



Nuklearna energetika



Doc. dr Koviljka Stanković
kstankovic@etf.rs



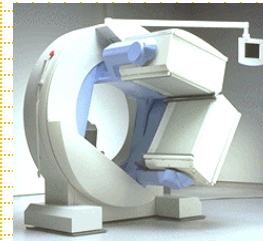
IZVORI JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

➤ PRIRODNI IZVORI (NATURALLY OCCURRING SOURCES)

- Čitava populacija na našoj planeti neprekidno je izložena jonizujućem zračenju iz prirodnih izvora zračenja.
- Poreklo prirodnih izvora:
 - 1) sekundarno kosmičko zračenje,
 - 2) zračenje iz zemljine kore – terestrijalno zračenje,
 - 3) radioizotopi prisutni u hrani i piću.
- Prirodni izvori zračenja prisutni su u vazduhu, vodi, hrani i piću, u građevinskim materijalima, u proizvodima široke potrošnje itd.

➤ VEŠTAČKI IZVORI (MAN-MADE SOURCES)

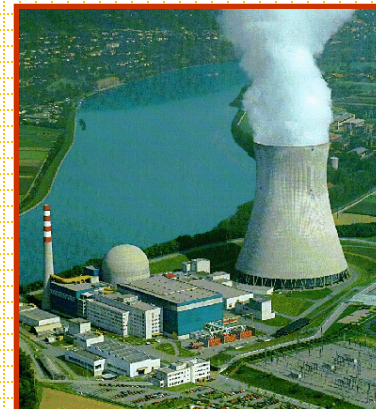
MEDICINA



INDUSTRIJA



NUKLEARNE ELEKTRANE



ORUŽJE

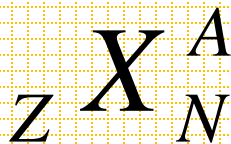




TERESTRIJALNO ZRAČENJE: ZEMLJIŠTE

- Radioaktivni izotopi prisutni su svuda u prirodi: u zemlji, stenama, vodi, vazduhu i vegetaciji.
- **Uranijum**, **torijum** i kalijum: prisutni su još iz perioda stvaranja Zemlje – primordijalni izotopi.
- Mesta na površini Zemlje sa najvišim vrednostima terestrijalnog zračenja: Posos de Holdas (Brazil), Ramsar (Iran), Kerala (Indija). Zemljište je u ovim oblastima bogato torijumom.

Izotopski sastav hemijskog elementa



X – Hemijski simbol elementa

Z – Redni ili atomski broj (broj protona u jezgru)

A – Maseni broj (broj protona + broj neutrona)

N – Broj neutrona u jezgru

- Hemijski element predstavlja smešu svojih izotopa.
- Abundacija – procentualni udeo u izotopa u smeši koja čini hemijski element.
- Izotopi: stabilni i radioaktivni.

URANIJUM

- Hemijski simbol **U**.
- Slabo radioaktivni **metal**.
- Rasprostranjeniji **500** puta više od **zlata** i **40** puta više od **srebra**, rasprostranjen je kao kalaj, volfram i molibden.
- Vreme poluraspada **4,468 milijardi godina** što je otprilike i starost planete Zemlje (za izotop U-238).
- Prirodni uranijum ima **3 izotopa**: **U-238** (udeo **99,275%**), **U-235** (udeo **0,720%**) i **U-234** (udeo **0,005%**).
- U-235 je **fisilni** tj. može da održi lančanu reakciju **fisije** čime se oslobađa **velika količina energije**.



PRIRODNI IZOTOPI URANIJUMA

<p>234 U</p> <p>234.04094 $t_{1/2}=246,000$ yrs 0.0055%</p> <p>Radioactive</p>	<p>235 U</p> <p>235.04392 $t_{1/2}=704$ million yrs 0.720%</p> <p>Radioactive</p>	<p>238 U</p> <p>238.05078 $t_{1/2}=447$ billion yrs 99.2745%</p> <p>Radioactive</p>
--	---	---

Obogaćeni uranijum: $U-235 > 0,72\%$

Osiromašeni uranijum: $U-235 < 0,72\%$

TERESTRIJALNO ZRAČENJE: 3 RADIOAKTIVNA NIZA

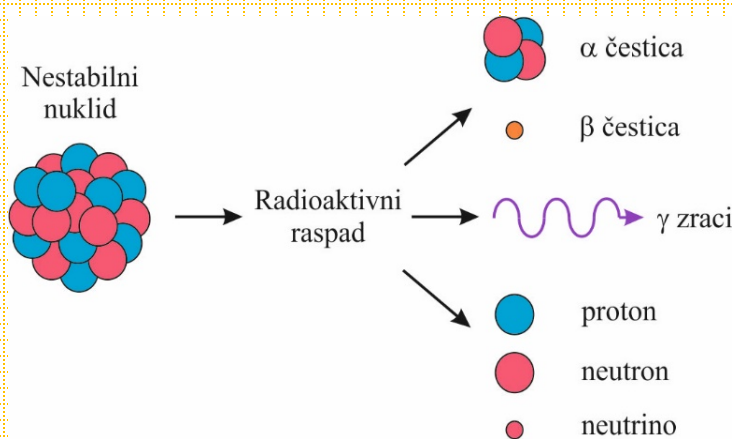
U-238 → Th-234 → Pa-234 → U-234 → Th-230 → Ra-226 → Rn-222 → ... → **Pb-206**

U-235 → Th-231 → Pa-231 → Ac-227 → ... → **Pb-207**

Th-232 → Ra-228 → Ac-228 → Th-228 → ... → **Pb-208**

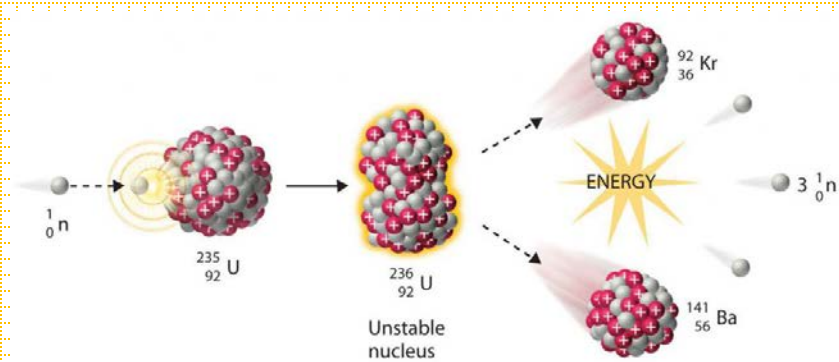
RADIOAKTIVNOST

- Spontana transformacija jezgra atoma i prelazak u drugi hemijski element, praćena emisijom čestica, sa ili bez pratećeg elektromagnetnog zračenja.



FISIJA

- Karakteristična je za teška jezgra.
- Energija uneta u jezgro (nuklearnom reakcijom) remeti ravnotežu sila koje deluju unutar jezgra što dovodi do deformacije jezgra.
- Kod teških jezgara sa velikim brojem protona i jakim odbojnim silama, deformacija jezgra može dovesti do **cepanja jezgra** na dva dela, tj. do fisije.



ENERGIJA VEZE PO NUKLEONU

Afinitet ka fuziji ili fisiji

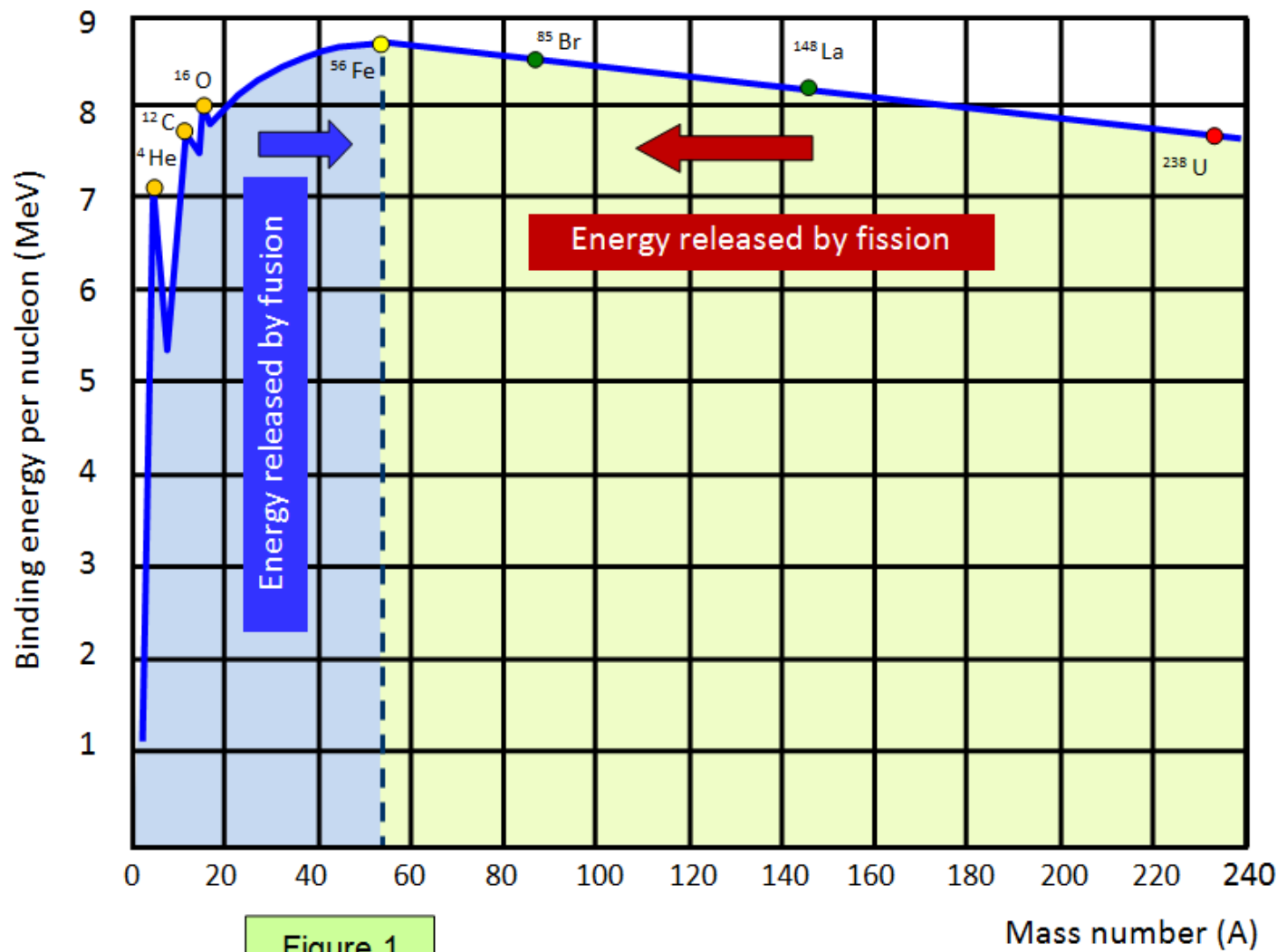


Figure 1

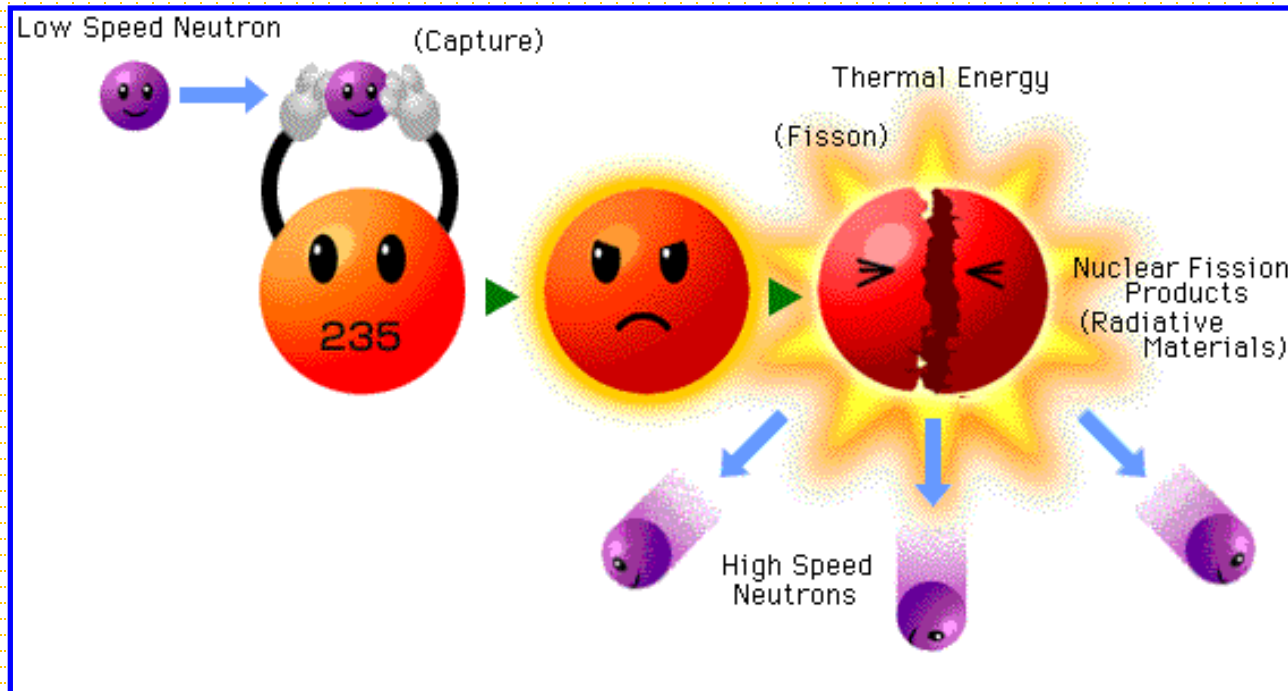
FISIJA

- Jezgro U-235 može da „zahvati” neutron niske energije tj. **termički neutron**, čime se formira novo jezgro koje se deli na **2 dela** pri čemu se oslobađaju **2-3 nova neutrona** i **energija u vidu toplote**.
- Ako novonastali neutroni izazovu fisije drugih atoma U-235 doći će do **lančane reakcije** kojom se iz male količine uranijuma može dobiti **velika količina toplote**.
- Ako neutron interaguje sa atomom **U-238**, on indirektno može postati **Pu-239**, koji je kao i U-235 fisilni.

FISIJA

- Spontana i izazvana fisija
- **Fisilni izotopi (jezgra sa neparnim masenim brojem)**: fisija je izazvana sporim neutronima. Za pokretanje fisije dovoljna je samo energija veze apsorbovanog neutrona; bez dodavanja kinetičke energije neutronu.
- Prirodni fisilni izotop: **U-235**
- Veštački fisilni izotopi: U-233, Pu-239, Pu-241
- **Fisibilni izotopi (jezgra sa parnim masenim brojem)**: fisija može biti izazvana, postoji donji prag kinetičke energije neutrona. Primer fisibilnog materijala je U-238. Bombardovanjem U-238 onima nastaje fisilni izotop Pu-239.
- Svaki fisilni izotop je ujedno i fisibini, a obrnuto ne važi.
- Fisioni produkti i neutroni

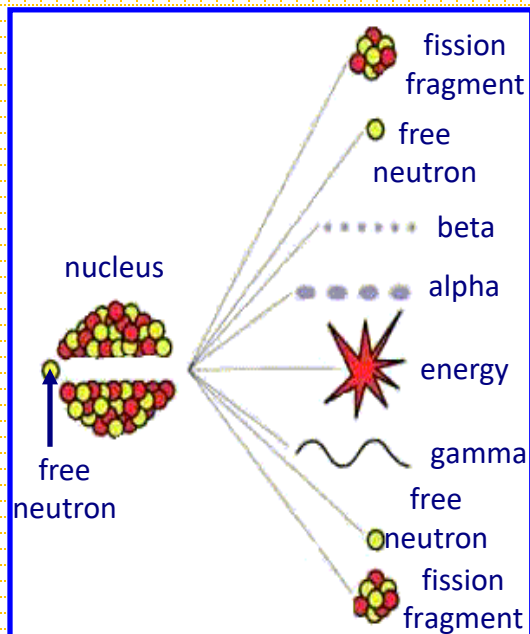
Proces fisije



Energija dobijena fisijom U-235 iznosi oko 200 MeV i raspoređuje se na produkte nastale u ovom procesu.

Proces fisije

- Energija koju možemo iskoristiti u nuklearnom reaktoru, manja je od oslobođene energije.



	Generisana energija [MeV]	Iskorišćena energija [MeV]
Fisioni fragmenti	168	168
Beta čestice	8	8
Gama zraci	7	7
Neutrino	12	-
Promptni gama zraci	7	7
Kinetička energija fisionih neutrona	5	5
Ukupno	207	195

Dve glavne karakteristike fisije za praktičnu primenu su:

- Oslobođanje velike količine energije tokom fisije;
- Samoodrživost nuklearnog procesa – lančana reakcija.

Proces fisije

- Energija dobijena fisijom U-235 iznosi oko 200 MeV (1 eV = 1.6×10^{-19} J). Koliku energiju oslobodi 1 gram U-235 dnevno?

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{1 \text{ g}}{235 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} = 2,56 \cdot 10^{21}$$

$$\text{Idealno: } E = N \cdot E_f \cdot 1 \text{ dan} = 2,56 \cdot 10^{21} \cdot 200 \text{ MeV} \cdot 1 \text{ dan} = 955,8 \text{ kWd}$$

$$\text{Realno: } E = N \cdot E_f \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} \cdot 1 \text{ dan} = 2,56 \cdot 10^{21} \cdot 200 \text{ MeV} \cdot 0,855 \cdot 1 \text{ dan} = 800 \text{ kWd} = 19200 \text{ kWh}$$

 gubici usled apsorpcije neutrona u drugoj vrsti interakcije

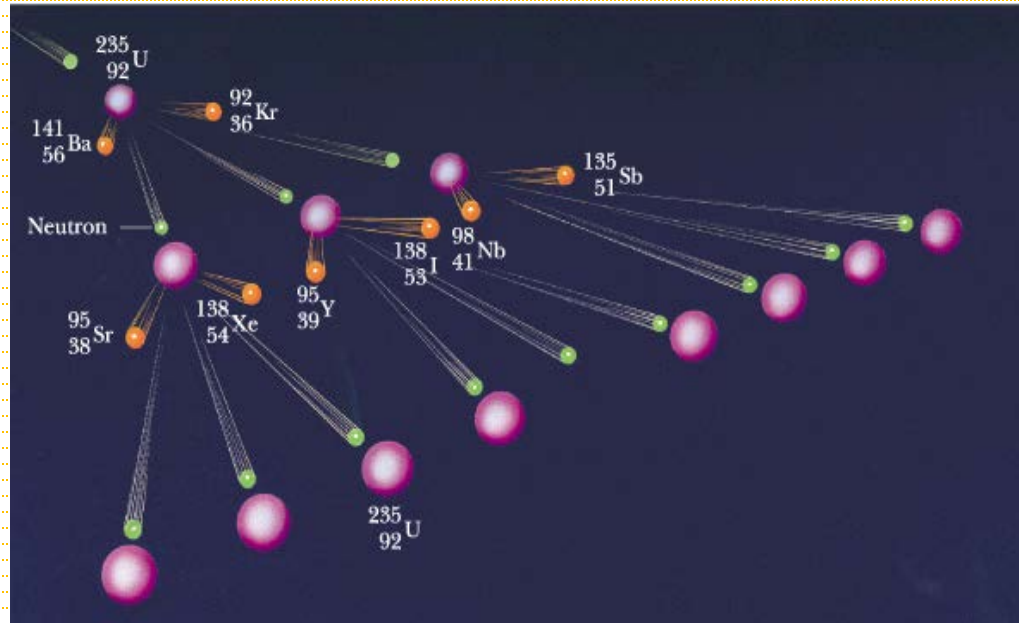
- Nuklearna reakcija fisije je, osim kod izotopa uranijuma i plutonijuma, ostvarena i kod atoma drugih elemenata (bizmut, olovo, platina, zlato).
- Kod tih nuklida je nemoguće ostaviti samoodrživu lančanu reakciju, pa oni nisu od značaja za nuklearnu energetiku.

