



**BUDOWA ELEKTROWNI JĄDROWEJ –  
TECHNOLOGIA , FINANSOWANIE,  
BEZPIECZEŃSTWO I ZARZĄDZANIE PROJEKTEM**  
Poznań, 23 kwiecień 2018 r.

---

**Bezpieczeństwo pierwszej polskiej  
elektrowni jądrowej**

**Dr inż. A. Strupczewski, prof. NCBJ**

Przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

# Główne źródło zagrożenia w EJ – produkty rozszczepienia w paliwie jądrowym



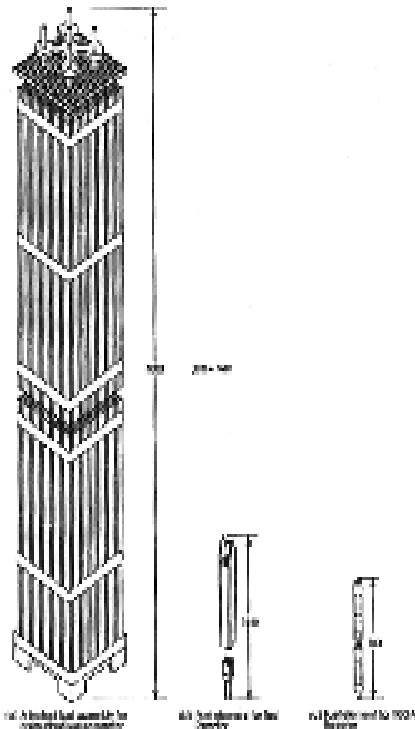
**Energia jądrowa daje energię – ale i radioaktywne produkty rozszczepienia.**

Paliwo – to pastylki UO<sub>2</sub>, o średnicy 10 mm, tworzące pręty cylindryczne o wysokości 3-5 m i zamknięte w koszulki ze stopu cyrkonu, odporne na temperatury do 1200 °C.

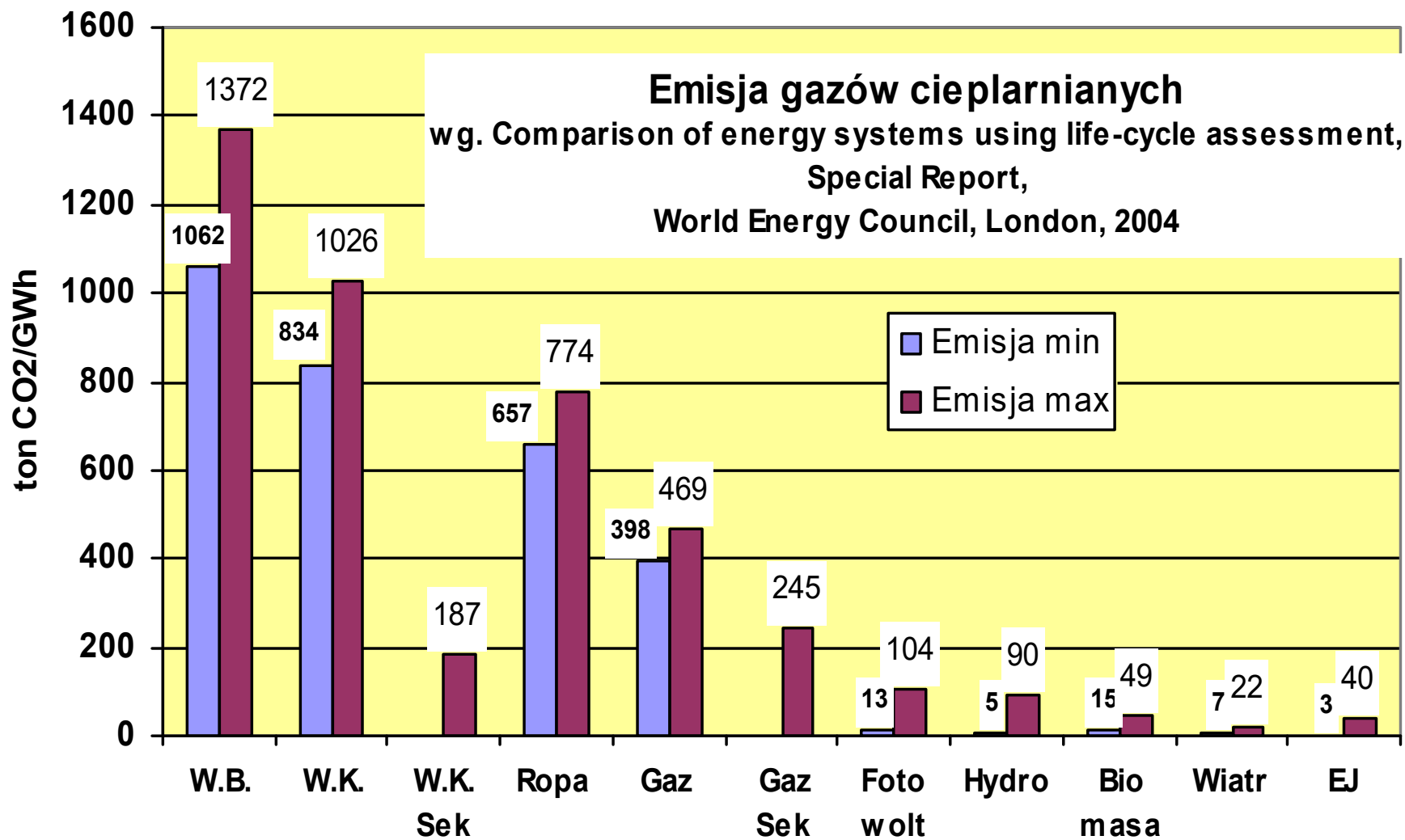
Ciepło odbiera woda o temperaturze 300 - 340°C

W temperaturach 300-400 oC produkty rozszczepienia pozostają w całości w paliwie.

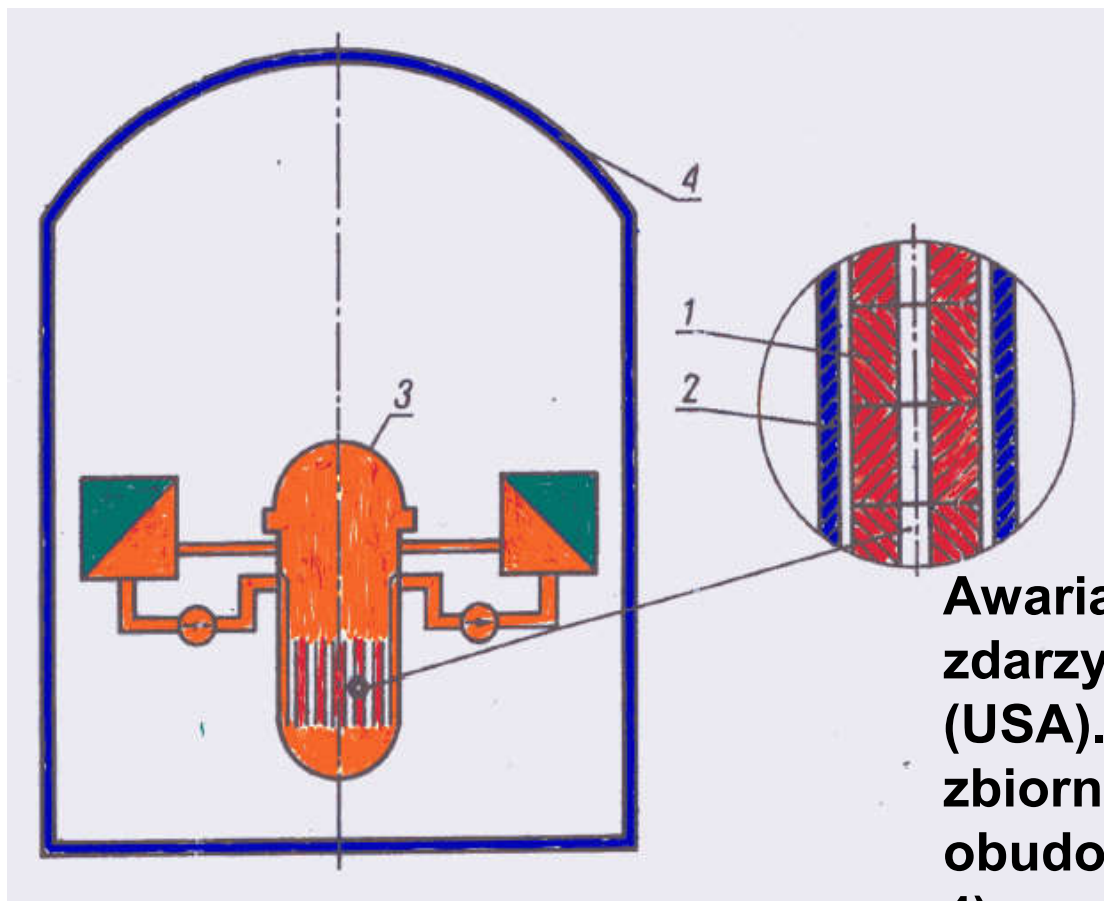
Jak długo paliwo jest chłodzone skutecznie wodą – nie ma istotnego zagrożenia radiologicznego poza EJ.



# Rola EJ w walce z CO2 wg bezstronnych ocen Światowej Rady Energetycznej



# Układ wielu barier - bezpieczeństwo zachowane w razie utraty dwóch, a nawet trzech z nich.



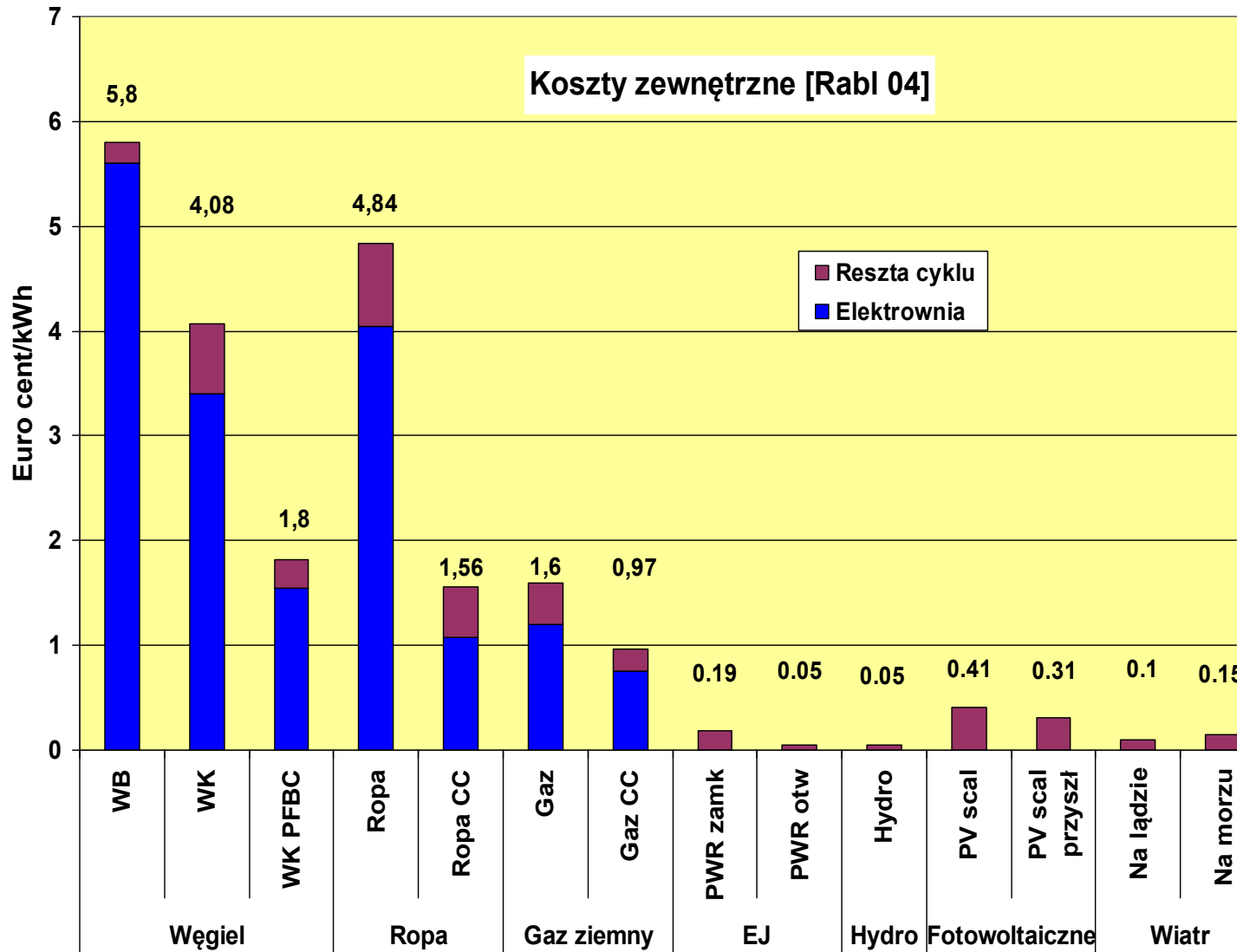
Układ barier w EJ:

1. Pastyłki paliwowe,
2. Koszulka cyrkonowa,
3. Zbiornik reaktora,
4. Obudowa bezpieczeństwa

Awaria ze stopieniem rdzenia zdarzyła się w reaktorze PWR w TMI (USA). Utracono bariery 1 i 2, ale zbiornik reaktora (bariera 3) – i obudowa bezpieczeństwa (bariera 4) pozostały szczelne

