

**Wydział Fizyki UW**  
**Podstawy bezpieczeństwa energetyki**  
**jądrowej, 2018**

---

**10. Zabezpieczenia przed awariami**  
**w EJ II generacji**

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

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

# Skutki wysokich wymagań bezpieczeństwa na etapie projektowania i budowy

---

## Fakty

- Konstrukcja EJ jest złożona, układy zwielokrotnione, wyposażenie najwyższej jakości, bardzo surowa kontrola jakości, ogromna ilość dokumentacji, analizy setek stanów awaryjnych wykazujące bezpieczeństwo i dostępne krytykom.
- Rozbudowany system barier, z potężną obudową bezpieczeństwa i chroniącym ją układami.
- Czas budowy długi, koszty wysokie.
- Ale wyniki są imponujące – w EJ budowanych zgodnie z obowiązującą filozofią bezpieczeństwa nikt nie stracił ani życia, ani zdrowia wskutek awarii jądrowej.

# Międzynarodowa Skala Zdarzeń Jądrowych INES



# Zasady stopniowania wydarzeń klasyfikowanych w INES

---

Podobnie jak skale opisujące wiatry i trzęsienie ziemi, każdy stopień skali INES odpowiada zdarzeniu 10-krotnie groźniejszemu niż poprzedni.

Po klasyfikowanych poniżej skali „odchyleniach” bez znaczenia dla bezpieczeństwa, mamy trzy poziomy incydentów a potem 4 poziomy awarii.

Wybór poziomu dla danego wydarzenia zależy od 3 czynników: Czy ludzie byli narażeni, czy stracono bariery powstrzymujące rozchodzenie radioaktywności i czy stracono jeden z poziomów systemu bezpieczeństwa.

Jeśli skutki występują tylko wewnątrz EJ to zdarzenie klasyfikujemy jako odchylenie lub incydent i umieszczamy je w klasie 1, 2, lub 3. Zdarzenia powodujące konsekwencje poza EJ to awarie, klasa 4 - 7.

# INES - przykłady

---

- Czarnobyl – 7 wielka awaria
- Fukushima – 7 skutki największej katastrofy naturalnej w Japonii
- TMI – 5 awaria z zagrożeniem poza obiektem (zagrożenie potencjalne, nie rzeczywiste)
- Pożar w Browns Ferry (1975) – 4, awaria bez zagrożenia poza obiektem – rdzeń nie uszkodzony, ale długotrwały przestój
- Przegrzanie paliwa w basenie paliwowym w trakcie oczyszczenia chemicznego w EJ Paks- 3, poważny incydent
- Saint Laurent – przepalenie elementu paliwowego, 2 incydent

# Najcięższe awarie w EJ - INES 7.

---

- 1986 - Czarnobyl (INES 7) Przegrzanie i rozerwania paliwa, zniszczenie reaktora i pożar spowodowane błędami operatorów, błędem konstrukcyjnym układu wyłączania reaktora i wbudowaną niestabilnością rdzenia

Skutki: śmierć 31 osób bezpośrednio po awarii. Nadmierne obawy przed skutkami promieniowania doprowadziły do decyzji o ewakuacji 135,000 osób. Około 10,000 km<sup>2</sup> uznano za strefę wyłączenia. Obecnie uznaje się te decyzje za błędne, i organizacje międzynarodowe wskazują że dawki w strefie wyłączenia są mniejsze niż w Finlandii, francuskim Masywie Centralnym i wielu innych rejonach świata.

- 2011 Fukushima (INES 7). Wskutek największej w historii Japonii katastrofy naturalnej – trzęsienie ziemi i tsunami – trzy bloki w EJ Fukushima utraciły zasilanie elektryczne i rdzenie w tych reaktorach uległy przegrzaniu i częściowemu stopieniu.

Ludność ewakuowano w promieniu około 30 km. Dawki dla ludności były małe, ale akcja ratunkowa po zniszczeniach była bardzo trudna. Prace zabezpieczające trwają



# Awarie na poziomie INES 5 i 4

---

- 1979 – TMI (INES 5). Awarie urządzeń i błędy operatora spowodowały utratę chłodziwa i stopienie rdzenia w EJ TMI.

Była to najgroźniejsza awaria reaktorowa w reaktorach PWR. Dawka na granicy strefy wyłączenia wyniosła poniżej 1 mSv, tj. około 1/3 średniej dawki rocznej. a dawki rzeczywiste otrzymane przez 2 miliony ludzi wyniosły około 10  $\mu$ Sv.

Awaria ta nie spowodowała zgonów ani utraty zdrowia nikogo z ludności ani personelu EJ. Według pesymistycznej hipotezy liniowej bezprogowej (LNT) dawka zbiorowa może spowodować mniej niż jeden zgon na raka.

- 1977 EJ Jasłowskie Bohunice, CSSR, poważna awaria w czasie przeładunku paliwa spowodowała utratę szczelności paliwa, rozległe uszkodzenia korozyjne koszulek paliwowych i uwolnienia radioaktywności do rejonu EJ.

Elektrownię zamknięto i wycofano z eksploatacji. (INES 4)

# Awarie na poziomie INES 3 i INES 2

---

- 1989 EJ Vandellos, Hiszpania. Pożar spowodował uszkodzenie systemów bezpieczeństwa EJ i znaczne osłabienie systemu obrony w głąb. (INES 3).

Nie było wydzielenia radioaktywności, ani uszkodzenia rdzenia, ani skażeń w rejonie reaktora. EJ zamknięto i wycofano z eksploatacji.

- 2003 EJ Paks, Węgry Przegrzanie paliwa w czasie oczyszczania chemicznego w basenie paliwowym,

Uwolnienia radioaktywności, skażenie basenu. (INES-3). Dawki dla operatorów i ludności pomijalnie małe.

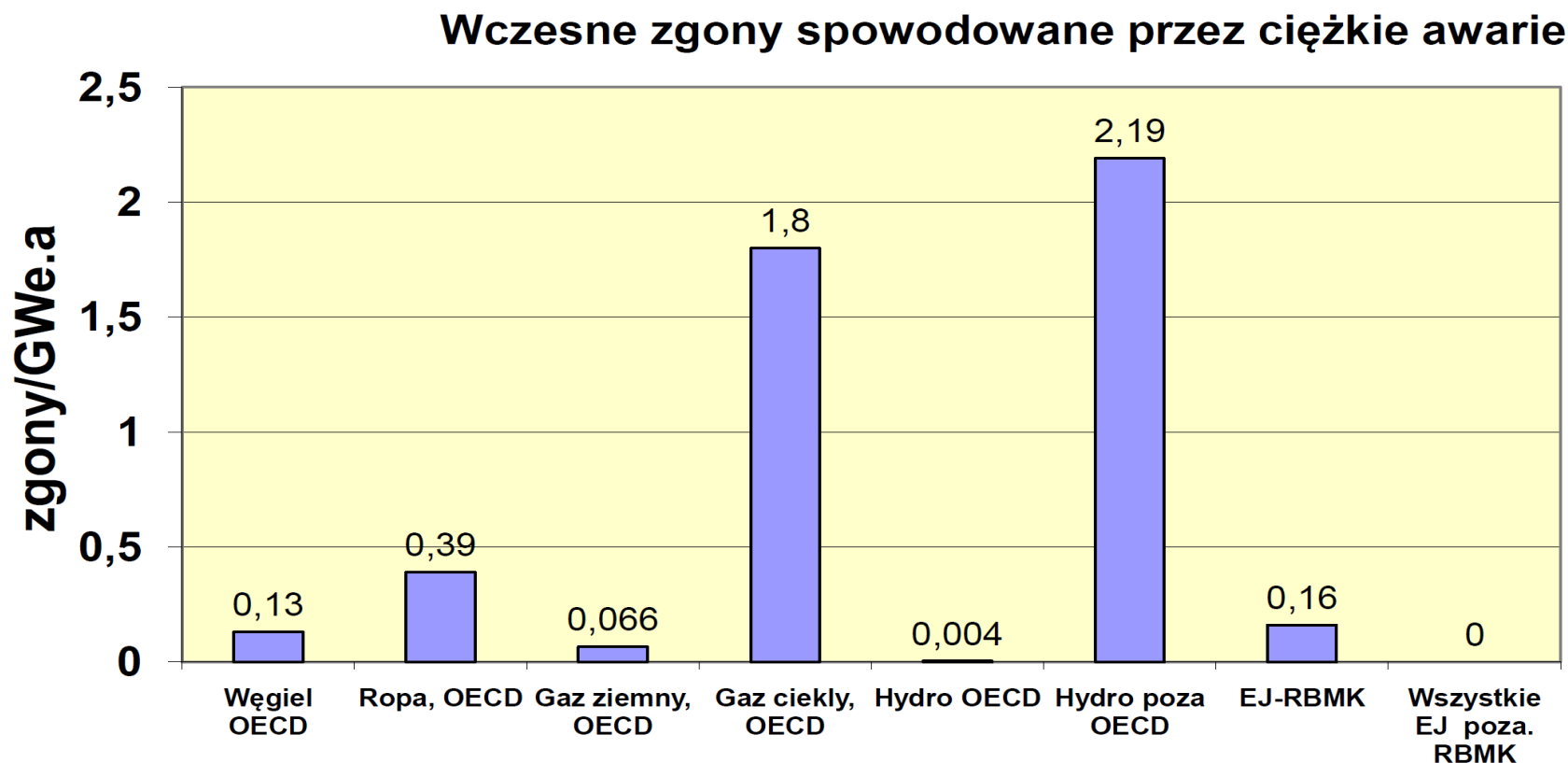
- 2006 – Awaria zasilania elektrycznego w Forsmark, Szwecja, z utratą zasilania z dwóch generatorów awaryjnych (INES 2).

Utrata oświetlenia w sterowni przez 25 minut. W czasie awarii poziom wody w reaktorze BWR obniżył się, ale rdzeń pozostał pod wodą, paliwo nie uległo uszkodzeniu. Nie było zagrożenia radiacyjnego.



# Bilans awarii w elektrowniach jądrowych

Rejestrujemy starannie wszelkie nawet drobne uszkodzenia, by uczyć się jak ich unikać i jak nie pozwolić by doprowadziły do większych uszkodzeń. Bilans historyczny – bardzo dobry dla EJ!



# Wymagania wobec projektu EJ

---

- • Projekt ma zapewnić, że EJ nadaje się do niezawodnej, stałej i łatwej eksploatacji, nadrzędnym celem jest zapobieganie wypadkom.
- • W projekcie trzeba stosować zasadę głębokiej obrony, z szeregiem poziomów obrony i z wielokrotnymi barierami zabezpieczającymi przed uwalnianiem materiałów radioaktywnych. Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń lub kombinacji uszkodzeń mogących prowadzić do poważnych konsekwencji musi być bardzo małe.
- • Rozwiązania techniczne uprzednio sprawdzone
- • Trzeba uwzględniać problemy współpracy człowieka z maszyną i możliwość błędu człowieka.
- • Narażenie na promieniowanie personelu instalacji i możliwość uwolnienia materiałów radioaktywnych są ALARA.
- • Trzeba przeprowadzić pełną analizę bezpieczeństwa elektrowni i jej niezależną weryfikację by upewnić się, że projekt instalacji spełni wymagania bezpieczeństwa.

# Przykłady wymagań jakie stawiamy układom bezpieczeństwa

---

Przy analizach zakłada się, że oprócz rozpatrywanej awarii w dowolnym układzie potrzebnym do jej opanowania może istnieć pojedyncze uszkodzenie, o którym operator nie wie. Jeśli kilka układów ma wspólne cechy, to mogą wystąpić w nich jednocześnie uszkodzenia ze wspólnej przyczyny.

