

Wydział Fizyki UW
Podstawy bezpieczeństwa energetyki
jądrowej, 2018

ODBIÓR MOCY Z REAKTORA PWR

Dr inż. A. Strupczewski, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Spis treści

Regulacja mocy – pręty regulacyjne

Wpływ prętów na rozkład strumienia neutronów

Kompensacja wypalenia przy użyciu kwasu borowego

Ograniczenia mocy cieplnej reaktora jądrowego

Maksymalna temperatura wewnątrz pręta paliwowego

Rozkład temperatury w pręcie paliwowym.

Odbiór ciepła z powierzchni koszulki

Kryzys wymiany ciepła

Moc powyłączeniowa

Układ awaryjnego chłodzenia rdzenia i jego ochrona

Obieg wtórny w PWR

Wzór czterech czynników na współczynnik mnożenia neutronów w reaktorze $k_{\infty} = \eta \epsilon P f$

- η – stosunek neutronów powodujących rozszczepienie do neutronów pochłoniętych w paliwie, $\eta = \Sigma f / \Sigma a$
 - Σf - przekrój czynny na rozszczepienie U-235
 - Σa - przekrój czynny na absorpcję w U 235 i U 238
- ϵ – współczynnik efektu rozszczepień na neutronach prędkich, stosunek liczby neutronów rozszczepieniowych do neutronów produkowanych z rozszczepień termicznych.
- P - frakcja neutronów spowolnionych do energii termicznej bez absorpcji w obszarach energii rezonansowych
- f - stosunek liczby neutronów pochłoniętych w paliwie do liczby neutronów termicznych pochłoniętych

Współczynnik mnożenia w układzie skończonym $k = k_{\infty} P(NL)$

- gdzie $P(NL)$ - prawdopodobieństwo uniknięcia ucieczki z rdzenia

Regulacja reaktywności reaktora

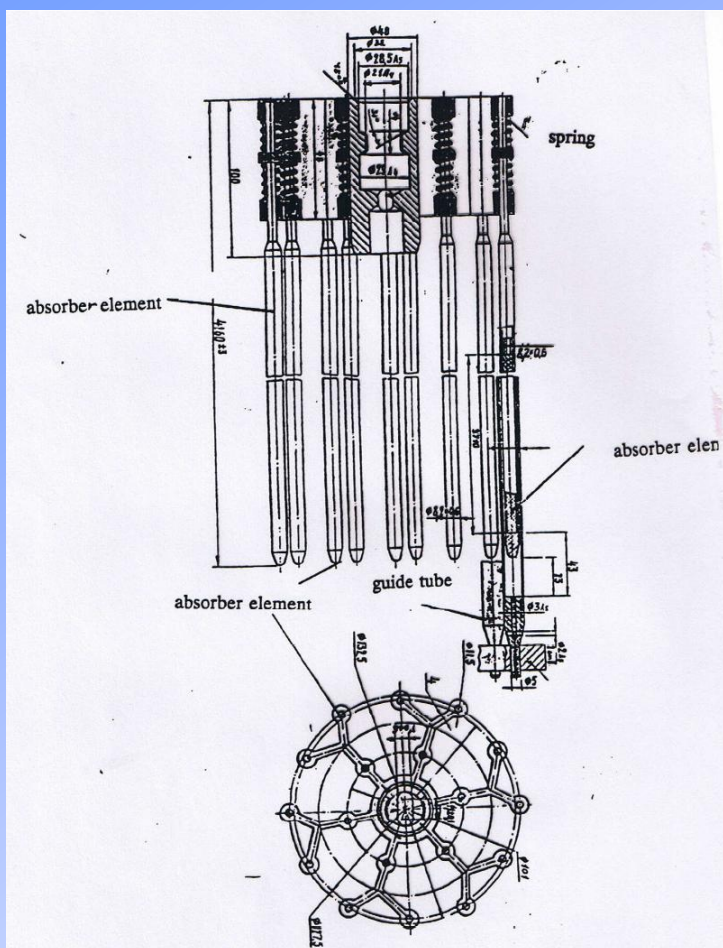
Układ regulacji musi zapewnić wyłączenie i utrzymanie reaktora w stanie podkrytycznym we wszystkich stanach , łącznie z awaryjnymi.

Wymaganie NRC- dwa niezależne systemy wyłączenia reaktora.

Konieczność kompensacji strat reaktywności powodowanych przez

- Efekt wzrostu temperatury 2-5% (do temp. mocy zerowej)
- Efekt wzrostu mocy 1-2% (efekt Dopplera w paliwie)
- Zatrucie samarem i ksenonem 2,5 - 3.0%
- Wypalenie uranu 5-8%
- Regulacja mocy 0,1-0,2%
- Kompensacja zatrucia ksenonem w toku pracy 0-1%
- Wyłączenie awaryjne (zrzut prętów bezpieczeństwa) 2-4% (więcej niż waga najcięższego pręta bezpieczeństwa).

Układ regulacji mechanicznej – ruchome pręty regulacyjne i pręty bezpieczeństwa.



Wiązka prętów regulacyjnych w PWR 1300. Możliwości kompensacji zmian reaktywności ograniczone są przez objętość dostępną w rdzeniu.

Waga prętów regulacyjnych jest proporcjonalna do stosunku powierzchni prętów do objętości rdzenia.

Wysokie jej wartości wymagają ciasnego rozstawienia prętów regulacyjnych, mniejszych zestawów paliwowych i większej liczby napędów prętów regulacyjnych.

Powoduje to wzrost komplikacji mechanicznych i kosztów rdzenia.

Materiał pochłaniający:

Rury ze szkła borokrzemianowego w koszulce ze stali nierdzewnej.

Kompensacja wypalenia przez wprowadzanie wypalanych zatrić do paliwa.

- Dodanie do paliwa materiału o wysokim przekroju czynnym na pochłanianie neutronów, który przemienia się w materiał o niskim przekroju czynnym gdy pochłonie neutron, „wypala się”.
- Takie zatricia kompensują tylko wypalania paliwa.
- **Zalety:**
- Nie powodują szybkich zmian miejscowej gęstości mocy
- Zmniejszają liczbę potrzebnych napędów prętów regulacyjnych
- Mogą służyć do redukcji miejscowych skoków generacji ciepła gdy jest duża różnica we współczynniku mnożenia między paliwem świeżym i częściowo wypalonym.
- Przykłady – kadm, bor, gadolin, hafn, dysproz. Jeśli trucizna nie wypali się całkowicie, to potrzebne jest skompensowanie zatricia przez zwiększenie wzbogacenia paliwa.

Sterowanie przez regulację stężenia kwasu borowego w chłodziwie I obiegu.

Rozpuszczenie absorbera neutronów w chłodziwie - **Problemy** :

- Musi być rozpuszczalny w pełnym zakresie potrzebnych stężeń.
- Chemicznie stabilny- nie ulegać osadzaniu ani nie powodować korozji
- Produkty wychwytu neutronów powinny mieć te same cechy.
- W niektórych układach stosowano siarczan kadmu $CdSO_4$, ale w reaktorach wodnych zwykle stosuje się kwas borowy H_3BO_3 .

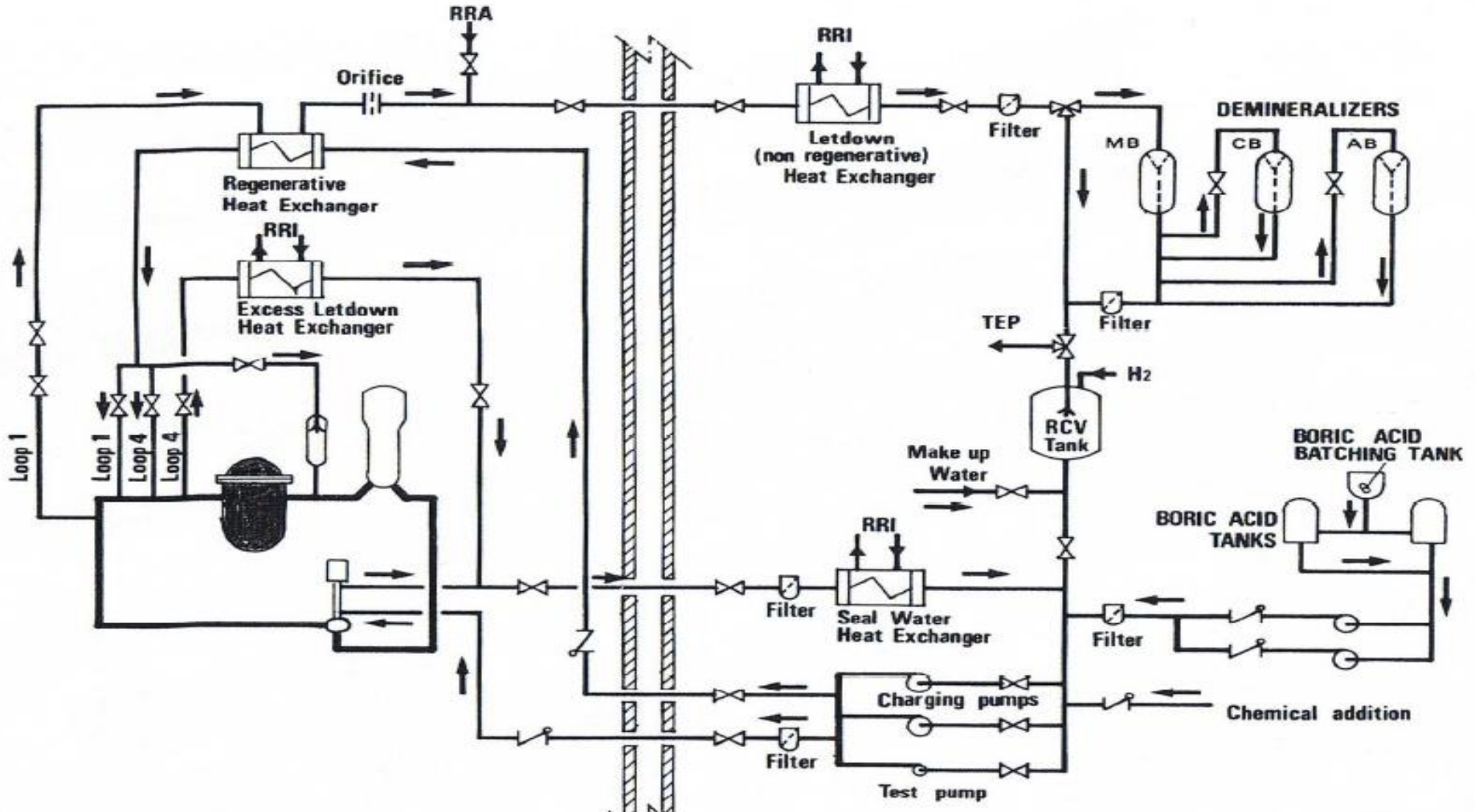
Zalety:

- Redukcja skomplikowania mechanicznego
- Lepszy rozkład mocy w rdzeniu (nie ma zaburzeń miejscowych)

Wady:

- Wpływ na temperaturowy współczynnik reaktywności,
- Ograniczona szybkość wprowadzania i usuwania kwasu borowego.

