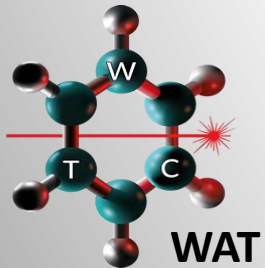


OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Bezpieczeństwo radiologiczne kraju w perspektywie rozwoju polskiej energetyki jądrowej.

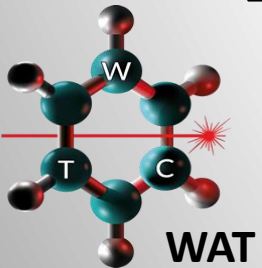


Oprac.: J.Stocki, ZRiMS ICh WNTiCh
(jaroslaw.stocki@wat.edu.pl)

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Plan wykładu:

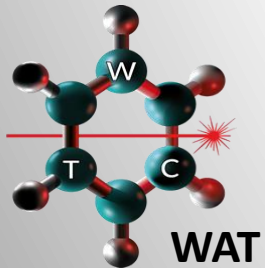
1. Wymagania i stan obecny bezpieczeństwa radiologicznego, w świetle obowiązującej strategii i polityki w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej .
2. Podstawowe zasady i środki zapewnienia bezpieczeństwa energetyki jądrowej.
3. Charakterystyka techniczna systemów bezpieczeństwa reaktorów jądrowych (EPR i AP1000) planowanych do budowy w Polsce.
4. Wnioski.



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Ochrona radiologiczna, zgodnie z definicją znajdującą się w ustawie Prawo atomowe (tekst jednolity z 14 lutego 2007 r., Dz. U. Nr 42, poz. 276, z późniejszymi zmianami), obejmuje

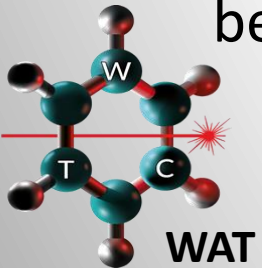
zespół czynności zmierzających do zapobiegania narażeniu ludzi i skażeniu środowiska, a w przypadku braku możliwości zapobieżenia takim sytuacjom - ograniczenie ich skutków do poziomu tak niskiego, jak tylko jest to rozsądnie osiągalne, przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych, społecznych i zdrowotnych.



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Na stan bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w kraju wpływ mają następujące elementy składowe:

- krajowa infrastruktura jądrowa oraz prowadzone na terytorium RP prace z materiałami jądrowymi i promieniotwórczymi,
- system prawny oraz instytucjonalny w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej,
- prace badawczo-rozwojowe w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej,
- wymiana doświadczeń i dobrych praktyk, służących harmonizacji norm bezpieczeństwa oraz doskonaleniu ram regulacyjnych, w celu ciągłej poprawy bezpieczeństwa.

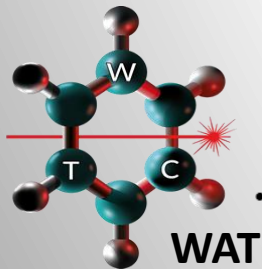


- Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Krajowy nadzór nad **bezpieczeństwem jądrowym i ochroną radiologiczną** obejmuje:

- obiekty jądrowe i inną działalność związaną z jądrowym cyklem paliwowym,
- działalność mającą związek z postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi,
- działalność powiązaną z wykorzystaniem materiałów jądrowych,
- działalność związaną z wykorzystaniem źródeł promieniotwórczych, urządzeń wytwarzających promieniowanie jonizujące oraz innych źródeł promieniowania jonizującego,
- działalność prowadzoną w warunkach narażenia na promieniowanie naturalne pochodzące od materiałów zawierających podwyższone stężenia naturalnych izotopów promieniotwórczych.

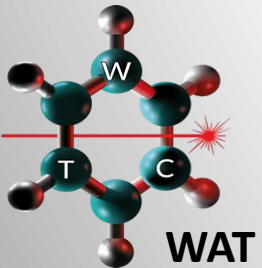


• Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Aktualnie (2025 r.) w Polsce do kategorii obiektów jądrowych zaliczyć należy:

- reaktor badawczy MARIA,
- wyłączony z eksploatacji i znajdujący się w fazie likwidacji reaktor badawczy EWA,
- dwa przechowalniki wypalonego paliwa jądrowego.

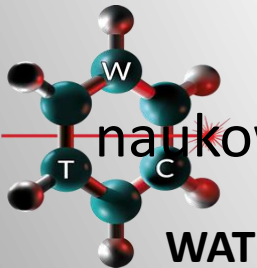


- Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

W Polsce objętych nadzorem i kontrolą przez organy dozoru jądrowego jest/są:

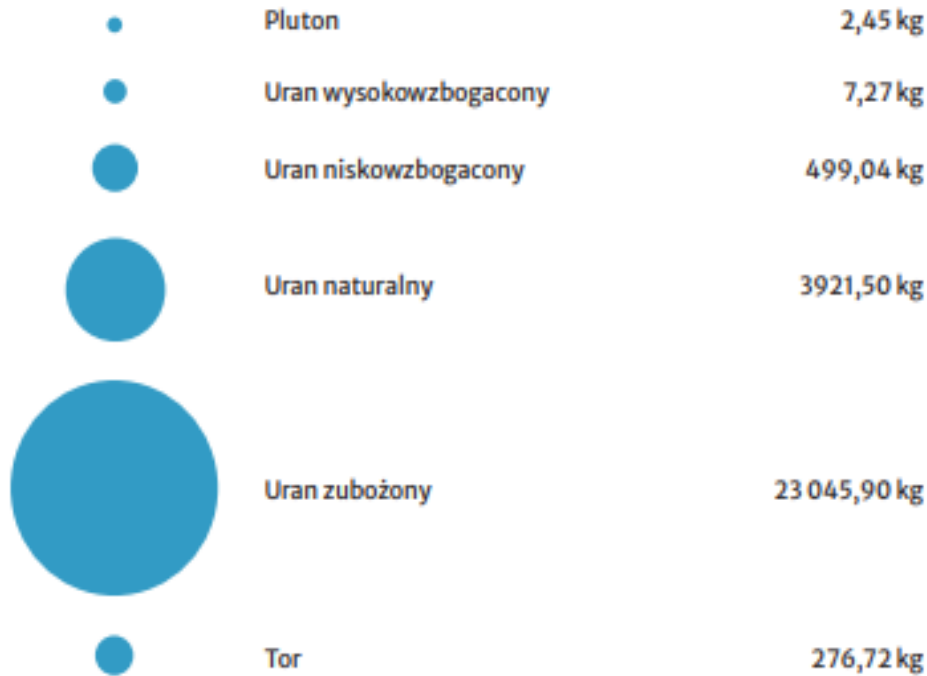
- 7368 działalności związanych z narażeniem na promieniowanie jonizujące, wykonywanych przez 4770 jednostek organizacyjnych.
- zamknięte źródła promieniotwórcze stosowane są w 2447 działalnościach, głównie w przemysłowej aparaturze kontrolno-pomiarowej, radiografii przemysłowej, brachyterapii, telegammaterapii, geo-pomiarach.
- otwarte źródła promieniotwórcze są stosowane w 484 działalnościach, w medycynie nuklearnej i badaniach naukowych. Łącznie stosowane są 12 532 źródła promieniotwórcze.
- urządzenia wytwarzające promieniowanie jonizujące – akceleratory i aparaty rentgenowskie, stosowane są w 3 975 działalnościach, w radioterapii, radiografii przemysłowej, weterynarii, do kontroli osób, bagażu i przesyłek oraz do badań naukowych.



• Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

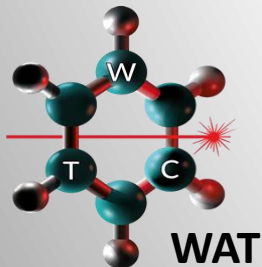
Zasoby materiałów jądrowych w Polsce



Materiały jądrowe w Polsce są wykorzystywane przeważnie jako osłony dla źródeł promieniotwórczych w postaci pojemników z uranu zubożonego.

Pozostałe wykorzystywane materiały jądrowe są stosowane w małych ilościach do badań naukowych oraz jako paliwo jądrowe w reaktorze MARIA w postaci uranu niskowzbogaconego.

Materiały jądrowe o łącznej wadze ponad 27 ton znajdują się w posiadaniu 111 jednostek organizacyjnych, podzielonych na 5 rejonów bilansu materiałowego.



Bilans materiałów jądrowych w Polsce
Źródło: PAA 2024 r.

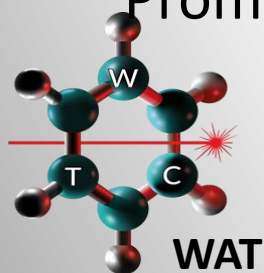
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Odpady promieniotwórcze

W Polsce odpady promieniotwórcze powstają w wyniku działalności ze źródłami promieniotwórczymi w medycynie, przemyśle i placówkach badawczych oraz w czasie eksploatacji reaktora badawczego. Większość odpadów promieniotwórczych jest kwalifikowana jako odpady niskoaktywne ze względu na stężenie promieniotwórcze zawartych w tych odpadach izotopów promieniotwórczych.

Odbiorem, transportem, przetwarzaniem, przechowywaniem i składowaniem odpadów promieniotwórczych powstających w kraju oraz przechowywaniem wypalonego paliwa jądrowego zajmuje się Zakład Utylizacji Odpadów Promieniotwórczych, który rocznie odbiera ok. 40 m³ odpadów stałych oraz ok. 30 m³ odpadów ciekłych.

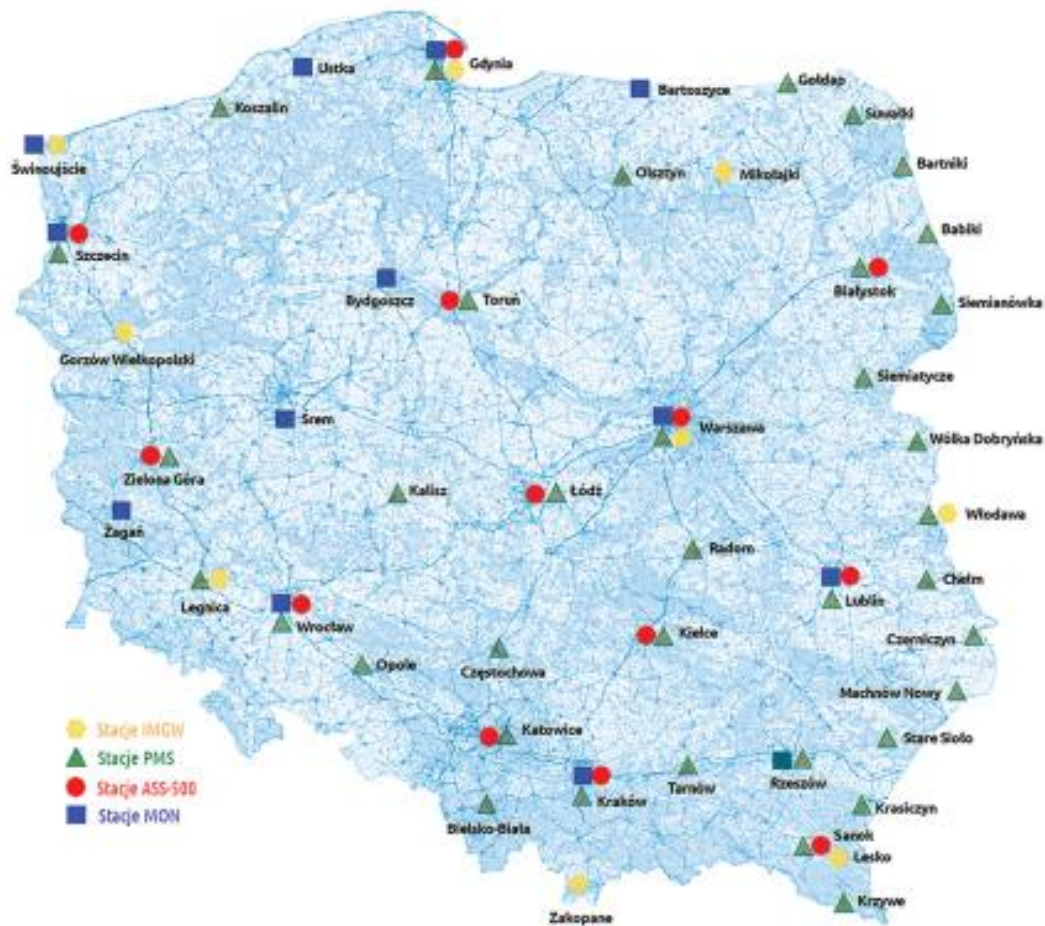
Miejscem składowania odpadów promieniotwórczych jest Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych, które jest obiektem powierzchniowym przeznaczonym do składowania odpadów promieniotwórczych o okresie połowicznego rozpadu radionuklidów krótszym niż 30 lat.



- Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Stan bezpieczeństwa jądowego i ochrony radiologicznej monitorowany jest permanentnie

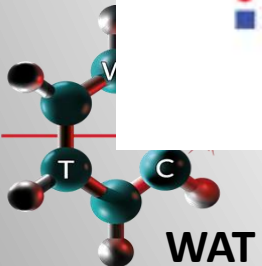


Monitoring ogólnokrajowy jest realizowany przez system stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych oraz placówki prowadzące pomiary skażeń promieniotwórczych środowiska, artykułów spożywczych i pasz. System wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych.

umożliwia dokonanie bieżącej oceny sytuacji radiacyjnej kraju, jak również wczesne wykrywanie skażeń promieniotwórczych w razie zaistnienia zdarzenia radiacyjnego.

system ten tworzy 59 stacji podstawowych podległych Agencji Atomistyki i 13 stacji wspomagających, podległych resortowi ON.

