

FUKUSHIMA

Història d'un desastre nuclear



*Anàlisi de les causes i les
conseqüències de l'accident nuclear
de Fukushima Dai-ichi*

ÍNDIX

1	INTRODUCCIÓ	3
2	LES CENTRALS NUCLEARS	5
2.1	CENTRAL NUCLEAR DE FUKUSHIMA DAI-ICHI	6
2.1.1	Companyia TEPCO	7
2.1.2	Reactors BWR de Fukushima Dai-ichi	7
2.1.3	Estructura i funcionament	9
2.1.4	Funcionament de la central nuclear	11
2.1.5	Control de la reacció de fissió en cadena	12
3	ACCIDENT NUCLEAR DE FUKUSHIMA	13
3.1	CRONOLOGIA I ANÀLISI	13
3.1.1	El terratrèmol	14
3.1.2	El tsunami	17
3.1.3	Accident nuclear per apagament total	19
3.1.4	Fusió del nucli d'un reactor	19
3.1.5	Refrigeració de les piscines de combustible gastat	21
3.1.6	Despressurització del reactor. Evacuació del vapor	21
3.1.7	Explosions d'hidrogen	22
3.1.8	Pla d'emergència: injecció d'aigua als reactors	24
3.1.9	Possibilitat de criticitat	25
3.1.10	Introducció de nitrogen als reactors	25
3.1.11	Construcció d'una coberta als reactors	25
3.1.12	Parada freda dels reactors	26
3.2	ESTAT DELS REACTORS	26
3.2.1	Reactor 1	27
3.2.2	Reactor 2	28
3.2.3	Reactor 3	30
3.2.4	Reactor 4	31
3.2.5	Reactors 5 i 6	33
3.3	PERSPECTIVA DE FUTUR: DESMANTELLAMENT DE LA CENTRAL	33
3.4	CONSEQÜÈNCIES RADIOLÒGIQUES	34
3.4.1	Gravetat de l'accident nuclear	35
3.4.2	Materials radioactius emesos	36
3.4.3	Abocament d'aigua radioactiva al mar	36
3.4.4	Evacuació de la població	37
3.4.5	Evolució de les zones evacuades	38
3.4.6	Repartiment de pastilles de iode a la població	39
3.4.7	Conseqüències mediambientals de la radiació	39
4	CONSEQÜÈNCIES SOCIALS I POLÍTIQUES	41
4.1	CRÍTIQUES	41
4.1.1	Crítiques respecte la central nuclear de Fukushima Dai-ichi	41
4.1.2	Valoració de la gestió de l'accident	43

4.1.3	<i>Dificultats addicionals que han tingut els operaris durant el sinistre.....</i>	43
4.1.4	<i>Premi Príncepe de Astúrias de la Concordia 2011.....</i>	44
5	CONCLUSIONS I COMENTARIS	45
6	FONTS.....	49
ANNEX 1. CONCEPTES FONAMENTALS DE FÍSICA NUCLEAR.....		51
1	INTRODUCCIÓ	52
2	ESPÈCIES ATÒMIQUES. ELS ISÒTOPS	53
3	REACCIÓ QUÍMICA.....	54
4	REACCIÓ NUCLEAR	55
4.1	EXEMPLE DE REACCIÓ NUCLEAR	55
4.2	PROPIETATS DE LES REACCIONS NUCLEARS	56
4.2.1	<i>Conservació del nombre atòmic i del nombre màssic</i>	56
4.2.2	<i>Defecte de masses i energia d'enllaç.....</i>	57
4.2.3	<i>Exemple 1: Defecte de masses i energia d'enllaç d'un nucli de He.....</i>	57
4.2.4	<i>Exemple 2: alliberació d'energia.....</i>	59
4.3	LA RADIACIÓ	59
4.3.1	<i>Partícules alfa (α).....</i>	60
4.3.2	<i>Partícules beta (β).....</i>	60
4.3.3	<i>Radiació gamma (γ).....</i>	61
4.3.4	<i>Emissió de neutrons.....</i>	61
4.3.5	<i>Efectes que produeix l'exposició a la radiació.....</i>	62
4.3.6	<i>Aplicacions de la radiació.....</i>	63
4.4	TIPUS DE REACCIONS NUCLEARS	63
4.4.1	<i>Desintegració radioactiva</i>	63
4.4.2	<i>Períodes de semidesintegració</i>	64
4.4.3	<i>Reacció nuclear de fusió.....</i>	64
4.4.4	<i>Reacció nuclear de captura.....</i>	65
4.4.5	<i>Reacció nuclear de fissió.....</i>	65
ANNEX 2. ESTRUCTURA I FUNCIONAMENT D'UN REACTOR NUCLEAR		69
1	REACTOR NUCLEAR.....	70
1.1	ESTRUCTURA D'UN REACTOR NUCLEAR	70
1.1.1	<i>Vas del reactor.....</i>	71
1.1.2	<i>Combustible nuclear.....</i>	71
1.1.3	<i>Barres de combustible</i>	74
1.1.4	<i>Barres de control.....</i>	74
1.1.5	<i>Moderador.....</i>	75
1.1.6	<i>Material reflector</i>	75
1.1.7	<i>Refrigerant.....</i>	75

1 INTRODUCCIÓ

L'11 de març de 2011 va succeir una catàstrofe natural de gran magnitud que va afectar al Japó. La notícia va aparèixer a totes les televisions del món i la dimensió dels fets asseguraven l'atenció de tothom. Personalment sempre m'han captivat els fenòmens naturals i veure com es manifesta la força i la potència de la natura que sovint ens demostra que té. Per tant, era d'esperar que un esdeveniment com el que va passar al Japó també desviaria la meva atenció.

El terratrèmol i tot el terror que aquest va provocar als japonesos només era el començament. Com a conseqüència, un gran tsunami va devastar pobles sencers situats a la costa japonesa del Pacífic, que ha deixat una marca per sempre més en la història d'aquest país.

Les imatges que arribaven a les nostres televisions ho deien tot, destrucció i devastació, terror i desolació per part d'aquelles persones que es trobaven allà, patint per la seva seguretat i per les seves llars. Així ens ho explicaven els mitjans de comunicació i així és com ho vam rebre a casa.

Però la història no acabava aquí, ja que encara havien de succeir més coses. No eren prou importants pels japonesos totes aquestes fatalitats que encara faltava el que seria el segon accident nuclear més greu de la història. Com a conseqüència del terratrèmol i el tsunami, la central nuclear de Fukushima Dai-ichi va quedar sinistrada i aïllada de qualsevol font d'electricitat. Els problemes que tenia per refrigerar els seus reactors van captar novament l'atenció de la població afectada i la de tot el món sencer, a l'espera de saber què podria passar després. Llavors, Japó es va decretar en estat d'emergència nuclear que suposava l'inici d'un període que tindria preocupats durant 9 mesos a milions de persones que temien una altra catàstrofe de contaminació radioactiva. Una altra perquè mai s'oblidarà aquella que va provocar l'accident nuclear més greu de la història a Txernòbil, que va comportar l'alliberació de grans quantitats de radioactivitat i totes les seves conseqüències, que encara es poden comprovar actualment.

Evidentment la meva preocupació també existia. Però, a més a més, també em va sorgir un interès per esbrinar què estava passant i quins n'eren els riscos.

I va ser al cap d'uns pocs mesos que vaig relacionar aquesta curiositat que tenia per conèixer què passava a Fukushima amb el treball de recerca, moment en que vaig decidir-ne el tema.

El que sí tenia decidit sobre el treball de recerca era que volia triar alguna cosa relacionada amb les ciències, la física o la química, matèries que trobo interessants. Vaig llegir opinions per Internet, temes que em podien agradar, però res em convenia

fins que, cert dia, vaig pensar en fer recerca sobre l'accident nuclear de Fukushima, ja que llavors la central encara estava sinistrada.

Per entendre com es van produir els problemes, necessitava molts coneixements previs que jo no tenia. Per tant, la idea de treballar sobre Fukushima va comportar l'ampliació de la meva recerca per l'energia nuclear i les centrals nuclears.

Primer havia de saber què és l'energia nuclear, com es produeix i moltes altres qüestions sobre la física nuclear. Després, em calia conèixer com és una central nuclear, com s'estructura i com genera electricitat. De manera que iniciava una recerca que, perquè fós completa, requeria tots aquests conceptes inicials.

Un cop aconseguida aquesta part ja podria endinsar-me en el món de Fukushima, a on segurament descobriria per què va quedar sinistrada la central nuclear, quins problemes va tenir els mesos posteriors i quines n'han sigut les conseqüències més immediates.

Per tant, el meu treball s'enfoca des de la part més científica ja que, tot i utilitzar el mètode històric per recollir una cronologia de fets, la clau de la recerca és descobrir i explicar les raons que han provocat tots els esdeveniments.

Els principals objectius que em vaig marcar per a fer aquest treball són entendre les causes que van provocar un accident de tal magnitud, analitzar com van actuar els equips d'emergència per solucionar el problema, així com quina en va ser l'evolució de l'estat dels reactors i analitzar les conseqüències que s'han derivat de l'accident, és a dir, l'alliberació de radioactivitat, l'actuació del govern per socórrer la població que estava en perill i les mesures que s'han pres per part dels governs i de les institucions de seguretat nuclear com a conseqüència de l'experiència de l'accident nuclear.

Ara que ja he fet aquesta introducció, dono la meva orientació per començar a llegir de la millor manera aquest treball de recerca.

Per aquells que no teniu els coneixements mínims de física nuclear i de les centrals nuclears, de la mateixa manera que jo no tenia quan començava la recerca, el treball comença a l'annex 1, titulat *Conceptes fonamentals de física nuclear*, i a l'annex 2, anomenat *Estructura i funcionament d'un reactor nuclear*, perquè hi ha explicats conceptes que seran necessaris per entendre adequadament els successos de l'accident nuclear de la central de Fukushima Dai-ichi. Per aquells que creieu que no us cal llegir els annexos 1 i 2, ja podeu començar per les primeres pàgines del treball i descobrir la meva recerca.

2 LES CENTRALS NUCLEARS

Les centrals nuclears són unes instal·lacions industrials termoelèctriques que produeixen energia elèctrica a partir de l'energia nuclear, que serveix com a font de calor. Es caracteritzen per generar reaccions nuclears de fissió en cadena de forma controlada en un reactor nuclear. És necessari un combustible nuclear com a reactiu d'aquestes reaccions, i normalment s'utilitzen diferents compostos d'urani i de plutoni. Generen una gran quantitat d'energia calorífica i a partir d'un cicle termodinàmic, que treballa a grans pressions i temperatures, és aprofitada per generar un moviment mecànic d'unes turbines. Finalment un alternador s'encarrega de transformar aquesta energia mecànica en energia elèctrica.

Les centrals són unes construccions molt complexes dotades de gran varietat de tecnologies industrials necessàries per generar energia nuclear i garantir la seguretat en tots els processos. Estan formades pel reactor nuclear, les instal·lacions adequades per produir energia elèctrica i per tots els equips auxiliars, de seguretat i d'emergència fonamentals pel seu funcionament. Però també, per tot el personal que hi treballa, com els equips d'operació, de manteniment, de seguretat i de direcció i administració, que en permeten la seva operació.

La seguretat nuclear és un dels principis fonamentals de l'ús de l'energia nuclear i les centrals es dissenyen de manera que estan capacitades per mantenir i garantir l'estabilitat dels seus reactors, davant de multitud d'incidents que poden afectar a les seves instal·lacions i, també, de grans catàstrofes naturals o fins i tot d'atacs terroristes. A més a més, les centrals estan dotades de molts equips d'emergència i de nivells de seguretat que minimitzen els riscos i els accidents.

L'aplicació de l'energia nuclear com a font d'electricitat genera tota una gran indústria nuclear, que comença amb l'extracció del mineral de l'urani i el tractament d'aquest per produir combustible i passa per les indústries que investiguen, dissenyen, construeixen i exploten les centrals i les altres que tracten i guarden els seus residus. Finalment, acaba amb les institucions i empreses que s'encarreguen de garantir la seguretat nuclear en tot el cicle que segueix el material nuclear radioactiu.

A continuació, coneixerem a la protagonista de l'accident nuclear, la central de Fukushima Dai-ichi. Analitzarem les seves característiques i les del model de reactor que utilitza, el reactor d'aigua en ebullició, anomenat en anglès *Boiling Water Reactor* (BWR).

2.1 CENTRAL NUCLEAR DE FUKUSHIMA DAI-ICHI

La Central Nuclear de Fukushima Dai-ichi¹ és una de les 25 centrals nuclears més grans del món i es va començar a construir l'any 1967. Està situada prop de la ciutat d'Okuma, a la prefectura de Fukushima de l'illa de Honshu, al Japó. En aquesta mateixa prefectura de Fukushima hi ha també la central nuclear de Fukushima Dai-ni².



1. Central nuclear de Fukushima Dai-ichi abans de l'accident nuclear de 2011

En són diverses les empreses que s'han ocupat del disseny, la construcció i l'operació de la central, però hem de destacar les companyies GE (General Electric Company), Toshiba, Hitachi, Ebasco i Kajima com a encarregades de la seva arquitectura i de la construcció dels reactors. Es van construir fins a 6 reactors que, des de l'octubre de 1979, ja estaven tots en funcionament. A més a més, actualment s'havia planificat la construcció de dos reactors més, els reactors 7 i 8.

Va entrar en funcionament el 1971 i la companyia japonesa TEPCO (Tokio Electric Power Company) s'ha encarregat de l'operació de la central durant tot aquest temps i del control dels reactors des de que es va iniciar l'11 de març de 2011 el seu sinistre.

Els 6 reactors de la central van estar operatius fins el moment de l'accident, que es van aturar permanentment. Tots són reactors BWR i conjuntament tenien una potència de 4,7 GW.

¹ Fukushima Dai-ichi o Fukushima I.

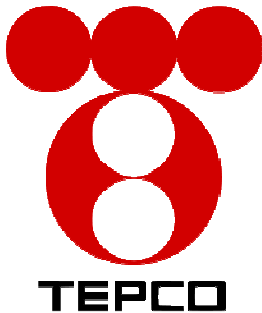
² Fukushima Dai-ni o Fukushima II.

o o o o o

2.1.1 Companyia TEPCO

La Companyia d'Energia Elèctrica de Tokio és una empresa japonesa de producció, transmissió i distribució d'electricitat que posseeix 3 centrals nuclears, 26 centrals termoelèctriques, 160 centrals hidroelèctriques i 1 central eòlica. És l'empresa elèctrica més gran del Japó i la quarta del món.

Al llarg del funcionament d'aquesta empresa, fundada el 1961, s'han esdevingut algunes polèmiques per diferents incidències que ha tingut amb la seguretat de les seves plantes nuclears. Aquests escàndols han provocat certa desconfiança en l'entorn d'aquesta empresa elèctrica i li han costat diferents expedients per incomplir els protocols de seguretat.



2. Logotip de la Tokio Electric Power Company.

El 2002 TEPCO va ser acusada de falsejar les inspeccions rutinàries dels seus reactors i amagar problemes de seguretat durant molts anys, entre el 1977 i el 2002. La companyia va admetre que va falsificar informació fins a 200 vegades.

El 2007 TEPCO va provocar un altre escàndol per no notificar diferents problemes de la central nuclear de Kashizasaki-Kariwa quan es va malmetre per un terratrèmol de 6,8 graus en l'Escala de Richter.

El 2008 l'Agència Internacional d'Energia Atòmica (IAEA) va advertir que les centrals japoneses tindrien greus problemes davant de terratrèmols superiors a 7,0 graus de magnitud en l'Escala de Richter. TEPCO va estudiar les capacitats de les seves centrals davant de diferents simulacions de terratrèmols i tsunamis i, el 7 de març del 2011, va fer arribar l'informe a l'Agència de Seguretat Nuclear i Industrial (NISA). L'empresa va notificar que no tenia la necessitat de prendre mesures urgents ja que es tractaven de càlculs que encara estaven en investigació. Segons la NISA, aquesta hauria d'haver fet públiques les seves investigacions i haver pres mesures immediates.

Altres incidents i accidents amb diferents treballadors completen una trajectòria de l'empresa plena d'irregularitats.

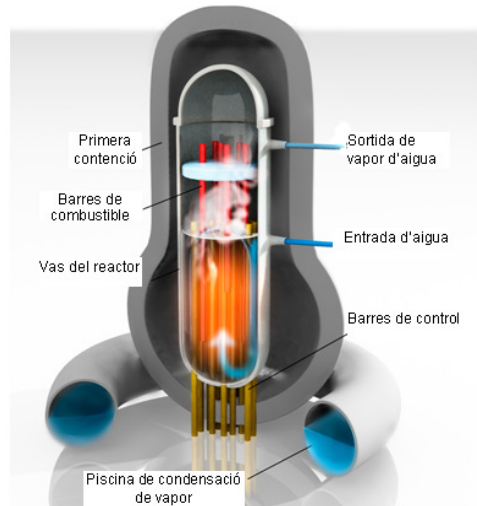
o o o o o

2.1.2 Reactors BWR de Fukushima Dai-ichi

El reactor BWR és un tipus de reactor que es va dissenyar a la dècada dels cinquanta per la companyia General Electric. Es tracta d'un model que té una estructura i un funcionament més senzills que molts altres reactors perquè utilitza únicament un circuit

de refrigeració. Per a aquest tipus es fan servir principalment combustibles d'urani enriquit i aigua natural purificada com a moderador i refrigerant.

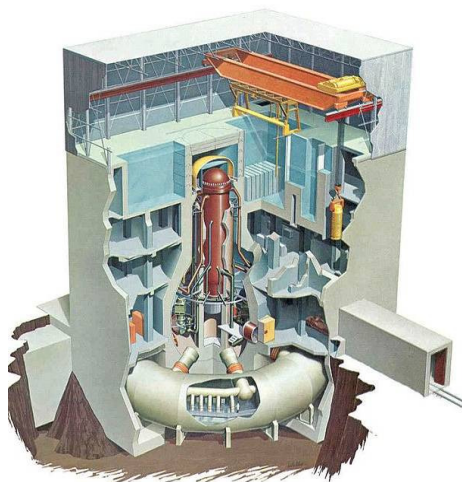
Els reactors BWR han seguit una llarga evolució al llarg de la seva existència. Des de mitjans de segle XX fins l'actualitat són 6 models els que han estat utilitzats a les centrals nuclears, començant pel reactor BWR-1 i fins el BWR-6. Però generalment s'han seguit 3 generacions de construcció de centrals nuclears BWR.



3. Disseny d'un reactor BWR

- **Primera generació:** correspon als reactors BWR-1 amb contenció de Mark I ³.
- **Segona generació:** correspon als reactors BWR-2, BWR-3 i alguns BWR-4 amb contenció de Mark I i reactors BWR-4 i BWR-5 amb contenció de Mark II.
- **Tercera generació:** correspon als reactors BWR-6 amb contenció de Mark III.

Durant les últimes dècades del segle XX també s'han dissenyat altres models de reactors BWR, com els reactors d'aigua en ebullició avançat (ABWR) o els reactors d'aigua en ebullició simplificat (SBWR).



4. Disseny dels reactors BWR de la central de Fukushima Dai-ichi.

Els models BWR dels reactors de la central de Fukushima Dai-ichi són diversos:

- El reactor 1 és un reactor BWR-3 de Mark I que produïa 460MW d'electricitat.
- Els reactor 2, 3, 4 i 5 són uns reactors BWR-4 de Mark I que generaven cadascun 784 MW d'energia elèctrica.
- El reactor 6 és un reactor BWR-4 de Mark II i generava 1100MW d'electricitat.
- I els reactors que encara no estaven construïts, els reactors 7 i 8 havien de ser del disseny de BWR més modern, reactors ABWR.

³ Mark: és el nom que reben els diferents dissenys de contencions dels reactors BWR. Mark I és el més antic i Mark III el més modern.

