

Wydział Fizyki UW
Podstawy bezpieczeństwa energetyki
jądrowej, 2018

**14. Czy awarie w przyszłych
polskich EJ będą groźne?**

Dr inż. A. Strupczewski, prof. NCBJ

**Przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego
Narodowe Centrum Badań Jądrowych**

Spis treści

- Wymagania bezpieczeństwa EJ wg EUR
- Pasywne systemy bezpieczeństwa w AP1000
- Ochrona przed ciężkimi awariami w EPR
- Chwytnacz stopionego rdzenia w EPR
- Pasywna autokatalityczna rekombinacja wodoru
- Dawki wokoło reaktora EPR w razie awarii
- Układy bezpieczeństwa w ABWR
- Modyfikacje układów bezpieczeństwa w Japonii
- Zagrożenia od reaktorów III generacji a przepisy polskie

Wymagania EUR: maksymalny udział biernych układów w systemie bezpieczeństwa EJ

Aby reaktor był bezpieczny wystarczy niezawodnie

- **WYŁĄCZAĆ REAKTOR W RAZIE AWARII I**
- **UTRZYMAĆ RDZEŃ ZALANY WODĄ.**

EUR wymaga by bezpieczeństwo oparte było na zjawiskach naturalnych: siła ciężenia, ciśnienie hydrostatyczne, konwekcja naturalna.

- Układy bezpieczeństwa poczwórne, w osobnych budynkach, zabezpieczone przed trzęsieniem ziemi, uderzeniem samolotu itd.
- System wielu barier chroni przed uwolnieniem radioaktywności
- Potężna obudowa bezpieczeństwa wytrzymuje awarie w EJ i chroni przed atakiem z zewnątrz.
- Wszystkie elementy układów bezpieczeństwa są sprawdzone na odporność na warunki awaryjne

Ograniczenie uwolnień produktów rozszczepienia z reaktorów III generacji

Reaktory III generacji są zaprojektowane tak, by nie dopuścić do stopienia rdzenia.

A jeśli się stopi - utrzymać go wewnątrz obudowy bezpieczeństwa.

Prawdopodobieństwo stopienia rdzenia jest bardzo małe

- AP1000 – 5 na 10 milionów reaktoro-lat
- EPR - 6.1 na 10 milionów reaktoro-lat
- ABWR - 1.6 na 10 milionów reaktoro-lat
- ESBWR – 0.1 na 10 milionów reaktoro-lat

Ale poza utrzymaniem rdzenia w obudowie, trzeba jeszcze ograniczyć wyjście produktów rozszczepienia.

Fukushima to dobitnie potwierdziła. Chociaż nikt nie zginął wskutek promieniowania, uwolnienia produktów rozszczepienia spowodowały konieczność ewakuacji ludności na wiele miesięcy,

Bilans bezpieczeństwa reaktorów obecnie pracujących dla celów pokojowych

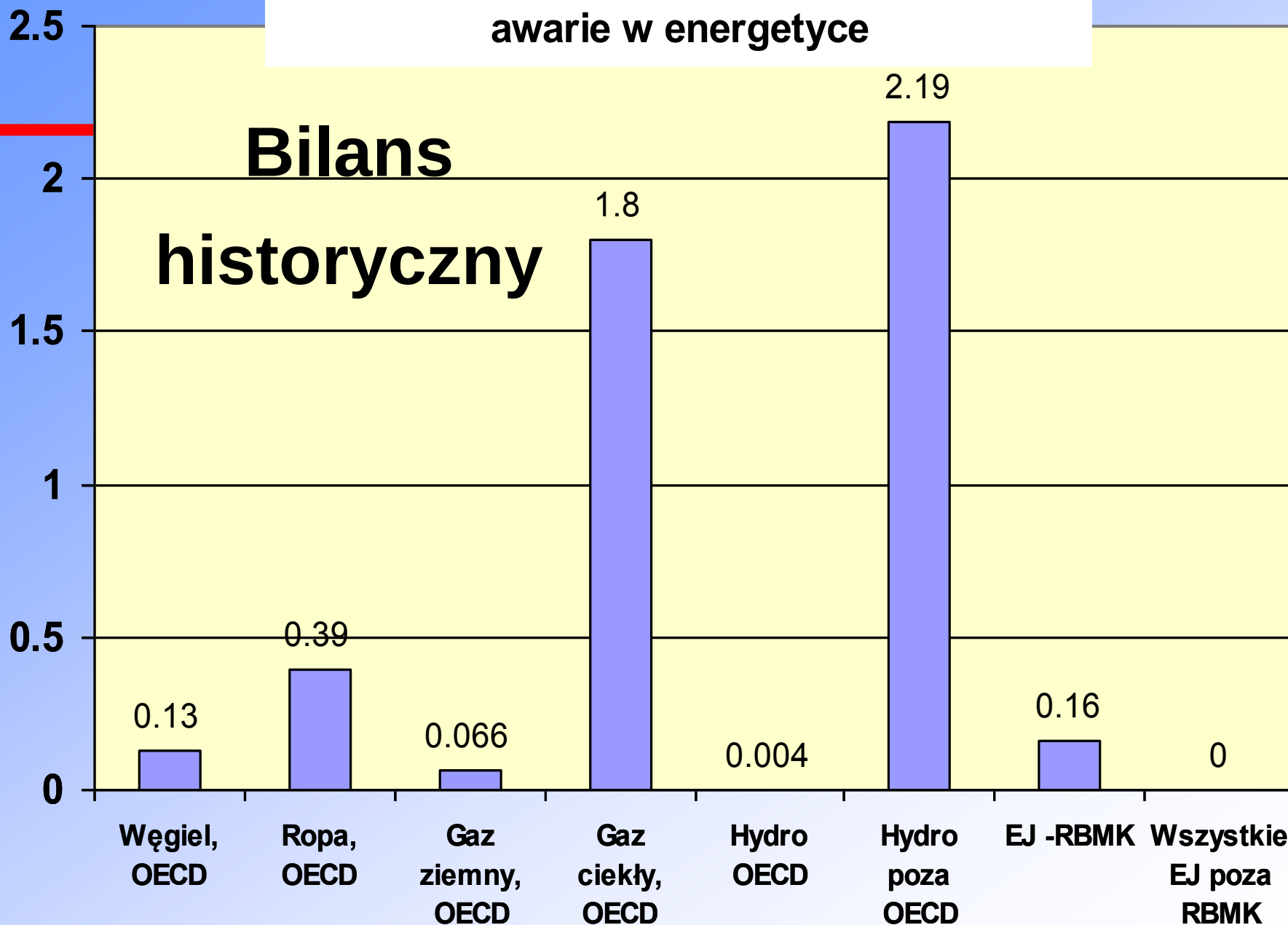
- Reaktory obecnie pracujące – tzw. reaktory II generacji - projektowano bardzo bezpiecznie.
- Chociaż reaktory te pracują już łącznie przez ponad 12 000 lat, ich promieniowanie nie spowodowało żadnego zgonu ani strat zdrowia żadnego człowieka, ani wśród obsługi, ani wśród ludności.
- Jest to wynikiem wielkich starań podejmowanych przez projektantów i budowniczych elektrowni, zapewnienia zapasów bezpieczeństwa i najwyższej jakości przy wykonawstwie EJ, zasady, że bezpieczeństwo jest ważniejsze od wszelkich innych względów, kontroli bezpieczeństwa prowadzonej przez niezależny Dozór Jądrowy i zapewnieniu, że w razie uszkodzenia dowolnego elementu lub popełnienia błędu przez człowieka będzie zawsze następny układ, który zastąpi uszkodzony element i zapewni bezpieczeństwo.

Wczesne zgony spowodowane przez ciężkie
awarie w energetyce

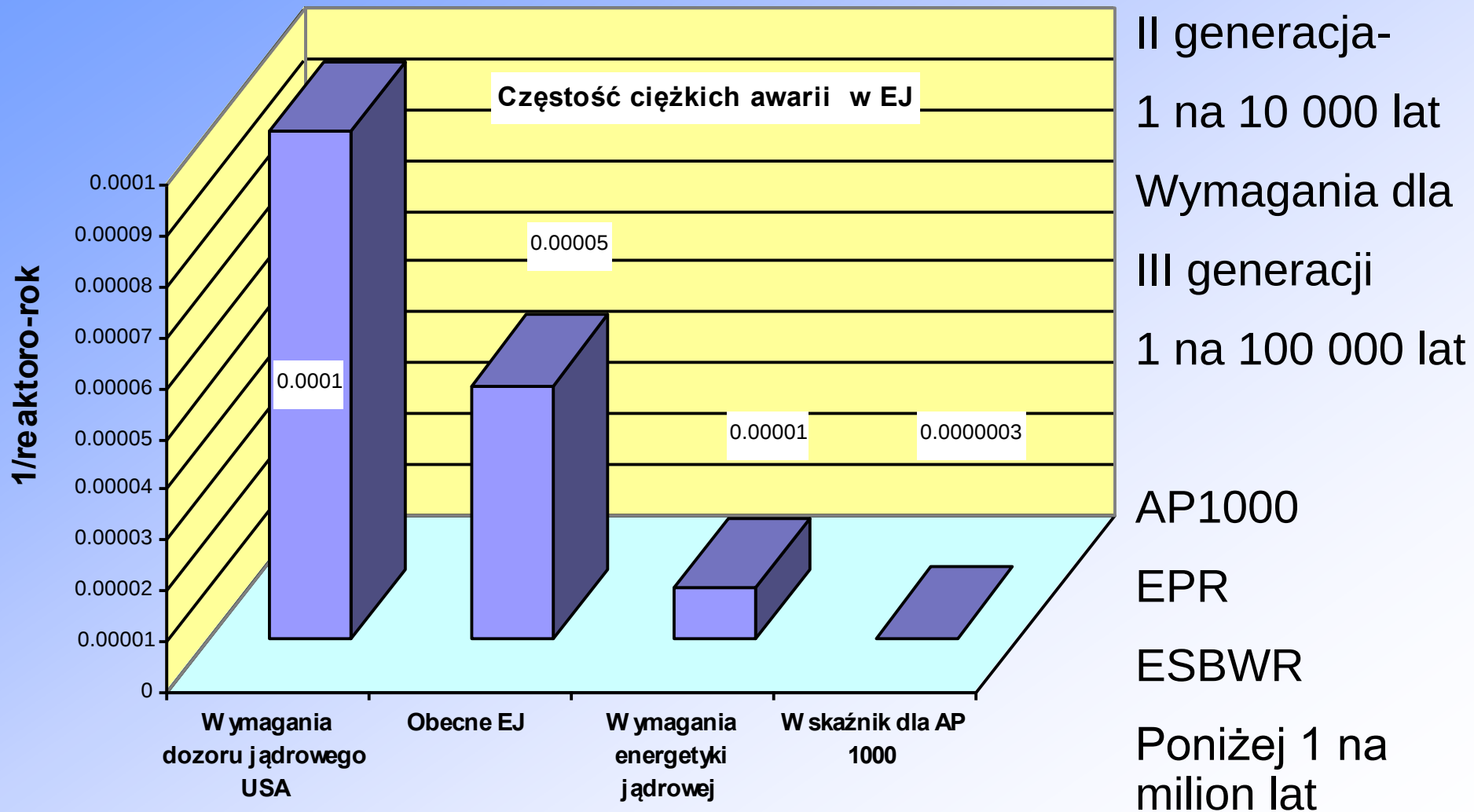
Bilans

historyczny

zgony /Gwe-rok



Ciężkie awarie ze stopieniem rdzenia rzadziej niż raz na 100 000 lat



Ale ciężkie awarie są wciąż uważane za groźne dla społeczeństwa

Chociaż...

- awaria w TMI nie spowodowała utraty życia ani zdrowia nikogo z personelu ani mieszkańców,
- awaria w Czarnobylu zdarzyła się w reaktorze wzorowanym na reaktorach wojskowych do produkcji plutonu militarnego i nie budowanych już od wielu lat,
- awaria w Fukushimie była skutkiem podwójnego kataklizmu wykraczającego poza przewidywania sejsmologów i hydrologów japońskich, a mimo to nie spowodowała utraty życia nikogo wskutek promieniowania,

groźba ciężkiej awarii pozostaje problemem numer 1.

Dlatego reaktory III generacji budowane są jako odporne na najcięższe możliwe zagrożenia, których w poprzednich generacjach nie brano pod uwagę.

EJ zbudowana zgodnie z wymaganiami EUR nie stwarza zagrożenia nawet po awarii

Po awariach uwzględnionych w projekcie (aż do rozerwania obiegu pierwotnego) nie potrzeba żadnych działań dalej niż 800 m od EJ

Nawet po hipotetycznych ciężkich awariach nie ma zagrożenia dla ludności poza strefą wyłączenia EJ:

- **Nie potrzeba wczesnych działań ochronnych** po awarii dalej niż 800 m od EJ (granica strefy wyłączenie wokół EJ)
- **Nie potrzeba działań średnio terminowych** dalej niż 3 km od EJ
- **Nie potrzeba działań długoterminowych** (ewakuacja, ograniczenie spożycia produktów rolnych) dalej niż 800 m od EJ
- Skutki ekonomiczne ograniczone

Takie bezpieczeństwo zapewniają EJ z EPR budowane w Finlandii i we Francji, lub AP 1000 i ABWR (USA)

Jak zabezpiecza się EJ przed uwolnieniami radioaktywności przy ciężkich awariach?

- Przy rozpatrywaniu ciężkiej awarii przyjmuje się jako **założenie**, że wskutek nieprzewidzianych uszkodzeń układów bezpieczeństwa (gdybyśmy mogli je przewidzieć, to byśmy się przed nimi zabezpieczyli!) oraz błędów ludzkich doszło do uszkodzenia i **stopienia rdzenia**.
- Cel działań: **ograniczenie rozprzestrzeniania produktów rozszczepienia**, po pierwsze przez obronę zbiornika reaktora przed przetopieniem, a po drugie - przez obronę szczelności obudowy bezpieczeństwa
- strategia obrony: w pierwszym etapie zmierza do jak najszybszego **obniżenia ciśnienia** wewnątrz zbiornika by umożliwić zalanie rdzenia wodą z różnych źródeł o niskim ciśnieniu i zmniejszyć groźby w razie przetopienia zbiornika

Wspólna cecha EJ III generacji- odporność na ciężkie awarie

- Po awariach w TMI-2 i w Czarnobylu zaprojektowano reaktory III generacji.
- Przy budowie EJ II generacji przyjmowano, że awarie zdarzające się niesłychanie rzadko – np. raz na 100 000 lat – można pominąć, bo powodują one małe ryzyko w porównaniu z wojnami czy kataklizmami naturalnymi.
- Natomiast przy projektowaniu EJ III generacji zakładamy, że mimo wszystkich środków bezpieczeństwa dojdzie jednak do takiej niesłychanie rzadkiej awarii – i wymagamy, by nawet wówczas reaktor nie powodował zagrożenia ludności.
- Promień strefy ograniczonego użytkowania wokół reaktora EPR to 800 metrów – nie kilometrów, ale metrów. Okoliczni mieszkańcy są bezpieczni!

Jak zapewnia się bezpieczeństwo EJ w razie ciężkiej awarii ze stopieniem rdzenia?

- Różne rozwiązania w różnych reaktorach.

- Chłodzenie stopionego rdzenia wewnątrz zbiornika reaktora poprzez **odbiór ciepła z zewnętrznej powierzchni zbiornika**.

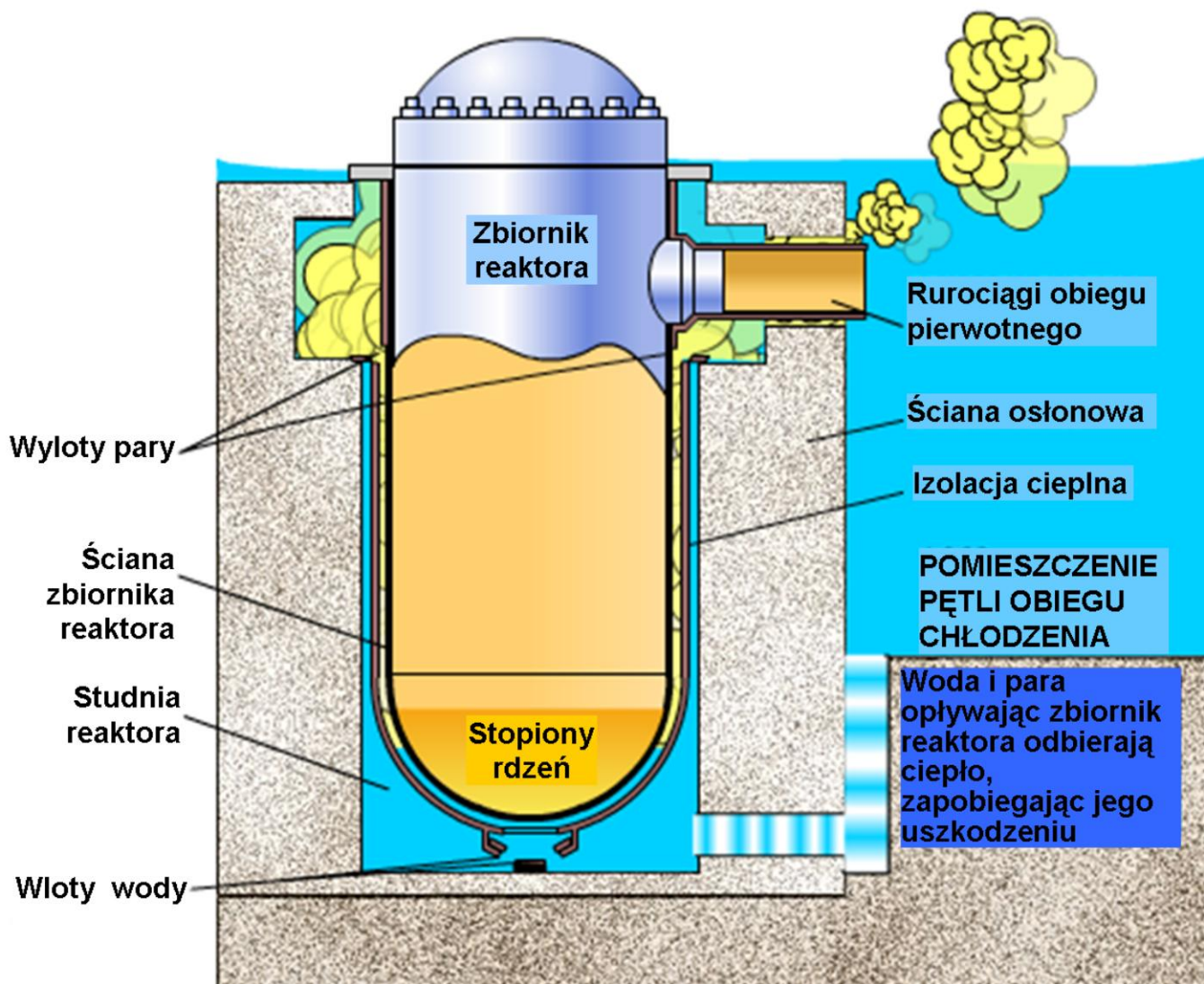
Rozwiązanie stosowane w Loviisa (440 MWe), AP600, AP1000 i proponowane dla koreańskiego PWR 1400 MWe.

Zaleta - utrzymanie zbiornika jako bariery ochronnej.

Wada- nadaje się tylko w ograniczonym zakresie mocy reaktora.

– Chwytnacz stopionego rdzenia, chroniący płytę fundamentową obudowy. Rozwiązanie opracowane dla EPR, Przewidywane także do stosowania w ESBWR w nieco odmiennej formie. Zaleta- może być stosowane nawet przy bardzo dużej mocy reaktora.

W razie stopienia rdzenia – pasywne chłodzenie z zewnątrz w AP1000



Woda z sąsiedniego basenu zalewa szyb reaktora.

Odbiera ciepło stopionego rdzenia poprzez zbiornik.

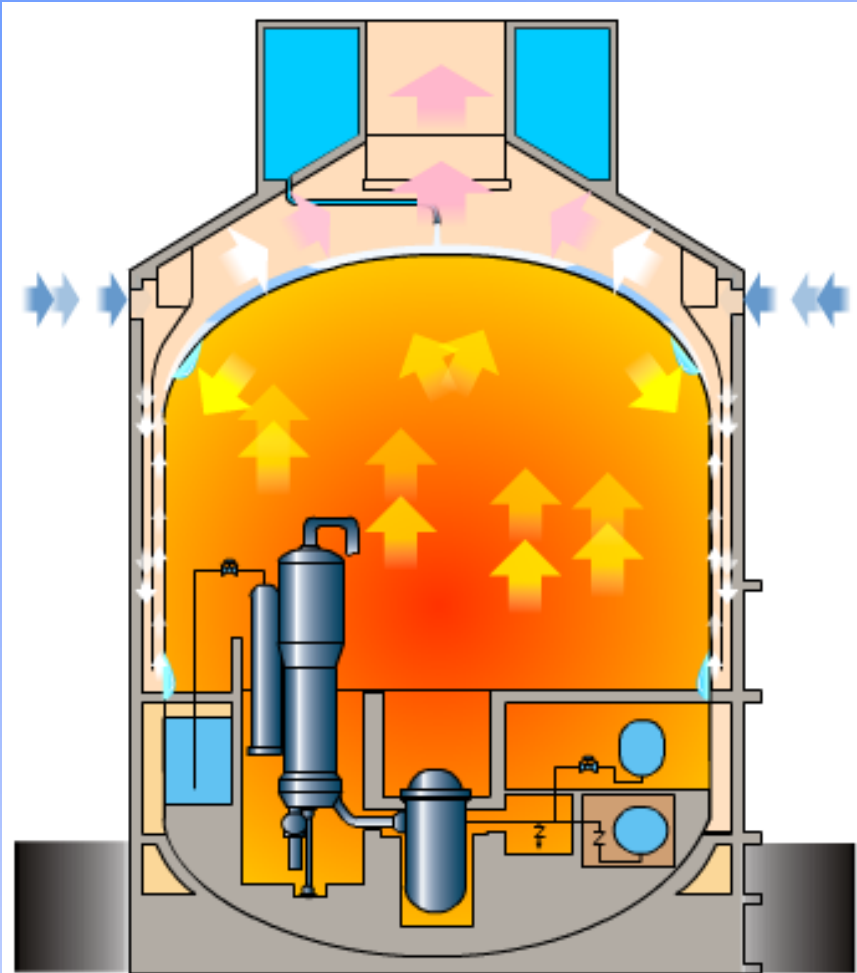
Produkty rozszczepienia pozostają w zbiorniku.