Fisioni fragmenti i neutroni

- Jedna od najvažnijih karakteristika fisionih fragmenata je njihova radioaktivnost.
- Zbog relaksacije, fisioni fragmenti emituju beta čestice i gama zrake zbog čega se i nakon gašenja reaktora generiše snaga.
- Fisioni neutroni: promptni i zakasneli

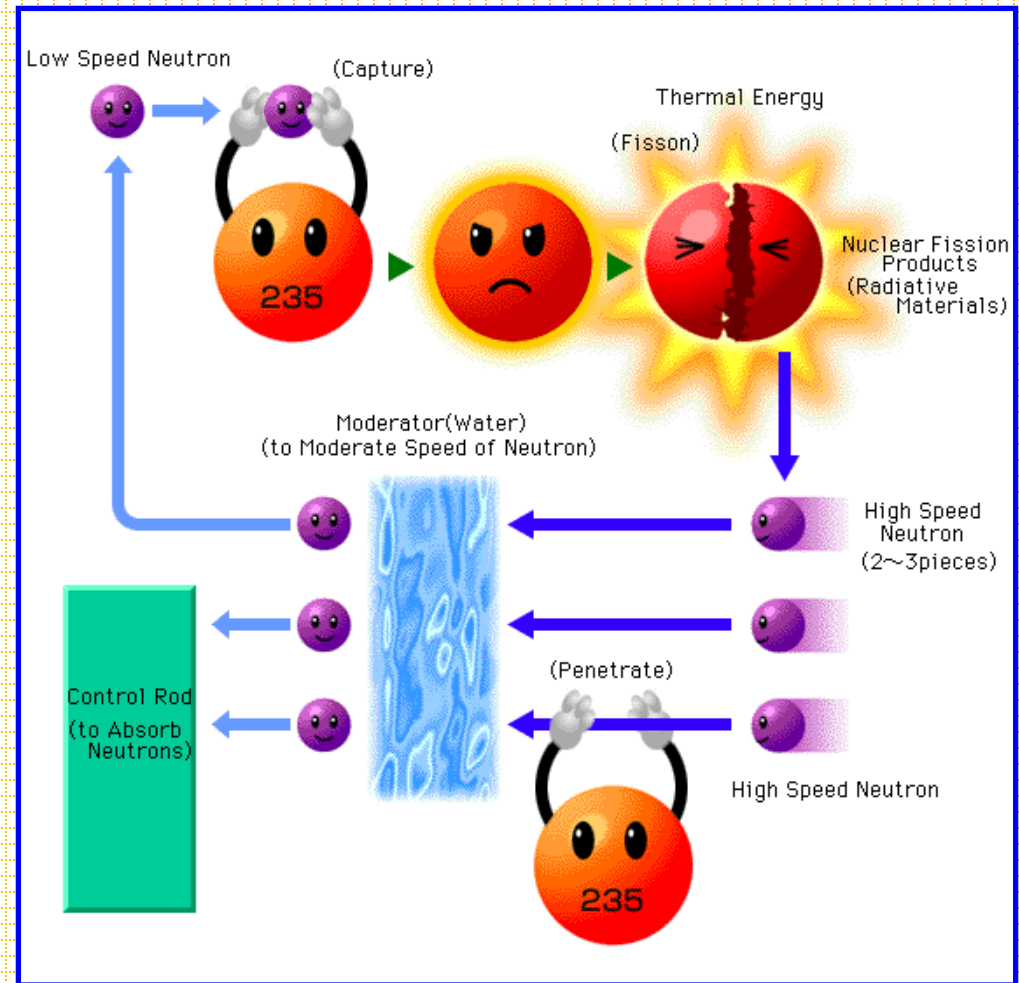
Lančana reakcija

- Mogućnost da se fisioni neutroni iskoriste za izazivanje daljih fisija i da se na taj način proces nastavi bez unošenja dodatnih neutrona u nuklearno gorivo.



Nuklearni reaktor

- Uređaj u kome su ostvareni uslovi za samoodrživu lančanu reakciju.
- Mogućnost kontrole lančane reakcije.
- Reaktorsko jezgro, nuklearno gorivo, moderator i kontrolne (regulacione) šipke.
- Oplodni materijal (materijal u kojem pri nuklearnoj reakciji nastaje neki fisibilni materijal) → konverzija nuklearnog goriva.



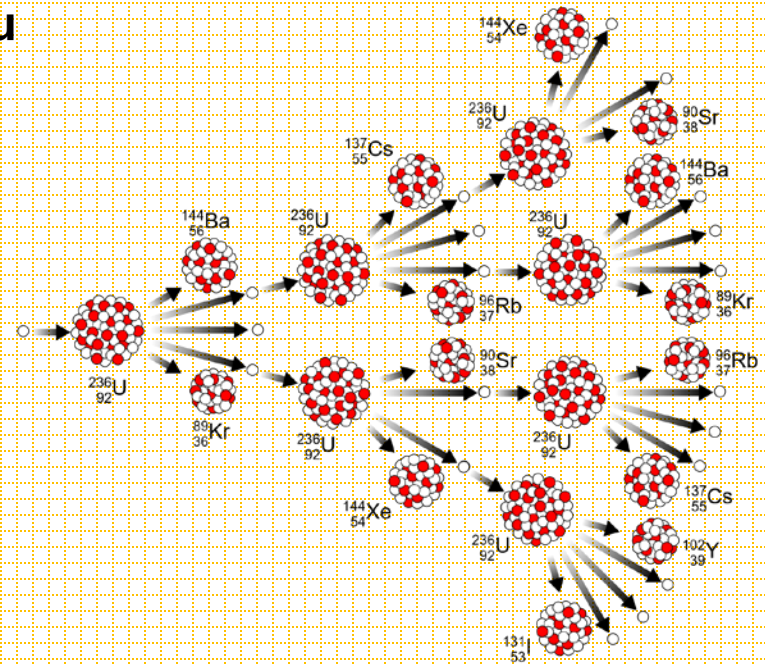
Nuklearni reaktor

- 2 do 3 neutrona po fisiji U-235 – brzi neutroni, moraju se usporiti da bi se povećala verovatnoća za odvijanje procesa fisije.
- Nefisibilni gubici neutrona u materijalu.
- Stvarno umnožavanje neutrona se opisuje faktorom k :
faktor umnožavanja neutrona u reaktoru

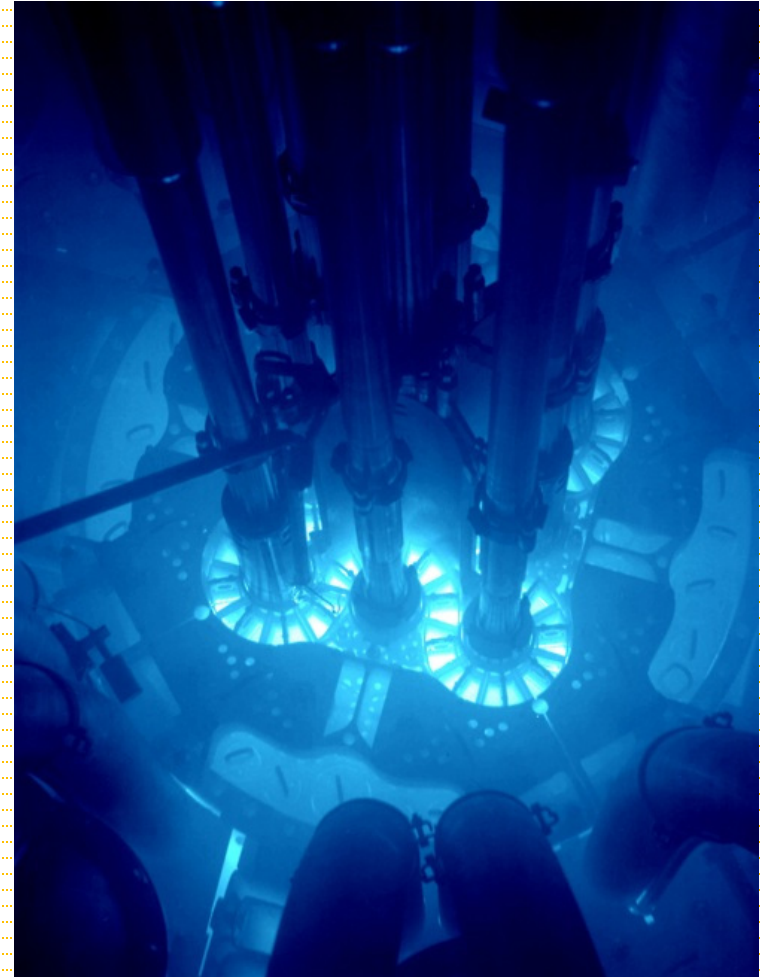
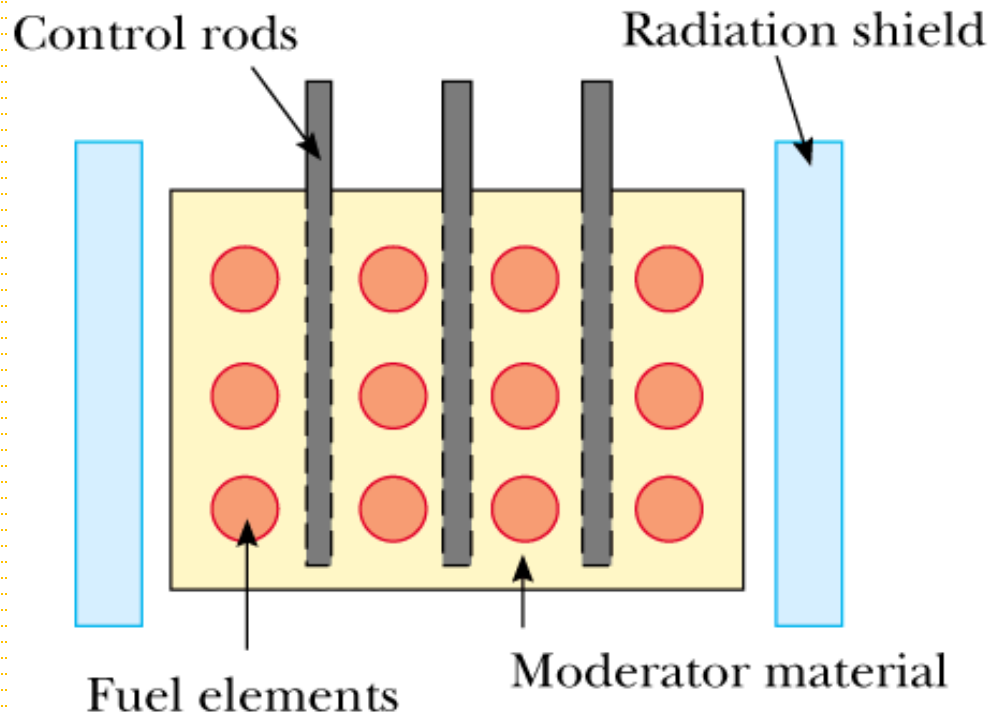
$$k = \frac{\text{br. neutrona u jednom ciklusu}}{\text{br. neutrona u prethodnom ciklusu}}$$

Ako je:

- $k < 1$ – reaktor u podkritičnom stanju (smanjenje snage reaktora)
- $k = 1$ – reaktor u kritičnom stanju (održavanje konstantne snage)
- $k > 1$ – reaktor u nadkritičnom stanju (povećanje snage reaktora)

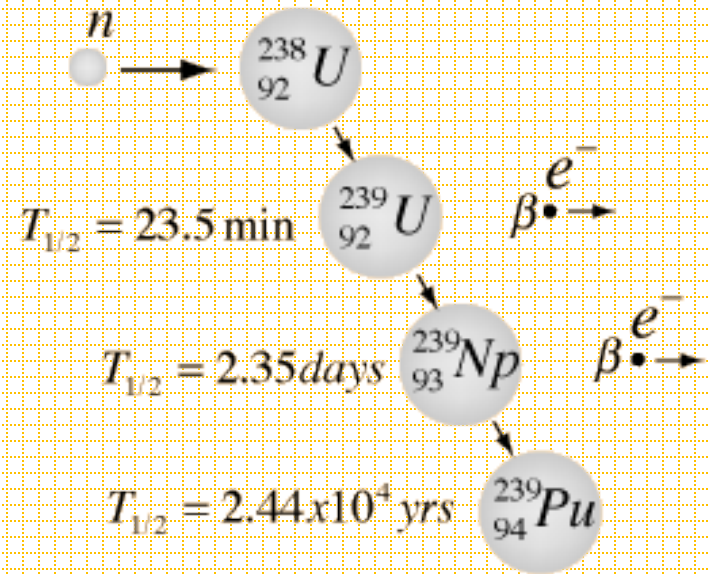


Nuklearni reaktor

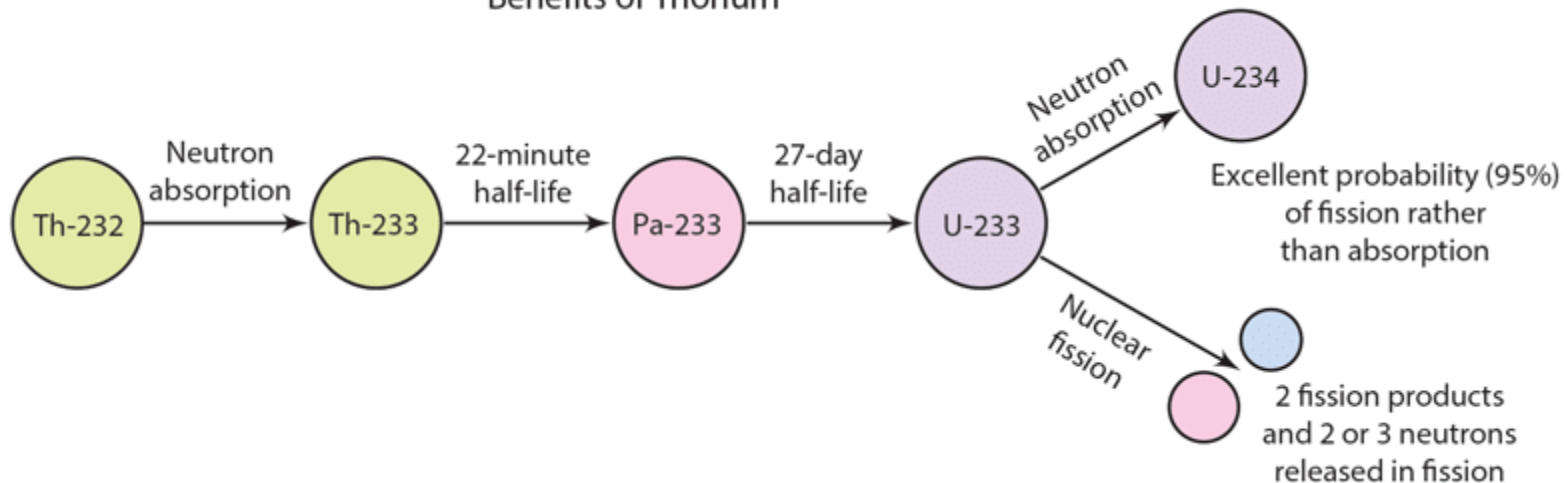


Primer konverzije nuklearnog goriva

- U-238 (n,gama) U-239
U-239 → Np-239 → **Pu-239**
- Th-232 (n,gama) Th-233
Th-233 → Pa-233 → **U-233**



Benefits of Thorium



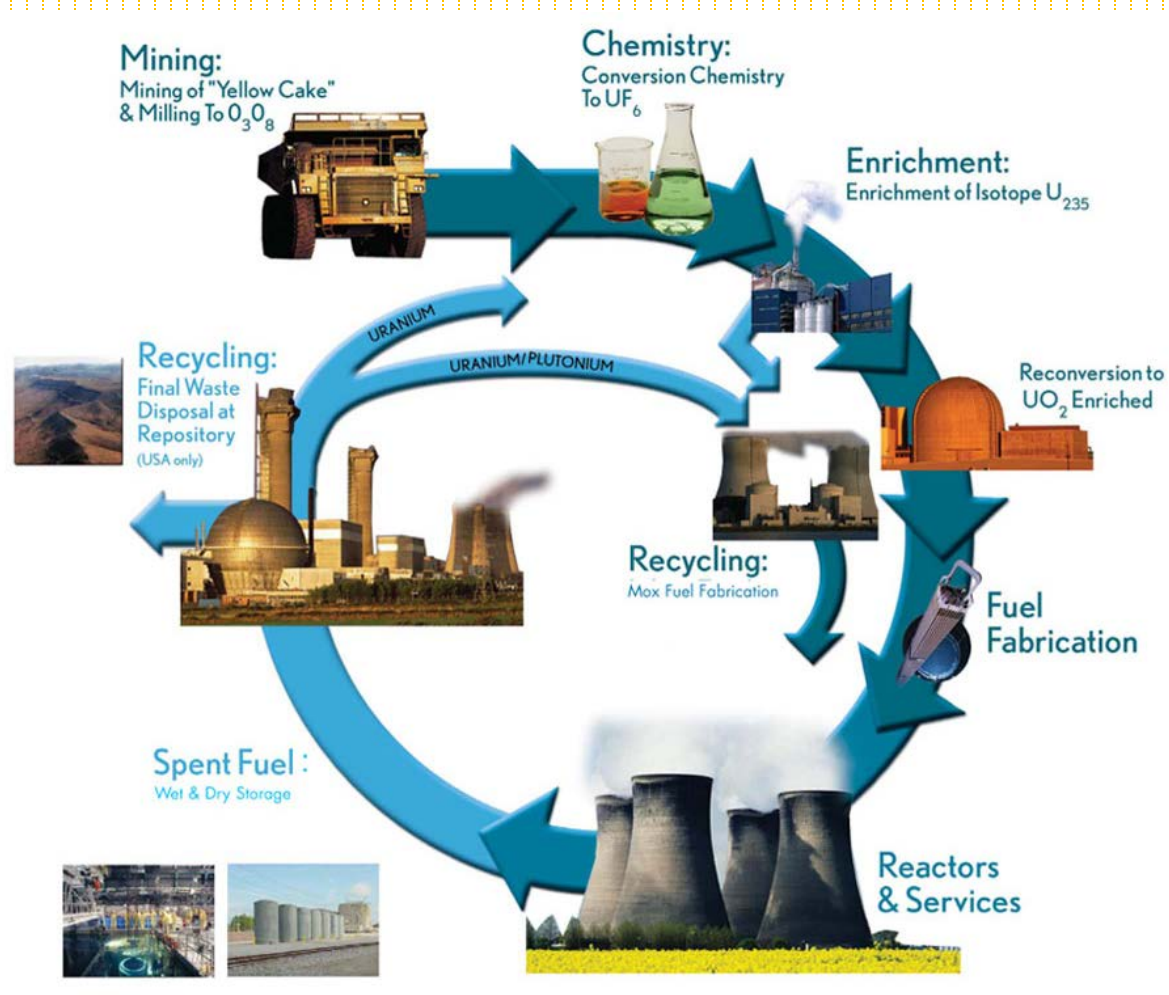
Faktor konverzije

- $C = \frac{\text{br. novostvorenih fisibilnih jezgara konverzijom}}{\text{br. utrošenih fisibilnih jezgara}}$
- $C < 1$ – konvertor
- $C > 1$ – oplodni reaktor ili “breeder”

Ciklus nuklearnog goriva

- Ciklus ili lanac nuklearnog goriva predstavlja tok nuklearnog goriva kroz različite faze njegove eksploatacije. Ciklus počinje iskopavanjem uranijuma a završava se odlaganjem nuklearnog otpada. Ciklus nuklearnog goriva se generalno može podeliti u **3 dela**:
 - **prednji kraj ciklusa** koji predstavlja **pripremu uranijuma za upotrebu u nuklearnom reaktoru** što obuhvata iskopavanje uranijumske rude, mlevenje, konverziju, obogaćivanje uranijuma i proizvodnju gorivnih šipki,
 - **faza korišćenja uranijuma (izgaranje goriva)** za dobijanje električne energije u nuklearnim elektranama,
 - **zadnji kraj ciklusa** koji obuhvata privremeno **skladištenje** iskorišćenog (istrošenog) goriva, njegovu ponovnu preradu i korišćenje i smeštanje iskorišćenog goriva u vidu radioaktivnog otpada u trajna **odlagališta**.

