

Fisioko energia nuklearra. Etorkizuneko energia-iturria?

Fernando Plazaola

Elektrizitatea eta Elektronika Saila
Zientzia eta Teknologia Fakultatea/Euskal Herriko Unibertsitatea
644 p.k., 48080 Bilbo

Laburpena: Energia arazo oso larria da gure gizartean, eta dirudienez, are larriagoa izango da etorkizun hurbil batean. Ez da munduan denon gustuko energia-iturriarik, zeren egungo iturri guztiak hankamotz gelditzen baitira alde batetik edo bestetik. Energia-iturri desberdinen abantailak eta desabantailak laburki aztertu ondoren, lan honetan energia nuklearrari erreparatuko diogu sakonkiago. Energia mota honek aurkakotasun ikaragarria aurkitu du Euskal Herrian zein Europan, baina azkenaldian energia nuklearra energiaren arazoari aurre egiteko iturri bezala aipatu da. Horren zergatiak aztertzen saiatuko gara lan honetan. Bukaeran zentral nuklearrek energia ekoizteko behar diren oinarriak azalduko ditugu, zentral nuklear mota nagusiak deskribatuz.

SARRERA

Gure zibilizazioa, energia-hornidura egokiaren mende dago. Energiarik gabe ezin izango genuke etxea berotu edo janaria prestatu. Distantzia luzeko bidaiak eta garraioa ere ezinezkoak izango lirateke, eta gure lantegiek ez lituzkete sortuko behar ditugun ondasunak. Horrek, egungo gizarterako garrantzi oso handiko parametro baten txartzea ekarriko luke, bizi mailaren txartzea hain zuzen eta denok jakitun gara egungo gizarteak bizi maila hobetzeko ahal dituen baliabide guztiak jartzen dituela.

Duela 100 urte, munduko energia gehiena ikatzetik eta iturri «tradizio-naletatik» lortzen zen, hau da, egurretik, uzten hondakinetatik eta animalien gorotzetatik. Orain ere energia-iturri nagusietakoak dira horiek, batez ere garapen-bidean dauden herrietan; haietan 2.000 milioi lagunek ez dute energia-forma berriak eskuratzeko modurik edo ezin dituzte ordaindu. Egurretik eta gorotzetatik urtean 1.000 milioi tona petrolioren pareko energia lortzen da. Kontuan izan behar da gutxi gorabehera mundu osoan ekoiztiriko energia nuklearra baino 1,6 aldiz gehiago dela hori. Europan eta Amerikako Estatu Batuetan (AEB) batera ikatzetik lortzen den energia kopuru bera da nonbait.

XX. mendean, merkataritza eta populazioa inoiz baino bizkorrago hazi dira. Berdin hazi da energia-kontsumoa ere: hamarkoiztu egin da, eta batez ere petrolio erregaia eta gas-erregaia, hidroelektrizitatea eta energia elektrikoa garatu dira. Herrialde industrializatuetan gertatu da hazkunderik handiena; haietan erregaien kontsumoa biztanleko garapen-bidean dauden herrialdetakoa baino 10 aldiz handiagoa da.

Herrialde industrializatuetan energia-kontsumoa gorantza doa baina egonkortzera joko duela espero da, eta une goren horretara iritsi ondoren behera egiten has daiteke energiaren eraginkortasuna etengabe handitzearen ondorioz. Azken bi mendeotan energiaren eraginkortasuna izugarri handitu da energia mekanikoan, elektrizitatearen sorkuntzan, argiztapenean, beroaren erabileran eta kontserbazioan, eta beste aplikazio askotan. Eta ez dago zertan pentsatu etorkizunean ez dela bide horretan aurrera egingo. Adibidez, garraioan erregai-pilak erabiliz, bi-hiru aldiz hobetu daiteke erregaien eraginkortasuna barne erredukzio motorrarekiko. Edo elektrizitatea eta beroa batera sortzeko energia-iturri txikien bidez.

Egoera bestelakoa da garapen-bidean dauden herrietan, han milako milioi lagun baitaude bizitzeko behar duten energia ezin erdiets dezaketela, edo areago, beren bizomodia hobetzeko behar den energia lortu ezinik. Aurrera egingo badute, beren energia-beharrak ase beharko dituzte, eta behar horiek bikoizten ari dira 15 urtetik behin. Bestalde haien populazioa herrialde garatuetakoa baino ia 710 aldiz handiagoa da, eta (Afrikako herrialde batzuk kendurik) hazkunde ekonomikoa askoz handiagoa da herrialde industrializatuetan baino.

Energiaren eraginkortasuna hobetzeko tarte bat utzirik ere, herrialde industrializatuetakoa gaur egungo kontsumoaren erdia baino ez da garapen-bidean dauden herrialdeetan energia-kontsumoa biztanleko, eta beraz, energia-kontsumoa hirukoiztu egingo dela pentsa dezakegu. Hortaz, hurrengo hamarkadetan, garatzen ari diren herrialdeek, gaur egungoaz gainera 5×10^6 MW-eko elektrizitatea sortzeko ahalmena beharko dute; gaur egun 1×10^6 MW-eko ahalmena baino ez dute hauek, eta 2×10^6 MW-eko herrialde industrializatuak. Izan ere, energia elektrikoa energia-kontsumo osoaren herena baino ez da; gainerakoa garraiatzeko eta berotzeko erabiltzen da nagusiki.

ENERGIA-ITURRIAK EBALUATZEKO IRIZPIDEAK

Beraz energia-hornidura behar itzela dugu izugarri sofistikatzen ari den gure zibilazio teknifikatu honetan. Garrantzizkoa eta premiazkoa da behar horiek asetzeko bideak aurkitzea, eta, hortaz, litezkeen aukera guztiak hartu behar ditugu kontuan, eta ahalik eta erarik objektiboenean ebaluatu. Honakoak dira energia-iturriak aztertzeko irizpide egokienak/eraginkorrenak:

- 1) Iturriak garbia izan behar du, hots, bere erabilerak ez du inolako kalterik sortu behar ez gizakiongan, ez ekosisteman. Egun erabiltzen ditugun energia-iturri nagusiek ez dute baldintza hau betetzen. Ikatza, gasa edo petrolioia bezalako fosil-erregaietan oinarritutako iturrien kasuan, negutegi efektuko gasak dira hondakinak; zentral nuklearretan, berriz, hondakinak erradioaktiboak dira.
- 2) Energia ekoizteko ahalmena etengabeki edukitzea. Egungo teknologian arazo oso larria da energia metatzeko gaitasun urria. Honek esan nahi du energia beharrak bat-batean handitzen badira ezin dela behar hori asetzeko gordea den (hau da, metatua den) energia erabili, teknologiak horretarako gaitasunik ez baitu. Ezintasun hori gainditzeko, energia-iturriek aukera eman beharko ligukete energia etengabeki emateko. Arazo honen aurrean hankamotz geratzen dira hainbat energia-iturri berriztagarri. Haize-errotek energia ekoizteko haizea behar dute eta egungo eguzkitikoeak eguzkia.
- 3) «Agortezina» izatea. Agerian dago ez fosil-erregaiak ezta egungo energia nuklearrak ere ez dutela baldintza hau betetzen. Aspaldidanik entzunak ditugu fosil-erregaiak agortuko direla dioten iragarpenak, baina hala ere, badirudi, egungo ustiapen-abiadurari eusten bazaio, mende bat baino denbora luzeagoan fosil-erregaiak ez direla agortuko.
- 4) Kostua. Energia-iturri bat lehiakor bilakatzeko parametro hau oso garrantzitsua da. Aurreko baldintza guztiak ongi bete arren, energia-iturri baten kostua gehiegizkoa bada, gure gizarte honetan ez du aukerarik, beste energia motekin lehiatzeko. Gehienetan hau da gakoa. Izan ere, 1973an petrolio-krisi bat egon zen: OPEC-koek petrolioren hornidura murriztu zien Yom Kippur gudan Israeli lagundu zioten estatuei, AEBei eta mendebaleko Europa osoari, eta petrolioaren salneurria 1974rako laukoiztu egin zen. Krisi honek, atea zabaldu zien nonbait energia berriztagarriei eta fisioko energia nuklearrari; petrolioaren garestitzeari aurre egiteko mendebaldea energia-iturri sendo bat bilatzen hasi zelako. Fusioko energia nuklearraren ikerketak ere izugarritzko dirutza jaso zuen, baina oraindik ez da energia-iturri bilakatu. Beharbada, fusioko energia nuklearra (eguzkiak Lurrera argia igortzeko erabiltzen duena) energiaren arazoa ebatz dezakeen energia-iturria izan daiteke etorkizunean: agortezina eta «garbia». Egun ere, petrolioaren salneurrien eta horniduraren egonkortasun eza da energia-iturri berrien ikerketaren eragile nagusia.

Oso komenigarria da energia-iturria erabiltzen den gunetik gertu egoetea ere. Energia elektrikoaren garraioan, kableetan, asko galtzen da Joule efektua dela-eta. Galera hori gutxitzeko tentsio altuko garraioa erabiltzen da (400.000-700.000 V), baina hala ere, iturrian sortzen den energia elek-

trikotik gutxienez %20a galtzen da bidean. Beraz, giro-tenperaturan lan egin dezaketen material supereroaleak aurkitu arte (inoiz aurkitzen badira), komenigarria da energia elektrikoaren iturria eta erabilera-gunea ahalik eta hurbilen egotea. Agerian dago egungo sare elektrikoak antolatuta dauden bezala, elektrizitatea iturri zentralizatuetatik urrunera garraiatuz eta transnazonala bilakatuz, bidean galtutako energia gehiegizkoa dela.

