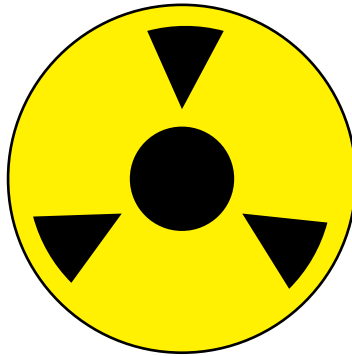




Kjarni jarðar, kjarnorka og viska náttúrunnar

Hugsun á tímaskala eilífðar

Kári

11. september 2025

*Þessi skýrsla fjallar um náttúrulega orku, jarðfræðilega djúpvísku og hvernig kjarnorka
tengist tíma og efni í samhengi eilífðar.*

Efnisyfirlit

1	Inngangur	4
2	Jarðhiti sem náttúruleg kjarnorka	5
3	Munurinn á náttúrulegri og manngerðri kjarnorku	6
3.1	Samanburður á úrani og þóríum	7
3.2	Oklo í Gabon: Náttúrulegt kjarnorkuver	8
3.2.1	Einstakt jarðfræðilegt fyrirbæri	8
3.2.2	Áhrif á nútíma úrgangsgeymslur	9
3.3	Nokkur geislavirk efni	10
4	Hvað gerir jörðin við úrganginn?	11
5	Stýring klofnunar í kjarnorkuveri	12
5.1	Stýring klofnunar	12
5.1.1	Sjálfbær keðjuverkun	12
5.1.2	Stýristangir	12
5.1.3	Hægfare nifteindir	12
5.2	Tafla: Þættir sem stýra klofnunarferlinu	13
5.3	Þóríumeldsneytishringrás	14
5.4	Heimspækileg hugsun: Tækni sem virðir eilífðina	14
6	Rannsóknir á þóríum í Danmörku og hjá CERN	15
6.0.1	Danmörk: Copenhagen Atomics og bráðnunarsalttæknin	15
7	CERN: Ráðstefna um þóríum sem orkugjafa og ADS-tilraunir	16
8	Ályktun	17
9	Yucca Mountain úrgangsgeymslan	18
9.0.1	Upphaf máls	18

9.0.2	Meðhöndlun úrgangs	18
9.0.3	Yucca Mountain sem geymslustaður	19
9.0.4	Afturköllun og lagaleg deila	19
9.0.5	Framvinda málsins	19
9.0.6	Áframhaldandi barátta	19
9.0.7	Samanburður: Dæmi af sundlaug	20
9.0.8	Eðli úrgangsins	20
9.0.9	Niðurstaða	20
9.0.10	Hugsun jarðar og arfleifð Hanford	21
10	Endurvinnsla úran-úrgangs og tengsl við þóríum	22
10.1	Úran-úrgangur og endurvinnsla	22
11	Þóríum sem valkostur	23
12	Tengsl og framtíðarmöguleikar	24
13	Framtíðarsýn: Kjarnorka í samhljómi við jörðina	25
13.1	Niðurstaða	25
14	Niðurlag	26
15	Eftirmáli	27
16	Viðauki	28
16.1	Eðli geislunar	28
16.2	Alþjóðleg kjarnorkuslys og alvarleg óhöpp (hefðbundin kjarnorkuver)	28
16.3	Evrópa	28
16.3.1	1957 – Windscale [Nú Sellafield], Bretland	28
16.3.2	1957 – Kyshtym (Mayak), Sovétríkin	29
16.3.3	1969 – Lucens, Sviss	29
16.3.4	1969 & 1980 – Saint-Laurent, Frakkland	29
16.3.5	1975 – Greifswald (Lubmin), Atomkraftwerk, Þýskaland	29
16.3.6	1977 – Bohunice A-1, Tékkóslóvakía (Slóvakía)	29
16.3.7	1986 – Chernobyl, Úkraína (SSSR)	30
16.3.8	1989 – Vandellós I, Spánn	30
16.3.9	1992 – Barsebäck 2, Svíþjóð	30
16.3.10	1999 – Blayais, Frakkland	30
16.3.11	2003 – Paks, Ungverjaland	30
16.3.12	2006 – Forsmark, Svíþjóð	31

16.4	Ameríka	31
16.4.1	1952 – Chalk River (NRX), Kanada	31
16.4.2	1958 – Chalk River (NRU), Kanada	31
16.4.3	1959 – Santa Susana (SRE), Bandaríkin	31
16.4.4	1961 – SL-1, Idaho, Bandaríkin	31
16.4.5	1975 – Browns Ferry, Bandaríkin	31
16.4.6	1979 – Three Mile Island, Bandaríkin	32
16.4.7	1987 – Goiânia, Brasilía	32
16.4.8	2002 – Davis-Besse, Bandaríkin	32
16.5	Asía	32
16.5.1	1993 – Narora, Indland	32
16.5.2	1999 – Tokaimura (JCO), Japan	33
16.5.3	2004 – Mihama-3, Japan	33
16.5.4	2011 – Fukushima Daiichi, Japan	33
16.5.5	2021 – Taishan-1, Kína	33
16.5.6	2012 – Kori-1, Suður-Kórea	33

1 Inngangur

Að hugsa á tímaskala eilífðarinnar.

