



## 4. előadás

# Az atomreaktorok fizikai, technikai és radiológiai alapjai

2019-2020. őszi félév

Dr. Yamaji Bogdán, Prof. Csom Gyula

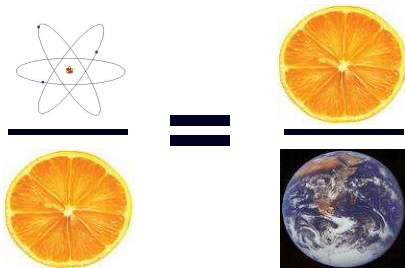
BME Nukleáris Technikai Intézet

## Tartalom

- Magfizikai alapok
- Reaktorteknikai alapok, reaktortípusok
- Atomerőművek felépítése
- Atomerőmű típusok
- Az atomreaktorok, illetve atomerőművek, mint a radioaktív kibocsátások forrásai
- Különleges reaktorok
- A VVER-440 típus (a paksi atomerőmű blokkjai)

## Magfizikai alapok

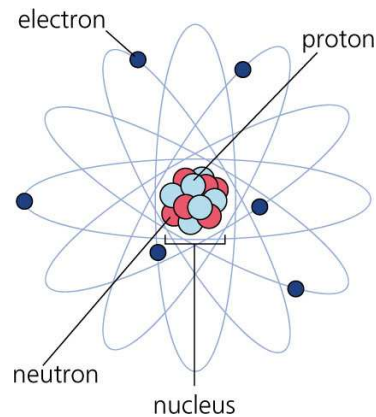
Atom: mag + elektronfelhő



$$10^{-10} \text{ m} = 0,0000000001 \text{ m}$$

Bohr modell (1913)

Atommag: protonok+neutronok



$$10^{-14} \text{ m} = 0,00000000000001 \text{ m}$$

## Magfizikai alapok

### Rendszám:

protonok száma



kémiai jellemzők

### Tömegszám:

protonok + neutronok száma



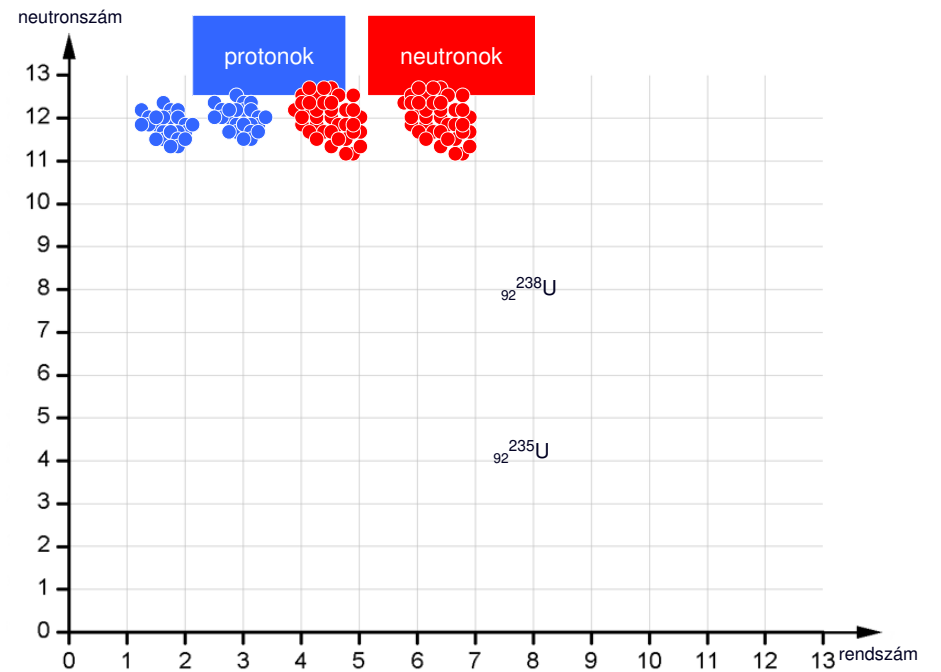
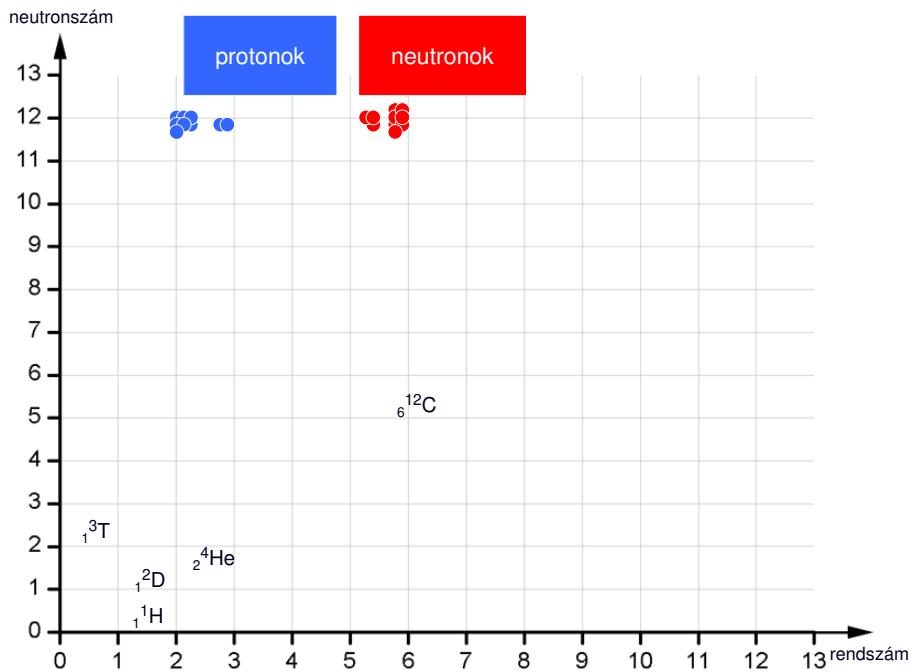
a rendszámmal együtt meghatározzák: nukleáris jellemzők

### Izotóp:

azonos rendszám,  
de eltérő tömegszám

${}^1_1\text{H}$ : hidrogén (1 proton, 0 neutron)

${}^2_1\text{H}$ : deutérium (1 proton, 1 neutron)