Nie ma zagrożenia radiologicznego.

Reaktor AP 1000 – z pasywnymi układami bezpieczeństwa

- Rozwiązanie amerykańskiego reaktora AP1000 opiera się na zastosowaniu zjawisk naturalnych, jak siła ciężkości, przepływ w obiegu konwekcji naturalnej, ciśnienie sprężonych gazów i konwekcja naturalna. Układy bezpieczeństwa działają na zasadzie pasywnej, zapewniając odbiór ciepła od rdzenia i chłodzenie obudowy bezpieczeństwa przez długi czas bez zasilania prądem zmiennym i nie wymagają działania operatora przez 3 doby.
- Nie ma w nich elementów czynnych (jak pompy, wentylatory lub generatory z silnikami Diesla), a działanie tych systemów nie wymaga systemów pomocniczych zakwalifikowanych do systemów bezpieczeństwa (takich jak zasilanie prądem zmiennym, chłodzenie elementów systemów bezpieczeństwa, odpowiedzialna woda techniczna, wentylacja i klimatyzacja).
- Pasywne systemy bezpieczeństwa obejmują układ pasywnego wtrysku chłodziwa do reaktora, pasywny układ odbioru ciepła powyłączeniowego i pasywny układ chłodzenia obudowy bezpieczeństwa.

AP1000 przez 3 dni nie potrzebuje energii elektrycznej do odbioru ciepła



Woda chłodząca zbiornik odparowuje, i skrapla się na wewnętrznej powierzchni stalowej obudowy bezpieczeństwa.

Najpierw ciepło odbiera woda spływająca w dół na zewnątrz stalowej obudowy

Potem ciepło odbiera powietrze w układzie konwekcji naturalnej

Nie potrzeba energii elektrycznej przez 72 godziny.

Wady –po 72 godzinach zasilanie elektryczne jednak jest potrzebne

Obudowa pojedyncza- warstwa zewnętrzna nie daje szczelności.

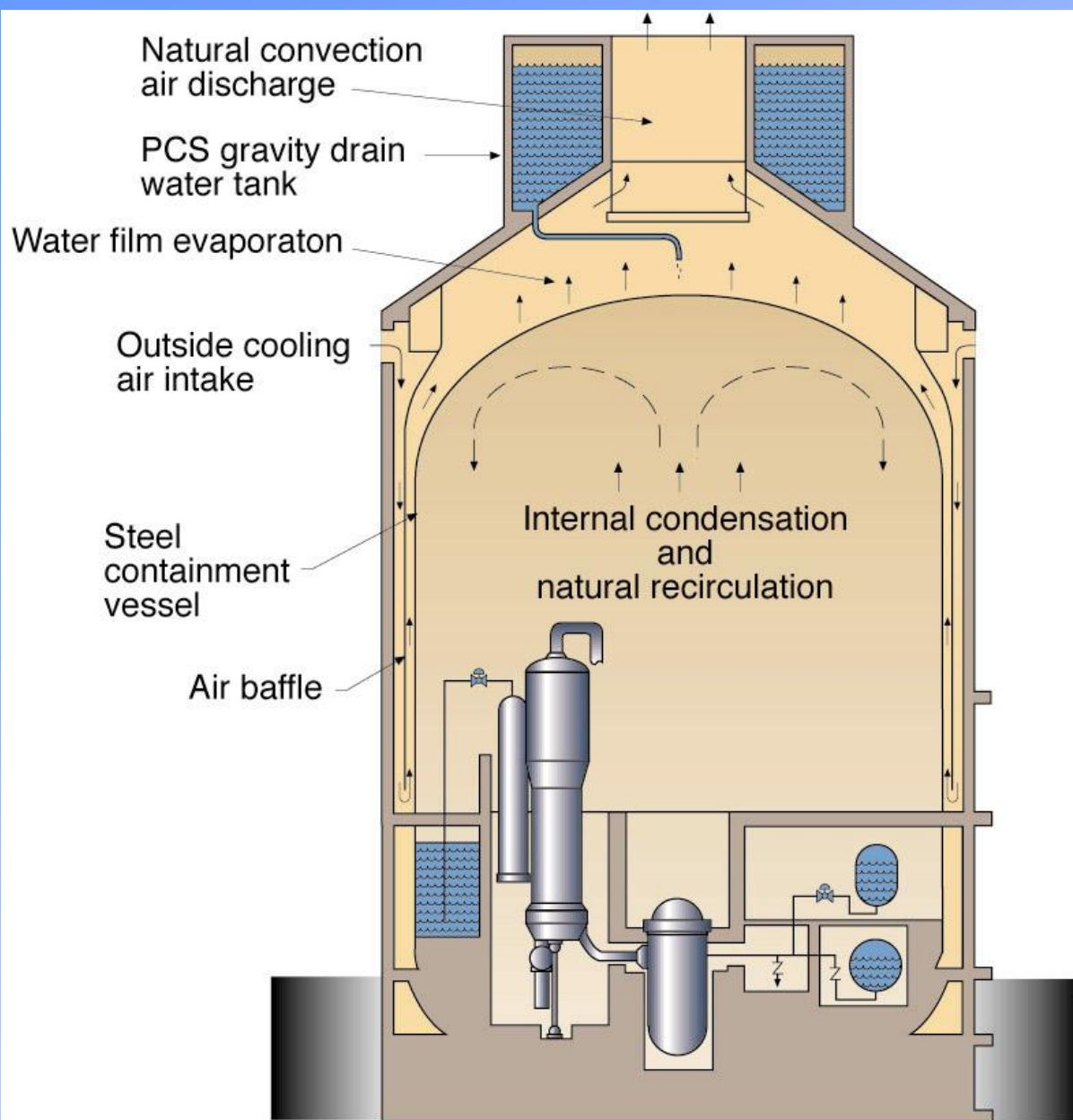
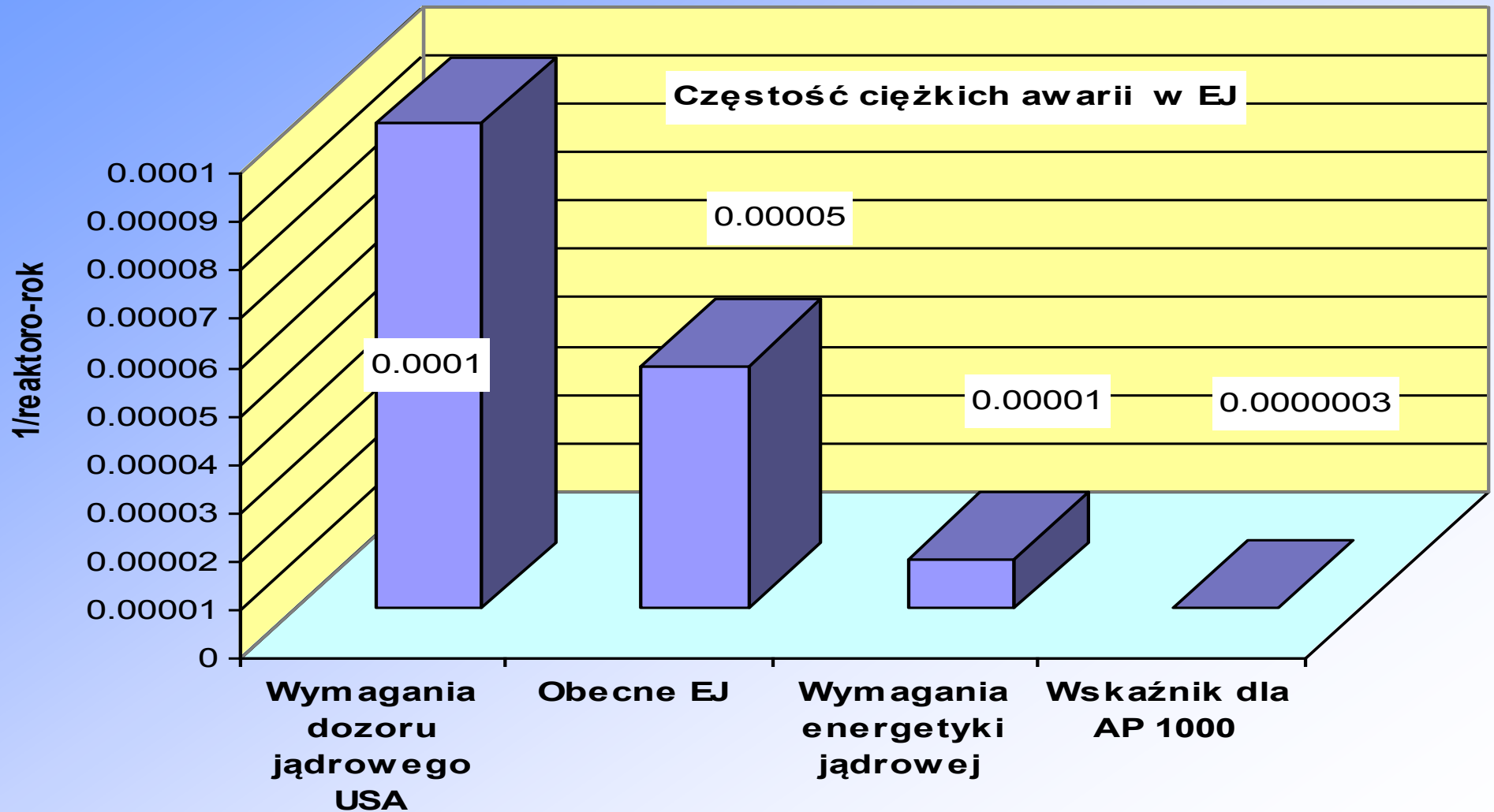


Figure 3. AP600 Passive Containment Cooling System

Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000

Powłoka stalowa 4,45 cm, maks ciśnienie proj. 5,1 bar
 Sciana betonowa- osłona przed promieniowaniem.
 Rdzeń reaktora pozostaje zawsze pod wodą, zbiornik zalany wodą od zewnątrz jest chroniony przed przegrzaniem
 Obudowa zabezpiecza przed uwolnieniami na zewnątrz.
 Zbiorniki wody wewnątrz obudowy zapewniają zalanie zbiornika reaktora i chłodzenie go od zewnątrz

Częstotliwość ciężkich awarii z uszkodzeniem rdzenia w USA i w AP 1000



Większe wypalenie paliwa w EJ z EPR

Ilość produktów rozszczepienia rośnie z głębokością wypalenia paliwa. Ale ten wzrost jest niewielki, aktywność wydzielająca się przy awarii osiąga stan nasycenia już po kilku miesiącach, dalsze wypalanie przez 2,3 i 4 lata niewiele zmienia.

Natomiast ważne, że paliwo nie wydziela się z prętów paliwowych. Frakcja nieszczelnych prętów wynosi zero!

Dozwołoną głębokość wypalenia określa dozór jądrowy i EJ nie może jej przekroczyć.

Obrona integralności obudowy

Potrafimy obronić obudowę przed rozerwaniem we wczesnej fazie awarii

- wybuch wodoru,
- grzanie bezpośrednio po rozerwaniu zbiornika,
- wybuch parowy) .

Potem trzeba ją bronić przed rozerwaniem w późnej fazie awarii:

- grzanie gazów i wzrost ich ciśnienia,
- przetopienie dna obudowy przez stopiony rdzeń.

Chwytnacz rdzenia pod szybem reaktora EPR stał się klasycznym rozwiązaniem stosowanym w różnych typach EJ.

Jak chronimy się przed ciężkimi awariami w reaktorze EPR?

Układy zasilania w energię i w wodę w budynkach odpornych na trzęsienie ziemi, tsunami i ataki terrorystyczne

Układy bezpieczeństwa rozdzielone przestrzennie na 4 rogi EJ

Układy autokatalityczne rekombinacji wodoru zapewniają usuwanie go nawet bez dopływu energii z zewnątrz i bez działań operatora

Potężna obudowa bezpieczeństwa wytrzymuje standardowo uderzenie dużego samolotu pasażerskiego, wybuch zewnętrzny i trzęsienie ziemi 0,3g, a może być jeszcze silniejsza

Wszystkie urządzenia ważne dla bezpieczeństwa odporne na wstrząsy sejsmiczne, pożar, powódź, temperatury itd.

Obudowa odporna nawet na działanie stopionego rdzenia o temperaturze 2000 oC.

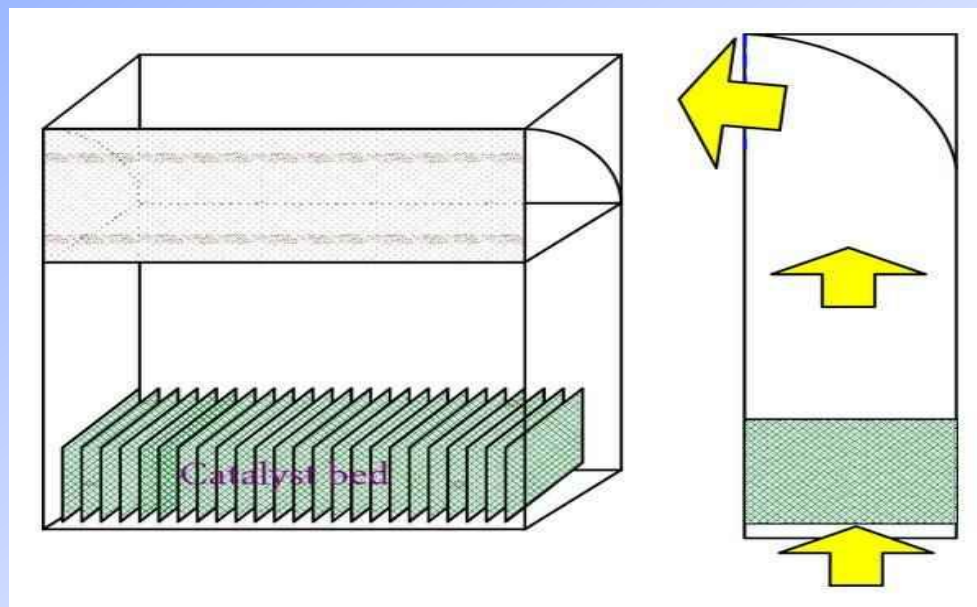
Reaktor EPR – odporny na utratę zasilania elektrycznego i na powódź

- EPR ma 4 generatory awaryjne z napędem diesla , każdy 7 MWe, w specjalnych oddzielnych budynkach , z wyprowadzeniem energii linią zasilającą 10 kV
- Na wypadek utraty generatorów awaryjnych, EPR ma 2 małe generatory z napędem diesla o mocy 1 MWe, każdy.
- Różnorodność: różne mocy diesli i napięcia (10KV, 690V)
- Generatory z silnikami Diesla osiągają pełną szybkość (częstotliwość) i napięcie po 15 sek. od sygnału startu.
- Można je uruchomić bez pomocniczych źródeł energii elektr..
- Każdy generator diesla może pracować 72 h – dość by dowieść ciężki sprzęt dla długotrwałego zasilania. Przewidywana utrata zasilania z sieci- przez 15 dni.

Rozwiązania problemu wodoru w innych reaktorach III generacji

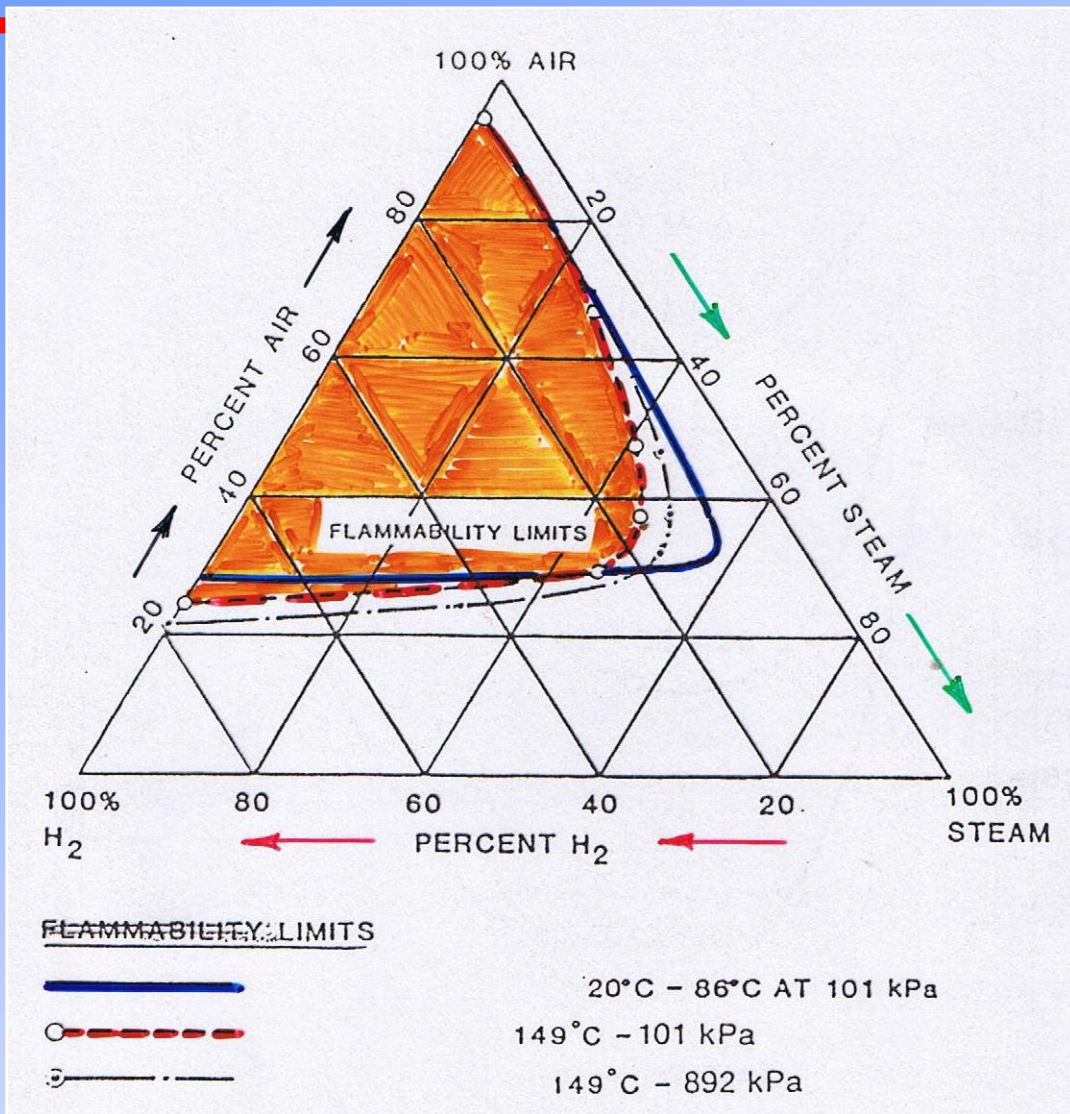
- AP1000 – zapłon iskrowy (wymaga energii) oraz 2 układy PAR w ramach koncepcji obrony w głąb. Ponadto mieszanie atmosfery w obudowie – pasywne, proces naturalny. Wystarcza dla 100% utlenienia koszulek paliwowych
- ABWR – atmosfera obojętna w obudowie pierwotnej, mieszanie atmosfery w obudowie pierwotnej wspomagane przez układ zraszania, 2 układy rekombinacji w obudowie wtórnej
- ESBWR - atmosfera obojętna (azot) w obudowie pierwotnej.. Układ odprowadzania gazów zaprojektowano z wytrzymałością na ciśnienie 17 razy większe od normalnego. To redukuje groźbę rozerwania tego układu przez wybuch wodoru. Wg GEH, groźba uszkodzeń wskutek wybuchów wodoru leży poza granicami wiarygodności.

Autokatalityczna rekombinacja wodoru w EPR- rozwiązanie problemu wybuchu wodoru



Układy rekombinacji katalitycznej obniżają frakcję wodoru gdy jeszcze w powietrzu jest dużo pary wodnej. Zanim para skropli się, wodór jest zrekombinowany. Rekombinacja nie wymaga źródeł energii elektrycznej.

