

Gradu Amaierako Lana
Fisikako Gradua

Chernobyngo istripuaren nondik norakoen ikerketa bibliografikoa

Egilea:
Leire Ocerin Rodríguez
Zuzendaria:
Fernando Plazaola Muguruza

© 2020, Leire Ocerin Rodríguez

Gaien Aurkibidea

1	Sarrera eta helburuak	3
2	Zentral nuklearrak eta erreaktoreen fisika	4
2.1	Erreaktore nuklearren sailkapena	4
2.2	Erreaktore gunea	5
2.3	Erregai	5
2.4	Neutroi moderatzailea	7
2.5	Kontrol eta segurtasun barrak	8
2.6	Hozgarria eta hozte-sistema	9
2.7	Neutroien biderketa-faktore eraginkorra	10
2.8	Erreaktibitatea	11
2.8.1	Erreaktibitate operazionalaren tartea (Operational Reactivity Margin)	11
2.8.2	Erreaktibitatean eragiten duten faktoreak	12
3	Chernobyl-go zentral nuklearra	17
3.1	RBMK-1000 erreaktorea	17
3.2	RBMK-1000 erreaktorearen diseinua	17
3.2.1	Erreaktore gunea	18
3.2.2	Moderatzailea	19
3.2.3	Erregai eta erregai-kanalak	19
3.2.4	Kontrol-barrak eta segurtasun-barrak	19
3.2.5	Hozgarria eta hozte-sistema	20
3.2.6	Erreaktibitate operazionalaren tartea (ORM)	21
3.3	RBMK erreaktoreen diseinu akatsak	22
3.3.1	RBMK erreaktorearen hutsune-koefizientea	22
3.3.2	Kontrol eta segurtasun barrak	22
4	Istripua	24
4.1	Istripuaren kronologia	24
4.2	Istripuaren analisia	27
4.3	Erreaktorean gertatu ziren bi leherketak	31
4.4	Leherketen ondorengo uneak	32
4.5	Istripuak eragindako osasun kalteak	34
5	Ondorioak	36
	Bibliografia	38

1. Kapituluia

Sarrera eta helburuak

Esku artean duzun gradu amaierako lan honetan, Chernobylgo istripuaren ikerketa bibliografikoa egin da. Chernobylgo istripua 1986. urteko apirilaren 26an gertatu zen historiako hondamendi nuklearrik larriena da. Chernobylgo zentral nuklearraren laugarren erreaktoreak eztanda egin zuen, eta askatu zen erradioaktibitatearen ondorioz, Chernobylgo inguruak guztiz kaltetuta geratu ziren. Gainera, istripuak epe laburreko eta epe luzeko osasun kalteak eragin zizkion Chernobylgo zentraletik hurbil bizi zen populazioari.

Gradu amaierako lan honek hiru helburu nagusi ditu. Alde batetik, Chernobylgo istripua ulertzeko beharrezkoa den fisika eta zentral nuklear baten funtzionamendua zein den ulertzea. Beste alde batetik, 1986ko istripuaren eragilea zer edo nor izan zen ulertzea, eta istripuan gertatu ziren leherketen inguruko hipotesietan sakontzea. Azkenik, askatutako erradioaktibitatearen ondorioz gertatu ziren osasun kalteak zeintzuk izan ziren aztertzea.

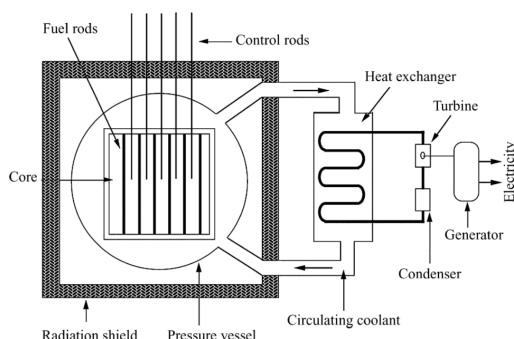
Helburuak betetzeko asmotan eta ulerterrazagoa egiteko xedearekin, lana lau ataletan banatu da. Lehenengo atalean, Chernobylgo istripua eta zentral nuklear baten funtzionamendua nolakoa den ulertzeko oinarritzko fisika azaldu da. Behin oinarritzko fisika azalduta, bigarren atalean, Chernobylgo laugarren erreaktorearen diseinua aztertu da, RBMK-1000 erreaktorearen diseinua alegia. Chernobylgo istripua ulertzeko oinarria dugularik, hirugarren atalean, istripuan emandako urratsak, eta haren analisisa egin da, istripuaren eragilea zein den eta istripuan gertatutako leherketen izaerari buruzko hipotesietan sakonduz. Gainera, istripuaren ondorengo egunak aztertu dira. Bestalde, istripuak eragin zituen osasun kalteak aztertu dira. Bukatzeko, azken atalean, gradu amaierako lan honetan atera ditugun ondorio nagusiak aurkeztu dira.

Horrez gain, irakurleak lan honetan gehiago sakontzeko aukera izan dezan, lanarekin atxikita, lau eranskin aurkeztu dira. Lehenengo eraskinean, erreaktoreen fisikan parametro garrantzitsua den lau faktoreko biderketa-faktorearen garapena egin da. Bigarren eraskinean, berriz, Chernobylgo istripuan askatu zen erradioaktibitatearen inguruko xehetasunak eman dira. Bestalde, hirugarren eranskinean, erradioaktibitateak pertsonengan nola eragiten duen aztertu da, horrela, irakurleari erradioaktibitateak eragin ditzakeen kalteetan sakontzeko aukera emanaz. Azkenik, laugarren eranskinean, Chernobylgo zentralaren eta inguruen gaur egungo egoera zein den aurkeztu da.

2. Kapitulara

Zentral nuklearrak eta erreaktoreen fisika

Potentziako zentral nuklearrak energia nuklearra energia elektriko bihurtzen dute. Energia nuklearra energia elektriko erreaktoreetan bihurtzen da. Honako irudi honetan ikus daitezke erreaktore baten atalak [1]:



1. **irudia.** Erreaktore batek izaten dituen atalak (Iturria [1]).

Erreaktore nuklearra deritzon gunean, erregai nuklearra osatzen duten nukleoen fisioa gertatzen da. Fisio-erreakzio batzuk, fisio termikoak kasu, moderatzaileagatik dira posibleak, eta kontrol-barren bitartez dira kontrolagarriak. Fisioan sortutako energia, erregaia inguratzen dagoen fluido bati energia termiko bezala transferitzen zaio, hozgarriari, eta hala, lurrina sortzen da. Ondoren, lurrin hori turbina eta alternadorez osaturiko zentralaren gunera bidaltzen da eta argindarra sortzen da.

Zentralen energia-irteera megawatio termikoetan, MW(th), edo megawatio elektrikoetan, MW(e), adierazten da. Lehenengoa ekoiztutako potentzia termikoaren balioa da, eta erreaktoreak ekoizten duen lurrin kopurua eta haren kalitatea adierazten du. Megawatio elektriko bidez, zentral nuklearrak duen elektrizitatea ekoizteko ahalmena jakinarazten da, eta potentzia termikoaren eta zentralaren eraginkortasunaren arteko biderketa da [2].

2.1 Erreaktore nuklearren sailkapena

Erreaktore nuklearrak era askotara sailka daitezke. Erabileraren arabera sailkatzen baditugu bi multzotan bana ditzakegu erreaktoreak: potentzia-erreaktoreak eta ikerkuntza-

erreaktoreak. Lan honetan potentzia-erreaktoreak jorratuko ditugu soilik, lanaren xedea Chernobyl-en gertatu zen istripua ulertzea baita. Potentzia-erreaktoreak energia elektrikoa ekoizteko erabiltzen dira gehienbat, eta sortzen den energia termikoa gigawatio ordenakoa izaten da.

Erreaktoreak sailkatzeko beste era bat fisioa eragiten duten neutroien abiadura kontuan hartzea da. Abiaduraren arabera hiru motakoak izan daitezke: lasterrak, ertainak eta termikoak. Erabilienak erreaktore termikoak dira, non, horietan moderatzailearen bidez neutroien energia energia termikoetara gutxitzen den eta fisio termikoak eragiten diren [2].

Azkenik, erreaktorearen osagaiak kontuan hartuz gero, erreaktorearen barnean dagoen erregaia moderatzailearekin eta hozgarriarekin batera nahasturik badago, erreaktorea homogeneoa dela esaten da. Erregaia moderatzailearekiko eta hozgarriarekiko independentea bada, aldiz, erreaktore heterogeneoa da [2].

Potentziako zentral nuklearren erreaktore arruntena ur presurizatuko erreaktorea (PWR) da, 250 zentral inguru daude. Sortzen duen potentzia termikoa 3800MW(th) ingurukoa da eta potentzia elektrikoa 1300 MW(e) ingurukoa. Erreaktore mota hori erreaktore termikoa da, izan ere, neutroi termikoen bidezko fisio-erreakzioak gertatzen dira erreaktorean [3].

Bigarren erreaktorerik arruntena ur irakineko erreaktorea (BWR) da, eta 90 zentral inguru daude. Ekoizten duen potentzia termikoa 3850MW(th) ingurukoa da eta potentzia elektrikoa 1200-1300 MW(e) tartekoa da. PWR erreaktorea bezala, erreaktore termikoa da [3]. Bi erreaktoreak erreaktore homogeneoak dira.

2.2 Erreaktore gunea

Erreaktore gunea hozgarria, moderatzailea, erregaia eta kontrol eta segurtasun barrak biltzen dituen egitura da zentral nuklear arruntenetan, baita Chernobylgoan ere. Erreaktore gunea osatzen duten materialek ezaugarri bereziak dituzte segurtasuna bermatzeko. Gainera, hozgarriak eta erregaiak izan behar dituzten baldintzak betetzeko, bai erreaktorearen sarrerako eta irteerako tenperaturak, bai erreaktorearen zeharreko presioa zehatza eta kontrolatua da.

Adibidez, ur presurizatuko erreaktoreek moderatzaile eta hozgarri bezala ur presurizaturia erabiltzen dute. Erreaktorearen sarrera-tenperatura 295°C da, aldiz, irteera-tenperatura, 330°C da. Erreaktore mota horietan, erregaia hozten duen hozgarria egoera likidoan mantentzen da eta, horretarako, presio altua izan behar du hozgarriak, 15.5 MPa. Bestalde, ur irakineko erreaktoreetan, moderatzaile eta hozgarri bezala ur arrunta erabiltzen da. Baina, erreaktore horietan, ura likido bezala sartzen da erreaktore gunera, eta erreaktore gunean dagoela, urak irakin egiten du. Erreaktore mota horren sarrera-tenperatura 216°C da, eta irteera-tenperatura 288 °C da. Gainera, erreaktore gunearen barnean urak irakin ahal izateko, presioa 7MPa-koa da [3].

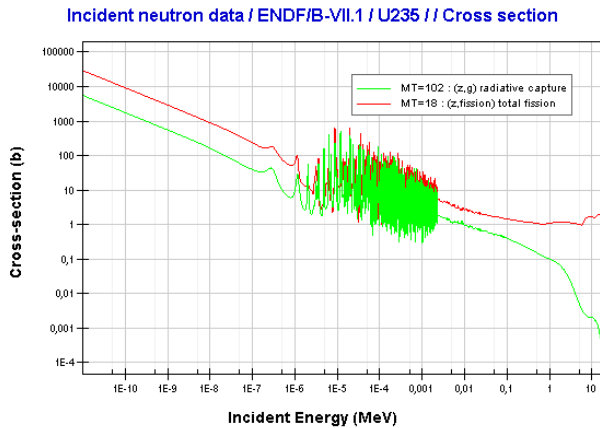
Erreaktore gunea altzairuzko estalki biologiko batek estaltzen du, langileak erradiaziotik babestea duena xede. Altzairuzko egitura, normalean, hormigoizko estalki baten bidez estaltzen da, istripu baten aurrean ingurumenari ahalik eta kalte txikiena eragiteko asmotan. Gainera, erreaktore gunek neutroi galera ekiditeko neutroi islatzaileak izaten ditu [2].

2.3 Erregaia

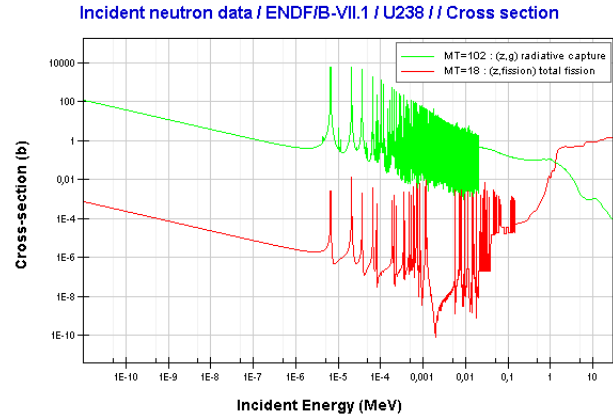
Erregaia elementu fisilak dituen lagin erradioaktiboa da, normalean egoera solidoan dagoena. Erregai erabiliena aberastutako uranio oxidoa da. Uranio oxidoak ^{235}U eta ^{238}U isotopoen

nahasketak ditu.

Uranioaren isotopoak neutroiz bonbardatuz gero, bi erreakzio nuklear mota gertatu daitezke: fisioa eta neutroi xurgapena. Erreakzio horiek gertatzeko probabilitatea neutroiaren energiaren arabera da. Probabilitatea zein izango den kalkulatzeko, eta hortaz ze erreakzio mota gertatuko den probabilitate handienarekin aztertzeko, uranio isotopoek neutroiaren energia ezberdinetan dituzten sekzio-eragileak neurtzen dira. Honakoak dira ^{235}U eta ^{238}U isotopoen fisiozko sekzio-eragilea eta xurgapen sekzio-eragilea neutroi erasotzailearen energiaren arabera [4]:



2. irudia. ^{235}U isotopoaren fisiozko eta xurgapen sekzio-eragileak (Iturria [4]).



3. irudia. ^{238}U isotopoaren fisiozko eta xurgapen sekzio-eragileak (Iturria [4]).

2 irudian ikus daitekeen bezala, neutroi erasotzailearen energiaren arabera hiru gune bereiz daitezke. Neutroiaren energia baxuetan, hau da, energia termikoetan ($T=290\text{K}$, energia 0.025 eV), ^{235}U isotopoaren fisiozko sekzio-eragilea handiena da. Beraz, energia termikoetan neutroiek isotopo hori erasotzen dutenean, fisioa gertatzeko probabilitatea handiena da. Bestalde, neutroiaren energia $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ MeV ingurukoa denean, erresonantziak gertatzen dira. Tarte horri erresonantzia-tartea deitzen zaio, eta azter daitekeen bezala, fisiozko sekzio-eragileak eta xurgapen sekzio-eragileak nahiko balio antzekoak dituzte. Azkenik, neutroiaren energia handienetan (energia horiek dituzten neutroiak neutroi lasterrak dira), fisiozko sekzio-eragilea da xurgapen sekzio-eragilea baino handiagoa da. Horrenbestez, neutroi lasterren bidez bonbardatutako uranio isotopoak fisioa jasateko probabilitate handiagoa du neutroi xurgapena jasateko baino. Hala ere, fisioa gertatzeko probabilitate handiena uranio isotopoa neutroi termikoen bidez bonbardatzen denean gertatzen da.

Bestalde, 3 irudian azter daitekeenez, neutroiaren energia termikoetan eta erresonantzia-tartean, ^{235}U isotopoaren kasuan ez bezala, ^{238}U isotopoak xurgapen sekzio-eragile handiagoa du, fisiozko sekzio-eragilea baino. Ondorioz, ^{238}U isotopoak probabilitate handiagoa du neutroi xurgapena jasateko fisioa jasateko baino. Hala ere, neutroiaren energia 1 MeV baino handiagoa denean, fisiozko sekzio-eragilea handiagoa da xurgapen sekzio-eragilea baino, eta ondorioz, energia horietan fisioa gertatzeko probabilitatea xurgapena gertatzeko baino handiagoa da. Bestalde, ^{238}U isotopoaren erresonantzia-tartea neutroi erasotzailearen energia $1 \cdot 10^{-5}$ MeV denean hasten da.

2 eta 3 irudiak alderatzen baditugu, neutroiaren energia altuenetan izan ezik (1 MeV baino energia handiagoetan), ^{238}U isotopoaren fisiozko sekzio-eragilea ^{235}U isotopoarena baino 10^5 aldiz txikiagoa da. Baina, uranio naturalak duen isotopo horren portzentajea $\%0.7290$ [2]

da soilik. Ondorioz, fisio-erreakzioak gertatuko direla bermatzeko, erregaiaren ^{235}U isotopoa proportzio batean handiarazten da. Uranio naturalak baino ^{235}U isotopo gehiago dituen erregaiari uranio aberastua deitzen zaio. PWR eta BWR errektoreek %3-5 aberastutako uranio naturala erabiltzen dute erregai bezala.

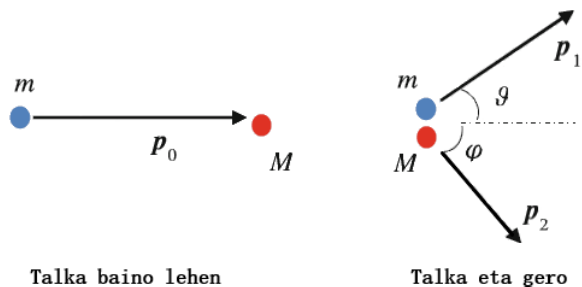
Erreaktorera aberastutako uranio oxidoaren laginak erregai-kanalak deituriko hodian barnean sartzen dira.

