

SKLOP 1/POGLAVJE 4 – **Jedrska energija**

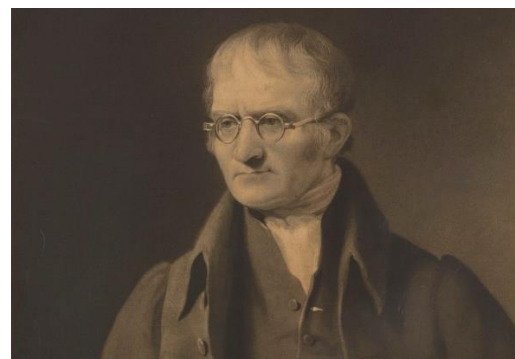
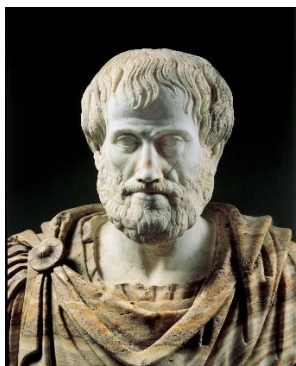
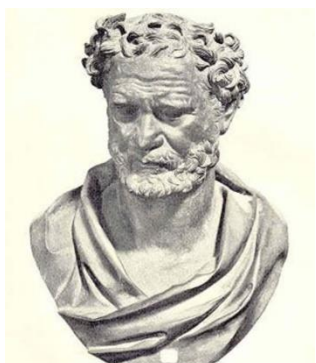
Zgodovinski razvoj atomske teorije *Od starogrške filozofije do zgodnjega sodobnega razvoja*

1. Starogrška filozofija

- **Demokrit in Levkip (5. stoletje pr. n. št.):** Predlagala sta, da je vsa snov sestavljena iz majhnih, nedeljivih delcev, imenovanih atomi. Atomi se gibljejo skozi prazen prostor in se kombinirajo v različne snovi.
- **Aristotel (4. stoletje pr. n. št.):** Zavračal je atomsko teorijo. Predlagal, da je snov zvezna in sestavljena iz štirih elementov: zemlje, vode, zraka in ognja.

2. Oživitev in razvoj atomske teorije

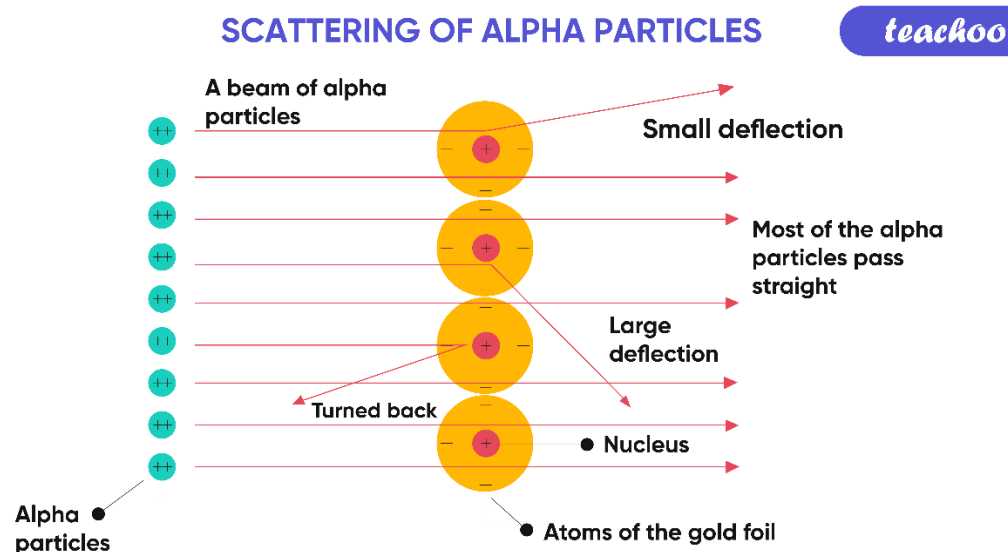
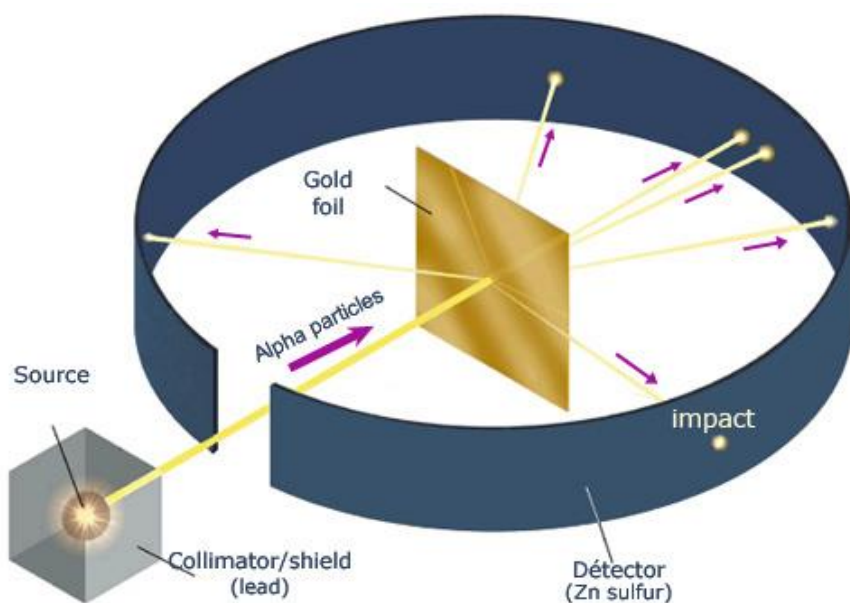
- **Robert Boyle (17. stoletje):** Izzval je klasično teorijo elementov. Predlagal, da je snov sestavljena iz korpoksulov (zgodnja oblika atomske teorije).
- **John Dalton (zgodnje 19. stoletje):** Elementi so sestavljeni iz edinstvenih atomov. Formuliral je zakon o večkratnih razmerjih.



Odkrivanje subatomskih delcev do sodobne teorije atoma

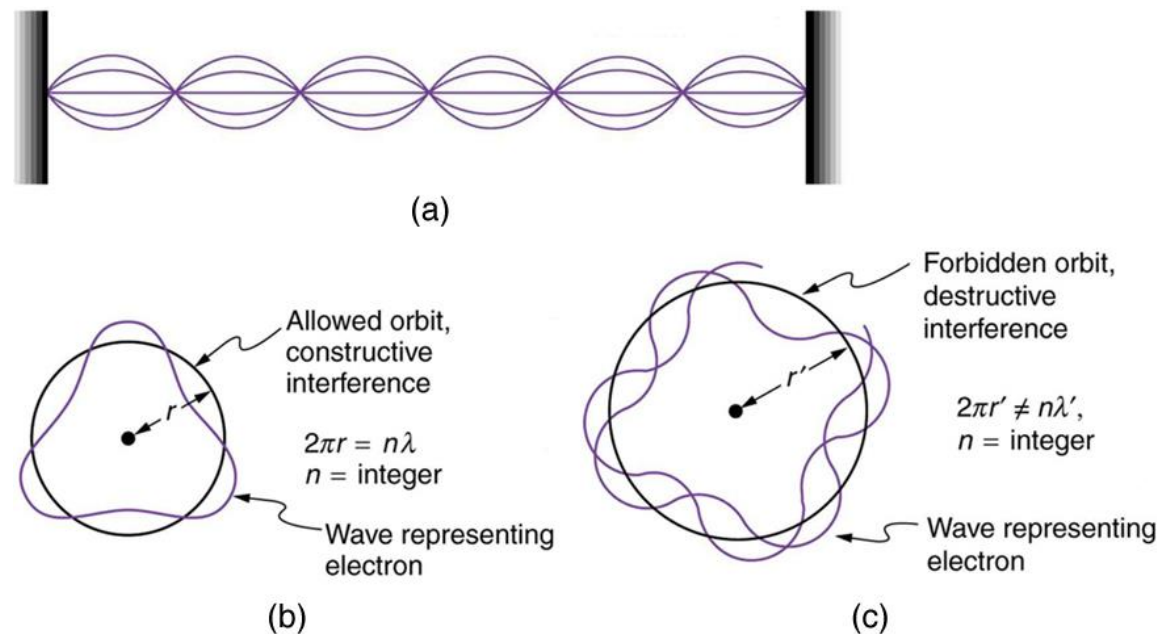
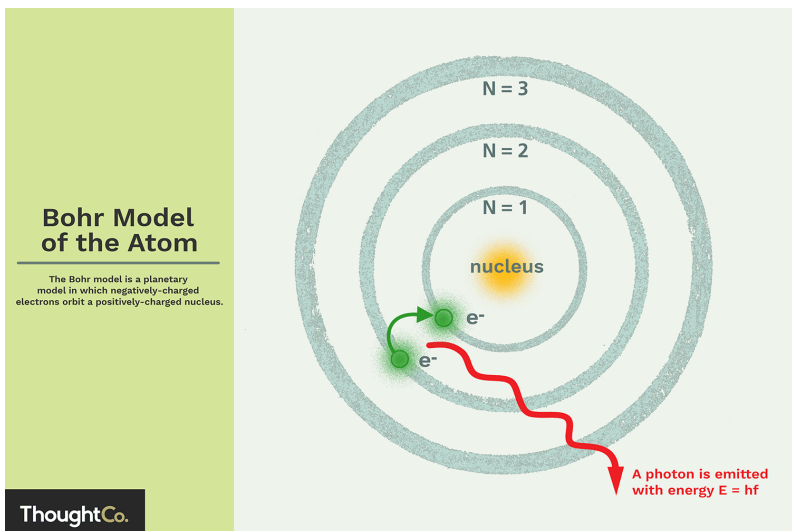
Odkrivanje subatomskih delcev

- **J.J. Thomson (1897):** Odkritje elektrona. Predlagal je model pudinga z rozinami.
- **Ernest Rutherford (1911):** Poskus z zlato folijo. Jedrski model z majhnim, gostim, pozitivno nabitim jedrom.



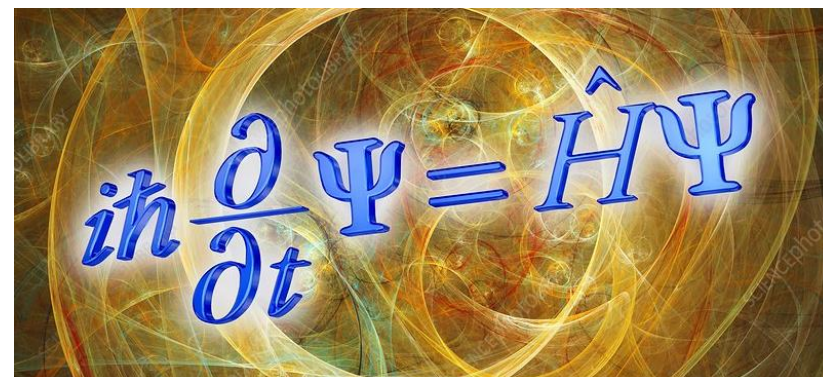
Zgodnja kvantna mehanika in sodobna atomska teorija

- **Niels Bohr (1913)**: Uvedel je kvantizirane orbite za elektrone. Bohrov model atoma velja za zgodnje začetke kvantne mehanike.



