.
- Reaktory jądrowe pośrednie – na neutronach pośrednich.
- Reaktory jądrowe termiczne - stosowane są neutrony termiczne – jest to najczęstszy typ reaktora.
- Reaktory jądrowe epitermiczne.

2.4. Podział według ilości obiegów.

- Jenoobiegowe, medium robocze (najczęściej woda lekka) napędzające turbinę jest ogrzewane bezpośrednio przez reaktor – reaktory BWR.
- Dwuobiegowe, energia cieplna z reaktora jest odbierana przez zamknięty obieg reaktora, który to poprzez wymiennik ciepła ogrzewa medium robocze turbiny – reaktory PWR.
- Trzyobiegowe, wprowadzony jest dodatkowy obieg pomiędzy obiegi reaktora i turbiny, połączony z nimi poprzez wymienniki ciepła, np. reaktor MSR.

2.5. Podział ze względu na używane paliwo.

Stosując jako kryterium podziału rodzaj paliwa, można jeszcze rozbić na podgrupy takie jak:

- Rodzaj paliwa – zastosowany pierwiastek: Uran, Pluton, Uran+Pluton (MOX), Tor.

- Stopień wzbogacenia: naturalne, lekko wzbogacone (2..5%), średnio wzbogacone, wysoko wzbogacone (od 90%).
- Postać chemiczna paliwa: tlenki, dwutlenki, węgliki uranu.
- Kształt elementów paliwowych np. cylindryczne, sferyczne, pręty, rurki, etc.

2.6. Podział ze względu na rodzaj pracy.

- Do pracy ciągłej – wymiana paliwa jest możliwa bez wyłączania reaktora.
- Do pracy okresowej – w celu wymiany paliwa konieczne jest wyłączenie reaktora.

3. Omówienie najczęstszych typów elektrowni atomowych

3.1. Elektrownie wyposażone w reaktory wodne, ciśnieniowe (PWR i WWER) [5] [6].

Zależnie od producenta są one w skrócie nazywane PWR (ang. *Pressurized Water Reactor*) lub WWER (ros. *Wodo-Wodianoj Energietyczeskiej Rieaktor* - wodno-wodny reaktor energetyczny).

Szczegóły konstrukcji.

Schemat blokowy elektrowni jądrowej tego typu został przedstawiony na Fig.1. Zastosowano w nim dwa obiegi wody i w obydwu użyta jest woda lekka.

Zbiornik reaktora jest wykonany najczęściej ze stali ferrytycznej, a od wewnątrz aby zabezpieczyć przed korozją jest powleczony warstwą stali kwasoodpornej. Ścianki zbiornika mają grubość od 100 do 200mm. Zbiornik od góry posiada pokrywę, którą podnosi się na czas wymiany paliwa w reaktorze.

Z tym, że w pierwszym obiegu związanym bezpośrednio z reaktorem jest ona pod dużym ciśnieniem (około 15MPa), co zapobiega jej wrzeniu przy temperaturze około 300..350°C. Do wrzenia wody nie można dopuścić, ponieważ wtedy nie jest ona w stanie odprowadzić ciepła z reaktora. Ciśnienie w tym obiegu jest kontrolowane przez zbiornik wyrównawczy (5) w którym znajduje się „poduszka” z pary wodnej i to poprzez jej chłodzenie lub dogrzewanie reguluje się ciśnienie. Woda w obiegu pierwotnym pełni również funkcję moderatora oraz reflektora. Ze względu na to, że lekka woda pochłania duże ilości neutronów jako paliwo jest wymagany uran lekko wzbogacony 2..4% U^{235} .

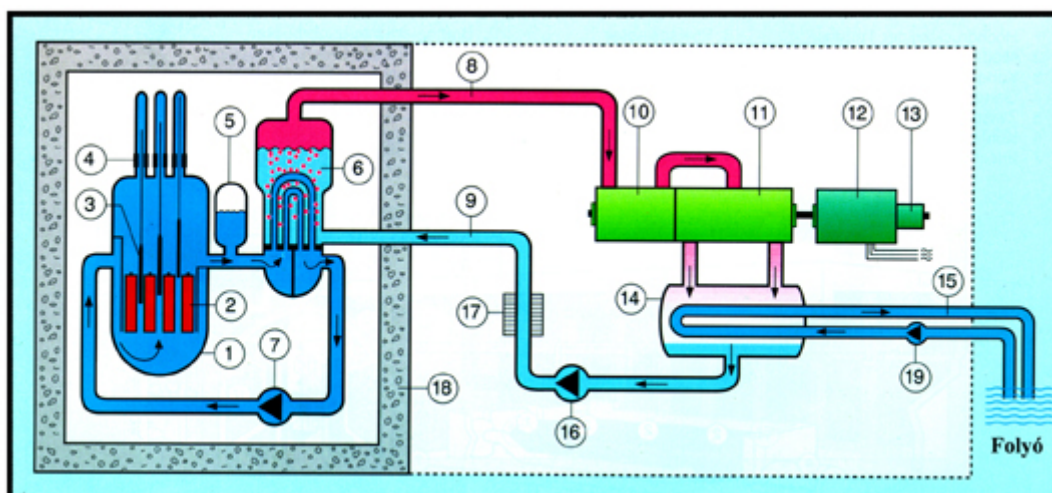


Fig. 1 - Schemat reaktora PWR [5]

1 – zbiornik reaktora	11 – turbina niskociśnieniowa
2 – elementy paliwowe	12 – prądnica
3 – pręty sterujące	13 – starter prądnicy
4 – napęd prętów kontrolnych	14 – skraplacz
5 – zbiornik wyrównawczy ciśnienia	15 – woda chłodząca
6 – generator pary	16 – pompa wytwornicy pary
7 – pompa obiegu pierwotnego	17 – wstępny podgrzewacz wody
8 – świeża para	18 – osłona betonowa
9 – woda	19 – pompa wody chłodzącej
10 – turbina wysokociśnieniowa	

Woda z obiegu pierwotnego w generatorze pary (6) oddaje ciepło wodzie (9) z drugiego obiegu, która później jako para mokra (8) po dotarciu do turbiny (10,11) rozpręża się w niej oddając energię. Para następnie zostaje ochłodzona zimną wodą pompowaną (19) z rzeki lub jeziora. Skroplenie następuje w skraplaczu (14) następnie poprzez pompę (16) jest ona ponownie podawana do generatora pary. W momencie rozruchu prądnicy jest ona wstępnie rozpędzana przy użyciu silników elektrycznych (13).

