

Wydział Fizyki UW
Podstawy bezpieczeństwa energetyki
jądrowej, 2018

**6. Czarnobyl –
jak doszło do awarii**

Prof. NCBJ dr inż. A. Strupczewski

Plan wykładu 1

1. Ogólna charakterystyka reaktora RBMK
2. Wady konstrukcyjne reaktora RBMK
 - *Brak obudowy bezpieczeństwa*
 - *Samoczynny wzrost mocy reaktora RBMK w pewnych sytuacjach awaryjnych*
 - *Błąd konstrukcyjny w układzie prętów bezpieczeństwa*
 - *Możliwość odłączenia układu zabezpieczeń reaktora*
 - *Obecność grafitu i niedobór wody.*
3. Brak kultury bezpieczeństwa

Plan wykładu cd 2

4. Przebieg awarii
5. Działania poawaryjne i budowa sarkofagu
- 6 Działania dla poprawienia bezpieczeństwa pracujących jeszcze reaktorów RBMK
- 7 Jakie byłyby konsekwencje podobnych błędów operatorów w reaktorze PWR?

Czemu budowano reaktory RBMK?

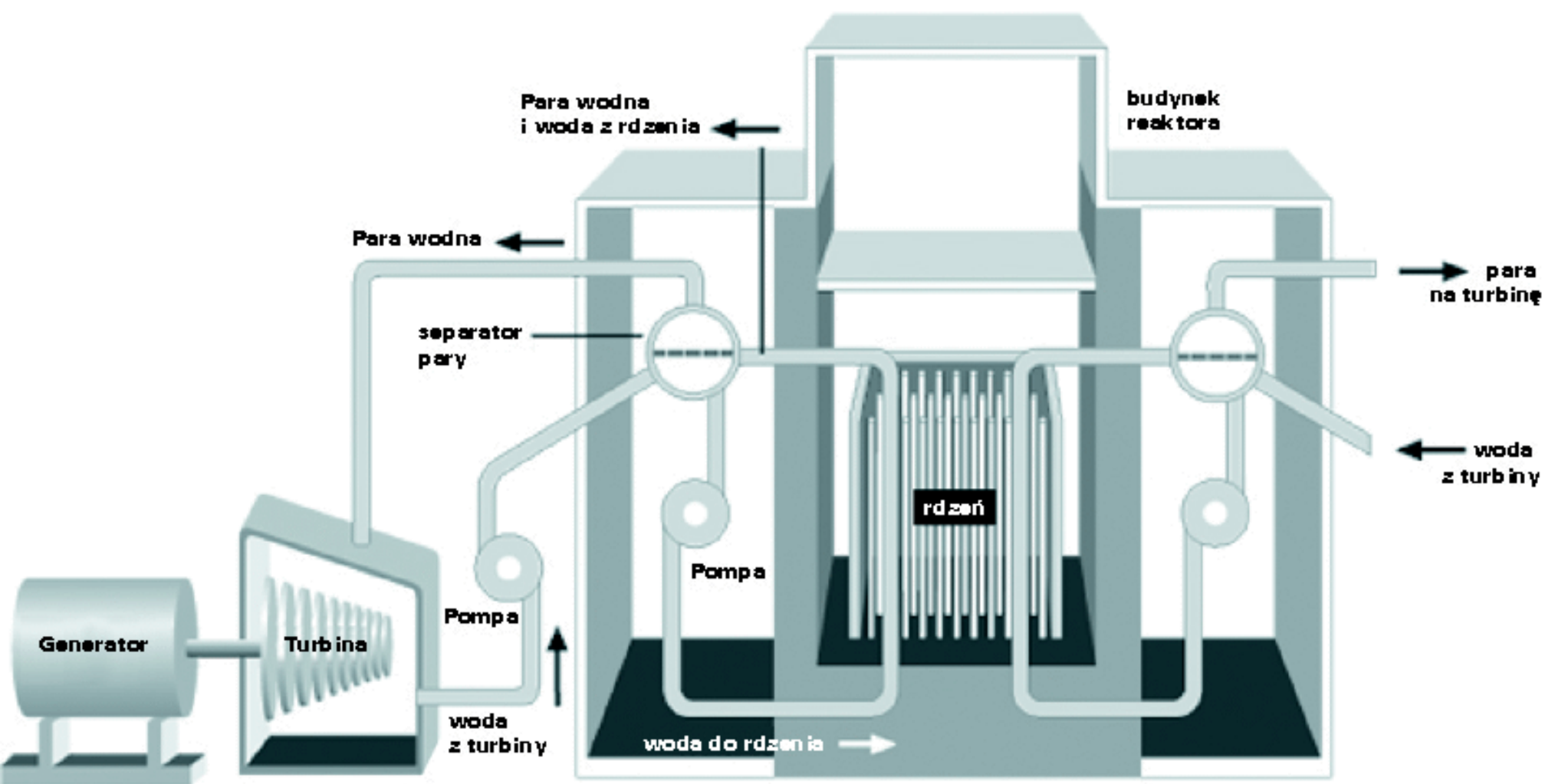
- Rozwiązanie projektowe oparte na reaktorach wojskowych - pracowały w ZSRR od 1948 r, a I EJ Obnińsk od 1954 r.