Ciklus nuklearnog goriva



Rezerve uranijuma

- Trenutna **potrošnja** uranijuma je oko **66500 tona godišnje**.
- Pretpostavlja se da postoje rezerve uranijuma dovoljne za narednih **200 godina**.
- Rude sa sadržajem manjim od **1000 ppm** su dovoljno bogate da njihova eksploatacija bude ekonomična, a ta granica se stalno **smanjuje**.
- **Australija** ima najveće rezerve uranijuma, a nakon nje slede **Kazahstan, Kanada i Rusija**.
- Reaktori 4. generacije će imati veće iskorišćenje, pa se pretpostavlja da će rezerve trajati duže.
- Alternativa uranijumskom gorivu – torijum 232.

Količina rezervi uranijuma država i njihov udeo u svetskim rezervama
 Izvor OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), NEA (*Nuclear Energy Agency*) i IAEA (*International Atomic Energy Agency*), 2019.

Država	Tona uranijuma	Udeo svetskih rezervi
Australia	1,692,700	28%
Kazakhstan	906,800	15%
Canada	564,900	9%
Russia	486,000	8%
Namibia	448,300	7%
South Africa	320,900	5%
Brazil	276,800	5%
Niger	276,400	4%
China	248,900	4%
Mongolia	143,500	2%
Uzbekistan	132,300	2%
Ukraine	108,700	2%
Botswana	87,200	1%
Tanzania	58,200	1%
Jordan	52,500	1%
USA	47,900	1%
Other	295,800	5%
Ukupno	6,147,800	

Uranijumske rude

- Prvi korak prednjeg kraja ciklusa – iskopavanje rude.
- Za potrebe u nuklearnim reaktorima uranijum mora biti izvanredno čist, a naročito oslobođen **primesa** koje imaju visoke efikasne preseke za apsorpciju neutrona.
- Rezultat ovog procesa je **koncentrat uranijum oksida** koji se naziva „žuti kolač” kog više od **80%** čini uranijum.
- Prvo se ruda drobi i usitnjava, a zatim se potapa u **sumpornu kiselinu** kako bi se razdvojio uranijum od jalovine. Taloženjem se dobija uranijum oksid U_3O_8 .



Konverzija uranijuma

- Žuti kolač ili uranijum oksid se mora konvertovati u uranijum heksafluorid UF_6 radi obogaćivanja.
- Tokom ovog procesa dodatno se uklanjaju nečistoće.
- $U_3O_8 + 2H_2 \rightarrow 3UO_2 + 2H_2O$
- $UO_2 + 4HF \rightarrow UF_4 + 2H_2O$
- $UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6$
- Nakon toga se sipa u specijalno dizajnirane čelične cilindre u kojima se dodatno hladi i postaje bela kristalna supstanca.

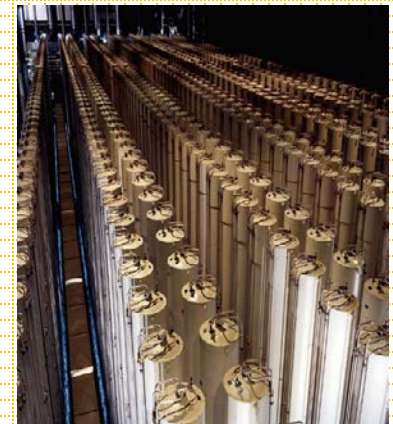
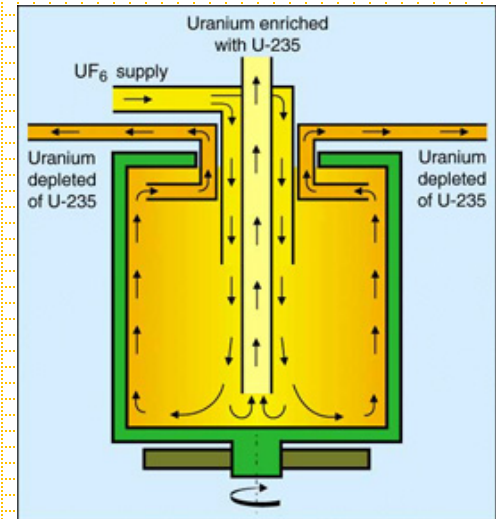
Obogaćivanje uranijuma

- Povećava se koncentraciju U-235 sa 0,7% na 3-5%.
- Nusproizvod ili otpadni produkt procesa obogaćivanja uranijuma je osiromašeni uranijum 0,25–0,30% U-235.
- Nivoi obogaćivanja uranijuma su:
 - blago obogaćeni uranijum (Slightly Enriched Uranium–SEU) gde je koncentracija U-235 od 0,9-2,0%,
 - nisko obogaćeni uranijum (Low Enriched Uranium–LEU) gde je koncentracija U-235 <20%,
 - visoko obogaćeni uranijum (Highly Enriched Uranium–HEU) gde je koncentracija U-235 >20%.
- Ne može postići hemijskim metodama, pošto se radi o atomima istog hemijskog elementa.
- Separacija izotopa vrši se fizičkim metodama baziranim uglavnom na razlici masa atoma pojedinih izotopa.
- Kod uranijuma je ta razlika mala i između U-238 i U-235 iznosi svega 1,26%.
- Za te razlike sve upotrebljive metode zahtevaju uranijum u obliku gasa. Jedini stabilniji gas uranijuma je uranijum heksafluorid UF_6 , koji je dodatno pogodan zato što fluor ima samo jedan stabilan izotop (F-19).

Metode obogaćivanja uranijuma

- Elektromagnetska separacija izotopa
- Metoda gasne difuzije
- Metoda gasne centrifuge
- Metoda laserskog razdvajanja izotopa

- Metoda gasne centrifuge
- Koriste se **gasne centrifuge** koje zapravo predstavljaju kućišta u kojima se nalazi cilindrični rotor koji rotira **velikom brzinom**.
- Zahvaljujući maloj razlici u **molekularnoj težini** moguće je razdvojiti gas UF_6 sa U-235 od gasa UF_6 sa U-238.
- Usled **centrifugalne sile** teži molekuli U-238 se približavaju zidu rotora, čime dolazi do delimične separacije U-238 i U-235.

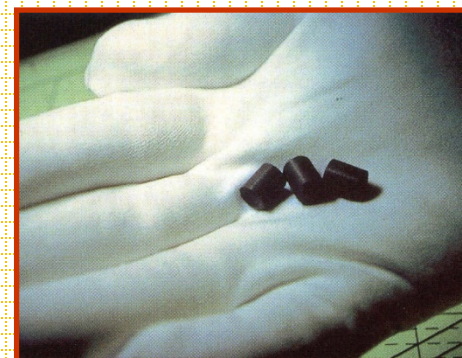
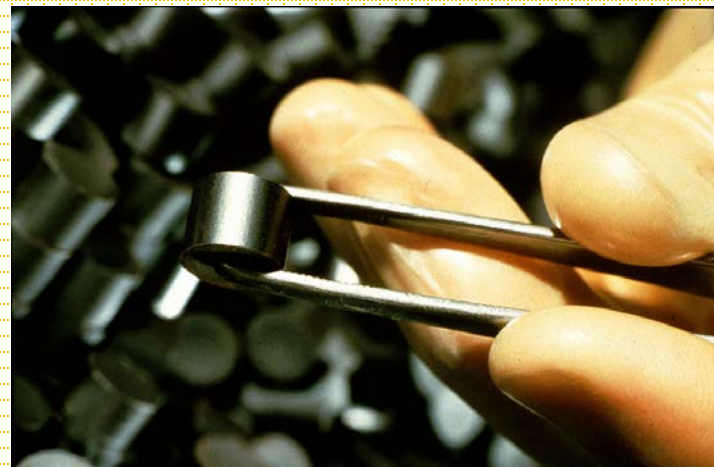


Koristi **kaskadni metod** kako bi se postigao željeni stepen obogaćenja.

Stepen obogaćenja uranijuma u jednoj centrifugi zavisi od **dužine rotora** i **brzine rotacije**.

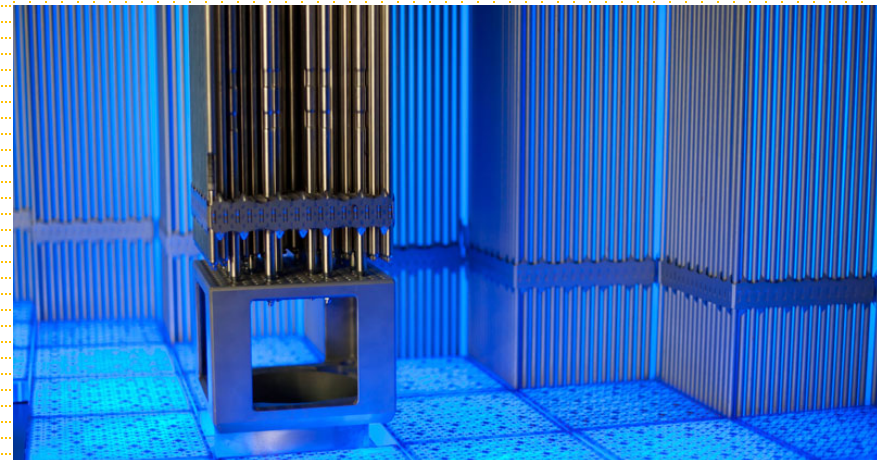
Proizvodnja gorivnih šipki

- Rekonverzija UF_6 u UO_2 prah,
- Proizvodnja tableta od UO_2 praha,
- Formiranje gorivnih šipki od tableta,
- Izgradnja sklopova gorivnih šipki.
- Prach uranijum dioksida se sabija u cilindričnu formu i sinteruje se na visokim temperaturama kako bi se dobile gorivne tablete visoke gustine, dobro definisanih fizičkih svojstava i hemijskog sastava.
- Proces mlevenja se koristi kako bi se postigla uniformna cilindrična geometrija.
- Tablete su tipično dimenzija: oko 1,25 cm dužine i oko 0,8 cm u prečniku.



NUKLEARNO GORIVO

- Takve tablete se zatim **redno ređaju u metalne cevi (košuljice)**.
- Metal koji se koristi u te svrhe zavisi od tipa reaktora.
- Nerđajući čelik je ranije korišćen, a danas se najviše koriste **legure cirkonijuma** jer su veoma **otporne na koroziju** i imaju **veoma male efikasne preseke za apsorpciju neutrona**.
- Metalne cevi sa tabletama se zatvaraju čime se dobijaju **gorivne šipke**.
- **Gorivni element** se formira od više gorivnih šipki koje se postavljaju u odgovarajućoj geometriji.



Nuklearni reaktori u nuklearnoj energetici



Klasifikacija nuklearnih reaktora

Prema nameni

- za proizvodnju plutonijuma
- za pogon brodova, podmornica raketa i satelita
- za medicinske svrhe
- za istraživanja
- za proizvodnju električne energije

Prema vrsti nuklearne reakcije

- **Fisione** nuklearne reaktore
 - **Termički**
 - Brzi
- Fuzione nuklearne reaktore



Termički fisioni reaktori

- Reaktorsko jezgro
 - Nuklearno gorivo (najčešće uranijum; može biti i torijum)
 - Moderator (najčešće voda)
- Hladilac (najčešće voda)
- Reaktorski sud (za održavanje konstantnog pritiska)
- Radijacioni štit (biološki štit)

Na osnovu materijala **moderatora** termalni reaktori se mogu podeliti na one koji su moderisani:

- Grafitom
- Vodom
 - Lakom vodom
 - Teškom vodom
- Lakim elementima (solima Li ili Be, tečnim metalima)
- Organskim jedinjenjima (Bifenil, terfenil)

Termički fisioni reaktori

Na osnovu materijala korišćenog za **hlađenje**, termalni reaktori se mogu podeliti na one koji koriste:

- Vodu pod pritiskom
 - **PWR** – pressurized water reactors – Reaktori hlađeni vodom pod pritiskom
 - **PHWR** – pressurized heavy water reactors - Reaktori hlađeni teškom vodom pod pritiskom
- Ključajuću vodu
 - **BWR** – boiling water reactors – Reaktori sa ključajućom vodom
- Gas
 - **GCR** – gas cooled reactors – Gasom hlađeni reaktori

Kada se govori o **tipu reaktora**, najčešće se koristi kombinacija materijala za moderaciju i hlađenje.

- Reaktori hlađeni i moderisani vodom
- Reaktori hlađeni vodom, moderisani grafitom
- Reaktori hlađeni gasom, moderisani grafitom

Termički fisioni reaktori

Poneki reaktori imaju specifične nazive, kao na primer

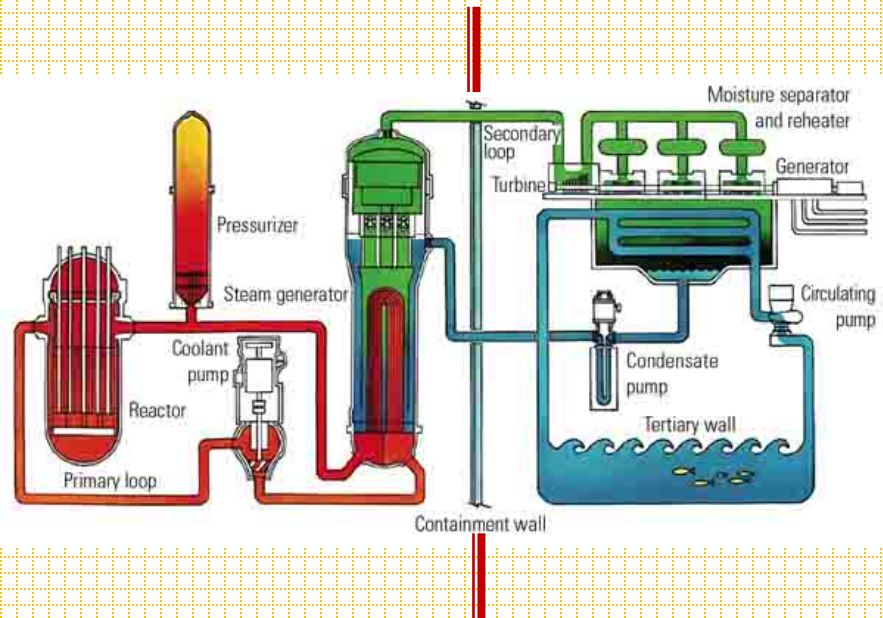
- CANDU
 - *CANada Deuterium Uranium reactor*
 - reaktor moderisan i hlađen teškom vodom
 - PHWR
- RBMK
 - *Reaktor bolshoy moshchnosty kanalny*
 - „Reaktor velike snage kanalnog tipa“
 - reaktor hlađen vodom i moderisan grafitom
 - LWGR

Broj reaktora u svetu po tipovima (2021)

Reactor type	Main countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurised water reactor (PWR)	USA, France, Japan, Russia, China, South Korea	302	287.0	enriched UO ₂	water	water
Boiling water reactor (BWR)	USA, Japan, Sweden	63	64.1	enriched UO ₂	water	water
Pressurised heavy water reactor (PHWR)	Canada, India	49	24.5	natural UO ₂	heavy water	heavy water
Advanced gas-cooled reactor (AGR)	UK	14	7.7	natural U (metal), enriched UO ₂	CO ₂	graphite
Light water graphite reactor (LWGR)	Russia	12	8.4	enriched UO ₂	water	graphite
Fast neutron reactor (FBR)	Russia	2	1.4	PuO ₂ and UO ₂	liquid sodium	none
TOTAL		442	393			

PWR reaktor - Primarni prsten

- Nuklearna elektrana sa PWR reaktorom sastoji se od dva izdvojena dela.
- Prvi deo, takozvano "nuklearno ostrvo" sadrži reaktor i primarni prsten, koji sadrže radioaktivnost i koji su od ostatka elektrane izdvojeni betonskim zidom (containment) koji štiti okruženje od zračenja.
- Unutar ovog containment-a takođe se nalaze i razni pomoćni i sigurnosni sistemi.
- „Nuklearno ostrvo“ snabdeva ostatak sistema vodenom parom, pa se još naziva i Nuclear Steam Supply System (NSSS).



- Centralna komponenta reaktorskog sistema je dobro izolovan reaktorski sud koji sadrži nuklearno jezgro i kontrolne šipke.
- Reaktorski sud je cilindričnog oblika sa polusfernim dnom i rasklopivom glavom na vrhu za pristup reaktorskom jezgru. Napravljen je od čelika i presvučen nerđajućim čelikom da bi se sprečila korozija.

