

TEMA 37

Energia nuclear.

Principi de conservació massa-energia

Fisió i Fusió nuclear i llur utilització.

Situació actual.

Problemàtica dels residus nuclears.

37.1 Energia Nuclear. Principi de conservació massa-energia

37.2 Nuclis fissionables. Reacció en cadena. Massa Crítica

37.3 La bomba atòmica

37.4 Reactors Nuclears

37.4.1 Característiques generals dels reactors nuclears

37.4.2 Tipus de centrals nuclears

37.5 Fusió

37.6 Problemàtica dels residus nuclears

37.5.1 Característiques dels residus

37.5.2 Opcions d'emmagatzament dels residus radiactius

37.6 Situació Actual

37***Energia nuclear. Principi de conservació massa-energia. Fisió i Fusió nuclear i llur utilització. Situació actual. Problemàtica dels residus nuclears.*****37.1 Energia Nuclear. Principi de conservació massa-energia**

Durant els anys 30 es va descobrir que la massa dels nuclis és sempre menor que la suma de les masses dels nucleons individuals que els componen. Per exemple, el nucli d'heli-4 té una massa de 4.00150 uma. La massa d'un protó és 1.00728 uma i la d'un neutró 1.00867 uma. Per tant, dos protons i dos neutrons tenen una massa total de 4.03190 uma. La massa dels nucleons individuals és 0.03040 uma més gran que la del nucli d'heli-4. Aquesta diferència de massa s'anomena defecte de massa. A partir de l'equació d'Einstein:

$$E = mc^2$$

deduïm que el defecte de massa prové del fet que durant la formació del nucli d'heli-4 s'allibera una certa quantitat d'energia, que s'anomena energia d'enllaç. L'energia alliberada és pot escriure com $0.03040 \times 931,4 \text{ MeV} = 28,31456 \text{ MeV}$. Podem dir doncs que durant la formació d'un nucli d'heli-4 una part de la massa esdevé energia (energia cinètica + radiació electromagnètica en forma de raigs gamma).

Si fem un estudi del defecte de massa per nucleó per molts nuclis, on per defecte de per nucleó enetenem $(M - Zm_p - Nm_n)/A$, que és un nombre negatiu, en funció del nombre de nucleons, s'observa que tant el nuclis molt lleugers $A \approx 20$ com els molt pesants $A \approx 200$, tenen defectes de massa inferiors als nuclis amb nombre de massa propers a 60. Això implica que tant la fusió de nuclis lleugers com la fisió de nuclis pesants, ha d'alliberar una quantitat molt important d'energia. L'equació d'Einstein ens recorda que això implica en tots dos casos la desaparició de petites quantitats de massa.

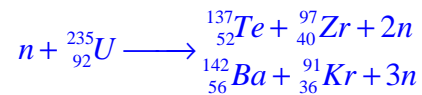
Per $A=200$ l'energia en repòs és aproximadament 1MeV per nucleó superior que per $A = 100$. Això voldrà dir que en la fisió d'un nucli massiu s'alliberen al voltant de 200 MeV. Aquesta energia és molt superior a l'energia de qualsevol reacció química (al voltant de 4eV).

L'energia alliberada en la fusió depèn molt de cada reacció en particular. Per exemple, la fisió del deuteri i el triti per donar heli-4 i un neutró allibera 17.6MeV. Aquesta energia sembla menor, però la quantitat d'energia per unitat de massa és molt superior que en el cas de la fisió.

Resulta interessant comparar aquestes energies amb les de les reaccions químiques. Quan es crema un combustible fòssil com el carbó, els àtoms d'hidrogen i carboni reaccionen amb l'oxigen de l'aire produint-se aigua i diòxid de carboni i s'allibera calor, uns 10eV per àtom de carboni.

37.2 Nuclis fisionables. Reacció en cadena. Massa Crítica

La primera fisió nuclear que es va descobrir fou la del urani-235. Aquest nucli fisiona fàcilment quan es bombardejat per neutrons tèrmics. El nucli pot fisionar de moltes maneres diferents, encara que normalment la massa dels dos nuclis resultants és semblant. Dues formes possibles d'entre moltes més són:



S'han trobat més de 200 isotops diferents fruit de la fisió de l'urani-235 i quasi tots són radiactius. Durant el procés de fisió, s'allibera una gran quantitat d'energia, deguda en gran part degut a la gran velocitat que adquireixen els nuclis resultant de la gran força de repulsió electrostàtica entre els dos nuclis que apareixen, i que es tradueix en energia tèrmica.