Pluton do celów wojskowych trzeba usuwać z reaktora już po kilku tygodniach – nie po trzech latach.

- Układ modułowy – rdzeń dostępny w czasie pracy reaktora
- Modułowość umożliwia też budowę wielkich bloków
- Woda pełni rolę nośnika ciepła – moderatorem jest grafit
- Odizolowanie twórców od świata,
- Rozwiązania utrzymywane w tajemnicy

RBMK

WYGLĄD REAKTORA



Schemat obiegu pierwotnego reaktora RBMK w Czarnobylu

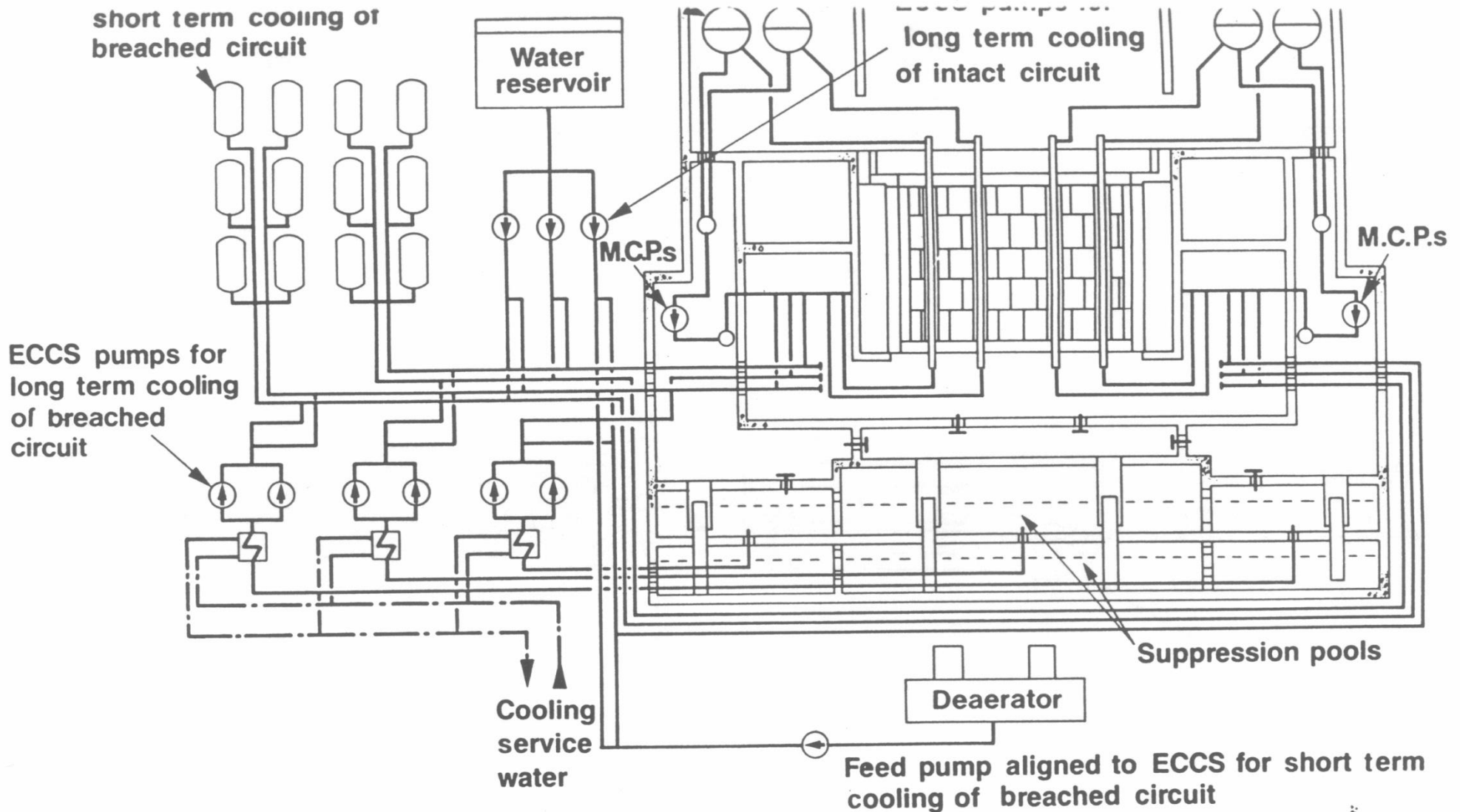
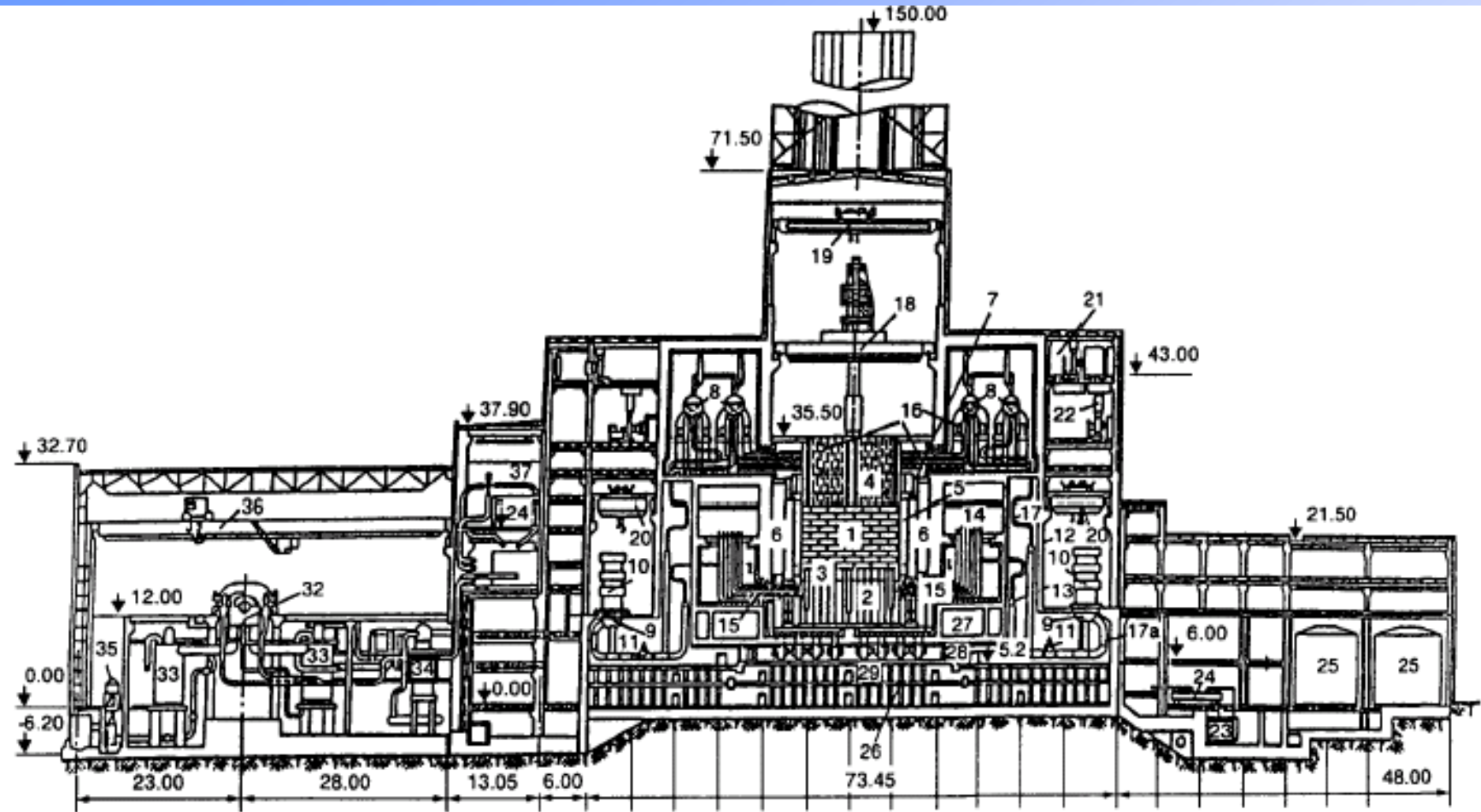