PWR reaktor - gorivo

- Nekoliko procenata obogaćen uranijum
- Tablete (peleti, briketi) obogaćenog UO_2
- Gorivne šipke (Zircaloy) ~ 3 - 4 m
- Gorivni element (*Fuel assembly*) – 200-300 šipki
- 150-200 gorivnih elementata u reaktoru
- Zamena goriva na 18 - 24 meseca, najčešće 1/3 gorivnih elemenata.
- Nuklearno jezgro sadrži nekoliko skupova gorivnih elemenata koji su raspoređeni tako da bi se postigle optimalne performanse reaktora.
- Ovi skupovi su mehanički identični, ali se razlikuju po stepenu obogaćivanja uranijuma.
- Gorivni elementi sa najvećim stepenom obogaćenjem postavljaju se periferno u jezgru reaktora, a oni sa nižim stepenom obogaćenja postavljaju se centralno.



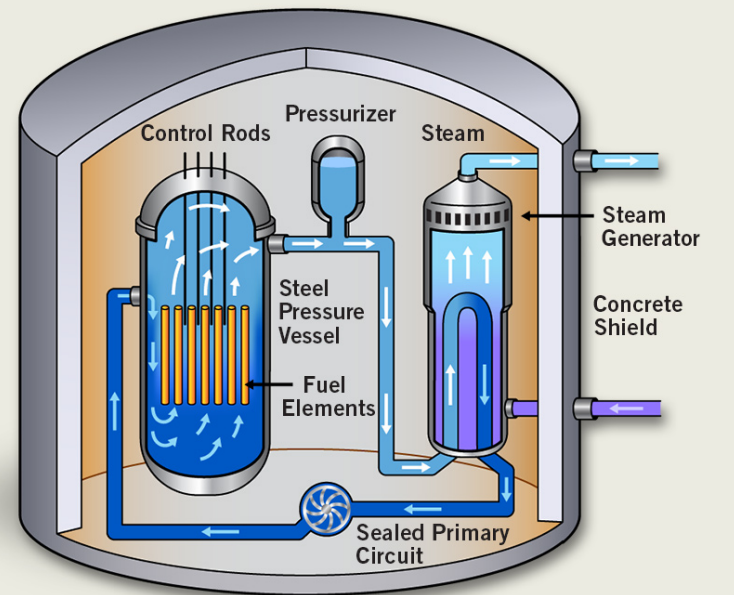
PWR reaktor - Kontrola lančane reakcije

- Za kontrolu lančane reakcije reaktora koriste se **kontrolne šipke** sačinjene od materijala koji ima veliki efikasni presek za apsorpciju neutrona.
- Ove šipke kreću se unutar i van reaktorskog jezgra putem linijskih cevi i pokreću se mehanizmom smeštenim na glavi reaktorskog suda.
- Ovaj mehanizam omogućava da kontrolne šipke, u slučaju potrebe, naglo upadnu u jezgro reaktora usled gravitacije, i brzo „isključe“ reaktor.



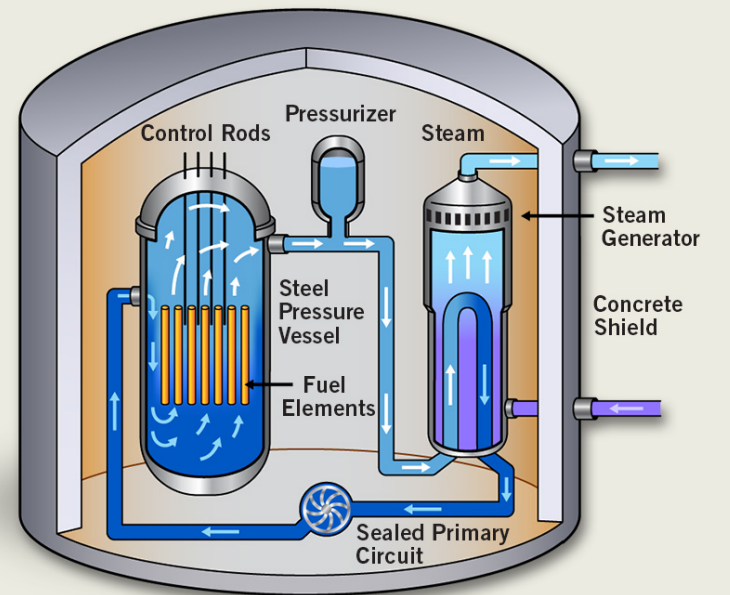
PWR reaktor - Primarni prsten

- Primarni prsten, sastoji se od reaktorskog jezgra, gde se energija fisije pretvara u toplotnu energiju u moderatoru/rashladnoj tečnosti (vodi), i kruga te tečnosti na visokoj temperaturi (275 °C - 315°C) i pritisku (15 MPa).
- Rashladna tečnost se upumpava u generator vodene pare, gde se toplota prenosi u sekundarni prsten, putem cevi "U" oblika.
- Tečnost iz ova dva prstena potpuno je fizički odvojena, i među njima dolazi samo do razmene toplote.
- Rashlađena tečnost iz generatora pare vraća se u reaktor, gde se ponovo zagreva.



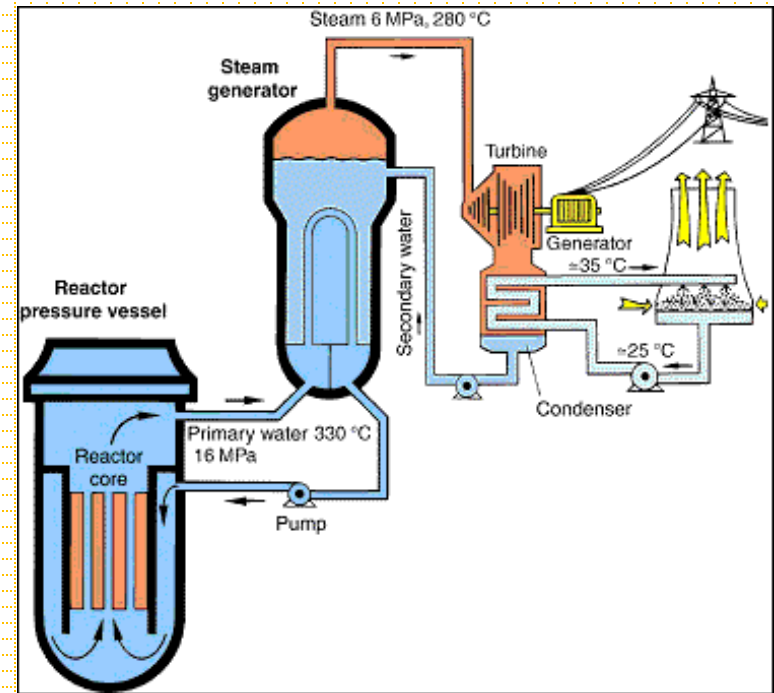
PWR reaktor - Primarni prsten

- Veoma važan element ovog prstena je uređaj za održavanje pritiska (**pressurizer**).
- Ovaj uređaj održava visok pritisak u primarnom ciklusu i **sprečava da dođe do ključanja vode** u njemu.
- Budući da je voda praktično nestišljiva, i najmanja promena zapremine rashladne tečnosti dovela bi do naglog pada pritiska i ključanja vode, što bi moglo da prouzrokuje preveliko sagorevanje nuklearnog goriva.



PWR reaktor - Sekundarni prsten

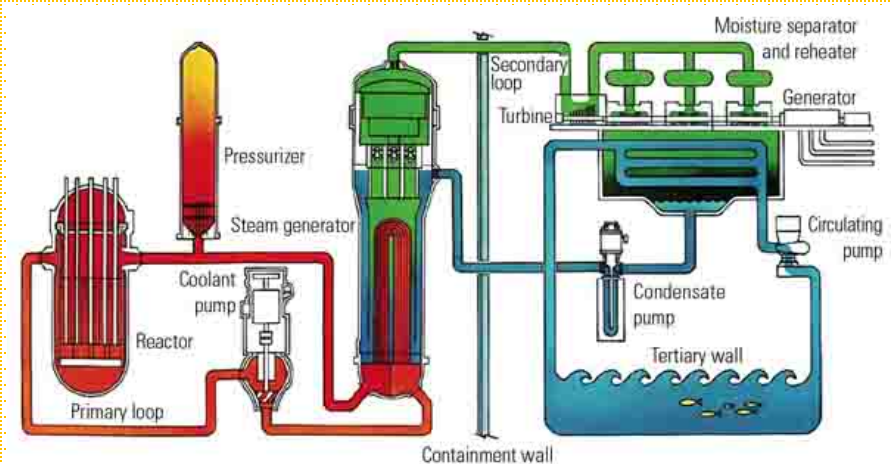
- Niži pritisak
- Ključanje vode
- Vrela radioaktivna voda pod pritiskom iz nuklearnog reaktora prolazi kroz metalne "U" cevi koje se ponašaju kao grejači uronjeni u vodu sekundarnog ciklusa u generatoru pare.
- Voda u sekundarnom ciklusu se na ovaj način zagreva, i budući da je na nižem pritisku, ona ključa i proizvodi paru.
- Generator pare nalazi se unutar containment-a, a tek suva vodena para napušta ovaj izolovani deo i odvodi se do turbina generatora, gde se pretvara u mehaničku, pa u električnu energiju.



- Vodena para na kraju završava u kondenzatoru, gde se kondenzuje i predaje ostatak svoje toplotne energije rashladnom sistemu – tercijaranom prstenu. Kondenzat se pumpa nazad u generator pare da bi se ciklus nastavio.

PWR reaktor – Tercijarni prsten

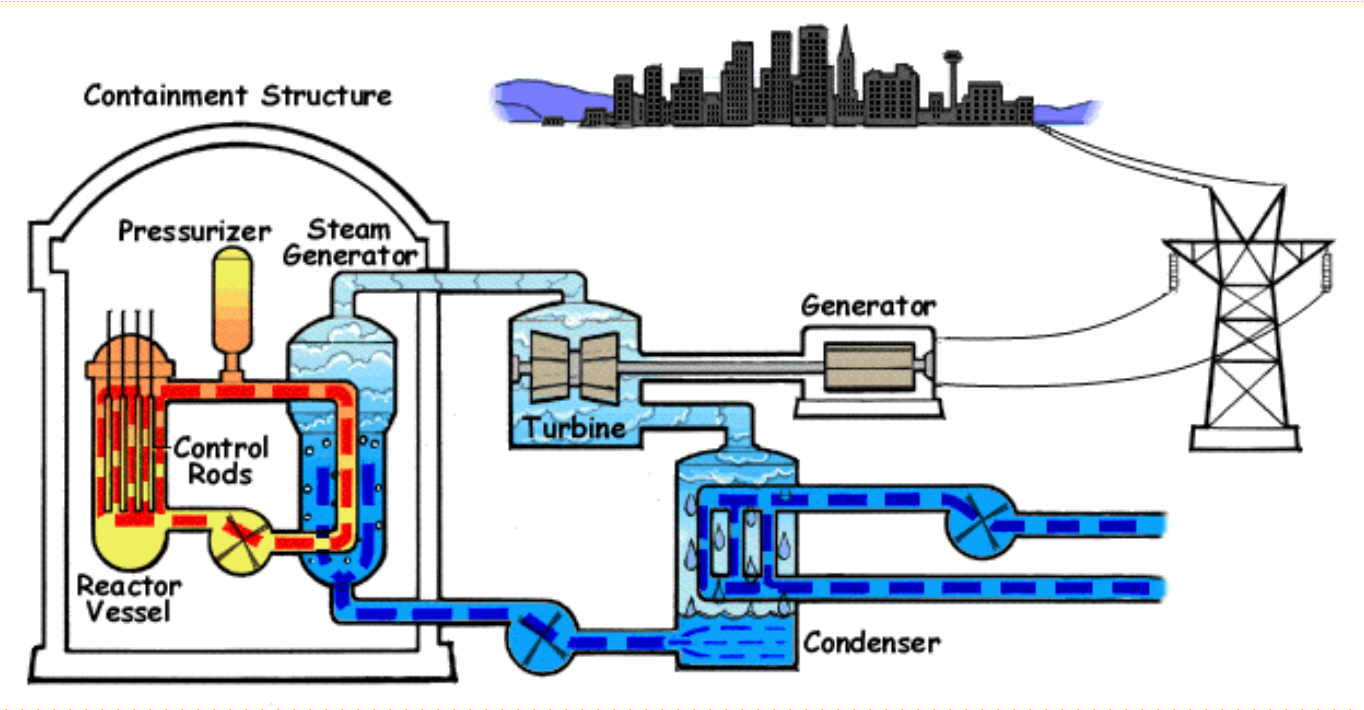
- Tercijarni prsten služi za hlađene vodene pare iz sekundarnog prstena u kondenzatoru i konačno odvođenje toplote iz sistema.
- U zavisnosti od mesta konstrukcije elektrane, hladna voda se doprema iz reka, jezera ili mora, koristi za hlađenje i tako zagrejana ispušta nazad ($\max \Delta t = 3^{\circ}\text{C}$).
- Da bi se sprečilo toplotno zagađenje vode i štetan uticaj na životnu sredinu, topla voda iz tercijarnog prstena se hladi u karakterističnim rashladnim tornjevima.



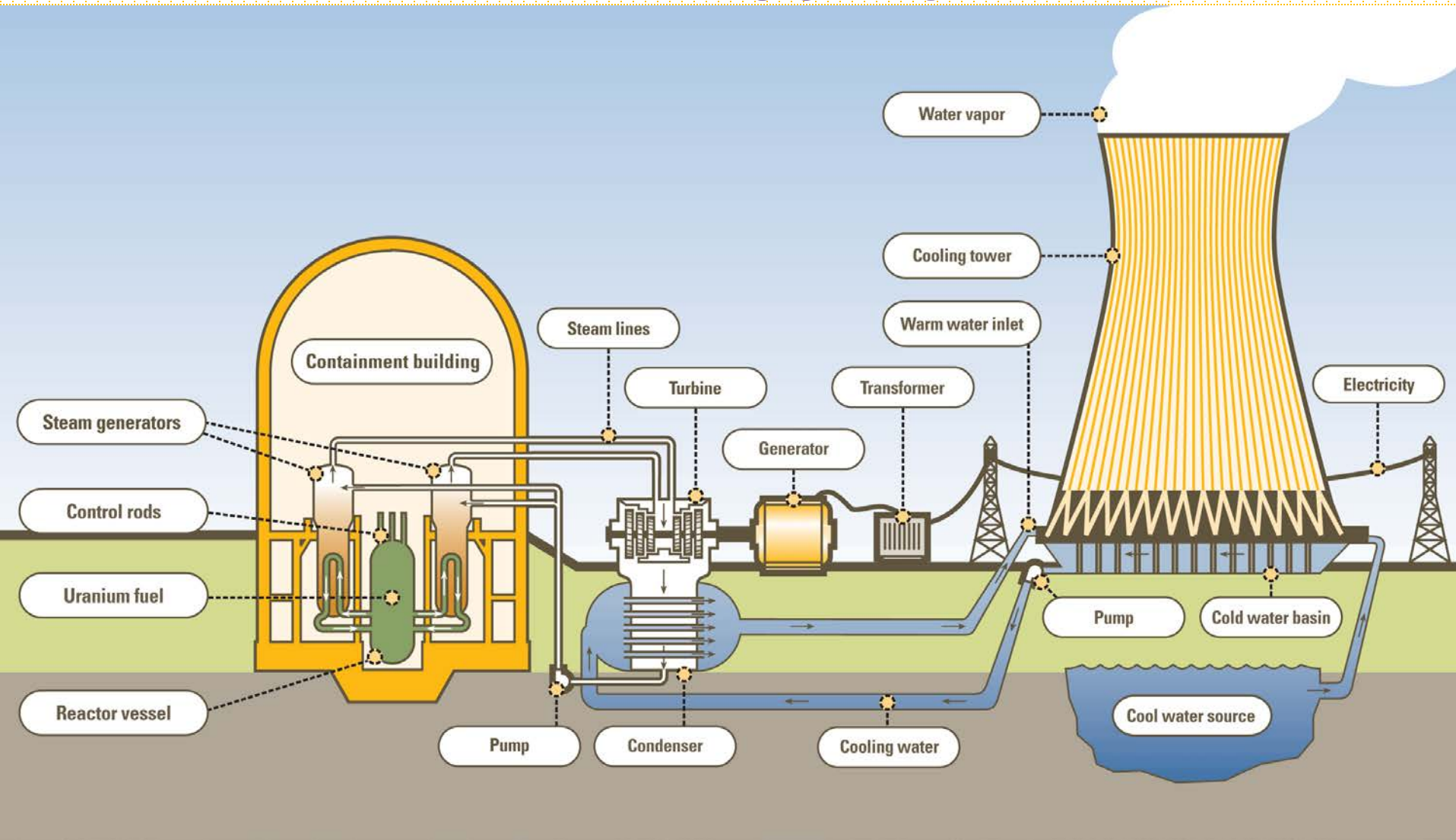
PWR - Ograničavanje radioaktivnosti

- Korišćenje fizički odvojenih sistema za moderaciju i generisanje pare praktično zadržava radioaktivne materijale unutar containment-a.
- Ovo takođe znači da turbine generatora ne dolaze u kontakt sa radioaktivnom parom, pa nije potrebno njihovo posebno održavanje.
- U pogledu bezbednosti nuklearnih elektrana sa PWR, postojala je bojazan od oštećenja reaktorskih sudova i akcidenta u vezi sa gubitkom tečnosti za hlađenje, što bi dovelo do otkrivanja gorivnih elemenata, pregrevanja i topljenja.
- Akcident na reaktoru u elektrani „Ostrvo tri milje“ (1979) pokazao je da u slučaju topljenja jezgra PWR reaktora radioaktivni materijal jezgra najvećim delom ostaje unutar containment zgrade, pa je ispuštanje radioaktivnosti u okruženje bilo veoma ograničeno.

