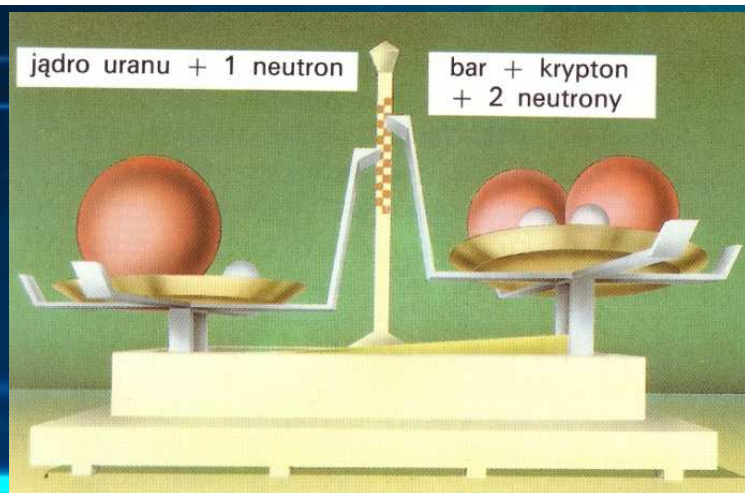
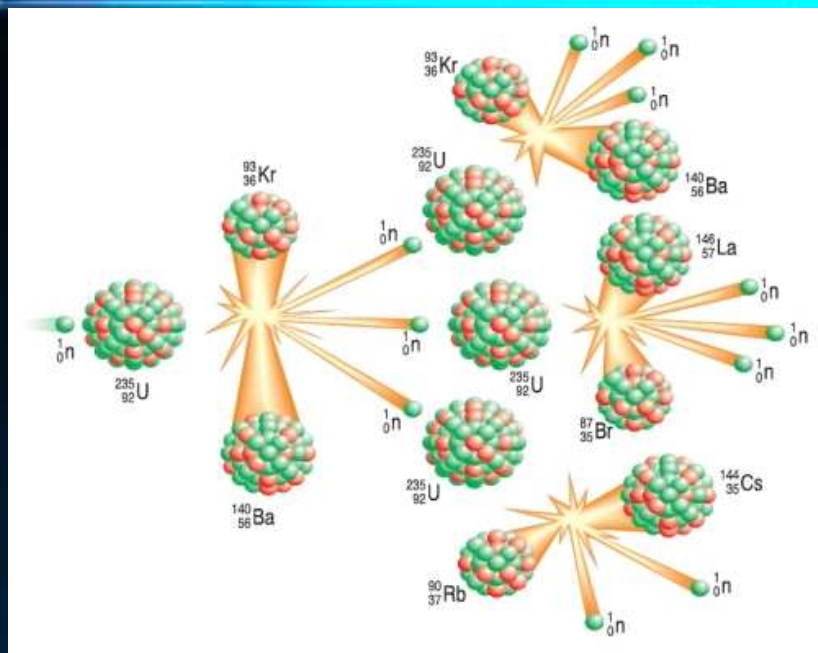


Bezpieczeństwo energetyki jądrowej

**Tak dla Atomu w Choczewie
Choczewo, 24 kwietnia 2012 r.**

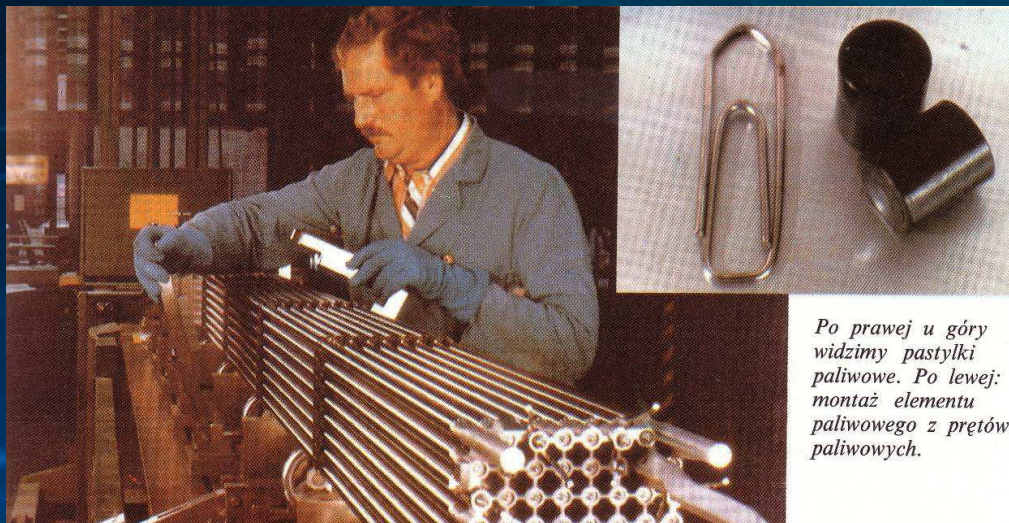
**mgr inż. Władysław Kiełbasa
Państwowa Agencja Atomistyki, ekspert MAEA i KE**

Jak działa elektrownia jądrowa – kontrolowana łańcuchowa reakcja rozszczepienia jąder ciężkich izotopów



- Masa produktów reakcji rozszczepienia jest mniejsza niż masa substratów:
 $\Delta m = m_s - m_p$
- „Brakująca” część masy (Δm) zamienia się na energię zgodnie ze wzorem Einsteina: $E = m \cdot c^2$
- Średnia energia wydzielana przy rozszczepieniu jądra U235:
 $E = \Delta m \cdot c^2 = 207 \text{ MeV}$
- Energia rozszczepienia U235 jest **ok. 50 mln razy większa** od energii spalania węgla → duża koncentracja energii w paliwie i reaktorze jądrowym
- Ogromną większość energii reakcji rozszczepienia można odebrać **w postaci ciepła** – wydzielającego się w paliwie jądrowym

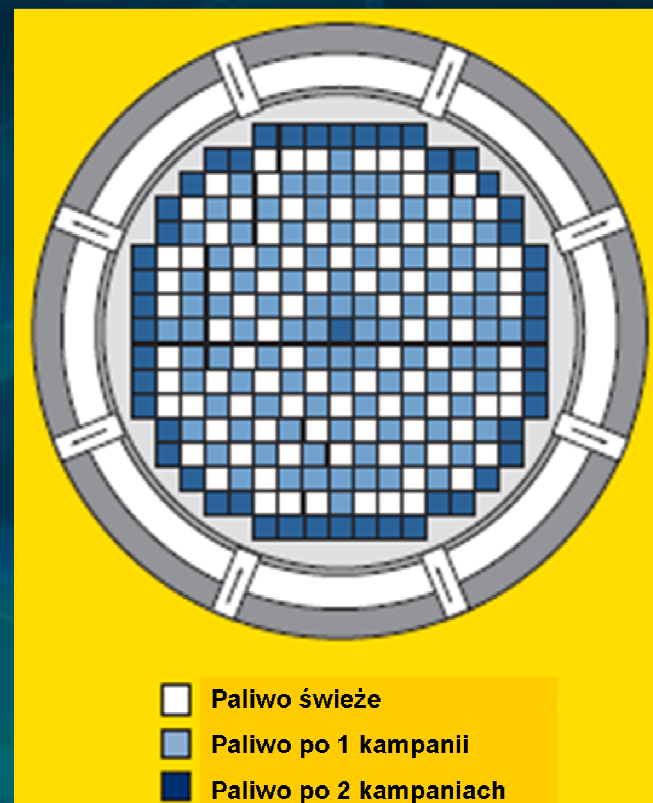
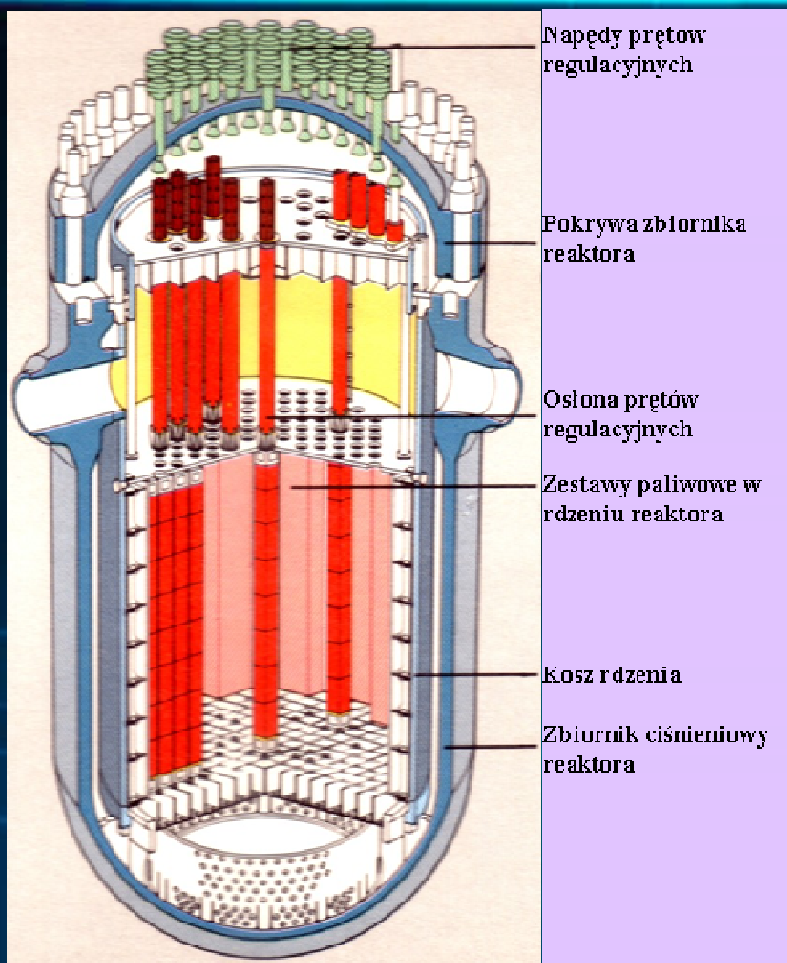
Jak działa elektrownia jądrowa – paliwo jądrowe



Po prawej u góry widzimy pastylki paliwowe. Po lewej: montaż elementu paliwowego z prętów paliwowych.

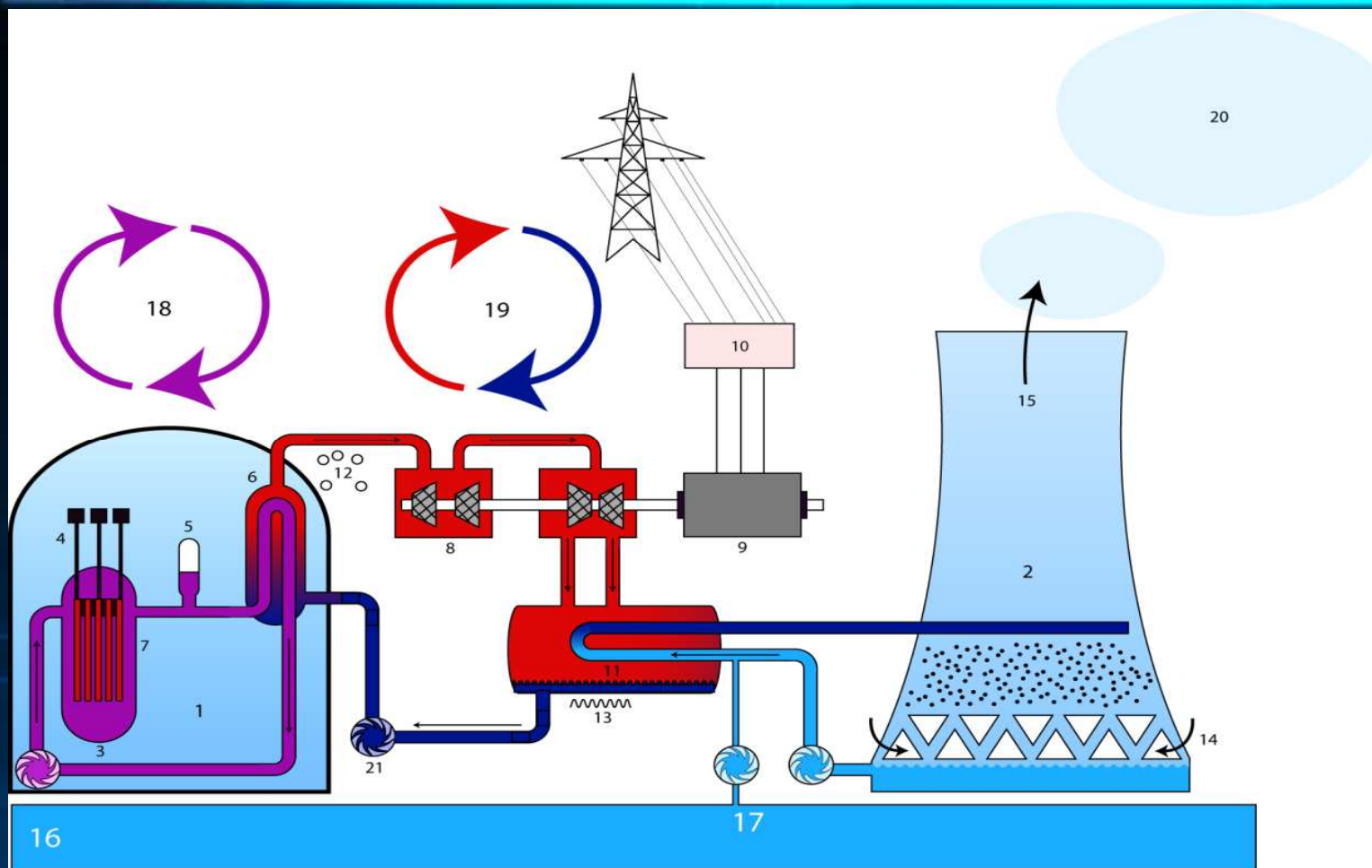
- **Pastyłki paliwowe:** spiek ceramiczny UO_2 lub UO_2+PuO_2 (MOX)
- **Wzbogacenie:** UO_2 - 2÷5% $U235$, MOX – ok. 7% Pu
- **Element (pręt) paliwowy:** rurka ze stopu **cyrkonowego** (Zr) wypełniona pastylkami paliwowymi i zaślepiona
- **Zestaw paliwowy (kasetta paliwowa):** 200-300 elementów paliwowych
- >20 pustych rurek w zastawach paliwowych (reaktorów wodno-ciśnieniowych PWR) do wprowadzenia **prętów regulacyjnych i bezpieczeństwa**
- **Moc reaktora reguluje się** za pomocą prętów regulacyjnych z materiału pochłaniającego neutrony

Jak działa elektrownia jądrowa – energetyczny reaktor jądrowy (wodno-ciśnieniowy: PWR)



- Do reaktora załadowuje się ~150 do >200 zestawów paliwowych → **rdzeń reaktora**: miejsce gdzie zachodzą reakcje jądrowe
- Prawdopodobieństwo zajścia rozszczepienia jest znacznie większe gdy neutrony są spowolnione → **spowalniaczem (moderatorem)** neutronów jest zwykła („lekka”) woda, będąca jednocześnie **chłodziwem**

Jak działa elektrownia jądrowa – zasada działania jądrowego bloku energetycznego z reaktorem wodno-ciśnieniowym (PWR)

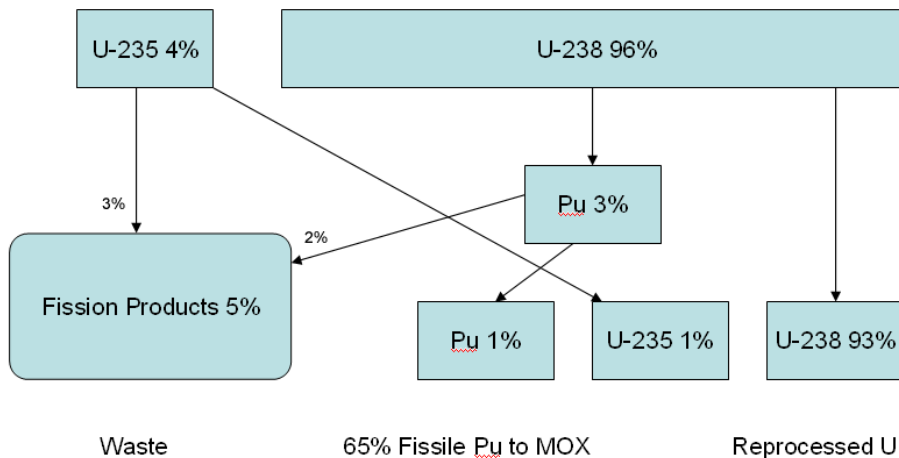


1. Jądrowy układ wytwarzania pary w obudowie bezpieczeństwa
2. Chłodnia kominowa
3. Reaktor
4. Pręty regulacyjne
5. Stabilizator ciśnienia
6. Wytwornice pary
7. Rdzeń reaktora
8. Turbina parowa
9. Generator
10. Transformator blokowy
11. Skraplacz
12. Para świeża
13. Skropliny
14. Powietrze,
15. Wilgotne powietrze
16. Rzeka lub jezioro
17. Uzupełnianie strat bezzwrotnych
18. Obieg pierwotny
19. Obieg wtórny
20. Para wodna
21. Pompa wody zasilającej