Þessi setning er ekki einungis heimspekileg — hún er leiðarljós. Hún kallar fram hugsun sem nær út fyrir núíð, út fyrir kynslóðir, út fyrir mannkynið sjálft. Í þessari grein er markmiðið að skoða kjarnorku ekki einungis sem tæknilegt fyrirbæri, heldur sem speglun á „náttúrulegri visku jarðar“. Eðlisfræðileg ferli jarðar framkalla varma og neutrínur [neutrínur eru afurð klofnunar]. Kenningin um náttúrulega kjarnaklofnun byggir m.a. á samanburði við vísindalega uppgötvun í Oklo í Gabon, en hefur ekki verið staðfest með beinum mælingum og er enn umdeild innan jarðvísinda.

Jarðhiti, m.a. á Íslandi, er samkvæmt þessu, afleiðing af geislavirku niðurbroti sem hefur haldið jörðinni heitri í milljarða ára.

Kannað verður hvernig náttúran sjálf meðhöndlar kjarnorku, hvað má læra af því, og hvernig hugsa má á tímaskala eilífðarinnar — með virðingu, ábyrgð og dýpt.

2 Jarðhiti sem náttúruleg kjarnorka

Kjarnorku fylgir talsverð áhætta. Hún felst meðal annars í því að kæling kjarnakljúfa getur brugðist. Þá kann voðinn að vera vís, og sú hættu er fyrir hendi að geislavirk efni losni út í andrúmsloftið.

Það má þó hugga sig við það að kjarna jarðar er stundum lýst sem eins konar kjarnorkuveri.¹

Jarðhiti er afleiðing af geislavirkni djúpt í iðrum jarðar:

- Þung frumefni eins og **úran, þóríum og kalíum-40** brotna niður í jarðskorpu og möttli.
- Þessi niðurbrot gefa frá sér **varmaorku**, sem hitar berg og vatn.
- Þegar þessi orka leitar upp á yfirborð, er hægt að nýta hana — eins og gert er í Hellisheiðarvirkjun og Nesjavallavirkjun.

Þetta er náttúruleg kjarnorka, sem jörðin hefur haldið stöðugri og öruggri í milljarða ára.

¹Herndon, J. M. (2003): Evidence for a natural nuclear reactor at the Earth's core. Í þessari grein er sett fram kenning um að í innsta kjarna jarðar geti verið virkt kjarnorkuver — svokallaður georeactor. Þannig má segja að „menn búi ekki til eitthvað framandi — heldur endurspegli það sem náttúran sjálf hefur gert í milljarða ára.“

3 Munurinn á náttúrulegri og manngerðri kjarnorku

Þegar kjarnaklofnun er framkvæmd á yfirborði jarðar — þótt í verum sé — þá er ákveðin berskjöldun til staðar. Menn „kveikja eld“ sem jörðin sjálf geymir í öruggum „hylkjum“. Menn bera ábyrgð á honum — ekki bara tæknilega, heldur siðferðislega og tilverulega.

Eiginleiki	Jarðkjarni (náttúrulegt)	Mannlegt kjarnorkuver (yfirborð)
Staðsetning	Djúpt í möttli og kjarna	Á yfirborði jarðar
Einangrun	Þykk berglög, náttúruleg hula	Mannvirki, oft viðkvæm fyrir áföllum
Tímaskali	Milljarðar ára, stöðug þróun	Áratugir, háð stjórnámálum og fjármagni
Hætta á slysum	Nánast engin	Möguleg geislun, bráðnun, leki
Geislavirkt úrgangsefni	Dreift og bundið í bergi	Þétt, hættulegt og erfitt að geyma

Tafla 3.1: Samanburður á náttúrulegri og manngerðri kjarnorku.

Land	Svæði / Athugasemdir	Þóríum (kt)
Indland	Monazít-sandur við strendur ²	846
Ástralía	Monazít og bastnasít ³	595
Bandaríkin	Ýmis svæði (sérstaklega Alaska) ⁴	400
Noregur	Sjaldgæf jarðefni ⁵	132
Brasilía	Monazít-sandur ⁶	302
Kína	Bastnasít og leir með jónaskiptum ⁷	100
Rússland	Flókin jarðefnasamsetning ⁸	75
Tyrkland	Þórít og allanít ⁹	344
Egyptaland	Monazít-sandur ¹⁰	38
Suður-Afríka	Þungmálmasandur ¹¹	35

Tafla 3.2: Áætlaðar birgðir af þóríum í helstu löndum (í þúsund tonnum).

Heimild: OECD NEA og IAEA – „Thorium Fuel Cycle – Potential Benefits and Challenges“, 2015.

