

Jedrska varnost

Jedrska varnost pomeni varovanje ljudi in okolja pred ionizirajočim sevanjem.

Zagotavljanje jedrske varnosti poteka na več nivojih (obramba v globino):

- 1) Preventiva: preprečevanje nezgod z ustrezno zasnovo reaktorja, z zagotavljanjem kakovosti med projektiranjem, gradnjo in vzdrževanjem, ter z usposabljanjem osebja.
 - 1a) V primeru odstopanja od normalnega obratovanja se elektrarna avtomatsko ustavi (ustavitev na osnovi meritev nevtronskih detektorjev, tlakov, temperatur in pretokov v primarnem ter sekundarnem sistemu in tlaka v zadrževalnem hramu).
- 2) Zaščita: jedrske elektrarne so opremljene z varnostnimi sistemi, ki tudi v primeru malo verjetne odpovedi vitalnih delov opreme preprečijo prekomerne izpuste radioaktivnih snovi.
- 3) Blaženje: v hipotetičnem primeru - ko bi odpovedali tako preventivni kot zaščitni ukrepi in bi prišlo do taljenja sredice, so elektrarne (še posebej nove) opremljene z varnostnimi sistemi za blaženje posledic in omejevanje radioaktivnih izpustov.
 - 3a) Blaženje posledic izpustov radioaktivnih snovi.

O jedrski varnosti

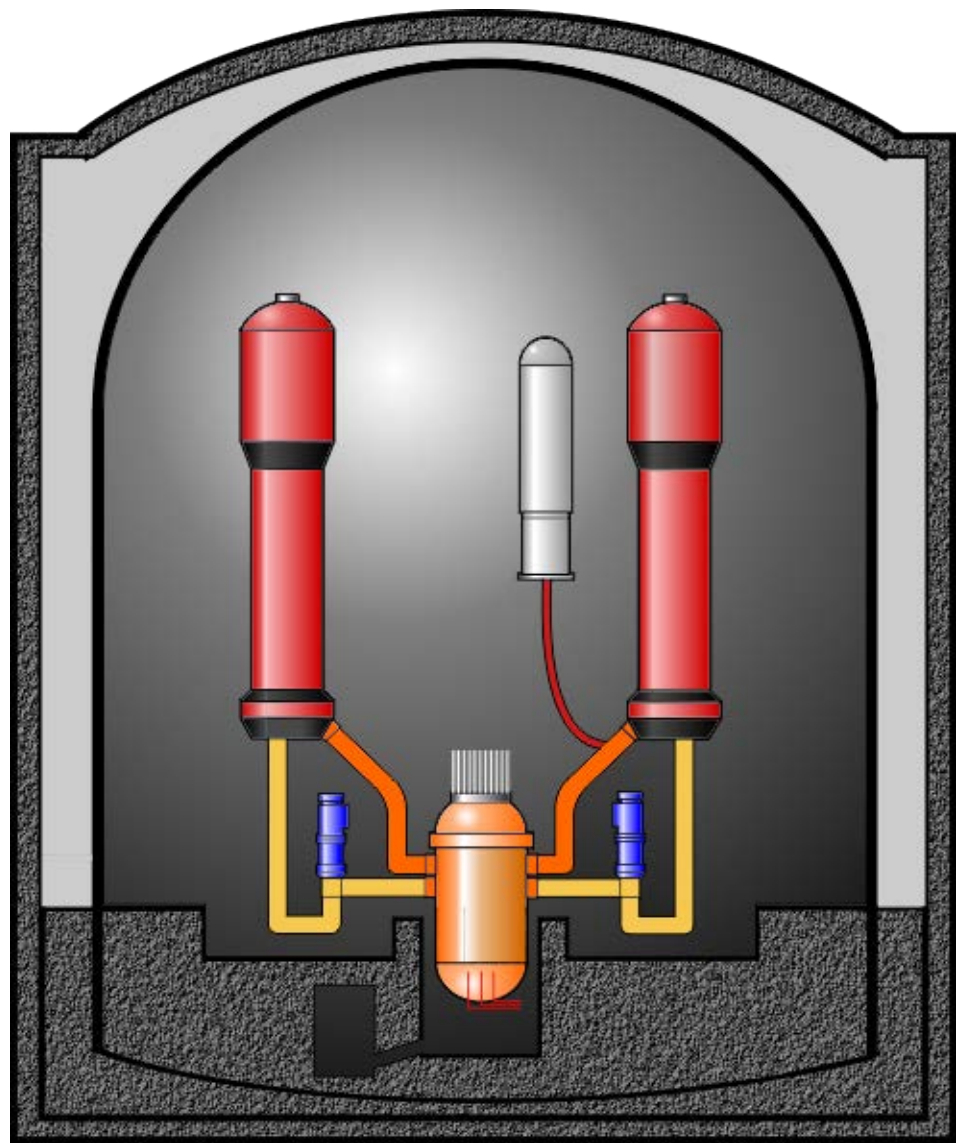
Jedrska varnost:

Izpuste radioaktivnih snovi preprečimo, če ohranimo celovitost glavnih pregrad:

- jedrskega goriva (zadrži 98% radioakt. prod.),
- primarnega sistema,
- zadrževalnega hrama.

Nobena od pregrad ni popolna:

- puščanje gorivnih palic (~1/leto)
- puščanje primarnega sistema (puščanje ventilov, puščanje U-cevi uparjalnika, ~litri/min)
- puščanje zadrževalnega hrama (~0.1% volumna 40.000 m³ na dan pri nadtlaku ~3 bar)



Varnostni sistemi

Varnostni sistemi elektrarne tudi v primeru okvar poskrbijo za:

- nadzorovanje verižne reakcije v gorivu,
- hlajenje goriva in
- zadrževanje radioaktivnih materialov

in tako ohranjajo celovitost pregrad ter preprečujejo izpuste radioaktivnosti.

Lastnosti varnostnih sistemov:

- redundanca
- fizična ločenost redundantnih sistemov
- različne fizikalni načini za opravljanje določene naloge (primer: reaktor je mogoče ustaviti z regulacijskimi palicami ali z boriranjem hladila)
- visoka kakovost, preizkušanje...
- varna odpoved (sistem po okvari ostane v varnem stanju)

Projektne nesreče

predpostavljene odpovedi nekaterih ključnih sistemov

Analize projektnih nezgod so osnova za oceno sprejemljivosti reaktorja.

Analize morajo pokazati, da v okolici reaktorja ni večjih radioloških posledic.

Osnovni tipi projektnih nesreč v tlačnovodnih elektrarnah:

- izguba hladila sredice (zlom cevi primarnega sistema - **izlivna nezgoda**)
- izguba pretoka hladila skozi sredico (odpoved primarne črpalke)
- preveč hladila v primarnem sistemu
- premajhen prenos toplote na sekundarno stran (zlom cevi napajalne vode)
- prevelik prenos toplote na sekundarno stran (zlom parovoda)
- reaktivnost sredice (izmet svežnja regulacijskih palic)
- regulacijske palice ob signalu ne padejo v sredico
- nezgode pri ravnanju z gorivom izven reaktorske posode
- zunanji dogodki (potres, padec letala)

Mejne nesreče - projektne nesreče z najtežjimi posledicami (zaprtje JE).

(maks. ekvivalentna doza "250 mSv once in a life time" pri verjetnosti za takšno nesrečo $\sim 10^{-4}$ - 10^{-5} /leto).