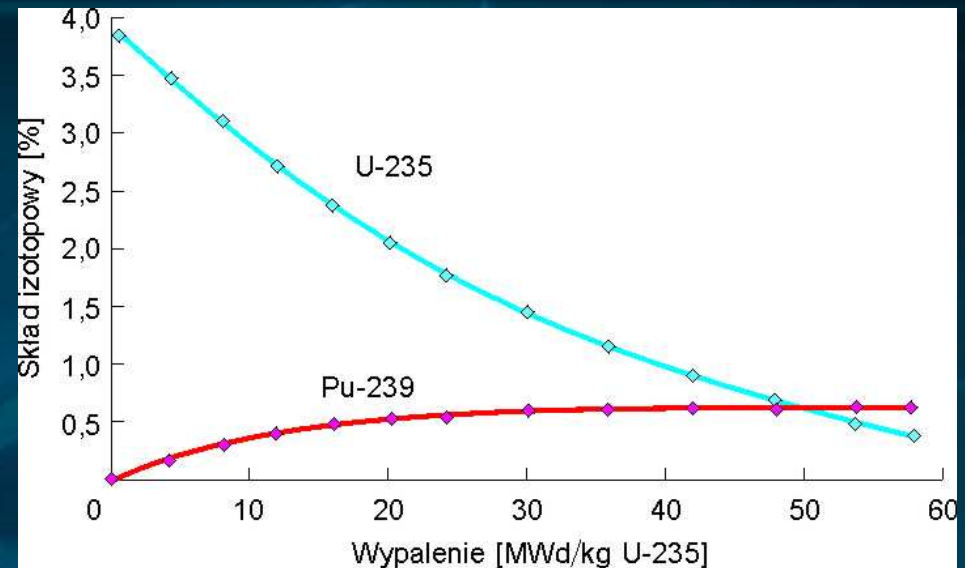
- 3 zasadnicze obiegi technologiczne: **pierwotny (18)**, **wtórny (19)**, **wody chłodzącej**
- Wytwarzana **para nasycona sucha**: $p=6\div 7$ MPa
- **Moce elektryczne** współczesnych bloków: $1100\div 1600$ MWe

Jak działa elektrownia jądrowa – wypalanie paliwa jądrowego

Reaction in standard UO_2 fuel:



Basis: 45,000 MWd/t burn-up, ignores minor actinides
Source: Cogema



- Podczas wypalania w paliwie jądrowym gromadzą się **produkty rozszczepienia** oraz **ciężkie izotopy** (transuranowce)
 - w tym **rozszczepialne** izotopy **Pu239** i **Pu241** → z U238
- Izotopy te są w ogromnej większości **promieniotwórcze** → napromieniowane neutronami paliwo jądrowe jest:
 - **Silnie radioaktywne**
 - Na skutek rozpadów promieniotwórczych w paliwie jądrowym **wytwarza się ciepło**, także po wyłączeniu reaktora → „**ciepło powyłaczeniowe**”

Jaskiniowcy debatuja o ogniu...

Ja myśleć ogień dobry. Ogień robić światło, robić ciepło, odpędzać złe zwierzęta w noc. Ogień robić jedzenie smakować i nie robić choroba.

Ogień robić dym. Dym robić kaszel, czuć źle. Oczy boleć. Dym nie dobry. Ogień bardzo zły. Co jeśli dzieci chorować?

OGIEŃ ZŁY! Moja widzieć ogień i ogień piękny, więc wziąć ogień i ręka boleć!

Kiedys światło z burzy uderzyć krzaki i zrobić ogień. Ogień być wszędzie! Co jeśli ogień uciec?

Ogień oznaczać kłopoty. Po co ogień? Słońce dawać światło, słońce nie boleć. Ogień ryzyko!

Ja nie wiedzieć, jak działać ogień. My mało sprytne żeby władać ogień

Tak, dotknąć ogień auć auć!
OGIEŃ ZŁY!!

Ogień robić popiół. Co my zrobić z tym popiół? Zostawić dla dzieci? Nie mieć rozwiązania popiół. Za dużo popiół w ognisko. Ja nie chcę więcej popiół, aż rozwiązać problem z popiół.

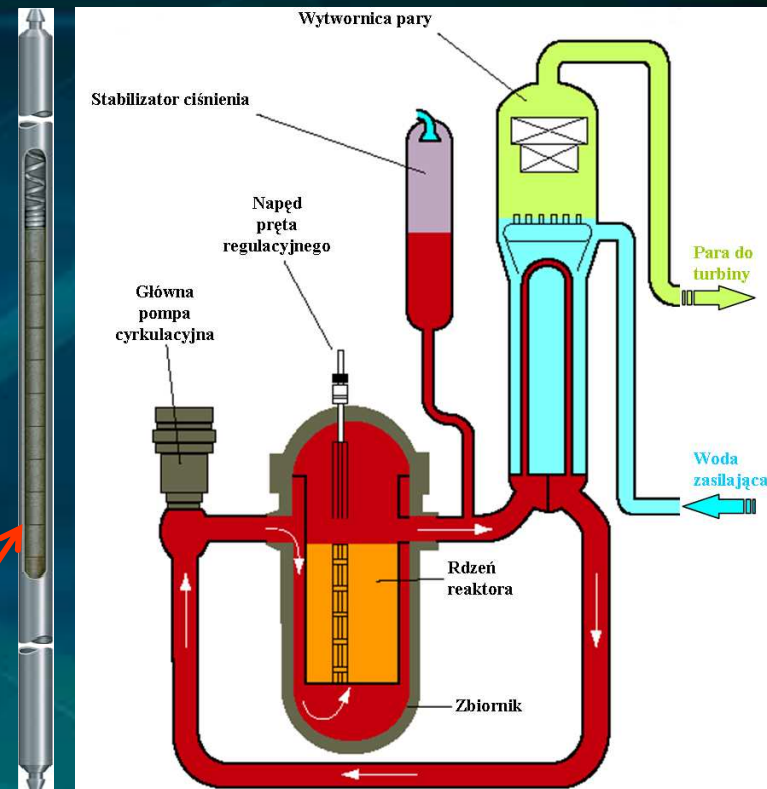
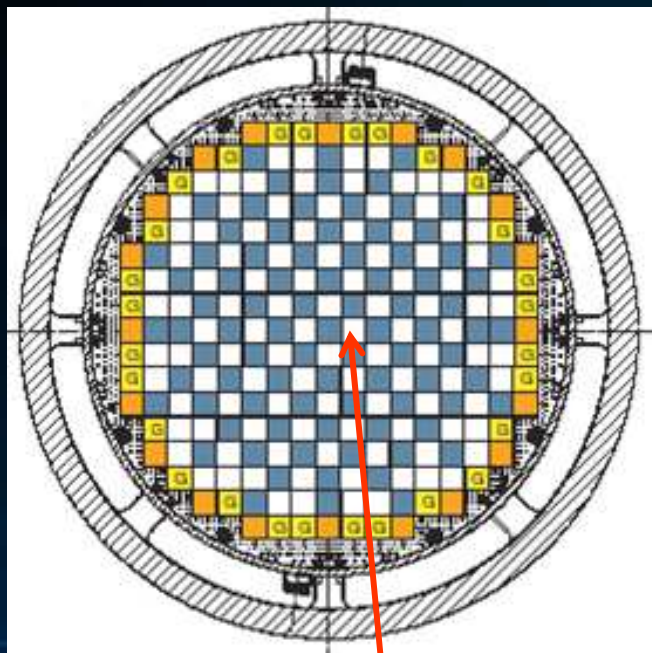
Jeśli my mieć ogień my nie zabronić innym mieć ogień. Ogień może być broń! Moja obawiać się proliferacja!

Błąd z maczuga - boleć jedna głowa. Błąd z ogień - boleć cała wioska!

Moja nie ufać ludzie, co zaczynać ogień. Co jeśli ogień uciec i robić źle? Czy my ufać oni powiedziec? Moja myśleć oni ukrywać prawda, żeby sprzedać więcej ogień.

Wioska chcę pokój! Wojna używać ogień! Moja nie chcę ogień, moja nie chcę wojna. Ognista wojna straszna, bardzo zła!

Źródło potencjalnego zagrożenia – substancje promieniotwórcze w rdzeniu i chłodziwie reaktora



Typowe wielkości aktywności radionuklidów w PWR 1000 MWe:

- **Rdzeń:** $3,7 \cdot 10^{20}$ Bq (10^{10} Ci), >200 nuklidów → produkty rozszczepienia (głównie) + transuranowce
 - w szczelinie pod koszulką el. paliwowego: ~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) $\leftarrow 3 \cdot 10^{-4}\%$

Podstawowe zasady zapewnienia bezpieczeństwa EJ



Strategia „obrony w głąb”

- Kilka kolejnych poziomów obrony (bezpieczeństwa) → jeśli zawiedzie jeden mamy następny
- 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



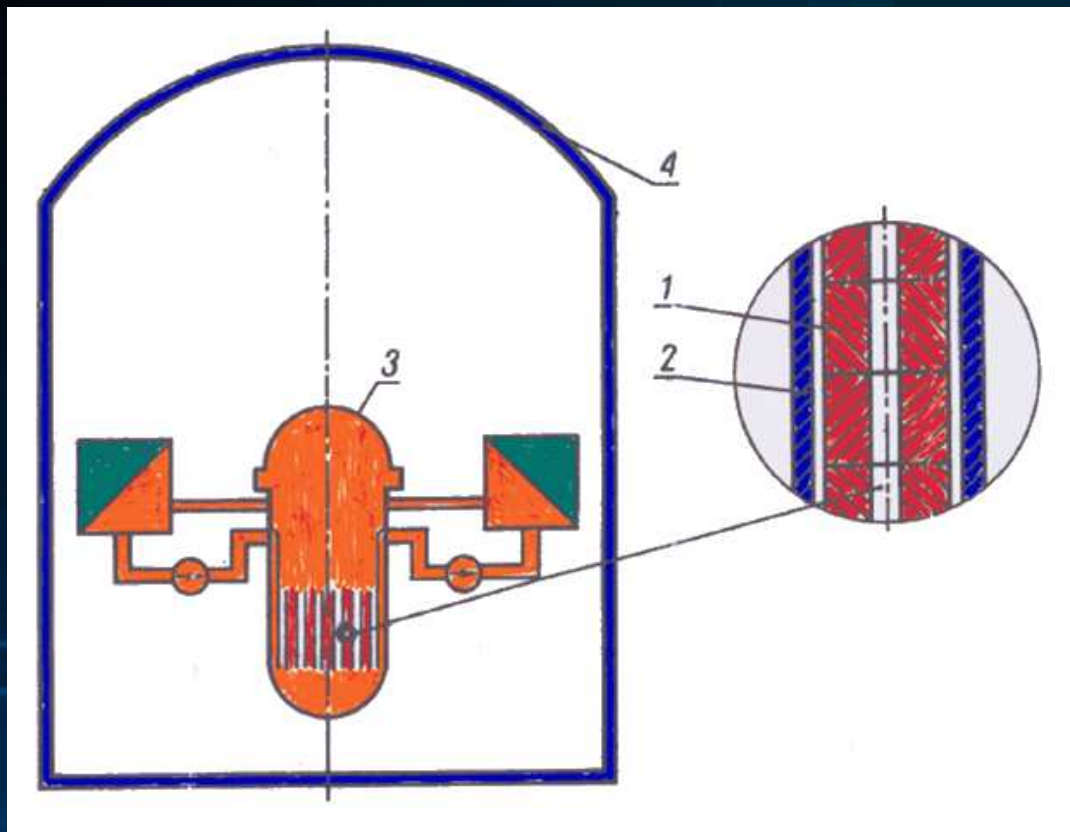
Zapewnienie jakości → na wszystkich etapach: projektowania, produkcji urządzeń, budowy, rozruchu, eksploatacji i likwidacji



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

Jak zapewniamy bezpieczeństwo EJ - system barier ochronnych izolujących substancje promieniotwórcze od otoczenia



I. 4 bariery ochronne:

1. Pastylki paliwowe (zatrzymują ~99% aktywności produktów rozszczepienia)
2. Koszulka elementu paliwowego
3. Granica ciśnieniowa układu chłodzenia reaktora
4. Obudowa bezpieczeństwa

II. Zapobieganie uszkodzeniom paliwa:

- Wyłączenie reaktora (niezawodne i szybkie)
- Odprowadzenie ciepła powyłączeniowego

III. Utrzymanie integralności i szczelności obudowy bezpieczeństwa

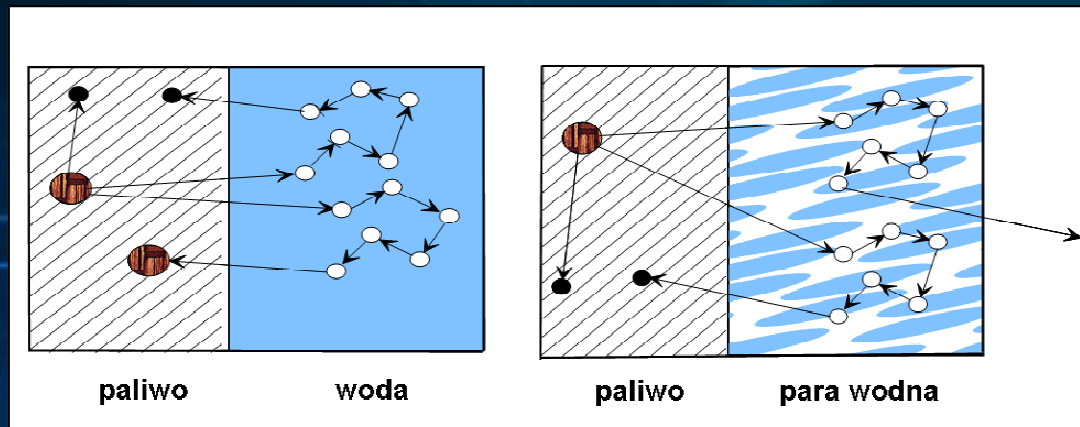
Zjawiska zagrażające integralności i skuteczności barier ochronnych w warunkach awarii

- ☞ Generacja ciepła „powyłączeniowego” – wydzielającego się w paliwie jądrowym także po wyłączeniu reaktora
 - Musi być zapewnione niezawodne chłodzenie → aby uniknąć przegrzania i uszkodzenia paliwa jądrowego i 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

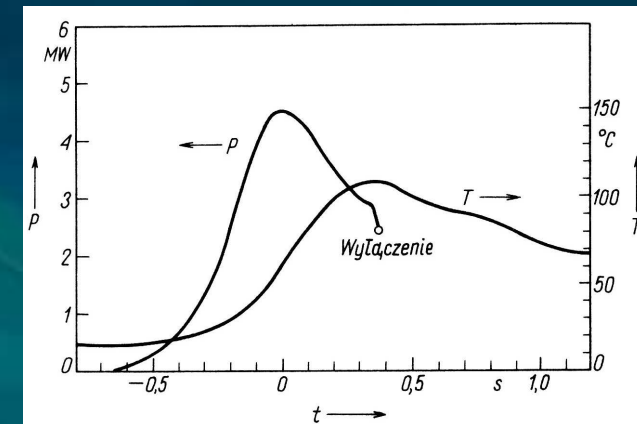
Jak zapewniamy bezpieczeństwo EJ

- stabilność i samoregulacja reaktora

- W reaktorach z moderatorem wodnym wzrost temperatury moderatora (zwłaszcza wrzenie) → zmniejszenie gęstości moderatora i pogorszenie spowalniania neutronów + zwiększenie ich ucieczki poza rdzeń → **ujemny efekt reaktywnościowy temperatury moderatora**
- Wzrost temperatury paliwa → zwiększenie pochłaniania rezonansowego neutronów → zmniejszenie ilości rozszczepień → **ujemny efekt reaktywnościowy temperatury paliwa**
- Wzrost mocy reaktora → wzrost zarówno **średniej temperatury moderatora** jak i **temperatury paliwa** → **ujemny efekt reaktywnościowy mocy reaktora** (moderator + paliwo)