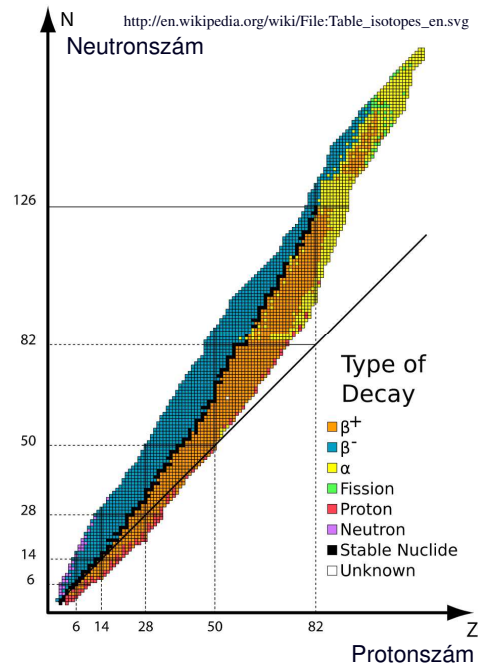


## Magfizikai alapok

- A stabil izotópok atommagjának összetétele:
  - N-Z görbe
  - Többlet neutronok
  - Neutronhiány
  - Radioaktivitás
    - az izotóp instabil

A neutron- és a protonszám összefüggése a stabil izotópok magjában (N-Z-görbe)

**Az önfenntartó láncreakció feltétele:** a fenti görbe alakja miatt a maghasadásnál szabad neutronok keletkeznek



## Magfizikai alapok

- Tömeg-energia ekvivalencia (Einstein, 1905)

$$E = mc^2 \rightarrow \frac{E}{m} = c^2$$

m: tömeg, E: energia, c: vákuumbéli fénysebesség

- A mag összetétele: nukleonok (proton, neutron):  $Z+N = A$ ,  ${}^A_ZX$
- Tömegdefektus:**  $\Delta M = [Zm_p + Nm_n] - M > 0$

A mag egy kötött rendszer, energiára van szükség ahhoz, hogy egymástól eltávolítsuk az nukleonokat.

A szükséges energia azonos egy bizonyos tömeggel a tömeg-energia ekvivalencia szerint.

- A nukleonok kötési energiája

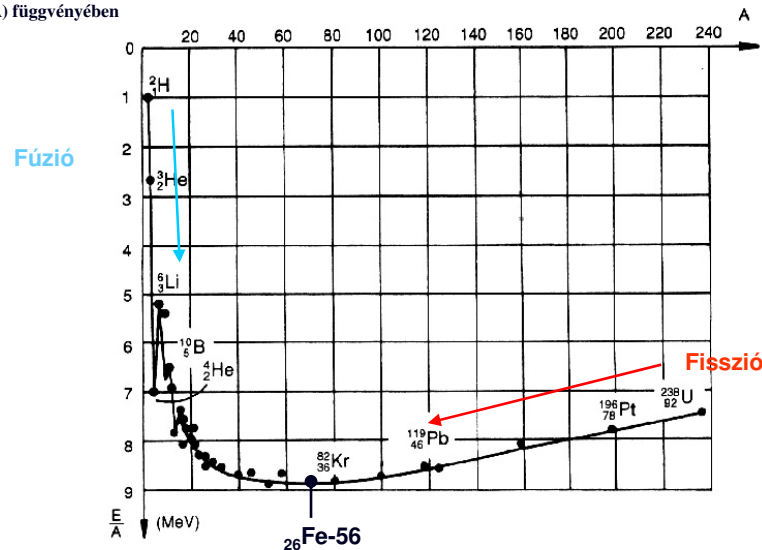
$$E_k = \Delta M c^2$$

- Fajlagos kötési energia a magban és az elektronhéjon

$$e_k = \frac{E_k}{A} \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}} \right] \gg e_{k,\text{elektronhéj}}$$

# Magfizikai alapok

A fajlagos kötési energia a tömegszám(A) függvényében



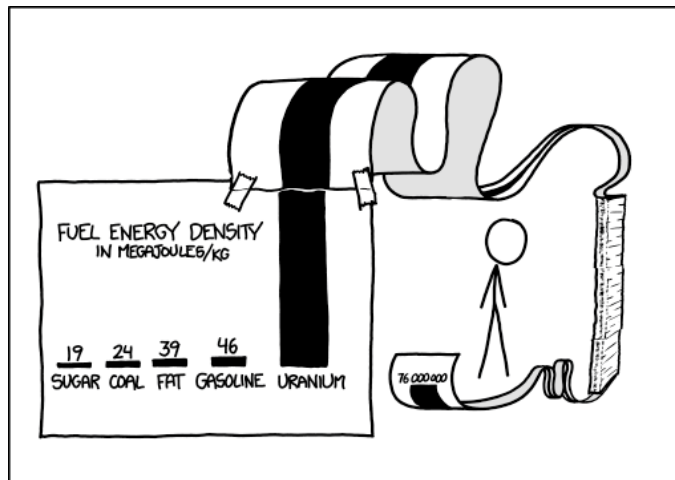
# 1. MAGFIZIKAI ALAPOK - 2

## MAGENERGIA-HASZNOSÍTÁS ELVI LEHETŐSÉGEI

- **Magfúzió**  
 $D+D = {}^4\text{He}$  reakciónál:  $E_f \cong 24 \text{ MeV/fúzió}$  (lehetne, de...) helyette lehetséges reakciók:
  - ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,25 \text{ MeV}$
  - ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ MeV}$
- **Maghasadás**  
 $E_k \cong 236 \cdot 0,9 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}} \cong 200 \text{ MeV/hasadás}$ 
  - Energetikai lehetőségek
  - Feltételek ahhoz, hogy a reakciók valóban le is játszódjanak
    - Magfúziónál: igen magas hőmérséklet
    - Maghasadásnál: Gerjesztés: neutronnal  
Spontán (nagy A-nál)
- **Kémiai reakció** (pl.  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ )  
 $E_k \cong 10\text{-}30 \text{ eV/reakció}$

# Magfizikai alapok

<http://xkcd.com/1162/>



SCIENCE TIP: LOG SCALES ARE FOR QUITTERS WHO CAN'T FIND ENOUGH PAPER TO MAKE THEIR POINT PROPERLY.

