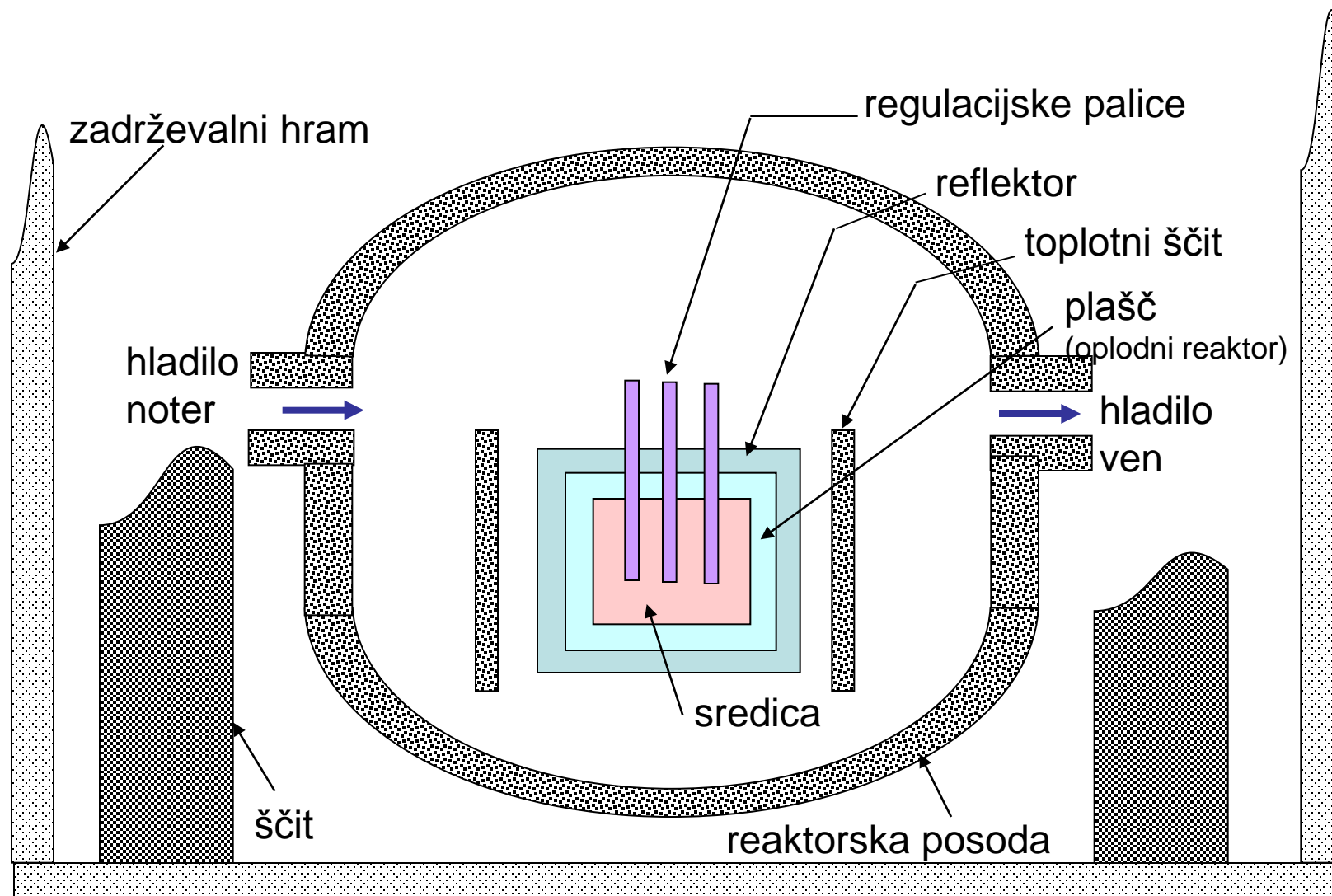


Osnovne komponente skupne večini jedrskih reaktorjev



Hlajenje reaktorja - različni načini...

energetski reaktorji

termični reaktorji

PWR - pressurized water reactor - tlačnovodni reaktor

BWR - boiling water reactor - vrelovodni reaktor

} lahkovodni reaktorji -
več kot 3/4 energetskih
reaktorjev

PHWR - pressurized heavy water reactor - težkovodni reaktor

GCR - Gas cooled reactor - plinsko hlajeni reaktor (CO_2)

RBMK - Ruski reaktor (Černobil, moderator grafit, hladilo voda)

...