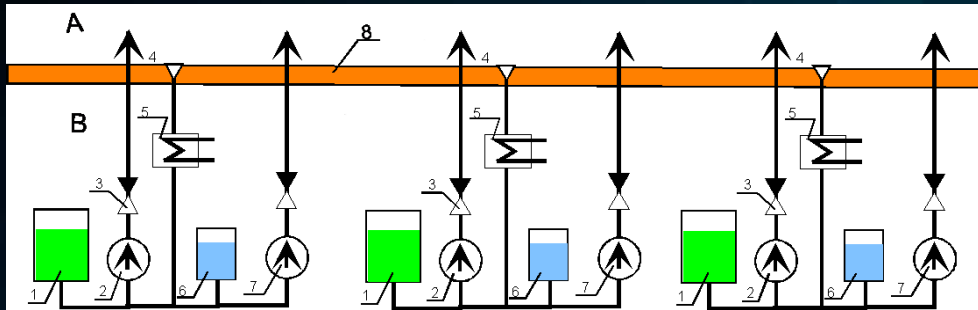
Ilustracja bilansu neutronów (wyciwyt, spowalnianie, ucieczka) w reaktorze wodnym przed i po odparowaniu wody



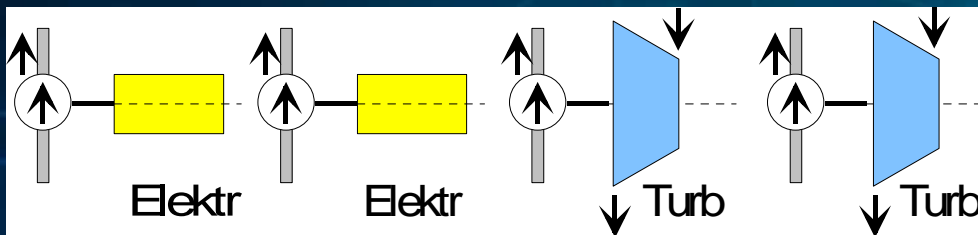
Zmiany mocy (P) i temperatury (T) reaktora SPERT-1 z okresem 118 ms, po skokowym wzroście reaktywności (wystrzelenie pręta regulacyjnego) i przy wyłączonym układzie sterowania i zabezpieczeń

Jak zapewniamy bezpieczeństwo EJ

- zasady projektowania systemów bezpieczeństwa



Zwielokrotnienie – redundancja:
3 (lub 4) równoległe pod-układy CUACR

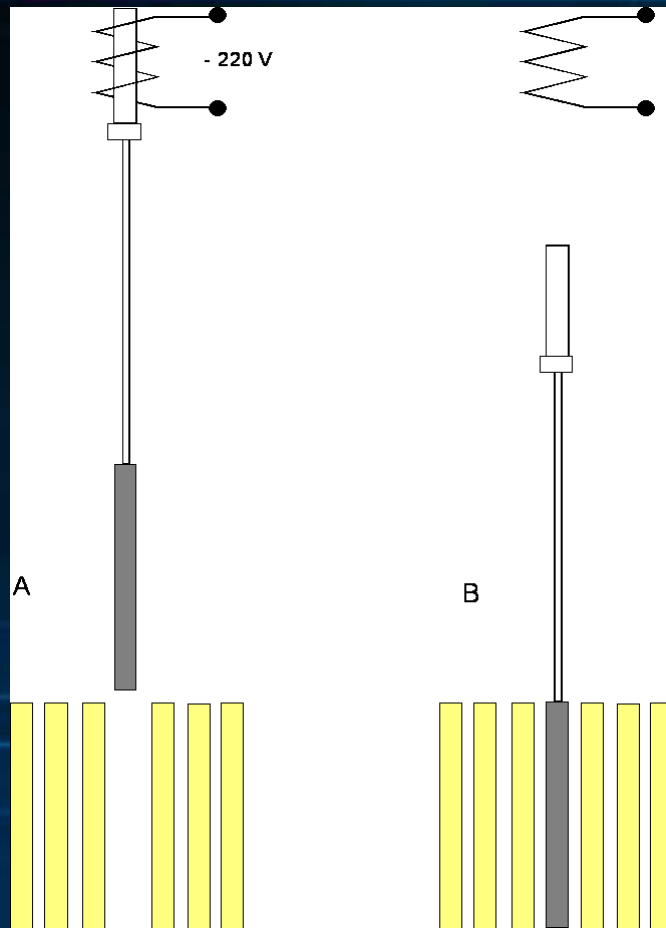


Różnorodność: tu napędów pomp awaryjnego układu wody zasilającej wytwornice pary (2 silniki elektryczne, 2 turbiny parowe)

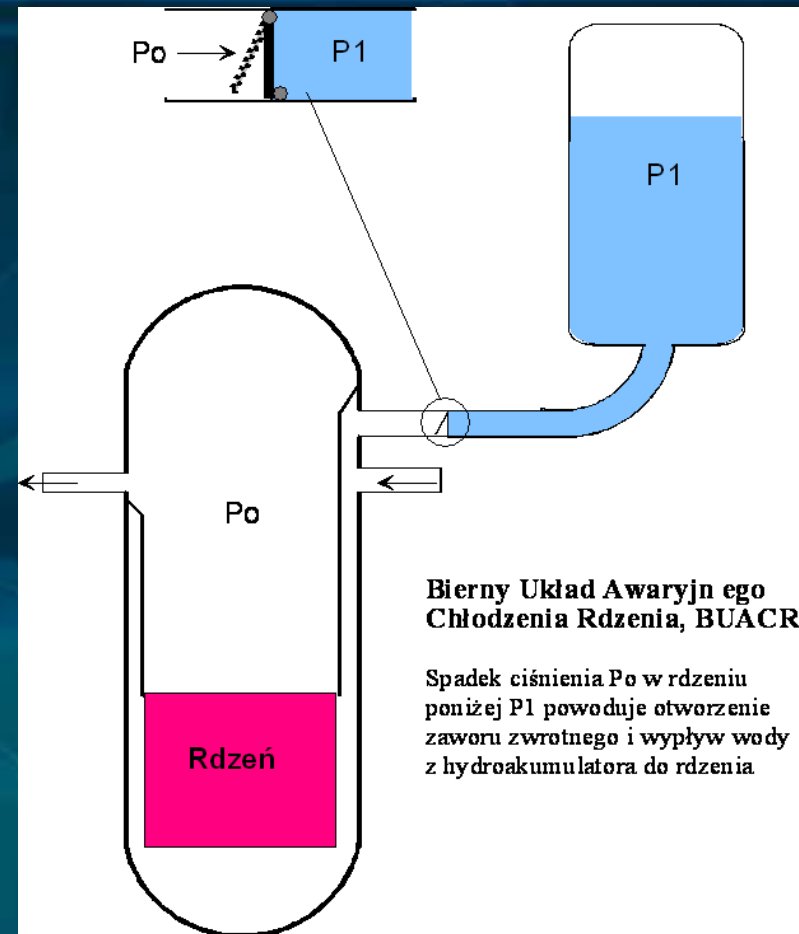
- Kryterium pojedynczego uszkodzenia: pojedyncze uszkodzenie jakiegokolwiek czynnego lub biernego elementu **nie może spowodować** utraty możliwości wypełnienia przez układ jego funkcji bezpieczeństwa
- Zapobieganie utraty funkcji więcej niż jednego układu lub urządzenia ze wspólnej przyczyny, wskutek np.: zatkania studzienek, awarii zasilania, pożaru, zalania
- Separacja przestrzenna i fizyczna (zagrożenia wewnętrzne / zewnętrzne: pożar, zalanie, uderzenie samolotu, i in.)
- Niezależność funkcjonalna (zwłaszcza systemów bezpieczeństwa)
- Przejście w stan bezpieczny po uszkodzeniu: zrzut prętów bezpieczeństwa, zamknięcie / otwarcie zaworu
- Stosowanie rozwiązań biernych wykorzystujących siły i zjawiska naturalne (grawitacja, konwekcja naturalna, energia sprężyn lub sprężonych gazów)

Jak zapewniamy bezpieczeństwo EJ

- zasady projektowania systemów bezpieczeństwa



Zasada „stan bezpieczny po uszkodzeniu”
i wykorzystanie **grawitacji**: zrzut prętów
bezpieczeństwa do rdzenia po zaniku zasilania
elektrycznego



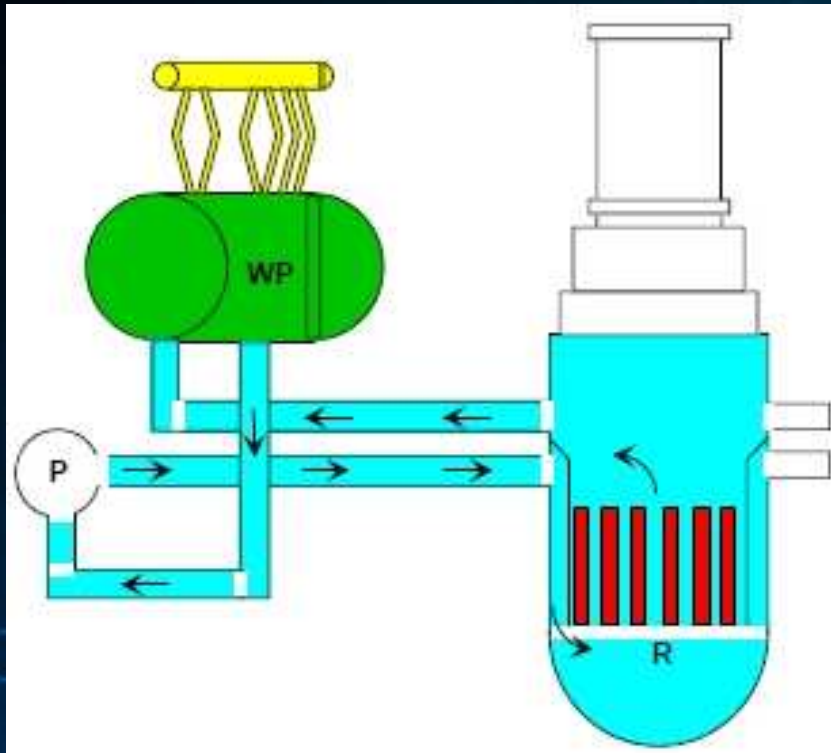
**Bierny Układ Awaryjnego
Chłodzenia Rdzenia, BUACR**

Spadek ciśnienia P_0 w rdzeniu
poniżej P_1 powoduje otwarcie
zaworu zwrotnego i wypływ wody
z hydroakumulatora do rdzenia

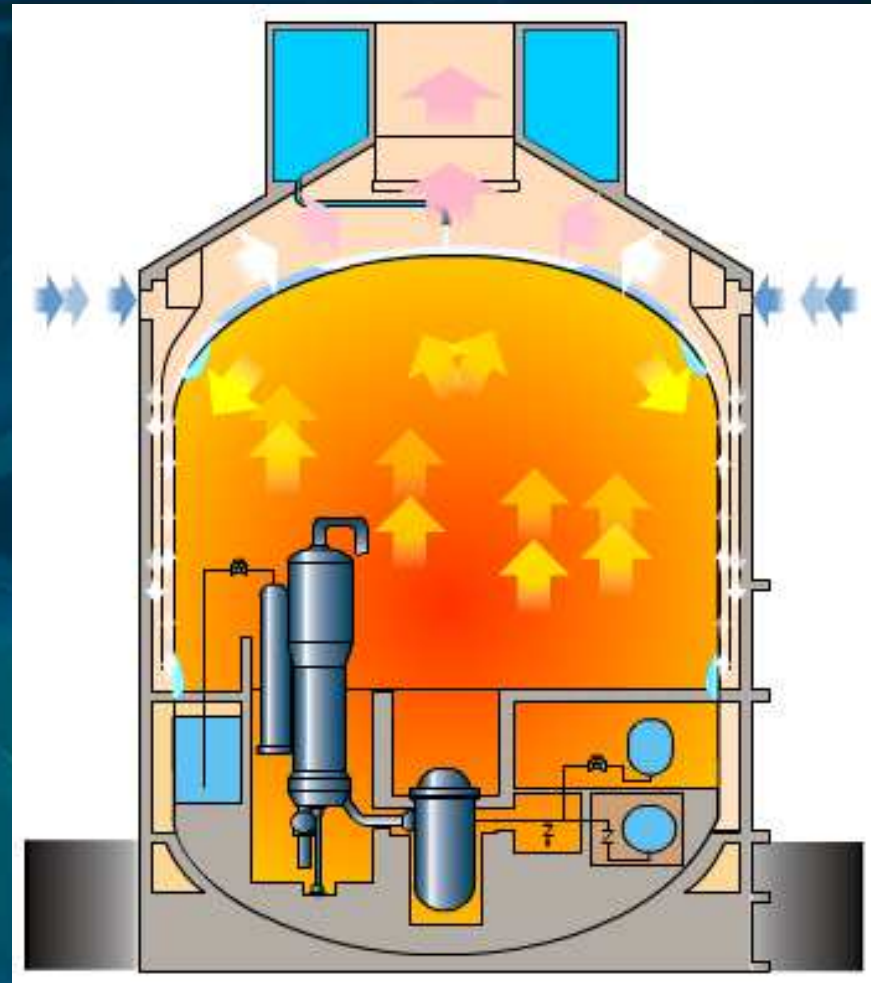
Wykorzystanie **energii sprężonego gazu** (azot)
i zastosowanie **klap zwrotnych** w BUACR

Jak zapewniamy bezpieczeństwo EJ

- zasady projektowania systemów bezpieczeństwa

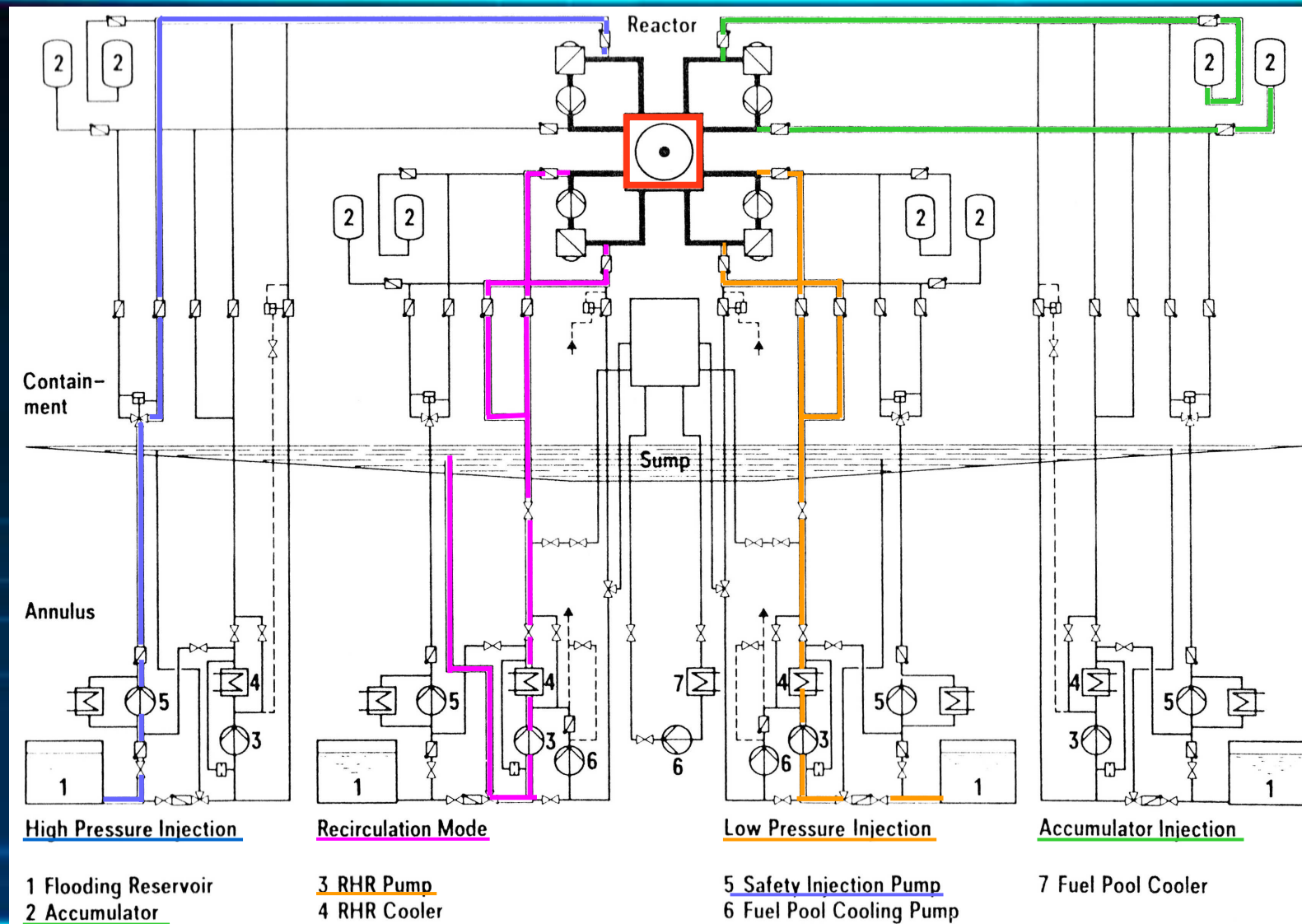


Wykorzystanie **konwekcji naturalnej** w układzie chłodzenia reaktora (WWER) – odbiór ciepła powyłączeniowego



Wykorzystanie **grawitacji, konwekcji naturalnej i parowania / skraplania** - pasywne chłodzenie obudowy bezpieczeństwa reaktora AP1000

Konfiguracja systemu awaryjnego chłodzenia reaktora PWR Konvoi (Siemens) – redundancja: cz. bierna 2x100%, cz. czynna 4x100%



Szczegółowe wymagania dla EJ z reaktorami III. generacji – dokument „EUR”

Dokument „EUR”: wymagania europejskich przedsiębiorstw energetycznych dla EJ III. generacji z reaktorami lekkowodnymi
European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants („EUR”). 2001.



