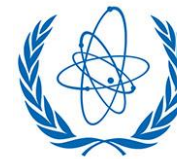


Instalații nucleare

➤ Conform standardelor **IAEA** sunt considerate instalații nucleare:

- ✓ reactorii nucleari
- ✓ instalații mari pentru prepararea, îmbogățirea, fabricarea, tratarea sau stocarea combustibilului nuclear
- ✓ Instalații mari conținând materiale radioactive sau materiale fisionabile
- ✓ acceleratorii de particule

➤ Utilizarea materialelor radioactive și a instalațiilor nucleare – este reglementată prin norme și standarde de protecție de către *Agenția Internațională de Energie Atomică de la Viena (IAEA)*



IAEA

International Atomic Energy Agency
Atoms for Peace and Development

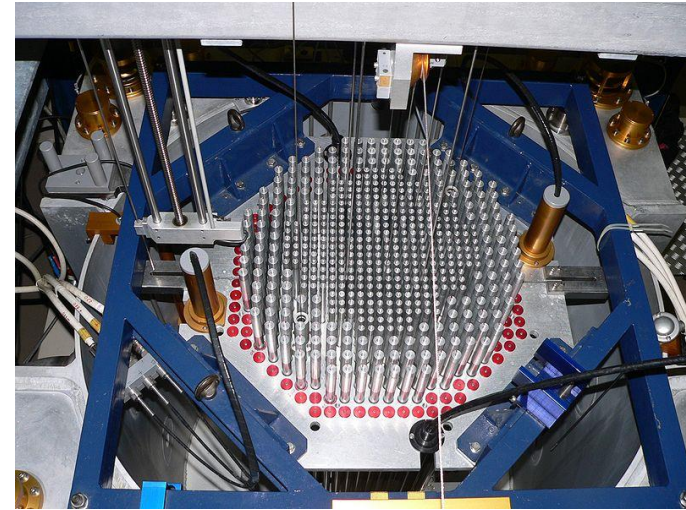
➤ Reglementarea, autorizarea și al controlului activităților nucleare din România este realizată de:
Comisia Națională pentru Controlul Activităților Nucleare (CNCAN)



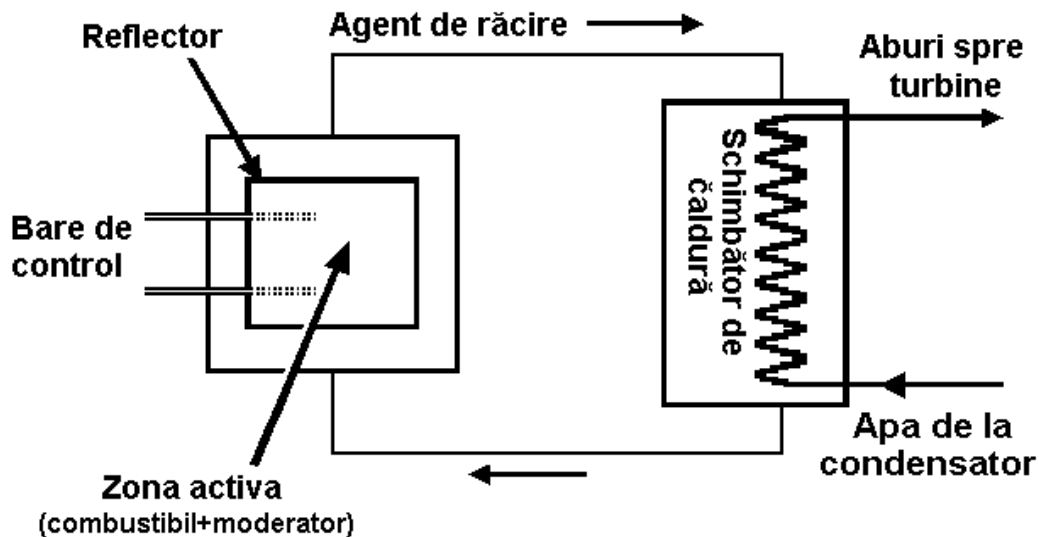
Comisia Națională pentru Controlul Activităților Nucleare

Reactorul nuclear

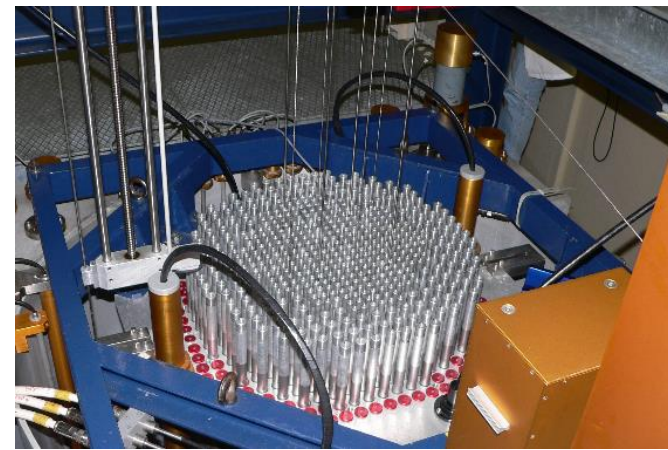
- Dispozitiv care eliberează energie nucleară pe baza reacțiilor în lanț, la care participă elementele fisionabile și neutronii
- Componente esențiale:
 - *combustibilul*
 - *moderatorul*
 - *sistem de control și reglare a reacției în lanț*
 - *sistemul de răcire*