Analize nesreč obravnava 15. poglavje **varnostnega poročila** JE (zahteve, ki so jih formalizirali v ZDA NRC - Nuclear Regulatory Commission - se danes upoštevajo pri načrtovanju v vseh "zahodnih" tipih elektrarn)

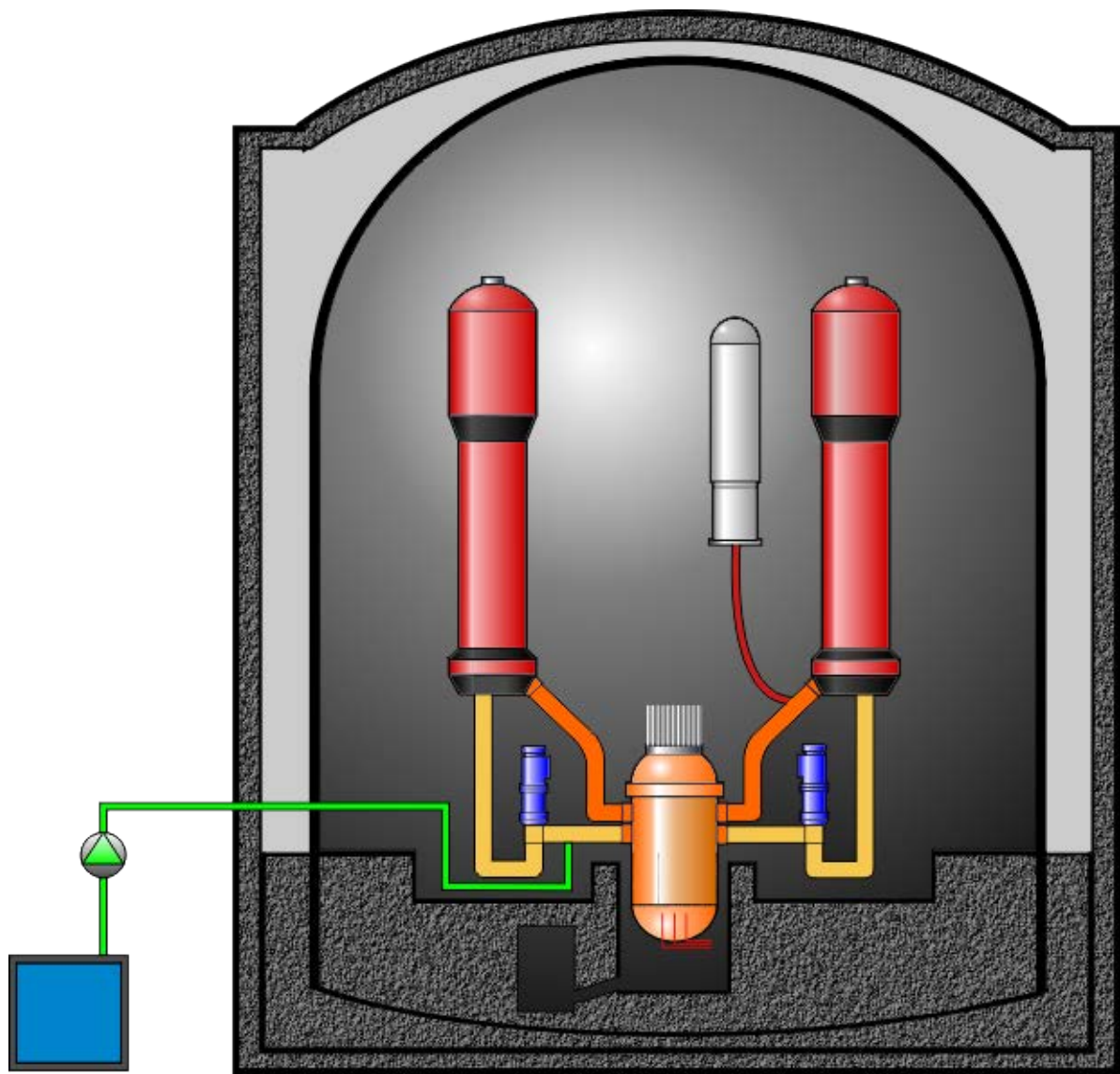
Varnostni sistemi JEK

Sistema za visokotlačno in nizekotlačno varnostno vbrizgavanje hladila

Zasilno hlajenje sredice ob izgubi hladila v primarnem sistemu

(mejna nesreča: velika izlivna nezgoda - LOCA - Loss Of Coolant Accident):

- Voda z raztopljenim borom ustavlja verižno reakcijo v sredici reaktorja.
- Odvajanje toplote, ki v gorivu nastane zaradi zaostalih radioaktivnih razpadov.

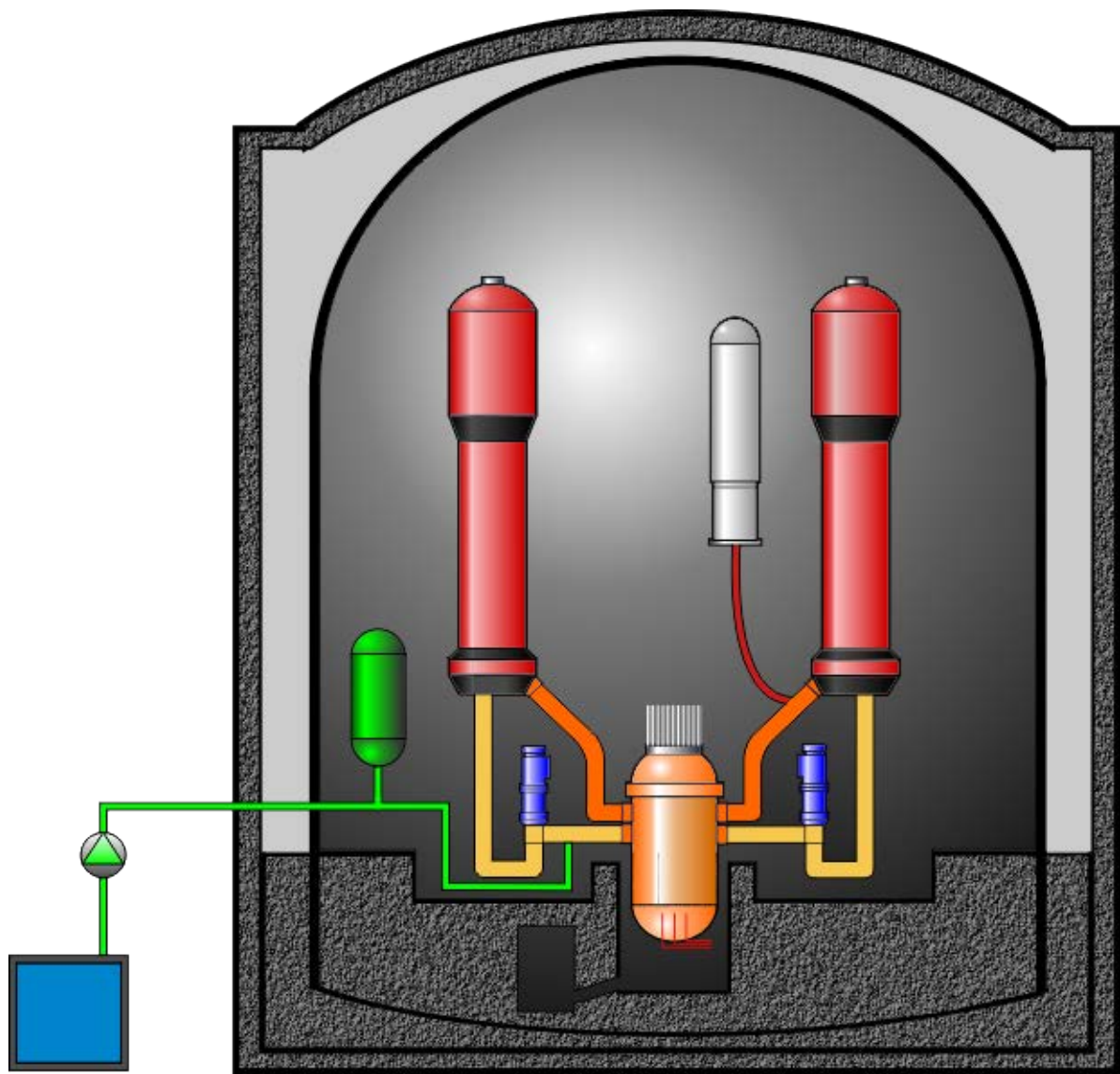


Varnostni sistemi JEK

Pasivna vodna akumulatorja

Opravljata podobne naloge kot oba sistema varnostnega vbrizgavanja - potrebna med veliko izlivno nezgodo.