3.1 Samanburður á úrani og þóríum

Eiginleiki	Úran (U-235/U-238)	Þóríum (Th-232)
Nýting í kjarnorkuverum	Algengast í núverandi verum	Tilraunakennd, en lofar góðu
Geislavirkur úrgangur	Mikill og langvarandi	Minni og stöðugri
Hætta á vopnavæðingu	Há, hægt að framleiða Plútóníum	Lág, ekki beint nothæft í vopn
Náttúruleg dreifing	Dreift í bergi, oft í háum styrk	Víða til, en minna virkt
Sjálfbærni	Takmörkuð, háð auðlindum	Möguleg langtíma sjálfbærni

Tafla 3.3: Samanburður á kjarnakleifum efnum.

²Monazít er fosfat (steinefni) sem inniheldur sjaldgæf jarðefni og þóríum. Finnst oft í sandi við strendur.

³Bastnasít er karbónat (steinefni) sem inniheldur mikið af sjaldgæfum jarðefnum. Monazít er t.a.m. algengt í Ástralíu.

⁴Þóríum finnst í fjölbreyttum jarðefnum í Bandaríkjunum, m.a. í Alaska þar sem sjaldgæf jarðefni eru unnin.

⁵Noregur hefur birgðir af sjaldgæfum jarðefnum sem innihalda þóríum, þó ekki í stórum mæli.

⁶Brasilía er þekkt fyrir monazít-sand sem inniheldur þóríum og sjaldgæf jarðefni.

⁷Í suðurhluta Kína finnst jónaskiptaleir sem bindur sjaldgæf jarðefni. Bastnasít er einnig mikilvæg uppspretta.

⁸Þóríum í Rússlandi er bundið í fjölbreyttum jarðefnum, m.a. allanít og torít.

⁹Þórít og allanít eru steindir sem innihalda þóríum og sjaldgæf jarðefni. Finnast m.a. í Tyrklandi.

¹⁰Monazít-sandur við strendur Egyptalands inniheldur þóríum og er unnin í litlum mæli.

¹¹Þungmálmasandur inniheldur ýmis geislavirk efni, þar á meðal þóríum.

Fyrsta þóríumkjarnorkuverið

Kínverjar hyggjast byggja fyrsta kjarnorkuver heims sem notar bráðið salt sem bæði eldsneytisburð og kælimiðil, og þóríum sem eldsneytisgjafa.

Sérfræðingar segja að slíkir kjarnakljúfar séu „eðlislega öruggari“ en hefðbundnir kjarnakljúfar og hafi ýmsa kosti. Hins vegar hafa vísindamenn lengi glímt við vanda-mál eins og tærandi áhrif ofhitaðra geislavirkra salta.

Hvers er að vænta? Gert er ráð fyrir því að bygging rannsóknarstöðvar hefjist á næsta ári [2025] og að rekstur hefjist árið 2030, með fullri framleiðslu í kjölfarið.^a

^aSjá frétt á vef ABC News.

Kjarnorkuver eru í raun gufuaflsvirkjanir þar sem varmi frá kjarnaklofnun er notaður til að framleiða rafmagn. Í kjarnaofni klofna þung frumefni, oft úran eða plútóníum,¹² sem losa mikla varmaorku. Þessi varmi hitar vatn í lokuðu kerfi þar sem það breytist í háþrýstingsgufu. Gufan knýr síðan gufuhverfla sem snúa rafölum og framleiða þannig rafmagn.

Eftir notkun er gufan kæld og þéttist aftur í vatn sem er endurnýtt í kerfinu. Þessi aðferð er svipuð þeirri sem notuð er í kolavirkjunum og jarðgufuvirkjunum, nema að orkugjafinn er kjarnaklofnun í stað bruna eða jarðvarma. Kjarnorkuver eru því tæknilega séð háþróaðar gufuaflstöðvar, þar sem orkan kemur frá klofningi frumeinda í stað hefðbundinna orkugjafa.

3.2 Oklo í Gabon: Náttúrulegt kjarnorkuver

Árið 1972 uppgötvuðu franskir vísindamenn í Oklo, í Gabon í Vestur-Afríku, náttúrulegt kjarnorkuver sem hafði verið virkt fyrir um tveimur milljörðum ára. Þar hafði úran-235 safnast saman í nægilegu magni og við réttar aðstæður til að viðhalda sjálfvirkri kjarnaklofnun — „án íhlutunar að utan“.¹³

3.2.1 Einstakt jarðfræðilegt fyrirbæri

Oklo-fyrirbærið er einstakt í jarðsögunni og hefur veitt mikilvægar upplýsingar um náttúrulega kjarnaklofnun og einangrun geislavirks úrgangs:

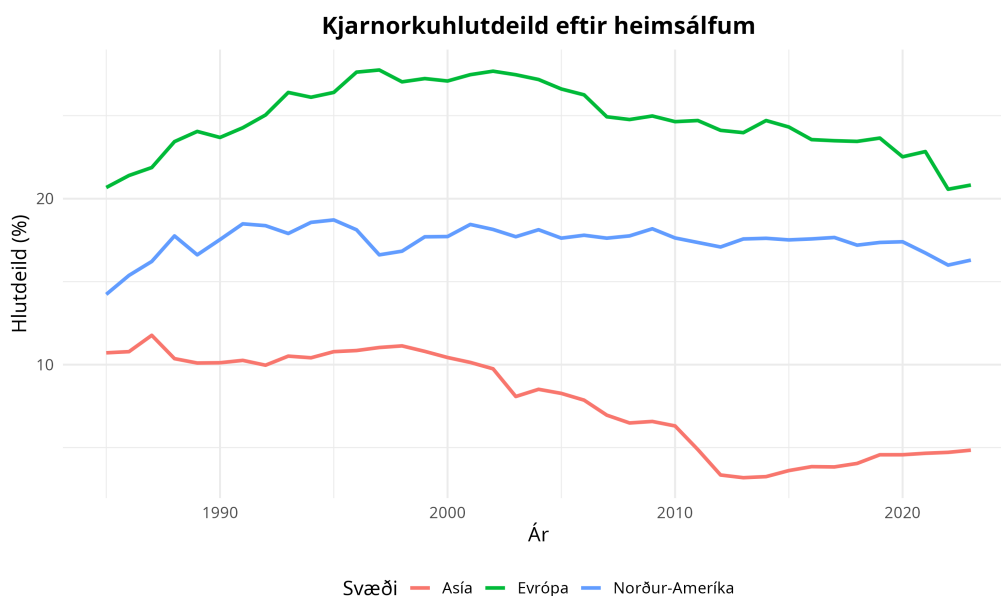
¹²Úran-235 er algengast í hefðbundnum kjarnorkuverum, einkum í léttvatnsöfnum. Plútóníum-239, sem einnig er geislavirk samsæta og hluti af frumefninu plútóníum, er stundum notað í endurunnu eldsneyti, svokölluðu MOX-eldsneyti (Mixed Oxide Fuel), einkum í Evrópu og Japan.

¹³(IAEA, 2018.)

- Kjarnaklofnunin var stöðug í hundruð þúsunda ára þar sem nifteindir héldu keðjuverkun gangandi.
- Geislavirkur úrgangur hélst einangraður í berginu, án þess að leita út í grunnvatn eða jarðveg.
- Jarðfræðileg einangrun virðist geta veitt langvarandi öryggi fyrir geislavirkan úrgang.

3.2.2 Áhrif á nútíma úrgangsgeymslur

Þessi uppgötvun hefur verið notuð sem raunverulegt dæmi í umræðum um örugga langtímageymslu geislavirks úrgangs. Hún styður hugmyndina um að jarðfræðileg einangrun sé raunhæf og örugg lausn.¹⁴



Mynd 3.1: Þróun kjarnorkuhlutfalls í rafmagnsframleiðslu í Evrópu, Norður-Ameríku og Asíu á tímabilinu 1985–2023. Í Evrópu hefur kjarnorka haldist nokkuð stöðug sem burðarás meðal annara orkugjafa, með meðalhlutfall upp á 24,7% og litlar sveiflur yfir tímabilið. Norður-Ameríka sýnir svipaðan stöðugleika, með lítilsháttar hækkun frá 14,2% í 1985 upp í 16,3% árið 2023. Á hinn bóginn hefur hlutdeild kjarnorku í Asíu dregist verulega saman — úr 10,7% niður í 4,85% — sem endurspeglar áhrif Fukushima-slyssins, aukningu í endurnýjanlegri orku og breyttar áherslur í orkumálum á svæðinu. Þessi þróun sýnir hvernig blanda orkugjafa heimsálfa mótast af tæknilegum, pólitískum og samfélagslegum þáttum. Gögn byggjast á Ember (2025) og Energy Institute – Statistical Review of World Energy (2025), með úrvinnslu frá Our World in Data, gerðri í tölfraðiforritinu R.

¹⁴(radioactivity.eu.com, 2025.)

3.3 Nokkur geislavirk efni

Taflan sýnir samanburð á helmingunartíma nokkurra geislavirkniefna og tengsl þeirra við geislavirknistyrk. Efni með stuttan helmingunartíma losa geislun hraðar og hafa því hærri geislavirknistyrk á skömmum tíma, en missa virkni sína fljótt. Á móti eru efni með langan helmingunartíma stöðugri til lengdar og geislunin dreifist yfir lengri tímabil. Þessi samanburður er lykilatriði við mat á hættu og notkun geislavirkniefna í iðnaði og umhverfi.¹⁵