Azter ditzagun laburki egun erabil ditzakegun energia-iturriak:

- Energia hidraulikoa oso energia-iturri garrantzitsua da, berriztagarria delako eta atmosfera kutsatzen ez duelako. Hala ere, lurralde balioetsuak erabiltzen ditu, eta, nolana ere, horretarako ibai egokiak ez dira asko. Energia hidraulikoaz nekez osatuko dugu geure energia-beharren %10 inguru baino gehiago.
- Haizeak, eguzkiak eta energia geotermikoak kontsumo osoaren ehuneko txikia ematen dute. Haietako batzuk (haizea eta eguzkia) ez dira konstanteak, edo aldizkakoak dira (mareak), eta beraz, ez dute aurreko 2. baldintza betetzen. Gainera, oraingoz aski garestiak dira eta lur-eremu handiak behar dituzte. Gure beharrak milioika aldiz asetzeko adina energia dago haizean, olatuetan eta mareetan, baina horrelako iturriak erabiltzeko moduan eskuratzea da gakoa. Ekoizten dugun energiaren %0,5 baizik ez dugu lortzen haizetik eta eguzkitik.
- Fosil-erregaiak: ikatza. 3. baldintza oso ondo betetzen du, egungo ustiapen-abiadurari eutsiz hainbat menderako erregaia geratzen baita. Hala ere, ikatza erabiltzen duen ohiko zentral elektriko bategi, negutegi efektuaren eragile diren beste hainbat hodakinez gain 10 milioi tona karbono dioxidoa baino gehiago aineratzen ditu urtean: horixe da hain zuzen negutegi efektuaren eragile nagusietako bat. Ikatza-kostuaren aldetik oso lehiakorra da, baina oso kutsakorra izanda lehenengo baldintza betetzen ez duenez energia-iturri hau ordezkatzeko ahaleginak egiten ari dira.
- Fosil-erregaiak: gas naturala eta petrolio. Gas naturala erabiltzen duten zentral elektriko asko eraikitzen ari dira, bereziki egun bere kostuak oso lehiakorrak direlako. Gainera, ikatza erabiltzen duten zentral elektrikoek askatzen duten karbono dioxidoaren erdia baizik ez dute aineratzen. Hala ere, metanoa isurtzen dute, eta metanoaren «Planetaren berotze potentziala» karbono dioxidoarena baino 60 aldiz handiagoa da gutxi gorabehera. Bi efektu horiek gutxi gorabehera elkar berdintzen dute, eta horrek esan nahi du ikatzetik gasera aldaturik ezin dela espero planetaren berotzea murriztuko denik. Petroliak ere, beste fosil-erregaien arazo berbera du, negutegi efektua eragiten duten gas andana igortzen ditu, eta horiez gain euri azido bilakatzen den sulfuro oxidoa askatzen du eguratsera. Gainera, petroleoa munduko eskualde ezegonkorretatik ekarri behar da.

Aurreko zehaztapenek agerian uzten dute ez dugula energia-iturri «filosofalik». Izan ere, energiaren arazoak «harri aroan» dagoela esatera ausart ninteke, egungo energia-iturri guztiek arazo larriren bat erakusten baitute etorkizuneko energia-beharrak asetzeko unean.

ENERGIA NUKLEARRA

Nazio Batuen 1955 eta 1957ko «Atomoak bakerako» kongresuak industria nuklearra zabaltzeko oinarri izan ziren, fisioko zentral nuklearrak zabaltzeko oinarri hain zuzen. Bazirudien erregai fosilek 75 urtean agortu egingo zirela eta xx. mendearen bukaerarako energia-krisi handi bat izango genuela energia nuklearrari heldu ezean. Hala ere, ongi dakigu horrelakorik ez dela gertatu. Erreserben zenbatespen desberdinak egon arren, frogatuta dago fosil-erregai ugari daudela, gutxienez datozen 100-200 urteetarako. Izan ere, egungo kontsumo-tasari eutsiz petrolioia izango da lehen agortuko dena, gas naturala gero, eta ikatza azkena. Zentral nuklear gehienak 1960-90 epean eraiki ziren. 70eko hamarkadaren hasieran gertatu zen petrolioaren energia-krisiak bereziki areagotu zuen energia nuklearraren aldeko apustua. 1980ko hamarkadan, zentral nuklear berrien eraikuntzaren gorenaldian, batez beste 23 erreaktore nuklear eraikitzen ziren urteko; une gorenera helduta, 43 eraiki ziren 1983an. Egun lanean diharduten zentral nuklearren kopurua 440 ingurukoa da, 32 estatuetan banatuak; munduan kontsumitzen den elektrizitatearen %16 jatorri nuklearrekoa da. Europan balio hori %33raino iristen da eta hainbat estatutan energia-iturri nagusia energia nuklearra da: Lituania (%80), Frantzia (%78), Eslovakia (%57), Belgika (%55) eta Suedia (%50).

Azken bi hamarkadetan bereziki, gizartearen zati handi bat energia nuklearraren aurka egon da. Izanez, duela bost urte jende oso gutxik pentsa zezakeen energia nuklearra energiaren arazoari aurre egiteko aukera gisa proposa zitekeenik. Are gehiago, badakigu mundu osoaren energia-ekoizpenaren %16 nuklearra dela eta Europan balio hori %33raino iristen dela; baina industria nuklearra gainbeheran zegoela esatera ausart ninteke. Istripu nuklearrek, bereziki Three Mille Island eta Txernobilgo istripuek, energia nuklearrarekiko oso aurkakoa bilakatu zuten gizartearen jarrera. Istripu horien ondorio zuzena izan zen, AEBn zein Europako hainbat estatutan zentral nuklearrak eraikitzeke moratoria.

Azkenaldian berriz, energia nuklearrak entzute handia hartu du komunikabideetan. Eta ez gertatu diren istripuengatik, egungo energia arazo orokorrari aurre egiteko energia-iturri eraginkor bat delakoan baizik. Bestalde, itzal handiko ekologistak energia nuklearraren aldeko bilakatu dira: «Gaia»ren asmatzailea (Lovelock) eta «Green Peace»n sortzaileetariko bat (Moore). Orain dela oso gutxi arte, «pronuklear» bat ezin zitekeen «ekolo-

gista» izan, bateraezin irizten baitzieten bi kontzeptuei. Azkenaldian baina, egoera hori aldatu da, zenbait tokitan behinik behin. Zerk eragin du aldaketa arras bortitz hori? Gizarteak ez al ditu gogoratzen Txernobilgo istripuen ondorio larriak?

Galdera hauei erantzutea ez da batere erraza. Faktore asko nahasten dira bilakaera hori ulertzen saiatzen garenean, baina sekula ez dugu burutik galdu behar egungo mendebaleko gizateriaren bizi maila, eta gure bizi mailara gerturatzeko ari direnen maila ere (Txina eta Indiarena bereziki).

Auzi honetan «harri aroan» gaudela esan dudanean esan nahi izan dut ez dugula oraindik lortu energia-dentsitate handiak emateko gai den energia-iturri «garbirik» erabili ahal izatea. Energia asko ekoizteko ahalmena izan dezakegu, baina energia metatzeko gaitasuna oso urria da. Azken hau arazo oso handia da eta energiaren esparruan sustrai sakonak ditu. Denek ezagutzen ditugu gauzez kontsumitzen den energia merkeagoa dela esaten duten enpresa elektrikoek iragarkiak, edo energia beharra ikaragarri handitzen denean hain xebreak izan diren «itzalaldiak»; hori ditugu San Franziskoko 2002an, edo Helsinkiko 2003an. Oinarrian energia metatzeko ezintasuna dago. Eta ezintasun horrek eskatzen du gure gizarterako, hau da, gure bizi maila ezagutzen dugun eran mantentzeko, energia-iturriek energia etengabeki ematea.

Azken hau ez da txantxetakoa. Gogoratu azken neguan Errusiako gasari Ukrainiak jarri zizkion eragozpenak (edo duela hilabete bat Bielorrusiak jarri zizkionak) zer larrialdi-egoera sortu zuen Europaren erdialdean. Zenbait energia berriztagarriak ere, haize-errotetatik sortzen den energia tarteko, arazo bera dute: energia airea dabilenean ekoiz dezakete bakar-bakarrik, eta haizerik ez dagoenean energia metatzeko baliabiderik ez dagoenez, ez dute energia ekoizteko gaitasunik. Baldintza hau egun ditugun fisioko zentral nuklearrek ondo betetzen dute: 24 hilabetean, gelditu gabe, etengabeki energia ekoizten egon daitezke, erregaia birzamatuarre. Zentral nuklearrek %90etik gorako zama-faktorea izaten dute, eta alde aurretik antolatutako mantentze lanetan joaten da gainerako denbora ia osoa.

Erregaiaren hornitzaleena da egun dugun beste arazo larri bat. Denok dakigu fosil-erregaiekin gertatzen ari dena, petroleoarekin gertatzen ari dena hain zuzen. Azkenaldi honetan etengabeki garestitzen ari da, salneurriak inoiz gertatu ez diren balioetara iritsi dira. Hainbat arrazoi egon daitezke horren jatorrian, baina funtsean petrolio-hornitzaile nagusiak ez dira mendebalekoak, eta estatu horietako askoren egoera politikoa ez da batere egonkorra. Izan ere, hornitzaile nagusi batzuen egoera, Irakena adibidez, ez da batere samurra, eta horniduraren eta salneurrien ezegonkortasun handia pairatu behar izaten da. Uranioa, nahiko zabaldua dago egungo zentral nuklearren erregai modura eta Australia eta Kanada bezalako herrialdeak dira hornitzaile nagusiak. Horrek esan nahi du erregaiaren kostuak

egonkorrak direla eta aurretik oso auresankorrak. Gainera OCDE/NEA eta OIEAren «Uranium 2005: Resources, Production and Demand» [1] txostenaren arabera, uranio naturalaren eskaria 1,5 faktoreaz handitu arren ez dirudi hurrengo 200 urteetan uranio eskasiarik egongo denik.

Fosil-erregaiak, egungo energiaren ekoizle nagusiak, negutegi efektuko gasak igortzen dituzte. Oso zabalduta dago fosil-erregaien aurkako aldarrikapena, negutegi efektuaren bidez Lurra berotzen laguntzen duten gasak askatzen dituztelako, hots, klima-aldaketaren iturri direlako. Izan ere, klima-aldaketari buruzko kezka areagotzen ari da gizartean. Irargarpen batzuek izugarritzko hondamendia agintzen dute. Nazio Batuen Klima-aldaketari buruzko Gobernuarteko Taldeko zientzilariek (IPCC) klima-aldaketa benetan gertatzen ari dela erakusten duten ebidentzia harriarriak bildu dituzte. Haien lanak dioenez, hurrengo 100 urteetan batez besteko tenperatura globala hainbat gradu igoko da eta itsasoaren mailak gora egingo du. Ez da ziur, jakina, baina komeni da klima-aldaketari arretaz erreparatzea. Hor dago Kyotoko protokoloa, klima-aldaketa geldiarazteko estatu bakoitzean aska daitekeen negutegi efektuko gas kopurua arautzen duen protokoloa. Izan ere, Loveloo eta Moore itzal handiko ekologistak, arrazoi simple bat izan dute *pronuklear* bilakatzeko: balantzan energia nuklearra eta klima-aldaketa jarriz, klima-aldaketak kezka eta ikara askoz gehiago sortzen diete. Egungo zentral nuklearrek ez dute negutegi efektuko gasik askatzen eta beraz, Kyotoren protokoloa betearazteko lagungarriak dira alderdi horretatik. Energia nuklearrera aldatzen diren herrialdeetan karbono dioxidoaren igorpenak murriztu egiten dira. 1970az geroztik, Frantziak erdira murriztu ditu emisioak, Japoniak %20 murriztea lortu du (%32an nuklearra da).