En promig, es produeixen 2.4 neutrons per cada fisió d'urani-235. Si cada neutró alliberat produeix una nova fisió, el nombre de neutrons augmentarà exponencialment en el temps, l'energia que s'allibera també i estarem davant del que s'anomena una reacció en cadena. El plutoni-239 allibera una mitjana de 2,8 neutrons quan fisiona.

La possibilitat de produir una reacció en cadena depèn de molts factors. Per començar depèn de la naturalesa dels nuclis presents, del nombre de nuclis emesos en cada fisió i de la capacitat d'aquests neutrons per provocar noves fisions. Per exemple, en l'urani natural, l'isòtop dominant és l'urani-238. Aquest nucli només pot ser fisionat, encara que amb una probabilitat força baixa, per neutrons ràpids. Això fa que en l'urani natural, que només conté un 0,72% d'urani-235, sigui d'entrada impossible produir una reacció en cadena. Resulta improbable que un neutró produït per fisió amb una energia inicial elevada iniciï una altra fisió. Això deixa de ser cert però, en presència d'un material moderador, que frena els neutrons i els retorna aptes per a la fisió.

Els nuclis que fisionen fàcilment són l'urani-235 i l'urani-233 (amb neutrons tèrmics) i el plutoni-239 (amb neutrons tèrmics o ràpids). S'han desenvolupat mètodes per obtenir grans quantitats d'aquests nuclis.

Quan aquests materials fisionen encara hi ha la possibilitat de que un nombre considerable de neutrons escapi per la superfície del material. La possibilitat de que un neutró pugui escapar depèn, en primer terme, de la relació superfície/volum. Per volums petits o grans superfícies els neutrons s'escaparan, cosa que no passarà si el volum és gran respecte de la superfície. Això imposa un límit a la massa mínima de materia fisible que s'ha de concentrar per a que es produeixi una reacció en cadena. S'anomena massa crítica al menor valor de massa que compleix aquesta condició. La massa crítica depèn de la forma que es doni a la mostra, essent la més favorable la forma esfèrica, per ser la que permet concentrar un major volum amb una superfície externa mínima. Quan tenim una massa crítica, només un neutró de cada fisió és capaç de produir una altra fisió.

37.3 La bomba atòmica

Les bombes atòmiques són enginys on es produeix una reacció en cadena d'una substància fissionable, com pot ser l'urani-235 o el plutoni-239 en un grau de puresa tant propera com es pot al 100%. La reacció de tot el material es produeix en un interval de temps extremadament curt, de l'ordre d'una centmil·lièsima de segon.

El material fisible pot estar constituït per dos blocs de massa inferior a la crítica (masses subcrítiques) que es mantenen separats. Per provocar l'explosió, un dels blocs es fa impactar violentament contra l'altre mitjançant la detonació d'un explosiu convencional. La reacció en cadena s'inicia quan les dues masses entren en contacte formant-se una massa superior a la crítica, és a dir, una massa supercrítica. En una massa supercrítica els neutrons emesos en cada fisió són aprofitats per a produir una nova fisió. Per tant, el nombre de neutrons i de fisions creix exponencialment en el temps produint-se una gran explosió. En la fisió completa d'un kg d'urani-235, la pèrdua de massa és d'al voltant d'un gram, la qual cosa equival a una energia equivalent a l'explosió de 20.000 tonelles de TNT, és a dir de 20 kilotones. Avui dia hi ha bombes amb potències superiors a les 500 kilotones.

En altres casos, l'urani o el plutoni formen un única massa que es manté en condicions no crítiques gràcies a la seva estructura porosa. Envoltant-la hi ha un explosiu convencional que a l'explotar comprimeix a la substància radioactiva convertint-la en crítica. La potència d'aquest tipus de bombes està limitada pel fet que no es pot incrementar indefinidament la quantitat d'urani o plutoni evitant al mateix temps que s'iniciï la reacció en cadena.

37.4 Reactors Nuclears

37.4.1 Característiques generals dels reactors nuclears

El principal problema que s'ha de resoldre en el disseny d'un reactor nuclear és el de limitar la velocitat de reacció, de manera es produïxi energia de forma constant, i aquesta energia sigui aprofitable, per exemple, per produir electricitat.

La majoria dels reactors en funcionament utilitzen o bé urani natural (99,28% urani-238 i 0,72% urani-235) o bé urani enriquit amb una proporció més gran de urani-235 (fins a un 2 o un 3%). Finalment, també n'hi ha que utilitzen plutoni-239.