- Woluminy 1, 2 i 4: 39 rozdziałów, >1800 str.
 - ok. 5000 ogólnych i szczegółowych wymagań, w tym ok. 900 dotyczy bezpieczeństwa
 - najważniejszy t. 2: szczegółowe wymagania dla części jądrowej
- Wolumin 3: opisy standardowych projektów EJ spełniających wymagania „EUR”
- Kryteria ograniczonego oddziaływania radiologicznego EJ określono:
 - nie tylko dla „warunków projektowych”: normalna eksploatacja, incydenty i awarie projektowe
 - ale też dla „rozszerzonych warunków projektowych”, obejmujących ciężkie awarie związane ze stopieniem rdzenia!

Wymagania i kryteria określone w „EUR”

– kryteria ograniczonego oddziaływania w razie awarii

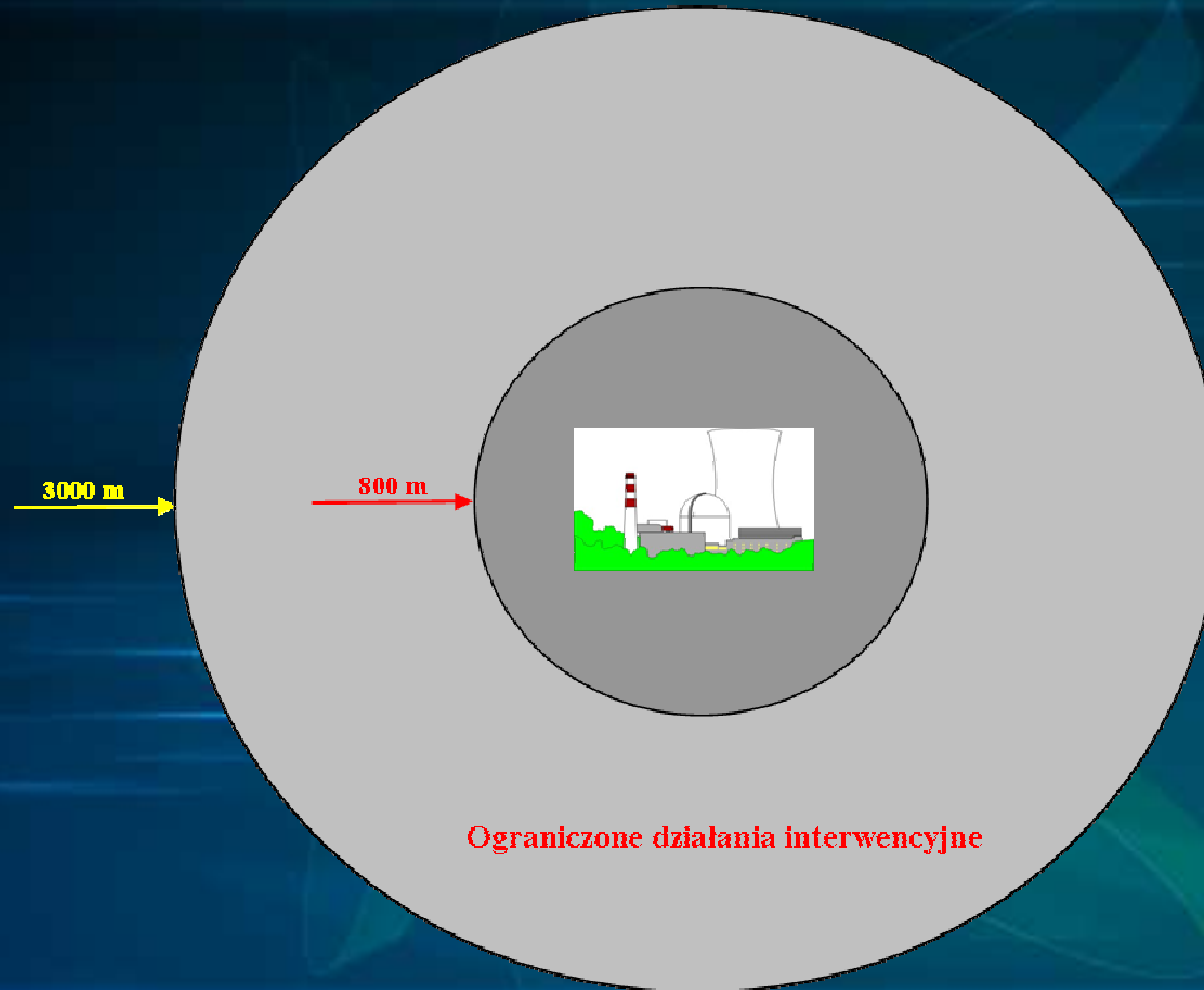
☞ Dla awarii projektowych:

- 1. Brak konieczności działań interwencyjnych > 800 m od reaktora**
- 2. Ograniczone skutki ekonomiczne**

☞ Dla awarii poza-projektowych (włączając ciężkie awarie z całkowitym stopieniem rdzenia):

- 1. Brak konieczności wczesnych działań interwencyjnych (wyprzedająca ewakuacja) > 800 m od reaktora**
- 2. Brak konieczności średnioterminowych działań interwencyjnych (czasowe przesiedlenie) > 3 km od reaktora**
- 3. Brak konieczności długoterminowych działań interwencyjnych (stałe przesiedlenie ludności, długotrwałe ograniczenie spożywania skażonej żywności i wody) > 800 m od reaktora**
- 4. Ograniczone skutki ekonomiczne**

Strefy działań interwencyjnych określone w „EUR”



Brak konieczności działań interwencyjnych

Wymagania i kryteria określone w „EUR”

- probabilistyczne cele bezpieczeństwa

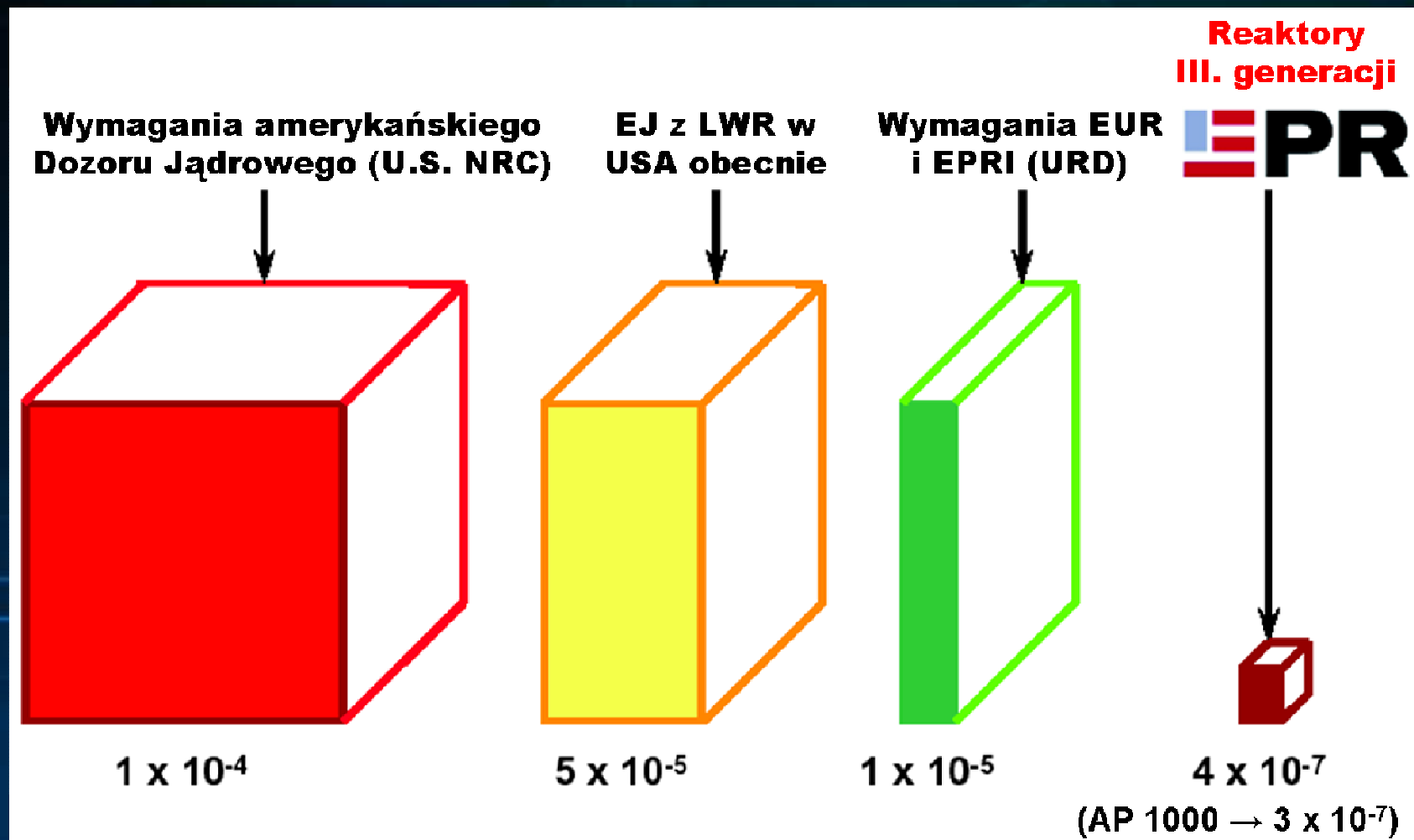
- Częstość uszkodzeń rdzenia: $< 10^{-5}$ / Reaktor-Rok (R-R)
- Częstość dużych uwolnień substancji promieniotwórczych: $< 10^{-6}$ / R-R
- Sekwencje potencjalnie prowadzące do uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa lub bardzo dużych uwolnień substancji promieniotwórczych: $\ll 10^{-6}$ / R-R

Wymagania polskich przepisów bezpieczeństwa EJ

– bardzo rygorystyczne, oparte o najnowsze światowe standardy

- Praktyczne **wykluczenie awarii** mogących prowadzić do:
 - wczesnych uwolnień substancji promieniotwórczych
 - dużych uwolnień substancji promieniotwórczych
- **Limit dawki** na granicy obszaru ograniczonego użytkowania w razie awarii bez stopienia rdzenia reaktora – **b. rygorystyczny: 10 mSv**
- **Kryteria ograniczenia oddziaływania radiologicznego w razie awarii i probabilistyczne kryteria bezpieczeństwa** → zgodne z „EUR”
- **Podwójna obudowa bezpieczeństwa reaktora**
 - Odporna na uderzenie dużego samolotu cywilnego
 - Pasywne zabezpieczenia przed uszkodzeniem obudowy przez:
 - Stopiony rdzeń reaktora
 - Detonację wodoru (pasywne auto-katalityczne rekombinatory wodoru)
- **Wysokie wymagania** – uwzględniające m.in. wnioski z awarii EJ Fukushima i „stress testów” europejskich EJ - dotyczące zapewnienia:
 - **odporności EJ na zagrożenia zewnętrzne:** sejsmiczne, powodziowe, skrajne pogodowe i in.
 - **niezawodności zasilania elektrycznego i odprowadzania „ciepła powyłączeniowego”:**
 - Długa „autonomia” układów zasilania elektrycznego (prądu przemiennego i stałego)
 - Wymóg zastosowania alternatywnych układów

Reaktory generacji III+ z dużym zapasem spełniają probabilistyczne kryteria bezpieczeństwa



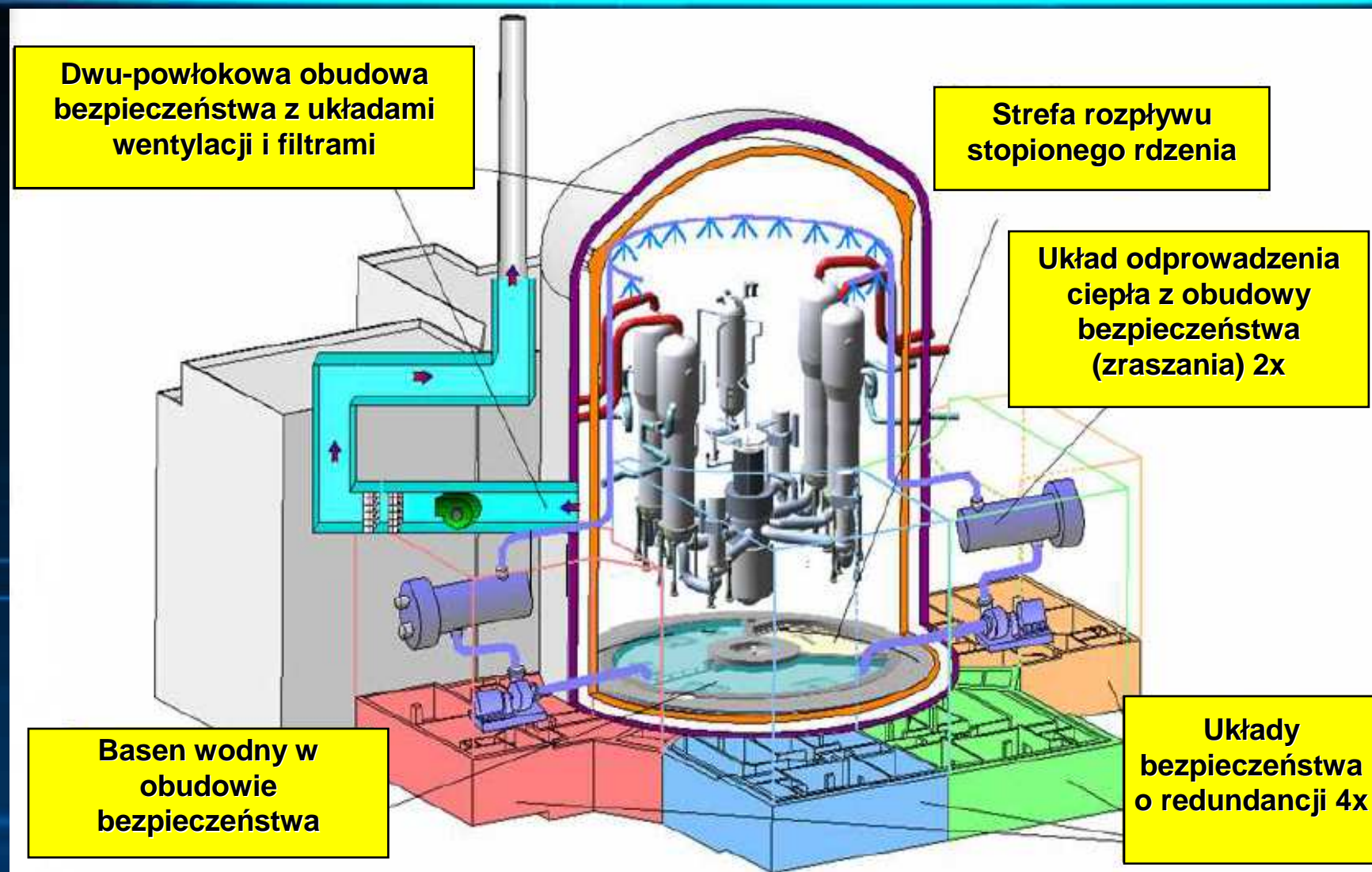
Częstość uszkodzeń rdzenia na reaktor-rok

Blok energetyczny z reaktorem EPR (European Pressurized Reactor) ~1600 MWe (AREVA)

Projekt ewolucyjny – oparty na wieloletnim doświadczeniu:
francuskiej firmy Framatome / AREVA i niemieckiej firmy Siemens