Zentral nuklearrek eraikitzeke diru-inbertsio handi bat eskatzen dute, baina zentralaren mantenimenduak eta erregaiaren kostu egonkorrak eta erlatiboki txikiak kostu aldetik lehiakorrak bihurtzen ditu zentral hauek. Mende honen hasieran Belgikako gobernuak batzorde bat sortu zuen elektrizitatea sortzeko bideak aztertzeko. Erregaiaren kostuak, erregaitik aparteko kostuak (inbertsioa, funtzionamendua eta mantentze lana), kanpoko kostuak (airearen poluzioa, zarata eta berotegi-gasak) eta eraikitzeke, sarera konektatzeko eta behin betiko ixteko kostuak kontuan harturik, batzordeak ondorioztatu zuen 2010. urtean ikatzetik kilowatt-ordu bat elektrizitatea sortzea 5,8 zentimo kostatuko litzatekeela. Gasa erabilita, kostua 4,3koa zen, haizea balitz 4,59koa (kostaldean), 5,92koa (itsasoan) eta 8,08koa (barnealdean); energia nuklearra erabilita, ordea, 3,02-3,17koa baino ez litzateke izango. Hala ere, kanpoko kostuak (airearen poluzioa, zarata eta berotegi-gasak) kontuan hartzen ez badira ere, IEA (2005) [2], University of Chicago (2004) [3], RAE (2004) [4], Tarjanne R&Loustarinen K (2003) [5] bezalako txostenek erakusten dute kilowatt nuklearra oso lehiakor bilakatu dela.

Beraz, fisioko energia nuklearra energia-iturri bezala ebaluatzerakoan lehen baldintza izan ezik beste baldintza guztiak nahiko ongi betetzen dituela esan daiteke. Gainera, lehenengo baldintza horri dagokionez, fosil-erregaiekin erkatzean energia nuklearra garbitzat hartu dugu, negutegi efektuko gasik ez duelako igortzen; hots, ez du klima-aldaketarik eragiten. Izan ere, egun, hori da energia-beharrari aurre egiteko unean aukeratua izateko energia nuklearrak duen balio handienetarikoa bat.

Hala ere, fisioko energia nuklearrak, lehenengo baldintzari dagokiolarik bi arazo larri ditu: istripu nuklearrak eta hondakin erradiaktiboak. Denborak dena sendatzen duen arren, 2006 urtean bete da Txernobilgo istripuaren 20. urteurrena; han gertatutakoa, zizelkaturik dago oraindik, gure oroimean. Akats asko gertatu/egin ziren batera Txernobilen. Erreaktorea abian egonik ingeniariak saiakera batzuk egiten hasi ziren. Lurrun-sorgailua kanpoko elikapen elektrikorik gabe nola zebilen ikusi nahi omen zuten. Horretarako argindarra eten zuten eta sistemaren babes batzuk ere bai. Horrek eragin zuen errektorearen gunea hozteko erabiltzen zen ur-isuriaren etena; eta hainbat babes etenda zeudenez, eta etenda ez zeudenek erantzun ez zutenez, nukleoa hozte-sistematik gabe geratzen hasi zen. Zentral nuklear batean, nuklearen hozte-sistemak huts egitea da gerta daitekeen konturik larrienetarikoa. Txernobilen moderatzailea grafitoa zen eta beroketan askatu zen hidrogenoak grafitoarekin erreakzionatuta leherketa handi bat gertatu zen, eta, telebistatik ikus zitekeen bezala, erretzen geratu zen grafitoa. Zentral honek estalki berezirik ez zuenez leherketak estalkia apurtu zuen eta handik aurrera isotopo erradiaktibo andana aireratu zen. Erreaktorearen gunea ere urtzeko zorian egon zen, baina zorionez ez zen horrelakorik gertatu.

Agerian dago Txernobilgo istripuan diseinuko akatsak eta ingenarienak gertatu zirela. Txernobilgoa bezala RBMK1000 diseinukoak diren erreaktoreak bakarrik orduko Sobiet Batasunak eraikitzen zituen. Mendebaleko Europan zein AEBn ez dago mota horretako zentral nuklearririk. Gainera estalki berezi ezak erraztu zuen isotopo erradioaktiboen eguratserako igorpena eta horren ondorioz kalte handia suertatu zen. Sortutako kalteak kontuan hartu gabe, askoz ere larriagoa izan zen ikuspegi teknikitik Three Mille Island zentraleko TMI-2 erreaktorean 1979ko martxoan gertatutako istripua; hozte-sistemak huts egin ondoren, erreaktorearen gunearen heren bat urtu egin zen. Gerta daitekeen istripurik larriena da gunea urtzea; kalte ekonomikoak eta materialak oso handiak izan ziren baina kalte pertsonalik ez zen gertatu, ez inguruko populazioan, ez eta ere zentralaren langileen artean ere. Istripu honen ostean Estatu Batuetako gobernuak moratoria bat ezarri zuen zentral nuklear berriak eraikitzeko, eta orduz gero ez da zentral nuklear berririk eraiki Estatu Batuetan.

Istripu horien ostean nazioarteko eta estatu bakoitzeko seguritate-bermeak zentral nuklearren eraikuntzarako sakonki areagotu dira. Adibidez,

Olkiluoto 3 erreaktoreak (European Pressurized Water Reactor, EPR), Finlandian eraikitzen ari diren erreaktore berriak (European eraikitzen ari diren bakarrak) hormigoizko bi euste-geruzaz estalita daude, eta diseinuaren arabera kanpoko geruzak hegazkinen talkak jasan ditzake. Beste hainbat seguritate-bermeen artean, kontuan hartu behar da erreaktorearen gunea urtzeko probabilitatea; txikia da baina ez nulua. Bestalde, kontuan hartzen badugu abian diharduten zentral nuklearrek azken 15 urteotan izan duten historia, aitortu beharra dago zentral nuklearren segurtasuna altua dela. Bestalde, aurrean esandako guztia kontuan hartuz eta bai fosil-erregaiak beroketa orokorrari egiten dioten ekarpena buruan izanik ere, erraz ulertuko da energia nuklearrarekiko jarrera apurka-apurka aldatzen joan dela. Izan ere, Austria, Portugal, Txipre eta Malta herrialdeen salbuespenekin (2005eko ekainaren «Survey on Radiactive Waste» Eurobarometroaren arabera [6]) energia nuklearrarekiko jarrera positiboagoa bilakatzen ari da European.

Hondakin erradiaktiboena da [7] energia-nuklearraren bigarren oztopo garrantzitsua. Zentral nuklear baten erreaktorearen barnealdea oso erradiaktiboa da, eta noizean behin erregai erabilia atera behar izaten da birprozesatzeko edo behin betiko hondakin bezala gordetzeko. Hori egiteko teknikak ondo garatu dira eta eragiketa horiek seguruak dira. Erregai erabiliak aktibitate handiko hondakinak dira eta lehenik, lur gainean metatzen dira dozenaka urtez, bizi laburreko isotopoak desintegratu arte. Gainerakoa urtu eta zeramikazko bloke disolbaezinak sortzen dira, eta altzairu herdoilgatzeko upeletan sartu eta ziur aski etorkizun batean lurpeko geruza geologiko egonkor sakonetan gordeko dira. Aktibitate handiko hondakinen bolumena ez da oso handia, bereziki fosil-erregaiak sortzen duten hondakinekin erkatuta. Hondakin hauek, inguruko tangetan gordetzen dira zentral nuklear bakoitzak bere bizitza osoan sortutako hondakin hauek, eta beraz, agerian dago zentral nuklearrek sortzen duten hondakin mota honen bolumena ez da handia, upela batzuen besterik ez.

Beste motetako hondakinak ere badaude, aktibitate txikiko hondakinak hain zuzen. Hauen barnean sartzen dira isotopo erradiaktiboak eta erregai nuklearrak maneiatzean erabiltzen diren eskularruak, jantziak, materialak eta bai hospitaletan, ikerketa-laboregietan eta fabriketan erabiltzen diren isotopo erradiaktibo agortuak ere. Aktibitate txikiko hondakinak biltegietan batzen dira, eta biltegi hauek bete ostean itxi egiten dira. Ostean, kontrolpean mantentzen dira bertako erradioaktibitatea deuseztatu arte, hots, 200-300 urte kontrolpean egon beharko dute. Hondakin hauekin egiten denak adostasun zabala du. Gainera, hondakin hauen arriskua aktibitate handiko hondakinena baino askoz ere apalagoa da. Aktibitate handiko hondakinen arazoa larriagoa da. Baina zer egin ote daiteke aktibitate handiko hondakin erradiaktiboekin? Gaur egun, mota honetako hondakin gehienak upeletan sartzen dira, zentral nuklear bakoitzaren ondoko tangetan. Hondakin horiek desintegratzen edo/eta fisionatzen energia asko askatzen