2.4 Neutroi moderatzailea

Aberastutako uranio oxidoa erregai bezala erabiltzen dituzten errektoreetan, nukleo fisilen fisioa neutroi termikoek induzitu dezakete probabilitate handienarekin. Izan ere, erregaiaren atalean aztertu dugun bezala, ^{235}U isotopoaren fisiozko sekzio-eragilea handiena da neutroi erasotzailearen energia baxuenetan. Baina, fisio-erreakzioan askatzen diren neutroiak lasterak dira, haien energia 2MeV ingurukoa baita. Ondorioz, neutroien abiadura txikitu beharra dago neutroi termikoen energia mailara iritsi arte [2].

Erreaktore nuklearretan, neutroien balaztatzea moderatzaileen bidez lortzen da. Moderatzaileak pisu atomiko baxuko substantziak dira, horrela, neutroi arinen eta pisu atomiko baxuko substantziaren arteko talka elastikoak gertatzen dira eta neutroien abiadura murriztea lortzen da. Neutroiek eta nukleo zurizkoak masa antzekoa dutenean (H atomoaren kasuan adibidez), neutroia sakabanatu egiten da eta haren abiadura murrizten da, baina, nukleoak energia zinetikoa irabazten du. Nukleo oso pisutsua denean ordea, neutroiak ez du ia abiadurarik galtzen.

Demagun T_0 energia zinetikoko eta m masakoa neutroiak pausagunean dagoen A zenbaki masakoko eta M masakoa nukleoaren kontra egiten duela talka. Honakoa izango da egoera talka baino lehen eta talka gertatu ostean [2]:



4. **irudia.** Talka aurretik eta talka ondoren neutroiaren eta nukleoaren higadura adierazten duen irudia (Iturria [2]).

Energiaren eta momentu linealaren kontserbazioa aplikatuta, nukleoak lortutako energia zinetikoaren, T_2 , eta neutroiaren hasierako energia zinetikoaren, T_0 , arteko erlazioa lor dezakegu [2]:

$$\frac{T_2}{T_0} = \frac{4mM}{(M+m)^2} \cos^2 \varphi \quad (2.4.1)$$

M eta m moderatzailea osatzen duen materialaren nukleoaren masa eta neutroiaren masa dira, hurrenez hurren. Hori horrela, neutroiaren hasierako energia zinetikoaren, T_0 , eta bukaerako energia zinetikoaren, T_1 , zatidura honakoa izango da [2]:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1 - \frac{4mM}{(M+m)^2} \cos^2 \varphi \quad (2.4.2)$$

Hurbilketa onean, $M \simeq Am$ dela esan dezakegu, ondorioz, aurreko adierazpena honela geratzen da[2]:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1 - \frac{4A}{(A+1)^2} \cos^2 \varphi \quad (2.4.3)$$

Gerta daitekeen neutroiaren energia galera maximoa $\varphi = 0$ denean izango da, $\varphi = \pi$ rad denean, aldiz, minimoa. Bestalde, ikus daiteke energia truke eraginkorrena zenbaki masiko txikiko nukleoan eta neutroien arteko talka elastikoa gertatzen denean emango dela. Adibidez, neutroia eta pausagunean dagoen hidrogenoaren arteko talka elastikoan, neutroia geratu egiten da eta energia zinetiko guztia protoiari transmititzen dio. Bestalde, nukleo astunen kontrako talketan ez denez ia transferentzia energetikorik ematen, neutroia azkar mugitzen da.

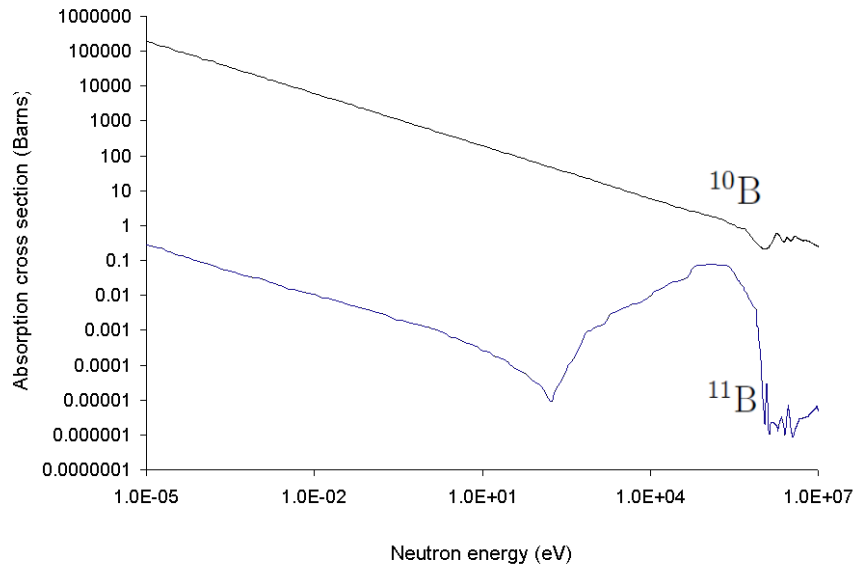
Erreaktoretan, fisio-erreakzio batetik besterako prozesuetan neutroiak moderatzailearen bidez balaztatu egiten dira. Moderatzaile arruntena hidrogenoa duen sistema da (ura), horrela, fisioan ekoiztutako neutroi lasterrek hidrogenoen protoiekin talka elastikoak izaten dituzte eta balaztatu egiten dira. Ur arruntan neutroi laster batek (2 MeV) neutroi termikoaren energia (0.025 eV) lortzeko behar duen talka kopuruaren batazbestekoa 18 ingurukoa da, 25 ingurukoa da ur-astunean eta 115koa grafitoan [2].

2.5 Kontrol eta segurtasun barrak

Kontrol eta segurtasun barren bidez erreakzio nuklearra kontrola daiteke, ondorioz, erreaktore gunearen potentzia. Kontrol-barrak hodi zilindrikoak izaten dira, non, barnean, neutroiak xurgatzen dituen materiala sartzen den.

Xurgatzaileak erreaktorera sartzean, neutroiak xurgatu eta erregaiaren fisioa gertatzeko probabilitatea jaisten da. Zenbat eta xurgatzaile gehiago egon erreaktorearen barnean, are eta handiagoa da erreakzioa guztiz geratzeko probabilitatea.

Xurgatzailearen materiala boroa, kadmioa, hafnioa edo gadolinioa izaten da, izan ere, material horiek neutroi xurgapen sekzio-eragile handiak dituzte, eta ondorioz, neutroi xurgatzaile onak dira [2]. Boroa edo boro karburoa da gehienetan erabiltzen den xurgatzaile. Boro naturala ^{11}B eta ^{10}B -ren nahasketa izaten da, eta ^{10}B isotopoak $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ($n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^7\text{Li}$) erreakzioak jasateko probabilitate handia dauka neutroiaren energia espektro guztian zehar [5]. Ondorioz, xurgapen sekzio-eragile handia du. Aitzitik, ^{11}B isotopoaren xurgapen sekzio-eragilea txikia da ^{10}B isotopoaren xurgapen sekzio-eragilearekin alderatuz gero. Honako irudi honetan, ^{10}B eta ^{11}B isotopoen sekzio-eragileak ageri dira neutroien energia guztietarako [6]:



5. irudia. ^{10}B eta ^{11}B isotopoen xurgapen sekzio-eragileak (Iturria [6]).

5 irudian azter daitekeen bezala, neutroi erasotzailearen energiaren espektro guztian zehar, ^{10}B isotopoak ^{11}B isotopoak baino xurgapen sekzio-eragile handiagoa du. Gainera, neutroiaren energia termikoetan, ^{10}B isotopoaren xurgapen sekzio-eragilea bereziki handia da. Ondorioz, boro karburoa neutroi xurgatzaile bezala jarduteko material ona da, batez ere, neutroi termikoekin lan egiten den errektoretan.

2.6 Hozgarria eta hozte-sistema

Errektoretan, fisio-erreakzioan askatutako beroa hozgarria izeneko fluidoak xurgatzen du. Hozgarria neutroiak balaztatzen dituen eta beroa xurgatzen duen fluidoa izaten da. PWR eta BWR errektoretan, adibidez, hozgarria ura da.

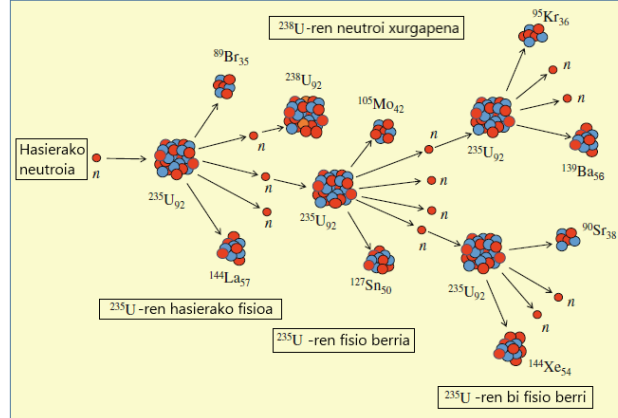
Hozgarria zirkuitu baten bidez mugiarazten da errektore gunean zehar, non zirkuitu horren bidez hozgarriak xurgatutako beroa lurrun-sortzaileari helarazten zaion. Horrela, lurrun sortzailean sortutako lurrunak turbinak birarazten ditu, eta energia mekanikoa energia elektriko bihurtzen da. Fisioaren ondorioz askatutako beroa, hozgarriaren bidez, lurrun-sortzailera arte bideratzen duen zirkuituari hozte-sistema deitzen zaio.

Guk aztertuko dugun errektorearen kasuan, hozgarria ur likidoa da, bero xurgatzaile eta neutroi moderatzaile ona da-eta. Gainera, gure kasuan, hozgarria bera bilakatzen da lurrun. Bestalde, fisio-erreakzioak sortzen duen bero kantitatea hain da handia (200 MeV inguru [2]), non, aztertuko dugun kasuan, fluidoaren emariak $8000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ingurukoa izan behar duen beroa errektore gunetik kanporatzea bermatzeko [7].

Hozgarria errektorearen hozgarri-ponpek hornitzen dute. Hozgarri-ponpek hozgarria hozte-sistemak osatzen duen zirkuituan zehar mugiarazten dute [7]. Errektorearen ponpek hozgarriaren emaria egokitzen dute errektorea lanean dagoen potentziaren arabera.

2.7 Neutroien biderketa-faktore eraginkorra

Fisio-erreakzioak gertatzen direnean neutroiak igortzen dira. Neutroi horiek fisio induzituak eragiten dituzte eta, beraz, kate-erreakzioak gerta daitezke. Honako irudi honetan ikus daiteke ^{235}U isotopoz osaturiko lagin baten fisio kate-erreakzioa [2]:



6. irudia. ^{235}U isotopoen kate-erreakzioaren adibidea (Iturria [2]).

6 irudian ikus daitezkeen bezala, fisioaren ondorioz igorritako neutroiek fisio berriak induzitzen dituzte eta fisio kate-erreakzioa gertatzen da. Sortzen diren fisio produktuak asko eta ezberdinak dira. Honako parametroa definituko dugu, neutroien biderketa-faktorea, hain zuzen [8]:

$$k = \frac{n + 1. \text{ erreakzioan igorritako neutroi kopurua}}{n. \text{ erreakzioan igorritako neutroi kopurua}} \quad (2.7.1)$$

$k=1$ denean, prozesua ‘kritikoa’ dela esaten da eta erreakzio iraunkorra ematen da. Egoera kritikoa ideala da fisio nuklearrean oinarritutako energia ekoizpenerako. $k < 1$ denean, egoera ‘subkritikoa’ da eta, ondorioz, erreakzioa gelditu egiten da. $k > 1$ denean ordea, egoera ‘gainkritikoa’ gertatzen da, energia oso azkar handitzen da eta eztanda ez kontrolatu bat gerta daiteke (bonba nuklearrak kasu).

Neutroien biderketa-faktorea errektore nuklear termiko batean dagoen neutroi termikoen balantzea da. Errektoreetan, askotan, uranio naturala - ^{238}U eta ^{235}U isotopoen nahasketada erregaia. Neutroi balantzea aztertzeko, ^{235}U -ren neutroi termikoen bidezko fisioa eragotzen duten prozesuak kontuan hartuko ditugu, hala nola, errektore gunetik ihes egiten duten neutroiak, uranioaz bestelako elementuen neutroien xurgapena, ^{238}U -ren neutroi xurgapena ^{239}Pu sortzeko (lehenik ^{239}U sortzen da), eta ^{235}U -ren neutroi xurgapen ez fisionagarria[8].

Neutroi-galera errektorearen tamainaren eta geometriaren arabera da, eta ondorioz, errektoreetan kritikotasuna lortzea ez da berehalakoa. Kritikotasuna lortzeko erregaiaren masa kantitate jakin bat behar da eta masa kantitate horri masa-kritikoa deitzen zaio. Biderketa-faktorea honako eran idatzi daiteke [8]:

$$k_{eff} = k_{\infty}L \quad (2.7.2)$$

L , errektoretik ihes egiten ez duten neutroien batz besteko probabilitatea da. K_{eff} biderketa-faktore eraginkorra da, errektore finituei aplikatzen zaiena, eta K_{∞} errektorea infinitua balitz aplikatuko zitzaiokeen biderketa-faktorea da (neutroi ihesa nulua dena). K_{∞}

erreaktorearen araberakoa da soilik, eta prozesuan eragiten duten sekzio-eragileak ezagututa kalkula daiteke [8]. K_∞ lau faktoreko biderketa-faktoreak definitzen du, eta haren garapena 1. eranskinean eginda dago:

$$K_\infty = \eta p f \epsilon \quad (2.7.3)$$

η ugalketa-faktorea, p fisio arinaren faktorea, f erresonantzia ekiditeko probabilitatea eta ϵ erabilera termikoaren faktorea dira.

Bestalde, (2.7.2) aztertuz, tamaina finituko erreaktore baten baldintza kritikoa $1 = \eta p f \epsilon L$ denean lortzen dela ikus daiteke. L beti izango da bat baino txikiagoa tamaina finituko erreaktore batentzat. Beraz, baldintza-kritikoa lortzeko K_∞ faktorea handitu behar da. Horrez gainera, erregaia erretzen doan heinean eta fisio hondakinak akumulatzen, k_∞ faktorea jaisten doa, beraz, hasiera batean erregaiak biderketa-faktore eraginkor handiagoa izan behar du, horrela jaitsiera hori konpentsatu ahal izateko eta erreakzioa kontrolatu ahal izateko [8, 4].

Erregaia uranio naturala den eta moderatzailea grafito den erreaktoreetan, baldintza ahalik eta idealetan, lortu daitekeen K_∞ baliorik handiena 1.07 inguru da [8]. Hori dela eta, neutroiek erreaktoretik ihes egiteko probabilitatea unitatearen ingurukoa izateko moduan aukeratu behar da erreaktore gunearen tamaina. Horregatik, erreaktore horien tamaina handia izaten da. Aztertuko dugun Chernobylgo erreaktore guneak, RBMK-1000 erreaktoreak alegia, 7 metro luzeko garaiera eta 11.8 metroko diametroa ditu [7]. Bestalde, PWR erreaktore guneak, 3 metro luzeko diametroa eta 4 metro luzeko garaiera ditu, eta BWR erreaktore guneak 4.5 metro luzeko diametroa eta 5 metro luzeko garaiera [3].

2.8 Erreaktibitatea

Aurreko atalean, neutroien biderketa-faktore eraginkorra definitu dugu. Hala ere, erreaktorearen lan-baldintza normaletan, neutroien biderketa-faktore eraginkorra unitatearen ingurukoa izaten da, eta ondorioz, praktikoagoa den parametroa definitzen da. Parametro hori erreaktibitatea da, honela definitzen dena [2]:

$$\rho = \frac{K_{\text{eff}} - 1}{K_{\text{eff}}} \quad (2.8.1)$$

(2.8.1) ekuazioa aztertuz gero, potentziaren eta erreaktibitatearen arteko erlazioa ondorioztatu dezakegu. Erreaktibitatea positiboa bada, neutroi populazioa handitu egingo da eta, ondorioz, potentzia handituko da. Erreaktibitatea nuloa bada, neutroi populazioa konstante mantenduko da; beraz, potentzia egonkor mantenduko da. Azkenik, erreaktibitatearen balioa negatiboa izanez gero, neutroi populazioa txikituko da eta potentzia jaitsi egingo da.

2.8.1 Erreaktibitate operazionalaren tartea (Operational Reactivity Margin)

Erreaktibitate operazionalaren tartea (ORM) une batean erreaktore gunean dauden kontrol-barra guztiak erreaktore gunetik aterako balira sortuko litzatekeen erreaktibitatearen balioa adierazten du. Sortzen den erreaktibitate gehigarri hori gehiegizko erreaktibitatea deitzen da.