Componentele unui reactor nuclear



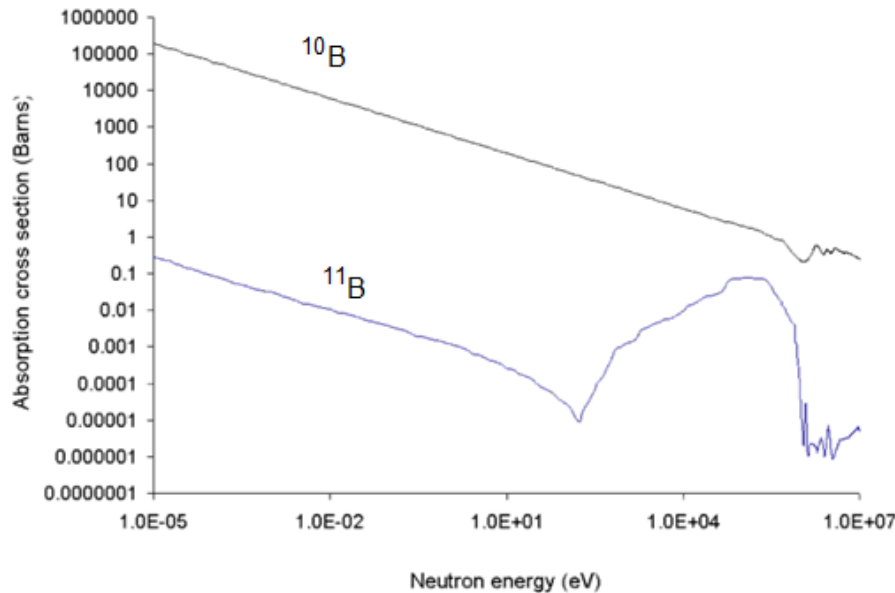
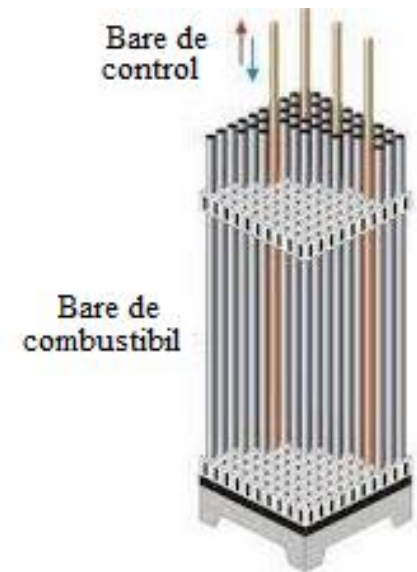
- **Zona activă** - elemente principale:
 - ✓ combustibilul
 - ✓ moderatorul (în cazul reactorilor termici)
 - ✓ reflectorul



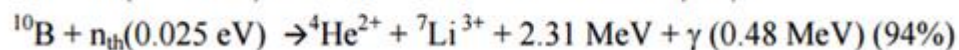
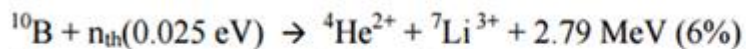
- **Combustibilul nuclear** – material fisionabil.
 - ✓ Cel mai cunoscut material fisil este ^{235}U , izotop al uraniului, aflat în amestecul izotopic natural într-un procent de 0,72 %.
 - ✓ Se folosește sub forma de oxid de uraniu pastilat și introdus în teci de oțel inoxidabil sau zircaloy ($\text{ZrH}_{1.65}$) dispuse după o anumită geometrie care să permită o reacție în lanț
- **Moderatorul** - rol de a scădea energia neutronilor de fisiune până la energia termică prin ciocnirile elastice ale neutronilor - materiale de elemente ușoare: apa, apa grea, oxidul de beriliu sau grafitul
- **Reflectorul**: - rol de minimizare a pierderilor neutronilor din zona activă - înconjurată de un înveliș cu rolul de a reflecta neutronii . În cazul reactorilor cu neutroni termici, moderatorul are și rol de reflector iar pentru reactorii rapizi, reflectorul, este construit din materiale cu număr atomic mare și secțiune de captură pentru neutronii rapizi, mică

➤ Sistemul de control și reglare a reacției în lanț

- ✓ Este format din bare metalice care conțin elemente cu putere mare de absorbție a neutronilor; bor, cobalt, hafniu, dysprosiu, gadoliniu, samariu, erbium, europiu, sau alte aliaje și compuși ca de exemplu oțel cu conținut înalt de bor, oțel aliat-indiu-cadmium, carbura de bor (B_4C), diborura de zirconiu (ZrB_2), diborura de titaniu (TiB_2), diborura de hafniu (HfB_2) și titanat de dysprosium ($Dy_2Ti_2O_7$)