- Wystąpienie tych dodatkowych uszkodzeń zakłada się w najbardziej niekorzystnym dla EJ miejscu i czasie.
- Od operatora wymaga się działania dopiero po 30 minutach od chwili awarii.

Przy takich i innych niekorzystnych założeniach trzeba udowodnić, że układy bezpieczeństwa i cechy bezpieczeństwa EJ zapewniają opanowanie każdej awarii projektowej tak, by jej następstwa nie przekroczyły poziomu uznanego za dopuszczalny.

# Zasady obrony w głąb

---

|           |                                                                                 |                                                                          |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Poz.<br>1 | Zapobieganie odchyleniom od normalnej eksploatacji i uszkodzeniom               | Projektowe zapasy bezpieczeństwa i wysoka jakość projektu i eksploatacji |
| 2         | Kontrola odchyłeń od normalnej eksploatacji detekcja uszkodzeń                  | Układy sterowania, ograniczania i bezpieczeństwa                         |
| 3         | Kontrola awarii projektowych                                                    | Inżynieryjne cechy i układy bezpieczeństwa i procedury awaryjne          |
| 4         | Ograniczania ciężkich awarii                                                    | Uzupełniające układy bezpieczeństwa i procedury dla ciężkich awarii      |
| 5         | Ograniczanie następstw radiologicznych dużych uwolnień produktów radioaktywnych | Działania awaryjne wokół uszkodzonego obiektu                            |

# Zasady głębokiej obrony przyjęte dla EJ (1)

---

- Poziom pierwszy: Projekt zapewniający duże zapasy bezpieczeństwa, właściwy dobór materiałów, zapewnienie jakości w fazie projektowania, budowy i eksploatacji, kultura bezpieczeństwa, to jest uznanie przez wszystkich zainteresowanych, że bezpieczeństwo jądrowe jest sprawą nadrzędną, ważniejszą niż wytwarzanie energii elektrycznej.
- Poziom drugi: Kontrola odchyleń od normalnej eksploatacji i wykrywanie uszkodzeń, zapewnienie środków do opanowania skutków uszkodzeń w układach EJ przez normalne systemy elektrowni, takie jak układ redukcji mocy i normalnego wyłączenia reaktora lub układ uzupełniania wody w obiegu pierwotnym. Automatyka regulująca parametry pracy EJ, instrukcje i procedury eksploatacyjne zapewniające prawidłowe działania operatora w przypadku odchyleń od stanu nominalnego.
- Poziom trzeci: Systemy zabezpieczeń (np. układ awaryjnego wyłączenia reaktora) i systemy bezpieczeństwa takie jak układ awaryjnego chłodzenia rdzenia z automatyką zapewniającą ich samoczynne zadziałanie w razie awarii, bez potrzeby interwencji operatora. Obudowa bezpieczeństwa chroniąca przed uwolnieniem substancji promieniotwórczych do otoczenia. Procedury postępowania operatora w razie awarii.



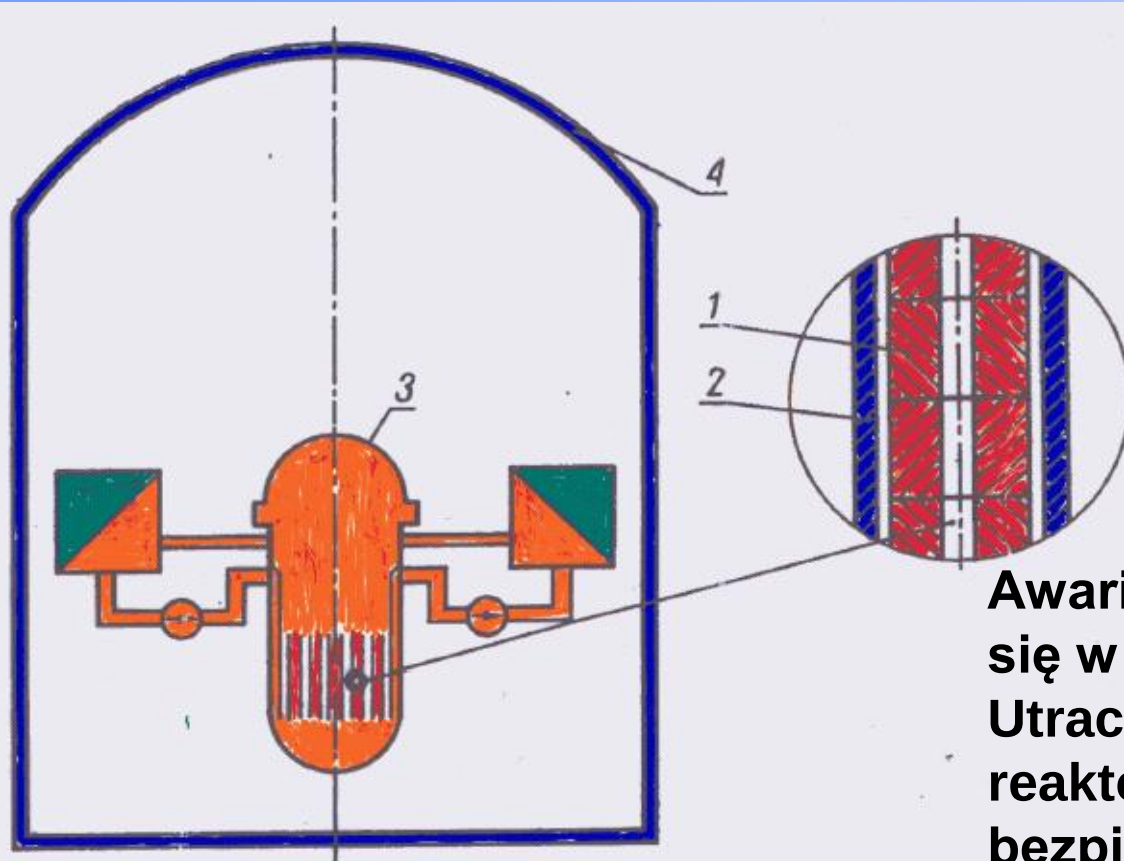
# Zasady głębokiej obrony przyjęte dla EJ (2)

---

- Poziom czwarty: Układy i działania zmierzające do opanowania awarii i minimalizacji jej skutków, a np. kontrolowane usuwanie gazów z wnętrza obudowy bezpieczeństwa przez układy filtrów, aby uchronić obudowę przed rozerwaniem wskutek nadmiernego ciśnienia gazów. Takie działanie może być podejmowane przez operatora w skrajnie nieprawdopodobnym przypadku całkowitego braku odbioru ciepła z obudowy bezpieczeństwa i ciągłego wzrostu temperatury i ciśnienia gazów nagromadzonych w niej po awarii. (awarie poza projektowe).
- Poziom piąty: Działania poza terenem elektrowni dla zmniejszenia narażenia ludności, takie jak podanie pastylek jodu obojętnego, zalecenie pozostania w domach lub czasowe wstrzymanie wypasu bydła w razie skażenia pastwisk. W przypadku awarii czarnobylskiej doszło nawet do ewakuacji dużej liczby mieszkańców okolic elektrowni, ale awaria ta nie jest reprezentatywna dla elektrowni innych typów i nie mogłaby wystąpić w reaktorach wodnych jakie będziemy budować w Polsce



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



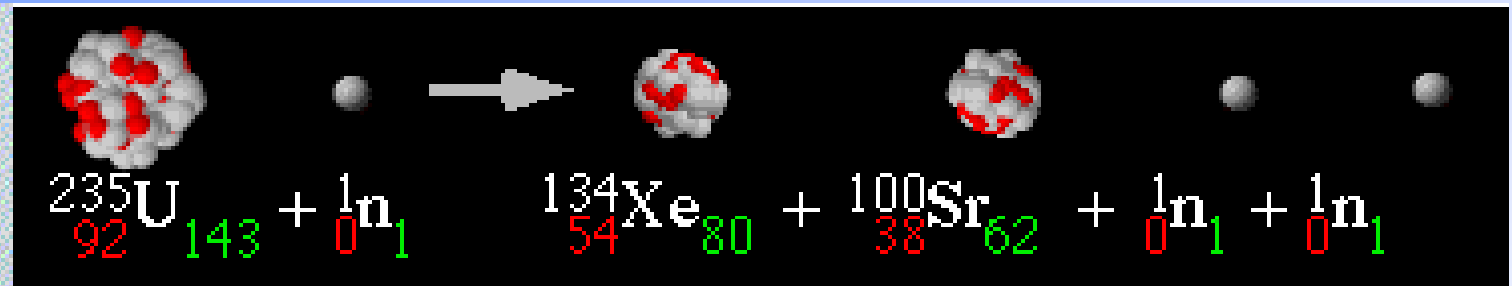
## Układ barier w EJ:

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**

# Główne źródło zagrożenia – produkty rozszczepienia w paliwie jądrowym

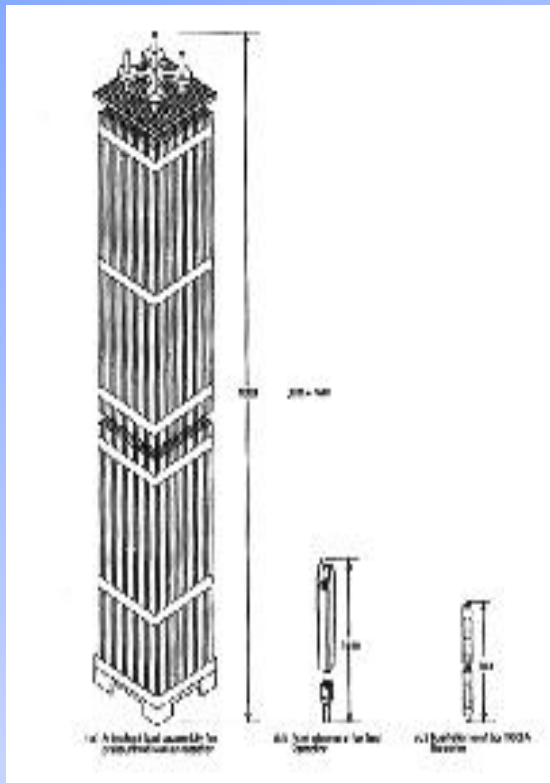


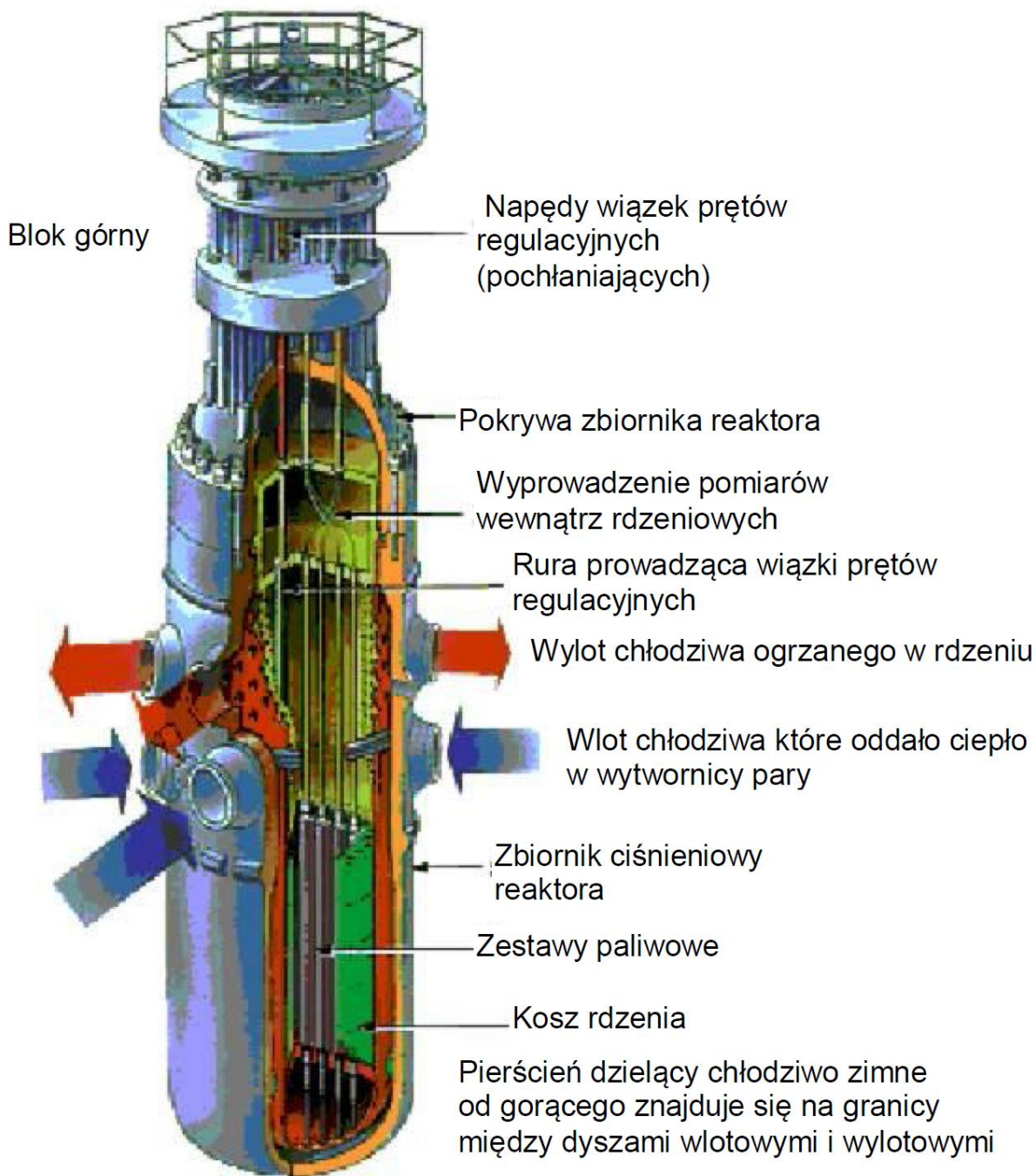
**Energia jądrowa daje energię – ale i radioaktywne produkty rozszczepienia.**

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.





Zbiornik ciśnieniowy reaktora projektowany jest z dużym zapasem wytrzymałości i wykonywany z najwyższą starannością, przy wielokrotnych kontrolach jakości stali i spawów. Ale z napromieniowaniem rośnie temperatura kruchego pękania stali, jeśli zawiera ona domieszki fosforu i niklu. Dlatego skład stali na zbiornik kontrolujemy szczególnie starannie. Staramy się też zredukować napromieniowanie ścian zbiornika.

# Metody przedłużania czasu pracy zbiornika

---

- Dobre własności chemiczne stali i spawów
- Osłona wodna między rdzeniem a ścianą zbiornika
- Kampania paliwowa w rdzeniu z niską ucieczką neutronów
- Podgrzewanie wody w UACR by uniknąć szoku termicznego w razie awarii
- Staranna kontrola napromieniowania neutronowego (ciągłe próbki świadków)
- Badania doświadczalne w warunkach reprezentatywnych
- W ostateczności – wyżarzanie stali zbiornika
- W reaktorach PWR duże marginesy bezpieczeństwa.



# Najbardziej widoczna cecha bezpieczeństwa EJ

---

EJ z PWR w San Onofre: Niezawodna obudowa bezpieczeństwa.



- Chroni EJ przed działaniami z zewnątrz.
- Zapewnia szczelność – przecieki poniżej 0,3%/dobę
- Dopóki obudowa jest szczelna, następstwa awarii nie są groźne.
- Wytrzymuje maksymalne ciśnienie po awarii.
- Żadna obudowa bezpieczeństwa nie uległa dotychczas zniszczeniu.





# Pożądane i wymagane cechy bezpieczeństwa EJ

---

**Najważniejsze - spadek mocy w sytuacjach awaryjnych.**

Działanie układów bezpieczeństwa oparte na działaniu praw natury

Przyjmowanie pozycji bezpiecznej po uszkodzeniu (fail safe)

Rezerwowanie (3 lub 4 równoległe podsystemy, gdy 1 wystarcza)

Różnorodność (by jedno zjawisko nie spowodowało awarii ze wspólnej przyczyny w kilku podsystemach)

Rozdzielenie podsystemów w przestrzeni lub barierami

Możliwość kontroli sprawności układu podczas pracy EJ

Udokumentowana odporność na warunki zewnętrzne (temperatura, wilgotność, wstrząsy sejsmiczne itd.)

Ochrona przed pożarem, zalaniem, biciem innych rurociągów w razie ich rozerwania, uszkodzeniem wskutek np. upadku budowli

# **Jak sprawdzamy bezpieczeństwo EJ?**

## **Metodą deterministyczną i probabilistyczną**

---

**Metoda deterministyczna:** zakładamy awarie po kolei każdego układu w EJ w najgroźniejszym miejscu, dodajemy do tego jedną ukrytą awarię w układzie bezpieczeństwa najbardziej potrzebnym do opanowania awarii pierwotnej i sprawdzamy, czy EJ zapewni opanowanie awarii i bezpieczeństwo ludności.

**Metoda probabilistyczna-** zakładamy awarie po kolei każdego układu EJ w różnych miejscach. Do każdej założonej awarii dodajemy uszkodzenie w jednym, dwóch, trzech i więcej układach bezpieczeństwa, potrzebnych do opanowania awarii. Im więcej ukrytych uszkodzeń założymy, tym mniejsze jest prawdopodobieństwo takiego zbiegu okoliczności. W wyniku trzeba udowodnić, że prawdopodobieństwo dużego uwolnienia radioaktywności jest mniejsze od dopuszczalnego.

**Elektrownię można zaakceptować tylko wtedy, gdy jej bezpieczeństwo jest udowodnione oboma metodami.**

# **Zasada bezpieczeństwa jądrowego – bezpieczeństwo jest najważniejsze!**

---

System obrony w głąb i wielokrotnych barier zapewnia, że po awarii w dowolnym urządzeniu elektrowni ani dodatkowa awaria w najbardziej potrzebnym układzie bezpieczeństwa, ani błąd operatora nie przeszkodzą w opanowaniu skutków awarii i uchronieniu ludności przed zagrożeniem.

Analizy bezpieczeństwa wykonuje się zakładając błąd człowieka lub dodatkową awarię w układach EJ.

Doświadczenie z 12 000 łącznej pracy reaktorów energetycznych wykazało, że przyjęte zasady bezpieczeństwa są skutecznym zabezpieczeniem.

Chociaż w TMI stracono 3 bariery – paliwo, koszulkę i granicę ciśnieniową obiegu pierwotnego, to przecież zbiornik reaktora i obudowa wystarczyły by zapewnić bezpieczeństwo ludności.



# Bezpieczne ( pesymizowane ) podejście do projektowania EJ

---

Konstrukcja EJ jest tak projektowana i realizowana, że:

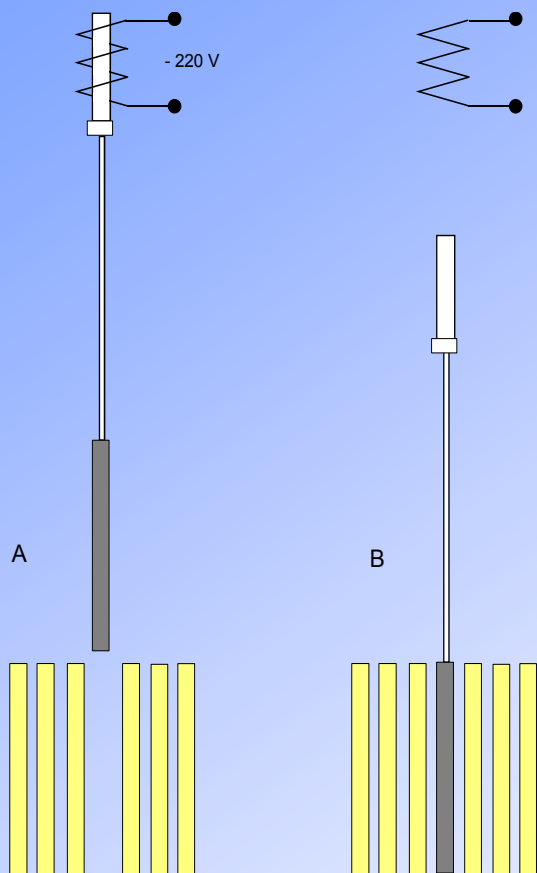
zapewnia duże marginesy bezpieczeństwa, tak że np.. osłabienie ścianki przez korozję nie powoduje jej pękania, bo jest duży zapas, albo że reaktor wyłącza się przy przekroczeniu temperatury dopuszczalnej na długo zanim temperatury staną się groźne.,

zabezpiecza przed wieloma uszkodzeniami z 1 przyczyny - układy zwielokrotnione, różnorodne, oddzielone przestrzennie i funkcjonalnie, przyjmujące bezpieczne położenia w razie uszkodzenia (fail safe),

Zapewnia kontrolę stanu układów podczas pracy, pozwala wykrywać stan grożący uszkodzeniem i prowadzić remont wyprzedzający