Monitoring ogólnokrajowy sytuacji radiacyjnej
Źródło: PAA 2025 r.



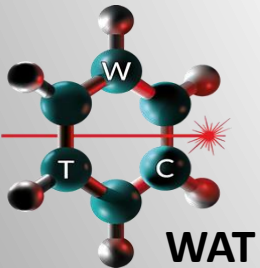
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Europejskie bezpieczeństwo radiologiczne

W ramach europejskiej platformy wymiany danych radiologicznych Rzeczpospolita Polska przekazuje automatycznie do wspólnej bazy danych, z częstotliwością **raz na godzinę**, wyniki pomiarów mocy przestrzennego równoważnika dawki oraz całkowitej aktywności alfa i beta pochodzącej od radionuklidów sztucznych w aerozolach atmosferycznych.

Analogiczne informacje przekazywane przez inne państwa umożliwiają analizę i ocenę wpływu ewentualnych zdarzeń radiacyjnych, które wystąpiły poza granicami Rzeczypospolitej Polskiej, na sytuację radiacyjną w kraju.

Do wymiany informacji o ewentualnych zagrożeniach radiacyjnych służy obsługiwany przez PAA system ECURIE, którego operatorem jest Komisja Europejska, a także USIE, obsługiwany przez MAEA.

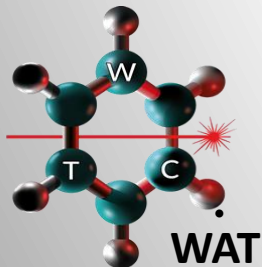


- Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Zasady bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej

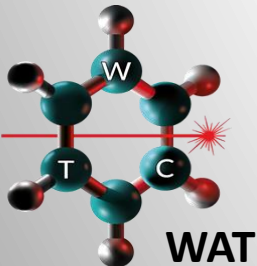
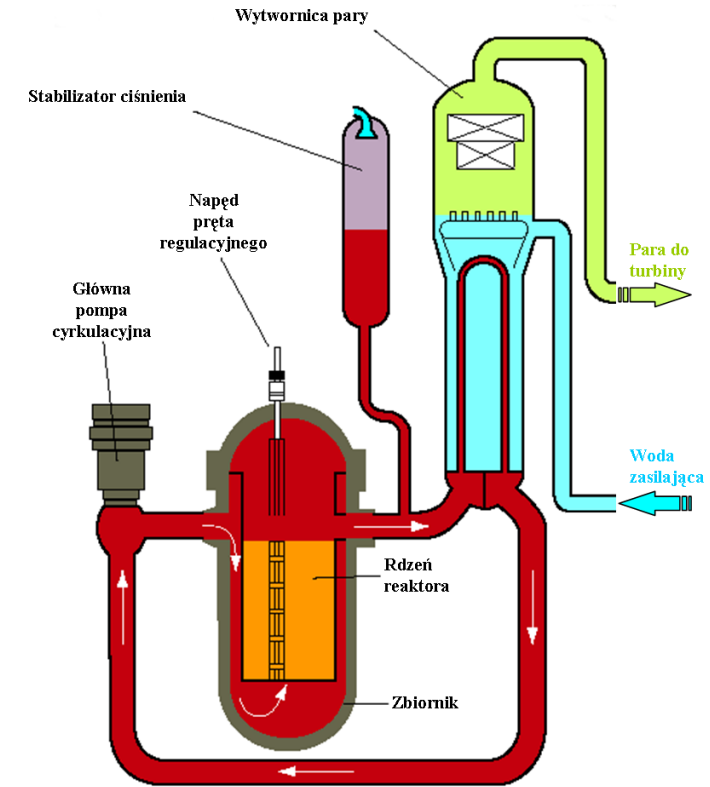
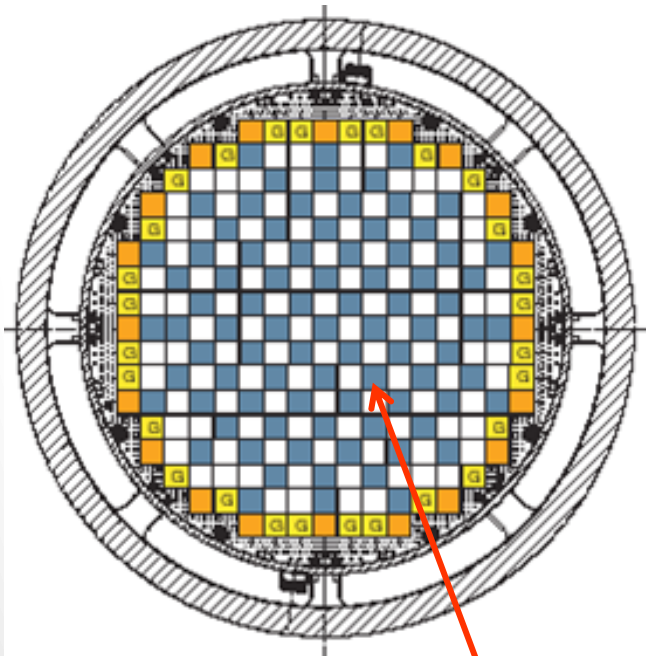
- są ukierunkowane na osiągnięcie podstawowego celu bezpieczeństwa, jakim jest ochrona ludzi i środowiska przed szkodliwymi skutkami narażenia na promieniowanie jonizujące.
- Termin „bezpieczeństwo” obejmuje bezpieczeństwo jądrowe obiektów jądrowych, ochronę radiologiczną, bezpieczeństwo postępowania z odpadami promieniotwórczymi oraz bezpieczeństwo transportu materiałów promieniotwórczych.
- zasady bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej uwzględniają kwestie związane z zapobieganiem i ograniczaniem prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń radiacyjnych, jak również z łagodzeniem i minimalizacją skutków w przypadku ich wystąpienia.



Źr. Strategia i polityka w zakresie rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej Rzeczypospolitej Polskiej 2022

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Źródła potencjalnego zagrożenia: paliwo w rdzeniu i skażone chłodziwo reaktora



Typowe wielkości aktywności radionuklidów w PWR 1000 MWe:

- Rdzeń: $3,7 \cdot 10^{20}$ Bq (10^{10} Ci), >200 nuklidów → produkty rozszczepienia (głównie) + transurany
– w szczelinie pod koszulką el. paliwowej: ~1% całości → Kr, Xe, J, Br, Cs, Rb, Sr, Ba, Te, Se
- Woda obiegu pierwotnego: $1,1 \cdot 10^{15}$ Bq ($\sim 3 \cdot 10^4$ Ci) → gazowe i lotne produkty rozszczepienia (Kr, Xe, J) + produkty aktywacji: wody, produktów korozji i chemikaliów (w tym tryt – z H_3BO_3) $\Leftarrow 3 \cdot 10^{-4}\%$
- Uwolnienie do atmosfery już $3,7 \cdot 10^{13}$ Bq (10^3 Ci) – przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych – może spowodować narażenie w odległości 1 km od EJ na max. dawki dopuszczalne.

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Podstawowe zasady i środki zapewnienia bezpieczeństwa energetyki jądrowej



Strategia „obrony w głąb”

- Kilka kolejnych poziomów obrony (bezpieczeństwa) → jeśli zawiedzie jeden dostępny jest kolejny
- W szczególności → układ kolejnych barier ochronnych



Rygorystyczne wymagania dla projektu i wyposażenia EJ

- Stabilność i samoregulacja reaktora
- Reguły projektowania dla zapewnienia niezawodności elementów składowych EJ ważnych dla bezpieczeństwa

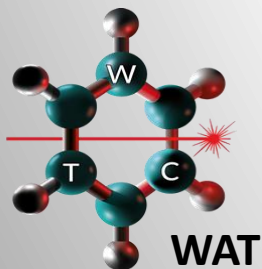


Zapewnienie jakości → na wszystkich etapach: projektowania, produkcji urządzeń, budowy, rozruchu, eksploatacji i likwidacji



Rygorystyczny system nadzoru państwowego

- Kryteria i wymagania bezpieczeństwa → przepisy normatywne - obligatoryjne (ustawy, rozporządzenia RM), wytyczne dozоровe, (specjalne) normy techniczne
- Nadzór dozоровy (Dozór Jądrowy – PAA, UDT) → zezwolenia; certyfikacja przedsiębiorstw, procesów i osób; odbiory i inspekcje



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Strategia „obrony w głąb”

Poziom I: jakość ⇒ zapobieganie odchyleniom od normalnej eksploatacji i uszkodzeniom EJ

Projekt → duże zapasy bezpieczeństwa, zwielokrotnienie, różnorodność i niezależność układów ważnych dla bezpieczeństwa, zapewnienie jakości (projektowania, budowy i eksploatacji) + kultura bezpieczeństwa (bezpieczeństwo nadrzędne)

Poziom II: nadzór ⇒ wykrywanie i opanowywanie odchyłeń od normalnej eksploatacji aby zapobiec awariom

Wykrywanie i opanowywanie skutków uszkodzeń przez normalne systemy EJ, jak układ redukcji mocy i normalnego wyłączenia reaktora; właściwe procedury eksploatacyjne

Poziom III: układy bezpieczeństwa ⇒ opanowywanie awarii projektowych

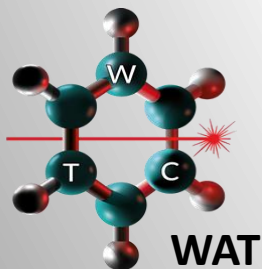
Wykorzystanie inherentnych cech bezpieczeństwa i układów bezpieczeństwa jak: systemy zabezpieczeń i UACR z automatyką zapewniającą ich samoczynne zadziałanie w razie awarii, obudowa bezpieczeństwa chroniąca przed uwolnieniem substancji promieniotwórczych do otoczenia, awaryjne procedury eksploatacyjne

Poziom IV: ograniczanie skutków ciężkich awarii ⇒ minimalizacja uwolnień substancji promieniotwórczych z EJ w razie uszkodzenia rdzenia

Utrzymanie integralności i efektywności obudowy bezpieczeństwa: zapobieganie wybuchowi wodoru w obudowie lub uszkodzeniom obudowy przez stopiony rdzeń

Poziom V: działania interwencyjne ⇒ łagodzenie skutków radiologicznych uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska

Działania poza terenem elektrowni dla zmniejszenia narażenia ludności, jak: podanie pastylek jodu obojętnego, zalecenie pozostania w domach, czasowe wstrzymanie wypasu bydła w razie skażenia pastwisk, czasowa ewakuacja z najbliższego otoczenia EJ



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

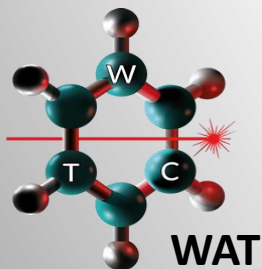
Zjawiska zagrażające integralności i skuteczności barier ochronnych w warunkach awarii

Generacja ciepła „powyłączeniowego” – wydzielającego się w paliwie jądrowym także po wyłączeniu reaktora

- Musi być zapewnione niezawodne chłodzenie → aby uniknąć przegrzania i uszkodzenia paliwa jądrowego (ze stopieniem rdzenia reaktora włącznie)
→ uwolnienia z paliwa znacznych ilości produktów rozszczepienia

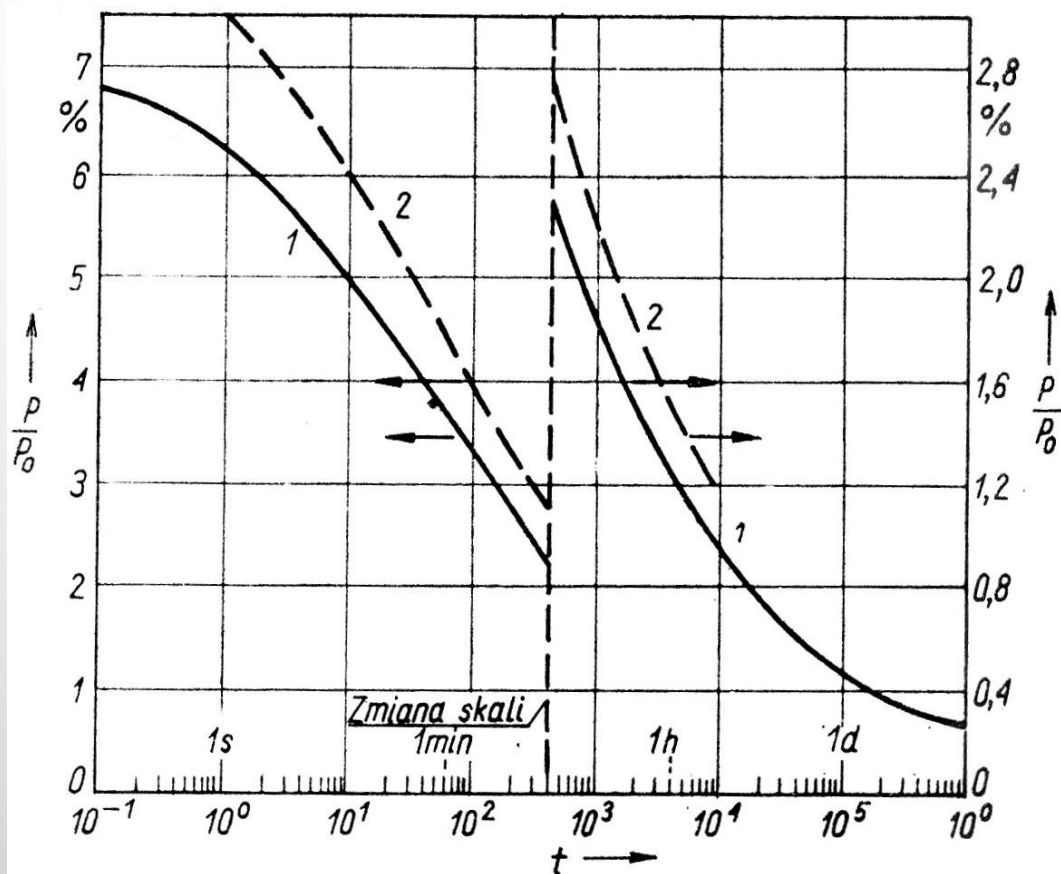
Reakcje chemiczne → wydzielanie palnych gazów (zwłaszcza wodoru):