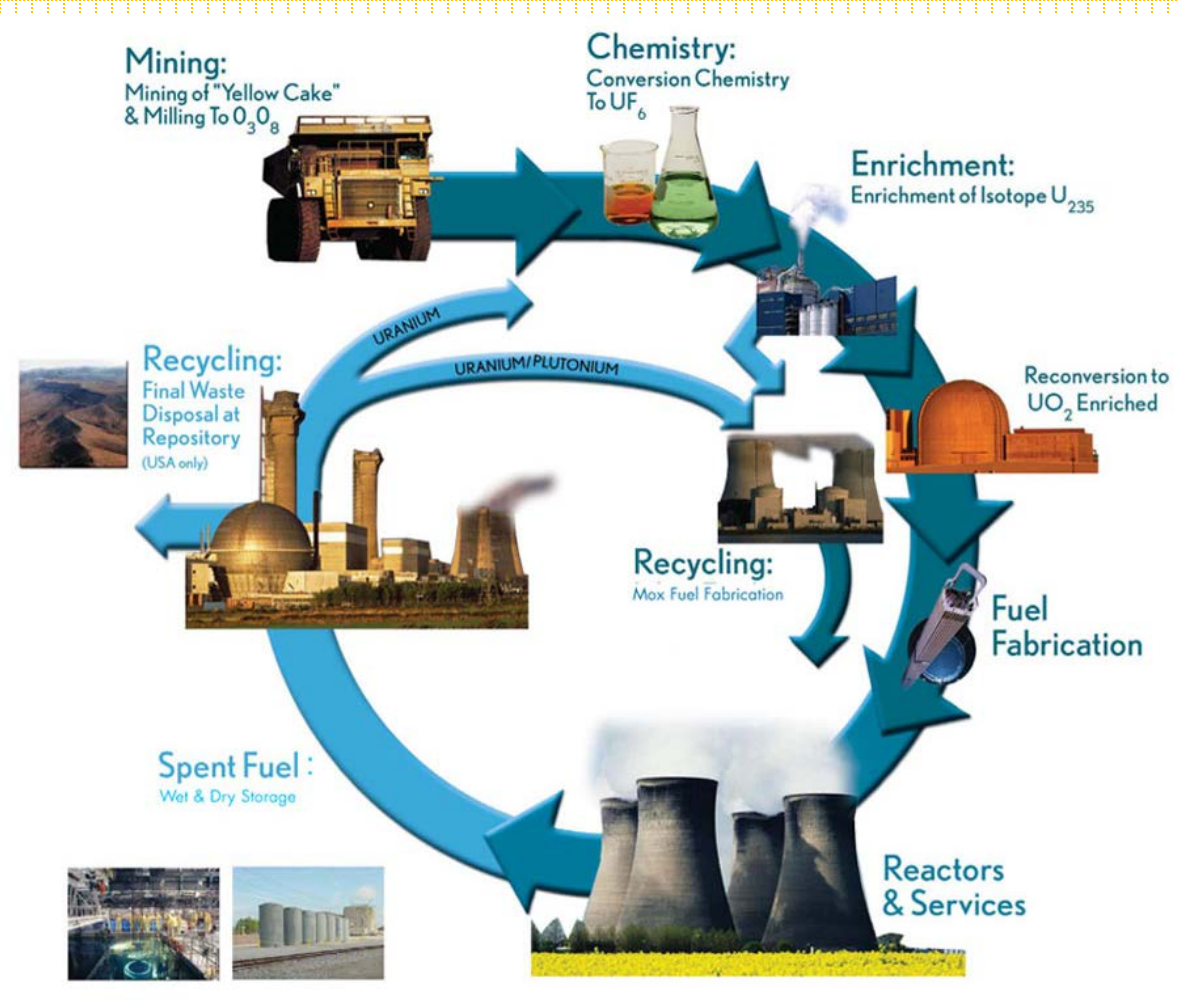
PWR reaktor



PWR reaktor

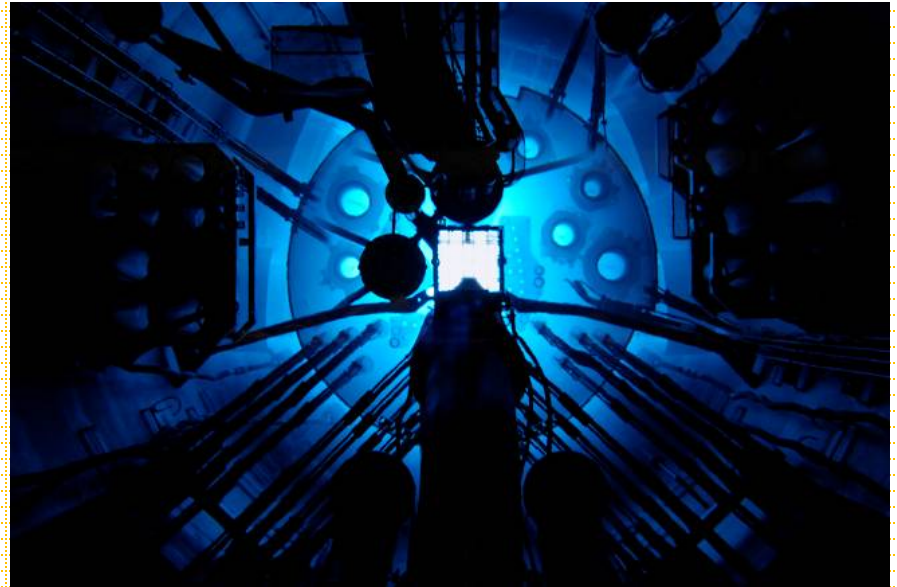


Ciklus nuklearnog goriva



Zadnji kraj ciklusa

- Prerada iskorišćenog nuklearnog goriva
- Sastav iskorišćenog nuklearnog goriva
- Odlaganje radioaktivnog otpada

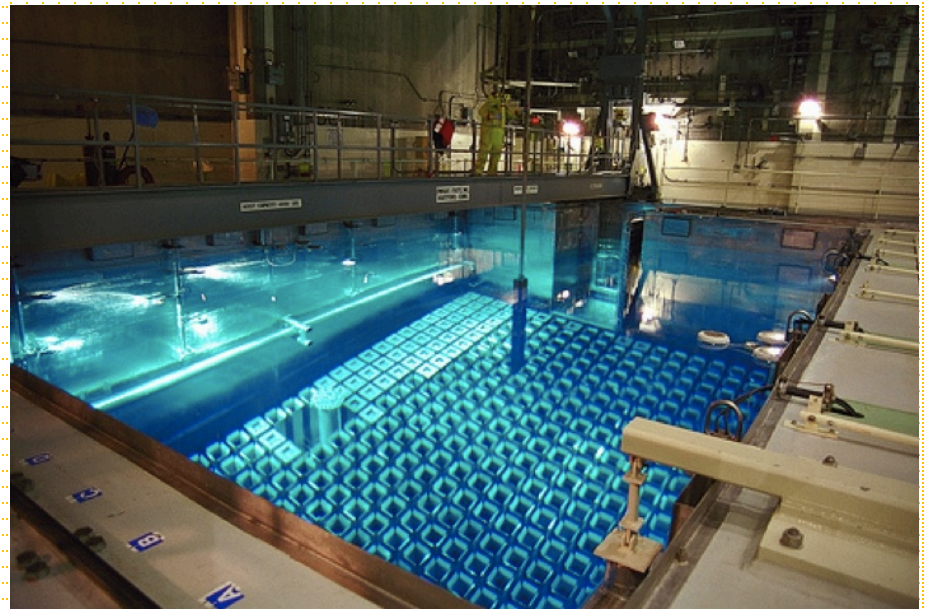


Prerada iskorišćenog nuklearnog goriva

- Hemijski se izdvaja **fisibilni plutonijum** iz iskorišćenog nuklearnog goriva.
- Reprocesirani plutonijum se koristi za dobijanje **MOX nuklearnog goriva (Mixed OXide fuel)** koje predstavlja mešavinu oksida uranijuma, oksida plutonijuma i osiromašenog uranijuma.
- **MOX** predstavlja alternativu **LEU** (Low Enriched Uranium).
- Reprocesiranje **smanjuje zapreminu** visoko radioaktivnog otpada, ali **ne smanjuje radioaktivnost i emisiju toplote** pa samim tim ni potrebu za skladištenjem iskorišćenog goriva u vidu nuklearnog otpada.

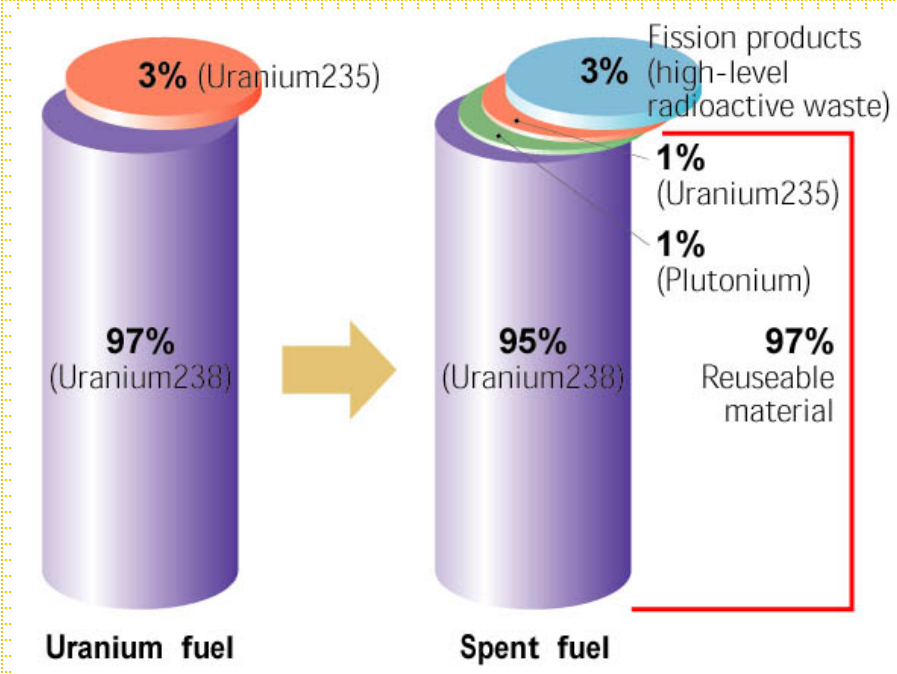
Prerada iskorišćenog nuklearnog goriva

- Iskorišćeno nuklearno gorivo je vrlo radioaktivno.
- Čeka se najmanje 100 dana pre nego što počne njegoa prerada.
- U međuvremenu radioaktivnost kratkoživećih radioaktivnih fisionih fragmenata opadne u značajnoj meri.
- Pri preradi iskorišćenog nuklearnog goriva dobijaju se značajne količine čvrstih, tečnih i gasovitih radioaktivnih otpadnih materijala.



Sastav iskorišćenog nuklearnog goriva

- Fisioni produkti
- Plutonium
- Uranijum



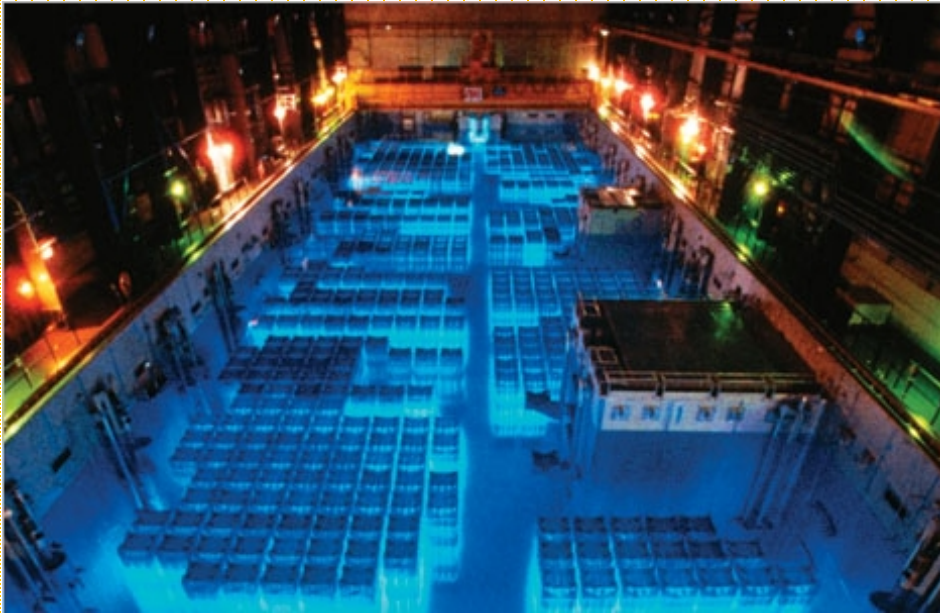
Fisioni produkti

- Oko 3% sastava iskorišćenog nuklearnog goriva.
- Smatraju radioaktivnim otpadom ili se mogu izdvojiti i koristiti u industrijske i medicinske svrhe.
- Elementi koji se mogu naći u fisionim produktima su Zr, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, I, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Nd.
- Neki radioaktivni fisioni produkti imaju kratko vreme poluraspada ali među njima ima i dugoživećih kao što su Sr-90, Cs-137, Tc-99 i I-129.

Plutonijum

- Oko 1% sastava iskorišćenog nuklearnog goriva su Pu-239 i Pu-240 koji nastaju konverzijom U-238 i mogu se smatrati korisnim nusproduktom ili opasnim i nepogodnim nuklearnim otpadom.
- Glavni problem jeste sprečavanje upotrebe plutonijuma za proizvodnju nuklearnog naoružanja.
- Ako se šarža goriva koristila dovoljno dugo, dobijeni plutonijum se ne može iskoristiti za proizvodnju nuklearnog oružja.
- Ukoliko je period upotrebe goriva bio kratak, plutonijum se može iskoristiti za proizvodnju nuklearnog oružja.
- Nuklearne neproliferacija – neširenje nuklearnog naoružanja – oblast nuklearne bezbednosti
- Razlikovati termine sigurnost i bezbednost – *safety and security*.

Uranijum



- Oko 96% sastava iskorišćenog nuklearnog goriva.
- Većina originalnog U-238 je ostala i negde oko 0,8% sastava je U-235.
- Takođe u tragovima se može naći i U-236 koji se može koristiti kao marker iskorišćenog nuklearnog goriva.

Odlaganje radioaktivnog otpada

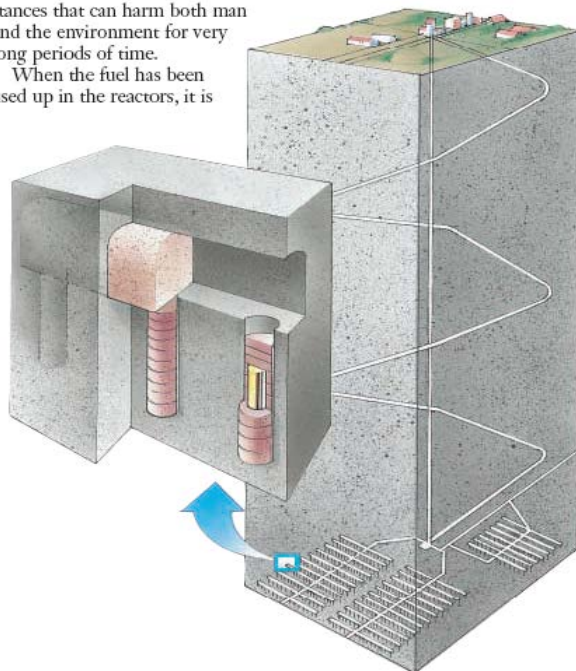
- **Radioaktivni otpad** je bilo koji materijal koji sadrži ili je kontaminiran radionuklidima koncentracije veće od dozvoljenog nivoa (nivo izuzimanja), a koje definiše kompetentno regulatorno telo, i **koji se ne planira za dalju upotrebu**.
- Metode skladištenja i odlaganja radioaktivnog otpada zavise od **agregatnog stanja, vrste radionuklida, njihove koncentracije i radiotoksičnosti**.
- Iskorišćeno nuklearno gorivo spada u **visoko aktivni radioaktivni otpad** (High Level Waste-**HLW**).
- Visoko aktivni radioaktivni otpad predstavlja **3% zapremine svetskog radioaktivnog otpada i 95% ukupne aktivnosti**.

Odlaganje radioaktivnog otpada

- Odlaganje predstavlja **poslednji korak** u upravljanju radioaktivnim otpadom.
- Odlaganje mora biti sigurno, ireverzibilno, u dugoročno kontrolisanim uslovima.
- Visoko aktivni radioaktivni otpad se trajno odlaže na **geološka odlagališta** - iskopane bušotine ili jame na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine tla.
- Geološka odlagališta omogućavaju izolaciju u odnosu na površinske procese i ljudske aktivnosti, zaštitu biosfere, očuvanje radioaktivnog otpada nekoliko hiljada godina i ograničenje migracija radionuklida.

Odlaganje radioaktivnog otpada

It will contain radioactive substances that can harm both man and the environment for very long periods of time. When the fuel has been used up in the reactors, it is



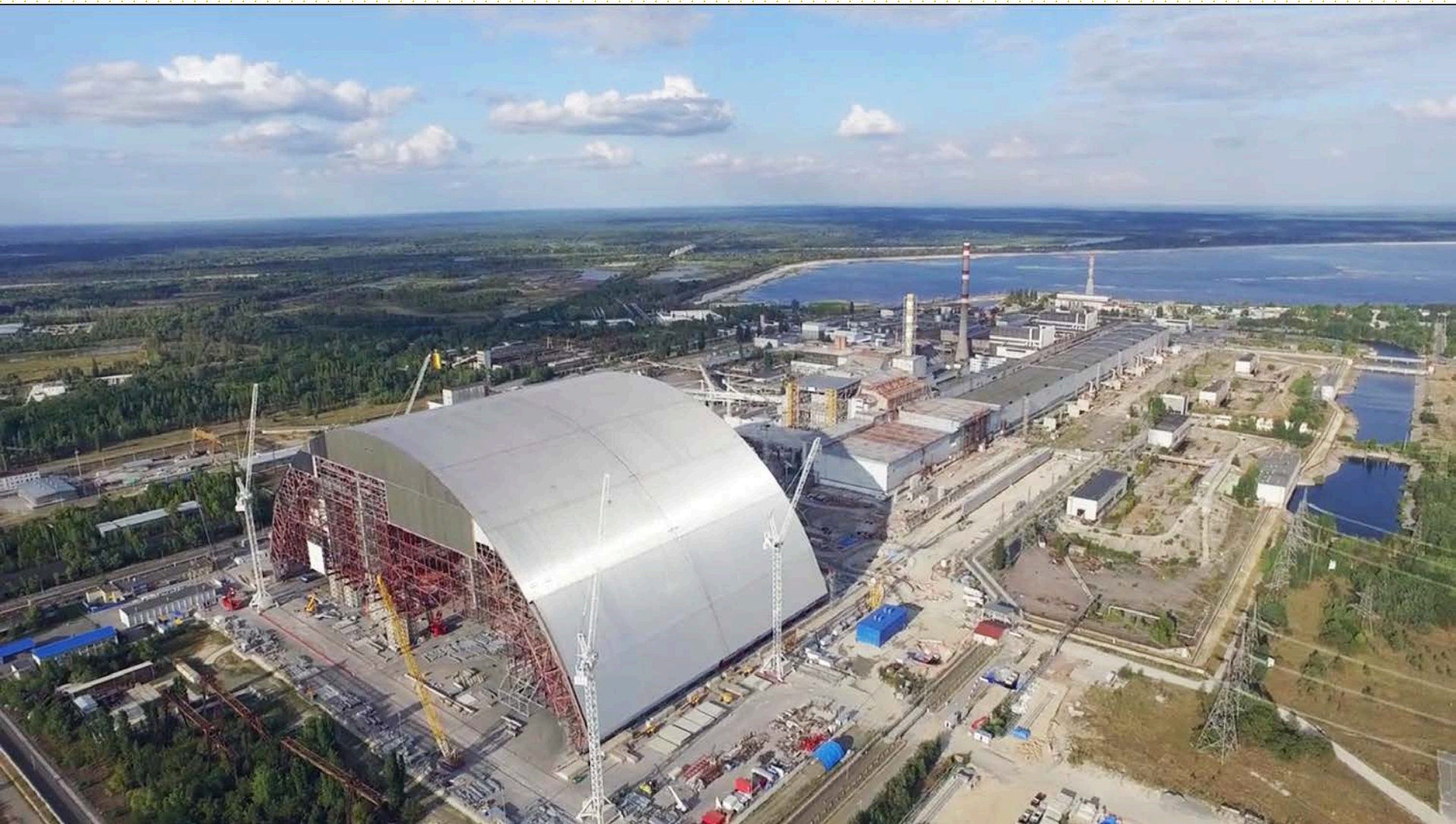
The spent nuclear fuel will be encapsulated in copper. The copper canisters will then be deposited in the bedrock, embedded in clay, at a depth of 500 metres.