Beraz, erreaktibitate operazionalaren tartea une batean erreaktore gunean dauden kontrol-barra guztiak erreaktore gunetik aterako balira sortuko litzatekeen gehiegizko erreaktibitatea

adierazten du. ORMa gehiegizko erreaktibitate hori zero bihurtzeko erreaktore gunera guztiz sartu beharko litzatekeen kontrol-barren balioen arabera adierazten da [9].

Erreaktore gunean segurtasunez lan egiteko beharrezkoa den magnitudea da. Magnitude horrek erreaktore gunean dagoen erreaktibitatearen inguruko informazioa ematen digu. Erreaktore guztiek, potentzia bakoitzerako, erreaktibitate operazionalaren balio minimo bat errespetatu behar dute. Balio hori ez bada errespetatzen arazo larriak gerta daitezke, hala nola erreaktorearen gainkritikotasuna lortzea.

Erreaktibitatean eragiten ez duten faktoreak kontuan hartzen ez baditugu (ondorengo atalean aztertuko dugun xenon bidezko pozoidura kasu), zenbat eta erreaktibitate operazionalaren tartea txikiagoa izan, erreaktorea orduan eta erreaktiboagoa denaren adierazle da. Erreaktibitate operazionalaren tarreak une batean erreaktore gunean dauden kontrol-barrak bertatik ateratzen baditugu gertatuko den erreaktibitate aldaketa adierazten digu. Orduan, erreaktore gunean kontrol-barra gutxi badaude, kontrol-barra gutxi horiek erreaktore gunetik ateratzean gertatzen den erreaktibitate aldaketa txikia izango da. Hori horrela, ORMa txikia izango da. Ondorioz, erreaktibitatean beste faktoreen batek eragiten ez badu, ORMa txikia izateak, erreaktore gunean kontrol-barra gutxi daudenaren seinale da, erreaktore gunea erreaktitate handia denaren seinale.

2.8.2 Erreaktibitatean eragiten duten faktoreak

Erreaktibitatea erreaktore gunea osatzen duten osagaien eta baldintzen arabera aldatu daiteke. Horren adibide dira atal honetan aztertuko ditugun hutsune-koefizientea eta Xenon bidezko pozoidura. Bi eragin horiek aztertuko ditugu, ikusiko dugun bezala, Chernobylgo istripuan, modu batera edo bestera eragin baizuten.

Hutsune-koefizientea

Erregai hozten duen hozgarrian lurrin burbuilak metatu daitezke. Lurrin burbuilek hozgarrian betetzen duten bolumen zati osoari hutsune-zati deitzen zaio eta ehunekoetan adierazten da [10]. Hozgarriak, normalean, neutroi xurgatzaile bezala edo neutroi moderatzaile bezala jarduten du, hozgarri motaren arabera. Horren ondorioz, hutsune-zatiaren aldaketak zuzenean eragiten du erreaktibitatean; izan ere, ur lurrinak neutroi gutxiago moderatzen ditu eta erreaktibitatea jaisten da.

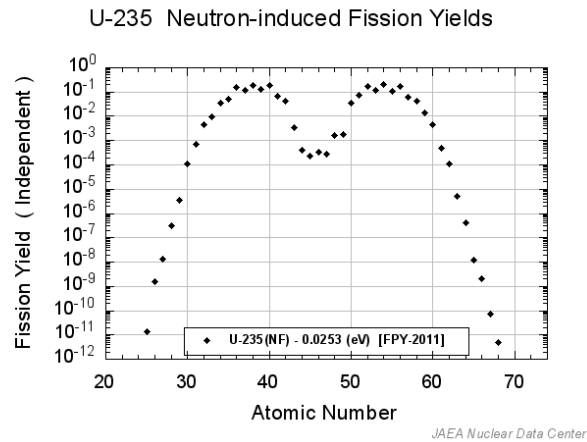
Beraz, hutsune-zatiaren aldaketak erreaktibitatean eragin zuzena du. Erreaktibitatearen aldaketaren eta hutsune-zatiaren aldaketaren arteko erlazioa da erreaktibitatearen hutsune-koefizientea, eta erreaktorearen diseinuaren arabera positiboa zein negatiboa izan daiteke [7]. Hutsune-koefizientea positiboa bada, lurrina sortzeak erreaktibitatearen eta potentziaren gorakada eragiten du. Aldiz, hutsune-koefizientea negatiboa bada, hozgarriaren hutsune-zatia handitzen denean erreaktibitate jaitsiera gertatzen da, eta erreaktibitatea igotzen denean hutsune-zatia txikitzen da. Hozgarritzat irakiten duen ura erabiltzen duten erreaktoreetan, jardun normaletan gertatzen den fenomeno da, eta kontrol-barren bitartez murrizten da eragina [10].

Aipatu bezala, ura hozgarri eta moderatzaile bezala erabiltzen den erreaktoreetan, ura lurruntzen denean hozgarriak neutroi gutxiago xurgatzen ditu; baina, neutroi gutxiago moderatzen ditu ere. Ondorioz, erreaktibitateak behera egiten du eta hutsune-koefizientea negatiboa da. Ura hozgarri bezala duten erreaktoreetan, baina beste moderatzaile bat dutenetan, grafito kasu, ura lurruntzean neutroi gutxiago xurgatuko ditu hozgarriak. Hala ere, mode-

ratzaileak neutroi gehiago izango ditu moderatzeko, eta hala, errektibitateak gora egingo du. Hori horrela, ura hozgarri bezala duten errektoretan, ura ez den beste moderatzailerik izanez gero, hutsune-koefizientea positiboa izan daiteke [11].

Erregaiaren Xe bidezko pozoidura

Atal honetan, erregaiaren xenon bidezko pozoidura aztertuko dugu. Baina, nola sortzen da xenon isotopoa erregaian? Erregaiak fisio-erreakzioa jasan ostean, fisio produktuak sortzen dira, eta horien desintegrazio erradioaktiboen ondorioz, nukleo berriak sortzen dira. Azpimarratu beharra dago fisio produktu jakin bat sortzeko probabilitatea ez dela berbera. ^{235}U isotopoaren kasuan honakoa da neutroi termikoen bidezko fisioaren ondorioz sortutako fisio produktuen probabilitate kurba [12]:



7. irudia. ^{235}U isotopoaren fisio produktuen probabilitate kurba (Iturria [12]).

Neutroi termikoen xurgapenaren bidezko ^{235}U -ren fisio induzituaren kasuan sortuko diren fisio-produktu probableenak bi taldetan bana daitezke; lehenengo taldea zenbaki atomikoa $Z \sim (36, 40)$ inguru duten nukleoek osatzen dute (Kr, Rb, Sr, Y, Zr) eta, bigarrena, zenbaki atomikoa $Z \sim (52, 56)$ dutenak (Te, I, Xe, Cs, Ba).

Erregai bezala ^{235}U isotopoz aberastutako uranioa erabiltzen duten errektoretan, ^{135}Xe isotopoa biltzen da erregaian. Xenon isotopoa neutroi xurgatzaile ona da, izan ere, xenonaren xurgapen sekzio-eragilea $\sigma_{\text{xe}} = 2.65 \cdot 10^6 \text{b}$ da. Ondorioz, xenona errektorean sortzen denean, honek neutroiak xurgatzen ditu, eta horrenbestez, fisioa eragiteko neutroi kopurua jaisten du. Hori horrela, fisio-erreakzio gutxiago sortzen dira errektorean eta, beraz, errektorearen potentzia jaitea eragiten du. Efektu horri erregaiaren xenon bidezko pozoidura deitzen zaio. Aipatu beharra dago xenon bidezko pozoidura gertatzen denean, errektibitate operazionalaren balioa jaitsiko dela. Izan ere, errektibitate operazionalaren tarteak une horretan errektore gunetik kontrol-barrak ateratzean sortuko den errektibitatea neurtzen du. Baina, kontrol-barrak ateratzen baditugu eta xenon bidezko pozoidura handia bada, gertatuko den errektibitate aldaketa ez da handia izango, izan ere, xenona izango dugu neutroi xurgatzaile bezala.

Uranioaren fisio termikoaren ondorioz xenon isotopoa sortzeko probabilitatea %0.3-koa da [8]. Hala eta guztiz ere, xenon isotopoa ^{135}I isotopoaren β^- desintegrazioaren ondorioz sortzen da. Iodo isotopoa ^{235}U fisio termiko bidez sortzeko probabilitatea, xenonaren probabilitatearekin konparatuz gero, nabarmen handia da %6.4-koa baita [8].

Azter dezagun errektore batean gerta daitekeen xenon bidezko pozoidura matematikoki. Horretarako, lehenik, iodo isotopoaren kontzentrazioa denboran zehar aztertu behar dugu, iodo isotopoa baita xenon isotopoaren ekoizle handiena. Iodo isotopoa ^{235}U -ren fisio termikoaren ondorioz sortuko da γ_I (%6.4) probabilitatearekin. Uranioaren fisioa gertatzeko probabilitatea uranioaren fisio sekzio-eragilearen, Σ_f , eta neutroi fluxuaren, ϕ , arabera da, $\Sigma_f\phi$. Beraz, denboran zehar uranio isotopoaren fisio termikoagatik sortuko den iodo kopurua $\Sigma_f\phi\gamma_I$ izango da. Berebat, kontuan izan behar dugu iodo isotopoak desintegrazio erreakzioak jasango dituela nukleo egonkorrago bat sortzeko asmotan. Orduan, λ_I , β^- desintegrazioen konstantea (isotopoak segundoko duen β^- desintegrazio bat jasateko probabilitatea) eta, I , iodo kontzentrazioa badira, denboran zehar $\lambda_I I$ β^- desintegrazio jasango ditu. ^{135}I isotopoak desintegrazioak jasateaz gain, neutroiak xurgatu ahal ditu nukleo berri bat sortzeko. Aitzitik, neutroi xurgapenaren sekzio-eragilea, xenonaren sekzio-eragilearekin konparatuz ($\sigma_{xe} = 2.65 \cdot 10^6 \text{b}$), txikia da $\sigma = 7.28 \text{b}$. Sekzio-eragile txikia izanik, neutroi fluxu handienetan ere, $\phi = 10^{15} \frac{\text{neutroi}}{\text{cm}^2\text{s}}$, neutroi xurgapenaren bidezko ^{136}I -ren sorrera arbuigarria da [8]. Horrenbestez, honakoa izango da iodo isotopoaren kontzentrazioaren, I , aldaketa errektorean denboran zehar [8]:

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \phi - \lambda_I I \quad (2.8.2)$$

Era berean, gertatzen den ^{135}Xe isotopoaren kontzentrazioaren, X , aldaketa azter daiteke. Kasu honetan, γ_{xe} fisio bidez xenona sortzeko probabilitatea, eta λ_{xe} xenonaren desintegrazio konstanteak izango dira. Horrez gain, kontuan hartu behar da xenon kontzentrazioa iodoaren desintegrazioaren ondorioz handituko dela. Bestalde, aipatu dugun bezala, xenona neutroi xurgatzaile ona da eta, beraz, σ_{xe} xenonaren xurgapen sekzio-eragilea bada, denboran zehar $\sigma_{xe}\phi X$ xurgapen gertatuko dira. Ondorioz, honakoa izango da xenon kontzentrazioaren aldaketa denboran zehar [8]:

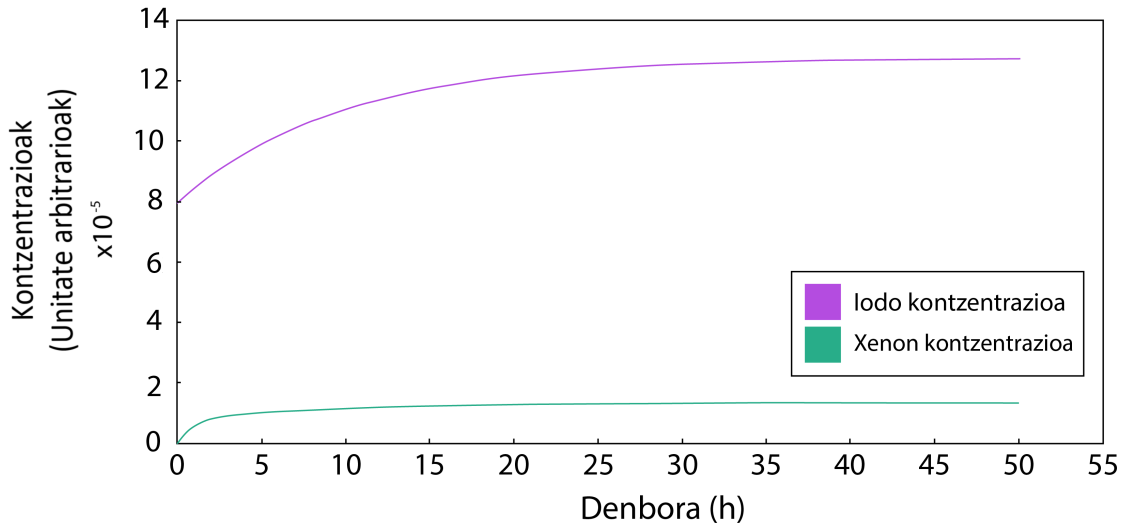
$$\frac{dX}{dt} = \gamma_{xe} \Sigma_f \phi + \lambda_I I - \lambda_{xe} X - \sigma_{xe} \phi X \quad (2.8.3)$$

Erreaktorea potentzia egonkorrean lanean jartzen bada xenonaren erdibizitza (9.2 ordu [8]) eta iodoaren erdibizitza (6.7 ordu [8]) baino askoz denbora luzeagoan, gutxi gora behera 50 ordutan, isotopoek oreka lortu eta I_0 eta X_0 kontzentrazioak bilduko dira erregaian. Oreka lortu dutenez, aurreko bi deribatuak nuluak izango dira. Ondorioz, (2.8.2) eta (2.8.3) ekuazioetatik, honakoak dira ^{135}I eta ^{135}Xe isotopoaren kontzentrazioak [8]:

$$I_0 = \frac{(\gamma_I \Sigma_f) \phi}{\lambda_I} \quad (2.8.4)$$

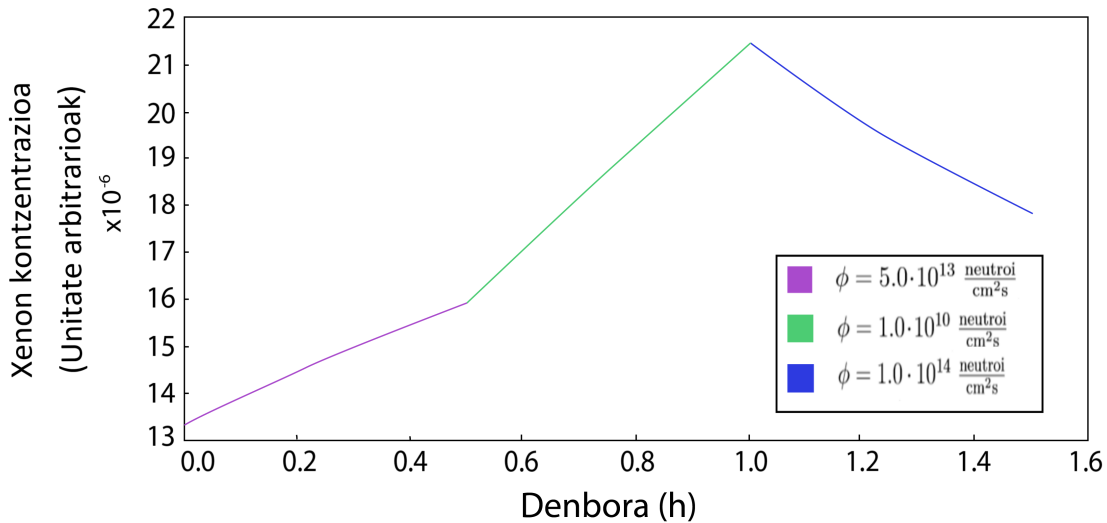
$$X_0 = \frac{(\gamma_{xe} \Sigma_f + \gamma_I \Sigma_f) \phi}{\lambda_{xe} + \sigma_{xe} \phi} \quad (2.8.5)$$

Xenon bidezko pozoidura hobeto ulertzeko asmotan, azter ditzagun zenbait adibide. Horretarako, (2.8.3) eta (2.8.2) ekuazioetatik abiatuta eta laugarren ordeneko Runge-Kutta metodoa erabilia, simulazio numerikoak egin ditugu. Lehenengo simulazioan, hastapen baldintza nuloak hartuta eta neutroi fluxua $\phi = 1.0 \cdot 10^{14} \frac{\text{neutroi}}{\text{cm}^2\text{s}}$ dela hartuta, 50 ordutan xenon eta iodo kontzentrazioak nola aldatzen diren irudikatu dugu. Honakoa da lehenengo simulazioaren emaitza:



8. irudia. Xenon eta iodo konzentrazioak 50 ordutan duten bilakaera adierazten duen irudia.