- Cyrkonu z koszulek elementów paliwowych z wodą / parą wodną
→ zagrożenie integralności elementów paliwowych oraz obudowy bezpieczeństwa (w razie niekontrolowanego spalania lub detonacji wodoru)
- Materiału stopionego rdzenia z wodą i betonem obudowy bezpieczeństwa (przy ciężkich awariach) → zagrożenie integralności obudowy bezpieczeństwa



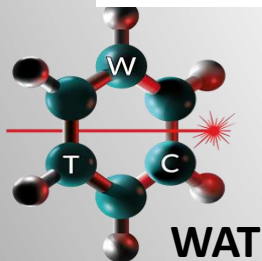
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Zjawiska zagrażające barierom ochronnym – generacja ciepła powyłączeniowego



Zanik grzania
powyłączeniowego
powodowanego rozpadem
produktów rozszczepienia
 ^{235}U w reaktorze
termicznym
1 — krzywa wartości
oczekiwanych wg danych
doświadczalnych podana
w normie American
Nuclear Society,
2 — krzywa wartości
o 20% większych niż
oczekiwane, przyjmowana
w analizach bezpieczeństwa

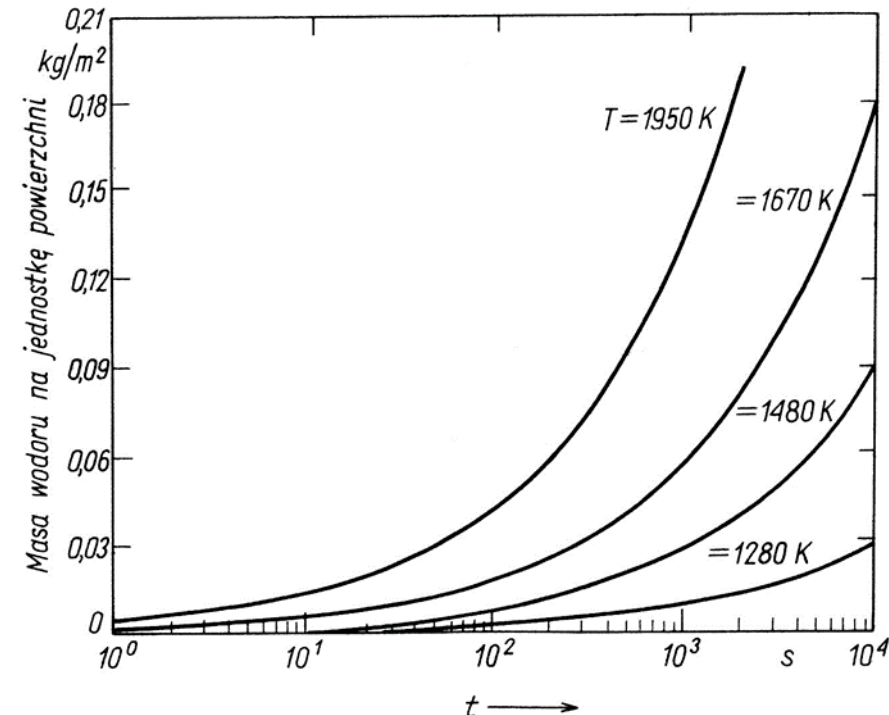
- Ciepło powyłączeniowe powstaje na skutek:
 - Rozszczepień wywołanych przez neutrony opóźnione
 - Rozpadów promieniotwórczych produktów rozszczepienia i jąder izotopów zaktywowanych wychwytem neutronów
- Ciepło powyłączeniowe musi być odprowadzone z reaktora, aby zapobiec przegrzaniu i uszkodzeniu paliwa, co doprowadziłoby do znacznych uwolnień substancji promieniotwórczych zawartych w paliwie



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Zjawiska zagrażające barierom ochronnym – reakcja cyrkonu z wodą uwalnianie wodoru podczas awarii

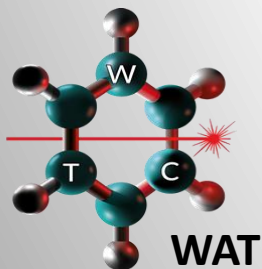
Wytwarzanie wodoru na jednostkę powierzchni wskutek reakcji cyrkonu z parą wodną wg wzoru Cathcarta-Pavla.



Egzotermiczna reakcja cyrkonu z koszulęk elementów paliwowych z wodą:



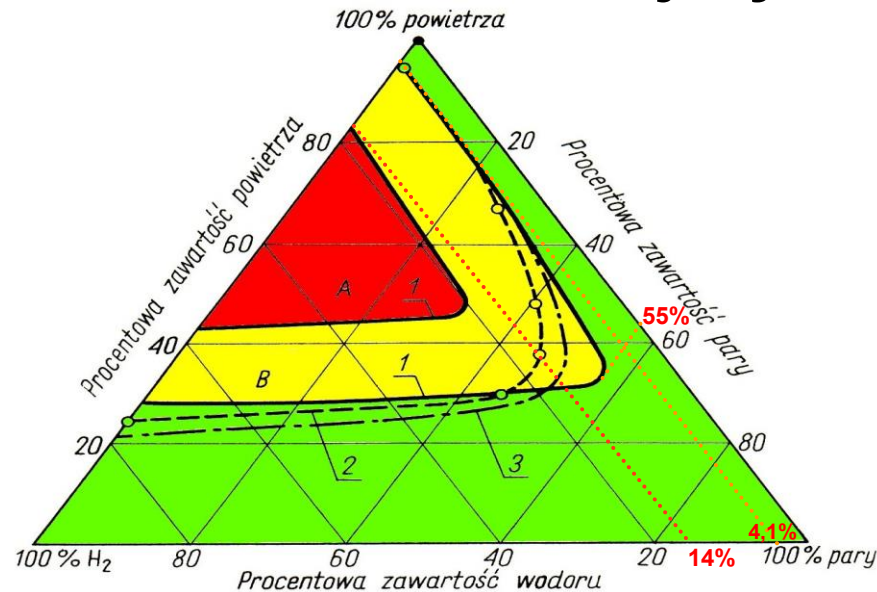
- reakcja zaczyna się przy 900 °C a jej intensywność wzrasta z temperaturą (zwłaszcza >1300 °C, przy 1550÷1650 °C reakcja może stać się autokatalityczną)
- utlenianie koszulek grożące ich degradacją
- wydzielenie znacznych ilości ciepła i wodoru (dodatkowo spalenie wydzielonego wodoru → 5200 J/kgZr)



WAT

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Zagrożenie niekontrolowanym zapłonem lub detonacją w obudowie bezpieczeństwa wodoru wydzielonego w reakcji cyrkonu z wodą

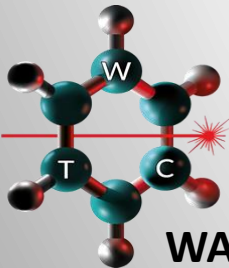


Obszar możliwego spalania wodoru w mieszaninie parowo-powietrznej.

A — obszar możliwych wybuchów wodoru; B — obszar możliwego spalania wodoru; 1 — $T = 20 - 86^{\circ}\text{C}$, $p = 101\text{ kPa}$; 2 — $T = 149^{\circ}\text{C}$, $p = 101\text{ kPa}$; 3 — $T = 149^{\circ}\text{C}$, $p = 892\text{ kPa}$

Obszary możliwego spalania lub detonacji mieszaniny wodoru z powietrzem i parą wodną

- Granice obszaru palności mieszaniny zależą od temperatury i ciśnienia
- Przy stężeniach wodoru $< 4,1\%$ nie występuje propagacja płomienia
- Spalanie wodoru nie zachodzi też przy zawartości pary wodnej $> 55\%$
- Detonacja wodoru możliwa przy stężeniach $> 14\%$ (przy dużej zawartości powietrza i małej zawartości pary wodnej)
→ w analizach bezpieczeństwa przyjmuje próg wybuchowości $= 10\% \text{ H}_2$



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Stabilność i samoregulacja reaktora



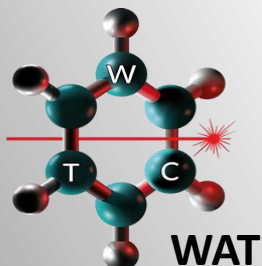
Wymagania bezpieczeństwa:

- Reaktor i związane z nim układy nie mogą posiadać wbudowanych cech, które mogłyby spowodować znaczny wzrost reaktywności
(reaktywność, $\rho = (k_{ef} - 1)/k_{ef}$ – parametr fizyczny określający bilans neutronów w reaktorze)
- Wymaga się stabilności i samoregulacji, tak aby łączny efekt fizycznych sprzężeń zwrotnych ograniczał wzrost mocy reaktora



Wymagania te są łatwe do spełnienia przez reaktory wodne (woda jest moderatorem neutronów i chłodziwem)
⇐ ujemne sprzężenie zwrotne od mocy reaktora, wynikające z:

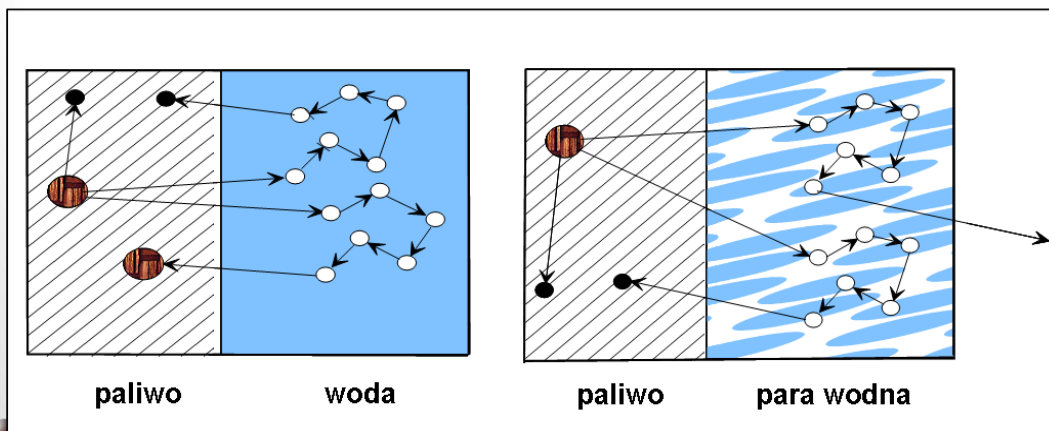
- Silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego od temperatury moderatora
- Ujemnego sprzężenia zwrotnego od temperatury paliwa



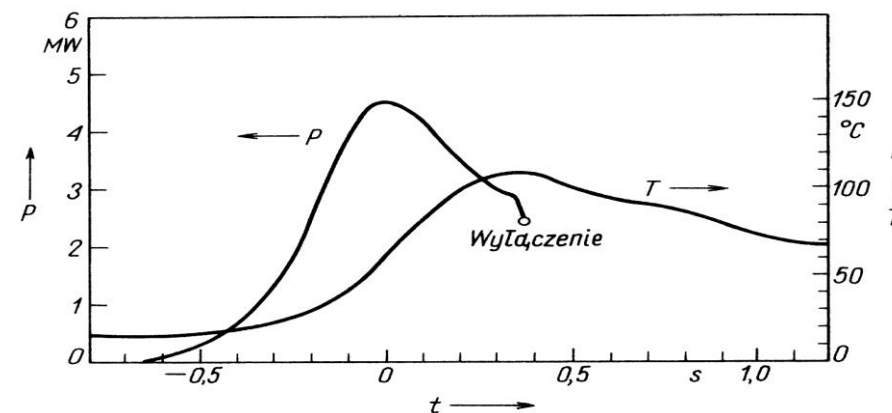
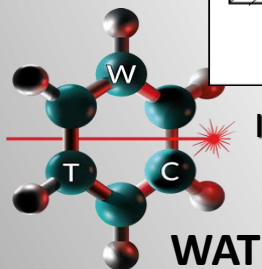
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Stabilność i samoregulacja reaktora

- W reaktorach z moderatorem wodnym (LWR, PHR) wzrost temperatury moderatora, a zwłaszcza jego wrzenie, skutkuje zmniejszeniem gęstości moderatora i pogorszeniem spowalniania neutronów oraz zwiększeniem ich ucieczki poza rdzeń → ujemny efekt reaktywnościowy temperatury moderatora (w PWR zależy od stężenia H_3BO_3)
- Wzrost temperatury paliwa powoduje zwiększenie pochłaniania rezonansowego neutronów (efekt Dopplera) oraz zmniejszeniem ilości rozszczepień ($\sigma_f \sim 1/v$) → ujemny efekt reaktywnościowy temperatury paliwa
- Wzrost mocy reaktora skutkuje wzrostem zarówno średniej temperatury moderatora jak i temperatury paliwa → ujemny efekt reaktywnościowy mocy reaktora (moderator + paliwo)



Ilustracja bilansu neutronów (wychwyt, spowalnianie, ucieczka) w reaktorze wodnym przed i po odparowaniu wody



Zmiany mocy (P) i temperatury (T) reaktora SPERT-1 z okresem 118 ms, po skokowym wzroście reaktywności (wystrzelenie pręta regulacyjnego) i przy wyłączonym układzie sterowania i zabezpieczeń

Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna Nr 3-4 2020.pdf

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Funkcje bezpieczeństwa urządzeń EJ

Fundamentalne funkcje bezpieczeństwa:

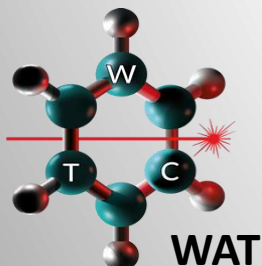
- I. Sterowanie reaktywnością
- II. Odprowadzanie ciepła z rdzenia reaktora
- III. Zatrzymywanie substancji promieniotwórczych, ograniczanie i kontrolowanie ich uwolnień do środowiska w stanach normalnej eksploatacji, oraz ograniczanie uwolnień podczas awarii

Konstrukcje, układy i urządzenia EJ dzieli się na klasy i kategorie bezpieczeństwa w zależności od ważności wypełnianych przez nie funkcji bezpieczeństwa

- wymagania techniczne różnicuje zależnie od kategorii bezpieczeństwa

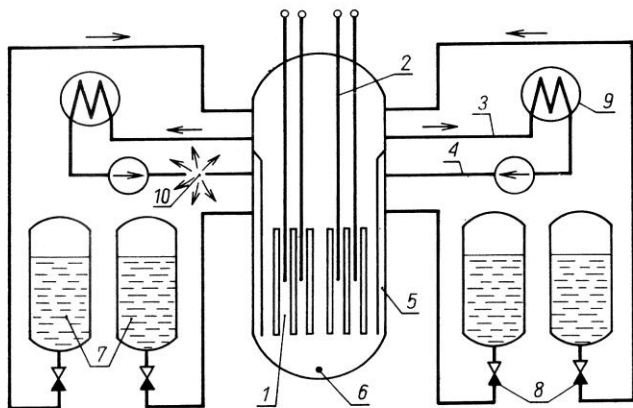
Podstawowe problemy bezpieczeństwa reaktorów wodnych:

- Awarie reaktywnościowe (niekontrolowanego wzrostu mocy) nie stwarzają istotnego zagrożenia
- Kluczowe problemy bezpieczeństwa:
 - Niezawodne odprowadzenie ciepła powyłączeniowego z rdzenia
 - Ograniczenie awaryjnych uwolnień substancji promieniotwórczych (utrzymanie funkcji obudowy bezpieczeństwa: integralności i szczelności, usuwania radionuklidów)



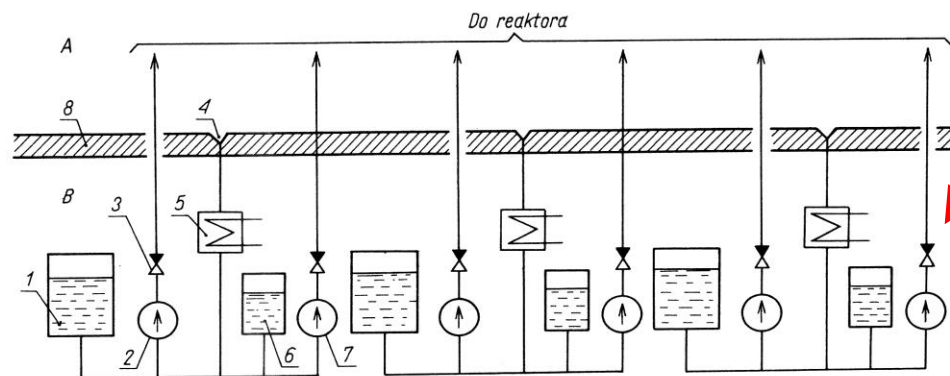
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Układy awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR)



Schemat biernego systemu UACR

1 — rdzeń, 2 — pręty bezpieczeństwa, 3 — rurociąg gorący obiegu pierwotnego, 4 — rurociąg zimny obiegu pierwotnego, 5 — szczelina opadowa, 6 — dolna komora mieszania, 7 — akumulator wody UACR, 8 — zawór zwrotny, 9 — wytwornica pary, 10 — miejsce rozerwania rurociągu obiegu pierwotnego



Część aktywna układu awaryjnego chłodzenia rdzenia

A — obszar wewnątrz obudowy bezpieczeństwa, B — obszar poza obudową bezpieczeństwa, 1 — zbiornik UACR, 2 — pompa niskociśnieniowa UACR, 3 — zawór zwrotny, 4 — studzienka ściekowa, 5 — wymiennik ciepła, 6 — zbiornik UACR, 7 — pompa wysokociśnieniowa UACR, 8 — ściana obudowy bezpieczeństwa

Funkcje UACR:

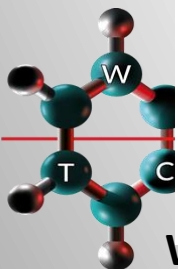
- dostarczenie wody (borowanej) i zalanie rdzenia w razie awarii utraty chłodziwa z obiegu pierwotnego (LOCA)
- długookresowe odprowadzanie ciepła powyłączeniowego

Bierny UACR (2 grupy x 100%):

- hydro-akumulatory z poduszką gazową (sprężony azot) połączone z reaktorem rurociągami z kłapami zwrotnymi
- działa w początkowej fazie zalewania rdzenia, dostarcza wodę pod i nad rdzeń

Czynny UACR (3 lub 4 podukłady x 100%):

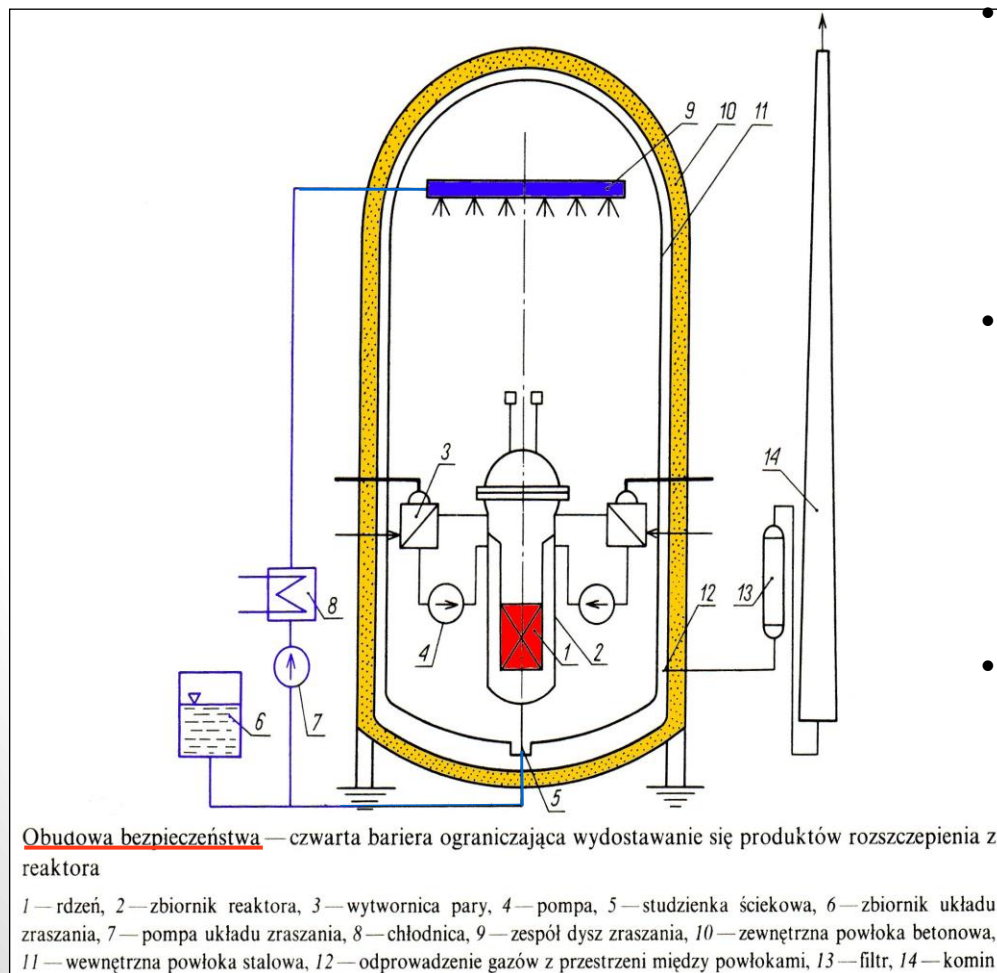
- część wysokociśnieniowa (działa przy małej LOCA)
- część niskociśnieniowa
- każdy podukład zasilany z oddzielnego awaryjnego generatora diesla
- jeden podukład wystarcza do zalania rdzenia i wychłodzenia reaktora



WAI

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

obudowa bezpieczeństwa reaktora



Funkcje obudowy bezpieczeństwa:

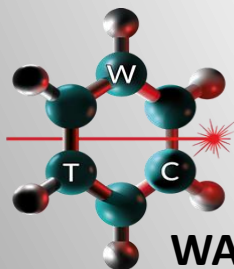
- zatrzymywanie i izolacja od otoczenia substancji promieniotwórczych
- redukcja / usuwanie radionuklidów i gazów palnych z atmosfery obudowy oraz długookresowe odprowadzanie ciepła
- ochrona przed skutkami zdarzeń zewnętrznych jak: uderzenie samolotu lub eksplozja chemiczna

Konstrukcja obudowy:

- wytrzymuje max ciśnienie awaryjne ($\sim 0,5$ MPa), zapewniając wymaganą szczelność (max przecieki: 0,25% obj./d)
- jedno-powłokowa ze sprężonego żelbetu z wykładziną stalową, lub dwu-powłokowa: wewnętrzna – stalowa lub ze sprężonego żelbetu z wykładziną stalową, zewnętrzna - ze zbrojonego betonu
- przepusty, śluzy i szybko-odcinająca armatura

Układ zraszania obudowy:

- zmniejsza awaryjne ciśnienie wewnątrz obudowy
- przyspiesza wmywanie radioaktywnych aerozoli (głównie jodu) wewnątrz obudowy (do wody dodaje się: N_2H_4 – hydrazynę lub NaOH)
- zasilany z awaryjnego generatora diesla



WAT

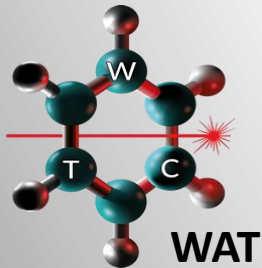
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Program Polskiej Energetyki Jądrowej

Podstawowym celem Programu Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ) jest budowa oraz oddanie do eksploatacji w Polsce elektrowni jądrowych o łącznej mocy zainstalowanej od ok. 6 do ok. 9 GWe w oparciu o sprawdzone, wielkoskalowe, wodne ciśnieniowe reaktory jądrowe generacji III+.

Zasadnicza część tego dokumentu koncentruje się na podstawowych zadaniach, które powinny zostać wykonane przez krajową administrację publiczną, inwestora, dozór jądrowy oraz inne podmioty biorące udział w realizacji PPEJ. Jednocześnie w PPEJ podkreślono rangę bezpieczeństwa jądrowego, wskazując, że jest ono priorytetem na wszystkich etapach realizacji PPEJ. W celu zapewnienia właściwego poziomu nadzoru oraz egzekwowania przestrzegania wymagań i norm bezpieczeństwa dla obiektów jądrowych PPEJ przewiduje działania zmierzające do wzmocnienia dozoru jądrowego.

Ponadto PPEJ odwołuje się do Strategii* (z 2022 r.) jako wiodącego dokumentu w obszarze bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej.



*Źródło: Strategia rozwoju systemu bezpieczeństwa narodowego Rzeczypospolitej Polskiej 2022

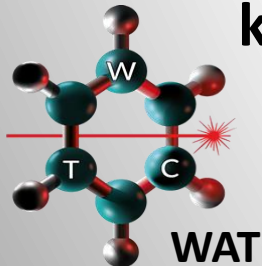
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Polski program rozwoju energetyki jądrowej swoją podstawę bezpieczeństwa będzie opierać o budowę bloków energetycznych (reaktorów) III+ generacji (III⁺G) , Jest to tzw. **system ewolucyjny**, który został ukształtowany przez wieloletnie doświadczenia międzynarodowe w zapewnieniu bezpieczeństwa radiacyjnego dla środowiska.

System innowacyjny z kolei wykorzystuje bierne zabezpieczenia radiacyjne.

Rozróżnia się dwa systemy bezpieczeństwa:

- System czynny zapewnia przywrócenie kontroli nad obiektem w przypadku awarii projektowej;
- System bierny zapewnia przywrócenie kontroli bezpieczeństwa w sytuacji konieczności usuwania skutków awarii.



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

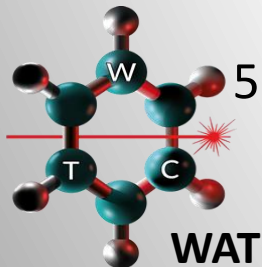
Cechy reaktorów II⁺G:

Są to reaktory typu EPR (*European Pressurized Reactor*) do budowy których wykorzystano ponad 40 letnie doświadczenia w sferze konstrukcyjnej i eksploatacyjnej prowadzonej w Niemczech oraz Francji. Moc cieplna rdzenia najnowszego modelu tej generacji (N4) wynosi 4500 MW, natomiast równoważna moc elektryczna wynosi ok. 1650 MW.