Awaria w TMI nie spowodowała żadnych szkód zdrowotnych

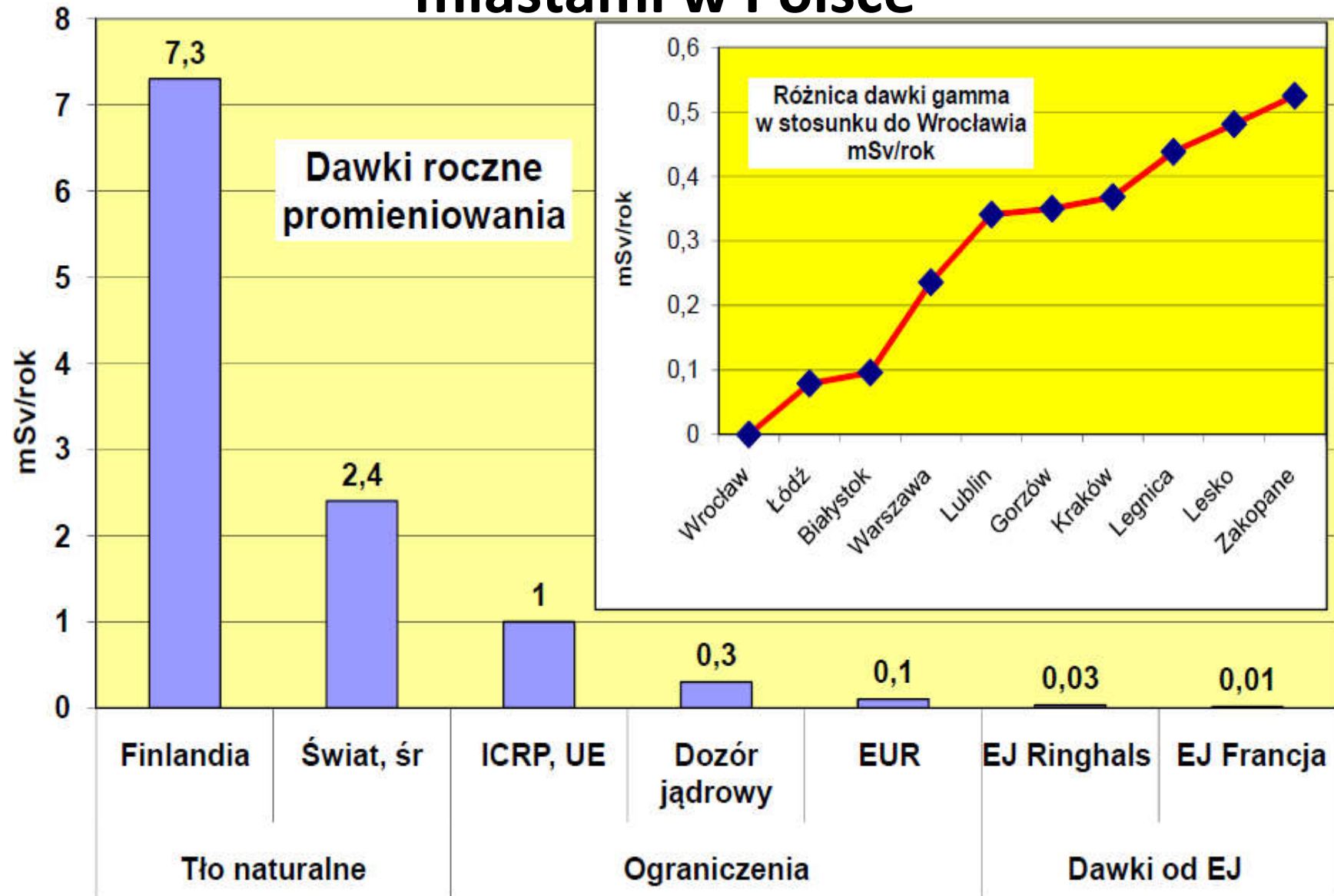
# Skutki zdrowotne wytwarzania elektryczności z różnych źródeł w UE-15 [Rabl 04]



Straty zdrowia przeliczone na pieniądze – wyniki programu ExternE

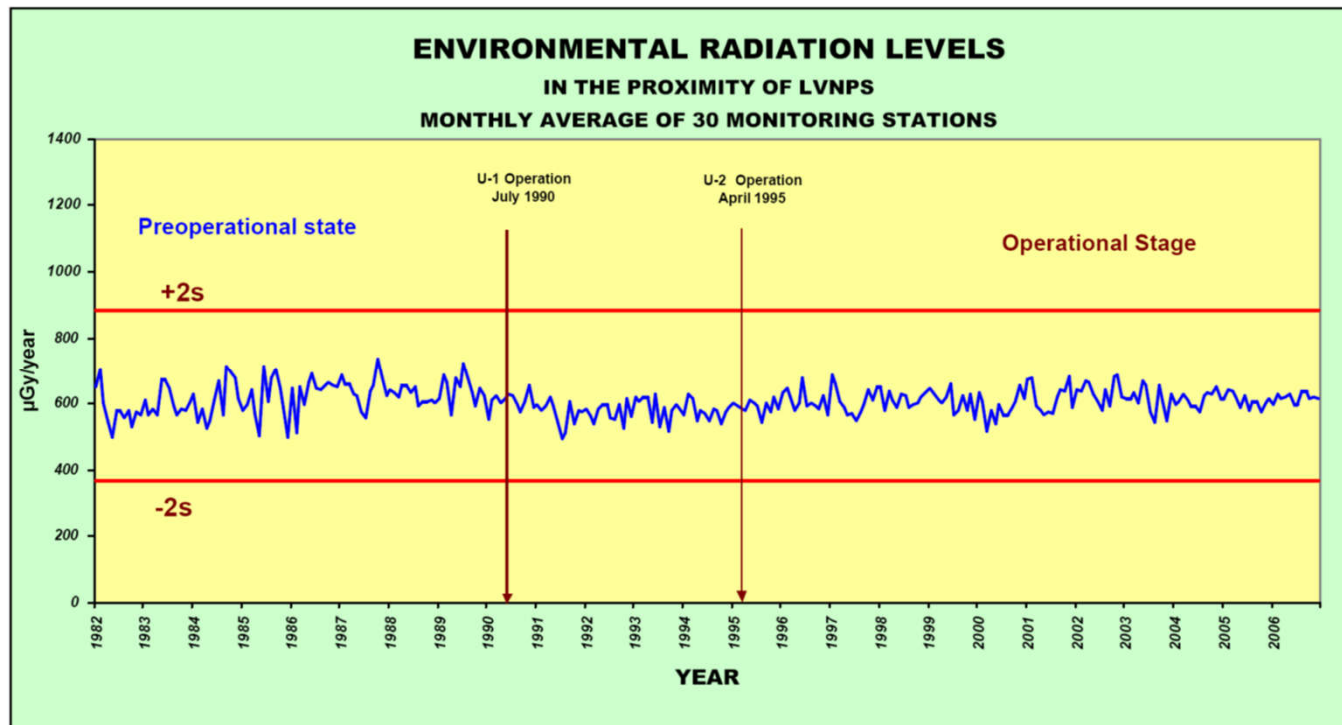
PFBC- spalanie w złożu usypanym pod ciśnieniem, CC- cykl kombinowany, PWR otw. – cykl paliwowy otwarty, PWR zamk. - cykl paliwowy zamknięty

# Dawki od EJ mniejsze niż różnice między miastami w Polsce



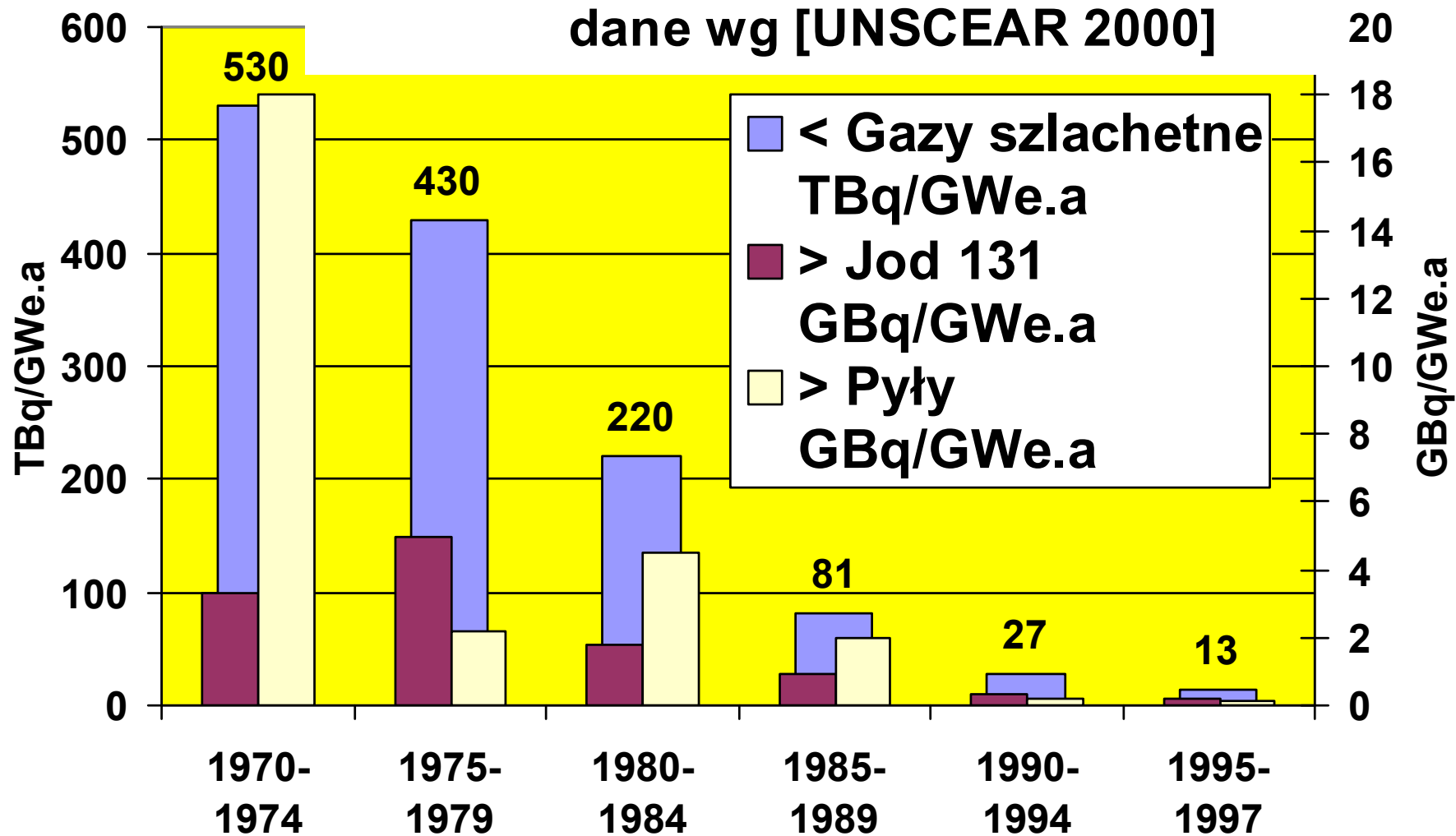
# Czemu dawka od EJ Rinhals na poprzednim rysunku była większa od średniej?

Ta zwiększona moc dawki to efekt awarii przepalenia elementu paliwowego. Jak widać, nie jest to katastrofa – moc dawki pozostaje poniżej zaleceń energetyki europejskiej (European Utilities Requirements), znacznie poniżej wymagań dozoru jądrowego i dużo niżej niż wynoszą wahania tła naturalnego między miastami w Polsce.



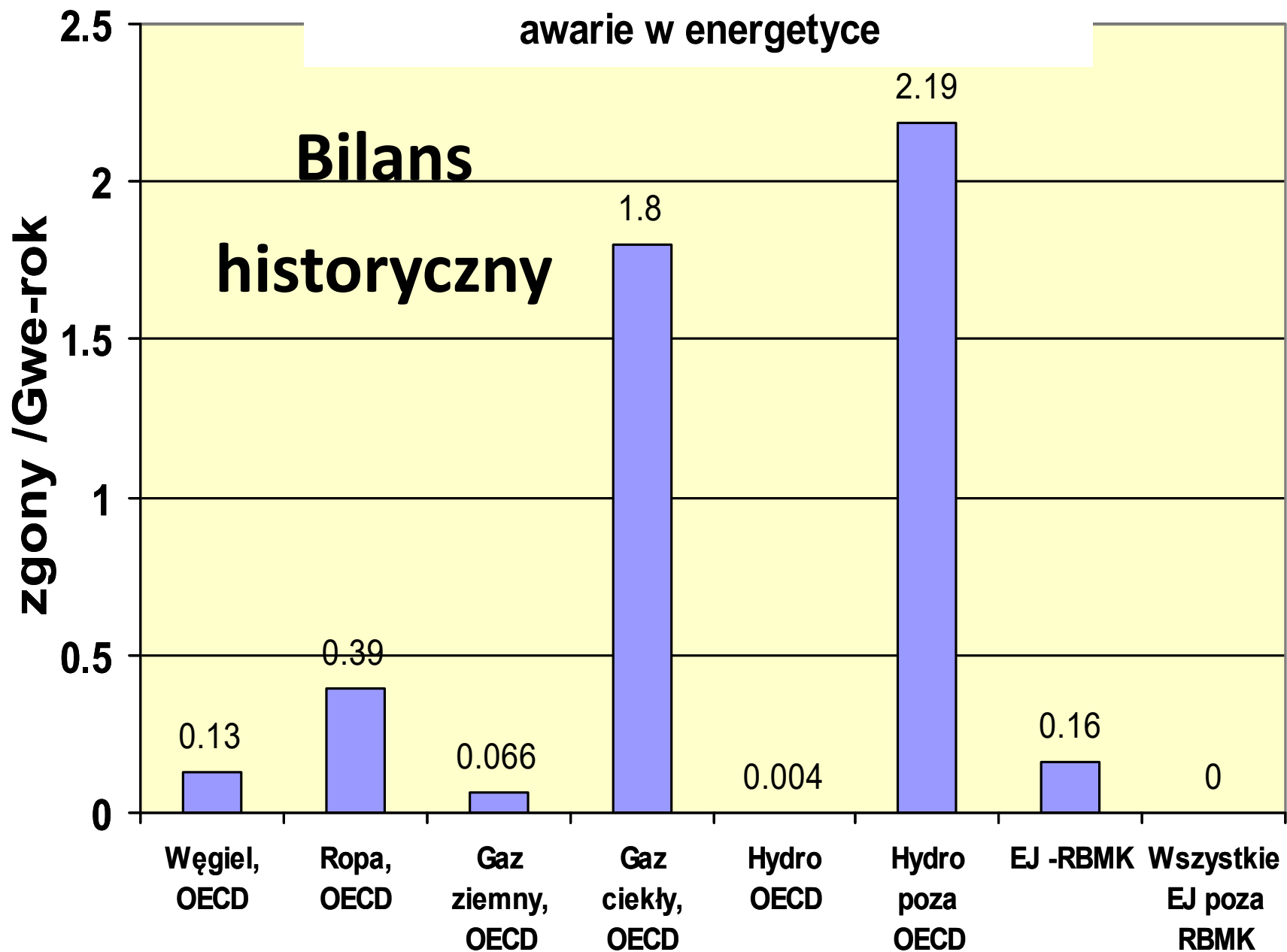
A uruchomienia elektrowni nie daje się zauważyć na wykresach przykład - wykres radioaktywność i powietrza EJ Laguna Verde.