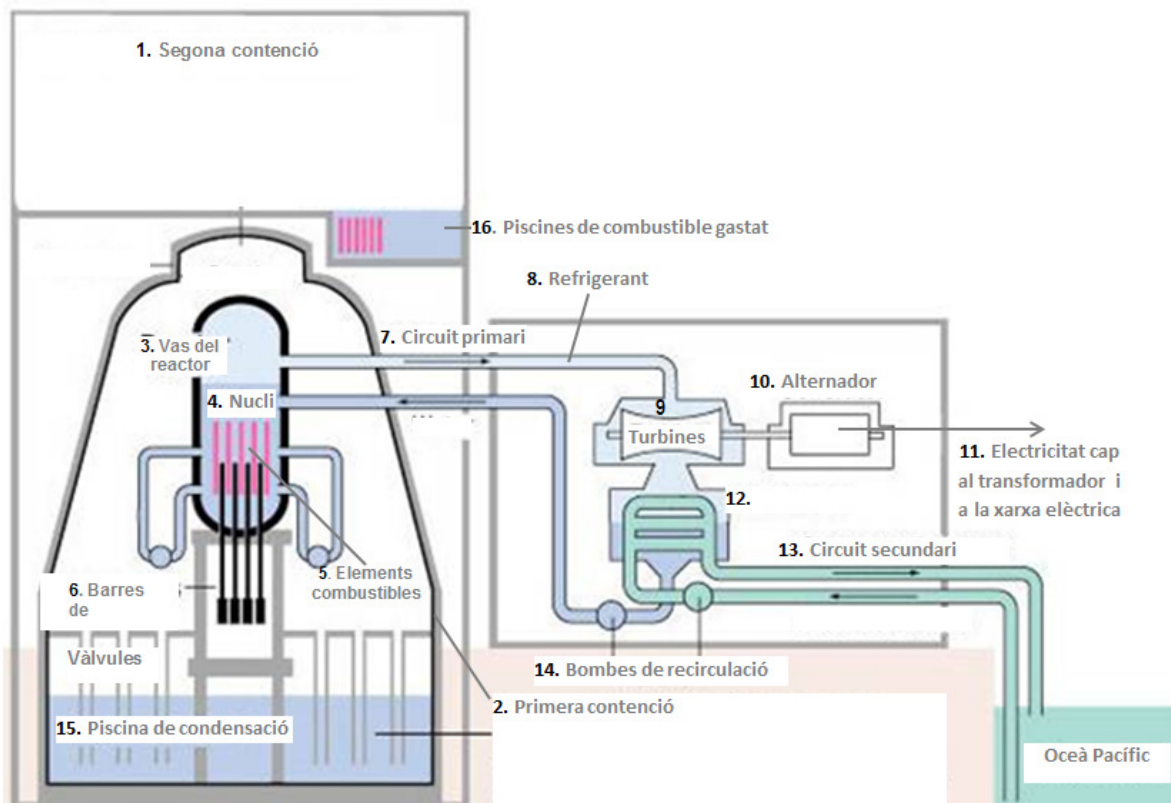
Per tant, els reactors operatius de la central de Fukushima són tots de la segona generació.

Pel que fa al combustible, els reactors 1, 2, 4, 5 i 6 utilitzen combustible d'òxid d'urani enriquit (UO_2), però el reactor 3 utilitza el combustible MOX, una barreja d' ^{235}U empobrit i ^{239}Pu que és més perillós per la seva alta radioactivitat.

.....

2.1.3 Estructura i funcionament

L'estructura general de les principals parts dels reactors BWR i dels equipaments auxiliars de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi és la següent:



5. Esquema d'una central nuclear com la de Fukushima Dai-ichi.

1. **Segona contenció:** Forma part de l'edifici del reactor i és la darrera barrera que cobreix el reactor de l'exterior.
2. **Primera contenció:** Està dissenyada amb blindatges de formigó armat i acer i és capaç de contenir la fuga de partícules radioactives i suportar pressions molt altes. També està construïda per aguantar i aïllar de l'exterior una fusió del nucli. Els diferents dissenys de contenció s'anomenen Mark I, Mark II i Mark III.

3. **Vas del reactor.**
4. **Nucli del reactor.**
5. **Elements combustibles.**
6. **Barres de control:** les barres de control dels reactors BWR de Fukushima Dai-ichi s'introdueixen per la part inferior del nucli del reactor.
7. **Circuit primari:** és el circuit tancat per on circula el refrigerant i connecta el reactor, les turbines i el condensador tèrmic.
8. **Refrigerant/moderador:** als reactors de Fukushima I és el mateix material, aigua, que fa les dues funcions. Com a refrigerant, quan es converteix en vapor al reactor, n'extreu la calor i és conduit fins a les turbines a on les fa girar. Com a moderador, l'aigua líquida sempre envolta el nucli del reactor per poder dur a terme la seva funció.

Quan la central està en funcionament, és a dir, que la reacció de fissió està activa, l'aigua del reactor es va evaporant i es dirigeix cap a les turbines. Però sempre s'ha de mantenir un nivell determinat d'aigua líquida que sigui suficient per envoltar el nucli del reactor i pugui continuar amb el procés d'extracció de calor sense que s'aturi.

9. **Turbines:** Són les màquines que s'encarreguen de generar moviment mecànic mitjançant la força del vapor d'aigua a alta pressió.

10. **Alternador:** és la màquina que transforma l'energia mecànica produïda per les turbines en energia elèctrica, generant un corrent altern.



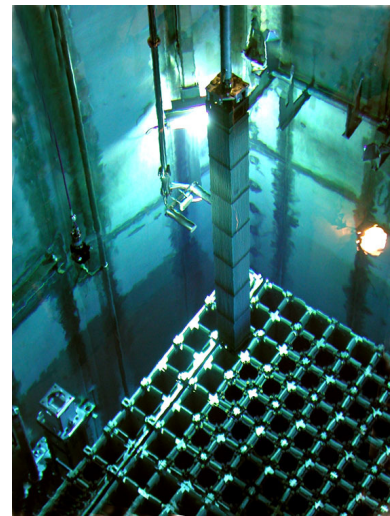
6. Sala de turbines de la central nuclear d'Almaraz.

11. **Transformador:** s'encarrega d'augmentar la tensió de l'electricitat generada a l'alternador per ser enviada a la xarxa elèctrica d'alta tensió.
12. **Condensador:** és la màquina que refreda el vapor a alta pressió que prové de les turbines i el transforma en aigua líquida a pressió ambiental. Dins al condensador entren en contacte dos circuits, el circuit primari i el circuit secundari.
13. **Circuit secundari:** transporta aigua del mar fins al condensador per refrigerar el vapor del circuit primari. Quan el cabdal d'aigua és insuficient, és necessari construir torres de refrigeració per expulsar el vapor d'aigua a l'atmosfera.

14. Bombes de recirculació: són unes bombes elèctriques que impulsen l'aigua cap al reactor nuclear.

15. Piscina de condensació de vapor. És una piscina situada per sota del reactor de forma de tub cilíndric que té entre 5 i 6 metres de diàmetre i conté aigua. La seva funció és de seguretat. Quan dins del vas del reactor s'assoleixen temperatures i pressions massa altes, el vapor es pot evacuar a través d'uns conductes fins la piscina condensadora de vapor, a on es refreda i es condensa en aigua líquida. Aquesta funció permet disminuir la pressió de l'interior del vas del reactor.

16. Piscines de combustible gastat: Són unes grans piscines a on es guarden els elements combustibles que ja estan gastats però que continuen estant massa calents i són massa radioactius com per poder ser transportats just després de la seva extracció. El combustible s'ha de mantenir guardat durant 5 o 10 anys, fins que es refreden suficientment i es redueix la radioactivitat dels productes. Tenen entre 15 i 20 metres de profunditat i estan plenes d'aigua, que actua com a refrigerant i serveix com a blindatge contra la radiació. Les piscines tenen grues i dipòsits interns per moure i emmagatzemar el combustible usat. Estan situades als costats de la primera contenció de la part superior de l'edifici. També necessiten refrigeració i tenen sistemes que funcionen amb energia elèctrica.



7. Magatzem a la piscina de la central nuclear de Trillo.

o o o o o

2.1.4 Funcionament de la central nuclear

Quan es produeix la reacció de fissió en cadena es desprèn calor. Aquesta calor és absorbida pel refrigerant d'aigua que envolta els elements combustibles. Llavors es transforma en vapor, ascendeix pel nucli del reactor, passant per separadors i assecadors d'humitat, i es condueix cap a les turbines a través del circuit primari.

El vapor fa moure les turbines, que produeixen un moviment mecànic que es transforma en energia elèctrica a l'alternador i és enviada a la xarxa elèctrica.

Després el vapor d'aigua que ha passat per les turbines es condueix al condensador tèrmic, on es condensa gràcies al contacte amb el circuit secundari per on hi circula l'aigua freda que prové del mar. L'aigua líquida, el refrigerant, es mou gràcies a unes bombes de recirculació i es retorna al nucli del reactor, on reinicia tot aquest procés.

.....

2.1.5 Control de la reacció de fissió en cadena

Als reactors BWR hi ha dos sistemes per controlar la potència de la reacció de fissió en cadena. Es controla introduint les barres de control o variant el flux de l'aigua que circula pel reactor.

2.1.5.1 Barres de control

És el mètode comú en la majoria de reactors nuclears. Variant la posició de les barres, que s'introdueixen entre el combustible, s'augmenta o es disminueix l'absorció de neutrons. Com menys introduïdes estiguin les barres de control, més neutrons lliures hi haurà a la reacció i més gran serà la potència. Però a mesura que les barres es vagin introduint, absorbiran més neutrons i la potència disminuirà.

Normalment aquest control s'utilitza quan el reactor treballa fins al 70% de la seva potència.

2.1.5.2 Control variant el flux d'aigua

Es basa en la propietat moderadora de l'aigua, és a dir, en la moderació de la velocitat dels neutrons ràpids productes de les fissions nuclears. Augmentant o disminuint el flux d'aigua es variarà la seva quantitat que envolta el nucli del reactor i afectarà a la probabilitat de que hi hagi més o menys neutrons lliures moderats.

Si s'apuja el flux d'aigua líquida, s'augmentarà la seva quantitat al nucli i hi haurà més moderació de neutrons. És a dir, que hi haurà més neutrons lents que seran absorbits pel material fissible i, consegüentment, la potencia del reactor serà major.

Si es disminueixi el flux d'aigua, el procés serà a l'inrevés. Baixarà el nivell de l'aigua dins el reactor i es moderaran les velocitats de menys neutrons, de manera que el combustible fissible també n'absorbirà menys i la potencia disminuirà.

Aquest mètode normalment es fa servir quan la central opera entre el 70% i el 100% del seu rendiment.

3 ACCIDENT NUCLEAR DE FUKUSHIMA

Un dels terratrèmols més forts de la història, posteriorment un gran tsunami devastador i conseqüentment una gran crisi nuclear han provocat que Japó s'hagi d'enfrontar a la pitjor crisi des de que es va acabar la Segona Guerra Mundial.

Com a conseqüència d'aquesta gran catàstrofe natural fins a tres centrals nuclears japoneses, Fukushima Dai-ichi, Otagawa i Tokai, han tingut dificultats per refrigerar els reactors que havien estat en funcionament. Però on la crisi nuclear ha estat més greu és a la central nuclear de Fukushima Dai-ichi.

Fins ara no s'havia produït cap successió de problemes semblant en una central nuclear i amb diverses unitats afectades simultàniament de manera que derivés a una situació d'apagament total i a una continuada fallida dels sistemes de refrigeració dels quals està dotada la central nuclear. La gravetat de l'accident, equiparable al pitjor accident nuclear de la història, el de Txernòbil, i el perill d'emissió de radioactivitat van alarmar tota la població mundial i indubtablement ha provocat la qüestió de molts aspectes de l'energia nuclear i la seva seguretat.

Per analitzar el sinistre de la central nuclear japonesa en coneixerem els principals esdeveniments i les causes que van portar a un accident d'aquesta magnitud. Posteriorment estudiarem de quina manera va afectar la crisi en cadascun dels reactors i finalment veurem quines n'han sigut les conseqüències mediambientals, polítiques i socials més importants.

3.1 CRONOLOGIA I ANÀLISI

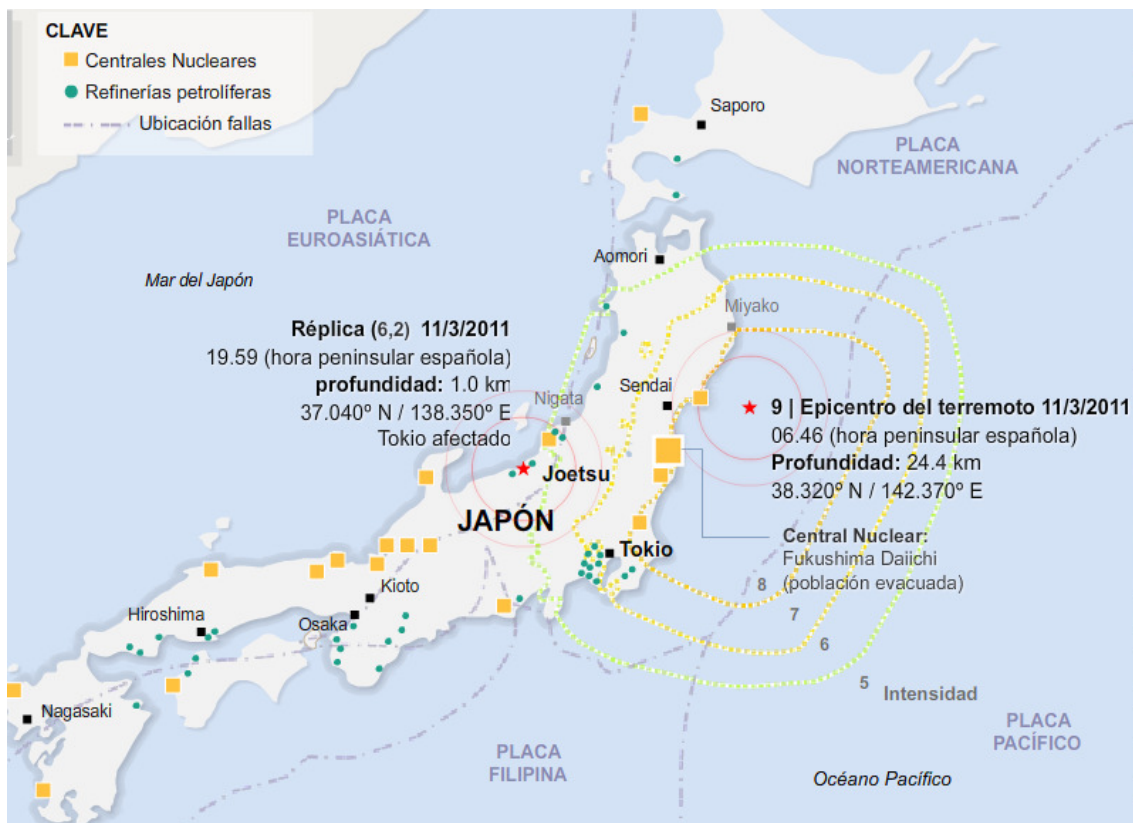
El divendres 11 de març del 2011 l'Agència de Seguretat Nuclear i Industrial del Japó (NISA) va decretar l'estat d'emergència a les centrals nuclears de Fukushima Dai-ichi i de Fukushima Dai-ni després de ser afectades per un terratrèmol i un tsunami. L'accident que es va produir a la central de Fukushima Dai-ichi va ser conseqüència d'un apagament total de les fonts d'electricitat i una successió de fallides que van afectar a les funcions de control i a la refrigeració dels reactors de la central. Durant el desenvolupament de l'accident i al llarg de les setmanes va augmentar la gravetat de la situació i el 12 d'abril del 2011 es va declarar un accident de nivell 7 en l'Escala Internacional d'Accidents Nuclears (INES).

o o o o o

3.1.1 El terratrèmol

Anomenat gran terratrèmol de l'est del Japó a la costa del Pacífic es va produir prop de la regió de Tōhoku i va ser d'una magnitud de 9,0 graus en l'Escala de Richter, el quart més fort dels registrats a nivell mundial i el més intens produït al Japó des de que se'n fa un registre històric iniciat al segle XIX.

El terratrèmol es va produir pel xoc de les plaques tectòniques Nord-americana i del Pacífic, que es troben en subducció. L'epicentre es situa sobre l'oceà Pacífic a 130 km de la ciutat de Sendai, a la costa oriental de Honshu. Els efectes del terratrèmol sobre les zones urbanes del Japó van ser mínims si ho comparem amb els esdeveniments posteriors.



8. Mapa de Japó sobre el terratrèmol de 9 graus en l'escala de Richter de l'11 de març de 2011.

3.1.1.1 Conseqüències a les centrals nuclears

En el moment del terratrèmol es va realitzar una parada segura automàtica de les centrals nuclears més properes a l'epicentre, les centrals d'Onagawa, de Fukushima I i de Fukushima II. Finalment es van aturar fins a 11 centrals en total després del moviment sísmic.

En aquell moment la central de Fukushima Dai-ichi tenia els reactors 1, 2 i 3 en funcionament i l'aturada automàtica de seguretat no va comportar cap problema. El reactors 4, 5 i 6 ja estaven apagats per una revisió de manteniment.

Com a conseqüència del terratrèmol la central nuclear va deixar de produir energia elèctrica per al funcionament intern a causa de l'activació d'un mecanisme de seguretat. Es van tancar automàticament unes vàlvules que aïllaven el reactor i aturaven el subministrament de vapor d'aigua a les turbines per evitar una pèrdua de refrigerant en cas d'algun trencament de les conduccions i l'emissió de gasos radioactius a l'exterior. Per tant, el subministrament elèctric intern va quedar restringit automàticament.

La central també va perdre tots els sistemes de subministrament d'energia exterior per la caiguda de diferents torres de la xarxa elèctrica i la fallida d'un transformador elèctric situat a 10 km de la central que connectava les seves instal·lacions amb la línia elèctrica general exterior. Per tant, la central va patir una pèrdua de la font d'electricitat externa que posteriorment afectaria greument al desenvolupament correcte de l'apagada freda dels reactors un cop ja estaven aturats.



9. Transformador elèctric, que subministra energia a la central de Fukushima I afectat pel terratrèmol.

El principal objectiu dels operaris de la central era apagar els reactors que havien estat aturats perquè encara emetien calor residual produït per la desintegració dels productes de la fissió nuclear.

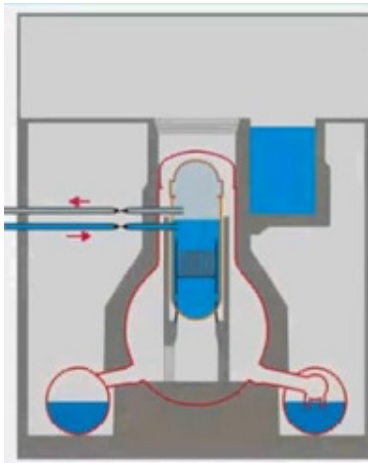
En una situació normal s'activaria el sistema d'evacuació de calor residual.

3.1.1.1 Sistema d'evacuació de calor residual (RHR)

Quan una reacció de fissió en cadena s'atura els productes derivats continuen emetent radiació de partícules i, per tant, segueixen produint un calor residual. Aquesta calor que es desprèn del nucli del reactor s'ha d'anar extraient durant un temps fins que l'emissió disminueix a un nivell acceptable en el qual ja no cal continuar el procés de refrigeració.

Els reactors tenen un sistema d'evacuació de calor residual format per un conjunt de mecanismes de bombes de recirculació, intercanviadors de calor, vàlvules de conduccions i altres dispositius que permeten que l'aigua circuli pels conductes adequats i que el vapor format en passar pel nucli dels reactors es condensi als

intercanviadors de calor, de manera que es mantingui una refrigeració constant del nucli del reactor.



10. Esquema del funcionament del sistema d'evacuació de calor residual (RHR).

Aquest sistema de refrigeració necessita una font elèctrica que faci funcionar les bombes de recirculació, però la central no disposava d'aquest subministrament elèctric i no el va poder activar.

Els operaris van seguir el protocol d'emergències i van activar una segona línia de defensa per al subministrament elèctric. Es van posar en funcionament uns generadors dièsel d'emergència i unes bateries acumuladores d'energia.

3.1.1.1.2 Activació dels generadors dièsel d'emergència

La central té una línia de defensa d'una font d'electricitat de suport per refrigerar els nuclis dels reactors en el cas que falla el subministrament tant exterior com interior.

Hi ha 13 generadors dièsel d'emergència en total, 2 connectats en cadascun dels reactors 1-5 i 3 al reactor 6. Cada generador produeix fins a 6 MW/h d'energia i estan situats a la planta baixa, prop dels reactors i de les sales de turbines.

Conjuntament amb aquesta nova font d'electricitat es van activar les bateries acumuladores d'energia, que donaven un suport elèctric complementari.