- Geološko okruženje u kom se gradi ili se planira odlagalište mora biti **stabilno** i moraju ga okruživati **nepropusne stene**.
- Koristi se koncepti **višestrukih barijera** kako bi se onemogućio bilo kakav kontakt sa okolinom i vodom koja bi mogla da eventualno proдре unutar skladišta.
- Kada se odlagalište napuni ono se **permanento zatvara**.

Nuklearna industrija je jedina grana energetske industrije koja preuzima **punu odgovornost** za upravljanje i odlaganje svih svojih vrsta **otpada** koje su **male** u poređenju sa otpadom nastalim korišćenjem fosilnih goriva za proizvodnju električne energije.



ČERNOBILJ DANAS



Stanje i perspektive nuklearne energetike

- Sve veća potreba za električnom energijom
- Uticaj na životnu sredinu
nulearna vs termoelektrana
- Pariški sporazum 2015.
- COP26 - 2021 United Nations Climate Change Conference
- Dekarbonizacija

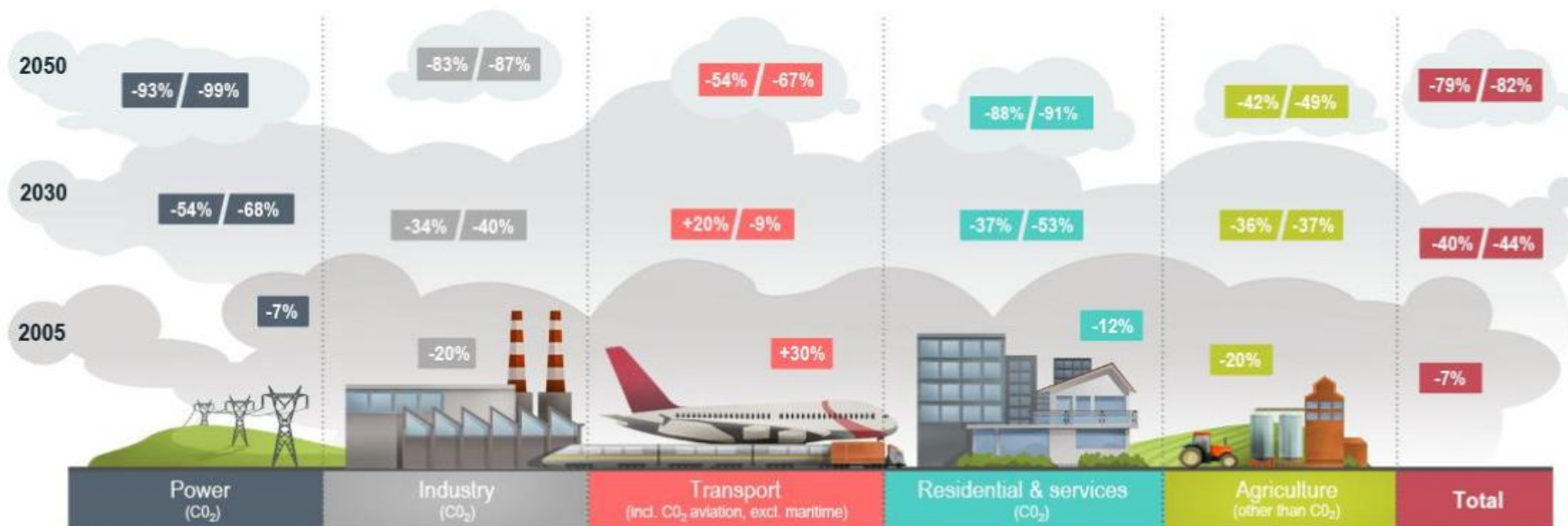


[Europe's energy roadmap 2050](#)

Stanje i perspektive nuklearne energetike

Low-carbon strategy for 2050

Targets compared to 1990 levels

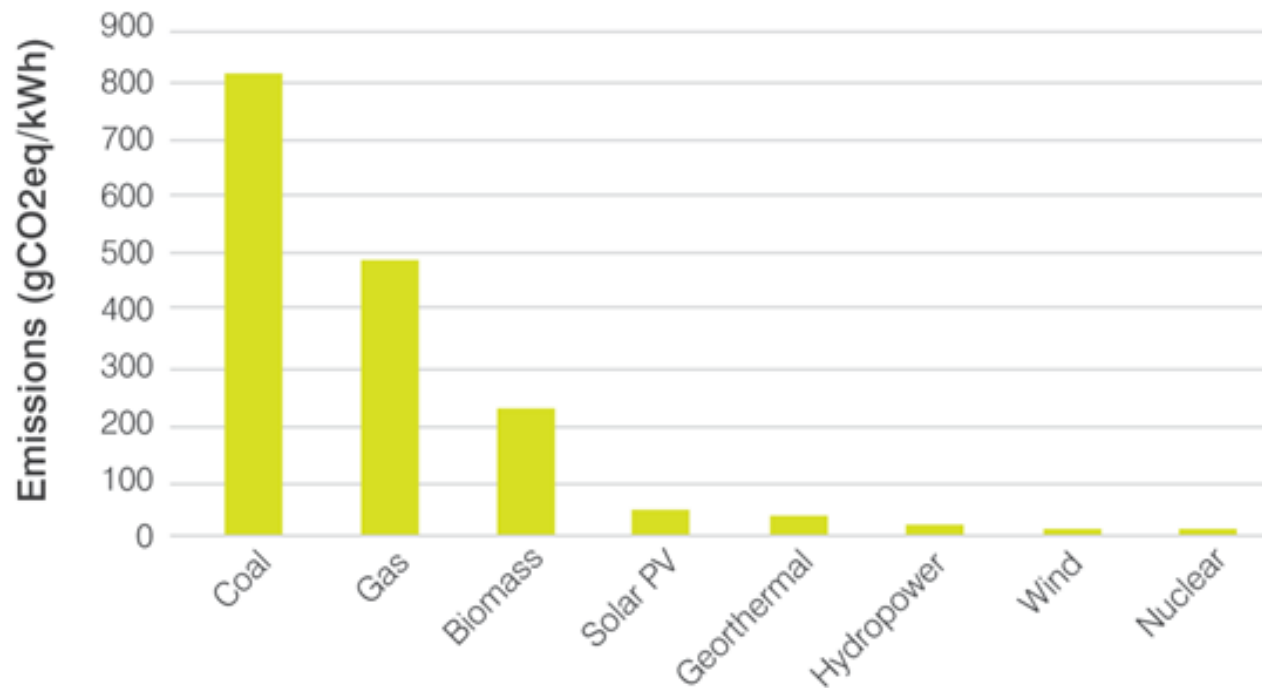


Source: European Commission



Ugljenični otisak - Carbon footprint

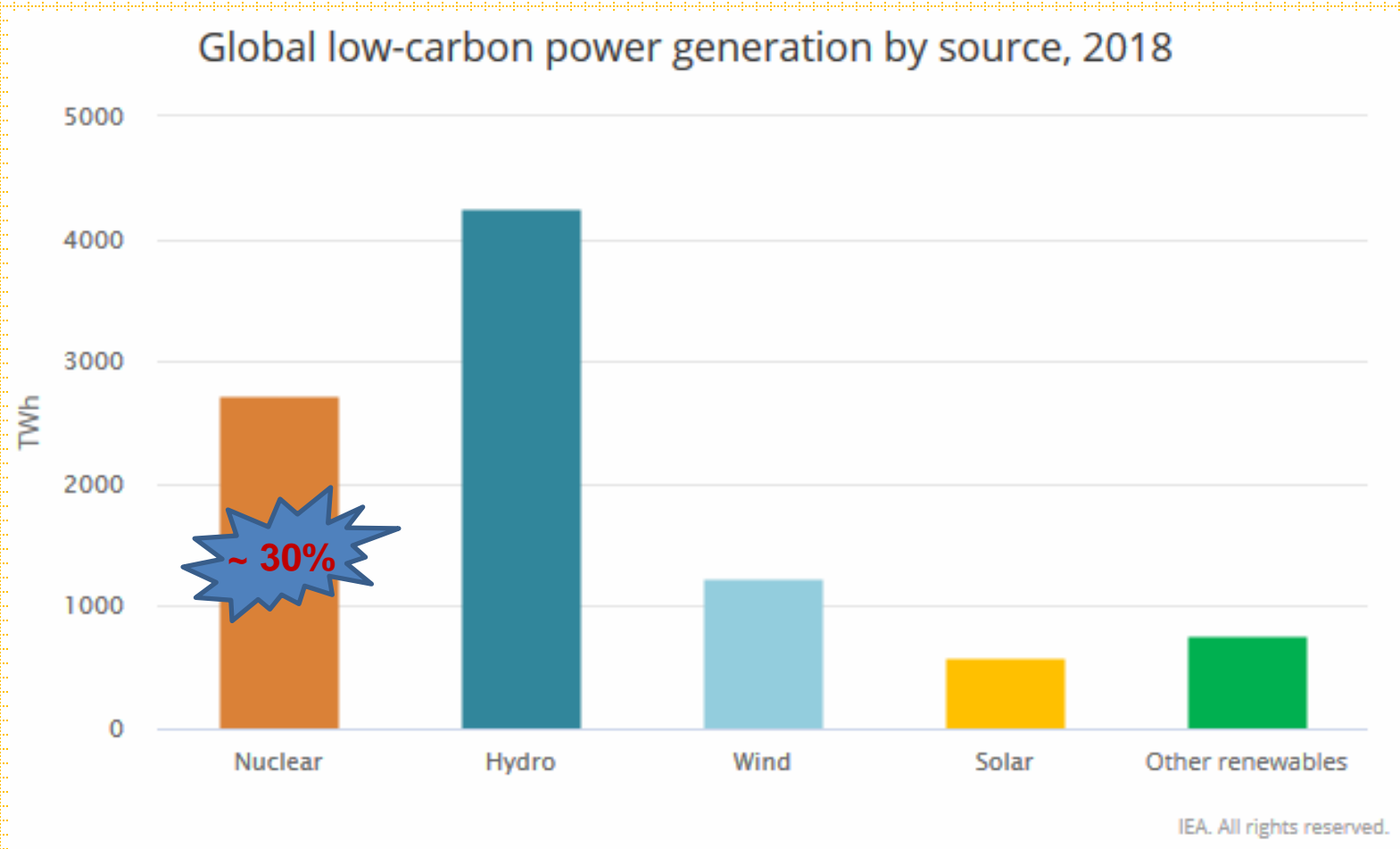
Life-cycle carbon emissions from selected electricity supply technologies



Source: 2014 IPCC, Global warming potential of selected electricity sources



Čista energija - Clean energy





Reactor database

IAEA.org NUCLEUS
Contact Us

IAEA
PRIS
Power Reactor Information System

World Statistics
Country Statistics
Publications
Glossary
About PRIS

PRIS

The Database on Nuclear Power Reactors

The Power Reactor Information System (PRIS), developed and maintained by the IAEA for over five decades, is a comprehensive database focusing on nuclear power plants worldwide. PRIS contains information on power reactors in operation, under construction, or those being... [READ MORE »](#)

Registered User ENTRY
How to Register

SHORTCUTS

- 2020: Nuclear Power Reactors in the...
- 2020: Operating Experience with NPP...
- 2020: PRIS Data Summary Analysis

CURRENT STATUS

443	NUCLEAR POWER REACTORS IN OPERATION
393 084	MW _e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY
50	NUCLEAR POWER REACTORS UNDER CONSTRUCTION
53 163	MW _e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY
18 844	REACTOR-YEARS OF OPERATION

REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY

Region	Operational (GW _e)	Under Construction (GW _e)
AFRICA	~1	~0
AMERICA - LATIN	~5	~0
ASIA - MIDDLE EAST AND SOUTH	~15	~10
EUROPE - CENTRAL AND EASTERN	~55	~5
ASIA - FAR EAST	~105	~15
EUROPE - WESTERN	~100	~5
AMERICA - NORTHERN	~105	~0

HIGHLIGHTS

NPP Status Changes (2021)

Map
Satellite

Year:

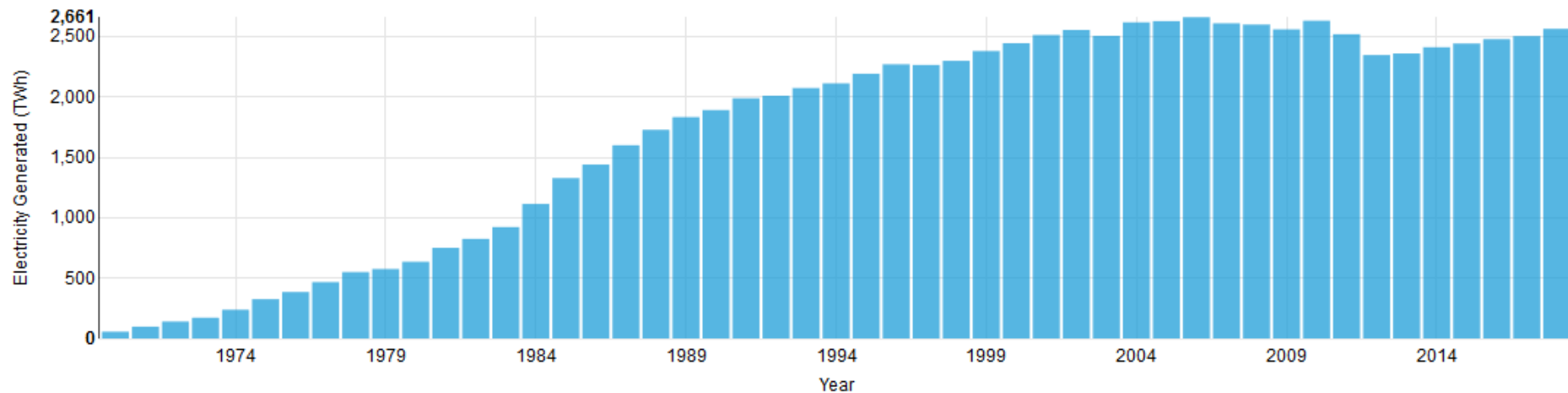
New connections to the grid

KAKRAPAR-3
(630 MW_e), PHWR, INDIA) on 10 January

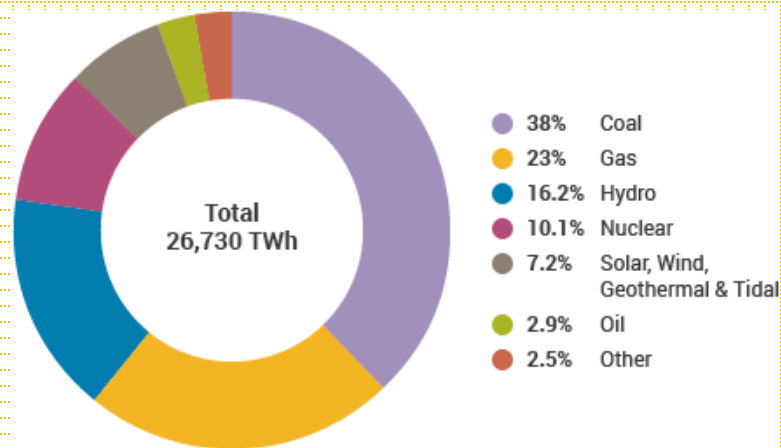
<https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>