## Emisje z reaktorów PWR na jednostkę energii, dane wg [UNSCEAR 2000]





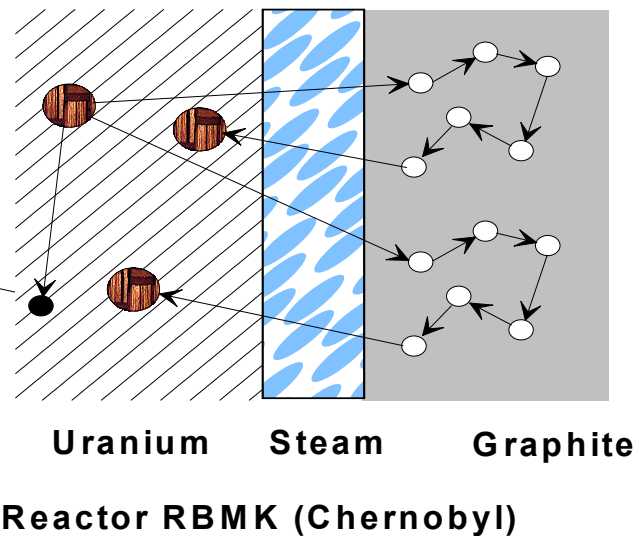
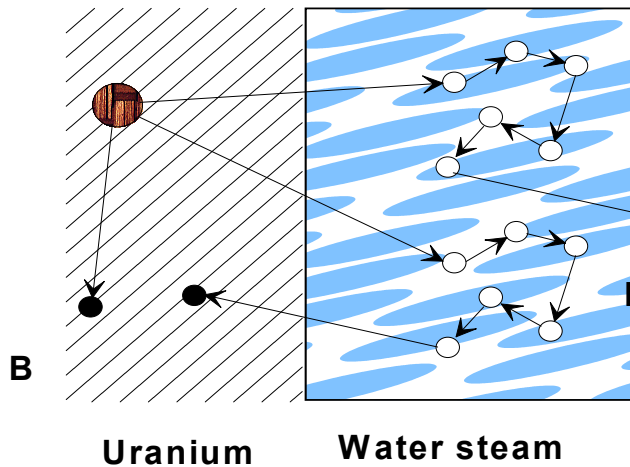
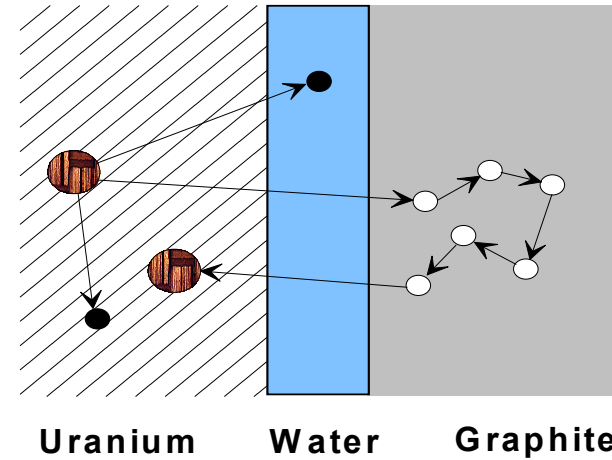
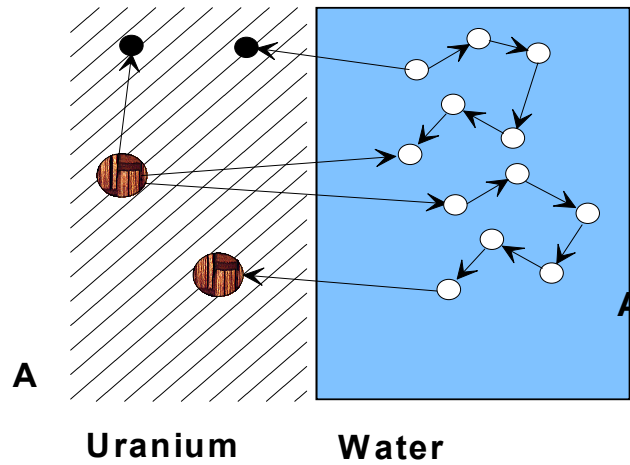
# Wczesne zgony spowodowane przez ciężkie awarie w energetyce



# Współczynnik mnożenia neutronów

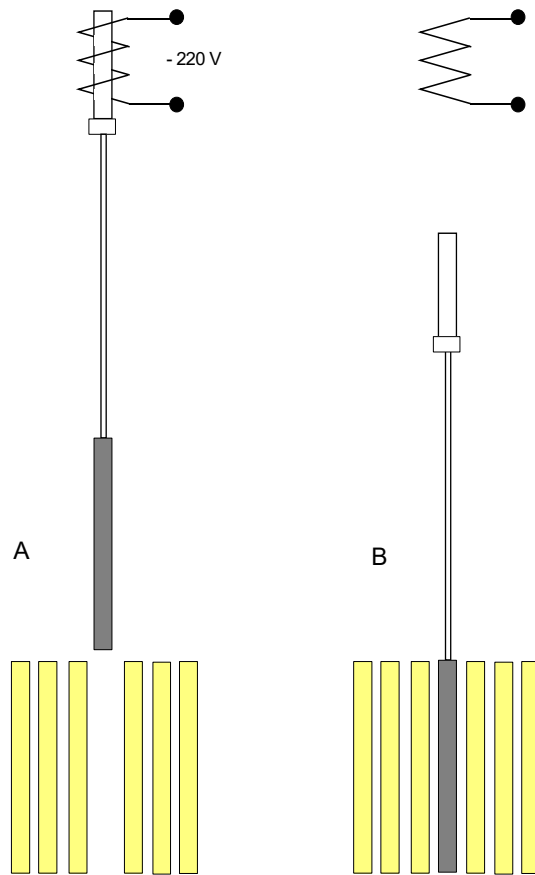
Reaktor wodny- przy grzaniu wody moc maleje

Reaktor w Czarnobylu- przy grzaniu moc rośnie



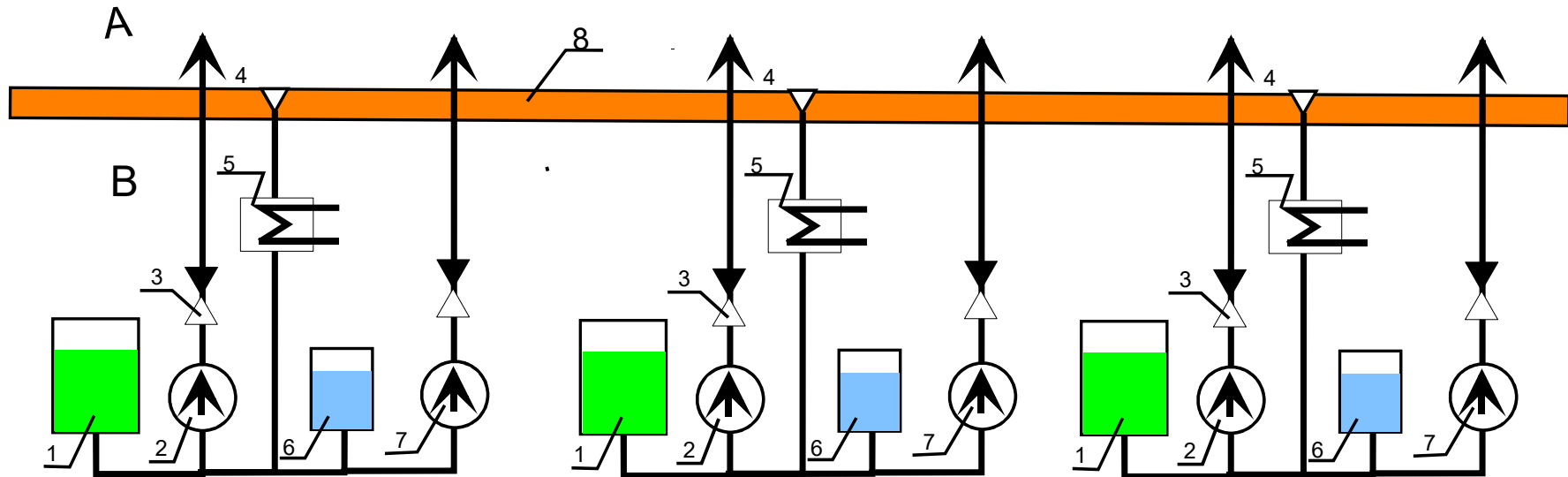
Reactors PWR and WWER

# Naturalne cechy bezpieczeństwa EJ – wykorzystanie siły ciężkości



- Wykorzystanie sił przyrody by uzyskać maksymalną niezawodność układów bezpieczeństwa
- Podczas normalnej pracy pręty bezpieczeństwa wiszą nad rdzeniem, utrzymywane w górze przez elektromagnesy.
- W razie awarii, lub utraty zasilania elektrycznego, pole magnetyczne znika i pręty spadają do rdzenia pod wpływem siły ciężkości.

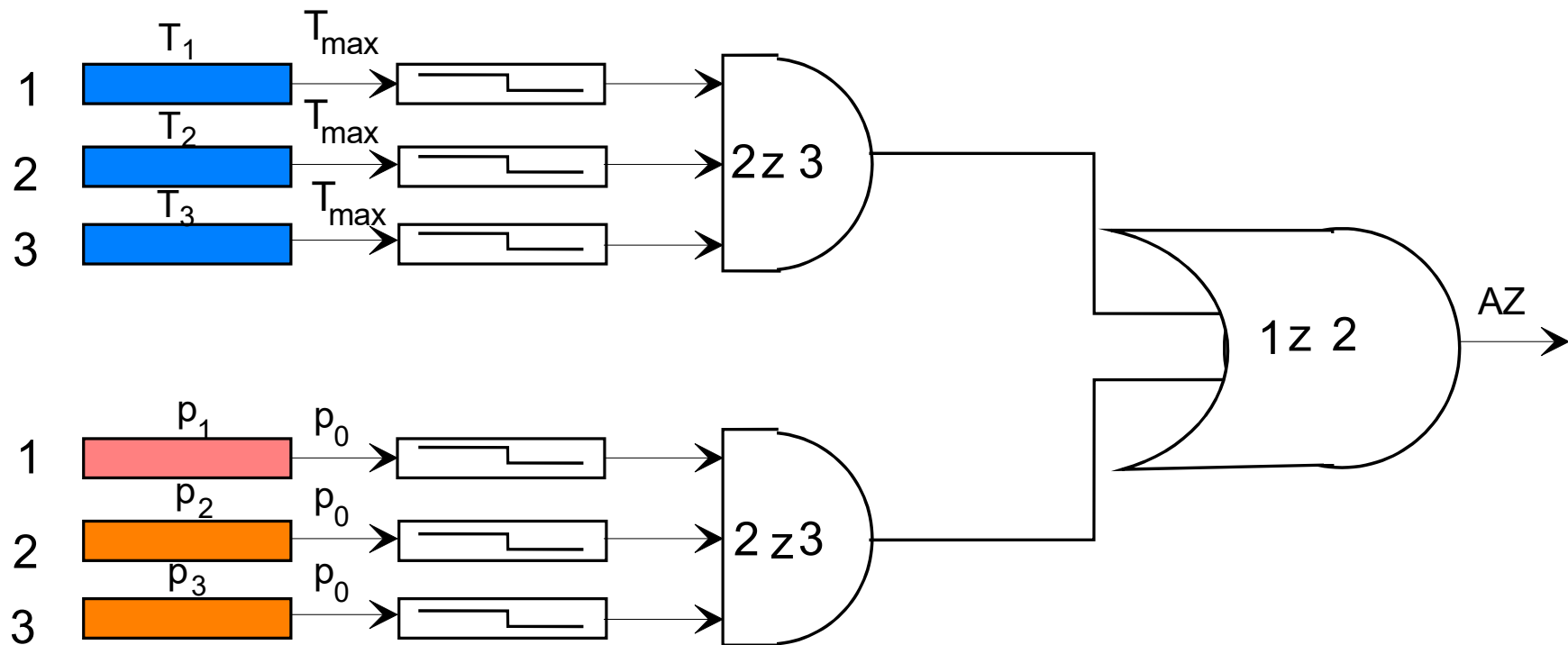
# Rezerwowanie z nadmiarem dla układów ważnych dla bezpieczeństwa