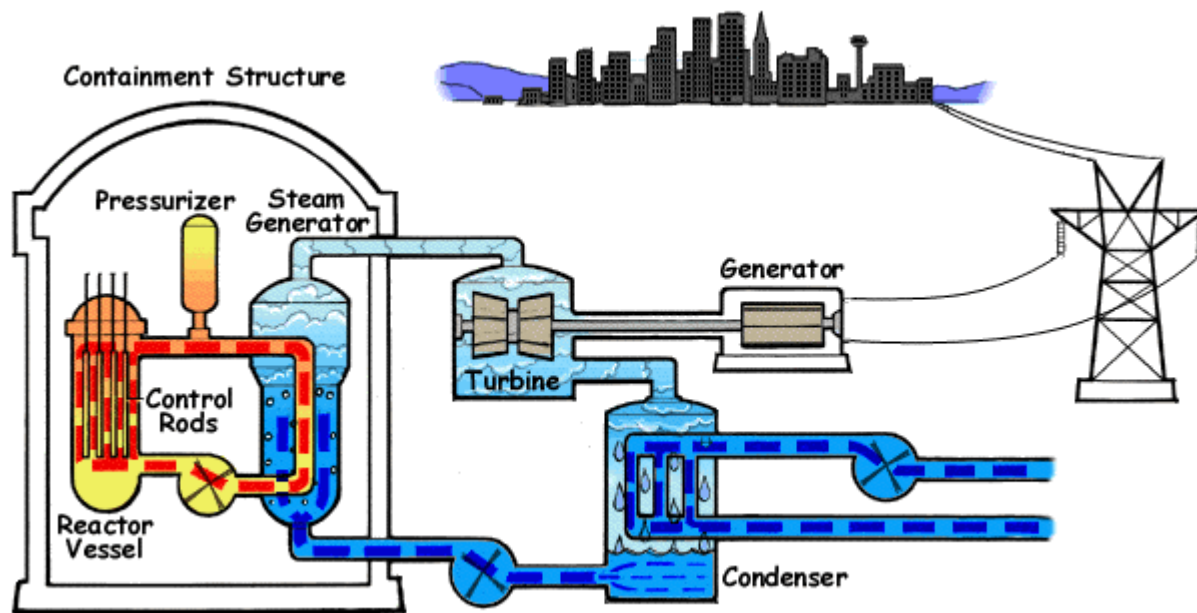
hitri reaktorji (hitri nevtroni - oplodni)

LMFBR - Liquid metal fast breeder reactor - hitri oplodni reaktor s tekočo kovino (Na, Pb, Pb-Bi)

GCFR - plinsko hlajeni hitri reaktor (He)

...

PWR - Tlačnovodni reaktor



slika:
Wikipedia

uparjalniki: 2
ali več

Primarni sistem: $p \sim 150-160$ bar, $T \sim 310$ °C

Sekundarni sistem: $p \sim 70$ bar, $T \sim 280$ °C

~60% vseh energetskih reaktorjev (JE Krško) - izboljšane verzije tudi v načrtovanih novih reaktorjih

Ladijski in podmorniški reaktorji

(Še ena kratica: VVER - Ruski PWR - horizontalni uparjalniki)

PWR - Krško - tlačnovodni reaktor



1-Zadrževalni hram

2-Pomožna stavba

3-Stavba za sveže gorivo

4-Stavba hladilnih sistemov

5-Turbinska zgradba

6-Center za usposabljanje

7-Pomožno črpališče

8-Hladilni stolpi

9-Črpališče vode

10-Iztok hladilne vode

11-Stikališče

12-Upravna stavba

13-Jez na Savi

14-Skladišče RAO

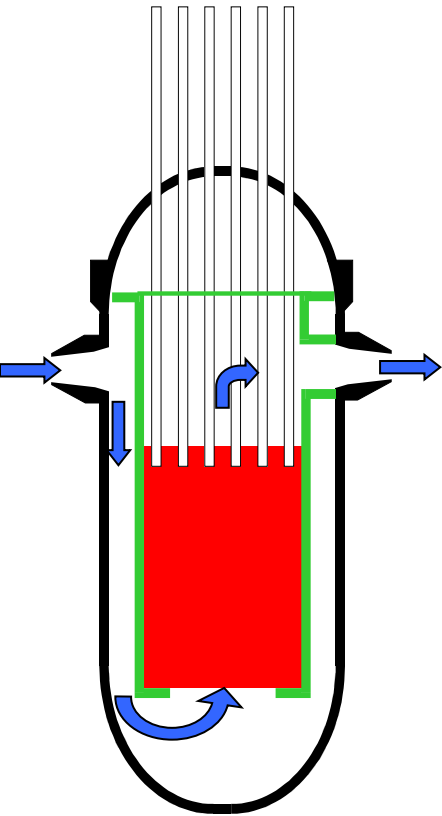
15-Dizel generatorja

16-Vratarnica

17-Garaže

18-Upravna stavba

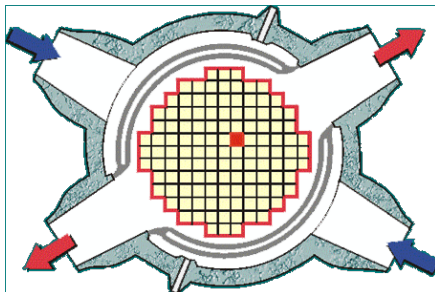
Krško - reaktorska posoda



Toplotna moč reaktorja: 1994 MW
Električna moč na sponkah generatorja: 727 MW
Moč na pragu elektrarne: 696 MW
Toplotni izkoristek: 35 %

Gorivo

Število gorivnih elementov: 121
Število gorivnih palic v gorivnem elementu: 235
Razporeditev gorivnih palic: 16 x 16
Dolžina gorivnih palic: 3,658 m
Debelina srajčke: 0,572 mm
Gradivo srajčke: Zircaloy-4
Kemična sestava goriva: UO_2
Premer tablete goriva: 8,192 mm
Zunanji premer gor. palice: 9.5 mm
Dolžina tablete goriva: 13,46 mm
Skupna količina urana: 48,7 t



Reaktorsko hladilo

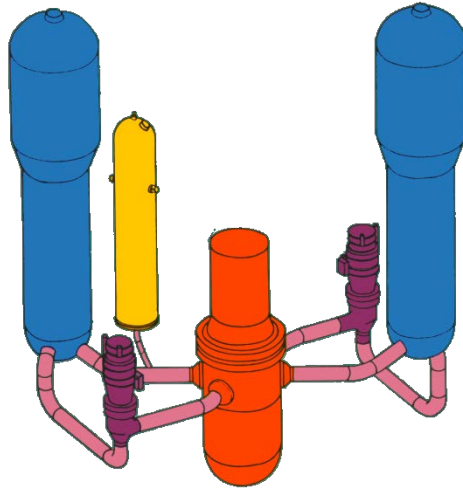
Snov: H_2O
Dodatki: H_3BO_3

vir: www.nek.si

Regulacijske palice

Število regulacijskih svežnjev: 33
Število absorpcijskih palic v svežnju: 20
Celotna teža regulacijskega svežnja: 53,07 kg
Nevtronski absorber: Ag-In-Cd (80-15-5) %

