

Energia nucleară.

Istoria celei mai noi surse de energie a început la sfârșitul celui de al doilea război mondial, când au fost folosite pentru prima dată primele două bombe atomice împotriva a două orașe japoneze Hiroshima și Nagasaki. După aproape 10 ani energia atomului a început să fie folosită în scopuri pașnice, la producerea de curent electric, prin punerea în funcțiune a primei centrale atomo-electrice la Obninsk în fosta U.R.S.S.

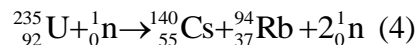
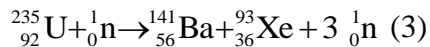
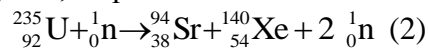
Energia nucleară rezultă din reacțiile de transformare a nucleelor, mai exact ea se produce ca urmare a „*pierderii de masă*” a nucleelor, proces care are loc cu mari degajări de energie în concordanță cu relația lui Einstein, $E=mc^2$, care corelează caracteristicile statice cu cele dinamice ale masei substanțelor. Potrivit acestei relații, *oricărei modificări a masei de repaus a unui corp trebuie să-i corespundă o cantitate echivalentă de energie cedată sau absorbită de acel corp*. Altfel spus, dacă masa unui corp se micșorează atunci el cedează energie, iar dacă masa lui se mărește, corpul respectiv primește energie dintr-o sursă exterioară. Procesul de obținere a energiei printr-o reacție nucleară poate fi înțeles ușor, dacă vom efectua următoarea operație imaginară: Doi neutroni și doi protoni sunt „cântăriți” separat constând că masa lor reprezintă 4,03298 u.a.m. (1 u.a.m., unitate atomică de masă = $1,6603 \cdot 10^{-24}$ g). Nucleul de heliu, format tot din doi protoni și doi neutroni cântărește 4,002603 u.a.m. În consecință la unirea celor patru nucleoni (doi protoni și doi neutroni) are loc o pierdere de masă de $\Delta m = 4,03298 - 4,002603 = 0,030377$ u.a.m. Această diferență numită „*defect de masă*”, reprezintă energia de legătură internucleară, și care se poate calcula cu relația lui Einstein: $E = 0,030377 \cdot 931,47 \text{ MeV} = 28,295 \text{ MeV}$ în care 931,47 MeV este echivalentul energetic al unei mase egale cu o unitate atomică de masă.

Fenomenul are loc la formarea oricărui nucleu, masa se va micșora corespunzător cu degazarea unei energii echivalente. Raportul dintre această energie și numărul nucleonilor care au interacționat la formarea nucleului se numește *energie medie de legătură pe nucleon*. În exemplul anterior, energia medie pe nucleon este de e.m.n. = $28,295 : 4 = 7,07 \text{ MeV}$. Cu cât această energie este mai mare cu atât nucleul este mai stabil. Aplicarea relației lui Einstein la echivalența energetică a substanțelor deschide perspective spectaculoase deoarece 1 kg de substanță echivalează cu $25 \cdot 10^{24} \text{ kWh}$. Comparativ cu această valoare, energia hidraulică, a mareelor sau cea pe care soarele o revarsă pe pământ devin cantități neglijabile.

Reacțiile nucleare pot avea loc prin bombardarea unui nucleu țintă cu particule proiectil, care pot fi particule nucleare (protoni sau neutroni), nuclee, în special de He^{2+} , cuante de lumină, electroni, neutrini sau mezomi. Sunt posibile două tipuri de reacții nucleare din care se degajă energie:

fuziunea nucleară, care presupune unirea a două nuclee ușoare, cum ar fi cele de deuteriu, pentru formarea unui nucleu mai greu: ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_1\text{T} + {}^1_1\text{p} + 4,0 \text{ MeV}$ (1)

fisiunea nucleară, prin care un nucleu foarte greu, spre exemplu uraniu, se sparge în două sau mai multe nuclee mai ușoare, respectiv noi elemente:



În ambele tipuri de reacții se obține energie numai pe baza defectelor de masă, ceea ce corespunde la mai puțin de o miime din masa totală a nucleelor care iau parte la reacție. Ar fi ideal să se obțină energia corespunzătoare întregii mase a nucleelor participante, însă explicațiile teoretice arată că nu se poate realiza anihilarea întregii mase a nucleelor.

Nucleul de uraniu-235, $^{235}_{92}\text{U}$, care se găsește în minereul natural de uraniu, poate fisiona spontan sau, prin bombardarea cu electroni lenți poate duce la ruperea în diferite fragmente, așa cum am arătat anterior. Cele două fragmente de de nucleu care se obțin prin fisiune au, de preferință un raport de masă 2/3. Elementele ușoare care apar la fisiune sunt: Br, Kr, Rb, Z, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru și Rh. Elementele grele de la fisiune sunt Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Pr, Nd, Pm și Sm. Cel mai adesea și în cantitățile cele mai mari apar elemente din mijlocul grupurilor prezentate. Toate numerele de masă a produselor primare de fisiune sunt între 75-160 cu un maxim între 90-100 și între 133-145 cu un minim la 110-125.

Inițial atât fisiunea cât fuziunea și nucleară au fost folosite „necontrolat” la realizarea armelor de distrugere în masă, bomba nucleară (fisiunea uraniului) și bomba cu hidrogen (fuziunea deuteriului la heliu). Pentru aplicațiile sociale, reacțiile nucleare folosite pentru obținerea armelor de distrugere în masă sunt absolut inutile. Pentru a obține energie într-un proces continuu, reacțiile nucleare trebuie controlate, adică viteza de desfășurare a lor să fie rezonabilă și să existe în posibilitatea întreruperii totale în situații de criză. Actualmente numai de reacțiile de fisiune pot fi controlate, dar și pentru fuziunea nucleară sau făcut pași importanți pe cale realizării practice.