La part fonamental d'un reactor és el nucli del reactor, on es dur a terme la fisió. El nucli del reactor està constituït pel combustible, el moderador (que frena els neutrons ràpids emesos durant la fisió per a que siguin aptes per a propera fisió), el refrigerant i la part estructural. El combustible, en estat sòlid, apareix en molts dissenys distribuït en forma de "cartuchos" separats pel material moderador. El moderador pot ser aigua, aigua pesada (el millor de tots i amb diferència), grafit o berili. Entre ells passa el refrigerant: aigua, aigua pesada, gasos a gran pressió com per exemple CO₂, refrigerants orgànics o metalls de baix punt de fusió, com ara el sodi en estat líquid. La seva funció és limitar la temperatura del reactor i transportar l'energia produïda per a la seva posterior utilització. A l'interior del nucli s'introdueixen les anomenades barres de control, constituïdes per materials molt absorbents de neutrons, com ara el cadmi, el bor o l'indi. Segons la penetració d'aquestes barres a l'interior del reactor s'absorbeixen més

o menys neutrons, es limita la velocitat de la reacció en cadena i si cal fins fins i tot es pot aturar el procés. Envoltant al nucli hi ha una capa de material reflector (aigua o grafit) per limitar al màxim la pèrdua de neutrons i una sèrie de cobertes d'acer i formigó que impedeixen que les radiacions produïdes en el nucli puguin arribar a l'exterior.

En un reactor que funciona amb urani-235, es produeixen com a promig 2,5 neutrons per cada fisió. Aquests neutrons són generalment molt ràpids. Algún d'aquests neutrons pot fisionar algún nucli d'urani-238, aconseguint-se així un petit aport extra de neutrons ràpids.

Els neutrons ràpids poden perdre's al sortir del nucli de material fisible, al ser absorvits per l'urani-238 per donar plutoni-239 o donar lloc a altres reaccions nuclears que no son de fisió. Els neutrons ràpids supervivents són frenats pel moderador.

El moderador convé que sigui un material amb nuclis lleugers i que absorbeixi molt pocs neutrons. Els neutrons lents tornen a l'urani a on tenen una gran probabilitat de produir fisions. Alguns però seran absorvits pel material estructural i pels productes de fisió. En un reactor en el que un dels neutrons fruit de cada fisió arriba a produir un altre fisió es diu que està en estat crític. Quan el nombre de neutrons útils per fisió és inferior a la unitat el reactor es diu que està en estat subcrític, i en estat hipercrític quan es produeix més d'un neutró útil en cada fisió.

També hi ha reactors que funcionen amb neutrons ràpids, com per exemple els que utilitzen plutoni-239. En aquest cas no hi ha moderador.

Els productes de fisió s'acumulen durant el funcionament del reactor. Aquests productes disminueixen l'eficiència del reactor perquè capturen neutrons. Això fa que sigui necessari parar el reactor peridicament per canviar el combustible nuclear. Quan les barres de combustible s'extreuen del reactor són extremadament radioactives. Per tant es guarden durant molt de temps en piscines anexas al reactor per a permetre la desintegració del nuclis radiactius de vida curta. La intenció era que després d'un temps les barres es reprocessarien i el combustible es separaria dels productes de fisió. En molts cassos però, degut a que el transport és extremadament perillós i que les plantes de reprocessament també són perillooses, el combustible nuclear s'acumula a la piscina del reactor.

Anem a examinar diferents tipus de reactors nuclears:

37.4.2 Tipus de centrals nuclears

Centrals d'aigua a pressió (PWR)

1. Utilitza urani enriquit fins a un 3%.
2. S'utilitza aigua ordinària tant com a moderador com a refrigerant. L'aigua ordinària absorbeix neutrons i això és el que obliga a enriquir l'urani.
3. El combustible nuclear està constituït per pastilles ceràmiques d'òxid d'urani situades a l'interior d'unes barres cilíndriques hermètiques d'aproximadament 1cm de diàmetre fetes d'una aleació de Circoni anomenada "circaloy", un metall molt poc absorvent de neutrons i punt de fusió molt elevat.