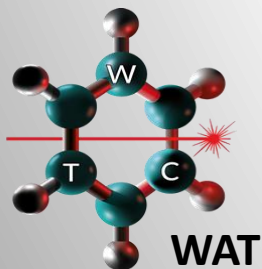
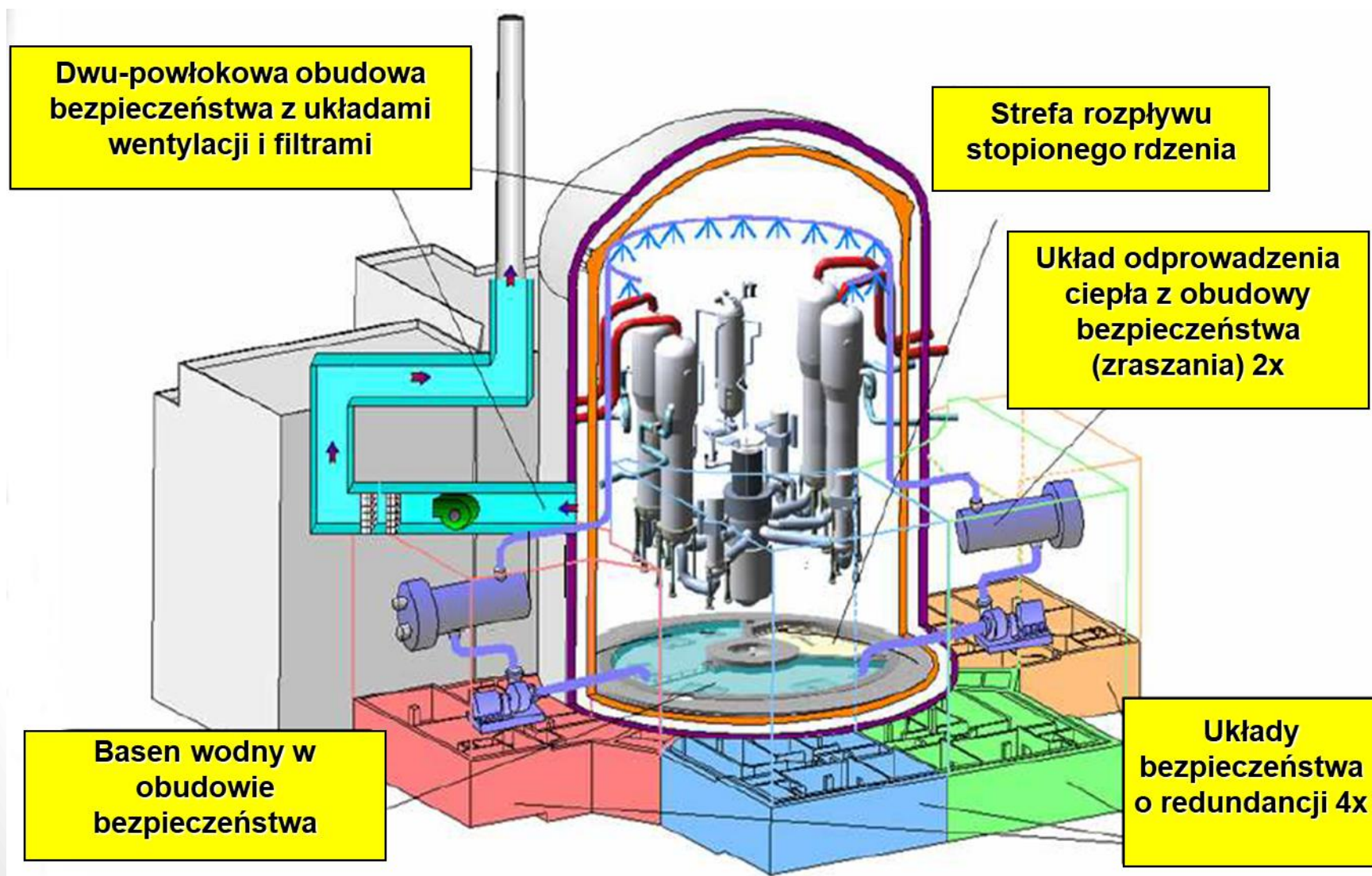
Obieg chłodzenia ze względów bezpieczeństwa zbudowany jest z czterech komplementarnych pętli.

Zastosowane linie bezpieczeństwa obejmują:

1. Dwupowłokową obudowę bezpieczeństwa reaktora;
2. Zastosowany „chwytnacz rdzenia” zabezpiecza obudowę bezpieczeństwa przed uszkodzeniem w razie stopienia rdzenia reaktora;
3. System bezpieczeństwa o czterokrotnej nadmiarowości (ang. *4xredundancy*);
4. Dodatkowy zbiornik wody w obudowie bezpieczeństwa w celu awaryjnego zasilania systemów bezpieczeństwa;
5. Przestrzenne konstrukcyjne rozdzielenie stropów oraz elementów składowych reaktora.



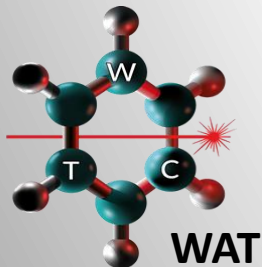
Główne cechy bezpieczeństwa reaktora EPR



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Rozwiązania projektowe zastosowane w EPR zapewniają:

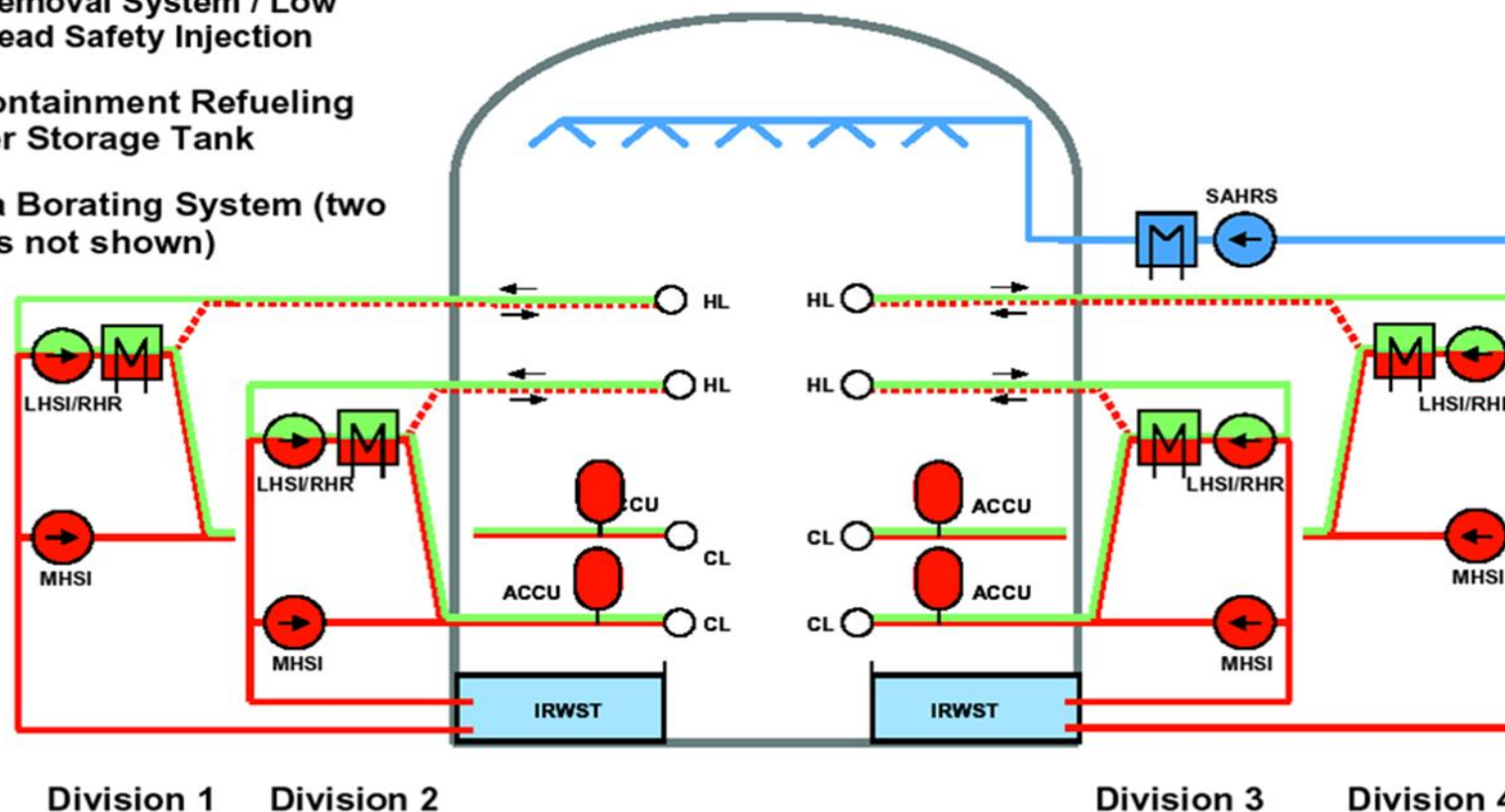
1. Wykluczenie ryzyka wczesnego uwolnienia materiałów promieniotwórczych do środowiska na skutek:
 - a) stopienia rdzenia przy wysokim ciśnieniu;
 - b) wysokoenergetycznej interakcji stopionego paliwa z wodą;
 - c) wybuchu wodoru w obudowie bezpieczeństwa;
 - d) ominięcia obudowy bezpieczeństwa,
2. Utrzymanie integralności obudowy bezpieczeństwa reaktora (w przyp. stopienia rdzenia i przetopienia obudowy reaktora) poprzez:
 - a) utrzymanie i stabilizację stopionego rdzenia wewnątrz obudowy reaktora;
 - b) zapewnienie permanentnego chłodzenia rdzenia,
3. Praktyczne wykluczenie wczesnych i dużych uwolnień materiałów promieniotwórczych do środowiska.



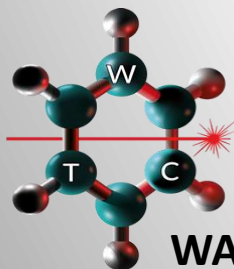
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

- Four train Safety Injection System (SIS)
 - Medium head SI pumps
 - Combined Residual Heat Removal System / Low Head Safety Injection
- In-Containment Refueling Water Storage Tank
- Extra Borating System (two trains not shown)

- Non-safety containment spray for severe accident



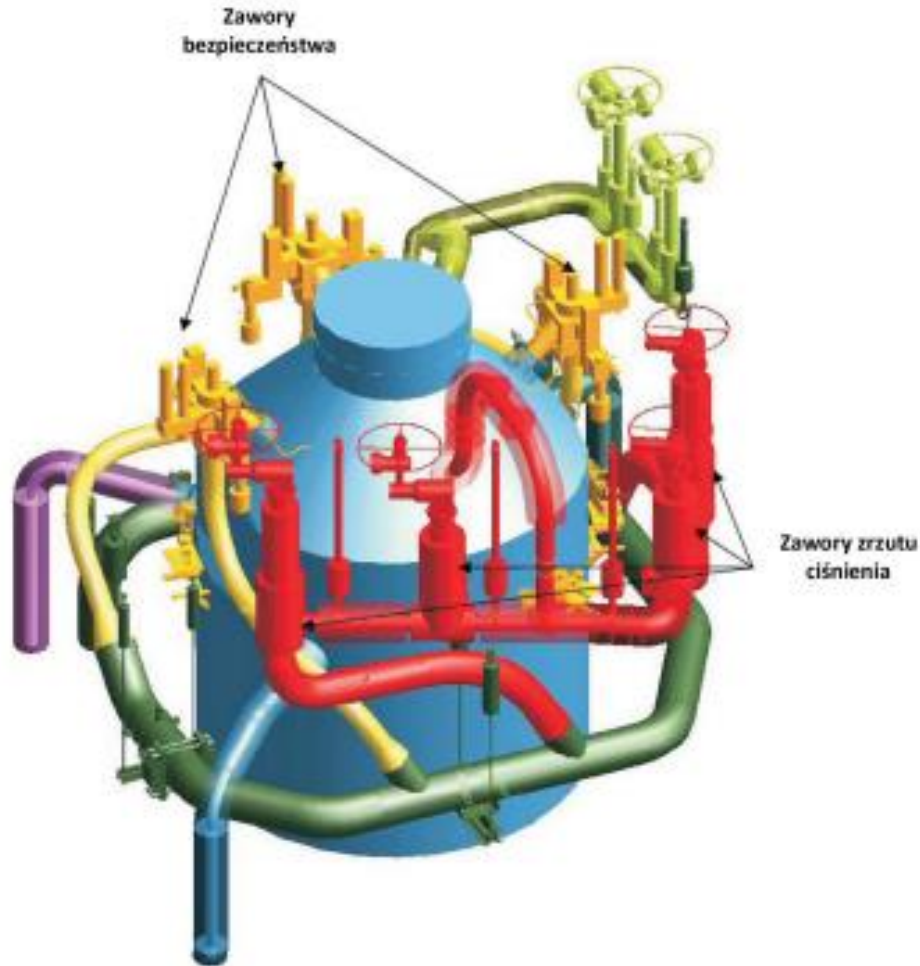
System awaryjnego chłodzenia reaktora EPR



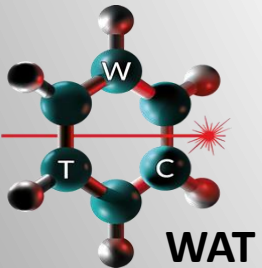
Źródło: Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochr._Radiol. Nr 3-4 2020.pdf

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

System redukcji (zrzutu) ciśnienia w obiegu chłodzenia



System zrzutu (redukcji) ciśnienia w obiegu chłodzenia ułatwia dopływ wody do rdzenia przez nisko-ciśnieniowy system dozowania i zapobiega stopieniu rdzenia w warunkach wysokich ciśnień, co mogłoby skutkować rozpryskiem stopionej masy paliwa z rdzenia do obudowy bezpieczeństwa powodując nadmierne nagrzewanie obudowy, co w konsekwencji doprowadzić mogłoby do uszkodzenia tego elementu zabezpieczenia.