- ✓ Borul natural - doi izotopi stabili; ^{11}B (80,1%) și ^{10}B (19,9%).
- ✓ Este utilizat în mod obișnuit ca absorbant de neutroni datorită secțiunii eficace mari a izotopului ^{10}B (3840 barni pentru neutroni termici- 0.025 eV).
- ✓ Izotopul ^{11}B are secțiunea eficace de absorbție pentru neutroni termici (0.025 eV) de aproximativ 0.005 barni.
- ✓ Majoritatea reacțiilor ale neutronilor termici sunt de tip (n, α) [reacții $^{10}B(n, \alpha)^7Li$ însoțite de emisie de radiații gamma cu $E_\gamma = 0.48 MeV$.]



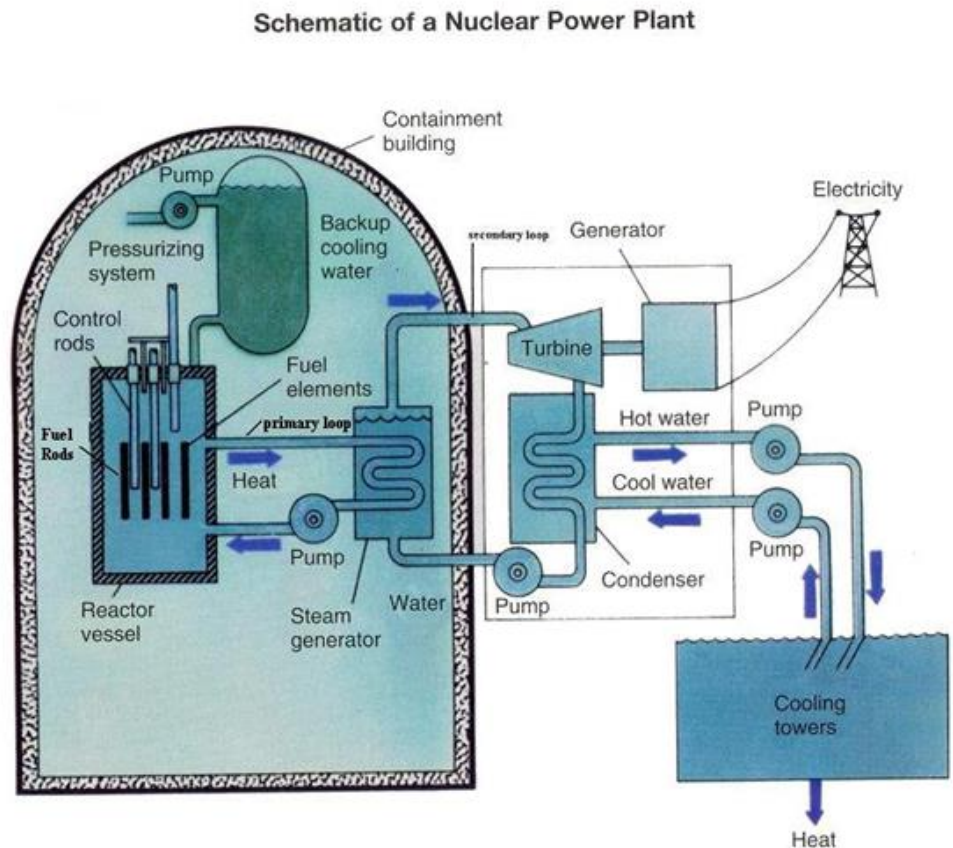
➤ Sistemul de răcire

- ✓ Căldura produsă în reactor prin fisiune este preluată de un agent de racire și transferată apei ușoare printr-un schimbător de căldură

Materialle de răcire a reactorilor

Material	Punct de topire	Punct de fierbere
Apă ușoară la 155 bar		345 °C
Mercur	-38.83 °C	356.73 °C
NaK eutectic	-11 °C	785 °C
Sodiu	97.72 °C	883 °C
FLiBe	459 °C	1430 °C
Plumb	327.46 °C	1749 °C
Plumb-bismut eutectic	123.5 °C	1670 °C

Eutectic- amestec de substanțe sau elemente chimice cu punctul de topire cel mai scăzut dintre toate compozițiile posibile ale acelor substanțe



□ Reacții nucleare în reactor

- *împrăștierea* (elastică și inelastică)
- *absorbția*

▪ Împrăștierea

➤ *Împrăștierea elastică :*

- ✓ *împrăștierea elastică (n, n)*-proces fundamental în termalizarea neutronilor din reactorii cu neutroni termici și în studiile de analiză structurală a sistemelor solide, lichide sau gazoase.
- ✓ *împrăștiere potențială* sau *împrăștiere normală* - împrăștierea se datorește ciocnirii neutronului cu suprafața exterioară a nucleului, fără a se forma un nucleu intermediar
- ✓ *împrăștiere la rezonanță* sau *împrăștiere anomală* - împrăștierea are loc prin pătrunderea neutronilor în interiorul nucleului și formarea unui nucleu intermediar (nucleu compus) urmată de expulzarea acestora cu aceeași energie în sistemul centrului de masă