4. El nucli del reactor típic té uns 15m d'alçada, 5 metres de diàmetre i unes parets d'uns 25cm d'espessor. El nucli conté unes 80 tonelles d'òxid d'urani.
5. El circuit primari d'aigua depurada, que circula en règim tancat i a una pressió elevada (150 atmosferes) per evitar l'ebullició (l'aigua surt del reactor a uns 325°C), està constituït pel propi reactor, les conduccions, la bomba de circulació, el presuritzador, i el generador de vapor. Tot plegat està contingut a l'interior d'un edifici de contenció de formigó.
6. El vapor es produeix en un circuit secundari també d'aigua.
7. Aquest tipus de central és la més comuna a tot el món i arriben a tenir una potència de 1.300 MW.

Centrals d'aigua en ebullició (BWR)

1. A diferència de les anteriors, l'aigua, un cop escalfada pel seu pas pel nucli del reactor es deixa que bulli, produint-se directament el vapor d'alimentació a turbines.
2. Per tant, no hi ha generador de vapor i les turbines estan també contingudes en el recinte de contenció.

Centrals d'urani natural, grafit, gas (GCR)

1. S'utilitza urani natural en forma metàlica envainat en una aleació de magnesi i Circoni, formant elements combustibles que s'introdueixen en canals buits d'un apilament de grafit, que fa de moderador.
2. El refrigerant és gas carbònic.
3. El nucli i el generador de vapor resten integrats en circuits de contenció.
4. La primera central d'aquestes característiques fou la de Calder Hall, que, encara que produïa electricitat, estava optimitzada per a la fabricació de plutoni-239 per a ús militar.
5. Arriben fins a una potència de 590MW, encara que la majoria es situa cap als 500MW.

Centrals avançades de gas (AGR)

1. A diferència de les anteriors el combustible és òxid d'urani enriquit en un 2% envainat en acer per poder treballar a temperatures més elevades.
2. Requereix menys combustible que l'anterior, i potència específica és més elevada.
3. Arriben fins a 660MW, però han donat molts problemes.

Centrals de gas d'alta temperatura (HTGR)

1. També utilitza grafit com a moderador, però el refrigerant és heli i el combustible són petites partícules esfèriques de carbur d'urani altament enriquit, des de 93% fins al 100%. Les esferes estan revestides amb una o dos capes de carbó refractari i una de carbur de silici.
2. També s'hi posa tori natural, que és pràcticament tori-232 en un 100%. El tori-232 pot absorbir un neutró i transformar-se en urani-233. El procés és anàleg a la transformació d'urani-238 en plutoni-239. L'urani-233 es fisiona quan es colpeja per un neutró lent i també produeix neutrons que mantenen la reacció en cadena. L'urani-233 emet més neutrons per fissió que l'urani-235 o el plutoni-239. L'urani-

- 233 que queda en el combustible residual es pot recuperar mitjançant reprocessament i pot ser incorporat a successius elements de combustible.
3. El coeficient de reactivitat de temperatura és negatiu: això vol dir que quan la temperatura del nucli augmenta la reactivitat baixa.
 4. Aquestes centrals treballen encara a temperatures més elevades i per tant tenen un rendiment energètic més gran. S'han construït centrals d'aquest tipus amb una potència de 343MW.

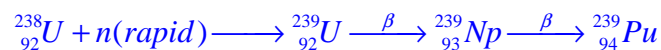
Centrals d'aigua pesada (HWR)

1. El combustible és urani natural i el fluid moderador refrigerant és aigua pesada.

Centrals amb reactors ràpids reproductors (FBR)

La majoria de centrals que hem estudiat fins ara, han de canviar el seu combustible amb una freqüència relativament elevada degut a la baixa eficiència en l'ús de l'urani. Aproximadament només s'arriba a aprofitar un 1%. En els reactors FBR es produeix més combustible del que es consumeix. Per aconseguir això, es fa servir plutoni-239.

El plutoni-239 pot fisionar prou eficientment per l'acció dels neutrons ràpids. Els neutrons ràpids, d'altra banda, són capaços de convertir l'urani-238 en plutoni-239:



Per tant, aquest tipus de central el nucli del reactor no fa ús de materials moderadors. El nucli està format per milers de tubs primers d'hacer inoxidable que contenen entre un 15-20% de plutoni-239 i la resta urani-238. El nucli està envoltat per una zona anomenada capa fèrtil, que conté barres similars plenes només d'òxid d'urani. Tot el conjunt de nucli i capa fèrtil mesura uns 3m d'alt per uns 5m de diàmetre i està muntat en un gran dipòsit que conté sodi líquid que surt del reactor a uns 500°C.