Układ regulacji borowej i kompensacji zmian objętości chłodziwa w I obiegu w PWR 1300



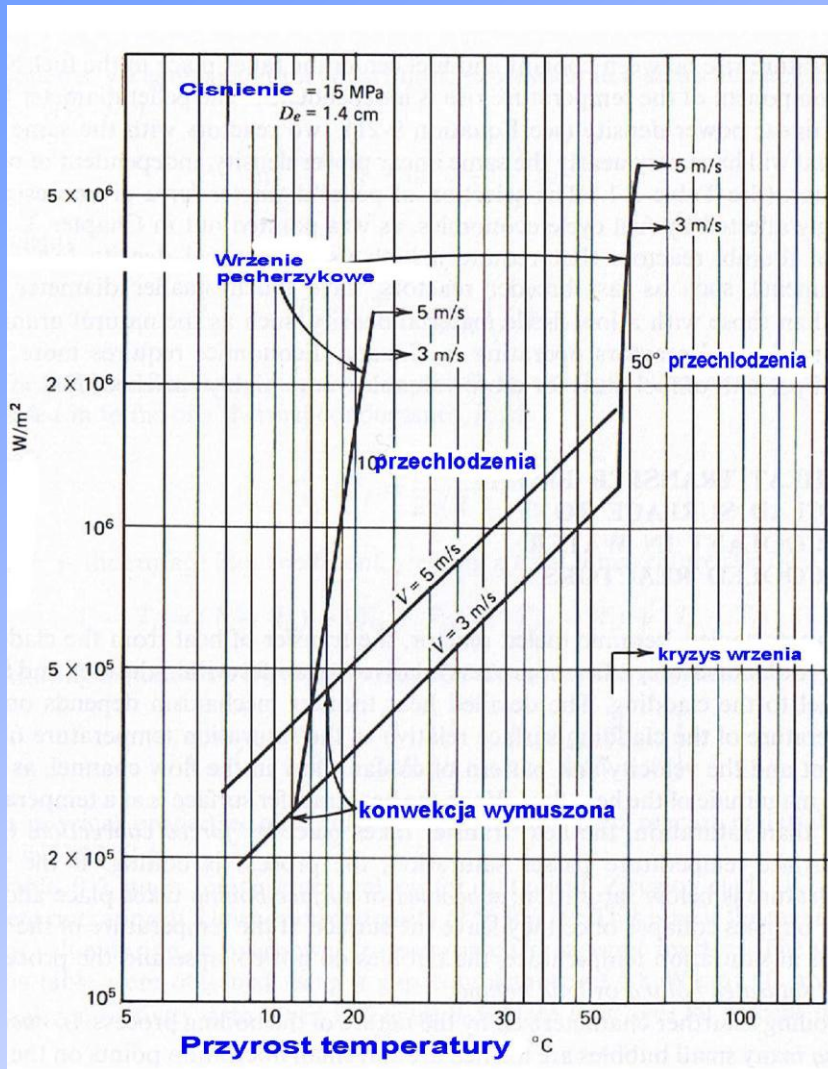
Układ regulacji borowej i kompensacji zmian objętości chłodziwa w I obiegu (RCV = CVCS)

- Kompensacja zmian objętości od stanu na zimno do pełnej mocy, szybkość 28 °C/h
- Uzupełnianie małych przecieków, przy nieszczelności poniżej 0,7 cm².
- Oczyszczanie chłodziwa reaktora - usuwanie produktów rozszczepienia i aktywacji na filtrach i w aparatach do odmineralizowania wody,
- Wtrysk wody na uszczelnienia pomp, badania hydrostatyczne I obiegu

Z zimnej gałęzi I obiegu upuszcza się 18 m³/h

- MB mixed bed, jeśli zawartość litu lub cezu nadmierna, to CB – cation bed Jeśli konieczne jest rozcieńczenie, to używa się AB - anion bed.,
- Poniżej demineralizatorów, filtr zatrzymywania żywic
- Część przepływu można skierować do TEP - systemu recyklicacji boru. Jedna pompa wystarcza. Większość przepływu płynie do I obiegu przez wymiennik regeneracyjny, część może być wykorzystana jako wtrysk pomocniczy podczas schładzania bloku. Wydatek i poziom w stabilizatorze są kontrolowane przez zawór po stronie tłocznej pomp.
- Reszta wydatku 7,2 m³/h płynie przez filtr do uszczelnień pomp reaktora i powraca na ssanie pomp przez filtr i chłodnicę wody uszczelniającej.
- Ilość kwasu borowego gotowa do natychmiastowego użycia jest większa niż potrzeba do wyłączenia reaktora bez udziału prętów pochłaniających.

Wymiana ciepła w reaktorze PWR



- Strumień ciepły odbierany z powierzchni paliwa rośnie z prędkością chłodziwa.

- Wrzenie powoduje silny wzrost współczynnika przyjmowania ciepła

$$\delta T = 0,023 (q'')^{1/2} \exp(-P/8,7)$$

gdzie P - ciśnienie, MPa, q'' strumień ciepły, W/m^2 , δT – uskok temperatury $^{\circ}C$.

Strumień krytyczny

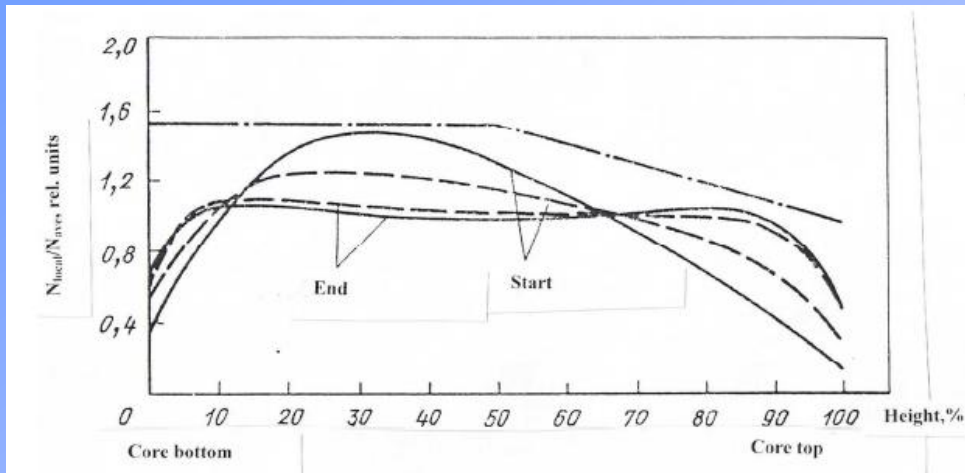
- Przy nadmiernej generacji pary pęcherzyki na powierzchni grzejnej łączą się tworząc błonkę parową.

- Odcina ona wodę od powierzchni grzejnej

- Następuje kryzys wrzenia – przegrzanie i przepalenie pręta paliwowego

- Takie niebezpieczeństwo występuje w razie utraty zasilania pomp cyrkulacyjnych.

Rozkład generacji ciepła w paliwie



Rozkład generacji ciepła wzdłuż wysokości rdzenia dla początku (BOC) i końca (EOC) pracy pierwszego wsadu paliwowego i dla wsadu w stanie równowagi na mocy nominalnej.

- - - -wsad w stanie równowagi
- ____ pierwszy wsad,
- - . – ograniczenie wielkości miejscowej generacji ciepła w rdzeniu kontrolowane przez układ regulacji mocy

Współczynniki gorącego kanału i gorącego miejsca:

Rozkład promieniowy i osiowy strumienia neutronów

Rozkład paliwa (wzbogacenie, wypalenie)

Współczynniki niepewności:

Nierównomierność rozkładu paliwa

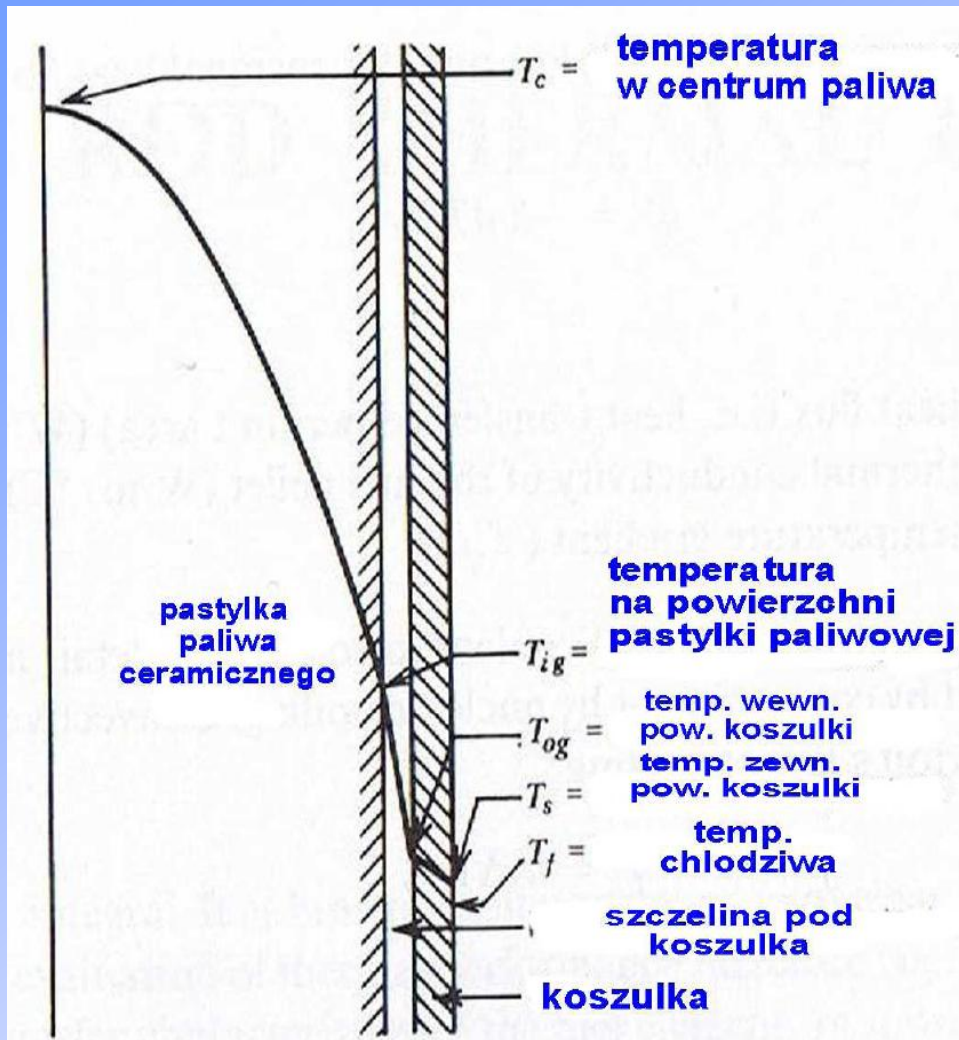
Niedokładność pomiarów

Odchylenia w geometrii wiązki paliwowej – wpływ na prędkość wody, współczynnik odbioru ciepła