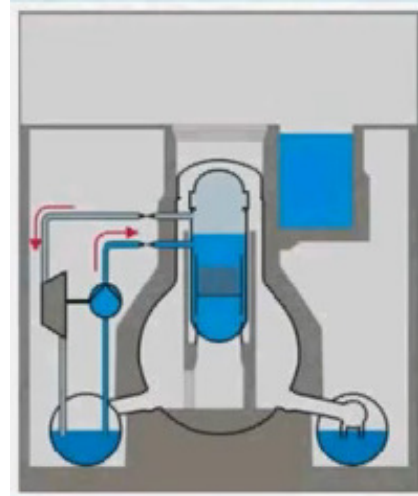
3.1.1.1.3 Activació de les bateries acumuladores d'energia

Les bateries acumuladores d'energia subministren electricitat per a alguns dispositius i sistemes de control limitats, així com vàlvules i indicadors de nivells. Aquests acumuladors d'energia de reserva duren unes 8 hores aproximadament, mentre no es recarreguen per mitjà dels generadors. Durant el seu funcionament encara es va poder mantenir la refrigeració dels reactors aturats fins que es van esgotar.

Els treballadors van poder activar els sistemes d'emergència de refrigeració del nucli (ECSS), dels quals un dels més importants és el sistema de refrigeració del nucli aïllat.

3.1.1.1.4 Sistema de refrigeració del nucli aïllat (RCIC)

El RCIC proporciona aigua de suport al nucli durant una parada del reactor si no es disposa d'aigua d'alimentació. S'activa automàticament quan es rep una senyal de nivell baix d'aigua al reactor des del sistema de control o manualment per un operari del reactor. Es bombeja aigua de refrigeració al nucli mitjançant una bomba accionada per turbines utilitzant el vapor del sistema del reactor. L'aigua que es bombeja pot provenir d'un dipòsit d'emmagatzematge o de la piscina condensadora de vapor.



11. Esquema funcionament del sistema de refrigeració del nucli aïllat.

Amb aquest sistema la refrigeració dels reactors continuava en funcionament.

o o o o o

3.1.2 El tsunami

Després del terratrèmol de magnitud 9 en l'Escala de Richter, l'Agència Meteorològica del Japó va alertar a totes les regions costaneres del Pacífic de la possible arribada d'un tsunami. On aquest va afectar més va ser a la costa oriental japonesa que va rebre ones de més de 10 metres en algunes zones, sobretot a les prefectures de Fukushima, de Miyagi i d'Iwate, les més properes a l'epicentre del terratrèmol.



12. Tsunami de l'11 de març al Japó vist des d'un poble proper a l'oceà Pacífic.

Gran part de les zones costeres van quedar arrasades per ones gegants que s'emportaven tot allò que es trobaven, com automòbils, camps de cultiu i cases senceres. Molts nuclis urbans van quedar destruïts com va ser el cas de la ciutat de Sendai, amb més d'1 milió d'habitants. També es van decretar més de 200 incendis en diverses prefectures, afectant a indústries petroquímiques, vivendes i automòbils.



13. Ciutat japonesa arrasada pel tsunami de l'11 de març de 2011.

El 24 de març organismes oficials del Japó van confirmar que el nombre de víctimes mortals ja es trobava superior a les 25.000 en sis diferents prefectures i el de desapareguts era de 16.094.

El tsunami també va afectar a les centrals nuclears de Fukushima I i II.

A la central de Fukushima I hi van arribar ones superior als 10 metres, que després de superar un trencaones de 2,5 km de llargada i un mur de 5,6 metres d'alçada que protegien la central, va arribar a les seves instal·lacions i en va inundar diferents zones fins a 6 metres de profunditat. Moltes instal·lacions van quedar afectades i van quedar malmesos 12 dels 13 generadors dièsel d'emergència que estaven en funcionament. Una hora després del terratrèmol aproximadament, només un dels generadors podia proporcionar electricitat. Poc més tard els acumuladors d'energia també es van esgotar i el sistema de refrigeració d'emergència del nucli es va aturar.

Els sistemes de control van patir diversos incidents degut al mal subministrament elèctric i van provocar que els operaris de la central no poguessin analitzar la situació fins passades dues hores després del terratrèmol. Quan TEPCO va reconèixer la situació en va informar a les autoritats japoneses.

El govern, a les 19:03 hores, tres hores i poc més tard des de que el tsunami inutilitzés els generadors dièsel, va decretar l'estat d'emergència nuclear i va iniciar l'evacuació de la població que es trobava pels voltants de la central, en un radi de 3 km.

Els esforços dels operaris es van centrar en aportar energia a les instal·lacions de la central per mantenir el sistema de refrigeració. Es van dotar de més generadors elèctrics transportats expressament i d'un equip de bombers especialitzat que va intentar

instal·lar-los a la central. Però va ser impossible utilitzar-los perquè les instal·lacions continuaven inundades i no van poder connectar-los.

Finalment, la central va quedar aïllada de qualsevol font d'energia elèctrica i es va esdevenir una situació d'apagament total.



14. Inundació de les instal·lacions de la central de Fukushima Dai-ichi.



15. Ones acostant-se als dipòsits d'oli del reactor 5 de la central de Fukushima I.

.....

3.1.3 Accident nuclear per apagament total

Les fonts d'energia elèctrica van quedar inutilitzades i la central no podia continuar amb la refrigeració dels reactors. Per tant, els reactors 1, 2 i 3, els que havien estat en funcionament abans del terratrèmol, es van començar a sobreescalfar. També van començar a sorgir problemes amb la refrigeració del combustible usat que es trobava a les piscines d'emmagatzematge de combustible. Tot i que al cap d'unes hores els reactors es van tornar a refrigerar injectant aigua, les conseqüències per aquesta insuficiència van ser inevitables.

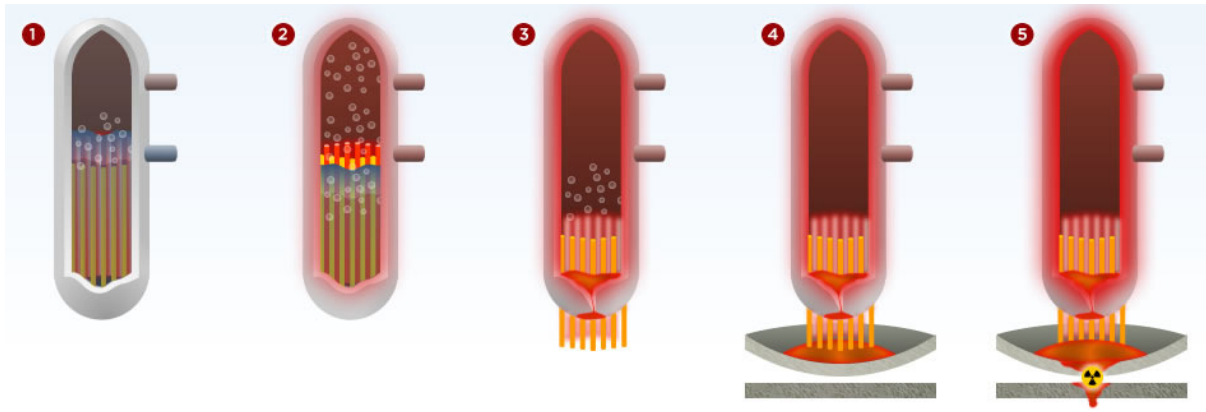
Per la falta de refrigeració es van produir descobriments dels nuclis dels reactors i diversos incidents a les piscines d'emmagatzematge de combustible gastat.

Als reactors 1, 2 i 3 es van produir fusions parcials dels nuclis.

.....

3.1.4 Fusió del nucli d'un reactor

Quan un reactor perd tots els sistemes de refrigeració i no es pot extreure la calor residual la temperatura del nucli comença a augmentar i l'aigua es va evaporant, fent disminuir el seu nivell. Si no s'injecta aigua nova, el nivell pot disminuir fins descobrir el nucli del reactor que aquesta envolta.



16. Evolució d'una fusió del nucli d'un reactor nuclear.

Als 2000 °C el zirconi dels elements combustibles es fon i deixa exposades les piles de combustible d'urani. Aquestes es comencen a fondre quan s'assoleixen els 3000 °C. Es tornen una massa semisòlida compacta que es va desprendre al fons del vas del reactor.

El reactor continua augmentant de temperatura pel procés de fissió, si aquest encara es produeix, però que no era el cas de Fukushima I, i per la desintegració dels productes de les reaccions nuclears.

Aquesta massa es comença a filtrar pel vas de contenció fins que cau al fons de la primera contenció, una altra barrera de protecció.

En el pitjor dels casos el nucli fos podria filtrar-se per les següents contencions i alliberar grans quantitats de radioactivitat a l'exterior del reactor, com va succeir a l'accident nuclear de Txernòbil.

A la central de Fukushima Dai-ichi, les conseqüències per la falta de refrigeració dels nuclis dels reactors van ser diferents per a cada reactor, ja que les condicions tampoc eren les mateixes. Es van produir fusions parcials dels elements combustibles d'alguns reactors i alguns dels vasos de contenció van quedar danyats, provocant pèrdues de refrigerant.



17. Nucli del reactor 2 parcialment fos de la central nuclear de Three Miles Island.

◦◦◦◦◦

3.1.5 Refrigeració de les piscines de combustible gastat

Les piscines de combustible gastat, que estan situades al costat superior de les contencions primàries dels reactors, també necessiten refrigeració i la central ja té uns sistemes de refrigeració determinats per a les piscines, però tots funcionen amb energia elèctrica.

Quan es queden sense refrigeració segueixen un procés semblant al que es produeix a l'interior del nucli d'un reactor que es queda sense refrigeració. El combustible es comença a escalfar fins que l'aigua entra en ebullició. L'evaporació de l'aigua provoca que el seu nivell vagi disminuint fins que el combustible gastat queda al descobert.

El zirconi que hi ha a les barres de combustible, en augmentar la temperatura i amb la presència del vapor d'aigua, pot separar l'oxigen i l'hidrogen, provocant una concentració de l'hidrogen, que és combustible amb l'oxigen i pot generar explosions. A més a més, l'augment de les temperatures fa que les barres de combustible gastat es deformin i es trenquin, alliberant isòtops radioactius del seu interior.

També es poden produir incendis com a conseqüència de la ràpida oxidació de l'urani, que encara queda, i provocar emissions de vapors radioactius.

Hi va haver problemes greus per refrigerar les piscines de combustible gastat als reactors 1, 2, 3 i sobretot al 4, que és el que tenia més elements combustibles emmagatzemats. Inicialment es creia que es van malmetre els elements combustibles gastats, però al cap d'uns mesos es va comprovar que no van patir danys.

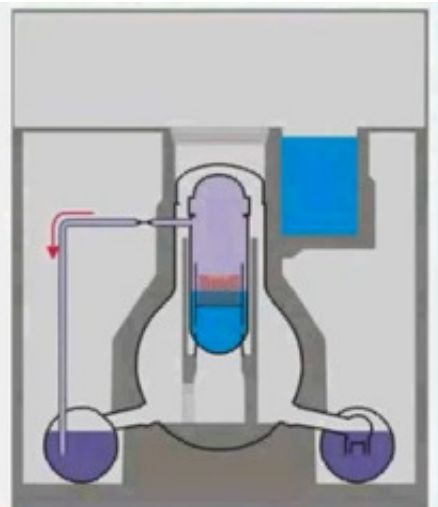
L'absència de refrigeració als nuclis dels reactors va provocar que l'aigua que hi havia es comencés a evaporar i la pressió dins al reactor augmentés. Però hi havia un sistema de seguretat que va permetre alliberar vapor de dins del vas de contenció del reactor.

◦◦◦◦◦

3.1.6 Despressurització del reactor. Evacuació del vapor

Un augment de la pressió dins al reactor pot afectar i malmetre la seva contenció primària i provocar fugues de radioactivitat. Per evitar aquest augment de pressió existeix un sistema d'alleujament de pressió nuclear, que allibera vapor per disminuir la pressió del reactor.

3.1.6.1 Sistema d'alleujament de pressió del vas del reactor



18. Esquema del funcionament del sistema d'alleujament de pressió del vas del reactor.

Aquest sistema protegeix el vas del reactor davant de possibles desperfectes per un excés de pressió. Disposa d'unes vàlvules d'alleujament i de seguretat que s'accionen automàticament quan es detecta un nivell determinat de pressió i evacuen el vapor del reactor a la piscina supressora de pressió.

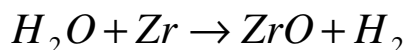
Per tant, en augmentar la pressió del vapor dins del reactor, les vàlvules d'alleujament i seguretat van evacuar el vapor cap a la piscina supressora de pressió, a on es va refredar i condensar ràpidament.

o o o o o

3.1.7 *Explosions d'hidrogen*

Degut a la falta de refrigeració dels nuclis dels reactors i el descens del nivell d'aigua que envolta el nucli del reactor a causa de la seva vaporització es va produir un descobriment del nucli del reactor.

Al nucli del reactor hi trobem els elements combustibles, que contenen el combustible recobert per unes beines de zirconi metàl·lic. El vapor d'aigua i el zirconi, quan entren en contacte reaccionen, de manera que el zirconi s'oxida i es produeix hidrogen:



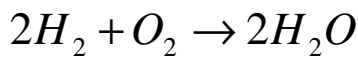
En condicions normals el vapor d'aigua i l'hidrogen produït es dirigeixen cap a un sistema de ventilació de seguretat.

3.1.7.1 Sistema de ventilació amb filtre i recombinadors d'hidrogen

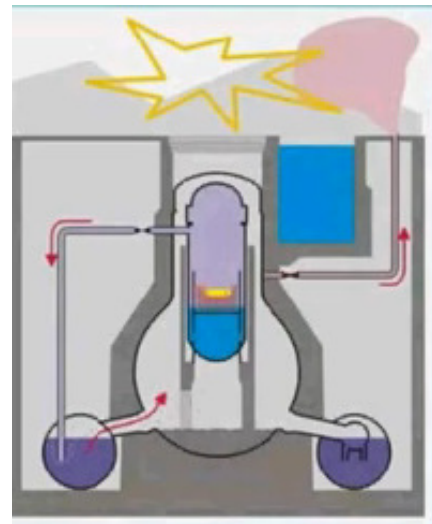
És un sistema que filtra els gasos evacuats de la radiació perquè puguin ser alliberats a l'exterior. L'hidrogen també passa per uns dispositius recombinadors d'hidrogen que el cremen controladament exposant-lo amb aigua. Finalment el vapor d'aigua s'evacua a través de la xemeneia a zones elevades de l'exterior.

Però degut a la situació d'apagament total els sistemes de ventilació i els recombinadors d'hidrogen no van funcionar i els gasos es van filtrar per diferents conductes i es van acumular a la part superior de la contenció secundària.

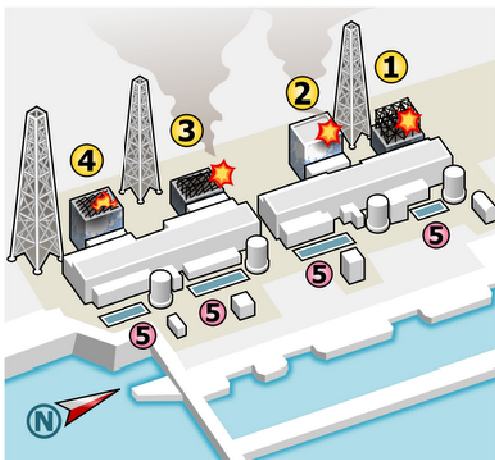
Quan l'hidrogen es troba a l'aire en una concentració superior al 4% reacciona de forma explosiva amb l'oxigen quan aquest supera el 8% de concentració i l'explosió es pot iniciar per l'acció d'una guspira o per autoignició.



Tot i controlar la despressurització del reactor no es va poder evitar l'evacuació de suficient hidrogen perquè aquest reaccionés amb l'oxigen de l'aire de la contenció secundària i provoqués explosions d'hidrogen.



19. Esquema de les explosions d'hidrogen dels reactors 1 i 3.



20. Esquema dels reactors 1, 2, 3 i 4 afectats per explosions d'hidrogen.

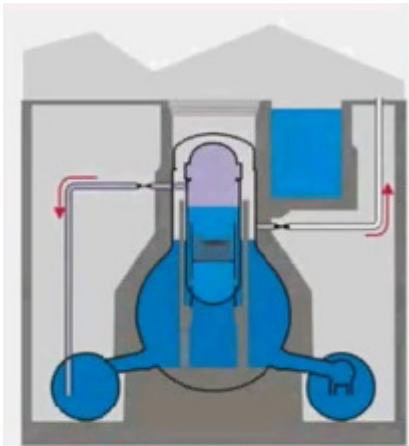
Hi va haver explosions d'hidrogen als reactors 1, 2, 3 i 4. Als reactors 1 i 3 es van produir a la part superior del reactor, afectant només a la segona contenció. Al reactor 2 es va produir a la part inferior del reactor, prop de la piscina de condensació de vapor. I al reactor 4 es va produir prop de la piscina de combustible gastat per hidrogen que provenia del reactor 3 i que s'havia filtrat per alguns conductes malmesos.

Durant unes hores els reactors van estar sense refrigerar-se i, per tant, sense control possible del que pogués estar succeint al seu interior. Els bombers d'emergència, els operaris de la central, els dirigents de TEPCO van estar treballant per controlar la situació i van iniciar un pla d'emergència en un nou intent per refrigerar els reactors.

o o o o o

3.1.8 Pla d'emergència: injecció d'aigua als reactors

Es va iniciar un pla per injectar aigua borada als reactors per refrigerar-ne els nuclis. En alguns reactors es va injectar inicialment aigua de mar borada però després es va canviar per aigua borada tractada. En altres es va introduir directament aigua tractada. Segurament aquesta mesura faria malbé els materials dels reactors i significaria el malbaratament definitiu d'aquests.



21. Esquema de la injecció d'aigua als reactors per refrigerar-los.

A l'aigua s'hi va afegir àcid bòric perquè és absorbent de neutrons. Es volia evitar la possibilitat de criticitat⁴.

El pla d'actuació consistia en omplir els nuclis dels reactors i aquest va ser el sistema que es va mantenir durant les posteriors setmanes per refrigerar els reactors.

El 25 de març, quan les condicions ho van permetre, es va començar a substituir l'aigua del mar borada que refrigerava els reactors per aigua dolça borada.

Quan la central no disposava d'electricitat la injecció d'aigua es va dur a terme pels equips de bombers d'emergència que hi estaven treballant, utilitzant els camions de bombers.

Però durant les setmanes següents els esforços dels dirigents de TEPCO també es van centrar en restaurar les fonts externes d'energia elèctrica a cadascun dels reactors, per poder restablir els controls de seguretat dels reactors.

A finals de març, els camions de bombers es van substituir per bombes i generadors que van continuar injectant aigua als reactors.

Progressivament els treballadors van anar instal·lant els diferents dispositius necessaris per poder subministrar energia als sistemes de control i vigilància dels reactors i finalment van poder substituir la refrigeració d'emergència dels nuclis per sistemes propis de la central.

⁴ Criticitat: condicions perquè hi hagi una massa crítica o supercrítica de combustible.

o o o o o

3.1.9 Possibilitat de criticitat

Hi havia la possibilitat que en el combustible, parcialment fos, s'hi adequessin unes condicions de criticitat, és a dir, unes condicions favorables perquè s'iniciés una reacció de fissió que, en aquesta situació seria una reacció aïllada però incontrolada. L'objectiu d'injectar un material absorbent de neutrons era reduir aquesta possibilitat de criticitat.

o o o o o

3.1.10 Introducció de nitrogen als reactors

A partir de les primeres setmanes d'abril es va començar a introduir nitrogen a la contenció primària del reactor 1 per evitar que s'hi formessin les condicions adequades que donarien lloc a més explosions d'hidrogen com les que van succeir als inicis de la crisi. Aquest pla també era aplicable als altres reactors sinistrats, els reactors 2, 3 i 4.

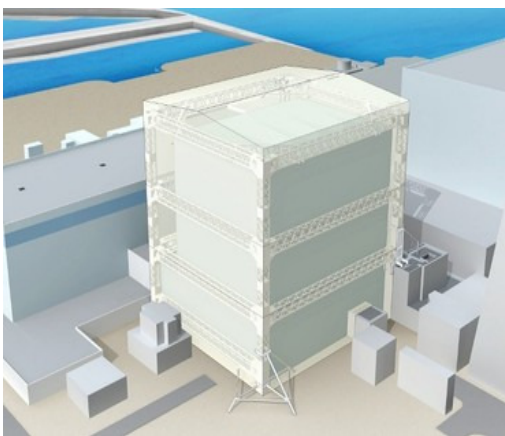
El nitrogen no reacciona amb l'hidrogen i químicament és estable.