La primera central d'aquest tipus fou la Super-Phénix francesa. A Escòcia n'hi ha una de 250MW.

37.5 Fusió

Quan nuclis molt lleugers fusionen es produeix energia, com ja hem vist. Les reaccions de fusió són l'origen de l'energia del Sol. Una gran quantitat d'elements químics es formen al llarg de la vida dels estels. Els elements més pesants es formen durant les supernoves. Els motius principals pels quals la fusió ha creat grans esperances són que el combustible necessari, constituït per diferents isotops de l'hidrogen és molt abundant a la naturalesa i els subproductes radiactius de la reacció són en menor quantitat i de vida més breu que els originats en el procés de fissió nuclear.

La temperatura més baixa a partir de la qual pot haver-hi alguna reacció de fusió és de 40 milions de graus. La reacció que pot tenir lloc a aquesta temperatura és:



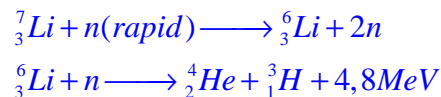
A aquestes temperatures la matèria es troba constituïda per ions positius i electrons, és a dir, en estat de plasma. Aquestes temperatures tant elevades s'han aconseguit utilitzant una bomba atòmica per iniciar el procés de fusió. Però aquest mètode no resulta factible per a la generació controlada d'energia. El deuteri és molt abundant, existeix en la proporció de 34 parts per milió en l'aigua de mar. El triti pot obtenir-se a partir del liti, element molt abundant a l'escorça terrestre.

Un dels problemes més greus doncs, és aconseguir temperatures suficientment elevades. Un altre problema és el de poder confinar material a tanta temperatura durant un temps suficient com per engegar la reacció.

Hi ha un aparell anomenat Tokamak que utilitza forts camps magnètics per contenir i escalfar la reacció. Un tokamak és bàsicament una "ampolla magnètica" per a confinar i escalfar nuclis per a obligar-los a fusionar-se. L'energia s'injecta en forma de radiofreqüència i feixos de partícules d'alta energia.

Un altre mètode consisteix a utilitzar làsers d'alta energia per iniciar el procés de fusió. El combustible es tanca en una minúscula piloteta que s'injecta en el camí d'intersecció de múltiples rajos làser. L'escalfor dels raigs làser fa que exploti cap enfora la coberta de la piloteta, la qual cosa genera una força igual cap endins, produint-se una implosió tant forta que pugui ocórrer la fusió.

Una vegada s'aconseguís engegar i mantenir la reacció el següent problema seria extreure l'energia de la reacció, que en un 80% és deguda a l'energia del neutró residual i en un 20% deguda a l'energia de l'heli. Els neutrons travessen fàcilment el plasma i poden arribar a la primera paret material de la cavitat de fusió. Un material que absorbeix bé els neutrons és el liti:



Per tant si s'utilitzés com a refrigerant liti fos aquesta reacció n'elevaria la temperatura i el triti es podria extreure per utilitzar-lo en la reacció.

Actualment cap tècnica a aconseguir produir més energia per fusió que la que s'aplica inicialment.

37.6 Problemàtica dels residus nuclears

No existeix cap manera de neutralitzar el caràcter radiactiu de les substàncies radiatives. La manipulació i el tractament dels residus radiactius finals procedents de la utilització de radioisòtops s'han d'encarar a partir d'un debilitament radiactiu durant un temps suficient, del blindatge adequat per a la seva manipulació i del confinament en condicions suficientment segures, tant pels emmagatzaments temporals com pels definitius.

Els isòtops radiactius de vida curta desapareixen durant el seu primer emmagatzament temporal, mentre que els més duradors, procedents de la irradiació de

l'urani en els reactors nuclears poden durar aproximadament 300 anys. Únicament els elements transurànids formats durant la irradiació de combustible nuclear romanen durant moltíssim temps, sobrepasant en alguns casos els 10.000anys.

Tots els països que participen en programes nuclears tenen actualment en perspectiva, o en vies més o menys avançades de desenvolupament, tecnologia necessària per a la preparació i compactació de diversos residus radiactius i la cerca i acondicionament d'emplaçaments adequats que permetin emmagatzemar durant un temps indefinit residus de mitjana o llarga durada.

37.5.1 Característiques dels residus

La producció de residus radiactius no només es dona en les centrals nuclears, també ocorre en la indústria, la investigació, medicina etc. La majoria dels isòtops utilitzats en aquests casos són de vida curta.