Specyfika zastosowania.

Reaktory PWR stanowią ponad połowę wszystkich użytkowanych reaktorów w elektrowniach jądrowych. Do ich głównych zalet należy zwiększone bezpieczeństwo poprzez oddzielenie dwóch obiegów od siebie. Oraz fakt że moderatorem i chłodziwem jest jednocześnie woda – co w przypadku awarii braku chłodziwa – automatycznie wyłącza reaktor ponieważ brakuje wtedy również moderatora i reakcja samoczynnie wygasa.

Do wad można zaliczyć ciśnieniowy zbiornik reaktora, który jest elementem bardzo dużym i ciężkim a jednocześnie musi być wykonany z dużą starannością. Zbiorniki takie są wykonywane u producenta w zakładzie a następnie transportowane na miejsce pracy, a to ze względu na możliwości transportu ogranicza ich rozmiary. Rozmiar reaktora ogranicza jego moc cieplną do około 3000MW, a tym samym maksymalną moc elektrowni do około 1300MW.

Ze względu na to, że para w obiegu wtórnym ma gorsze parametry niż w para w elektrowniach konwencjonalnych sprawność netto elektrowni PWR na ogół nie przekracza 33%.

Kolejnym problemem związanym z taką budową reaktora jest w większości przypadków uciążliwy załadunek paliwa ze względu na konieczność otwierania komory reaktora.

Jeszcze faktem nie będącym bez znaczenia jest konieczność wcześniejszej obróbki paliwa – jego wzbogacania.

3.2. Elektrownie posiadające reaktory wodne, wrzące (BWR i RBMK).

Szczegóły konstrukcji. [5]

W przypadku Boiling Water Reactor (BWR) podobnie jak w reaktorach PWR chłodziwem jest lekka woda jednak w tym rozwiązaniu istnieje jedynie jeden obieg chłodziwa - obieg ten został schematycznie przedstawiony na Fig.2. Para (6) napędzająca turbinę (8)(9) odparowuje bezpośrednio w reaktorze (1). Reaktor pełni tutaj rolę wytwornicy pary, wewnątrz zbiornika reaktora umieszczone są pompy recyrkulacyjne, (4) które wymuszają obieg chłodziwa. W górnej części zbiornika (1) otrzymujemy się parę nasyconą o temperaturze około 280°C i ciśnieniu około 7MPa.

Ze względu na zastosowanie lekkiej wody jako moderatora konieczne jest wzbogacanie uranu.

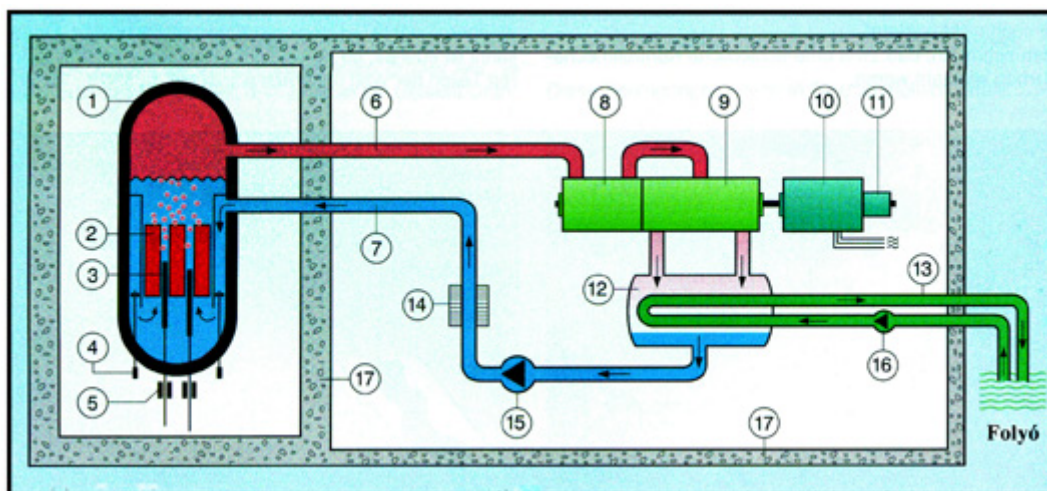


Fig. 2 - Schemat reaktora BWR [5]

1 – zbiornik reaktora	10 – prądnica
2 – elementy paliwowe	11 – starter prądnicy
3 – pręty sterujące	12 – skraplacz
4 – pompy recyrkulacyjne	13 – woda chłodząca
5 – napęd prętów kontrolnych	14 – wstępny podgrzewacz wody
6 – świeża para	15 – pompa wody obiegu reaktora
7 – woda	16 – pompa wody chłodzącej
8 – turbina wysokociśnieniowa	17 – osłona betonowa
9 – turbina niskociśnieniowa	

Specyfika zastosowania.

Reaktory BWR w stosunku to PWR są dużym uproszczeniem konstrukcyjnym, co powoduje o wiele niższe koszty budowy. Jest to zwłaszcza wynikiem braku grubościennego zbiornika ciśnieniowego. Jednak ze względu na to, że w zbiornikach reaktorów BWR znajduje się para muszą być one dużo większe niż PWR, aby zachować tę samą moc cieplną. W układzie jest też brak wielu pomp pierwotnego obiegu ciśnieniowego. Sprawność w tych elektrowniach nie przekracza 34% jednak moc reaktora nie jest ograniczona ze względu na brak zbiornika ciśnieniowego.

Jednak z powodu wyeliminowania obiegu pierwotnego cały obieg pracuje w warunkach radioaktywnych. Wiąże to ze sobą problemy z ekranowaniem, a tym samym obsługą i konserwacją całego obwodu w warunkach radioaktywnych. Jednoobiegowy system także stwarza większe prawdopodobieństwo zagrożenia skażeniem w przypadku awarii.