Fig. 8. Schematic diagram reactor cooling circuit and

Konstrukcja RBMK

- Zestawy paliwowe z uranu wzbogaconego w rurach ciśnieniowych
- Wokoło rury szczelina izolacyjna – wokoło grafit
- Duże wymiary: średnica 12 m, wysokość 7 m
- Wokoło rdzenia wodna osłona biologiczna
- Układ regulacji – 211 prętów pochłaniających neutrony
- Dodatkowo pręty regulacyjne wsuwane od dołu
- Układ chłodzenia – pośredni między PWR a BWR, z rozdzielaniem pary i wody w walczakach, woda wraca do rdzenia, para płynie do turbiny i po skropleniu wraca do walczaka.

Układ reaktora RBMK



1- stos grafitowy, 2-7 struktury metalowe, 8 walczak separatora pary, 9 główne pompy cyrkulacyjne, 10- silnik pompy, 11 zawory odcinające, 12 kolektor wlotowy.

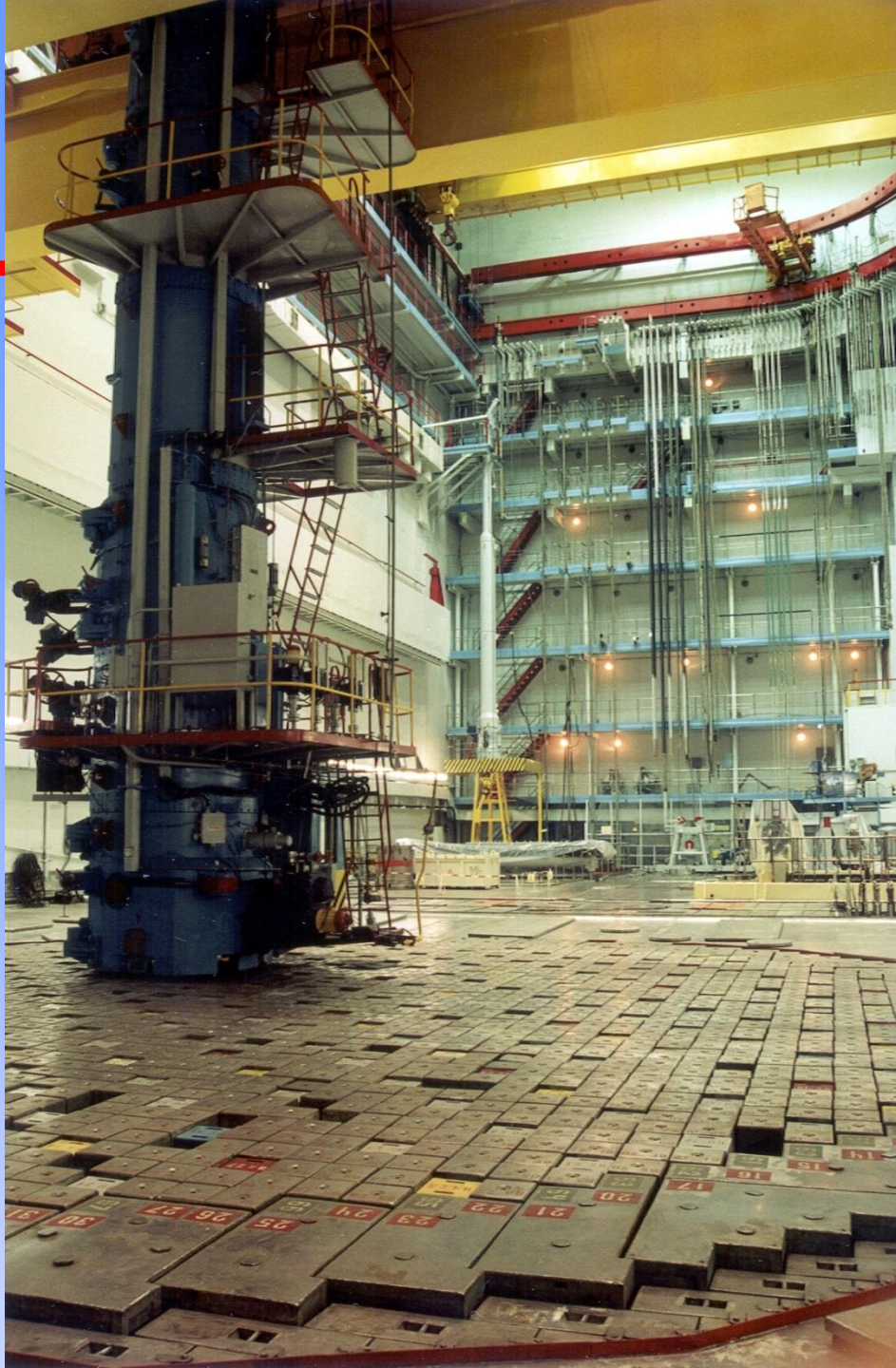