Za svoje delovanje ne potrebujeta zunanjega vira napajanja. Pogonja ju stisnjen dušik.

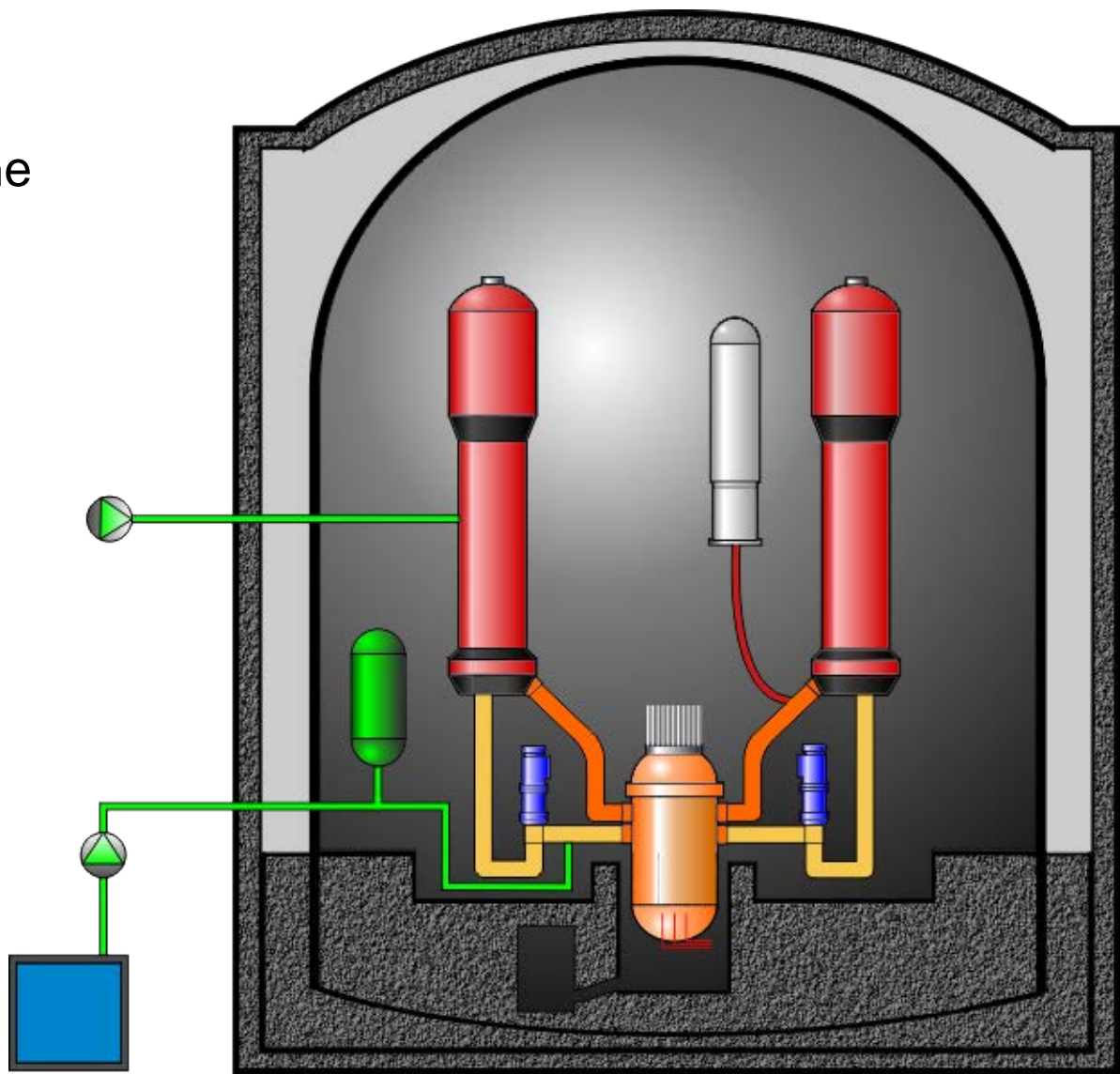


Varnostni sistemi JEK

Sistem pomožne napajalne vode na sekundarni strani uparjalnika

Deluje ob manjših puščanjih primarnega sistema in nekaterih okvarah v sekundarnem sistemu.

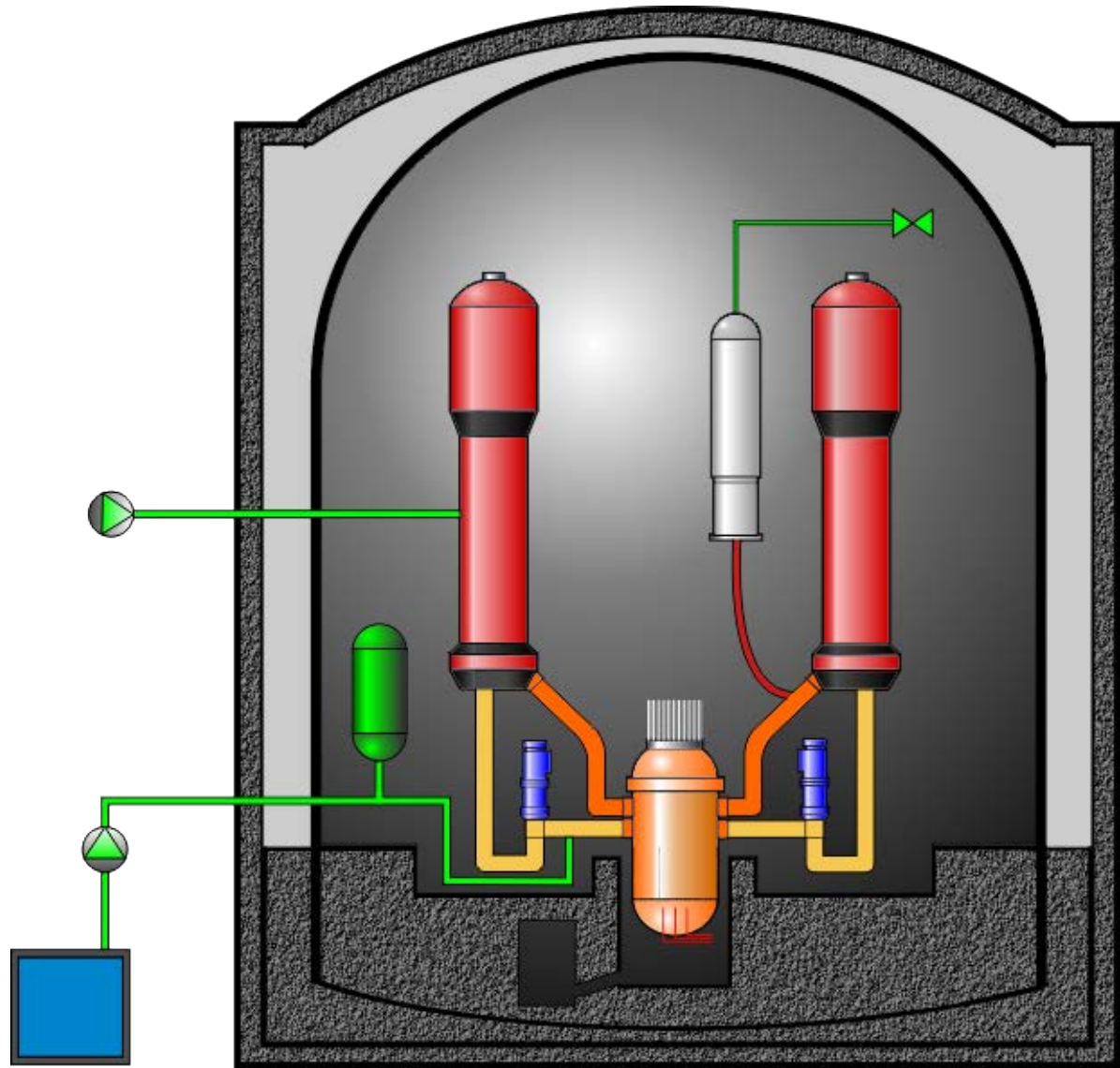
Preko sekundarne strani uparjalnika odvaja zaostalo toploto iz goriva.