Do reaktorów wodnych wrzących zalicza się również reaktory RBMK (ros. Реактор Большой Мощности Канальный (Reaktor Bolszoy Moszcznosti Kanalnyj)) czyli Reaktor Kanałowy Wielkiej Mocy. Jest to reaktor moderowany grafitem i chłodzony lekką wodą (Fig.3.). Do jego głównych zalet należy możliwość użycia jako paliwa uranu naturalnego bez konieczności wzbogacania lub oczyszczania oraz wymiana paliwa podczas pracy reaktora. Jednak ze względu na moderowanie grafitem to w przypadku braku lub zmniejszenia chłodzenia (lekkiej wody) następuje wzrost reaktywności rdzenia, co w prostej linii prowadzi do awarii.

Ze względu na zastosowanie grafitu jako moderator to jako paliwo mógł być zastosowany uran naturalny.

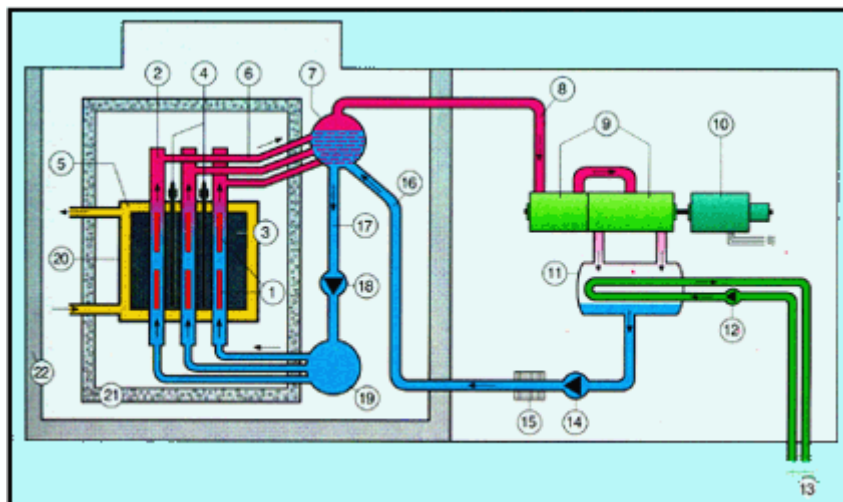


Fig. 3 - Schemat reaktora RBMK [5]

1 – paliwo (Uran)	10 – prądnica	17 – woda obiegu reaktora
2 – rury ciśnieniowe	11 – skraplacz	18 – pompa recyrkulacyjna
3 – moderator grafitowy	12 – pompa wody chłodzącej	19 – zbiornik rozdzielający
4 – pręty kontrolne	13 – woda chłodząca	20 – osłona stalowa
5 – gaz ochronny	14 – pompa wody obiegu reaktora	21 – osłona betonowa
6 – woda / para	15 – wstępny podgrzewacz wody	22 – budynek reaktora
7 – separator pary	16 – woda obiegu reaktora	
8 – para		
9 – turbina		

Tego typu reaktor znajdował się w Czarnobylu i taka konstrukcja poza zaniedbaniami ze strony personelu była główną przyczyną awarii.

3.3. Elektrownie z reaktorem ciężkowodnym.

Szczegóły konstrukcji.

W reaktorach rodziny HWR (Heavy Water Reactor) w których moderatorem jest ciężką wodą (D_2O) jako paliwa można używać uranu naturalnego ze względu na to że woda ciężka w przeciwieństwie do lekkiej ma mały przekrój czynny na pochłanianie neutronów. Jednak aby wystarczająco spowolnić neutrony, konieczne jest zastosowanie kilkakrotnie większej ilości wody ciężkiej niż wymagałoby to wody lekkiej. W związku z tym reaktory te mają dużo większe gabaryty. W większości przypadków woda ciężka jednocześnie jest używana jako chłodziwo. Przykładem ciśnieniowego reaktora ciężkowodnego jest produkowany w Kanadzie reaktor CANDU (Canadian Deuterium Uranium), którego budowa została zamieszczona na Fig.4.

W reaktorze CANDU pręty paliwowe są umieszczone poziomo w metalowym zbiorniku reaktora zwanym Calandria. Pręty paliwowe nie znajdują się bezpośrednio w zbiorniku reaktora tylko są jeszcze umieszczone w kanałach ciśnieniowych, przez które przetłaczana jest ciężka woda odbierająca od nich ciepło. Przestrzeń pomiędzy kanałami jest również wypełniona wodą ciężką z tym, że pod niskim ciśnieniem.

Ogrzana ciężka woda z kanałów ciśnieniowych jest przetłaczana do generatora pary gdzie ogrzewa wodę lekką krążącą w obiegu wtórnym. Obieg wtórny jest analogiczny jak w elektrowni z reaktorem PWR.