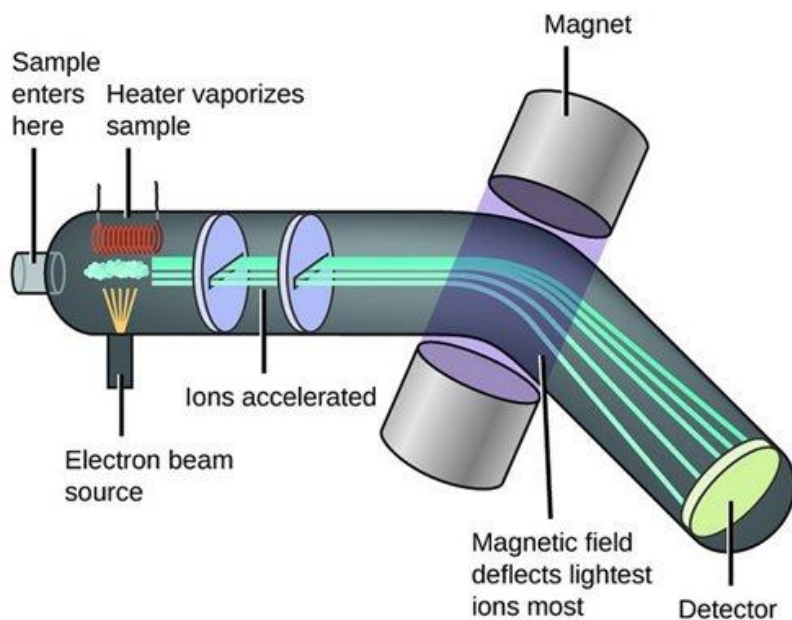
Kvantna mehanika (1920-ta - 1930-ta leta)

- Dvojnost val-delca in **Schrödingerjeva enačba**.
- **Heisenbergovo** načelo nedoločenosti.
- **James Chadwick (1932)**: Odkritje nevtrona.
- Kvantna teorija polja in standardni model (1960 - danes)
- Opisuje osnovne delce in njihove interakcije.



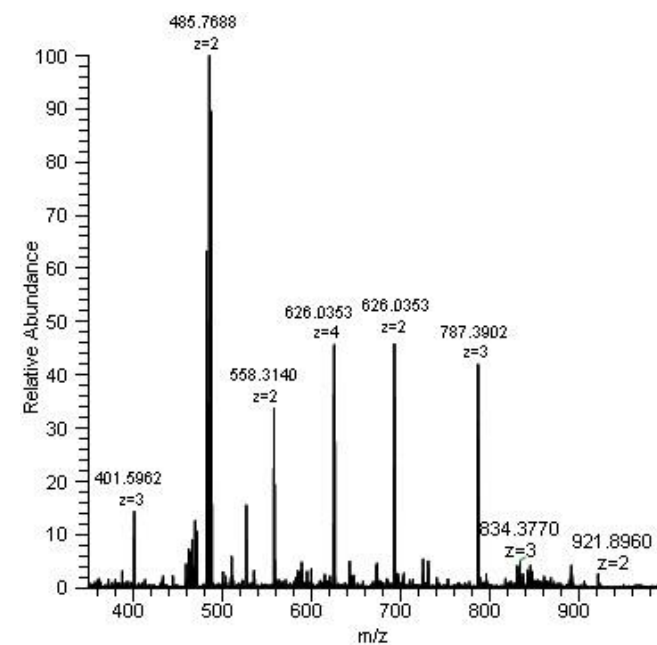
Kakšna je struktura atomskih jeder?

Na to vprašanje so odgovorili s pomočjo masnega spektrometra.

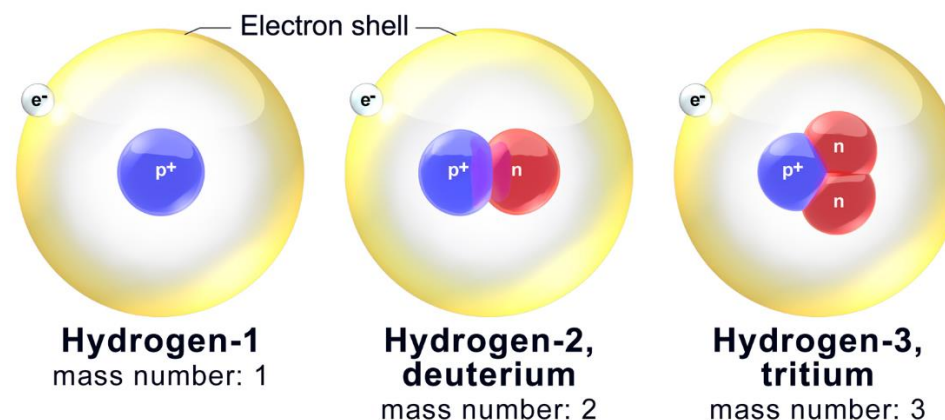
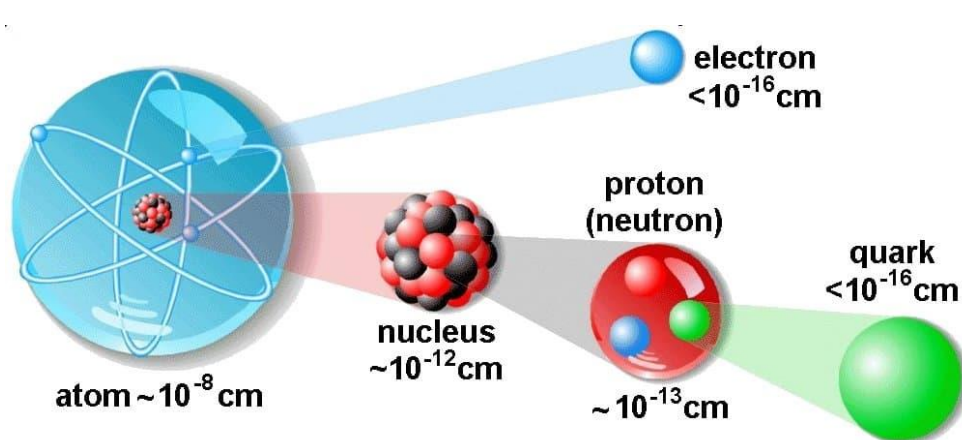


Radij krožnice v magnetu je premo-sorazmeren z maso atomskih jeder:

$$r = \frac{mv}{eB} = \frac{mE}{eB^2}$$



Danes vemo, da so atomska jedra sestavljena iz protonov in nevtronov.



Maso jeder merimo v **atomske enoti mase**:

$$u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

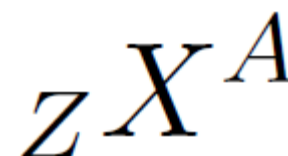
Masa protona: $m_p = 1.007277u$

Masa nevtrona: $m_n = 1.008665u$

Jedrska snov ima enormno gostoto:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4\pi r^3}{3}} = 1.4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3.$$

Oznaka elementa v **periodnem sistemu**:



PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

Chemical Group Block

PubChem

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 1.0080 H Hydrogen Nonmetal												5 10.81 B Boron Metalloid	6 12.011 C Carbon Nonmetal	7 14.007 N Nitrogen Nonmetal	8 15.999 O Oxygen Nonmetal	9 18.9984... F Fluorine Halogen	10 20.180 Ne Neon Noble Gas
3 7.0 Li Lithium Alkali Metal	4 9.012183 Be Beryllium Alkaline Earth Metal																
11 22.989... Na Sodium Alkali Metal	12 24.305 Mg Magnesium Alkaline Earth Metal											13 26.981... Al Aluminum Post-Transition Metal	14 28.085 Si Silicon Metalloid	15 30.973... P Phosphorus Nonmetal	16 32.07 S Sulfur Nonmetal	17 35.45 Cl Chlorine Halogen	18 39.9 Ar Argon Noble Gas
19 39.0983 K Potassium Alkali Metal	20 40.08 Ca Calcium Alkaline Earth Metal	21 44.95591 Sc Scandium Transition Metal	22 47.867 Ti Titanium Transition Metal	23 50.9415 V Vanadium Transition Metal	24 51.996 Cr Chromium Transition Metal	25 54.93804 Mn Manganese Transition Metal	26 55.84 Fe Iron Transition Metal	27 58.93319 Co Cobalt Transition Metal	28 58.693 Ni Nickel Transition Metal	29 63.55 Cu Copper Transition Metal	30 65.4 Zn Zinc Transition Metal	31 69.723 Ga Gallium Post-Transition Metal	32 72.63 Ge Germanium Metalloid	33 74.92159 As Arsenic Metalloid	34 78.97 Se Selenium Nonmetal	35 79.90 Br Bromine Halogen	36 83.80 Kr Krypton Noble Gas
37 85.468 Rb Rubidium Alkali Metal	38 87.62 Sr Strontium Alkaline Earth Metal	39 88.90584 Y Yttrium Transition Metal	40 91.22 Zr Zirconium Transition Metal	41 92.90637 Nb Niobium Transition Metal	42 95.95 Mo Molybdenum Transition Metal	43 96.90636 Tc Technetium Transition Metal	44 101.1 Ru Ruthenium Transition Metal	45 102.9055 Rh Rhodium Transition Metal	46 106.42 Pd Palladium Transition Metal	47 107.868 Ag Silver Transition Metal	48 112.41 Cd Cadmium Transition Metal	49 114.818 In Indium Post-Transition Metal	50 118.71 Sn Tin Post-Transition Metal	51 121.760 Sb Antimony Metalloid	52 127.6 Te Tellurium Metalloid	53 126.9045 I Iodine Halogen	54 131.29 Xe Xenon Noble Gas
55 132.90... Cs Cesium Alkali Metal	56 137.33 Ba Barium Alkaline Earth Metal		72 178.49 Hf Hafnium Transition Metal	73 180.9479 Ta Tantalum Transition Metal	74 183.84 W Tungsten Transition Metal	75 186.207 Re Rhenium Transition Metal	76 190.2 Os Osmium Transition Metal	77 192.22 Ir Iridium Transition Metal	78 195.08 Pt Platinum Transition Metal	79 196.96... Au Gold Transition Metal	80 200.59 Hg Mercury Transition Metal	81 204.383 Tl Thallium Post-Transition Metal	82 207 Pb Lead Post-Transition Metal	83 208.98... Bi Bismuth Post-Transition Metal	84 208.98... Po Polonium Metalloid	85 209.98... At Astatine Halogen	86 222.01... Rn Radon Noble Gas
87 223.01... Fr Francium Alkali Metal	88 226.02... Ra Radium Alkaline Earth Metal		104 267.1... Rf Rutherfordium Transition Metal	105 268.1... Db Dubnium Transition Metal	106 269.1... Sg Seaborgium Transition Metal	107 270.1... Bh Bohrium Transition Metal	108 269.1... Hs Hassium Transition Metal	109 277.1... Mt Meitnerium Transition Metal	110 282.1... Ds Darmstadtium Transition Metal	111 282.1... Rg Roentgenium Transition Metal	112 286.1... Cn Copernicium Transition Metal	113 286.1... Nh Nihonium Post-Transition Metal	114 290.1... Fl Flerovium Post-Transition Metal	115 290.1... Mc Moscovium Post-Transition Metal	116 293.2... Lv Livermorium Post-Transition Metal	117 294.2... Ts Tennessine Halogen	118 295.2... Og Oganesson Noble Gas
			57 138.9055 La Lanthanum Lanthanide	58 140.116 Ce Cerium Lanthanide	59 140.90... Pr Praseodymium Lanthanide	60 144.24 Nd Neodymium Lanthanide	61 144.91... Pm Promethium Lanthanide	62 150.4 Sm Samarium Lanthanide	63 151.964 Eu Europium Lanthanide	64 157.2 Gd Gadolinium Lanthanide	65 158.92... Tb Terbium Lanthanide	66 162.500 Dy Dysprosium Lanthanide	67 164.93... Ho Holmium Lanthanide	68 167.26 Er Erbium Lanthanide	69 168.93... Tm Thulium Lanthanide	70 173.05 Yb Ytterbium Lanthanide	71 174.9668 Lu Lutetium Lanthanide
			89 227.02... Ac Actinium Actinide	90 232.038 Th Thorium Actinide	91 231.03... Pa Protactinium Actinide	92 238.0289 U Uranium Actinide	93 237.04... Np Neptunium Actinide	94 244.06... Pu Plutonium Actinide	95 243.06... Am Americium Actinide	96 247.07... Cm Curium Actinide	97 247.07... Bk Berkelium Actinide	98 251.07... Cf Californium Actinide	99 252.0830 Es Einsteinium Actinide	100 257.0... Fm Fermium Actinide	101 258.0... Md Mendelevium Actinide	102 259.1... No Nobelium Actinide	103 266.1... Lr Lawrencium Actinide

Izotopi



- Izotopi danega kemičnega elementa imajo **enako vrstno število Z**.
- Razlikujejo pa se po **številu nevtronov** v jedru.