Główne cechy bezpieczeństwa reaktora EPR

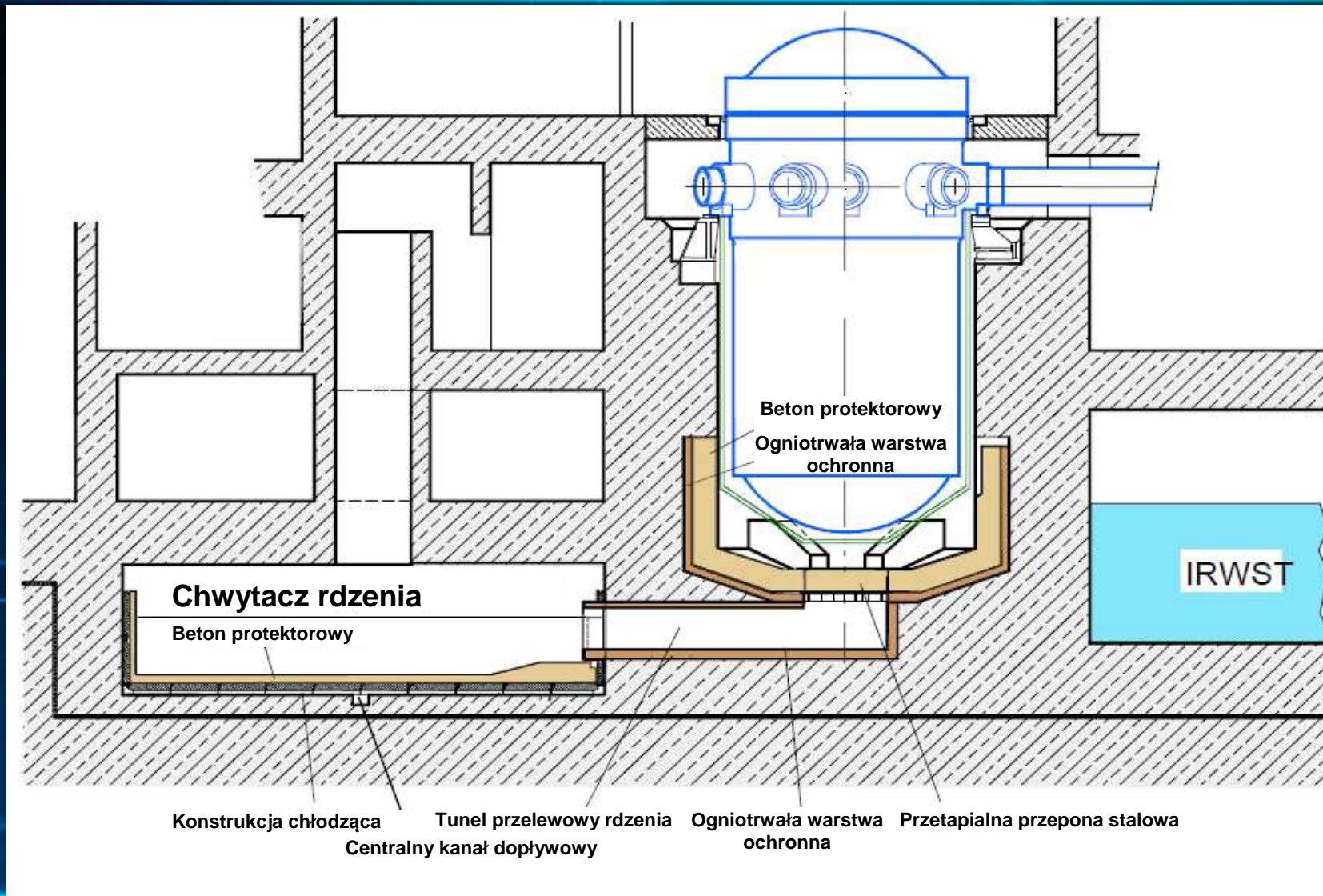


Obudowa bezpieczeństwa reaktora EPR



- **Powłoka wewnętrzna ze sprężonego betonu**, o gr. 1,3 m, z wykładziną stalową o gr. 6 mm, $D \times H = 46,8 \times 65$ m, $V_p \sim 80\,000$ m³; $p_a = 0,53$ MPa, $t = 170^\circ\text{C}$
 - Wytrzymuje warunki dużej LOCA
 - Wykładzina zapewnia szczelność i ochronę przed odłamkami (przeciek $\leq 0,25\%$ V/d)
- **Powłoka zewnętrzna ze zbrojonego betonu** – oddzielona od powłoki wewnętrznej, o gr. 1,8 / 1,3 m (powyżej / poniżej stropu bud. bezp.); $D = 53$ m
 - Ochrona przed uderzeniami samolotów (włączając duże pasażerskie) i wybuchami zewnętrznymi
- **Wentylowana przestrzeń pomiędzy powłokami:**
 - Utrzymywanie podciśnienia (≥ 620 Pa)
 - Filtrowanie \rightarrow minimalizacja uwolnień radioaktywnych
- **Podwójne, szybko działające niezależne zawory odcinające**
- **Obliczeniowe obc. sejsmiczne \rightarrow max poziome przyśp. gruntu 0,3g**

Ochrona integralności obudowy bezpieczeństwa reaktora EPR - chwytacz rdzenia



Ochrona integralności obudowy bezpieczeństwa reaktora EPR – zapobieganie detonacji wodoru



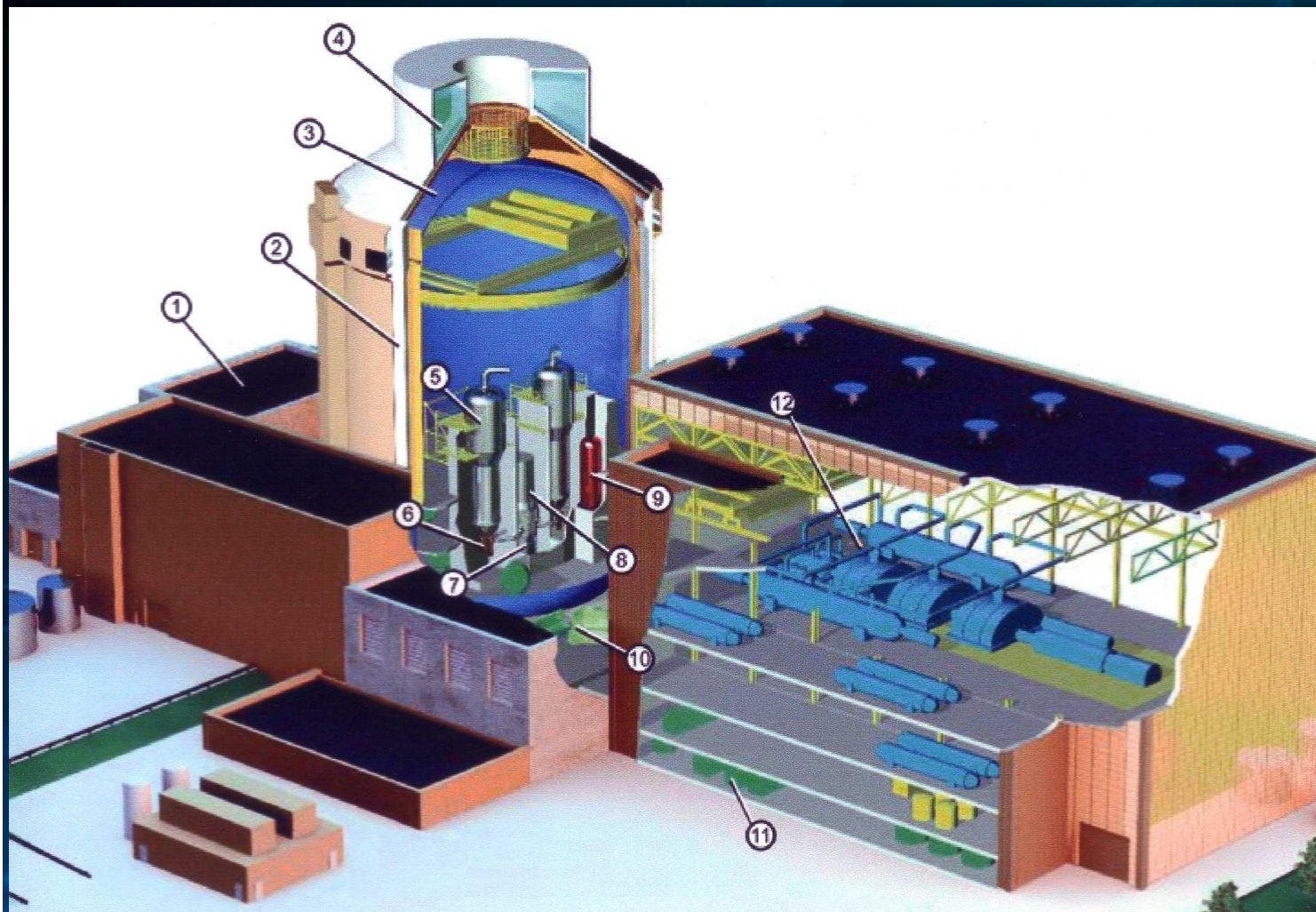
Pasywny katalityczny rekombinator wodoru

- Wodór może wydzielić się na skutek reakcji:
 - Cyrkonu koszulek paliwowych z wodą
 - W razie ciężkiej awarii: stopionego rdzenia z betonem w strefie „chwytna rdzenia”
- Wewnętrzna powłoka obudowy bezpieczeństwa ze sprężonego betonu wytrzyma ciśnienie powstające przy spalaniu wodoru
- Zapobieganie detonacji wodoru → układ kontroli, mieszania i usuwania wodoru z obudowy bezpieczeństwa:
 - Mieszanie atmosfery obudowy – konwekcja naturalna - zapobiega powstaniu lokalnych wybuchowych stężeń wodoru
 - Usuwanie wodoru z atmosfery obudowy za pomocą pasywnych katalitycznych rekombinatorów → utrzymanie stężenia wodoru $<10\%$

3. Blok EJ Olkiluoto (Finlandia) z reaktorem EPR



Blok energetyczny z reaktorem AP 1000 (Advanced Passive) ~1100 MWe (Westinghouse)

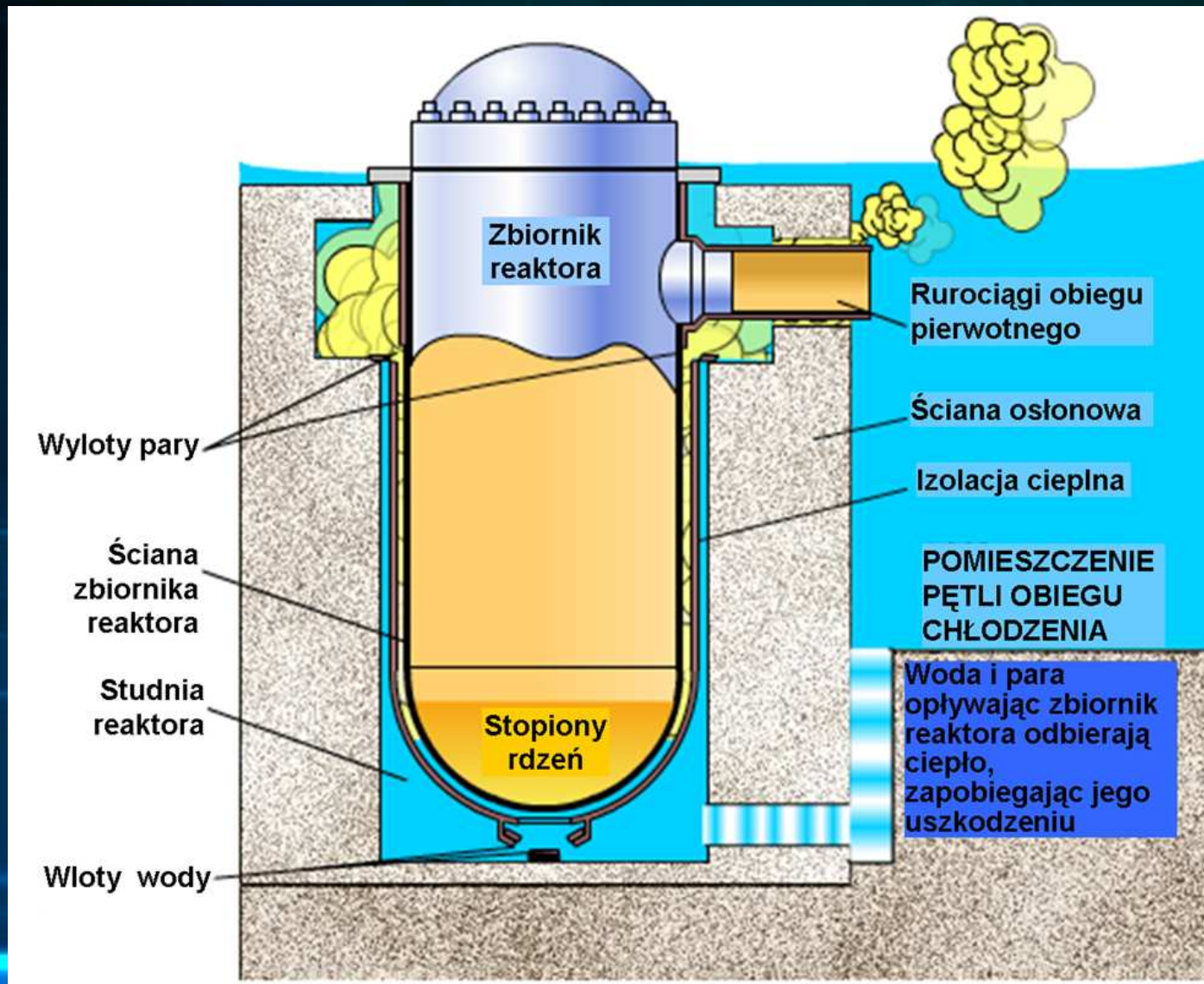


1. budynek paliwa
2. betonowy budynek osłonowy
3. stalowa obudowa bezpieczeństwa
4. zbiornik wody pasywnego chłodzenia obudowy bezpieczeństwa
5. wytwornica pary
6. pompy chłodziwa reaktora
7. reaktor
8. blok górny reaktora
9. stabilizator ciśnienia
10. główna nastawnia
11. pompy wody zasilającej
12. turbozespół

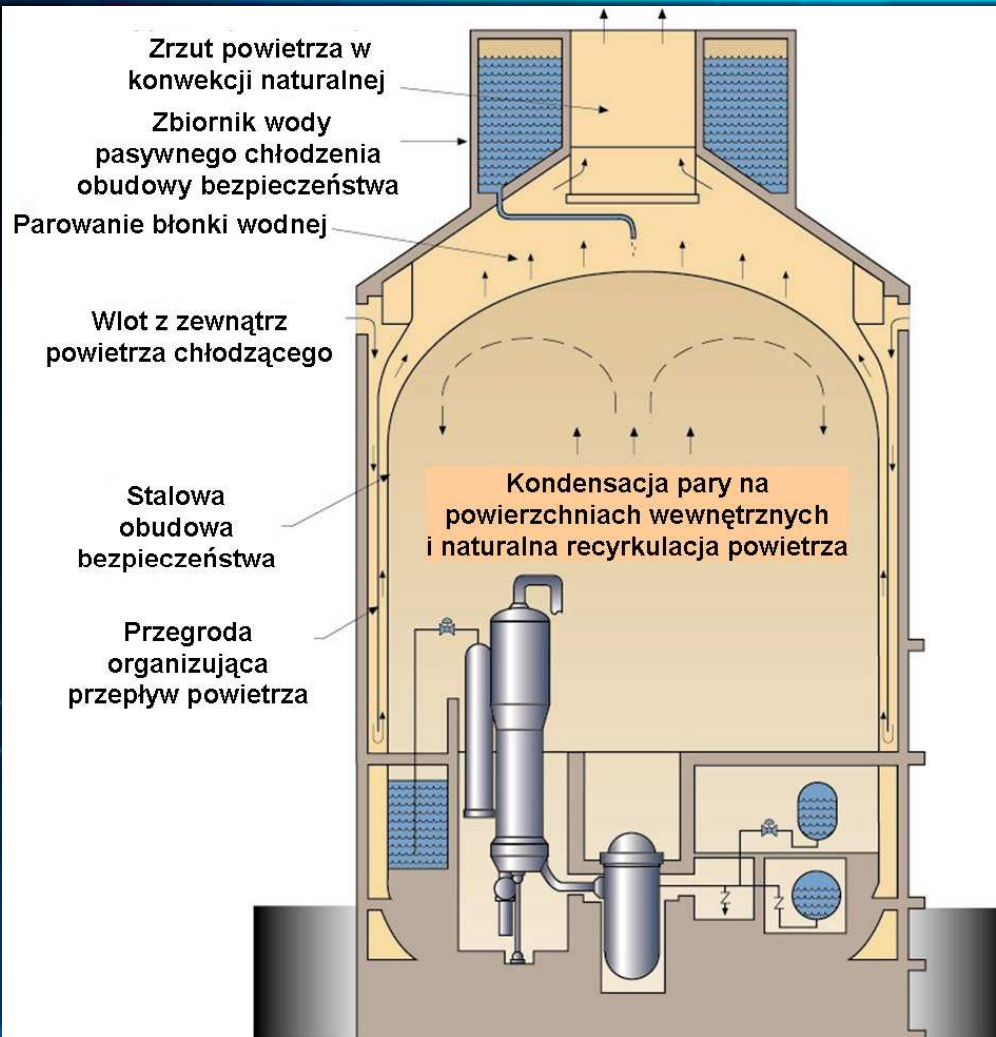
Blok energetyczny z reaktorem AP 1000

- Innowacyjne, uproszczone rozwiązania projektowe
- **Pasywne układy bezpieczeństwa**
 - Awaryjnego chłodzenia reaktora,
 - Odprowadzenia ciepła powyłączeniowego
 - Chłodzenia obudowy bezpieczeństwa
- **Bezpieczne wyłączenie i chłodzenie reaktora**
→ **przez 72 godz. od początku awarii, bez zasilania elektrycznego prądem przemiennym**, a nawet udziału operatora
- Długookresowe odprowadzanie ciepła poprzez chłodzenie obudowy bezpieczeństwa → przy wykorzystaniu jedynie **sił grawitacji, cyrkulacji naturalnej i sprężonych gazów**
- Nie potrzeba zwielokrotnionych układów bezpieczeństwa z niezawodnym zasilaniem elektrycznym