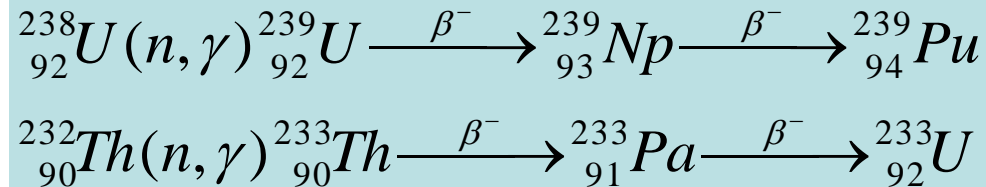
➤ *Împrăștierea inelastică (n, n')* – starea energetică internă a nucleelor grele și medii se modifică prin preluarea unei cantități de energie cinetică, conducând la excitarea primelor nivele energetice a nucleului rezidual

- ✓ are loc numai dacă energia neutronilor depășește energia de excitare a primului nivel nuclear ($\sim 0.1 \div 2$ MeV).
- ✓ dezexcitarea nucleelor reziduale - prin emiterea de radiații γ de energie mică.
- ✓ rol important în degradarea spectrului energetic al neutronilor de fisiune

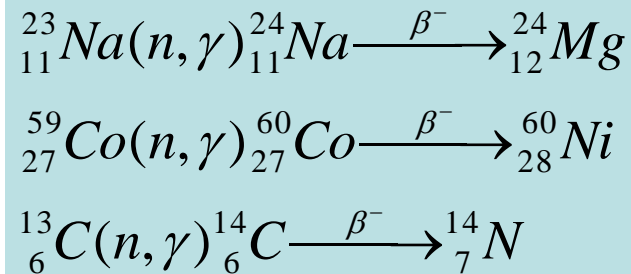
➤ Absorbția neutronilor

➤ Reacții de captură radiativă (n, γ)

- ✓ procesul de absorbție a neutronilor de către nucleul țintă în urma căruia energia de excitare a sistemului format este emisă sub forma de radiație γ , într-un timp de aproximativ 10^{-14} s.
- ✓ În general reacții de captură radiativă au loc cu neutronii lenți și termici, în urma cărora se obțin nuclee radioactive care se dezintegrează prin emisia de radiații β
 - obținerea în reactorii nucleari de elemente fisionabile (^{239}Pu , ^{233}U) plecând de la ^{238}U și ^{232}Th :

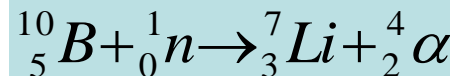
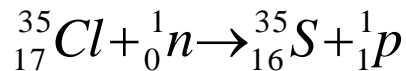
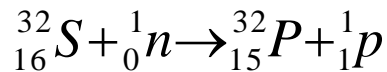
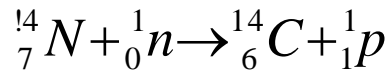


- obținerea de radioizotopi folosiți în obținerea de surse γ :



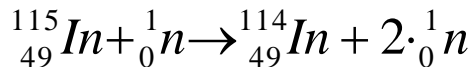
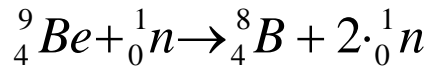
➤ **Reacții de captură urmată de emisia unei particule încărcate (n, p), (n, α)**

- ✓ necesită un exces de energie egal cu cel puțin bariera coulombiană plus energia de legătură a particulei încărcate în nucleu
- ✓ reacțiile de acest tip au loc numai cu neutroni rapizi
- ✓ excepții a unor izotopi ușori, în care reacțiile au loc cu neutroni epitermici și termici



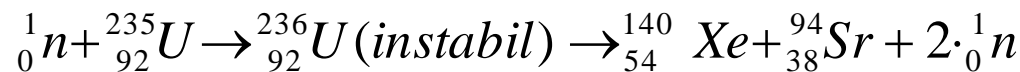
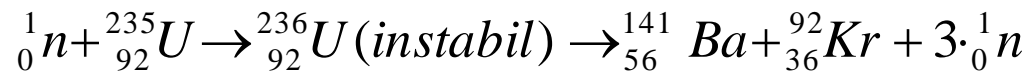
*importantă deosebită în
detecția neutronilor*

✓ **Reacții de tip ($n, 2n$)**



✓ **Reacții de captură urmată de fisiune (n, f)**

- ✓ au loc cu nucleele elementelor fisile, prin formarea unui nucleu compus înalt excitat, instabil ($\sim 10^{-2}$ s) care se fragmentează



Clasificarea reactorilor nucleari

(există circa 326 reactori aflați în 55 țări)

(a) Energia neutronilor care produc fisiunea (E_n)