Krško - primarni sistem, uparjalnik



Primarni sistem

Število hladilnih zank: 2

Skupni masni pretok: 9400 kg/s

Tlak: 15,41 MPa

Celotna prostornina: 197 m³

Temperatura na vstopu v reaktor: 287 °C

Temperatura pri izstopu iz reaktorja: 324 °C

Število črpalk: 2

Zmogljivost črpalke: 6,3 m³/s

Moč motorja črpalke: 5,22 MW

Uparjalnik:

Material: INCONEL 690 TT

Tlak pare pri izstopu: 6,5 MPa

Temperatura pare pri izstopu: 280,1 °C

Temperatura napajalne vode: 219,4 °C

Masni pretok pare iz obeh uparjalnikov: 1090 kg/s

Višina uparjalnika: 20,6 m

Število U-cevi: 5428

Zun. premer U-cevi: 19,05 mm

Teža uparjalnika: 345 t

Površina prenosa toplote: 7177 m²

Debelina stene U-cevi: 1,09 mm

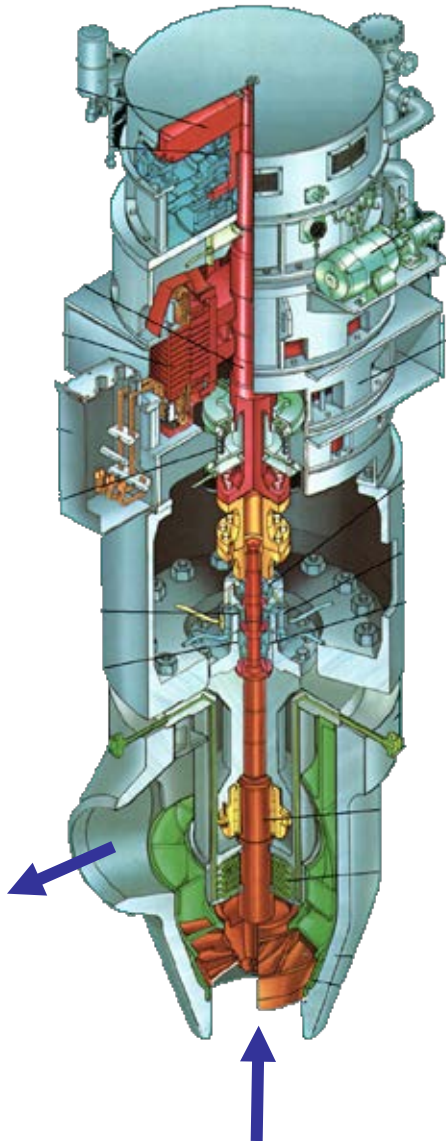
Krško - primarni sistem, črpalka, tlačnik

Črpalka:

Število črpalk: 2

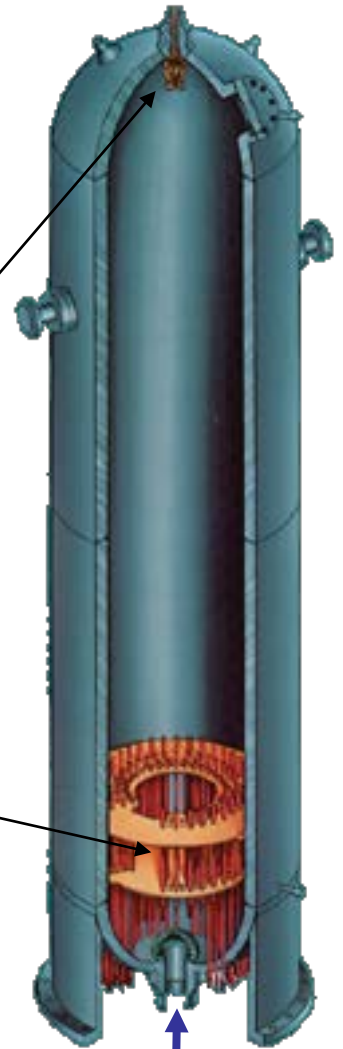
Zmogljivost črpalke: 6,3 m³/s

Moč motorja črpalke: 5,22 MW



prhe

grelci



Tlačnik ~28 m³:

T~ 345 °C

nivo kapljevine ~ 50%

Grelci - višanje primarnega tlaka

Prhe - nižanje primarnega tlaka

Varnostni ventili na vrhu tlačnika

povezava s
primarnim
sistemom

Krško - turbina, generator

Turbina:

maksimalna moč: 727 MW

Pretok pare: 1090 kg/s

Vstopni tlak sveže pare: 6,2 MPa

Temperatura sveže pare: 275,5 °C

Vrtilna hitrost turbine: 1500 vrt./min

Vlažnost pare ob vstopu: 0,46 %

Kondenzacijski tlak (vakuum): 5,1 kPa

Povprečna temperatura kondenzata: 33 °C

Število glavnih napajalnih črpalk: 3

Zmogljivost napajalne črpalke: 50 %

Generator:

Nazivna moč generatorja: 813 MVA

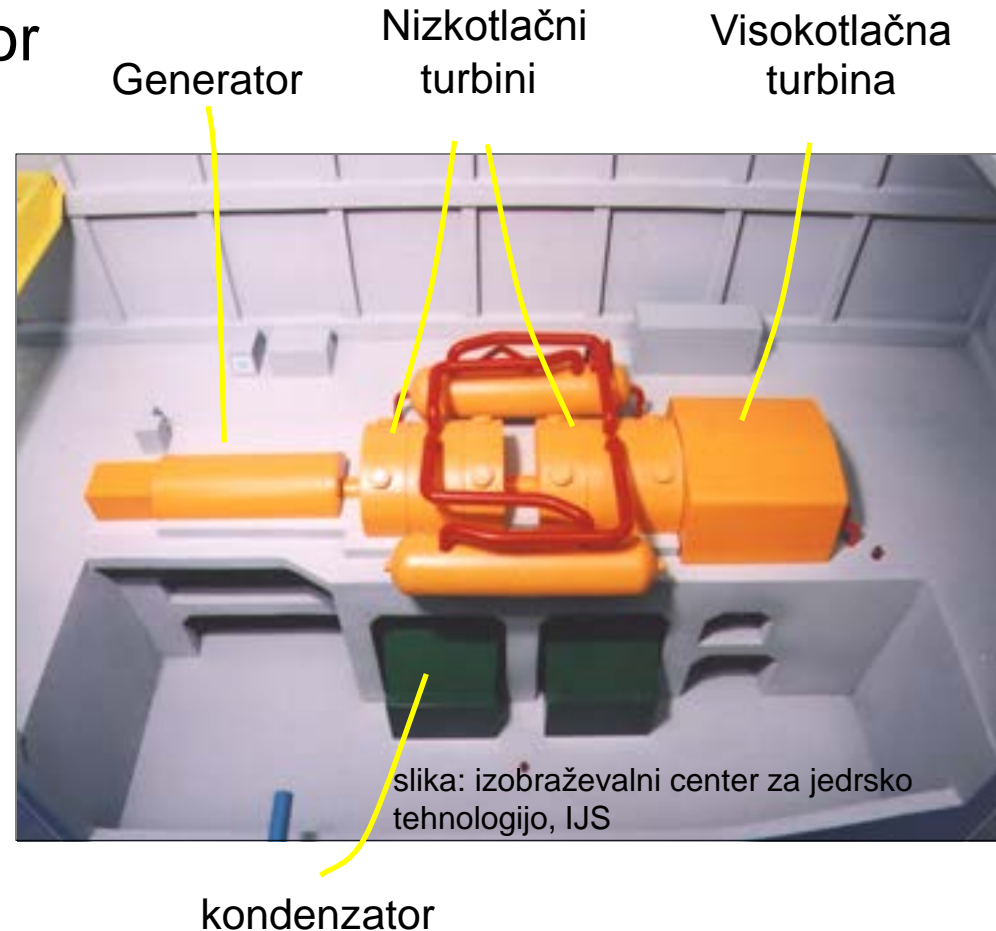
Nazivna napetost: 21 kV

Nazivna frekvenca generatorja: 50 Hz

Nazivni $\cos \varphi$: 0,85

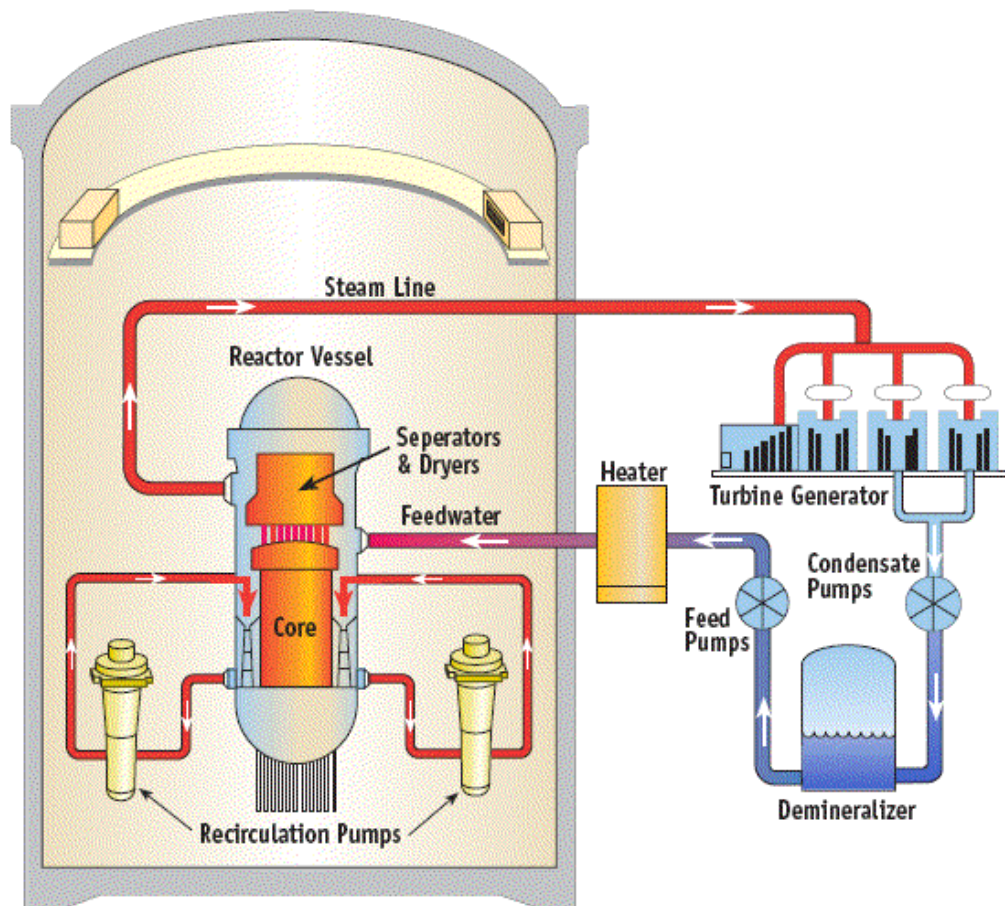
Blokovna transformatorja - Nazivna moč: 1 x 500 MVA, 1 x 400 MVA, Prestavno razmerje: 21/400 kV