Es tractava d'una mesura preventiva i el seu objectiu era crear una atmosfera inerta, lliure d'oxigen. Malgrat tot, l'Agència de Seguretat Nuclear i Industrial del Japó (NISA) va advertir que aquesta acció podria comportar filtracions de gasos radioactius fora de la contenció primària i va demanar que es dugués a terme controladament i vigilat els nivells de radioactivitat dels voltants.

o o o o o

3.1.11 Construcció d'una coberta als reactors

TEPCO va decidir construir una coberta a l'edifici del reactor 1, malmès per l'explosió



22. Disseny de la nova coberta que protegirà els reactors nuclears.

d'hidrogen, per poder contenir els gasos radioactius que se'n desprenien i reduir-ne l'emissió. Es tracta d'una coberta formada per làmines de polièster que va acompanyada d'un sistema de ventilació que en filtra les substàncies contaminants.

Es va començar a construir a finals de juny de 2011 i es va acabar a finals d'octubre del mateix any.

La companyia també està considerant

construir-ne unes altres als reactors 3 i 4, que també tenen malmesos els edificis, però primer és necessari retirar la runa de cada recinte.

.....

3.1.12 Parada freda dels reactors

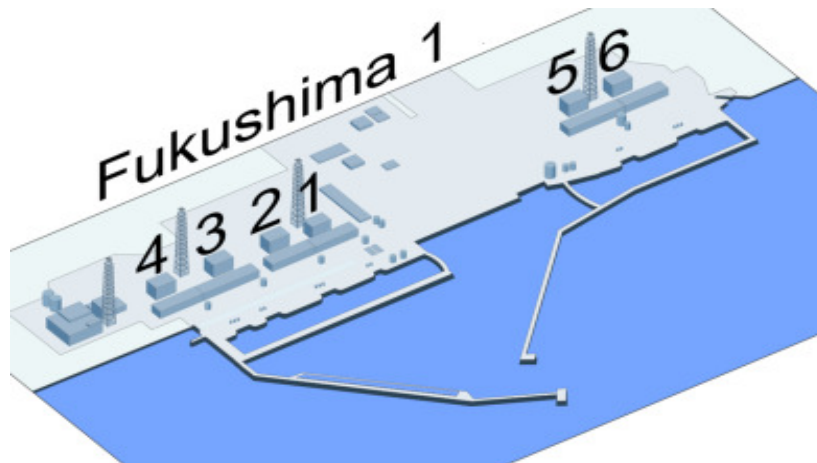
A l'abril de 2011 el govern japonès va preveure que la central de Fukushima I es tancaria en un termini d'entre 6 i 9 mesos, quan aconseguís la parada freda de tots els reactors. Finalment han assolit aturar-los dins del termini que es van marcar.

La parada freda d'un reactor és la parada del seu funcionament perquè ja emet una calor residual mínima i no hi ha cap possibilitat de que es produeixi cap situació de perill. Llavors el reactor ja es pot deixar de refrigerar.

La parada de cada reactor es va produir en unes dates diferents, però l'últim en aturar-se va ser al desembre del 2011, nou mesos després de l'inici de l'accident nuclear. Es va poder confirmar la fi del sinistre de la central de Fukushima Dai-ichi i el seu tancament definitiu. Però evidentment, per tornar a la normalitat caldrà temps i treball per poder netejar i desmantellar la central.

3.2 ESTAT DELS REACTORS

El desenvolupament de l'accident no va afectar de la mateixa manera en cadascun dels reactors de la central perquè les condicions tampoc eren les mateixes. Per tant, és necessari analitzar els problemes que va presentar cada reactor i quines en van ser les conseqüències. Els reactors afectats van ser els 1, 2, 3 i també el 4.



23. Esquema dels reactors de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi.

o o o o o

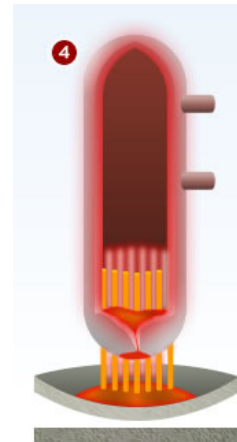
3.2.1 Reactor 1

El reactor 1 es va parar de forma segura quan es va produir el terratrèmol. Després els operaris van començar a tenir alguns problemes en sistemes de control per la refrigeració i la TEPCO va declarar la situació d'emergència nuclear pels reactors 1 i 2.

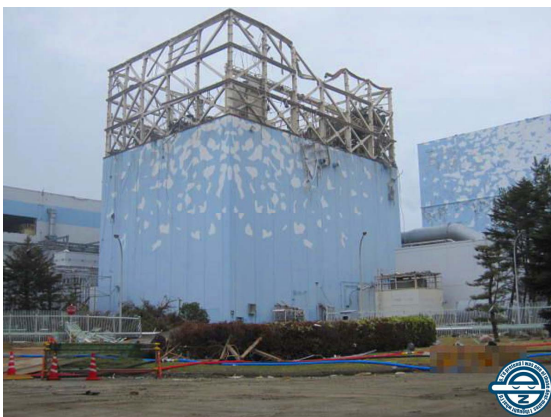
Es va perdre el subministrament exterior i el tsunami va malmetre els generadors. Llavors la central es va quedar en situació d'apagament total.

Van tenir dificultats per refrigerar el nucli del reactor i conseqüentment en van quedar exposats els elements combustibles. Van patir una fusió parcial entre un 55% i un 70% i la part inferior del vas de contenció es va danyar, de manera que també es va començar a filtrar aigua radioactiva. S'estima que els danys d'aquest

nucli del reactor van ser els més greus de tots els reactors i que el nucli fos es va filtrar a través del vas del reactor i va caure sobre la primera contenció de formigó, provocant la producció de gasos per reaccions químiques amb el formigó.



24. Possible estat del nucli fos del reactor 1.



25. Estat del reactor 1 després de l'explosió d'hidrogen.

Durant una despressurització del reactor es va produir el 12 de març una explosió d'hidrogen a la part superior de la segona contenció. Les parets i el sostre de l'edifici es van ensorrar i la radiació al voltant del reactor va augmentar. L'edifici va quedar menys afectat que els altres que també van patir explosions d'hidrogen.

El 12 de març també van començar a refrigerar el nucli amb aigua de mar borada mitjançant els camions de bombers. Més tard es va substituir l'aigua de mar borada per aigua dolça. A mesura que van anar passant les setmanes es va anar restablint l'electricitat en algunes parts del reactor i es van utilitzar bombes de propulsió elèctrica per injectar aigua al reactor.

El 24 de març van tenir problemes a les piscines de combustible gastat però els elements combustibles no van quedar exposats.

El 7 d'abril es va introduir nitrogen al reactor per evitar explosions d'hidrogen i el 5 de maig van començar a instal·lar al reactor uns sistemes de ventilació per filtrar l'aire radioactiu i a construir una coberta a l'edifici destruït.

A partir del 13 de maig es van preparar les obres per a la construcció de la coberta a l'edifici del reactor i es va començar a muntar el 28 de juny, fins que van acabar-ne la instal·lació el 28 d'octubre.



Finalment el 21 d'agost TEPCO va confirmar la **26. Construcció de la coberta del reactor 1.** parada freda del reactor.

En resum, els principals problemes i danys que hi van haver al reactor són:

- Situació d'apagament total.
- Problemes amb la refrigeració del nucli del reactor.
- Fusió parcial del nucli entre un 55% i un 70% i filtració del nucli fos a la primera contenció.
- Danys a la part inferior del vas del reactor i filtracions d'aigua radioactiva.
- Explosió d'hidrogen a la part superior de la segona contenció .
- Problemes amb el nivell d'aigua de les piscines de combustible gastat.

.....

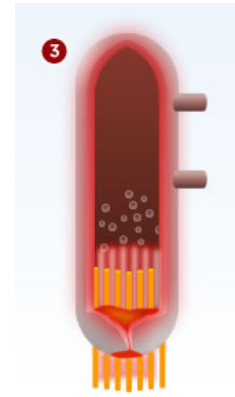
3.2.2 Reactor 2

El reactor 2 també va tenir una parada segura quan es va produir el terratrèmol. També es van activar els generadors dièsel, però el tsunami els va inutilitzar. Llavors es va declarar la situació d'emergència nuclear pel reactor.

Fins al 14 de març van poder mantenir la refrigeració del nucli del reactor mitjançant els acumuladors d'energia i generadors mòbils, però el reactor va patir una pèrdua de pressió i els sistemes de refrigeració van fallar. L'explosió d'hidrogen del reactor 3 també va provocar danys al sistema de refrigeració d'aquest reactor.

Els elements combustibles van quedar exposats diverses vegades i van quedar danyats en un 33%. Es va produir una fusió parcial del nucli i es creu que el nucli fos va caure sobre la part inferior del vas del reactor.

El 15 de març es va recuperar la refrigeració injectant aigua de mar borada al reactor però es va produir una explosió d'hidrogen a la part inferior del vas del reactor. Era el tercer reactor que patia una explosió. Es van danyar la piscina condensadora de vapor i el vas del reactor i conseqüentment es va filtrar aigua radioactiva que va arribar al mar. Malgrat això, l'edifici del reactor no va quedar danyat.



27. Estat estimat del nucli del reactor 2.



28. Fum blanc sortint del reactor 2 el 23 de març de 2011.

El 20 de març van sorgir problemes de refrigeració a les piscines de combustible gastat i van injectar-hi aigua de mar.

Posteriorment la refrigeració es va substituir per aigua dolça i finalment la van connectar en un sistema circulatori de la central, quan van recuperar l'electricitat.

L'11 de juny van instal·lar uns sistemes de ventilació a l'edifici del reactor per filtrar l'aire radioactiu contingut i el 28 de juny van injectar nitrogen al reactor.

La refrigeració es va mantenir durant mesos però l'1 de novembre van tornar a tenir problemes. Es van detectar gasos, com ^{135}Xe i ^{133}Xe , que eren producte d'una fissió nuclear aïllada en alguna part del reactor. Es va decidir introduir àcid bòric absorbent de neutrons.

Finalment el desembre de 2011 es va aconseguir la parada freda del reactor.

En resum, els principals problemes produïts en aquest reactor van ser:

- Situació d'apagament total.
- Problemes amb la refrigeració del nucli del reactor.
- Danys en un 33% dels elements combustibles i fusió parcial del nucli.
- Explosió de vapor a la part inferior del vas del reactor i danys a la piscina condensadora de vapor.

- Danys al vas de contenció i fuga d'aigua radioactiva al mar.
- Problemes a la piscina de combustible gastat
- Fissions aïllades i incontrolades en alguna zona del reactor.

.....

3.2.3 Reactor 3

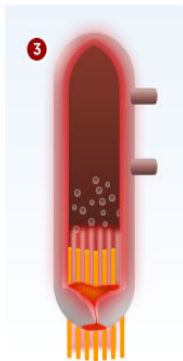
Al reactor 3 també es va fer una parada segura al moment del terratrèmol. Es van activar els generadors dièsel i els sistemes de refrigeració d'emergència del nucli quan el subministrament elèctric exterior es va perdre. Després del tsunami les bateries d'emergència i generadors mòbils van mantenir la refrigeració fins el 13 de març. Llavors es van quedar sense energia i el nivell d'aigua del reactor va baixar notablement.



29. Seqüència d'imatges de l'explosió

Els elements combustibles van quedar exposats i es va produir una fusió parcial del nucli. El mateix dia van començar a injectar aigua de mar borada.

El 14 de març es va produir una altra explosió d'hidrogen, la segona explosió a la central, en el procés d'alliberació de vapor per disminuir la pressió del reactor. Va ser semblant a l'explosió del reactor 1, ja que es va produir a la part superior de la segona contenció del reactor i també va provocar danys a l'edifici.



30. Estat estimat del nucli del reactor 3.

Aquest mateix dia també van començar a sorgir problemes a les piscines de combustible gastat i TEPCO va declarar l'existència d'un perill de criticitat a l'interior del reactor. Segurament es va arribar a produir alguna fissió nuclear aïllada i incontrolada.

El 25 de març es van detectar danys al vas de contenció del reactor i hi havia fugues de materials radioactius i d'aigua radioactiva. Segurament es va danyar a causa de la fusió del nucli.

L'1 de juliol la refrigeració de la piscina de combustible gastat es va connectar a un sistema circulatori de la central, ja que llavors ja s'havia pogut restaurar l'electricitat.

El 14 de juliol es va injectar nitrogen al reactor per evitar explosions d'hidrogen i finalment, el desembre de 2011 es va aconseguir la parada freda del reactor juntament amb el reactor 2.



31. Equip de bombers llançant aigua per sobre del reactor 3.



32. Fum sortint del reactor 2, després de quedar greument afectat per una explosió d'hidrogen.

Els principals problemes que va tenir el reactor 3 van ser:

- Situació d'apagament total.
- Problemes amb la refrigeració del nucli del reactor.
- Danys entre un 25% i un 30% dels elements combustibles i fusió parcial del nucli.
- Danys al vas de contenció i fuga d'aigua radioactiva.
- Explosió d'hidrogen a la part superior de la segona contenció i danys a l'edifici del reactor.
- Problemes amb la refrigeració de les piscines de combustible gastat.
- Perill de criticitat a les piscines de combustible gastat.
- Fissions aïllades i incontrolades en alguna zona del reactor.

.....

3.2.4 Reactor 4

El reactor 4 ja no estava en funcionament quan es va produir el terratrèmol perquè s'estaven fent revisions de manteniment. Es va aturar el 29 de novembre del 2010 i tots els elements combustibles estaven a la piscina d'emmagatzematge. Però com a conseqüència del sinistre dels altres reactors, aquest també va quedar afectat.

El 14 de març els operaris de la central van detectar un augment de la temperatura a la piscina de combustible gastat.

El 15 de març es va produir una explosió d'hidrogen prop de la piscina de combustible gastat que va provocar forats a les parets de l'edifici del reactor. Més tard es va descobrir que la causa de l'explosió va ser hidrogen filtrat per uns conductes provinents del reactor 3.



33. Explosió d'hidrogen del reactor 4.

El mateix dia es va iniciar un incendi a la piscina de combustible gastat que va durar uns 150 minuts. Van tenir problemes per mantenir-la refrigerada i la van omplir amb aigua de mar amb l'ajuda dels equips de bombers. Durant les següents setmanes la van anar refrigerant injectant aigua amb els camions de bombers, fins que es va restaurar el subministrament elèctric al reactor i van poder utilitzar unes bombes elèctriques.

Es va informar el 12 d'abril que alguns elements combustibles de la piscina podien estar danyats, però al cap d'uns mesos van poder comprovar que això no era cert i que els elements combustibles estaven en bon estat. Únicament el que havia sofert danys era l'estructura de la mateixa piscina a conseqüència de l'ensorrament del sostre de l'edifici del reactor.

Per això, el 9 de maig van començar a instal·lar una estructura de suport per evitar que patís més danys.

Finalment el 31 de juliol la refrigeració de la piscina es va substituir per un sistema circulatori de la central.



34. Vista del reactor 4 després de l'explosió d'hidrogen en una de les seves plantes.



35. Vista aèria del reactor 4 després de l'explosió d'hidrogen provinent del reactor 3.

En conclusió, els principals problemes que hi van haver al reactor 4 van ser:

- Problemes per refrigerar la piscina de combustible gastat.
- Explosió d'hidrogen que va afectar a l'estructura de la piscina.
- Incendi a la piscina de combustible gastat.
- Possibles danys als elements combustibles de la piscina.

.....

3.2.5 Reactors 5 i 6

Els reactors 5 i 6 no estaven en funcionament quan es va produir el terratrèmol. En el moment del tsunami un generador del reactor 6 va resistir i no va quedar afectat per la ona, de manera que va poder mantenir la refrigeració dels dos reactors fins que no es va restablir la línia elèctrica exterior.

No van tenir problemes greus com els altres reactors, tot i que al llarg dels mesos també van patir algunes incidències amb la refrigeració.

3.3 PERSPECTIVA DE FUTUR: DESMANTELLAMENT DE LA CENTRAL

El govern japonès i TEPCO han elaborat una fulla de ruta per desmantellar la central nuclear i preveuen que necessitaran entre 30 i 40 anys per aconseguir-ho.

Segons el pla, mantindran 3 fases que divideixen els treballs de protecció, neteja i desmantellament.

La primera fase es realitzarà fins el 2014 i consistirà en mantenir i controlar la parada freda dels reactors, en la construcció de cobertes per protegir els reactors més afectats per les explosions d'hidrogen, com ja s'ha fet al reactor 1 i, finalment, es realitzarà la restauració de l'emplaçament, és a dir, la recollida de les runes i la neteja de les diferents instal·lacions afectades.

La segona fase s'iniciarà el 2015 fins el 2022 i es realitzarà l'extracció dels elements combustibles que es troben a les piscines de combustible. A més a més, el 2019 s'introduiran càmeres de vídeo dins els reactors per estudiar-ne el seu estat.

La tercera fase es començarà el 2023 i serà l'etapa en què s'iniciarà la tasca d'extracció del material combustible fos dels reactors. Posteriorment a això, ja es passarà al desmantellament de la central.

TEPCO ha calculat que ha tingut pèrdues de més de 5.800 milions d'euros entre els mesos d'abril i setembre, i durant el 2012 haurà de desemborsar prop de 1 bilió de iens, és a dir, 9.789 milions d'euros, en indemnitzacions, però es creu que la suma podria augmentar fins als 4,5 bilions de iens, 44.090 milions d'euros, durant els pròxims dos anys.

3.4 CONSEQÜÈNCIES RADIOLÒGIQUES

Durant tot el temps que va haver problemes amb la central nuclear, com a conseqüència de l'accident, es van produir diverses emissions de radioactivitat que van afectar a la població que es trobava més propera en un radi determinat i, a més a més, han deixat la zona més pròxima a la central inhabitable, amb una zona d'exclusió establerta per uns quants anys. Aquestes són les conseqüències més directes o a curt termini, però també n'hi ha i n'hi haurà a mig i a llarg termini, que afectaran a la salut de la població més propera, als ecosistemes terrestres i marins i a l'obtenció d'aliments primaris en aquella zona, encarregats dels quals són el sector agricultor, ramader i pesquer.

Les emissions d'isòtops radioactius més importants s'han produït com a conseqüència de les explosions d'hidrogen, de l'alliberació de vapor radioactiu per la disminució de pressió dins el reactor i de filtracions en alguns dels reactors, entre d'altres.

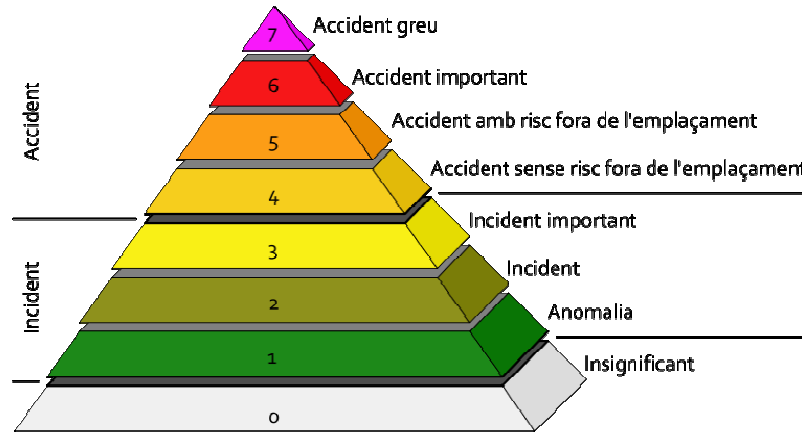
Però no només es va alliberar radiació a l'atmosfera, sinó que també a l'oceà., ja que es van abocar grans quantitats d'aigua radioactiva al mar.

La contaminació radioactiva existeix però no és gens comparable amb la que hi va haver a Txernòbil. Malgrat això, hi ha científics i entitats ecologistes que diuen que la contaminació radiològica és important i que les repercussions seran greus. En canvi, altres científics i empreses energètiques diuen que l'emissió ha estat reduïda i que no tindrà efectes significants als ecosistemes i la salut de la població.

o o o o o

3.4.1 Gravetat de l'accident nuclear

Els accidents nuclears es qualifiquen en un grau de gravetat mitjançant l'Escala Internacional d'Accidents Nuclears. Es tracta d'una escala logarítmica dividida en 7 nivells que s'utilitza per descriure una magnitud comparativa dels accidents nuclears a partir de la seva interpretació amb l'objectiu de crear un sistema d'avisos i de seguretat davant d'aquests accidents.



36. Escala Internacional d'Accidents Nuclears (INES) en forma piramidal.

Per fer la interpretació de la gravetat d'un accident es segueixen uns criteris establerts, dels quals un dels més importants és la magnitud de l'emissió de radioactivitat a l'exterior.