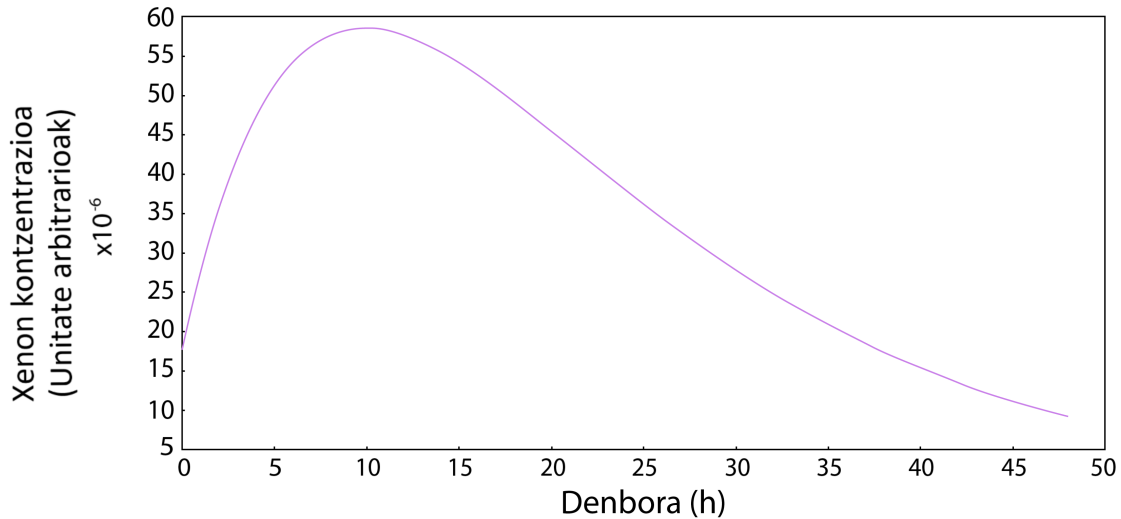
Ikus daitekeenez, potentzia egonkorrean, xenon eta iodo konzentrazioak 50. ordurako orreka lortzen dute. Baina, zer gertatzen da une batean neutroi fluxuaren balioa aldatzen bada? Neutroi fluxuaren aldaketak eragiten duen xenon konzentrazioaren aldaketa aztertzeko, bigarren simulazio bat egin dugu. Oraingo honetan, hastapen baldintza bezala, orekako konzentrazioak hartu ditugu. Ondoren, $t=0$ denboran, bat-batean fluxua $\phi = 5.0 \cdot 10^{13} \frac{\text{neutroi}}{\text{cm}^2\text{s}}$ -ra ordu erdi batez jaisten dela simulatu dugu. Gero, ordu erdi hori pasata, fluxua $\phi = 1.0 \cdot 10^{10} \frac{\text{neutroi}}{\text{cm}^2\text{s}}$ -ra jaisten dela simulatu dugu, eta hori beste ordu erdi batez gertatzen dela. Azkenik, neutroi fluxua berriro $\phi = 1.0 \cdot 10^{14} \frac{\text{neutroi}}{\text{cm}^2\text{s}}$ -ra egonkortzen dela simulatu dugu. Fluxu aldaketak ordu erdiko tartetetan aldatzen direla hartu dugu, izan ere, aztertuko dugun bezala, Chernobylgo istripuan, 1986ko apirilaren 26ko 00:05-tik 01:43-ra bitartean, potentzia gorabeherak orduerdiko tartetetan gertatu ziren, eta horrela, tarte horietan potentziarekin xenon konzentrazioa nola aldatzen den ulertzeko gai izango gara. Honakoa da lortutako emaitza:



9. irudia. Neutroi fluxua aldatzean xenon konzentrazioak jasaten dituen aldaketak adierazten dituen irudia.

9 irudian azter daitekeen bezala, neutroi fluxuaren balioa jaisten denean, xenon bidezko pozoidura handitu egiten da. Era berean, neutroi fluxua hasierako baliora egonkortzen den unean, xenon kontzentrazioa txikitu egiten da. Beraz, neutroi fluxuaren balioa txikitzen denean, xenon kontzentrazioa handitzen da, eta hortaz, xenon bidezko pozoidura handiagoa da. Baina, neutroi fluxuaren balioa handitzen denean, xenon kontzentrazioa txikitzen da, eta ondorioz, xenon bidezko pozoidura txikitu egiten da.

Azkenik, hirugarren simulazioan, hastapen baldintza bezala, bigarren simulazioan lortu-tako bukaerako kontzentrazioak hartu ditugu, eta bat-batean neutroi fluxua nulua deneko kasua aztertu dugu bi eguneko denboran. Honakoa da lortu dugun azken simulazioaren emaitza:



10. irudia. Neutroi fluxua itzalita dagoenean, xenon kontzentrazioak denboran zehar duen bilakaera adierazten duen irudia.

Azken simulazio honetan, azter daiteke fluxua nulua denean, xenon bidezko pozoiduraren maximoa gertatzen dela erreaktorea itzali eta 10 ordotara. Izan ere, neutroi fluxurik ez dagoenez, xenona iodo isotopoaren β^- desintegrazioaren ondorioz sortuko da soilik. Hori dela eta, kontuan izanik iodo isotopoaren erdi bizitza 6.7 ordukoa dela, maximoa 10 ordotara gertatuko da, baina, ondoren, erreaktore gunean dagoen iodo guztia egonkortzen doan heinean xenon kontzentrazioa gutxitu egingo da.

Atal honekin bukatzeko, xenon bidezko pozoiduraren eta erreaktibitatearen arteko erlazioa aztertuko dugu. Aipatu dugun bezala, erreaktorean xenona sortzen denean, xenonak neutroiak xurgatu eta fisio-erreakzio gutxiago gertatzen dira. Hau da, xenona sortzen denean, erreaktibitatea jaitsi egiten da. Hori horrela, zenbat eta handiagoa izan xenon bidezko pozoidura, are eta txikiagoa izango da erreaktibitatea.

3. Kapituluia

Chernobyl-go zentral nuklearra

Vladimir Ilich Lenin zentral nuklearra edo ezagunagoa den Chernobyl-go zentral nuklearra Ukrainan dago kokaturik, Kiev hiritik 145 km-ra. Distantzia horretara eraiki zen, hala, Kiev hiria elektrizitatez elikatzeke eta istripu nuklearretatik babesteko. Chernobyl-go zentrala Prypiat ibaia blokeatuz sortutako lakuaren ertzean eraikitako lau errektorek osatzen zuten. Lakuak errektoreak ur hozgarriz hornitzen zituen eta, gainera, behin errektorea guztiz itzailita dagoenean geratzen diren bero-hondarrak isurtzeko ingurune egokia zen. Errektoreak sobietar batasunean nagusi ziren RBMK errektoreak ziren.

Chernobyl-go istripua zentralaren laugarren unitatean gertatu zen. Laugarren unitatea bigarren belaunaldiko RBMK-1000 errektorea zen [13]. Errektoreak 3.200 MW-ko potentzia termikoa eta 1000 MWko potentzia elektrikoa ekoizten zuen [7].

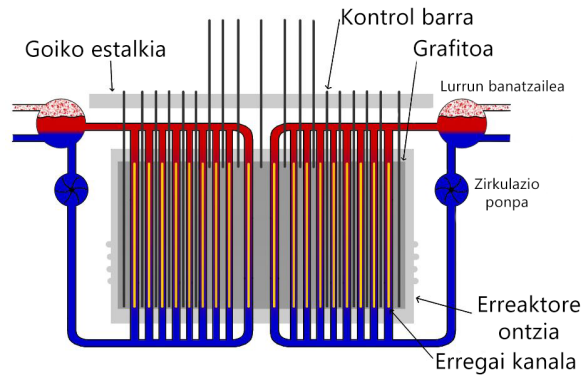
3.1 RBMK-1000 errektorea

”Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny”(potentzia handiko kanal motako errektorea) edo RBMK errektoreak Sobietar Batasunean diseinatutako errektore heterogeneoak dira. RBMK errektorea bomba nuklearrak sortzeko beharrezkoa zen plutonioa ekoizteko sobietarrek eraikitako errektore nuklearretan dago oinarrituta. Horregatik, mendebaldean eraikitako potentzia errektoreetatik bereizten zituzten ezaugarri ugari dituzte. Berezitasunik handiena da, munduko beste errektoreetan ez bezala, hozgarria irakiten duen ur arina (ur arrunta) dela eta moderatzailea grafitoa. RBMK errektoreak mendebaldeko errektoreetatik bereizten zituzten beste ezaugarrietako bat errektoreen estalki eza zen. Mendebaldeko errektoreek hormigoizko estalki handiak zituzten; baina, sobietarrek, zela estalkien kostuagatik, zela segurtasun kontzientzia urriagatik, estalkirik ez jartzea erabaki zuten [14].

3.2 RBMK-1000 errektorearen diseinua

Atal honetan, Chernobyl-go istripua baino lehen, RBMK-1000 errektoreen diseinua aztertuko dugu. Izan ere, istripua gertatu ostean, diseinu akatsak zirela-eta, RBMK errektoreen diseinua egokitu zen.

RBMK-1000 errektorea errektore guneak, erregai-kanalek, kontrol-barrek eta hozte-sistemak osatzen dute. Honako irudi honetan, ikus daitezke RBMK-1000 errektorearen atalak [6]:



11. irudia. RBMK erreaktorearen atalak adierazten dituen irudia (Iturria [6]).

Azter ditzagun RBMK-1000 erreaktorearen osagaiak atalik atal.

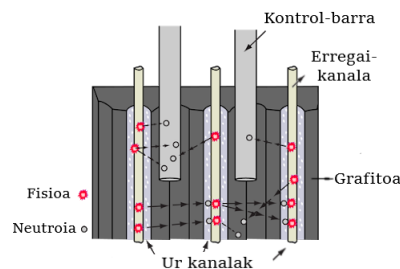
3.2.1 Erreaktore gunea

Erreaktore gunea 7 metro luze eta 11.8 m ko diametroa duen egitura zilindrikoa da, grafitozko blokez eraikita dagoena [7]. Arestian aipatu dugun bezala, PWR erreaktore guneak, 3 metro luzeko diametroa eta 4 metro luzeko garaiera ditu, eta BWR erreaktore guneak 4.5 metro luzeko diametroa eta 5 metro luzeko garaiera [3].

Grafitozko blokeen artean, zabalgunek zilindrikoak daude, non, barnean presio-hodiak dauden. Presio-hodiak erreaktore gunera, bai kontrol-barrak, bai erregai-kanalak sartze-ko erabiltzen diren egitura zilindrikodun hodiak dira. Presio-hodi batzuk kontrol-barrak erreaktore-gunera txertatzeko erabiltzen dira; besteek ordea, erregai-kanalak dituzte barnean. Erregai-kanalak erregaia eta hozgarria biltzen dituzte. Fisioaren ondorioz askatutako energia zinetikoa bero-energia bihurtzen da. Urak bero hori xurgatzen du eta irakiten hasten da. Hala, presio-hodietako beroa ezabatzen da. Beraz, RBMK erreaktore gunean dagoen beroa sortzen den lurrunaren arabera da [14].

Erreaktore gunearen goiko aldea 1200 tonako, 3 metro luzeko eta 17 metroko diametrodun altzairuzko xafla zilindriko pisutsu batek estaltzen du (top-plate 11 irudian). Erreaktore gunearen beheko aldea ere, luzera eta diametro berdina dituen altzairuzko xafla batek estaltzen du. Bi xaflak zabalgunek dituzte erreaktore gunera, presio-hodien bitartez, erregai-kanalak eta kontrol-barrak sartu ahal izateko [7, 13].

Erreaktore guneak guztira 1871 presio-hodi ditu; 1660 erregai-kanalak dira eta 211 presio-hodi kontrol eta segurtasun sistemarako erabiltzen dira [7]. Osagaiak 11 eta 12 irudietan ikus daitezke.



12. irudia. RBMK erreaktore gunearen osagaiak (Iturria [15]).

3.2.2 Moderatzailea

RBMK motako errektoretan grafitoa da moderatzailea. Fisioan askatzen den beroaren %5-a moderatzaileari transferitzen zaio. Hori horrela, moderatzaileak 700 °C-ko temperatura du. Temperatura hain da altua, non grafitoa oxigenoarekin nahastuz gero errektore gunekak sua hartu dezakeen. Grafitoak sua hartzea ekiditeko, helio (%80) eta nitrogeno (%20) gas geldoen arteko nahasketa mugiarazten da grafito-blokeen artean [11].

3.2.3 Erregia eta erregai-kanalak

Erregia %2 aberastutako uranio oxidoa [16] da. RBMK errektoretan ez bezala, mende-baldean eraikitako PWR errektoretan (ur presurizatuko errektorea), %3 – 5 aberasten da uranioa [3]. Bai erregia denbora laburragoan ekoizten zelako, bai ekoizteko merkeagoa zelako, sobietarrek uranio oxidoa maila baxuagoan aberasten zuten[14].

Errektore gunearen barnean, erregiaren 1660 kanal daude txertatuta. Kanal horiek 80 mm-ko diametroan zirkonio aleaziozko tutuek osatzen dituzte. Kanal bakoitzak erregai lagin bat du atxikita, non, lagin bakoitzean zirkonio aleaziozko estaldura duten 13.6mm-ko hodi moduko 18 erregai elementu dauden. Lagin bakoitzak 114.7 kg uranio ditu [16].

Bestalde, RBMK errektoreak hasiera batean plutonioa sortzeko diseinatu zirela kontuan izanik, errektore gunearen diseinuaren ondorioz, posiblea da erregiak birjartzea, nahiz eta errektorea martxan egon. Hala, erregia ahalik eta gehien aprobetxatzea ahalbidetzen da [14].

Chernobyl-go istripua gertatu ostean, presio hodiak erabiltzen zituzten errektoreen diseinua zalantzan jarri zen. Izan ere, presio hodiak erabilia, errektorean erregai-kanal kopuru handia apurtzeko arriskua dago [7].

3.2.4 Kontrol-barrak eta segurtasun-barrak

Arestian aipatu bezala, errektorearen kontrol eta segurtasun sistema osatzen duten kontrol-barrek eta segurtasun-barrek errektore nuklearra kontrolatzea eta geldiaraztea ahalbidetzen dute. Chernobyl-go laugarren unitateko errektoreak 211 kontrol eta segurtasun barra ditu. Barrak ur zirkuitu independente batek hoztutako barra mugikorrek dira [16].

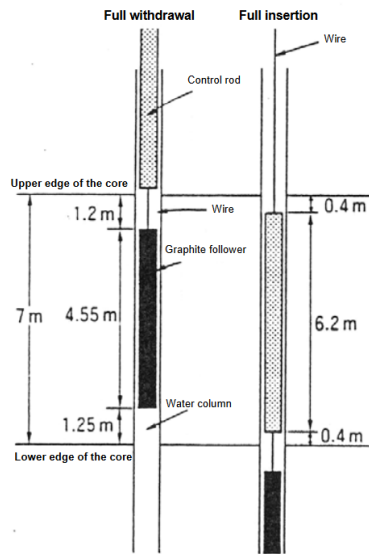
Baldintza normaletan edota oinarrizko diseinu akatsak dauden egoeretan, eskuz kontrolatutako 139 kontrol-barra [13] eta automatikoki kontrolatutako 24 kontrol-barra erabiltzen dira, errektore guneko errektibitatea igo edo jaitsiaraziz [7]. Eskuz kontrolatutako kontrol-barrek errektore guneko neutroien banaketa erradial eta azimutala kontrolatzen dute. Bestalde, kontrol automatikoko barrak errektoreak presio eta temperatura ezohikoak baditu, hozgarriaren emaria ez bada egokia edota oinarrizko diseinu akatsak gertatzen badira, automatikoki sartzen dira errektore gunean errektorea geldiarazteko xedearekin [13]. Horrez gain, errektore nuklearrarekin guztiz bukatzea beharrezkoa denean, larrialdi babes sistema osatzen duten 24 kontrol-barra erabiltzen dira [7, 13]. Aipatutako kontrol-barra horiek guztiak goiko aldetik sartzen dira errektore gunera.

Kontrol eta segurtasun sistema kontrol-barra laburtuek ere osatzen dute. Guztira 24 kontrol-barra laburtu daude eta, izenak dioen bezala, beste kontrol-barrak baino laburragoak dira. Haien eginkizuna neutroi fluxu axiala kontrolatu eta energia banaketa berdina goa lortzea da. Kontrol-barra laburtuak errektore gunera behe aldetik sartzen dira, beste kontrol-barra guztiak ez bezala [16].

Kontrol-barrak presio hodian barnean sartzen dira errektore gunera, eta presio hodi horiek urez horniturik daude. Kontrol-barra bakoitzak boro karbuoz osaturiko eta 6.2 metro luzeko xurgatzailea dute. Xurgatzaileekin batera 4.5 metro luzeko grafitozko “desplazatzaile” bat dute behe aldean atxikita. Beraz, urak, grafito desplazatzaileak eta xurgatzaileak osatzen dituzte kontrol-barrak dauden presio hodiak. Hala ere, kontrol-barra guztiek ez dute diseinu bera, kontrol automatikorako erabiltzen diren barrek ez baidaukate grafitozko desplazatzailearik atxikita [7].

Desplazatzailea atxikita duten kontrol-barretan, desplazatzailea eta xurgatzailea 1.25 metro luzeko espazio batek banatzen du, non, espazio hori urez beteta dagoen. Kontrol-barrak errektore gunetik guztiz ateratzen direnean, desplazatzailea zentratu geratzen da barnealdean eta mutur banatako 1.25 metro luzeko espazioa urez betetzen da [7]. Horrela, grafitoak urak baino neutroi gutxiago xurgatzen dituenaz, errektoretik kontrol-barrak ateratzen direnean, errektibitatea handiagotzea ahalbidetzen da.