Wykres trójkątny palności wodoru



Na osiach mamy:

Procent powietrza

100% powietrza,

Procent pary

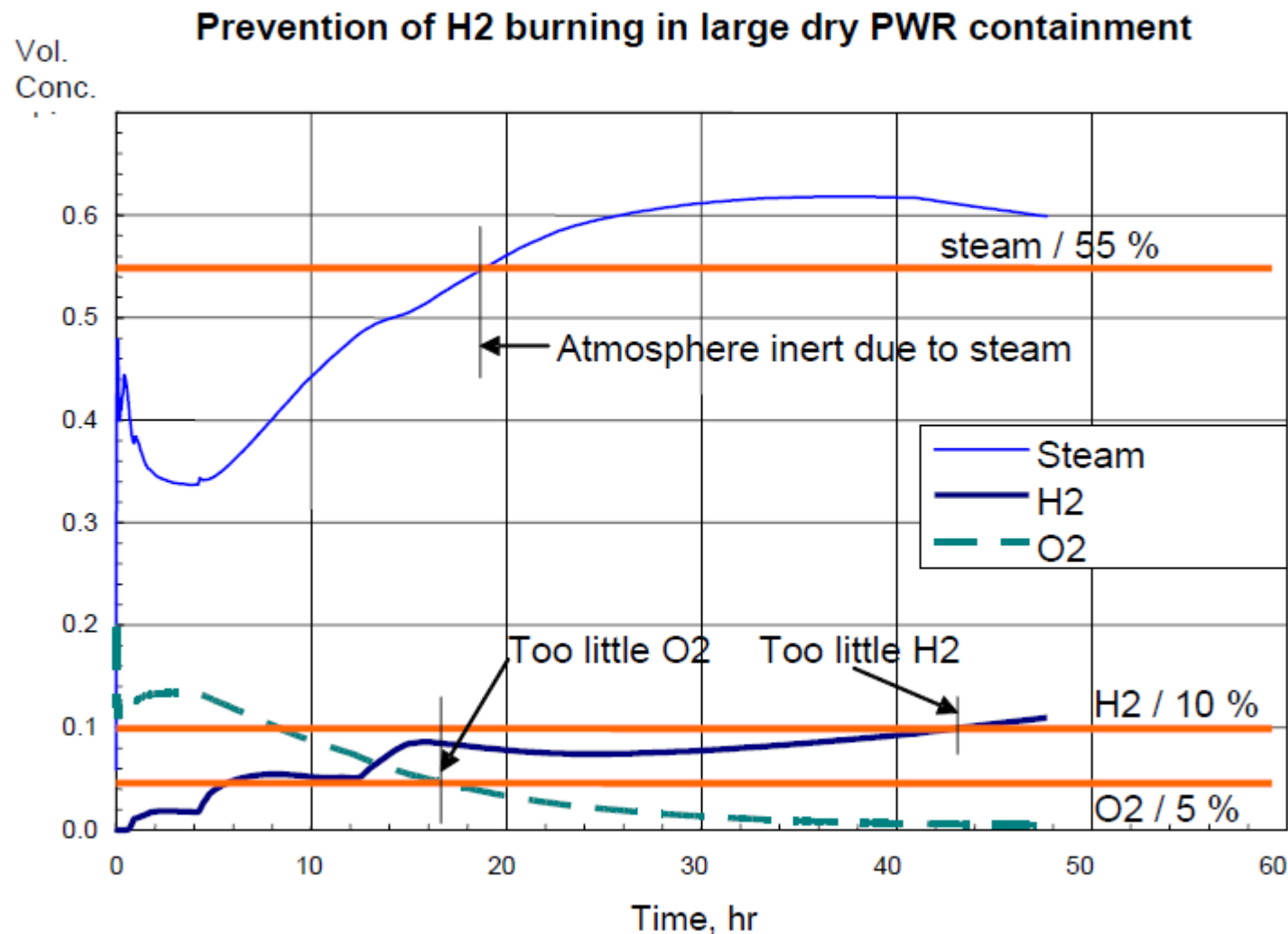
100% pary,

Procent H₂

100% H₂

Granice palności
wodoru

Obrona przed spalaniem wodoru w dużej obudowie bezpieczeństwa PWR



Dane z analiz
dla EJ Temelin

Atmosfera
obojętne przy
frakcji pary >
55%

Za mało O₂

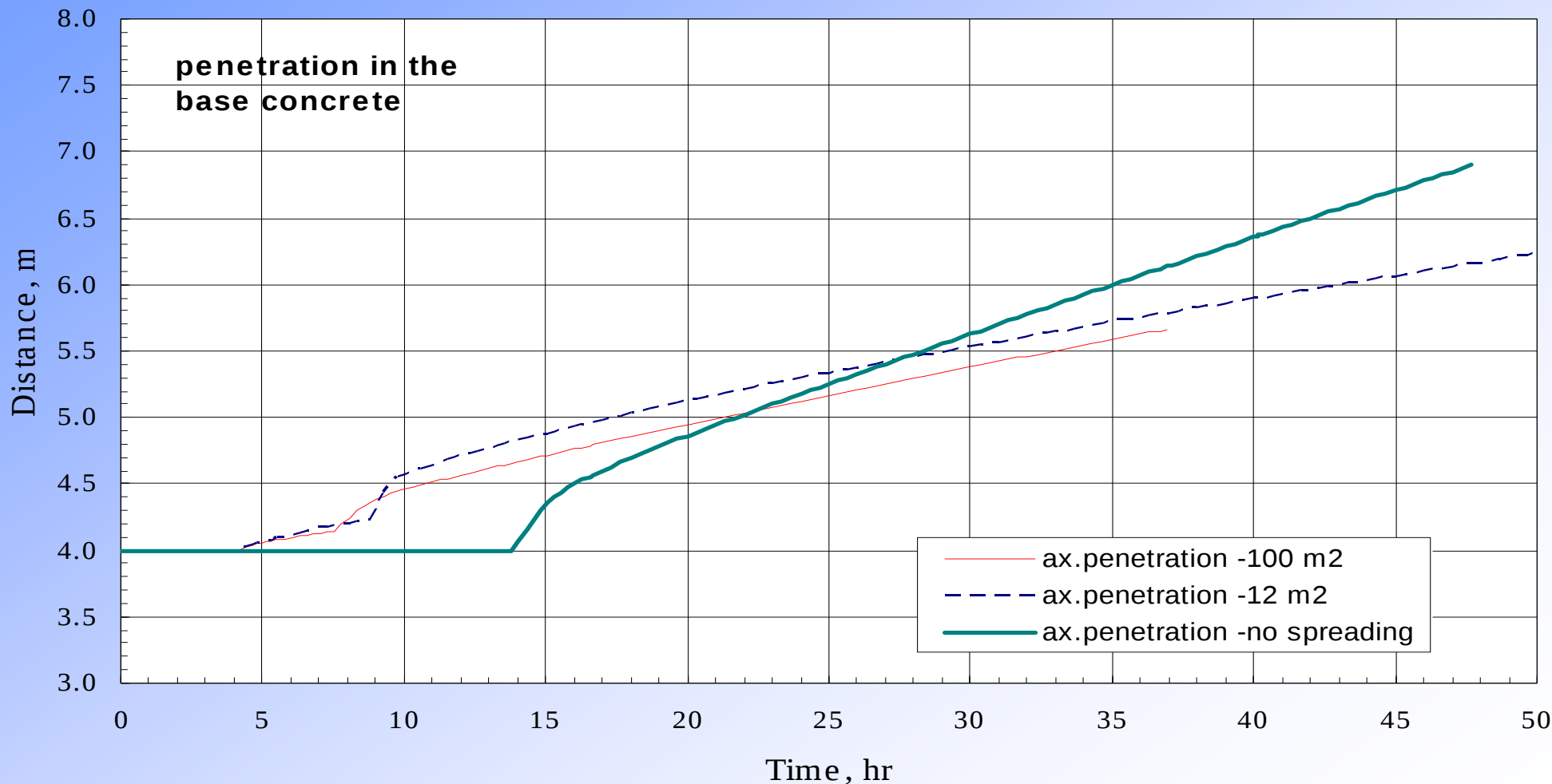
Za mało H₂

Czas, h

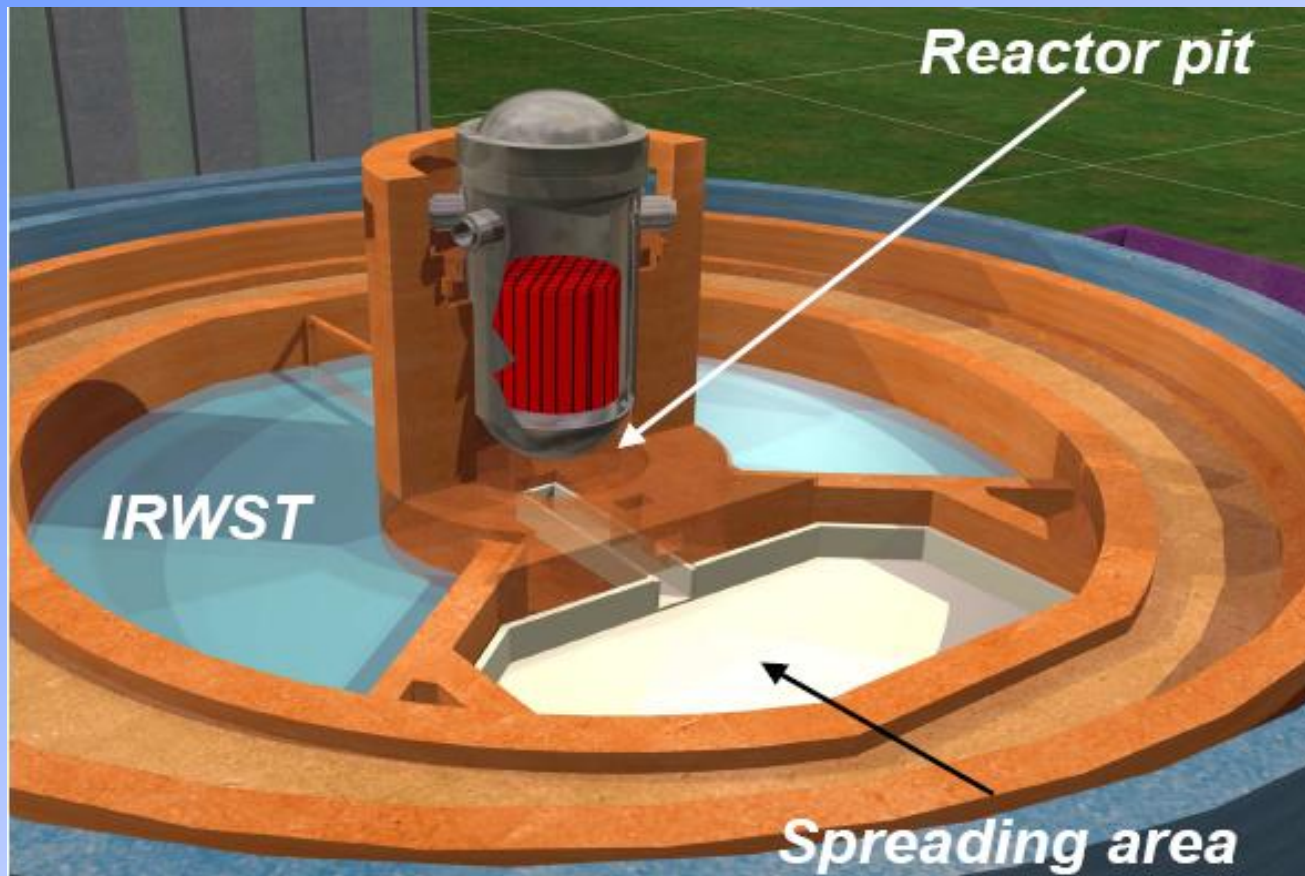
Stężenie obj.

Zagrożenie przetopieniem dna obudowy przez stopiony rdzeń w reaktorze PWR II generacji

TEMELIN, WWER-1000, LB LOCA



Chwytnacz stopionego rdzenia w EPR – ochrona przed przetopieniem dna obudowy

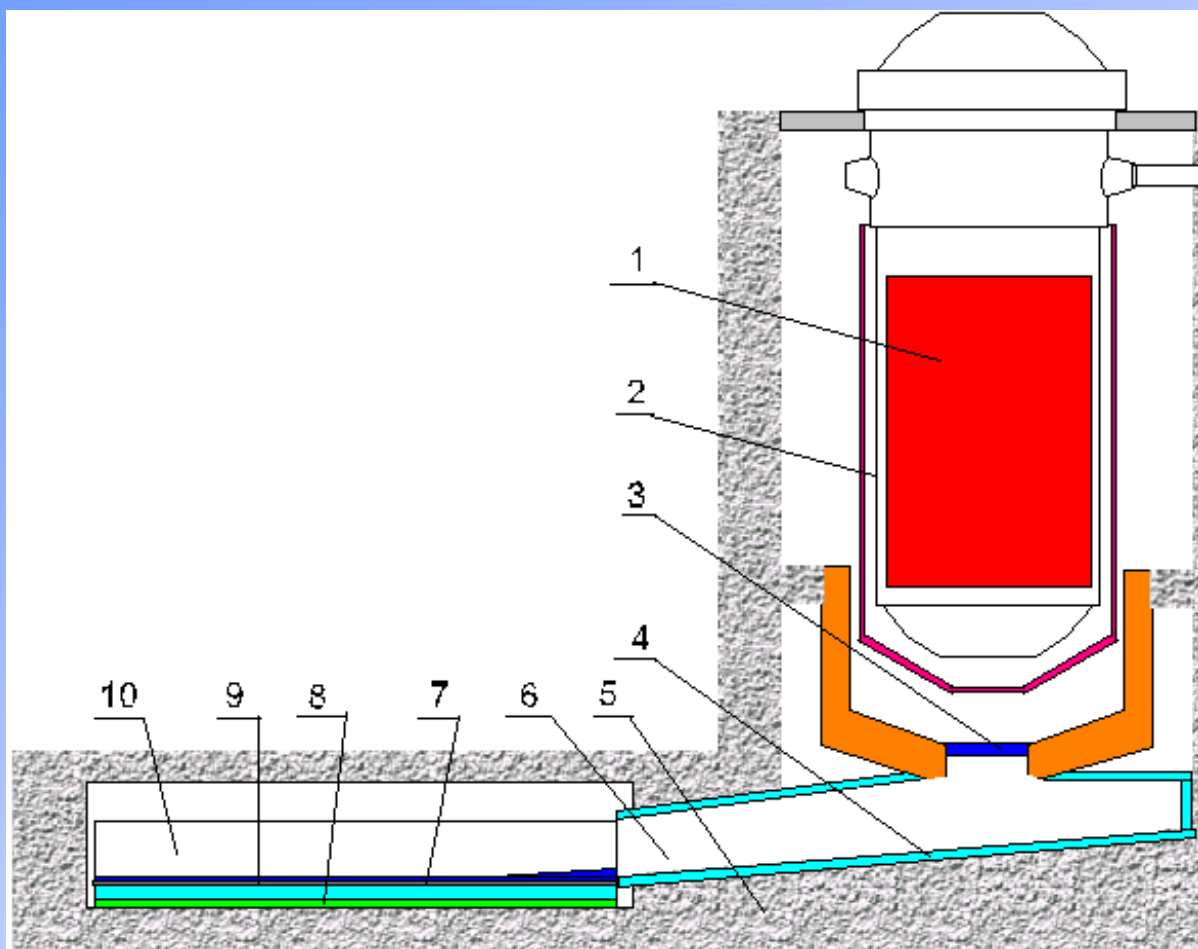


Ø Chwytnacz rdzenia chroni dno obudowy przed przepaleniem. Zapewnia stabilizację stopionego rdzenia bez dodatkowych działań.

Obszar rozplýwu stopionego rdzenia jest suchy w chwili wypływu rdzenia ze zbiornika. Pod wpływem siły ciężkości stopiony rdzeń wypływa ze zbiornika, przepala zawory i rozplýwa się w chwytnaczu rdzenia. Dzięki małej szybkości wypływu nie dochodzi do eksplozji gazowej.

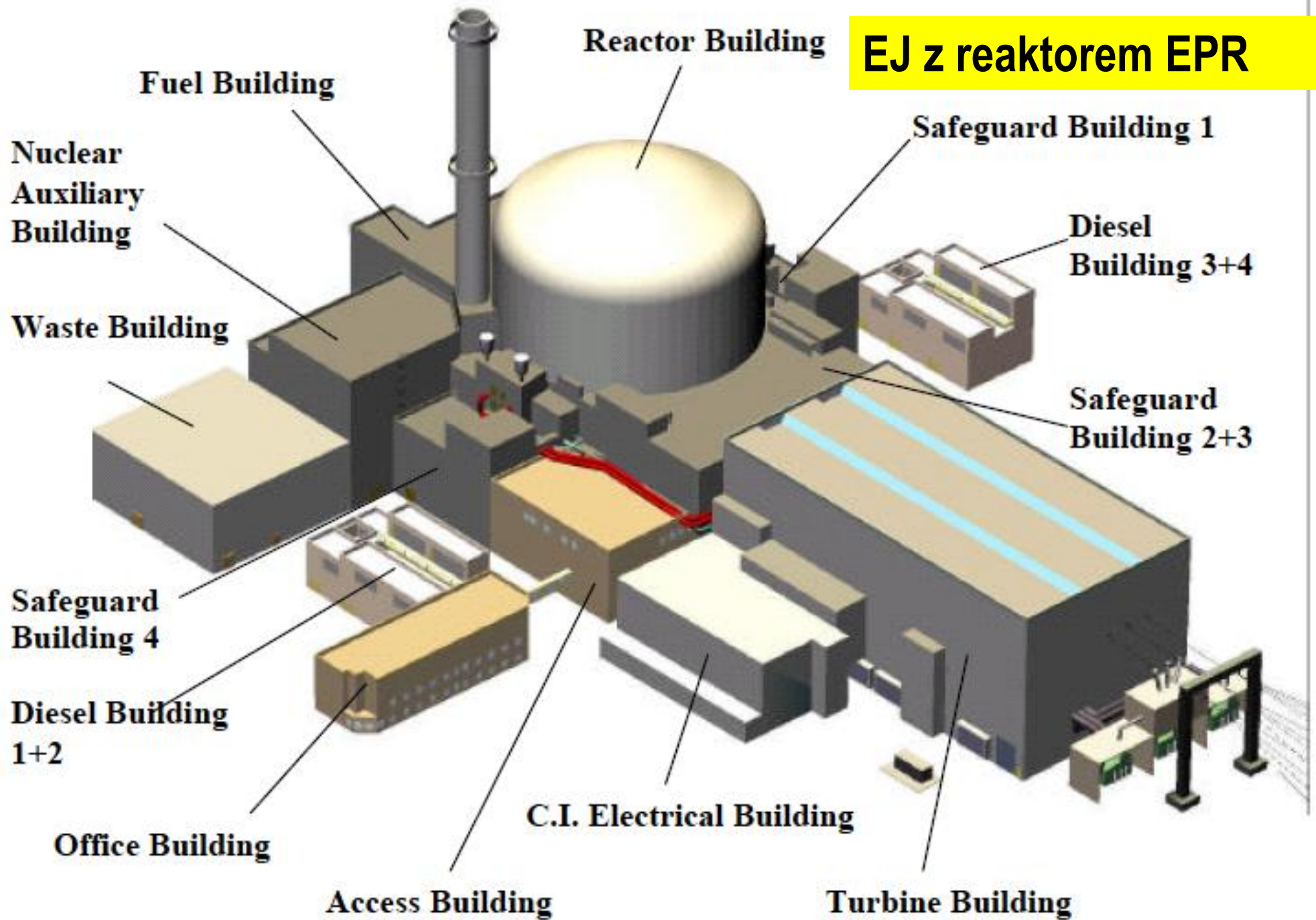
Ø

Układ chwytnic stopionego rdzenia w EJ z EPR jest suchy, nie grozi wybuch parowy

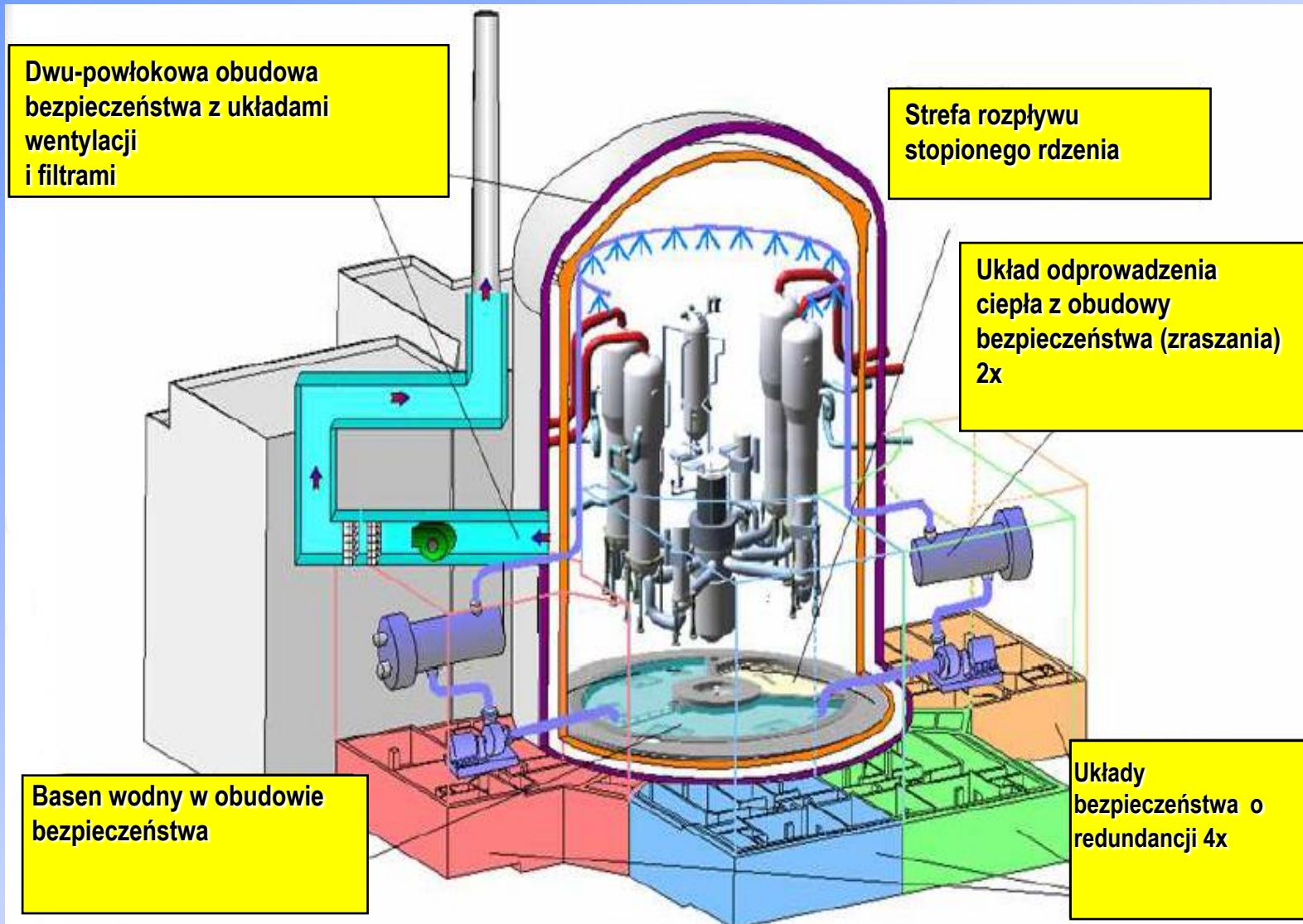


- 1) rdzeń reaktora,
- 2) zbiornik ciśnieniowy reaktora,
- 3) pokrywa przetapiana przez rdzeń,
- 4) dno tunelu przelewowego,
- 5) beton fundamentów obudowy bezpieczeństwa,
- 6) tunel przelewowy,
- 7) materiał ogniotrwały ZrO_2 ,
- 8) chłodzenie wodne chwytnic,
- 9) warstwa powierzchniowa przeznaczona na wytopienie,
- 10) chwytnic rdzenia - basen dla stopionego rdzenia.