Transformatorja lastne rabe Maksimalna dovoljena trajna moč: 2 X 30 MVA



BWR - Vrelvodni reaktor

slika: www.eia.doe.gov



~20% vseh energetskih reaktorjev.

Hladilni sistem: $p \sim 75$ bar, $T \sim 285$ °C,

Razlike BWR - PWR:

- Stabilnost vrenja - vprašljiva pri nizkem tlaku, stabilno pri tlaku BWR hladila.
- Radioaktivna para na turbini - potrebno ščitenje.
- Tanjše stene reaktorske posode a večja posoda kot v PWR.
- Regulacijske palice skozi dno posode.
- Brez bora v hladilu.

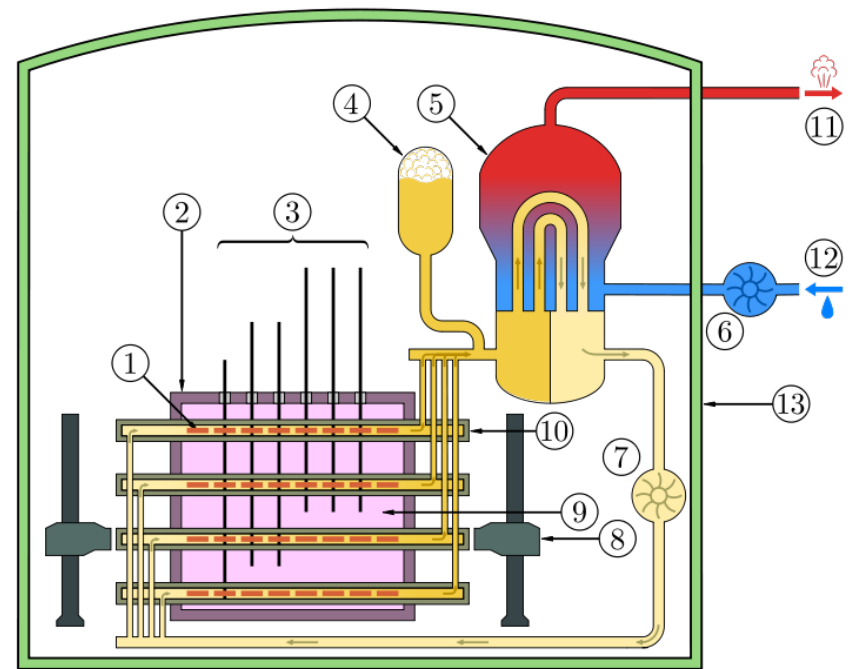
Recirkulacijske črpalke: pretok skozi sredico 7x večji od toka pare. Z recirkulacijskimi črpalkami je mogoče nadzorovati moč reaktorja.

PHWR - Težkovodni reaktor

Kanada - CANDU (slika)

Nekaj 10 reaktorjev - predvsem v Kanadi in Indiji

- uporablja naravni uran
- CANDU - ni reaktorske posode ampak "Kalandrija" - gorivo v ločenih kanalih - možna menjava goriva med delovanjem.



1 - gorivo, 2 - Kalandrija, 3 - regulacijske palice, 4 - težka voda - primarno hladilo, 5 - uparjalnik, 6 - napajalna črpalka sekundarne (navadne) vode, 7 - črpalka primarne (težke) vode, 8 - naprava za menjavo goriva, 9 - težka voda pri nizkem tlaku (ločena od primarnega sistema - potrebno hlajenje), 10 - tlačna "cevn", 11 - para, 12 - kapljevina iz kondenzatorja, 13 - zadrževalni hram.