Kontrol-barrak errektorerera guztiz sartuta daudenean, ordea, xurgatzailea errektore gunean zentratuta geratzen da, eta desplazatzailea errektore gunetik kanpo ateratzen da. 13 irudian, kontrol-barra errektore gunetik guztiz aterata dagoen unean eta kontrol-barra errektore gunean guztiz sartuta dagoen unean desplazatzailearen eta xurgatzailearen posizioak ikus daitezke [17].



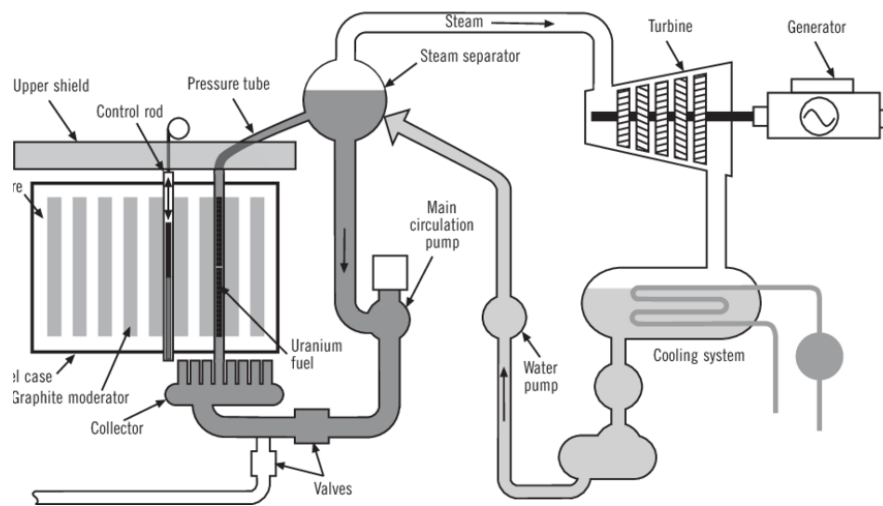
13. irudia. Xurgatzailearen eta desplazatzailearen posizioak, kontrol-barrak errektore gunean guztiz sartuta (eskuman) eta guztiz aterata (ezkerrean) daudenean (Iturria [17]).

3.2.5 Hozgarria eta hozte-sistema

RBMK-1000 errektorearen hozgarria ur arrunta da. Hozgarria errektorean zehar mugiarazten da hozte-sistemaren bidez.

Hozte-sistema (ikus 14 irudia) errektore gunearen erdia hozten duten bi zirkuitu berdinek osatzen dute. Zirkuitu bakoitzak bi lurrin banatzaile eta lau zirkulazio-ponpa nagusi ditu, eta zirkulazio-ponpetako hiru erabiltzen dira baldintza normalean. Laugarren zirkulazio-ponpa hiru ponpetako bat apurtuz gero erabiltzen da. Zirkulazio-ponpa nagusi baten bidez, hozgarria errektore gunearen behe aldera mugiarazten da eta, bertatik, erregai-kanalekara.

Erregai-kanalaren hozgarriaren presioa jaisten da eta tenperatura igotzen da, izan ere, hozgarriak fisio-erreakzioan askatutako beroa xurgatzen du. Tenperatura igoerak eta presio jaitsierak ura irakinarazten du. Sortzen den lurrin eta ur nahastea lurrin-banatzailerara doa. Lurrin-banatzaileran, lurrin saturatua (likido batek irakitean isurtzen den lurrina) eta ur likidoa banatzen dira, 7MPa-ko presio pean. Ondoren, banatutako lurrina bi turbinetara bidaltzen da, bi zirkuituak bi turbosorgailu-unitate ezberdinetara baitaude konektaturik. Turbinak igaro ostean, kondentsadoreetan, lurrina kondentsatu egiten da. Lortutako ur likido horri "ur-elikatua" deitzen zaio. Hozte-sistemak ur-elikatua ponpatzeko elektrizitatez elikatutako beste hainbat zirkulazio-ponpa ditu, ur-elikatutako ponpak deritzenak. Beraz, ur-elikatua elektrizitate bidez elikatutako ponpen bidez, lurrin-banatzailerara mugiarazten da berriro eta, horrela, banatutako ura eta ur-elikatua nahastu egiten dira. Nahasketaren ondorioz lortutako uraren tenperatura 270°C-koa da. Ur hori azken zirkulazio-ponpa nagusi baten bidez erreaktore-gunearen behe aldera bidaltzen da. Hala, zikloa berriro hasten da [7, 16]. Honako irudi honetan, hozte-sistemaren zirkuitu bat azaltzen duen irudi eskematikoa ikus daiteke[18]:



14. irudia. Hozte-sistemaren irudi eskematikoa (Iturria [18]).

Erreaktore guneko uraren sarrera-tenperatura 270°C-koa da [7] eta presioa 8.2MPa-koa[13]. Erreaktore guneko uraren irteera-tenperatura aldiz, 280°C-koa da eta presioa 7MPa-koa [16].

Baldintza normaletan, zirkulazio-ponpa bakoitzaren emaria $8000 \frac{m^3}{h}$ -koa da [7]. Potentzia egonkorrean ponpen zeharreko emaria igotzen bada, edo erreaktorearen potentzia jaisten bada eta ponpen emaria berdin mantentzen bada, lurrin-banatzaileran lortutako ur nahastuaren masa alda daiteke eta, ondorioz, ur nahastuaren tenperatura igo [7]. Horrek kabitazioa sor dezake ponpetan [7], hau da, hozgarria lurrin presioa baino presio txikiagora jaitsi eta likidoa lurrundu daiteke. Kabitazioak ponpetan kalteak eragiten ditu, hala nola ponpen materialen apurketak.

3.2.6 Erreaktibitate operazionalaren tartea (ORM)

RBMK-1000 erreaktoretan egonkortasuna bermatzeko erreaktibitate operazionalaren tartea faktore garrantzitsua da. Erreaktibitate operazionalaren tartea SKALA izeneko ordenagailu batek kalkulatu zuen eta 10-15 minutu behar zituen neurketa guztiak egin eta ORMa kalkulatzeko [7].

RBMK-ren segurtasuna bermatzeko, erreaktorearen potentzia potentzia nominalaren $\%$ (80-100) zenean, ORMa 50 kontrol-barrakoa izan behar zen gutxienez. Potentzia nominalaren $\%$ (50-80) zenean, ordea, 45 kontrol-barrakoa, eta potentzia nominalaren $\%$ 50 baino gutxiagoa zenean 30 kontrol-barrakoa. Hala ere, ingeniari nagusiak baimena ematen bazuen, bazen 30 kontrol-barra baino gutxiagoko ORM-arekin lan egitea, beti ere, 15 kontrol-barra baino handiagoko ORM-a bazen. Izan ere, ORM-a 15 kontrol-barrakoa zela neurtzen bazen, erreaktorea amatatu behar zen [19].

ORMaren balio minimoa ez bada errespetatzen larrialdirako sistemak ez du erreaktorea amatatzea lortuko erreaktore gunean kalterik sortu gabe. Adibidez, ORMa 30 kontrol-barrakoa denean, larrialdi sistema martxan jartzean erreaktibitate negatibo handia sortzen da. Horrenbestez, ORMa 30 kontrol-barrakoa denean, erreaktore gunea larrialdi sistemaren bidez amatatzea segurua da. Baina, ORMa 7 kontrol-barrakoa denean, ordea, kontrol-barren diseinuagatik, larrialdi sistema abian jartzen denean, aztertuko dugun bezala, erreaktibitate positiboa sortzen da, eta erreaktorea amatatu beharrean, azeleratu egiten da [19].

3.3 RBMK erreaktoreen diseinu akatsak

Istripua eta gero agerian geratu zen RBMK erreaktoreek diseinu akatsak zituztela. Jarraian, nolabait istripua gertatzean eragina izan zuten RBMK-ren bi diseinu akats garrantzitsuenak aztertuko ditugu.

3.3.1 RBMK erreaktorearen hutsune-koefizientea

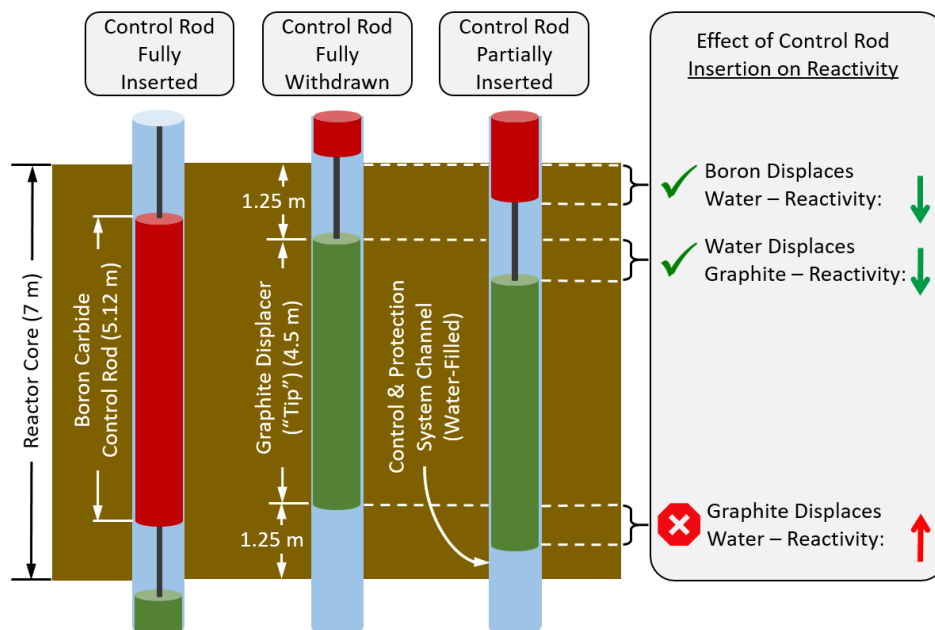
RBMK erreaktoreek duten diseinuaren ondorioz, hutsune-koefizientea positiboa zein negatiboa izan daiteke. Erreaktorea potentzia-egonkorrean lanean dagoenean, hutsune-koefizientea positiboa da [7].

Honakoa da hutsune-koefiziente positiboa izatearen arrazoia. Hozgarriak fisio-erreakzioan sortzen diren neutroi kopuru txiki bat xurgatzen du. Ura lurruna baino hozgarri hobea eta neutroi xurgatzaile hobea da. Hala izanda, zenbat eta lurrun burbuila gehiago egon hozgarrian, orduan eta neutroi gutxiago xurgatuko ditu hozgarriak. Beraz, moderatzaileak neutroi gehiago balaztatuko ditu energia termikoetara; orduan, erreaktibitatea igo egingo da [11].

3.3.2 Kontrol eta segurtasun barrak

Kontrol eta segurtasun barrek bi diseinu akats larri zituzten. Batetik, aipatu bezala, kontrol-barrek grafitozko desplazatzailea zuten, kontrol-barra erreaktore gunetik guztiz aterata zegoen unean, erreaktore gunearen erdigunean kokatzen zena. Une horretan, desplazatzailearen beheko alde urak betetzen zuen. Baina, kontrol-barra erreaktore gunean sartzen zen heinean, ura zegoen tokia desplazatzaileak betetzen zuen. Ondorioz, grafitoak urak baino neutroi gutxiago xurgatzen dituzenez, eta grafito moderatzaile ona denez, erreaktore gunearen beheko aldean, erreaktore gunean kontrol-barrak sartzean, erreaktibitatearen gorakada gertatzen zen. 15 irudian, ikus daiteke efektu hori [20]:

CHERNOBYL CONTROL ROD ILLUSTRATION



15. irudia. Kontrol-barren bukaerako efektua adierazten duen irudia (Iturria [20]).

Erreaktibitatearen gorakada hori ez zen larria kontrol-barra batek eragiten bazuen. Aitzitik, kontrol-barra asko batera erreaktore gunean sartzean, larrialdiko sistema osatzen duten kontrol-barrak kasu, efektua nabaria zen. Efektu horri SCRAM efektu positiboa deitzen zaio (SCRAM erreaktorearen itzaltzea da), eta erreaktibitate operazionalaren tarte minimoa errespetatuz egiten zaio aurre [7, 19].

Bestetik, guztiz ateratako larrialdi babeserako barrek 18 segundo behar zituzten erreaktore gunera guztiz sartzeko. Izan ere, kontrol-barraren eta presio-hodiaren arteko tarte hain zen estua, non, larrialdi babeserako barrak balaztatu egiten ziren. Gainera, kontrol-barretan zeharreko urak ere barrak balaztatzea eragiten zuen. Beraz, potentziaren gorakada ez kontrolatua gertatuz gero, larrialdi babeserako barrak ez ziren gai erreakzioa guztiz gelditzeko, izan ere, potentziaren gorakada gertatzean erreakzioen periodoa segundo gutxi batzutatkoa da [7].

4. Kapituluia

Istripua

Chernobylgo istripua 1986ko apirilaren 26an gertatu zen, eta zentral nuklearren historiako istripurik larriena da. Harrigarria bada ere, Chernobyl-go istripua 1986ko apirilaren 25an segurtasun proba bat egin nahi izanagatik gertatu zen.

Erreaktorean erreakzio nuklearra bukatzeko kontrol-barrak sartzen direnean erreakzioa ez da segituan bukatzen, erregai-kanaletako neutroi termiko kopuru txiki batek oraindik ere fisioak sorrarazten baitituzte. Fisio-erreakzio horien ondorioz askatzen den beroari bero-hondar deitzen zaio, eta erreaktorearen funtzionamendu egokia bermatzeko, une horretan, erreaktore gunean hozgarria egotea ahalbidetu behar da. Erreaktorearen lan-baldintza normalatan ekoizten den potentzia zati bat zentralaren osagaien funtzionamendu egokia bermatzen duen turbosorgailura bidaltzen da; baina, ez da horrela gertatzen erreaktorea amatatzen denean. Erreaktorea amatatuta edo potentzia galera gertatzen denean, energia elektrikoa kanpo energia-sorgailuetatik hartzen da. Chernobylgo kanpo-sorgailuek 60 segundo behar zituzten ponpak berriro martxan jartzeko; denbora luzea istripu baten aurrean [14]. Azal dutako egoeran segurtasuna bermatzeko xedearekin, kanpoko-sorgailuek ponpak elikatzen ez zituzten denboran, aztertu nahi zuten zortzigarren turbosorgailuan oraindik ekoizten zen energia mekanikoa aprobetxatu zitekeen ponpak elikatzeko. Izan ere, turbosorgailuak, nahiz eta bertara lurrunik ez heldu, energia mekanikoa sortzen zuen balaztatzen zihoan heinean. Proba hasi baino lehen, erreaktorearen potentzia 700-1000 MW termikora jaitsi behar da, eta zortzigarren turbosorgailua sistematik itzali behar da balaztatzean sortzen dituen bibrazioak neurtzeko. Behin potentzia egonkortuta eta bibrazioak neurtuta, probarekin hasteko, zortzigarren turbosorgailuak dituen larrialdiko balbulak deskonektatu egin behar dira turbosorgailua itzali dadin [19].

4.1 Istripuaren kronologia

Atal honetan, 1986ko apirilaren 25tik hasita apirilaren 26ko gauean leherketak gertatu arte, eman ziren pauso guztiak kronologikoki aztertuko ditugu. Horretarako, Sobietar segurtasun atomikorako komisioak ([19]), sobietar aditu taldeak ([16]) eta IAEA-k ([7]) onartutako bertsioari helduko diogu. Izan ere, bertsio hori da gehien zabaldu dena.

1986ko apirilaren 25a:

- **01:06:** Froga prestatzeko erreaktorearen potentzia jaitziera hasten da. ORM-a 31 kontrol-barrakoa da.

- **03:00:** Potentzia 2000MW(th)-koa da eta ORM-a 26 kontrol-barra baino gutxiago-koa da, xenon bidezko pozoidura hasi denaren seinale. Hala ere, ingeniari nagusiak probarekin aurrera jarraitzeko baimena ematen du.
- **03:45:** Grafito blokeak babesten dituen nitrogeno-helio gas nahastea nitrogenoaren-gatik ordezkutzen da.
- **03:47:** Ordu honetan, errektorearen potentzia 1600 MW termikokoa da.
- **04:13-12:36:** 1500MW termikotan, zazpi eta zortzigarren turbosorgailuen neurketa kontrolatua egiten da.
- **07:10:** ORM-a 13.2 kontrol-barrakoa dela neurtzen da, horrek xenon bidezko pozoidura handia dela adierazten du. 1500 MW (th)-tan, ORM-a hain txikia izanik, errektorea guztiz amatatu behar da. Baina, langileek aurrera jarraitzea erabakitzen dute.
- **13:05:** Zazpigarren turbosorgailua itzaltzen da. Beraz, turbosorgailuak elikatzen dituen lau zirkulazio ponpa nagusi eta elektrikoki elikatutako ur-elikaturako ponpa bi zortzigarren turbosorgailura konektatzen dira.
- **14:00:** Errektoreak duen larrialdirako hozte-sistema deskonektatzen da, larrialdiko hozte-sistemak hozte-sistema nagusira ura isurtzea ekiditeko. Une honetan, Kiev-eko sare elektrikoak proba atzeratzea erabakitzen du. Beraz, errektorea 1500 MW termikotan larrialdirako hozte-sistema amatatuta duelarik uzten da lanean. Gainera, hurrengo txandan dauden langileek burutu beharko dute proba nahiz eta horretarako prestaturik ez egon.
- **15:20:** ORM-a 16.8 kontrol-barrakoa da. ORM-a handitzeak xenon bidezko pozoidura gutxitzen hasi dela adierazten du, izan ere, 1500MW-ko potentzian, hamaika orduz egon da lanean eta xenonaren erdibizitza 9.2 ordukoa izanik, xenona desintegratzen hasi da.
- **23:10:** Laugarren unitatearen potentzia 1500MW (th)-tik jaisten hasten da berriro. Une horretan, ORM-a 26 kontrol-barrakoa da. Une horretarako, ORMak adierazten duen bezala, xenon bidezko pozoidura nabarmen txikitu da.