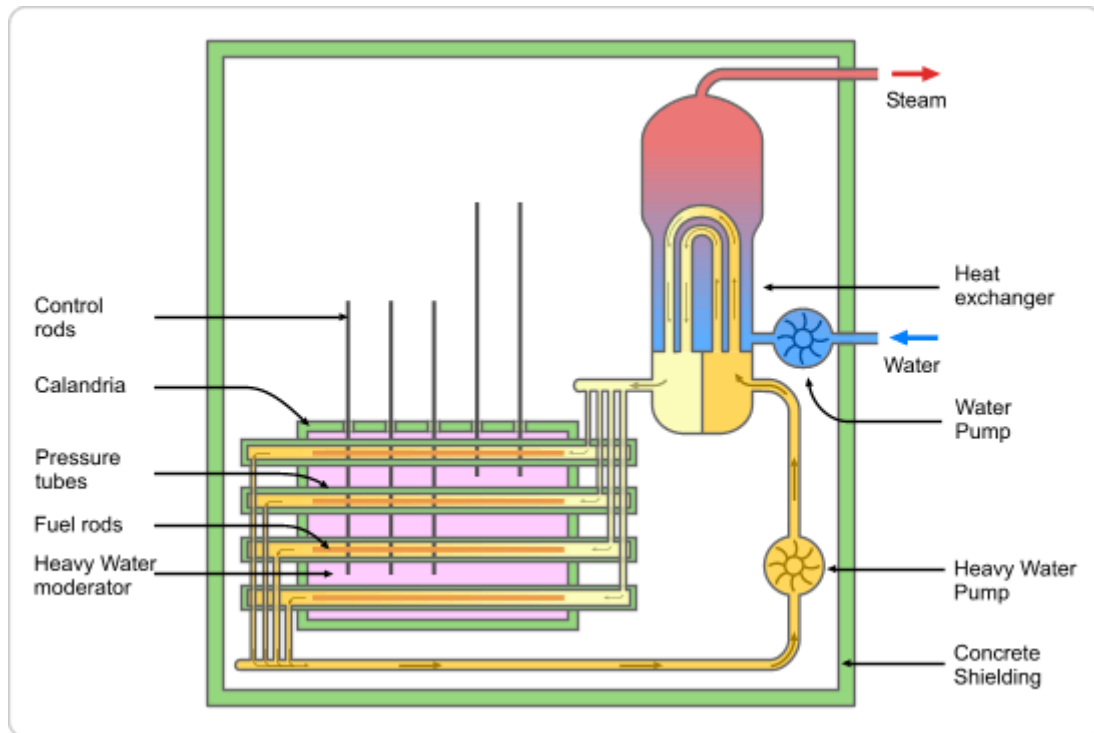


Fig. 4 - Schemat reaktora CANDU [12]

control rods – pręty sterujące	heat exchanger – generator pary
calandria – zbiornik reaktora	water – woda obiegu wtórnego
pressure tubes – kanały ciśnieniowe	water pump – pompa wody obiegu wtórnego
fuel rods – pręty paliwowe	heavy water pump – pompa ciężkiej wody obiegu reaktora
heavy water moderator – moderator ciężkowodny	concrete shielding – osłona betonowa
steam – para	

Specyfika zastosowania.

Do głównych zalet reaktorów ciężkowodnych należy możliwość pracy na paliwie naturalnym, co zmniejsza koszty o budowę instalacji do wzbogacania uranu. Niestety wymagana jest woda ciężka w dużej ilości, której otrzymywanie jest bardzo kosztowne.

Kolejną bardzo ważną zaletą reaktora CANDU jest możliwość wymiany paliwa w trakcie pracy reaktora, przez co unika się przestojów w pracy.

3.4. Elektrownie o reaktorze z chłodzeniem gazowym (GCR, AGR, HTGR).

Szczegóły konstrukcji.

- GCR – Gas Cooled Reactor – Reaktor Chłodzony Gazem,
- AGR – Advanced Gas-Cooled Reactor – Zaawansowany Reaktor Chłodzony Gazem,
- HTGR – High Temperature Gas-Cooled Reactor – Wysokotemperaturowy Reaktor Chłodzony Gazem.

Stanowią one grupę reaktorów chłodzonych gazem i moderowanych grafitem. Główną ideą stworzenia tych reaktorów było podniesienie temperatury pracy reaktora, co z kolei jest niezbędne do zwiększenia sprawności całej elektrowni nawet do około 50% w przypadku HTGR. Zastosowanie gazu jako chłodziwa umożliwia podniesienie temperatury

Istnieją trzy podstawowe typy takich reaktorów:

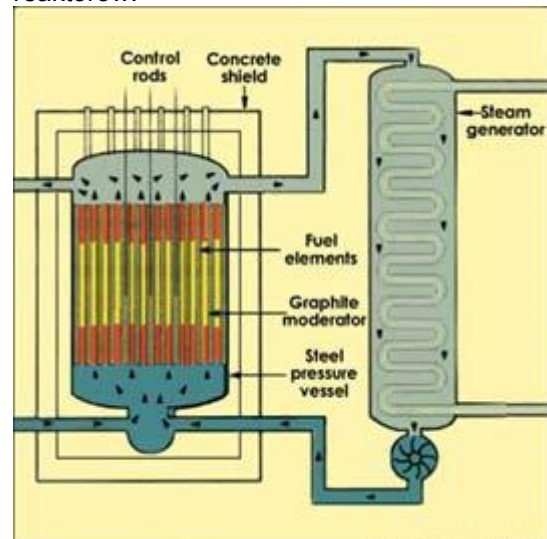


Fig. 5 - Schemat reaktora GCR [8]

steel pressure vessel - zbiornik reaktora
fuel elements - elementy paliwowe
control rods – pręty sterujące
concrete shield – osłona betonowa
graphite moderator – moderator grafitowy
steam generator – generator pary

pracy bez konieczności zwiększania ciśnienia chłodziwa. W tym przypadku temperatura jest ograniczona wytrzymałością temperaturową materiałów użytych do budowy instalacji, reaktora oraz elementów paliwowych.

▪ Typ GCR.

Pierwsze reaktory tego typu jako chłodziwa używały dwutlenku węgla. Jako paliwo był wykorzystywany metaliczny uran naturalny zamknięty w uźebrowanych powłokach ze stopu magnezowego. Tak przygotowane paliwo nosi nazwę magnekoksu. W reaktorach gazowych moderatorem jest grafit.

Rdzeń reaktora jest wykonany z elementów grafitowych posiadających wewnątrz kały paliwowe. Rdzeń na ogół znajduje się w kulistym zbiorniku wykonanym z betonu sprężonego. Dwutlenek węgla przechodząc przez reaktor ogrzewa się do temperatury 415°C przy ciśnieniu około 2,8MPa. Wyższa temperatura pracy nie jest możliwa ze względu na wytrzymałość „koszulek” magnezowych.

Dalsza część elektrowni jest typowa dla układów dwuobiegowych, w drugim obiegu jest zastosowana woda lekka. Para wytworzona w generatorze pary osiąga temperaturę do 400°C.

▪ Typ AGR.

Reaktor AGR (Advanced Gas Cooled Reactor) jest drugą generacją reaktora GCR. Główne zmiany polegają na modyfikacji paliwa tak, aby wytrzymało pracę w dużo wyższej temperaturze. Powłoki magnezowe w paliwie GCR zostały zastąpione powłokami ze stali nierdzewnej lub Zircaloyu, co umożliwiło pracę w temperaturze 650°C zamiast 415°C. A tym samym podniesienie temperatury pary do 565°C. Co umożliwia stosowanie turbin parowych typowych dla elektrowni konwencjonalnych. Jednak ze względu na gorszy bilans neutronów zabieg taki wymaga używania jako paliwa uranu wzbogaconego do wartości 2..3%. Mimo konieczności wzbogacania według statystyk z Wielkiej Brytanii elektrownie te posiadają najniższe koszty wytworzenia energii elektrycznej.