Wady RBMK w zakresie bezpieczeństwa

- Brak obudowy bezpieczeństwa – kontrast z USA i wymaganiami na Zachodzie
- Radzieckie przepisy: obudowa bezpieczeństwa wymagana „*chyba że konstruktor udowodni że nie jest ona potrzebna...*”
- W Czarnobylu częściowy układ lokalizacji awarii – nie obejmował rdzenia i górnej części obiegu pierwotnego
- System wystarczał do lokalizacji przecieków - nie do opanowania skutków dużej awarii
- Układ Awaryjnego Chłodzenia Rdzenia wystarczał do chłodzenia połowy rdzenia ale nie całego rdzenia po awarii.

Widok z zewnątrz reaktorów RBMK w elektrowni Smoleńsk

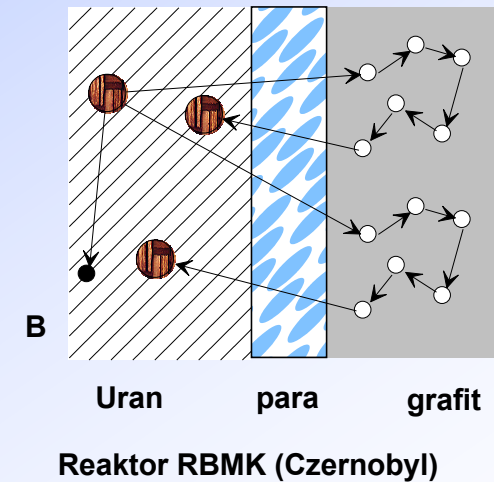
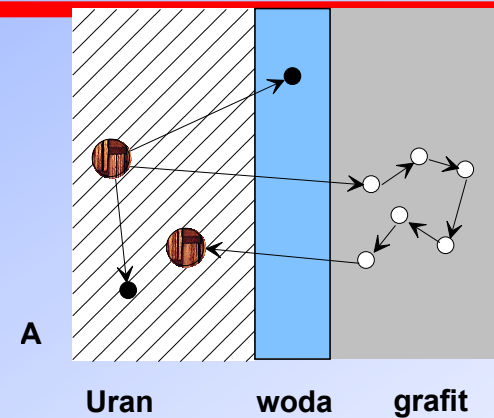
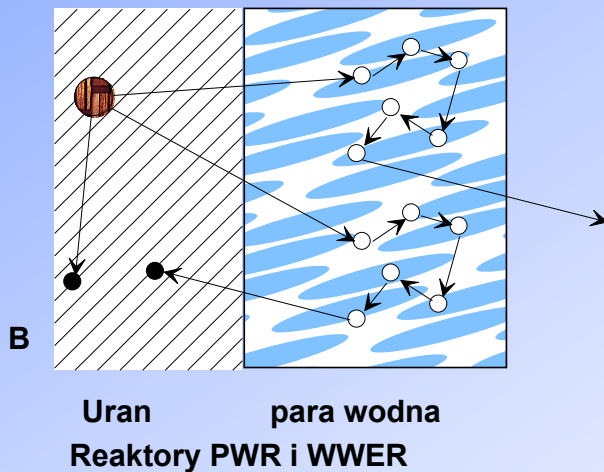
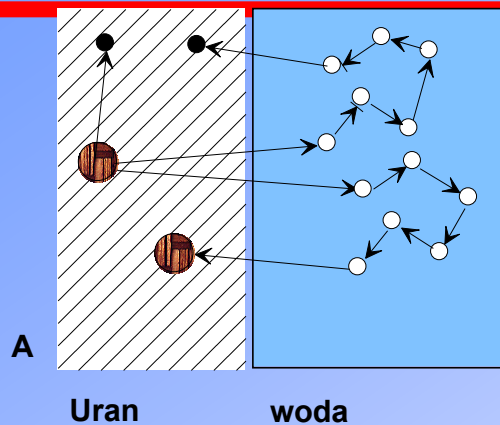