Utrzymanie stopionego rdzenia wewnątrz zbiornika reaktora AP 1000



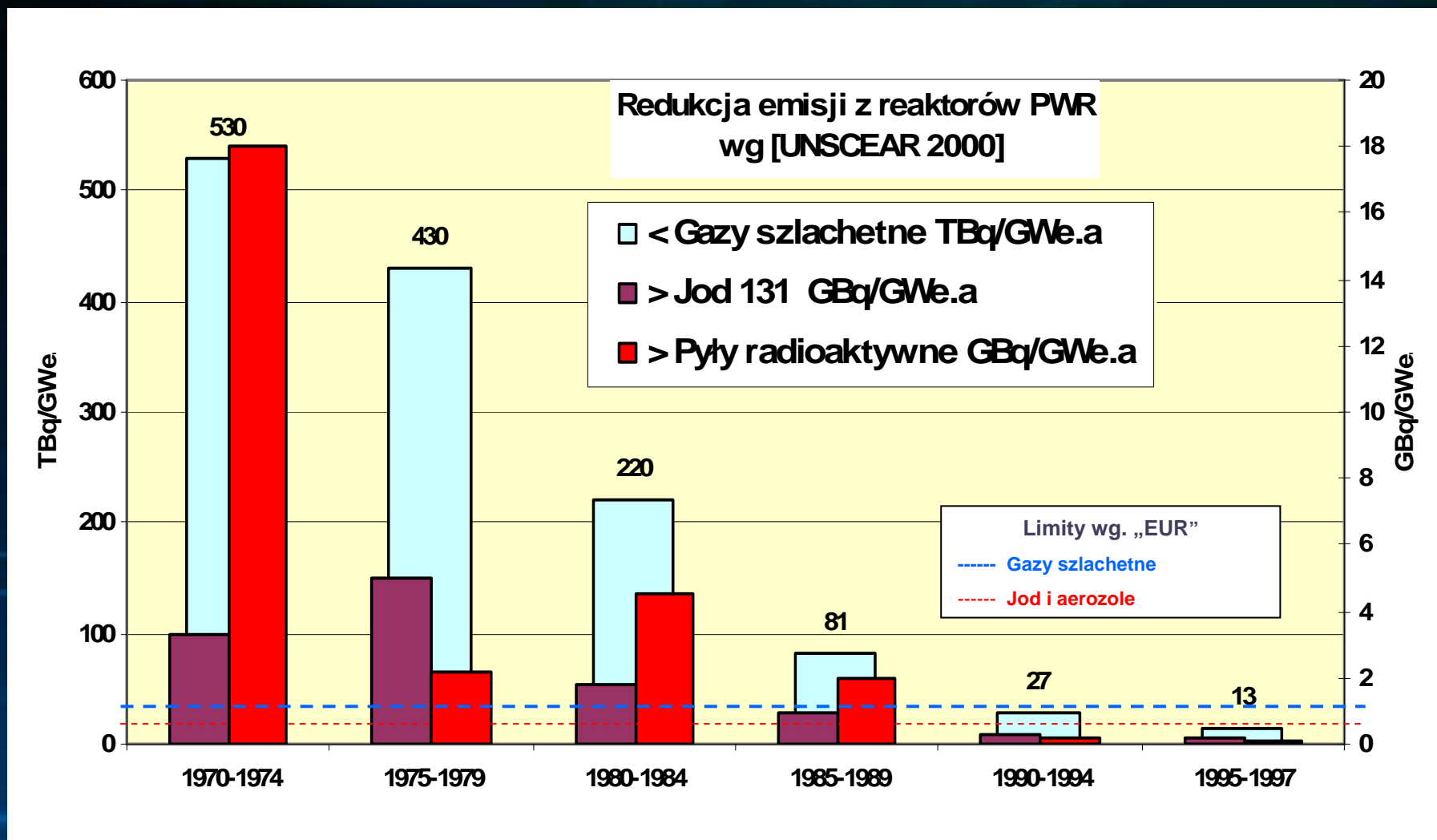
Układ pasywnego chłodzenia obudowy bezpieczeństwa reaktora AP 1000



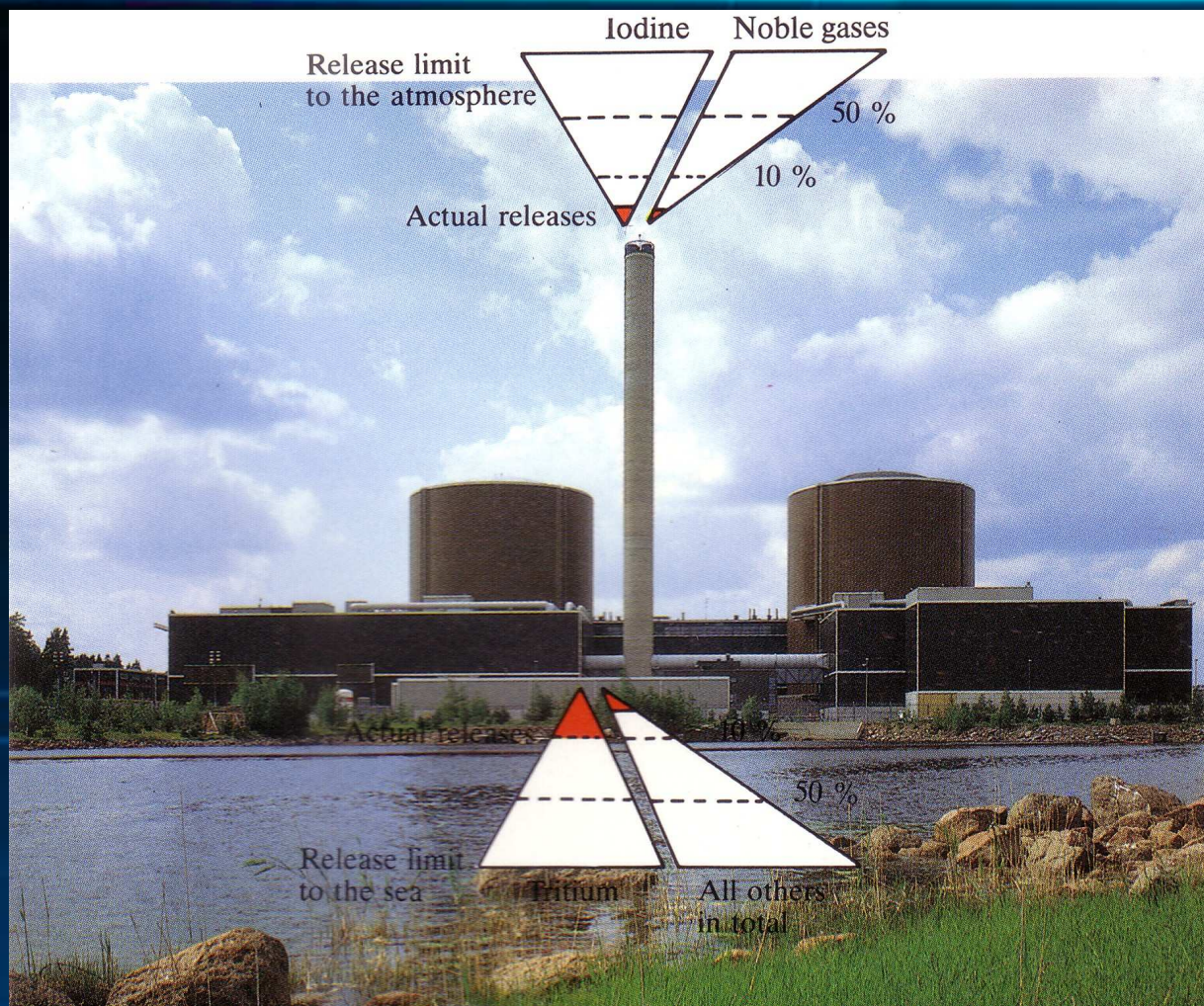
Pasywny układ chłodzenia obudowy bezpieczeństwa AP1000

- Powłoka wewnętrzna - stalowa ($g = 4,44 \text{ cm}$, $D \times H = 39,6 \times 65,6 \text{ m}$), $V_p = 58\,300 \text{ m}^3$, $p_a = 0,51 \text{ MPa}$, $t = 149^\circ\text{C}$
 - zapobiega niekontrolowanemu uwolnieniu do otoczenia substancji promieniotwórczych
- Powłoka zewnętrzna - żelbetowa ($g = 0,9 \text{ m}$, $D_w \times H = 43 \times 83,3 \text{ m}$) $V_{zb.} = 2\,864 \text{ m}^3$
 - Dodatkowa osłona układów i urządzeń zawierających media promieniotwórcze
 - Ochrona przed oddziaływaniami zewnętrznymi
- Obliczeniowe obc. sejsmiczne → max poziome przyśp. gruntu = $0,3g$
- Postępowanie z wodorem:
 - mieszanie (konw. nat.), rekombinacja, inicjacja zapłonu

Wpływ EJ na środowisko podczas normalnej eksploatacji – sukcesywna redukcja emisji substancji promieniotwórczych



Wpływ EJ na środowisko podczas normalnej eksploatacji - rzeczywiste uwolnienia substancji promieniotwórczych



EJ Loviisa (Finlandia)

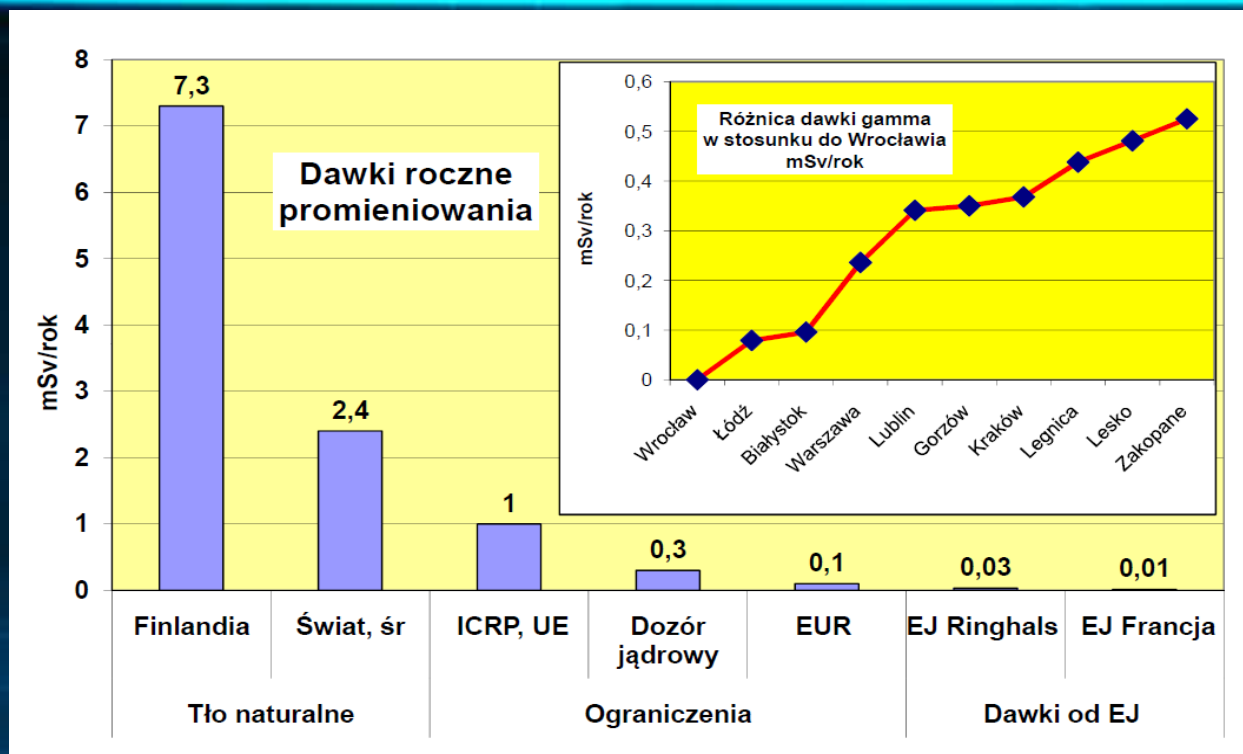
EJ Loviisa (Finlandia):

- Uwolnienia do atmosfery: **< 0,1% dopuszczalnych**
- Uwolnienia ciekłe (do morza): **1÷10% dopuszczalnych**

Francuskie EJ:

- Uwolnienia jodu i aerozoli: **0,4% dopuszczalnych**
- Uwolnienia ciekłe: **0,5% dopuszczalnych**

Porównanie dawek promieniowania od EJ z tłem naturalnym i dawkami dopuszczalnymi



Dawki roczne od tła promieniowania:

- Finlandia: **7,3 mSv/rok**
- Polska – dawki od zewnętrznego promieniowania γ : **0,517 (Wrocław) ÷ 1,042 (Zakopane) mSv/rok**

Dodatkowe dawki od EJ:

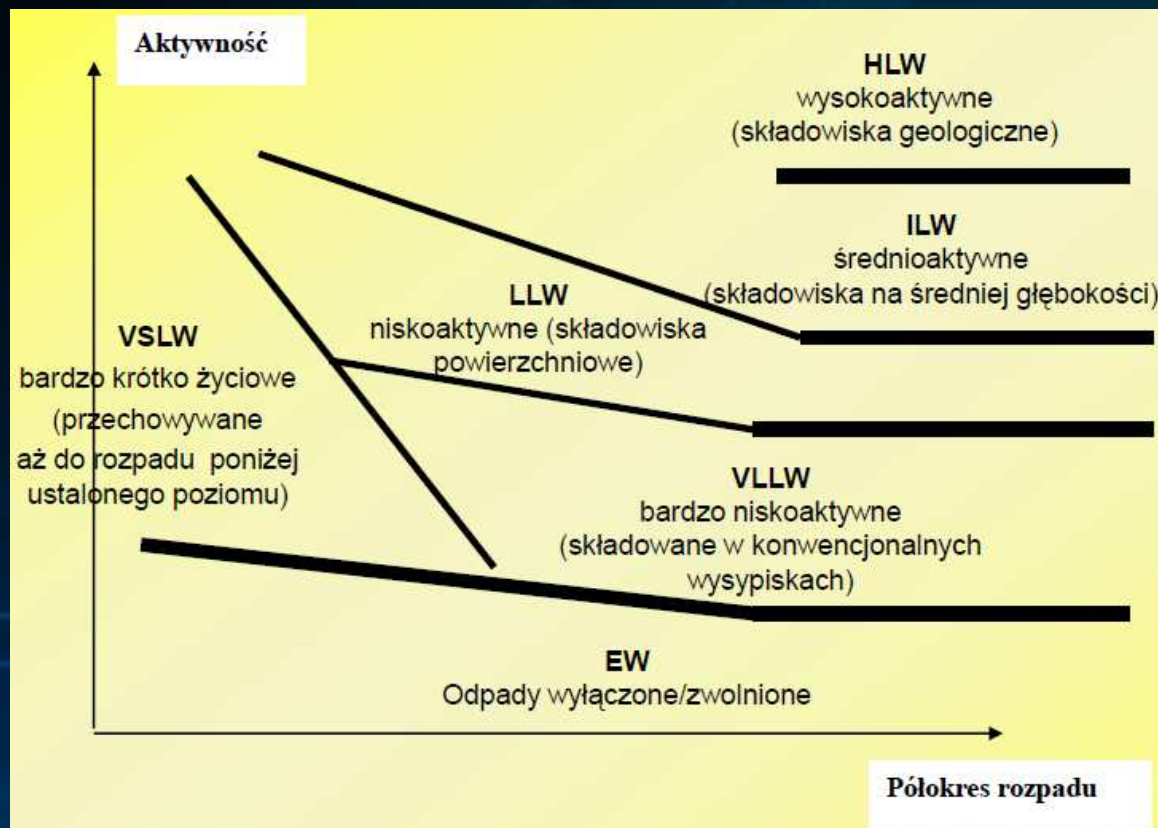
- Limit wg. „EUR”: **0,1 mSv/rok**
- Rzeczywiste: **< 0,01 mSv/rok (ponad 10-krotnie mniejsze), a nawet <1 μ Sv/a (100-krotnie mniejsze)**
- Dodatkowa dawka na granicy strefy ochronnej EJ → **ok. 30-krotnie mniejsza od różnicy dawki od tła promieniowania gamma pomiędzy Wrocławiem a Krakowem (0,36 mSv/rok)!**