▪ Typ HTGR. [9]

Jest to trzecia generacja reaktora chłodzonego gazem i moderowanego grafitem. W tego typu reaktorach paliwo ma złożoną budowę i jest nim mieszanina węgla uranu oraz węgla toru. Ze względu na paliwo tego typu reaktory są też określane jako reaktory THTR (Thorium High Temperature Reactor). Uran stosowany w tym przypadku jest wzbogacany do wartości 93..97%. Mieszanina zawiera dziesięć razy tyle materiału paliworodnego ThC_2 niż UC_2 i jest ona formowana w granulki o średnicy około 0,5 .. 0,7 mm

Ostatecznie granulki paliwowe są prasowane w większe elementy najczęściej w postaci kul o średnicy 60mm lub rzadziej w postaci walców. Aby paliwo wytrzymało wysokie temperatury i miała dużą powierzchnię to mieszanina UC_2 i ThC_2 jest pokryta kilkoma warstwami porowatego grafitu pirolitycznego, litego grafitu, znów pirolitycznego potem węgla krzemu i znów litego grafitu. Jest to schematycznie przedstawione na Fig.6.

Dzięki tak złożonej budowie elementu paliwowego możliwe jest utrzymywanie w rdzeniu temperatury na poziomie 1100°C. Budowa reaktora została przedstawiona na rysunku Fig.7. Sarkofag reaktora (6) jest

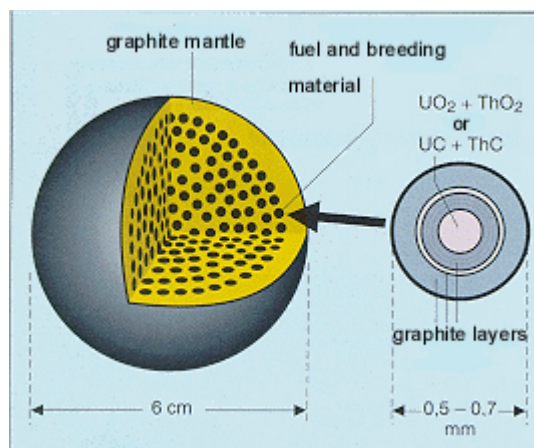


Fig. 6 - Schemat budowy elementu paliwowego reaktora HTGR [9]

wykonany z grubościennego betonu sprężonego, do którego poprzez kanał załadowczy (9) ładowane jest świeże paliwo. Paliwo z racji na to, że jest w postaci kul ma możliwość przemieszczania wewnątrz reaktora (1) i po wypaleniu jest odbierane przez dolny kanał (8). Podczas pracy w reaktorze znajduje się 675000 kul. Taka budowa w sposób istotny ułatwia wymianę paliwa, która się odbywa w sposób płynny.

Ze względu na temperaturę pracy jako materiał konstrukcyjny zastosowany został grafit, który pełni również funkcję moderatora oraz reflektora. Natomiast jako gazowe chłodziwo jest zastosowany hel (15), który krąży w obiegu reaktor – generator pary (4) – pompa recyrkulacyjna (5) i znów reaktor, maksymalnie przyjmując temperaturę 750°C. Natomiast możliwa do osiągnięcia temperatura pary (12) to 530°C.

Specyfika zastosowania.

Do wad trzeba zaliczyć przede wszystkim skutki niekorzystnych właściwości cieplnych gazu, co wymaga dużych powierzchni oddających ciepło, oraz dużej wydajności tłoczni gazu chłodzącego. Co istotnie zwiększa gabaryty całej konstrukcji.

Do głównych zalet reaktorów chłodzonych gazem należą: stosunkowo prosta budowa (niskie ciśnienia), duża niezawodność (niskie ciśnienia i znikoma korozja), ponadto gaz w niższym stopniu jest aktywowany oraz niski przekrój na pochłanianie neutronów przez gaz. Cechy te w dużym stopniu przekładają się na niższy koszt budowy oraz utrzymania, jednocześnie są to też reaktory (AGR i HTGR) o najwyższej sprawności.

W przypadku reaktorów HTGR ze względu na możliwą do uzyskania dość wysoka temperaturę istnieje perspektywa wykorzystania ich w kompleksowej gospodarce energetycznej (np. wytop surówki, synteza chemiczna, zgazowanie węgla, produkcja energii elektrycznej).

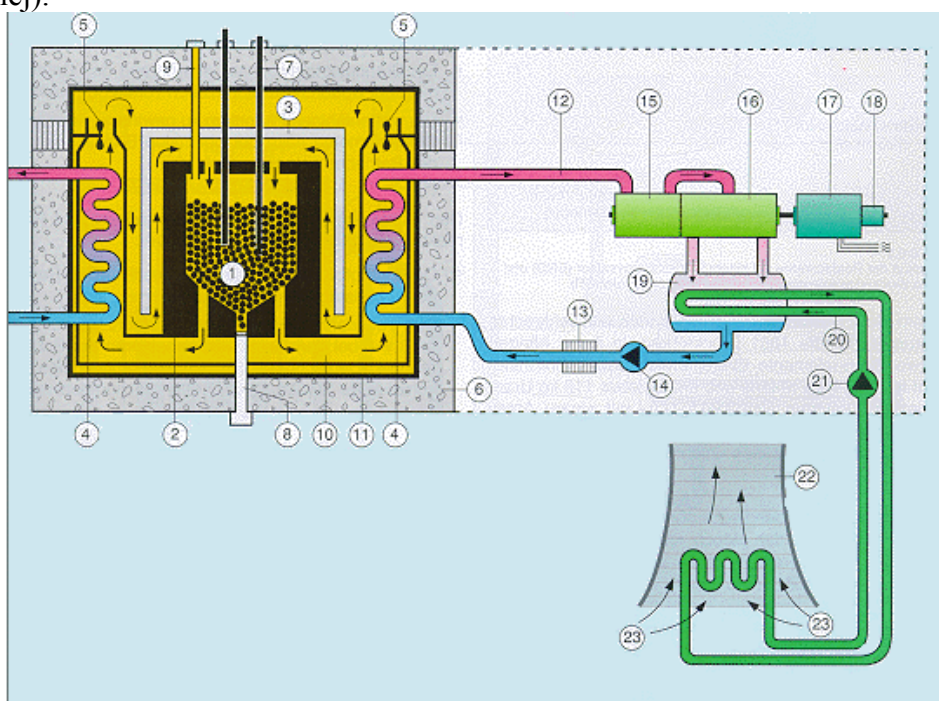


Fig. 7 - Schemat budowy reaktora THGR. [9]