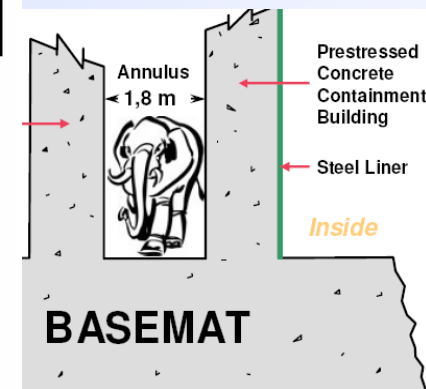
EJ z reaktorem EPR



Reaktor EPR odporny na awarie jądrowe i ataki z zewnątrz



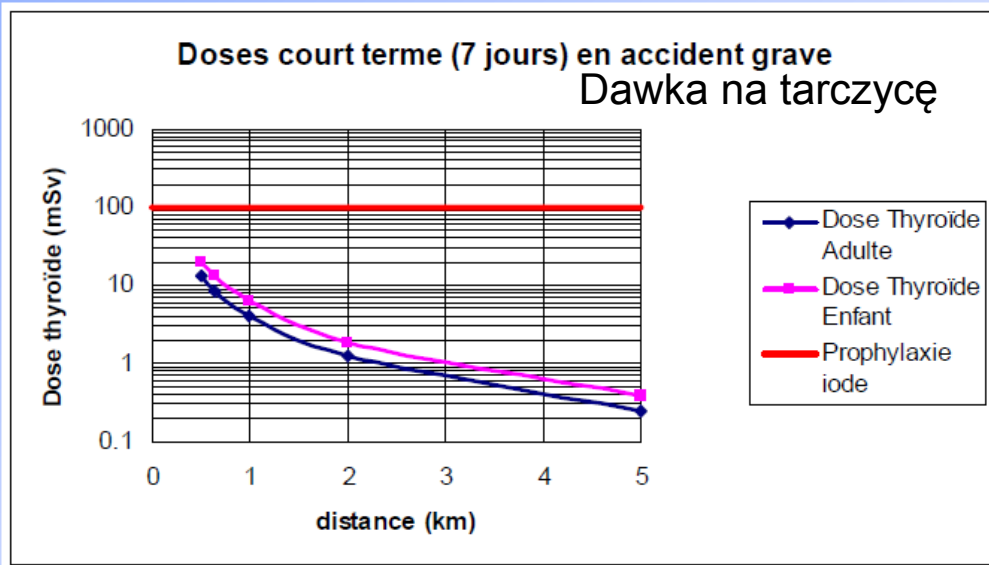
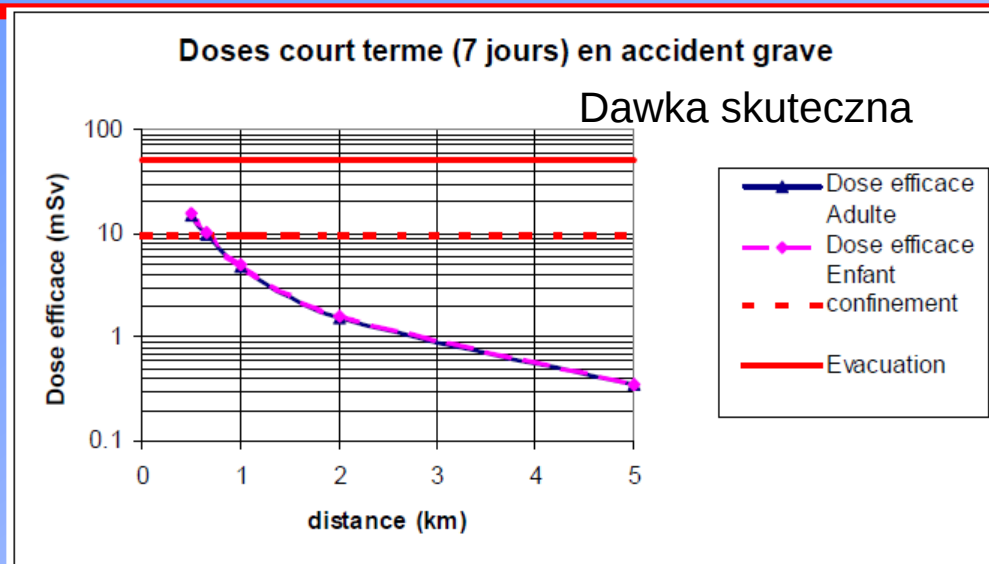
Podwójna obudowa bezpieczeństwa wytrzymała nawet uderzenie samolotu Boeing 757



Czy potrzebna jest podwójna obudowa bezpieczeństwa?

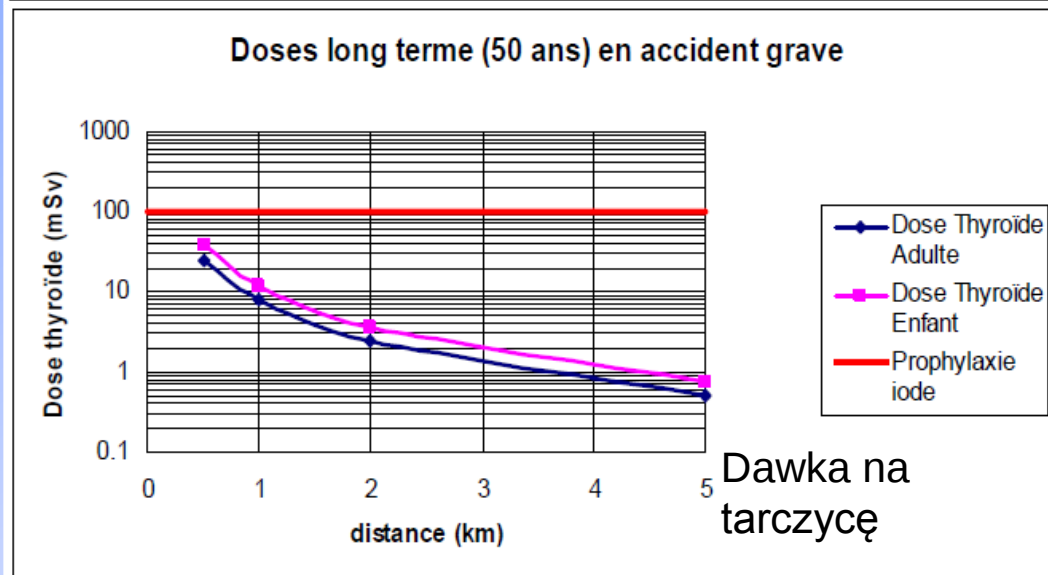
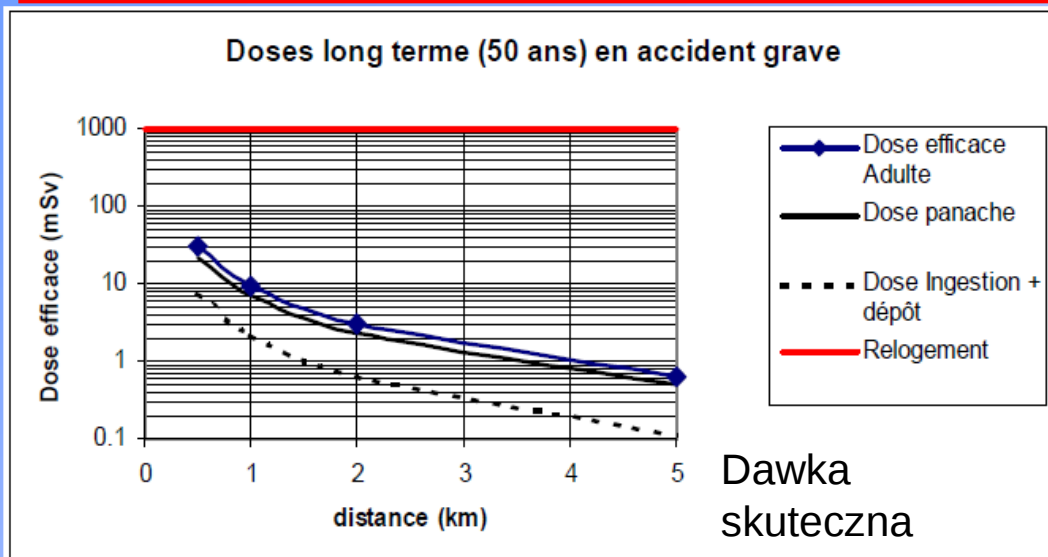
- W USA dawka graniczna w odległości 800 m od EJ to 250 mSv
- I to w ciągu 2 godzin!
- Dawki roczne są kilkakrotnie większe od dawki 2-godzinnej.
- W Polsce poza strefą ograniczonego użytkowania po awarii bez stopienia rdzenia dawka nie może przekroczyć 10 mSv przez rok.
- Dla spełnienia przepisów US NRC wystarcza dobra szczelność pojedynczej obudowy bezpieczeństwa.
- Dla spełnienia wymagań polskich potrzeba podwójnej obudowy z układem filtracji – albo dużej strefy ograniczonego użytkowania .

Dawki wokoło reaktora EPR w ciągu 7 dni od ciężkiej awarii ze stopieniem rdzenia



- Dawka skuteczna (wykres górny) i dawka na tarczycę (wykres dolny) w ciągu 7 dni po awarii ze stopieniem rdzenia EPR.
- Wg przepisów polskich dawka skuteczna w ciągu 7 dni powinna być mniejsza od **100 mSv** (we Francji 50 mSv) by nie trzeba było podejmować ewakuacji i od **10 mSv** by nie było potrzeby pozostawać w pomieszczeniach zamkniętych.
- EPR spełnia oba wymagania- poza strefą ograniczonego użytkowania 10 mSv – wystarcza około 700 m.

Dawki wokoło reaktora EPR w ciągu 50 lat od ciężkiej awarii ze stopieniem rdzenia



- Dawka skuteczna i dawka na tarczycę w ciągu 50 lat po awarii ze stopieniem rdzenia EPR.
- Wg przepisów polskich dawka skuteczna w ciągu 70 lat powinna być mniejsza od 1000 mSv (we Francji tak samo) by nie trzeba było przesiedlać ludności.
- Poza strefą graniczonego użytkowania 30 mSv w ciągu 30 dni- spełnione z zapasem, nie tylko przez 30 dni, ale przez 50 lat!

Reaktor III generacji EPR nie stwarza więc zagrożenia nawet po ciężkiej awarii

Po awariach uwzględnionych w projekcie (aż do rozerwania obiegu pierwotnego) nie potrzeba żadnych działań dalej niż 800 m od EJ

Nawet po hipotetycznych ciężkich awariach :

- **Nie potrzeba wczesnych działań ochronnych** po awarii dalej niż 800 m od EJ (granica strefy ograniczonego użytkowania wokół EJ)
- **Nie potrzeba działań średnio terminowych** dalej niż 3 km od EJ
- **Nie potrzeba działań długoterminowych** (ewakuacja, ograniczenie spożycia płodów rolnych) dalej niż 800 m od EJ
- Skutki ekonomiczne ograniczone

Takie bezpieczeństwo zapewniają EJ z EPR budowane w Finlandii, Francji, w Chinach i zaplanowane w UK i USA.

Odporność reaktorów III generacji na awarie projektowe bez stopienia rdzenia

Różne są podejścia do analiz przebiegu awarii projektowych.

- Ocena przebiegu i skutków awarii może być realistyczna- jak w większości krajów UE i w Polsce – lub umowna, służąca do oceny lokalizacji i obudowy bezpieczeństwa, jak w USA.
- Wg podejścia stosowanego w UE (Francja, UK, Niemcy, Szwecja i inne kraje) jeśli EJ ma układy bezpieczeństwa, to można w analizie przyjąć, że są one skuteczne i nie dopuszczają do stopienia rdzenia .
- W USA dla większości awarii wymagane jest założenie, że powodują one częściowe stopienie rdzenia.(RG 1.183). Dlatego dawki graniczne są dużo wyższe.
- Wg ANSI/ANS 51.1 - 1983 stany EJ awarie dzielą się na 5 kategorii w zależności od ich częstości

Podejście w USA i w UE do ocen awarii i dawek dopuszczalnych

- Podejście w USA – narzucona wielkość uwolnień do obudowy, dawniej 100% gazów szlachetnych, 25% jodu i 1% stałych produktów rozszczepienia (RG1.3 i RG1.4) obecnie frakcje określone w RG 1.183 (następna strona)
- Promień strefy wyłączenia EAB typowo to 0,5 mili = 800 m, limit dawki po awarii w ciągu 2 h na granicy EAB 250 mSv
- Strefa o małej gęstości zaludnienia Low Population Zone – typowo 1,5 mili = 2400 m, (ESBWR 4820 m.) limit dawki w ciągu 30 dni na zewnętrznej granicy LPZ wynosi 250 mSv
- **Podejście w UE (większość krajów UE)**
- Limit dawki po awarii projektowej 20 mSv (UK), lub 10 mSv (European Utilities Requirements EUR), nawet 5 mSv Bułgaria.

Frakcje produktów rozszczepienia uwolnione do obudowy bezpieczeństwa, RG 1.183

Grupa	Faza uwolnień ze szczeliny	Faza początkowa uwolnień ze zbiornika	Suma
Gazy szlachetne	0.05	0.95	1.0
Halogeny	0.05	0.35	0.4
Metale alkaliczne	0.05	0.25	0.3
Grupa telluru	0.00	0.05	0.05
Ba, Sr	0.00	0.02	0.02
Metale szlachetne	0.00	0.0025	0.0025
Grupa ceru	0.00	0.0005	0.0005
Lantanowce	0.00	0.0002	0.0002

Różne założenia w analizie awarii projektowych

- Wysokie dawki graniczne w USA są odbiciem bardzo zachowawczych założeń co do uwolnień.
- Przepisy USA wymagają, by założyć częściowe stopienie rdzenia jako podstawę do ocen radiologicznych
- Dużo niższe dawki graniczne w UE możliwe dzięki przyjęciu realistycznego podejścia do analiz awarii..
- W krajach UE jeśli reaktor ma system bezpieczeństwa zgodny z wymaganiami bezpieczeństwa, to można przyjąć, że ten system będzie działał (przy zachowaniu zasady pojedynczego uszkodzenia i innych zasad)
- Jeśli analiza wykaże, że nie dochodzi do stopienia rdzenia, to nie musimy zakładać stopienia rdzenia.

Wymagania US 10 CFR 100 wobec lokalizacji EJ

Wnioskodawca powinien założyć wydzielenia produktów rozszczepienia z rdzenia , oczekiwaną nieszczelność obudowy bezpieczeństwa i warunki meteorologiczne odpowiednie dla danej lokalizacji by określić wielkość strefy wyłączenia i strefy o małej gęstości zaludnienia (**exclusion area, a low population zone**).

Rozmiary strefy wyłączenia winny być takie, by osoba znajdująca się na jej zewnętrznej granicy narażona na działanie chmury radioaktywnej po uwolnieniu produktów rozszczepienia z EJ w ciągu 2 godzin po awarii nie otrzymała dawki efektywnej większej niż 250 mSv ani dawki na tarczycę powodowanej przez izotopy jodu większej niż 3 Sv

Rozmiary strefy o małej gęstości zaludnienia winny być takie, by osoba znajdująca się na jej zewnętrznej granicy narażona na działanie chmury radioaktywnej po uwolnieniu z EJ w ciągu całego okresu przepływu chmury nie otrzymała dawki efektywnej większej niż 250 mSv ani dawki na tarczycę powodowanej przez izotopy jodu większej niż 3 Sv.

Wielkości dawek granicznych trzeba rozpatrywać w połączeniu z metodyką analiz

- Kraj kupujący nowy reaktor uwzględnia w swych przepisach wymagania MAEA, WENRA , przepisy kraju produkującego reaktor a obecnie w UE- zalecenia i wymagania EUR.
- Podejście USA przyjęto w Europie w Hiszpanii, Belgii, we Włoszech, a w Azji w Południowej Korei. Podobne jest w Chinach i Japonii.
- Podejście EUR przyjęto we Francji, UK, w Niemczech, Finlandii i szeregu innych krajów.
- Różnice występują głównie w definicji awarii projektowej i dawek po awariach bez stopienia rdzenia.

Obszar ograniczonego użytkowania wokół EJ wg przepisów polskich

Art. 36f. 1. Wokół obiektu jądrowego tworzy się obszar ograniczonego użytkowania, na zasadach określonych w ustawie z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska

2. Obszar ograniczonego użytkowania wokół obiektu jądrowego obejmuje teren, na zewnątrz którego:

w stanach eksploatacyjnych obiektu jądrowego obejmujących normalną eksploatację oraz przewidywane zdarzenia eksploatacyjne **roczna dawka skuteczna (efektywna) od wszystkich dróg narażenia nie przekroczy 0,3 milisiwerta (mSv);**

w razie awarii bez stopienia rdzenia **roczna dawka skuteczna (efektywna) od wszystkich dróg narażenia nie przekroczy 10 milisiwertów (mSv).**

Dla reaktora III generacji, np. EPR

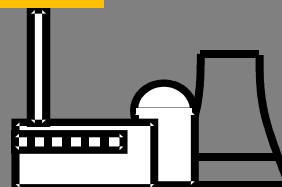
Nie potrzeba działań interwencyjnych **poza strefą 3 km** nawet po ciężkiej awarii ze stopieniem rdzenia

Po awarii projektowej
 $D(\text{rok}) \leq 10 \text{ mSv}$, nie
potrzeba działań
interwencyjnych

$D(\text{rok}) \geq 10 \text{ mSv}$

3 000 m

800 m



Ograniczenie uwolnień promieniotwórczych poza obudowę bezpieczeństwa reaktora

§ 9. tak, żeby nie było konieczne podejmowanie

- 1) w razie awarii projektowych - jakichkolwiek działań interwencyjnych poza granicami obszaru ograniczonego użytkowania;
- 2) w razie wystąpienia rozszerzonych warunków projektowych:
 - wczesnych działań interwencyjnych podczas trwania uwolnień substancji promieniotwórczych z obudowy bezpieczeństwa poza granicami obszaru ograniczonego użytkowania,
 - średnioterminowych działań interwencyjnych w jakimkolwiek czasie poza granicami strefy planowania awaryjnego,
 - długookresowych działań interwencyjnych poza granicami obszaru ograniczonego użytkowania.

Po awarii ze stopieniem rdzenia reaktora

- 2. W przypadku awarii ze stopieniem rdzenia reaktora projekt obiektu jądrowego zawiera rozwiązania, które, z maksymalnym prawdopodobieństwem, zapobiegają:
- sekwencjom zdarzeń prowadzącym do wczesnych uwolnień substancji promieniotwórczych, rozumianym jako sytuacje, w których są wymagane działania interwencyjne poza terenem obiektu jądrowego, w przypadku braku czasu na ich przeprowadzenie;
- sekwencjom zdarzeń prowadzącym do dużych uwolnień substancji promieniotwórczych, rozumianym jako sytuacje, w których są wymagane nieograniczone w przestrzeni lub czasie działania chroniące społeczeństwo.