## **Aktywny układ awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR).**

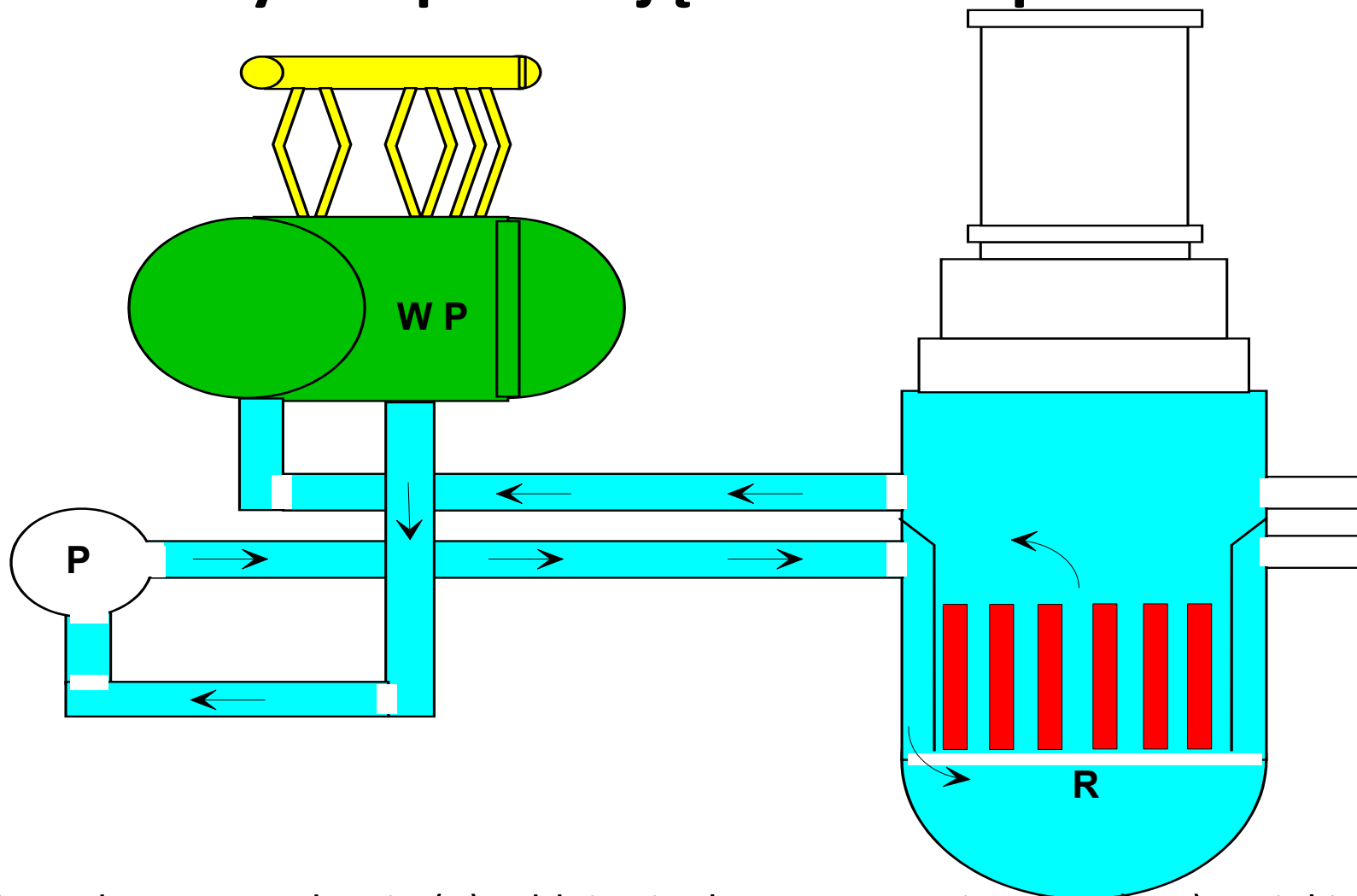
*A – obszar wewnątrz obudowy bezpieczeństwa, B – obszar poza obudową bezpieczeństwa, 1 – zbiornik UACR, 2 – pompa niskociśnieniowa UACR, 3 – zawór zwrotny, 4 – miska ściekowa, 5 – wymiennik ciepła, w którym ciepło powyłączeniowe przejmowane przez UACR jest przekazywane do układu wody technicznej, 6 – zbiornik UACR o wysokim stężeniu kwasu borowego, 7 – pompa wysokociśnieniowa UACR, 8 – ściana obudowy bezpieczeństwa.*

# Różnorodne sygnały stosowane do awaryjnego wyłączenia reaktora.

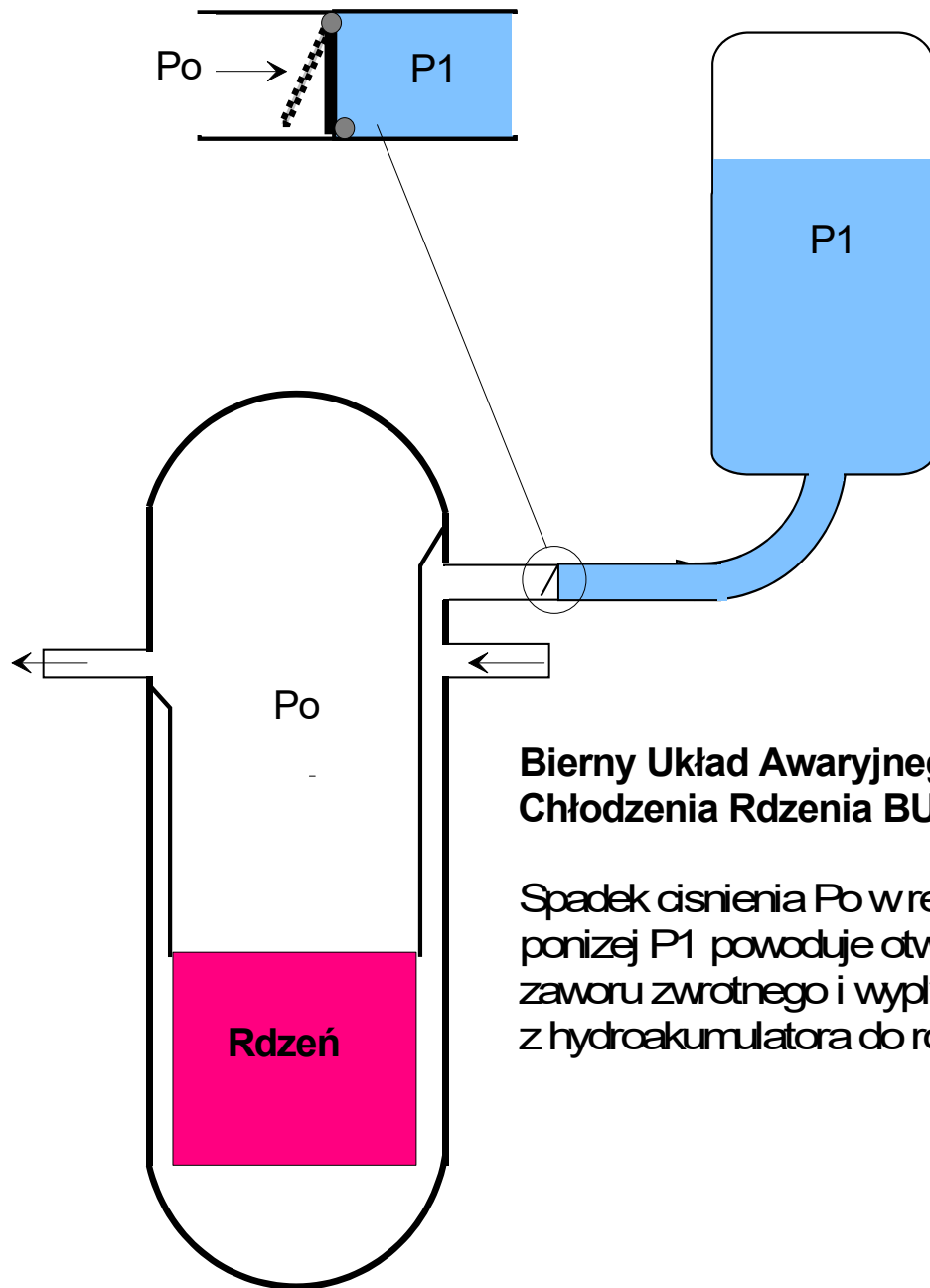


Jeśli dwa z trzech czujników temperatury wykażą przekroczenie progu, reaktor zostanie wyłączony. Aby jednak zapewnić różnorodność, podobny układ sygnałów działa w oparciu o pomiar ciśnienia.

# Prawa fizyki zapewniają odbiór ciepła z rdzenia.



Woda podgrzana w rdzeniu (R) oddaje ciepło w wytwornicy pary (WP). Dzięki różnicy poziomów WP i rdzenia reaktora **konwekcja naturalna wystarcza** do odbioru mocy powyłączeniowej bez potrzeby uruchomienia pompy (P).



**Bierny Układ Awaryjnego Chłodzenia Rdzenia BUACR.**

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

## Różnica ciśnień zapewnia zalanie wodą rdzenia

Póki rdzeń jest chłodzony, póty reaktor jest bezpieczny.

Przykład wykorzystania różnicy ciśnień do zalania rdzenia wodą w przypadku awarii utraty chłodziwa. Zawór zwrotny otwiera się samoczynnie, gdy ciśnienie w reaktorze spadnie poniżej ciśnienia w hydroakumulatorze.

# Ostateczna bariera chroniąca otoczenie EJ – obudowa bezpieczeństwa

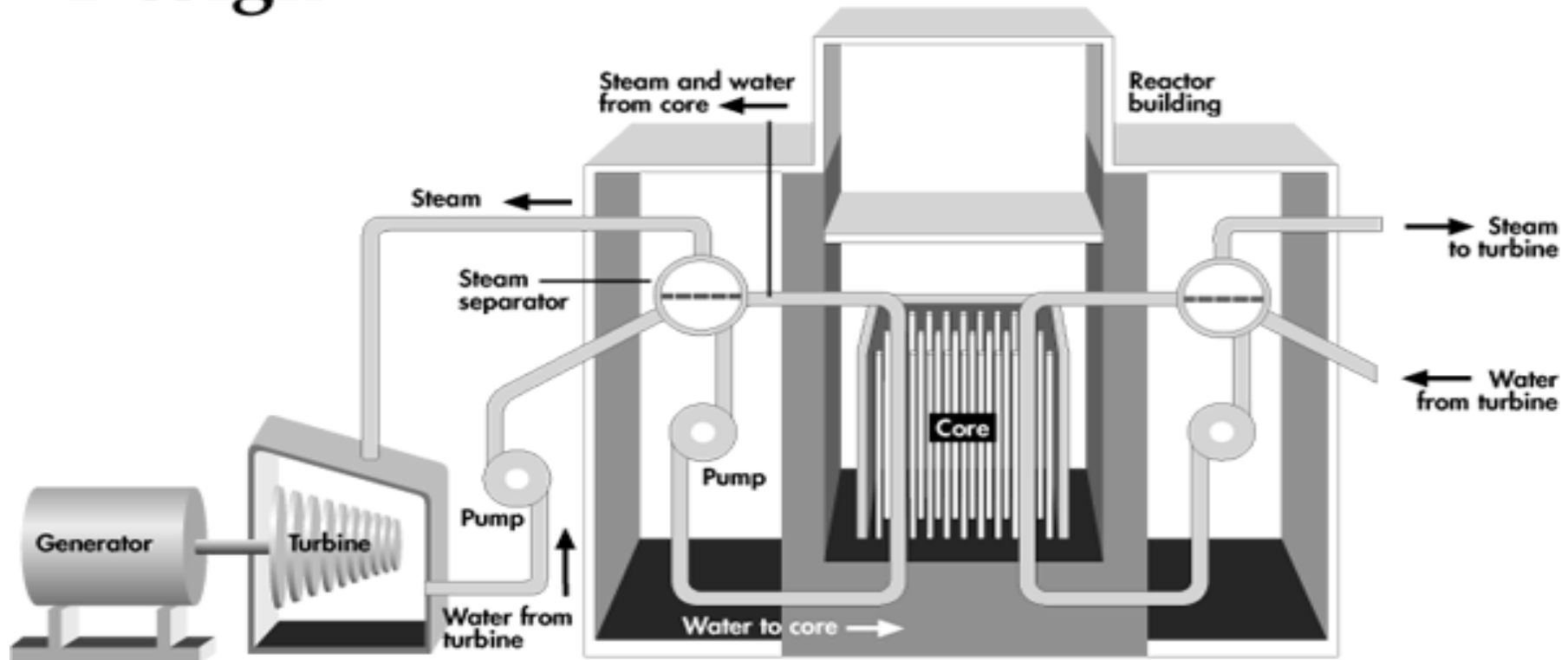
EJ z PWR w San Onofre: Niezawodna obudowa bezpieczeństwa.





# W RBMK nie było obudowy bezpieczeństwa...

## RBMK Reactor Design



Source: Nuclear Energy Institute

## Niebezpieczne cechy reaktora RBMK

**Wbudowana niestabilność**, która po wzroście temperatury prowadzi do wzrostu mocy reaktora.

**Błąd projektowy** – wprowadzenie pręta regulacyjnego przejściowo zwiększało reaktywność.

Cechy te spowodowały bardzo szybki wzrost mocy do mocy wielokrotnie większej od dopuszczalnej. Paliwo reaktora musiało ulec przegrzaniu, uran stopił się i odparował, a produkty radioaktywne uwolniły się poza reaktor.

## Dalsze **niebezpieczne** cechy reaktora RBMK

Układ awaryjnego chłodzenia rdzenia można było odłączyć – i operator to zrobił...