Niepewność w stosowanych wzorach

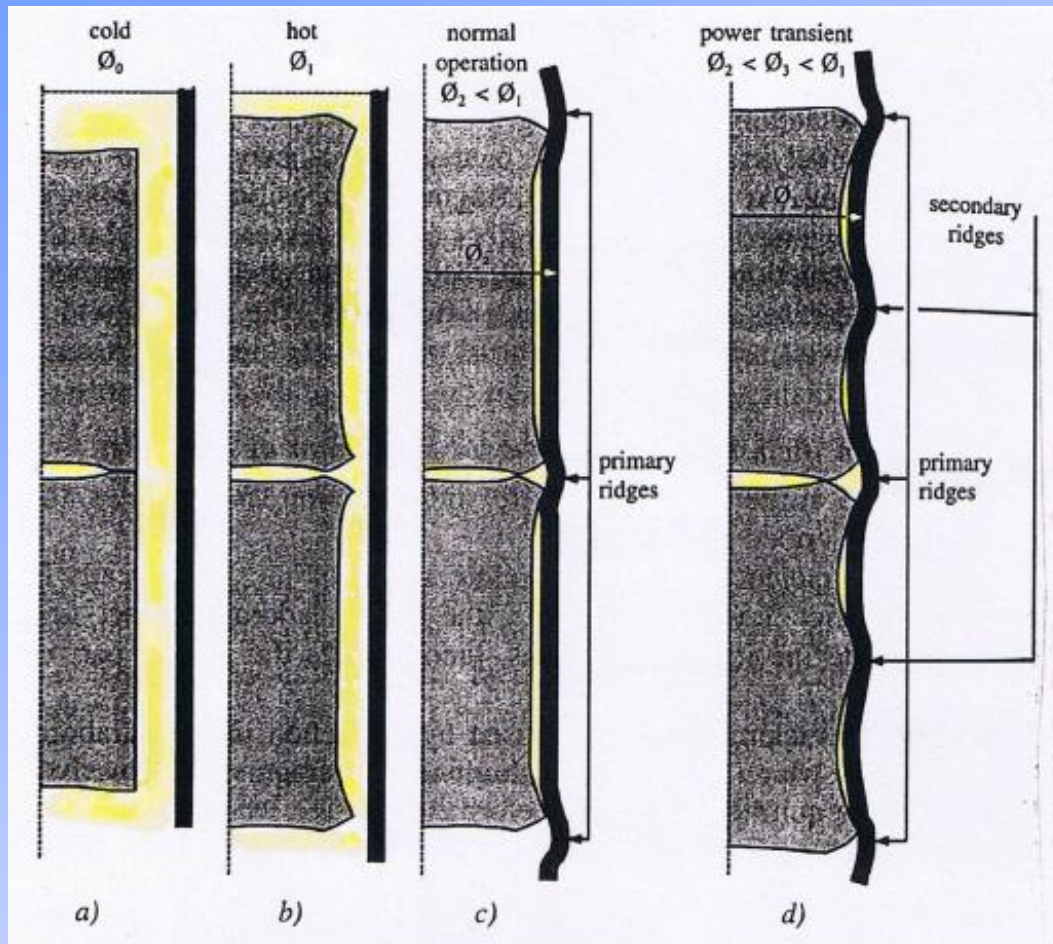
Badania modelowe w skali 1:1

Rozkład temperatury w pręcie paliwowym



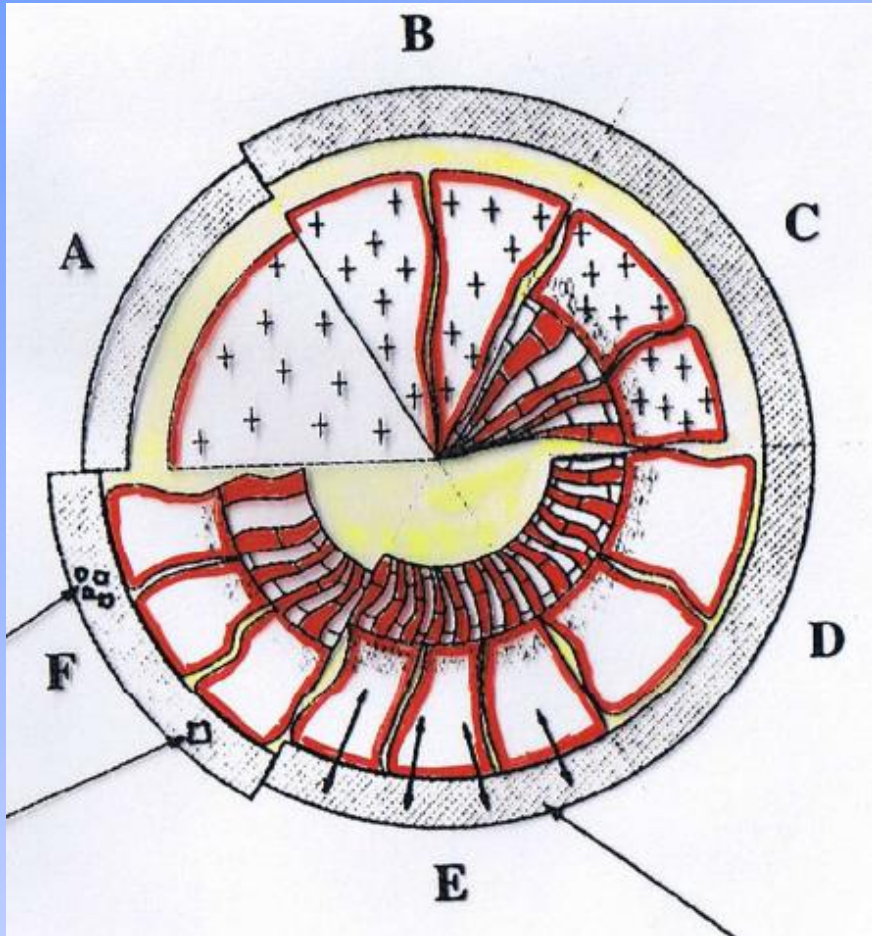
- Szczelina pod koszulką maleje w toku eksploatacji.
- Temperatury w szczelinie od 350 oC do 500 oC – Kr i Xe są w stanie gazowym ale CsI osadza się na ściankach. To zmniejsza zagrożenie uwalnianiem jodu i cezu.
- W stanach przejściowych paliwo pęka, ciśnienie w szczelinie rośnie, wydzielają się gpr i jod.
- Zjawisko znane jako szczyt (peak) jodowy – obserwowane nawet przy wyłączaniu reaktora.

Oddziaływanie paliwa z koszulką w toku wypalenia paliwa.



Mechanizm zapadkowy. Grzbiety powstające na koszulce powodują jej odkształcenia wskutek różnicy współczynnika rozszerzalności cieplnej paliwa i koszulki. Ogranicza to głębokość wypalenia paliwa. W 1990 r. - 45 MWd/kg, obecnie - 60 MWd/kg Frakcja uszkodzonych prętów - 1/10 000

Zmiany struktury paliwa w toku jego wypalania podczas eksploatacji



A-świeże paliwo, 1 bar w szczelinie paliwo-koszulka

B- Wzrost mocy: zróżnicowana rozszerzalność cieplna, mniejsza szczelina, pękanie paliwa

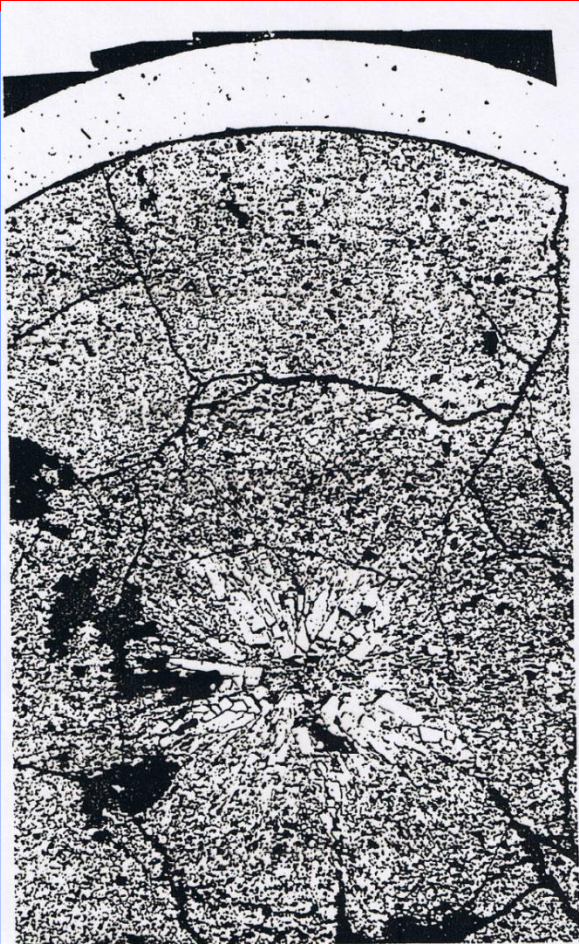
C – Początek zmian strukturalnych: rozrost ziaren, pojawienie się ziaren kolumnowych wskutek migracji porów, powstawanie otworu centralnego

D- Koniec zmian strukturalnych- utworzony otwór centralny, szczelina zamknięta

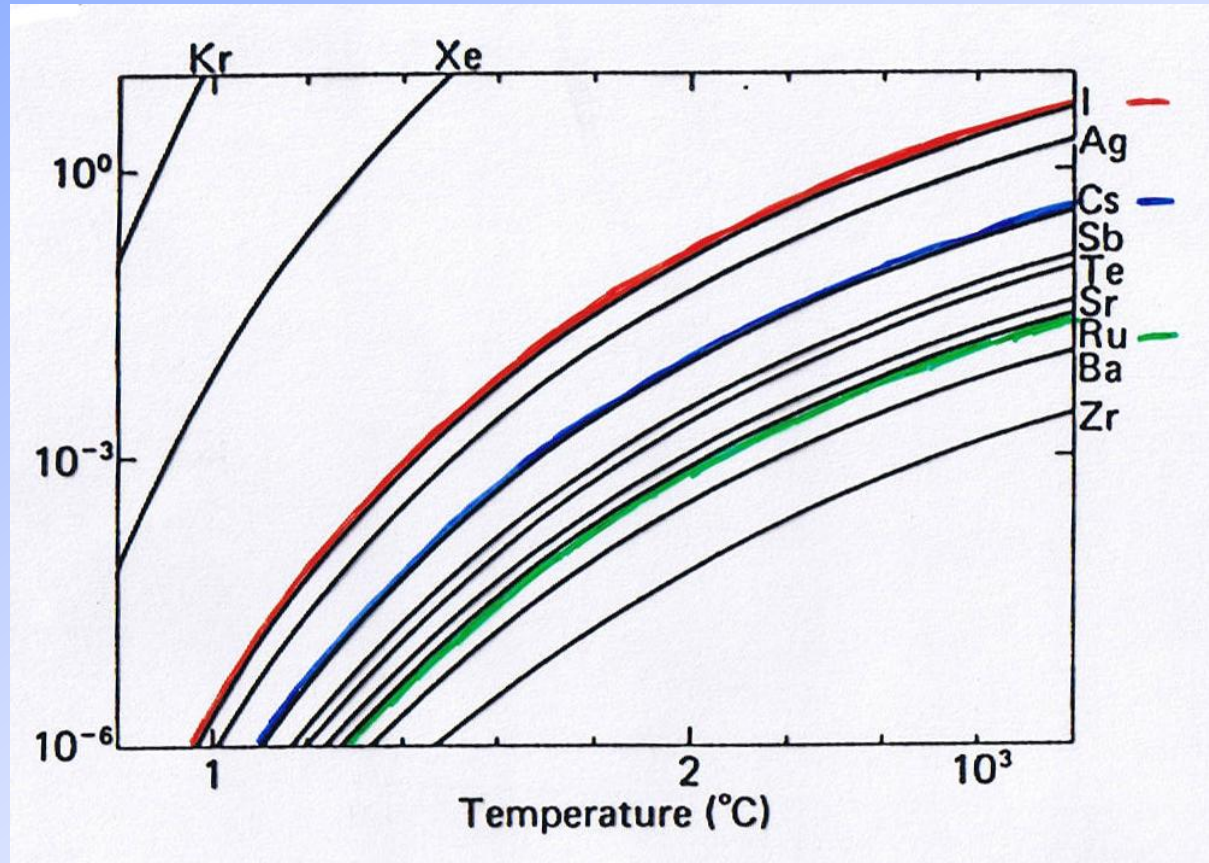
E – Szczelina zamknięta, PCI, wydzielenie gpr. powoduje wzrost ciśnienia

F – uszkodzenia radiacyjne koszulki, puchnięcie, pełzanie, PCI, korozja zewnętrzna koszulki