Działania interwencyjne wg przepisów polskich i zaleceń MAEA

Wielkość dawki, która może być otrzymana przy zaniechaniu działań interwencyjnych			Rodzaj działań interwencyjnych
Wartość	Rodzaj dawki	W czasie	
100 mSv*	efektywna	7 kolejnych dni	Ewakuacja
10 mSv*	efektywna	2 kolejne dni	Pozostanie w ukryciu
100 mGy	Na tarczycę	-	Podanie jodu stabilnego
30 mSv*	Efektywna	30 dni	Czasowe przesiedlenie
10 mSv*	efektywna	30 dni po 2 latach od wypadku	Stałe przesiedlenie ludności
1000 mSv*	efektywna	Całe życie**	Stałe przesiedlenie ludności

Strefy ochronne na wypadek ciężkiej awarii wokół EPR zgodnie z wymaganiami EUR

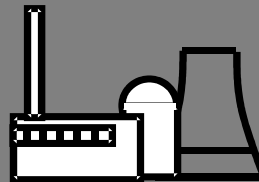
Ne potrzeba
żadnych działań
interwencyjnych

Ograniczone działania
Podanie jodu, pozostanie w
ukryciu, czasowe
przesiedlenie

Dla porównania- wg
przepisów USA
 $D(\text{EAB}, 2h) \leq 250 \text{ mSv}$
 $D(\text{LPZ}, 30 \text{ d}) \leq 250 \text{ mSv}$

3 000 m

800 m

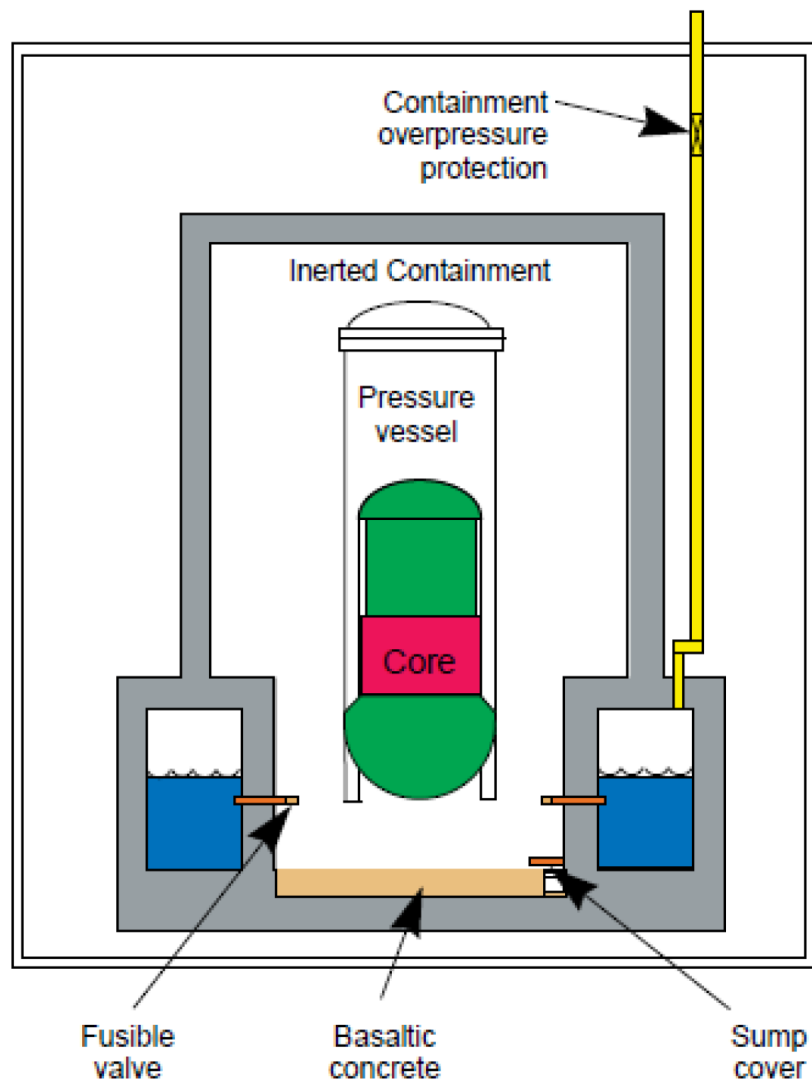


$D(7 \text{ dni}) \leq 100 \text{ mSv}$

$D(30 \text{ dni}) \leq 30 \text{ mSv}$
 $D(70 \text{ lat}) \leq 1000 \text{ mSv}$

Kolorem żółtym
pokazano dawki
ustalone w Polsce
dla opisanych
powyżej
poziomów
interwencyjnych

Układ do zatrzymania stopionego rdzenia w razie ciężkiej awarii w ABWR



W razie stopienia rdzenia i przepalenia zbiornika dolny układ zalewania obudowy wprowadza na dno szybu wodę z wodnego układu tłumienia ciśnienia.

Każda z rur biegnących ze zbiorników wodnych do dolnej części szybu reaktora ma roztapiany korek położony w dolnej części szybu. Jeśli stopiony rdzeń wydostanie się poza zbiornik, korki stopią się i woda zaleje materiał rdzenia.

Beton bazaltowy sprzyja ograniczeniu reakcji powodujących wydzielanie CO i CO₂. Ponadto dno szybu jest wyłożone cegłami z ogniotrwałych tlenków dla uniemożliwienia przeniknięcia ciekłego rdzenia przez płytę fundamentową.

Reaktor ABWR wyposażony w podwójną obudowę bezpieczeństwa

- Dla awarii z częściowym stopieniem rdzenia zachodzących wewnątrz obudowy bezpieczeństwa, przy przeciekach z obudowy 0,5% dziennie, dawki poza strefą ograniczonego użytkowania wynoszą mniej niż 10 mSv.
- Jest to skutek wychwytu produktów rozszczepienia w układzie filtrów na wyjściu z wtórnej obudowy bezpieczeństwa.
- Układ odsysania gazów z przestrzeni pierścieniowej to obecnie standard w reaktorach ewolucyjnych. Brakuje go jednak w reaktorach pasywnych: AP1000 i ESBWR - bo polega się w nich wyłącznie na układach pasywnych i po awarii może brakować zasilania elektrycznego

ABWR – układ ograniczania i redukcji stężenia wodoru, wymaga dopływu energii

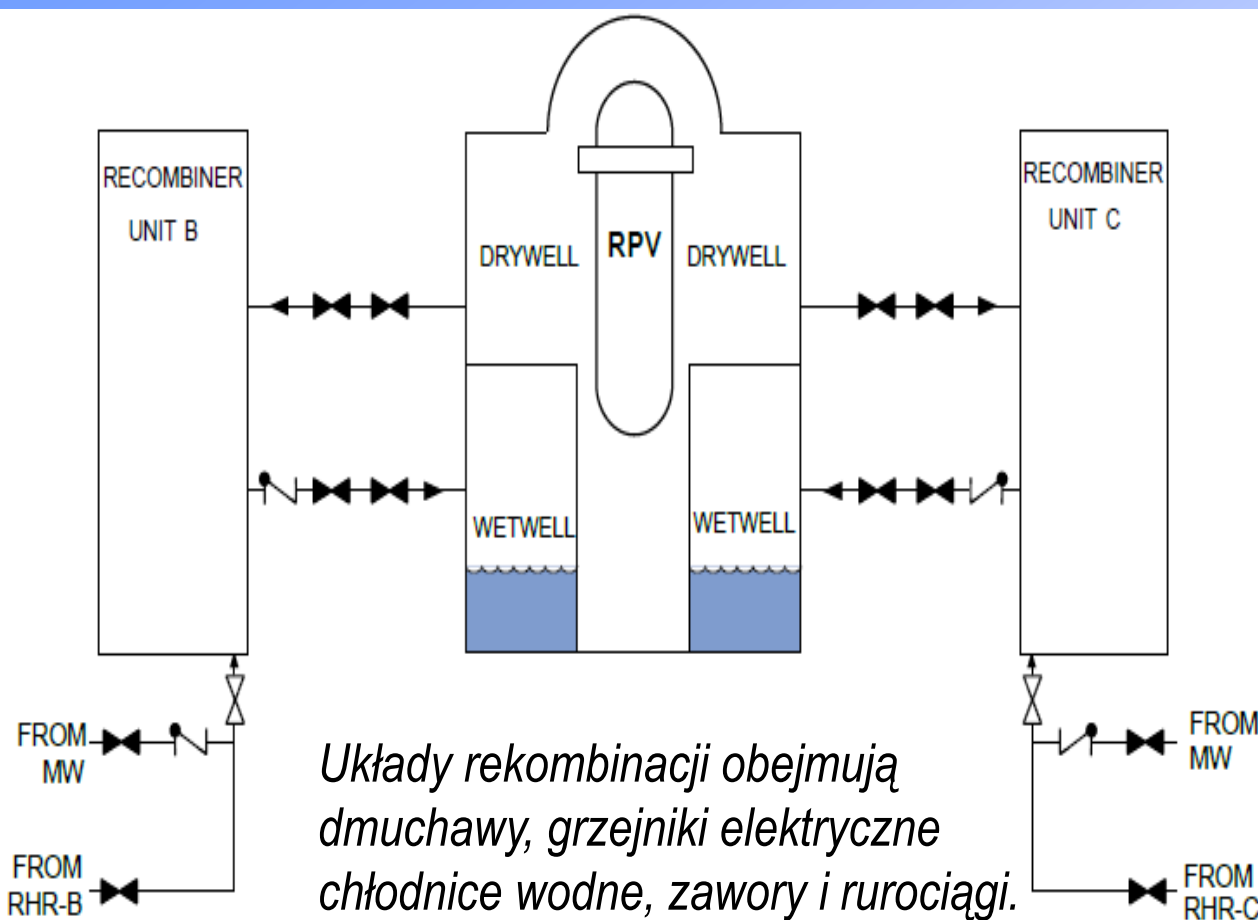


Figure 4-8. Flammability Control System

Układ kontroli gazów palnych Flammability Control System (FCS) **wymaga dostarczania energii elektrycznej** – nie spełnia wymagań §34 punkt 3 i §79 punkt 2 projektu Rozp. RM „projektowego”. Ta słabość FCS była jedną z głównych przyczyn zniszczenia EJ Fukushima

Pierwotna obudowa bezp. ABWR nie jest dość silna – w przeciwieństwie do obudowy EPR by wytrzymać ciśnienie po ciężkiej awarii. Potrzeba układu ochrony przed nadciśnieniem Containment Overpressure Protection System (COPS).

ABWR Ochrona obudowy przed nadciśnieniem – ale za cenę niekontrolowanych uwolnień

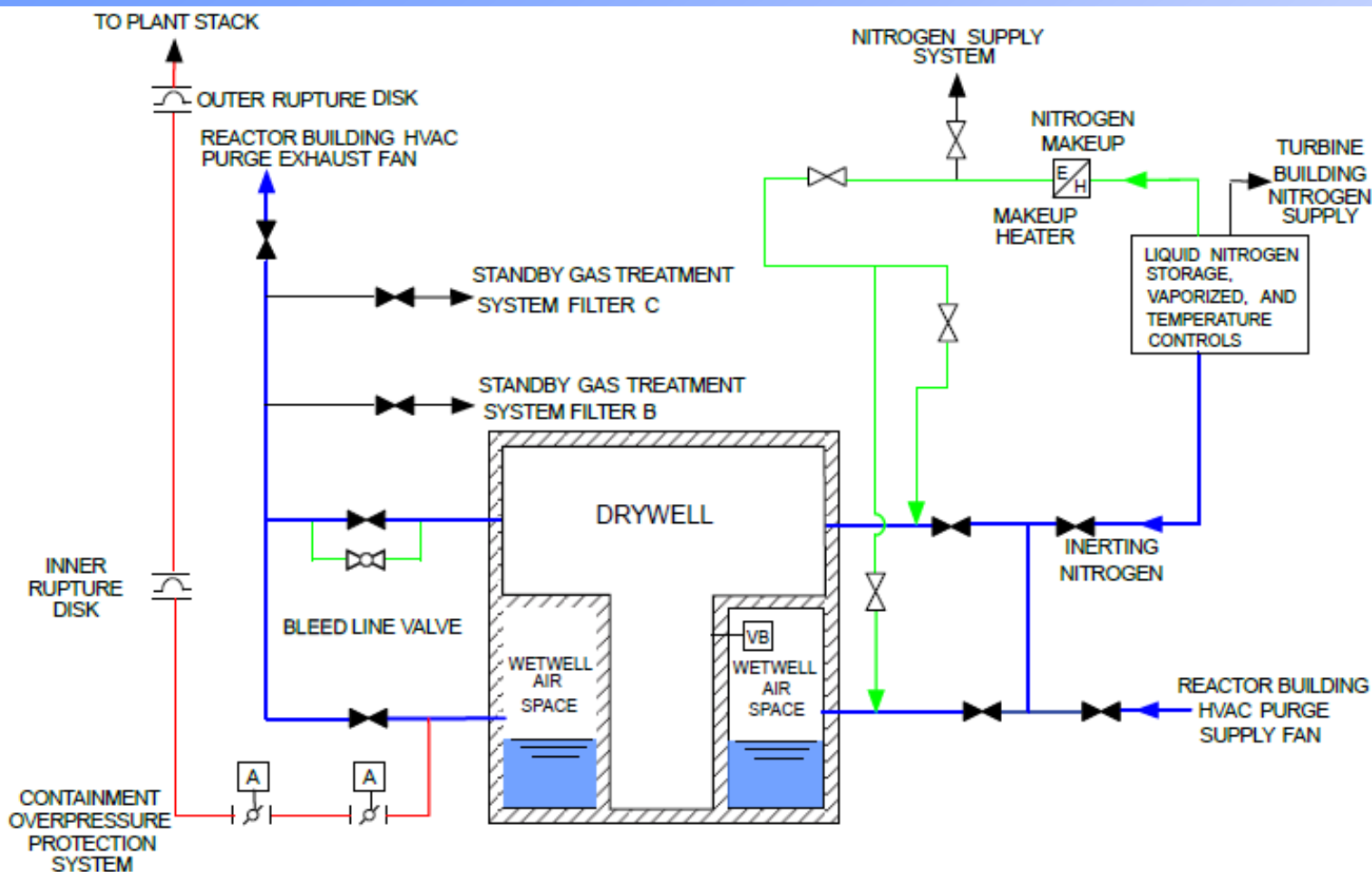
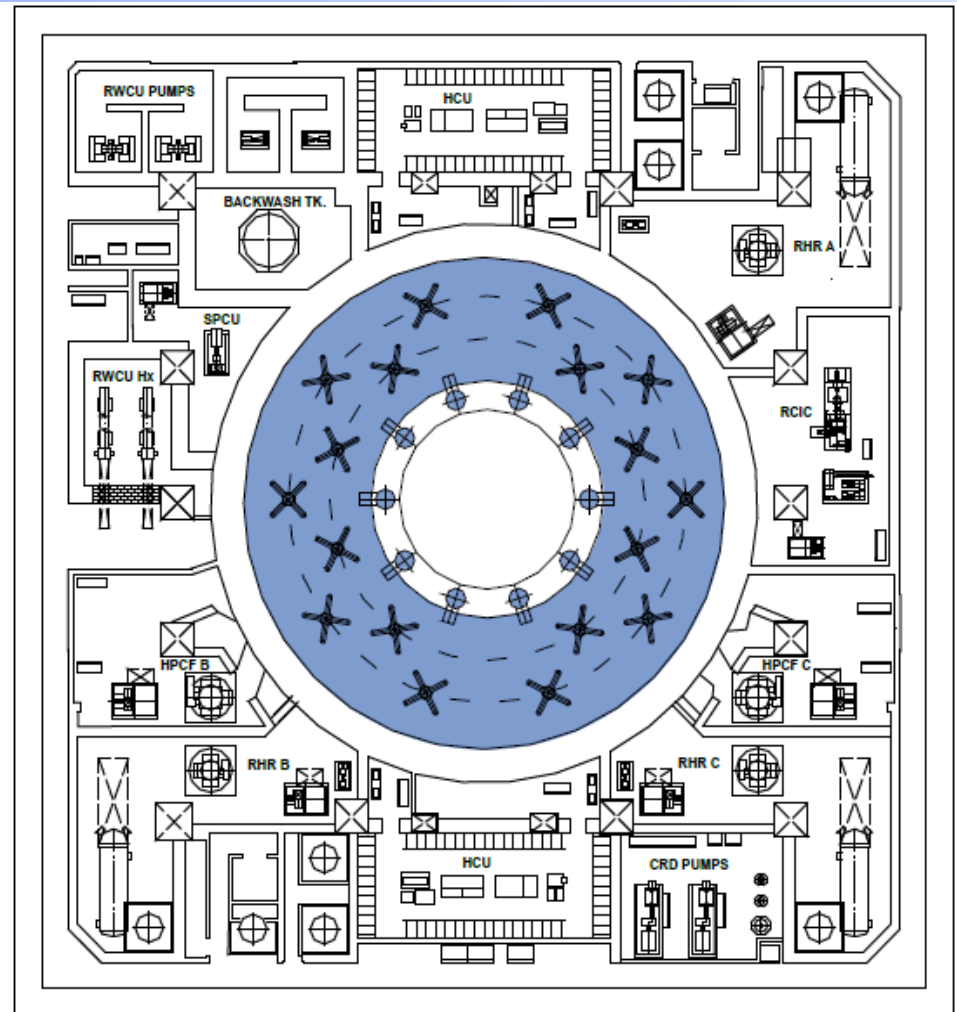
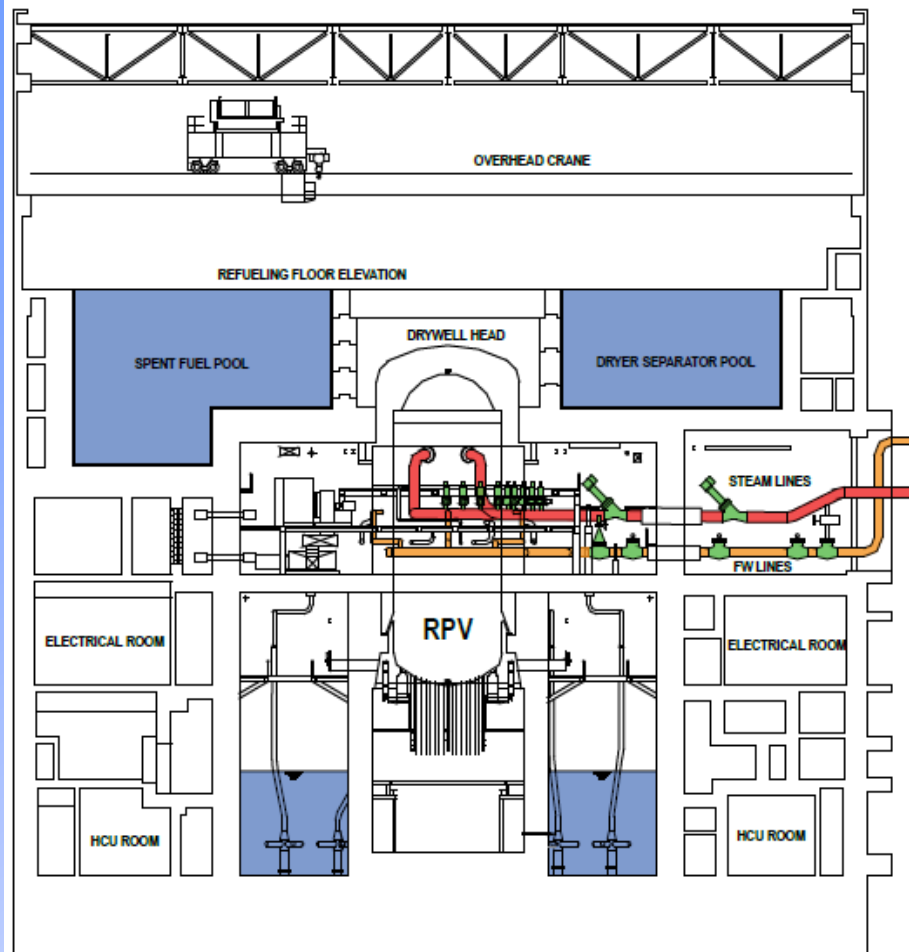


Figure 4-7. Atmospheric Control System

Po przekroczeniu ciśnienia progowego, membrana wewn. w układzie COPS pęka i gazy przefiltrowane przez wodę w zamku wodnym obudowy wypływają przez komin.

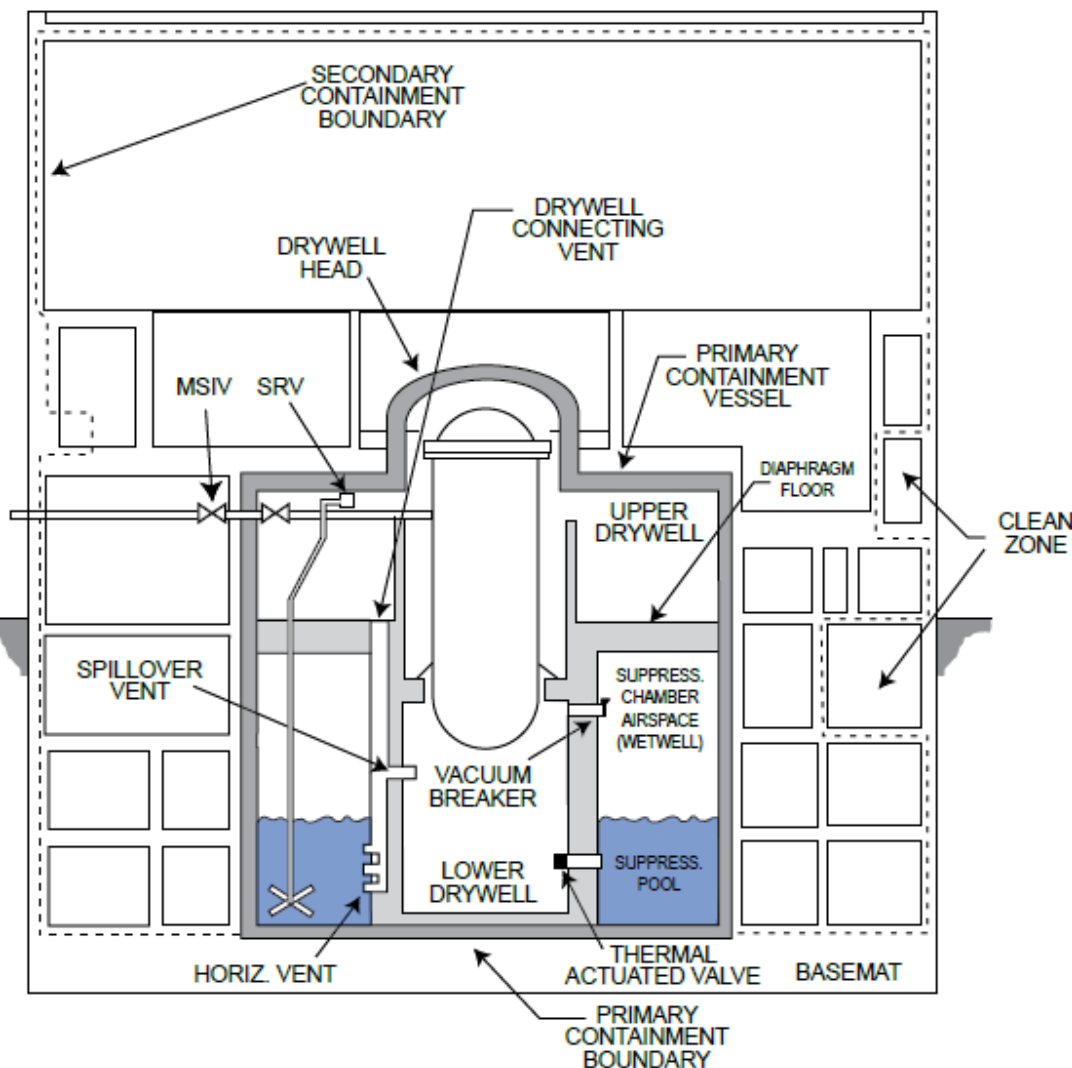
Ale w układzie nie ma filtrów więc otwarcie COPS oznacza wypływ produktów rozszcz. do otoczenia.