Primer: *Svinec* iz običajne svinčeve rude je sestavljen iz štirih izotopov z atomskimi masami 204, 206, 207 in 208 v sledečih razmerjih: 1.5%, 23.6%, 22.6%, 52.3%.

Povprečna atomska masa svinca je:

$$M_{Pb} = 0.015 \cdot 204 + 0.236 \cdot 206 + 0.226 \cdot 207 + 0.523 \cdot 208 = 207.2$$

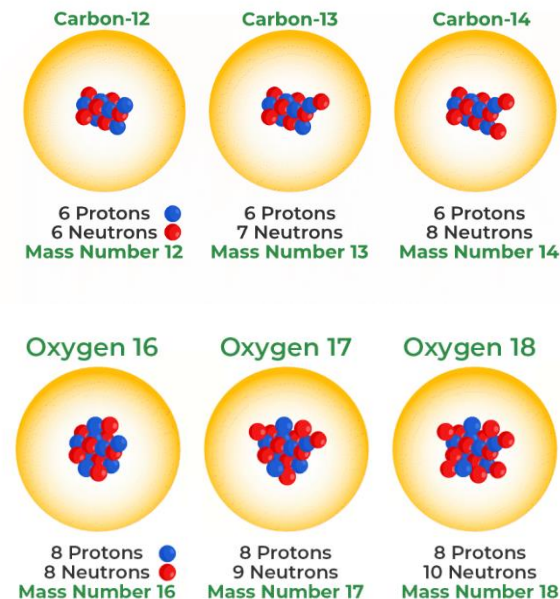
Naravni ogljik: 98.9% C^{12} in 1.1% C^{13} .

Obstaja tudi C^{14} , ki ga je $10^{-14}\%$.

$$A(C^{12}) = 12.00000u$$

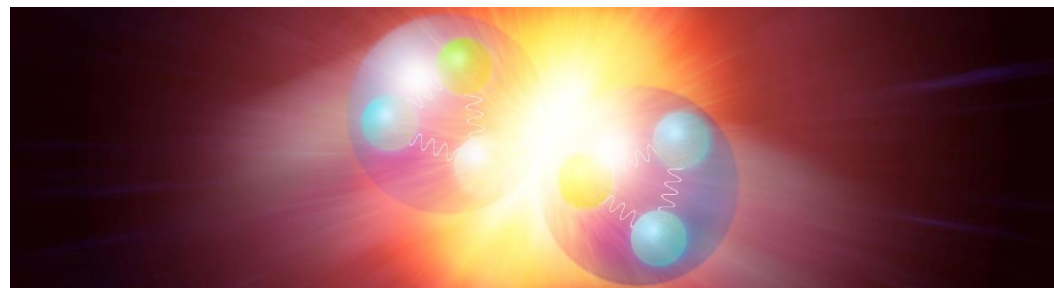
$$\bar{A} = 12.011037u$$

Kisik: 99.76% O^{16} , 0.04% O^{17} , 0.2% O^{18} .



Jedrska sila

- Pozitivno nabiti **protoni v jedru se odbijajo**.
- Jedro skupaj drži **jedrska sila**, ki je zelo močna, a ima doseg le okoli 2 fm.
- V jedrih lahkinih elementov je približno **enako protonov in nevtronov**.
- V jedrih težkih elementov je potreben **presežek nevtronov**.



$$W_{cel} = Zm_p c_0^2 + Nm_n c_0^2 - W_p.$$

Vezavna energija

Masa atomskega jedra je manjša, kot je skupna masa sestavnih delov!

Primer: Vezavna energija devterona je določena z enačbo

$$\Delta m = m_p + m_n - m_d = 0.002388u,$$

$$W = 0.002388c_0^2 u = 0.002388 \cdot 931,48 MeV = 2,22 MeV.$$

Foton gama potemtaka lahko razbije devteron na proton in nevtron le, če je njegova energija večja od 2,22 MeV. Na en nukleon v devteronu odpade specifična vezavna energija 1,11 MeV.

Primer: Vezavna energija jedra ogljikovega izotopa C^{12} : Najprej masni defekt

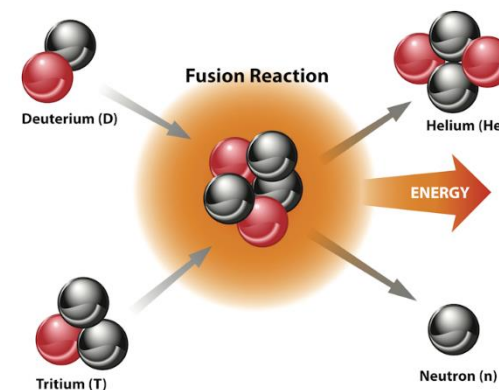
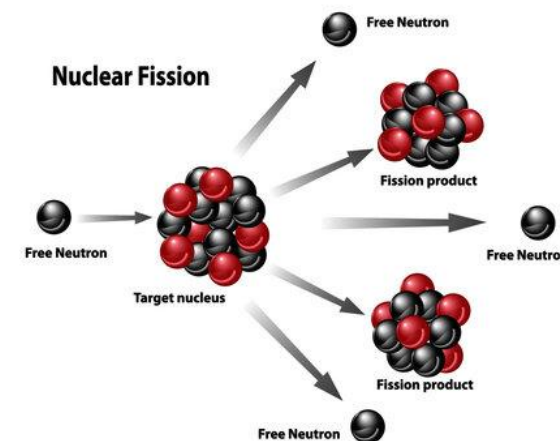
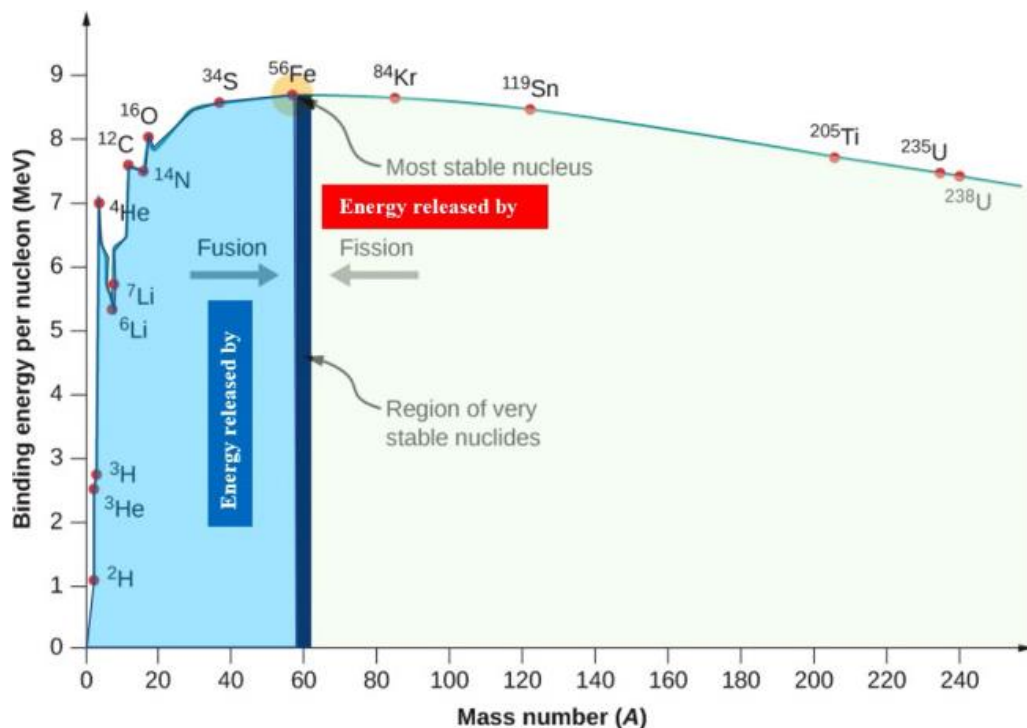
$$\Delta m = 6m_p + 6m_n - m_{C^{12}} = 0.098940u,$$

$$W = 92,2 MeV.$$

Na en nukleon v jedru C^{12} odpade specifična vezavna energija $92,2712 MeV = 7,7 MeV$. To je precej več kot pri devteronu!

What is an
Joule
 $1.60 \cdot 10^{-19} J$
Electron Volt?
eV

Določimo lahko specifično vezavno energijo za vse izotope v naravi:



- Merjenja so pokazala, da je **specifična vezavna energija največja pri $A = 56$ (železo)**.
- Pri lažjih ali težjih elementih je vezavna energija manjša.
- Ti rezultati omogočajo **fuzijo** in **fisijo** jeder.

Radioaktivnost

Stabilno jedro: Nukleoni so v stanjih z najmanjšimi energijami.

Nestabilno jedro: Nukleoni so v višjih energijskih stanjih.

Radioaktivni izotopi: So izotopi z neobstojnimi jedri.

Radioaktivno sevanje: To so fotoni gama ali snovni delci, ki jih oddajajo radioaktivna jedra.

žarki α = helioni $= {}_2\text{He}^4$,

žarki β = elektroni $= e^-$,

žarki γ = fotoni z energijo nekaj MeV.