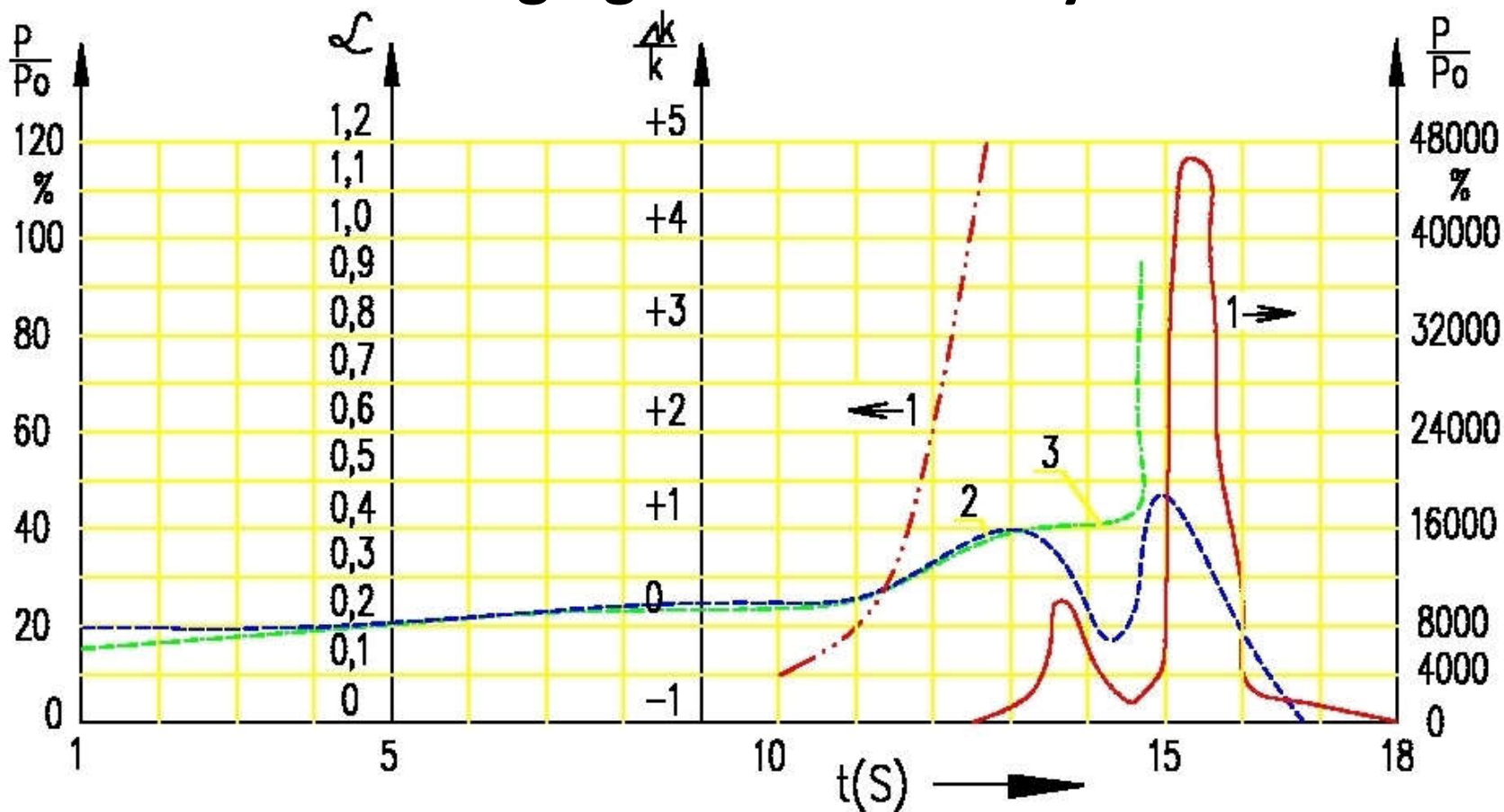
Sygnaly powodujące **zrzut prętów bezpieczeństwa można było wyłączyć** – i operator to zrobił ...

Praca z małą liczbą prętów bezpieczeństwa rdzeniu była **niebezpieczna** – ale nie napisano tego w raporcie bezpieczeństwa ...

**Nie było kultury bezpieczeństwa** – chęć osiągnięcia celu przed 1 maja wystarczyła by operator złamał przepisy bezpieczeństwa...

Dyspozytor sieci energetycznej utrzymał reaktor na mocy dla zaspokojenia potrzeb sieci mimo że **powodowało to zagrożenie**

## Dodatni współczynnik reaktywności doprowadził do nagłego wzrostu mocy



1. Moc reaktora  $P/P_0$  (w czasie od 10 do 13 s. wielkość mocy pokazuje skala na lewo, od 0 do 120% mocy nominalnej, po 13 s. skala na prawo, od 0 do 48 000% mocy nominalnej) 2. Reaktywność  $\delta k/k$  3. Objętościowa zawartość pary  $\alpha$

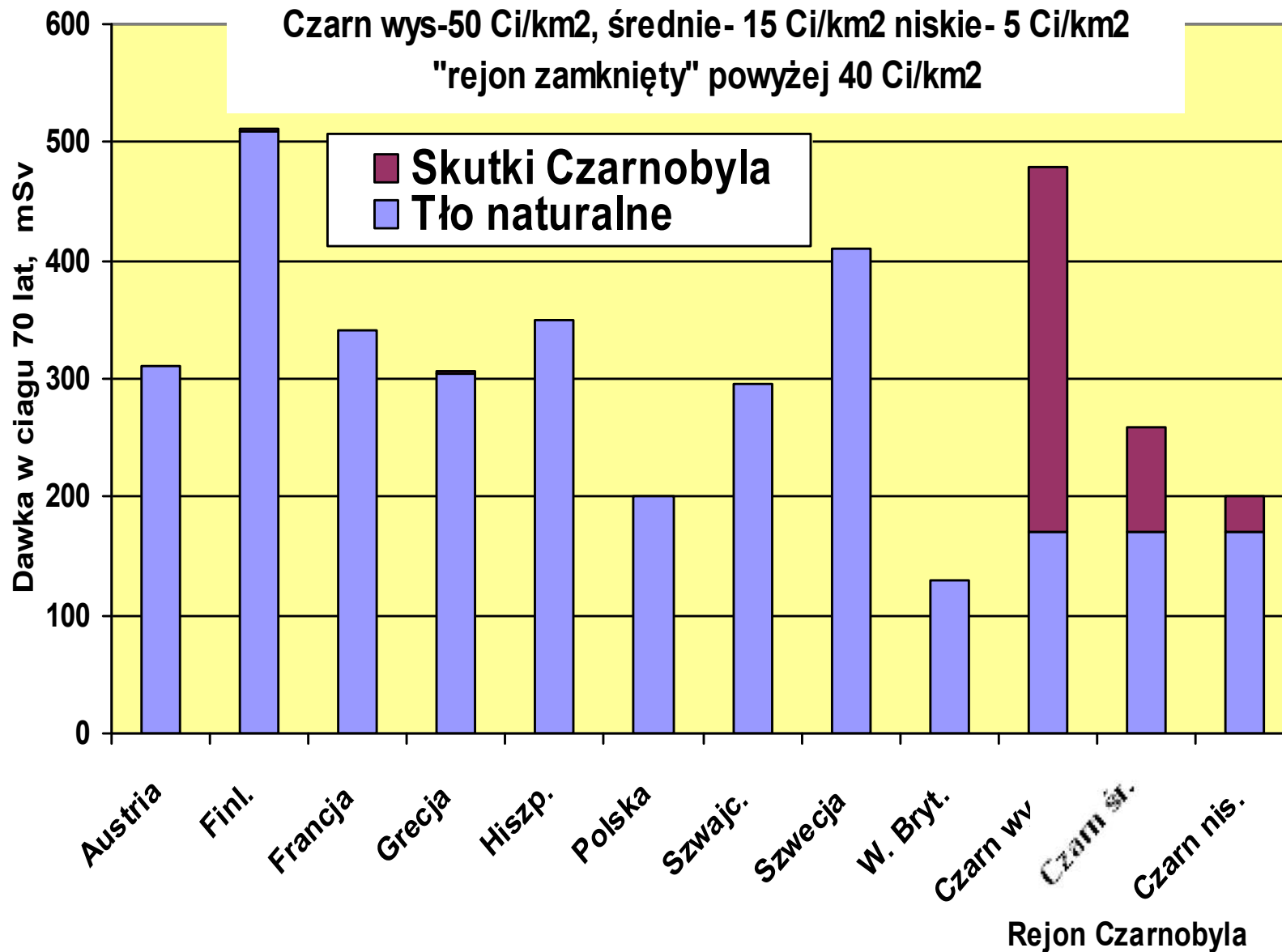
**Figure 31. Radiation Hotspots Resulting From the Chornobyl' Nuclear Power Plant Accident**

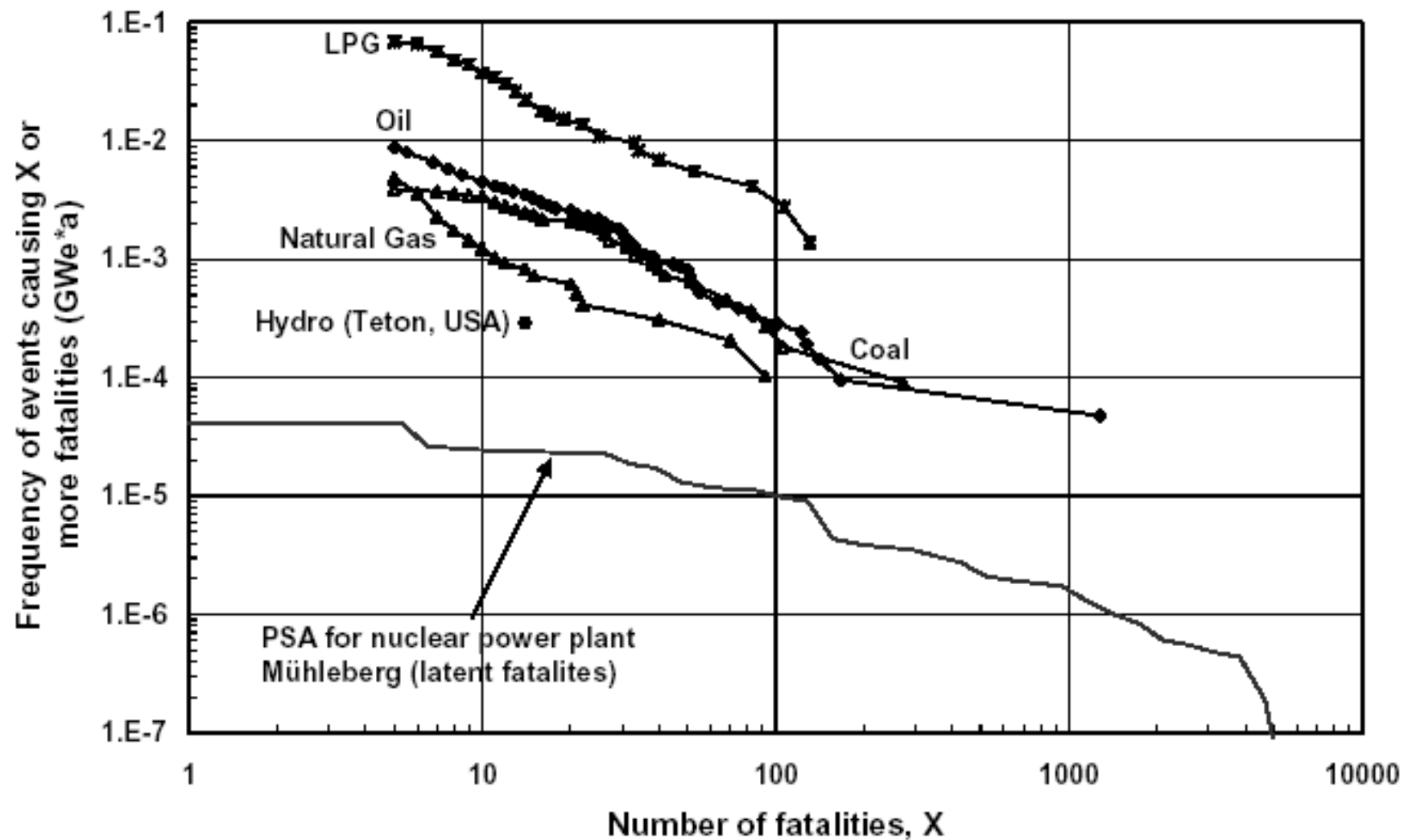


# Dawki promieniowania w różnych rejonach Europy

Czarn wys-50 Ci/km<sup>2</sup>, średnie- 15 Ci/km<sup>2</sup> niskie- 5 Ci/km<sup>2</sup>

"rejon zamknięty" powyżej 40 Ci/km<sup>2</sup>





Częstość awarii powodujących X lub więcej zgonów wg ocen probabilistycznych [·Hirschberg S. et al. Comparison of severe accident risks..., Symp. MAEA, 2001]

# Wielkie trzęsienie ziemi i FUKUSHIMA

## Trzęsienie ziemi i Tsunami

Skutki:

**20000 zgonów**

**Kompletne zniszczenie prowincji**

Przesunięcie poziome całej wyspy o 2 metry.