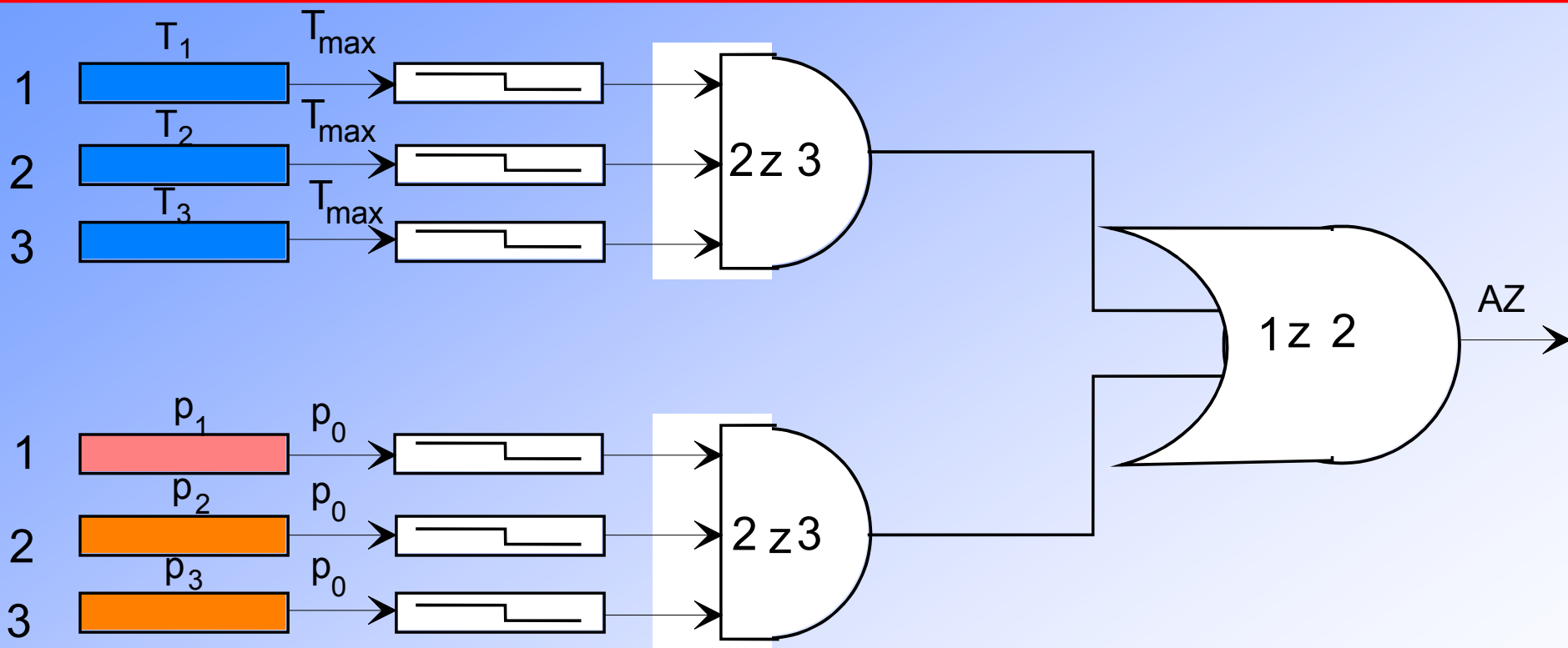
# Naturalne cechy bezpieczeństwa EJ

## np. 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.
- W reaktorach wodnych spadek pręta bezpieczeństwa zawsze obniża moc
- W Czarnobylu wprowadzanie prętów bezpieczeństwa powodowało dodatkowy przejściowy wzrost mocy

# Różnorodność zasad działania systemów bezpieczeństwa

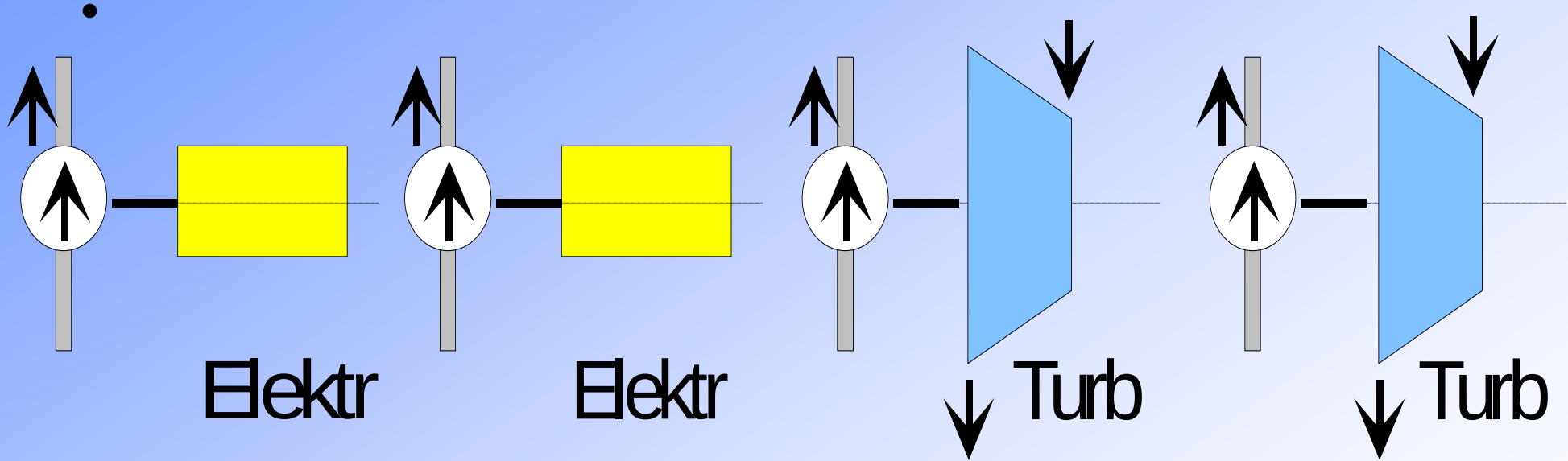


**Różnorodne sygnały stosowane do awaryjnego wyłączenia reaktora.**

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.

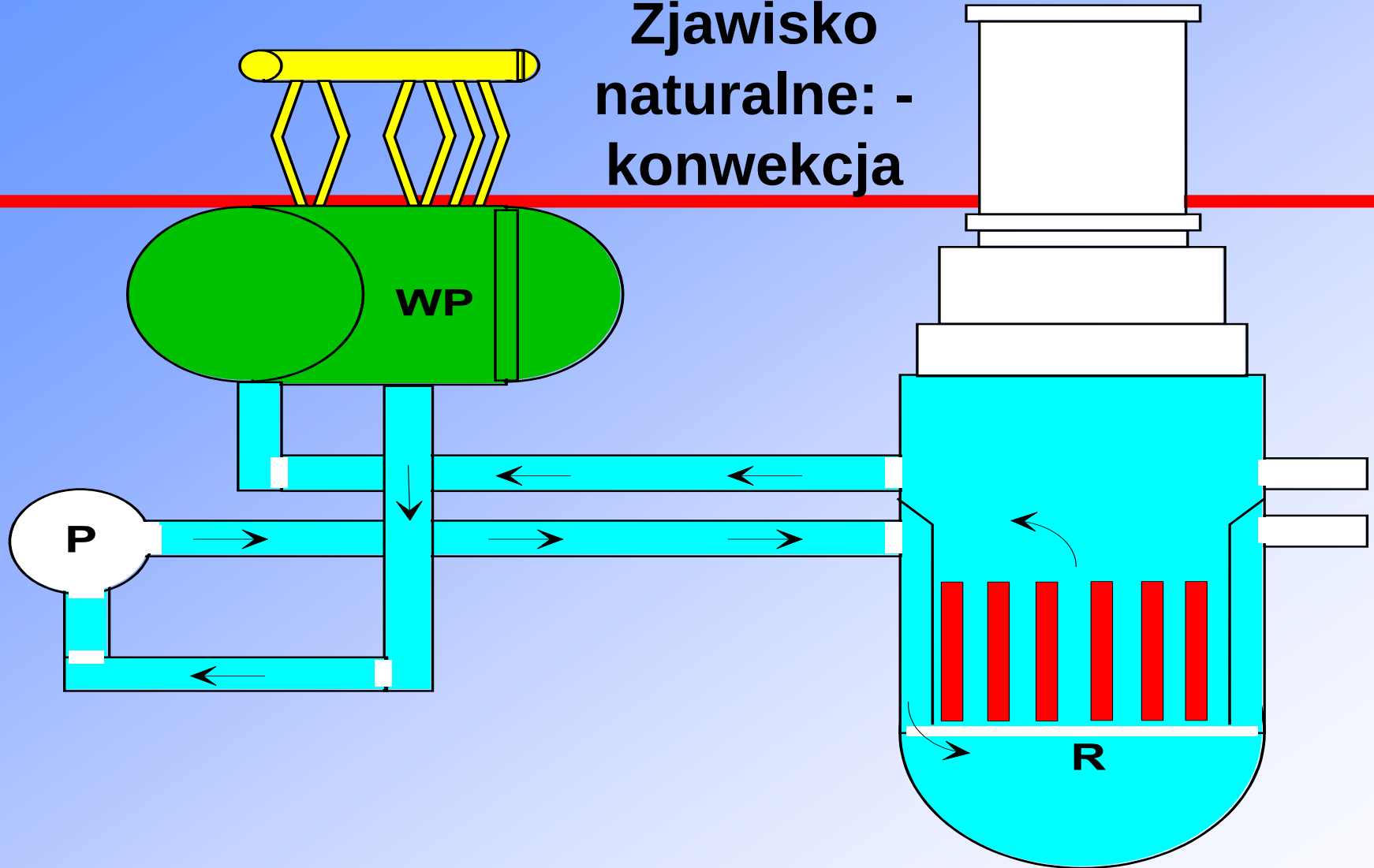
# Zasada różnorodności – przykład AUWZ

---



**Zastosowanie zasady różnorodności do napędu pomp Awaryjnego Układu Wody Zasilającej.** Dwie pompy napędzane są silnikami elektrycznymi, a dwie turbinami parowymi. W razie utraty zasilania elektrycznego, turbiny będą napędzały pompy tak długo jak długo w reaktorze wytwarzana będzie para, a więc jak długo będzie potrzebna woda chłodząca.

**Zjawisko  
naturalne: -  
konwekcja**



**Wykorzystanie praw fizyki dla zapewnienia bezpieczeństwa reaktora.**

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

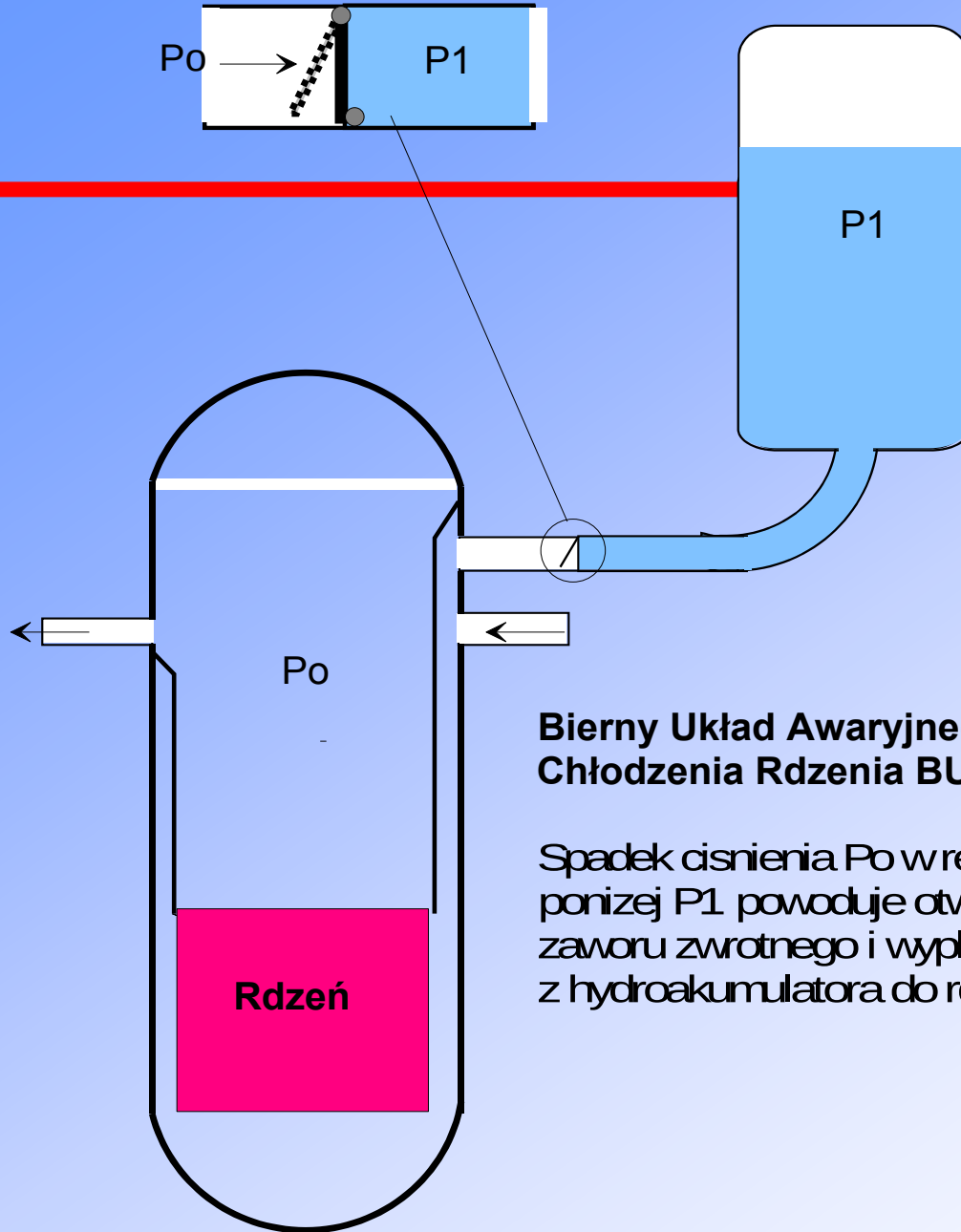


# Zjawisko naturalne: różnica ciśnień powoduje przepływ

Póki rdzeń jest chłodzony, póty reaktor jest bezpieczny. Dlatego robimy wszystko, by rdzeń zawsze był zalany wodą, nawet po rozerwaniu obiegu pierwotnego.