Hala przeładowcza- rdzeń dostępny z góry



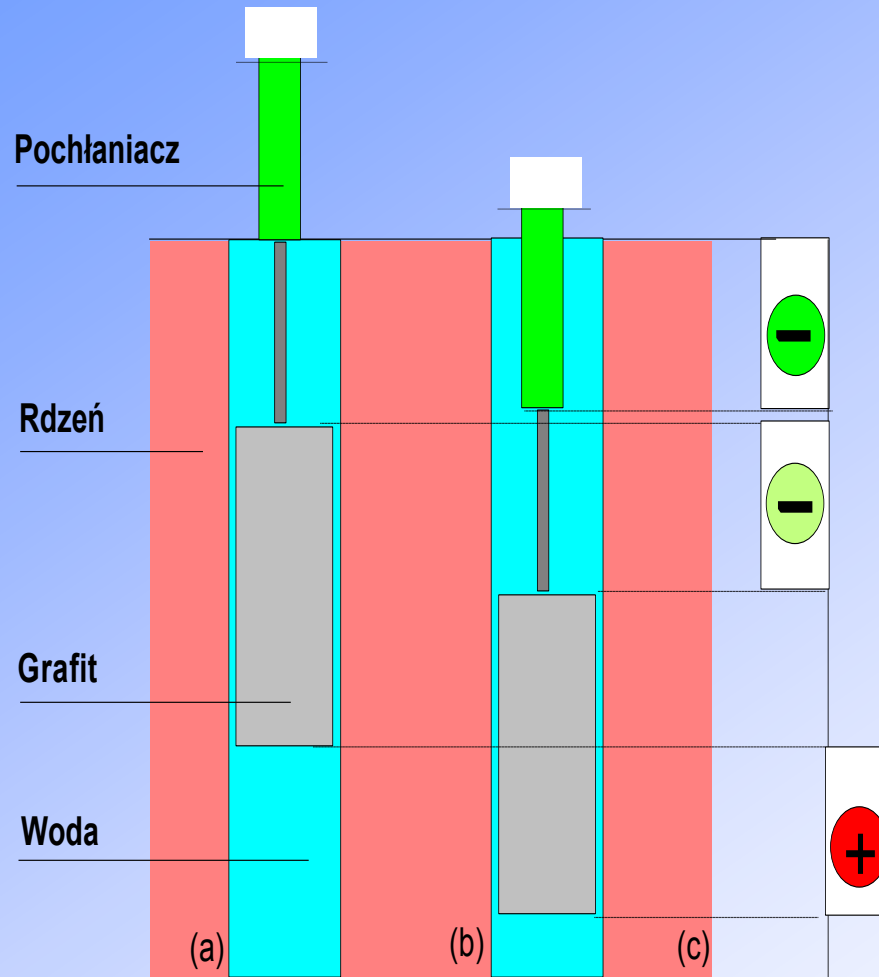
- Maszyna przeładowcza przesuwająca się w hali nad reaktorem może korek nad elementem paliwowym podnieść, paliwo wymienić i korek ponownie załadować na miejsce.
- Hala, w której przesuwana się maszyna przeładowcza, jest normalnie dostępna podczas pracy reaktora.
- Rdzeń nie jest otoczony systemem barier jak w reaktorach PWR .
- Sytuacja w EJ Smolensk, RF.

Zmiany gęstości rozszczepień po odparowaniu części wody



A- normalna praca, B – spadek przepływu wody, część wody odparowuje.
W reaktorze PWR lub WWER moc maleje, w reaktorze RBMK moc rośnie.