System redukcji nadciśnienia.

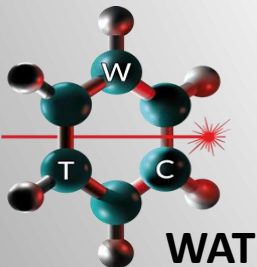
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA



Obudowa bezpieczeństwa EPR

Ten element konstrukcyjny wyposażony jest w szczelne przepusty, przejścia i służy a rurociągi przechodzące przez obudowę mają podwójne, szybko działające integralne zawory odcinające, które zapewniają automatyczną izolację obudowy od otoczenia w razie awarii.

U podstawy obudowy znajduje się zbiornik z wodą (ok. 2000 m³) oraz „**chwytnik rdzenia**” do ochrony obudowy w razie groźnej awarii (np. po przetopieniu dna reaktora przez roztopione paliwo).



Obudowa bezpieczeństwa EPR.

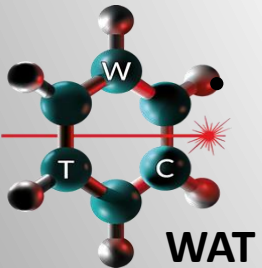
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Ochrona integralności obudowy bezpieczeństwa EPR

Systemy bezpieczeństwa EPR zapewniają zatrzymanie produktów rozszczepienia jądrowego wewnątrz obudowy nawet przy hipotetycznie groźnej awarii, włącznie ze stopieniem rdzenia. Służą do tego środki ochrony integralności konstrukcyjnej i skuteczność działania obudowy, w szczególności:

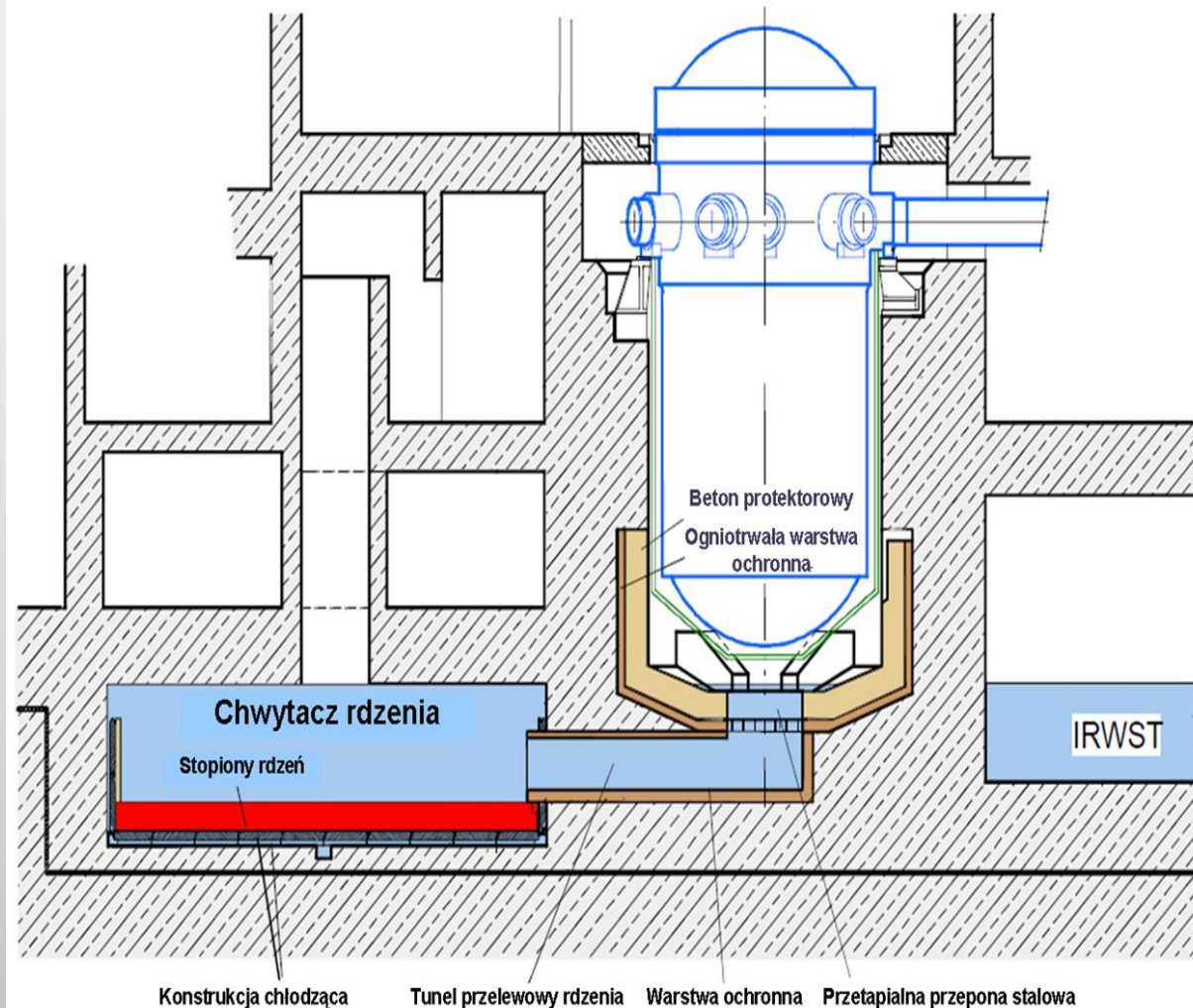
- Ochrona płyty fundamentowej przed uszkodzeniem przez stopiony rdzeń, którego zawartość mogłaby się wydostać ze zbiornika po jego przetopieniu;
- Eliminacja ryzyka związanego z potencjalnym niekontrolowanym spalaniem lub detonacją wodoru w obudowie bezpieczeństwa;

Zapewnienie niezawodnego długookresowego chłodzenia obudowy po wystąpieniu awarii.

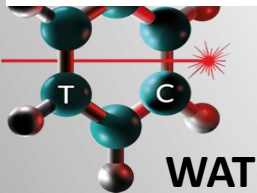


OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

System „chwytyacza rdzenia” w EPR.



Płyta fundamentowa stanowiąca podłoże obudowy bezpieczeństwa ma ok. 4 m grubości. W przypadku stopienia paliwa zbierze się ono na dnie zbiornika ciśnieniowego reaktora, a po pewnym czasie może przetopić to dno i spłynąć do dolnej części studni reaktora. Wówczas mogłoby pojawić się ryzyko przetopienia dna studni reaktora i płyty fundamentowej. Zapobiec temu ma konstrukcja rozległego zbiornika zwanego „chwytyaczem rdzenia”, dokąd stopiony rdzeń spłynie specjalnym tunelem przelewowym, w którym nastąpi schłodzenie i zestalenie rdzenia. Powierzchnie dolnej części studni reaktora, tunelu przelewowego i chwytyacza wyłożone są materiałami wysoko ogniotrwałymi. Chwytnacz posiada system chłodzenia pozwalający na długotrwałe odprowadzanie ciepła połączeniowego, wytwarzającego się w stopionym rdzeniu.



Konstrukcja chwytyacza rdzenia

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

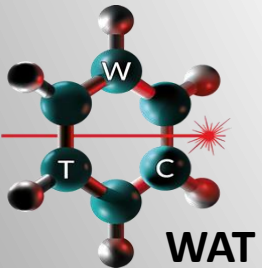
Eliminacja ryzyka zagrożenia wybuchem wodoru w EPR.

Celem redukcji potencjalnego ryzyka eksplozji mieszaniny wodorowo-powietrznej wewnątrz EPR zastosowano rozwiązania zapobiegające zarówno detonacji jak i zapłonowi wodoru w obudowie bezpieczeństwa. Uzyskano to poprzez:

- Efektywne mieszanie w konwekcji naturalnej atmosfery zapobiegające powstawaniu w obudowie lokalnych stężeń wybuchowych wodoru;
- Usuwanie wodoru z objętości obudowy bezpieczeństwa za pomocą 47 pasywnych autokatalitycznych rekombinatorów umieszczonych w reaktorze.

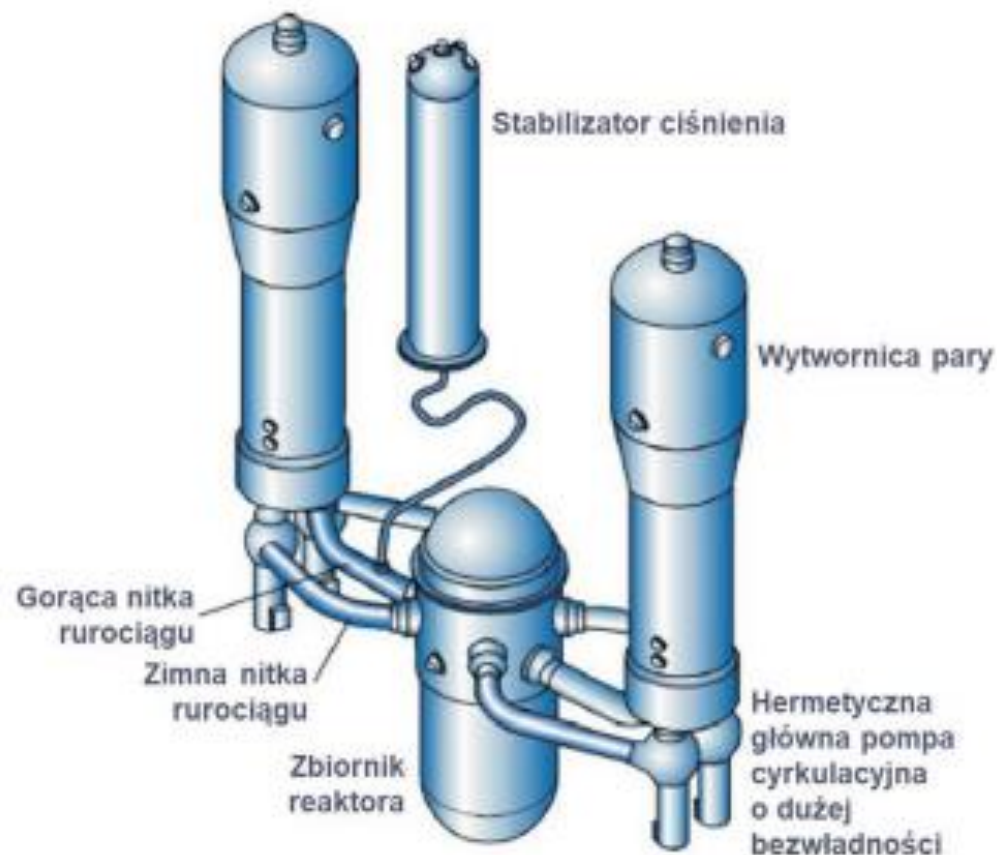


Katalityczny rekombinator wodoru.



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

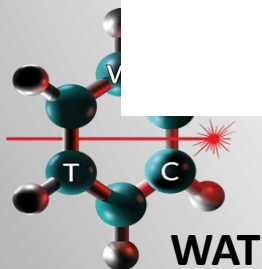
Reaktor typu pasywnego AP 1000.



Reaktor typu pasywnego AP 1000

Reaktor typu pasywnego AP1000 (ang, Advanced Passive) projektu amerykańskiej firmy *Westinghouse Electric Corporation*, reprezentuje nową linię innowacyjną o odmiennej koncepcji zapewnienia bezpieczeństwa. Obieg chłodzenia AP składa się z dwóch pętli wraz z pompami cyrkulacyjnym chłodziwa z hermetycznymi silnikami zintegrowanymi z wytwornicami pary wodnej.

AP1000 to udoskonalony reaktor pracujący autonomicznie, a w przypadku awarii nie wymaga doprowadzania energii z zewnątrz. Zastawano tu systemy bierne, wykorzystujące zjawiska i siły naturalne (konwekcja, parowanie, skraplanie, grawitacja, ciśnienie sprężonych gazów). Systemy bezpieczeństwa AP zapewniają odbiór ciepła z rdzenia i ciągłe chłodzenie obudowy. Reaktor nie wymaga zasilania prądem elektrycznym. W łańcuchu zapewnienia bezpiecznej reakcji za awarie brak tu takich elementów krytycznych jak pompy (poza recyrkulacyjnymi), wentylatory, awaryjne generatory prądu, a działanie systemu nie wymaga wspomagających urządzeń pomocniczych.