Ucieczka produktów rozszczepienia z paliwa

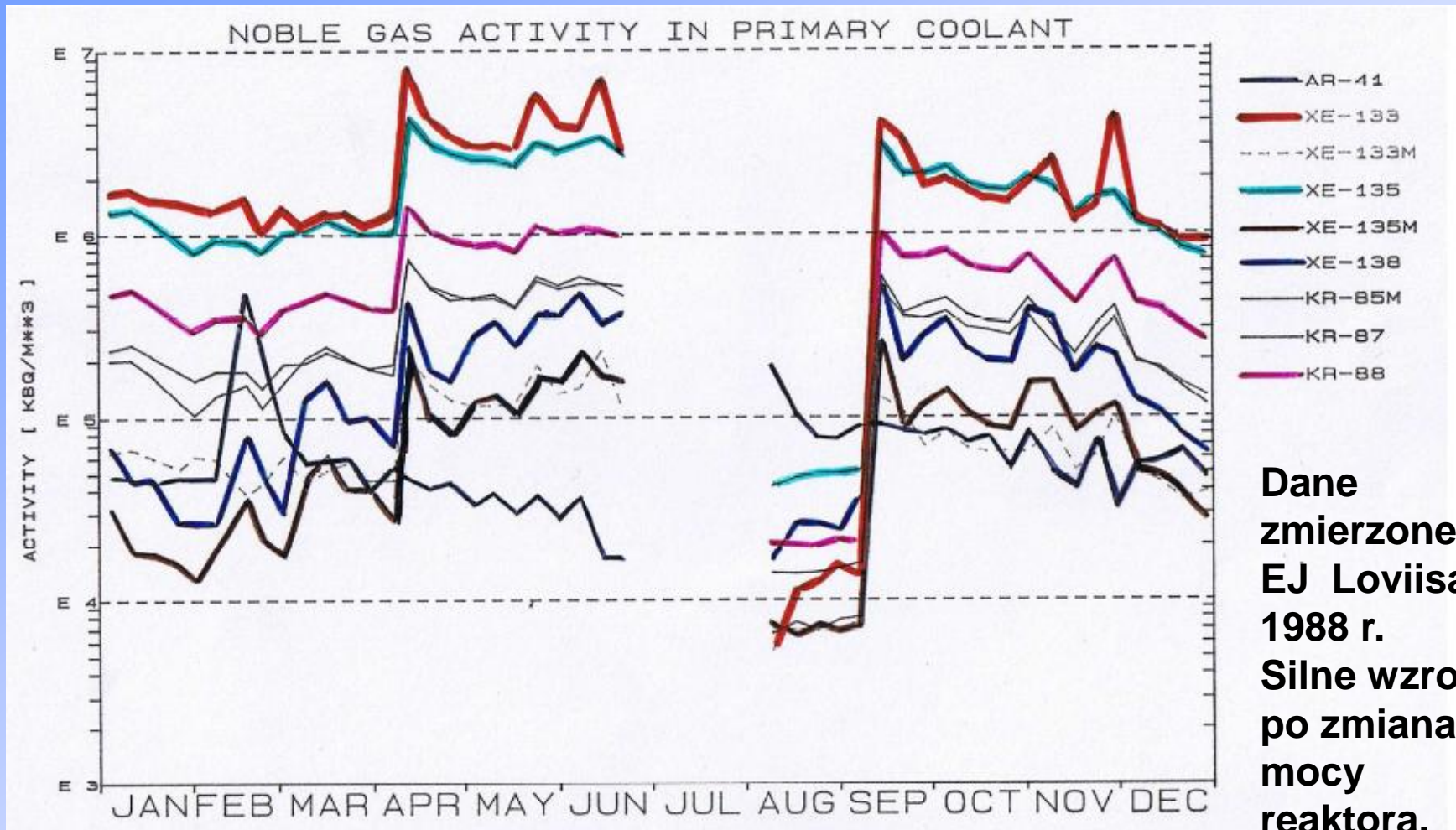


Powstawanie otworu centralnego
wskutek migracji porów soczewkowych

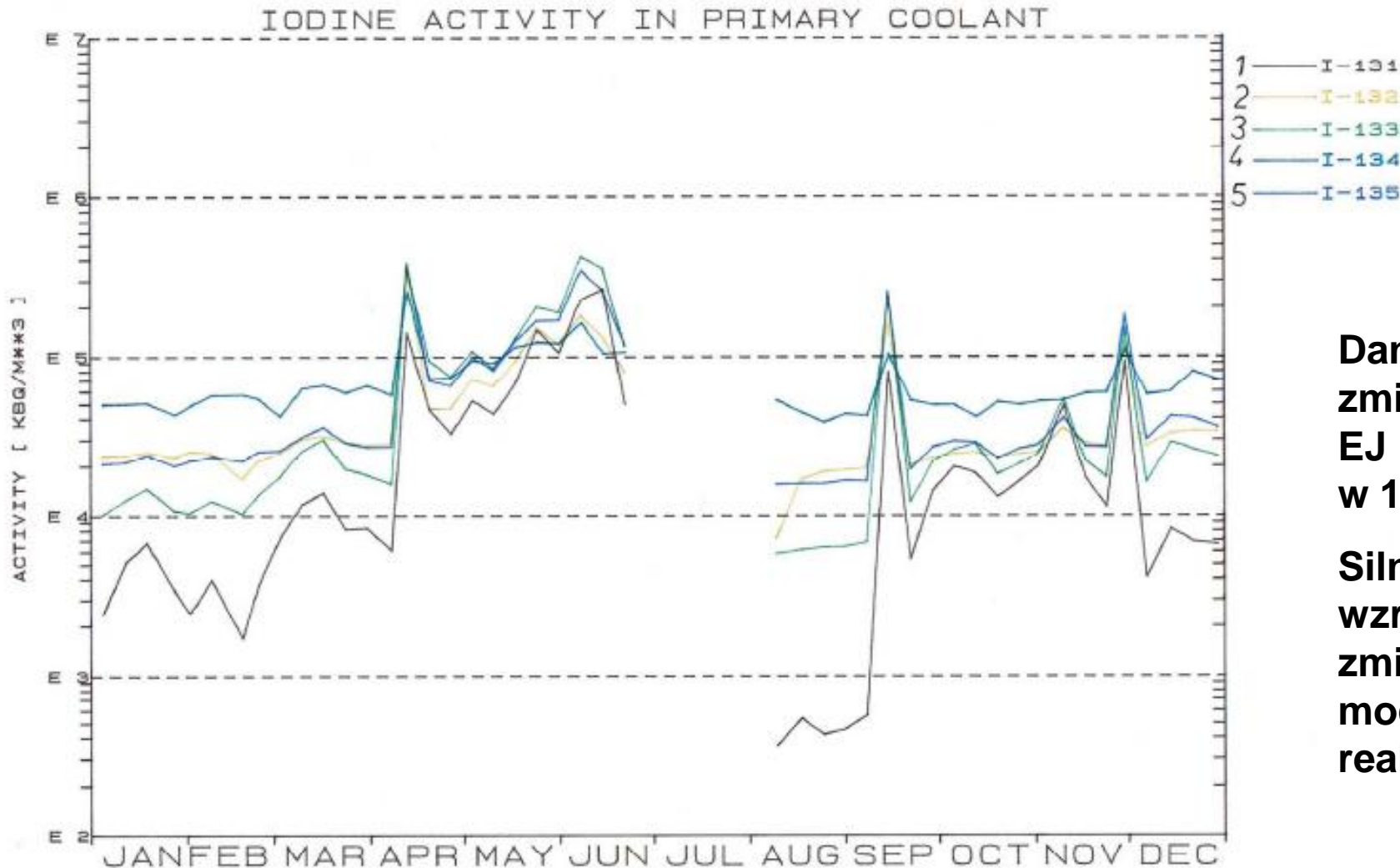


Szybkość uwolnień z paliwa - frakcja/min –
zależna od temp. parowania -największa Kr,
Xe, mniejsza I, Cs, bardzo mała dla Sr, Ru, Ba

Aktywność gazowych produktów rozszczepienia w I obiegu



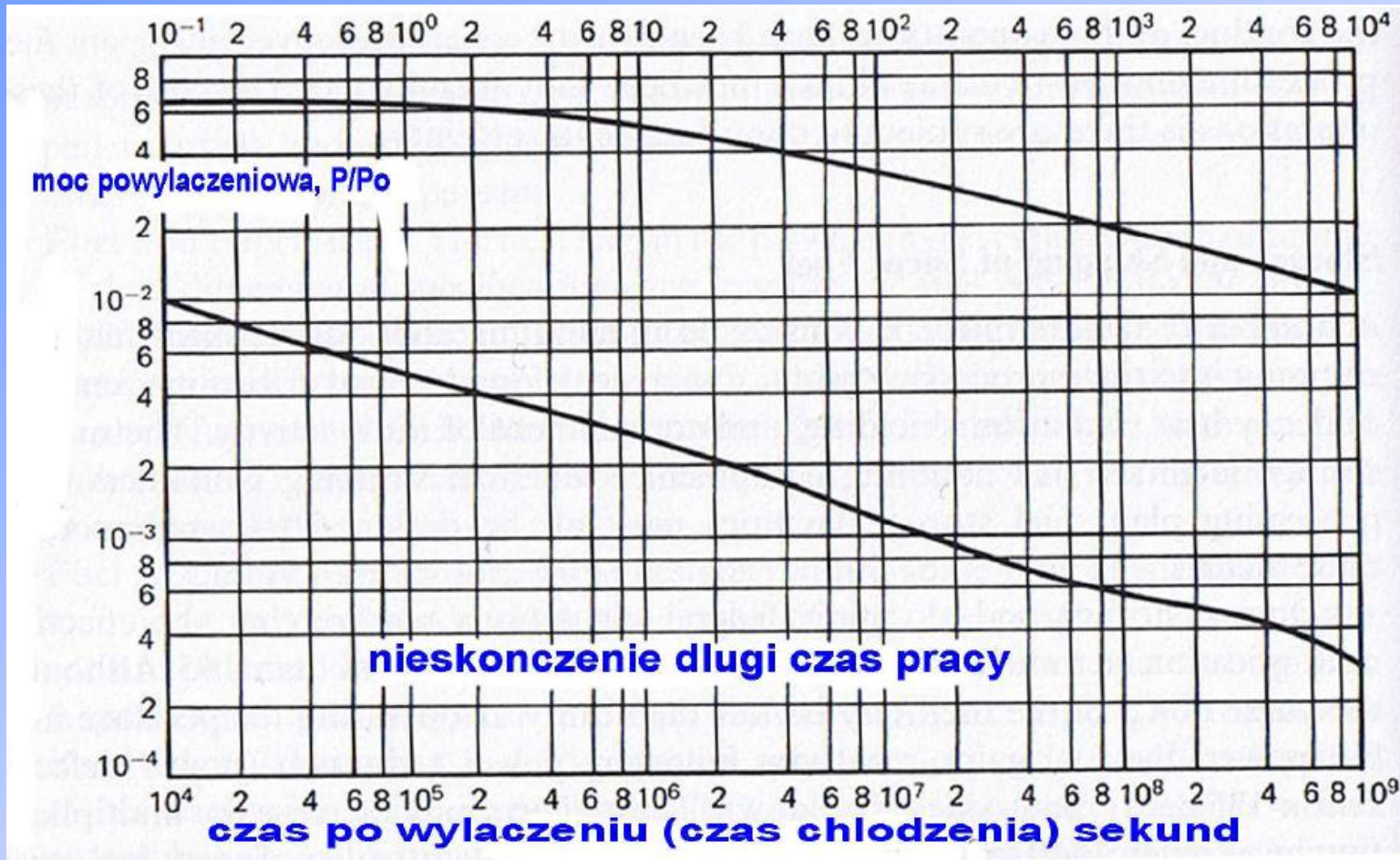
Aktywność izotopów jodu w I obiegu



Dane
zmierzone w
EJ Loviisa
w 1988 r.

Silne
wzrosty po
zmianach
mocy
reaktora.

Moc powyłaczeniowa

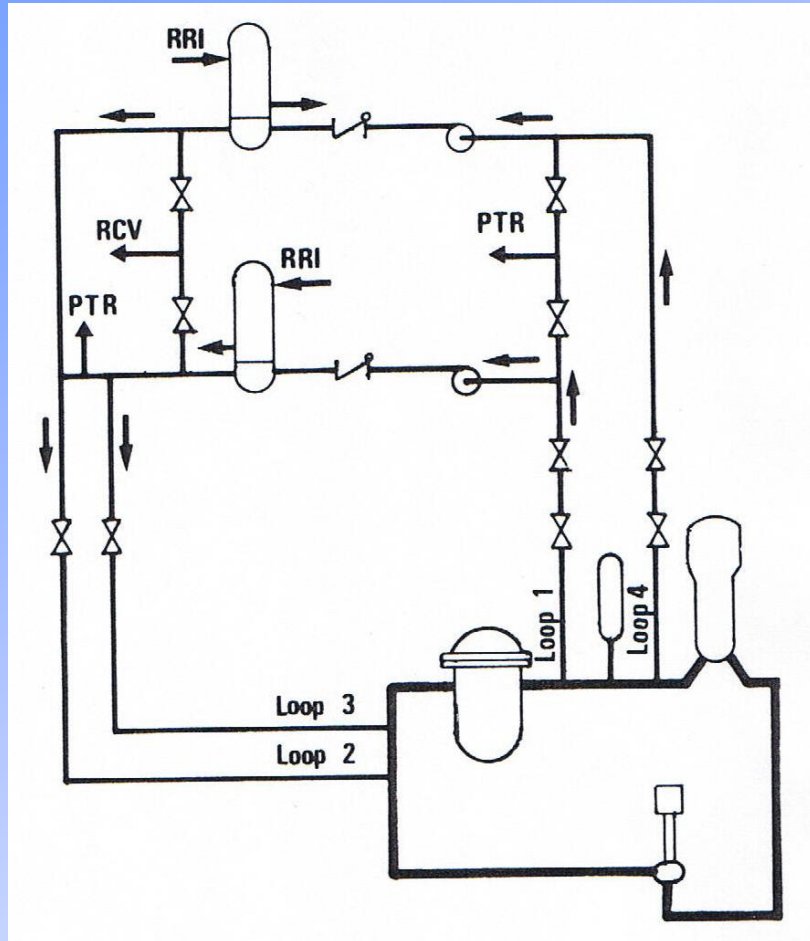


Dla PWR
1300 MWe

Po 10 s 5%,
po 1000 s
1,9%,
po 3 h 1% -
ale to wciąż
jeszcze
50 MW
cieplnych!