➤ reactori cu neutroni termici -TR (*Thermal Reactor*)

$$E_n \cong 0.025 eV$$

➤ reactorii cu neutroni rapizi - FBR (*Fast Breeder Reactor*)

$$E_n > 100 KeV$$

(b) *Natura combustibilului nuclear* - gradul de îmbogățire a combustibilului nuclear în izotopul ^{235}U

- Elementele fisionabile: ^{233}U , ^{235}U și ^{239}Pu , dintre care numai ^{235}U se găsește în natură, ^{233}U și ^{239}Pu se formează în reactor
 - reactori cu combustibil *putermic îmbogățit* (90% ^{235}U)
 - reactori cu combustibil *mediu îmbogățit* (5 ÷ 20 % ^{235}U)
 - reactori cu combustibil *slab îmbogățit* (1 ÷ 2% ^{235}U)
 - reactori cu *uraniu natural* (0.71% ^{235}U)
 - reactori cu *plutoniu-239*
 - reactori cu *uraniu-233*

(c) Tipul de moderator utilizat

- apa
- apa grea (D_2O)
- beriliu
- grafitul

PWR (Pressurised Water Reactor)-CANDU

BWR (Boiling Water Reactor)

(d) Structura zonei active

- omogeni
- heterogeni

(e) Natura agentului de răcire

- apă
- apa grea
- metale lichide (sodiul)
- substanțe gazoase (heliul, bioxidul de carbon)

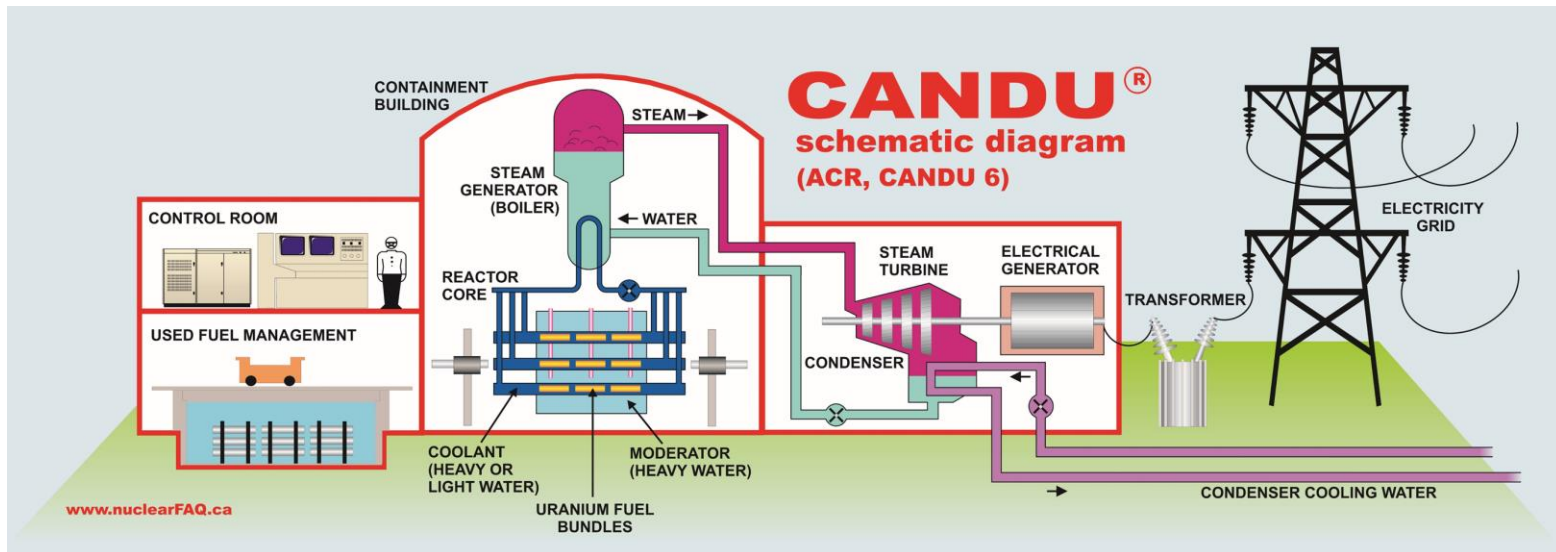
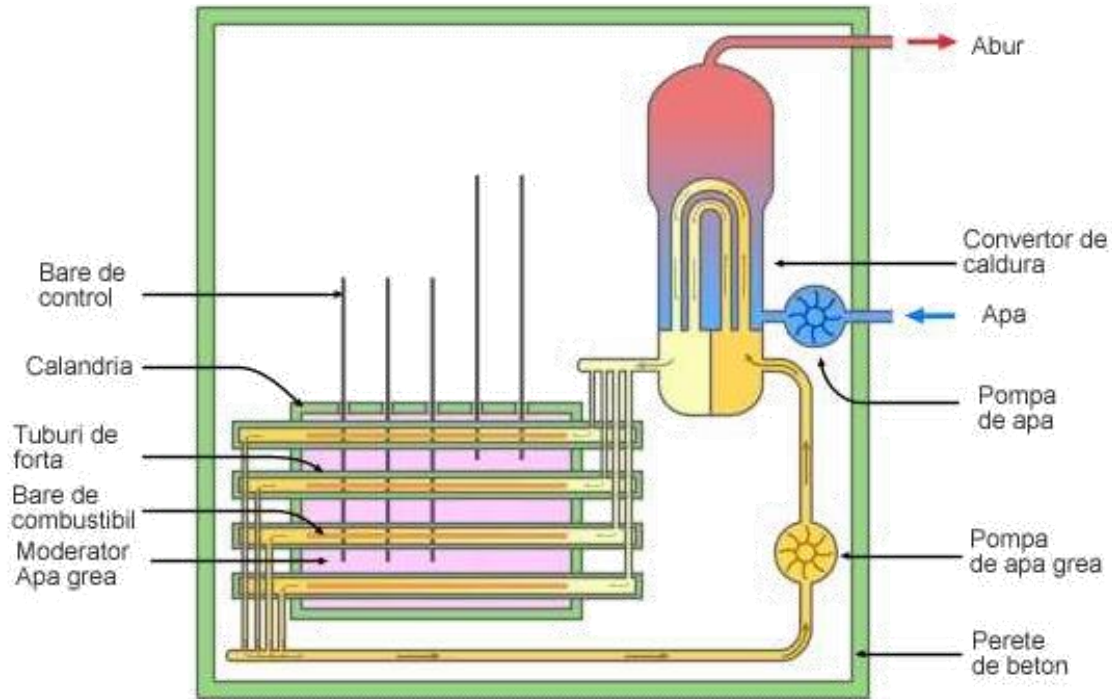
(f) Puterea reactorului