# Magfizikai alapok

- **Maghasadás felfedezése:**  
 Otto Hahn and Fritz Strassmann, Lise Meitner, 1938-39:  
 Neutronnal végzett besugárzás hatására az urán atommag két kisebb magra esik szét



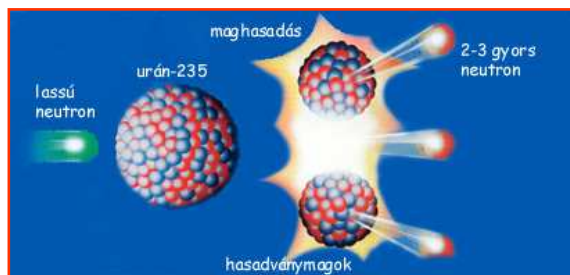
Deutsches Museum  
<http://www.flickr.com/photos/brewbooks/176055587/>



ADVENTURES INSIDE THE ATOM, General Electric, National Archives (1948)  
[http://www.osti.gov/manhattan-project-history/Resources/adventures\\_atom.htm](http://www.osti.gov/manhattan-project-history/Resources/adventures_atom.htm)

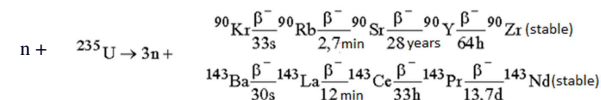
## MAGFIZIKAI ALAPOK

### MAGHASADÁS

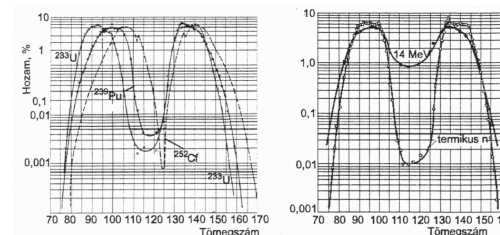


- Prompt neutronok (energia szerinti eloszlás)
- Késő neutronok (energia szerinti eloszlás)
- Hasadási termékek (hasadványok)

## Magfizikai alapok



- Keletkezési gyakoriság



1.22. ábra. A  ${}^{235}\text{U}$  és  ${}^{239}\text{Pu}$  gerjesztett hasadásánál és a  ${}^{235}\text{U}$  spontán hasadásánál keletkező hasadványok keletkezési gyakorisága

1.23. ábra. A  ${}^{235}\text{U}$  termikus ill. 14 MeV-es neutronok által kiváltott hasadásánál keletkező hasadványok keletkezési gyakorisága

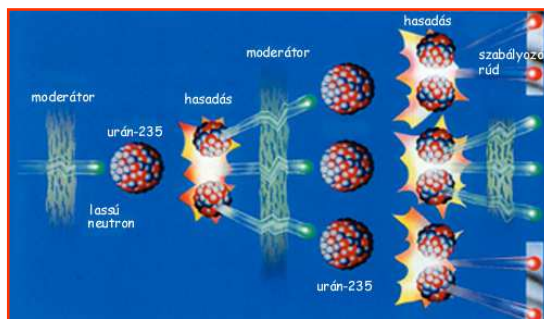
### HASADÁSI TERMEKEK RADIOAKTIVAK (neutronfelesleg)!

## 1. MAGFIZIKAI ALAPOK - 6

### A NUKLEÁRIS LÁNCREAKCIÓ

(Szilárd Leó szabadalmi bejelentése, 1935.)

- Moderátor
- Szabályozórúd
- Neutronciklus
- Ciklusidő
- Sokszorozási tényező:  $k = \frac{n_{i+1}}{n_i}$
- Reaktivitás:  $\rho = \frac{k-1}{k}$
- Kritikuság:  $k = 1, \rho = 0$
- Szuperkritikuság:  $k > 1, \rho > 0$
- Szubkritikuság:  $k < 1, \rho < 0$



## Magfizikai alapok

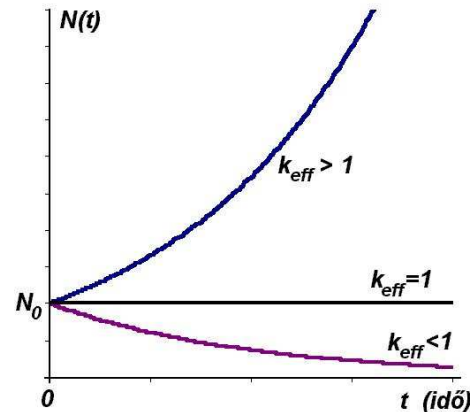
négyfaktor formula:  $k_{\infty} = \eta \times f \times p \times \epsilon$

- $\eta$ : termikus neutronhozam: keletkező neutronok száma befogásonként
- $f$ : termikus hasznosítási tényező: annak a valószínűsége, hogy egy elnyelt neutron az üzemanyagban nyelődik el
- $p$ : rezonancia-kikerülési valószínűség: annak a valószínűsége, hogy egy hasadásból származó neutron elnyelődés nélkül lassul termikus energiára
- $\epsilon$ : gyorsasítási tényező: összes hasadások száma/termikus hasadások száma



## Magfizikai alapok

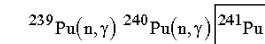
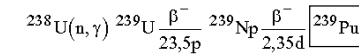
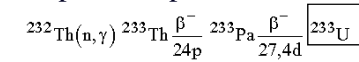
- **Kritikusság:**  $k = 1, \rho = 0$   $N(t) = N_0 = \text{állandó}$
- **Szuperkritikus:**  $k > 1, \rho > 0$   $N(t)$  exponenciálisan növekvő neutronszám
- **Szubkritikus:**  $k < 1, \rho < 0$   $N(t)$  exponenciálisan csökkenő



## Magfizikai alapok

### MAGÁTALAKÍTÁS

- Izotóptermelés
- Új hasadóképes izotópok előállítás



- Hosszú életű radioizotópok átalakítása (transzmutáció)
  - Hasadási termékek: pl.  ${}^{99}\text{Tc}$  ( $2,1 \times 10^5$  év),  ${}^{129}\text{I}$  ( $1,6 \times 10^7$  év)
  - Aktinidák: Domináns aktinidák (Pu-izotópok)  
Másodlagos aktinidák: pl.  ${}^{237}\text{Np}$  ( $2,14 \times 10^6$  év),  ${}^{241}\text{Am}$  (433 év),  ${}^{245}\text{Cm}$  (9300 év)
- **Következmény:** növeli a hasznosítási hatásfokot radioaktív izotópokat (transzuránokat) termel