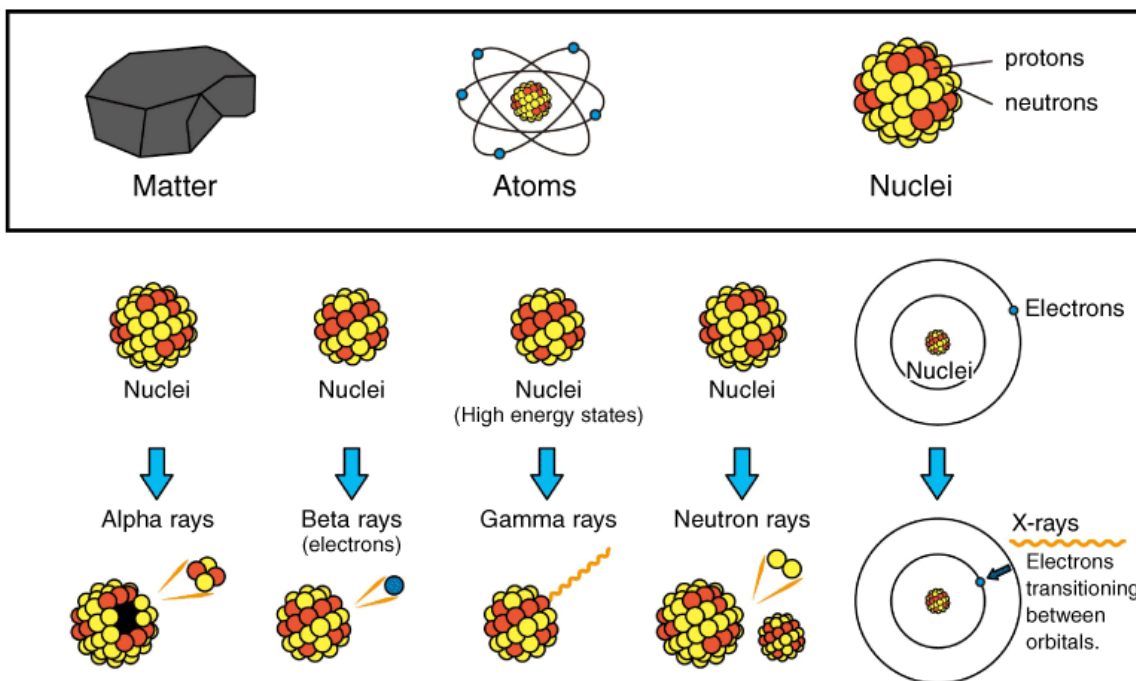
α particle

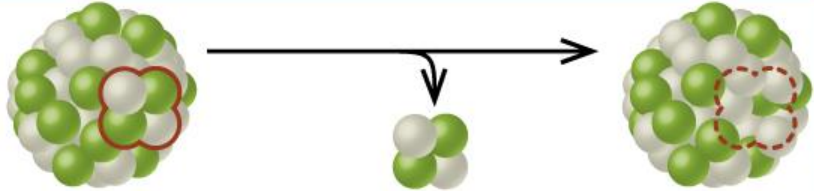
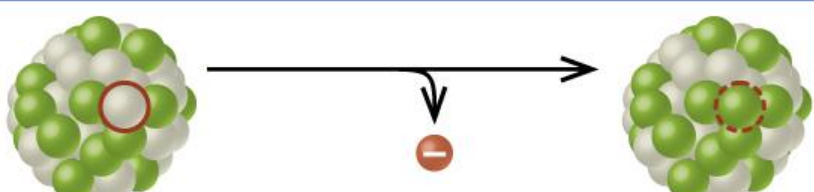
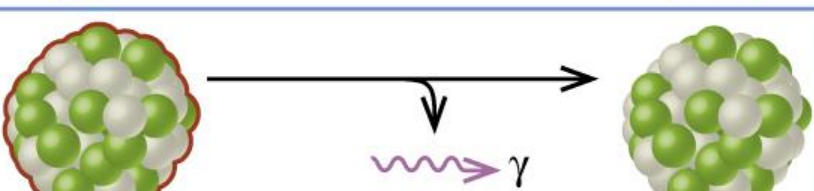
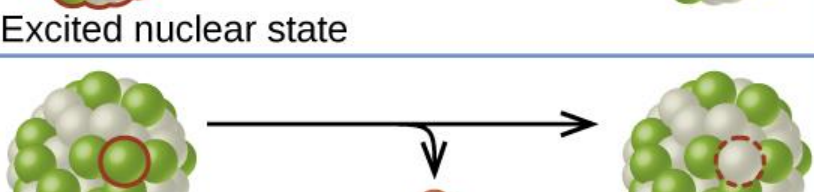
β particle

γ ray



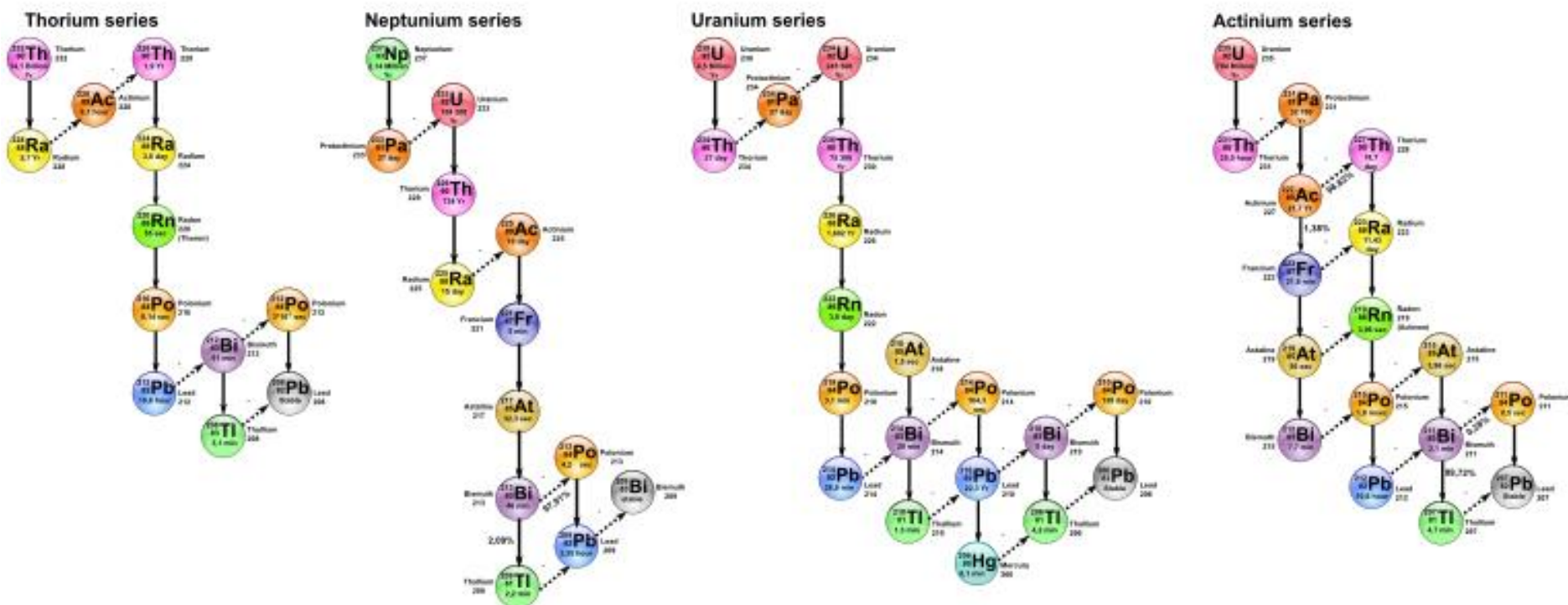
Where is radiation produced?



Type	Nuclear equation	Representation	Change in mass/atomic numbers
Alpha decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: decrease by 4 Z: decrease by 2
Beta decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y$		A: unchanged Z: increase by 1
Gamma decay	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$	 Excited nuclear state	A: unchanged Z: unchanged
Positron emission	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{+1}e + {}^{A}_{Z-1}Y$		A: unchanged Z: decrease by 1
Electron capture	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \gamma$	 X-ray	A: unchanged Z: decrease by 1

Radioaktivne družine

Naravno radioaktivne izotope s konca periodnega sistema lahko razvrstimo v t.i. **radioaktivne družine**. Zadnji člen vsake verige je stabilni izotop svinca ali bizmuta.



Aktivnost

Aktivnost opisuje **hitrost razpadanja** radioaktivnih jeder (Bq – Bacquerel = 1 razpad/s):

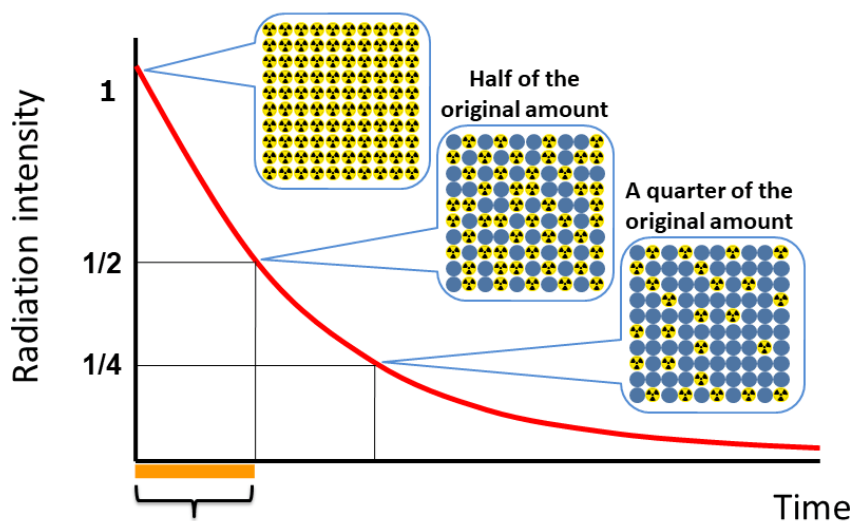
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Razpolovni čas: $t_0 = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Povprečni življenjski čas izotopa: $\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_0}{\ln 2}$

Radioactive
Materials

Half-lives and Radioactive Decay



Time required for the amount of the radionuclides to reduce to half = (physical) half-life

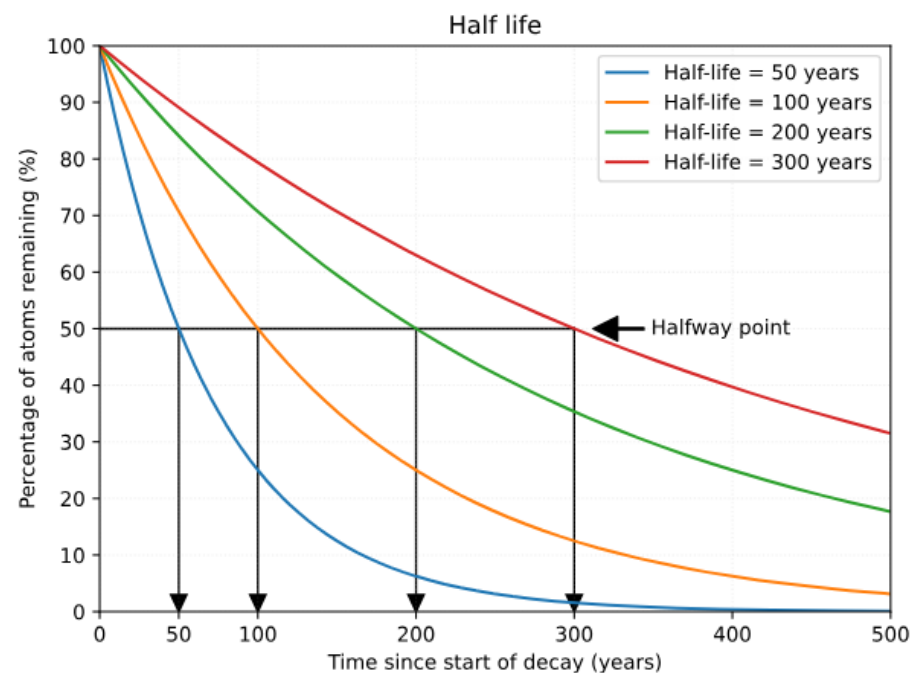


Table 2: Symptoms associated with acute radiation exposure (dose for one day)

Dose (Sv)	Symptoms	Outcome
0-0.25	None	-
0.25 - 1	Some people feel nausea and loss of appetite	Bone marrow damage, lymph nodes and spleen damaged.
1 - 3	Mild to severe nausea, loss of appetite and infection	Same as above, but more severe. Recovery probable, but not assured,
3 - 6	Severe nausea, loss of appetite, plus hemorrhaging, infection, diarrhea, skin peels, and sterility	Death occurs if doses higher than 3.5 Sv are left untreated.
6 - 10	Above symptoms plus impairment of the central nervous system	Death expected
Above 10	Incapacitation	Death