- putere zero (folosiți în cercetare)
- reactori de putere medie
- reactori de mare putere

(g) Domeniul de utilizare

- producerea energiei electrice (*peste 12% din energia electrică*)
- producerea de ^{239}Pu (*reactori folosiți în domeniul militar*)
- reactori folosiți în propulsia mavelor marine (*submarine, portavioane, etc.*)
- reactori destinați cercetării științifice și producției de radioizotopi

Schema reactorului CANDU

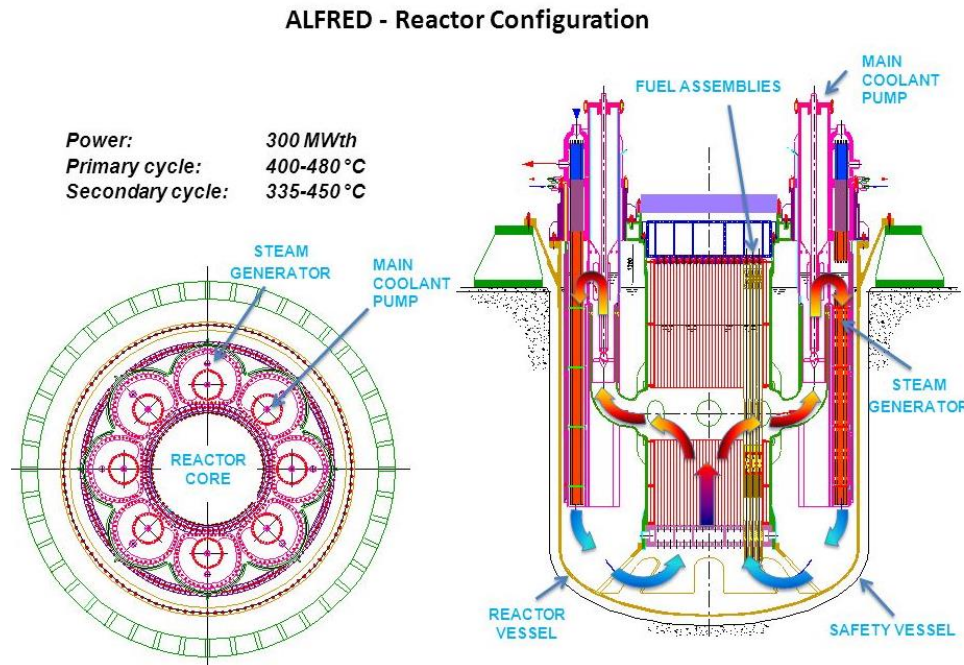


Centrala Nucleară de la Cernavodă



ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor Demonstrator)

- Proiectul ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor Demonstrator) are ca obiectiv construirea, până în 2030, a unui demonstrator european de reactor cu neutroni rapizi răciți cu plumb (LFR, Lead Fast Reactors) generația IV, de 300 MWth, la Institutul de Cercetări Nucleare Pitești, pe platforma de la Mioveni (investiție estimată la aproximativ un miliard de euro până în 2030)



Scop:

- creșterea siguranței în funcționare.
- obținerea unei eficiențe economice crescute
- utilizarea mult mai eficientă a resurselor de uraniu
- minimizarea cantităților de deșuri radioactive produse