dute eta energia horren zati handi bat bero bilakatzen da. Honela, tange-
tan kokatuta upelak hoztu egiten dira eta, gainera, tangetako urak ere ba-
bes biologiko legez jokutzen du upela zeharkatzen duen erradiazioarekiko
(gamma erradiazioarekiko bereziki). Orokorki, aktibitate handiko hon-
dakin horiek denbora oso-oso luzean isolaturik egon behar dute, nukleo
ezegonkorren kopurua arbuigarria izan arte, hots, hondakin gehienak
egonkortu bitartean. Bestela, gizakiengana iritsiz gero, kalte handiak sor-
ditzakete. Isolamenduko denbora tarte hori ehunka mila urtekoa izan dai-
teke, fisioko erreakzioetan sortzen diren fisio-produktu anitzek erdibizi-
tza oso luzea baitu. Isolamendu hitza oso ondo ulertzen da, baina milaka
urteko isolamendua nahiko ulergaitza egiten da, gizakiaren existentziaren
neurriko denbora-parametroetan behintzat. Azkeneko hamarkadetan lan
handia egin eta egiten ari da erdibizitza luzeko nukleoak banatu eta erbizi-
tza laburreko nukleotara edo nukleo egonkorretara transmutatzeko etekin
handiko metodoen bila. Zientzia-oinarriak oso ondo ezagutzen dira: trans-
mutazioak arazo teknikoak eta ekonomikoak ditu. Alde teknikitik, egun
posible da erdibizitza luzeko nukleo batzuk etekin handiz transmutatzea.
Hala ere, erradionukleido asko eta asko kontzentrazio txikietan eta beste
elementu kimiko eta isotopo erradiaktiboekin nahasturik ageri dira. Ba-
naketa-prozesu oso konplexuak behar dira banakako isotopo erradiakti-
boak eta taldeak banatzeko, eta transmutazioen bidez maila onargarrietara
jaisteko. Hori bereziki zaila suertatzen da birprozesaturiko materialen ka-
suan. Ikuspegi ekonomikitik begiratuta, merkaritza mailako transmuta-
zioak lortzeko, banaketarako eta erreaktoretarako azpiegitura handiak be-
harko lirateke. Erreaktoreak kritikoak zein azpikritikoak, azeleragailuez
gidaturikoak izan litezke. Fisio-produktuak eta uranioz bestaldeko produk-
tuak erraz bana litezkeela emanez gero, urteko ehuneko txiki bat bakarrik
transmutatu ahal izango litzateke era eraginkorrean. AEBetako hondakin
erradiaktiboak kudeatzeko erakundeko zuzendari Crowleyk dioenez «ora-
indik hainbat hamarkada beharko dira jakiteko ea egun dauden hondaki-
nen bolumenerako, eta etorkizunean sortuko direnerako, transmutazioa
praktikoki egin daitekeen kostu onargarrietan. Gaur egun hori ezinezkoa
da eta hondakinak behin betiko geruza geologikoki sakonetan isolatzea da
hondakinen kudeaketarako teknikoki aurreratuta dagoen metodoa eta eko-
nomikoki aurre egiteko metodo bakarra». Beraz, egun aurreikusten den
bide bakarra aktibitate handiko hondakinak behin betiko biltokietan «beti-
rako» isolatzea da. Oraindik ez da horrelako biltegirik eraiki, baina AEBn,
Suedian eta Finlandian eraikitzen ari dira. Hori, ziur aski konponbide ona
izango da egungo belaunaldietarako, baina auskalo etorkizuneko belaunal-
dietarako.

Gure gizartearen egungo bizi maila mantentzeko energia-hornidura
egokia lortzea gero eta zailagoa gertatzen ari da. Gure bizi maila hobe-
tze aldera zuzenduta dago, munduaren populazioa handitzen ari da eta
Asian guk dugun bizi mailara hurbiltzeko ahaleginetan ari dira bertako es-

tatu erraldoiak. Honek guztiak egungo energia baino askoz gehiago ekoiztea eskatzen du. Bestalde, argi geratu da, oraindik ez dugula aurkitu garbia, ahalmentsua, agortezina eta merkea den energia-iturririk. Beraz, egungo baliabideekin energia-iturrien arazoak larriak dira, eta klima-aldaketa kontuan hartzen badugu are larriagoak. Hau da, iragarpenen arabera, ahal den arinen ordezkatu beharko lirateke berotegi-gasak igortzen dituzten energia-iturriak, hots, fosil-erregaietan oinarritutako energia-iturriak.

Ene uste apalean, energia nuklearrak, energiaren arazo larri hau gaintzeko ekarpen positibo bat egin dezake, energia berriztagarriekin batera eta kutsadura gutxien sortzen duten fosil-erregaietan oinarritutako zentralekin batera. Hala ere, ene ustez fisioko energia nuklearra, gutxienez aktibitate handiko hondakin erradiaktiboen arazoa ebazteko biderik aurkitzen ez den bitartean, trantsizioko energia-iturri bat izan behar da, eta fusioko energia nuklearra bezalako energia-iturrien garapenaren aldeko apustua egin behar da.

FISIO NUKLEARRA [8]

Egun erabiltzen diren zentral nuklearrek fisio nuklearrean oinarrituta daude. Fisio nuklearra desintegrazio erradiaktibo mota bat da eta berez bitan zatitzen dira oso astun diren nukleo batzuk, kalifornio-252 kasu; izan ere, Cf²⁵² oso erabilia da detektigailuak kalibratzeko; hala ere, gehienguan artifizialki eragindako desintegrazioa da fisio nuklearra. Fisioaren eragilea, neutroia, protoia, alfa partikula edo gamma erradiazioa izan daiteke eta prozesua, honelakoxea da hitz gutxitan: delako partikula edo erradiazioa horrek nukleo astuna jo, honek xurgatu eta, eratzen den egitura berria ezegonkorra izaki, bi zatitan banantzen da. Horrekin batera, neutroi bat edo batzuk, erradiazioa eta energia-kantitate handia askatzen da. Hona hemen uranio-nukleoaren fisio-erreakzio posible bat:

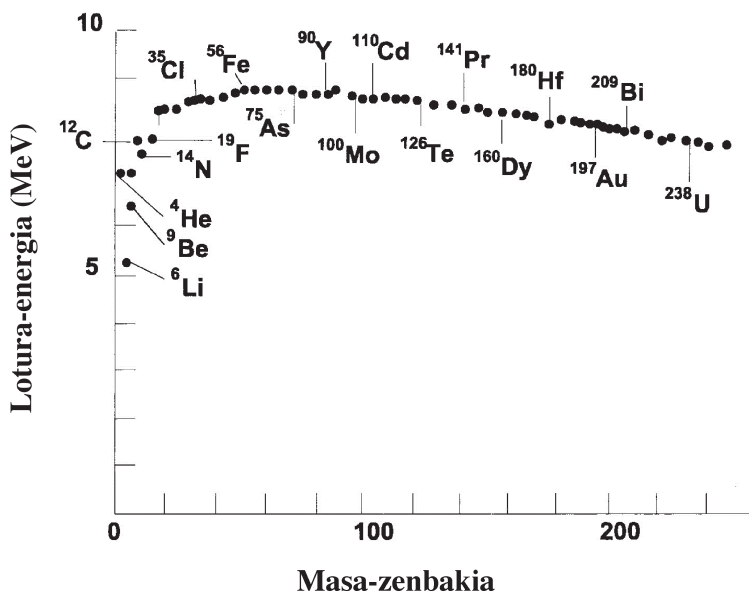


Bertan, uranio-235 isotopoaren neutroi bat harrapatzean bi zatitan fisionatzen da, Kr⁹⁰ eta Ba¹⁴² isotopoetan, eta kasu horretan bi edo hiru neutroi askatzen dira. Fisioko erreakzioan 200 MeV energia inguru askatzen da. Erreaktiboaren eta emaitzen arteko masa-diferentzia da horren eragilea. Izan ere, erreakzioaren masa-balantzea eginez gero, erreaktiboaren masa emaitzena baino handiagoa dela ikus daiteke. Masaren zati bat energia bihurtzen da beraz. Masa horri dagokion energia $E = mc^2$ ekuazioaren bidez kalkula daiteke.

Nukleoak neutroia xurgatzen du eta zatitu egiten da, horrekin batera zenbait neutroi askatuz. Neutroi askatu berriak beste nukleo batzuen fisioa era-

giteko gai badira, erreakzioak bere burua elikatzen du, neutroi sortu berriak erreakzioaren eragile ere badirelako aldi berean, eta, ondorioz erreakzio-segida edo kate-erreakzioa gerta daitekeelako. Kate-erreakzioa oso laster gerta daiteke, kontrolik gabe, edo bestela, askatzen diren neutroien artean fisioa eragiteko gai izan daitezkeenak nolabait kontrolatuz, bere burua irau-narazten duen abiadura jakineko erreakzioa lor daiteke. Kate-erreakzioko fisio bakoitzean neutroi bakar batek beste fisio bat sortzen badu, hots, fisio bakoitzeko neutroi bakar batek, eta bakarrik batek beste fisioa sortzen badu, kate-erreakzioa kritikoa dela esaten da. Erreakzioaren urrats batean askatzen diren neutroietarik batzuk inguruneak xurgatzen ditu eta beste batzuek ihes egiten dute. Erreakzioa kritikoa izateko, horiek kenduta gelditzen diren neutroien kopuruak fisioa eragiteko behar den kopuruaren berdina behar du izan. Kritikotasun maila lortzeko behar den neutroi kopurua baino neutroi gehiago badaude, erreakzioa superkritikoa da eta, kontrolatu ezean, nukleoak oso denbora laburrean fisioa daitezke, eta askatzen den energia oso handia denez, eztanda gerta daiteke. Kritikotasunetik behera, berriz, kate-erreakzioa ezin da mantendu eta gelditu egiten da.

Azaldu berri ditugun gertakari guztien oinarrian fisioko energia nuklearra dago. Kate-erreakzioak, kritikotasun mailatik gora, lehergailu nuklearrak egiteko erabil daitezke neutroien kopurua ez bada kontrolatzen, baina kontrolpean egonik, zentral nuklearretan bezala, energia erabilgarria lortzen da.



1. irudia. Nukleoien lotura-energia masa-zenbakiaren arabera

Fisioaren zergatia eta nola gertatzen den ulertu ahal izateko, nukleoaren egituraren egonkortasunean eragina duten faktoreak hartu behar dira kontuan. Nukleoaren egonkortasunaren lehen gakoa haren lotura-energia da. Izan ere, nukleoi deritzen atomo azpiko partikula batzuek osatzen dute nukleoa. Banako partikula hauen masa, nukleoa osatzen dutenean baino masa handiagoa dute. Masa-defektu edo masa-galera horri dagokion energia da lotura-energia. Zenbat eta lotura-energia handiagoa izan, nukleoa hainbat eta egonkorragoa izango da. 60 masa-zenbakia dute nukleo egonkorrenak, burdinarena kasu. Bai masa-zenbaki txikiagoko nukleoak batuz (fusionsatuz), bai masa-zenbaki handiagoko nukleoak zatituz, burdinatik gertuago dauden nukleo egonkorragoak eratzen dira. Bi prozesuetan beraz, energia askatzen da. Aipaturiko bi prozesuetatik, lehenak fisio-energia sortzen du; adibidez, izarretan gertatzen diren erreakzioetan eta ikertzen ari diren fusio-erreaktoreetan kontrolatu nahi dena. Bigarrena, berriz, desintegratio erradioaktiboan eta fisio nuklearrean askatzen den energia da.