Błąd konstrukcyjny w reaktorze RBMK



- **Skutki wprowadzania pręta bezpieczeństwa do rdzenia reaktora RBMK.**
Wprowadzanie przedłużacza grafitowego powoduje wzrost mocy w dolnej części rdzenia, a spadek mocy w części górnej (znaki + i – w kolumnie „c”).
- Ale w chwili awarii rozkład mocy w rdzeniu był przekoszony – moc generowała się głównie w dolnej części.
- Wprowadzanie kilkudziesięciu prętów na raz spowodowało gwałtowny wzrost mocy, który nałożył się na wzrost mocy powodowany utratą wody

Inne braki w zakresie bezpieczeństwa

- Po awarii projektanci twierdzili że nie wolno było pracować z reaktorem z dużą liczbą prętów bezpieczeństwa poza rdzeniem
- Operatorzy nie wiedzieli o zagrożeniu – bo nie opisano go w raporcie bezpieczeństwa
- Dozór jądrowy pozwolił na to zaniedbanie – byłoby ono nie do przyjęcia na Zachodzie.
- Sygnały zabezpieczeń w Czarnobylu można było odłączyć – i operatorzy to zrobili
- Mało wody – a dużo rozżarzonego grafitu...
- Skutek: po awarii jod nie jest zatrzymywany przez wodę
- Grafit w reakcji z tlenem płonie...

Brak kultury bezpieczeństwa

Sprawy bezpieczeństwa winny być ważniejsze od produkcji energii

Za bezpieczeństwo EJ winien odpowiadać jej dyrektor

Analizy bezpieczeństwa winny obejmować wszystkie możliwe awarie

Dozór jądrowy winien być silny i mieć uprawnienia.

W Czarnobylu żaden z tych warunków nie był spełniony.

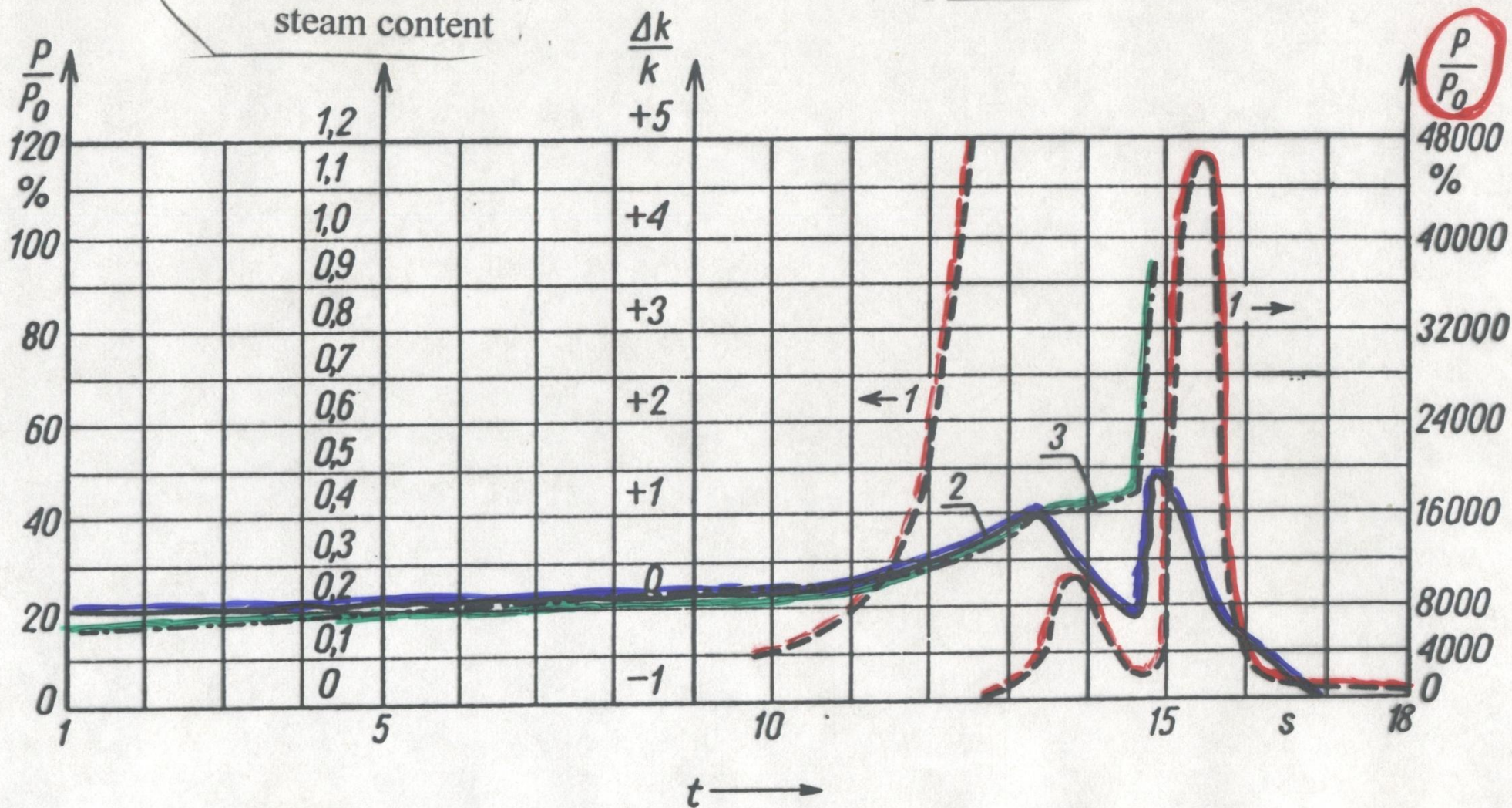
Zaplanowanie doświadczenia – potencjalnie niebezpiecznego – bez udziału fachowców w zakresie bezpieczeństwa.