L'accident de Fukushima Dai-ichi ha seguit una trajectòria en que la gravetat ha anat augmentant fins a decretar-se, finalment l'11 d'abril de 2011, com un accident nuclear de nivell 7 en l'escala INES, el grau màxim i el segon accident nuclear més greu de la història per darrere del de Txernòbil.

La descripció del nivell 7 d'accidents nuclears a l'escala INES respecte l'impacte a les persones i al medi ambient és la següent:

“En el nivell 7 es produeix una alliberació superior de material radioactiu que posa en risc la salut general i el medi ambient i requereix l'aplicació de mesures de contraposició.”

o o o o o

3.4.2 Materials radioactius emesos

Durant les reaccions de fissió es generen productes nuclears que són molt radioactius i es formen molts isòtops que queden continguts dins els elements combustibles dels reactors.

Quan el combustible es gasta, aquests elements combustibles es traslladen a les piscines d'emmagatzematge, a on es guarden uns anys perquè els isòtops que tenen un període de semidesintegració més curt desapareguin.

A Fukushima Dai-ichi hi va haver una fusió dels nuclis d'alguns dels reactors i es van escapar isòtops radioactius a l'atmosfera. Com a conseqüència de les explosions d'hidrogen, de la ventilació de vapor dels reactors i de les filtracions, part d'aquests isòtops radioactius es van alliberar a l'exterior, a l'atmosfera i a l'oceà.

Els isòtops radioactius que es van emetre van ser principalment ^{131}I i ^{137}Cs , els més comuns com a residus de la fissió nuclear. També es van alliberar gasos nobles, però aquests no són radioactius i la seva perillositat és força menor.

TEPCO també va detectar la presència de ^{239}Pu en alguns punts de l'entorn del reactor 3, que utilitza un combustible que barreja urani i plutoni, el MOX, però la quantitat era mínima i no presentava un perill significat.

Totes les quantitats que s'han pres són estimacions inicials realitzades per diferents organismes de seguretat nuclear com la NISA, del Japó, i la IRSN, francesa.

El ^{131}I té un període de semidesintegració de 8,02 dies. En canvi, el ^{137}Cs es manté en un estat radioactiu durant força temps i és el que més podrà afectar a l'entorn de Fukushima, ja que té un període de semidesintegració de 30,07 anys.

El plutoni té un període de semidesintegració de 24,36 anys i es considera molt perillós per la seva toxicitat.

o o o o o

3.4.3 Abocament d'aigua radioactiva al mar

Com a conseqüència de l'accident es va abocar aigua radioactiva a l'oceà Pacífic per dues causes. Per una banda es van produir filtracions en algun dels reactors que va provocar l'alliberació de grans quantitats d'aigua al mar i, per l'altra, la companyia TEPCO va haver de prendre una mesura que requeria abocar-ne més, per agilitzar el treball dels equips que estaven a la central.

Degut a les filtracions en algun dels reactors les quantitats dels isòtops ^{131}I i ^{137}Cs al mar van arribar a ser molt superiors al límit legal, durant les primeres setmanes. Els primers intents per tapar l'esquerda per on es filtrava l'aigua van fracassar, però finalment es va aconseguir.

Per poder treballar adequadament TEPCO va necessitar buidar algunes zones de les instal·lacions de la central nuclear que estaven inundades.



37. Control de seguretat a una nena de contaminació radioactiva.

Es va calcular durant les setmanes posteriors a l'inici de l'accident que hi havia unes 60.000 tones d'aigua altament radioactiva que inundaven diferents zones de la central nuclear. Era necessari retirar aquesta aigua per facilitar el treball per reactivar el sistema de refrigeració dels reactors i per això l'Agència de Seguretat Nuclear de Japó va autoritzar el bombeig de tota aquesta aigua altament contaminada per transportar-la en dipòsits que té la central. Però prèviament TEPCO va haver de buidar alguns d'aquests dipòsit per deixar suficient lloc per l'aigua nova.

Per això la companyia va haver d'abocar a l'oceà Pacífic més de 9.000 tones d'aigua amb una radioactivitat relativament baixa per augmentar l'espai en un dipòsit de residus nuclears.

o o o o o

3.4.4 Evacuació de la població

Des de les primeres hores de l'accident el govern va haver de començar un pla d'evacuació de la població que residia pel voltant de la central. A mesura que les setmanes passaven i l'estat dels reactors empitjorava l'evacuació es va anar expandint en radis determinats de distància perquè el risc d'emissions de radiació cada cop era més elevat.

Les condicions meteorològiques van determinar en gran mesura l'expansió de la radiació per l'atmosfera. Durant la major part de les setmanes els vents es van dirigir cap a l'oceà, evitant que la radiació s'expandís greument sobre l'illa de Honshu, però els vents també van bufar en direcció nord-oest, cap a l'interior.

El govern també va prendre mesures per controlar els nivells de radiació en els diferents nuclis urbans, va revisar a tota la població que va ser evacuada i que podria haver estat exposada i va repartir pastilles de iode a la població com a prevenció per protegir les glàndules tiroïdals, lloc a on afecta el ^{131}I radioactiu.

Com a conseqüència del terratrèmol, el tsunami i l'accident nuclear es van desplaçar unes 350.000 persones, que es van allotjar en refugis d'emergència que estaven instal·lats en diferents localitats.

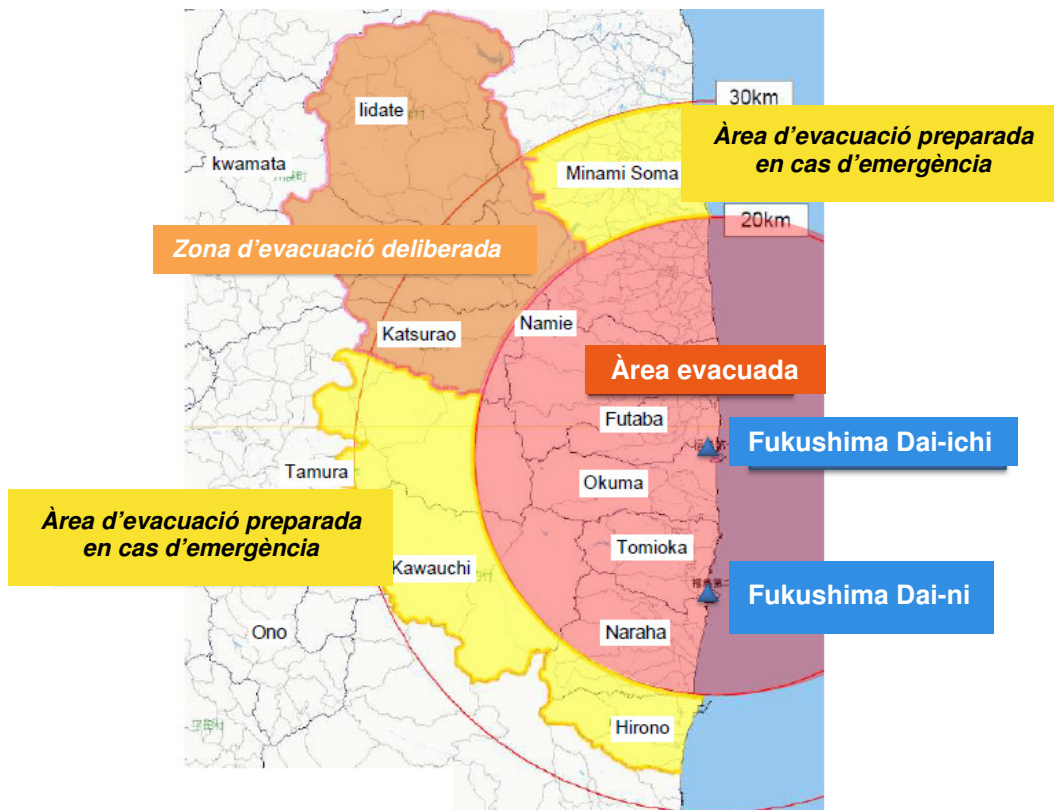
Actualment encara hi ha milers de persones desplaçades que no poden tornar a les seves cases per la radiació i per la devastació del tsunami.

.....

3.4.5 Evolució de les zones evacuades

Tot va començar poques hores després del terratrèmol i del tsunami. Quan es va decretar l'estat d'emergència nuclear per als reactors 1 i 2 de la central de Fukushima Dai-ichi, el govern japonès va ordenar l'evacuació dels habitants que es trobaven en un radi de 3 km al voltant de la central. El dia següent, també es va decretar aquesta mateixa evacuació al voltant de la central de Fukushima Dai-ni, que també tenia alguns problemes per la seva refrigeració.

L' 11 de març les autoritats japoneses van ampliar el radi d'evacuació a 10 km respecte la central de Fukushima Dai-ichi, i es van començar a repartir pastilles de ^{127}I , la seva forma més estable, com a mesura de seguretat radiològica.



38. Mapa de les mesures d'evacuació fetes pel govern japonès al voltant de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi.

El 13 de març el govern va tornar a augmentar el radi d'evacuació de 10 a 20 km i la va declarar com a zona d'exclusió. Al cap d'unes setmanes el govern va recomanar a la població que vivia entre els 20 km i els 30 km que romangués tancada a les cases i en va permetre l'evacuació voluntària.

Però es van detectar en algunes poblacions fora del radi de 30 km que sobrepassaven els límits legals de radiació. Com a conseqüència del vent que va bufar alguns dies en direcció nord-oest, una llengua de radiació es va estendre en aquesta direcció uns 40 o 50 km endins, des de la central nuclear. Poblacions com Itate o Minami Soma, situades a uns 40 km de la central, també van quedar afectades i el govern va establir mesures d'evacuació.

Actualment l'àrea compresa dins dels 20 km de radi des de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi està restringida a la població i a la zona d'entre 20 km i 30 km ja es pot tornar a les cases.

.....

3.4.6 Repartiment de pastilles de iode a la població

Un dels isòtops radioactius que es van alliberar va ser ^{131}I . Aquest material radioactiu quan s'inhala s'acumula a la glàndula tiroïdal, una glàndula neuroendocrina situada sota de la nou d'Adan, junt al cartílag tiroides i sobre la tràquea. Aquesta glàndula regula el metabolisme del cos, produeix proteïnes i regula la sensibilitat del cos a altres hormones. El ^{131}I afecta a aquesta glàndula i l'exposició a aquesta radiació provoca càncer de tiroides.

Aquesta glàndula es pot saturar de iode ja que té una capacitat d'absorció limitada. Per això el govern japonès va repartir pastilles de ^{127}I , un isòtop del iode estable, per saturar la glàndula tiroides amb aquest iode i evitar que absorbís el iode radioactiu.

L'augment de la taxa de càncer de tiroides sobre la població que a patit un accident nuclear amb radiació emesa és un dels efectes derivats més comuns. En el cas de Txèrnòbil la taxa va augmentar de forma multiplicativa i també s'ha esdevingut l'increment en zones que han tingut altres accidents nuclears més locals.

.....

3.4.7 Conseqüències mediambientals de la radiació

La conseqüència més greu de l'accident nuclear de Fukushima Dai-ichi és l'alliberació de radioactivitat al medi ambient. Malgrat que petites dosis de fugues radioactives es

dissolguin amb facilitat a l'atmosfera, una continuada i intensa exposició a la radiació pot comportar greus conseqüències pel medi ambient i per la salut dels éssers vius.

Un dels problemes que se'n poden derivar és la transmissió de la radioactivitat al llarg de la cadena tròfica, ja que la ingestió de plantes o animals que han rebut radiació provoca la transmissió d'aquesta a l'organisme que ingereix. Al llarg del temps la radiació de l'atmosfera es pot acumular al terra i al mar, afavorint les condicions perquè més radiació s'incorpori a la cadena tròfica dels animals i plantes. Per tant, si la cadena tròfica queda afectada, els humans també tenim molts riscos de quedar afectats perquè ens situem al capdamunt d'aquesta.

Per exemple, a l'accident nuclear de Txernòbil, la contaminació radioactiva dels líquens de la zona va afectar a milers de rens de l'Àrtic, ja que els líquens en són el seu aliment, i això va provocar el sacrifici de milers de rens per evitar que aquella carn fos menjada per persones.

Els ecosistemes de l'entorn de Fukushima, tant terrestres i marítics quedaran afectats per la contaminació radioactiva. Els animals també tindran mutacions genètiques i agafaran malalties.



39. Conill recent nascut sense orelles com a conseqüència de la contaminació radioactiva en un poble situat a 30 km de la central nuclear de Fukushima.

En una petita granja de Namie Tsushima, un poble situat a 30 km de la central nuclear, hi va néixer fa poc temps un conill sense orelles. Els japonesos que ho van veure van quedar molt preocupats per la contaminació radioactiva que hi podia haver a l'ambient.

Al Japó han aparegut molts aliments procedents de Fukushima que tenien contaminació radioactiva i això ha provocat que se n'haguessin de fer molts controls de radiació.

La contaminació radioactiva d'alguns productes pesquers i agrícoles ha comportat que els sectors primaris de la zona de Fukushima hagin quedat afectats i tinguin pèrdues econòmiques pel descens del seu comerç i de la seva exportació a la resta del món, ja que molts països van prohibir la importació de productes provinents de Fukushima o en van augmentar molt els controls.

4 CONSEQÜENCIES SOCIALS I POLÍTIQUES

4.1 CRÍTQUES

Després de l'accident nuclear de Fukushima Dai-ichi han sigut múltiples les valoracions i les crítiques que se n'han realitzat, com per exemple, crítiques sobre el disseny de la central nuclear o valoracions sobre la gestió de l'accident i sobre la tasca que han realitzat tots els operaris de la central i els equips de suport que han estat treballant per apagar els reactors.

Per tal de fer una recol·lecció a continuació s'expliquen detalladament les més importants.

o o o o o

4.1.1 Crítiques respecte la central nuclear de Fukushima Dai-ichi

Han sigut diverses les crítiques negatives sobre el disseny de la central i la seva localització. Recordem que l'accident nuclear de Fukushima va ser superior a les bases de disseny de la central, és a dir, que va superar totes les línies de defensa que tenia la central. Algunes de les crítiques més rellevants són:

1. Crítica a la ubicació de les centrals nuclears al costat de mar.

La central de Fukushima Dai-ichi va quedar afectada per un tsunami de més de 10 metres d'alçada. Si la central no hagués estat situada al costat del mar, el sinistre no hauria succeït mai.

A més a més, construir les centrals al costat del mar presenta diferents inconvenients. L'aigua del mar provoca una major corrosió de les canonades i les instal·lacions i, per tant, cal fer un manteniment especial per evitar aquest problema. A més, cal netejar periòdicament les instal·lacions de les algues i crustacis que s'hi incrusten.

Però malgrat aquests inconvenients i la situació geogràfica de Japó que és propensa a patir terratrèmols i tsunamis, no són raons suficients perquè les centrals no es construeixin al costat del mar.

El motiu d'això és purament econòmic. Japó no té rius de cabdal important i la seva superfície és molt petita. Per les empreses i el govern és molt més rentable construir les centrals al costat del mar per la proximitat de l'aigua.

2. Crítica de la localització dels generadors dièsel dins la central nuclear.

La central de Fukushima Dai-ichi va perdre les línies d'electricitat exterior com a conseqüència del terratrèmol, però tenia una altra línia de defensa formada pels generadors dièsel, capaços de mantenir la refrigeració dels reactors en cas d'emergència. Però quan va arribar el tsunami aquests van quedar inutilitzats perquè el lloc on es trobaven es va inundar. Aquests es situaven a la planta baixa de la central, a l'exterior i desprotegits.

Si haguessin tingut una protecció adequada contra inundacions els generadors no haguessin fallat. Per tant, es critica aquest error de disseny perquè no protegia correctament els generadors dièsel.

3. Crítica de la base de disseny de la central nuclear.

També s'ha criticat que, malgrat la construcció de la central al costat del mar, no tingués una bona seguretat contra agents externs, importants al Japó, com ara són els tsunamis. Novament el tema econòmic respon a aquesta crítica.

Tècnicament és possible construir una central dissenyada a tot risc, contra terratrèmols i tsunamis, i que, a més a més, estigui al nivell del mar. Però econòmicament no és possible, ja que, no és rentable per l'elevat cost que això suposaria.

4. Crítica a l'organisme regulador de seguretat nuclear japonès.

Finalment també s'ha criticat a l'organisme regulador de seguretat nuclear japonès, és a dir, l'Agència de Seguretat Nuclear i Industrial (NISA), per la poca eficàcia a l'hora d'exigir mesures de seguretat. Des de feia temps la NISA sabia que la central de Fukushima que explotava la TEPCO no era resistent a terratrèmols superiors a 7 graus de l'Escala de Richter. TEPCO també ho sabia, però l'agència de seguretat nuclear no tenia pressa per exigir-li.

Aquesta ineficàcia de la NISA és deguda a la dependència que té respecte les companyies elèctriques, com ara TEPCO, perquè tenen un gran poder econòmic.

o o o o o

4.1.2 Valoració de la gestió de l'accident

La gestió de l'accident, així com les solucions aplicades per refrigerar els reactors o les mesures decretades per evacuar la població també han estat valorades.

Es considera bona la gestió que TEPCO va realitzar amb l'ajuda del govern japonès i dels equips de bombers, policials, militars, etc. que també van col·laborar.

Van evitar conseqüències pitjors i van aconseguir la parada freda de tots els reactors, 9 mesos després del sinistre. S'ha valorat positivament l'organització i la comunicació amb els equips col·laboradors i l'Agència Internacional de l'Energia Atòmica. També s'ha considerada positiva l'eficàcia de la cooperació internacional.

Però si que s'ha criticat força la veracitat de la informació que la TEPCO publicava sobre els estats dels reactors. La població no va estat ben informada i les incidències que la companyia havia tingut anteriorment feia que aquesta no transmetés confiança.

Com a resultat de l'accident, s'han extret unes lliçons bàsiques que es poden resumir en aquests punts:

- Cal millorar la prevenció contra accidents greus de les centrals nuclears i revisar la base de disseny per a successos externs.
- Cal realitzar un major control de l'hidrogen que es pugui produir en un reactor nuclear. També cal millorar l'entrenament del personal per a situacions d'emergències nuclears.
- Cal continuar realitzant bones respostes d'emergència, que inclou l'organització, la comunicació i l'ajuda internacional.
- Cal millorar la infraestructura de seguretat donant més independència a l'òrgan regulador de seguretat nuclear.

.
o o o o o

4.1.3 Dificultats addicionals que han tingut els operaris durant el sinistre

Cal destacar l'actuació dels operaris que han treballat durament per garantir la refrigeració dels reactors i aconseguir-ne la parada freda. Les condicions en què havien de treballar eren dolentes derivades dels efectes del terratrèmol, del tsunami, de la falta d'electricitat i de la dosis elevada de radiació.

El treball de recuperació posterior al tsunami va ser bastant perillós per les rèpliques del terratrèmol, per les esquerdes de les carreteres, per la runa que obstaculitzava les mobilitzacions i l'accés dels equips a determinades zones, la foscor amb què van haver de treballar per falta d'energia i per les dificultats que presentava arribar a diferents zones per l'elevada radiació de l'entorn.



40. Supervisant en un escriptori amb una màscara facial i a plena foscor.

o o o o o

4.1.4 Premi Príncepe de Astúrias de la Concordia 2011

El 7 de Setembre de 2011 Espanya va celebrar l'entrega anual dels premis Príncepe de Astúrias i va atorgar als anomenats Herois de Fukushima el premi de la Concordia 2011.

Els representats de la central de Fukushima van rebre aquest premi dedicat als diferents col·lectius que van estar treballant a Fukushima durant moltes setmanes, moments en què ho van fer en condicions extremes (elevada radiació, contínues rotacions, poques hores de descans, limitacions amb l'alimentació i amb el subministrament d'aigua potable, etc.) Malgrat aquestes greus conseqüències i la dificultat del treball ells van continuar participant amb les feines per recobrar el control de la central nuclear, conscients dels riscos i de la seva tasca imprescindible per evitar una catàstrofe pitjor.



41. Entrega del Premi Príncepe de Astúrias de la Concordia 2011 a representants dels Herois de Fukushima.

La tasca de tota aquesta gent va fer possible que la gravetat de l'accident nuclear fos mínima, comparat amb tot el que podia haver passat però que no va succeir.

El comportament de tots els treballadors mostren els valors més característics de la societat japonesa, com són el sentit del deure, el sacrifici personal i familiar pel bé comú, la constància davant l'adversitat, la generositat, la humilitat i la valentia.