L'extracció de l'urani mineral produeix grans quantitats de residus, 500 tonelades per cada tonelada d'urani. Aquests residus contenen radi i d'altres isòtops radiactius. L'activitat però és baixa i es pot eliminar mitjançant dilució química, concentrant i eliminant els isòtops radiactius.

Quant a les centrals nuclears:

1. Una part queda lligada al propi combustible. Són els residus de menor volum, però són els de major nivell de radioactivitat, constituïts per fragments radiactius de fisió i per altres elements, com el plutoni o d'altres transurànids, que s'originen com a conseqüència de la irradiació neutrònica del combustible. Si aquests residus es reprocessen (fora de la central) els residus s'obtenen en forma de concentrats líquids, que s'immobilitzen mitjançant la incorporació a materials de tipus vitrificat, com el pyrex.
2. Els residus líquids radiactius es sotmeten a un o varios processos de precipitació, evaporació, filtració, centrifugació i intercanvi iònic específic, quedant com a producte final un residu concentrat, que s'incorpora a una matriu de ciment, asfalt o polímers plastificats per a obtenir un producte final sòlid.
3. Els residus sòlids, eines, indumentària, etc es poden compactar, triturar o incinerar per a reduir el seu volum.
4. Restes radiactives del desmantellament de les centrals al terme de la seva vida útil.

Per tant, tots aquests residus sòlids, una vegada acondicionats, són els que s'han de considerar a efectes d'un emmagatzament confinat.

Es consideren residus d'alta activitat els lligats al combustible irradiat i el seu reprocessament. I de mitjana i baixa activitat la resta de residus (excloent sempre els transurànids emissors alfa), segons el seu nivell de concentració o d'irradiació. Els residus de mitjana i baixa activitat són isòtops de vida molt més curta que els d'alta activitat.

37.5.2 Opcions d'emmagatzament dels residus radiactius

L'emmagatzament de residus ha de respondre a uns criteris de confinament i seguretat que evitin el contacte directe o indirecte amb l'exterior, en particular amb les cadenes biològiques. Per tant els residus han de ser immovilitzats i continguts en capsules especials.

Els magatzems escollits han de garantir una estabilitat i durada superior a cents o milers d'anys, segons el tipus de residu. Els principals emplaçaments escollits són mines subterrànies o mines de sal que garanteixen absència d'aigua durant milers d'anys. També poden ser vàlids els dipòsits en formacions rocoses profundes de basalt o granit on es podrien fer pous d'accés que després es tancaríen hermeticament.

Altres opcions són perforacions en sediments subaquàtics de fons oceans profunds o la introducció de residus a l'interior de capes de gel permanent en les zones polars.

Els residus de mitjana i baixa activitat poden dipositar-se en enterraments més superficials o també en fosses oceàniques profundes.

Actualment hi ha mines experimentals a Alemanya, mina de sal de Asse, a 750 metres de profunditat. A USA hi ha també una mina de sal de 600 metres de fondària i a una formació basàltica de 1130m de profunditat. A França hi ha un emmagatzament en superfície a La Manche per residus de mitjana i baixa activitat de 12 hectàrees d'extensió i un altre centre a Loire. Gran Bretanya té enterraments superficials per residus de baixa activitat a Driggs i Dounreay.

Referent al combustible gastat, a França hi ha una planta de vitrificació a Marcoule i a USA i Gran Bretanya s'estudia la possibilitat d'emmagatzament prolongat en sec, sense processament.

37.6 Situació Actual

Als USA al principi de la dècada dels 80 hi havia unes 100 centrals nuclears contant les que estaven en funcionament i les que estaven en construcció. Després de l'accident de Three Mile Island la preocupació per la seguretat i els factors econòmics van bloquejar el creixement de l'energia nuclear. Des de l'any 1978 no s'han construït noves centrals nuclears a USA i no s'ha permès el funcionament d'algunes centrals ja acabades. Aproximadament un 20% de la producció enèrgica a USA és d'origen nuclear.

A Europa hi ha diversitat d'actituds front l'energia nuclear. Àustria ha cancel·lat el seu programa nuclear. Suècia ha limitat el seu programa a 10 reactors. A Espanya s'ha limitat també el nombre de reactors i el de Vandellòs I està en desmantellament després d'un greu accident. En canvi a França, Alemanya i també al Japó es segueix avançant en aquest sector. A França, el 75% de l'energia produïda és nuclear. Al Regne Unit al voltant del 25%.