Reacțiile de fisiune nucleară pentru producerea energiei electrice sau termice au loc în instalații complexe denumite **reactoare nucleare**. În aceste instalații, energia de legătură eliberată, pe seama defectelor de masă ale nucleelor care iau parte la reacția nucleară, se regăsește în energia cinetică a produselor de fisiune. Ca urmare, temperatura mediului în care au loc reacțiile crește foarte mult și sistemul poate ceda căldură pe baza căreia pot fi puse în mișcare diverse mașini termice. Reacțiile nucleare pot avea loc numai atunci când reactanții sunt aduși în condiții favorabile; în acest sens prezintă importanță doar acele reacții nucleare pentru care realizarea condițiilor de reacție necesită un consum energetic mai mic decât energia degajată în urma reacției. Baza producerii reacțiilor nucleare o constituie faptul că nucleele unor izotopi ai uraniului sunt foarte aproape de limita de instabilitate și, sub șocul unei particule, pot fisiona. Spre exemplu, nucleul izotopului $^{235}_{92}\text{U}$ dacă este lovit de un neutron de energie 0,025 MeV se scindează în două noi nuclee de masă mai mică și doi sau trei neutroni de energie suficientă pentru a provoca scindarea unor noi nuclee de uraniu și astfel se ajunge la reacții în lanț, reacții care se autoîntrețin (3). În această situație pentru fiecare nucleu fisionat se obține o energie de 200 MeV care este preluată sub formă de energie cinetică de fragmentele de fisiune și de către neutroni, și cedată mediului înconjurător ca urmare a ciocnirilor cu alți atomi sau molecule. În final se obține o încălzire a mediului exterior iar căldura cedată poate fi folosită în diverse scopuri: generare de aburi pentru turbinele centralelor electrice, producerea unor reacții chimice, etc.

Descrierea anterioară reprezintă o simplificare a procesului, în realitate sursele de energie nucleară bazate pe fisiunea uraniului prezintă complicații tehnologice deosebite, multe dintre acestea constituind încă obiective prioritare de cercetare.

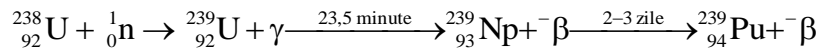
Uraniul utilizat drept combustibil nuclear nu este uraniul care se găsește în scoarța terestră, procesul de fabricație fiind extrem de laborios, costisitor și complicat. Cea mai

importantă problemă care trebuie însă rezolvată o reprezintă protecția omului și a mediului înconjurător de radiațiile nocive pentru orice formă de viață pe care le emite o orice reacțiile nucleare și deșeurile sale. Din acest motiv marea speranță a acestei forme de energie rămâne încă grevată de cele mai mari îndoieli și dificultăți ale noilor tehnologii energetice.

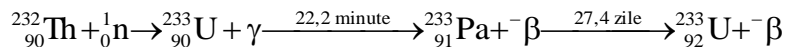
În natură uraniul se găsește sub formă de combinații a trei izotopi, $^{238}_{92}\text{U}$, în proporție de 99,282%, $^{235}_{92}\text{U}$ în proporție de 0,712% și $^{234}_{92}\text{U}$ în proporție de 0,006%. Numai izotopul $^{235}_{92}\text{U}$ este fisibil și el constituie combustibilul nuclear pentru actualele centrale nucleare.

Fisiunea nucleară nu este specifică numai nucleelor grele ($A > 180$, A =număr de masă) însă numai nucleele grele cu un număr impar de neutroni, ca $^{235}_{92}\text{U}$, $^{233}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{241}_{94}\text{Pu}$, pot fisiona în lanț la atașarea unui neutron termic, fiind necesară numai energia neutronului captat pentru a declanșa reacția nucleară de fragmentare a nucleului. Are o mare importanță **energia de parasaturare**, astfel că pot fisiona numai nucleele puțin stabile, cu număr impar de neutroni denumite și materiale fisibile. $^{235}_{92}\text{U}$ și $^{232}_{90}\text{Th}$ din care se pot obține materiale fisibile se numesc materiale fertile. Materialele fisibile și cele fertile formează împreună combustibilul nuclear.

$^{238}_{92}\text{U}$ captează neutroni cu energie mult mai mare decât $^{235}_{92}\text{U}$ dar nu poate capta neutronii emiși de acesta din urmă. Pentru a putea fi captați neutronilor trebuie să li se imprime o energie de cel puțin 1,1 MeV, ceea ce se realizează în reactoarele nucleare termice:



La fel $^{232}_{90}\text{Th}$, care se găsește în natură, captează neutroni termici și trece, prin două dezintegrări β în $^{233}_{92}\text{U}$. Acest ciclu se poate aplica la reactoarele termice la temperatură înaltă răcite cu gaze:



La elementele fisibile $^{235}_{92}\text{U}$, $^{233}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, și $^{241}_{94}\text{Pu}$ energia de excitație pentru fisiune este foarte mică și poate avea loc cu neutroni lenți sau termici, frânați de un moderator.