5 CONCLUSIONS I COMENTARIS

Han estat diversos els temes que he tractat en l'elaboració d'aquest treball i, per això, trobo necessari treure conclusions sobre diversos aspectes:

- Conclusions respecte l'accident nuclear de la central de Fukushima Dai-ichi.
- Conclusions i comentaris respecte l'elaboració del treball.
- Conclusions i comentaris personals.

Conclusions respecte l'accident nuclear de la central de Fukushima Dai-ichi

- L'accident nuclear de la central de Fukushima Dai-ichi va ser un accident que va superar la base de disseny de la central, és a dir, que tots els sistemes de seguretat van quedar afectats pels diferents successos i no van ser suficients per evitar les conseqüències que s'han produït. Per tant, totes les crítiques que es puguin fer sobre la central faran referència principalment a la base de disseny de la central, o sigui, a l'estructura de les seves instal·lacions i al disseny dels sistemes de seguretat del reactor.
- El sinistre de la central va ser conseqüència de diversos fenòmens naturals, i no hi va haver errors humans significants. La gestió de l'accident va seguir els protocols de seguretat que estan establerts i estava controlada i supervisada constantment per les agències de seguretat nuclear nacionals i internacionals. Potser un dels fets que pot ser criticat sobre la gestió és la poca eficàcia de TEPCO per preveure i controlar la formació de gas hidrogen que va provocar les explosions dels reactors. Setmanes més tard, sí que es va prendre una mesura per evitar-ne de noves, introduint nitrogen dins al reactor.
- Si la gestió va ser la correcta perquè es van seguir els protocols de seguretat marcats, aquesta no va ser suficient per evitar la fusió parcial dels nuclis i les explosions dels reactors. Per tant altres punts que s'analitzaran i es revisaran seran dels mateixos protocols de seguretat.
- Aquest accident és el primer de la història de successos nuclears que afecta a diversos reactors simultanis i té conseqüències greus.

- Es va alliberar radioactivitat, per suposat, però en cap cas és comparable amb l'accident de la central de Txernòbil. La gravetat de l'emissió de partícules radioactives ja no la puc valorar perquè hi ha divergència d'opinions dins de la comunitat de científics i experts nuclears. N'hi ha que diuen que les conseqüències radiològiques no són ni seran gaire rellevants, mentre que d'altres creuen que també hi haurà problemes importants derivats de la radiació. És cert que encara s'estan fent estudis i estimacions de les quantitats alliberades i, en tot cas, la gravetat s'analitzarà segons quins siguin els efectes sobre la població japonesa propera a la central, d'aquí a unes quantes dècades.
- És admirable de destacar que els japonesos van rebre molta ajuda internacional i hi va haver molta cooperació, tant per la gestió de l'accident com per la recuperació del país després del devastador tsunami. Pel que fa als treballadors de la central, cal recordar que van arriscar les seves vides per complir amb la seva tasca i el comportament que van tenir segurament reflexa els valors de la societat japonesa, que també es podran demostrar el pròxims anys amb la reconstrucció del país.
- Valoro negativament els mitjans de comunicació perquè, tot i informar dels principals esdeveniments als països internacionals les primeres setmanes que potser van ser les més crítiques, després la notícia de Fukushima ha minvat molt fins al punt de deixar de sentir-ne parlar, però hauríem de recordar que l'accident ha durat 9 mesos.
- Les principals conseqüències més immediates derivades de l'accident nuclear han sigut la reavaluació dels protocols de seguretat de totes les centrals nuclears a nivell mundial i l'enduriment de les proves de resistència per les centrals nuclears. Aquestes mesures han sigut preses per les agències de seguretat nuclear internacionals. Doncs voldria constar que les centrals nuclears espanyoles han superat sense dificultats tots els nous tests de resistència que s'hi han realitzat.

Conclusions i comentaris respecte l'elaboració del treball

- Voldria destacar la important dedicació que he hagut de fer durant els primers mesos per aprendre conceptes que calia conèixer sobre l'energia nuclear. Si inicialment vaig marcar-me uns objectius que feien referència a l'accident

nuclear de Japó, després els vaig haver d'ampliar perquè em feien falta aquests coneixements per entendre allò que m'havia proposat.

- La principal eina de treball que m'ha servit per recopilar informació és Internet. Sense aquesta font segurament no podria haver escrit aquest treball ni hauria pogut fer una bona recerca. Tota la informació recent es troba a Internet, i no pas als llibres. D'aquests algun n'he consultat, però només per temes teòrics de física nuclear.
- No he tingut dificultats per trobar informació, és més, el problema més aviat ha estat trobar les millors fonts i les més fiables i sintetitzar totes les idees que he anat recopilant. També vull recordar que he hagut de llegir molts articles i llocs web per completar aquesta recerca i fer-la de la millor manera que he pogut. M'he trobat que moltes fonts estaven en anglès, però la majoria d'aquestes eren les més tècniques i científiques.
- També vaig tenir dificultats inicialment per entendre en termes més concrets la gestió de l'accident, però han sigut dubtes que al llarg del temps he anat resolent. Afortunadament he pogut compartir les meves idees amb un expert en centrals nuclears, el senyor Luis Casaus, enginyer industrial que treballa a la central nuclear de Vandellós II. Ell m'ha resolt els dubtes que tenia i he pogut reconfortar aquelles idees que ja creia per bones.
- Crec que la part més difícil del treball de recerca en general ha sigut transmetre aquells coneixements que he anat adquirint amb la recerca i explicar-los en forma de text de la millor manera perquè després els lectors del treball entenguin els conceptes de la manera més fàcil i puguin obtenir una idea completa d'allò que s'hagi estudiat, en el meu cas, l'accident nuclear del Japó.
- Finalment vull comentar que vaig tenir l'oportunitat d'anar a una conferència el passat 26 de gener sobre l'accident nuclear de Fukushima i la perspectiva de futur de l'energia nuclear, realitzada per Agustín Alonso, catedràtic emèrit en tecnologia nuclear, i que es va celebrar a la seu del Col·legi d'Enginyers Industrials de la Demarcació de Tarragona. Respecte la conferència vull destacar que tot el que es va explicar no va presentar dificultats de comprensió per mi i, a més a més, la major part dels temes que es van tractar ja els havia treballat jo amb la meua recerca. Vaig poder comprovar la rigorositat del treball de recerca,

que generalment l'havia fet correctament, d'acord amb el que es va explicar en aquella presentació.

Conclusions i comentaris personals

- Primerament m'agradaria dir que, tot hi haver de fer un treball com aquest durant un curs com és 2n de Batxillerat i que resta moltes hores que es podrien aprofitar per estudiar més pel curs, considero que comporta avantatges que ens serviran per quan comencem a estudiar a la universitat. Haver fet un treball com aquest ens permet tenir l'experiència d'aquesta nova manera de treballar, que segurament s'utilitzarà molt a la universitat. Per tant, crec que tot allò que fem ens servirà sempre per alguna cosa.
- Haver fet aquest treball, parlant ara sobre el tema concretament, m'ha permès descobrir tot un món que abans desconeixia i que ara tinc prou coneixements per formular les meves idees i les meves opinions respecte aquests temes dels quals he tractat. He après molt d'aquesta recerca i com que m'interessava i m'agrada com ha quedat finalment, després de tot l'esforç que he dedicat, vull expressar que em sento orgullós d'aquest treball.
- Finalment, voldria fer una reflexió sobre l'energia nuclear, donant la meua opinió personal i ara que ja he acabat el treball.
Crec que l'energia nuclear és positiva per la gran quantitat d'energia que genera però no compensa tots els riscos que es prenen per treballar amb ella, ja que existeix sempre el perill de que es produeixi algun accident nuclear per qualsevol circumstància, considerant que aquests poden arribar a ser catastròfics. A més, el potencial tan gran d'aquesta forma d'energia fa que pogués ser utilitzada com armament nuclear. Per tant crec que l'energia nuclear no és una bona alternativa als combustibles fòssils, tot i que sembli la més adequada per atendre la gran demanda energètica que existeix actualment al món. Crec que l'aposta per energies renovables és el futur de la societat i valoro positivament les mesures preses per països com Suïssa, Alemanya i Itàlia per abandonar el seu pla energètic nuclear.

6 FONTS

Bibliografia

- José Ramírez Vázquez con la colaboración de Lorenzo Beltrán Vidal. *Centrales eléctricas*. 7a ed.: Editorial CEAC, S.A.; 1990.
- Llibre de text - *Física 2 - Batxillerat*. Editorial McGraw-Hill ; 2009

Webgrafia

- Wikipedia contributors. *Fukushima Dai-ichi nuclear disaster*, 2012.
Disponible a: http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster
- *Enusa Industrias Avanzadas* Disponible a:
http://www.enusa.es/pub/comunicacion/album_nuclear.html. Recuperat el 15/01/2012.
- *Energía Nuclear* Disponible a: <http://energia-nuclear.net/>. Recuperat el 15/01/2012.
- *Nuclear Reactors | Nuclear Power Plant | Nuclear Reactor Technology* Disponible a: <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>. Recuperat el 15/01/2012
- *Crisis nuclear en Japón | Greenpeace España* Disponible a:
<http://www.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Fin-de-la-era-nuclear/Crisis-nuclear-en-Japon/>. Recuperat el 15/01/2012.
- *Accidente nuclear de Fukushima: Una explicación sencilla y precisa de un científico | Bahianoticias.com* Disponible a: <http://bahianoticias.com/accidente-nuclear-de-fukushima-una-explicacion-sencilla-y-precisa-de-un-cientifico/38466/>. Recuperat el 15/01/2012.
- *Energía Nuclear en España* Disponible a: <http://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/energia-nuclear-en-espana>. Recuperat el 15/01/2012.
- NISA - Nuclear and Industrial Safety Agency Disponible a:
<http://www.nisa.meti.go.jp/english/index.html>. Recuperat el 15/01/2012.
- Foro Nuclear. Foro de la Industria Nuclear Española. *Funcionamiento de una central nuclear - YouTube* Disponible a: <http://www.youtube.com/watch?v=-laHe-s9S8o&feature=related>. Recuperat el 15/01/2012.
- *In Focus: Fukushima Nuclear Accident* Disponible a:
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/>. Recuperat el 15/01/2012.

Vídeos i documentals

- *ENERGIA NUCLEAR - YouTube* Disponible a:
http://www.youtube.com/watch?v=jec_AixIwmM&feature=related. Recuperat el 15/01/2012
- National Geographic. *El Tsunami de Japón - Alerta Nuclear - YouTube* Disponible a: <http://www.youtube.com/watch?v=MxwCiJup51Y>. Recuperat el 15/01/2012.
- *The Fukushima Nuclear Reactor Accident: What Happened and What Does It Mean? - YouTube* Disponible a:
<http://www.youtube.com/watch?v=LS6kqo9qZnM>. Recuperat el 15/01/2012.
- College of Engineering. The University of Iowa. *Presentación sobre Accidente de Fukushima por Margaret Harding - YouTube* Disponible a:
<http://www.youtube.com/watch?v=6otcObaq6p0>. Recuperat el 15/01/2012.

Articles científics

- Institute Power Nuclear Operations. *Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station 2011* 11/2011
- USNRC Technical Training Center. *Reactor Concepts Manual. Boiling Water Reactor Systems.*
- Departament de Física i Enginyeria Nuclear, Campus Nord UPC. *FENOMEN - Special issue on nuclear power.*
- *Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety* Disponible a:
http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html. Recuperat el 15/01/2012.
- IEEE Nuclear Power Engineering Committee – Akira Kawano – Tokyo Electric Power Company. *Fukushima Nuclear Accident Interim Report: Effects of the Earthquake and Tsunami on the Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations, especially on electric and I&C systems and equipments.* – 27 de juliol de 2011
- IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety. *The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. Nuclear Emergency Response Headquarters Government of Japan.* 20-24 de juny de 2011 - Viena

Revistes i diaris

- Medicine & Global Survival. *The Fukushima Nuclear Disaster.* 06/2011.
- Seguridad y medio ambiente. *Accidente por apagón en Fukushima.* Segundo trimestre 2011.
- El Viejo Topo 280. *Fukushima – Un Chernóbil a cámara lenta. Entrevista a Eduard Rodríguez Farré.* Mayo 2011
- *Japón sufre su mayor terremoto* · ELPAÍS.com Disponible a:
http://www.elpais.com/articulo/internacional/Japon/sufre/mayor/terremoto/elpepiint/20110312elpepiint_1/Tes. Recuperat el 15/01/2012.
- *Desastre de Fukushima causó la mayor contaminación del mar en la historia* Disponible a: <http://mx.globedia.com/desastre-fukushima-causo-mayor-contaminacion-mar-historia>. Recuperat el 15/01/2012.
- *Terremoto y crisis nuclear en Japón* | ELMUNDO.es Disponible a:
<http://www.elmundo.es/especiales/2011/terremoto-japon/>. Recuperat el 15/01/2012.
- *Japón teme una fuga radiactiva en la central de Fukushima* · ELPAÍS.com Disponible a:
http://www.elpais.com/articulo/internacional/Japon/teme/fuga/radiactiva/central/Fukushima/elpepuint/20110311elpepuint_15/Tes. Recuperat el 15/01/2012.

Entrevistes

- Entrevista al Sr. Luis Casaus – Enginyer Industrial de Vandellós II

Conferències

- Agustín Alonso – Catedràtic emèrit de tecnologia nuclear. *Accident nuclear de Fukushima i perspectiva de futur de l'energia nuclear.* Col·legi d'Enginyers Industrials de la Demarcació de Tarragona – 26 de gener de 2012

ANNEX 1

CONCEPTES FONAMENTALS DE FÍSICA NUCLEAR

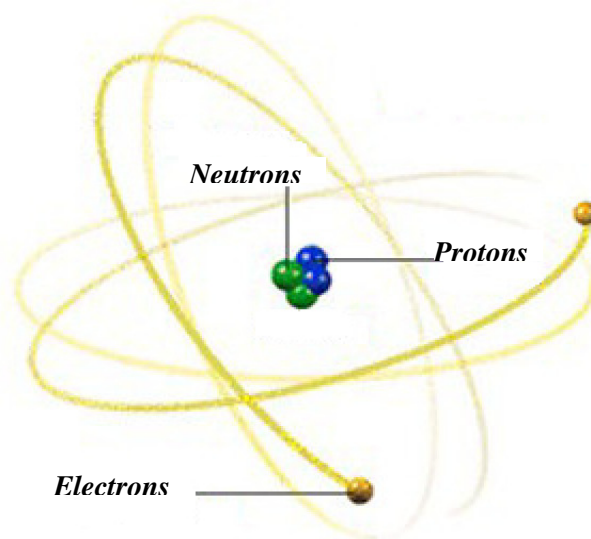
1 INTRODUCCIÓ

El model atòmic actual considera l'estructura de la matèria com un conjunt de molècules de molts compostos que, a la vegada, estan formades per estructures més petites, els àtoms. Els àtoms són elèctricament neutres i es divideixen en partícules subatòmiques.

La seva estructura consta de dues parts:

- **Nucli atòmic:** hi trobem les partícules subatòmiques anomenades neutrons i protons. Les primeres no tenen càrrega elèctrica i les segones tenen càrrega positiva.
- **Part externa:** hi trobem els electrons, amb càrrega negativa, que giren al voltant del nucli per un conjunt d'orbitals.

Però dins d'un àtom també s'hi troben un gran nombre d'altres partícules elementals, de vida efímera, és a dir, que constantment es desintegren en unes altres.



42. Estructura de l'àtom.

2 ESPÈCIES ATÒMIQUES. ELS ISÒTOPS

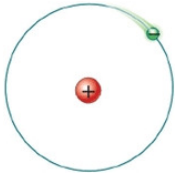
Una espècie atòmica ve definida per dos nombres enters:

- **nombre atòmic Z:** és el nombre de protons que es troben al nucli de l'àtom i defineix l'element químic al qual pertany.
- **nombre màssic A:** és el nombre total de protons més neutrons d'un àtom i correspon al nombre enter més pròxim a la massa d'aquest àtom en qüestió.

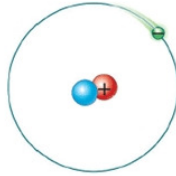
A la natura trobem diferents espècies atòmiques que tenen el mateix nombre atòmic però posseeixen nombres màssics diferents. Estem parlant d'un mateix element químic, però són espècies que no tenen el mateix nombre de neutrons. Per tant, dins de cada element trobem diferents espècies atòmiques, que reben el nom d'isòtops.

És a dir, que podem definir els isòtops d'un element com aquells àtoms que tenen el mateix nombre de protons i d'electrons però que tenen diferent nombre de neutrons. Tenen les mateixes propietats químiques, però les seves masses són diferents, i en molts casos, també ho són les seves propietats atòmiques.

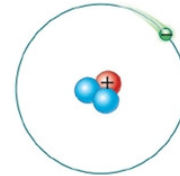
Per exemple, l'hidrogen, que té nombre atòmic 1, té tres isòtops:



Proti (o hidrogen)



Deuteri



Triti

43. Isòtops de l'hidrogen.

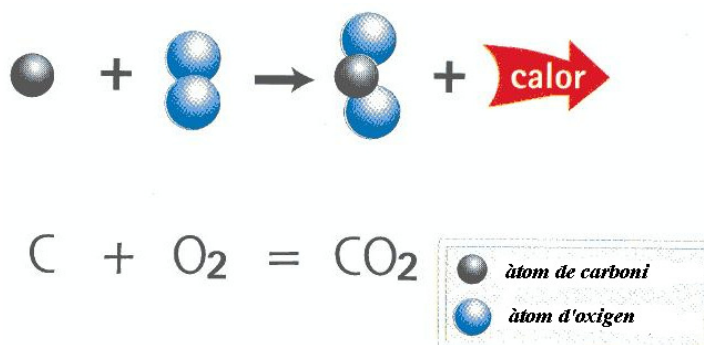
L'element hidrogen es refereix a una barreja dels seus tres isòtops, però se li atribueixen les propietats de l'isòtop més abundant, en el seu cas, el protí. Això succeeix en tots els elements.

3 REACCIÓ QUÍMICA

Una reacció química és un procés on es combinen àtoms d'elements o de compostos moleculars entre ells, per produir altres estructures de propietats químiques diferents. En les reaccions químiques els canvis que hi ha dins els àtoms només afecten als electrons situats a la part més externa, ja que aquests interactuen, de manera que es perden, es guanyen o es comparteixen. Primer els àtoms dels compostos reactius es transformen en ions carregats elèctricament, però són inestables i s'uneixen formant altres estructures neutres i més estables, és a dir, es converteixen en altres compostos moleculars.

Però en cap moment hi ha canvis en les partícules dels nuclis dels àtoms i, per tant, les propietats atòmiques no varien. És a dir, que els àtoms, abans i després d'una reacció química, tindran les mateixes propietats atòmiques, tractant-los individualment, malgrat que la seva nova combinació faci que les propietats químiques del conjunt siguin diferents.

Per exemple la combustió del carboni:



44. Esquema de la combustió del carboni.

Un àtom de carboni es combina amb dos d'oxigen per produir una molècula de diòxid de carboni. El nucli central de cada àtom de la molècula no pateixen cap canvi; continuen sent unes unitats individuals, iguals i inalterables. És a dir, partim d'àtoms de carboni i oxigen, i els productes estan formats per àtoms de carboni i oxigen. Només han canviat les propietats químiques perquè s'ha canviat d'estructura molecular.

4 REACCIÓ NUCLEAR

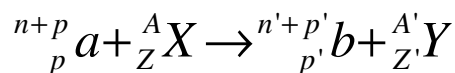
Primerament hem de definir la desintegració radioactiva o radioactivitat, que és una reacció nuclear natural. És la tendència natural que tenen alguns elements a descompondre's en nuclis diferents i en partícules elementals. Es tracta, doncs, d'elements que no tenen estabilitat nuclear i es divideixen en altres elements de nombre atòmic menor per estabilitzar-se. Són elements naturals com per exemple l'urani, el tori, el poloni, el radi, etc.

Aquests elements van ser descoberts per científics com Henri Becquerel, Marie Curie i Pierre Curie, després de que Ernest Rutherford conegués el fenomen de la radioactivitat.

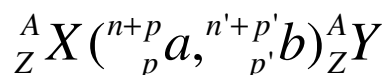
Quan parlem de reaccions nuclears ens referíem a la creació de nuclis inestables que donen lloc a la radioactivitat artificial. Per tant, en un laboratori és possible canviar l'estructura d'un nucli bombardejant-lo amb partícules lleugeres com neutrons, protons, electrons, etc.

D'aquesta manera, podem definir les reaccions nuclears com processos de combinació i transformació de les partícules subatòmiques i nuclis atòmics. El procés d'una reacció nuclear fa que els isòtops inicials es transformin en isòtops d'altres element, de manera que canvien les seves propietats atòmiques i químiques, perquè el seu nombre atòmic canvia.