## Reaktortechnikai alapok, reaktortípusok

- **Atomreaktor definíciója:**  
Az a műszaki létesítmény, amely biztosítja a maghasadáson alapuló önfenntartó láncreakció hosszantartó szabályozható megvalósulását.
- **Atomreaktorok felépítése:**
  - Termikus reaktorok (hasznosítási hatásfok kb. 0,5-0,6%)
  - Gyorsreaktorok (hasznosítási hatásfok kb. 10-50%)
  - Intermediér reaktorok
- **Sokszorozási tényező**
- **Üzemanyag, fűtőelem** (U,  $\text{UO}_2$ , MOX, UC)
- **Moderátor** ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , grafit)
- **Hűtőközeg** ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , He, folyékony fém)
- **Aktív zóna**
- **Kritikus tömeg**
- **Kritikus térfogat**

## Reaktortechnikai alapok, reaktortípusok

### CSOPORTOSÍTÁS A RENDELTETÉS ALAPJÁN

- Szubkritikus rendszerek
- Kritikus rendszerek („Zéró reaktorok”)
- Kutatóreaktorok (pl. Budapest kutatóreaktor, 1959-)
- Forrásreaktorok
- Anyagvizsgáló reaktorok
- Oktatási célú reaktorok (pl. BME Oktatóreaktor, 1971-)
- **Energetikai reaktorok** (pl. paksi atomerőmű reaktorai, 1982-)

# Reaktortechnikai alapok, reaktortípusok

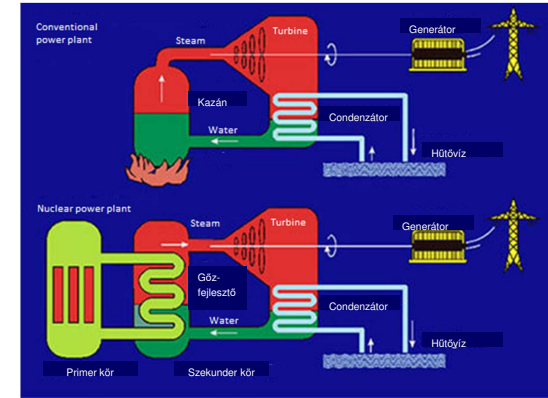
## Energetikai reaktorok típusai

- LWR: **light water reactor – könnyűvízes reaktorok**
  - PWR (**pressurized water reactor**): nyomottvízes reaktor
    - pl. paksi VVER reaktorok
  - BWR (**boiling water reactor**): forralóvízes reaktor
- HWR (CANDU): nehézvízes reaktor (moderátor és hűtőközeg)
- RBMK (Csernobil)
- GGR (including Magnox reactors): gázhűtésű, grafit moderálású
- AGR: továbbfejlesztett gázhűtésű
- HTGR: magas hőmérsékletű gázhűtésű
- THTR: tórium (üzemanyagú) magashőmérsékletű (gázhűtésű)
- FBR (**fast breeder reactors**): gyorsnevelő reaktorok
  - LMFBR liquid metal cooled – folyékony fém hűtésű
  - GCFR gas cooled - gázhűtésű
- Sólavadékos reaktorok (homogén)
- Gyorsítóval hajtott subkritikus rendszerek

# Egyszerűsített atomerőművi séma

## ATOMERŐMŰ ÉS A KONVENCIONÁLIS ERŐMŰ ELVI FELÉPÍTÉSÉNEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

Konvencionális erőmű gőzturbinával

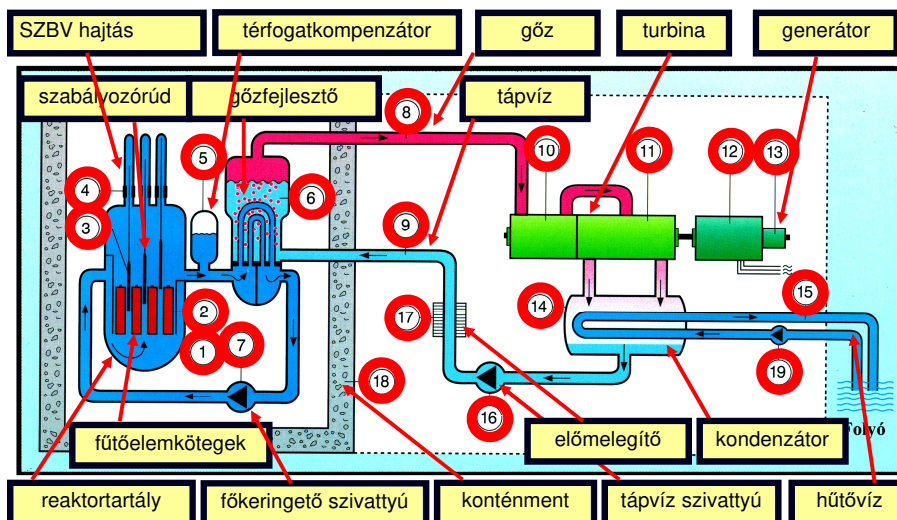


Atomreaktorra alapuló gőzkörfolyamat

A konkrét felépítés alapvetően az atomreaktor típusától függ

# Atomerőmű típusok

## PWR-rel szerelt kétkörös atomerőmű

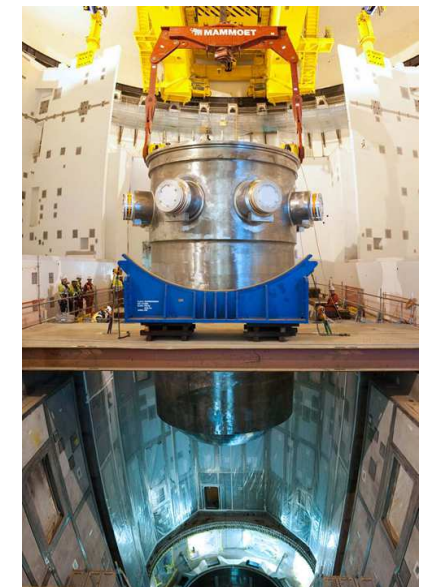


# Atomerőmű típusok

EPR, Olkiluoto-3

## PWR- Pressurized Water Reactor

San Onofre, USA



## Atomerőmű típusok

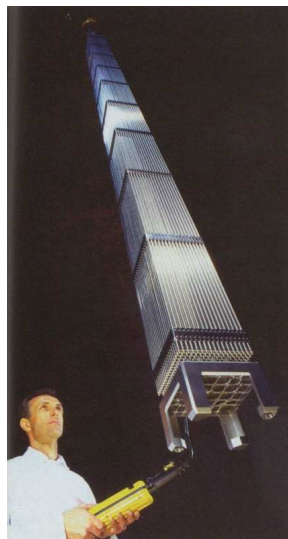
### PWR- Pressurized Water Reactor

- Primerköri jellemzők (p,T)
- Szekunderköri jellemzők (p,T)
- Dúsítás
- Erőmű hatásfok: ~32-34%
- Biztonság
- Gazdaságosság