Pentru caracterizarea reacțiilor nucleare este foarte importantă valoarea **secțiunii eficiente** care poate fi definită ca o suprafață perpendiculară pe traiectoria particulelor incidente prin care acestea trebuie să treacă pentru a reacționa cu nucleul. Ea poate depăși de 1 000 de ori secțiunea geometrică a nucleului datorită naturii ondulatorii a neutronului. După natura reacției nucleare secțiunea eficientă poate fi de absorbție, de împrăștiere, de fisiune, etc. Nucleul $^{235}_{92}\text{U}$ prin captarea unui neutron va fisiona cu probabilitatea dată de suprafață secțiunii eficiente de scindare. Pe lângă cele două nuclee, la scindare rezultă și 2-3 neutroni cu o energie medie de 2 MeV. Peste 99% din acești neutroni, la un timp de 10^{-14} secunde de la apariția lor vor fi liberi (neutroni promiți) apariția lor fiind considerată simultană cu procesul de fisiune. Restul de neutroni apar

după câteva secunde, deci cu un anumit decaj de timp, neutroni întârziati. Prin fisiunea nucleelor de ${}_{92}^{235}\text{U}$ și ${}_{92}^{238}\text{U}$ se obține o energie termică cu un randament mediu de neutroni rapizi dat de relația:

$$\eta = \frac{N^{235}\delta_f^{235}}{N^{235}(\delta_f - \delta_c) + N^{238}\delta_c^{238}} v \text{ în care}$$

- $v = 2,5$ peste numărul mediu de electroni
- δ_f și δ_c = secțiunea eficace de fisiune
- N = numărul de atomi de uraniu

${}_{92}^{235}\text{U}$ are $\delta_f = 590$ și $\delta_c = 108$ iar ${}_{92}^{238}\text{U}$ are $\delta_f = 0$ și $\delta_c = 2,8$. Cu aceste valori ale neutronilor termici, randamentul la uraniul natural este de 1,33. Cu neutronii rapizi din uraniul natural nu se poate realiza reacția de fisiune în lanț. Neutronii rapizi obținuți prin fisiune, cu o probabilitate mare sunt dispersați neelastic și în consecință pierd prea multă energie pentru a mai putea scinda uraniul. Din această cauză se folosesc moderatori pentru a putea frâna prin impacturi elastice neutronii, care vor putea fi absorbiți de ${}_{92}^{238}\text{U}$, captare prin rezonanță. Pentru a elimina pierderile de neutroni, prin ieșirea neutronilor rapizi din reactor, cât și pentru a diminua captarea prin rezonanță, neutronii rapizi sunt frânați prin ciocniri elastice cu nucleele atomilor unor elemente ușoare (moderatori), slab absorbante de neutroni. Frânarea are loc până la reducerea vitezei corespunzător unei energii termice de 0,025 MeV. Ca moderator se utilizează hidrogenul sau deuteriul sub formă obișnuită de apă sau apă grea, D_2O , carbonul sub formă de bare de grafit, beriliul ca metal sau oxid, și unele substanțe organice bogate în hidrogen. Prin procesul de moderare neutronii rapizi devin neutroni termici și sunt absorbiți de ${}_{92}^{235}\text{U}$ care se dezintegrează. Pentru a menține reacția de fisiune în lanț prin neutroni termici, este necesar ca din cei 2-3 neutroni rezultați, pierderile să nu fie mai mari de 1,5 neutroni. Cantitatea minimă de material fisionabil necesar menținerii reacției de fisiune poartă denumirea de **masă critică** și este caracteristică fiecărui element în parte. Astfel ${}_{92}^{235}\text{U}$ în stare metalică are o masă critică de 22,8 kg iar ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ în stare metalică 5,6 kg.

Fisiunea nucleară este posibilă și cu neutroni rapizi, dar trebuie mărită probabilitatea de interacționare cu nucleele țintă, ceea ce se realizează prin creșterea cantității de material fisionabil. În reactoarele cu neutroni rapizi și fără moderator se utilizează ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, ${}_{94}^{241}\text{Pu}$ mai reactive și deci cu masă critică mai mică. În acest caz materialele fertile din reactor (${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$ și ${}_{94}^{241}\text{Pu}$) participă la procesul de fisiune absorbând surplusul de neutroni obținuți suplimentar la fiecare fisiune transformându-se astfel în material fisionabil. Din acest motiv reactoarele cu neutroni rapizi se numesc și reactoare cu reproducere (breeder reactor). Pentru a evita pierderile de neutroni la suprafețele laterale, zona activă este învelită cu un material reflector, care întoarce neutronii în zona activă. Ca reflectori se utilizează de obicei materiale moderatoare. Pentru a menține un reactor nuclear în funcțiune, el trebuie încărcat cu o cantitate mai mare de combustibil nuclear decât cea minimă necesară corespunzătoare masei critice deoarece concentrația materialului fisionabil scade prin procesul de fisiune. Reactorul având mai este necesară posibilitatea reglării excesului de reactivitate. În acest scop se utilizează materiale cu secțiune mare de absorbție a neutronilor termici (oțel cu bor sau cadmiu) sub formă de bare de control care după necesitate sunt imersate mai mult sau mai

puțin în reactor. Fiecare bară de control poate compensa aproximativ 1% din reactivitatea reactorului.

Centrala nucleară produce energie electrică din energia termică obținută din reacții nucleare de fisiune controlată în lanț, proces realizat în reactorul nuclear. Arderea unui kg de uraniu produce de 120 000 de ori mai multă energie decât arderea unui kg de cărbune sau păcură. Într-o centrală nucleară, reactorul nuclear are același rol ca și cazanul de aburi într-o centrală pe păcură sau cărbune. Căldură degajată din reacția nucleară încălzește apa transformând-o în abur care rotește paletele unei turbine ce pune în mișcare un generator electric.

Rezervele geochimice ale scoarței terestre sunt evaluate la aproximativ 800 mil. t. însă cantitatea de uraniu din zăcăminte este evident mult mai mică, de aproximativ 24,5 mil.t. U_3O_8 din care 20,2 mil.t. în țările dezvoltate. Repartizarea celor mai importante zăcăminte de uraniu și a centralelor nucleare la nivel mondial este prezentată în figura 2.18.