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 hydro-akumulatorze.

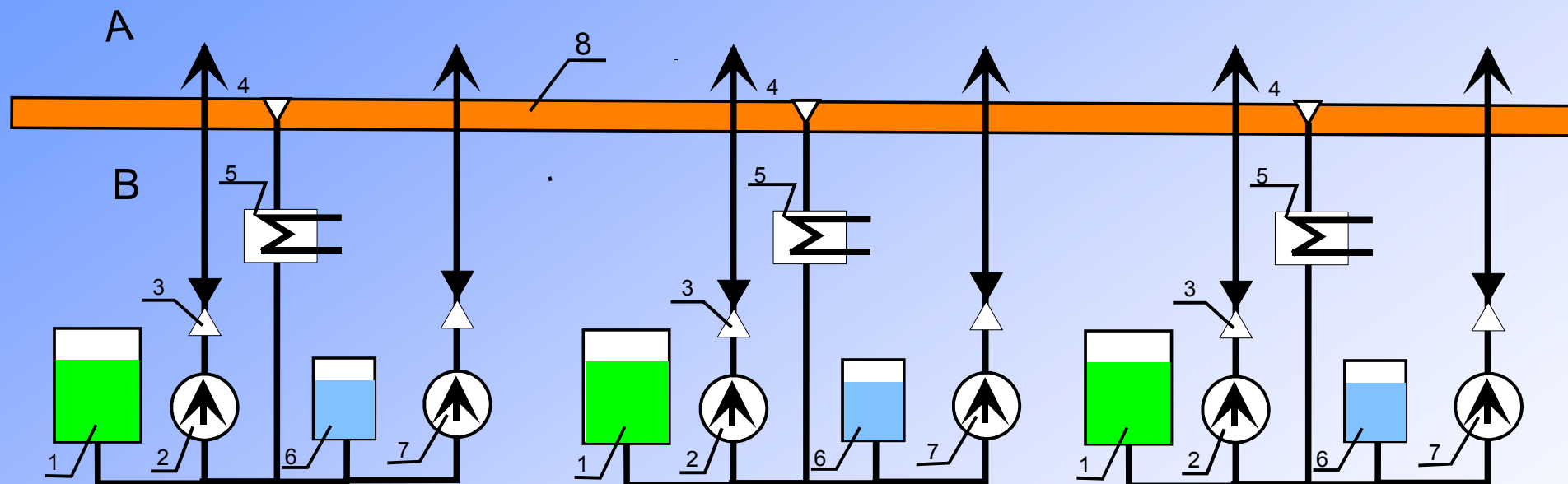


**Bierny Układ Awaryjnego  
Chłodzenia Rdzenia BUACR.**

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

# Obrona przed pojedynczym uszkodzeniem

3 niezależne układy, choć 1 wystarcza do skutecznego chłodzenia



**Ilustracja rezerwowania z nadmiarem układów bezpieczeństwa, pokazana na przykładzie aktywnego układu awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR).**

*A - obszar wewnątrz obudowy bezp, B – obszar poza obudową bezp, 1- zbiornik UACR, 2 - pompa niskociśn. UACR, 3 – zawór zwrotny, 4 - miska ściekowa, 5- wymiennik ciepła, 6 - zbiornik UACR o wysokim stężeniu kwasu borowego, 7 – pompa wysokociśn. UACR, 8 – ściana obudowy bezpieczeństwa.*

# Rozdzielenie przestrzenne, odporność na pożar i zalanie wodą

---

**Rozdzielenie przestrzenne** Układy bezpieczeństwa są rozdzielone przestrzennie, tak by np. pożar nie spowodował jednoczesnej utraty dwóch lub więcej podsystemów. W nowoczesnych EJ każdy z czterech podsystemów układów bezpieczeństwa znajduje się w innej części budynku reaktora, oddzielonej przestrzennie od pozostałych.

Kable sterowania i kable energetyczne układów bezpieczeństwa prowadzone są oddzielnie od kabli układów nie spełniających funkcji bezpieczeństwa, a ponadto kable sterowania są umieszczone w kanałach oddzielonych od kanałów kabli energetycznych,

**Odporność na pożar, zalanie wodą, wstrząsy sejsmiczne. warunki otoczenia**

- Szczególne zagrożenie stanowią pożary, mogące spowodować utratę wielu elementów bezpieczeństwa znajdujących się w zasięgu ognia.
- Analizy możliwości pożaru w pomieszczeniach, zabezpieczenia wykluczające lub zmniejszające możliwość pożaru, takie jak np. zastąpienie smarowania łożysk pomp olejem przez smarowanie wodą.
- Gdy ogień jest jednak możliwy, analizuje się jego zasięg i czas trwania i zapewnia środki przeciwdziałające rozprzestrzenianiu pożaru,

# Uściślenie przepisów o działaniach ochronnych po awariach jądrowych

---

Po Czarnobylu okazało się, że władze państwowe nie znają się na skutkach zdrowotnych promieniowania i nie są w stanie podejmować prawidłowych decyzji.

W czasie awarii w Czarnobylu wytyczne MAEA przewidywały, że ewakuację można zarządzić, gdy odpowiednia redukcja dawki przez całe życie wynosi od 50 do 500 mSv. Okazało się że władze zarządziły ewakuację przy najniższym progu, a potem ten próg jeszcze dalej obniżono.

Według nowych wytycznych MAEA wielkość dawki unikniętej, przy której podejmuje się ewakuację, wynosi **1000 mSv**.

Gdyby taka zasada obowiązywała w czasie po awarii w Czarnobylu, uniknięto by ewakuacji setek tysięcy ludzi, a rejon wokół Czarnobyla byłby już od dawna normalnie zagospodarowany.

# **EJ stwarza mniejsze zagrożenie niż inne źródła energii**

---

- Studia wielkich awarii prowadzone przez Instytut Paula Scherrera w Szwajcarii dla rządu wykazały, że inne źródła energii powodują większe zagrożenie wielkimi awariami. (wielka awaria – taka przy której ginie ponad 5 ludzi)
- Ale dużo ważniejsze jest ciągłe zagrożenie zdrowia ludzi powodowane przez cykl paliwowy, spalanie paliw kopalnych i zatrucie środowiska przy produkcji urządzeń energetycznych, w tym paneli słonecznych lub wiatraków.
- Studium zagrożeń dla zdrowia człowieka i środowiska prowadzono w programie Unii Europejskiej External Electricity Costs – ExternE – przez 15 lat z udziałem wszystkich państw UE-15.



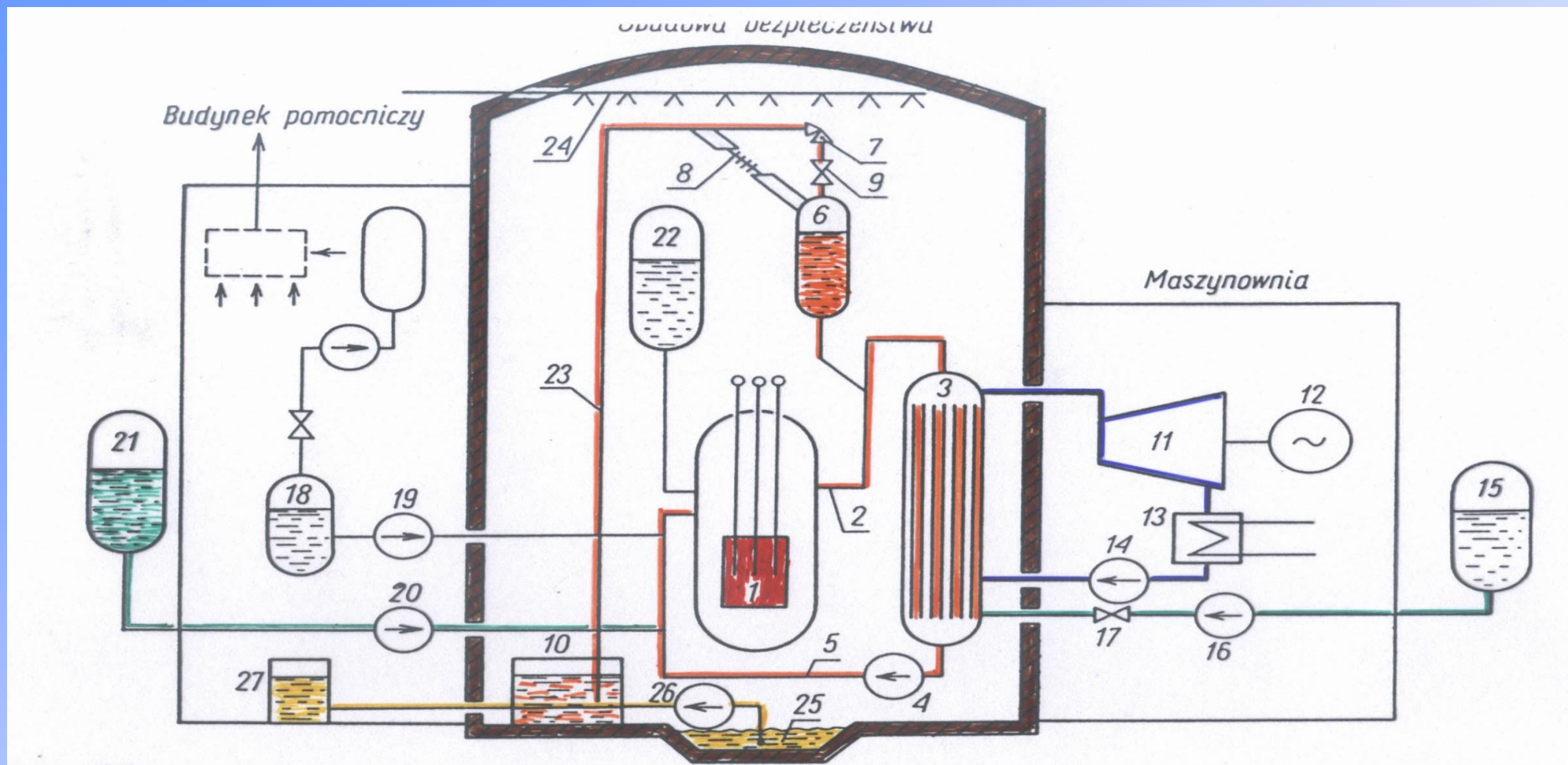
# **Awaria w reaktorze PWR w TMI - 2**

---

- Reaktor PWR firmy Babcock and Wilcox, 900 MWe,
- Przepływowa wytwornica pary.