1986ko apirilaren 26a:

- **00:05:** Errektorearen potentzia termikoa 720MW (th)-koa da, proba burutzeko potentzia minimoa alegia. Potentzia jaistean, xenon bidezko pozoidura handitzen da (Ikus. Xenon bidezko pozoidura atala, 9 grafikoa eta azalpena).
- **00:28:** Errektorearen potentzia 500 MW-ra jaisten da. RBMK errektore gunea oso handiak dira, beraz potentzia era lokalean kontrola daiteke errektore gunea atalka kontrolatuta, edo era globalean kontrola daiteke. Une honetan, potentzia lokalki kontrolatzen daude, baina, lokalki beharrean globalki kontrolatzen hasten dira. Pauso hori ematen denean, potentzia 30 MW-ra jaisten da. Ez dago argi xenon bidezko pozoiduraren edo kontrol automatikoko akatsen baten ondorioz jaisten den hainbeste potentzia. 30MW termikotan, xenon bidezko pozoidura era bortitzean handitzen da bat-bateko potentzia jaitsieraren ondorioz (Ikus. Xenon bidezko pozoidura atala, 9 grafikoa eta azalpena). Xenon bidezko pozoidurak sortzen duen erreaktibitate negatiboari

aurre egin eta potentzia igoarazteko, kontrol-barrak ia gehienak ateratzen dira erreaktore gunetik eta, ondorioz, dela kontrol-barrak ateratzen direlako, dela xenon bidezko pozoiduragatik, ORM-a txikitzen da.

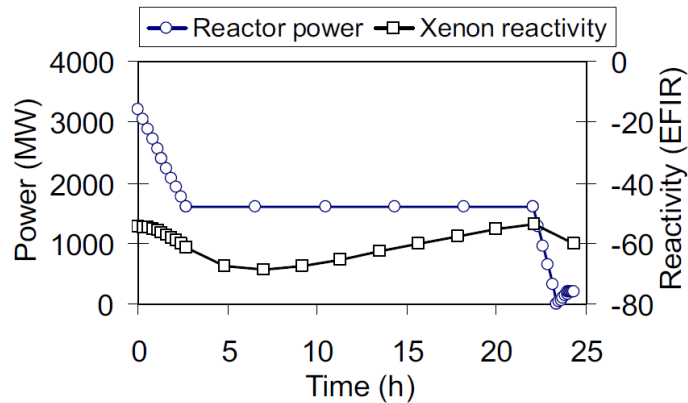
- **00:34:03:** Bat-bateko potentzia jaitsieraren kausaz, lurrun-banatzaillean, lurrun presioa eta ur maila jaisten dira. Lurrun-banatzailleko ur maila, -600 mm den larrialdiko ur-maila, baino maila baxuagora jaisten da. Hala ere, ez da larrialdiko sistema aktibatzen eta erreaktorea itzaltzen.
- **00:36:24:** Lurrun banatzaillean, $539 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$ -ko presio minimoa neurtzen bada, automatikoki turbosorgailua itzaltzen da. Une honetan, lurrun-banatzaillean lurrun presioaren jaitsieraren ondorioz turbosorgailua amatatzea ekiditeko, $490 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$ -ra aldatzen da presio minimoa.
- **00:41-01:16:** Probaren prozedura jarraituz, zortzigarren turbosorgailua sistematik deskonektatzen da balaztatzean bere bibrazioak neurtzeko asmoz.
- **00:43:** Martxan dauden turbosorgailuak amatatzen dituen larrialdi sistema blokeatzen da.
- **01:03:** Erreaktorea 200 MW termikoko potentziara igotzen da eta egonkortu egiten da. Une horretan, larrialdirako dauden zirkulazio ponpetako bat pizten da. Ondorioz, erreaktorean zeharreko hozgarriaren emaria handitzen da.
- **01:06:** Lurrun banatzailleko ur-maila igoarazteko, ur-elikatuaren emaria $1200-1400 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ -ra igoarazten da ur-elikatuko ponpen bitartez.
- **01:07:** Larrialdirako dagoen zirkuitu nagusiko bigarren ponpa pizten da. Beraz, ponpa guztiak martxan egonik, erreaktorean zeharreko hozgarriaren emaria normalean ($8000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$) baino handiagoa da. Honek neutroi xurgatzaile nagusia ura izatea eragiten du, hutsune-zatia txikiagoa baita (ur likidoa lurruna baino neutroi xurgatzaile hobea da) eta potentzia egonkor mantendu ahal izateko kontrol-barrak gehiago atera behar direlako. Gainera, hozgarrian tenperatura igotzen bada edo presioa jaisten bada lurrun kopurua handituko da, eta ondorioz, tenperatura igotzean edo presioa jaistean, erreaktibitatea handitu egingo da.
- **01:09:** Ur-elikatuaren emaria $90 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ -ra jaisten da erreaktorearen eskuinaldean. Ezker aldearen ur-elikatuaren emaria aldiz, $180 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ -ra igotzen da.
- **01:22:30:** ORMa 8 kontrol-barrakoa da. Une honetan, erreaktorean zeharreko potentzia banaketa oso ez-uniformea eta ez-egonkorra da.
- **01:23:04:** Probari hasiera ematen zaio. Horretarako, larrialdietan zortzigarren turbosorgailua geldiarazteko balbulak ixten dira.
- **01:23:40:** Nahiz eta ORM-a ez bete, larrialdiko sistemaren botoia, AZ-5 botoia, sakatzen da (ez dago argi AZ-5 botoia sakatzearen arrazoia). Larrialdiko kontrol-barrak eta eskuz kontrolatutako kontrol-barrak erreaktore gunean sartzen hasten dira eta SCRAM efektu positiboa gertatzen da, erreaktore guneko behe aldeko erreaktibitatearen gorakada.

- **01:23:43:** SCRAM efektu positiboagatik, bat-bateko potentzia igoera gertatzen da, eta potentzia 530MW termikora igotzen da. Hain da handia erreaktorearen behe aldeko potentzia igoera, non erreaktorearen potentzia globalaren bat-bateko gorakada eragiten duen. Hurrengo segundoetan, erreaktoreak gero eta potentzia handiagoa izango du.
- **01:23:46:** Lanean dauden lau zirkulazio ponpak amatatzen dira.
- **01:23:47:** Proban parte hartzen ez duten zirkulazio-ponpen emaria % 40 jaisten da. Bestalde, lurrin-banatzailleetan lurrin presioa eta ur-maila bortizki handitzen dira.
- **01:23:48:** Proban parte hartzen ez duten zirkulazio-ponpen emaria lehengo baliora eramaten da, eta proban parte hartzen duten zirkulazio-ponpen emaria lehengo balioen %85-ra egonkortzen da. Lurrin-banatzailleetan aldiz, presioak eta ur mailak handitzen dirau.
- **01:23:49:** Erreaktorean erregai-kanal batzuen apurketa gertatzen da, eta presioa handitzen da erreaktore gunean.
- **01:24:** Zarata batzuk entzuten dira. Segurtasun eta larrialdirako kontrol-barrak erreaktoreko beheko aldera heldu baino lehen gelditzen dira. Segundo batzuk pasata, erreaktorea guztiz suntsituta geratzen da.

4.2 Istripuaren analisisia

Hasiera batean, 1986. urtean, istripuaren errua langileei egotzi zitzaien, IAEAk INSAG-1 istripuari buruzko lehen bertsio nagusian argitaratu zuenez. Hala eta guztiz ere, 1990. urtean, sobietar segurtasun atomikorako komisioak [19] eta sobietar aditu taldeak [16] istripua erreaktorearen diseinu akatsen eta lan segurua bermatzen duten dokumentuen akatsen ondorio izan zela frogatu zuen. Ondorioz, IAEAk Chernobylgo istripuari buruzko INSAG-7 bertsio berria argitaratu zuen, non bertsio honetan erreaktorearen diseinu akatsak hartu zituzten kontuan [7]. Atal honetan, INSAG-7-k, sobietar segurtasun atomikorako komisioak eta sobietar aditu taldeak [7, 19, 16] emandako bertsioa aztertuko dugu, hori baita gaur egun dagoen bertsio ofiziala.

Lehenik eta behin, azter ditzagun xenon bidezko pozoiduragatik sortutako erreaktibitatea eta potentziaren bilakaera potentzia jaisten hasten den unetik (hasieratik), AZ-5 SCRAM botoia sakatzen den unera arte. Horretarako, azter dezagun honako grafikoa [9]:



16. irudia. Istripuan zehar, xenon bidezko pozoidurak sortzen duen erreaktibitatearen eta potentziaren bilakaera adierazten dituen grafikoa (Iturria [16]).

16 grafikoa ikus daiteke, hasieran potentzia txikitzen hasten denean, xenon bidezko erreaktibitatea txikitu egiten dela, eta potentzia 1500 MW termikoetan dagoela, hasieratik zazpi ordu pasata, erreaktibitatearen minimoa gertatzen dela. Ondoren, erreaktibitatea handitu egiten da, baina potentzia berriz jaistean, erreaktibitatea txikitu egiten da berriro. Xenon bidezko pozoidura atalean aipatu dugun bezala, zenbat eta xenon gehiago bildu erreaktore gunean, orduan eta baxuagoa izango da erreaktibitatea. Hori horrela, adierazi dezakegu potentzia jaisten hasten denean, xenon bidezko pozoidura handitu egiten dela, eta potentzia 1500 MW termikoetan dagoela, hasieratik zazpi ordu pasata, xenon bidezko pozoiduraren maximoa gertatzen dela.

Hurrengo potentziaren jaitsiera bortitza gertatzen denean, ordea, xenon bidezko pozoidura handitu egiten da berriz ere. Xenon bidezko pozoidurari aurre egiteko, kontrol-barra gehienak erreaktore gunetik guztiz ateratzen dira. Hasiera batean, interpreta dezakegu istripuaren eragile zuzena potentziaren bat bateko beherakada gertatzen denean, xenon bidezko pozoidura igotzea izan daitekeela, pozoidurari aurre egiteko ia kontrol-barra guztiak erreaktore gunetik guztiz kanporatzen dira-eta. Aitzitik, kontrol-barra gehienak erreaktore gunetik guztiz ateratzea ezin dugu esan istripuaren eragile zuzena denik; hala eta guztiz ere, istripuaren larritasunaren erantzule zuzena da. Izan ere, ORMa ez da betetzen eta, ondorioz, larrialdirako sistema ez da arazo baten aurrean erreakzio nuklearra bukatzeko gai izango erreaktore gunea kaltetu gabe. Bestalde, xenon bidezko pozoidurak eta kontrol-barra ia gehienak guztiz kanporatuta egoteak neutroi fluxua erreaktorearen goiko aldean maximoa duen bi tontorduna izatea eragiten du (ikus. 17 irudia, 0 s-tan) [16, 19]. Horren arrazoia xenon bidezko pozoiduraren eta desplazatzailearen eragina dugu. Xenon ia gehiena erregai-kanalen erdialdean biltzen da, kontrol-barren desplazatzailea erdialdean kokatuta dagoenez neutroi gehiago moderatzen dira bertan, eta ondorioz, fisio-erreakzio gehiago gertatzen dira eta xenon gehiago biltzen da. Erdialdean, xenon gehiago dagoenez, neutroi gehiago xurgatuko dira, eta neutroi fluxua txikiagoa izango da.

Horrenbestez, xenon bidezko pozoidura ez da istripuaren eragile zuzena. Baina, potentziaren beherakada gertatzen denean, xenon bidezko pozoidurak neutroi fluxua erreaktore gunearen goiko aldean maximoa duen tontor bikoia izatea eragiten du (ikus. 17 irudia, 0s-tan).

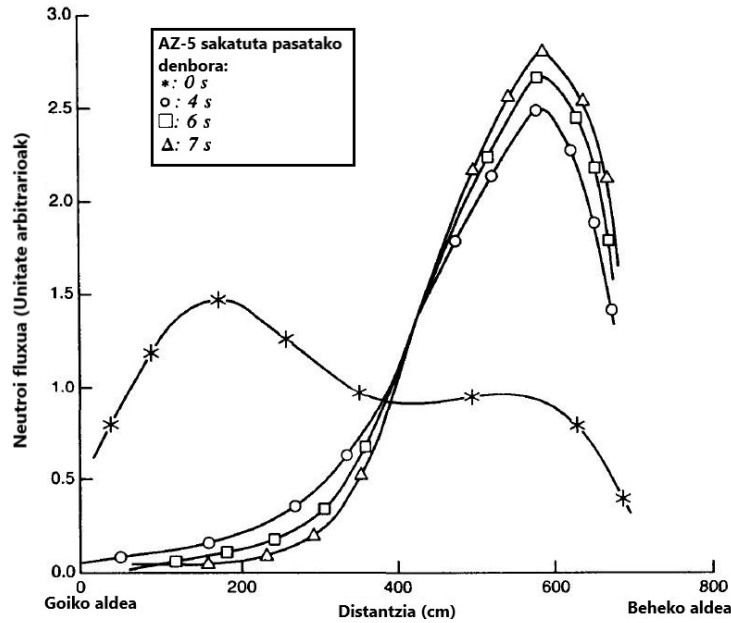
Azter dezagun orain zer gertatzen den, potentziaren beherakada bortitza gertatu eta ondorengo uneetan. Potentzia 30 MW termikoetara jausten denean, potentzia igotzen saiatzen

dira. Baina, xenon bidezko pozoidura dela-eta, ezin dute potentzia 700 MW termikotik (proba egiteko potentzia minimoa) gora ezarri. Potentziaren igoera 1:03h-tan egonkortzen da, 200 MW termikoetan. Nahiz eta proba egiteko ezarritako potentzia baino txikiagoa izan, aurrera egitea erabakitzen dute. Une horretan, proba bukatutakoan erreaktore gunea era egokian hoztea ahalbidetzeko, 1:03h eta 1:07h denbora tartean larrialdiko bi zirkulazio ponpak jartzen dira martxan. Beraz, zortzi zirkulazio ponpa nagusiak daude martxan. Hori horrela, hozgarriaren emaria guztira onartutako balioa baino balio handiagoa igotzen da, $56\ 000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ (baldintza egonkorretan, $8000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ da). Hozgarriaren emaria handitzen denez, hozgarriaren tenperatura gutxitzen da, eta hozgarriaren tenperatura gutxitzeak fisio-erreakzioen ondorioz askatzen den energia hozgarriaren tenperatura igoarazteko erabiltzea eragiten du. Momentu horretan, hozgarriaren tenperatura igotzen bada, potentzia igoerak edo hozgarriaren presio jaitsierak hozgarria lurruntzea eragingo luke. Bestalde, hozgarriaren emaria igotzeak hutsune-zatiaren bolumena txikitzea eragiten du, horrenbestez, ura neutroi gehiago xurgatzeko gai da eta horri aurre egiteko kontrol-barra gehiago atera behar dira erreaktore gunetik potentzia mantendu nahi bada. 01:22-n, erreaktorearen potentzia termikoa 200MW termikokoa da eta ORMa 8 kontrol-barrakoa da. Neutroi fluxua erreaktorearen goiko aldean maximoa duen tontor bikoia da, hozgarriaren emaria guztira $56\ 000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ -koa da eta ur-elikatuaren emaria $200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ -ingurukoa da. Hau da, erreaktore-gunea ez da egonkorra.

Nahiz eta erreaktore gunea ez-egonkorra izan, 01:23:04-n, probari hasiera ematen zaio. Gogoratu probak erreaktorea guztiz amatatzen den egoeretan edo potentzia galera gertatzen den egoeretan, zortzigarren turbosorgailuan ekoizten den energia mekanikoa ponpak elikatzeke aprobetxatu daitekeen ikertzean datzala. Zortzigarren turbosorgailura konektatuta dauden ponpen abiadura angeluarra gutxitzen hasten da. Ondorioz, hozgarriaren emaria gutxitzen da. Emaria gutxitzeak erreaktore gunean biltzen den lurruna areagotzen du eta hutsune-koefizientea handitzen da. Aitzitik, [19]-ren arabera, une horretan, hutsune-koefizientearen handipenari kontrol-barrak erreaktore guneko goiko aldetik erreaktore gunera 1.4 metro sartuz egin ahal zaio aurre. Horrenbestez, une honetan erreaktorea oso ez-egonkorra da, baina oraindik ere kontrolagarria.