Efni	Kjarnasamsetning	Helmingunartími
Uran-235 (U_{92}^{235})	92 róteindir, 143 nifteindir	703.8 milljónir ára
Uran-238 (U_{92}^{238})	92 róteindir, 146 nifteindir	4.468 milljarðar ára
Þóríum-232 (Th_{90}^{232})	90 róteindir, 142 nifteindir	14.05 milljarðar ára
Plútóníum-239 (Pu_{94}^{239})	94 róteindir, 145 nifteindir	24,100 ár
Plútóníum-238 (Pu_{94}^{238})	94 róteindir, 144 nifteindir	87,7 ár
Strontíum-90 (Sr_{38}^{90})	38 róteindir, 52 nifteindir	28.8 ár
Cesíum-134 (Cs_{55}^{134})	55 róteindir, 79 nifteindir	2.06 ár
Cesíum-135 (Cs_{55}^{135})	55 róteindir, 80 nifteindir	2.3 milljónir ára
Cesíum-137 (Cs_{55}^{137})	55 róteindir, 82 nifteindir	30.17 ár
Karbón-14 (C_6^{14})	6 róteindir, 8 nifteindir	5,730 ár
Radon-222 (Rn_{86}^{222})	86 róteindir, 136 nifteindir	3.8 dagar
Jód-131 (I_{53}^{131})	53 róteindir, 78 nifteindir	8.02 dagar
Polonium-210 (Po_{84}^{210})	84 róteindir, 126 nifteindir	138 dagar

Tafla 3.4: Samanburður á helmingunartíma á algengum geislavirkum efnum.

¹⁵Sjá einnig: Plexus-NSD.

4 Hvað gerir jörðin við úrganginn?

Þegar geislavirk efni klofna í iðrum jarðar, þá:

- Eru þau dreifð í bergi — ekki í þéttum haugum.
- Eru þau einangruð djúpt í jarðskorpu¹⁶ og möttli.
- Klofna hægt og stöðugt — og jörðin hefur nægan tíma til að dreifa varmanum.
- Þau safnast ekki saman í „hættulegum hylkjum“ — heldur verða hluti af náttúrulegri hringrás.

Hvað má læra af þessu: Ef geyma þarf úrgang, verður að „hugsa eins og jörðin“ — með tímaskyn, þolinmæði og djúpa einangrun.

¹⁶Samkvæmt frétt *Morgunblaðsins*, þann 16. september 2015, greindist staðbundin uppsöfnun náttúrulegra geislavirkra efna í útfellingum í borholutoppum við Reykjanesvirkjun. Þar komu fram samsætur eins og blý-210 (Pb-210), bismút-210 (Bi-210) og póloníum-210 (Po-210), sem eru dótturefni úr úrani (U-238). Geislavirkni var mælanleg en talin innan viðmiðunarmarka, og efnin voru bundin í föstu formi innan lokaðs kerfis. Sjá: https://www.mbl.is/frettir/innlent/2015/09/16/geislavirkni_finnst_a_reykjanesi/

5 Stýring klofnunar í kjarnorkuveri

Í kjarnorkuveri er klofnun úran-235 (^{235}U) stýrt með nifteindum. Þegar ^{235}U kjarni klofnar, losnar mikil orka og 2–3 nifteindir. Þessar nifteindir geta klofið aðra kjarna og þannig myndast keðjuverkun. Til að viðhalda stöðugri og öruggri orkunýtingu þarf að stýra hraða klofnunar.

5.1 Stýring klofnunar

5.1.1 Sjálfbær keðjuverkun

Klofnun ^{235}U kjarna losar nifteindir sem geta klofið aðra kjarna. Ef of margar nifteindir valda klofnun verður ferlið óstöðugt; ef of fáar, stöðvast ferlið.

5.1.2 Stýristangir

Stýristangir úr efnum eins og bór eða kadmín gleypa nifteindir. Með því að færa stýristangir inn eða út úr kjarnaofninum er hægt að stýra fjölda nifteinda sem valda klofnun.¹⁷

5.1.3 Hægfara nifteindir

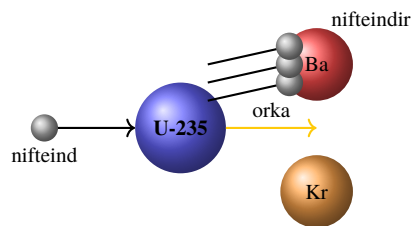
Úran-235 klofnar best við hægfara nifteindir. Kælimiðill, oft vatn, hægir á nifteindunum og eykur líkurnar á klofnun.

¹⁷How does a nuclear reactor work?, World Nuclear Association, August 2025.

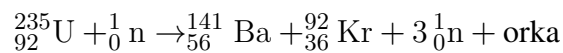
5.2 Tafla: Þættir sem stýra klofnunarferlinu

Þáttur	Hlutverk í stýringu klofnunar
Stýristangir	Gleypa nifteindir, stýra hraða klofnunar
Kælimiðill (vatn)	Hægir á nifteindum, eykur líkur á klofnun
Nifteindir frá klofnun	Koma af stað keðjuverkun

Tafla 5.1: Helstu stýriþættir í kjarnorkuveri.