1 – rdzeń reaktora
 2 – reflektory grafitowe
 3 – metalowa powłoka
 4 – generator pary
 5 – pompy recyrkulacyjne gazu
 6 – sarkofag ze betonu sprężonego
 7 – pręty kontrolne
 8 – kanał wypalonego paliwa
 9 – kanał załadunku świeżego paliwa
 10 – chłodziwo gazowe (Hel)
 11 – szczelna powłoka stalowa
 12 – świeża gorąca para

13 – wstępny podgrzewacz wody
 14 – pompa wody obiegu generatora pary
 15 – turbina wysokociśnieniowa
 16 – turbina niskociśnieniowa
 17 – prądnica
 18 – starter prądnicy
 19 – skraplacz
 20 – woda chłodząca
 21 – pompa wody chłodzącej
 22 – Chłodnia kominowa
 23 – przepływ powietrza

3.5. Elektrownie z reaktorami prędkimi (LMFR na szybkich neutronach).

Szczegóły konstrukcji.

W reaktorach tego typu rozszczepienia nie są powodowane jak w przypadku wyżej omówionych reaktorów poprzez neutrony termiczne (o niskich energiach), tylko przez tak zwane neutrony prędkie o energiach w zakresie MeV. Najbardziej rozwiniętą konstrukcją wśród reaktorów prędkich powielających (FBR) jest reaktor chłodzony ciekłym sodem. Schemat elektrowni jądrowej z reaktorem LMFR jest przedstawiony na rysunku Fig.9.

Reaktory prędkie nie używają wody jako chłodziwa, ponieważ woda jest moderatorem i by eliminowała neutrony prędkie. Jednak użycie ciekłego sodu wiąże ze sobą poza korzyściami pewne problemy. Temperatura topnienia sodu wynosi 98°C dlatego aby nie dopuścić do krzepnięcia w momencie wyłączenia reaktora konieczne są układy podgrzewania. Ponadto sód jest materiałem łatwo palnym oraz ulega aktywacji przez neutrony. Jednak okazuje się, że zapewnienie bezpieczeństwa nie jest trudniejsze niż w przypadku instalacji wysokociśnieniowych stosowanych w reaktorach PWR.

Zalety stosowania ciekłego sodu to przede wszystkim bardzo dobre przewodnictwo cieplne, niska absorpcja neutronów, oraz małe spowalnianie neutronów.

Ze względów bezpieczeństwa w elektrowni z reaktorem LMFR, są stosowane trzy obiegi chłodzenia. W pierwszym znajduje się ciekły sód aktywny (5), który poprzez wymiennik ciepła (10) ogrzewa sód nie aktywny (11), a ten z kolei dostarcza energii do generatora pary (13).

Rdzeń reaktora (1)(2) Fig.8. jest tak skonstruowany, że wewnątrz znajdują się elementy zawierające pluton otoczone zubożonym UO_2 . Dodatkowo w każdym pręcie paliwowym strefa centralna jest wypełniona ($UO_2 + PuO_2$), a strefy górna i dolna - pastylkami ze zubożonego UO_2 . W ten sposób paliwo w rdzeniu jest ze wszystkich stron otoczone warstwą materiału paliworodnego.

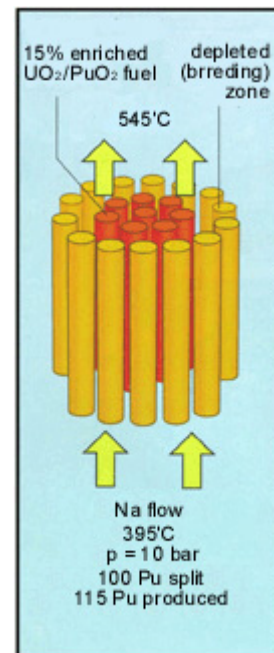


Fig. 8 - Model rdzenia reaktora LMFR. [9]

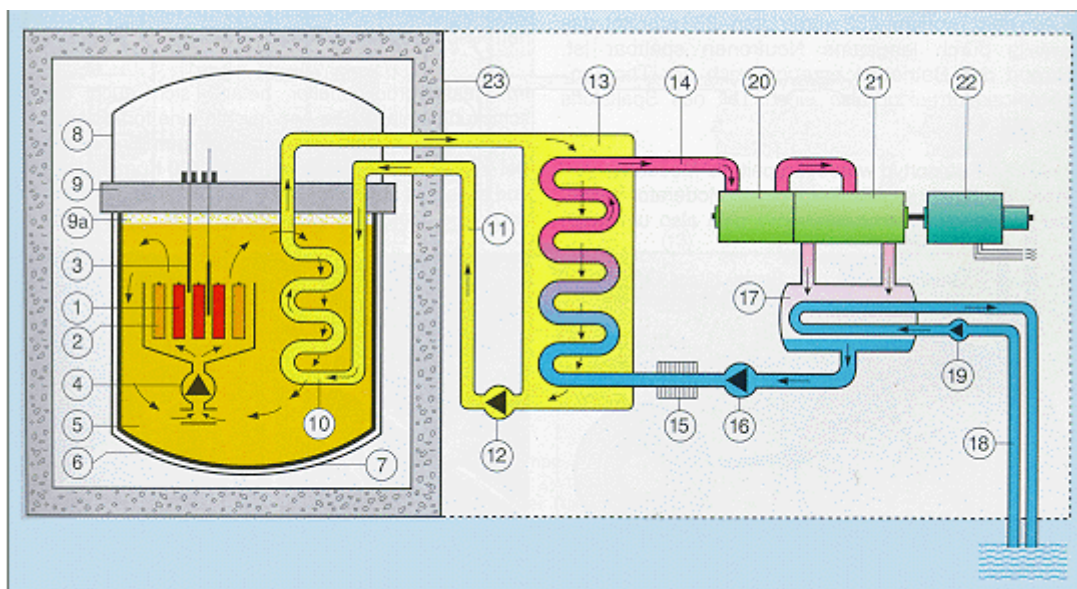


Fig. 9 - Schemat budowy reaktora LMFBR. [9]