01:23:40-n, proba hasi denetik 36 segundo pasata, argi ez dagoen arrazoi batengatik AZ-5 botoia sakatzen da. IAEAk eta komisioek egindako ikerketen arabera, ez dago argi zergatik sakatzen den AZ-5 botoia une horretan. Hala ere, gau horretan kontrol gelan egon zen Anatoly Dyatlov ingeniari nagusiak bere liburuan adierazi zuenaren arabera, AZ-5 botoia sakatzen da 01:23:40-n jadanik proba bukatuta dagoelako, eta larrialdiko sistema sakatuz erreaktore-gunea amatatu nahi delako [21].

AZ-5 SCRAM botoia sakatzen denean, kontrol-barrak erreaktore gunera sartzen hasten dira. Kontrol-barrak erreaktore gunera sartzen doazen heinean, ura desplazatzailearengatik ordezkatzeko behe aldean, eta ondorioz, behe aldean, neutroi fluxua handitzen doa. Erreaktore guneko goiko aldean berriz, xurgatzailea dela –eta, neutroi fluxua txikitu egiten da. Honako grafikoa neutroi fluxuaren bilakaera ikus daiteke [16]:



17. irudia. AZ-5 botoia sakatuta, neutroi fluxuaren bilakaera adierazten duen grafikoa (Iturria [16]).

17 grafikoa ikus daitekeenez, AZ-5 botoia sakatzen den unean, neutroi fluxua tontor biko da, maximoa errektore gunearen goiko aldean duena. Behin larrialdirako dauden kontrol-barrak errektore gunera sartzen hasten direnean, SCRAM efektu positiboa gertatzen da, hau da, xurgatzaileak ura ordezkatzen duen lekuan errektibitatea jaisten da, eta ondorioz, neutroi fluxua; baina, kontrol-barrak errektore gunera sartzen direnean, beheko aldean grafitozko desplazatzaileak ura ordezkatzen du, eta horrenbestez, errektibitatea handitzen da. Beraz, kontrol-barrak errektore gunera sartzen diren heinean, errektore gunearen behe aldean errektibitatea handitu egiten da. Errektore gunearen goiko aldetik sei metrora gertatzen da neutroi fluxuaren maximoa, eta azter daitekeenez, zenbat eta denbora gehiago pasa, handiagoa da neutroi fluxuaren maximoaren balioa.

Errektore gunearen behe aldeko errektibitatearen gorakada nabarmenak errektore gunearen behe aldeko potentzia lokalki asko handitzea eragiten du. Errektore gunearen behe aldean, potentziaren gorakadak erregai-kanalen tenperaturaren igoera dakar. Hori horrela, erregai elementu batzuek $220 \frac{\text{Cal}}{\text{g}}$ ($T=3300\text{K}$) -ko entalpia lortzen dute, erregai elementuen desintegrazioa eragiten duen entalpia alegia. Erregai elementuak erregai-kanalean desintegratu egiten dira eta erregai-kanal batzuen apurketa eragiten dute [19]. Erregai-kanalen apurketak lurrunaren eta presioaren gorakada lokal handia eragiten du. Beraz, hutsune-koefizientea positiboa denez, erregai-kanala apurtu den guneetan errektibitateak gora egiten du eta potentziaren gorakada kontrolgabea gertatzen da. Potentziaren gorakada lokala, segituan errektore gune osora hedatzen da eta potentzia globalki kontrolik gabe hasten da igotzen. Jarraian bi eztanda gertatzen dira.

1986ko apirilaren 25ko eta 1986ko apirilaren 26ko gertakariak aztertuta, argi ikus daiteke istripuaren eragilea AZ-5 SCRAM botoia sakatzea izan zela. Izan ere, langileek errektorea egoera ez egonkorrean jarri zuten lanean, eta SCRAM botoia sakatzean, kontrol-barrak zituzten diseinu akatsen ondorioz eta hutsune-koefiziente positiboagatik, potentziaren gorakada ez-kontrolatua gertatu zen.

4.3 Erreaktorean gertatu ziren bi leherketak

Arestian aipatu dugunez, SCRAM botoia sakatuta potentziaren gorakada kontrolik gabea gertatu zen, eta lauzpabost segundotara bi leherketa gertatu ziren [16]. Bi leherketen inguruko hainbat interpretazio egin dira 1986. urtean istripua gertatu zenetik gaur egunera arte. Atal honetan, hogeita hamalau urte horietan egin diren interpretazio garrantzitsuenak jorratuko ditugu.

Hasteko azter dezagun istripua gertatu eta ondorengo hamarkadan egindako interpretazioa. Horretarako, INSAG 7 [7, 16, 19] txostenean, [22] estatu batuek egindako erreportajea, eta [23] (2010. urtean argitaratua da, baina bertsiio zaharra babesten du) artikuluan agertzen diren bertsiioei helduko diegu. Izan ere, horiek adierazten duten bertsiio nagusia da istripua gertatu eta ondorengo hamarkadan hedatutako leherketei buruzko bertsiio nagusia. Gainera, gaur egun ere, badira zenbait artikulua eta liburu bertsiio hori babesten dutenak, hala nola [14] liburua.

90. hamarkadan nagusitu zen bertsiioaren arabera izaera nuklearra ez duten bi leherketa gertatzen dira erreaktore-gunean. Erregai-kanal batzuen apurketek potentzia era ez-kontrolatuan handitzea eragiten dute, izan ere, erregai-kanalen apurketek ura lurruntzea eragiten dute, eta hutsune-koefiziente positiboagatik, potentzia era bortitzean hasten da igotzen. Horrek erregaiaren tenperatura handitzea eragiten du, ondorioz, lurrun gehiago ekoizten da, eta potentzia gehiago handitzen da. Potentzia handitzen denez, erregaiaren tenperatura handitzen da, ondorioz, lurrun gehiago ekoizten da; hau da, tenperatura-lurrun-potentzia zikloa sortzen da. Hori dela-eta, lurruna era masiboan biltzen da erreaktore gunean. Hainbeste lurrun biltzen da erreaktore gunean, non lehenengo leherketa gertatzen den, lurrun leherketa alegia [19]. Lurrun leherketak erreaktore gunearen goiko aldeko 1200 tonako altzairuzko xafra lehertzen du. Hori horrela, erreaktore gunea guztiz babestu gabe geratzen da [22]. Bestalde, erreaktore gunearen behe aldeko estalkia 3.85m hondoratzen da [23]. Lehen leherketa eta gero, erreaktore gunean dagoen lurruna grafitoarekin nahasten da eta karbono monoxidoa sortzen da ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$). Erreaktore gunea guztiz zabalik dagoenez, karbono monoxidoa airearekin nahasten da, eta grafitoak 500 °Cko tenperatura lortzen duenean, bigarren eztanda gertatzen da, non bigarren leherketaren eraginez, erreaktore gunea suntsitzen den [23].

Azaldutako bertsiio nagusiaren lehen leherketaren inguruko hipotesia (lurrun leherketa) oraindik dago babesturik. Bigarren eztanda dagokionez, XXI. mendeaz geroztik egin diren ikerketetan, izaera nuklearra duen leherketa gertatu zela proposatu da. Hain zuzen ere, [24]-k izaera nuklearra duen bigarren leherketa gertatu zela babesten du. [24]-n arabera, lurrun leherketa gertatzen denean, erreaktore gunearen goiko aldea babesten duen estalkia airera bota, eta estalkia airetik dagoen unean, bigarren leherketa gertatzen da. Lurrun leherketaren ondorioz erreaktore guneak 4000 °C-ko tenperatura lortzen du, eta 100-250 tona TNTko (1 tona TNT = 4.184 GJ) eztanda gertatzen da. Eztanda ondoz, erreaktore gunea eta metalezko estalkia lehertzen dira, eta horiek 30 metroko altuerara igoarazten dira. Beraz, erreaktore gunean, erregaiaren %9 – 13-a geratzen da soilik. Eztanda potentzia datu sistimikoetatik lortzen du. Berebat, erreaktore gune osoaren leherketaren arrazoia aurkitzen du, besteak beste, erreaktore gunearen estalki metalikoa, 1995. urtean, erreaktorearen zentrotik ekialderantz (eskuinerantz) eta 35 metrora aurkitu izanean, eta erreaktore gunean erregairik ez aurkitu izanean.

[13]-k ere izaera nuklearra duen bigarren leherketa babesten du. Izan ere, aipatzen duenez, bigarren eztanda gertatu zenean argi urdina ikusi zen, eta karbono monoxidoaren eta airea-

ren nahasketaren ondoriozko leherketarengatik ez litzateke argi urdinik ikusi beharko. Argi urdina ikusi izanak bigarren leherketak izaera nuklearra izan zuenaren hipotesia irmotzen du, Cherenkov erradiazioagatik igorritako erradiazio nuklearra urdin kolorekoa baita. Hala ere, Mikhail V. Malko-ren arabera, leherketa nuklearra ez da errektore gune osoan gertatzen, baizik eta errektore gunearen erdi batean soilik. Izan ere, jakina da Chernobyl-go istripua gertatu zenetik hamar egunera arte erradionukleidoak askatu zirela ingurunera. Gune osoko leherketa nuklearra gertatuko balitz, ez lirateke istripua gertatu eta 10 egunera arte igorriko ingurumenera, ez liratekelako erregai nahikorik egongo errektore gunean, erradionukleidoak hamar egunez igortzeko. Beraz, leherketa gertatu eta gero erregai nuklearraren parte bat errektore gunean geratu beharko litzateke.

Horrenbestez, [24] eta [13]-ren lanak alderatuta, ondorioztatu dezakegu bigarren leherketa 100-250 tona TNTko eztanda nuklearra izan zela, eta leherketa ez zela errektore guneko erregai guztiaren ondoriozko eztanda nuklearra izan.

Azken hogei urteetan, lehenengo leherketa lurrin leherketa eta bigarren leherketa nuklearra izan zenaren bertsioa nagusitu da. Hala eta guztiz ere, 2018.urtean, oihartzuna izan duen Chernobylgo istripuaren leherketen izaerari buruzko bertsio berritzailea argitaratu zuten, [25]. Chernobylgo zentraletik ipar ekialderantz 1000 km-ra dagoen Cherepovets herrialdean, ^{133}Xe (erdibizitza $\tau=5.243$ egun) eta ^{133m}Xe (erdibizitza $\tau=2.19$ egun) isotopoak neurtu ziren 1986ko apirilaren 27tik maiatzaren 2ra bitartean. Isotopo horiek fisio leherketaren ondorioz, probabilitate handiz sortzen diren fisio produktuak dira. Datu meteorologikoetatik ondorioztatu zuten, fisio produktu horiek Chernobylgo errektorean, leherketa nuklearra gertatu eta atmosferan zehar bidaiatu zutela 2.5-3 km-ko altueran.

Aurkikuntza horietan oinarrituta, [25]-k honako hipotesia egiten du. SCRAM botoia sartzatzen denean, kontrol-barrak errektore gunera sartzen hasten dira, eta SCRAM efektu positiboagatik, errektorearen beheko aldean errektibitate lokalaren gorakada gertatzen da. Hots, neutroi termiko gero eta gehiago daude fisio-erreakzioa eragiteko. Hori horrela, erregai kanal batzuetan hain da handia gertatzen den errektibitatearen igoera, non leherketa nuklear lokalak gertatzen diren. Erregai kanalek 350kg-ko estalkiak dituzte, eta leherketa gertatzen denean, erregai nuklearraren jariakinak (*Nuclear Jet*) erregai kanalen estalkia kendu eta erregai kanal horietan egon den erregai nuklearra atmosferara igortzen da. Hori horrela, erregaiaren jariakina sortzen da, 2.5-3 km-ko altueran bidaiatzen duena atmosferan zehar. Bitartean, leherketa gertatu ez den erregai kanaletan handitzen doan errektibitateak eta hutsune-koefiziente positiboak errektore gunean lurrin gero eta gehiago biltzea eragiten du, eta bigarren leherketa gertatzen da, lurrin leherketa. Lurrin leherketaren ondorioz, errektore guneko estalkia lehertzen da eta 30 metroko altuerara botatzen da. [25]-k datu sismikoetatik, 100-250 tona TNTko leherketa gertatzen dela adierazten du. Gainera, leherketa nuklearra 2-3 erregai kanaletan gertatzen dela ondorioztatzen du. Horrez gain, bigarren leherketa 2.7s beranduago gertatu zela argudiatzen dute. Hortaz, [25] lanean, azken urteotan egin den hipotesiaren kontrakoa aurkezten da.

4.4 Leherketen ondorengo uneak

Atal honetan, eztrandak gertatu ziren unetik errektorea kontrolatzea lortzen den unera arte eman ziren urratsak deskribatuko ditugu. Horretarako, [26]-k deskribatutakoari helduko diogu.

Arestian aipatu dugun bezala, kontrolik gabeko potentziaren gorakadaren eraginez bi ez-

tanda gertatzen dira. Bigarren ezteandaren ondorioz, erreaktore gunea estalki gabe geratzen da, eta leherketaren ondorioz, erreaktore gunea osatzen duten elementu batzuk erreaktore guztian zehar sakabanatzen dira, hala nola erreaktorearen teilatua eta makinaren gelan. Erreaktorearen teilatua asfaltoz (alkitranez) eratuta dago. Hori dela eta, bigarren ezteandaren eraginez erreaktore guneako elementuak teilatua eta makinaren gelan jausten direnean, 30 sute baino gehiago eraten dira, teilatuko sua makinaren gelara hedatzen baita. Apirilaren 26ko goizeko 4.50 aldera arte, suhiltzaileek ez dute suteen gehiengoa amatatzea lortzen. 100 suhiltzaile baino gehiagok hartzen dute parte suak amatatzeko lanetan, non lan horiek maila erradioaktibo altuetan eta ke zerratuarekin egiten dituzten. Suhiltzaileek suteak itzali nahian, erreaktore gunea urez hornitzen dute. Beraz, erreaktore gunean geratzen den erregai nuklearrak fisio-erreakzioak izaten jarraitzen du (gogoratu, ura neutroi moderatzaile ona dela), eta erregaia gero eta beroago dago. fisio-erreakzioetan askatutako beroaren ondorioz (energia zinetikoa, bero bihurtzen da), erreaktorean dauden materialak hainbeste berotzen dira, non apirilaren 26ko arratsaldeko 9.41ean, beste sute handi bat pizten den. Gainera, erreaktore gunea estali gabe dago, eta erradionukleidoak atmosferara igortzen dira. Sutea eta erradionukleidoen isurketa kontrolatzeko materialak botatzea erabakitzen dute erreaktorea suntsituta dagoen gunean, besteak beste, sutea kontrolatzeko 1800 tona are eta, neutroien xurgapena bermatzeko, 40 tona boro. Apirilaren 27 eta Maiatzaren 2a bitartean, beste hainbat tona isurtzen dira erreaktorea suntsituta dagoen gunera. Horretarako, 1800 helikoptero bidai egiten dira, eta erradioaktibitate maila altua dela-eta gidaria arriskuan ez jartzeko asmotan, helikopteroek higitzen dauden heinean isurtzen dituzte materialak erreaktorerara. Hori dela-eta, boroa eta area ez da erreaktore gunera botatzen soilik, erreaktorearen teilatura jausten da materialaren gehiengoa (ikus. 19 irudia). Materialaren pisuarekin eraiki-naren teilatua jausteko arriskua ekidin nahian, maiatzaren 2an material gehiago ez botatzea erabakitzen dute.

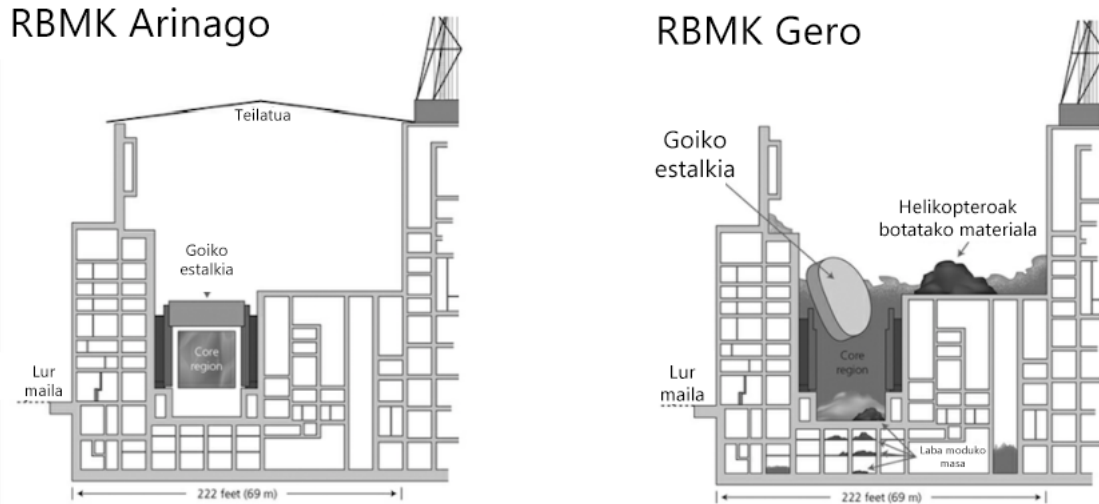
Horrez gain, bi ezteandak gertatzen diren unetik, erreaktore gunea zegoen lekuan, laba moduko masa bat eraten da geratzen diren erreaktore guneako materialekin eta erregaiarekin. Labaren barnealdean, erregaia dago eta erregaia grafito geruza batek estaltzen du. Laba moduko masan elementu lurrunkorrak, zesioa kasu, eta ez lurrunkorrak daude. Elementu lurrunkorrak grafitoarekiko iragazkaitzak dira, elementu ez lurrunkorrak berriz, iragazkorak. Ondorioz, grafito geruza dagoen artean atmosferara elementu ez lurrunkorrak igortzen dira, eta elementu lurrunkorrak laba moduko masan geratzen dira. Grafito geruza maiatzaren 2rako guztiz erretzen da, eta une horretan, masaren elementu lurrunkorrak airera isurtzen hasten dira.