Fenntartható fejlődés és atomenergia

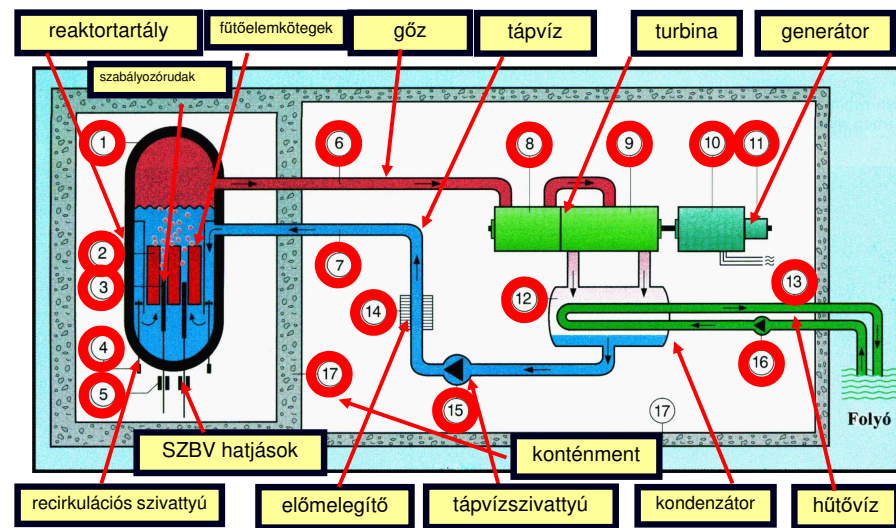
Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI



25

## Atomerőmű típusok

### BWR-rel szerelt egykörös atomerőmű



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

26

## Atomerőmű típusok

### BWR - Boiling Water Reactor

Forsmark, Sweden



Fukushima  
Daiichi Unit 1

Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI



27

## Atomerőmű típusok

### BWR - Boiling Water Reactor

Fűtőelemköteg



Fenntartható fejlődés és atomenergia

Dr. Yamaji Bogdán, BME NTI

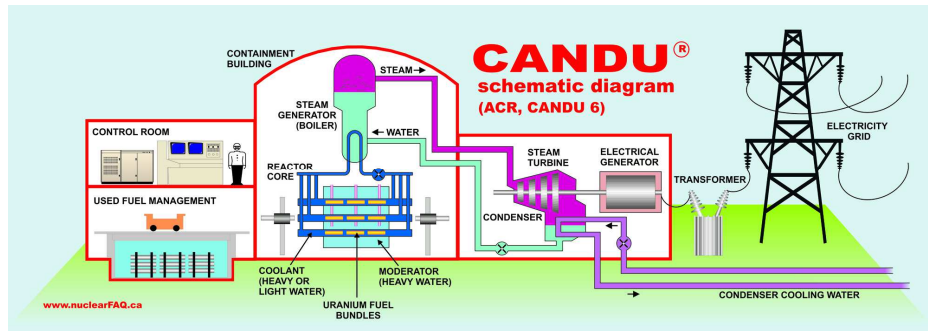
GNF  
GE 14



28

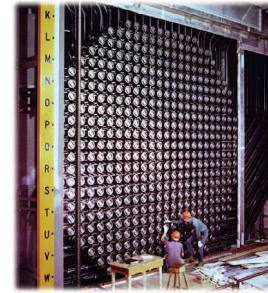
# Atomerőmű típusok

## Atomerőmű nehézvizses reaktorral (HWR)

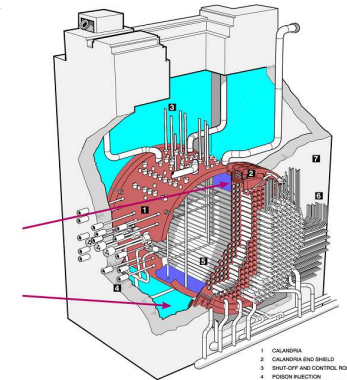


# Atomerőmű típusok

## HWR- Heavy Water Reactor



Reactor face (during construction)



1 CALANDRIA  
2 CALANDRIA END SHIELD  
3 SHUT-OFF AND CONTROL RODS  
4 MODERATOR PUMP/STATION  
5 FUEL CHANNEL ASSEMBLIES  
6 PRESSURE VESSEL  
7 VAPOR

CANDU 6 Reactor Assembly



JUNE 1999



Quinshan III, China

# Atomerőmű típusok

## HWR- Heavy Water Reactor

üzemanyag

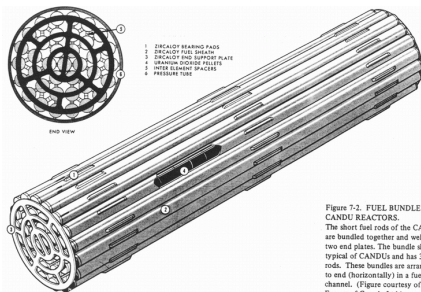
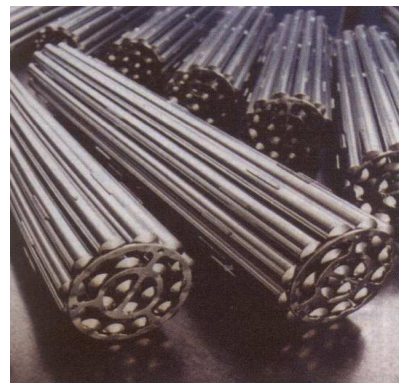


Figure 7-2. FUEL BUNDLE FOR CANDU REACTORS. The short fuel ends of the CANDU are bundled together and welded to two end plates. The bundle shown is typical of CANDUs and has 37 fuel rods. These bundles are arranged end to end (horizontally) in a fuel channel. (Figure courtesy of Atomic Energy of Canada Ltd.)