1 – zestaw paliwowy	13 – generator pary
2 – zestaw paliworodny	14 – świeża gorąca para
3 – pręty kontrolne	15 – wstępny podgrzewacz wody
4 – pompa sodu obiegu pierwotnego	16 – pompa wody obiegu generatora pary
5 – obieg pierwotny (sód aktywny)	17 – skraplacz
6 – zbiornik reaktora	18 – woda chłodząca
7 – powłoka zabezpieczająca	19 – pompa wody chłodzącej
8 – pokrywa reaktora	20 – turbina wysokociśnieniowa
9 – pokrywa	21 – turbina niskociśnieniowa
10 – wymiennik ciepła sód / sód	22 – prądnica
11 – szczelna powłoka stalowa	23 – budynek reaktora
12 – pompa sodu obiegu wtórnego	

W czasie pracy reaktora z normalnie nieużytecznego izotopu uranu U-238 powstają, w procesie pochłaniania neutronów i następujących rozpadów beta izotopy plutonu (głównie Pu-239). Pluton może być następnie wydzielony i użyty ponownie jako paliwo. Reaktor powielający to reaktor, który wytwarza w ten sposób więcej plutonu, niż go zużywa.[12]

Specyfika zastosowania. [12]

Praktyczne zastosowanie reaktorów prędkich jest bardzo ograniczone, pomimo teoretycznie znacznie lepszej od reaktorów termicznych ekonomiki (reaktor powielający jest w stanie, startując z tej samej ilości uranu, wyprodukować setki razy więcej energii niż reaktor termiczny). Czynnikiem ograniczającym są przede wszystkim:

- obawy o bezpieczeństwo - ze względu na stosowanie ciekłego sodu, reaktory powielające uważane są za mniej bezpieczne,
- duże koszty budowy reaktora, gdyż niewiele materiałów jest w stanie oprzeć się korodującemu działaniu sodu,
- konieczność stosowania wysokowzbogaconego paliwa, konieczność budowy przy reaktorze zakładu przetwarzania zużytego paliwa i odzyskiwania plutonu,
- związana z powyższym możliwość rozprzestrzeniania broni jądrowej.

3.6. Elektrownia wyposażona w reaktory solne (MSR).

Szczegóły konstrukcji. [14]

W reaktorach typu MSR (Molten Salt Reactor) (Fig.9.)w przeciwieństwie do większości innych paliwo nie jest w stanie stałym, ale w ciekłym. Paliwem i jednocześnie chłodziwem są stopione soli, najczęściej jest to mieszanina fluorków sodu, cyrkonu i uranu. Reakcja w paliwie zachodzi jedynie, podczas gdy przepływa ono przez grafitowe kanały rdzenia i tam

osiąga temperaturę do 700°C. Reaktor jest sterowany prętami kontrolnymi dokładnie tak samo jak większość reaktorów jądrowych. W większości produktami rozpadu są fluorki. Reaktor ten jest trzybiegowy, w drugim obiegu również jako chłodziwo są używane stopione sole.

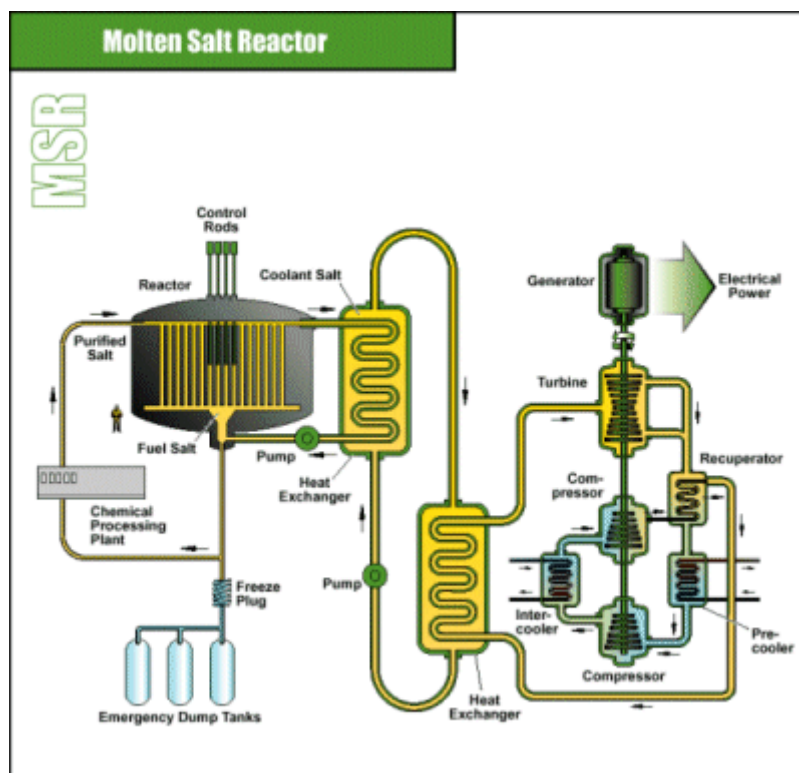


Fig. 10 - Schemat budowy reaktora MSR. [14]

Specyfika zastosowania.

Ciekłe paliwo jest tutaj bardzo dużą zaletą, umożliwia bowiem bezpośrednie przekazywanie ciepła od paliwa w wymienniku ciepła. Ponadto ciecz jest jednorodna w swojej objętości i można w prosty sposób kontrolować i zmieniać jej skład wpływając w ten sposób dodatkowo na prace reaktora.

System MSR posiada zamknięty cykl paliwowy i umożliwia prowadzenie najlepszej gospodarki aktynowcami.

Niestety z punktu ekonomicznego nie jest to najtańsze rozwiązanie, ponieważ posiada dużą ilość wymaganych podzespołów.

Budowa reaktora 1000MW jest planowana na rok 2025.

4. Podsumowanie.

Podsumowanie ważniejszych cech reaktorów zostało przedstawione w Tabelicy 1.

Tablica 1. – Zestawienie cech reaktorów.