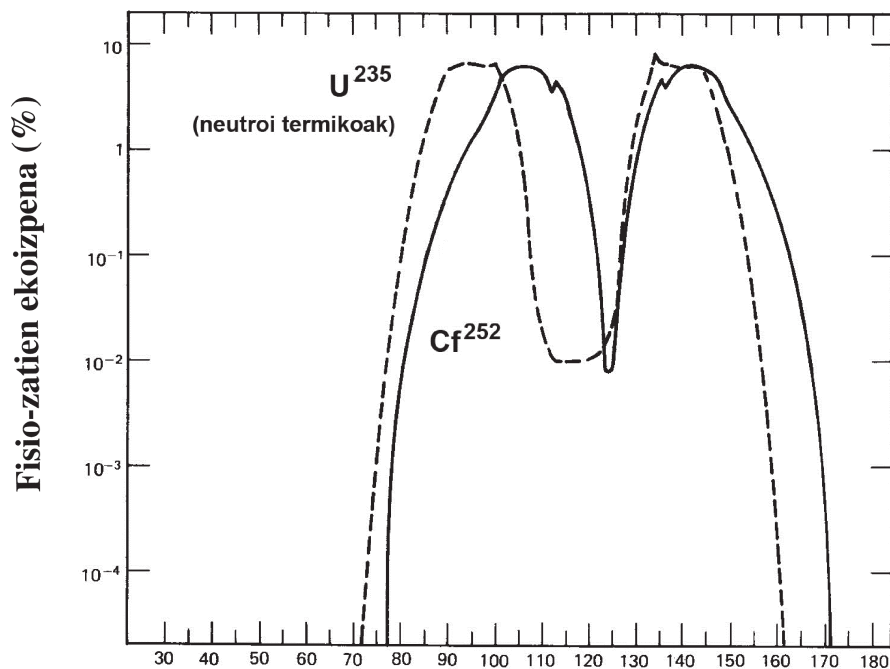
Pentsa liteke, orduan, materia osatzen duten elementu astun guztiak konfigurazio egonkorrena bilatu behar luketela eta burdinara joko luketela denbora pasa ahala. Baina ez da horrela gertatzen bestelako eragozpenak daudelako bat-bateko errakzio horiek gerta ez daitezten.

Bada nukleoaren egonkortasuna lortze horretan funtsezkoa den beste eragile bat. Nukleoko partikulak elkartzen dituen indarra (indar nuklear bortitza) oso handia da, baina distantzia oso laburrekoa. Nukleoko partikula kopurua handituz doala, partikulen arteko distantziak ere gero eta handiagoak bilakatzen dira. Zerbait behar da protoien arteko aldaratze elektromagnetikoa moteltzeko eta funtzio hori neutroiek betetzen dute. 40ko masa atomikora bitarteko nukleoetan, protoi eta neutroi kopurua bera da, baina hortik gora neutroi gehiago behar dira. Nukleoak likido tanta baten antzeko portaera duela onartuz gero, ondo ulertzen da neutroi bat bezalako kanpoko eragile batek jotzen badu xurgatu eta esfera deformatu egiten dela. Deformazio horren ondorioz, kontrako bi prozesu jar daitezke abian: esferaren gainazal-tentsioa dela medio, nukleoak esfera berri baten forma hartzea jotzen du, baina, aldi berean, deformatzean aldaratze-indarrak txikiagotu egiten dira. Aurkako bi joera horien arteko harremanaren arabera gertatuko da nukleoa egonkortzea ala bitan zatitzea. Beraz, fisioa, hein handian, protoien arteko aldaratze-indarren ondorioa dela esan daiteke eta horretan zeri-rikusi handia du protoi-neutroi harremanak.

Uranio-235aren fisioan, nukleoak neutroi geldoa xurgatzen du eta oso egoera kitzikatuan dagoen U-236 nukleoa eratzen da. Nukleo hori da zinez zatitzen dena, eta ez uranio-235 nukleoa delakoa. Fisioaren emaitzak desberdinak izan daitezke. Horrez gain, bi edo hiru neutroi igortzen dira.

Fisio-erreakzioaren energiaren zati handiena oso denbora laburrean askatzen da (10^{-12} segundotan gutxi gorabehera). Fisio-zatien energia,

energia zinetikoa da, baina bero bihurtzen da berehala, fisio-zatien higadura oztopatuta dagoelako. Nukleo bakoitzaren fisioan askaturiko energia 200 MeV ingurukoa da. Bestalde, fisioaren ondorio diren fisio-zati erradioaktiboen desintegrazioan ere energia askatzen da. Batzuen erdibizitza oso laburra da eta energia erreaktorean bertan askatu eta bero bihurtzen da. Azkenik erdibizitza luzeko produktu erradioaktiboek luzaro irauten dute, eta energia nuklearraren arazo handienetakoa dakarte berekin, hondakin erradioaktiboen arazoa hain zuzen ere. Bestalde, 2 irudian ageri den bezala, fisio nuklear guztiek ez dituzte fisio-zati berdinak sortzen. Izan ere, fisiozatiak bi taldetan banatzen dira: arinak (2 irudiaren ezkerreko gailurrekoak) eta astunak (2 irudiaren eskumako gailurrekoak). Ikus daitezkeen bezala fisio-zatiek tarte oso zabala hartzen dute; izan ere, 100 isotopo desberdin inguru sortzen dira fisio erreakzioetan. Horixe da transmutazio nuklearraren bidez fisio-zatiak (aktibitate handiko hondakin erradiaktiboak) egonkortzeko agertzen den zailtasun itzel bat: hondakinak isotopo mota desberdin askotakoak dira; hori dela-eta, banan-bana tratatzea lan eskergea da, eta ohar gaitzkeenez oso garestia.



Masa-zenbakia

2. irudia. U^{235} isotopoak neutroi termikoak harrapatzean U^{235} isotopoaren fisiozati banaketa. Cf^{252} isotopoa berez fisioatzean sortutako fisiozati banaketa

Erreaktore nuklear batean fisio-erreakzio kontrolatua lortu ahal izateko, zenbait baldintza bete behar dira. Lehenik, neutroiak nukleoarekin elkarrekintza bat izan ahal izateko, energia egokia izan behar du, eta hori isotopoaren arabera aldatzen da. Uranio-235 isotopoa, gehien erabiltzen den erregaia, neutroi geldoetz bonbardatzen da. Hala ere, badira neutroi lasterrez fisionatzen diren erregai nuklearrak. Neutroi geldoak lortzeko, jaitsi egin behar da fisioan askatzen diren neutroien abiadura. Horretarako moderatzaile izeneko gaia erabiltzen da. Bestetik erreaktore gehienetan, kate-erreakzio kritikoa lortu ahal izateko, erregai nuklearrean uranio-235 isotopoaren ehuneko jakin bat behar da, naturako uranioak duena baino handiagoa. Hori lortzeko aberaste prozesua egin behar da. Azkenik, eskura izan behar da substantzia jakin bat, erreakzioaren abiadura behar bezala kontrolatzearen neutroiak xurgatzeko eta, horrela, erreakzioa motteldu edo guztiz geldiarazteko. Substantzia horrekin egiten dira kontrol-barrak, behar denean erregai multzoaren baitan nahi den mailaraino sar edo atera daitezkeenak.

FISIOKO ZENTRAL NUKLEARRA

Zentral nuklear bat bereziki hiru osagai desberdinez osatuta dago: Erreaktorea, eraikina eta konfinamendu-sistemak, eta turbina-alternadore multzoa. Erreaktore nuklearra da bereziki zentral nuklearrak potentziako beste zentraletatik bereizten duena. Turbina-alternadore multzoak, berriz, argindarra sortzen duten potentziako zentral gehienetan antzekoak dira. Erreaktore nuklearrak sailkatzeko bi irizpide nagusi daude. Lehen, erreaktorearen erabilera motarena eta bigarrena, fisioa eragiteko erabiltzen diren neutroien energiarena.

Erabileraren arabera, bi erreaktore mota ditugu: potentzia-erreaktoreak eta ikerkuntza-erreaktoreak. Energia erabilgarria lortzea da potentzia-erreaktoreen helburua, hau da, elektrizitatea, beroa edo propulzioa emango duen energia lortzea. Ezbairik gabe, energia elektrikoa ekoizteko erreaktoreak dira erabilienak. Erreaktore nuklearren bidezko propulzioa zenbait urpekaritan eta izotza hausteko itsasontzietan erabiltzen da. Badaude potentzia-erreaktore berezi batzuk, erregai nuklear gisa erabil daitezkeen material fisionagarriak ekoizten dituztenak (erreaktore birsortzaileak). Azkenik, ikerkuntza-erreaktoreak ditugu; hauek I+G, isotopoak lortzea, materialen saiakuntzak gitea, eta abarrekoak izan dezakete helburu modura.

Fisioa eragiteko erabiltzen diren neutroien energiaren arabera bi erreaktore mota bereiz daitezke: batetik erreaktore termikoak, hau da, neutroi geldo edo termikoak erabiltzen dituztenak, eta bestetik erreaktore lasterreak. Potentzia-erreaktoreak lasterrak zein termikoak izan daitezke, baina erreaktore birsortzaileak lasterrak dira beti. Funtsean erreaktore nuklea-

rra delako gailu batek aukera eman behar du erregai nuklearraren fisioa sortzeko, kontrolatzeko eta askatzen den beroa jariakin bati transmitituz kanporatzeko. Horretarako osagai nagusiak hauek dira: 1) fisioatzen den erregai nuklearra, 2) fisioan askatzen diren neutroi lasterrak neutroi termiko bihurtzen dituen moderatzailea (erreaktore termikoetan), 3) beroa xurgatzen duen hozgarria eta 4) erreakzioaren abiadura kontrolatu ahal izateko material neutroi-xurgatzailez egindako kontrol-barrak.

Erregai nuklearra eta moderatzailea biltzen dituen egiturari erreaktore-gune deritzo (hozte-zirkuituak horren barruan duen atala ere gunearen zatitzat hartu ohi da). Erreaktorearen osagaiak ontzi moduko estalki baten barnean daude.