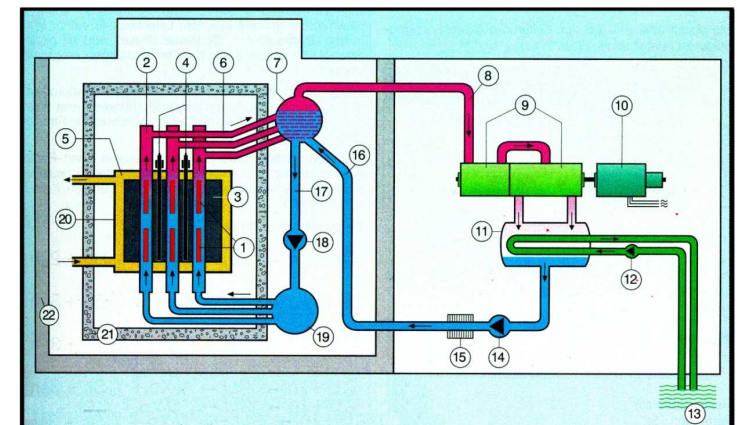


# Atomerőmű típusok

## RBMK- grafit moderátorú, könnyűvíz hűtőközegű

nagy méret  
nyomottcsöves  
grafit moderátor  
forralóvízes  
Nincs inherens  
biztonság!  
(Csernobil)

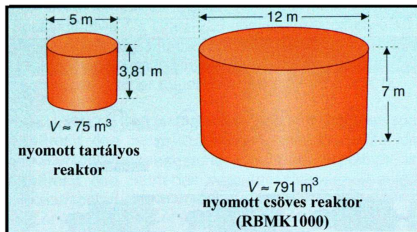
1 Üzemanyag (UO <sub>2</sub> )	9 Turbina	17 Recirkulált víz
2 Csatorna	10 Generátor	18 Főkeringető szivattyú
3 Grafit moderátor	11 Kondenzátor	19 Elosztó
4 Szabályozórúd	12 Hűtőszivattyú	20 Acél köpeny
5 Védőgázrendszer	13 Folyó	21 Beton szerkezet
6 Víz/gőz	14 Tápvízszivattyú	22 Reaktorépület
7 Gőzszeparátor dob	15 Tápvíz előmelegítő	
8 Gőz a turbinára	16 Tápvíz	





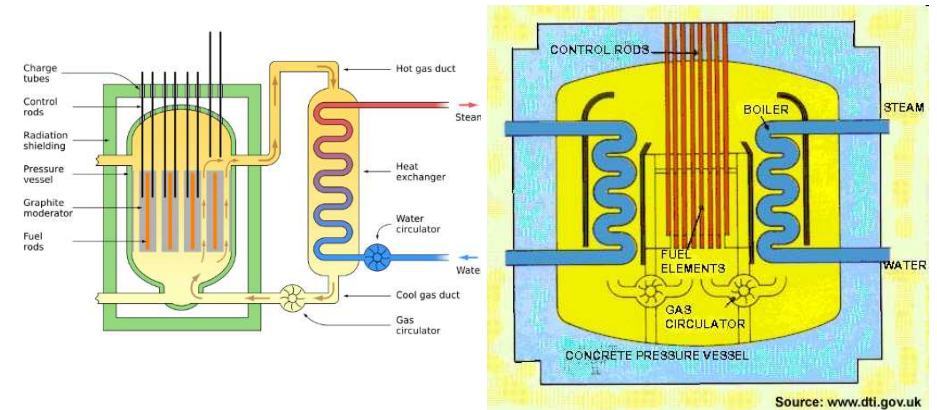
# Atomerőmű típusok

## RBMK- grafit moderátorú, könnyűvíz hűtőközegű



# Atomerőmű típusok

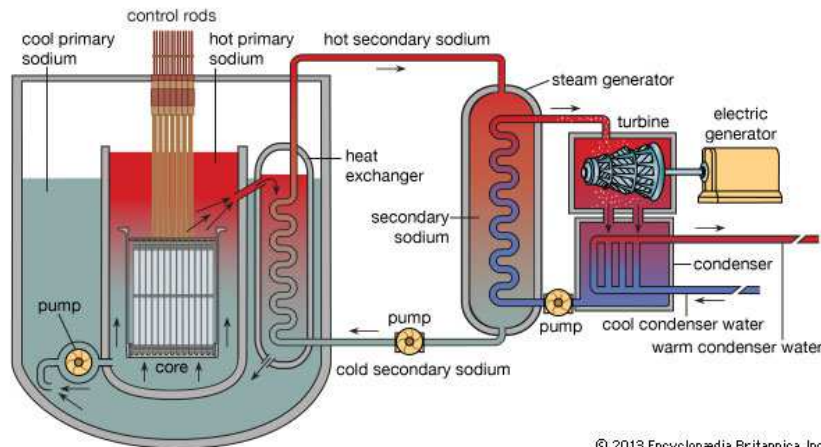
## Grafit moderátoros, gázhűtésű reaktorok: Magnox, AGR



# Atomerőmű típusok

## Háromkörös, folyékonyfém (nátrium) hűtésű gyorsreaktor

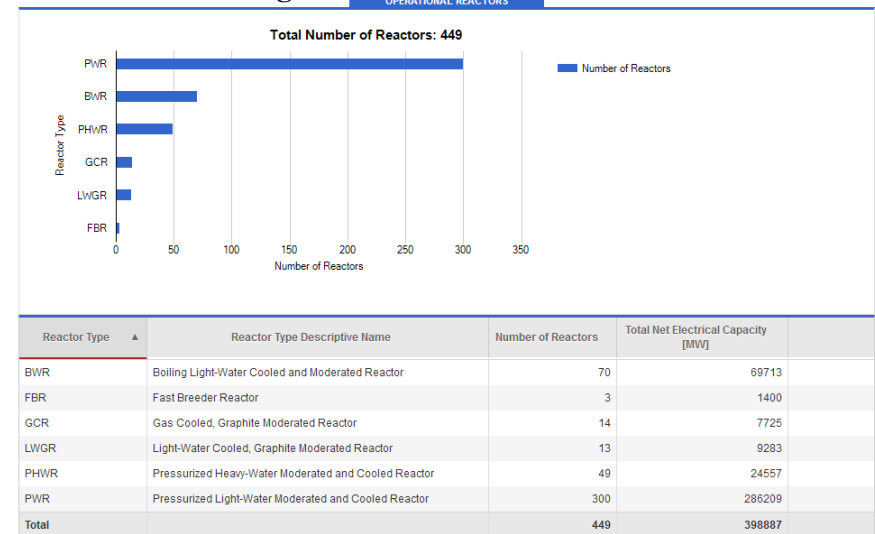
### Sodium-cooled liquid-metal reactor



© 2013 Encyclopædia Britannica, Inc.