## **Cechy, które wpłynęły na przebieg awarii**

- Mała pojemność wodna w WP (osuszenie WP w ciągu 2 minut)
- Otwieranie zaworu nadmiarowego przy 15.5 MPa,
- Wyłączenie awaryjne reaktora przy 16.2 MPa
- Sygnalizacja napięcia w solenoidzie zamykającym zawór nadmiarowy zamiast położenia zaworu
- Odizolowanie obudowy bezpieczeństwa dopiero przy nadciśnieniu 270 milibar
- Położenie WP – brak konwekcji naturalnej (wadliwy układ pionowy EJ)
- Brak układu odpowietrzania awaryjnego



**Układ elektrowni jądrowej TMI-2**, 1 — rdzeń reaktora, 2 — gorąca gałąź obiegu pierwotnego, 3 — wytwornica pary, 4 — pompa cyrkulacyjna, 5 — zimna gałąź obiegu pierwotnego, 6 — stabilizator ciśnienia, 7 — zawór nadmiarowy z napędem elektrycznym, 8 — zawór bezpieczeństwa, 9 — zawór odcinający, 10 — zbiornik zrzutowy, 11 — turbina parowa, 12 — generator, 13 — kondensator, 14 — główna pompa wody zasilającej, 15 — zbiornik awaryjnego układu wody zasilającej, 16 — pompa awaryjnego układu wody zasilającej, 17 — zawór odcinający, 18 — zbiornik wody CNUACR, 19 — pompa CNUACR, 20 — pompa CWUACR, 21 — zbiornik wody borowej CWUACR, 22 — zbiornik wody BUACR, 23 — linia zrzutu ze stabilizatora ciśnienia, 24 — zraszanie obudowy bezpieczeństwa, 25 — studzienka ściekowa, 26 — pompa studzienki ściekowej, 27 — zbiornik przechowywania odpadów ciekłych

# **EJ TMI Wytwornice pary typu płaszczowo-rurowego, z jednokrotnym przepływem pary, mało wody**

---

Ciśnienie w I obiegu utrzymywane dzięki pracy stabilizatora 6 wyposażonego w układ grzejników elektrycznych, mogących powodować generację pary i zwiększenie ciśnienia.

Gdy ciśnienie w I ob. rosło nadmiernie, część pary ze stabilizatora można usunąć otwierając zdalnie sterowany zawór nadmiarowy z napędem elektrycznym 7, przez który para wypływała do zbiornika zrzutowego 10, pod powierzchnię wody zapewniającej jej skraplanie.

W razie otwarcia zaworów bezpieczeństwa na zbiorniku 10, woda wypływała do studzienki ściekowej obudowy bezpieczeństwa 25.

Na linii zrzutu pary ze stabilizatora 23 umieszczono szeregowo przed zaworem nadmiarowym zawór odcinający 9. Na dwóch liniach równoległych zawory bezpieczeństwa 8.

Reaktor wyposażony w UACR, składający się z trzech zasadniczych podukładów:

- CWUACR pompy 19,7 MPa, włączane automatycznie, gdy ciśnienie w I obiegu poniżej 11 MPa;
- BUACR, zbiorniki z roztworem kwasu borowego 22 4,1 MPa;
- CNUACR pompy 2,8 MPa.

Układ zraszania zawiera roztwór wodorotlenku sodu, włączany od sygnału wysokiego ciśnienia.



# Obudowa bezpieczeństwa w TMI-2 izolowana po wzroście ciśnienia lub na sygnał operatora

---

Obudowa bezpieczeństwa może być odizolowana od atmosfery albo automatycznie — gdy wewnątrz obudowy ciśnienie wzrośnie do dużej wartości — albo ręcznie przez operatora.

Do układów wentylacji obudowy były przyłączone urządzenia do rekombinacji wodoru, mogącego powstać wskutek radiolizy chłodziwa lub reakcji cyrkonu z parą wodną.

Obok obudowy bezpieczeństwa znajduje się budynek maszynowni zawierający *ii* turbogenerator i kondensator, z którego jest pobierana normalnie woda zasilająca do wytwornic pary, tłoczona pompami 14.

W przypadku przerwania dopływu tej wody, wytwornice pary są zasilane przez *awaryjny układ wody zasilającej* (AUWZ), którego pompy 16 pobierają wodę ze zbiornika 25 i podają ją bezpośrednio do wytwornic pary 3.

**Aby zapewnić niezawodność działania** tego systemu, jest on wyposażony w trzy równoległe linie, każda z własną pompą i zaworami, przy czym dwie pompy są napędzane elektrycznie, a **trzecia ma własną turbinę parową.**

# TMI - brak konwekcji naturalnej

## Dla porównania, układ pionowy WWER

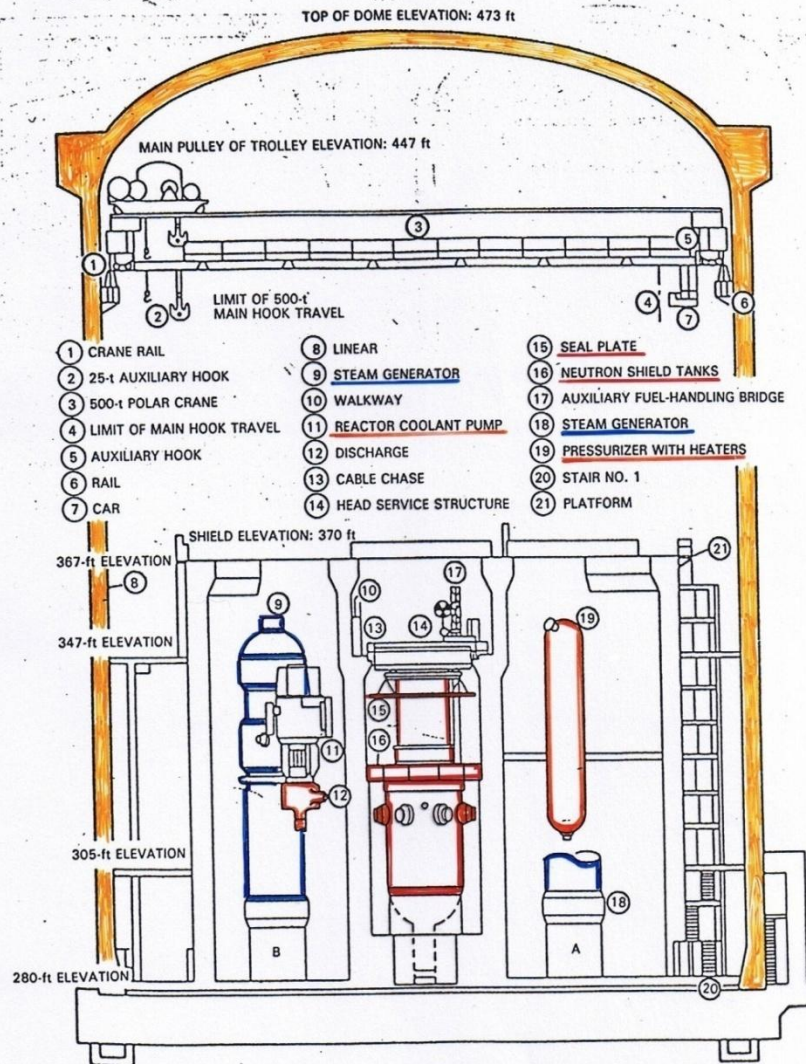
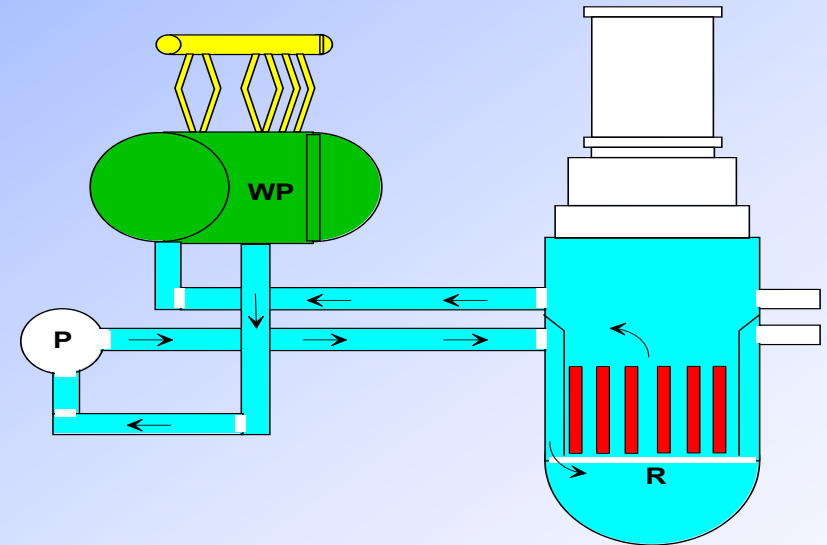


Fig. 2. Cross section of the TMI-2 reactor containment building (facing south) (taken from Ref. 3).



**28 marzec 1979 - 04.00**

Niektóre rurociągi kondensatu na wyjściu ze skraplacza turbiny **zatkane mieszaniną jonitów i wody** ze stacji oczyszczania kondensatu.

Próba oczyszczenia sprężonym powietrzem nieudana

Wskutek różnicy ciśnień między kondensatem a sprężonym powietrzem doprowadzono do zawodnienia układu sprężonego powietrza.

Zamknęły się sterowane **zawory odcinające na linii podawania kondensatu do pomp wody zasilającej.**

Wyłączyły się pompy, odłączyła się turbina

Na razie – to tylko drobne zakłócenie toku eksploatacji EJ



## Uruchomienie pompy AUWZ

Przerwa w dopływie wody do  
WP spowodowała  
pogorszenie odbioru ciepła od  
obiegu pierwotnego,

P rośnie.  
4s - 15.5 MPa, zawór  
nadmiarowy otworzył się  
automatycznie, ale reaktor  
pracował dalej.