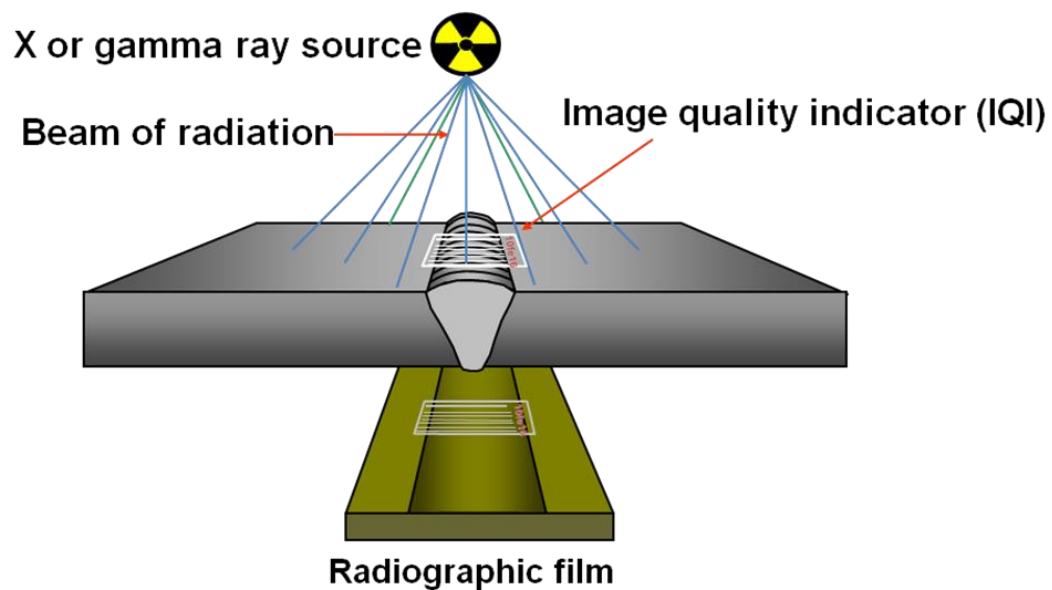
Absorbirana doza je merilo količine ionizirajočega sevanja, ki jo absorbirajo tkiva ali materiali. Izraža se v sivertih (Gy), kjer 1 Gy ustreza absorpciji 1 joula energije na kilogram mase.

Ekvivalentna doza je merilo biološkega učinka ionizirajočega sevanja na človeško tkivo. Izračuna se tako, da se absorbirana doza (v sivertih, Gy) pomnoži s faktorjem, ki upošteva vrsto sevanja in njegovo biološko učinkovitost. Ta faktor, imenovan **faktor kvalitete (Q)**, je odvisen od vrste sevanja (npr. alfa delci, beta delci, gama žarki). Ekvivalentna doza se meri v **sivertih (Sv)** in omogoča primerjavo različnih vrst sevanja glede na njihov učinek na zdravje.

Uporaba radioaktivnega sevanja v tehnologiji/industriji

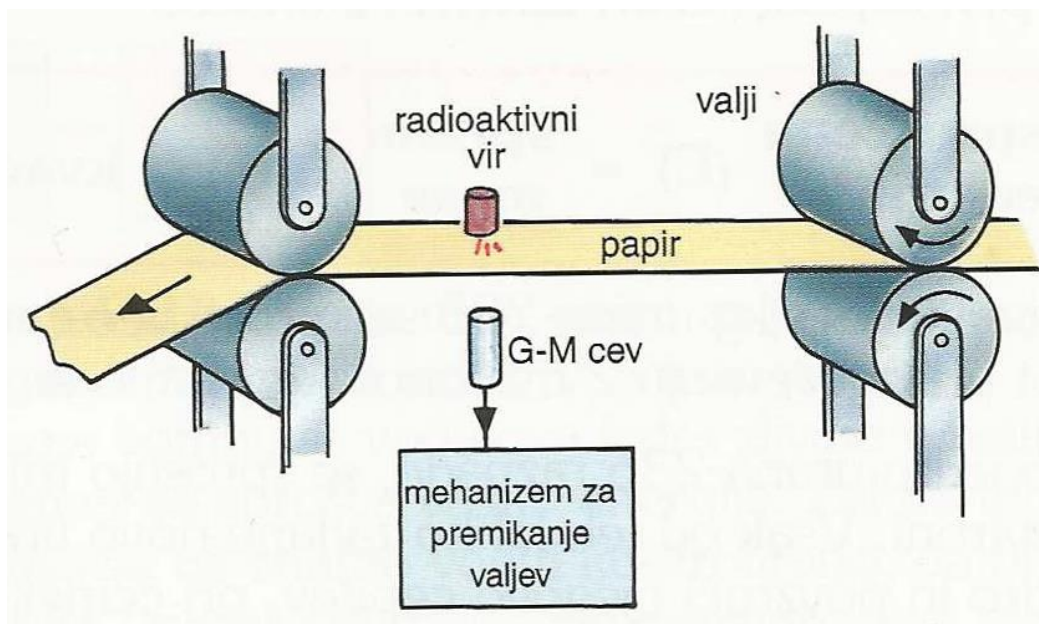
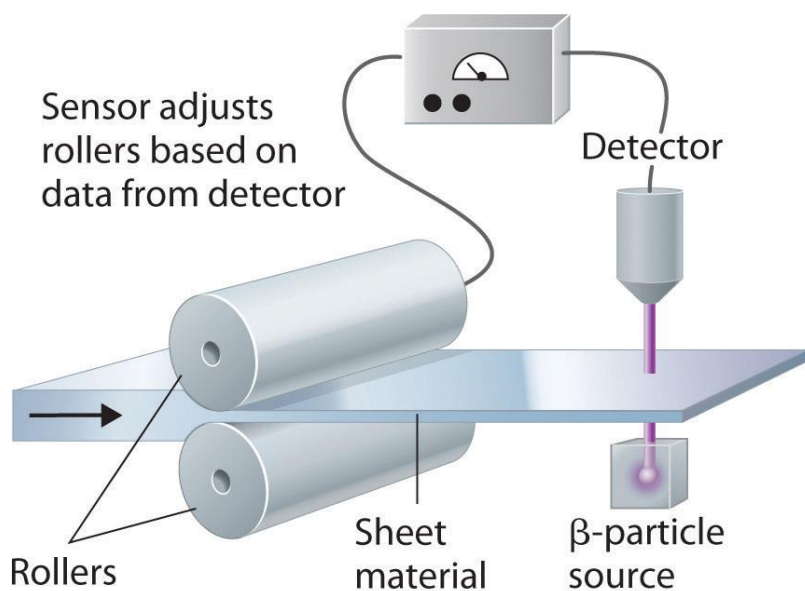
1. Radiografija

- **Industrijska radiografija:** Uporablja se za preverjanje kakovosti materialov in varov z rentgenskim ali gama sevanjem. To omogoča odkrivanje notranjih napak brez uničenja preizkušanca.



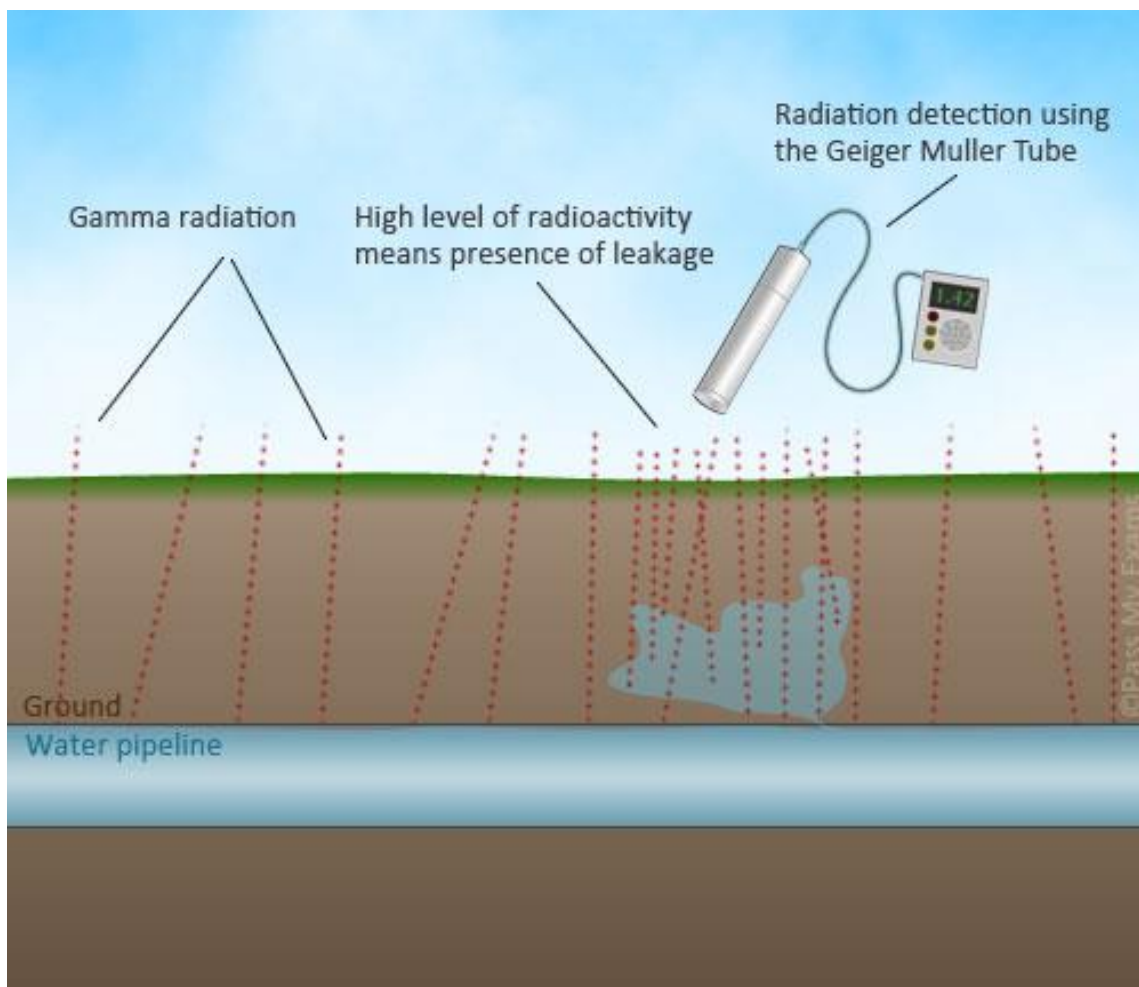
2. Merjenje debeline in gostote

- **Merjenje debeline:** V industriji papirja, plastike, kovin in drugih materialov se radioaktivno sevanje uporablja za merjenje debeline materialov med proizvodnjo.
- **Merjenje gostote:** V naftni in plinski industriji se uporablja za merjenje gostote vrtn, kar pomaga pri določanju vsebnosti in lastnosti podzemnih rezervoarjev.



3. Radioaktivni sledilci

- **Radioaktivni sledilci** se uporabljajo za sledenje gibanja snovi v industrijskih procesih, kar pomaga optimizirati procese in odkrivati puščanja.