Varnostni sistemi JEK

Varnostni ventili na tlačniku

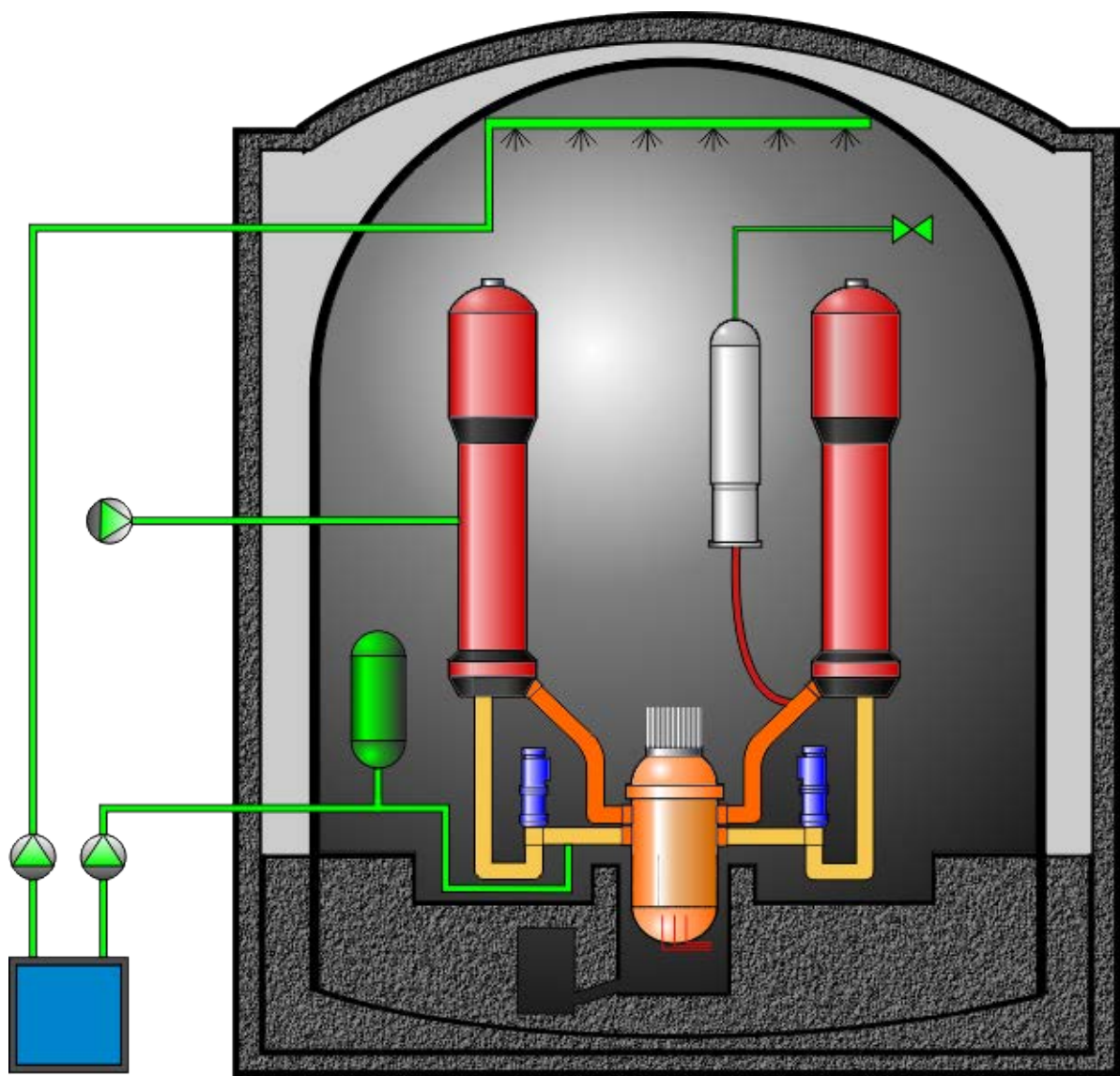
Varnostni ventili se odprejo pri previsokem tlaku in varujejo celovitost primarnega sistema.



Varnostni sistemi JEK

Prhe zadrževalnega hrama

Ob nezgodah varujejo zadrževalni hram pred previsokim tlakom in odstranjujejo radioaktivne produkte iz atmosfere ZH.



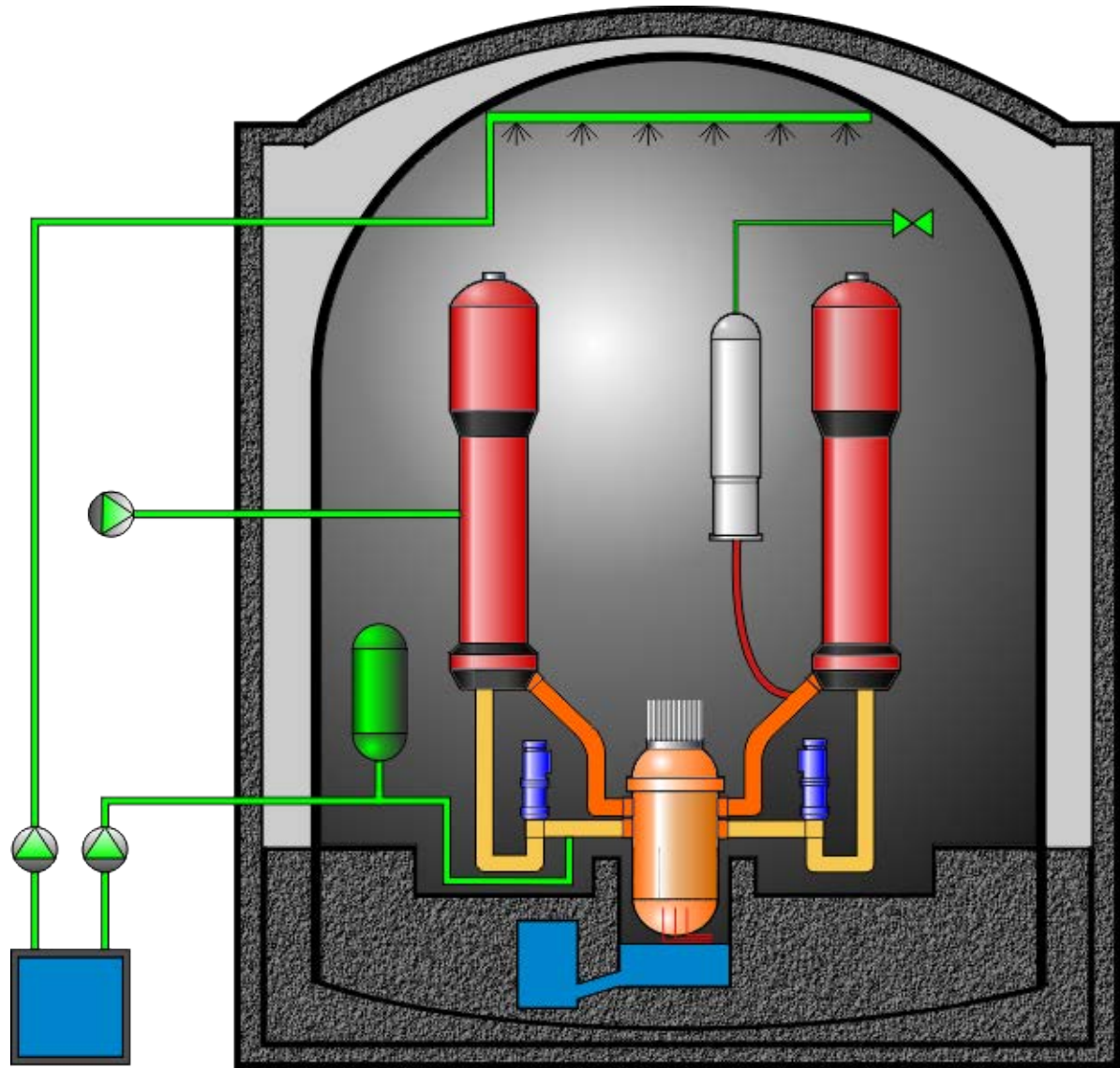
Nesreče s taljenjem sredice

(Severe accidents)

Poplavljanje reaktorske votline med nezgodo s taljenjem sredice

Če bi odpovedali prej naštetni varnostni sistemi, bi lahko prišlo do taljenja sredice in morda tudi reaktorske posode.