- În reactorii cu neutroni rapizi (peste 0.5 MeV), reacția de fisiune eliberează mai mulți neutroni decât cea cu neutroni termici. Excesul de neutroni este folosit pentru transmutarea U-238 sau a Th-232 în izotopi fisionabili (Pu-239 respectiv U-233).
- Reactorii cu neutroni rapizi se mai numesc și reproducători (generează mai mult material fisionabil decât consumă). Reactorii rapizi sunt răciți cu metale topite (sodiu, plumb) sau gaze (Helium, CO₂)
- Reactorii cu neutroni rapid pot reduce radiotoxicitatea totală a deșeurilor nucleare folosind toate sau aproape toate deșeurile drept combustibil
- Principalele dezavantaje ale reactorilor cu neutroni rapizi sunt date de cost și de dificultățile de construit și de operat

Tipuri de reactor de generația IV

- Gas-cooled Fast Reactor (GFR),
- Lead-cooled Fast Reactor (LFR),
- Molten Salt Reactor (MSR),
- Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR),
- Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)
- Very High Temperature Reactor (VHTR).

❑ Reactorul nuclear staționar

- **Reactorul nuclear** - ansamblu de materiale fisionabile (combustibil nuclear) și alte materiale cum ar fi moderatorul, elementele de răcire, reflectori de neutroni, bare de control, etc., a căror dispunere în spațiu asigură o desfășurare controlată a reacțiilor nucleare în lanț
- **Condiția pentru ca reacția în lanț să aiba loc** - numărul de neutroni produși prin fisiunea combustibilului nuclear să fie egal cu suma dintre numărul neutronilor absorbiți de combustibil și numărul de neutroni absorbiți de celelalte componente ale reactorului, inclusiv a neutronilor care părăsesc zona activ
- **Coeficient de criticitate efectiv, k_{ef}**
 - Populația de neutroni din zona activă rămâne constantă - reactorul este în **stare critică**.
 - când există o creștere a populației de neutroni reactorul se consideră **supracritic** ($k_{ef} > 1$)
 - când populația de neutroni scade, reactorul este în stare **subcritică** ($k_{ef} < 1$)

$$k_{ef} = \varepsilon \cdot L_f \cdot P \cdot L_{th} \cdot f \cdot \eta$$

ε - factorul de fisiune cu neutroni rapizi și se referă la raportul fisiunilor totale față de cele produse de către neutronii termici

L_f - ia în considerare fracțiunea neutronilor rapizi care nu părăsesc zona activă

P - probabilitatea de scăpare la rezonanță care dă fracțiunea de neutroni care nu sunt **absorbiți la rezonanță, în zona activă**.

L_{th} - ia în considerare fracțiunea neutronilor termici care nu părăsesc zona activă

f - factorul de utilizare a neutronilor termici este fracțiunea neutronilor care sunt absorbiți și generează procese de fisiune

η - media numărului de neutroni produși de fiecare neutron termic capturat de elementele combustibilului

❑ Reactorul nuclear pulsant

- Categorie specială a reactorilor nucleari de cercetare care asigură o intensitate a fluxului de neutroni de circa 10^{18} - 10^{19} $n/cm^2/s$ pe durata unui interval de timp scurt
- Fluxul de neutroni este obținut prin aducerea reactorului în regim de spracriticitate când reacția în lanț este amplificată ($k_{ef} > 1$), ca apoi să fie stinsă brusc prin înserarea barelor de control

➤ Caracteristici esențiale:

- ✓ creșterea rapidă a puterii reactorului pe durata a câtorva fracțiuni de secundă, se face prin aducerea reactorului în stare critică față de neutronii prompti și nu față de neutronii întârziați ca în cazul reactorilor staționari
- ✓ mecanism intrinsec care reglează independent puterea reactorului astfel încât, puterea să scadă automat după obținerea pulsului bază procesului de scădere a reactivității reactorului datorită creșterii temperaturii elementelor combustibile și a elementelor de reglare
- ✓ Puterea degajată în barele de combustibil variază în timp după o lege exponențială