Reaktor ABWR – basen wypalonego paliwa poza pierwotną obudowę bezpieczeństwa



- GE Hitachi: The ABWR Plant General Description

ABWR: Wtórna obudowa bezpieczeństwa nie jest odporna na uderzenie samolotu.

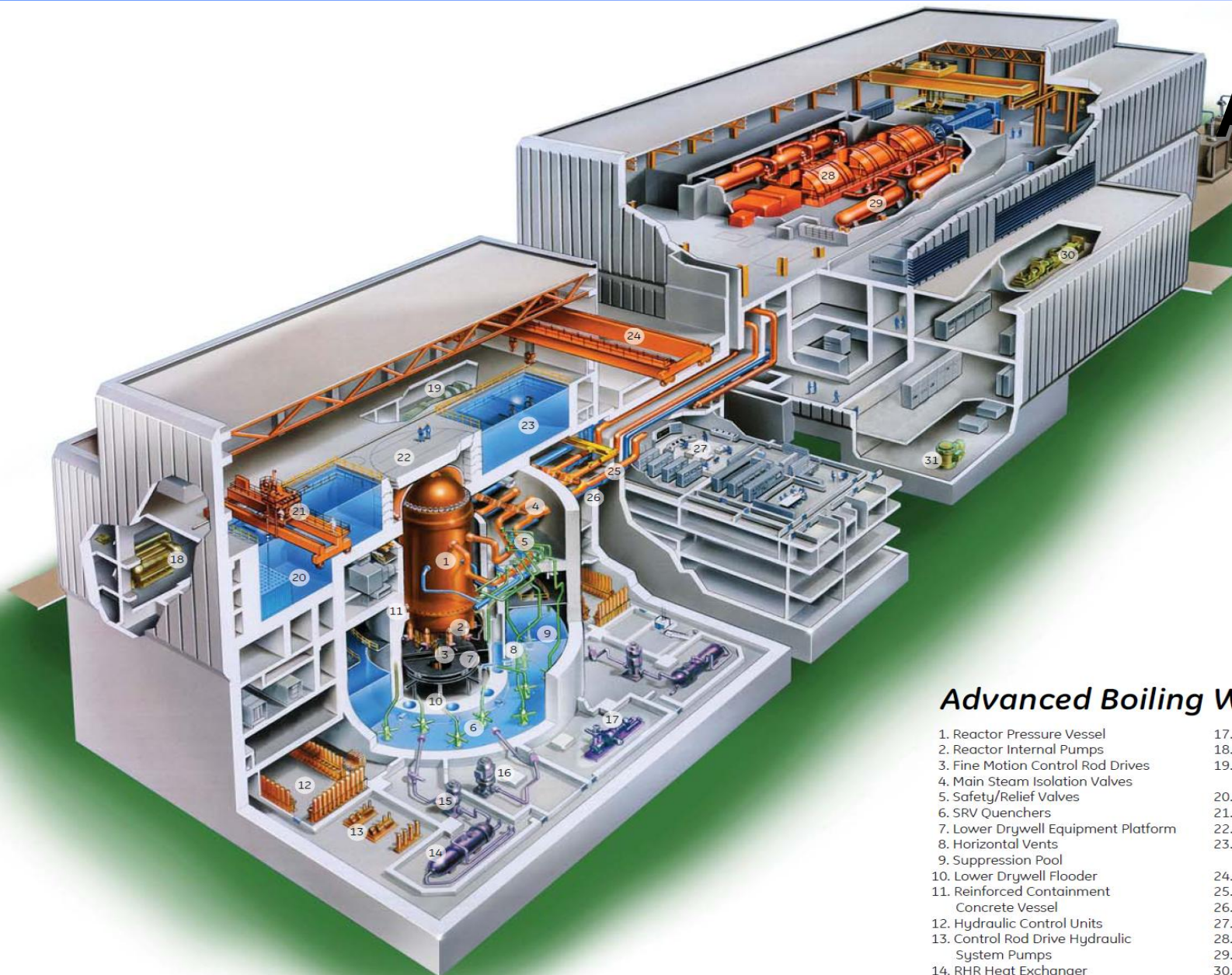


Basen paliwa wypalonego nie jest chroniony.

Podobnie jak w Fukushima Daiichi basen paliwa wypalonego znajduje się nad obudową pierwotną. W razie ciężkiej awarii może to utrudniać dostęp do wypalonego paliwa i jego chłodzenie.

Ani basen wypalonego paliwa ani sam reaktor nie są odpowiednio chronione przed uderzeniem samolotu – lekki dach na obudowie wtórnej nie spełnia wymagań §19 punkt1 i §33 projektu polskiego rozp. RM „projektowego” (wersja z 1 września 2011)

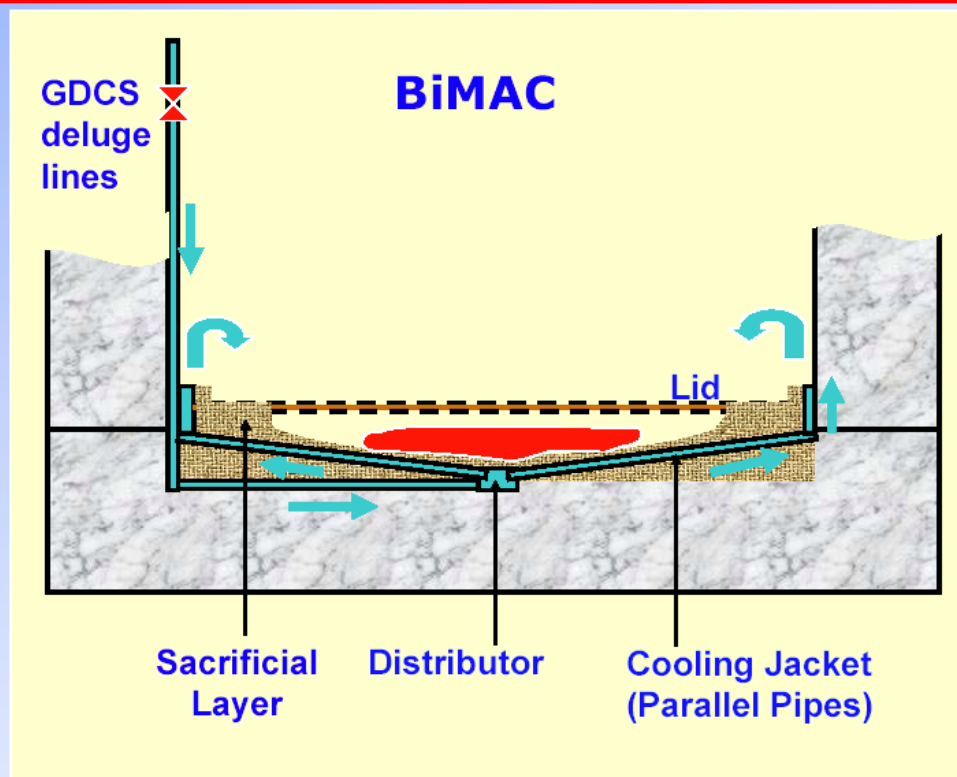
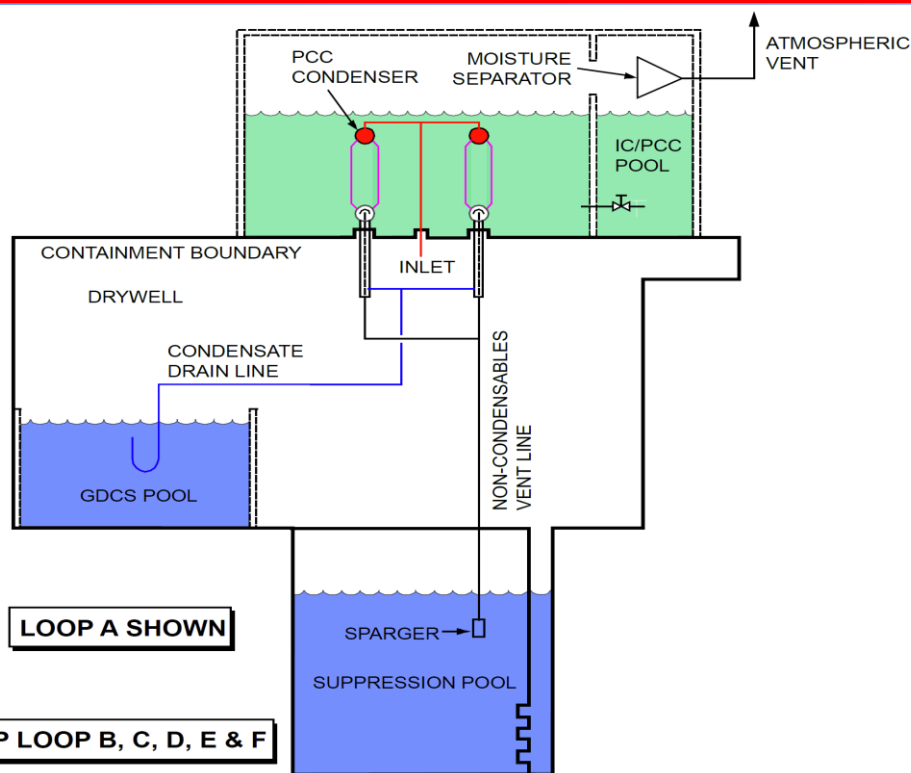
ABWR



Advanced Boiling Water Reactor

- | | |
|--|--|
| 1. Reactor Pressure Vessel | 17. RCIC Steam Turbine and Pump |
| 2. Reactor Internal Pumps | 18. Diesel Generator |
| 3. Fine Motion Control Rod Drives | 19. Standby Gas Treatment Filter and Fans |
| 4. Main Steam Isolation Valves | 20. Spent Fuel Storage Pool |
| 5. Safety/Relief Valves | 21. Refueling Platform |
| 6. SRV Quenchers | 22. Shield Blocks |
| 7. Lower Drywell Equipment Platform | 23. Steam Dryer and Separator Storage Pool |
| 8. Horizontal Vents | 24. Bridge Crane |
| 9. Suppression Pool | 25. Main Steam Lines |
| 10. Lower Drywell Flooder | 26. Feedwater Lines |
| 11. Reinforced Containment Concrete Vessel | 27. Main Control Room |
| 12. Hydraulic Control Units | 28. Turbine Generator |
| 13. Control Rod Drive Hydraulic System Pumps | 29. Moisture Separator Reheater |
| 14. RHR Heat Exchanger | 30. Combustion Turbine Generator |
| 15. RHR Pump | 31. Air Compressor and Dryers |
| 16. HPCF Pump | 32. Switchyard |

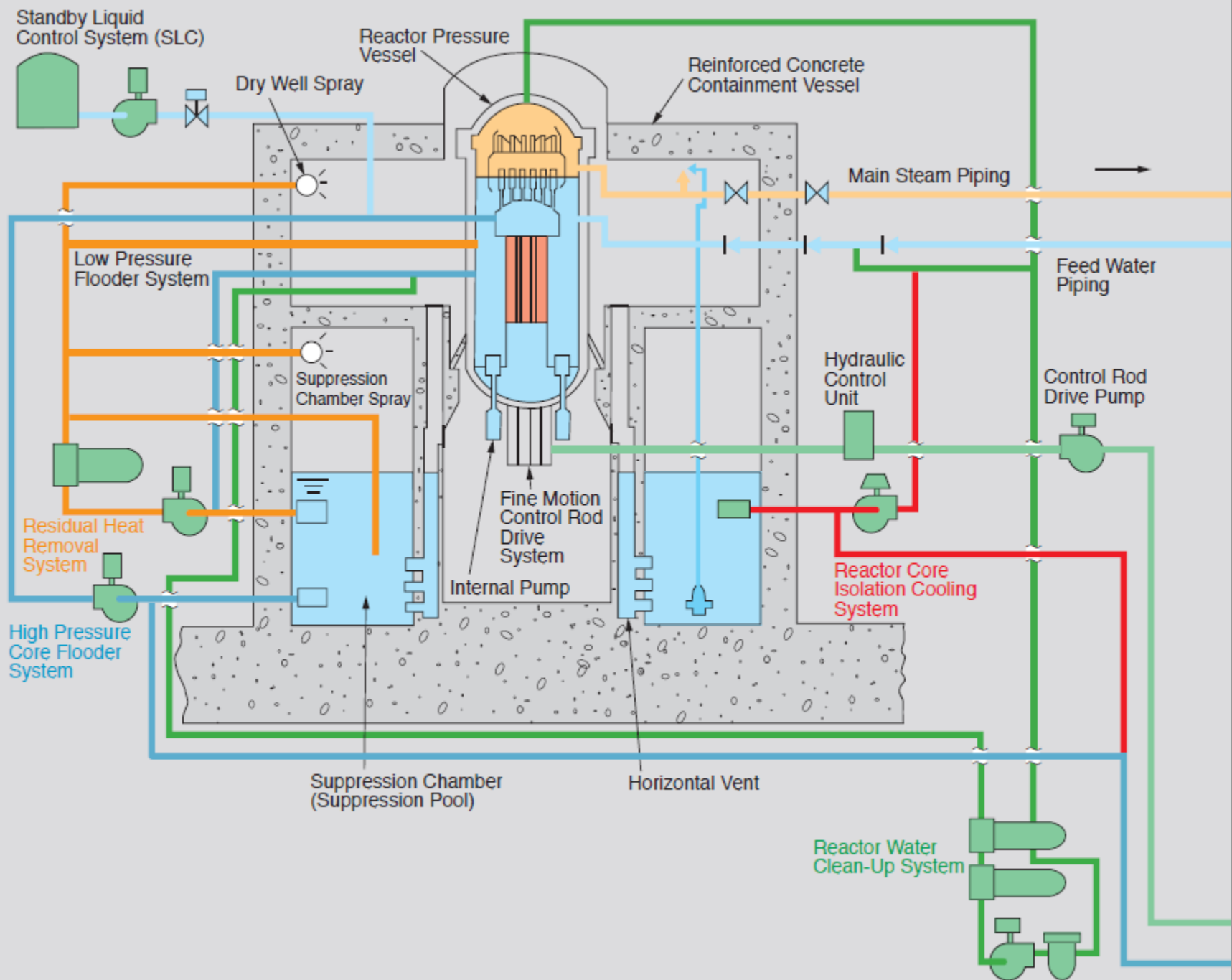
Reaktor ESBWR – wynik długiej ewolucji reaktorów wrzących BWR



- Chłodzenie pasywne poprzez wymienniki ciepła ustawione poza obudową bezpieczeństwa
- Chwytnacz rdzenia z układem chłodzenia
- Bardzo mała częstość ciężkich awarii

Działania w Japonii po awarii w Fukushima

- Po awarii w Fukushima zatrzymano wszystkie reaktory jądrowe i podjęto gruntowną analizę zagrożeń i możliwych zabezpieczeń.
- Wymagania bezpieczeństwa były znacznie zwiększone, wyższe niż w którymkolwiek innym kraju.
- Zmieniono też organizacje i kompetencje dozoru jądrowego.
- Zmiany wprowadzone do EJ omówimy na przykładzie EJ Kashiwazaki Karima z reaktorem BWR



Działania wprowadzone w Japonii

Obrona w głąb		Wnioski z awarii	Środki
Poziom	Cel		
1	Zapobieganie odchyleniom	Niewystarczająca ochrona przed tsunami	Ochrona przed wszelkimi możliwymi zagrożeniami zewnętrznymi (trzęsienie ziemi, tsunami itd.)
2	Ochrona przed rozwojem awarii	Niedostateczna ochrona ważnych dla bezpieczeństwa SEKW przed powodzią	Ochrona przed wszelkimi możliwymi zagrożeniami wewnętrznymi (zalanie wodą, pożar.)
3	Ochrona przed uszkodzeniem rdzenia	Niedostateczne środki wtrysku wody w razie utraty zasilania elektrycznego	Ulepszenie systemu zasilania elektrycznego, wtrysku wody i odbioru ciepła dla zabezpieczenia rdzenia przed uszkodzeniem
4	Powstrzymanie rozwoju awarii	Niedostateczne środki po uszkodzeniu rdzenia	Ulepszenie środków powstrzymania rozwoju awarii

Podniesienie bezpieczeństwa w EJ



③Debris Removal Car

①Fire Truck • ② Heat Exchanger Car
④Gas Turbine Generator Car • ⑤Power Supply Car



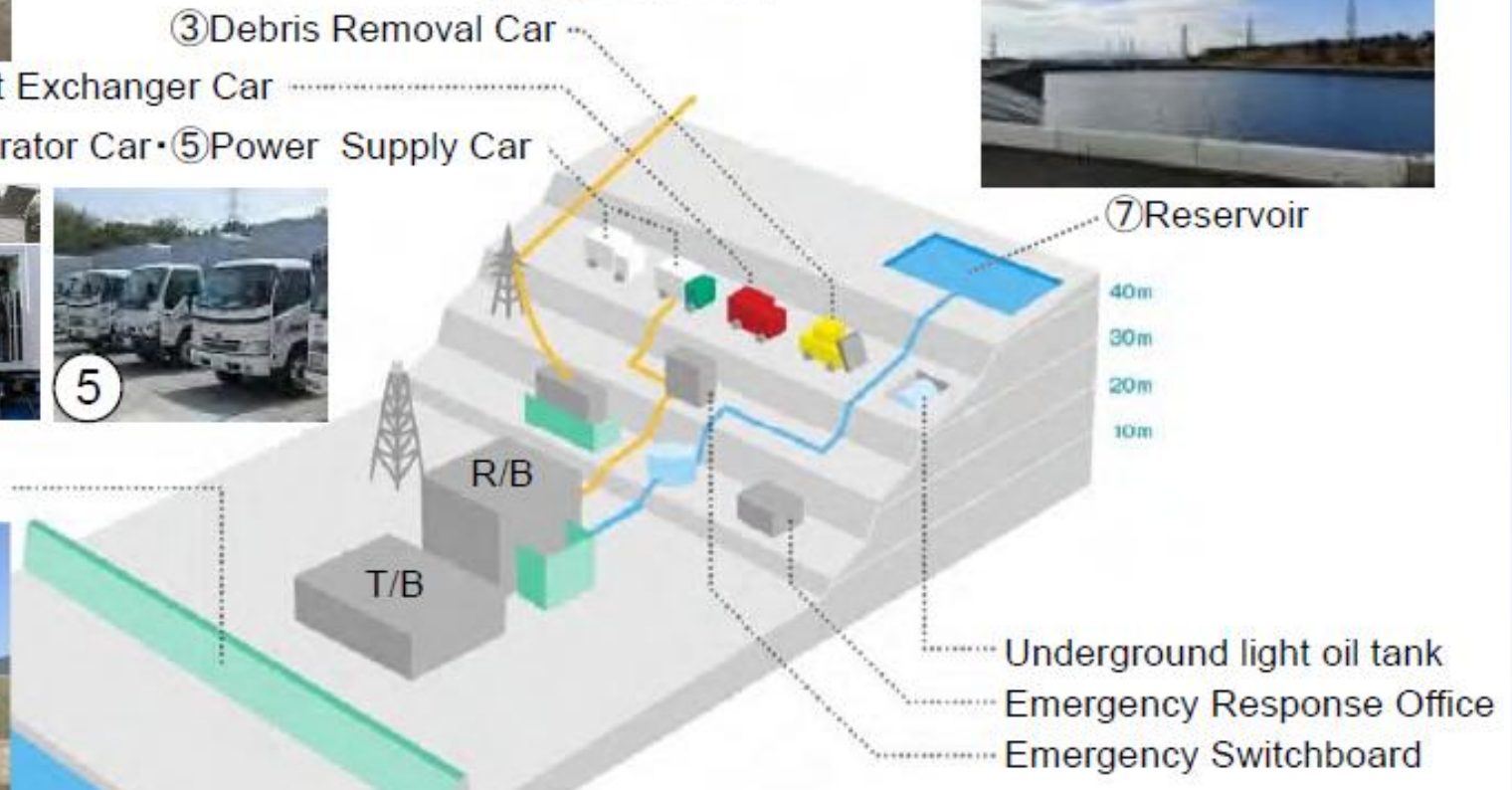
④

⑤

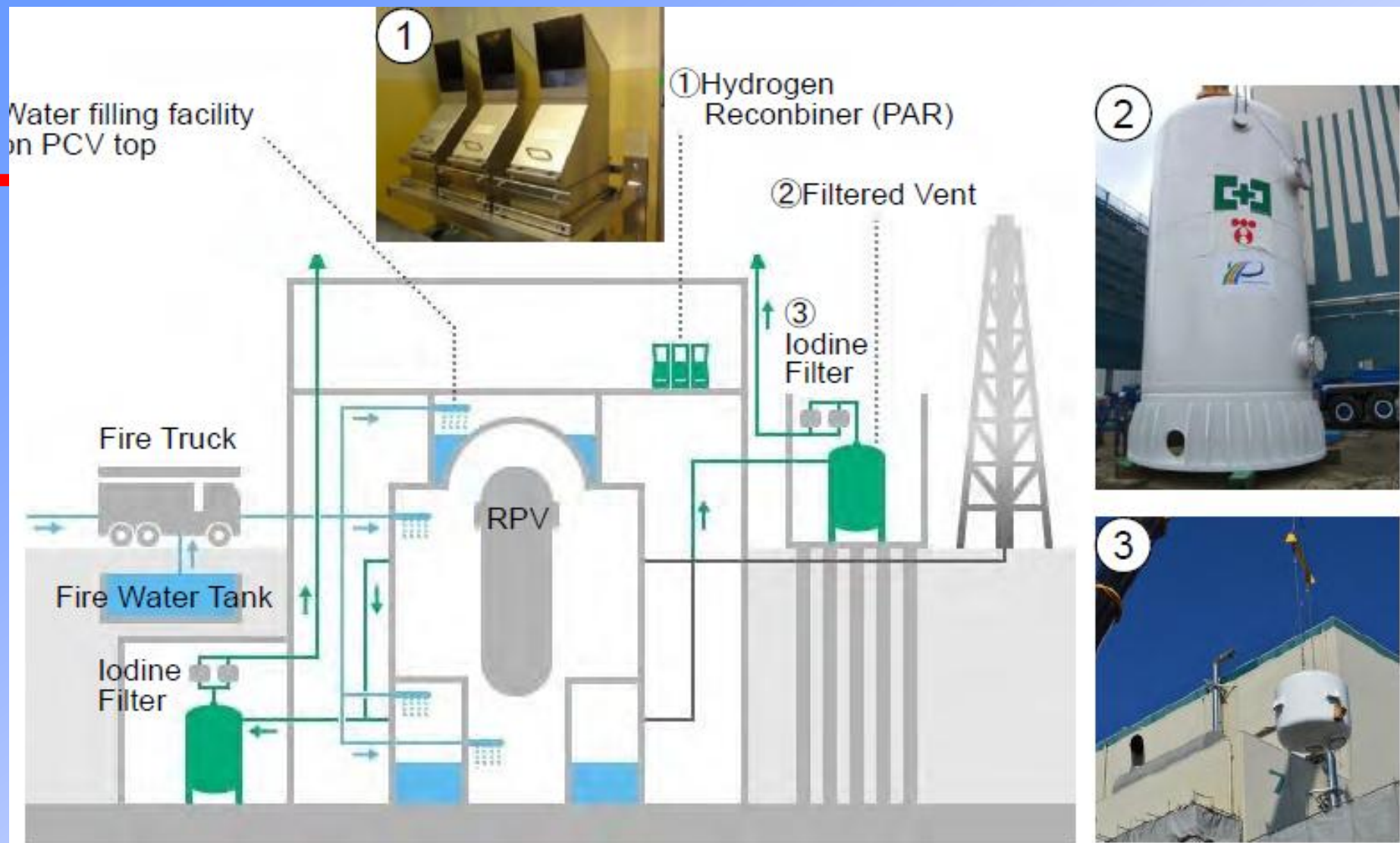
⑥Tsunami Wall



⑥



1.Wóz strażacki, 2. Pojazd z wymiennikiem ciepła, 3. Pojazd do usuwania gruzu, 4. Samochód z generatorem z turbiną gazową, 5. Pojazd z przewoźnym awaryjnym generatorem elektrycznym, 6. Mur ochronny przed tsunami, 7. Zbiornik , 8 Podziemny zbiornik lekkiego oleju, 9. Biuro reagowania awaryjnego, 10, rozdzielnica awaryjna.