NEK bi posledice taljenja sredice blažila s poplavljanjem votline pod reaktorsko posodo.



Širjenje izpustov v okolici JE

Pri težkih nesrečah s taljenjem sredice in velikih izpustih (Černobil, Fukušima), so poleg elementov v tabeli z radiološkega vidika pomembni še Cezij in Stroncij.

Končni rezultat analize projektnih nezgod je ocena izpustov!

Širjenje fisijskih produktov v elektrarni (filtriranje, puščanje...) ter okolici je pomembno področje jedrske tehnike. Za oceno so dovolj poenostavljeni meteorološki modeli. Kljub temu - **več le v knjigah** (npr: Lamarsh & Baratta).

Običajno nas ob izpustih zanima še stanje elektrarne po nezgodi.

Vsebina najpomembnejših hlapljivih fisijskih produktov v sredici JE Krško

vir: varnostno poročilo NEK, tabela 15.6.5-13

Isotope	Core Inventory Ci(Bq)	Containment Atmosphere, Ci(Bq)	Containment Sump, Ci(Bq)
I-131	5.37E+07 (1.98E+18)	1.34E+07 (4.96E+17)	2.69E+07 (9.95E+17)
I-132	7.78E+07 (2.88E+18)	1.95E+07 (7.215E+17)	3.89E+07 (1.44E+18)
I-133	1.12E+08 (4.14E+18)	2.79E+07 (1.03E+18)	5.57E+07 (2.06E+18)
I-134	1.23E+08 (4.55E+18)	3.07E+07 (1.14E+18)	6.15E+07 (2.28E+18)
I-135	1.04E+08 (3.85E+18)	2.60E+07 (9.62E+17)	5.21E+07 (1.93E+18)
Kr-83M	7.16E+06 (2.65E+17)	7.16E+06 (2.65E+17)	-
Kr-85	5.21E+05 (1.93E+16)	5.21E+05 (1.93E+16)	-
Kr-85M	1.55E+07 (5.735E+17)	1.55E+07 (5.735E+17)	-
Kr-87	3.00E+07 (1.11E+18)	3.00E+07 (1.11E+18)	-
Kr-88	4.23E+07 (1.57E+18)	4.23E+07 (1.57E+18)	-
Kr-89	5.21E+07 (1.93E+18)	5.21E+07 (1.93E+18)	-
Xe-131M	5.76E+05 (2.13E+16)	5.76E+05 (2.13E+16)	-
Xe-133M	3.45E+06 (1.28E+17)	3.45E+06 (1.28E+17)	-
Xe-133	1.10E+08 (4.07E+18)	1.10E+08 (4.07E+18)	-
Xe-135M	2.14E+07 (7.92E+17)	2.14E+07 (7.92E+17)	-
Xe-135	2.70E+07 (9.99E+17)	2.70E+07 (9.99E+17)	-
Xe-137	1.04E+08 (3.85E+18)	1.04E+08 (3.85E+18)	-
Xe-138	9.37E+07 (3.47E+18)	9.37E+07 (3.47E+18)	-

Še drugi pomembni fisijski in aktivacijski produkti v sredici...

Table C-7. Fission and activation product inventory (FPI) in LWR core about 30 min after shutdown (continued)

Fission product	Inventory [Ci/MW(e)]	Inventory [Ci/1000 MW(e)]
$^{135}\text{Xe}^b$	3.4E+04	3.4E+07
$^{138}\text{Xe}^b$	1.7E+05	1.7E+08
$^{134}\text{Cs}^b$	7.5E+03	7.5E+06
$^{136}\text{Cs}^b$	3.0E+03	3.0E+06
$^{137}\text{Cs}^b$	4.7E+03	4.7E+06
$^{140}\text{Ba}^b$	1.6E+05	1.6E+08
$^{140}\text{La}^b$	1.6E+05	1.6E+08
^{141}Ce	1.5E+05	1.5E+08
^{143}Ce	1.3E+05	1.3E+08
$^{144}\text{Ce}^b$	8.5E+04	8.5E+07
^{143}Pr	1.3E+05	1.3E+08
^{137}Nd	6.0E+04	6.0E+07
$^{239}\text{Np}^b$	1.6E+06	1.6E+09
^{238}Pu	5.7E+01	5.7E+04
^{239}Pu	2.1E+01	2.1E+04
^{240}Pu	2.1E+01	2.1E+04
^{241}Pu	3.4E+03	3.4E+06
^{241}Am	1.7E+00	1.7E+03
^{242}Cm	5.0E+02	5.0E+05
^{244}Cm	2.3E+01	2.3E+04

^aIt is assumed that the core is at equilibrium [i.e., has been operating for at least one fueling cycle (18 months)]. This assumption could overestimate the inventory of long-lived fission products for a new core. Only the fission products with half-lives greater than 30 min are considered.

^bFission products that should be considered in assessments because they are either a major contributor to early phase dose or they are likely to be released (noble gases).

Source: WASH-1400, Table VI-3-1.

Analiza tveganja - Slovenija (statistični letopis 2010, podatki 2009)

Smrti v letu 2009 (Tabela 4.14)

SKUPAJ	18750
Bolezni obtočil	7475
Neoplazme	5805
Bolezni dihal	1271
Bolezni prebavil	1160
Poškodbe, zastrupitve, zun. vzroki	1450

(Tabela 4.16)

Nezgode	1140	(677 Moški, 463 Ženske)
transportne nezgode	209	
zastrupitve	74	
padci	556	
ogelj in eksplozije	11	
zadužitve in utopitve	61	
drugi vzroki	229	
Usmrtitve in uboji	12	
Samomori	448	(351 Moški , 97 Ženske)

Analiza tveganja

Some U.S. Accident-Fatality Statistics (vir: Vital Statistics of USA 2009)

Accident	Total deaths	Probability of death per person per year
Motor vehicles	36,284	1.18×10^{-4}
Poisoning	30,504	9.9×10^{-5}
Falls	24,834	8.1×10^{-5}
Other - nontransport	15,902	5.2×10^{-5}
Drowning	3,539	1.2×10^{-5}
Fires, burns	2,751	$9. \times 10^{-6}$
Water, Air and space transport	1,782	$6. \times 10^{-6}$
Electricity	888	$3. \times 10^{-6}$ (podatek 1985)
Firearms and handguns	588	$2. \times 10^{-6}$ (podatek 1985)
Lightning	162	$5. \times 10^{-7}$ (podatek 1985)
Suicide	36,547	1.19×10^{-4}
Homicide	16,591	5.4×10^{-5}

TABLE 14-6Average Loss in Life Expectancy due to Various Causes[†]

Cause	Time (days)
Being unmarried—male	3500
Cigarette smoking—male	2250
Heart disease	2100
Being unmarried—female	1600
Being 30% overweight	1300
Being a coal miner	1100
Cancer	980
Cigarette smoking—female	800
Less than eighth-grade education	850
Living in unfavorable state	500
Serving in the U.S. Army in Vietnam	400
Motor vehicle accidents	207
Using alcohol (U.S. average)	130
Being murdered (homicide)	90
Accidents for average job	74
Job with radiation exposure	40
Accidents for “safest” job	30
Natural background radiation (BEIR, 1972)	8
Drinking coffee	6
Oral contraceptives	5
Drinking diet soft drinks	2
Reactor accidents (Kendall, 1975)	2 [‡]
Reactor accidents (WASH-1400, 1975)	0.02 [‡]
Radiation from nuclear industry	0.02 [‡]
PAP test	—4
Smoke alarm in home	—10
Air bags in car	—50

[†]Reprinted with permission from B. L. Cohen and I. S. Lee, “A Catalog of Risks,” *Health Phys.*, Vol. 36, June 1979, pp. 707-722, copyright © 1979, Pergamon Press, Ltd.