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Metody zapewnienia bezpieczeństwa pracy reaktora AP

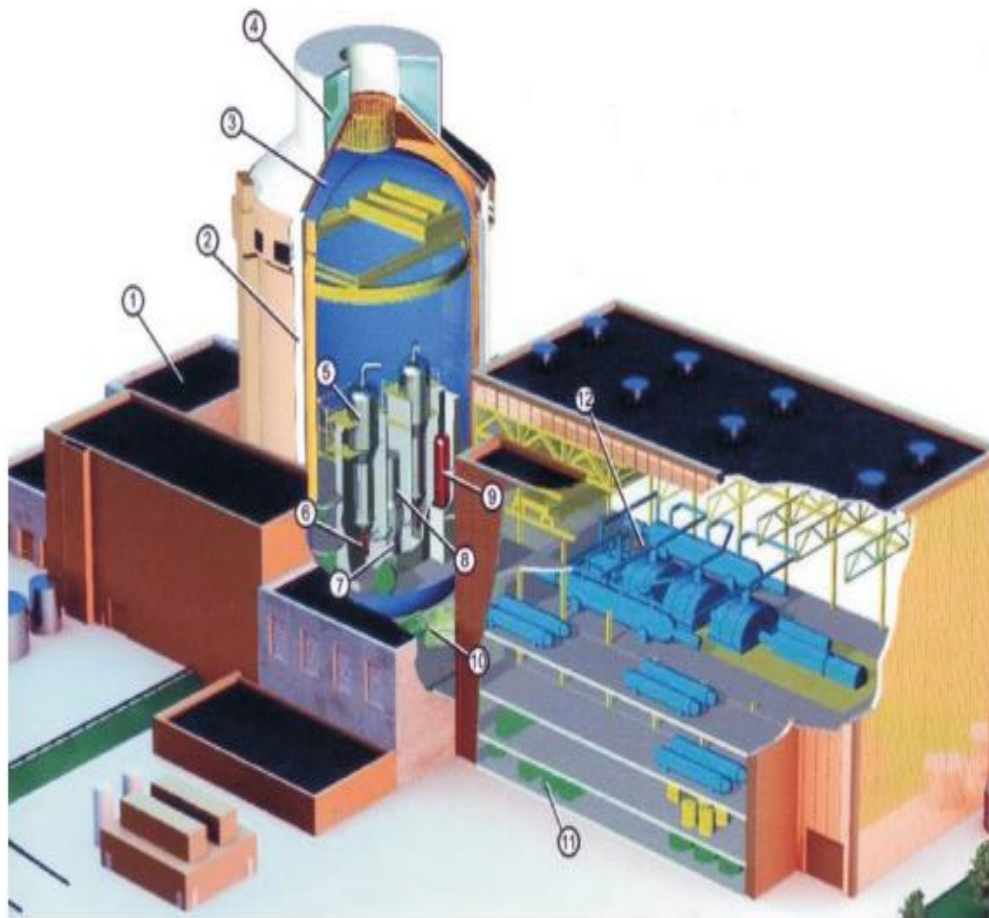
Bierne systemy bezpieczeństwa;

Brak zależnych urządzeń pomocniczych;

Systemy bezpieczeństwa nie są wykorzystywane w procesie normalnej pracy reaktora;

Wysoki stopień autonomii i automatyki pracy reaktora, nie wymagają stałego nadzoru operatorów;

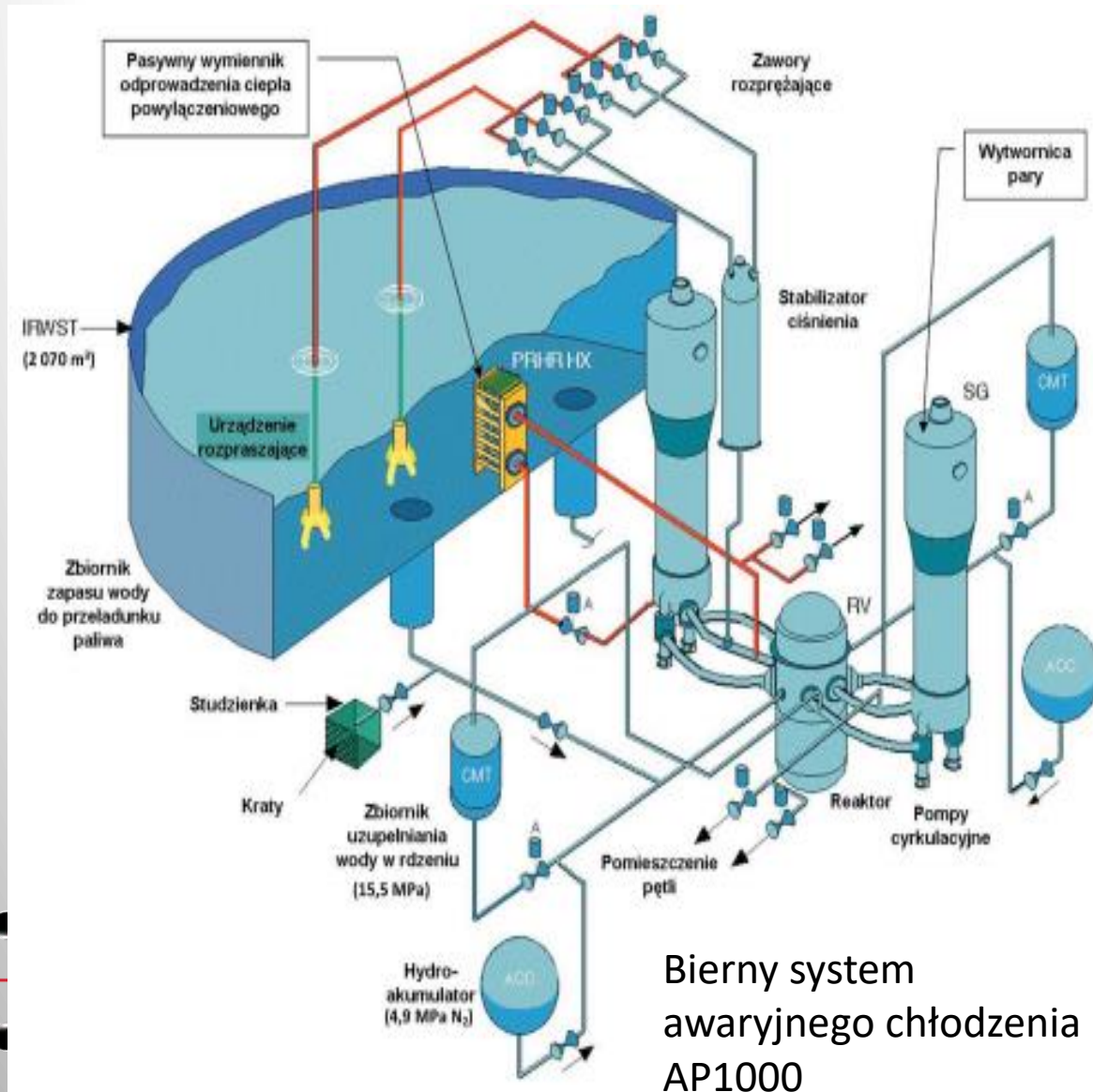
Ograniczone skutki ewentualnych awarii projektowych.



Rys. 8. Jądrowy blok energetyczny z reaktorem AP1000 (źródło: [8]). 1 – budynek paliwa, 2 – betonowy budynek osłonowy, 3 – stalowa obudowa bezpieczeństwa, 4 – zbiornik wody pasywnego chłodzenia obudowy bezpieczeństwa, 5 – wytwornica pary, 6 – pompy chłodziwa reaktora, 7 – reaktor, 8 – blok górny reaktora, 9 – stabilizator ciśnienia, 10 – główna sterownia, 11 – pompy wody zasilającej, 12 – turbozespół.

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Bierny system chłodzenia reaktora AP 1000



Procesy przebiegają z udziałem sił naturalnych. W razie spadku ciśnienia następuje samoczynne dozowanie wody. W pierwszej fazie z wysokociśnieniowego zbiornika wody uzupełniającej, a następnie z średnociśnieniowych hydroakumulatorów pod wpływem ciśnienia „poduszki” z gazowym azotem. Finalnie następuje niskociśnieniowe, grawitacyjne zasilanie obiegu pierwotnego ze zbiornika zapasu wody o pojemności 2070m³.

Bierny system awaryjnego chłodzenia rdzenia wyposażony jest w automatyczny system zrzutu (redukcji) ciśnienia (ang. automatic depressurization system ADS) w obiegu chłodzenia reaktora, aby dostarczać długookresowo wodę do rdzenia.

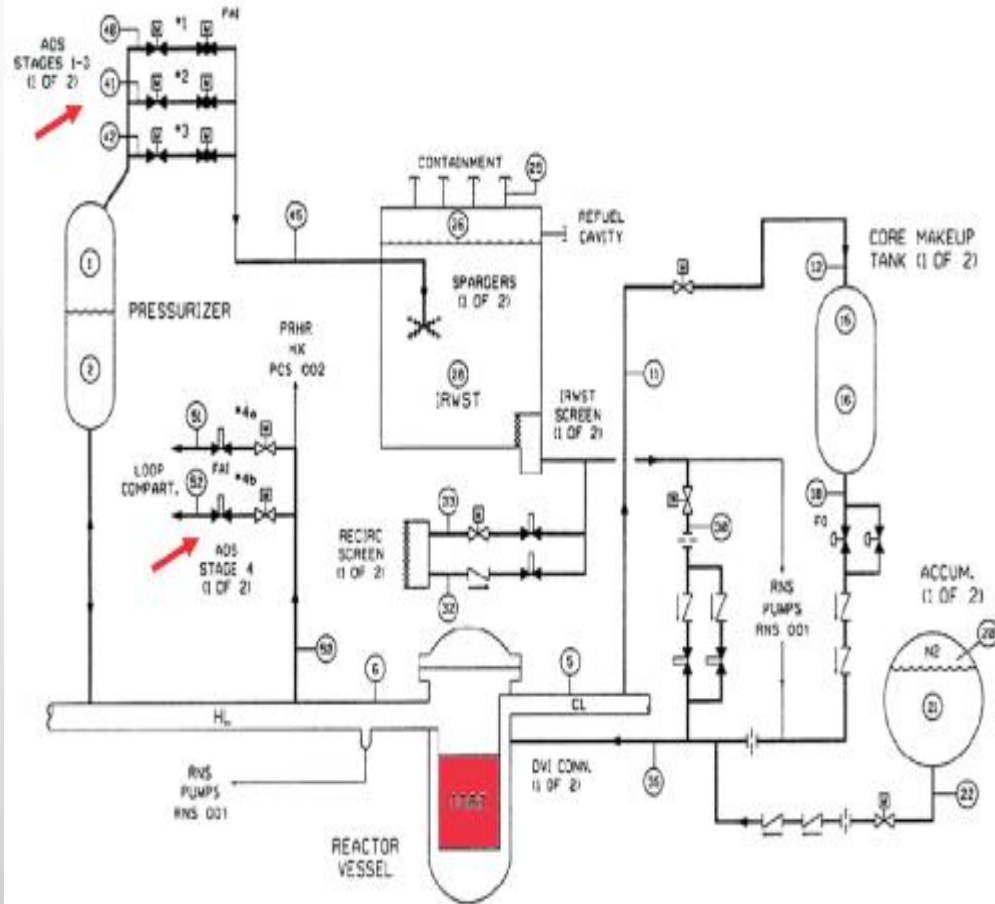
System ADS składa się z 4 stopni zaworów:

- Trzy stopnie: po 2 zawory sterowane elektronicznie, zamontowane na stabilizatorze ciśnienia;
- Czwarty stopień: 4 zwory (dwie pary) przyłączone do gorących linii pętli chłodzenia reaktora, aktywowane w razie awarii ładunkami pirotechnicznymi.

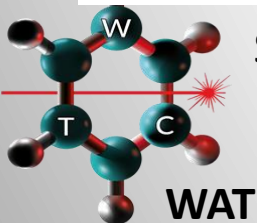
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

(Awaryjne) utrzymanie stopionego rdzenia w reaktorze AP 1000

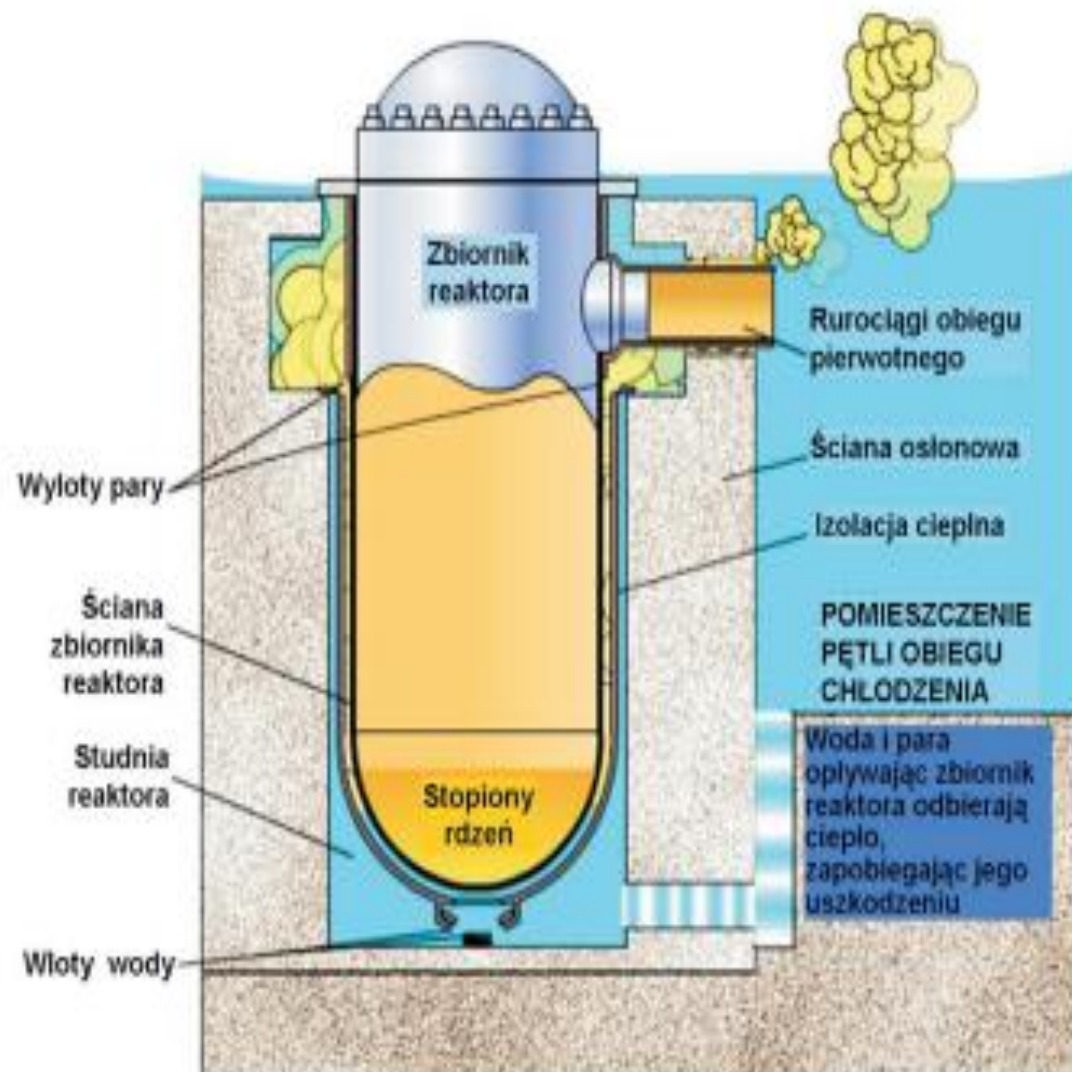
W odróżnieniu do EPR w AP1000 brak jest chwytacza rdzenia. W AP1000 stopiony rdzeń ma być utrzymany wewnątrz zbiornika reaktora. Obniżając ciśnienie w obiegu chłodzenia reaktora możliwym jest zalanie rdzenia wodą zgromadzoną w biernych systemach reaktora i tą drogą schłodzenie masy paliwa. W tej konstrukcji woda wypełni cały szyb reaktora chłodząc od zewnątrz ściany zbiornika reaktora.