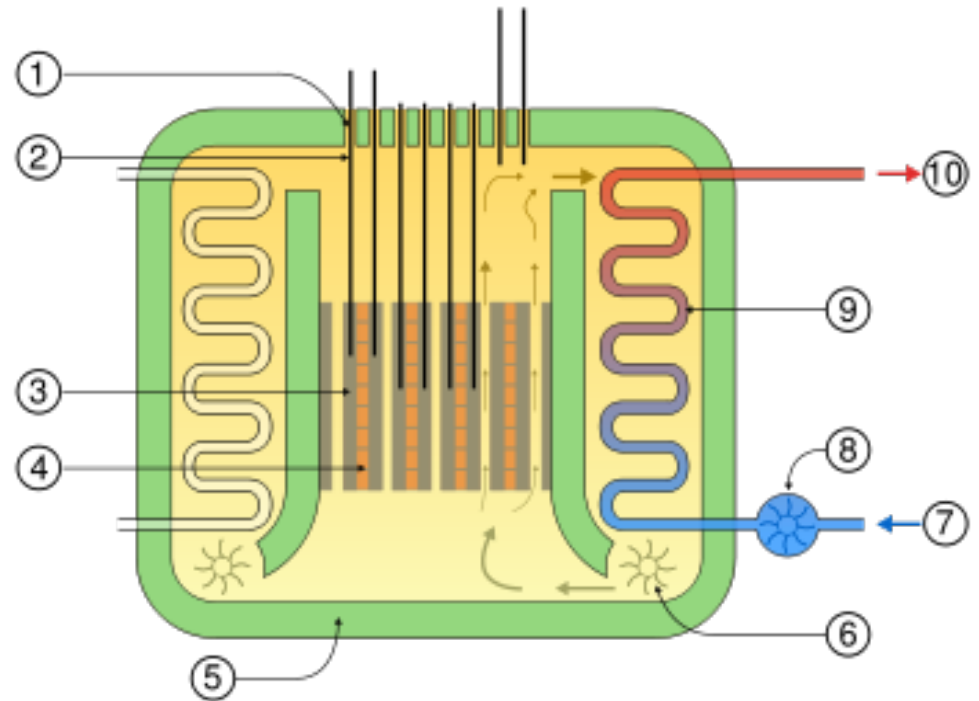
GCR - plinsko hlajeni reaktorji

Nekaj 10 reaktorjev - predvsem v VB

slika: AGR (Advanced GR) - VB

- moderator grafit

- hladilo CO₂



"Uparjalnik" v posodi, 1. cevi za menjavo goriva, 2 - regulacijske palice, 3 - grafit, 4 - gorivo, 5 - betonska tlačna posoda in ščit, 6 - črpalka CO₂, 7 - voda, 8 - vodna črpalka, 9 - izmenjevalec toplote - "uparjalnik", 10 - para

Projektirana za menjavo goriva med delovanjem.

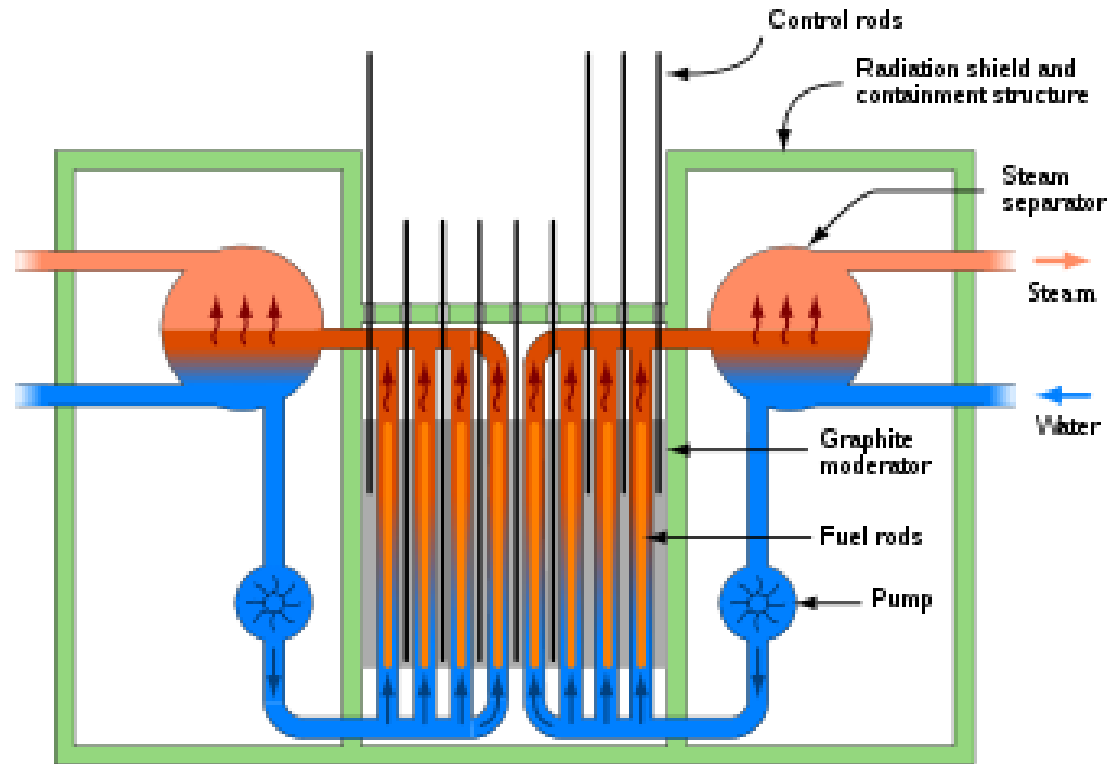
RBMK - reaktor

~25 reaktorjev - v državah
bivše SZ, deluje jih še 10 v
Rusiji.

Ignalina 2 - Litva - zaprta 2009.

Reaktorska jama:

- ni reaktorske posode - hladilo
- voda - teče po ločenih
ceveh. Med cevmi je
moderator - grafit.