Suposem que podem produir una col·lisió entre un nucli X i una partícula lleugera a que té una energia cinètica adquirida amb un accelerador, i que el xoc dóna lloc a un nucli final Y i una partícula emesa b . La reacció nuclear s'expressa:

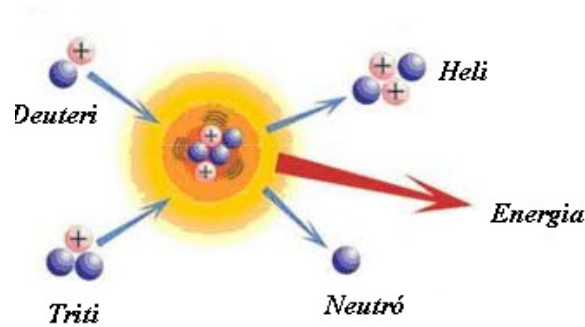


o també es pot representar:



4.1 EXEMPLE DE REACCIÓ NUCLEAR

Considerem que tenim un àtom de deuteri i un àtom de triti (isòtops de l'hidrogen). Suposem que podem aconseguir el xoc d'aquests dos àtoms impulsats a gran velocitat. Els dos nuclis s'uniran per un instant provocant un rebot de les partícules atòmiques. En

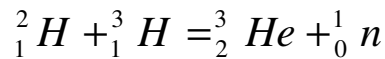


45. Fusió del Deuteri i el Treti.

circumstàncies especials es pot aconseguir que un neutró sigui alliberat, mentre que l'altre neutró quedi retintut i formi un nou nucli amb els dos protons inicials. S'ha produït una reacció nuclear.

El resultat és un nou nucli més un neutró perdut, provocat per la fusió de dos nuclis individuals. Com que queden dos protons als productes, els dos electrons dels reactius es conserven també als productes i, per tant, no es perden en forma de radioactivitat. El nou àtom queda elèctricament neutre.

És a dir, que partint d'un àtom de deuteri i d'un de treti, s'han transformat en un àtom d'heli més un neutró després. La reacció es pot expressar així:



4.2 PROPIETATS DE LES REACCIONS NUCLEARS

Qualsevol reacció nuclear, sigui natural o induïda artificialment i té les següents característiques fonamentals:

- Conservació del nombre atòmic i del nombre màssic.
- Defecte de masses i energia d'enllaç.
- Emissió de radioactivitat.

o o o o o

4.2.1 Conservació del nombre atòmic i del nombre màssic

A partir dels principis de conservació és verifica que el nombre de protons inicials és igual al nombre de protons finals i que el nombre de protons més neutrons inicials és igual al nombre de protons més neutrons finals. És a dir:

- $p + Z = p' + Z'$ (conservació del nombre atòmic)
- $n + p + A = n' + p' + A'$ (conservació del nombre màssic)

.....

4.2.2 Defecte de masses i energia d'enllaç

Per què es desprèn una gran quantitat d'energia en les reaccions nuclears?

Lògicament diríem que la massa M d'un nucli ${}^A_Z X$ és igual a la massa dels protons pel nombre de protons més la massa dels neutrons pel nombre de neutrons: $m_p Z + m_n (A - Z)$.

Però, en realitat, la massa d'un nucli sempre és més petita que la suma de les masses dels nucleons, tractats individualment, dels quals està format: $M({}^A_Z X) < m_p Z + m_n (A - Z)$.

És a dir, la massa de les partícules quan es troben aïllades és més gran que quan formen part d'un nucli atòmic.

La diferència de masses entre els nuclis i els nucleons aïllats s'anomena *defecte de masses*, ΔM , i la pèrdua de massa dels nucleons lligats es transforma en una energia anomenada *energia d'enllaç*.

L'energia d'enllaç es calcula a partir de l'expressió que va formular Albert Einstein, $E = \Delta M \cdot c^2$. Com que c^2 és un valor molt gran, la velocitat de la llum, un defecte de massa molt petit és suficient per generar una energia relativament gran.

En una reacció nuclear, l'energia E alliberada està determinada pel defecte de masses de la reacció, i es verifica que:

$$\Delta M = (M_y + M_b) - (M_x + M_a)$$

.....

4.2.3 Exemple 1: Defecte de masses i energia d'enllaç d'un nucli de He

- a) Comprova i calcula el defecte de masses entre els nucleons d'un àtom d' ${}^4\text{He}$ i la massa d'aquest mateix àtom.
- b) Calcula l'energia d'enllaç de l'àtom d' ${}^4\text{He}$ en MeV.

DADES	Massa en una (u)
Àtom ${}^4\text{He}$	4,002603 u
Protó	1,007277 u
Neutró	1,008665 u
Electró	0,000549 u
Relació: $1u = 931,5 \text{ MeV}$	

Resolució:

a) Recordem que el l'àtom d'heli està format per dos protons i dos neutrons. Com que al valor de la massa atòmica de l'heli hi ha inclosa la massa dels dos electrons que conté, haurem de tenir en compte la massa dels electrons individualment per calcular-ne el defecte de masses.

Taula 1. Masses de partícules

$$m_{partícules} = 2 \text{ protons} + 2 \text{ neutrons} + 2 \text{ electrons}$$

$$m_{partícules} = 2 \cdot 1,007277 + 2 \cdot 1,008665 + 2 \cdot 0,000549 = \mathbf{4,032982 \text{ u}}$$

$$m_{\text{àtom } 4\text{He}} = \mathbf{4,002603 \text{ u}}$$

Podem comprovar que existeix una diferència entre les masses de les partícules i la massa de l'àtom:

$$m_{partícules} > m_{\text{àtom } 4\text{He}}$$

$$4,032982 \text{ u} > 4,002603 \text{ u}$$

És a dir:

Defecte de masses:

$$\Delta m = m_{partícules} - m_{\text{He}}$$

$$\Delta m = 4,032982 - 4,002603 = \mathbf{0,030379 \text{ u}}$$

Per tant, el defecte de masses és de $0,030379 \text{ u}$.

b) Càlcul de l'energia d'enllaç d' ${}^4\text{He}$ en MeV:

$$E = 0,030379 \text{ u} \cdot \frac{931,5 \text{ MeV}}{1 \text{ u}} = 28,30 \text{ MeV}$$

Aquesta és l'energia que es desprèn en fusionar dos protons, dos neutrons i dos electrons per formar un àtom d' ${}^4\text{He}$.

La massa dels electrons té una influència insignificant en aquesta energia perquè la seva massa és mínima comparada amb la de les altres partícules com els protons i els neutrons.

.....

4.2.4 Exemple 2: alliberació d'energia

Aquest exemple ens permetrà comprovar quanta energia es desprèn tenint una quantitat molt petita de massa.

a) Suposem que tenim 1 mg de defecte de massa d'una substància qualsevol. Calcula'n l'energia que se'n despendria en J.

$$1 \text{ mg} = 10^{-6} \text{ Kg}$$

$$E = \Delta M \cdot c^2 = 10^{-6} \text{ Kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 3 \cdot 10^{10} \text{ J (Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2)$$

Per tant, podem comprovar que l'energia que es despendria seria molt gran.

En conclusió, les principals diferències entre les reaccions químiques i les reaccions nuclears són:

	<i>Reaccions químiques</i>	<i>Reaccions nuclears</i>
Transformació	Els àtoms es reordenen per la ruptura i formació d'enllaços químics.	Els isòtops d'un element generen altres isòtops al canviar la constitució del nucli atòmic.
Partícules que hi intervenen	Al trencament i a la formació d'enllaços només participen els electrons.	A les reaccions hi poden participar protons, neutrons, electrons i altres partícules elementals.
Energia	Les reaccions van acompanyades per l'absorció o emissió de quantitats d'energia relativament petites.	Les reaccions van acompanyades per l'absorció i l'emissió d'enormes quantitats d'energia.

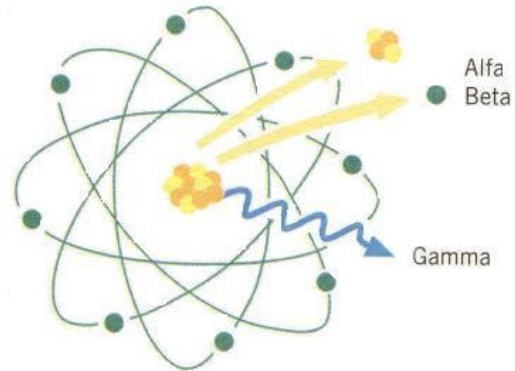
Taula 2. Diferències entre reaccions químiques i reaccions nuclears.

4.3 LA RADIACIÓ

Quan es va descobrir el fenomen de la radioactivitat es va comprovar que s'emetien un conjunt de partícules en forma de radiació. Ernest Rutherford va estudiar aquest procés i va descobrir que la radiació emesa en una desintegració radioactiva podia ser de tres classes: partícules alfa, desintegració beta i radiació gamma.

Actualment la radioactivitat es defineix com un fenomen físic característic d'alguns isòtops inestables que es desintegren en altres més estables i emeten radiacions.

Existeixen un gran nombre de radiacions i es poden classificar en radiacions electromagnètiques, com els raigs X i els raigs gamma, o corpusculars, com per exemple partícules alfa, beta, neutrons, entre d'altres.



46. Esquema radiació alfa, beta i gamma.

A continuació explicarem les radiacions principals de les reaccions nuclears, és a dir, l'emissió de partícules alfa, partícules beta, raigs gamma i neutrons.

.....

4.3.1 Partícules alfa (α)

Les partícules α són partícules carregades positivament formades per nuclis d' ${}^4\text{He}$, és a dir, nuclis amb dos neutrons i dos protons. En el procés d'emissió es desprèn molta energia, que es manifesta en l'energia cinètica que adquireix la partícula. No són gaire penetrants¹, però, en canvi, són molt ionitzants².

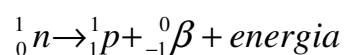
.....

4.3.2 Partícules beta (β)

Les partícules β són emissions d'electrons, carregats negativament, o de positrons, carregats positivament. Tenen un poder de penetració regular i no són gaire ionitzants.

Per tant, trobem dos tipus de radiació β :

- a) *Partícules ${}^0_{-1}\beta$* : aquestes partícules es produeixen per la transformació d'un neutró en un protó i un electró. La reacció es pot expressar així:



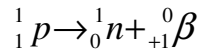
L'electró emès abandona el nucli a altíssima velocitat. En aquest procés, el nombre màssic no s'altera perquè disminueix un neutró i es forma un protó, però

¹ Penetrant: capacitat de les radiacions d'incidir a la matèria.

² Ionitzant: propietat que tenen algunes radiacions com els raigs X, els gamma, les partícules alfa i beta, els neutrons, etc. de transformar els àtoms en ions carregats elèctricament en travessar la matèria.

l'àtom que es forma té al seu nucli un protó més que l'àtom inicial i, per tant, el seu nombre atòmic augmenta una unitat.

- b) *Partícules* ${}^0_{+1}\beta$: aquestes partícules són positrons, antipartícules dels electrons, i tenen una càrrega positiva. Es produeixen quan un protó del nucli es desintegra en un neutró. La reacció seria:



En el procés el nombre màssic tampoc s'altera perquè disminueix un protó i es forma un neutró, però l'àtom que es forma té al seu nucli un protó menys que l'àtom inicial i, per tant, el seu nombre atòmic disminueix una unitat.

.....

4.3.3 Radiació gamma (γ)

La radiació γ és una radiació electromagnètica que es propaga a la velocitat de la llum en el buit, té una longitud d'ona molt petita i generalment sorgeix conjuntament amb partícules alfa i beta. Es produeix quan un nucli atòmic passa d'un estat energètic excitat a un estat més i allibera energia. Són molt energètiques i penetrants i per això es consideren molt perilloses.

.....

4.3.4 Emissió de neutrons

L'emissió de neutrons també es produeix en moltes reaccions nuclears. Són elèctricament neutres i tenen un nivell de ionització baix.

En les reaccions de fissió, l'emissió de neutrons és el principi en què es basen per mantenir-se contínuament, és a dir, obtenir una reacció en cadena.

A més a més, els neutrons s'utilitzen per trencar nuclis atòmics perquè tenen un poder molt penetrant.

Finalment, els neutrons poden ser absorbits fàcilment per elements de nombre atòmic baix, propietat que facilita la creació de materials absorbents per aturar reaccions de fissió en reactors nuclears.

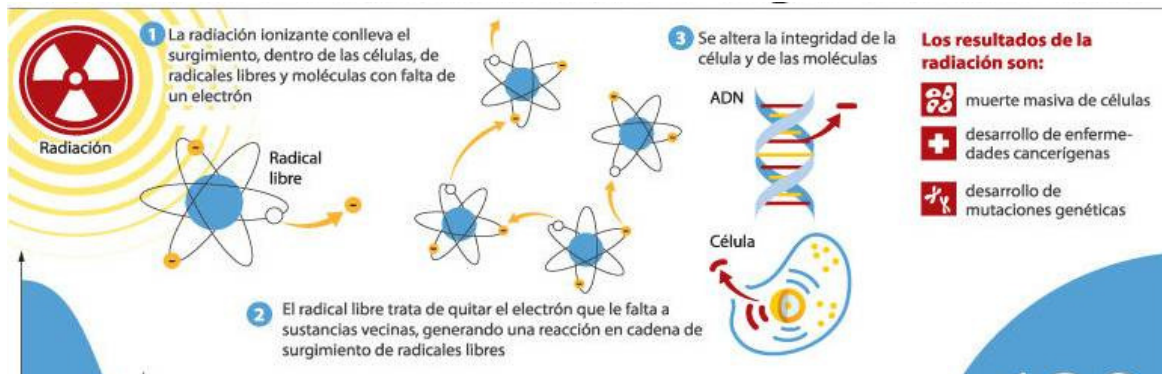
o o o o o

4.3.5 Efectes que produeix l'exposició a la radiació

La radiació és una forma d'energia que es manifesta de tal forma que no la podem percebre per cap dels nostres sentits. Per això i pels riscos que comporta és considerada potencialment perillosa per a la salut dels éssers vius i pel medi ambient.

Els riscos que comporta depenen de les dosis rebudes, és a dir, de la intensitat i del temps d'exposició, i en funció d'aquestes dosis les conseqüències poden ser més greus o menys. També dependrà de les zones a on afectin aquestes radiacions.

A nivell cel·lular les radiacions produeixen ionitzacions i excitacions i formen ions i radicals lliures que provoquen reaccions químiques que alteren el funcionament de la cèl·lula.



47. Esquema de les conseqüències derivades de l'exposició a la radiació.

La sensibilitat de les cèl·lules davant les radiacions varia molt segons el tipus de cèl·lula i, per això, les conseqüències derivades es classifiquen en:

- **Somàtiques:** es produeixen quan la radiació només actua sobre les cèl·lules no reproductives, de manera que si l'exposició és alta pot generar càncer.
- **Genètiques:** es produeixen quan la radiació també afecta en els gens de les cèl·lules reproductores que pot comportar a defectes en la descendència de l'organisme.

Ara bé, dosis molt altes de radiació provoquen lesions molt greus que afecten als sistemes nerviosos, sanguini, reproductor, etc. i en el pitjor dels casos provoca la mort de l'individu. Les dosis baixes no provoquen necessàriament un dany directament, però fan que augmenti la probabilitat de la persona a que tingui malalties com ara càncers.

Els efectes de la radiació solen aparèixer bastant de temps més tard des del moment de l'exposició.

.....

4.3.6 Aplicacions de la radiació

Malgrat el risc, les radiacions també s'utilitzen per produir beneficis a les persones. Generalment tenen aplicació a la medicina que, per exemple, utilitza les radiacions X i gamma per tractar tumors de càncer amb les tècniques de radioteràpia i també amb finalitats diagnòstiques, sobretot a les especialitats de radiologia i medicina nuclear.

La radiació també té aplicacions biològiques que no estan relacionades amb la medicina. És el cas de la inducció de mutacions genètiques en aliments i vegetals, com ara els cereals, per millorar el rendiment de les collites i la qualitat de les proteïnes que contenen.

4.4 TIPUS DE REACCIONS NUCLEARS

Primerament hem de distingir entre la desintegració radioactiva, que és una reacció natural, i les altres reaccions que es produeixen artificialment.

.....

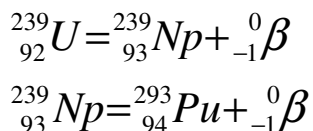
4.4.1 Desintegració radioactiva

És el fenomen natural de la radioactivitat. És una reacció nuclear de descomposició espontània, és a dir, la desintegració d'un material inestable en un altre d'estructura nuclear més senzilla i més estable. Són inestables els elements que tenen un gran nombre de partícules atòmiques, concretament, aquelles que tenen un nombre atòmic igual o superior a 84. Per tant, són elements molt radioactius.

La desintegració radioactiva forma cadenes de reaccions, ja que si l'element producte de la desintegració encara no és prou estable, esdevé una segona desintegració, i així, successivament, fins que l'isòtop aconsegueix ser estable. Els successius isòtops d'un conjunt de desintegracions reben el nom de sèrie radioactiva o família radioactiva.

Aquest procés comporta l'emissió de partícules alfa i beta a grans velocitats, i molt sovint, són acompanyades de radiacions γ .

Un exemple és la desintegració radioactiva de l'urani, que continua amb el neptuni, etc.:



L' ^{239}U és molt inestable i es converteix ràpidament en ^{239}Np , que a la vegada, aquest, que també és inestable, es transforma en ^{239}Pu .

.....

4.4.2 Períodes de semidesintegració

Cada una de les desintegracions tenen un període de semidesintegració o semivida, i és característic de cada isòtop. La semivida representa el temps necessari perquè la meitat de la matèria radioactiva es desintegri. És independent de la quantitat de substància radioactiva ja que tan sols està determinada pel tipus de nucli radioactiu.

Alguns isòtops tenen períodes de semidesintegració molt llargs, de milions d'anys, i, en canvi, d'altres en tenen molt curts, tan sols de pocs minuts, hores, etc.

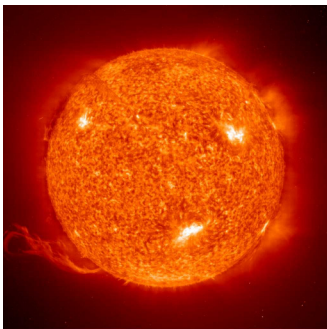
Per tant, les velocitats de la desintegració s'analitza en funció de la semivida de cada isòtop.

Per exemple l' ^{235}U té un període de semidesintegració de 700 milions d'anys. El del ^{239}Pu és de 24.100 anys, el del ^{137}Cs és de 30 anys i el del ^{131}I és de 8 dies.

.....

4.4.3 Reacció nuclear de fusió

Es caracteritza perquè als productes de la reacció hi ha menys àtoms que els que s'utilitzen com a reactius. A la pràctica és molt difícil fer aquestes reaccions perquè per aconseguir-les és necessari que els àtoms xoquin a grans velocitats, i això només és possible augmentant la seva temperatura a milions de graus. Per tant, les dificultats tècniques que presenta són molt grans, quan es tracta d'iniciar i controlar una reacció com aquesta.



48. Reaccions de fusió del Sol

L'energia del Sol i les estrelles prové de constants reaccions de fusió que s'hi esdevenen.

La fusió d'elements d'estructura nuclear més senzilla, menor que la del ferro, produeixen energia, mentre que la fusió d'elements més pesats que el ferro requereixen energia. Per això el combustible que caldria no ha de ser gaire complex, ja que estaria format per elements de nombre atòmic baix. El deuteri és un isòtop que té unes característiques adequades i

és abundant a la natura, o sigui, que seria un isòtop amb el qual es podrien realitzar reaccions de fusió.

Es realitzen moltes investigacions sobre la fusió nuclear, però encara no s'ha trobat la manera per produir i controlar la reacció a la pràctica. Si s'aconseguís l'ús d'aquesta energia com a font d'electricitat proporcionaria molta més quantitat d'energia que la fissió nuclear i generaria menys productes radioactius.

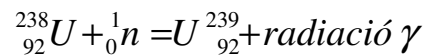
o o o o o

4.4.4 Reacció nuclear de captura

És una reacció nuclear en què un neutró impacta contra un nucli atòmic d'un element de manera que l'àtom l'absorbeix al seu nucli. El resultat és un àtom del mateix element que té un neutró més, és a dir, un altre isòtop d'aquest element.

Aquestes reaccions s'utilitzen per transformar isòtops d'elements. Són utilitzades en la indústria nuclear per a la creació de combustible, ja que els permet transformar material no fissible en material fissible.