# Atomerőmű típusok

## Atomerőművek a világon



<https://pris.iaea.org/pris/> - IAEA Power Reactor Information System (PRIS), 2019.09.23.

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

### Radioaktív izotópok keletkezése az atomreaktorban:

#### a) Hasadási termékek

Primer hasadási termékek (igen nagy neutronfelesleggel rendelkeznek)

Szekunder hasadási termékek (hasadási termékek radioaktív bomlása révén keletkeznek)

Radioaktivitás magfizikai oka: A stabil izotópok N-Z görbéje

#### b) Transzurán izotópok (aktinidák)

$Z > 92$  ... Ilyen természetes izotópok nincsenek

Keletkezésük:  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  magreakciók

Reakcióban keletkező radioizotópok bomlástermékei

#### c) Aktivációs termékek

Keletkezésük: Általában  $(n, \gamma)$  reakcióval szerkezeti anyagokban, hűtőközegben és a hűtőközeg szennyező komponenseiben (pl. korróziós termékekben)

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

### Hasadási termékek

Kb. 300 fajta radioizotóp keletkezik ezen a módon (nem elhanyagolható mennyiségben)

Vannak: a) Nagyon rövid felezési idejük:  $T_{1/2} < 50$  nap

b) Rövid felezési idejük:  $50 \text{ nap} < T_{1/2} < 1-2 \text{ év}$

c) Közepes felezési idejük:  $1-2 \text{ év} < T_{1/2} < 30 \text{ év}$

d) Hosszú felezési idejük:  $30 \text{ év} < T_{1/2} < 10-100 \text{ millió év}$

e) Nagyon hosszú felezési idejük:  $T_{1/2} > 10-100 \text{ millió év}$

Környezeti szennyezőként nem jelentős csoportok:

a) Nagyon gyorsan lebomlanak még az atomerőművön belül (kivéve az atomerőmű-balesetet)

b) A nagyon kicsi bomlási állandó miatt elhanyagolható az aktivitásuk

A fűtőelemeken belül koncentrálnak

Környezetbe juthatnak: fűtőelem inhermetikusságon keresztüli kiszivárgás (hűtőközegbe), baleset közbeni fűtőelem-meghibásodáskor, radioaktív hulladékként

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

### Hasadási termékek jellemzői (PWR-ek) közepes v. hosszú felezési idő

Izotóp	Termelt mennyiség <sup>(a)</sup> , kg/GW <sub>e</sub> év	felezési idő, év	Bomlás módja
<sup>79</sup> Se	0,158	$6,5 \times 10^4$	$\beta^-$
<sup>85</sup> Kr	0,75	10,76	$\beta^-$
<sup>90</sup> Sr	15,3	28,1	$\beta^-$
<sup>93</sup> Zr	23,1	$1,5 \times 10^6$	$\beta^-$
<sup>94</sup> Nb		$2,0 \times 10^4$	$\beta^-$
<sup>99</sup> Tc	26,6	$2,1 \times 10^5$	$\beta^-$
<sup>107</sup> Pd	6,8	$7,0 \times 10^6$	$\beta^-$
<sup>113m</sup> Cd		13,6	$\beta^-$
<sup>126</sup> Sn	0,69	$1,0 \times 10^5$	$\beta^-$
<sup>129</sup> I	5,8	$1,7 \times 10^7$	$\beta^-$
<sup>135</sup> Cs	12,5	$2,3 \times 10^6$	$\beta^-$
<sup>137</sup> Cs	35,8	30,1	$\beta^-$
<sup>151</sup> Sm		87	$\beta^-$

<sup>(a)</sup> UO<sub>2</sub>, kiégés: 45-50 GWnap/t, 5 év hűtés után

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

### Transzurán izotópok (aktinidák)

Csoportjai: Plutónium izotópok: <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu

Másodlagos aktinidák:

Neptúnium izotópok: különösen <sup>237</sup>Np

Amerícium izotópok: <sup>241</sup>Am, <sup>242</sup>Am, <sup>242m</sup>Am, <sup>243</sup>Am

Kúrium izotópok: <sup>243</sup>Cm, <sup>244</sup>Cm, <sup>245</sup>Cm, <sup>246</sup>Cm

Egyéb transzuránok: Jelentőségük elhanyagolható (pl. <sup>252</sup>Cf)

A fűtőelemeken belül koncentrálnak

Jelentőségük energetikai szempontból is nagy

(különösen a Pu izotópoké)

radioaktív hulladékok részeként

Környezetbe juthatnak:

- fűtőelem inhermetikusságon keresztüli kiszivárgás (hűtőközegbe)

- baleset közbeni fűtőelem-meghibásodáskor

- radioaktív hulladékként

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

PWR-ekben lévő, illetve keletkező fontosabb közepes és hosszú életű aktinidák fő jellemzői

Izotóp	Termelt mennyiség <sup>(1)</sup> (kg/GWeév)	Felezési idő (év)	Bomlási mód
<sup>233</sup> U		1,59·10 <sup>5</sup>	
<sup>235</sup> U		7,04·10 <sup>8</sup>	α
<sup>236</sup> U		2,34·10 <sup>7</sup>	
<sup>238</sup> U		4,47·10 <sup>9</sup>	α
<sup>237</sup> Np	15,6	2,14·10 <sup>6</sup>	α
<sup>238</sup> Pu	7,46	87,7	α, sf
<sup>239</sup> Pu	125,3	24,3·10 <sup>3</sup>	α
<sup>240</sup> Pu	60,8	6,56·10 <sup>3</sup>	α, sf
<sup>241</sup> Pu	26,3	13,2	α, β <sup>-</sup>
<sup>242</sup> Pu	17,6	3,74·10 <sup>5</sup>	α, sf
<sup>241</sup> Am	9,3	433	α
<sup>242</sup> Am		0,004	β <sup>-</sup>
<sup>242m</sup> Am	0,016	141	α
<sup>243</sup> Am	3,5	7,36·10 <sup>3</sup>	α
<sup>243</sup> Cm	0,012	30	α, sf
<sup>244</sup> Cm	1,557	18,10	α, sf
<sup>245</sup> Cm	0,075	8,50·10 <sup>3</sup>	α, sf
<sup>246</sup> Cm	0,1	4,73·10 <sup>3</sup>	α, sf

<sup>(1)</sup> UO<sub>2</sub> üzemanyag, 45-50 MWnap/kg kiégetés, 5 év hűtés után. (Csak a jelentősebb mennyiségek vannak feltüntetve.)