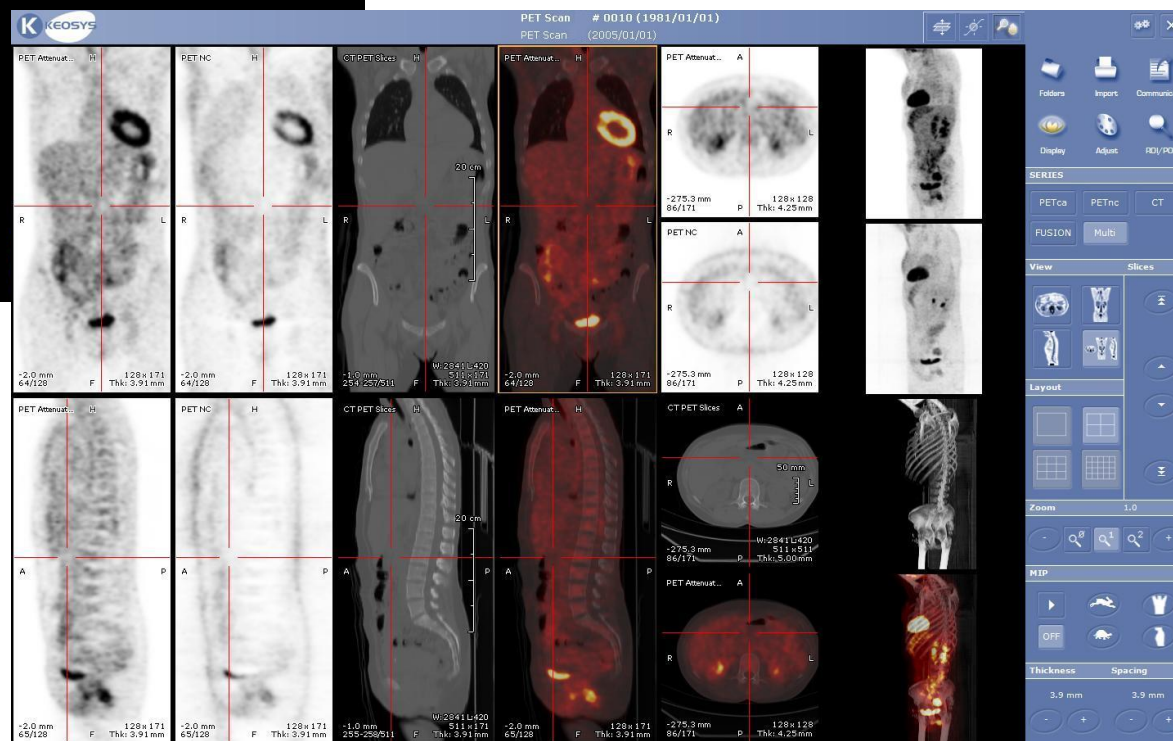
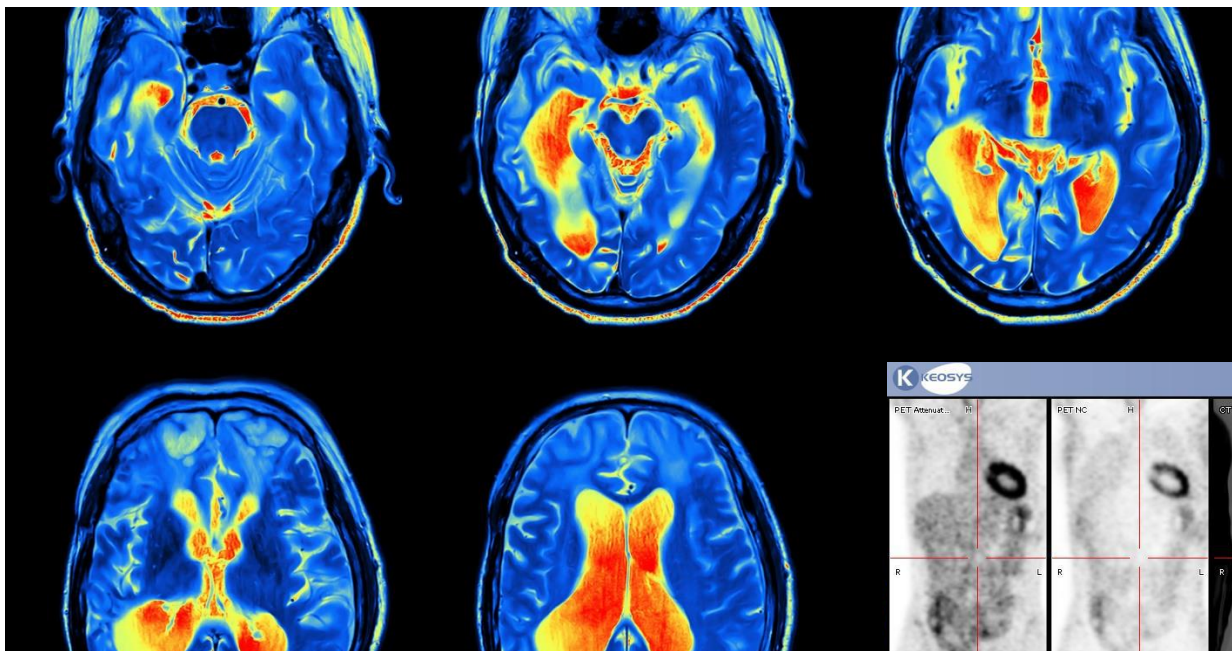
4. Sterilizacija

Radioaktivno sevanje se uporablja za **sterilizacijo medicinskih pripomočkov**, farmacevtskih izdelkov in živil, saj učinkovito uničuje mikroorganizme.

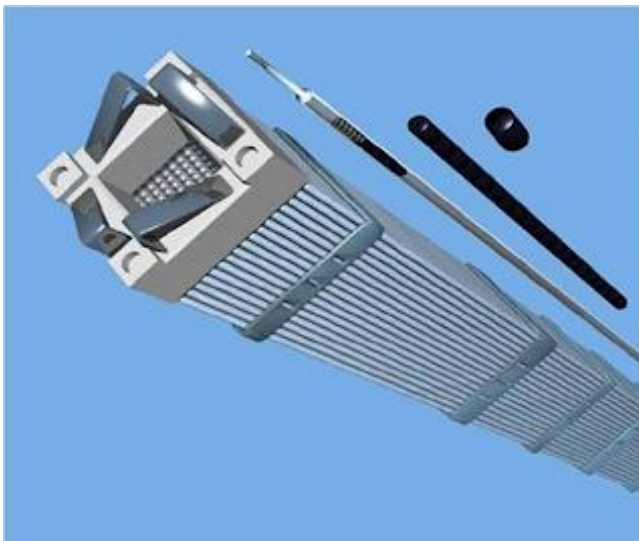


5. Merjenje in raziskave v znanosti; nuklearna medicina

Radioaktivne izotope se uporablja **v znanstvenih raziskavah** za preučevanje različnih procesov, kot so biološki in kemijski procesi, ter za določanje starosti materialov (**radiometrično datiranje**).

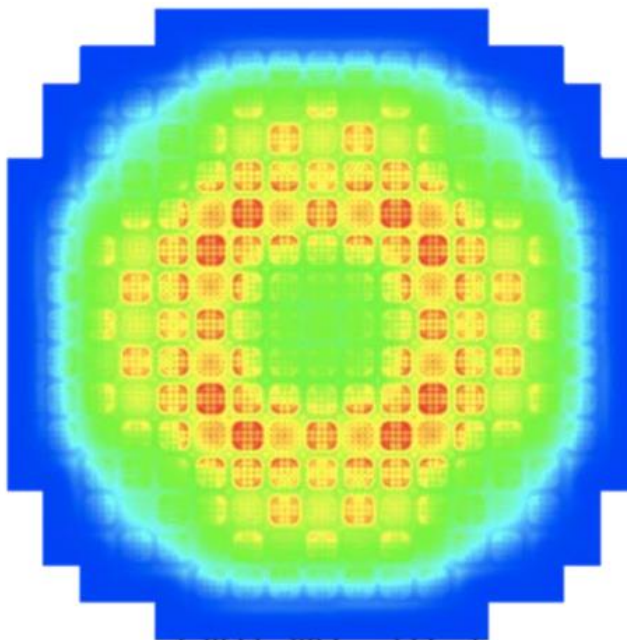


Jedrske elektrarne (Jedrsko gorivo)



A Reality Check

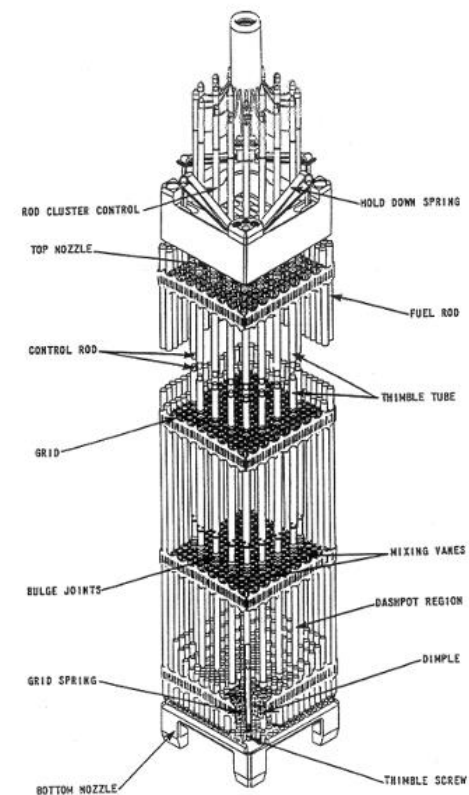
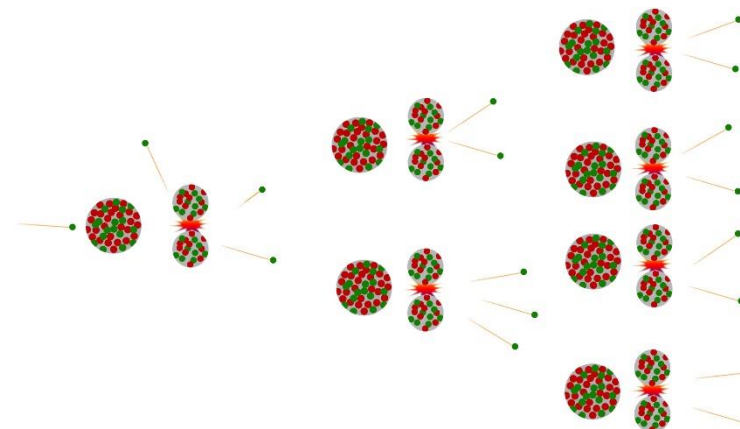
Fuel assembly and reactor core design are complex engineering challenges. We've simplified things a bit in our cartoon.



Jedrsko gorivo se nahaja
v palicah znotraj **reaktorja**.

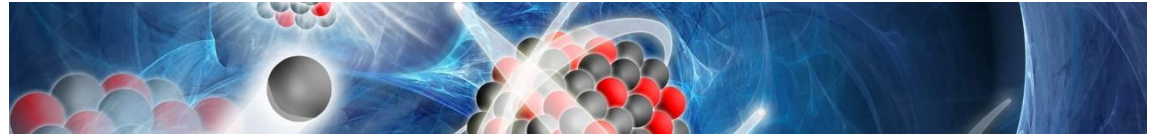
Zaradi **radioaktivnih razpadov** se
močno segreje.

V reaktorju poteka **verižna
reakcija**.