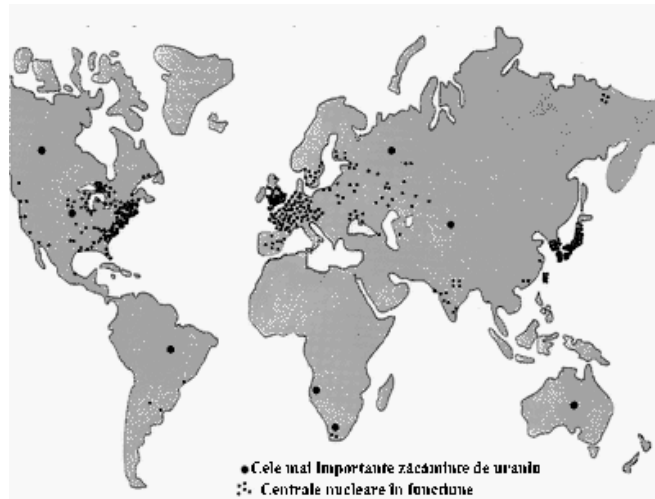
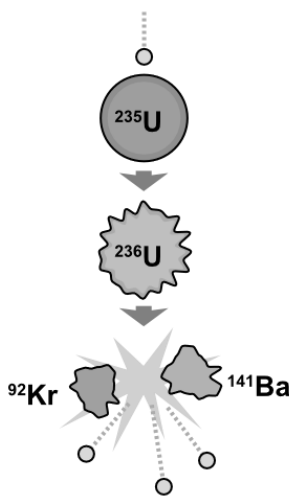


Figura 2.18. Cele mai importante zăcăminte de uraniu și centralele nucleare la nivel mondial.



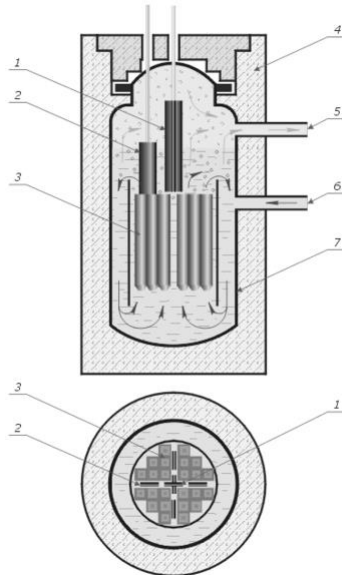
Reactoarele nucleare trebuie să satisfacă toate condițiile de securitate și bună desfășurare a unei reacții nucleare. Primul tip de reactor folosit, cronologic, este și actualmente cel mai utilizat. În cazul acestui reactor problemele care se pun din punct de vedere metalurgic, chimic, al echipamentului pentru prepararea materiei prime sunt mai simple, prețul reactorului este mai redus dar energia obținută și randamentele de utilizare sunt inferioare și cheltuielile de investiții sunt mai ridicate datorită instalațiilor mai costisitoare. Al doilea tip de reactor tinde să ocupe o pondere sporită în rândul centralelor nucleare-electrice. Costurile de producție sunt mai importante prin cheltuieli relativ mari pe care le presupune prepararea materiei prime, însă investițiile inițiale sunt mai scăzute iar randamentele superioare datorită calității materiei prime. Prepararea uraniului îmbogățit, respectiv creșterea în minereu

a a proporției de material fisibil prin extragerea unei părți din materialul nefisibil se realizează prin procedeul difuziei gazoase selective, fie prin procedeul

ultracentrifugării. Așa cum am menționat, uraniul se găsește în natură într-un amestec de trei izotopi, unul nefisionabil $^{238}_{92}\text{U}$ și doi fisionabili $^{235}_{92}\text{U}$ și $^{236}_{92}\text{U}$. Izotopul fisionabil $^{235}_{92}\text{U}$ elimină la descompunere un neutron și cantități minime de căldură, rezultând din pierderea naturală de radioactivitate. Dacă neutronul întâlnește un alt atom de $^{235}_{92}\text{U}$ se obține un atom instabil de $^{236}_{92}\text{U}$ care se dezintegrează în alte două elemente și eliberează 2-3 neutroni. Dacă neutronul întâlnește un atom de $^{238}_{92}\text{U}$ se obține un atom instabil de $^{239}_{92}\text{U}$ care se descompune rapid în plutoniu cu degajarea unei imense cantități de căldură și eliberarea de neutroni care perpetuează procesul. Pentru ca reacția să nu devină explozibilă, ea trebuie temperată, adică neutronii trebuie controlați prin intermediul moderatorilor capabili să absoarbă electroni. În cazul reactoarelor obișnuite, datorită cantităților reduse de material fisionabil se folosește ca moderator apa, sau, cel mai adesea apa grea sau grafit, uneori chiar ambele materiale. Indiferent de tipul de reactor un lichid de răcire, apă, sodiu topit, dioxid de carbon lichid, heliu, preia căldura degajată din reacție și o transmite prin intermediul unui schimbător de căldură, apei care se transformă în abur.

Un reactor nuclear este format dintr-o zonă centrală, denumită „zonă centrală” sau „inima reactorului”, în care are loc reacția de fisiune în lanț, un mediu de răcire care transportă căldura degajată la generatorul de abur și moderatorul care permite întreținerea reacției în lanț prin reducerea vitezei neutronilor.

În figura 2.14 prezentăm schema de bază a unui reactor nuclear.