Pogwałcenie zasad w toku eksperymentu (odłączony UACR, długa praca na małej mocy spowodowała niestabilność, odłączenie układów bezpieczeństwa).

Przebieg awarii

- Cel eksperymentu: Pokazać, że w razie wyłączenia reaktora energia kinetyczna obracającego się wirnika turbiny wystarczy do zasilania pomp chłodzenia reaktora.
- Doświadczenie uznano za problem elektryczny, nie reaktorowy.
- 25 kwietnia rano zmniejszono moc z 3000 do 1500 MW, odłączono UACR, ale dyspozytor nie pozwolił na eksperyment, bo moc była potrzebna w sieci.
- Przy pracy na malej mocy reaktor ulega zatruciu – trzeba wyciągać z rdzenia pręty regulacyjne by utrzymać go w stanie krytycznym. W miarę upływu czasu sytuacja pogarszała się, reaktor stał się niestabilny.
- Operatorzy wyłączyli układ zabezpieczeń, by umożliwić powtórzenie eksperymentu
- Wreszcie o północy – rozpoczęto eksperyment

Przebieg zmian parametrów reaktora w Czarnobylu w chwili awarii

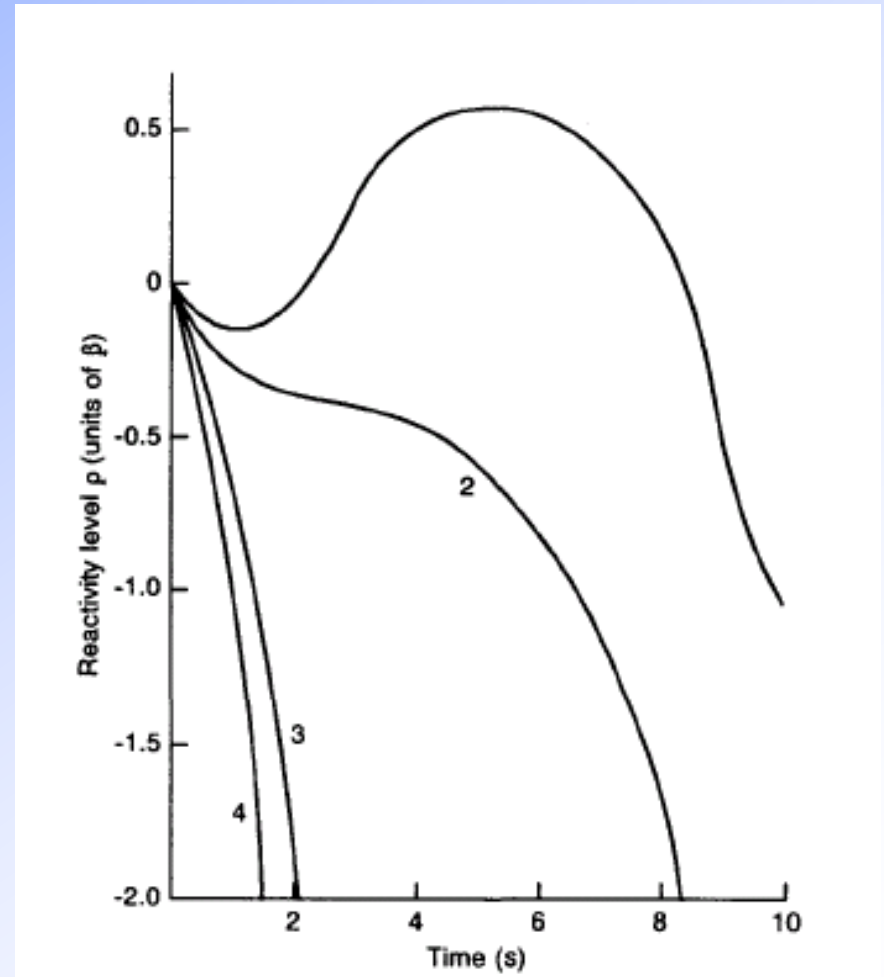
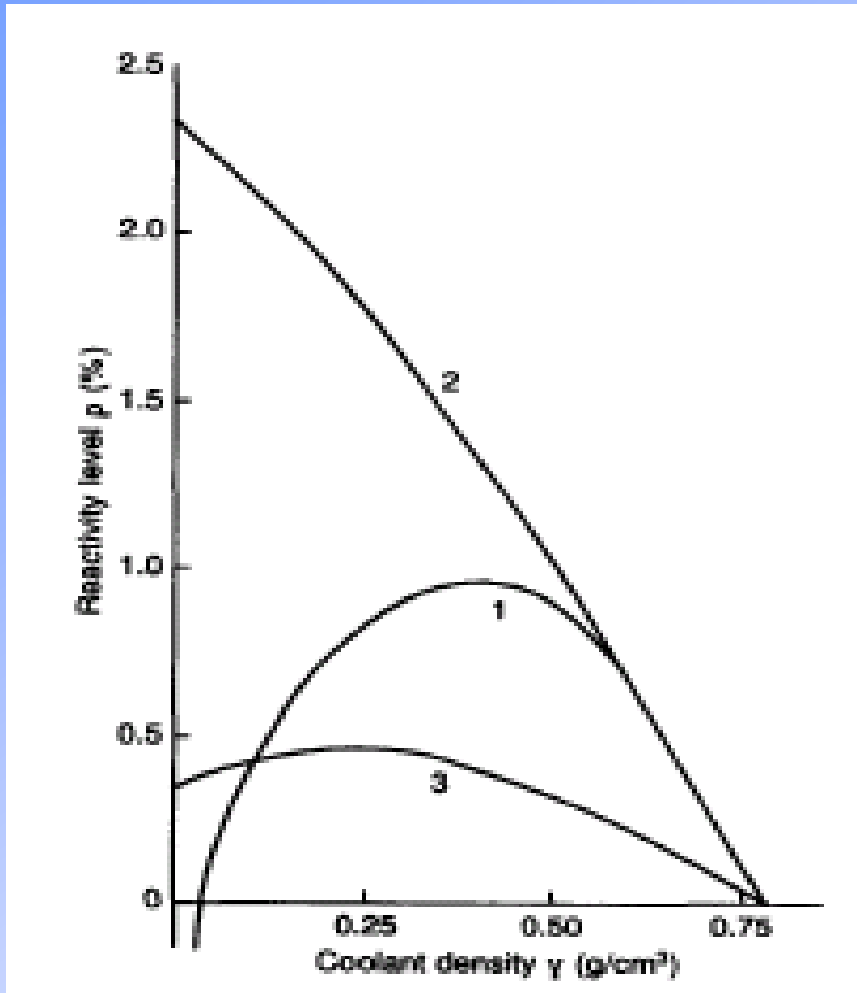