Zniszczenie 4 reaktorów

**Reaktory nie spowodowały żadnego zgonu!**

Skutki promieniowania:

Dawki efektywne dla dzieci **od 0,01 do 1,2 mSv łącznie- nie groźne.**

Wstrzymanie jedzenia zebranego na powierzchni **zaledwie kilku km<sup>2</sup>**

Nawet największe dawki (230 mSv) otrzymane przez pracowników elektrowni **nie są groźne dla zdrowia**, nie przekraczają dawek dopuszczalnych



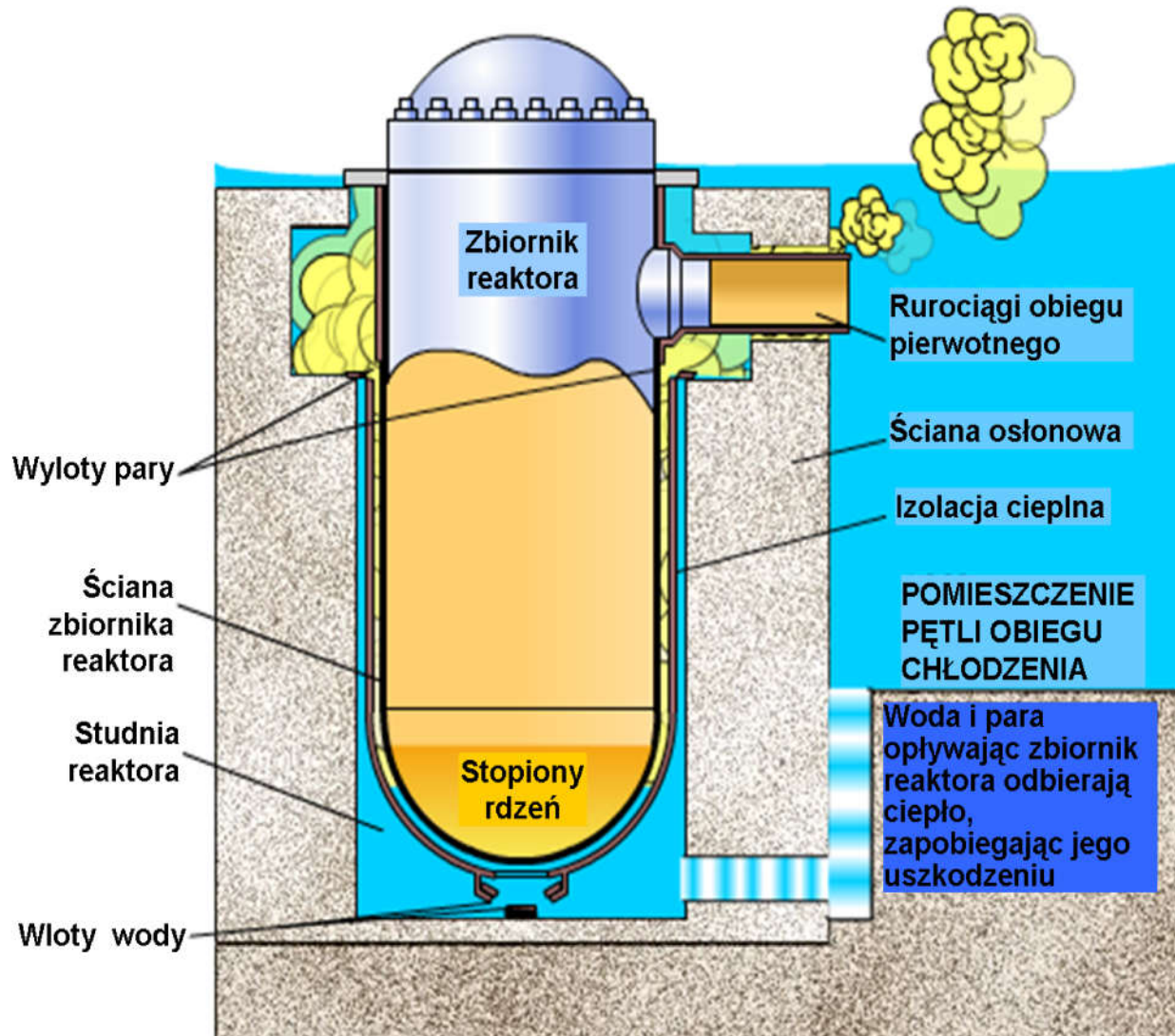
# Wspólna cecha EJ III generacji- odporność na ciężkie awarie

- 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 wokoło reaktora EPR to 800 metrów – nie kilometrów, ale metrów. Okoliczni mieszkańcy są bezpieczni!

# Jak zapewniana 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



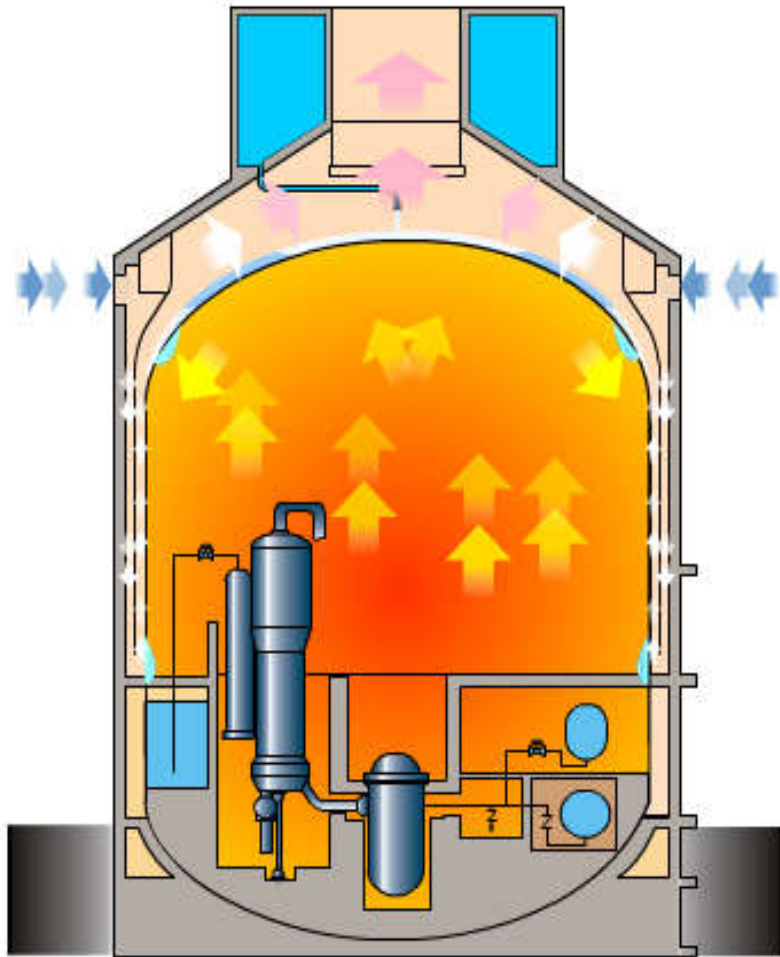
Woda z sąsiedniego basenu zalewa szyb reaktora.

Odbiera ciepło stopionego rdzenia poprzez zbiornik.

Produkty rozszczepienia pozostają w zbiorniku.

Nie ma zagrożenia radiologicznego.

# 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

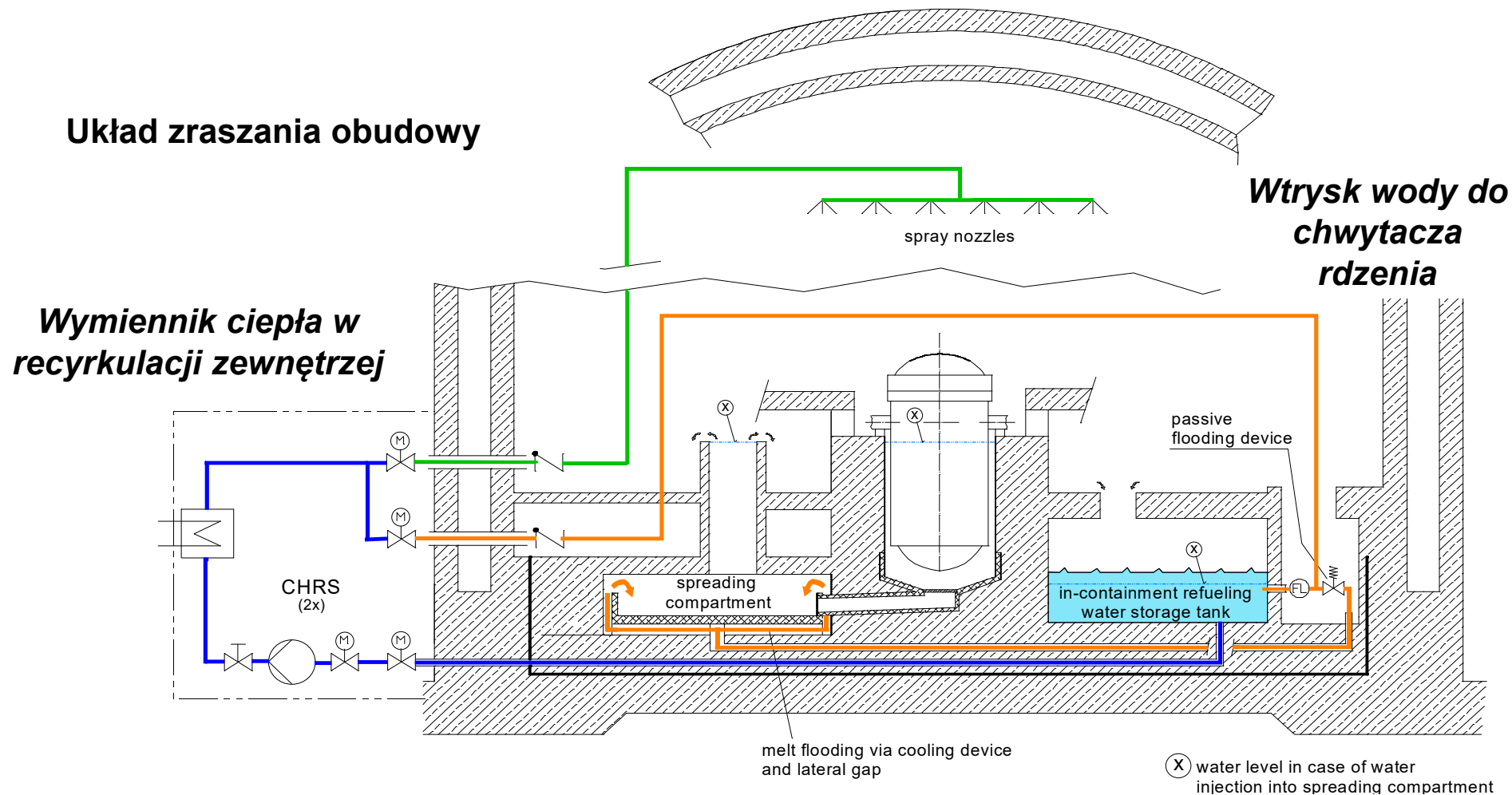
Potem ciepło odbiera powietrze w układzie konwekcji naturalnej

Nie potrzeba energii elektrycznej przez 72 godziny.

Wady – po 72 godzinach zasilanie elektryczne jednak jest potrzebne

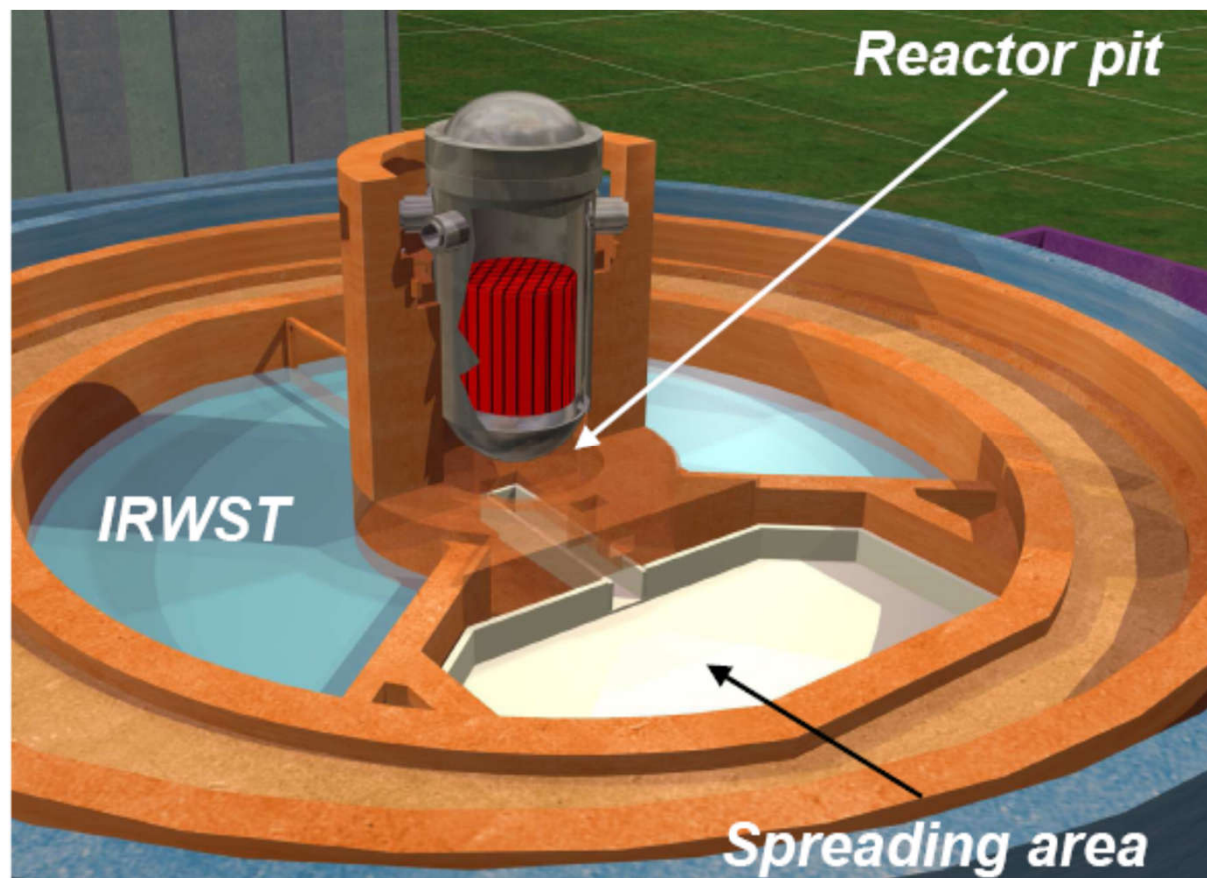
Obudowa pojedyncza- warstwa zewnętrzna nie daje szczelności.