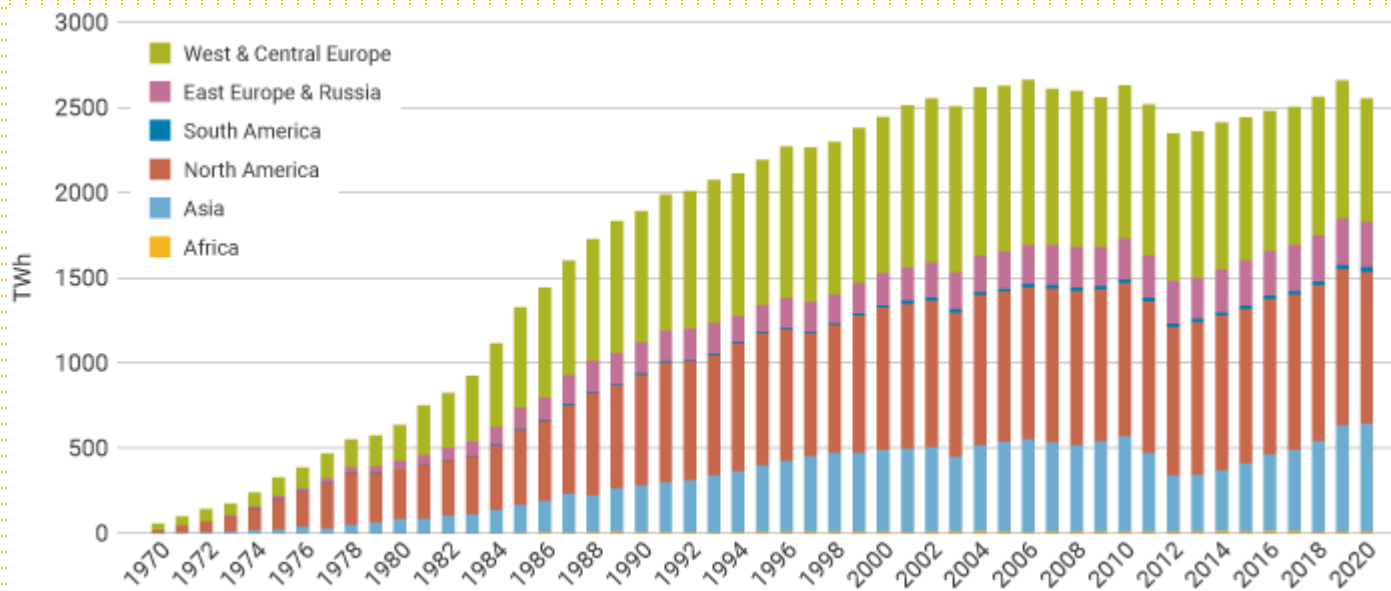
Broj reaktora u svetu



Udeo nuklearne energije u proizvodnji električne energije



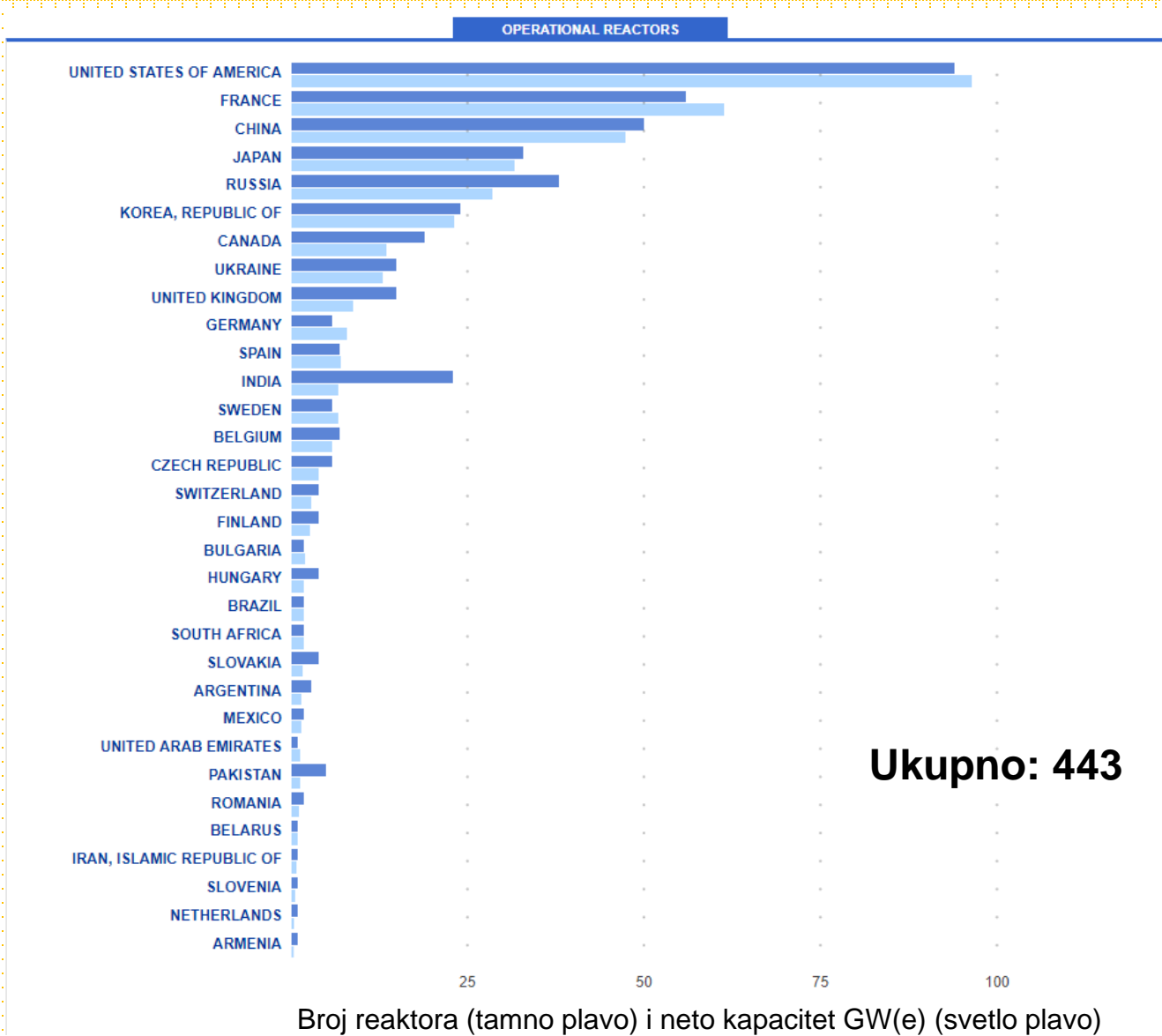
World electricity production by source 2018 (source: International Energy Agency)



Nuclear electricity production (source: World Nuclear Association, IAEA PRIS)

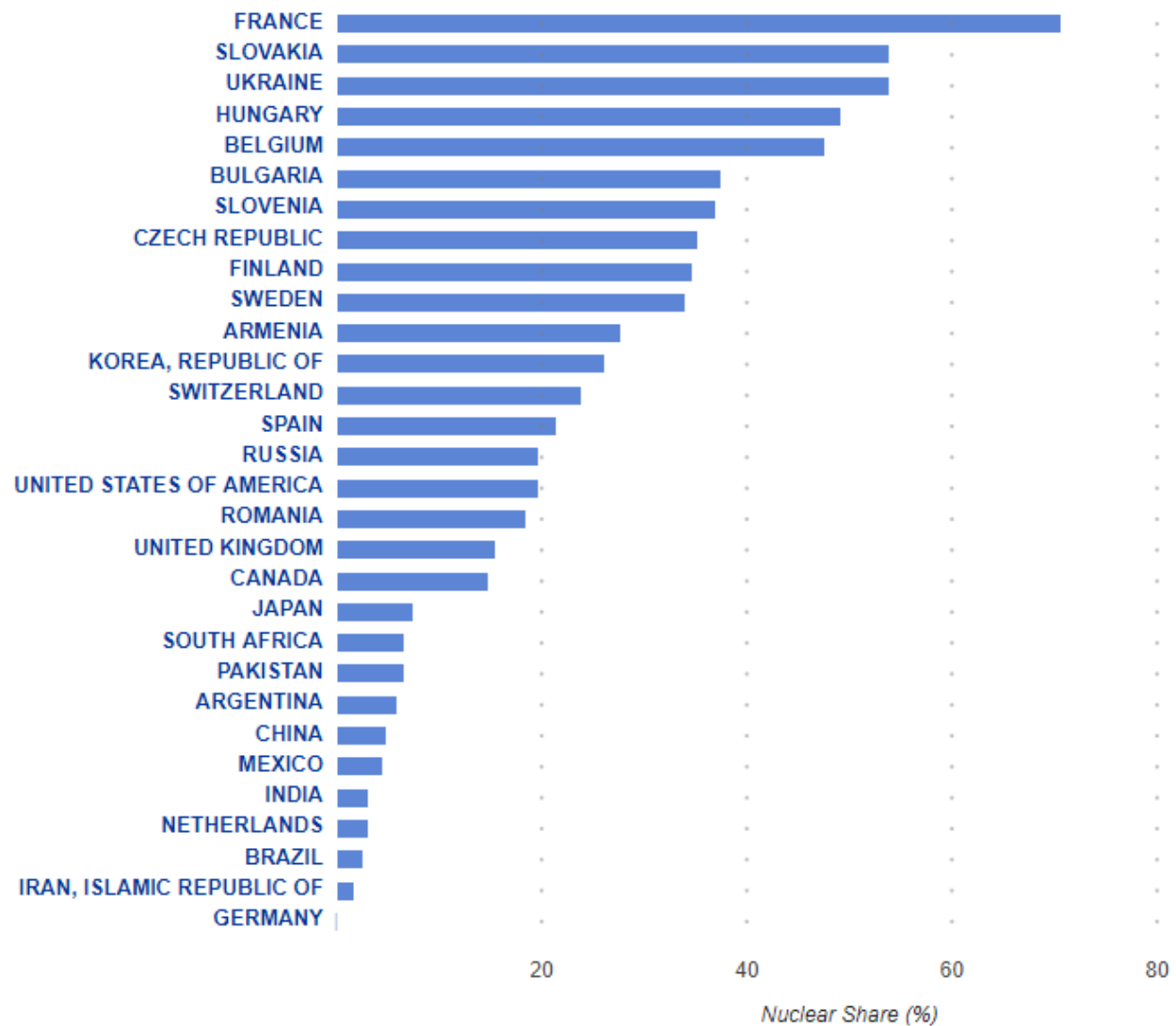


Raspodela broja reaktora po državama





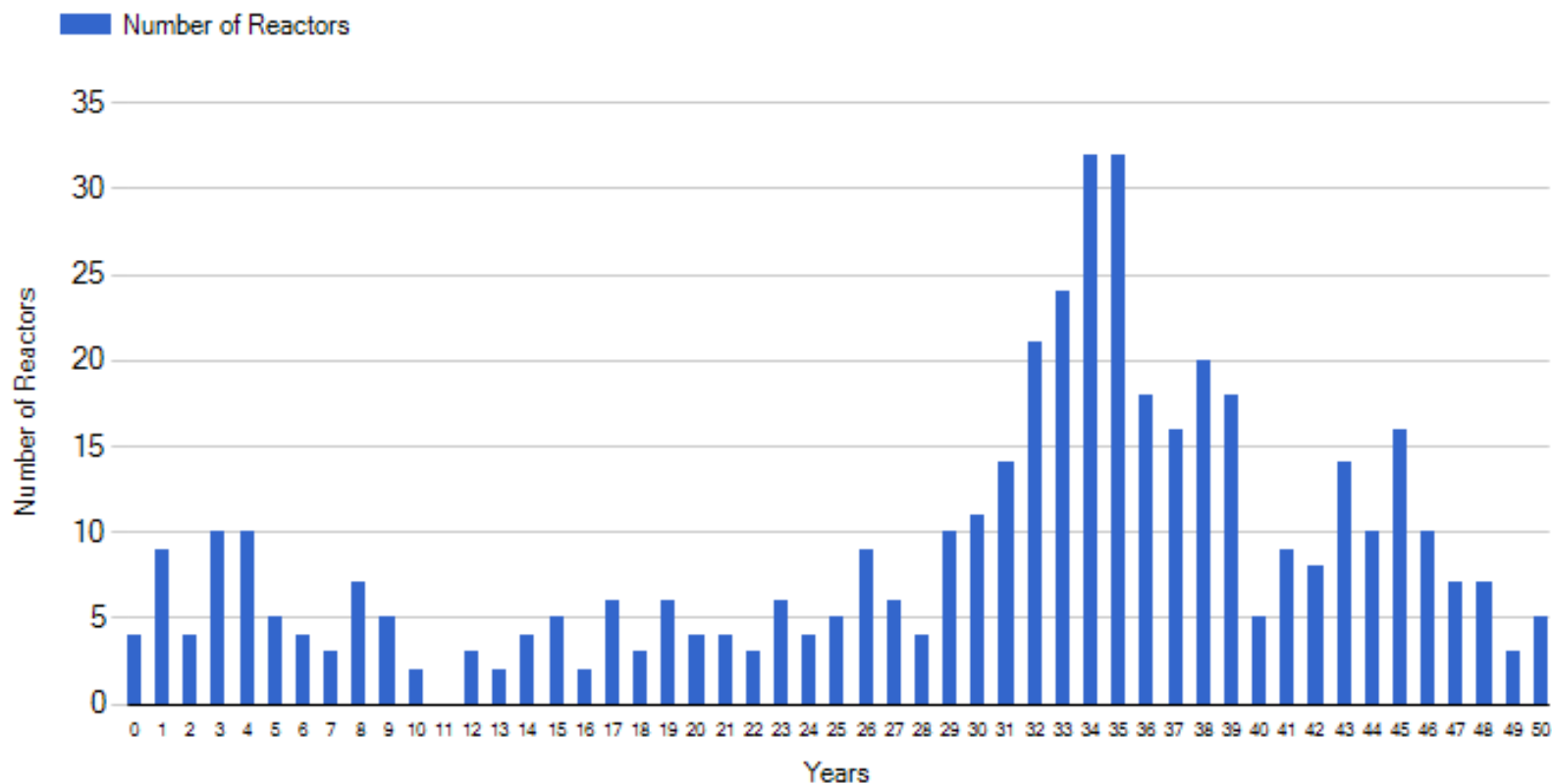
Udeo nuklearne enegije u ukupnoj proizvodnji električne energije 2019





Starost reaktora u pogonu

Total Number of Reactors: 449



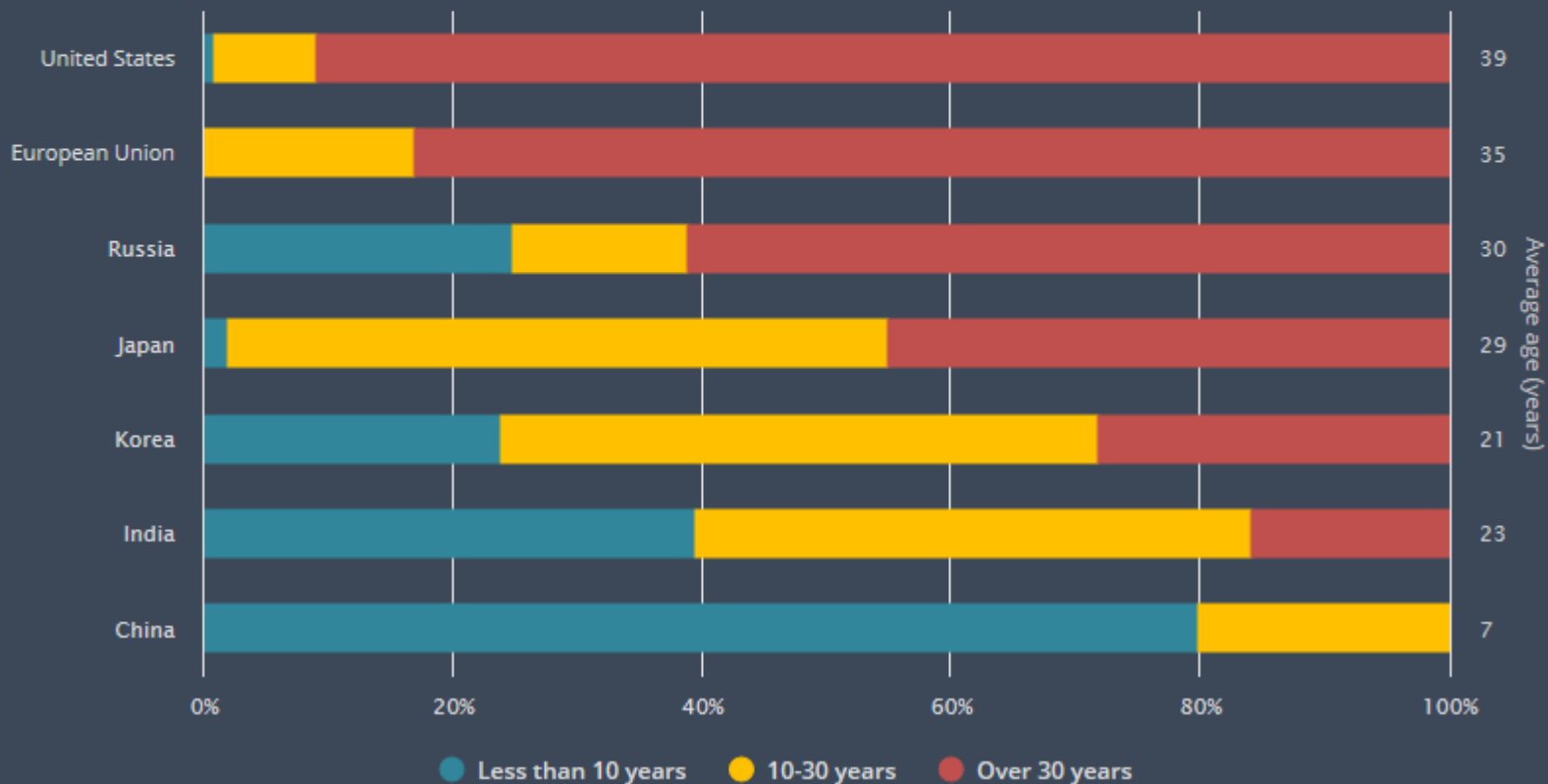
Tokom perioda 1996-2016, 80 reaktora je ugašeno, a 96 počelo sa radom. Referentni scenario IAEA: 140 reaktora se gase do 2035. godine, a 224 nova reaktora se povezuju na mrežu.



Starost reaktora u pogonu

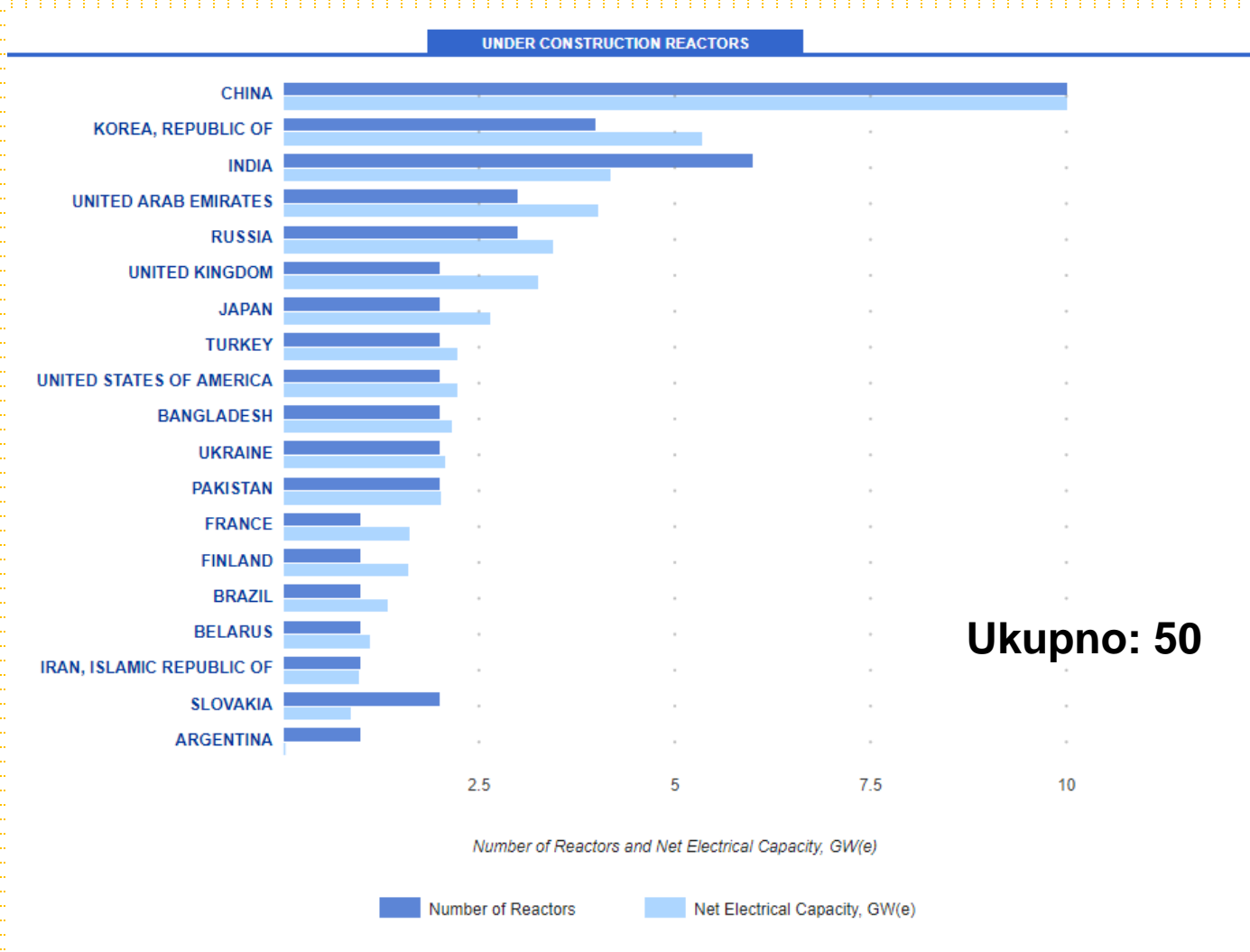
However the nuclear fleet in advanced economies is 35 years old on average and many plants are nearing the end of their designed lifetimes. Given their age, plants are beginning to close, with 25% of existing nuclear capacity in advanced economies expected to be shut down by 2025.