Exemple:



Aquest tipus de reacció sempre emet radiacions gamma.

o o o o o

4.4.5 Reacció nuclear de fissió

La fissió és una reacció en què un nucli pesat es divideix en dos o més nuclis de menor nombre atòmic, acompanyats de radiacions. És un procés exotèrmic, per tant, es desprenen grans quantitats d'energia, que es manifesta en forma de radiacions i en energia cinètica que adopten els fragments resultants. Aquest model de reacció és el que s'utilitza actualment en les centrals nuclears de manera que és el que estudiarem amb més detall.

4.4.5.1 Característiques

Per iniciar una reacció de fissió és necessària una partícula externa que la activi. Aquesta partícula ha de poder penetrar a l'àtom i trencar el nucli. Podrien ser neutrons,

electrons o protons, ja que es poden trobar lliures, però diferents factors fan que només unes partícules en concret siguin capaces de complir amb aquesta funció:

- **Electrons:** si s'utilitzessin electrons lliures probablement no podrien penetrar a l'àtom perquè serien rebutjats per la capa d'electrons perifèrics d'aquest, ja que tenen la mateixa càrrega. I en el cas que arribessin al nucli, el seu efecte seria gairebé nul perquè la massa d'un electró és insignificant respecte la massa d'un nucli atòmic.
- **Protons:** tampoc servirien perquè serien repel·lits pels protons de l'àtom i, ni tan sols, arribarien a xocar.
- **Neutrons:** en canvi, els neutrons, que no tenen càrrega, no tindrien problemes per arribar al nucli i el seu efecte seria considerable, ja que la seva massa ja és comparable amb la d'un nucli atòmic.

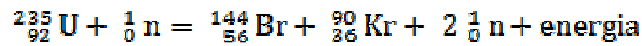
Per tant, la fissió nuclear solament és possible amb la intervenció de neutrons.

Però per que es realitzi una reacció de fissió també hi ha altres factors que la condicionen:

- **Estructura nuclear del material:** Els elements que tenen estructures nuclears més grans són més fàcils de fissionar-se perquè hi ha moltes més possibilitats d'encert. A més, la fissió en els elements més pesats que el ferro produeixen energia, però els menys pesats en requereixen per activar-se. Si l'objectiu és produir-ne i tenir la major possibilitat d'encert, els dos elements que presenten una major combinació d'abundància a la natura i facilitat de ser fissionats són dos, l'urani i el plutoni.
- **Massa del material:** la quantitat de material també influeix en la probabilitat de xocs i partició de nuclis atòmics i per això és necessari un nombre mínim d'àtoms. Caldrà doncs, una massa mínima de material, que serà diferent per cada element. Aquesta quantitat mínima rep el nom de *massa crítica*.
- **Velocitat del neutró projectil:** La velocitat del neutró projectat també condiciona la reacció. Si és massa ràpida o massa lenta travessarà el nucli o hi rebotarà, respectivament, i no el trencarà. El valor de velocitat necessari perquè es produeixi la fissió, que dependrà del material també, rep el nom de *velocitat de ressonància*.

Els materials productes de la fissió poden ser diferents elements químics, però generalment són elements amb nuclis atòmics que tenen la meitat de neutrons i protons que el nucli del material que és fissionat. Aquests elements que en resulten solen ser molt radioactius, és a dir, isòtops inestables que es descompondran mitjançant cadenes de desintegració.

Una reacció de fissió molt important a les centrals nuclears és la següent:

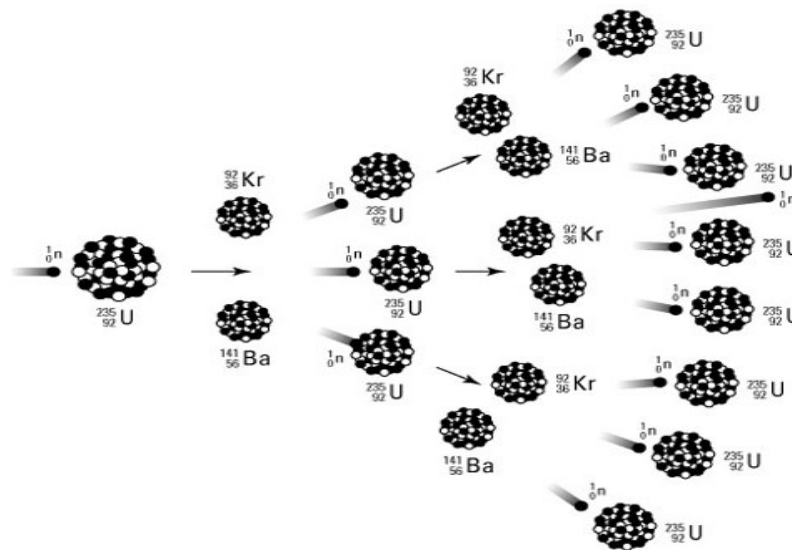


Un neutró que es mou a la velocitat de ressonància impacta contra el nucli de l'àtom d' ${}^{235}\text{U}$ i es fissiona en un àtom de ${}^{144}\text{Ba}$ i un àtom de ${}^{90}\text{Kr}$, després 2 neutrons i emet energia.

4.4.5.2 Reacció de fissió en cadena

Després de la primera fissió es desprenen neutrons que es poden aprofitar per provocar noves reaccions de fissió. Com es pot comprovar a la imatge següent, l'efecte és multiplicatiu, de manera que amb un sol neutró inicial es pot fissionar una gran quantitat de material fissible en una període de temps molt curt.

Els neutrons lliures que es desprenen de la primera fissió impacten contra nous nuclis de material fissible, que generen nous subproductes i nous neutrons lliures, i així successivament.



49. Esquema d'una reacció de fissió en cadena d' ${}^{235}\text{U}$.

Ara bé, els neutrons lliures després de les fissions nuclears tenen una velocitat molt superior a la velocitat de ressonància i, consegüentment, no poden provocar noves fissions. D'alguna manera s'ha de frenar la seva velocitat i aconseguir la velocitat adequada.

D'aquesta funció se n'encarreguen certes substàncies anomenades moderadors. Aquestes substàncies tenen un nombre de partícules nuclears i no queden afectades pels neutrons ràpids. La seva funció consisteix en absorbir part de l'energia cinètica dels neutrons, quan aquests impacten contra els seus nuclis. Llavors aquests neutrons perden velocitat i esdevenen neutrons lents o tèrmics. Els materials utilitzats com a moderadors són el grafit, el beril·li, l'aigua pesada³ i l'heli.

Amb una massa supercrítica de combustible i moderant la velocitat dels neutrons ràpids ja es pot iniciar una reacció de fissió. Ara només fa falta poder-la controlar i regular.

S'ha de moderar la velocitat en que es produeix la reacció perquè en molt poc temps es podrien generar grans quantitats d'energia i la temperatura podria augmentar a milions de graus, de forma que es crearia una immensa explosió nuclear. La manera en que aquest procés es pot regular és aprofitant un determinat nombre de neutrons de tots els que es produeixen en una fissió, ja que així es limitaria la velocitat de la reacció en cadena. Per aconseguir controlar la quantitat de neutrons que es generen s'utilitzen materials absoerbents de neutrons. Normalment s'usen materials com el cadmi i el bor. Als reactors nuclears, aquests materials tenen forma de barres, que s'anomenen barres reguladores o de control, i permeten controlar la potència de la reacció.

³ Aigua pesada: molècula d'aigua formada per dos àtoms de deuteri i un d'oxigen. La seva fórmula és: $^2\text{H}_2\text{O}$.

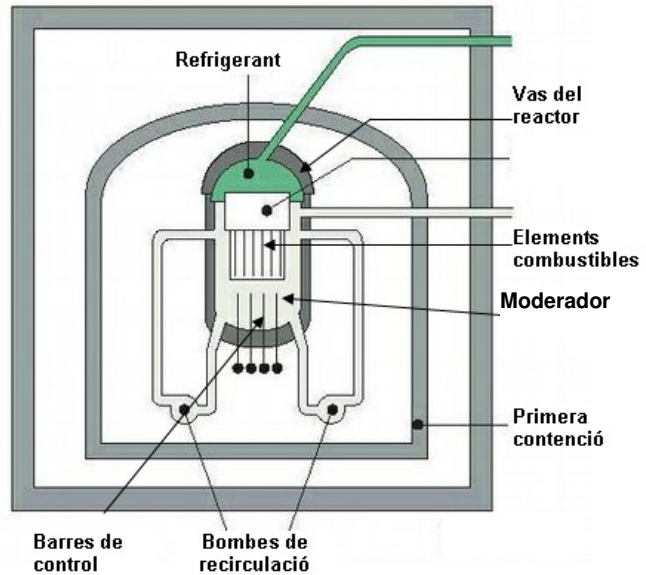
ANNEX 2

ESTRUCTURA I FUNCIONAMENT D'UN REACTOR NUCLEAR

1 REACTOR NUCLEAR

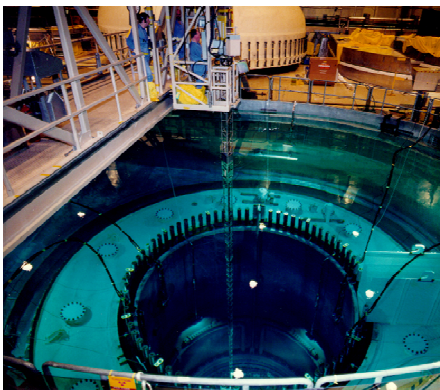
El reactor nuclear és un dispositiu capaç d'iniciar, mantenir i controlar les reaccions nuclears de fissió en cadena que es produeixen al nucli del reactor. Està format per tots els elements que realitzen la reacció i el conjunt de dispositius auxiliars que la controlen i n'extreuen la calor.

Per entendre el funcionament d'un reactor nuclear és necessari conèixer cada un dels dispositius i elements que intervenen en la reacció de fissió en cadena.



50. Estructura d'un reactor nuclear.

1.1 ESTRUCTURA D'UN REACTOR NUCLEAR



51. Vista interior del vas d'un reactor nuclear.

Un reactor nuclear està estructurat pel vas del reactor, a l'interior del qual hi ha el nucli, i per les diferents barreres que protegeixen la reacció de fissió de l'exterior.

Està format per dispositius i elements que controlen i fan possible la reacció, com per exemple, el combustible nuclear, les barres de combustible, les barres de control, el material moderador i el material refrigerant.

Un reactor nuclear està dotat de molts sistemes de seguretat de funció complexa i alta tecnologia. Nosaltres només en coneixerem els dispositius més bàsics i fonamentals.

o o o o o

1.1.1 Vas del reactor



52. Vas del reactor de la central nuclear de Vandellós II.

El vas del reactor és el dipòsit a on s'hi troben tots els dispositius que controlen la reacció nuclear i el nucli del reactor. La seva funció és protegir el nucli del reactor i evitar l'emissió de radiació fora de la contenció. Està recobert de parets protectores i blindatges amb materials com el plom, l'acer i formigons especials.

o o o o o

1.1.2 Combustible nuclear

El combustible nuclear està format per materials fissibles que han sigut adaptats per funcionar en un reactor nuclear i produir una reacció nuclear de fissió en cadena. Tenen forma de pastilles cilíndriques i són sòlides i compactes.

1.1.2.1 Materials fissibles

Els materials fissibles són materials que es fissionen quan són bombardejats amb neutrons. N'hi ha molts que tenen aquesta característica, però no tots serveixen com a combustibles nuclears perquè han de complir amb unes condicions específiques. Primerament han de tenir més probabilitat de fissionar-se que de



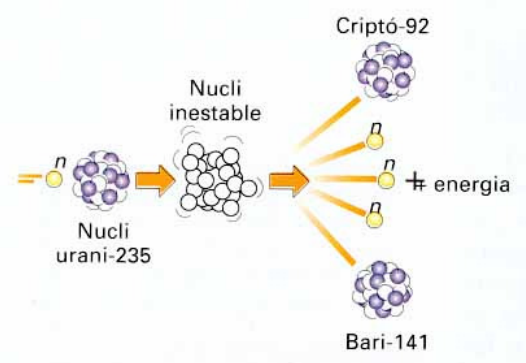
53. Piles de combustible nuclear

capturar el neutró amb el qual interactua, i després han de ser adequats per mantenir una reacció de fissió en cadena. També han de ser eficaços, és a dir, que han de desprendre força energia i han d'alliberar suficient quantitat de neutrons i amb les velocitats adequades.

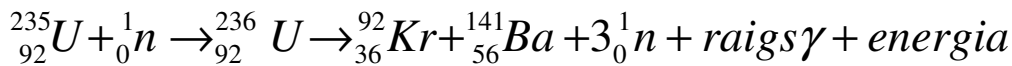
Els materials fissibles més eficaços i capaços de realitzar fissions en cadena són l' ^{233}U , l' ^{235}U i el ^{239}Pu .

²³⁵Urani: L'²³⁵U és l'únic dels tres que es troba en estat natural, però és molt escàs. L'urani natural està constituït per un 0,7% d'²³⁵U i per un 99,3% d'²³⁸U, que no és fissible.

La fissió de l'²³⁵U és la reacció més important que es produeix als reactors nuclears. En reaccionar, primer es forma ²³⁶U, un isòtop d'urani molt inestable, i ràpidament es fissiona, en diferents isòtops més estables. En aquest exemple els productes són ⁹²Kr i ¹⁴¹Ba. La reacció és:



54. Fissió de l'²³⁵U.



Per aprofitar els diferents isòtops d'urani que es troben junts a la natura, s'utilitzen dues tècniques per millorar i augmentar les possibilitats de que l'²³⁵U es fissioni a partir dels neutrons i evitar que l'²³⁸U els absorbeixi. Aquestes tècniques són:

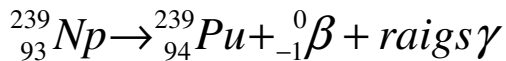
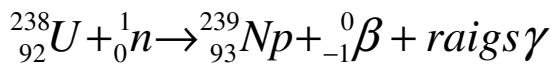
- **Disminuir la velocitat dels neutrons:** La velocitat dels neutrons influeix en la capacitat dels isòtops en fissionar-se o produir una reacció de captura. Si es disminueix la velocitat dels neutrons, es pot disminuir les possibilitats de captura de neutrons pels nuclis d'²³⁸U i incrementar la probabilitat de fissions de l'²³⁵U. Aquest procés es dur a terme directament als reactors nuclears i s'utilitzen materials moderadors.
- **Enriquir l'urani natural amb ²³⁵U:** o sigui, augmentar la concentració de l'²³⁵U de l'urani natural. per reduir la influència de l'²³⁸U. És un procés complex i difícil que es basa en les propietats físiques dels isòtops i requereix una tecnologia avançada i força inversió capital. Aquesta tècnica es realitza per preparar els combustibles nuclears, que variaran segons el grau d'enriquiment d'²³⁵U que tinguin i cada reactor nuclear necessitarà algun combustible determinat.

L'²³³U i el ²³⁹Pu es produeixen mitjançant processos artificials. L'²³³U es produeix a partir de reaccions de captura sobre nuclis de ²³²Th i el ²³⁹Pu a partir de reaccions de captura sobre nuclis d'²³⁸U.

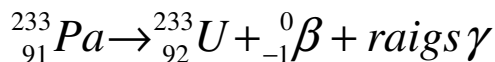
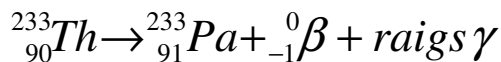
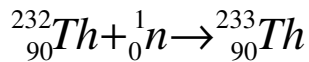
1.1.2.2 Materials reproductors o fèrtils

Són els materials dels quals provenen els materials fissibles artificials. Són tant importants com els materials combustibles, ja que la majoria d'ells es formen a partir d'aquests. Són materials fèrtils el ^{232}Th i l' ^{238}U .

^{239}Pu : el ^{239}Pu es produeix a partir d'un canvi radioactiu de l' ^{238}U . La reacció és:



^{233}U : l' ^{233}U es produeix a partir del ^{232}Th . Primer es produeix una reacció de captura i es converteix en ^{233}Th . Aquest es transforma a partir de canvis radioactius en ^{233}Pa i finalment en ^{233}U . Les reaccions serien:



Hi ha molts altres materials que s'utilitzen i altres reaccions nuclears que es realitzen a la indústria nuclear, però aquests són els més importants.

1.1.2.3 Combustibles nuclears

Segons quin material fissible s'utilitza o amb quina quantitat, trobem diferents tipus de combustibles. Els més importants i els que s'utilitzen en les centrals nuclears són combustibles formats per òxids d'urani. Són el UO_2 i els òxids mixtos anomenats MOX.

- **Diòxid d'urani (UO_2):** És el combustible més usual als reactors BWR¹ i PWR² i està format per urani natural o enriquit.
- **Òxids mixtos (MOX):** és una mescla de plutoni i urani natural empobrit i és un combustible alternatiu al de UO_2 . No és necessari enriquir-lo, i, per tant, el seu procés d'obtenció és més fàcil, però també genera productes de fissió més radioactius.

¹ BWR: reactor d'aigua en ebullició. Es caracteritza per utilitzar vapor d'aigua per extreure la calor del reactor.

² PWR: reactor d'aigua pressuritzada. És un model de reactor que també utilitza vapor d'aigua per extreure'n la calor del reactor, però a diferència del BWR, aquest treballa a pressions molt més elevades.

1.1.2.4 Subproductes atòmics

Són els materials productes de les reaccions de fissió dels reactors nuclears. Regularment s'han d'anar extraient del reactor per evitar la seva acumulació, ja que podria comportar una disminució del rendiment o directament una aturada de la reacció en cadena. La majoria d'aquests són molt radioactius, propietat que és manté durant molt de temps i que va disminuint lentament.

Aquests residus són transportats fins a grans dipòsits subterranis d'acer, altament protegits, a on es guarden permanentment.

.....

1.1.3 Barres de combustible

Les barres de combustible són uns tubs llargs i prims, anomenats beines i fets de zircaloy, un aliatge de zirconi, que contenen les pastilles de combustible. Aquestes barres separen el combustible del refrigerant, però en deixen transmetre la calor. Les barres s'agrupen en feixos anomenats elements combustibles.



55. Barres de combustible de Grupo ENUSA.

El zirconi és un material que no absorbeix neutrons i que té una bona resistència tèrmica.

A l'interior de les barres es produeixen les reaccions de fissió i és a on es dipositen els productes de fissió. Constitueixen la primera protecció del combustible i dels productes radioactius.

.....

1.1.4 Barres de control

Són unes barres que limiten les reaccions nuclears en cadena absorbint els neutrons sobrants i que permeten que sigui un procés regulable i completament controlable. Una fissió nuclear en cadena s'ha de mantenir en una velocitat adequada per evitar un sobreescalfament del reactor i un descontrol de la reacció. Aquestes barres constitueixen els elements reguladors del reactor nuclear. Han de tenir materials que siguin molt absorbents de neutrons, i generalment estan fetes de cadmi i de bor.

S'introdueixen per uns forats que hi ha entre les beines, les barres de combustible, i n'absorbeixen els neutrons. Ràpidament poden aturar una reacció de fissió en cadena.

.....

1.1.5 Moderador

El moderador és un material que té la funció de disminuir la velocitat dels neutrons que es van alliberant en la fissió nuclear en cadena per augmentar les possibilitats de fissió dels isòtops fissibles del combustible, de manera que es millora l'eficàcia i el rendiment de la reacció.

La velocitat es disminueix quan els neutrons impacten contra els nuclis dels àtoms del moderador i perden part de l'energia cinètica que tenen perquè els àtoms l'absorbeixen.

Certs materials tenen la capacitat de realitzar aquesta funció i els més utilitzats són l'aigua, l'aigua pesada, el grafit i el beril·li.

El moderador es troba dins el vas de contenció i envolta els elements combustibles.

.....

1.1.6 Material reflector

El material reflector evita les fugues de neutrons, ja que els reflexa i els fa tornar al combustible nuclear. Pot estar compost de grafit, beril·li, acer, zirconi o altres materials.

En un reactor nuclear, el material reflector forma una capa que envolta el nucli del reactor.

.....

1.1.7 Refrigerant

Els materials refrigerants tenen una doble funció en un reactor nuclear. Per una banda tenen la funció de transportar la calor extreta del nucli del reactor cap a l'intercanviador tèrmic, a través del circuit primari, i per l'altra, refrigerar el reactor per evitar-ne un sobreescalfament.

Han de ser uns materials bons conductors de la calor i no han de ser corrosius. Hi ha molts tipus de refrigerants, però els més comuns són el CO₂, l'heli, l'aigua i l'aigua pesada.