# Chłodzenie stopionego rdzenia i obudowy bezpieczeństwa EPR. Faza długoterminowa



**Dwa rezerwowe podsystemy ze specjalnym ujściem ciepła**  
**Elementy systemu położone poza obudową bezpieczeństwa znajdują się w**  
**szczelnych pomieszczeniach osłonowych**

# Chwytnacz stopionego rdzenia w EPR

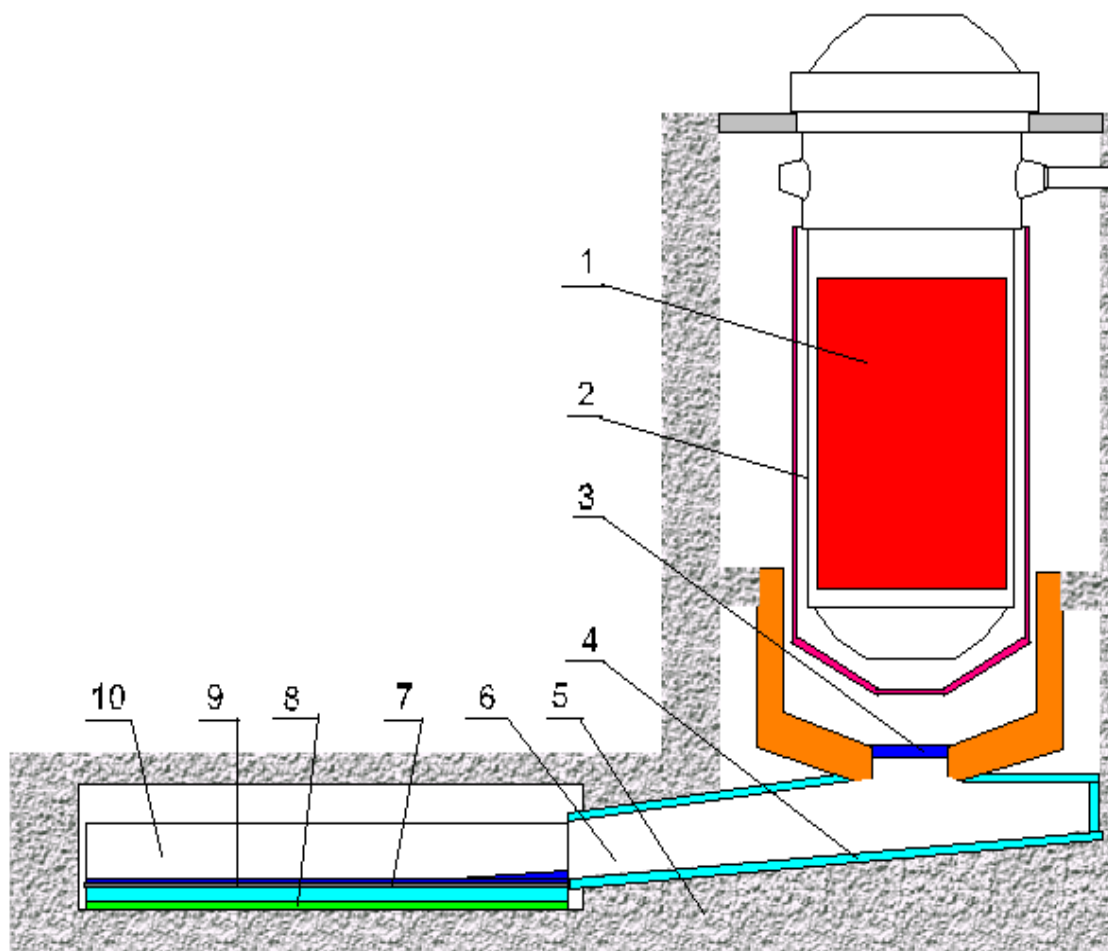


∅ Chwytnacz rdzenia chroni dno obudowy przed przepaleniem. Zapewnia stabilizację stopionego rdzenia bez dodatkowych działań.

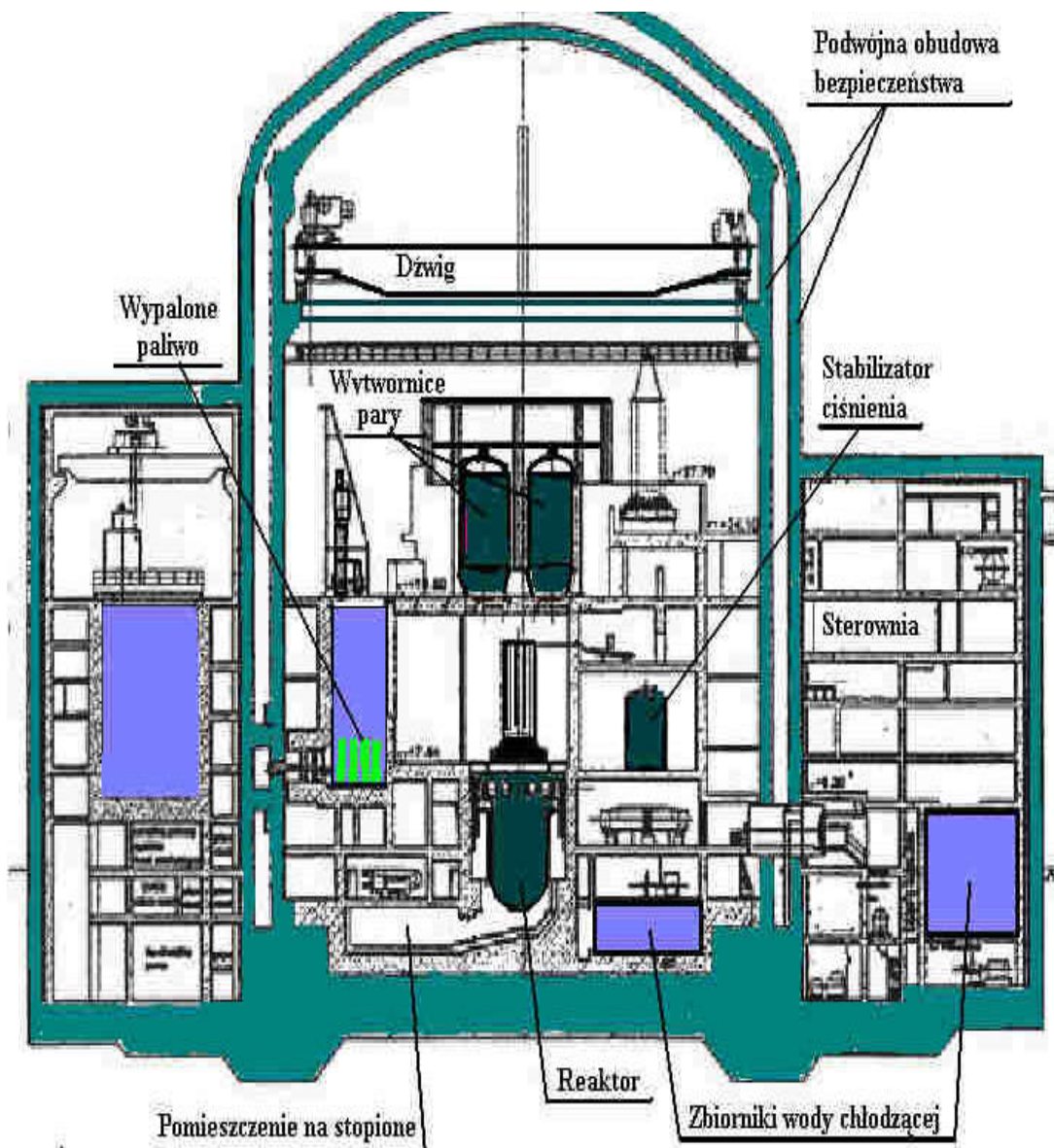
Obszar rozplýwu stopionego rdzenia jest suchy w chwili wypływu rdzenia ze zbiornika. Pod wpływem siły ciężkości stopiony rdzeń wypływa ze zbiornika, przepala zawory i rozplýwa się w chwytnaczu rdzenia. Dzięki małej szybkości wypływu nie dochodzi do eksplozji gazowej.

∅

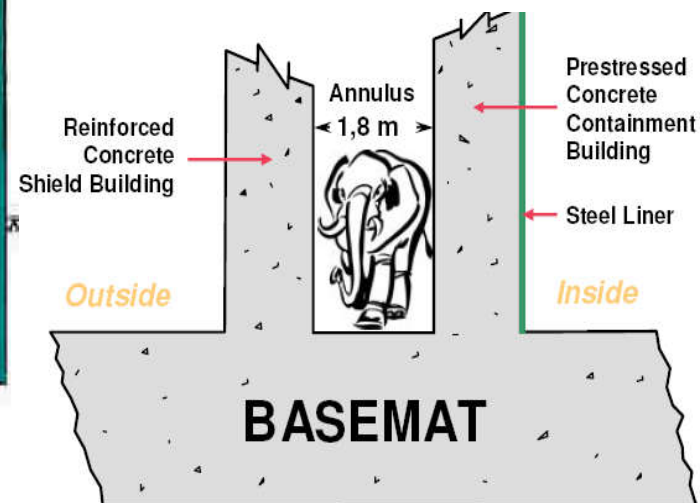
# Układ chwytnicy stopionego rdzenia w EJ z EPR - sprawdzony, pewny



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



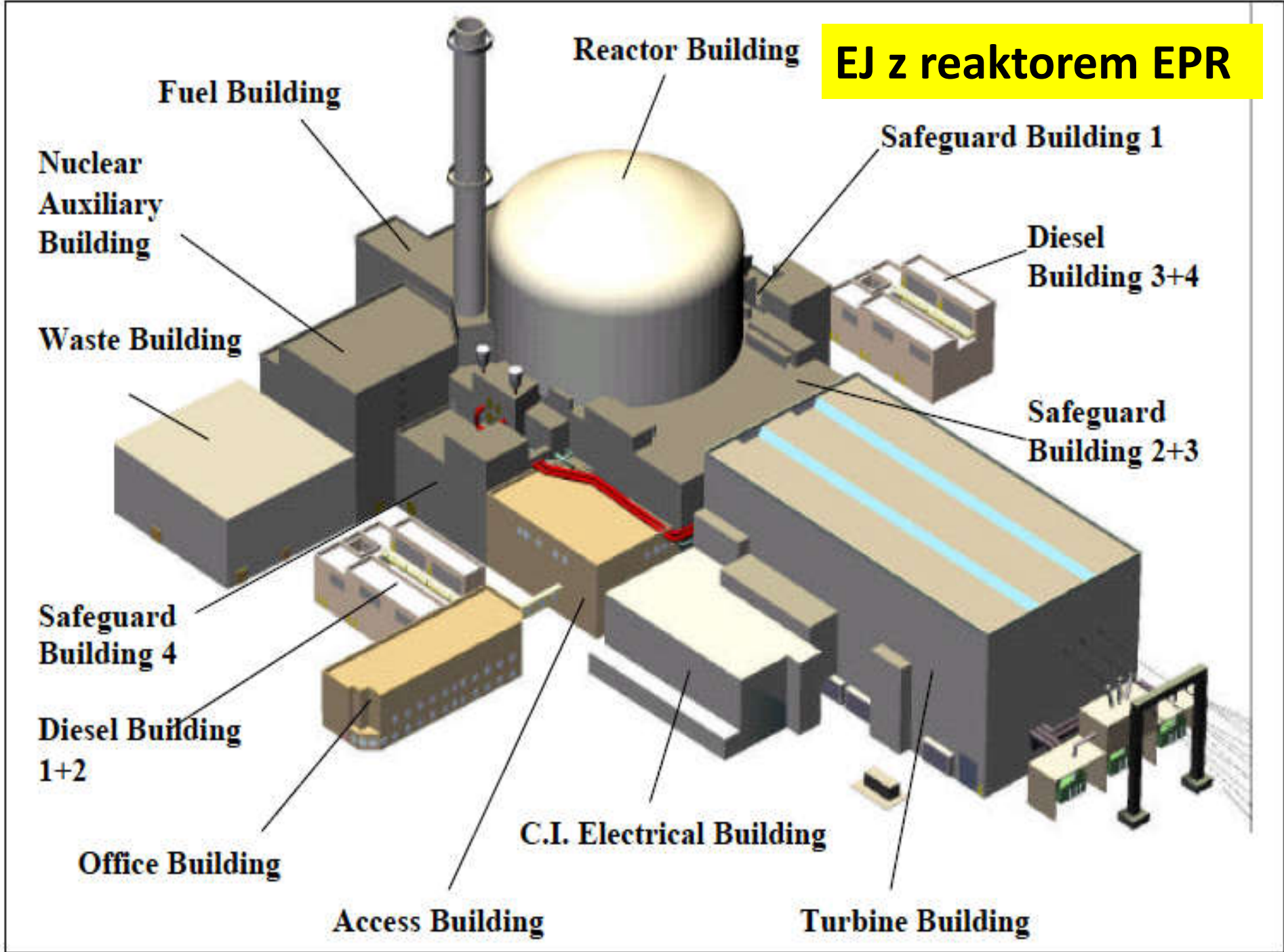
**EPR** odporny na awarie jądrowe i ataki z zewnątrz. Podwójna obudowa bezpieczeństwa, wzmocniona tak, że wytrzymuje nawet uderzenie samolotu Boeing 757