P rośnie  
8 s - 16.2 MPa, wyłączenie  
reaktora

13 s - P spadło do 15.2 MPa-  
wartość progowa, **zawór  
nadmiarowy powinien się  
zamknąć.**

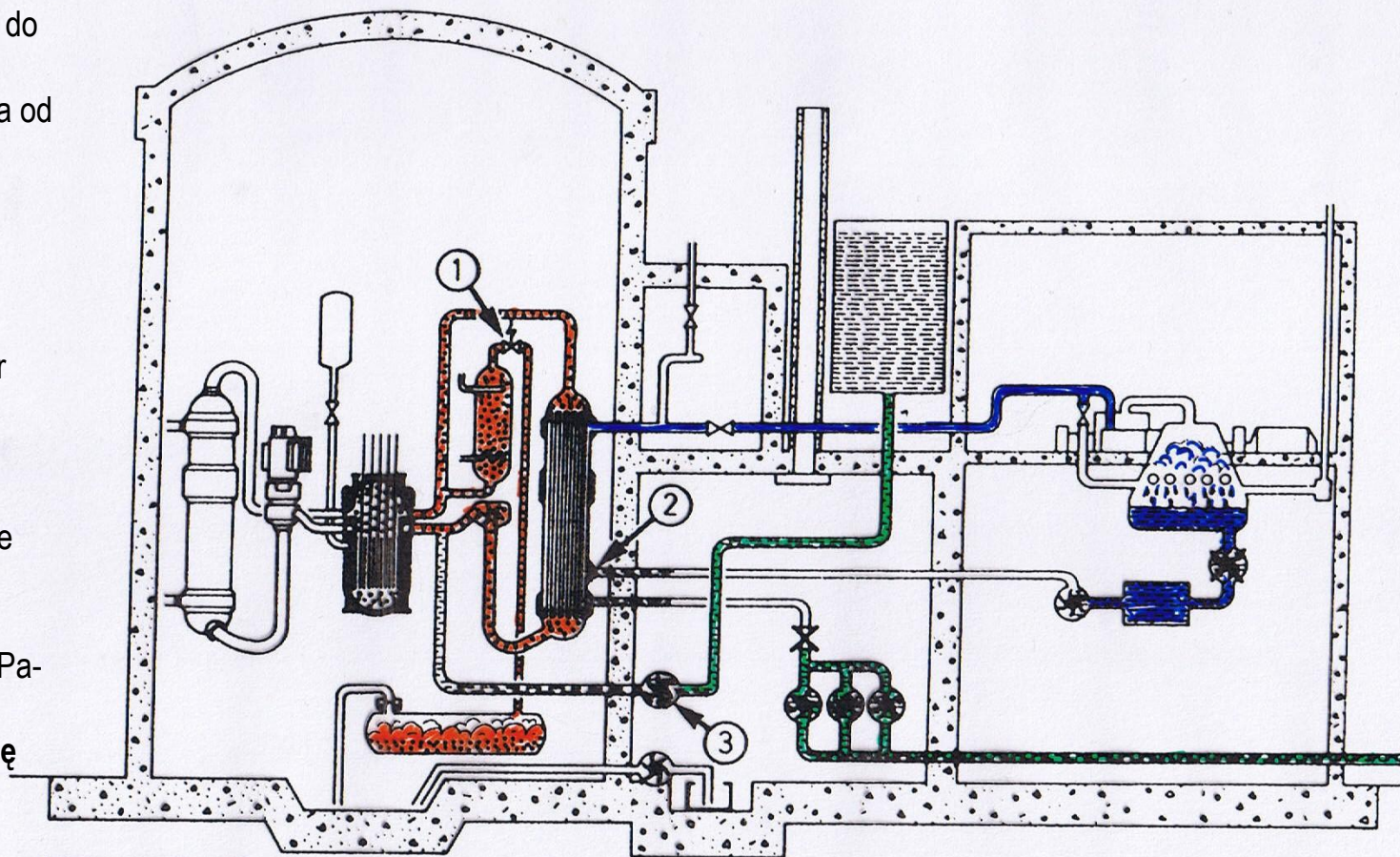
Zielona lampka zapala się w  
sterowni. 1-6 minutes

Wydatek przez zawór  
nadmiarowy 800 l/min

**Figure 5.1** TMI-2 phase 1: turbine trip.

**Pompy AUWZ pracują, woda nie dopływa do WP.**  
2 m 40 s 112 MPa, CWUACR uruchomiony

1 minuta - pogorszenie odbioru ciepła w WP  
4 m 38 - jedna pompa CW UACR wyłączona,



# Operatorzy sądzą że zawór nadmiarowy jest zamknięty i wyłączają UACR

---

- W rzeczywistości zawór nie zamknął się, ale w układzie sygnalizacji brak było wskaźnika pokazującego rzeczywisty stan zaworu. Był to błąd w koncepcji układu, który wpłynął decydująco na dalszy przebieg wydarzeń.
- Po upływie 2 min 40 s ciśnienie w obiegu pierwotnym spadło do 11 MPa, CWUACR został uruchomiony i zaczął wtryskiwać wodę do rdzenia. **Poziom wody w stabilizatorze podnosił się nadal.**
- Operatorzy obawiali się, że dalszy wtrysk wody doprowadzi do likwidacji poduszki parowej. Operatorzy nie wiedzieli, że w tym czasie w obiegu występowało już wrzenie i znaczna część zbiornika reaktora była wypełniona parą. Powodowało to podnoszenie poziomu wody w stabilizatorze.
- W obawie, aby obieg pierwotny nie został przepełniony wodą, **operatorzy wyłączyli dwie pompy CWUACR, a wydatek trzeciej znacznie zmniejszyli.**
- Od tej pory **wypływ wody przez zawór nadmiarowy był większy** od wydatku wody podawanej do obiegu przez CWUACR



# Pierwsze uwolnienia radioaktywności do otoczenia poza obudowę bezpieczeństwa.

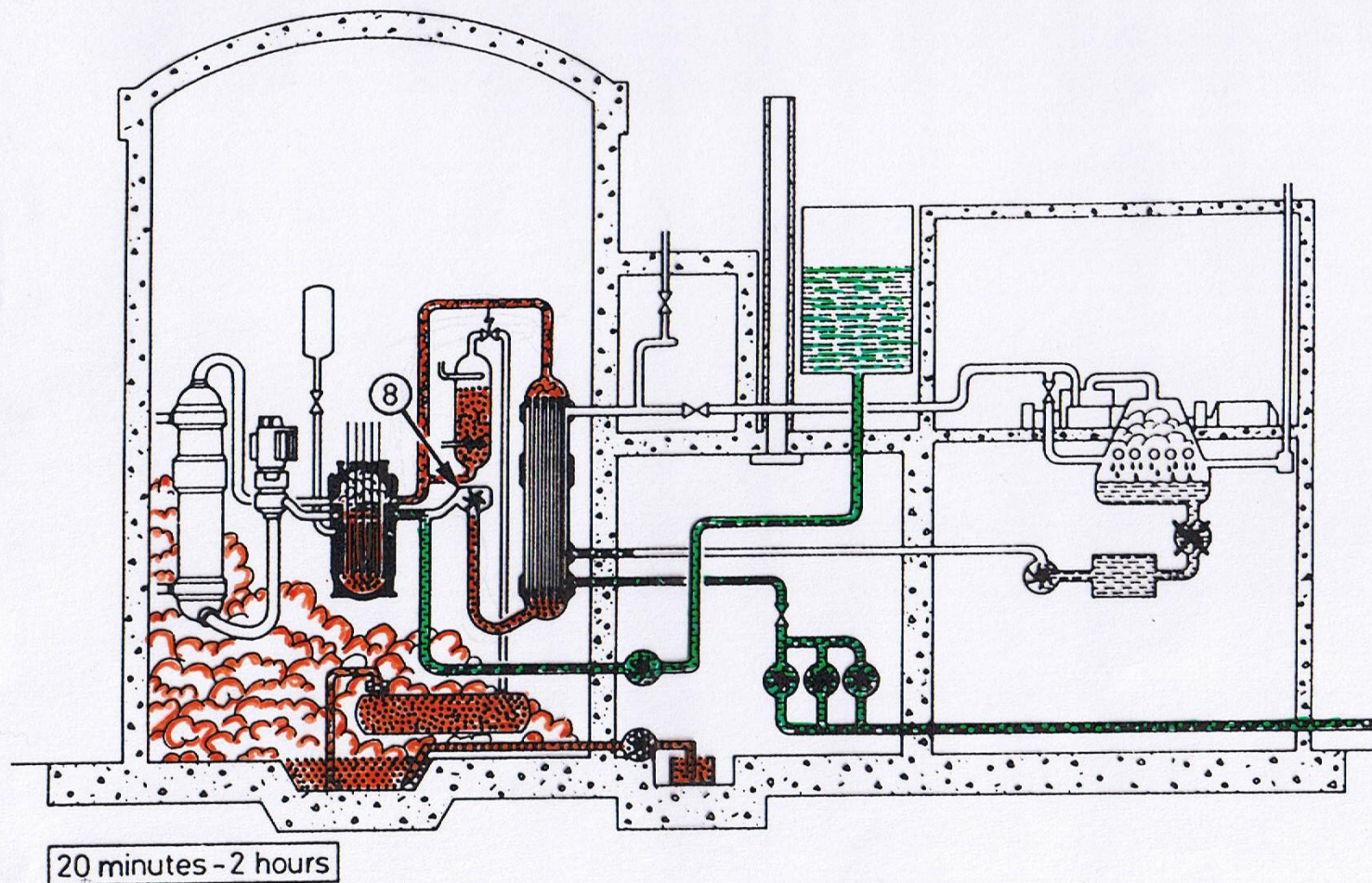
---

Wskutek wypływu wody przez zawór nadmiarowy ilość jej w zbiorniku zrzutowym rosła. Zawór bezpieczeństwa na tym zbiorniku otworzył się i woda zaczęła wypływać do obudowy bezpieczeństwa. Po 8 minutach pompa 26 została automatycznie uruchomiona i zaczęła przepompowywać wodę ze studzienki ściekowej 23 do zbiornika 27 w budynku pomocniczym.

Zawory odcinające na odpowiednim rurociągu pozostawały otwarte, bo izolacja obudowy bezpieczeństwa następowała automatycznie tylko po wzroście ciśnienia powyżej 27 kPa, Uruchomienie CW UACR nie było sprzężone z odizolowaniem obudowy jak to ma miejsce w reaktorach firmy Westinghouse i WWER.

Ten przepływ stał się przyczyną uwolnienia pewnej ilości gazów radioaktywnych, czego można było uniknąć w razie automatycznego izolowania obudowy przy wtrysku z CW UACR.

Wobec stałego dopływu wody i pary ze stabilizatora, ciśnienie w zbiorniku zrzutowym wzrastało i po 15 min została rozerwana przepona na tym zbiorniku. Od tej pory chłodziwo z 1 obiegu wypływało bezpośrednio do obudowy.