$$\frac{dP}{dt} = \exp\left(\frac{t}{\tau}\right)$$

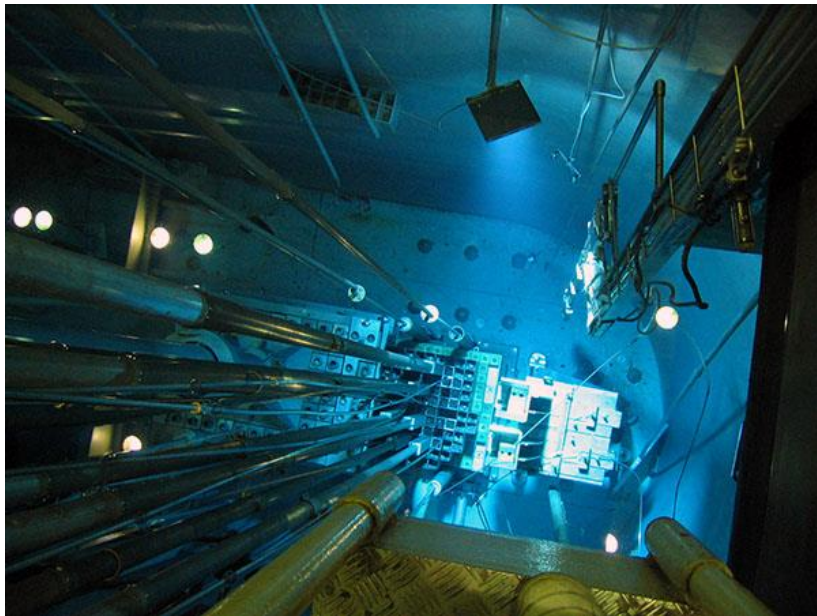
$$\tau = \frac{\theta}{\Delta k}$$

θ – timpul de viață a neutronilor prompti

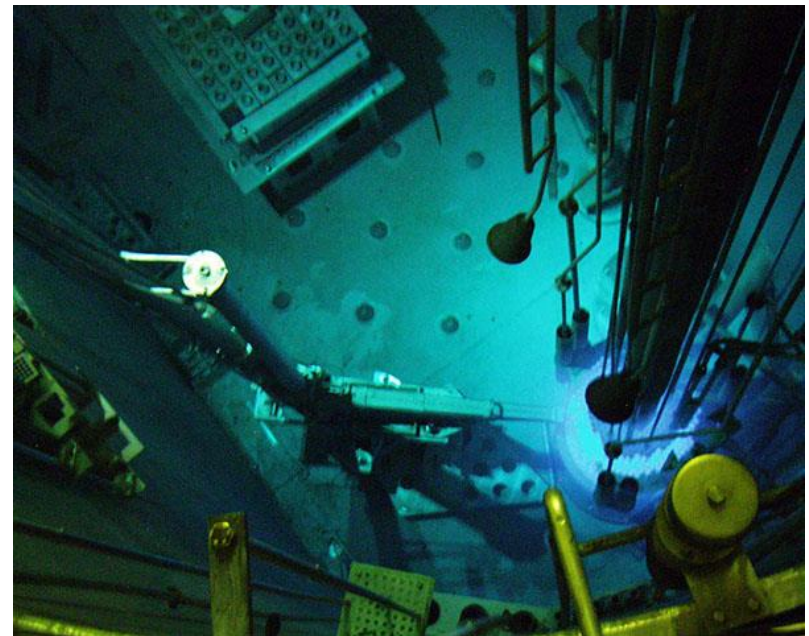
Δk – excesul de reactivitate pentru neutronii prompti

- ✓ Valorile maxime ale puterii reactorului (P_{max}), energiei (E_{max}) și temperaturii (T_{max}) pe durata pulsului sunt dependente atât de caracteristicile dinamice ale procesului cât și de geometria aranjamentului zonei active (combustibil)

Institutul de Cercetari Nucleare Pitesti (ICN)

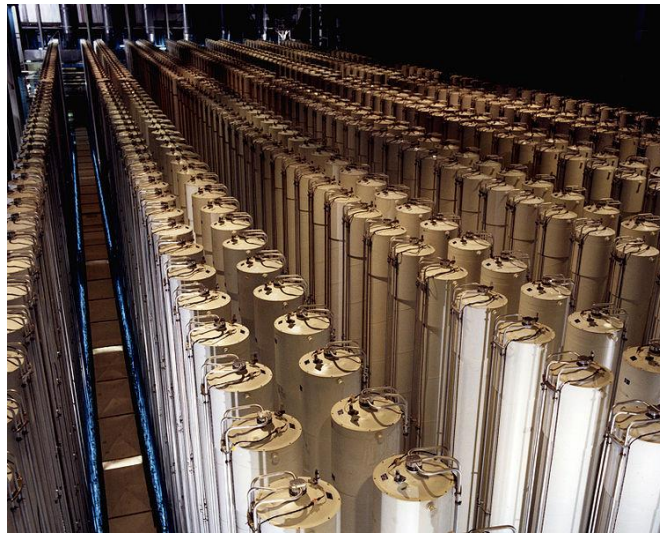
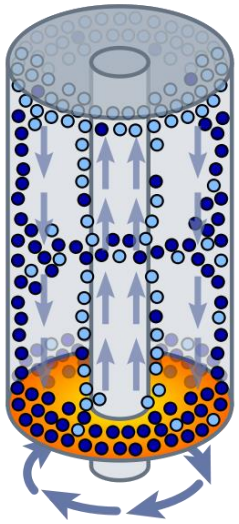


Reactor stationar
Triga SSR – 14 MW



Reactor pulsant
Triga ACPR - puls de maxim 20.000 MW

❑ Instalații mari pentru prepararea, îmbogățirea, fabricarea, tratarea sau stocarea combustibilului nuclear



Instalații de centrifugare

Depozitarea deșeurilor

Nuclear electricity generation