**Reaktor EPR firmy AREVA- 1650 MWe, pełne bezpieczeństwo, spełnia wszystkie wymagania energetyki UE**

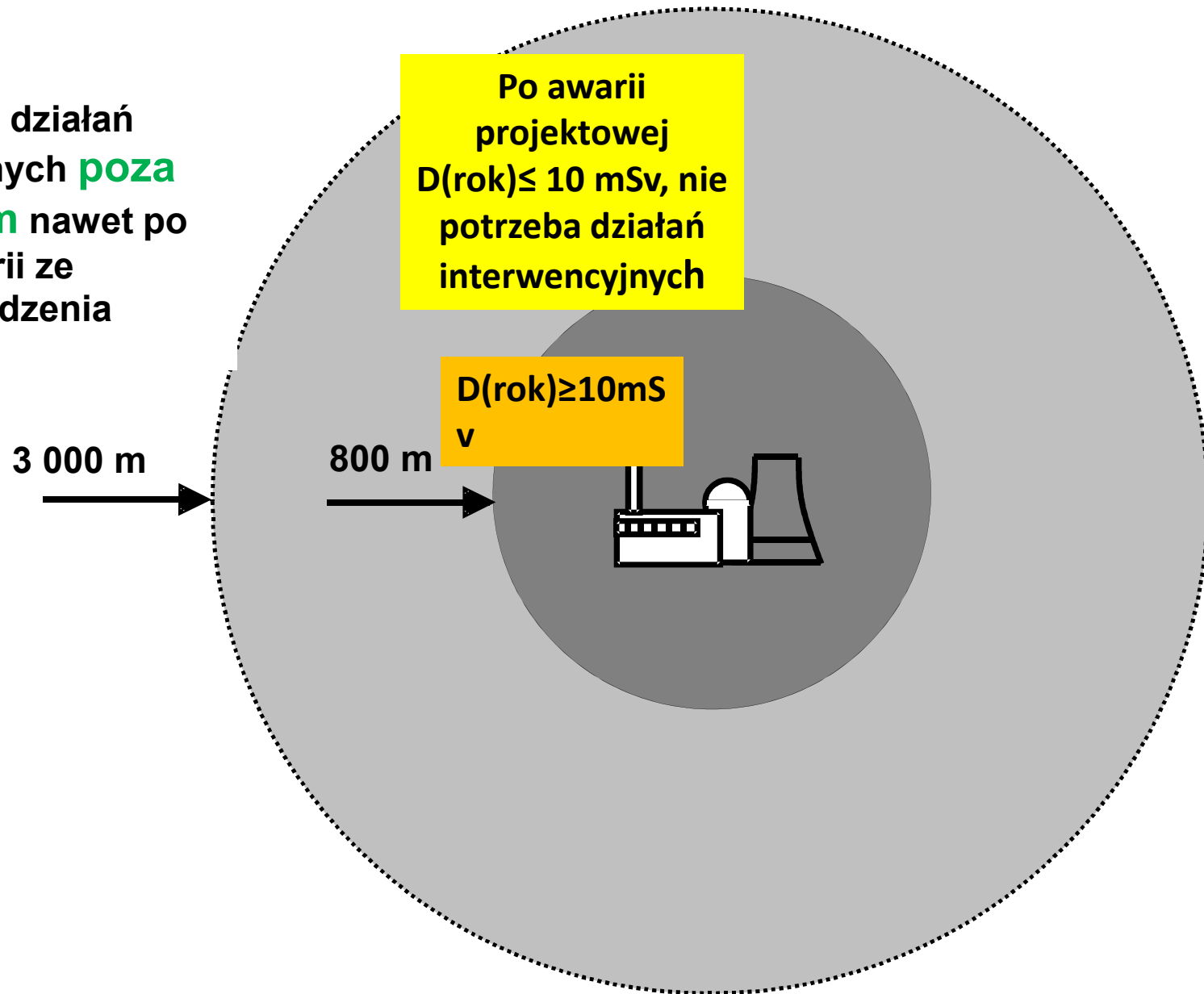


# EJ z reaktorem EPR

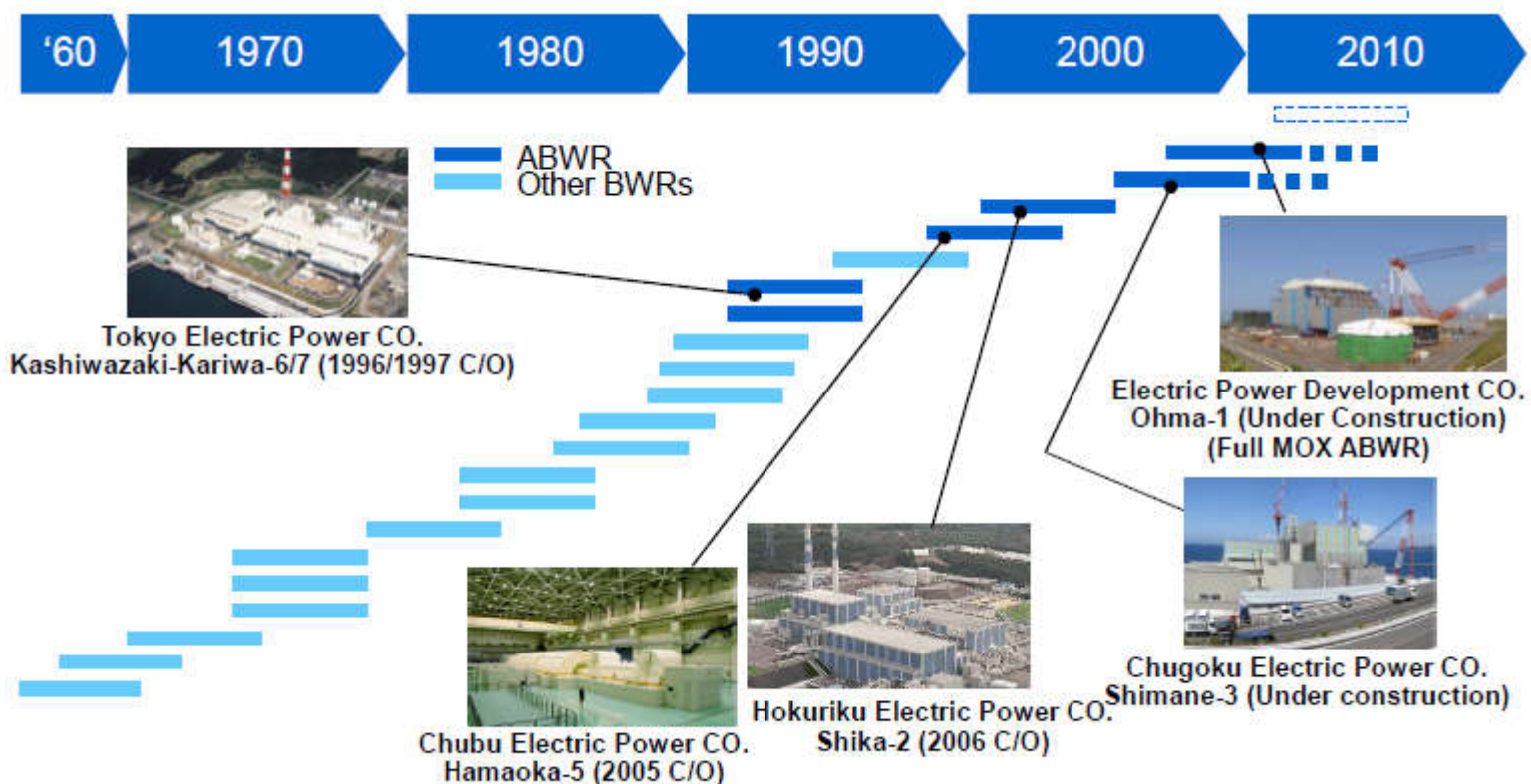


## Dla reaktora III generacji, np. EPR

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



# Podobny poziom bezpieczeństwa zapewniają reaktory ABWR



Pierwsze ABWR zaczęły pracę już w XX wieku. Szczyłą się  
szybką budową i certyfikatami w Japonii, USA, i innych  
krajach. Więcej danych w referatach GE-Hitachi.

# Groźby Greenpeace'u – czy mamy obawiać się skutków wielkiej awarii w EJ?

W marcu 2014 r. GP opublikował specjalny raport, mający przestraszyć mieszkańców Wybrzeża, Gdyni, Gdańska, a nawet Warszawy, widmem możliwej awarii EJ i jej skutków.

Wobec tego, że **awarie ze stopieniem rdzenia** w EJ III generacji zdarzają się bardzo rzadko, około **raz na milion lat**, a i to **nie powodują zagrożeń poza obszarem ograniczonego użytkowania**, ekspertom Greenpeace'u taka awaria nie wystarczała. Dlatego w swoim opracowaniu, jako jedną z dwóch przyjęli awarię ze stopieniem rdzenia i utrzymaniem szczelności obudowy bezpieczeństwa, a jako drugą – **awarię z utratą obudowy bezpieczeństwa, co np. dla reaktora EPR może zdarzyć się raz na 300 milionów lat.**

Czy naprawdę powinniśmy bać się takich zagrożeń?

# Porównanie uwolnień radioaktywnych ze stopienia rdzenia w EPR z okresem miliona lat

Wystarczy pomyśleć o dwóch wojnach światowych w ciągu ostatniego wieku, które spowodowały ogromne zniszczenia i dziesiątki milionów zabitych, by zagrożenia jądrowe ujrzeć we właściwej skali. Ale zaraz – uwolnienia mogące wystąpić w elektrowni jądrowej raz na milion lat NIE powodują żadnego zagrożenia zdrowotnego, NIE powodują zgonów, ani nawet ewakuacji ludności. A przecież od stu lat, z dwoma wojnami światowymi, do miliona lat jest bardzo długa droga.

Przed 30 tysiącami lat nie było jeszcze dzisiejszych ludzi homo sapiens, i wszystkie wędrówki ludów, powstanie cywilizacji egipskiej, greckiej, imperium rzymskiego i jego upadek, najazdy tatarskie i rzezie setek tysięcy ludzi zdarzyły się w tym czasie. A wcześniej – wcześniej mieliśmy w Europie epokę lodowcową, która przykryła wybrzeże, razem z terenami dzisiejszego Gdańska i Gdyni wielometrową warstwą lodu. A przecież wciąż mówimy o porównaniu z awarią reaktora, która NIE powoduje zgonów ani zagrożenia dalej niż około kilometra od reaktora.

# W EPR awaria, którą straszy Greenpeace, zdarza się raz na... trzysta milionów lat!

A co działo się na Ziemi w ciągu takiego czasu?



W okresie około 17 milionów lat temu wypiętrzyły się Karpaty.

Około 65 milionów lat temu nastąpiła masowa zagłada gatunków włącznie z zagładą dinozaurów. Był to jeden z pięciu okresów największego wymierania zwierząt.

Wyginęły gatunki, które przedtem, w epoce kredy, królowały na Ziemi. Śmierć zbierała obfite żniwo.

Wymarły m.in. amonity, belemnity, mozazaury, plezjozaury, pterozauury.

# Epoka kredy, jury, triasu – zmiany nie tylko gatunków, ale i kontynentów



Wcześniej – przed epoką kredy – były epoki jury i triasu, zapoczątkowane masową zagładą gatunków z okresu permskiego, która wystąpiła około 250 milionów lat temu. W okresie triasu nastąpiło pęknięcie ogromnego superkontynentu Pangea, z którego wydzieliły się Ameryka Północna i Południowa z jednej strony, a Europa i Afryka z drugiej. Cały Ocean Atlantycki powstał w tym czasie! W takiej skali czasu mierzy się częstość występowania znaczących uwolnień radioaktywnych z reaktora EPR.

## **A jeśli weźmiemy pod uwagę nie jeden reaktor, ale wszystkie 400 reaktorów jądrowych?**

Wówczas częstość awarii ze stopieniem rdzenia wyniesie nie raz na milion, ale raz na 2,5 tysiąca lat, a więc raz na okres obejmujący wojny i wędrówki ludów od czasu bitwy pod Maratonem, poprzez podbój Persji przez Aleksandra Wielkiego, powstanie i upadek Rzymu, najazdy Hunów i Tatarów, najazdy niemieckie na Polskę, bitwę pod Grunwaldem, potop szwedzki, wojny tureckie, powstania w okresie porozbiorowym, I wojnę światową, II wojnę światową z milionami zabitych Polaków.

A w porównaniu z tymi straszliwymi milionami ofiar, skutki stopienia rdzenia w reaktorze np. EPR to zagrożenie w rejonie około 1 km – nie tysięcy kilometrów, ale 1 km, i to bez ofiar śmiertelnych.

A częstość awarii ze stopieniem rdzenia i zniszczeniem obudowy bezpieczeństwa dla całej populacji 400 reaktorów to raz na okres 750 tysięcy lat – dużo dłuższy niż okres istnienia rasy ludzkiej.



# Statystyka wykazuje, że energetyka jądrowa jest najbezpieczniejsza (OECD 2010)

|                        | Państwa OECD    |                           |                                      | Państwa poza OECD |                           |                                      |
|------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Źródło energii         | Liczba wypadków | Liczba ofiar śmiertelnych | Liczba ofiar śmiertelnych na GWe/rok | Liczba wypadków   | Liczba ofiar śmiertelnych | Liczba ofiar śmiertelnych na GWe/rok |
| Węgiel                 | 75              | 2 259                     | 0,157                                | 1 044             | 18 017                    | 0,597                                |
| Węgiel (Chiny 1994-99) |                 |                           |                                      | 819               | 11 334                    | 6,169                                |
| Węgiel (bez Chin)      |                 |                           |                                      | 102               | 4 831                     | 0,597                                |
| Olej opałowy           | 165             | 3 713                     | 0,132                                | 232               | 16 505                    | 0,897                                |
| Gaz ziemny             | 90              | 1 043                     | 0,085                                | 45                | 1 000                     | 0,111                                |
| LPG                    | 59              | 1 905                     | 1,957                                | 46                | 2 016                     | 14,896                               |
| Hydroenergetyka        | 1               | 14                        | 0,003                                | 10                | 29 924                    | 10,285                               |
| Energetyka jądrowa     | 0               | 0                         | 0                                    | 1                 | 31*                       | 0,048                                |
| łącznie                | 390             | 8 934                     |                                      | 1 480             | 72 324                    |                                      |

Statystyka wypadkowości i liczba ofiar katastrof sektora energetycznego w latach 1969-2000.

**Dziękuję za uwagę**



**Tłumy na plaży koło EJ Vandellos w Hiszpanii,**