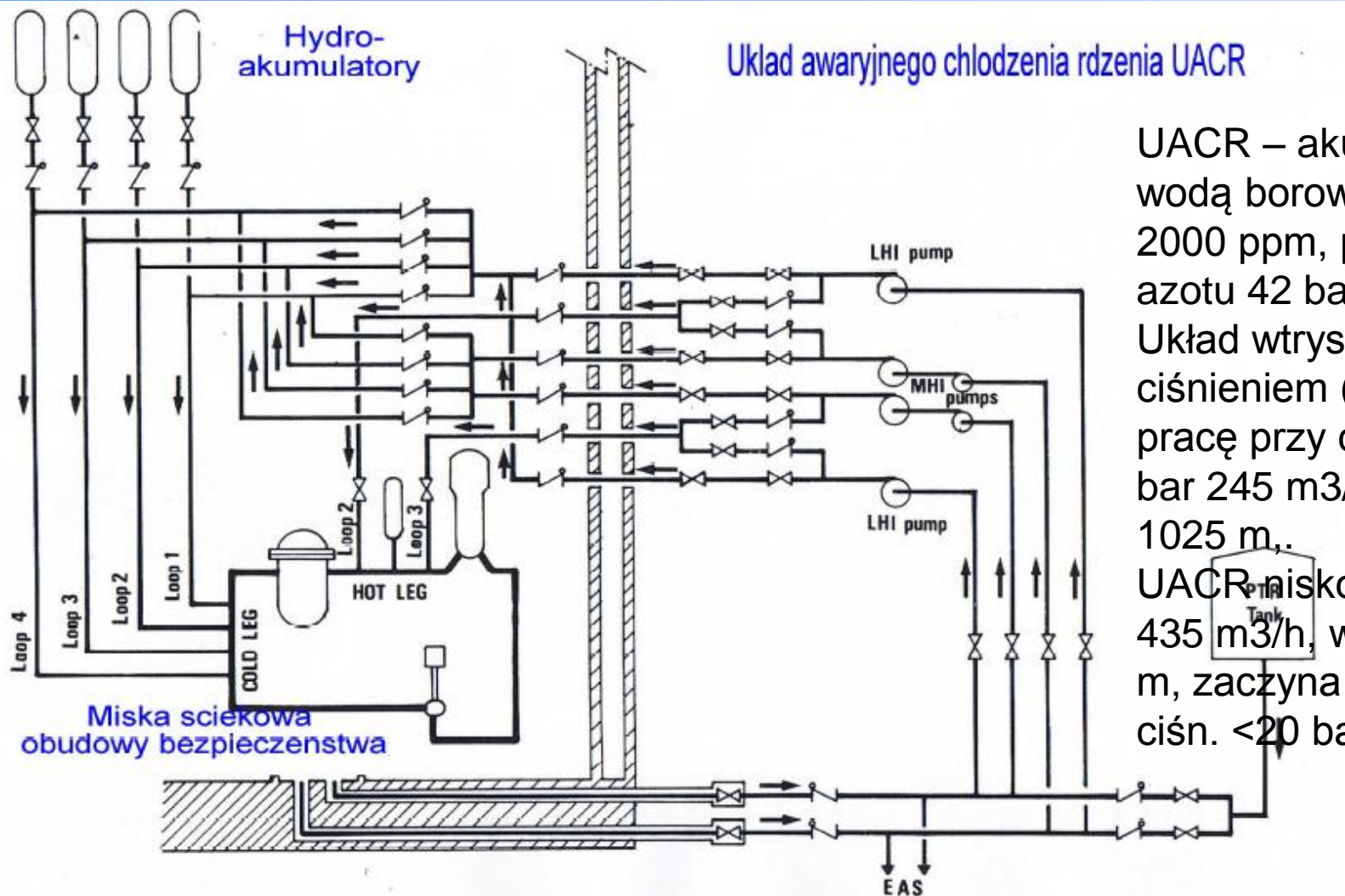
Odbiór
ciepła musi
być
niezawodny

Układ chłodzenia powyłączeniowego w PWR 1300



- Układ znajduje się całkowicie wewnątrz obudowy bezpieczeństwa.
- Ma obniżyć temperaturę chłodziwa I obiegu poniżej 60 oC i utrzymać ją.
- Pompa 1150 m³/h, wysokość podnoszenia 105 m,
- Wymiennik ciepła 12,2 MW(t)
- Układ zaczyna pracę 5 h po wyłączeniu, gdy ciśnienie I obiegu < 2.5 MPa.
- Część wydatku płynie do CVCS.
- Po wymianie paliwa RHR usuwa wodę z komory reaktora do zbiornika PTR (chłodzenie basenu paliwowego)

Układ awaryjnego chłodzenia rdzenia w reaktorze PWR 1300 MWe



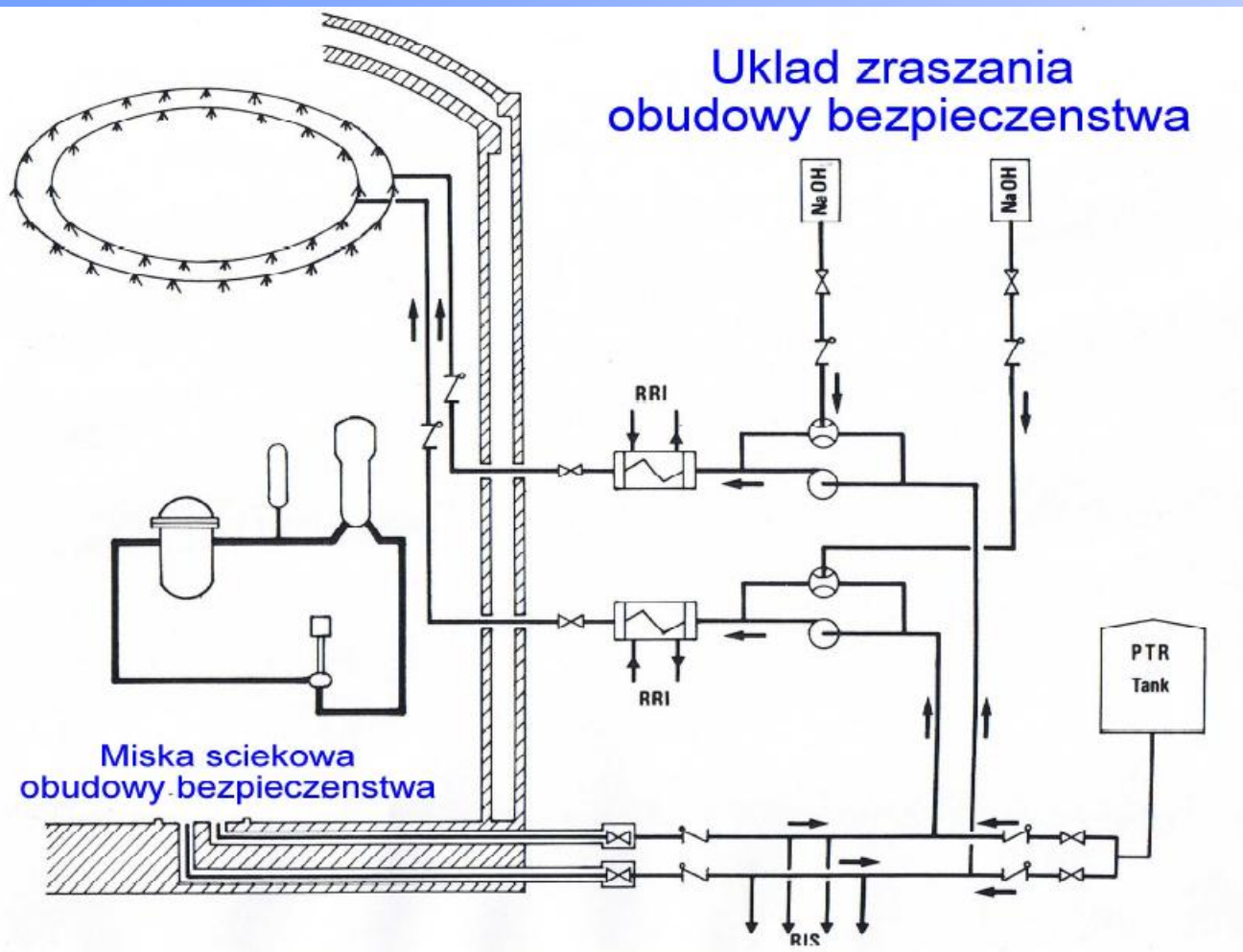
UACR – akumulatory: z wodą borowaną 30 m³, 2000 ppm, pod ciśnieniem azotu 42 bar.

Układ wtrysku pod średnim ciśnieniem (MHI,) zaczyna pracę przy ciśnieniu < 110 bar 245 m³/h, wys. podn. 1025 m,.

UACR niskociśnieniowy 435 m³/h, wys.podn.197 m, zaczyna pracę przy ciśn. <20 bar. .

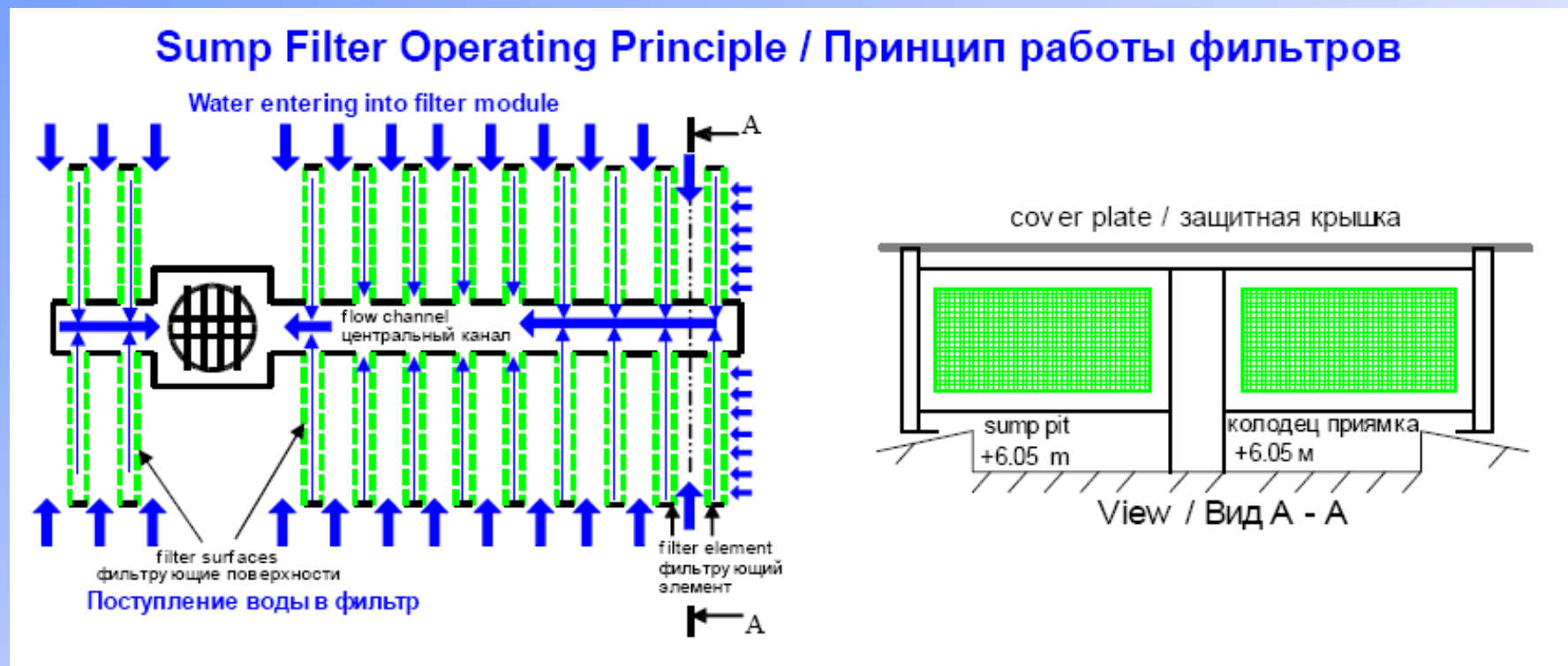
Układ zraszania w PWR 1300

Układ zraszania
obudowy bezpieczeństwa



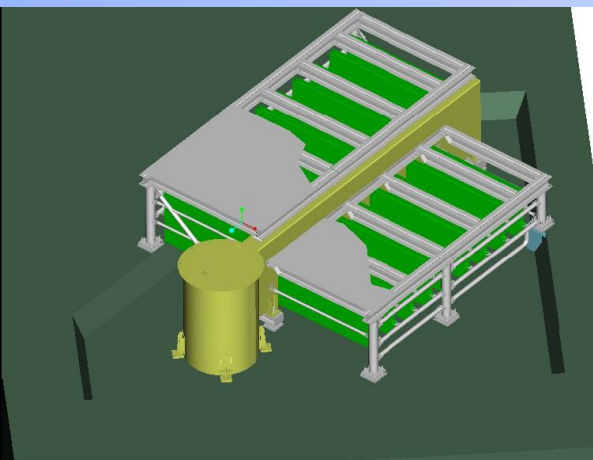
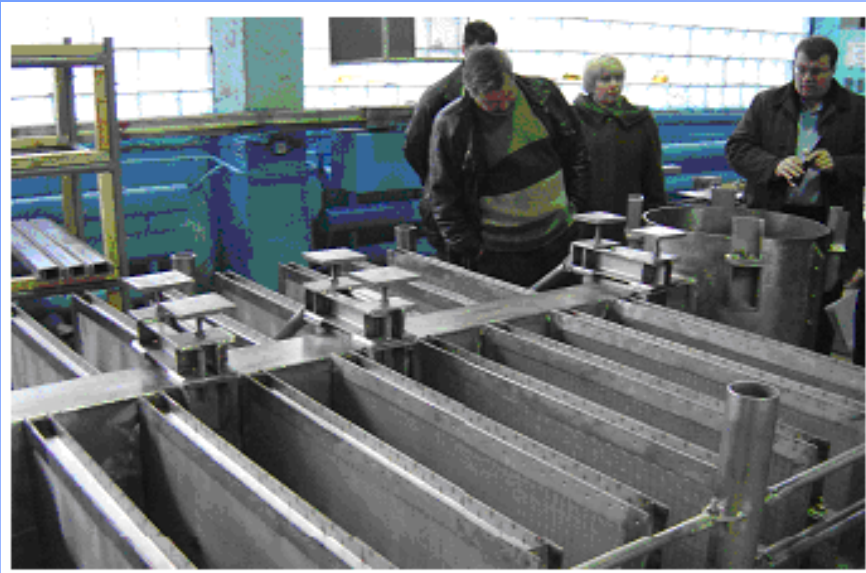
Układ zraszania:
1000 m³/h
Recyrkulacja po 20 minutach.
Problem - jak uniknąć zapychania się misek ściekowych?
Program TACIS w Rosji i na Ukrainie - rozbudowa filtrów, wymiana izolacji rurociągów, testy.
W reaktorach PWR w UE również prace przeprowadzono.