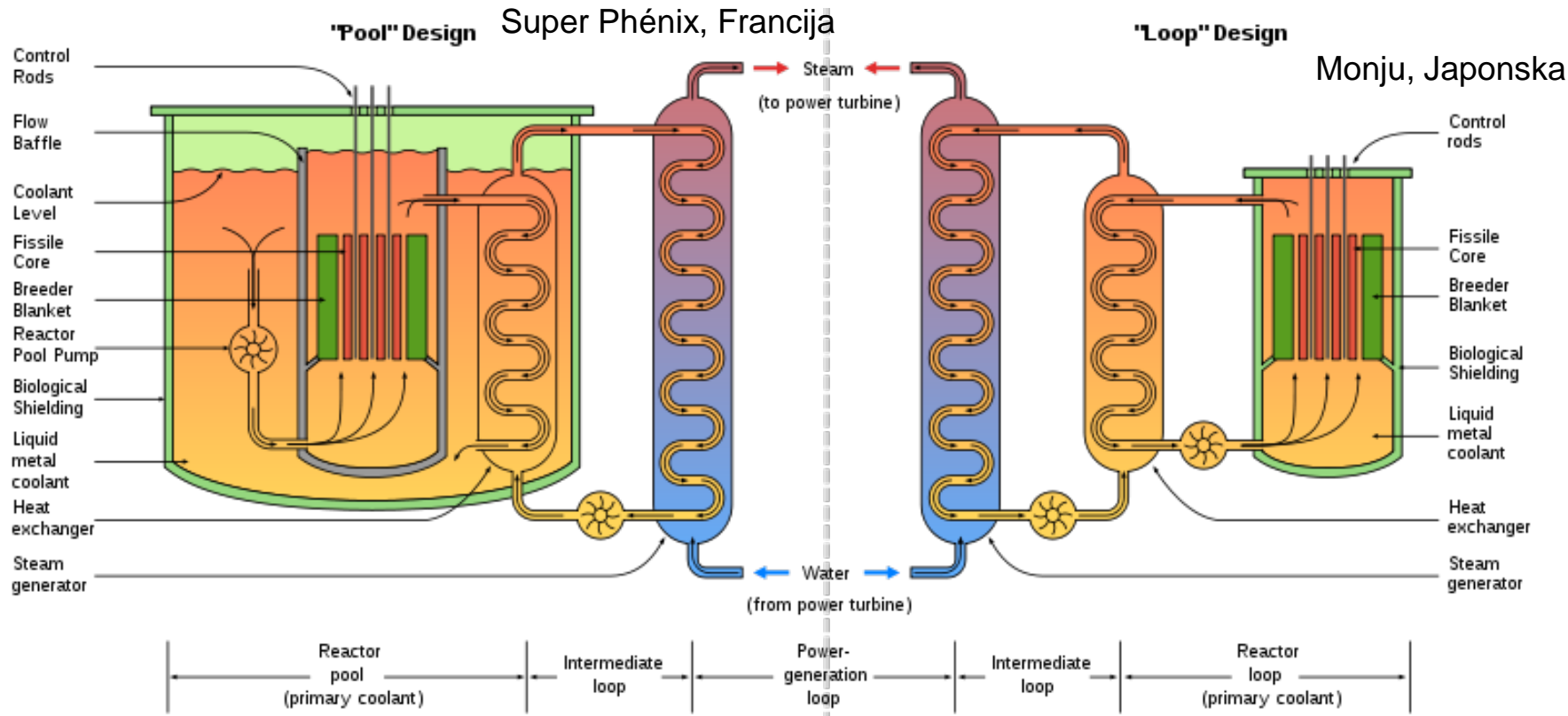


gorivo - 2% obogateni uran - omogoča menjavo goriva med delovanjem.

1000 in 1500 MWe reaktorji.

Hitri reaktorji - LMFBFR

slika: wikipedia



Nekaj delujočih prototipov - tipično ~10-300 MWe (Rusija, Francija - Super Phénix 1200 MWe, Japonska). Večino hladi natrij.

Oploidno razmerje: št. nevtronov nastalih ob fisiji narašča z energijo začetnega nevtrona => ČIM MANJ zaviranja nevtronov.

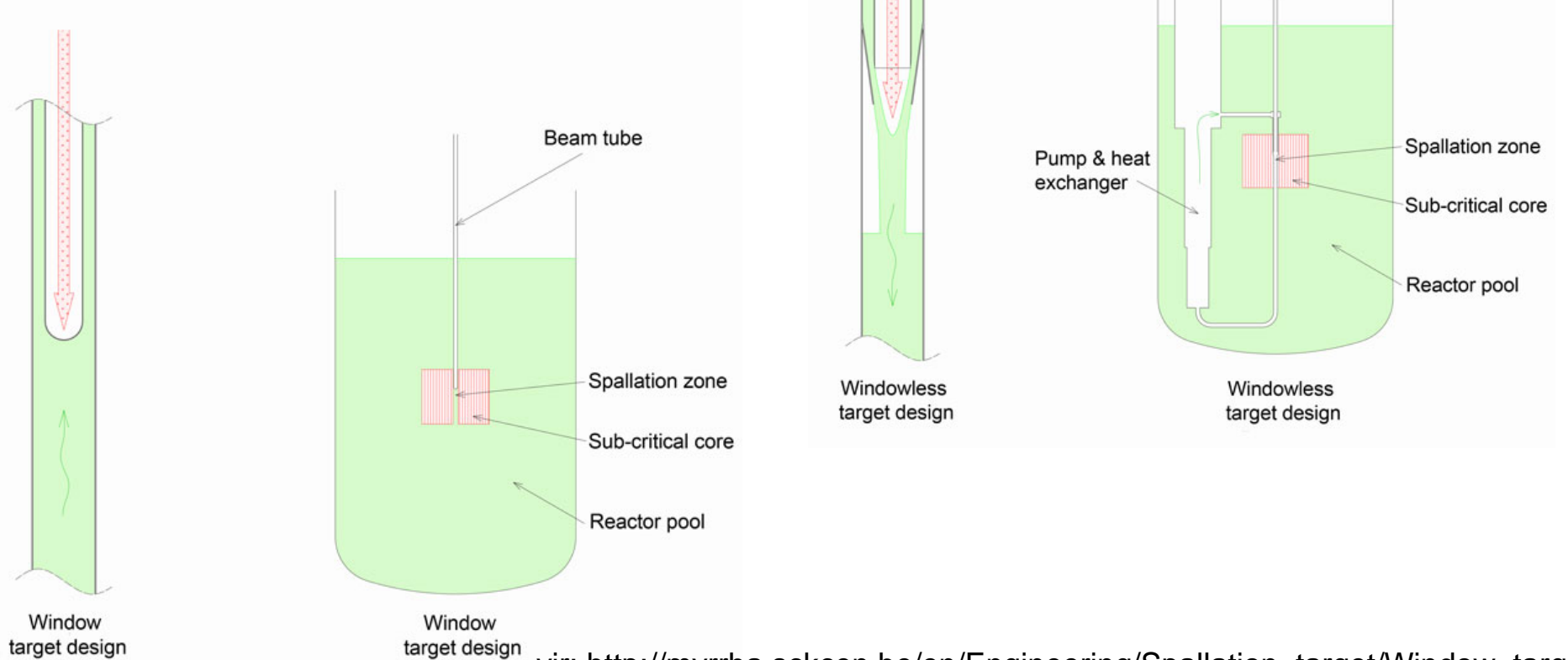
Na: visoka T vrelišča, ni korozije kovinskih struktur, pri sobni temperaturi se strdi, se močno aktivira, puščanje se opazi - Na v zraku reagira.