Typ reaktora	Udział typu na świecie ¹	Sprawność	tem p. pary	paliwo	wypaleni e paliwa	chłodziwo	moderator	ilość obiegów	uwagi
-	%	%	°C	-	MWd/kg	-	-	-	-
PWR	61	30..33	?	Uran lekko wzbogacony	10..30	Woda lekka	Woda lekka	1	
BWR	21	34	280	Uran lekko wzbogacony	?	Woda lekka	Woda lekka	1	

RBMK	3	?	?	Uran naturalny	?	Woda lekka	Grafit	1	Wycofywane
PHWR	9	?	?	Uran naturalny	?	Woda ciężka	Woda ciężka	2	
GCR	5	31,5	400	Uran naturalny	4,7	Dwutlenek węgla	Grafit	2	
AGR		41	565	Uran lekko wzbogacony	18	Dwutlenek węgla	Grafit	2	
HTGR		45	530	Uran wysoko wzbogacony + Tor	113	Hel	Grafit	2	Prototypy
FBR (LMFBR)	1	40	487	Uran + Pluton	?	Ciekły sód	brak moderatora	3	

¹ źródło [10]

5. Słownik skróconych nazw typów reaktorów. [11]

- **PWR** reaktor ciśnieniowy chłodzony i moderowany lekką wodą (Pressurized light-Water-moderated and cooled Reactor)
- **BWR** reaktor wrzący chłodzony i moderowany lekką wodą (Boiling Light-Water - moderated and cooled Reactor)
- **LWR** reaktor chłodzony i moderowany lekką wodą (Light-Water-cooled and moderated Reactor)
- **HWR** reaktor ciężko wodny (Heavy Water Reactor)
- **HWLWR** reaktor wrzący chłodzony lekką wodą, moderowany wodą ciężką (Heavy Water-moderated, boiling - Light Water-Reactor)
- **PHWR** reaktor ciśnieniowy chłodzony i moderowany ciężką wodą (Pressurized Heavy-Water-moderated and cooled Reactor)
- **SGHWR** reaktor wrzący chłodzony lekką wodą, moderowany wodą ciężką (Steam-Generating Heavy-Water Reactor)
- **HWGCR** reaktor chłodzony gazem moderowany ciężką wodą (Heavy Water-moderated Gas-Cooled Reactor)
- **CANDU** reaktor kanadyjski typu PHWR (CANadian Deuterium -Uranium Reactor)
- **LWGR** reaktor chłodzony lekką wodą z moderatorem grafitowym (Light-Water -cooled. Graphite-moderated Reactor)
- **PTGR** reaktor kanałowy z moderatorem grafitowym (Pressurized Tube Graphite Reactor)
- **GCR** reaktor chłodzony gazem z moderatorem grafitowym (Gas-Cooled graphite-moderated Reactor) (Advanced Gas cooled, graphite- moderated Reactor)
- **HTR** reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem z moderatorem grafitowym (High-Temperature gas-cooled Reactor)
- **HTGR** reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem z moderatorem grafitowym (High -Temperature Gas-cooled-Reactor)
- **THTR** reaktor wysokotemperaturowy na paliwie torowym (Thorium High-Temperature Reactor)
- **FBR** reaktor prędkości powielający (Fast Breeder Reactor)
- **LMKBR** reaktor prędkości powielający chłodzony sodem (Liquid-Metal-cooled, Fast Breeder Reactor)
- **LWBR** reaktor powielający termiczny chłodzony lekką wodą (Light-Water Breeder Reactor)
- **MSBR** reaktor powielający chłodzony stopionymi solami (Molten Salt Breeder Reactor)
- **GCFR** reaktor prędkości chłodzony gazem (Gas-Cooled Fast Reactor)
- **OMR** reaktor z chłodziwem i moderatorem organicznym (Organic-Mode-rated and cooled Reactor)

- **SZR** reaktor chłodzony sodem moderowany wodorotlenkiem cyrkonu (Sodium cooled, Zirconium-hydride-moderated Reactor)
- **WWR** reaktor typu PWR budowany w ZSRR, (wodno-wodny reaktor energetyczny ros. *Wodo-Wodianoj Energieticzeskij Reaktor* -).
- **RBMK** reaktor moderowany grafitem i chłodzony lekką wodą Reaktor Kanałowy Wielkiej Mocy (Реактор Большой Мощности Канальный (czyt. Reaktor Bolszoj Moszcznosti Kanalnyj))

6. Spis ilustracji.

Fig. 1 - Schemat reaktora PWR [5].....	5
Fig. 2 - Schemat reaktora BWR [5].....	7
Fig. 3 - Schemat reaktora RBMK [5].....	8
Fig. 4 - Schemat reaktora CANDU [12].....	9
Fig. 5 - Schemat reaktora GCR [8].....	9
Fig. 6 - Schemat budowy elementu paliwowego reaktora HTGR [9].....	10
Fig. 7 - Schemat budowy reaktora THGR. [9].....	11
Fig. 8 - Model rdzenia reaktora LMFR. [9].....	12
Fig. 9 - Schemat budowy reaktora LMFBR. [9].....	13
Fig. 10 - Schemat budowy reaktora MSR. [14].....	14

7. Bibliografia

- [1] http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_j%C4%85drowa
- [2] http://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_cieplna
- [3] http://pl.wikipedia.org/wiki/Reaktor_j%C4%85drowy
- [4] http://pl.wikipedia.org/wiki/Rozszczepienie_j%C4%85dra_atomowego
- [5] <http://www.atomeromu.hu/mukodes/tipusok/pwr-e.htm>
- [6] http://pl.wikipedia.org/wiki/Reaktor_wodny_ci%C5%9Bnieniowy
- [7] <http://www.ilo.suwalki.pl/energ/doc/klasyfikacja.html>
- [8] <http://www.coolschool.ca/lor/PH11/unit9/U09L04.htm>
- [9] <http://www.atomeromu.hu/mukodes/tipusok/thtr-e.htm>
- [10] http://www.cna.ca/curriculum/cna_nuc_tech/reactor_types-eng.asp?bc=Major%20Reactor%20Types&pid=Major%20Reactor%20Types
- [11] http://www.wnt.if.pwr.wroc.pl/kwazar/rokfizyki2005/146166/typy_reaktorow.htm
- [12] http://pl.wikipedia.org/wiki/Reaktor_pr%C4%99dki
- [13] <http://pl.wikipedia.org/wiki/CANDU>
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_reactor