Erregai nuklearra

Fisioatzen den isotopoa duen materiala da. Potentzia-erreaktore gehienetan, uranio edo uranio-konposatuak erabiltzen dira. Erreaktore batzuetan, uranio-konposatuez gain, plutonio-konposatuak ere erabiltzen dira (eta MOX esaten zaio plutonio eta uranio oxidoen nahasteari). Badira, azkenik, uranio- eta torio-konposatuak erabiltzen dituzten bakar batzuk. Isotopo erabiliena neutroi termiko edo geldoetz fisioatzen den uranio-235 isotopoa delakoa da. Gehienetan, uranio aberastua (naturako uranio elementua baino uranio-235 gehiagokoa) behar izaten da, kate-erreakzioak kritikotasuna erdietsi dezan. Erreaktore batzuek (CANDU motakoek) uranio naturala erabiltzen dute. Erreaktore birsortzaileetan, uranio-235 fisioagarriaz gain, fisioagaitza den eta naturan gehien dagoen uranio-238 isotopoa erabiltzen da. Uranio-238 isotopoa ez da fisioagarria baina neutroi lasterrak harrapatzean fisioagarria den plutonio-239a eratzen da. Beraz, erreaktore birsortzaileetan moderatzailezik ez da erabiltzen eta erregaia erreaktorean bertan U^{238} isotopoaren transmutazioak sortutako Pu^{239} dira.

Erregai nuklearra erregai multzo izeneko egituretan antolatzen da. Eskuarki, erregai multzoa hainbat zorroz osatuta dago eta zorroaren barnean erregai bera dago. Zorroaren eginkizunak hauek dira: erregaia erraz erabili ahal izatea, ihesik gerta ez dadin ingurunetik isolatzea eta moderatzaile eta hozgarriekin kontaktu-azalera handiagoa izatea.

Moderatzailea

Fisioan askatzen diren neutroi lasterrak neutroi geldo edo termiko bihurtzen ditu. Horretarako, neutroia xurgatu gabe, haren energia behe-ratu behar da. Neutroi lasterrek, nukleo arinekin talka elastikoak egitean (billarreko bolen artekoak bezalako talkak egitean alegia) energia galdu

egiten dute eta talka anitzen ostean neutroi geldo bihur daitezke. Gairik erabilienak ur arrunta, ur astuna eta grafitoa dira. Birsortaileak ez diren errektoreetan moderatzaileak ezinbestekoak dira, fisioaren probabilitatea hainbat magnitude orden handiagoa baita neutroi erasotzaileen energia txikia denean. Esaterako, U^{235} isotopoaren kasuan, fisio-probabilitatea 1.000 aldiz handiagoa da neutroi termikoetarako, fisioan askatzen diren neutroi lasterretarako baino. Errektore birsortzaileetan, neutroi lasterrak erabiltzen direnez, ez dago moderatzailearik.

Hozgarria

Fisioan askatzen den bero-energia xurgatzen duen gaia da. Berez, fisioaren ondoriozko energia fisio-zatien energia zinetikoa da nagusiki, baina inguruneko gaiek berehala moteldu edo geldiarazten dituzte eta energia zinetiko gehiena bero-energia bihurtzen da. Hozgarri erabilienak ur arrunta, ur astuna, helioa eta karbono dioxidoa dira, eta, errektore birsortzaileetan, metal likidoa (sodioa). Beroa xurgatu ondoren, hozgarriak, gehienetan, beste zirkuitu bateko jariakin bati, normalean urari transmititzen dio bero-trukagailuaren bitartez. Ondorioz, ura lurrundu eta lurruna sorgailu bati eragiten dion lurrun-turbinara bideratzen da. Ur arruntez hoztutako errektore batzuetan (BWR izenekoetan), bi zirkuitu antolatu beharrean, zirkuitu bakarra dago eta errektorearen gunea hozten duen hozgarriak berak birarazten du turbina. Hozgarri modura helioa darabilten errektoreetan (HTGR), hozgarriak zuzenean eragin diezaiokie gas-turbina bati.

Kontrol-barrak

Fisio-erreakzioaren abiadura kontrolatzeko (hau da, errektorearen potentzia kontrolatzeko) edo behar denean errektorea geldiarazi edo abiarazteko kontrol-sistema dira. Neutroiak ondo xurgatzen dituzten material ezinbestekoak dira, normalean boro edo kadmiozkoak. Errektorearen gunean sartu eta irteteko mekanismoen bidez, aukera ematen dute erreakzioa bizkortu, moteldu edo erabat gelditzeko. Bete beharreko eginkizunaren arabera, kontrol-barrak desberdinak egoten dira.

Errektore-ontzia

Errektorearen osagaiak edukitzeaz gain, hozgarriak zirkulatzen duen eta kontrol-barrak higitzeko aukera ematen duen egitura da. Hozgarria ontzira sartu eta, guneko beroa xurgatutakoan, bertatik irteten da. Errektorearen osagaien eta bero-energia erabiltzeko sistemaren arabera egokiak

diren presioa eta temperatura mantentzen ditu. Ontzia osatzen duten materialak ezaugarri berezikoak behar dute izan, direlako baldintzetan behar bezala erantzun ahal izateko.

FISIO NUKLEARREKO ZENTRAL MOTAK

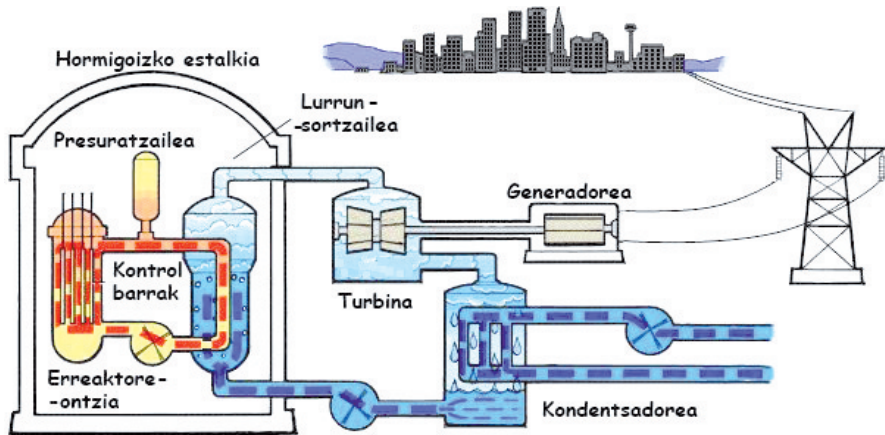
Erreaktoreak sailkatzeko, osagai mota bakoitza har daiteke irizpide modura, baina moderatzailearen arabera sailkapena da erabiliena.

Ur presurizatuko erreaktorea (PWR)

Erreaktore erabiliena da. Hozgarria eta moderatzailea presio handiko ur arrunta da. Presioak ura beti likido eta irakin gabe mantentzeko adinakoa behar du izan. Lehen zirkuitu honetako ur presurizatuaren beroa bigarren zirkuitu bateko urari transmititzen zaio lurrun-sorgailuan (ikus 3 irudia). Sortutako lurruna turbinara bideratzen da eta, kondentsatu ondoren, ura lurrun-sorgailura doa berriz. Beraz, erreaktorearen gunearekin kontaktuan dagoen ura turbinara ez doan zirkuitu itxian dabil (ikus 3 irudia). Urak presiopean ibili behar duenez, erreaktorearen ontziaren hormek BWRrean baino lodiago behar dute izan. Gainera, presio handipean lan egin beharrak ekipoen sendotasuna eta segurtasuna areago zorrotz beharra dakar berekin. Erregai nuklearra uranio oxido aberastua da (%3-5) eta erreagai-zorroa zircaloyzkoa. Kontrol-barrak gainaldetik sartzen dira (ikus 3 irudia). Erreaktore mota honen ohiko ezaugarriak honako hauek dira.

- gunea: 3-4 m-ko diametro eta garaiera,
- ontzia: 5 m-ko barne diametroa eta 10 m-ko garaiera,
- lehen zirkuituko presioa: 15,5 MPa,
- ontziko uraren sarrera-tenperatura, 295 °C eta irteera-tenperatura, 330°C,
- lurrun-sorgailuko presioa: 7,58 Mpa,
- potentzia termikoa: 3.800 MW,
- potentzia elektrikoa: 1.300 MW,
- potentzia-dentsitatea: 102 MW/m³,
- etekina: %34.

Erreaktore hauek ditugu arruntenak (250 zentral inguru), eta oso egonkorrak dira bereziki tenperatura igo ahala potentzia gutxiago sortzeko joera baitute. Hori, oso lagungarria da kate-erreakzioaren kontrola ez galtzeko. Erreaktore hauek oso seguruak dira. Erreaktore hauetan hozgarria (ura) tenperatura garai batean likido izaten jarrai dezan presio handipean egon behar denez eraikuntza-kostuak asko handitzen dira.

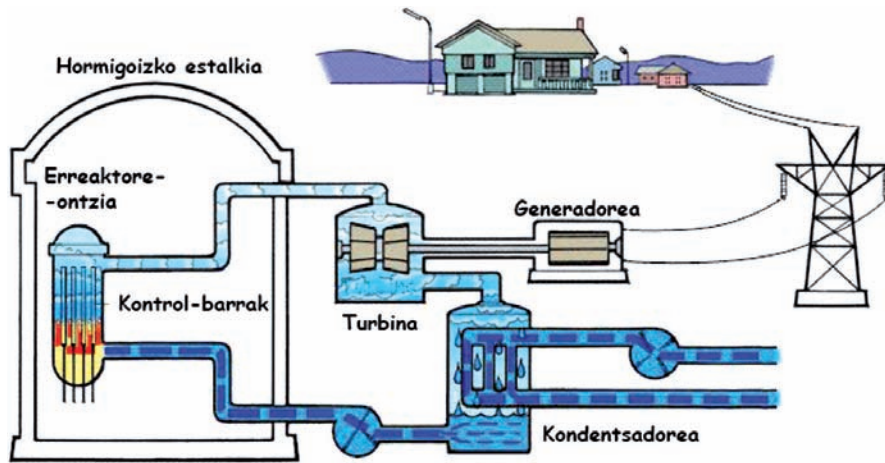


3. irudia. PWR motako zentral nuklearra

Ur irakineko erreaktorea (BWR)