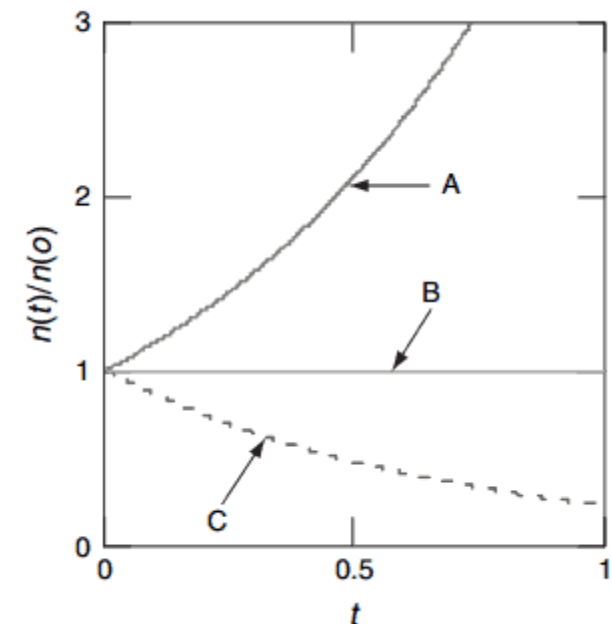
Reactor Fuel Assembly

Kontroliranje reaktorja



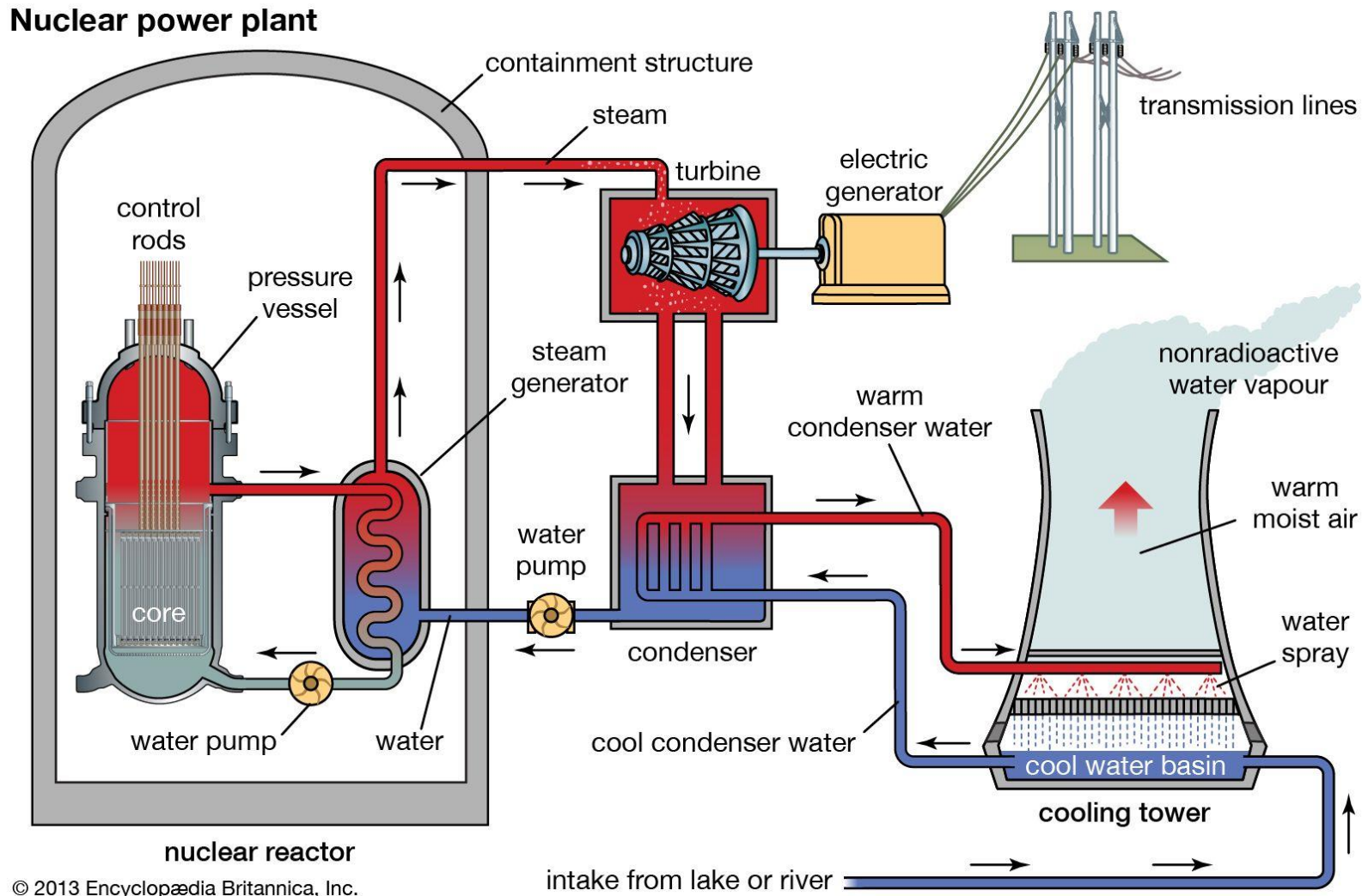
Reaktor se lahko nahaja v podkritičnem, kritičnem in nadkritičnem stanju

- **Kontrolne palice** so narejene iz materialov, ki močno absorbirajo nevtrone, kot so kadmij, bor ali hafnij.
- Z vstavitvijo kontrolnih palic v jedro reaktorja se zmanjša število prostih nevtronov in s tem zmanjša hitrost verižne reakcije. Z izvlekom kontrolnih palic se reakcija pospeši.
- Operaterji lahko natančno prilagajajo **pozicijo kontrolnih palic**, da uravnavajo moč reaktorja.
- **Moderatorji**, kot so težka voda (D_2O) ali grafit, upočasnjujejo nevtrone, da postanejo bolj učinkoviti pri povzročanju cepitev jedra urana ali plutonija.
- S spreminjanjem količine moderatorja ali njegove temperature operaterji lahko vplivajo na **hitrost verižne reakcije**.
- **Hladilni sistem** odstranjuje toploto iz reaktorja, kar preprečuje pregrevanje in omogoča proizvodnjo pare za pogon turbin.
- **Pretok hladilne tekočine** se prilagaja glede na potrebe. Običajno se uporabljajo voda, težka voda ali plini (kot je helij) kot hladilna sredstva.