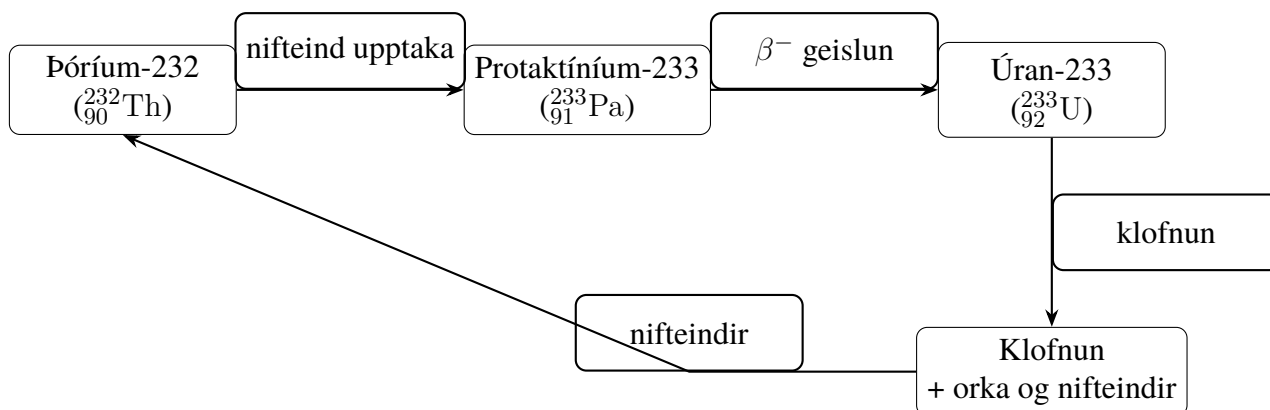


Mynd 5.1: Klofnun úran-235: innkomandi nifteind veldur klofnun og losun nifteinda og orku



Mynd 5.2: Klofnunarferli úran-235. Þegar úran-235 kjarni tekur við nifteind (${}_0^1\text{n}$), klofnar hann í tvo léttari kjarna — barium-141 og krypton-92 — og losar þrjár nýjar nifteindir og mikla orku. Þessar nifteindir geta síðan valdið frekari klofnunum og þannig myndast keðjuverkun.

5.3 Þóríumeldsneytishringrás



Mynd 5.3: **Skýring:** Þóríum-232 tekur við nifteind og breytist í protaktíníum-233. Protaktíníum-233 gengur í gegnum beta-geislun og myndar úran-233, sem er kljúfanlegt efni. Við klofnun úran-233 losnar orka og nifteindir, sem geta viðhaldið hringrásinni. Þetta ferli er grundvöllur fyrir þóríumkjarnorku og hefur möguleika til að vera öruggari og umhverfisvænni en hefðbundin úranhringrás.

5.4 Heimspekileg hugsun: Tækni sem virðir eilífðina

Hugsun óháð tíma — meðvitund sem horfir yfir tilveruna með ábyrgð og virðingu.

Spyrja þarf:

- Er þessi orka nýtt með virðingu fyrir tímaskala eilífðarinnar? ...
- Er hægt að hagnýta kjarnorku þannig að endurspegli náttúrulega einangrun, stöðugleika og dreifingu?
- Er myndaður úrgangur, sem jarðlögin sjálf myndu aldrei framleiða, í mjög miklu magni og á skömmum tíma?

Þetta eru ekki bara tæknilegar spurningar — heldur heimspekilegar, siðferðislegar og heimsfræðilegar. Hugsu þarf eins og „jörðin sjálf“: með þolinmæði, dýpt og virðingu fyrir tilveru sem seint verður skilin til fulls.

6 Rannsóknir á þóríum í Danmörku og hjá CERN

Á síðustu árum hefur áhugi á þóríum sem kjarnorkuelsneyti aukist verulega, bæði vegna öryggis, úrgangsstýringar og þess að efnið hentar ekki vel í vopnaframleiðslu. Tvö merki-
leg rannsóknarverkefni í Evrópu vekja athygli: í Danmörku og hjá CERN¹⁸ í Sviss.

6.0.1 Danmörk: Copenhagen Atomics og bráðnunarsalttæknin

Fyrirtækið **Copenhagen Atomics** vinnur að þróun **bráðnunar-salt-kjarnorkuvera** sem nota þóríum sem eldsneyti. Samkvæmt tilkynningum var áformað, í samstarfi við Paul Scherrer Institute í Sviss, að hefja tilraunaverkefni á þessu sviði í Evrópu árið 2024.¹⁹

- Til verksins er notað **bráðnunarsalt** úr flúoríðum með þóríum og lágauðguðu úrani.
- Hönnunin er **gámastærð** (12 metra einingar), sem gerir verkið færanlegt og staðlað.
- Saltkerfið virkar við **lágan þrýsting** og getur **nýtt kjarnorkuúrgang** sem eldsneyti.
- Gögnum sem safnast í tilrauninni verður beitt við **þróun og hönnun, leyfisveitingar og stefnumótun með áherslu á örugga og friðsamlega nýtingu kjarnorku**.

Þetta verkefni er mikilvægt skref í átt að **dreifðri, öruggri og sjálfbærri kjarnorku** sem byggir á þóríum.

¹⁸The European Organization for Nuclear Research - Kjarnorkurannsóknarstofnun Evrópu.