Oprac.: A. Strupczewski

Porównanie rocznych dawek promieniowania od różnych źródeł naturalnych i sztucznych

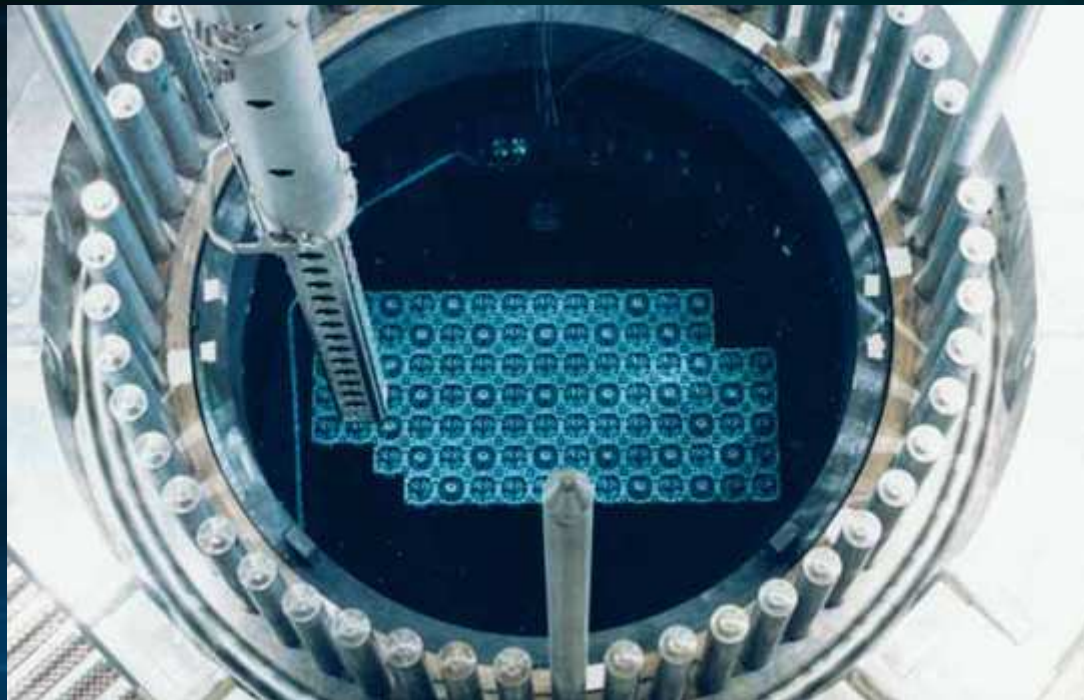
- Dawka roczna kosmonauty na orbicie = 420 mSv
- Dawka roczna od promieniowania naturalnego w Ramsar (Iran) = 300 mSv
- Dawka roczna w niewietrzonym domu na podłożu granitowym = 20 mSv
- Dawka roczna od promieniowania naturalnego na wysokości 1500 m n.p.m. = 3,6 mSv
- Dawka roczna średnia na powierzchni ziemi od źródeł naturalnych = 2,4 mSv
- Dawka otrzymywana przy prześwietleniu rentgenowskim płuc = 0,7 mSv
- Dawka od promieniowania kosmicznego podczas lotu Warszawa – Nowy Jork – Warszawa = 0,06 mSv
- Dawka otrzymywana podczas tygodniowego pobytu na nartach w górach < 0,01 mSv
- Dawka roczna w najbliższym sąsiedztwie elektrowni jądrowej < 0,01 mSv

Pochodzenie, klasyfikacja i sposób składowania odpadów promieniotwórczych



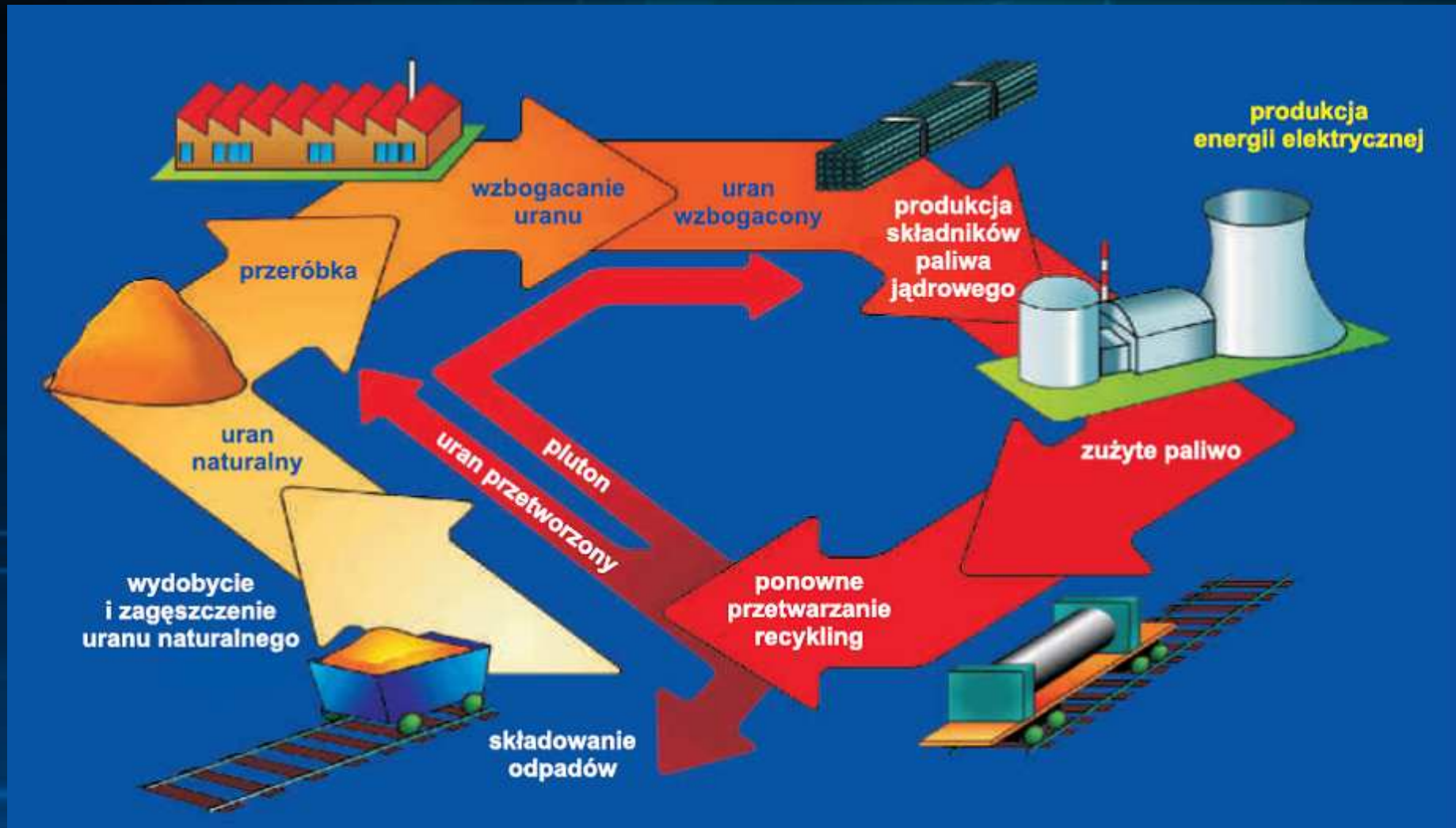
- 99% aktywności zawarte jest w wypalonym paliwie
- Odpady wysokoaktywne:
 - Wypalone paliwo i odpady z jego przerobu
- Odpady średnio i nisko-aktywne:
 - wkłady filtracyjne z układów oczyszczania skażonych mediów technologicznych i powietrza
 - ścieki z dekontaminacji urządzeń i pomieszczeń oraz pryszniców i z pralni odzieży ochronnej
 - zużyta odzież ochronna
 - wycofane z eksploatacji urządzenia

Postępowanie z wypalonym paliwem jądrowym

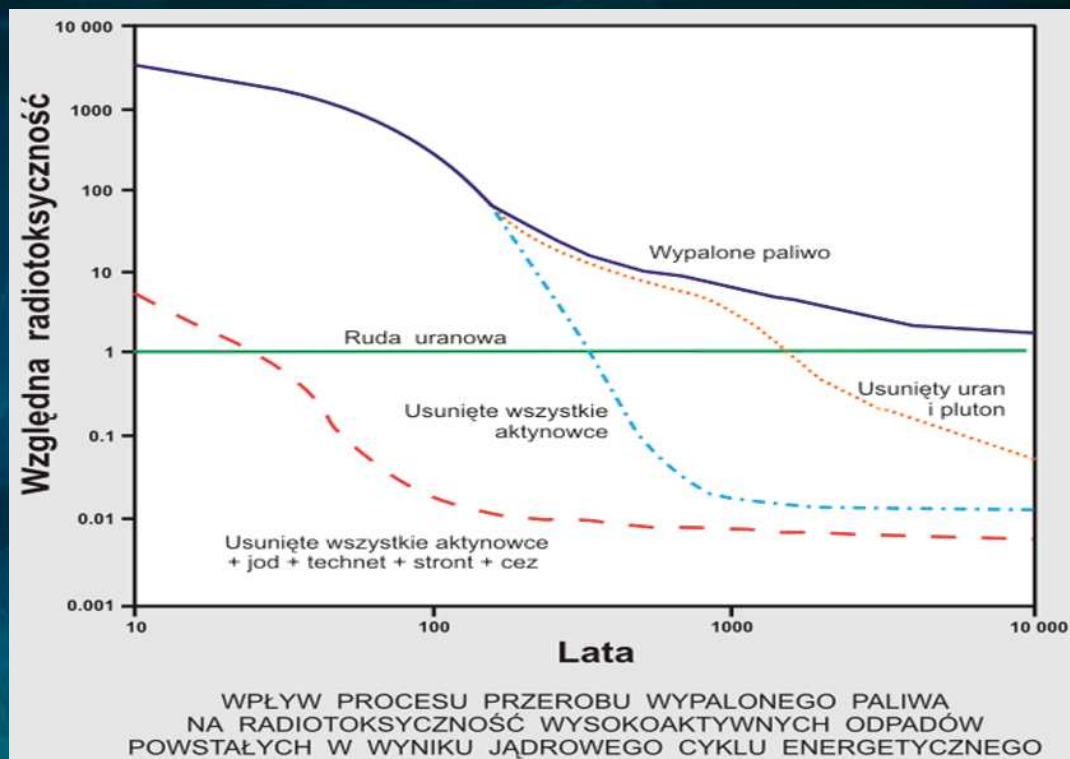
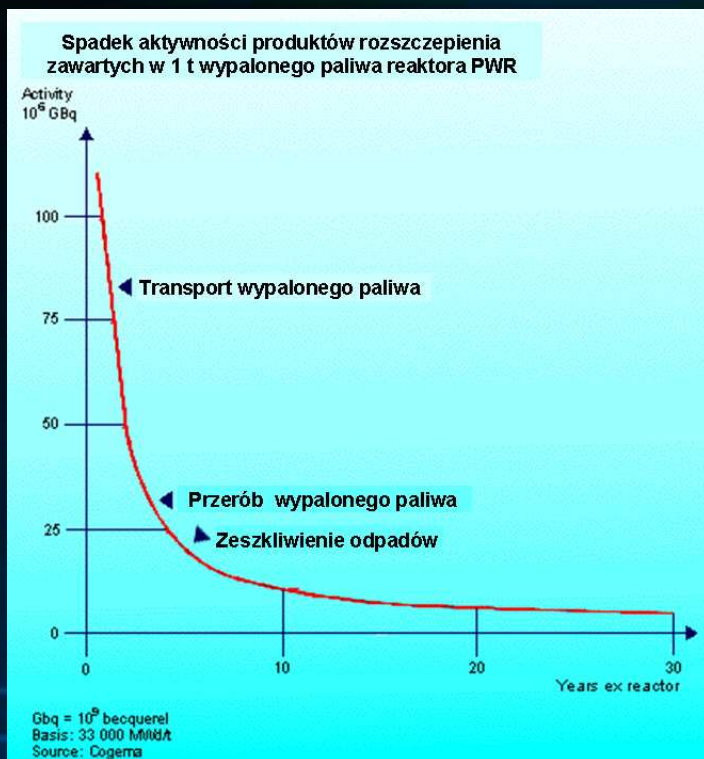


- **Przeładunki paliwa** – pod kilkumetrową warstwą wody
 - W reaktorze 1000 MW_e rocznie wymienia się średnio ok. 20 t paliwa
 - Przy 18 mies. kampanii wymienia się 1/3 zestawów paliwowych
- **Czasowe składowanie wypalonego paliwa** jądrowego na terenie elektrowni
 - Najpierw (3 – 10 lat) w basenach wodnych
 - Następnie możliwe przechowywanie suche

Zamknięty cykl paliwowy reaktora energetycznego – przetwarzanie wypalonego paliwa jądrowego

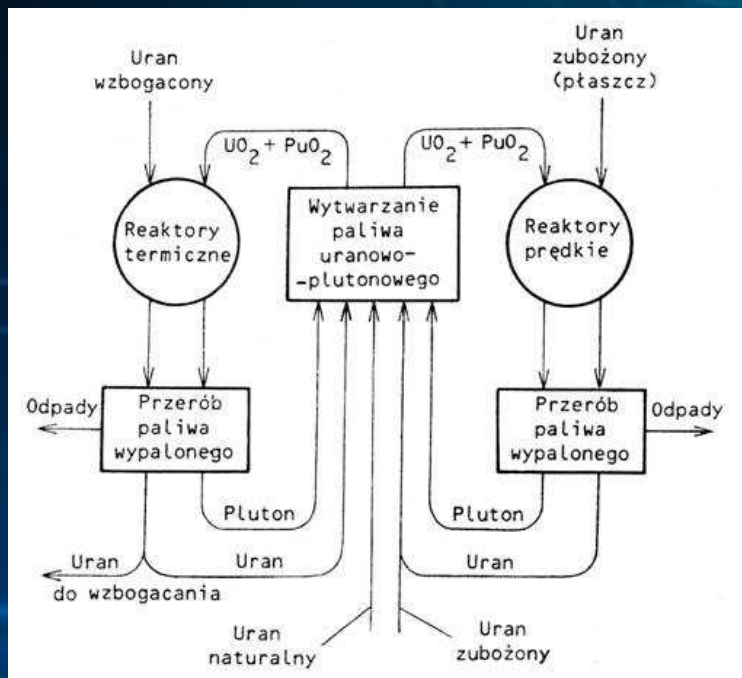
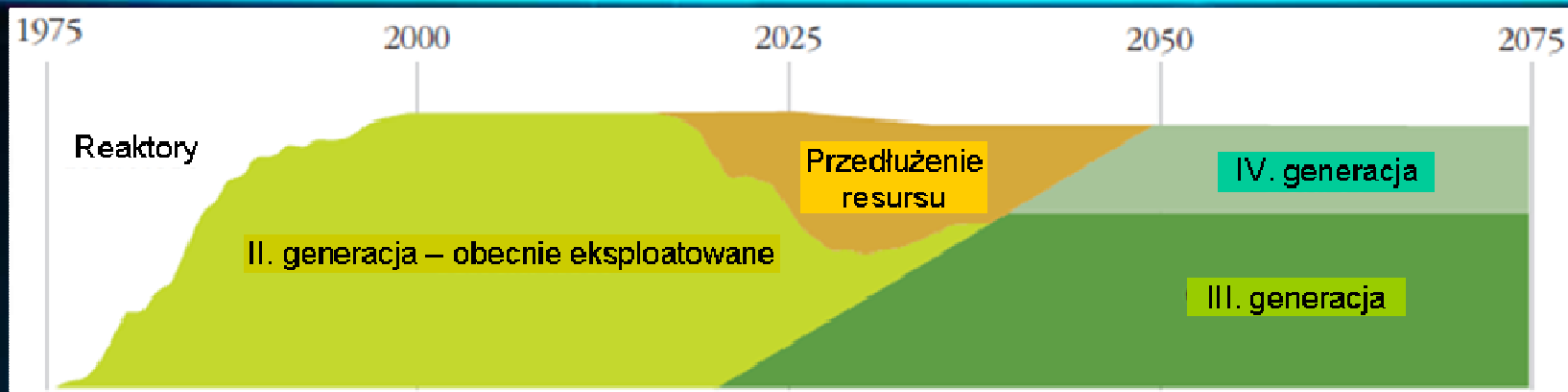