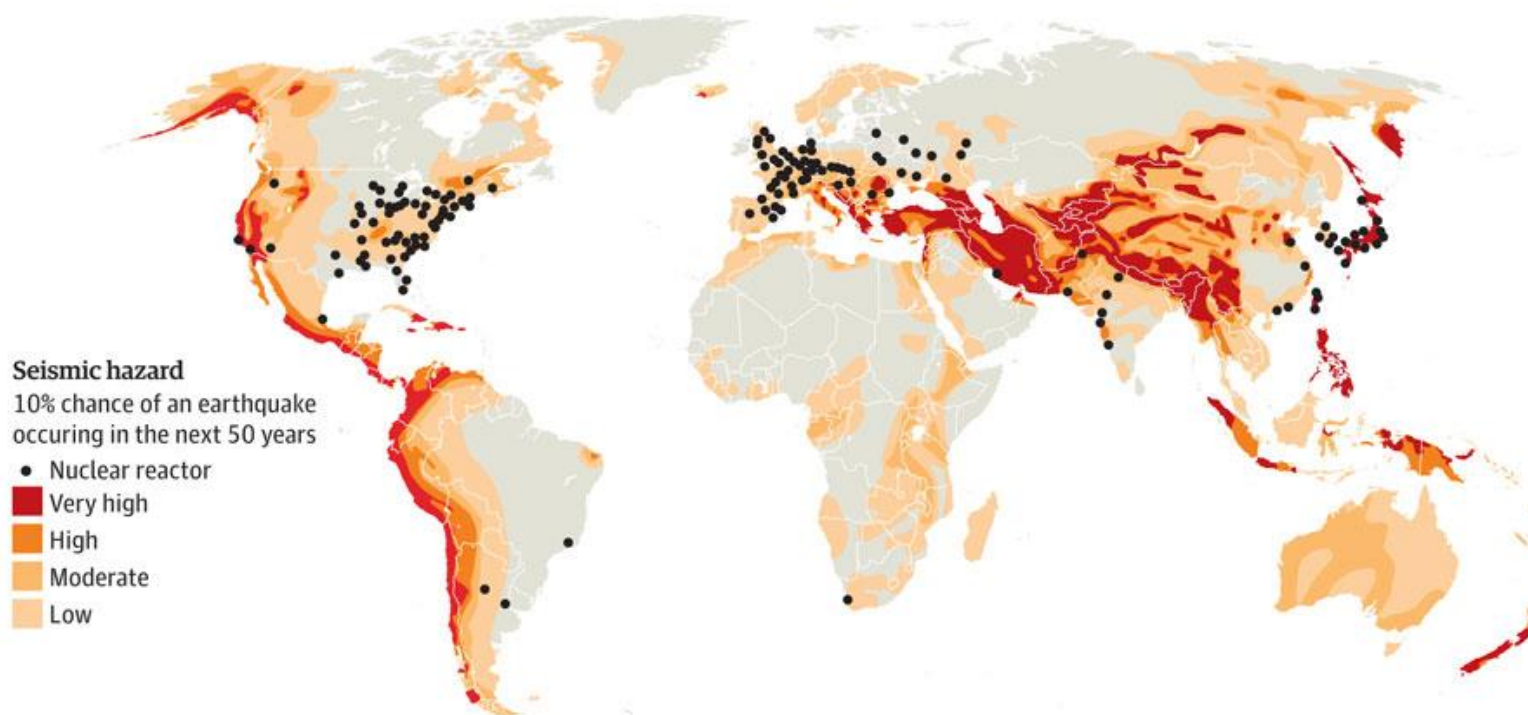
Jedrske elektrarne

Nuclear power plant



Globalna porazdelitev jedrskih elektrarn

Nuclear plants are built in earthquake zones around the world

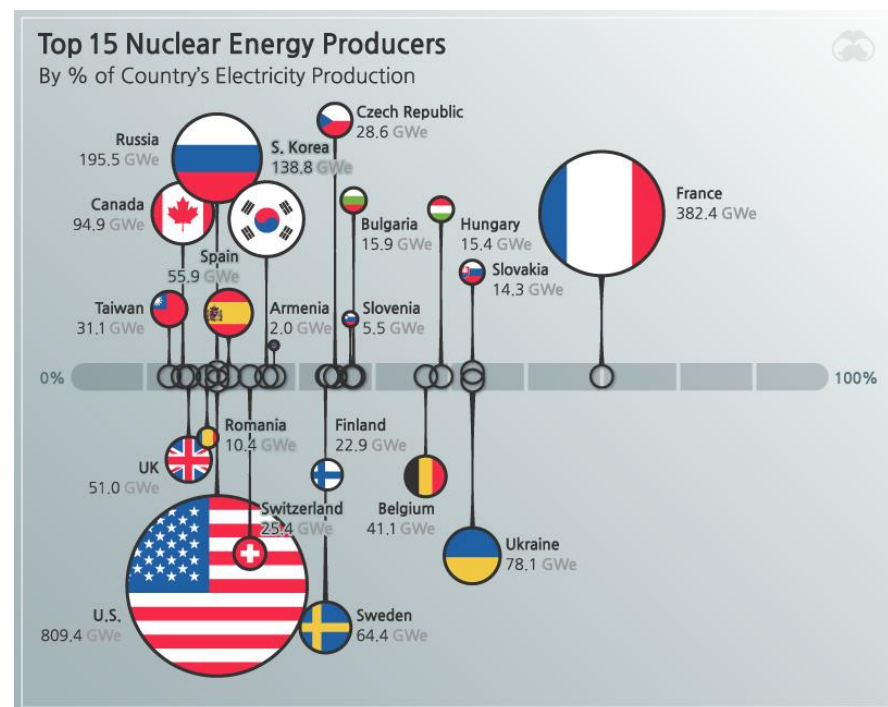
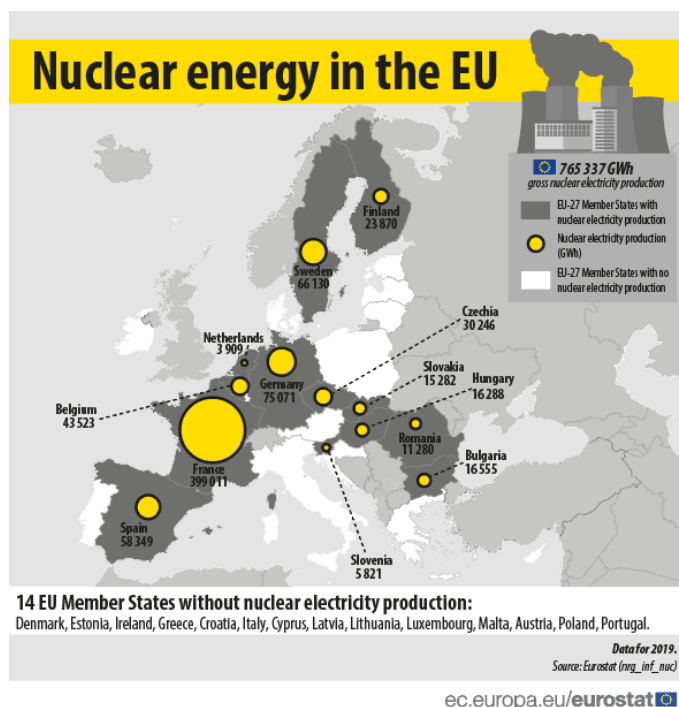


- Svetovna proizvodnja električne energije z jedrskimi reaktorji je leta 2022 dosegla približno 2,487 teravatnih ur (TWh).
- Jedrska energija trenutno predstavlja približno 9,2 % globalne proizvodnje električne energije.
- Združene države, Kitajska, Francija in Rusija so med največjimi proizvajalci jedrske energije. Projekcije kažejo, da se bo zmogljivost jedrskih elektrarn še povečevala, saj mnoge države vlagajo v nadgradnjo in širitev jedrskih zmogljivosti.

Med največje proizvajalce jedrske energije spadajo naslednje države:

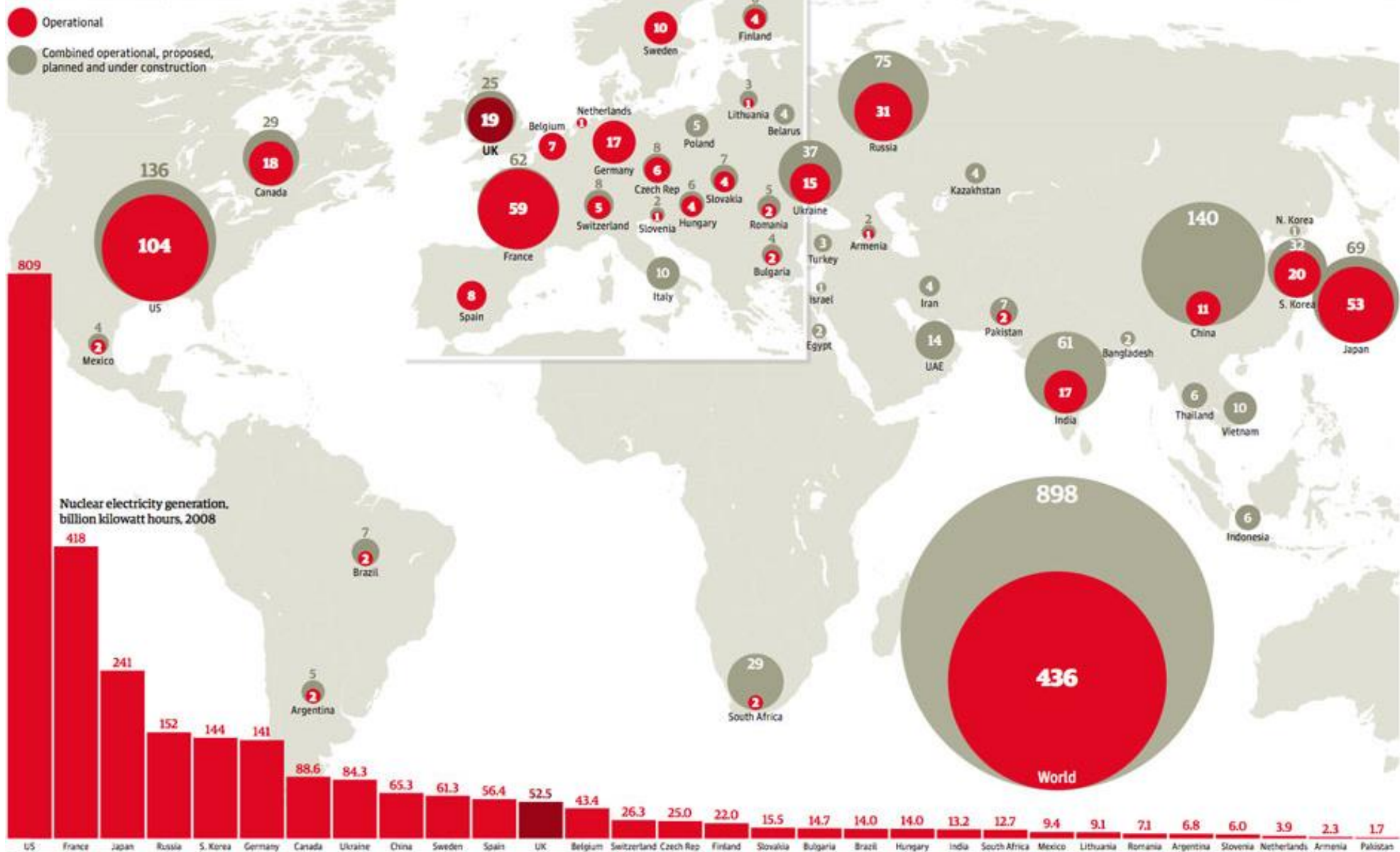
- **Združene države Amerike:** Največji svetovni proizvajalec jedrske energije.
- **Francija:** Druga največja proizvajalka, kjer jedrska energija predstavlja velik delež skupne proizvodnje električne energije.
- **Kitajska:** Hitro povečuje svoje jedrske zmogljivosti.
- **Rusija:** Pomemben proizvajalec z obsežnimi jedrskimi zmogljivostmi.
- **Japonska:** Kljub zmanjšanju po nesreči v Fukušimi še vedno pomemben proizvajalec.

Te države prispevajo k večini svetovne proizvodnje jedrske energije.



The world's nuclear reactors, October 2009

SOURCE: WORLD NUCLEAR ASSOCIATION

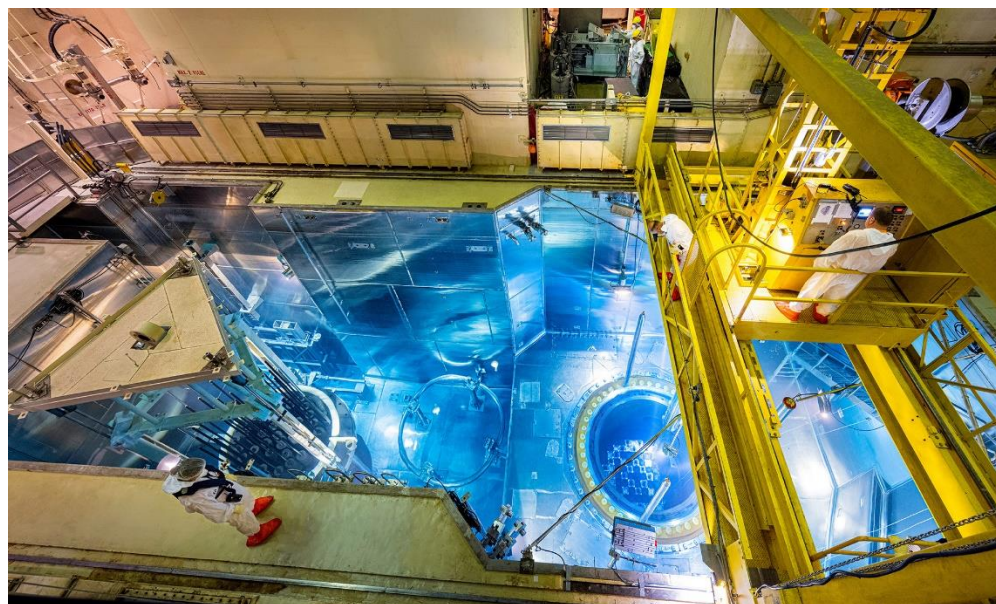


Jedrska elektrarna Krško

Jedrska elektrarna Krško (NEK) je edina jedrska elektrarna v Sloveniji. Tukaj so njeni osnovni parametri:

- Lokacija: Krško, Slovenija
- Tip reaktorja: Tlačnovodni reaktor (PWR)
- Zmogljivost: 696 MW električne moči
- Gorivo: Oboje obogaten uran (U-235)
- Začetek obratovanja: 1981
- Operaterji: Nuklearna elektrarna Krško, d.o.o.
- Lastništvo: Skupno lastništvo med Slovenijo in Hrvaško

NEK igra ključno vlogo pri zagotavljanju stabilne oskrbe z električno energijo za obe državi.



Nevarnosti jedrske energije

Jedrska energija prinaša številne koristi, vendar so z njo povezane tudi določene nevarnosti:

- **Radioaktivni odpadki:** Visoko radioaktivni odpadki zahtevajo varno in dolgotrajno shranjevanje.
- **Jedrske nesreče:** Nesreče, kot so Černobil, Fukušima in Three Mile Island, imajo lahko katastrofalne posledice za okolje in zdravje ljudi.
- **Jedrska proliferacija:** Tehnologija jedrskega goriva lahko vodi do širjenja jedrskega orožja.
- **Visoki stroški:** Gradnja in vzdrževanje jedrskih elektrarn sta draga.

Ti dejavniki zahtevajo skrbno upravljanje in regulacijo jedrske energije za zmanjšanje tveganj.



Prednosti jedrske energije

Jedrska energija ima več prednosti pred drugimi viri energije:

- **Nizke emisije CO₂:** Proizvaja zelo malo ogljikovega dioksida v primerjavi z fosilnimi gorivi, kar pomaga zmanjševati podnebne spremembe.
- **Zanesljivost:** Jedrske elektrarne lahko neprekinjeno proizvajajo energijo, saj niso odvisne od vremenskih razmer, kot so sonce in veter.
- **Visoka energetska gostota:** Majhna količina jedrskega goriva lahko proizvede ogromno energije, kar je učinkovito in zmanjšuje potrebe po transportu in skladiščenju.
- **Stabilnost cen:** Stroški proizvodnje jedrske energije so relativno stabilni in niso odvisni od cen goriv na svetovnih trgih.

Te prednosti omogočajo, da jedrska energija igra pomembno vlogo pri zagotavljanju čiste, zanesljive in trajnostne energije.