PWRaren ondoren, zentral nuklearretan gehien erabiltzen den erreaktorea da (90 zentral inguru). Ur arrunta da hozgarria eta moderatzailea, baina, PWRean ez bezala, urak irakin egiten du erreaktore-ontziaren barnean. Erreaktore-ontziko presioa PWRekoaren erdia izaten da gutxi gorabehera (7 MPa). Ontziaren goialdean biltzen den lurruna da turbina birarazteko erabiltzen dena, tartean lurrun-sorgailurik ez dago (ikusi 4 irudia). Gunetik ihes egiten ez duen bitartean, oso bizitza laburreko nitrogeno-16 isotopoa da (7 s-ko erdibizitza) ur horretatik turbinara igaro daitekeen erradioaktibitate-iturri bakarra. PWRean bezala, erregai nuklearra uranio oxido aberastua da (%3-5) eta erregai-zorroa zircaloyzkoa. Kontrol-barrak, berriz, behealdetik erabili ohi dira, egitura batzuk daudelako goian lurruna uretatik bereizi eta kanporantz bideratzeko (ikusi 4 irudia). BWReko gunearen tamaina PWRekoaren antzekoa izaten da, ontziaren hormak ez dira PWRarenak bezain lodiak, eta erreaktore-ontzia zabalagoa eta luzeagoa izaten da. Dena den, lurrun-sorgailurik behar ez denez, erreaktorearen eraikina txikiagoa izan ohi da. Erreaktore mota honen ohiko ezaugarriak honako hauek dira:

- gunea: 4,5 m-ko diametroa eta 4 m inguruko garaiera,
- ontzia: 8 m-ko barne-diametroa eta 22 m bitarteko garaiera,
- zirkuituko presioa: 7 MPa,
- ontziko uraren sarrera-temperatura, 216 °C, eta irteera-temperatura, 288°C,
- potentzia termikoa: 3.850 MW,
- potentzia elektrikoa: 1.200-1.300 MW,



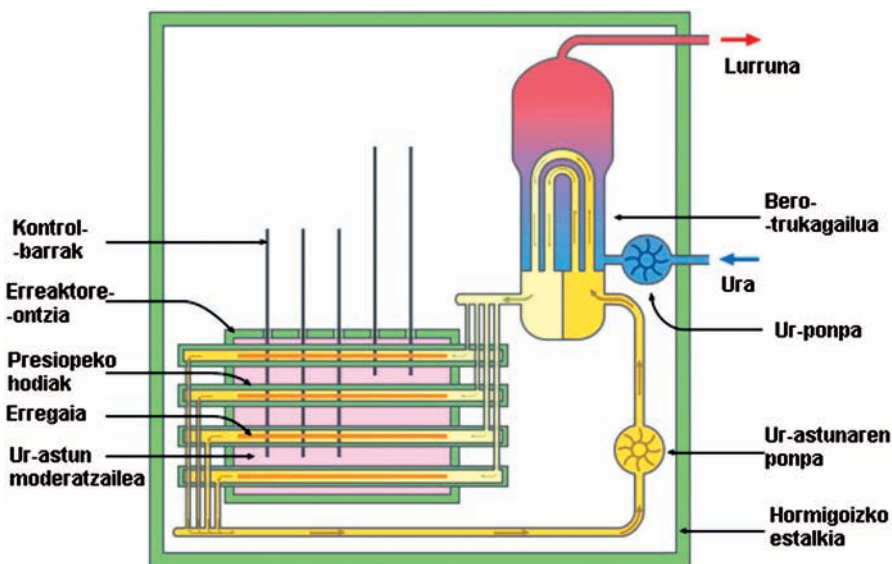
4. irudia. BWR motako zentral nuklearra

- potentzia-dentsitatea: 56 MW/m^3 ,
- etekina: %33.

Zehaztapen hauek ikusita, nabari da PWR eta BWR erreaktoreek anzteko potentzia eta etekina ematen dutela. Halere, BWR erreaktoreak bi desabantaila nabari ditu: batetik turbina fisio-zatiez kutsatzeko arriskua dago eta bestetik kontrol-barrak behealdetik sartu behar direnez beraien pisuagatik ez dira erreaktorera berez erortzen argindar guztia joaten bada.

Ur astuneko erreaktorea (CANDU)

Kanadan garatutako erreaktore mota honetan ur astuna da hozgarria eta moderatzailea. Erregai modura uranio oxido naturala erabiltzea da CANDUren bereizgarri nagusietakoa, hau da, erregaiak ez du aberaste prozesurik jasan behar. Ur arrunteko erreaktoreetan ez bezala, hozgarriaren eta moderatzailearen zirkuituak bereziak dira (ikus 5 irudia). Moderatzailea atmosferako presioan dago eta hozgarria, berriz, irakitea eragozten duen presio handiko zirkuituan dabil (ikus 5 irudia). Erregai multzoak zirkuloyzko hodi horizontalen barruan sartzen dira eta hodi horietan barrena dabil hozgarria. Erregaiak kendu eta jartzeko erreaktorea gelditu behar ez izatea dugu CANDUren beste ezaugarri garrantzitsu bat. Kontrol-barrak goialdetik sartu eta ateratzen dira. Erreaktore honen ohiko ezaugarriak honako hauek dira:



5. irudia. Ur-astuna moderatzaile eta hozgarri gisa erabiltzen dituen CANDU motako zentral nuklearra

- gunea: 6-7 m-ko diametro eta 6 m-ko garaiera,
- ontzia: 5 m-ko barne diametroa eta 10 m-ko garaiera,
- hozte-zirkuituko presioa: 11 MPa,
- hozgarriaren sarrera-tenperatura, 266 °C eta irteera-tenperatura, 310°C,
- potentzia termikoa: 2.100 MW,
- potentzia elektrikoa: 600 MW,
- potentzia-dentsitatea: 7,5 MW/m³,
- etekina: %30.

Gasez hoztutako grafito-erreaktorea (Magnox eta kidekoak)

Erresuma Batuan garatutako erreaktorea da eta gero Frantzian ere garatu da horren aldaera bat. Erregaia uranio naturala da, moderatzailea grafitoa, eta hozgarria karbono dioxidoa. Gunea erregai nuklearra sartzeko kanal bertikalak dituen grafitozko egitura da. Erregai-zorroa magnesio-aleaziozkoa da (Erresuma Batuan, aleazio horren izen komertziala *Magnox* delarik). Egitura horren behealdetik sartu eta goialdetik irteten da hozgarria, eta gunearen ondoan dauden bero-trukagailuetatik dabilen ura lurrunazten du. Hormigoizko edo altzairuzko egitura presurizatu batean sarturik daude horiek denak.

Gasez hoztutako erreaktore aurreratua (AGR)

Magnox erreaktoreetatik eratorritakoa da. Erregai-atalen osaera da bien arteko alde nagusia: erregaia uranio oxido gutxi aberastua da (%2) eta zorroa altzairu herdoilgaitzekoa da.

RBMK

Sobiet Batasunean garatutako erreaktorea da. Erregaia uranio oxido gutxi aberastua da (%1,8), moderatzailea grafitoa eta hozgarria ur arrunta. Gunea grafitozko egitura da eta horren barnean erregaia duten hodiak eta hozgarriaren zirkuituko hodiak daude, zirkonio-niobiozkoak biak ere. Presiopeko ura behetik sartzen da erreaktore-gunean, irakin egiten du eta irten-dakoan turbinara doa. Ohiko potentzia termikoa 3.100 MW ingurukoa da eta potentzia elektrikoa, 1.000 MW-ekoa. Txernobilgo zentralako erreaktore nuklearrak mota honetakoak ziren.

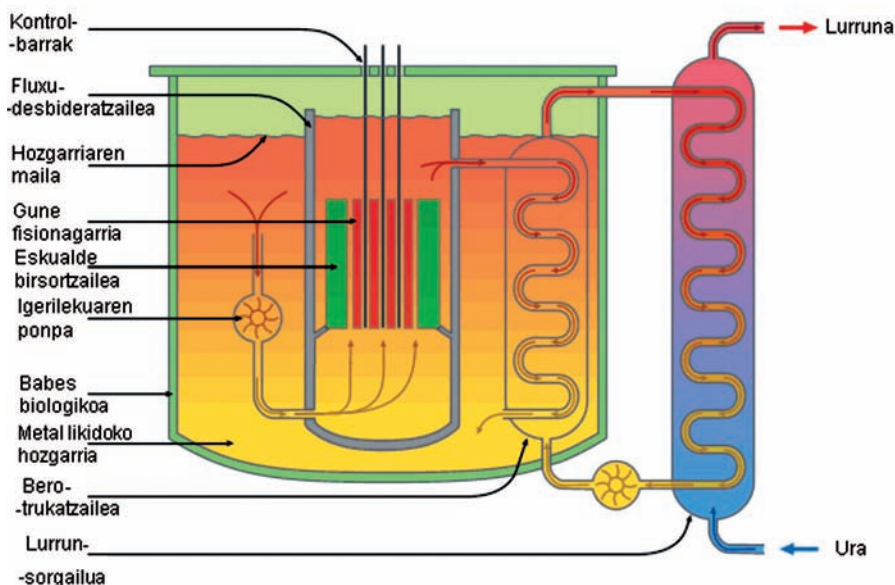
Metal likidoko erreaktore birsortzaile lasterra (LMFBR)

Erreaktore birsortzaileetan, nukleo batek neutroi bat harrapatu eta nukleo fisioagarri berria eratzen du, hau da, material fisioagarria sortzen da erreaktorean. Horrelako nukleo fisioagarriak eman ditzaketen espezieei material emankor deritze eta naturan uranio-isotopo ugariena den uranio-238 da erabiliena, neutroia harrapatzean plutonio-239 ematen duena. Torio-232 ere emankorra da, uranio-233 fisioagarria ematen baitu. Gertakari hori neutroi lasterrek eragin dezakete eta, hortaz, erreaktore birsortzaileetan ez da moderatzailerik erabiltzen. Gehienetan, erreaktore hauek potentzia-erreaktore gisa ere funtzionatzen dute eta erregai modura material emankorrek eratzten duen espezie bera erabiltzen dute. 6. irudian «igerileku» diseinuko LMFBR bat erakusten da. Bertan ikus daitekeenez, U^{235} eta Pu^{239} direlako material fisioagarria material emankorraz inguratuta dago erreaktorearen gunean eta kontrol-barrak goialdetik sartzen dira; material emankorra 6 irudian eskualde birsortzailean dago.