Rozpad promieniotwórczy radionuklidów zawartych w wypalonym paliwie jądrowym – korzyści z przetwarzania paliwa



- Transport wypalonego paliwa do zakładów przetwarzania po 1-3 latach schładzania w basenie wodnym
- Recyklicacja U i Pu (wytwarzanie i wykorzystanie paliwa MOX)
 - zwiększenie wykorzystania potencjału energetycznego paliwa i oszczędność do 30% uranu
 - Koszt paliwa MOX ok. 5% wyższy do uranowego (uwzględniając oszczędność uranu)
- 4-5 krotne zmniejszenie objętości odpadów wysokoaktywnych
- 10-krotne zmniejszenie radiotoksyczności izotopów długo-życiowych \Rightarrow skrócenie wymaganego okresu izolacji od biosfery do 300 lat

Reaktory IV generacji – symbioza reaktorów termicznych i prędkich



- Odpady współczesnej EJ – paliwem dla reaktorów IV generacji
 - 50 lat pracy reaktora LWR \Rightarrow zasób paliwa wypalonego dla 1 reaktora prędkiego
- Zamknięte cykle paliwowe z wielokrotnym recyklingiem U, Pu i Th
- Ok. 100-krotne zwiększenie wykorzystania potencjału energetycznego paliwa
- Wypalanie rzadkich aktynowców i innych długożyciowych izotopów
- Radykalna redukcja ilości i aktywności odpadów i wymaganego czasu ich izolacji od biosfery

Ocena wystarczalności zasobów uranu

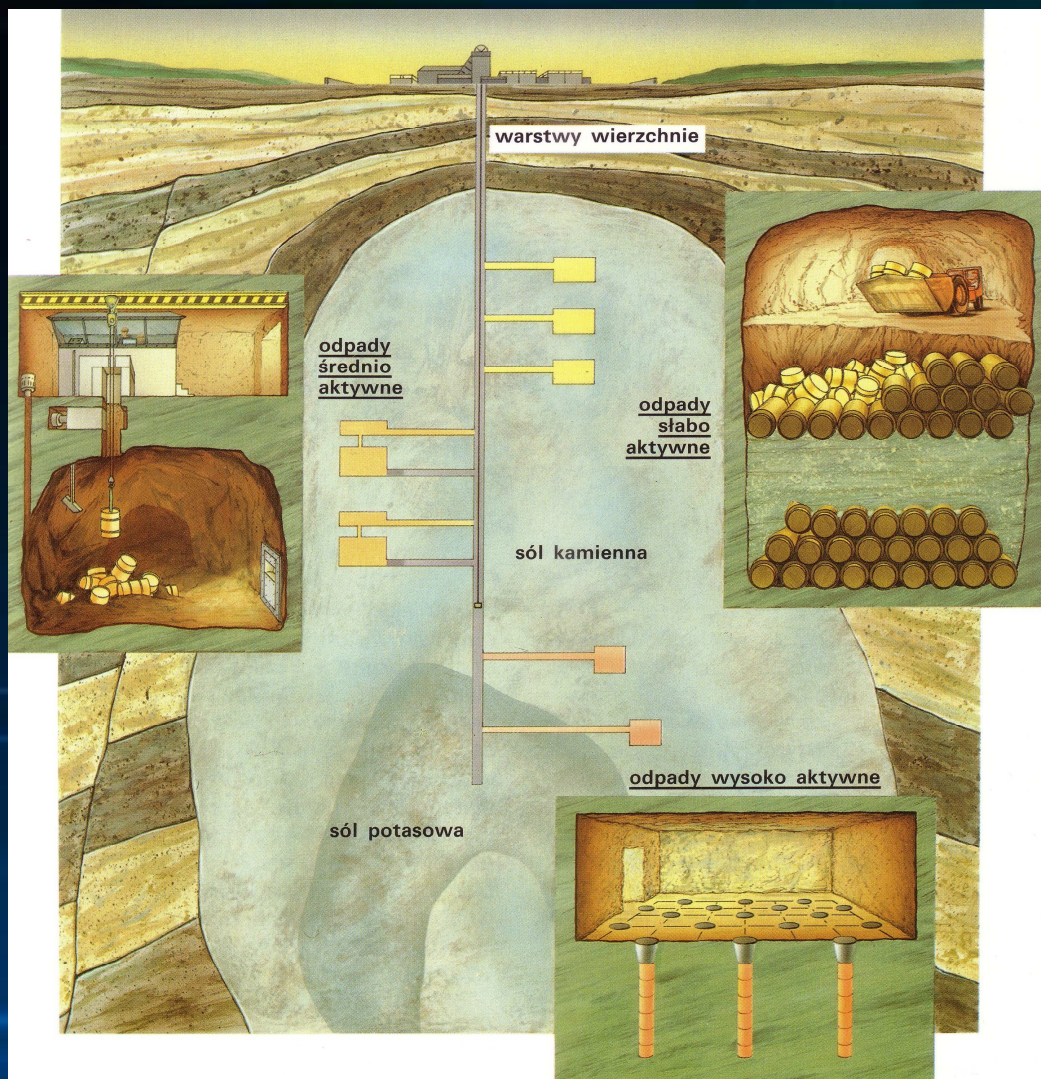
Okres w latach na jaki wystarczy uranu przy obecnej mocy elektrowni jądrowych

[na podstawie: „Climate change and nuclear power 2008”, IAEA]

Kategoria zasobów	Zidentyfikowane	Wszystkie konwencjonalne	Konwencjonalne i niekonwencjonalne, w tym fosforany
Reaktory LWR / obecny cykl otwarty	100	300	1 690
Prędkie reaktory powielające, recykling Pu	3 070	8 990	56 680
Prędkie reaktory powielające recykling uranu i aktynowców / cykl zamknięty	24 000	71 000	472 000

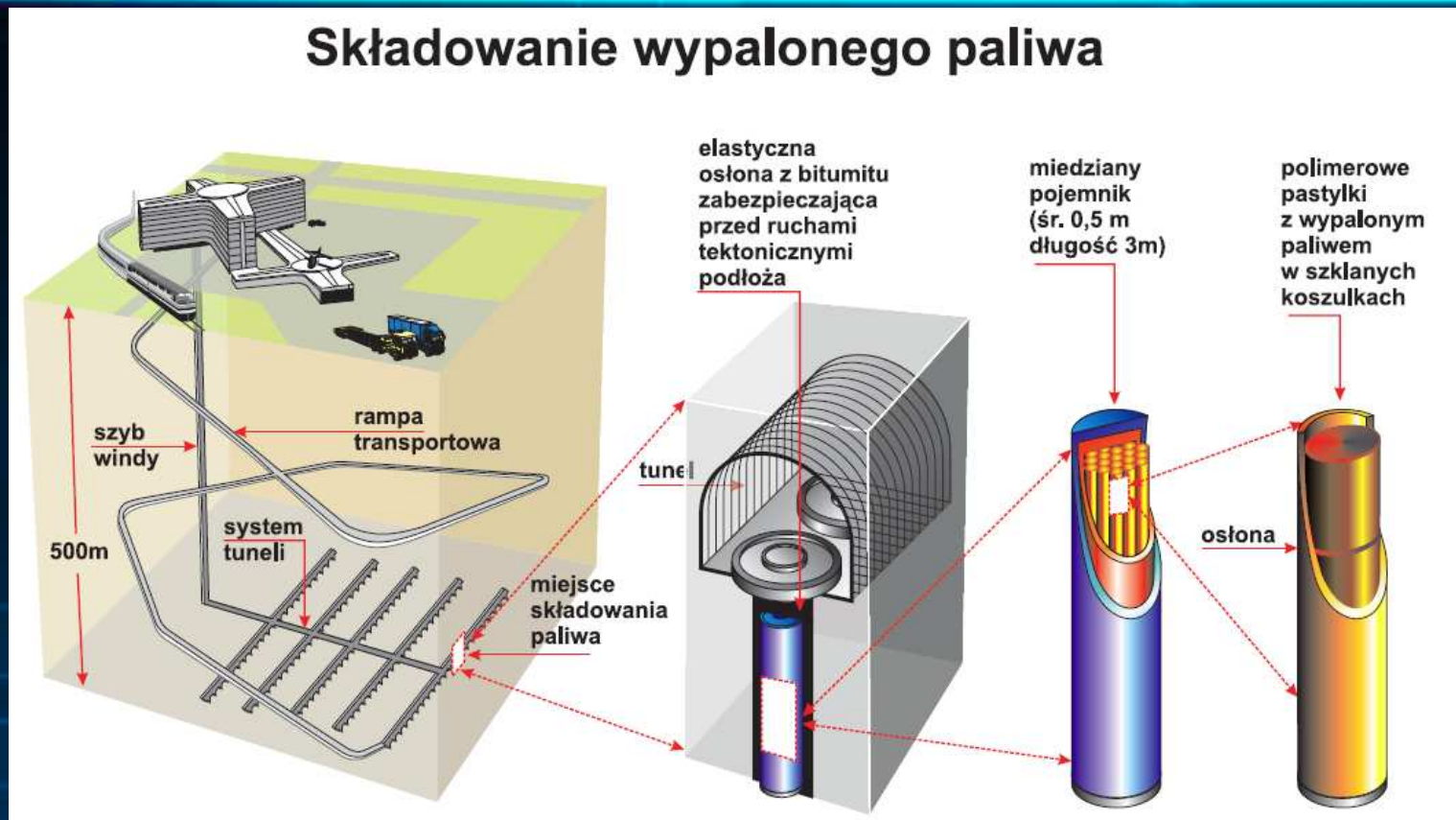
Oprócz tego: Th232, z którego można wytworzyć w reaktorze rozszczepialny U233 – a zasoby Th232 są ok. 4-krotnie większe od zasobów uranu

Ilość odpadów promieniotwórczych i sposób ich składowania



- **Roczna ilość** odpadów z EJ 1000 MW_e (LWR):
~ 180 m³
- **Wysoko-aktywne** ⇒ głębokie składowiska geologiczne:
 - ~ 3 m³ (po przetworzeniu wypalonego paliwa)
 - lub wypalone paliwo bez przetworzenia: ~13 m³
- **Średnio-aktywne**: 10-22 m³ ⇒ składowiska podziemnie średnio-głębokie
- **Nisko-aktywne** (reszta): 155-160 m³ ⇒ składowiska powierzchniowe
- **Koszty** unieszkodliwiania odpadów: ~1% łącznych kosztów wytwarzania energii elektrycznej

Składowanie wypalonego paliwa



- **Głębokość: rzędu 500 m**
- **Wielokrotne bariery:**
 - Pastyłki paliwa zalane szkłem lub w polimerze i umieszczone w szklanych koszulkach
 - Miedziane pojemniki
 - Elastyczna osłona z bitumitu lub gliny bentonitowej
 - Skąła: stabilna i nieprzepuszczalna formacja geologiczna

Składowanie odpadów z przerobu wypalonego paliwa

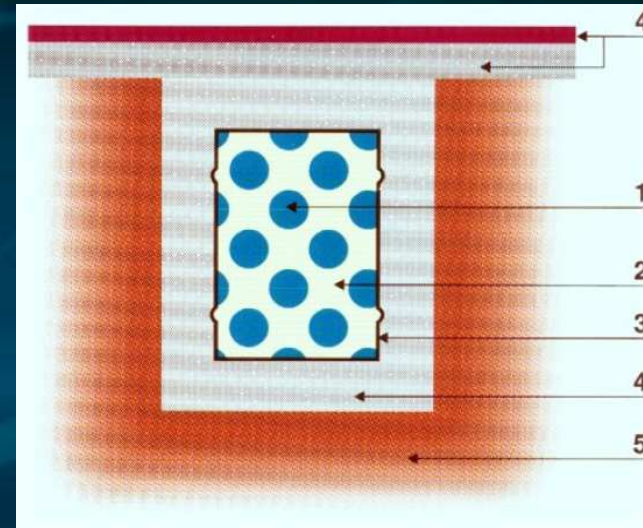


Pojemniki zeszkliwionych odpadów wysoko-aktywnych długo-życiowych z przerobu wypalonego paliwa (AREVA, Francja)



Składowisko odpadów wysoko-aktywnych długo-życiowych (Bure, Francja)

Unieszkodliwianie i składowanie odpadów średnio i nisko-aktywnych



Bariery ochronne:

1. Chemiczna
2. Fizyczna
3. I inżynierska
4. II inżynierska
5. Naturalna



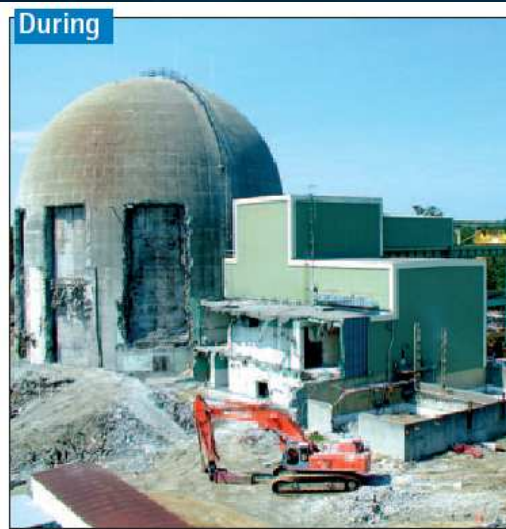
Kondycjonowane odpady niskoaktywne
[ZUOP Świerk]



KSOP w Różanie [ZUOP Świerk]

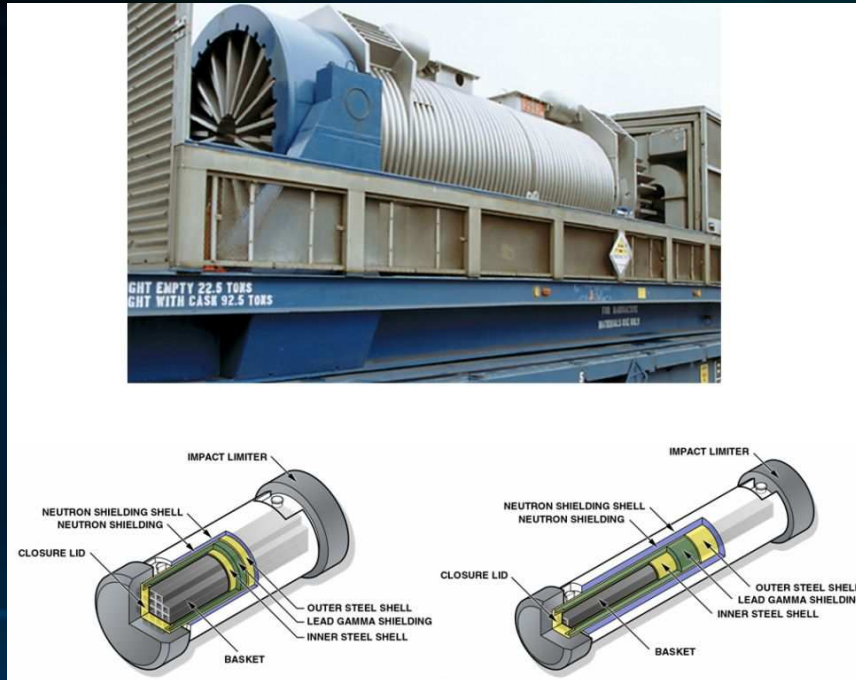
Likwidacja elektrowni jądrowej

– przykład: Maine Yankee (USA), PWR 900 MW_e



- Do X 2010 r. zlikwidowano na świecie: 80 reaktorów energetycznych
- Koszty likwidacji reaktorów III. generacji: <20% nakładów na budowę (wg. MIT 2009: 17,5%)
 - Kapitał na likwidację odkłada się na specjalnym rachunku bankowym przez 40 lat eksploatacji
 - Koszty likwidacji: <0,5% kosztów wytwarzania energii elektrycznej
- Dawki napromieniowania pracowników są niskie a wpływ radiologiczny na środowisko nieznaczny

Transport wypalonego paliwa i odpadów promieniotwórczych



- Pojemniki muszą spełniać surowe normy bezpieczeństwa MAEA
- Testy wymagane dla pojemników typu „B” obejmują:
 - Uderzenie pociągu jadącego z pełną prędkością w zaporę betonową
 - Uderzenie pociągu w bok pojemnika
 - Upadek pojemnika z wysokości 9 m na twardą powierzchnię betonową
 - Odporność na przebicie prętem metalowym
 - Pożar
 - Zatopienie pojemnika



**Dziękuję Państwu za
uwagę!**