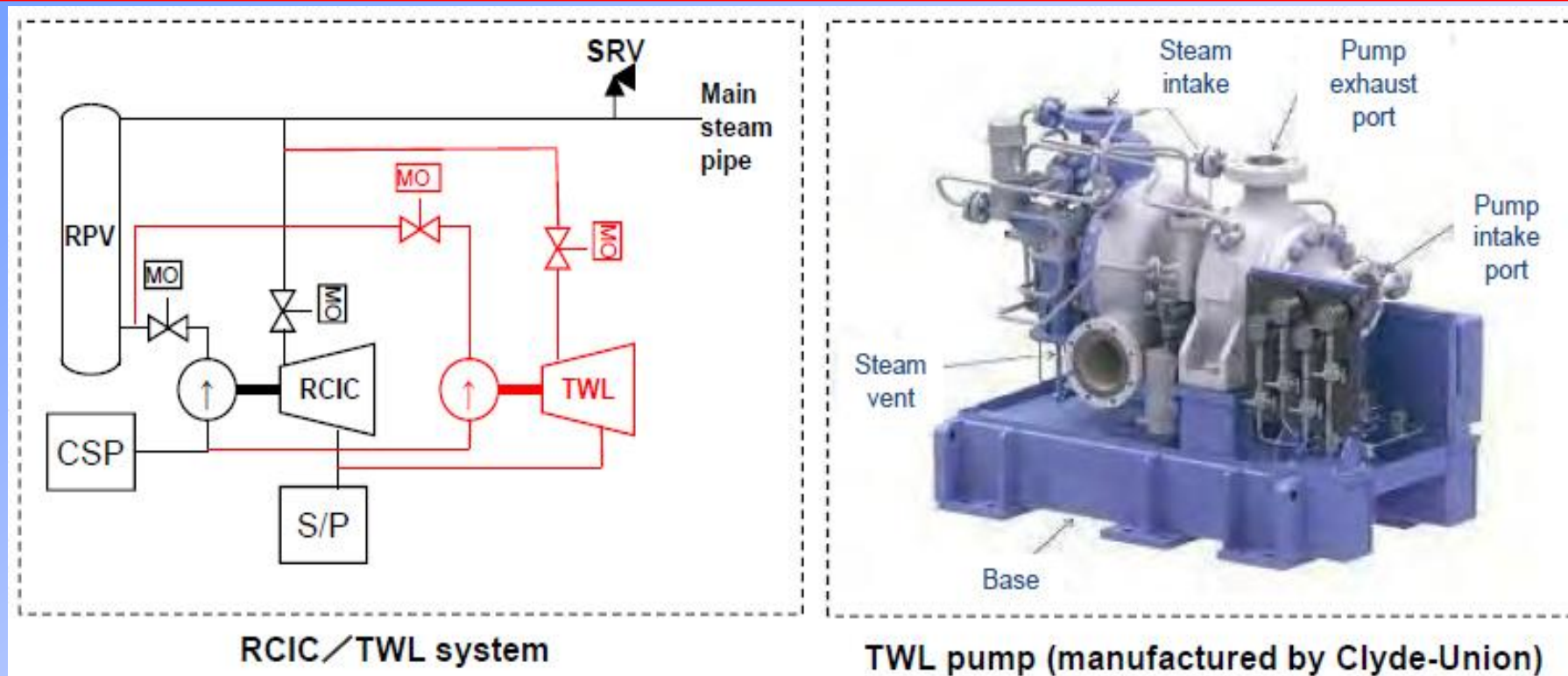


1. Układ pasywnej autokatalitycznej rekombinacji wodoru (PAR), 2 Wentylacja filtrowana, 3. Filtr jodowy, 4. Układ napełniania wodą pierwotnej obudowy bezpieczeństwa (PCV-primary containment vessel), 5. Wóz straży pożarnej, 6. RPV – zbiornik ciśnieniowy reaktora, 7. Zbiornik wody pożarowej, 8 filtr jodowy.

Mur chroniący przed tsunami

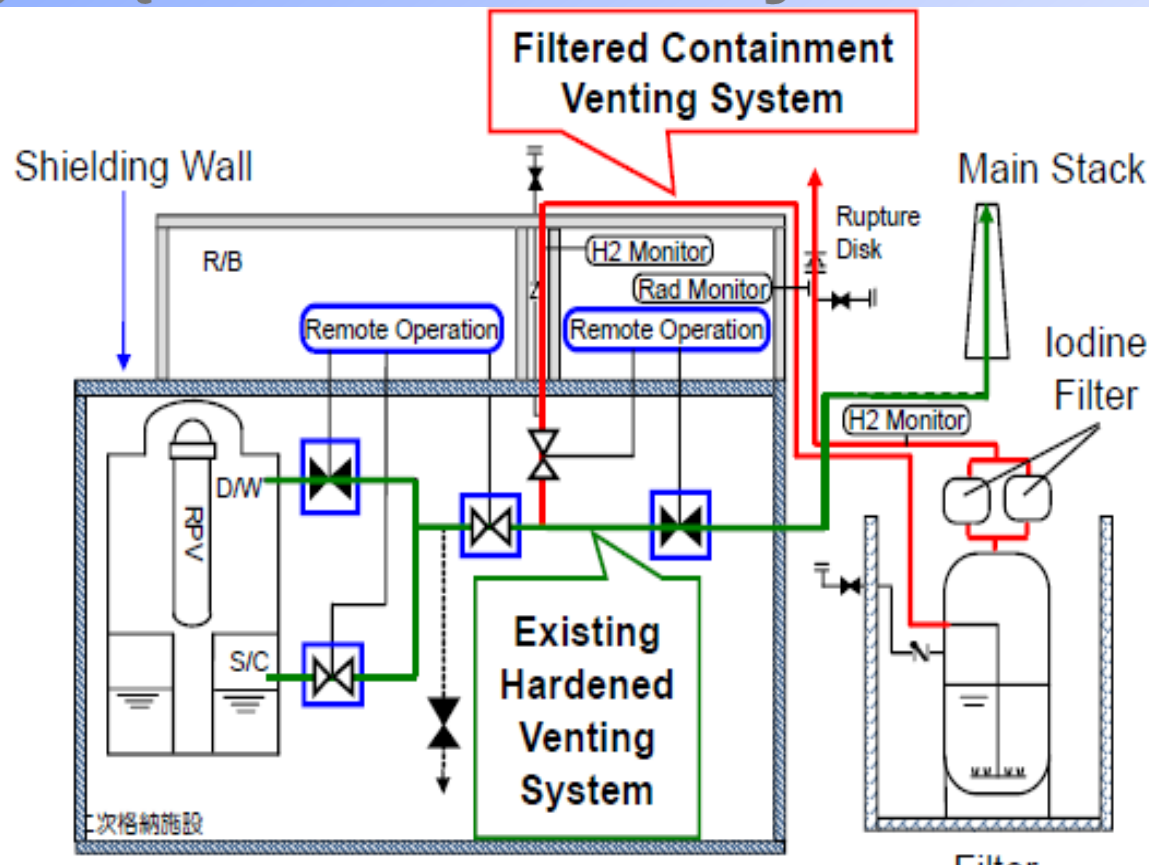
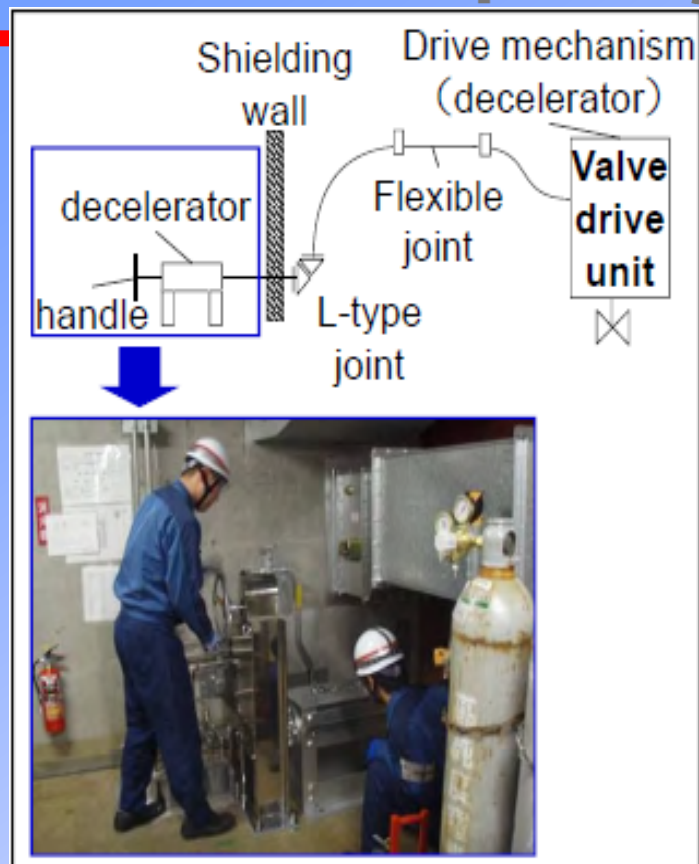


Pompa z napędem parowym, turbinowym jako alternatywa wobec układu wtrysku wody pod wysokim ciśnieniem



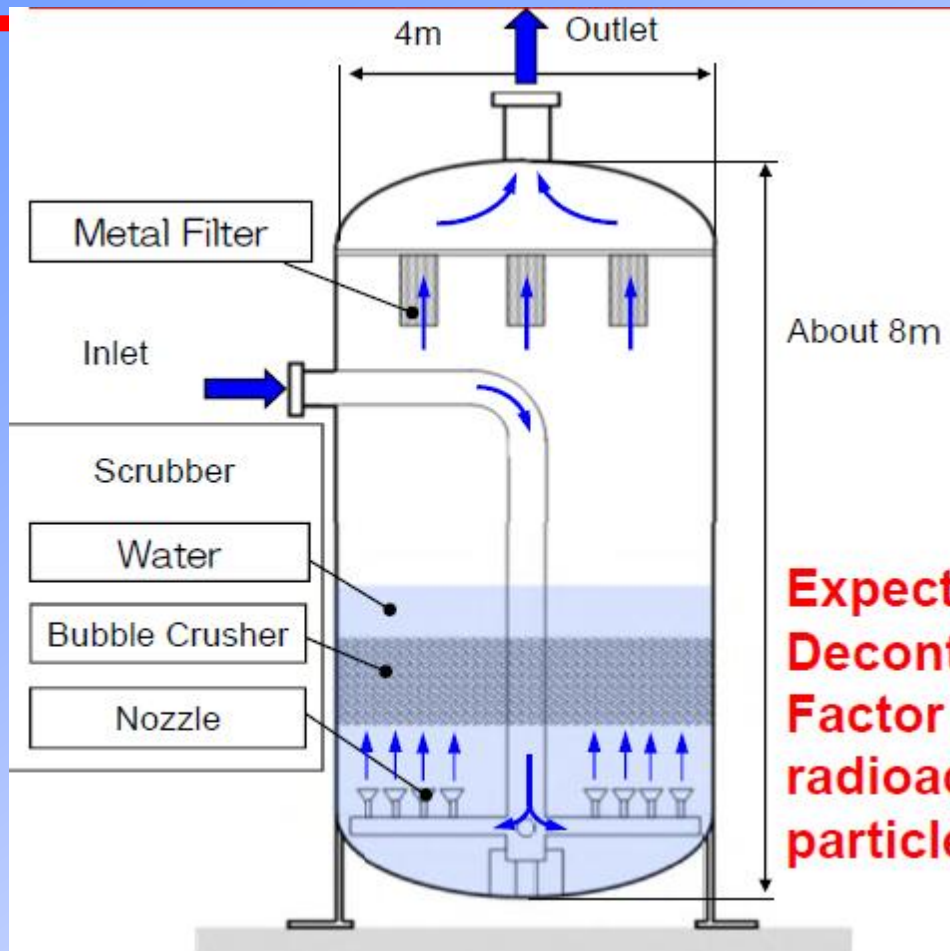
SRV –steam relief valve – zawór nadmiarowy pary RPV – zbiornik ciśnieniowy reaktora, CSP – pompa wody zasilającej RCIC -Układ chłodzenia rdzenia w trybie izolacji, main steam pipe – główny rurociąg parowy Steam intake –wlot pary, pump exhaust port – króciec wylotowy pompy, Pump intake port – króciec wlotowy pompy, steam vent – wentyl parowy, base – podstawa

Wylot gazów ze szczytu budynku reaktora, manipulacje ręczne zza osłony



1, Sciana osłonowa, 2, Mechanizm napędowy reduktora 3. Zespół napędu zaworu, 4. Rączka reduktora 5. Złącze elastyczne, 6. Złącze typu L **Układ filtrowanej wentylacji obudowy**, 1. Sciana osłonowa, 2. Komin wentylacyjny, R/B budynek reaktora, Sterowanie zdalne, Monitor stężenia wodoru, Monitor promieniowania, Membrana rozrywana, Filtr jodowy, Monitor stężenia H₂, Wzmocniony istniejący system wentylacji.

Struktura płuczki do dekontaminacji gazów

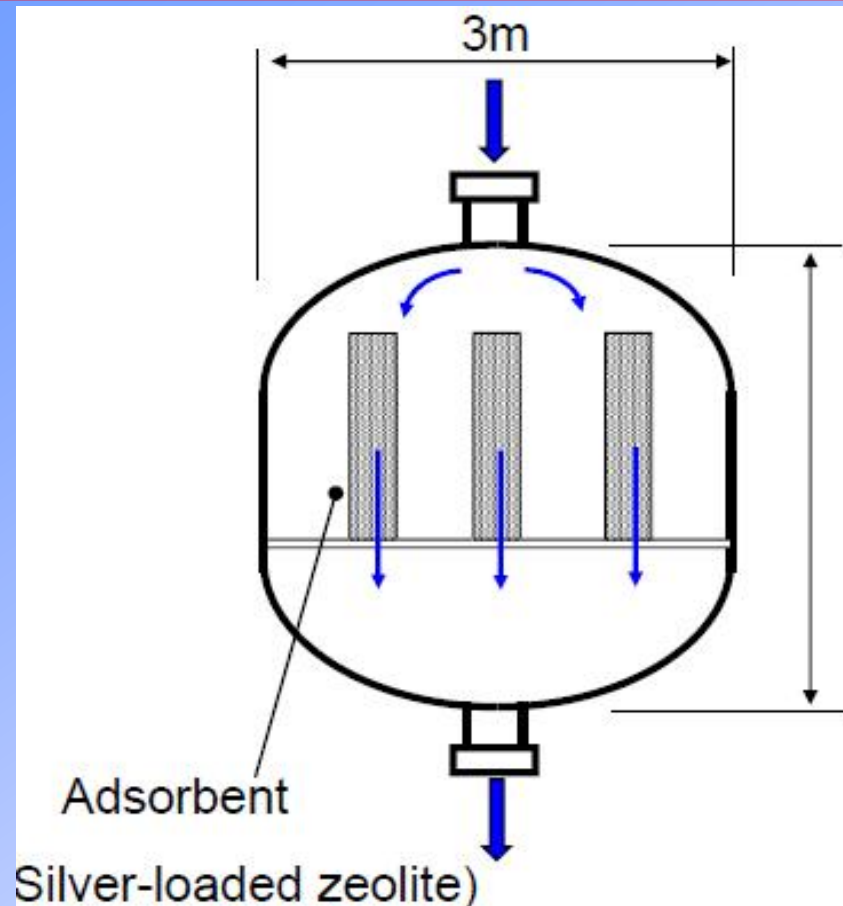


**Expected
Decontamination
Factor for
radioactive
particle is 1,000**



Wylot, Filtr metalowy, , wlot, płuczka, woda, rozdrabniacz pęcherzyków, dysze,
Oczekiwany współczynnik dekontaminacji cząstek radioaktywnych 1000

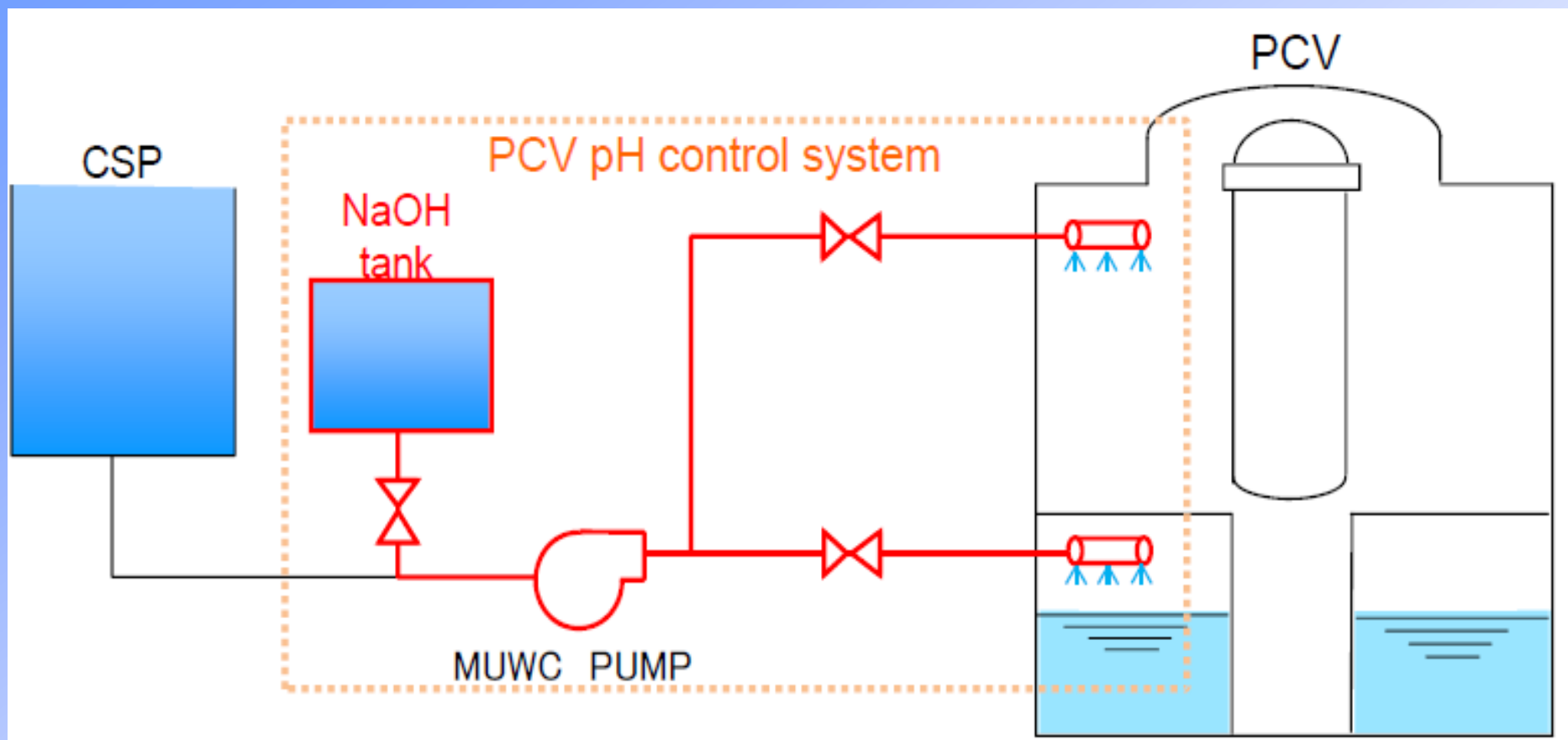
Konstrukcja filtra jodowego.