Erreaktorea suntsitu eta zortzigarren egunean, laba moduko masak erreaktore gunearen behe aldeko estalkia urtzen du eta laba moduko masa estalkiaren elementuekin batera erreaktoreko behe aldeko geletan zehar hedatzen da. Hori dela eta, masaren osaera aldatzen da. Gainera, masak azalera zabalagoa hartzen du, eta ondorioz, isurtzen den erradionukleido kopurua handiagoa da. Erreaktore gunearen beheko aldean burbuil-igerilekuak daude, eta laba moduko masa uretara jausten bada, fisio-erreakzioan askatutako neutroiak moderatu daitezke, fisio-erreakzio kate superkritikoa sortu eta beste leherketa bat gertatu daiteke. Baina, suhiltzaileek eta erreaktoreko hiru langilek aurreko egunetan bertan dagoen uraren gehiengoa kentzea lortzen dute, laba moduko masa bertara jaustean hirugarren ezteanda gertatzea saihesteko asmotan. Horrenbestez, laba moduko masa erreaktore guneako beheko aldean jais-tean, masak lurruna sortzen du geratzen den urarekin kontaktuan jartzen delako. Berebat, erradionukleido kopuruaren isurketak gora egiten du.

Hamargarren egunerako, sutea itzaltzea lortzen da. Gainera, erregaiaren fisio produktuak

egonkorragoak bihurtzen dira eta ez dira erradionukleidoak isurtzen kanpoaldera. Beraz, hamargarren egunerako erreaktorea kontrolatzea lortzen da.

Ondorengo irudietan, erreaktoreak istripua baino lehen eta istripuaren ostean duen itxura ikus daiteke, eta erreaktorera isuritako materialen pilaketa eta sortutako laba moduko masaren kokapena ikus daitezke:



18. irudia. RBMK erreaktorea istripua gertatu baino lehen (Iturria [27]).
19. irudia. RBMK erreaktorea istripua gertatu eta gero (Iturria [27]).

4.5 Istripuak eragindako osasun kalteak

Chernobylgo istripuan apirilaren 26tik maiatzaren 5ra bitartean igorri ziren erradionukleidoak ingurunera. Askotariko erradionukleidoak askatu ziren, hala nola, ^{133}Xe (6500 PBq), ^{131}I (1150 PBq), ^{133}I (910 PBq), ^{137}Cs (85 PBq), ^{90}Sr (10 PBq) eta ^{238}Pu (0.015 PBq)[26]. Chernobylgo istripuagatik gehien kutsatutako herrialdeak Bielorrusia, Ukraina eta Errusia izan ziren. Askatutako erradioaktibitatearen inguruko xehetasunak 2. eranskinean daude.

Istripuan askatutako erradiazioak, bai epe luzean, baita epe laburrean, zenbait osasun kalte eragin zituen pertsonengan (erradiazioak pertsonengan nola eragiten duen, 3. eranskinean dago azalduta).

Chernobylgo istripuan, 600 larrialdi-langilek eta 600.000 “likidatzailek” (1986-1990 urteetan, Chernobylgo hondamendia konpontzen aritu ziren langileak) hartu zuten parte [28]. 234 larrialdi-langileri osasun-azterketa egin zitzaion, eta horietatik 134 langilek erradiazio akutuarien sindromea pairatu zuten. Erradiazio akutuarien sindromea izan zutenen artean, 28 langile hil ziren, non horietatik 23 Chernobylgo istripuan sortutako suteak itzaltzen jardun zuten suhiltzaileak ziren [26, 28]. Bestalde, 134 langiletatik 13 pertsonak hezur-muineko arazoak izan zituzten, eta hezur-muinaren transplantea behar izan zuten. Transplantearen ondorioz, 12 langile hil ziren. Horrez gain, 134 langiletik 15 langilek sindrome gastrointestinalak izan zituzten, eta 8 langilek neumonia izan zuten [28].

Chernobylgo istripuaren ondorioz epe luzean gertatu den osasun kalterik garrantzitsuen tiroideko kantzerra izan da. Larrialdi-langileen eta likidatzaileen artean, tiroidean batzuk besteko 0.21 Gyko dosia xurgatu zutela estimatzen da [28]. Horrez gain, 1986ko apirilaren 27an Chernobylgo zentral nuklearretik 3 km-ra bizi ziren 50 000 pertsona inguru ebakuatu zi-

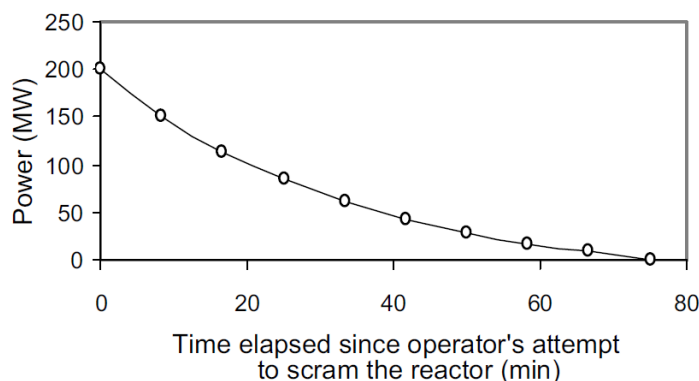
ren, eta maiatzaren 6an Chernobylgo zentraletik 30km-ra bizi zen populazio guztia ebakua-
zen. Guztira 116 000 pertsona izan ziren behartuak beraien bizilekua uztera eta ebakua-
turikoetatik, tiroidean, umeei 0.11-0.39 Gy, nerabeek 0.066-0.39 Gy eta helduek 0.066-0.40
Gy bitarteko dosiak xurgatu zituztela estimatzen da [28]. Chernobylgo istripuaren ondorioz
erradiazio dosi altuenak jasan zituzten herrialdeen artean (Ukraina, Errusia eta Bielorrusia)
1991-2015 urteen bitartean, 20 000 tiroideko kantzerrak erregistratu ziren, 1986. urtean, istripua
gertatu zenean adingabeak zirenean atzeman ziren tiroide kantzerrak kasuak. Chernobylgo
istripua eta gero egin diren azterketa epidemiologikoetatik ondorioztatzen da erradiazioaren
eraginpean, umeei daukatela arrisku gehien tiroideko kantzerra izateko; hau da, erradia-
zioaren eraginpean tiroideko kantzerra izateko arriskua gizabanakoaren adinarekin loturik
dagoela agerian geratu da [29].

5. Kapituluia

Ondorioak

Lan honetan, lehenik, Chernobylgo istripuaren analisia eta gertatu ziren leherketen inguruko hipotesiak aztertu ditugu. Ondoren, istripuak izan zituen ondorio biologikoak aztertu ditugu.

Chernobylgo istripuaren analisisian aipatu dugunez, hasiera batean, istripua gertatu izana bertan egon ziren langileei leporatu zitzaien. Aitzitik, gaur egun dagoen bertsio ofiziala aztertuta istripuaren eragilea SCRAM efektu positiboa eta hutsune koefiziente positiboak direla ikusi dugu. Langileen jokaera aztertuz gero, ikusi dugunez langileek ez zuten erreaktorea itzaltzea erabaki ORMa 15 kontrol-barra baino txikiagoa zenean, hau da, ez zuten araua bete, protokoloa jarraitu eta zuzen jokatu. Bestalde, ikertu dugunez, langileek ez zuten probarako erabakita zegoen potentzia errespetatu (700-1000 MW(th)) eta 200 MW(th)-tan proba burutzea erabaki zuten. Hala ere, ezin zaie leporatu potentzia txikietan lan egitea erabaki izana, ze potentziatan lan egin ez baitzegoen arauturik. Gainera, langileek ez zituzten potentzia baxuan lan egitearen arriskuak ezagutzen, eta ez zekiten erreaktorea oso era ez-egonkorrean jarriko zutenik. Beraz, leporatu ahal zaien bakarra ORMaren balio minimoa errespetatu ez izana da. Hala eta guztiz ere, [9] artikuluan ageri den bezala, AZ-5 SCRAM botoia sakatuko ez balitz, AZ-5 botoia sakatzea erabaki zen unetik 80 minutura berez amatatuko litzateke erreaktorea. Izan ere, suposatuz gero erreaktore-gunearen konfigurazioa ez dela aldatzen, xenon bidezko pozoidura 200 MW(th)-tan gero eta handiagoa izango litzateke, eta horrek 80 minuturen buruan erreaktore gunea berez itzaltzea eragingo luke. Honako grafiko honetan ikus daiteke AZ-5 botoia sakatuko ez balitz nola gertatuko litzatekeen potentziaren bilakaera [9]:



20. **irudia.** AZ-5 botoia sakatuko ez balitz gertatuko litzatekeen potentziaren bilakaera hipotetikoa adierazten duen grafikoa (Iturria [9]).

20 grafikoan azter daitekeen bezala, erreaktoreak zituen baldintzengatik, potentziak 80 minuturen buruan behera egingo luke, eta guztiz itzaliko litzateke erreaktorea. Horrekin guzti horrekin argi geratzen da AZ-5 botoia sakatuko ez balitz, ez litzatekela istripurik gertatuko. Horrenbestez, AZ-5 SCRAM botoia sakatzea izan zen istripuaren eragilea, eta ondorioz, RBMK 1000-ren diseinu akatsa, izan ere, SCRAM efektu positiboa gertatu izana kontrol-barren diseinu okerraren eragina da. Bestalde, langileek erreaktore gunea modu ezegonkorrean jarri zuten, eta istripuaren sustatzaile izan ziren; beraz, nire ustez, langileek ere erruaren zati bat izan zuten.

Behin istripuaren analisia egin dugunean, istripuan gertatu ziren bi leherketen izaeraren inguruan egin diren hipotesiak ikertu ditugu. Ikusi dugunez, azken urteotan lehenengo leherketa lurrin leherketa eta bigarrena leherketa nuklearra izan zenaren hipotesia da gehien zabaldu dena. Hala ere, 2018. urtean argitaratu zen lanean [25], kontrako hipotesia plazaratzen da, lehen leherketa nuklearra eta bigarrena lurrin leherketa izan zela alegia. Azter dezakegun bezala, nahiz eta 34 urte pasa izan diren istripua gertatu zenetik, ez da istripuaren leherketen izaeraren inguruko bertsio osaturik lortu. Lan honetan aztertu ditugun hiru lanek [24, 13, 25] adibidez, leherketen inguruko hiru hipotesi ezberdin jorratzen dituzte. Hala ere, hirurek izaera nuklearra duen leherketa eta lurrin leherketa gertatu zirela argudiatzen dute. Horrenbestez, nahiz eta badirudien oraindik ez dela leherketen inguruko hipotesi irmorik sortu, azken urteotan egin diren lanei esker, 1986ko apirilaren 26an gertatu ziren leherketen izaera argitzeko bidea egin da, eta lurrin leherketa eta leherketa nuklearra dira eztabandean izaeraren inguruko hipotesi sendoenak.

Chernobylgo istripuak eragindako osasun kalteak aztertu ditugunean, erradiazioak eragin zituen epe laburreko kalteak aztertu ditugu. Bertatik, ondoriozta daiteke Chernobylgo istripuan parte hartu zuten larrialdi langileen %39-ri osasun azterketa egin zitzaiela, eta horien %57, 26ak erradiazioaren sindrome akutua izan zuela, hots, larrialdi langileen %22.3ak. Gainera, ondoriozta daiteke erradiazioaren sindrome akututa izan zutenen %29.85a hil egin zela, larrialdi langileen %6.7a alegia.

Bestalde, Chernobylgo istripuak eragindako osasun kalteak aztertzerako orduan irakurri ditudan txostenak oinarri ditudala, ondorioztatu dezaket Chernobylgo istripua gertatu ondoren zientzialariek erradiazioak eragiten dituen osasun kaltean ikertzeko aukera handiagoa izan dutela, bereziki tiroideko kantzerrari dagokionez. Izan ere, Chernobylgo hondamendia eta gero, zientzialariek erradiazioak eragiten dituen kalteak aztertzeke populazioaren lagin handiagoa izan dute. Zientzialariek, istripuaren ondorioz erradiazioaren eraginpean egon den populazioa aztertuta eta azterketa epidemiologikoak eginda, ondorioztatu dute erradiazioaren eraginpean dagoen populazioan, umeeke dutela tiroidetako kantzerra izateko arrisku gehien. Hala eta guztiz ere, erradiazioak eragiten duen tiroideko kantzerra ulertzeko zenbait galdera daude oraindik erantzun gabe, hala nola zenbat denbora den beharrezkoa populazioan erradiazioak eragindako tiroideko kantzerra izateko arriskua gutxitzeko [29].

Bibliografia

- [1] Brian R. Martin. *Nuclear and Particle Physics*. John Wiley Sons, 2006.
- [2] Marco Ripani Enzo De Sanctis, Stefano Monti. *Energy from nuclear fission: an introduction*. Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [3] Fernando Plazaola. Fisioko energia nuklearra. etorkizuneko energia-iturria? *Ekaia*, (20):41–67, 2006.
- [4] <https://www.nuclear-power.net/>.
- [5] Yoshiaki Oka. *An advanced course in nuclear engineering: nuclear reactor design*. Springer International Publishing, Tokyo, 2010.
- [6] <https://commons.wikimedia.org/wiki/Portada>.
- [7] International Atomic Energy Agency. Insag-7—the chernobyl accident: Updating of insag-1. *Safety Series Report*, (7), 1992.
- [8] I. R. Cameron. *Nuclear Fission Reactors*. Plenum Press, New York and London, 1982.
- [9] A. Kaliatkac E. Knoglingera, H. Wölflb. Heat transfer in the core graphite structures of rbmk nuclear powerplants. *Nuclear Engineering and Design*, 293:413–435, 2015.
- [10] Michel Spiro Jean-Louis Basdevant, James Rich. *Fundamentals in Nuclear Physics. From nuclear structure to cosmology*. Springer International Publishing, USA, 2005.
- [11] Usathomas B. kingery Steven B. Krivit, Usajay H. Lehr. *Nuclear energy encyclopedia: Science, Technology, and Applications*. John Wiley and Sons, New Jersey, 2011.
- [12] <https://wwwndc.jaea.go.jp/cgi-bin/FPYfig?xpar=z>.
- [13] M. V. Malko. The chernobyl reactor: Design features and reasons for accident. *Investigation of Research Activities About the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia*, 2002 (current as of May 18, 2017).
- [14] Stephan Bullard Thomas Filburn. *Three Mile Island, Chernobyl and Fukushima. Curse of the Nuclear Genie*. Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [15] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/cherno2.html>.
- [16] International Atomic Energy Agency. Insag-7—the chernobyl accident: Updating of insag-1, anex ii. *Safety Series Report*, (7), 1992.

- [17] Imanaka Tetsuji. What happened at that time? *Investigation of Research Activities About the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia*, 2008 (current as of May 18, 2017).
- [18] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-Chernobyl-RBMK-1000-nuc-fig1_282567562.
- [19] International Atomic Energy Agency. Insag-7—the chernobyl accident: Updating of insag-1, annex i. *Safety Series Report*, (7), 1992.
- [20] https://www.reddit.com/r/chernobyl/comments/bzkmgc/control_rod_graphic/
- [21] <https://www.neimagazine.com/features/featurehow-it-was-an-operator-s-perspective/>.
- [22] US Nuclear Regulatory Commission. Report on the accident at the chernobyl nuclear power station. 1987.
- [23] E.I. Grishanin. The role of chemical reactions in the chernobyl accident. *Physics of Atomic Nuclei*, 73:2296–2300, 2010.
- [24] A.N. Kiselev and K. P. Checherov. Model of the destruction of the reactor in the no.4 unit of the chernobyl nuclear power plant. *Atomic Energy*, 91(6):967–975, 2001.
- [25] Henning Rodhe Lars-Erik De Geer, Christer Persson. A nuclear jet at chernobyl around 21:23:45 utc on april 25, 1986. *Nuclear Technology*, 201(1):11–22, 2018.
- [26] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. annex d: Health effects due to radiation from the chernobyl accident. 2008.
- [27] <https://undsoc.org/2018/02/24/nuclear-accidents/>.
- [28] V Saenko, V Ivanov, A Tsyb, Tatjana Bogdanova, Mykolo Tronko, Yu Demidchik, and Shunichi Yamashita. The chernobyl accident and its consequences. *Clinical Oncology*, 23(4):234–243, 2011.
- [29] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation et al. Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the chernobyl accident. *A White Paper to Guide the Scientific Committee’s Future Programme of Work*, page 30, 2018.