1. Moc względna, P/P_0 , %, zmiany najpierw wg skali po lewej stronie, 0-120%, potem wg skali po prawej stronie wykresu, od 0 do 48 000%, 2. reaktywność $\Delta k/k$ od -1% do +5%, 3. objętościowa zawartość pary wodnej, od 0 do 1,2

Awaria!

- O 1.22 operator zmniejszył dopływ wody zasilającej walczaki
- 1.23.04 operator odcina dopływ pary do turbiny
- Przepływ wody przez rdzeń maleje, bo 4 z 8 pomp są napędzane przez tę turbinę.
- Reaktor w stanie niestabilnym. Moc neutronowa rośnie.
- 1.23.20 operator naciska przycisk zrzutu prętów bezpieczeństwa. Skutek odwrotny – moc rośnie.
- Przepalenie paliwa, odparowanie uranu, reakcja wody z cyrkonem
- $Zr + 2 H_2O = ZrO_2 + 2H_2 + \text{ciepło}$.
- Rozerwanie rur ciśnieniowych, potem (1.23.48) wybuch wodoru wskutek kontaktu z powietrzem w obszarze grafitu.

Zmiany reaktywności- pierwotnie i teraz



7 Jakie byłyby konsekwencje podobnych błędów operatorów w reaktorze PWR?

- 1. Obniżenie liczby prętów bezpieczeństwa w rdzeniu reaktora poniżej wartości dopuszczalnej
- 2. Obniżenie mocy poniżej wartości zaplanowanej.
- 3. Włączenie dodatkowych pomp w pierwotnym obiegu chłodzenia.
- 4. Wyłączenie awaryjnego układu chłodzenia rdzenia
- 5. Wyłączenie sygnałów powodujących awaryjne wyłączenie reaktora
- 6. Błąd konstrukcyjny w układzie prętów bezpieczeństwa
- 7. Najważniejsze: zdolność RBMK do samoczynnego zwiększania swej mocy w warunkach awaryjnych.

Porównanie cech reaktora RBMK w Czarnobylu i reaktorów PWR budowanych w krajach OECD

<i>W Czarnobylu</i>	<i>W reaktorze PWR</i>
Po wzroście temperatury moc reaktora	
Rośnie	Maleje
Zrzut prętów bezpieczeństwa powoduje	
Przejściowy wzrost mocy!	Wyłączenie reaktora
Układy bezpieczeństwa	
Były zależne od operatora	Działają samoczynnie
Po błędach ludzi	
Moc wzrosła aż do stopienia paliwa	Moc maleje, reaktor wyłącza się
Reaktor zawiera	
Rozżarzony grafit, pali się długo	Wodę, naturalne chłodziwo
W razie stopienia paliwa	
Cez i jod wydzielają się z suchego rdzenia	Woda rozpuszcza i zatrzymuje cez i jod
Obudowa bezpieczeństwa	
Nie istniała. Jod i cez unosiły się w górę w powietrze	Pełna obudowa bezpieczeństwa zatrzymuje wszystkie produkty rozszczepienia
Rozwiązania reaktora	
Były tajne, nieznane poza ZSRR Oparte na reaktorach wojskowych Nie wykorzystano w nich doświadczeń innych krajów	Są szeroko znane, analizowane w setkach ośrodków, dostępne dla krytyków i przeciwników EJ, usprawniane przy wykorzystaniu doświadczeń całego świata
Urząd dozoru jądowego	
Słaby, podporządkowany celom politycznym	Silny, niezależny, oddzielony od produkcji
Zagrożenie po awarii	
Objęło dużą część Ukrainy i Białorusi,	Jest ograniczone do kilku kilometrów