¹⁹Uatom.org, 19. júlí 2024: *First Critical Experiment on Thorium Molten Salt Reactors to be Held in Europe* [Uatom.org]

7 CERN: Ráðstefna um þóríum sem orkugjafa og ADS-tilraunir

Hjá CERN í Genf hafa verið gerðar tilraunir með **Accelerator Driven Systems (ADS)** sem nota þóríum sem eldsneyti. Á **þóríum-ráðstefnu - Thorium Energy Conference (ThEC13)** árið 2013 var fjallað um möguleika þóríums sem öruggara og vopnaóhæfs kjarnorkuelsneytis²⁰.

- **Carlo Rubbia**, Nóbelsverðlaunahafi, leiddi tilraunir með **proton-knúin ADS** sem geta virkjað þóríum.
- **Hans Blix** lagði áherslu á að þóríum sé **óhæft til vopnaframleiðslu**, sem styrkir friðsamlega nýtingu.
- Þóríum er **fjórum sinnum algengara en úran** í jarðskorpunni og myndar **minni og stöðugri úrgang**.

Tilraunirnar hjá CERN²¹ sýna fram á möguleika þóríums í **nýsköpun kjarnorkutækni** og **úrgangseyðingu**.

²⁰CERN News, 12. nóvember 2013: *Hans Blix talks thorium energy and nuclear non-proliferation* [CERN]

²¹Short Interview with IThEC President Jean-Christophe de Mestral, CDS Videos, CERN, 2023.

8 Ályktun

Rannsóknir í Danmörku og hjá CERN²² sýna að þóríum gæti gegnt lykilhlutverki í framtíðarkjarnorku. Með bráðnunarsaltakerfum og ADS-tækni má hugsanlega framleiða orku sem er:

- **Öruggari** – við lágan þrýsting og með sjálfslokunarkerfum.
- **Sjálfbærari** – með betri nýtingu og minni úrgangi.
- **Friðsamlegri** – þar sem efnið er ekki nothæft í vopn.

Þetta er ekki bara tæknileg þróun — heldur **siðferðileg umbreyting** í átt að ábyrgri orkunýtingu.

²²IThEC2023: International conference on thorium energy at CERN, CERN News Announcement, April 2023.

9 Yucca Mountain úrgangsgeymslan

9.0.1 Upphaf máls

Frá árinu 1944 til 1989 lét Bandaríkjastjórn framleiða plútóníum fyrir kjarnorkuvopn á Hanford-svæðinu²³ í Washington-fylki. Þar eru nú geymdir um 200 milljón lítrar²⁴ af hágeislavirkum úrgangi í 177 neðanjarðartönkum. Af þeim eru 149 komnir yfir áætlaðan endingartíma og margir þeirra leka úrgangi í jarðveginn.²⁵

Hreinsun Hanford-svæðisins

Columbia-áin rennur meðfram Hanford kjarnorkusvæðinu, sem hýsir eina hættulegustu mengun jarðar. Hanford varð til í kjarnorkuvopnakapphlaupinu sem hófst í seinni heimsstyrjöld og hélt áfram í gegnum kalda stríðið. Í áratugi geymdi bandaríska alríkisstjórnin mjög geislavirkan og eitruð úrgang í 177 neðanjarðartönkum eða að hann var losaður beint í jörðu. Nú ber Orkumálaráðuneyti Bandaríkjanna ábyrgð á einni stærstu kjarnorkuhreinsun heims. Markmiðið er að krefja stjórnvöld um ábyrgð á því að vernda fólk og Columbia-ána gegn geislavirkri og eitruðri arfleifð Hanford-svæðisins.

Heimild: Columbia Riverkeeper – Clean Up Hanford.

9.0.2 Meðhöndlun úrgangs

Washington-fylki ber ábyrgð á hreinsun um tveggja þriðju hluta varnartengds úrgangs í Bandaríkjunum. Til stendur að meðhöndla úrganginn í „Waste Treatment Plant (WTP)“, sem er enn í hönnun og byggingu. Hönnunin er sniðin að geymsluaðstæðum í Yucca Mountain.²⁶

²³Sjá einnig: Hanford cleanup. Sótt 31. ágúst 2025.

²⁴53 milljónir gallona.

²⁵Yucca Mountain Nuclear Waste Repository.

²⁶*Ibid.*

9.0.3 Yucca Mountain sem geymslustaður

Árið 2002 samþykkti Bandaríkjaping að Yucca Mountain í Nevada yrði opinber geymslustaður fyrir hágeislavirk efni og notað kjarnorkueldsneyti. Rannsóknir og fjárfestingar í verkefninu voru umfangsmiklar og taldar veita traustan vísindalegan grunn.²⁷

9.0.4 Afturköllun og lagaleg deila

Í janúar 2010 ákvað ríkisstjórn Obama að draga umsóknina til baka og hætta við verkefnið. Washington-fylki mótmælti þessari ákvörðun og lagði fram mál fyrir bandarísku kjarnorkueftirlitsstofnunina [NRC] og síðar fyrir dómstóla í Washington DC. Fylkið hélt því fram að ákvörðunin bryti gegn:

- **Lögum um meðhöndlun kjarnorkuúrgangs** (Nuclear Waste Policy Act), sem kveða á um skyldu til að leggja fram leyfisumsókn.
- **Lögum um stefnu í umhverfismálum** (National Environmental Policy Act), sem krefjast umhverfismats með valkostum.
- **Lögum um málsmeðferð stjórnvalda** (Administrative Procedures Act), þar sem ákvörðunin var talin byggjast á geðþótta og vera órökstudd.