Age profile of nuclear power capacity in selected regions



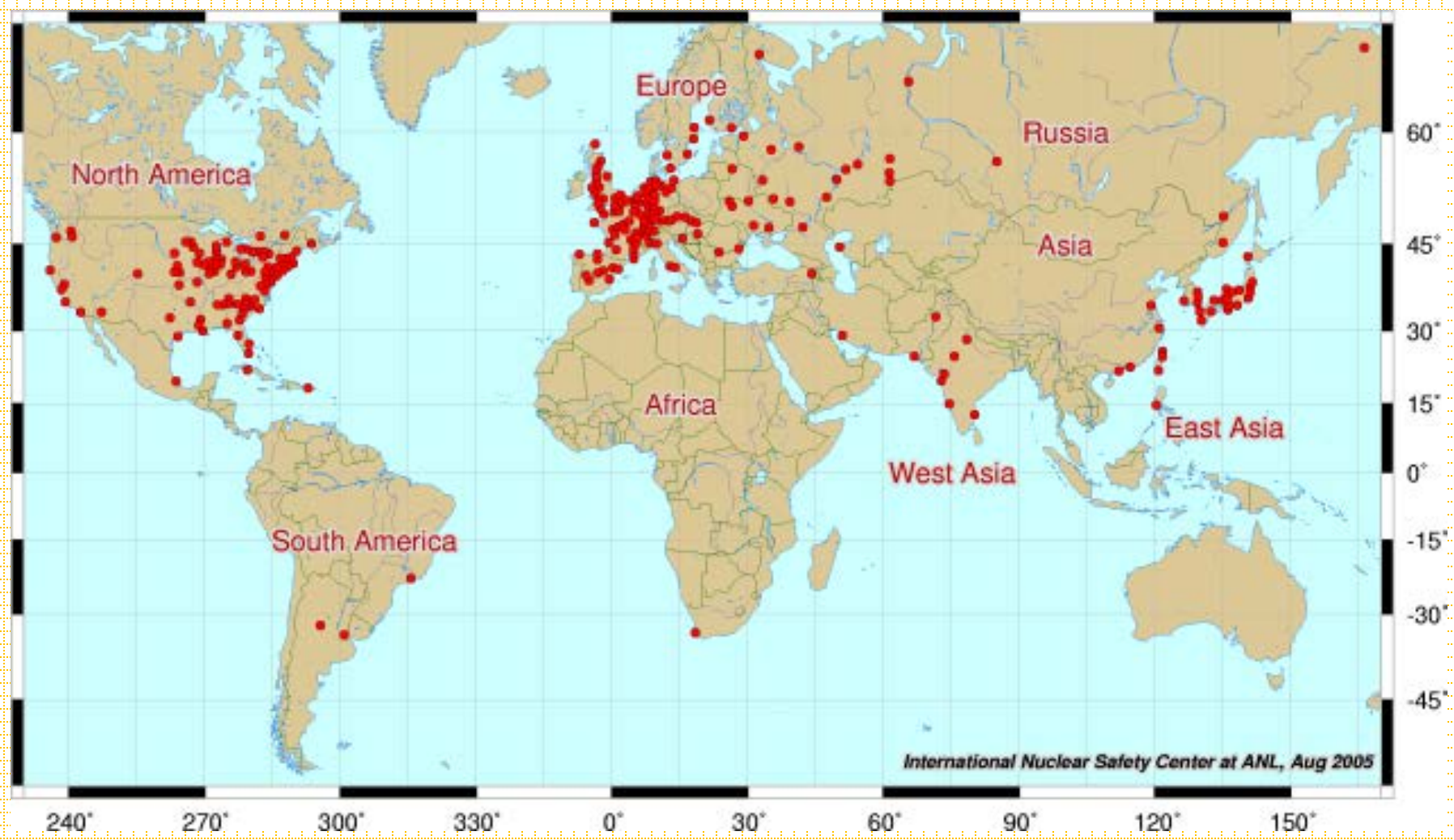


Broj reaktora u izgradnji





World nuclear map (2005)





Situacija u regionu





Zakon o zabrani izgradnje nuklearnih elektrana u Saveznoj Republici Jugoslaviji (2005) ...i dalje na snazi u Republici Srbiji

- Zabranjuje se izgradnja nuklearnih elektrana, postrojenja za proizvodnju nuklearnog goriva i postrojenja za preradu isluženog nuklearnog goriva za nuklearne elektrane u Saveznoj Republici Jugoslaviji.
- Zabrana se odnosi na: donošenje investicionih odluka, izradu investicionih programa i tehničke dokumentacije za izgradnju nuklearnih elektrana, postrojenja za proizvodnju nuklearnog goriva i postrojenja za preradu isluženog goriva za nuklearne elektrane.
- Odredbe člana 1. ovog zakona ne odnose se na naučnoistraživačke i istraživačko-razvojne radove, rudarsko-geološke istražne radove, geološko-seizmička istraživanja i **obrazovanje kadrova**.



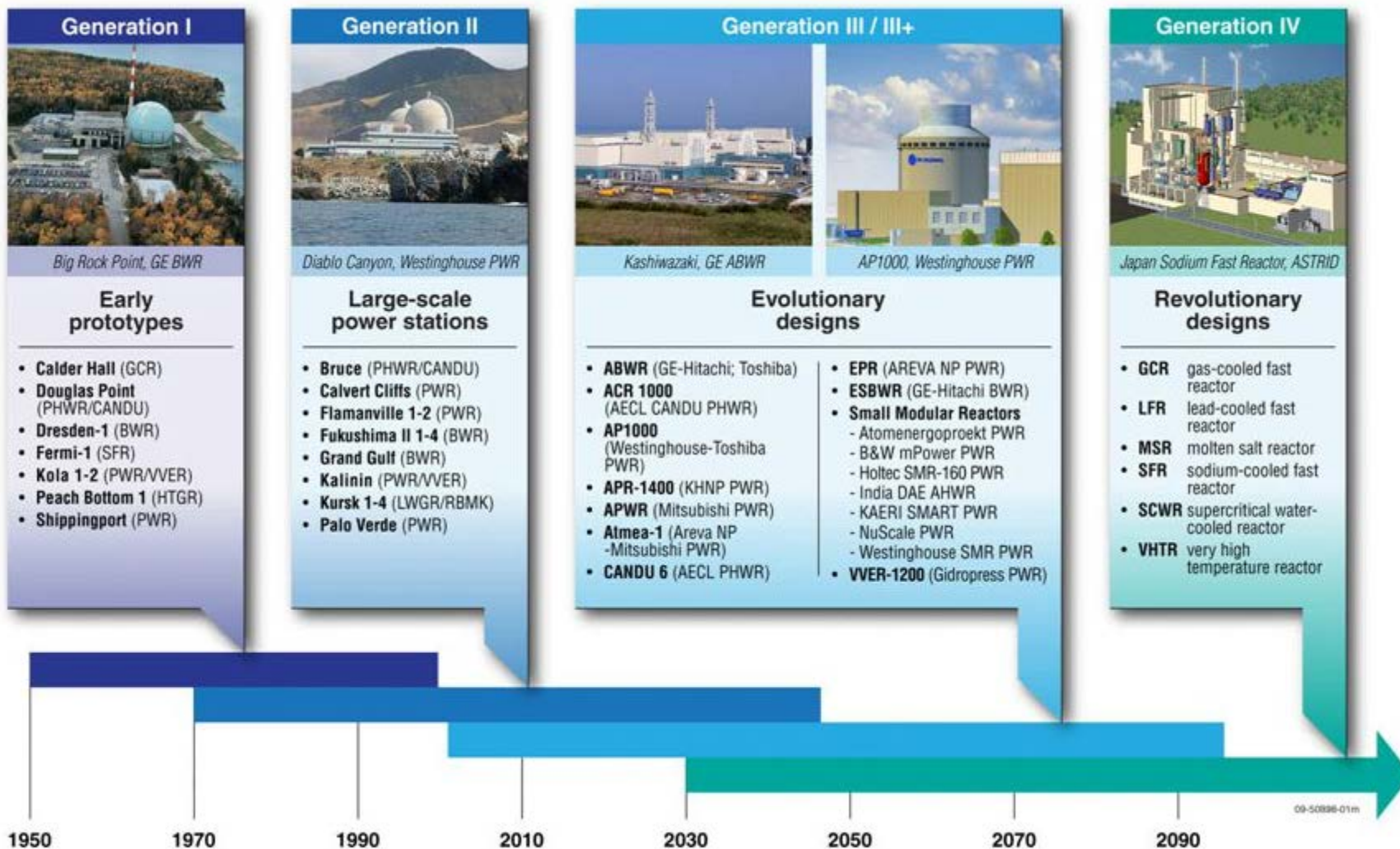
РЕПУБЛИКА СРБИЈА
Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност
и безбедност Србије

Масарикова 5, XV спрат, 11000 Београд · тел: +381 11 3061 489 · факс: +381 11 3061 552 · е-пошта: info@srbatom.gov.rs





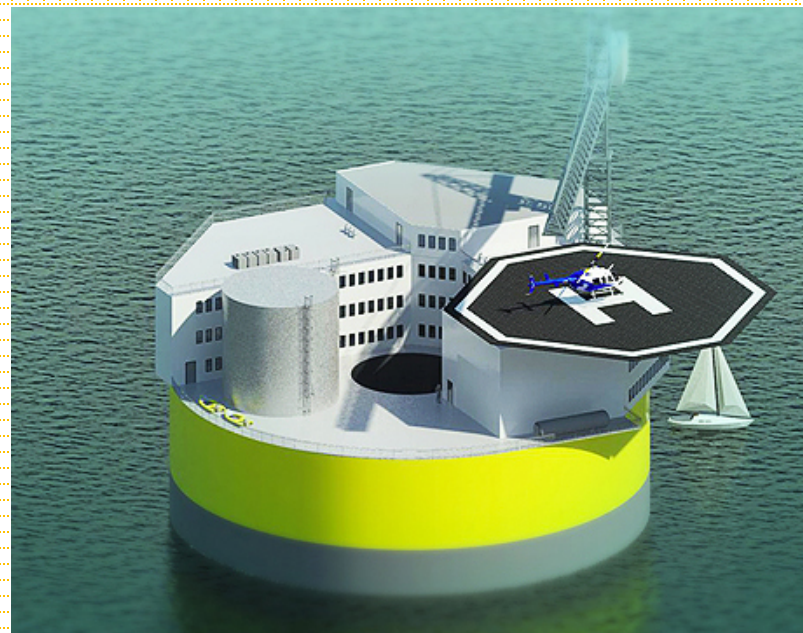
Razvoj tehnologija nuklearnih reaktora



Sinergija nuklearnih i obnovljivih izvora

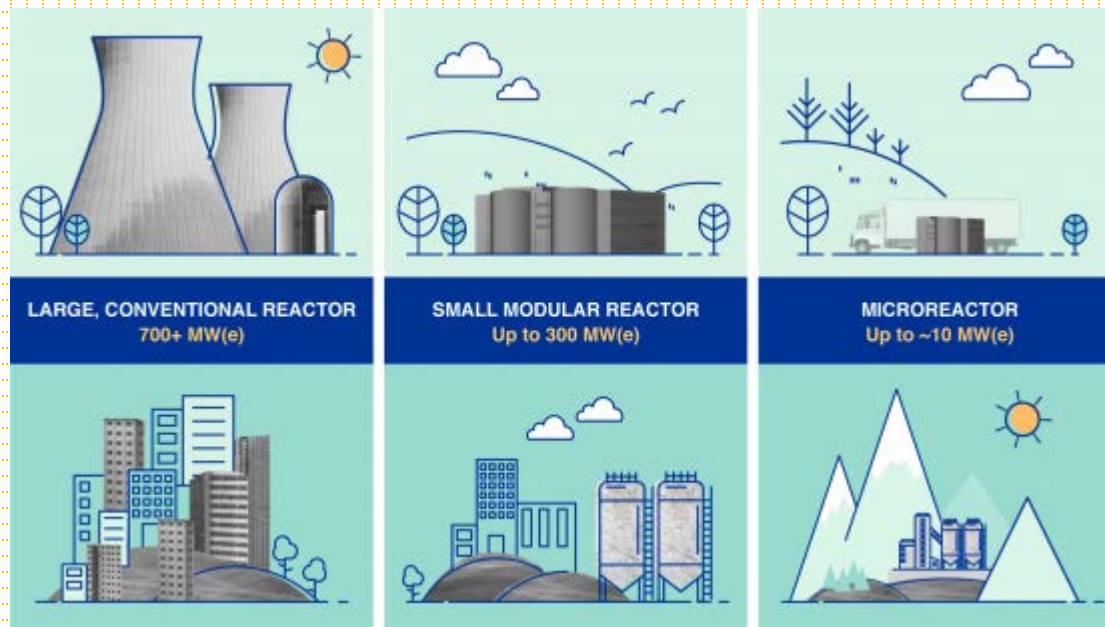
Hibridni elektroenergetski sistemi

- Tranzicija prema energiji sa značajno manjom emisijom gasova koji izazivaju efekat staklene bašte.
- Integracija intermitentnih pogona sa konvencionalnim generisanjem električne energije.
- Mali modularni reaktori (Small Modular Reactors- SMR) – između 3. i 4. generacije reaktora
- Uvodjenje mobilnosti nuklearne elektrane, čime se isključuje njena vezanost za jednu lokaciju (floating nuclear power plant)



Mali modularni reaktori

- Mali modularni reaktori (SMR) su napredni nuklearni reaktori koji imaju kapacitet snage do 300 MW(e) po jedinici, što je oko jedne trećine proizvodnog kapaciteta tradicionalnih nuklearnih reaktora.
- Mali – po veličini samo delić konvencionalnog nuklearnog reaktora.
- Modularni – omogućava da sistemi i komponente budu fabrički sastavljeni i transportovani kao jedinica do lokacije za ugradnju.
- Reaktori – korišćenje nuklearne fisije za generisanje toplote, za proizvodnju električne energije.



Phases and Milestones for a New Nuclear Power Programme

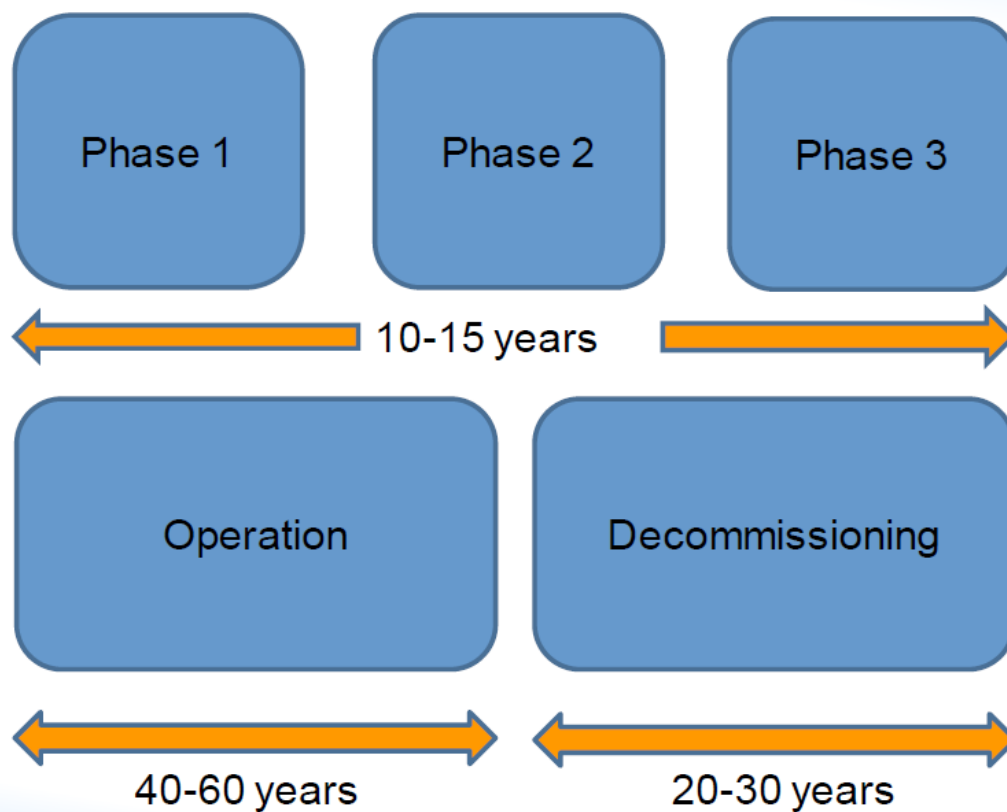


Introducing
Nuclear Power



NPP Operational Life Cycle

IAEA Phases and Milestones for a new NPP



Total life-cycle = 70 to 100 years+ (2 to 3 generations!)



CHINA

CEFR

CHANGJIANG-1

CHANGJIANG-2

CHANGJIANG-3

DAYA BAY-1

DAYA BAY-2

FANGCHENGGANG-1

FANGCHENGGANG-2

FANGCHENGGANG-3

FANGCHENGGANG-4

FANGJIASHAN-1

FANGJIASHAN-2

FUQING-1

FUQING-2

FUQING-3

FUQING-4

**HONGYANHE-5**
Operational**KINA**

REACTOR DETAILS

Reactor Type PWR	Model ACPR-1000	Owner Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co. Ltd. (LHNPC)	Operator Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co. Ltd. (LHNPC)
Reference Unit Power (Net Capacity) 1061 MW_e	Design Net Capacity 1061 MW_e	Gross Capacity 1119 MW_e	Thermal Capacity 2905 MW_t
Construction Start Date 29 Mar, 2015	First Criticality Date 13 Jun, 2021		
First Grid Connection 25 Jun, 2021	Commercial Operation Date 31 Jul, 2021		

Za kraj

- Nijedna država ne želi da bude previše zavisna od jednog izvora energije, a pored korišćenja fosilnih goriva jedino **dugoročno rešenje** jeste korišćenje **nuklearnog goriva**.
- Kako cene fosilnih goriva rastu, nuklearna energija postaje sve **atraktivnija**.
- **Nuklearna industrija** je jedina grana energetske industrije koja preuzima **punu odgovornost** za upravljanje i odlaganje svih svojih vrsta **otpada** koje su **male** u poređenju sa otpadom nastalim korišćenjem fosilnih goriva za proizvodnju električne energije.
- Sigurnost i bezbednost postrojenja – **zaštita po dubini** (defense in depth): Pristup projektovanju i radu nuklearnih objekata koji sprečava i ublažava nesreće koje oslobađaju opasne materijale - stvaranje više nezavisnih i redundantnih slojeva odbrane kako bi se nadoknadili potencijalni ljudski i mehanički kvarovi, tako da se ni na jedan sloj, bez obzira koliko robustan, ne oslanja isključivo na jedan sloj zaštite. Dubinska odbrana uključuje upotrebu kontrola pristupa, fizičkih barijera, redundantnih i raznovrsnih ključnih bezbednosnih funkcija i mera hitnog reagovanja.
- Značaj nuklearne energetike sa vremenom će rasti, a samim tim i i poboljšanja ciklusa nuklearnog goriva (4. generacija reaktora).



How much do you actually know about nuclear energy?



- [Take quiz](#)

Korisni linkovi

- [PRIS IAEA](#)
- [World Nuclear Association](#)
- <https://www.nuclear-power.com/>
- [SRBATOM](#)