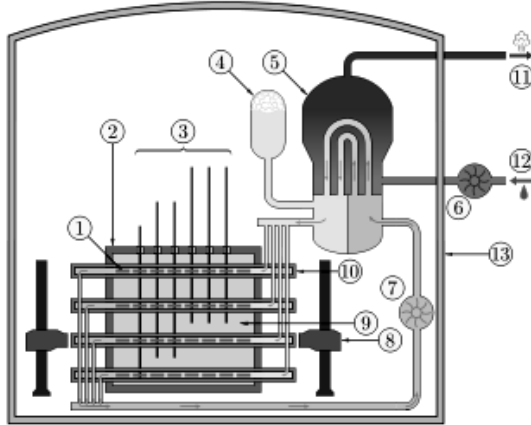


- 1 - bară pentru oprire de urgență
- 2 - bare de control
- 3 - combustibil
- 4 - protecție biologică
- 5- ieșirea vaporilor
- 6- intrarea apei
- 7- protecție termică

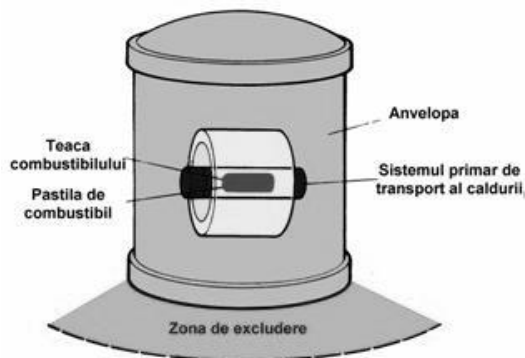
Figura 2.14. Schema simplificată a unui reactor nuclear

Există actualmente mai multe tipuri de reactoare nucleare dar toate se bazează pe aceleași principii menționate anterior. Tipul de reactor folosit la noi în țară, la centrala de al Cernavodă este CANDU (Canada Deuterium Uranium), figura 2.15. Zona activă miezul reactorului CANDU se află într-un rezervor cilindric orizontal numit „Calandria” prevăzut la capăt cu două protecții formate din plăci de oțel. Vasul „Calandria” și

protecțiile de oțel sunt străbătute de 380 de tuburi - Calandria în care sunt amplasate 380 de tuburi mai mici, denumite tuburi de presiune în care sunt introduse pastile de combustibil, cântărind fiecare 24 kg în care uraniul natural este sub formă de pastile compactizate și sinterizate.



a – schema reactorului



b – pastila de combustibil

Figura 2.15. Schema unui reactor CANDU. 1- pastile combustibil; 2 – protecție oțel; 3 – bare de grafit; 4 – rezervor apă grea; 5 – generator de abur; 6 – pompă apă; 7 – pompă apă grea; 8 – suport protecție oțel; 9 – moderator (apă grea); 10 – tub Calandria; 11 – abur spre turbină; pompă apă pentru generare abur; 13 – manta exterioară

Apa grea, care este moderatorul, fără de care reacția nu ar putea avea loc înconjoară tuburile de presiune. Aceasta este și agent de răcire, care preia căldura degajată din reacția nucleară. Ea este pompată prin tuburile de presiune, care conțin fasciculele de combustibil și apoi transportată la generatoarele de abur, unde cedează căldura apei obișnuite care se transformă în abur, iar odată răcită este reciclată în reactor.

În figura 2.16. prezentăm schema simplificată a unui reactor cu reproducere.

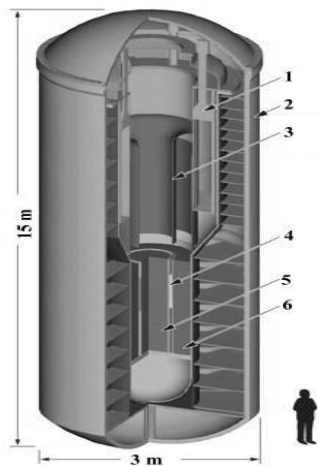


Figura 2.16. Schema unui reactor nuclear cu reproducere.

1 – Generator abur; 2 – manta exterioară; 3 – pompă electromagnetică; 4 – combustibil nuclear; 5 – înveliș reflector; 6 – scuturi protecție.

Aburul este transportat la turbine unde rotește generatorul care produce energie electrică, aceasta fiind livrată după o prealabilă ajustare a frecvenței și tensiunii curentului electric la consumatori, casnici sau industriali. Schema integrată a unei centrale nucleare este prezentată în figura 2.17.

O centrală nucleară necesită condiții speciale de securitate, măsurile protective fiind pe mai multe niveluri atât în interiorul centralei cât și în relația cu exteriorul. Energia nucleară s-a dezvoltat continuu după cel de al doilea război mondial. Actualmente sunt aproximativ 450 de centrale nucleare la nivel mondial și încă 30-40 în construcție.