Expected DF for gaseous iodine (organic iodine) is 50

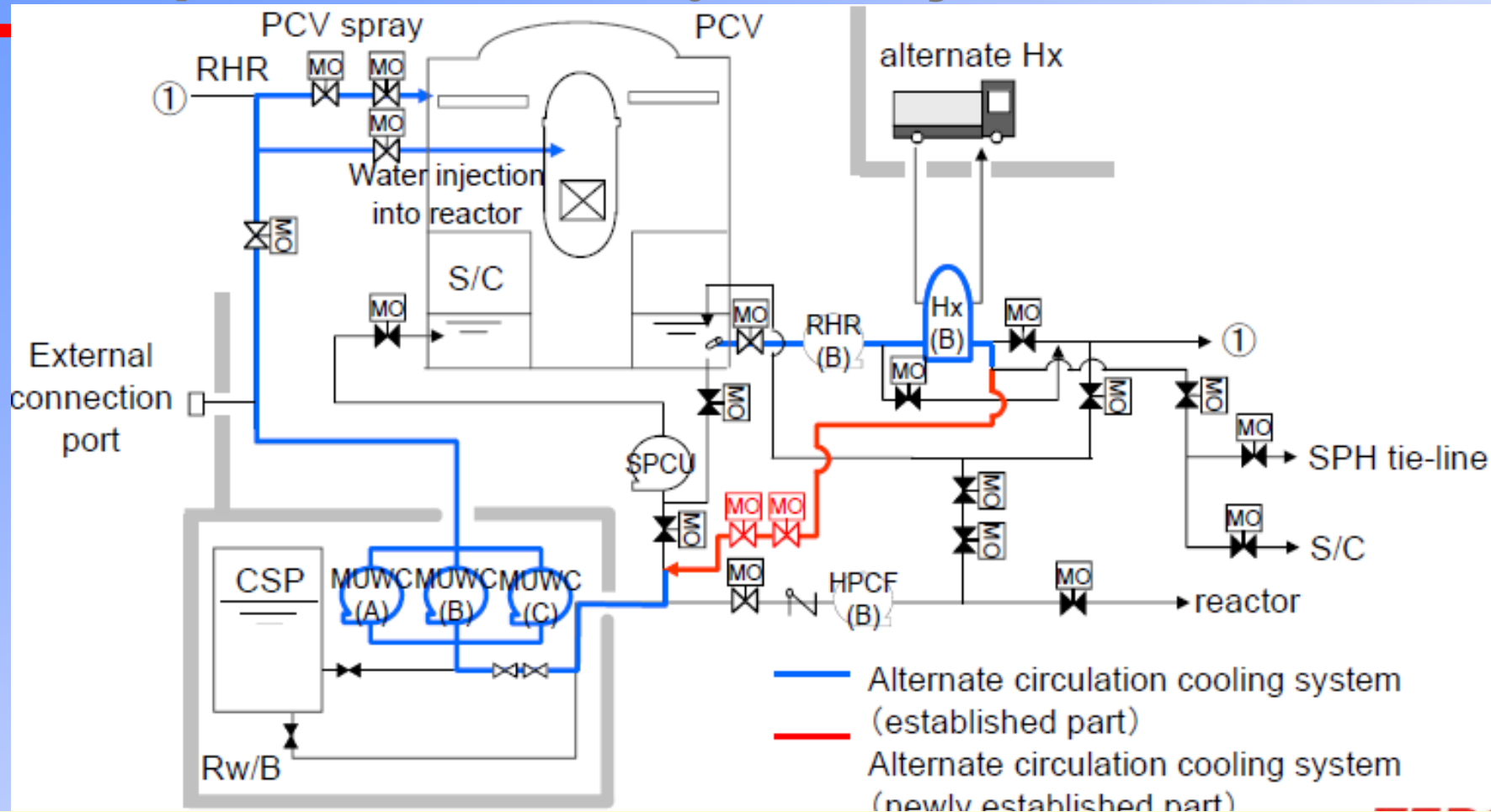
Adsorbent zeolitowy z domieszką srebra. Oczekiwany współczynnik DF dla jodu w postaci gazowej wynosi 50

Ilość wydzielonego jodu zmniejsza się przez utrzymywania zasadowości wody $\text{pH} > 7$



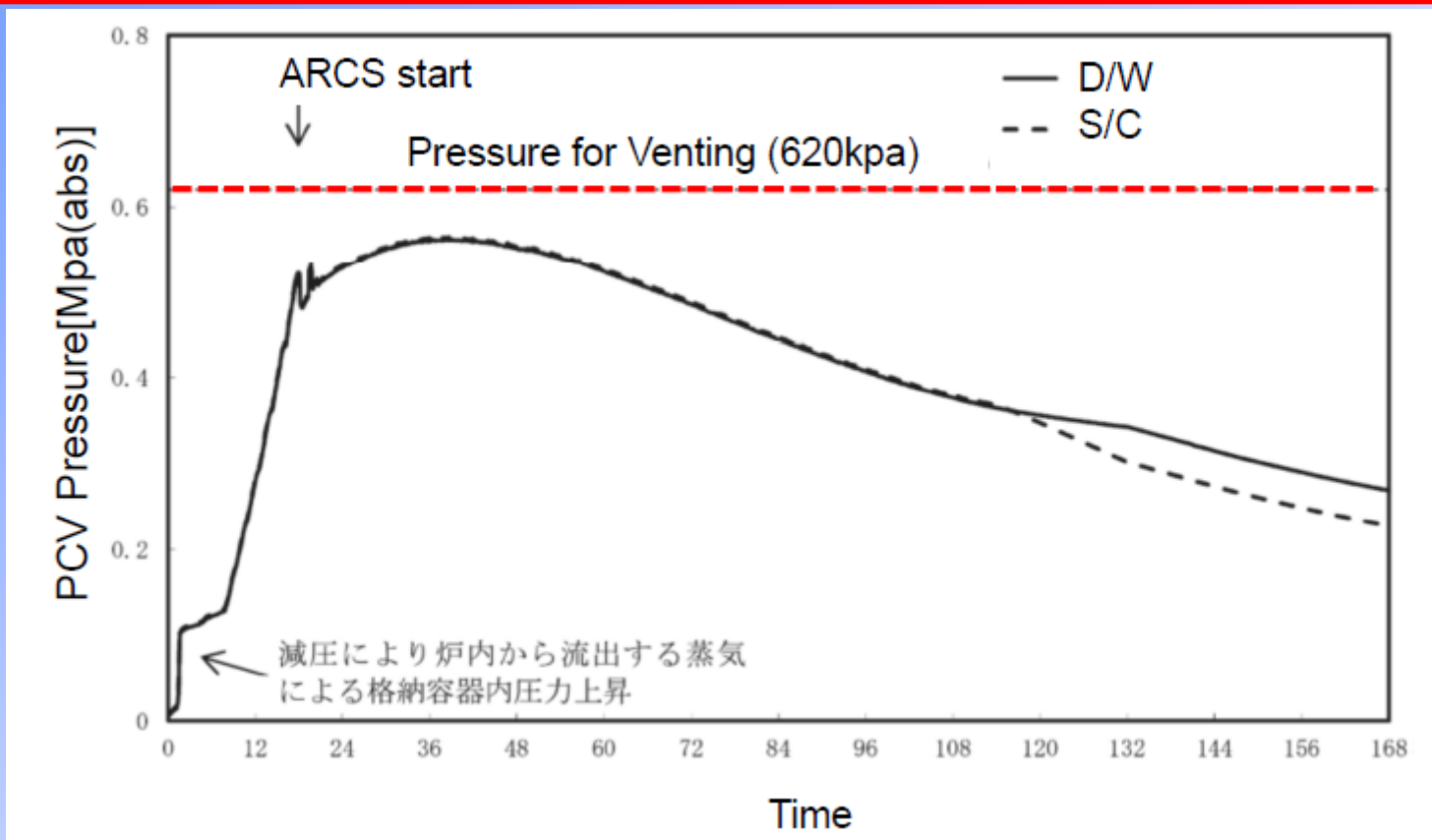
CSP – condensate system pump – pompa układu kondensatu
MUWC – pompa układu uzupełniania wody w skraplaczach

Alternatywny układ chłodzenia obudowy pozwalający uniknąć wentylowania PCV



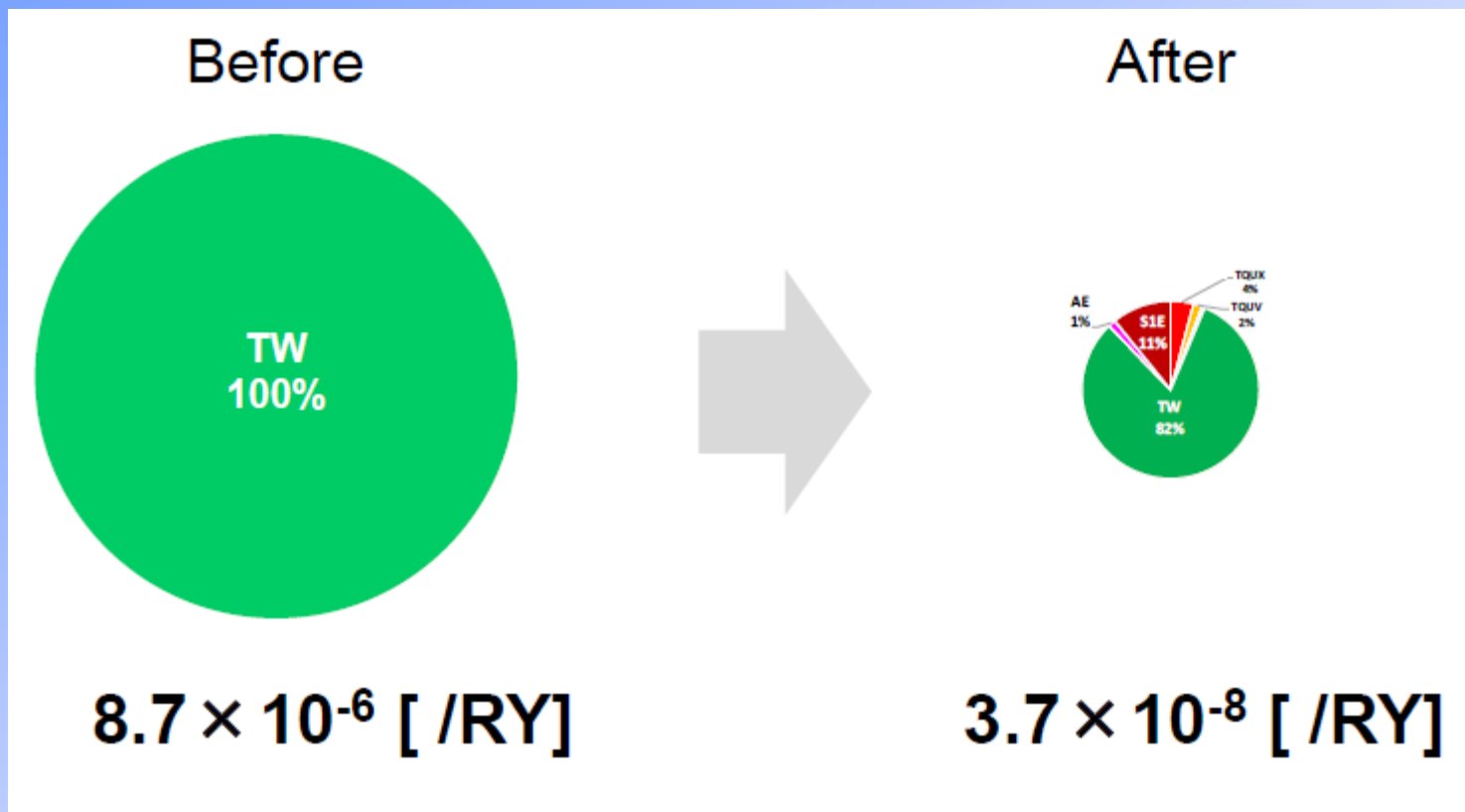
Alternatywny wymiennik ciepła, PCV – pierwotna obudowa bezpieczeństwa, zraszanie obudowy pierwotnej, wtrysk wody do reaktora, RHR odbiór ciepła powyłączeniowego, HX wymiennik ciepła, SPCU - Suppression Pool Cleanup System układ oczyszczania pojemnika tłumienia ciśnienia, SPH SP – suppression pool

Skutek działania alternatywnego systemu odbioru ciepła ACRS



Ciśnienie w pierwotnej obudowie bezpieczeństwa, MPa, abs. Czas, godzin
Ciśnienie otwarcia wentylacji, 820 kpa, początek działania ARCS,

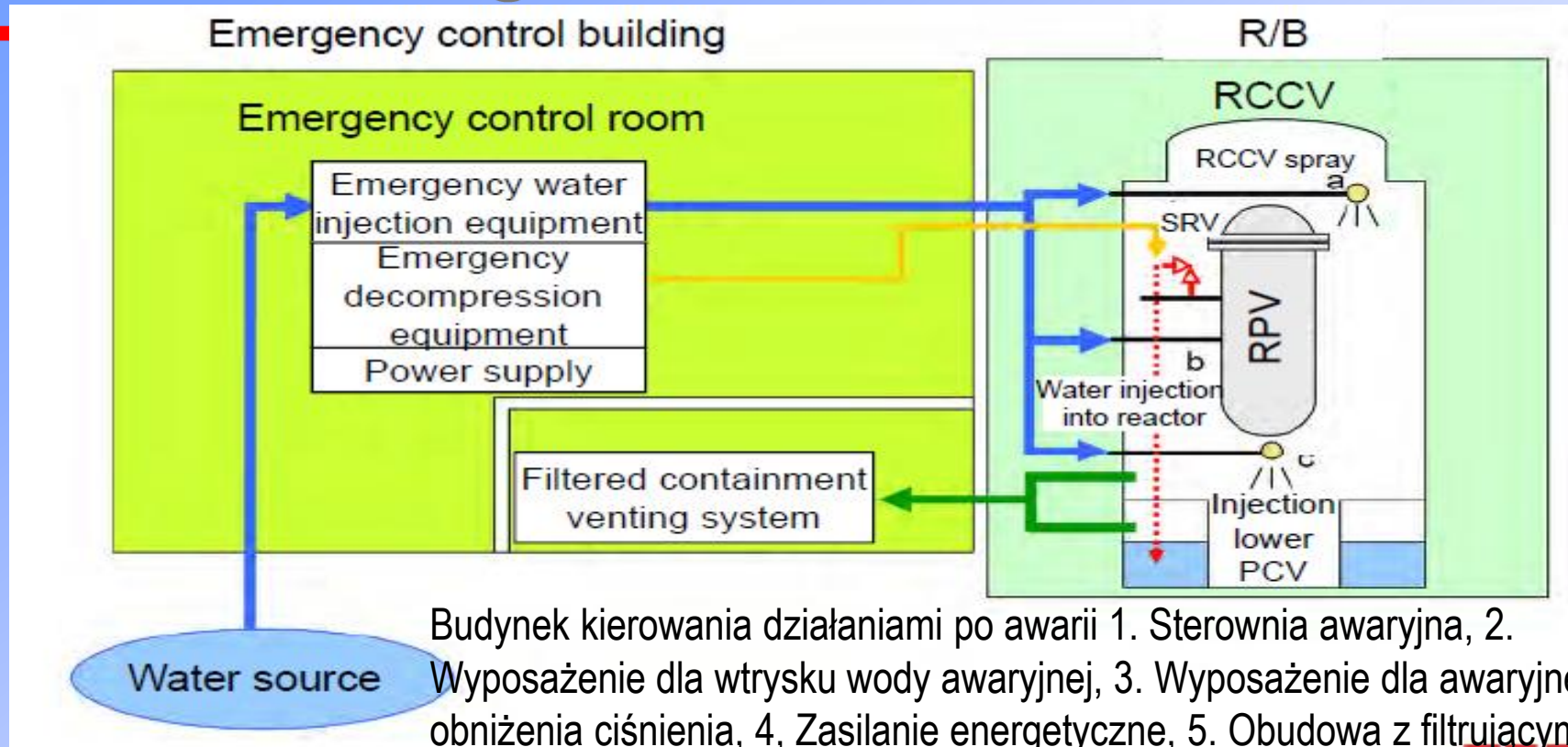
Wpływ modyfikacji na prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia przy pracy EJ



Przed modyfikacjami

Po modyfikacjach

Środki zapobiegające zniszczeniu w razie celowego uderzenia samolotu



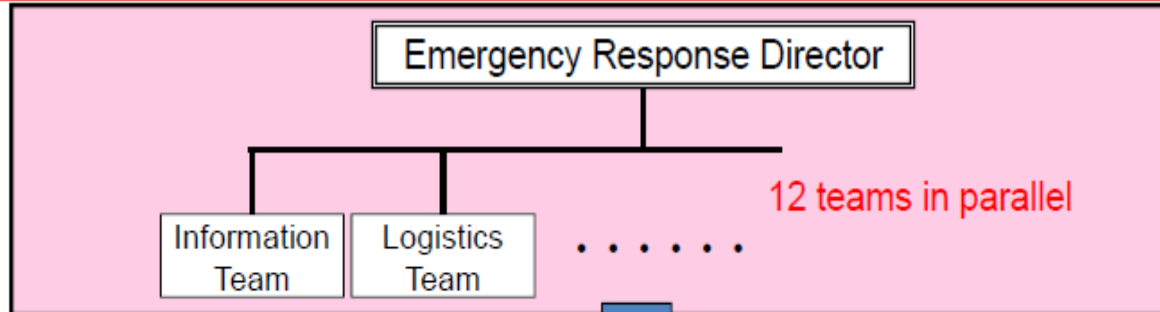
Budynek kierowania działaniami po awarii 1. Sterownia awaryjna, 2. Wyposażenie dla wtrysku wody awaryjnej, 3. Wyposażenie dla awaryjnego obniżenia ciśnienia, 4, Zasilanie energetyczne, 5. Obudowa z filtrującym układem wentylacji , 6. Źródło wody chłodzącej

Budynek reaktora, 1. RCCV - Reinforced Concrete Containment Vessel – wzmocniona obudowa betonowa, Spray zraszanie RCCV, SRV – safety relief valve, zawór odpuszczający bezpieczeństwa, RPV zbiornik ciśnieniowy reaktora, wtrysk wody do reaktora, Wtrysk do dolnej części pierwotnej obudowy bezpieczeństwa,

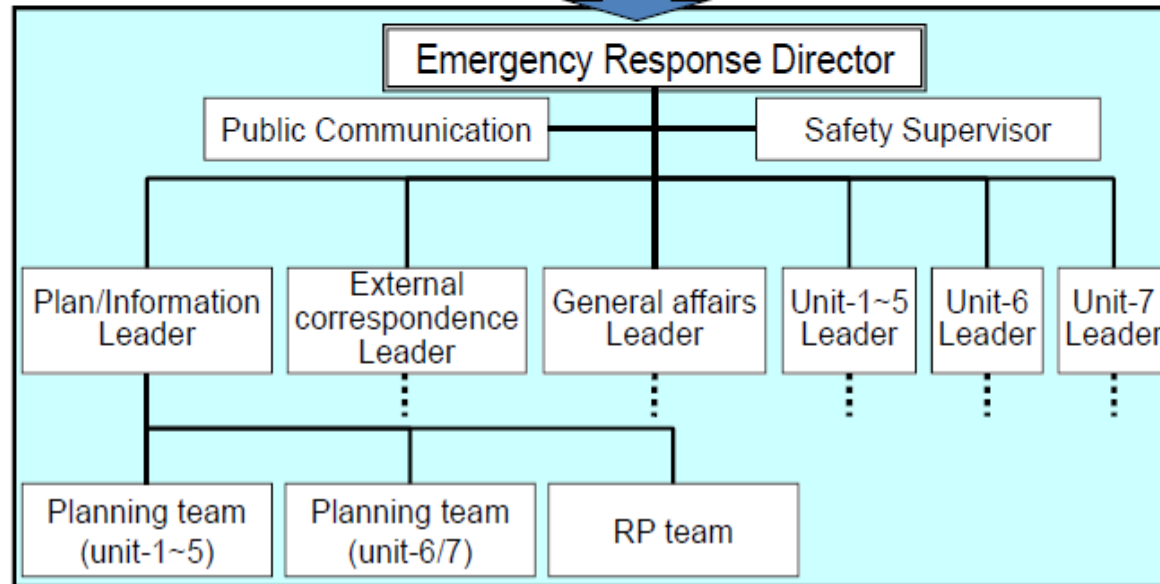
Zmiany w organizacji zespołu reagowania awaryjnego

Reform of Emergency Response Organization

Before



After (ICS)



Dawniej: Dyrektor zespołu reagowania awaryjnego, 2. Zespół informacyjny, Zespół logistyczny 3. 12 równoległych zespołów.

Obecnie: Dyrektor zespołu reagowania awaryjnego, 2. Komunikacja ze społeczeństwem, 3. Nadzór nad bezpieczeństwem 4. kierownik planowania i informacji, 5. Kierownik komunikacji zewnętrznej 6. Kierownik ds. ogólnych, 7. Kierownik zespołu 1-5, itd. 8. Zespół planowania 1-5, 6-7

Podsumowanie

W analizach ciężkich awarii analizuje się wszystkie, nawet pozornie najbardziej nieprawdopodobne kombinacje uszkodzeń i błędów człowieka, a przede wszystkim możliwości uszkodzeń wielu elementów z powodu wspólnej przyczyny.

W konsekwencji dochodzimy do scenariuszy ze stopieniem rdzenia i towarzyszącymi mu poważnymi następstwami. Stopień rdzenia nie oznacza jednak wydzielenia produktów rozszczepienia poza elektrownię.

Tajemnica sukcesu - skuteczność obudowy bezpieczeństwa

Przepisy UDJ: częstotliwość dużych uwolnień z obudowy winna być co najmniej 10 razy mniejsza niż częstotliwość stopienia rdzenia.

Nowoczesne EJ dysponują już układami zapewniającymi, że nawet po ciężkiej awarii produkty rozszczepienia pozostaną wewnątrz obudowy.

Nowe EJ: skutki awarii praktycznie nie wykraczają poza teren EJ.