[‡]Assumes that all U.S. power is nuclear.

vir: Knief, Nuclear engineering

Odnos do tveganja (verjetnost za smrt posameznika v 1 letu)

Starr's General Correlation of Involuntary Risk (Death/Person/Year) with Perceived Attitude

vir: Knief

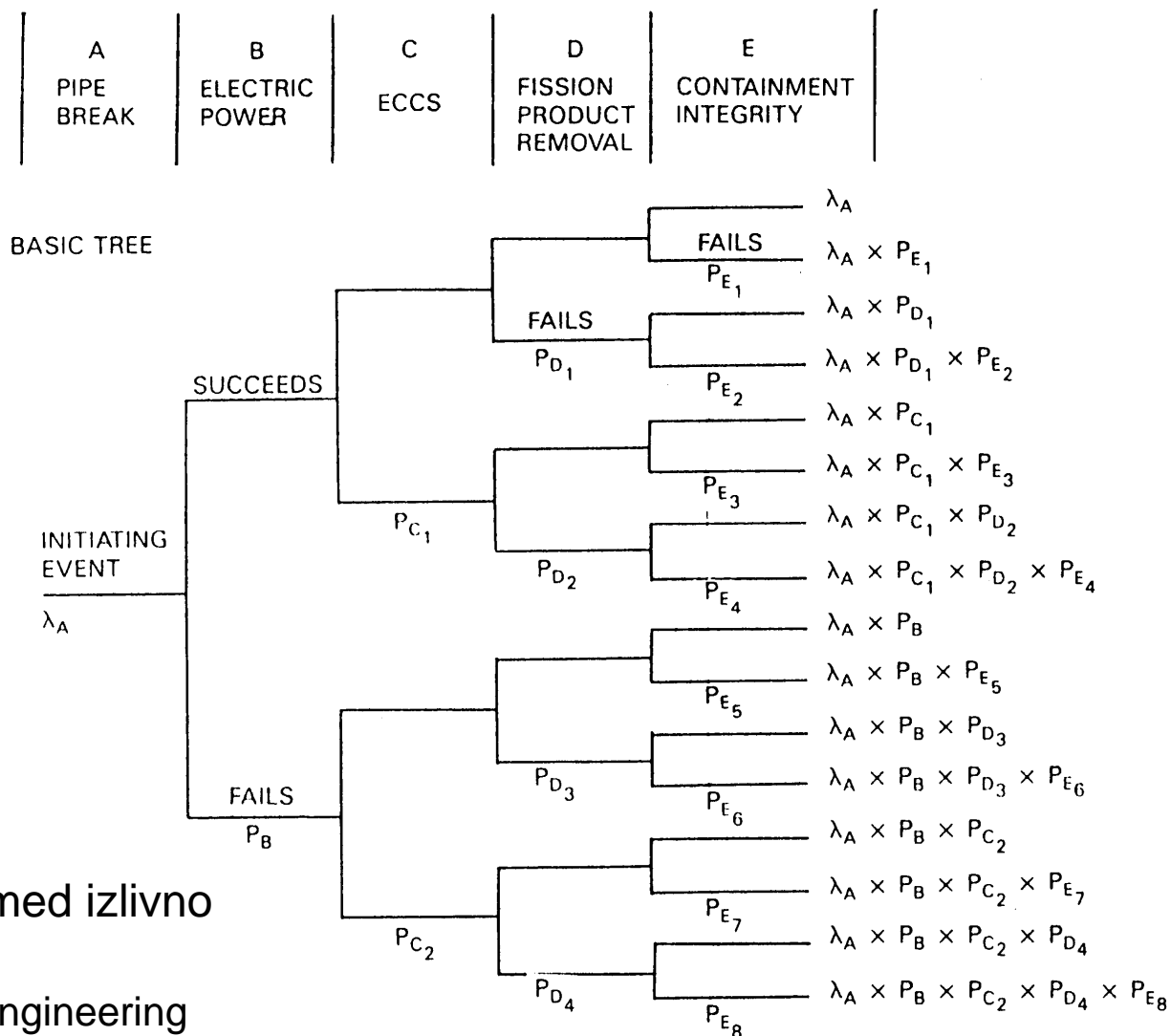
• -----		
• Risk	General Attitude	
• -----		
• 10^{-2}	Natural Death Reference	
• 10^{-3}	Unacceptable, Difficult to find	
• 10^{-4}	Effort and Money Spent to Reduce	(SLO ceste)
• 10^{-5}	Mild Inconvenience to Avoid	(SLO umori)
• 10^{-6}	"Act of God"	
• -----		

Osebno sprejemanje tveganja - ljudje se ne odločamo po številkah:

- Sprejemamo **prostovoljno** tveganje, ki je za faktor $\sim 10^2$ večje kot **neprostovoljno**
- velika nesreča majhne verjetnosti se nam pri istem matematičnem tveganju zdi manj tvegana kot majhna nesreča velike verjetnosti (padec letala : avtomobilske nesreče)

.....