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

A tipikus PWR-ekben keletkező másodlagos aktinidák közelítő mennyiségi adatai

Reaktortípus	PWR	PWR	PWR	PWR
Üzemanyagtípus	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	MOX	MOX
Kiégetési szint (MWnap/kg)	33	60	33	60
Pihentetési idő (év)	5	5	3	3
Másodlagos aktinidák tömege (kg/év/GWe)	22,2	26,3	77,9	78

**MOX: Mixed Oxide üzemanyag: UO<sub>2</sub> és PuO<sub>2</sub>**

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

### Aktivációs termékek

**Forrásai:** Neutron-magreakciók

- A reaktorban lévő neutronsugárzásnak kitett szerkezeti elemek és eszközök (fűtőelem-burkolat, tartó rácsok, távtartók, aknafalak, reaktortartály, termoelemek, neutrondetektorok, vezetősövek, biológiai védelmi beton stb.) felaktiválódása főleg (n,γ) reakcióval
- Hűtőközeg alapanyagának (pl. H<sub>2</sub>O-ban lévő hidrogén- és oxigénatomok) felaktiválódása
- Hűtőközegben oldott szennyezők (sók, korróziós termékek) felaktiválódása

**Kikerülésük a környezetbe:**

A hűtőközeg közvetítésével kijutnak a primerkörbe és annak berendezéseiben felületi radioaktív elszennyeződést okoznak. Szivárgásokon keresztül egy kisebb részük környezetbe juthat. Radioaktív hulladékként

## Atomerőművi radioaktív kibocsátások

**Fontosabb aktivációs termékek (példák):**

Trícium ( <sup>3</sup> H):	T <sub>1/2</sub> = 12,6 év
Fe-55:	T <sub>1/2</sub> = 2,6 év
Co-60:	T <sub>1/2</sub> = 5,3 év
Ni-63:	T <sub>1/2</sub> = 92,1 év

**Elsőrendű feladat:**

A keletkezett radioizotópok kijutásának megakadályozása  
A radioaktív hulladékok biztonságos elszigetelése (végleges elhelyezése).

## Főbb ellenőrző kérdések

1. Írja fel a tömeg és az energia ekvivalenciáját kifejező összefüggést!
2. Mekkora az atommag és az atom átmérőjének nagyságrendje?
3. Mekkora az atommag és az atom térfogatarányának nagyságrendje?
4. Mekkora az atommag és az elektronhéj tömegarányának nagyságrendje?
5. Mik az izotópok?
6. Milyen nukleonokból épül fel az atommag?
7. Mi a tömegszám?
8. Mi a tömegdefektus? Írja fel a meghatározását megadó összefüggést!
9. Mi a kötési energia? Írja fel kapcsolatát a tömegdefektussal!
10. Mi a fajlagos kötési energia? Írja fel meghatározó összefüggését!
11. Mekkora az atommagra vonatkozó fajlagos kötési energia nagyságrendje?
12. Mekkora az elektronhéjba kötött elektron fajlagos kötési energiájának nagyságrendje?
13. Rajzolja fel a fajlagos kötési energia tömegszám-függését?
14. A magenergia-hasznosítás elvi lehetőségei az  $e_k = f(A)$  diagram alapján.
15. Magfúzióként felszabaduló energia.
16. Maghasadásonként felszabaduló energia.
17. A magfúzió megvalósulásának feltétele!
18. Rajzolja fel a stabil izotópok N-Z görbéjét!
19. Mi a neutrontöbblet?
20. Mi a neutronfelesleg?
21. Mi a neutronhiány?

22. Mik a prompt neutronok?
23. Mik a késő neutronok?
24. Mik a hasadási termékek (hasadványok)?
25. Mik a primer és a szekunder hasadványok?
26. Rajzolja fel a hasadványok keletkezési gyakoriságát tömegszámuk függvényében!
27. Rajzolja fel a nukleáris láncreakció sémáját!
28. Mi a neutronciklus és a ciklusidő?
29. Mi a sokszorozási tényező és a reaktivitás?
30. Mi a kritikusság, szuperkritikusság, szubkritikusság feltétele?
31. Írja fel az új hasadóképes izotópok előállítás sémáját!
32. Mi a transzmutáció?
33. Az atomreaktor definíciója.
34. A reaktorok fajtái a hasadást kiváltó neutronok energiája alapján.
35. Mi az aktív zóna?
36. Mi a kritikus tömeg és a kritikus térfogat?
37. Milyen üzemanyagfajtákat ismer?
38. Milyen moderátor anyagokat ismer?
39. Ismertesse az atomreaktorokat rendeltetésük szerint.
40. Melyek a legfontosabb energetikai atomreaktor-típusok?
41. Milyen anyaghatásfok érhető el termikus reaktorokban?
42. Rajzolja fel a hőerőmű elvi felépítését.
43. Rajzolja fel az atomerőmű elvi felépítését.
44. Sorolja fel az atomreaktorban keletkező radioaktív izotópok csoportjait és azok keletkezési formáit.

45. Megközelítően hány radioaktív hasadási termékfajta keletkezik az atomreaktorban?
46. Milyen csoportokba sorolhatók a hasadási termékek felezési idejük alapján?
47. Környezeti szennyezőként mely hasadási termék-csoportoknak kicsi a jelentősége, mik az okai ennek?
48. Hol koncentrálnak a hasadási termékek és milyen módon kerülhetnek a környezetbe?
49. Soroljon fel néhány hosszú felezési idejű hasadási terméket!
50. Ismertesse az atomreaktorban keletkező transzuránizotópok (aktinidák) fő csoportjait!
51. Soroljon fel néhány fontosabb közepes és hosszú életű transzurán izotópot és azok tipikus fajlagos keletkezési mennyiségét.
52. Hol koncentrálnak a transzurán izotópok (aktinidák), mi a jelentőségük energetikai szempontból?
53. Milyen módokon juthatnak a környezetbe a radioaktív transzurán izotópok.
54. Melyek az atomreaktorban keletkező aktivációs termékek és azok forrásai?
55. Soroljon fel néhány fontosabb aktivációs terméket, ismertesse azok felezési idejét!
56. Milyen módokon kerülhetnek a környezetbe az atomreaktorban keletkező aktivációs termékek?
57. Melyek az atomreaktorban keletkező radioaktív izotópokkal kapcsolatos elsőrendű feladatok?