Schemat zrzutu ciśnienia w reaktorze AP 1000



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

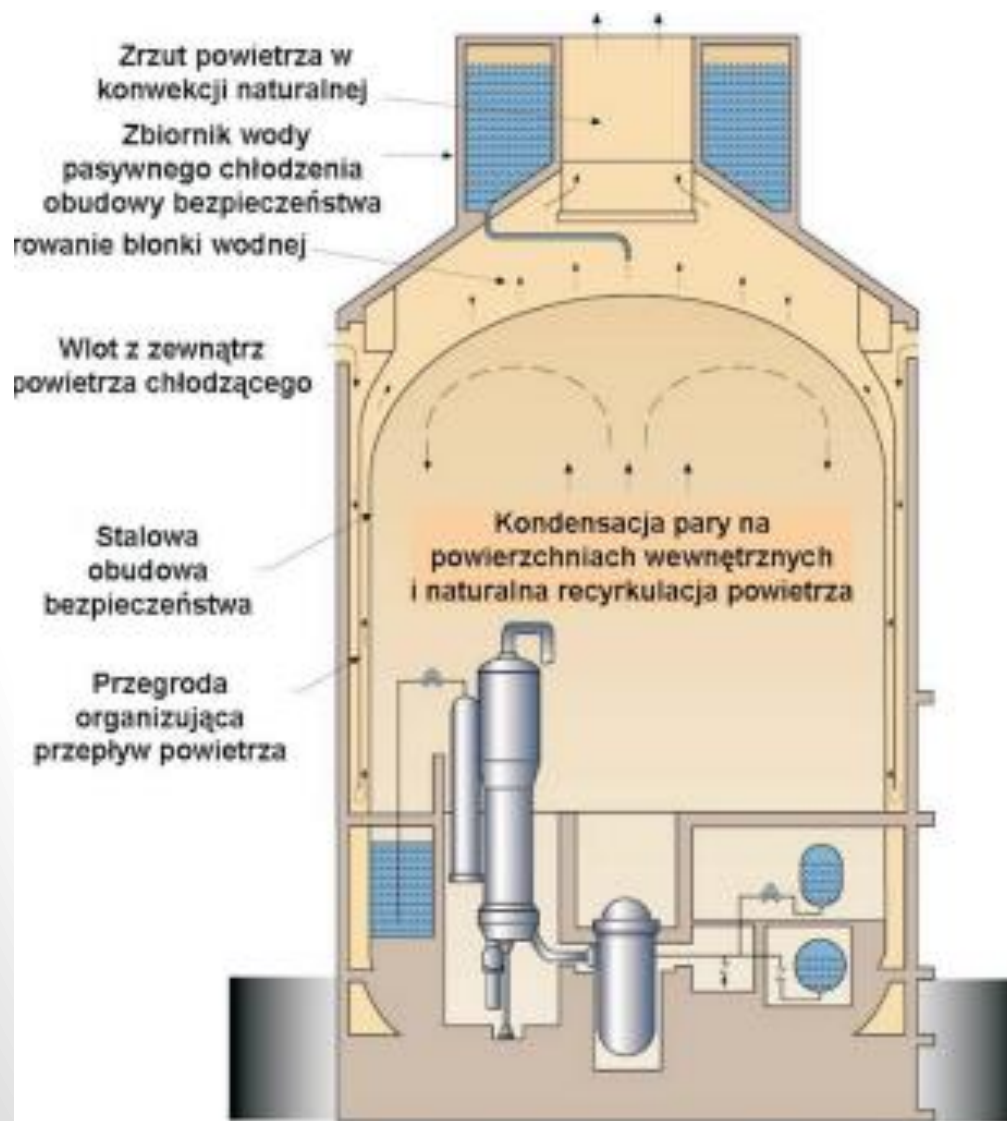


Chłodzenie stopionego rdzenia w zbiorniku reaktora AP 1000.

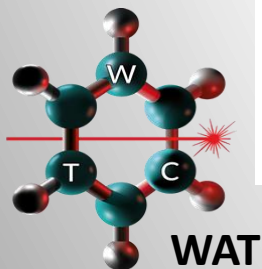
Rezerwuar wody chłodzącej umieszczony jest wewnątrz obudowy bezpieczeństwa powyżej rdzenia, aby w razie awarii woda została zrzucona grawitacyjnie. Woda przepływając pomiędzy zbiornikiem ciśnieniowym reaktora a izolacją termiczną odbierać będzie „ciepło po wyłączeniowe” wytwarzane przez stopiony rdzeń. Woda parując pozostanie w stalowej obudowie bezpieczeństwa, cyrkulując wraz z podgrzanym powietrzem w naturalnej konwekcji.

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP 1000.



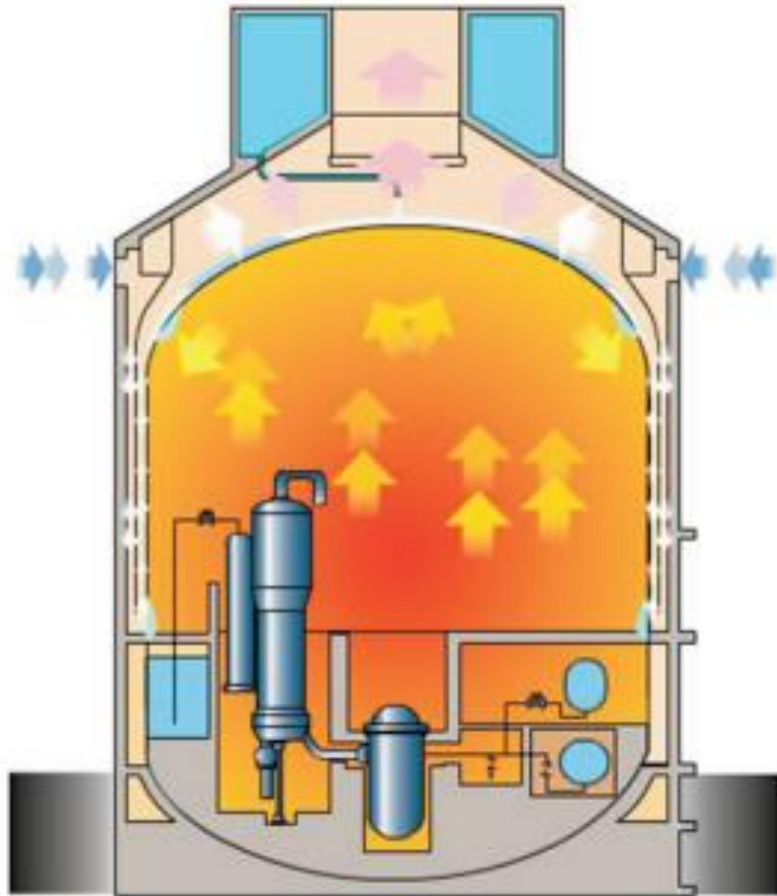
Obudowa bezpieczeństwa wykonywana jest ze stali otoczona osłoną ze zbrojonego betonu. Wewnętrzna stalowa powłoka ma grubość ponad 44 mm i wymiary: średnica = 39,6 m, a wysokość = 65,6 m. Powłoka jest wytrzymała mechanicznie do ciśnienia ok 0,51MPa, w temp. 150°C. Żelbetonowa zewnętrzna osłona ma grubość ok. 1 m, średnicę=43 m i wysokość 83 m. Konstrukcja zwieńczona jest rodzajem komina, wokół którego znajduje się zbiornik ok. 3000 m³ wody.



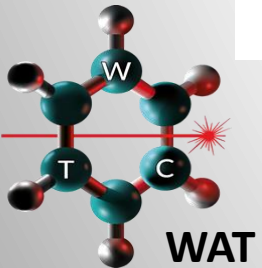
OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Obudowa bezpieczeństwa posiada całkowicie bierny system chłodzenia.

Para powstająca przy chłodzeniu rdzenia reaktora, poprzez rozszczelnienia uszkodzonego pierwotnego obiegu chłodzenia trafia do wewnętrznej obudowy bezpieczeństwa, gdzie traci ciepło poprzez stalową powłokę obudowy, chłodzonej z zewnątrz powietrzem i wodą spływającą grawitacyjnie ze zbiornika położonego na szczycie reaktora. Para wodna unosząc się ku górze oddaje ciepło stalowej powłoce, co w konsekwencji powoduje wykroplenie pary wodnej, a skropliny spływają do miski ściekowej w dole obudowy, skąd są zwracane do studni reaktora.



System awaryjnego, biernego chłodzenia rdzenia reaktora AP1000.

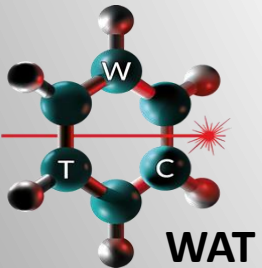


OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP 1000 wyposażona jest w system zapobiegający gwałtownemu spalaniu lub detonacji wodoru (mieszaniny wodorowo-powietrznej) który zapewnia:

- Monitorowanie stężenia wodoru;
- Mieszanie gazów wewnątrz obudowy w wyniku występującej w niej konwekcji naturalnej, w celu wykluczenia miejscowego wzrostu stężenia wodoru;
- Usuwanie wodoru za pomocą dwóch biernych autokatalitycznych rekombinatorów, umieszczonych wewnątrz stalowej obudowy bezpieczeństwa;
- Kontrolowane spalanie wodoru, poprzez zastosowanie 66 zapłonników rozmieszczonych wewnątrz stalowej obudowy bezpieczeństwa.

Jak dowodzi praktyka eksploatacji reaktorów pasywnych wykorzystanie zjawisk naturalnych w systemach bezpieczeństwa, reaktor tego typu przez 3 doby od zaistnienia awarii nie wymaga zasilania prądem elektrycznym ani interwencji operatora, gdyż procesy kontrolowania awarii i chłodzenia reaktora przebiegają samoczynnie.



OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

Potencjalne lokalizacje elektrowni jądrowych



W Polsce jest ponad 20 potencjalnych lokalizacji elektrowni jądrowych. Lokalizacje pokrywają się z tymi określonymi w „Programie Polskiej Energetyki Jądrowej z 2014 r.”

Pierwsza elektrownia najprawdopodobniej będzie zbudowana na wybrzeżu, w lokalizacjach: Lubiatowo-Kopalino lub Żarnowiec, czyli tam gdzie prace lokalizacyjne i środowiskowe są najbardziej zaawansowane. Za tymi lokalizacjami przemawiają:

- lokalne zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz
- dostęp do wody technologicznej niezbędnej do procesów chłodzenia reaktorów, a także
- możliwość transportu ładunków wielkogabarytowych drogą morską pozostaje tu nie bez znaczenia.

W zaawansowaną fazę wchodzi również projekt budowy siłowni jądrowej przez koncern energetyczny Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) z lokalizacją: Konin-Pontnów.

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

WNIOSKI

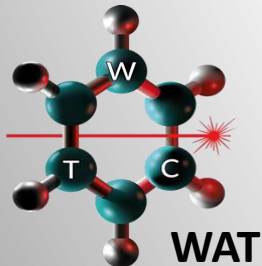
Polskie doświadczenia związane z reaktorami jądrowymi ograniczają się do eksperymentalnych eksploatacji reaktorów EWA i MARIA (w IBJ, w Świerku).

Stosowane w przemyśle, medycynie, badaniach materiały i urządzenia promieniotwórcze znajdują się pod ścisłą, instytucjonalną kontrolą uwarunkowaną regulacjami Prawa atomowego.

Proliferacja materiałów rozszczepianych jest w pełni kontrolowana przez instytucje państwowe.

Pilne potrzeby uzupełnienia bilansu energetycznego państwa wymagają podjęcia budowy i rozwoju alternatywnych źródeł energii, w tym krajowej energetyki jądrowej. Przemawiają za tym względy ekonomiczne, ochrony środowiska (emisja CO₂) oraz dywersyfikacji źródeł energii.

Rozwój technologii reaktorowej pozwala korzystać z najnowszych bezpiecznych technologii, które zostały zdobyte przez dziesiątki lat doświadczeń na świecie (reaktory typu EPR i AP).



Wykorzystanie nowych technologii bezpieczeństwa jądrowego powinno być gwarantem bezawaryjnej i neutralnej dla środowiska przeszłej energetyki jądrowej w Polsce.

OBRONA PRZED BRONIĄ MASOWEGO RAŻENIA

PYTANIA !!!