Reaktorji "4." generacije (področja današnjih raziskav)

- **Very High Temperature Reactor (VHTR)** - za procese, ki zahtevajo toploto pri visokih energijah - termo-kemična proizvodnja vodika. Hladilo helij, na izhodu iz sredice temperatura 1000°C . Jedrsko gorivo - TRISO kroglice - gorivo prevlečeno s tremi sloji izotropnih materialov - odporno na visoke temperature. Ovoji vsebujejo grafit. Kroglice so lahko samostojne (pebble bed reactor) ali v blokih grafita. Odvajanje toplote gorivu hladi na maks. 1600°C med normalnim obratovanjem in izrednimi dogodki.
- **Gas-cooled Fast Reactor (GFR)** uporablja helij kot hladilo, fisijo vzdržujejo hitri nevtroni. Gorivni cikel je zaprt: oplodni reaktor uporablja in proizvaja gorivo, učinkovita transmutacija aktinidov (atomska števila od 90 navzgor). Gorivo v obliki palic, plošč, ali prizmatičnih blokov. Hladilni sistem podoben VHTR.
- **Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)** hitri nevtroni, zaprt gorivni cikel. Glavni cilji: oplodni reaktor, transmutacija aktinidov. Temperatura natrija (hladila) na izhodu iz sredice $\sim 550^{\circ}\text{C}$. Primarni hladilni sistem: "pool" ali "loop" izvedba. Vmesni hladilni sistem prenaša toploto s primarnega kroga na sistem, ki notranjo energijo pretvarja v elektriko. Novi projekti: vmesni hladilni sistem uporablja težko tekočo kovino (svinec), kar prepreči stik natrija in vode.
- **Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)**. Hitri reaktor hlajen s svincom - zelo majhna absorpcija hitrih nevtronov in kemično inertno hladilo. Temperatura hladila na izstopu iz reaktorja višja od 550°C (do 800°C , odvisno od vzdržljivosti materiala 😊). V primerjavi s SFR ima LFR širšo rešetko goriva, ki omejuje hitrost hladila na $\sim 2.5\text{ m/s}$ in s tem omeji erozijo materialov ter tlačne izgube v sredici. Načrtuje se "pool" izvedba primarnega hladilnega sistema. Zaradi velike gostote svinca, je načrtovan pasivni odvod toplote vmed normalnim obratovanjem in med izrednimi dogodki.
- **Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)** - nadgradnja današnjih lahkovodnih reaktorjev. Tlak hladila $\sim 25\text{ MPa}$, temperatura $> 500^{\circ}\text{C}$. Primarno hladilo gre neposredno na turbino. Osnovni cilj - poceni elektrika (visok termični izkoristek). Zaradi nižje gostote vode pri nadkritičnih p in T bo spekter nevtronov trši, višje bo razmerje med proizvedenim in porabljenim gorivom, ter manj radioaktivnih aktinidov.
- **Molten Salt Reactor (MSR)** - spekter nevtronov nekoliko trši od termičnega, zaprt gorivni cikel z učinkovito izrabo plutonija in transmutacijo aktinidov. Osnovni cilji - proizvodnja elektrike, sežiganje plutonija in aktinidov. Hladilo je tekoča zmes natrija, cirkonija in uranovih fluoridov. Sistem deluje pri nizkih tlakih in ima na izhodu iz sredice temperature nad 700°C , kar pomeni visok izkoristek.

Reaktorji "4." generacije (področja današnjih raziskav)

- Accelerator-driven subcritical nuclear system (ADS)** - hiter nevtronski spekter za sežiganje jedrskih odpadkov (minor actinides - vsi aktinidi razen goriva). Sistem sestavljajo trije glavni deli: pospeševalnik protonov, tarča, v kateri iz protonov nastanejo nevtroni (spallation target) in podkritična sredica, v kateri poteka transmutacija radioaktivnih odpadkov. Zlitine svinca so lahko hladilo in inostočasno "spallation target", sja pri obstreljevanju Pb s protoni nastaja precej nevtronov. Sredica podobna kot v LFR. ADS sistem vsebuje tarčo, ki je vir nevtronov, pospeševalnik in podkritičen reaktor. Obravnava se dva različna tipa tekoče kovinskih tarč: tarčo "z oknom" in tarčo "brez okna".



vir: http://myrrha.sckcen.be/en/Engineering/Spallation_target/Window_target