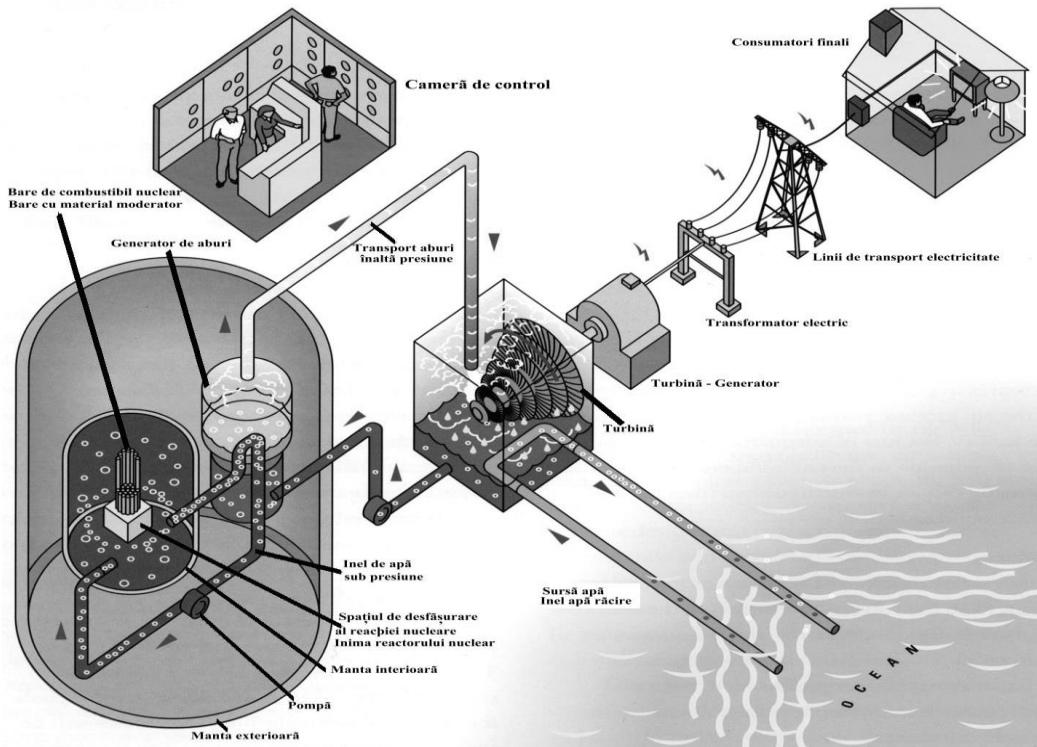


Figura 2.17. Schema integrată a unei centrale nucleare-electrice.

Cele mai importante tipuri de reactoare nucleare sunt:

- Pool type reactor = reactor cu piscină
- Pressurized Water Reactor (PWR) = reactor cu apă sub presiune
- Boiling Water Reactor (BWR) = reactor cu apă fierbinte
- Fast Breeder Reactor (FBR) = reactor rapid reproducător
- Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) sau CANDU = reactor cu apă grea sub presiune
- United States Naval reactor = reactor utilizat de marina Statelor Unite

Tipuri vechi aflate încă în funcțiune:

- Magnox reactor = reactor Magnox
- Advanced Gas-cooled Reactor (AGR) = reactor avansat răcit cu gaz
- Light water cooled graphite moderated reactor (RBMK) = reactor răcit cu apă ușoară și moderat cu grafit

Alte tipuri de reactoare

- Aqueous Homogeneous Reactor = reactor omogen cu apă
- Liquid Fluoride Reactor = reactor cu fluoruri lichide

Reactoare rapide:

Există mai mult de o duzină de proiecte de reactoare avansate, aflate în diferite stadii de dezvoltare. Unele sunt îmbunătățiri ale proiectelor anterioare PWR, BWR și PHWR, altele sunt radical diferite. Primele includ reactoarele avansate cu apă în fierbere (Advanced Boiling Water Reactor = ABWR) dintre care două sunt deja operaționale și altele în construcție, respective reactoarele cu securitate pasivă ESBWR și AP1000. Cel mai radical și nou proiect este reactorul modular cu strat modular (PBMR) ce face parte din categoria reactoarelor de înaltă temperatură răcite cu gaz (HTGCR). De menționat este faptul că se află în stare de proiect noul tip de reactor, CAESAR (Clean And Environmentally Safe Advanced Reactor = reactor avansat, curat și sigur pentru mediul înconjurător), ce folosește aburul pe post de moderator.

Reactoare de generația a IV-a:

Cele mai avansate proiecte de reactoare nucleare sunt cunoscute sub denumirea de Generația a IV-a și sunt împărțite în șase clase:

- Gas cooled fast reactor = reactor rapid răcit cu gaz
- Lead cooled fast reactor = reactor rapid răcit cu plumb
- Molten salt reactor = reactor cu sare topită
- Supercritical water reactor = reactor supercritic cu apă
- Very high temperature reactor = reactor cu temperatură foarte înaltă
- Fission fragment reactor = reactor cu fragmente de fisiune

Rezervele geochimice ale scoarței terestre sunt evaluate la aproximativ 800 mil. t. însă cantitatea de uraniu din zăcămintele este evident mult mai mică, de aproximativ 24,5 mil.t. U_3O_8 din care 20,2 mil.t. în țările dezvoltate. Producția de curent electric produs în centralele nucleare a crescut continuu după cel de al doilea război mondial ajungând în prezent la peste 8% din producția mondială, însă există state la care procentul de curent din centralele nucleare depășește 50%. În figura 2.19 este prezentată producția de curent electric pe zone geografice iar în figura 2.20 țările care posedă centrale nucleare și procentul pentru fiecare țară de curent nuclear din total curent electric.

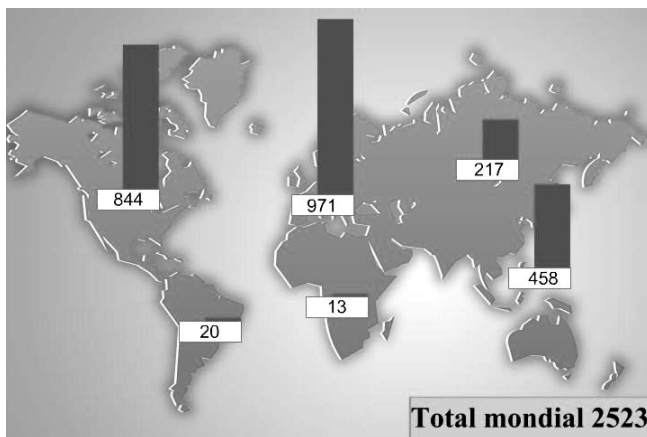


Figura 2.19. Producția de curent electric în centrale nucleare pe zone geografice (TW).