Zabezpieczanie UACR przed zatkanieniem przez elementy izolacji

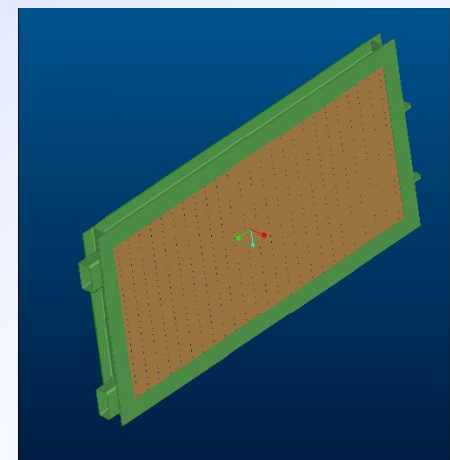


Temat TACIS U1.01/97A Zabezpieczenie miski ściekowej obudowy bezpieczeństwa przed zatkanieniem po awarii rozerwania rurociągu w EJ Rowno

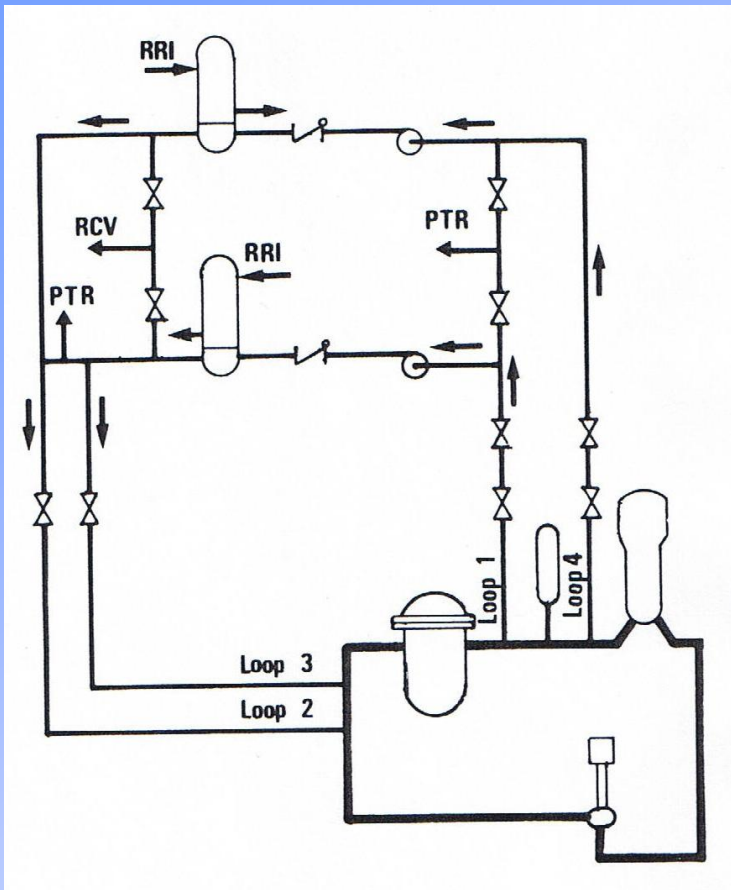
Prace przy modernizacji filtra zabezpieczającego układ UACR w EJ Rowno



Koszt urządzeń : 640 k Euro
1997 - Maj 2000- projekt i
zatwierdzenie, styczeń 2002
podpisanie kontraktu, Styczeń
2003 Badania prototypu,
Maj-czerwiec 2004 instalacja
w EJ Rowno 1 i 2.



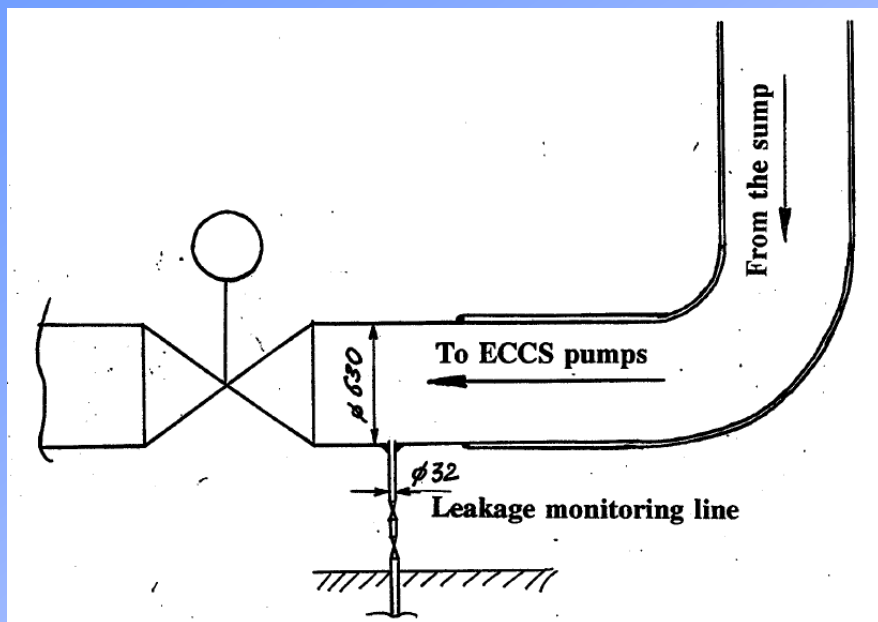
Układ chłodzenia powyłączeniowego musi być zabezpieczony przed pęknięciem poza obudową bezpieczeństwa.



Układ chłodzenia powyłączeniowego,
PWR 1300 MWe

- Po wyłączeniu reaktora moc grzania powyłączeniowego wynosi najpierw 7%, po godzinie spada do około 3%, potem spada bardzo wolno.
- Konieczny jest niezawodny odbiór ciepła przez układ chłodzenia powyłączeniowego
- Przepięki mogą wystąpić w wymiennikach ciepła z uciezką wody do układu odpowiedzialnej wody technicznej. Grozi to wyciekami radioaktywności i utratą wody z układu chłodzenia powyłączeniowego.
- Wymagane jest też prowadzenie rurociągów w obudowie – tak by pęknięcie jednej rury nie powodowało utraty wody.

Zabezpieczenia przed utratą wody wskutek przecieków linii poza obudową bezpieczeństwa



W EJ Mochovce zainstalowano rurę podwójną prawie do samego zaworu, ale dodano rurkę kontrolującą stan przecieków z obudowy. Misja MAEA zaleciła usunięcie tej rurki. Zalecenie wykonano

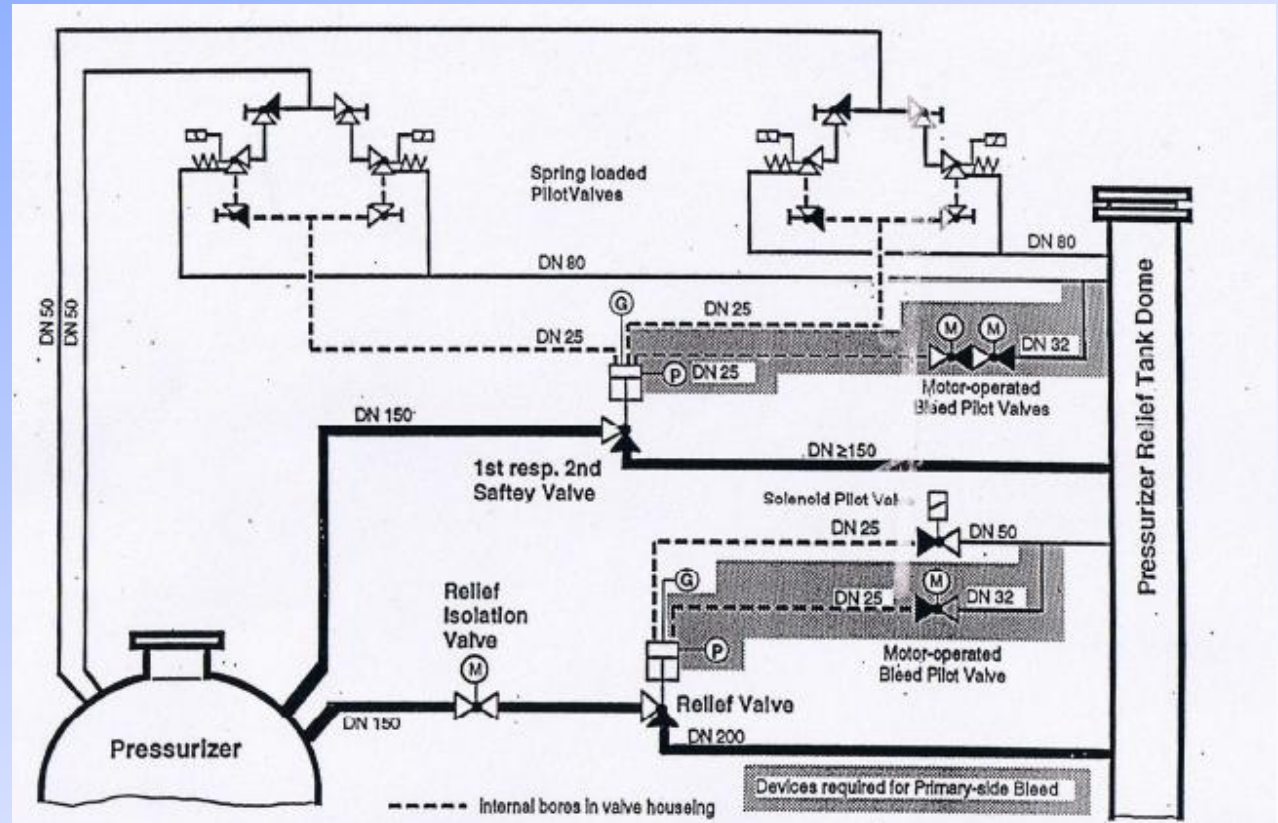
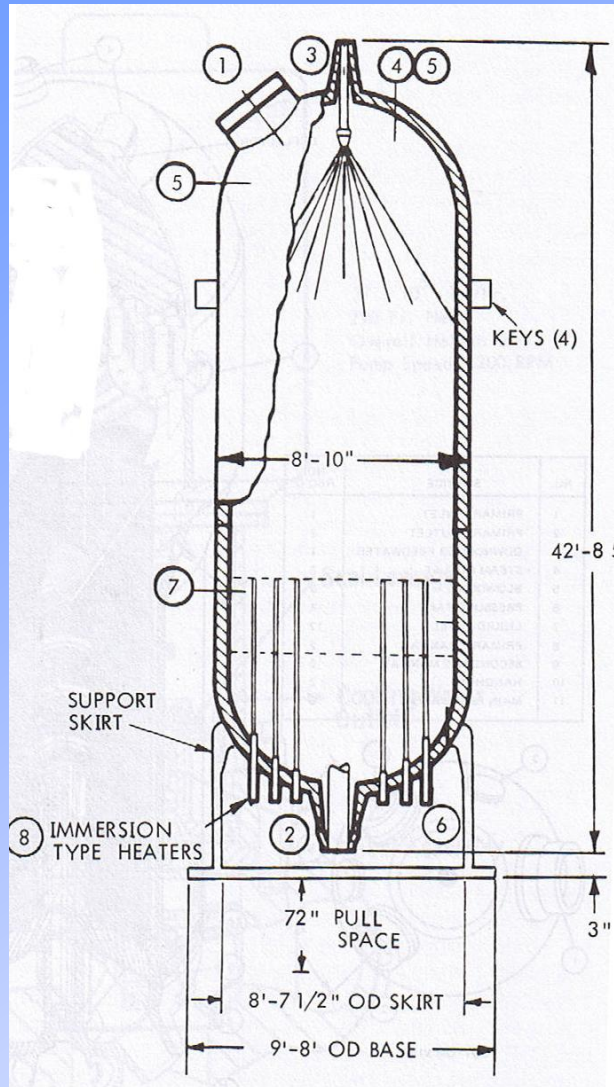
Przykład wdrażania jednej z wielu zasad bezpieczeństwa:

Rurociągi przechodzące przez ściany obudowy bezpieczeństwa winny być zabezpieczone podwójnymi ściankami aż do zaworów odcinających.