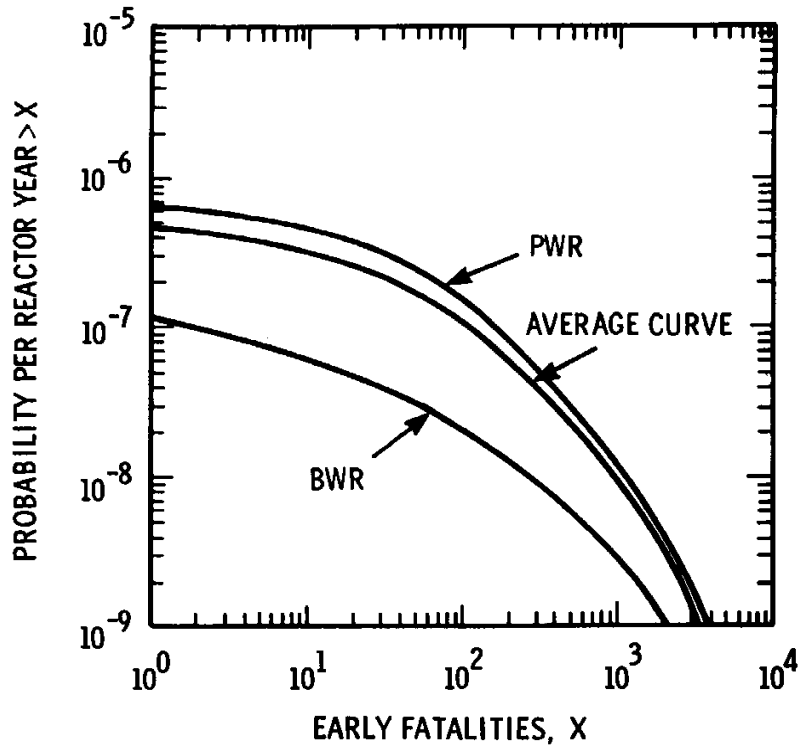
Verjetnostne varnostne analize JE



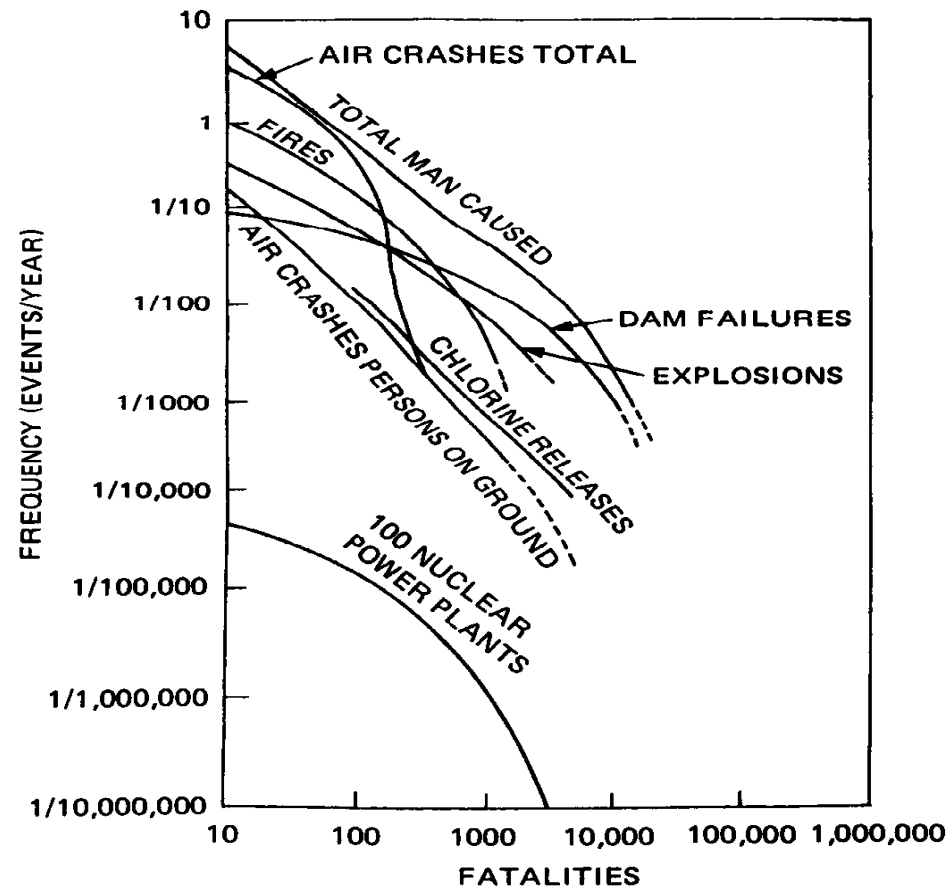
Drevo dogodkov med izlivno nezgodo

vir: Knief, Nuclear Engineering

Reactor Safety Study - WASH 1400 (1975)



negotovost zgornjih krivulj:
 posledice - faktor 4
 verjetnosti - faktor 5



Analiza tveganja

	JEK	nove elektrarne		
		APWR Mitsubishi	EPR AREVA- Francija	AP1000 Westinghouse
Frekvenca poškodbe sredice na reaktorsko leto	$\sim 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Frekvenca velikih zgodnjih izpustov na reaktorsko leto	$9 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$

Z analizami tveganja je mogoče kvantitativno ovrednotiti verjetnosti, s katerimi posamezni začetni dogodki ali okvare pripeljejo do taljenja sredice ali izpusta radioaktivnih snovi.

Vrednosti v tabeli: brez upoštevanja zunanjih dogodkov (potresi, letala, vojne.. ..)

Nesreča na Otoku treh milj (TMI-2) 1979

Dva tlačnovodna reaktorja.

Reaktor št. 2: PWR 880 MWe

Začetni dogodek: ustavitev napajalne črpalke uparjalnika - zmanjšani odvod toplote poveča tlak v primarnem sistemu, kar sproži ustavitev reaktorja.

Zaradi visokega tlaka se je odprl eden razbremenilnih ventilov tlačnika IN OSTAL ODPRT tudi po padcu tlaka. V komandni sobi so instrumenti kazali, da je ventil ZAPRT.

Dogaja se "**mala izlivna nezgoda**", ki pa je operaterji niso identificirali!

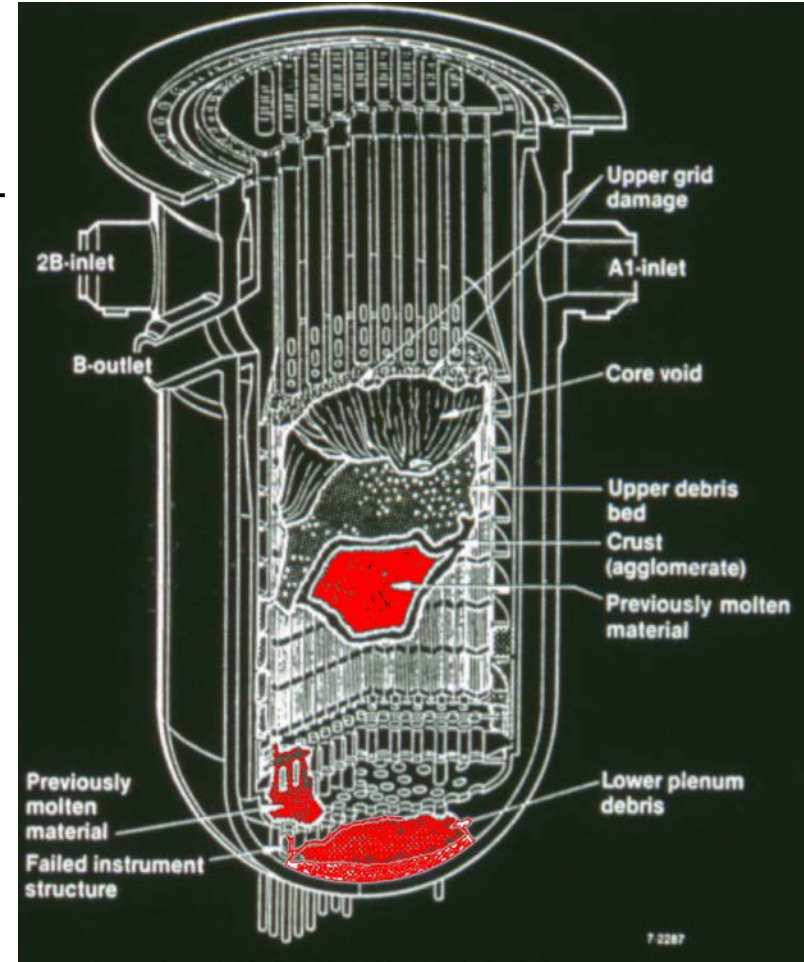
Zmanjšajo pretok sistema za zasilno hlajenje sredice, da bi preprečili napolnitev tlačnika s kapljevino.

Zaradi vibracij ustavijo primarni črpalčki.

Sredica se odkrije in delno stali (~2-4 ure po začetnem dogodku)

Po več urah zaprejo ventil tlačnika in vzpostavijo hlajenje sredice...

TMI-1 podaljšana licenca do 2034 (60 let)



Majhne radiološke posledice:

2,000,000 ljudi po 15 μ Sv

maks. ~ 370 μ Sv

...velike posledice za jedrsko industrijo.