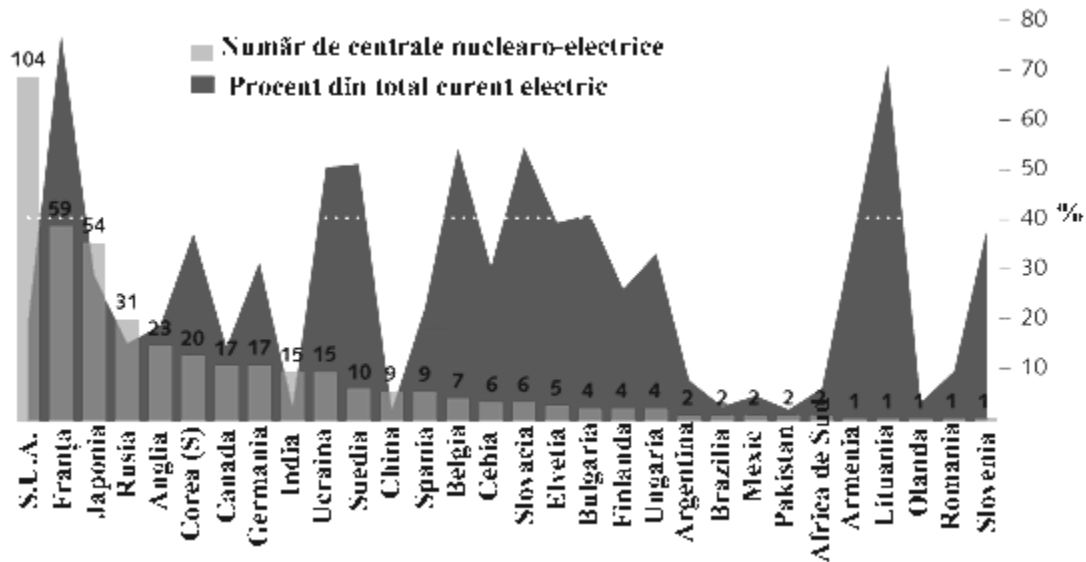


Figura 2.20. Țările care posedă centrale nucleare și procentul de curent electric nuclear din total producție curent electric.

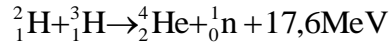
Deși a fost cea mai mare speranță, industria energetică nucleară este foarte contestată datorită efectelor negative pe care le are asupra mediului. De asemenea accidentele produse la centralele nucleare au sporit nemulțumirile referitoare la această sursă de energie. Dintre dezavantajele energiei nucleare menționăm:

- durata mare a perioadei de construcție: 6 ani pentru o instalație de îmbogățire a uraniului și 7 ani pentru o centrală nucleare-electrică
- randamente globale mai reduse (sub 2%) ale reactoarelor nucleare actuale
- pericole potențiale deosebite pe care le prezintă eventualele accidente pentru mediul înconjurător și pentru viața oamenilor, ceea ce implică măsuri și instalații speciale de protecție împotriva oricăror situații, și asigurarea securității de exploatare, care ridică foarte mult costul investiției inițiale
- nu este soluționată până în prezent depozitarea deșeurilor radioactive

Dintre avantajele energiei nucleare menționăm:

- durata de funcționare mai mare a centralelor atomo-electrice față de cele termoelectrice
- caracterul mai puțin poluant pentru atmosfera terestră
- facilități de stocare a combustibililor nucleari ca urmare a capacității energetice ridicate concentrate într-un volum foarte mic care corespunde potențialului energetic al unui kg de uraniu echivalent cu 25 000 t de cărbune
- costul de producție mai scăzut, datorat faptului că ponderea cheltuielilor privind combustibilul se situează sub 10%, chiar și în cazul reactoarelor cu randamentele cele mai scăzute, în raport cu 50% la centralele electrice pe cărbune; datorită acestui fapt o creștere cu 50% a prețului combustibilului se reflectă într-o creștere cu 50% a Kwh la o centrală pe cărbune iar o dublare a prețului combustibilului nuclear se reflectă printr-o creștere cu doar 5% a unui Kwh.

Cu adevărat o speranță în ceea ce privește producerea de energie o reprezintă **fuziunea nucleară** controlată, un proces similar cu cel care are loc în centrul soarelui: doi izotopi ai hidrogenului, un atom de deuteriu și unul de tritium se unesc pentru a forma heliu.



Prin fuziune se degajă o mare cantitate de energie și se elimină deșeurile radioactive cu o durată de viață mult mai mică decât cele rezultate din actualele centrale nucleare electrice. Fuziunea nucleară a fost realizată pentru prima dată prin anii 1930 prin bombardarea unei ținte conținând deuteriu, izotopul hidrogenului cu masa 2, cu deuteroni într-un ciclotron. Pentru a accelera raza de deuteroni este necesară folosirea unei imense cantități de energie, marea majoritate transformându-se în căldură. Din această cauză s-a considerat multă vreme că fuziunea nu este o cale eficientă de a produce energie. În anii 1950 prima demonstrație la scară largă a eliberării unei cantități mari de energie în urma fuziunii necontrolate a fost făcută cu ajutorul armelor termonucleare în SUA, URSS, U.K. și Franța. Această experiență a fost foarte scurtă și nu a putut fi folosită la producerea de energie electrică. În cadrul fisiunii, neutronul, care nu are sarcină electrică poate interacționa ușor cu nucleul, în cazul fuziunii, nucleele au amândouă sarcină pozitivă și în mod natural nu pot interacționa pentru că se resping conform legii lui Coulomb, lucru care trebuie contracarat prin mărirea energiei cinetice a acestora când temperatura gazului este suficient de mare 50-100 milioane °C. Problema de bază în atingerea fuziunii nucleare este căldura gazului și existența unei cantități suficiente de nuclee pentru un timp îndelungat pentru a permite eliberarea unei energii suficiente pentru a încălzi gazul. O altă problemă este captarea energiei și convertirea în energie electrică. La o temperatură de 100.000°C toți atomii de hidrogen sunt ionizați, gazul fiind compus din nuclee încărcate pozitiv și electroni liberi încărcăți negativ, stare numită **plasmă**.