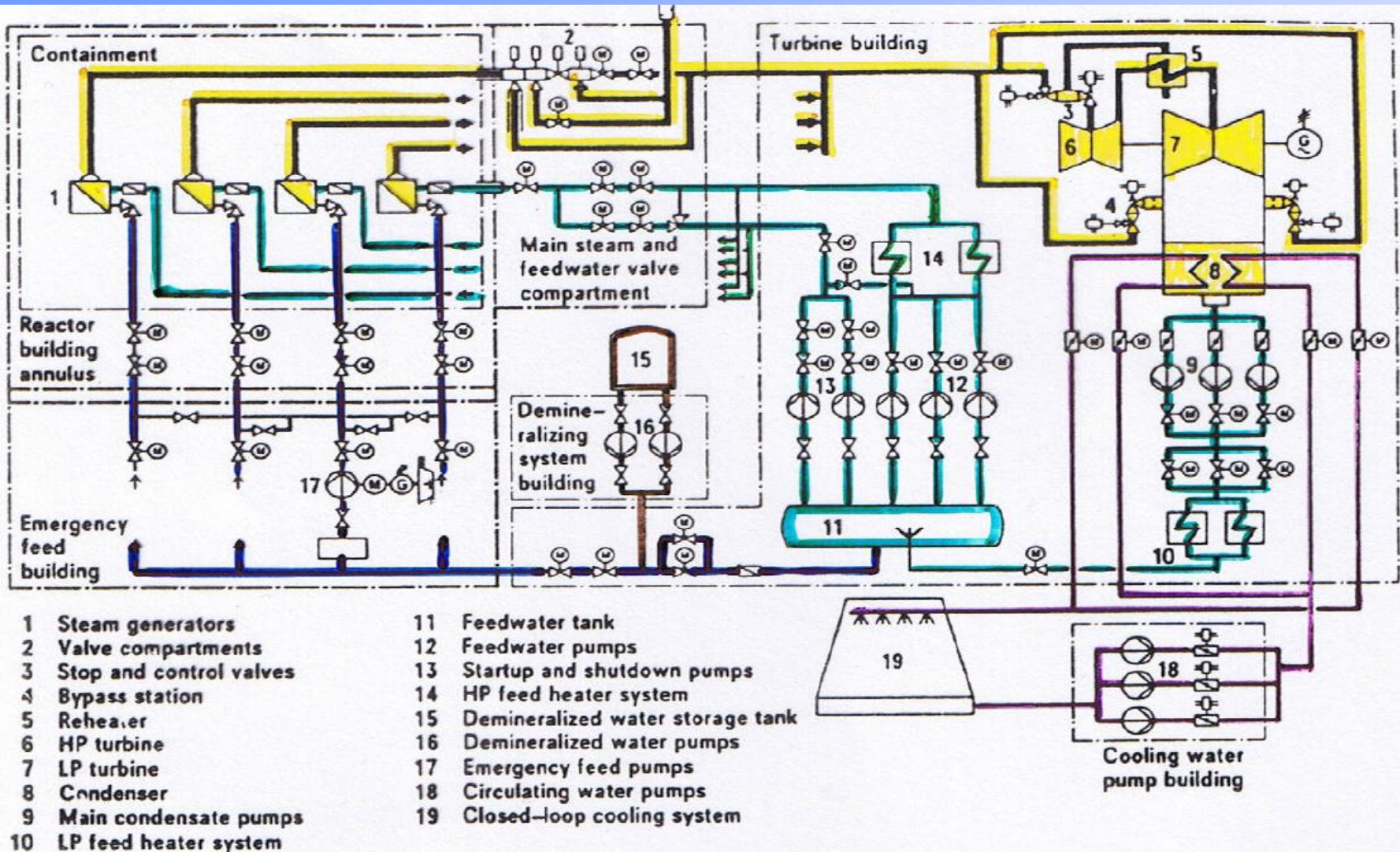
Praktyka WWER i obrona projektantów: Rura ściekowa z obudowy bezpieczeństwa jest pojedyncza. Nie przenosi żadnych obciążeń. Zamknięcie jej w drugiej rurze uniemożliwi regularną kontrolę szczelności.

Nowe WWER w Chinach i Indiach: Mają podwójną rurę ściekową, zgodnie z zasadami bezpieczeństwa.

Regulacja ciśnienia w I obiegu PWR



PWR 1300 MWe – obieg wtórny



PWR 1300 MWe obieg wtórny - opis

1. Wytwornice pary, 2. Pomieszczenia zaworów,
3. Zawory odcinające i regulacyjne, 4. Układ bocznikujący,
5. Przegrzewacz międzystopniowy, 6. Turbina wysokoprężna,
7. Turbina niskoprężna, 8. Skraplacz
9. Główne pompy kondensatu, 10. Układ podgrzewaczy niskociśnieniowych, 11. Zbiornik wody zasilającej,
12. Pompy wody zasilającej, 13. Pompy rozruchowe,
14. Układ podgrzewaczy wysokociśnieniowych, 15. Zbiornik wody zdemineralizowanej, 16. Pompy wody zdemineralizowanej,
17. Pompy awaryjnego układu wody zasilającej, 18. Pompy wody chłodzącej 19. Układ chłodzenia w obiegu zamkniętym

Obieg wtórny w PWR

Wytwornica pary: Woda w obiegu wtórnym wrze, pobierając ciepło od obiegu pierwotnego. Przed wejściem do turbiny pozostałe krople wody są oddzielane od pary, tak że para jest sucha..

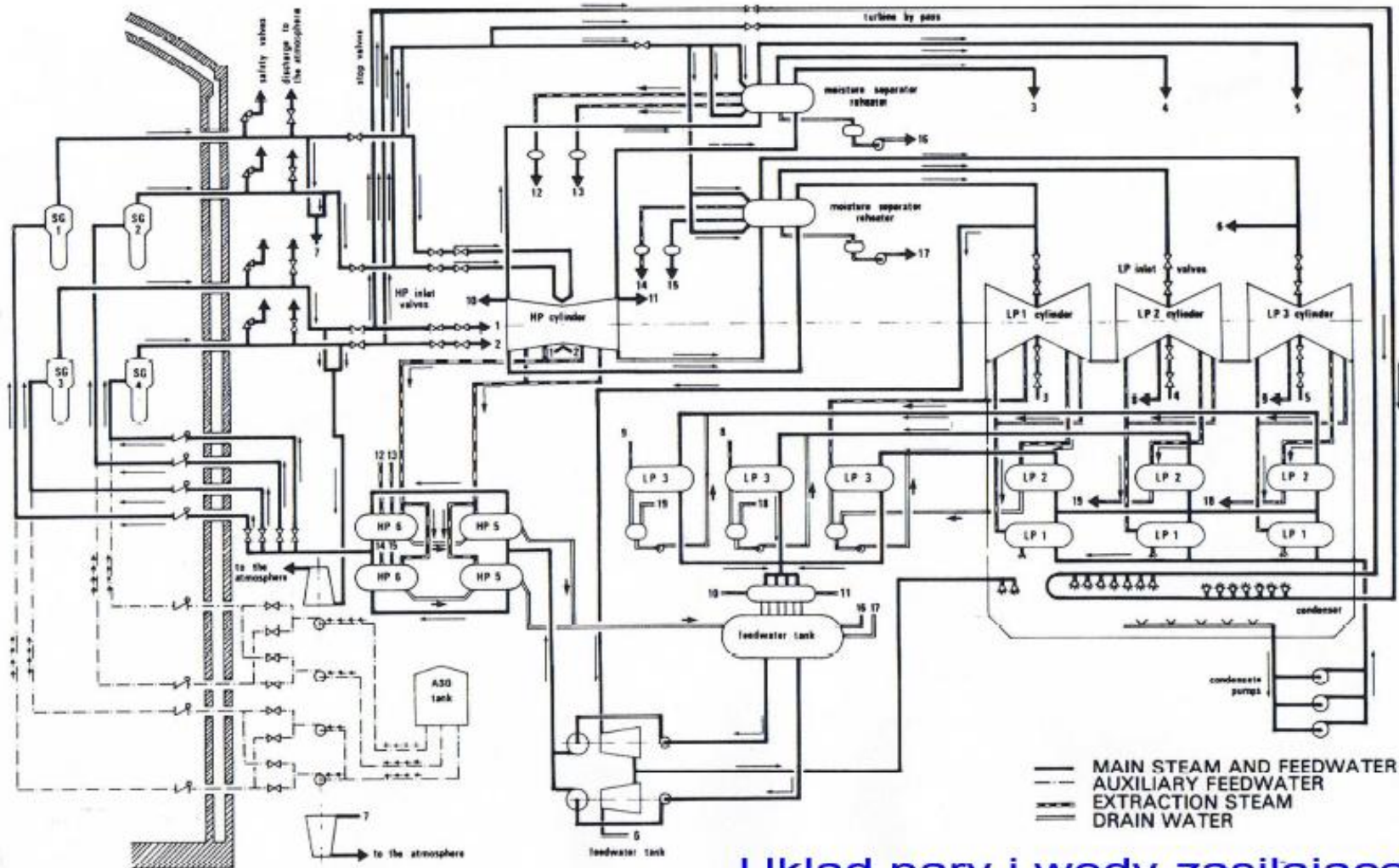
Turbina: Rozprężająca się para napędza turbinę, połączoną z generatorem elektrycznym. Turbina dzieli się na część wysokoprężną i niskoprężną. Aby uniknąć skraplania pary (krople wody uderzające z dużą prędkością powodują uszkodzenie łopatek) para jest przegrzewana przed wejściem do części niskoprężnej.

Skraplacz: Para jest schładzana i skraplana oddając ciepło do trzeciego obiegu chłodzącego..

Odgazowywacz: Usuwa gazy z chłodziwa.

Pompa: Pompy cyrkulacyjne są napędzane przez ich własne małe turbiny parowe.

Układ pary i wody zasilającej w PWR 1300



Układ pary i wody zasilającej

Układ po stronie wtórnej w PWR 1300

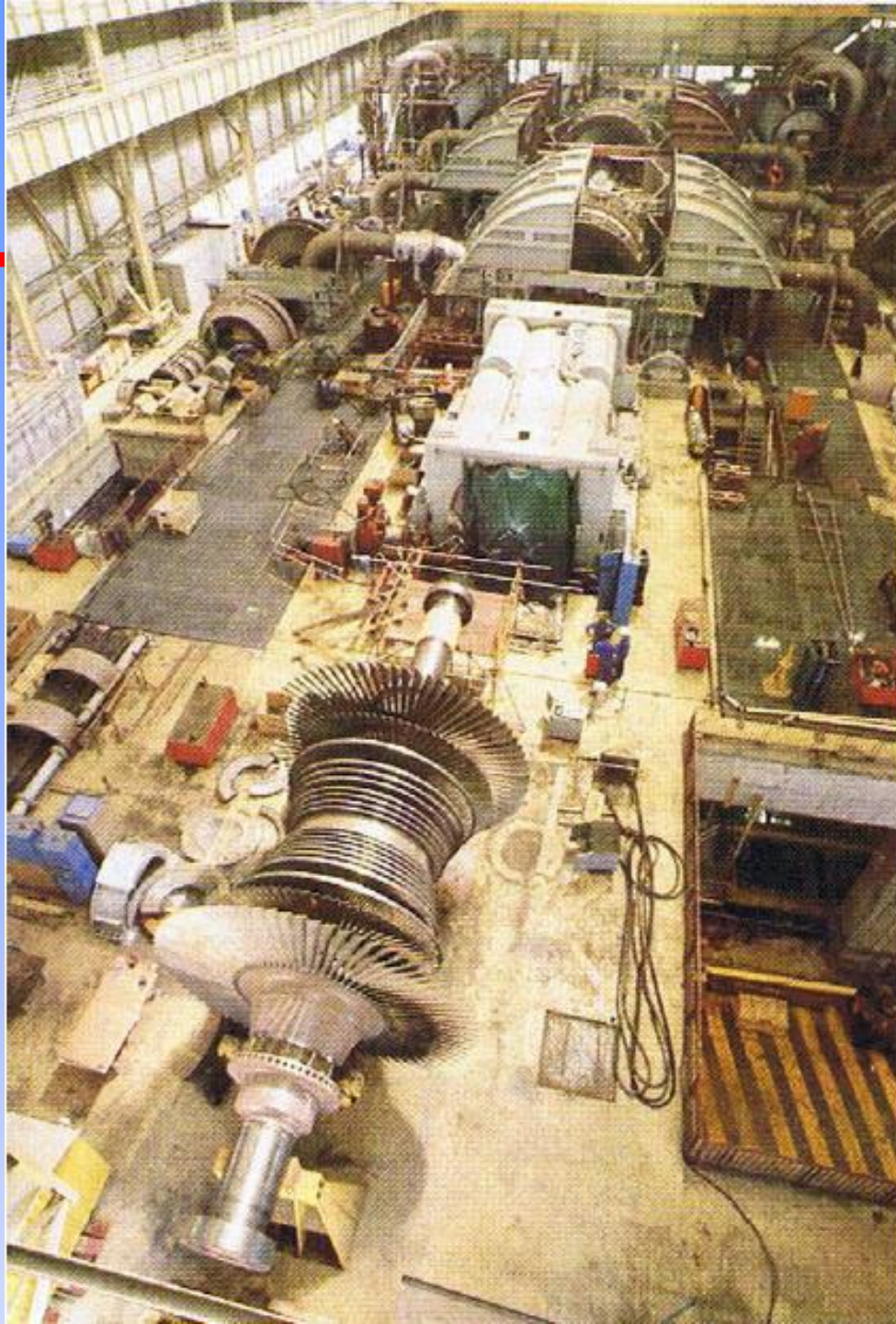
- Turbina parowa – długość 56 m, waga 3000 ton, turbina wielostopniowa impulsowa z podwójnym cylindrem wysokoprężnym i 3 niskoprężnymi z podwójnym przepływem, 1500 obr/min. Z części wysokoprężnej para płynie do separatora wilgoci - przegrzewacza.
- Zawory szybkodziałające odcinające na wlocie to TG zamykają się w ciągu 0,3 s.
- Układ wody zasilającej - cztery linie z podgrzewacza , połączenie z pomocniczego układu wody zasilającej.
- PUWZ zbiornik 1550 m³, woda zdemineralizowana, dwa zespoły pomp, 2 napędzane elektrycznie, jedna turbiną parową, 100 m³/h. Para dopływa z układu pary świeżej, upust przed zaworami odcinającymi.