Černobil 1986

RBMK reaktor - **projektne pomanjkljivosti:**

- pozitivni skupni reaktivnosti koeficient pri nizkih močeh
- počasen sistem za ustavitev reaktorja z regulacijskimi palicami
- brez zadrževalnega hrama
- možnost blokade varnostnih sistemov

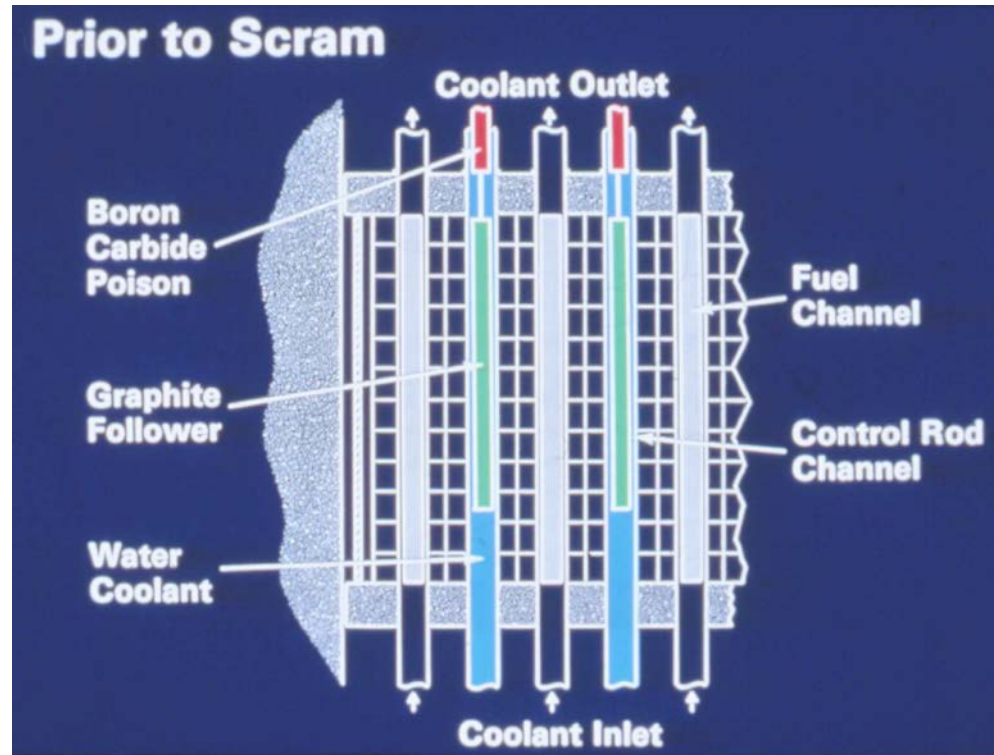
Človeške napake:

Organizacijske:

- neustrezni postopki,
- neusposobljeno osebje...

Konkretne

- neupoštevanje varnostnih postopkov
- blokada signalov za ustavitev reaktorja
- delovanje reaktorja izven predpisanih meja



Rezultat: delovanje reaktorja v prepovedanem območju z izključenimi signali za ustavitev, nesreča.

VARNOST NOVIH ELEKTRARN

Nove tlačnovodne elektrarne so zelo podobne obstoječim.

Za jedrsko varnost pomembne izboljšave v novih elektrarnah:

- Naprednejša izdelava ključnih komponent primarnega sistema in obratovalne izkušnje obstoječih elektrarn že v času gradnje omogočajo projektiranje za 60 letno obratovalno dobo. NEK je projektirana za 40 let.
- Zelo skrbna identifikacija možnih dogodkov v elektrarni. Ovrednotenje verjetnosti za takšne dogodke in za scenarije, ki lahko vodijo v nezgodo. Načrtovanje sistemov, ki preprečijo razvoj začetnih dogodkov v nezgodo.
- Digitalni sistemi zmanjšujejo možnost napak pri upravljanju elektrarne.
- Varnostni sistemi so predvideni tudi za nezgode s taljenjem sredice.
- Za varnost pomembne zgradbe so v novih elektrarnah dodatno zaščitene pred zunanjimi vplivi (padeč letala).

EPR (AREVA, EU)

Enoten sistem za srednjetačno in nizekotlačno varnostno vbrizgavanje

Napredni vodni akumulatorji (iz US-APWR)

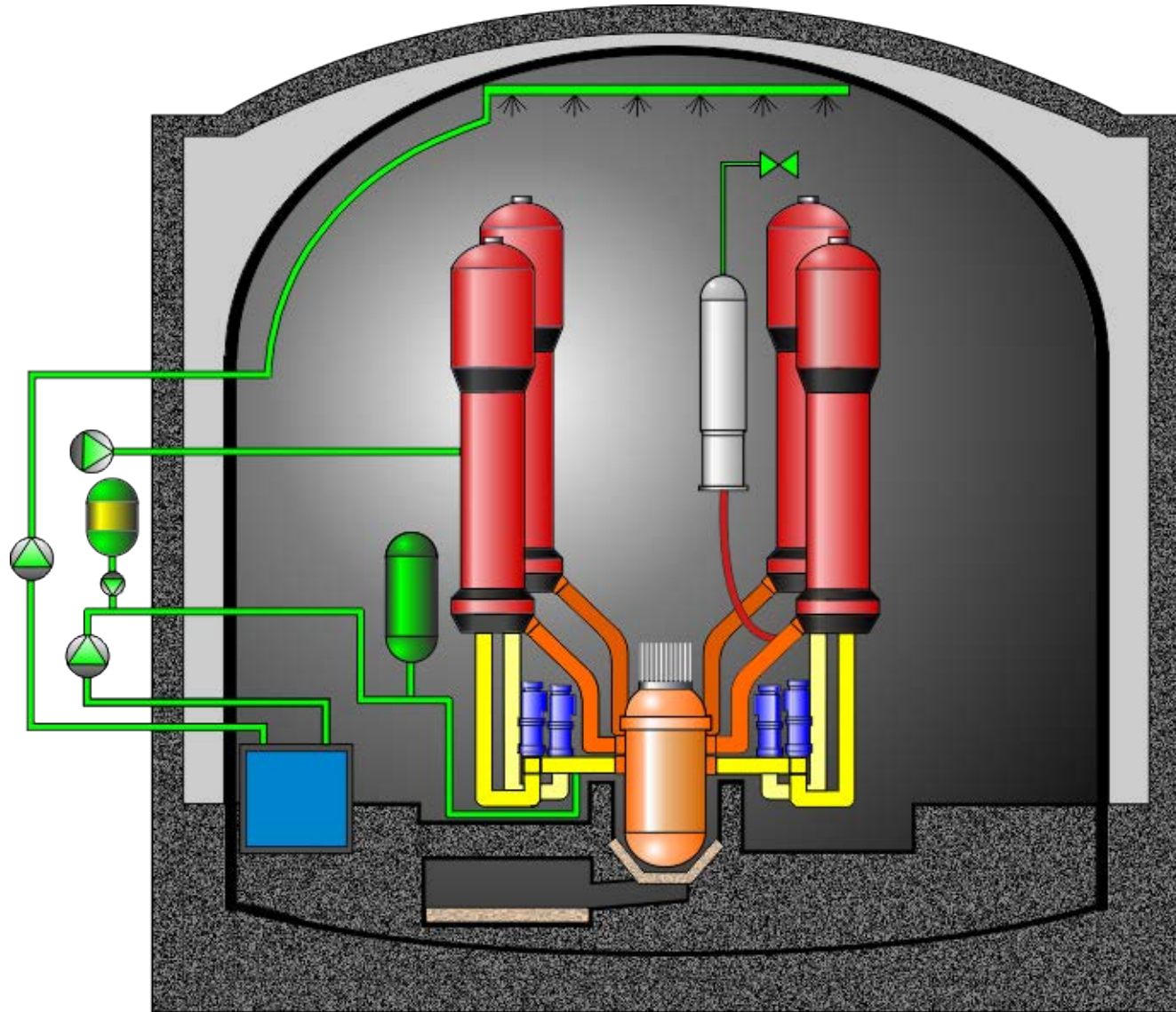
Sistem za dodatno boriranje

Sistem pomožne napajalne vode na sekundarni strani uparjalnika

Prhe zadrževalnega hrama

Varnostni ventili na tlačniku

Lovilec staljene sredice



AP1000 (Westinghouse, ZDA)

Inovativen sistem za blaženje nezdod s taljenjem sredice.

Ustrezna zasnova za učinkovito zunanje hlajenje reaktorske posode.

Z zunanje strani je poplavljen večji del reaktorske posode, kar omogoča zadrževanje staljene sredice v reaktorski posodi.