**Figure 5.3** TMI-2 phase 3: continued depressurization.

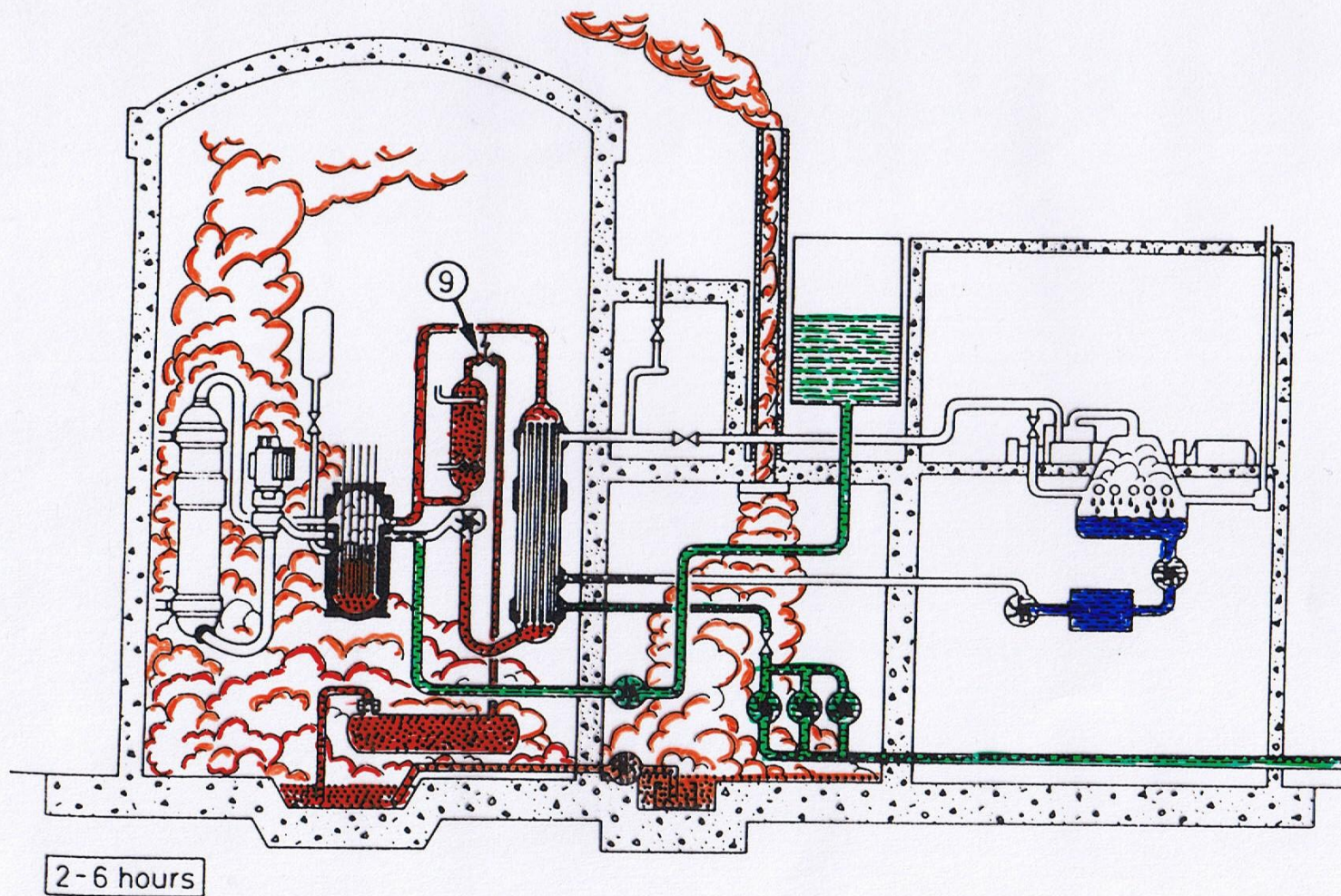
20 m - 1 h - parametry  
ustabilizowane, 70 bar,  
290 oC

38 m - zatrzymano  
pompy usuwające wodę  
z Obudowy bezp.

1h 14 m - GPC w pętli  
B wyłączone  
(wibracja, niskie  
ciśnienie)

1 h 40 m - GPC w pętli  
A wyłączone  
Do tej pory wypłynęło  
2/3 wody z I obiegu.  
**Poziom wody 30 cm  
nad rdzeniem.**  
**Brak przepływu w  
konwekcji naturalnej**





**Figure 5.4** TMI-2 phase 4: the heat-up transient.

Nowa zmiana przyszła do reaktora. Kierownik zmiany kazał zamknąć zawór odcinający pod zaworem nadmiarowym. Sądził, że w ten sposób usuwa możliwy mały przeciek. Nie wiedział że przerwał silny wypływ wody.

**2 h 18 m - PORV zawór odcinający zamknięto**

Ciśnienie i obieg rośnie, ciśnienie w obudowie maleje. Wyciek ustał. Ale warunki odbioru ciepła w rdzeniu gorsze. Powstaje poduszka parowa. – paliwo grzeje się powyżej 1800 oC.

# Osuszenie, przegrzanie i stopienie paliwa

---

- Wskutek ciągłego odparowywania wody i odcięcia drogi wypływu pary, pęcherz parowy zebrał się nad rdzeniem, wypchnął wodę z rdzenia, co przyspieszyło nagrzewanie paliwa.
- 2h 55 m - alarm w EJ, wysokie natężenie promieniowania w przewodzie łączącym reaktor z układem oczyszczania. ( rdzeń uszkodzony).
- Próby uruchomienia pomp. Jedna pompa pracuje 19 m, wyłącza się wskutek drgań. Ale wtłoczyła ona około 28 m<sup>3</sup> wody,.
- Pulsacje ciśnienia, paliwo rozsypało się. Wysokość złoża odłamków w rdzeniu około 75 cm. Stopiona masa spada na dno zbiornika. Łącznie w dolnej komorze około 20 ton stopionego metalu.
- 3h 20- m - włączono CW UACR. 3h 30 m - alarm ogólny
- **4.30 - 7 h Próby skroplenia pary .**
- Niepomyślne, otwieranie PORV powoduje ulatnianie pary, jodu, cezu i gazowych produktów rozszczepienia.



# Piątek i sobota - niepotrzebna ewakuacja

---

W piątek i w sobotę 30-31 marca strach, napięcie i zamieszanie doszły do zenitu [9]. W piątek NRC dowiedziała się o dwóch wydarzeniach: o nagłym wzroście ciśnienia w obudowie bezpieczeństwa, jaki w środę wieczorem zasygnalizowały układy pomiarowe (spalenie wodoru) - co sugerowało wybuch wodorowy w obudowie, i o celowym usunięciu radioaktywnych gazów z obudowy w piątek rano, które spowodowało wzrost wskazań bezpośrednio nad kominem wentylacyjnym do 12 mSv/h.

Jednocześnie, wskutek rozmów telefonicznych między ludźmi nieorientowanymi w sytuacji w elektrowni, wystąpiła seria nieporozumień między różnymi agencjami stanowymi i federalnymi. Urzędnicy doszli do wniosku, że pomiar 12 mSv/h oznaczał natężenie promieniowania poza terenem elektrowni. Sądziли oni także, że może dojść do wybuchu wodoru, że NRC zarządziła ewakuację i że możliwe jest stopienie rdzenia.

Zniekształcone komunikaty prasowe wywołały dyskusję na temat ewakuacji. W piątek nastąpił niezorganizowany i chaotyczny wyjazd weekendowy oparty nie na tym, co działo się w rzeczywistości w elektrowni, lecz na tym, co wyobrażały sobie środki masowego przekazu i niektórzy urzędnicy. [9].

# Brak mierzalnych skutków uwolnień z TMI

---

- Ustalono zgodnie, że wielkości aktywności uwolnionej z TMI były pomijalnie małe. Zebrano tysiące próbek i przeanalizowano je w różnych zespołach. Wszystkie analizy dały wyniki negatywne. Również badania osób mieszkających w sąsiedztwie elektrowni przy pomocy licznika całego ciała, a więc najdokładniejsze pomiary, jakie można było przeprowadzić, dały wyniki negatywne. Łącznie zbadano 762 osoby - i u żadnej nie wykryto oznak napromieniowania [7].
- Osoby występujące przeciwko elektrowni twierdziły, że emisje jodu mogły osiągnąć wartość 1,6 PBq (43 000 Ci). Jednakże takie emisje dałyby wyraźne efekty w środowisku. Na przykład, podczas awarii w reaktorze wojskowym w Windscale w 1957 roku, gdy wydzielilo się 740 TBq (20 000 Ci) jodu, został skażony obszar ponad 200 km<sup>2</sup>, a koncentracja jodu w mleku krowim sięgała 59 000 Bq/litr. Natomiast wokoło TMI nie wykryto wzrostu aktywności jodu w mleku, pomimo że próg czułości urządzeń pomiarowych wynosił 0,02 mikroSv/h ponad promieniowanie tła.
- Opierając się na wynikach uzyskanych z badania aktywności trawy, oszacowano, że łączne emisje jodu nie mogły być większe niż 4 Ci, co stanowi wartość niższą od 15 Ci podanych oficjalnie przez NRC. Wobec tak niskich wartości zmierzonych i przy braku oznak napromieniowania w badaniach licznikiem całego ciała widać, że emisje jodu były nieznaczące [7].



# Podsumowanie skutków awarii

---

- W czasie awarii wokół elektrowni pobierano i analizowano setki próbek powietrza, wody i gleby. . Prace te prowadził Departament Energetyki USA i Departament Zasobów Środowiska stanu Pensylwania, a także inne zespoły ekspertów. Stwierdzono, że nie było wysokich wskazań pomiarowych izotopów promieniotwórczych z wyjątkiem gazów szlachetnych, nie było praktycznie biorąc żadnych wydzielen jodu. Mierzone wartości były dużo niższe od ustalonych przepisami krajowymi poziomów granicznych. Mimo to burza medialna i polityczna, pełna zamieszania i dezinformacji nadal szalała w pełni.
- Rdzeń reaktora utracił chłodzenie wodne, został osuszony i przegrzany, jedna trzecia paliwa stopiła się.
- Obudowa bezpieczeństwa zachowała szczelność zgodnie z projektem. Pomimo stopienia jednej trzeciej rdzenia, również i zbiornik ciśnieniowy reaktora zachował szczelność. Stopione paliwo pozostało wewnątrz zbiornika.
- Substancje radioaktywne przeniknęły przez zaprojektowane bariery elektrowni (nie było bezpośrednich przecieków z obudowy bezpieczeństwa) i wydostały się do środowiska. Wydzielenia były małe i nie stwarzały zagrożenia dla zdrowia. Potwierdziły to tysiące pomiarów i analiz próbek pobranych w otoczeniu elektrowni podczas awarii.

# Odrzucenie przez sąd zarzutów odnośnie skutków zdrowotnych awarii w TMI

---

Skażenie mleka produktami rozszczepienia było pomijalnie małe. Największe występowały w mleku kozim, które było wykorzystywane tylko do karmienia koźląt. Wg oceny NRC, niemowlęta pijące mleko kozie o maksymalnym skażeniu przez 2 miesiące po awarii otrzymałyby hipotetycznie dawkę wynoszącą tylko 0,02 mSv.[8].

Twierdzenia organizacji antynuklearnych o rzekomych skutkach zdrowotnych są pozbawione wszelkich podstaw. Wiele organizacji wyspecjalizowanych w dziedzinie ochrony przed promieniowaniem przeprowadziło szereg badań epidemiologicznych i nie stwierdziło żadnych ujemnych skutków zdrowotnych [9].

Zarówno sądy regionalne jak i sąd apelacyjny orzekły, że pomimo przeszukania wszelkich akt i dokumentów pod kątem poparcia twierdzeń mieszkańców, nie znaleziono żadnych po temu podstaw, a pełna zgodność wielu różnych pomiarów i modeli obliczeniowych analizowanych przez różne zespoły wskazuje, że są one zgodne z rzeczywistością.

**Tezy o szkodliwym wpływie awarii w TMI na zdrowie mieszkańców zostały odrzucone .**

# Definicje działań ochronnych wczesnych, opóźnionych i długoterminowych

---

Pewne ograniczone środki zapobiegawcze, np. podawanie pastylek jodowych, mogą być stosowane. Nie są one uwzględniane w formułowaniu powyższych wymagań

**Działania ochronne wczesne** - obejmują **nagłą ewakuację** w oparciu o prognozę dawki do 7 dni. Można je wdrożyć w fazie nagłego stan zagrożenia, podczas trwania wydzieleń radioaktywności. Okres ten jest z reguły krótszy niż 7 dni.

**Działania opóźnione** –obejmują tymczasowe **przemieszczenie** mieszkańców w oparciu o prognozę dawek oczekiwanych w ciągu 30 dni po awarii. Można je wdrożyć po praktycznym zakończeniu fazy wydzielania produktów rozszczepienia.

**Działania długoterminowe** –obejmują **trwałe przesiedlenie** ludności w oparciu o przewidywane dawki w ciągu 50 lat powodowane przez promieniowanie gruntu i powtórne tworzenie zawiesiny aerozoli. Dawki otrzymywane drogą pokarmową nie są przy tym uwzględniane.