PWR 1300 hala turbin



Na pierwszym planie turbogenerator po obu stronach przegrzewacze -separatory wilgoci .

Turbogenerator w PWR 1300



Wewnątrz hali
turbin:
turbogenerator i trzy
cylindry
niskoprężne. Z tyłu
z lewej strony
przegrzewacz -
separator wilgoci.

Turbogeneratory w reaktorach WWER

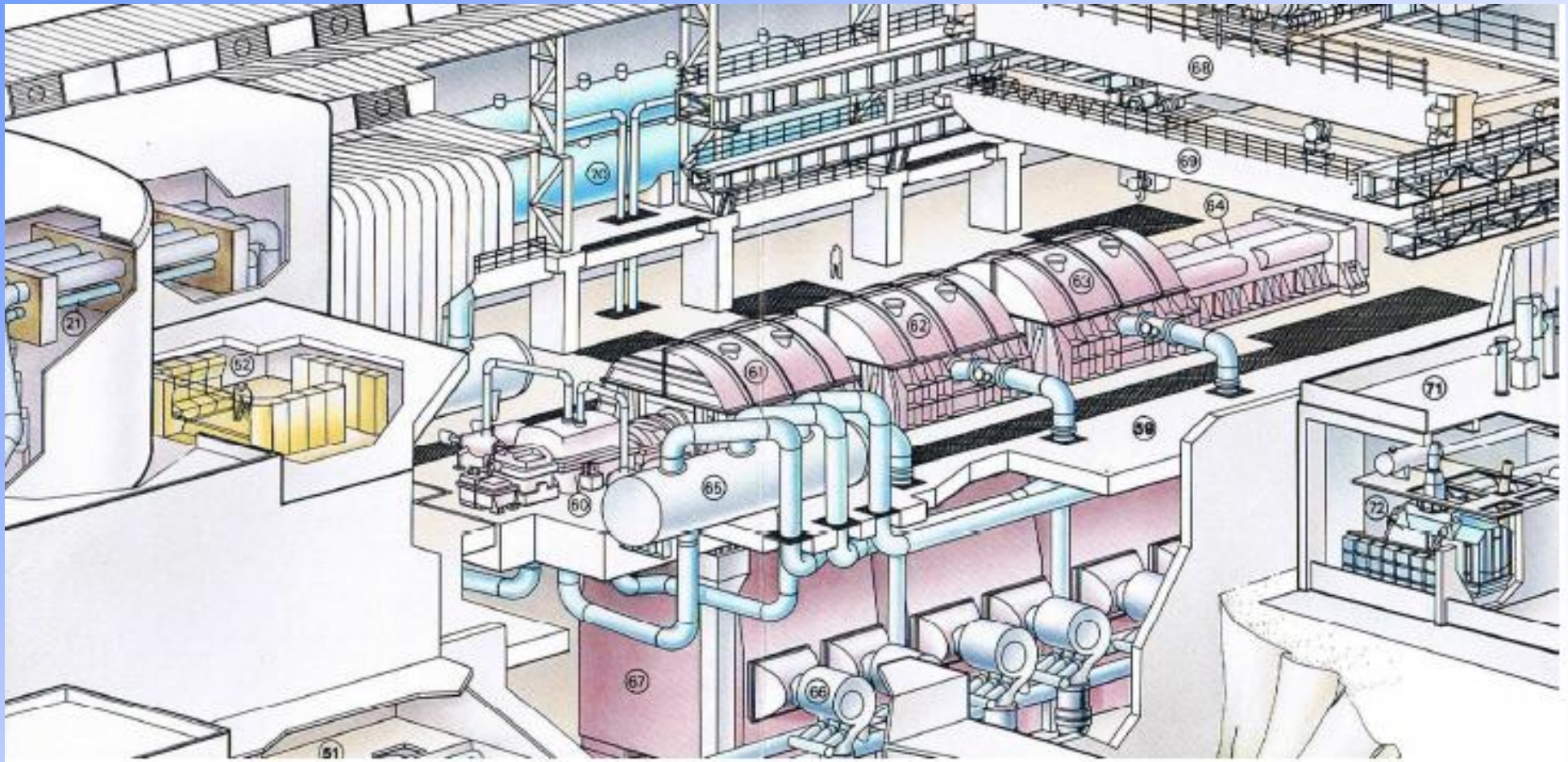


Turbogenerator 1000 Mwe, EJ Balakovo

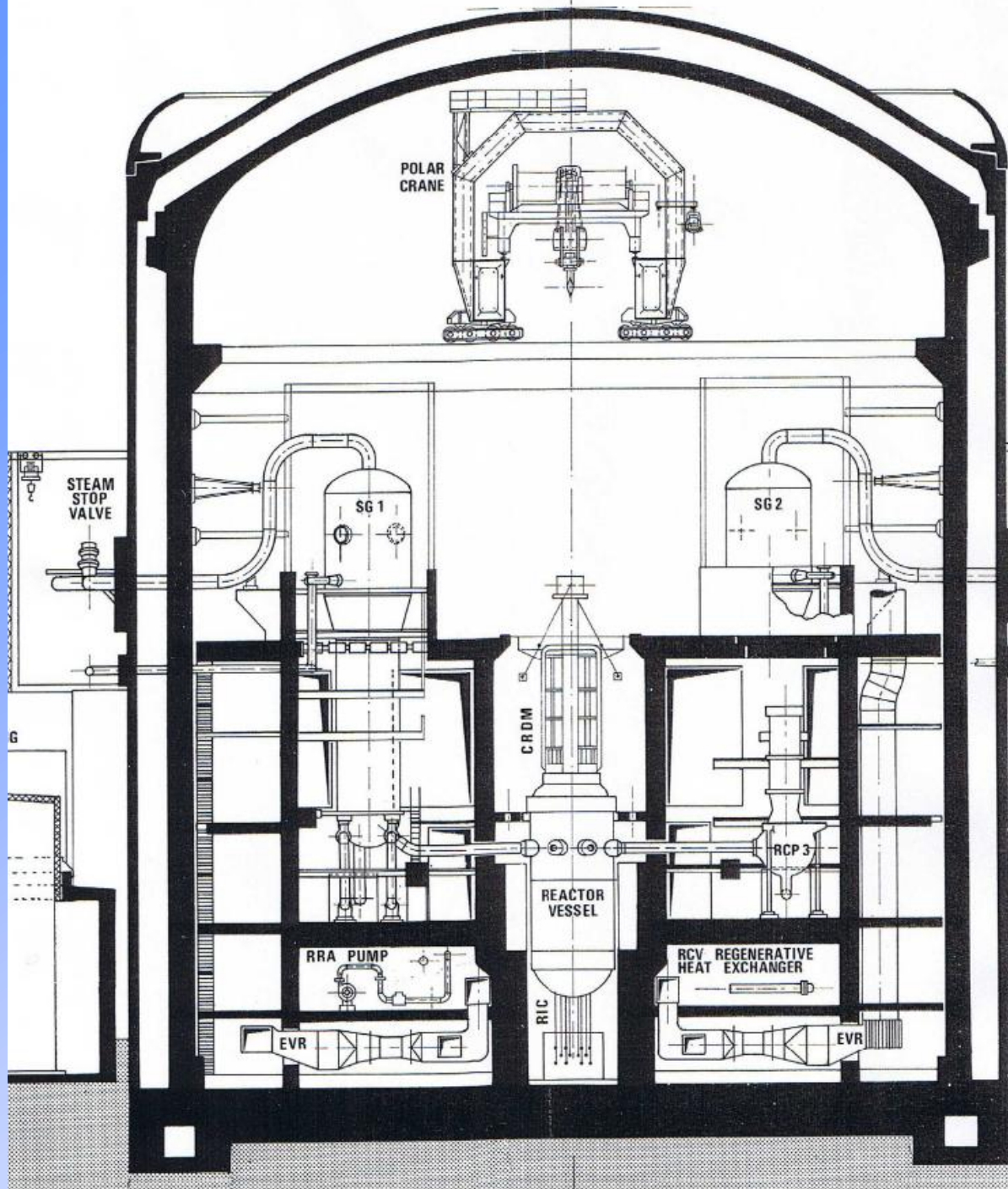


Turbina 1000 MWe, EJ Nowoworoneż

Hala turbin w reaktorze PWR 1300

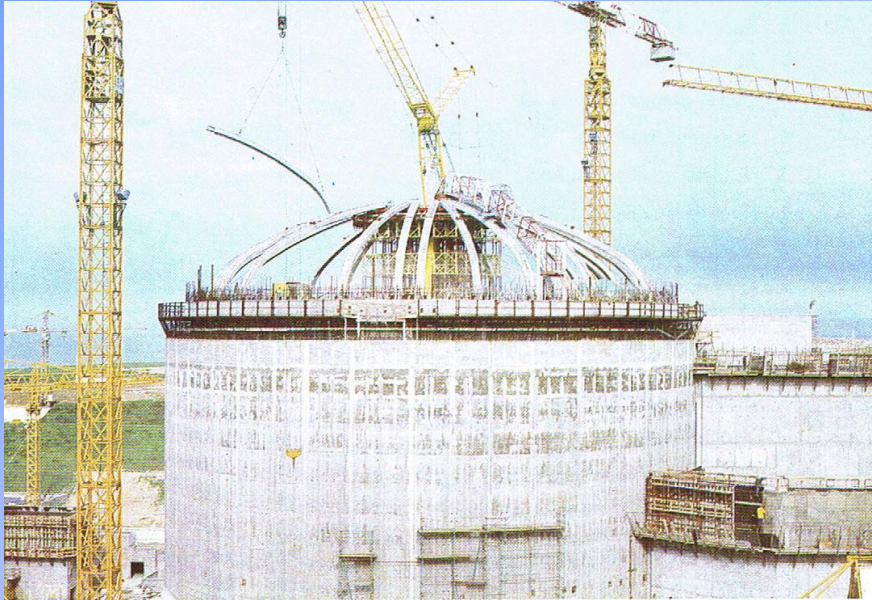


Reaktor PWR 1300 MWe



- Przekrój pionowy przez obudowę bezpieczeństwa reaktora PWR 1300 MWe
- Obudowa podwójna, wysoka szczelność.
- Nie ma pomieszczeń POD szybem reaktora - to zmniejsza zagrożenie w razie wypływu stopionego rdzenia ze zbiornika.

Obudowa bezpieczeństwa PWR 1300



- Ostatnia faza budowy obudowy bezpieczeństwa reaktora PWR 1300 (Francja)
- Widać konstrukcję prętów stalowych. Obwodowo obudowa jest ściskana linami stalowymi by zapewnić naprężenia ściskające w betonie

- Wg zasad przyjętych przez przemysł jądrowy, ryzyko dużych uwolnień produktów radioaktywnych musi być poniżej
- **1 na milion lat.**
- Obudowy reaktorów PWR 1300 we Francji przed 11 września 2001 były budowane jako odporne na uderzenie samolotu
- Cessna 210 (1,5 t, 360 km/h) – pocisk twardy, lub
- Lear Jet 23 (5,7 t, 360 km/h)- pocisk miękki .
- Obecnie EJ Flammanville 3 i Olkiluoto 3 są odporne na uderzenie Boeinga 767.