Plasma caldă pentru fuziune nu se poate obține din materiale obișnuite. Plasma s-ar răci foarte repede, și pereții vasului ar fi distruși de căldură. Dar plasma poate fi controlată cu ajutorul magneților urmând liniile de câmp magnetic stând departe de pereți.

În 1980 a fost realizat un astfel de dispozitiv, în timpul fuziunii temperatura fiind de 3 ori mai mare ca a soarelui.

O altă cale posibilă de urmat este de a produce fuziune din deuteriu și tritium pus într-o sferă mică de sticlă care să fie bombardată din mai multe locuri cu un laser pulsând sau cu raze ionice grele. Acest procedeu produce o implozie a sferei de sticlă, producându-se o reacție termonucleară care aprinde carburantul.

Progresul în fuziunea nucleară este promițător dar înfăptuirea de sisteme practice stabile pentru reacția de fuziune care să producă mai multă energie decât consumă sunt extrem de greu de realizat. Activitatea de experimentare este și ea foarte scumpă. Totuși unele progrese sau obținut în 1991 când o cantitate importantă de energie (1,7 milioane W) a fost produsă cu ajutorul reacției de fuziune controlată în Laboratoarele JET din Finlanda. În 1993 cercetătorii de la Universitatea din Princeton au obținut 5.6 milioane W. În ambele cazuri s-a consumat mai multă energie decât s-a creat. Problema de baza în atingerea fuziunii nucleare este căldura gazului și existența unei cantități suficiente de nuclee pentru un timp îndelungat pentru a permite eliberarea unei energii suficiente pentru a încălzi gazul. O alta problemă este captarea energiei și convertirea în energie electrică.

O altă cale posibilă de urmat este de a produce fuziune din deuteriu și tritium pus într-o sferă mică de sticlă care să fie bombardată din mai multe locuri cu un laser

pulsatoriu sau cu raze ionice grele. Acest procedeu produce o implozie a sferei de sticlă, producându-se o reacție termonucleară care aprinde carburantul.

Dacă reacția de fuziune devine practică oferă o serie de avantaje: o sursă de deuteriu aproape infinită din oceane, imposibilitatea de a produce accidente din cauza cantității mici de carburant, reziduurile nucleare sunt mai puțin radioactive și mai simplu de manipulat.

În anul 2005 a fost lansat programul ITER la Centrul de Cercetări Nucleare de la Canderache din sudul Franței și la care participă Uniunea Europeană, SUA, Rusia, Japonia, China și Coreea de Sud și care cu un buget de peste 10 miliarde de dolari își propune realizarea fuziunii nucleare controlate ca sursă de energie. Schema reactorului nuclear de fuziune este prezentată în figura 2.22.

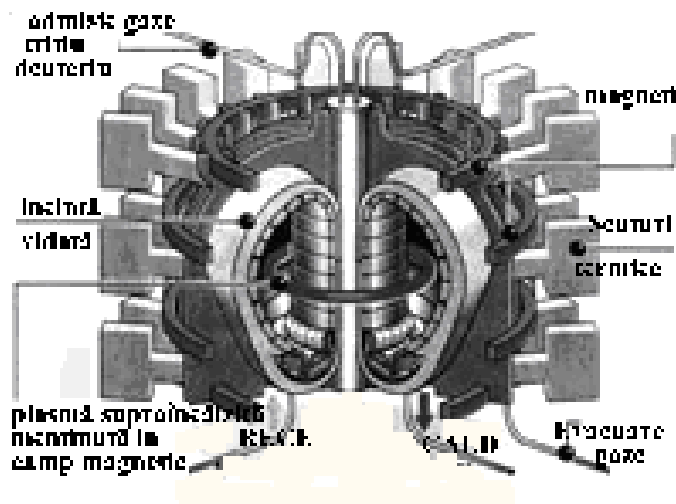


Figura 2.22. Schema reactorului nuclear de fuziune.

Atât combustibili fosili cât și sursele regenerabile sunt folosite la producerea de energie electrică și subsidiar pentru apă caldă menajeră și pentru încălzirea locuințelor. La nivelul anului 2002 repartitia producției de energie pe surse și o prognoză pentru 2030 este prezentată în tabelul 2.7.

Tip de combustibil	% în 2017	Previțiune 2030
Cărbune	38	38
Gaze naturale	19	30
Nuclear	17	13
Hidroenergetic	16	9
Petrol	7	4
Altele*	2	6

* din surse regenerabile cu excepția celor hidroenergetice.

Tabel 2.7. Procente din energia electrică produsă din diverse surse energetice.

Așa cum se observă există o tendință pronunțată de creștere e energiei provenită din surse regenerabile de aproximativ 3 ori, iar după ultimele estimări această creștere va fi și mult mai mare.