Erreaktore-gunea sodioz beteriko igerileku baten barruan dago eta ponpa baten bitartez gunera ponpatzen da sodioa behealdetik; beroturiko sodioa goialdetik igerileku barruan dagoen bero-trukatzaile sartzten da. Erreaktore birsortzaile laster erabilienean, hozgarria sodio likidoa da, baina beruna, Na, K eta merkurioa ere erabili dira. Hain zuzen ere, sodioa neutroi-moderatzaile eskasa da eta bero-transferentziarako ezaugarri onak ditu. Dena dela, sodioak neutroia xurgatzen du eta sodio-24 isotopo erradiaktiboa sortzen da (15 orduko erdibizitza duena). Isotopo hori bero-trukagailuetara igaro ez dadin, beste sodio-zirkuitu bat ezarri behar da

METAL LIKIDOKO ERREAKTORE BIRSORTZAILE LASTERRA (LMFBR)

“Igerilekua” diseinua



6. irudia. Neutroi lasterrak erabiltzen dituen (hau da, moderatzaierik ez duen) LMFBR motako eta «igerileku» diseinuko erreaktore birsortzaile lasterra

gunea hozten duen sodioaren eta turbina lurrunez hornitzen duen lurrin-sorgailuaren artean. Sodioa oso elementu oxidatzailea da eta erabiltzen diren materialak oso ondo aukeratu behar dira.

ERREAKTORE AURRERATUAK

Gasez hoztutako temperatura altuko erreaktorea (HTGR)

Erregai uranio aberastuaren karburoaren eta torio karburoaren nahastea da, moderatzailea grafitoa eta hozgarria presiopeko helioa izanik. Erregai diametro txikiko esferen (0,5 mm) gunean dago, grafito, pirokarbonato eta silizio karburo geruzaz estalirik. Horrelako hainbat, esfera grafitozko geruza esferiko baten barnean (60 mm-ko diametroko esferan) kokatzen dira pilota bat osatuz. Horrelako milaka pilota (300.000 inguru) grafitoz inguratutako gune metaliko batean daude, erregairik gabe, baina berdin eraikitakoak diren beste esferak (100.000 inguru) tartean dituztelarik. Gune osoan material erregogorrek erabiltzen dira, 300 °C-tik gorako

tenperaturetan funtziona dezan. Hozgarria gunetik oso tenperatura altuan irteten denez (900°C inguru), errektore mota hau gas-turbina bati zuzenean eragiteko oso egokia da eta elektrizitatea %40-ko etekinarekin sortzeko gai da. Erregaia etengabeki aldatzen da pilota berriak goitik sartu eta zaharrak behetik ateratzen direlarik; beraz, PWR eta BWR errektoreetan ez bezala, erregaia birzamatzeko zentral nuklearra ez da gelditu behar. Gainera, istripu larrietako tenperaturetan ere (1.600 °C-tik gora) materialak ez dira urtzen, erregogorak direlako. Honek segurtasun handi samarra eskaintzen du. Bestalde, helio gas noblea erabiltzen da hozgarri modura, eta beraz, beste materialekin erreakzionatzeko arriskurik ez dago, ez eta tenperatura handietan ere. Errektore-modulu bakoitzaren potentzia elektrikoa 120 MW-ekoa da. Kontuan hartuz lehenik, errektore hauek behar duten lekua errektore arruntena baino askoz txikiagoa dela, bigarrenik, diseinuaren eta eraikuntzaren sinpletasuna, eta azkenik segurtasuna, errektore hauek oso erakargarriak izan daitezke hurrengo belaunaldiko errektoreetarako.

EPR (europako ur presurizatuko errektorea) [9, 10]

PWR motako errektoreetan oinarritutakoa da. Diseinua eta garapena, bi enpresa frantziarrek eta enpresa aleman batek egin dute: Framatome (Areva NP), Electricité de France (EDF), eta Siemens Ag hurrenez hurren. Hirugarren belaunaldiko PWR errektoreekiko segurtasuna areagotu eta lehiakortasun ekonomikoa handitu nahi izan da EPR honen bidez. Diseinu honen potentzia elektrikoa 1.600 MW-koa da eta erregai bezala uranio oxidoa aberastua (%5) edo uranio plutonio oxidoen nahastea erabil daiteke.

Mendebaldeko Europan eraikitzen ari den zentral nuklear bakarra, Olkiluoto 3, EPR motakoa da. Zentral hori Suomiko (Finlandiako) mendebalean eraikitzen ari dira, Olkiluoto 1 eta 2 BWR zentralen ondoan.

Errektore honen ezaugarriak honako hauek dira:

- gunea: diametroa 3,77 m eta garaiera 4,2 m,
- ontziaren garaiera: 13 m,
- lehen zirkuituko presioa: 15,4 MPa,
- ontziko lurrun-tenperatura: 290 °C,
- erregai-multzoen kopurua: 241,
- kontrol-barra kopurua: 89,
- uranio kopurua errektorean: 128 tonelada (UO₂),
- estalkia: 49 m-ko diametroa eta 63 m-ko garaiera,
- potentzia termikoa: 4.300 MW,
- potentzia elektrikoa: 1.600 MW,
- etekina: %37.

Zentral honek istripuen aurkako babes aktibo eta pasiboak ditu:

- Lau hozte-sistema beregain, bakoitzak erreaktorea itzaltzeko nahiko gaitasuna duelarik eta laurak erakikuntza banatan kokatuak daudelarik.
Honek ziurtatzen du hainbat azpisistemak lanean jarraituko dutela, gertatzen diren kanpo eta barne larrialdiak gertatzen direla ere.
- Erreaktorearen inguruan gasarekiko hermetikoa den horma.
- Beste estalki bat eta beste hozte eskualdea eraikiko dira ondorengo helburuarekin: erreaktorearen gunea urtuz gero (gerta daitekeen istripurik larriena), likido hori hozte-eskualde horretara bideratuko litzateke, birsolidifikatuz ihesa eragozteko. Horretarako, sistema pasiboen bidez urturiko gunea berak beherantz egitean etengailu bezala jokatu eta hozte-sistema pizten du, urturiko gunea eskualde handi batean zabaltzen den bitartean. Era horretan gunea urtua birsolidifikatzen da.
- Hormigoizko bi estalki, denera 2,6 m lodierakoak, hegazkinen talkek jasateko modukoak.

1. taula. Erreaktore motak eta elikaturiko potentzia elektriko garbia, 2005eko abenduaren 31n [11]

Erreaktore mota	kopurua	Potentzia guztira MW(e)
PWR	267	241,085
BWR	94	84,427
Ur astunekoak	41	20,933
Gasez hoztuak (mota guztiak)	22	10,644
RBMK	16	11,404
Lasterrak (sodiokoak)	3	1,039
GUZTIRA	443	369,552

2. taula. Abian diharduten zentral nuklearrak eta eraikuntza daudenak 2005ko abenduaren 31ean⁹

Estata	Abian Dauden Erreaktoreak		Eraikitzen Dauden Erreaktoreak		2005ean Ekoizitako Elektrizitate Nuklearra		Esperientzia Zentral Nuklearrekin
	Kopurua	MW(e) osoa	Kopurua	MW(e) osoa	TW(e).h	Osoaren %ekoa	Urteak
AEB	104	99.210			780,47	19,33	3.080
Alemania	17	20.339			154,61	30,98	683
Argentina	2	935	1	692	6,32	6,92	55
Armenia	1	376			2,50	42,74	38
Belgika	7	5.801			45,34	55,63	206
Brasil	2	1.901			9,85	2,48	29
Britania Handia	23	11.852			75,17	19,86	1.378
Bulgaria	4	2.722	2	1.906	17,34	44,10	137
Erromania	1	655	1	655	5,11	8,58	10
Errusia	31	21.743	4	3.775	137,27	15,78	870
Eslobakia	6	2.442			16,34	56,08	113
Eslovenia	1	656			5,61	42,36	24
España	9	7.588			54,70	19,56	237
Frantzia	59	63.363			430,90	78,46	1.464
Hegoafrika	2	1.800			12,24	5,52	42
Herberekak	1	449			3,77	3,91	61
Hungaria	4	1.755			13,02	37,15	82
India	15	3.040	8	3.602	15,73	2,83	252
Iran			1	915			0
Japonia	56	47.839	1	866	280,67	29,33	1.232
Kanada	18	12.599			86,83	14,63	535
Korea	20	16.810			139,29	44,67	260
Lituania	1	1.185			10,30	69,59	40
Mexiko	2	1.310			10,80	5,01	28
Pakistan	2	425	1	300	2,41	2,80	40
Suedia	10	8.910			70,00	46,67	333
Suiza	5	3.220			22,11	32,09	154
Suomi	4	2.678	1	1.600	22,33	32,91	107

Estatua	Abian Dauden Erreaktoreak		Eraikitzen Dauden Erreaktoreak		2005ean Ekoizitako Elektrizitate Nuklearra		Esperientzia Zentral Nuklearrekin
	Kopurua	MW(e) osoa	Kopurua	MW(e) osoa	TW(e).h	Osoaren %ekoa	Urteak
Txina	9	6.572	3	3.000	50,33	2,03	57
Txekia	6	3.368			23,25	30,52	87
Ukrania	15	13.107	2	1.900	83,29	48,48	309
GUZTIRA	443	369.552	27	21.811	2.626,35	19,28	12.086

Oharra: Datuetan Taiwan Txinan barne hartzen da:

- 6 erreaktore, 4.904 MW(e) martxan, 2 erreaktore eraikitzen, 2.600 MW(e).
- 38,4 TW(e).h elektrizitate nuklearra, han ekoizturiko elektrizitatearen %20,25.
- Esperientzia: 148 urte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] «Uranium 2005: Resources, Production and Demand»: OECD, International Atomic Energy Agency (IAEA); OECD Pub. ISBN:9789264024250.
- [2] IEA (2005) = INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2005): «Projected costs of generating electricity: 2005 Update». ISBN 92-64-00826-8. <http://www.nea.fr/html/pub/>
- [3] UNIVERSITY OF CHICAGO (2004): «The Economic Future of Nuclear Power». http://www.anl.gov/Special_Reports/
- [4] RAE (2004) = ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (2004): «The cost of generating electricity». http://www.nowap.co.uk/docs/generation_costs_report.pdf.
- [5] TARJANNE, R. & LUOSTARINEN, K. (2003): «Competitiveness Comparison of the Electricity Production Alternatives». Lappeeranta University of Technology, 2003.
- [6] SPECIAL EUROBAROMETER, Report 227: «Radioactive Waste» European Commission. <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/publications/>.
- [7] F. PLAZAOLA (1999): «Hondakin Erradiaktiboak: zer egin». Elhuyar 148, 26.
- [8] «Energiaren hiztegi entziklopedikoa» EVE, Bilbo 2000.
- [9] TVO Nuclear Services Oy. <http://www.tvons.fi>.
- [10] Suomiko energia ministeritza». <http://www.energia.fi>.
- [11] «Nuclear reactor power in the world» IAEA Reference data series N.2, apirila 2006.