9.0.5 Framvinda málsins

NRC hafnaði beiðni DOE um að draga umsóknina til baka. Washington-fylki og fleiri aðilar lögðu fram beiðni um að NRC myndi halda áfram með leyfisferlið. Árið 2011 komst NRC að niðurstöðu um að umsóknin skyldi áfram vera virk, en að öll frekari meðferð yrði stöðvuð.²⁸

9.0.6 Áframhaldandi barátta

Í maí 2012 kom lögmaður Washington-fylkis fram fyrir dómstól og krafðist þess að leyfisferlið yrði tekið upp að nýju og að NRC myndi skila niðurstöðu innan 14 mánaða. Markmiðið var að rjúfa stöðnun í málinu og tryggja örugga meðhöndlun kjarnorkuúrgangs í Bandaríkjunum.²⁹

²⁷ *Ibid.*

²⁸ *Ibid.*

²⁹ *Ibid.*

9.0.7 Samanburður: Dæmi af sundlaug

Vatnsmagn sundlaugar miðað við magn Hanford-úrgangs.

$$\text{Rúmmál} = 25 \text{ m} \times 12.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} = 375 \text{ m}^3 = 375\,000 \text{ L}$$

Viðmið	Mál (m)	Rúmmál (m ³)	Lítrar (L)
Sundlaug	25 × 12,5 × 1,2	375	375,000
Hanford úrgangur	—	200,000	200,000,000
Samsvarar fjölda lauga	$\frac{200,000 \text{ m}^3}{375 \text{ m}^3} \approx 533,3 \text{ laugar}$		

Tafla 9.1: Samanburður á magni sundlaugar og Hanford-úrgangs, í rúmmetrum og lítrum.

Skýring: Sundlaug getur t.d. tekið um 375.000 lítra af vatni. Sé það borið saman við geislavirkan Hanford-úrgang, sem nemur 200 milljónum lítra, þá myndi það magn fylla sundlaug rúmlega 500 sinnum. Þessi samanburður setur magn úrgangsins í samhengi við daglegt rými sem flestir þekkja og tengja við.

9.0.8 Eðli úrgangsins

Úrgangurinn á Hanford er afgangsefni frá kjarnorkuframleiðslu og inniheldur efni eins og:

- Plútóníum (²³⁹Pu): helmingunartími allt að 24.000 ár.
- Strontíum-90 (⁹⁰Sr) og sesíum-137 (¹³⁷Cs): valda alvarlegum skemmdum á frumum og DNA.

Slíkur úrgangur getur mengað jarðveg og grunnvatn í þúsundir ára ef hann lekur út.

9.0.9 Niðurstaða

Samanburðurinn sýnir að **magn þessa kjarnorkuúrgangs er gríðarlegt**. Hanford-úrgangurinn mun ógna viskerfinu um ókomna tíð. Hann er **ógnvænlega hættulegur** vegna eðlis síns. Þetta undirstrikar mikilvægi þess að meðhöndla geislavirk efni af varfærni og ábyrgð — og að skilja að **lítil eining getur haft gríðarleg áhrif** þegar hún ber í sér orku og hættu sem jafnvel varir í árþúsundir.

9.0.10 Hugsun jarðar og arfleifð Hanford

Sagan af Hanford og deilan um Yucca Mountain er ekki einungis tæknilegt mál um úrgang og geymslu. Hún er spegilmynd af því hvernig mannkynið tekst á við afleiðingar eigin gjörða — og hvernig fólk hugsar um framtíðina. Þegar geislavirkur úrgangur, sem talinn er vera um 200 000 000 L, er farinn að leka í jarðveginn, er það ekki bara mengun: það er tímaskökkja. Óræk sönnun þess að menn hafa hugsað í áratugum, en ekki í öldum.

Í samhengi „hugsunar jarðar“ verður ljóst að náttúran sjálf hefur í milljarða ára meðhöndl-að geislavirkni með þolinmæði og jafnvægi. Hún hefur bundið úran og þóríum í bergi, dreift varmaorku í möttli og skapað lífsskilyrði á yfirborði. Mannkynið, aftur á móti, hefur á örfáum áratugum framleitt úrgang sem krefst geymslu í tugþúsundir ára — en án þess að tryggja að geymslan sjálf endist jafn lengi.

Þetta minnir menn á að tæknin ein og sér er ekki nægileg. Afla þarf visku — jarðvisku — til að hugsa um orku, úrgang og ábyrgð á tímaskala sem nær út fyrir líf mannfólks, út fyrir kynslóðir, og inn í eilífðina. Fyrirmyndirnar eru til - það þarf að læra meira af þeim. Það er verkefni vísinda og stjórnmála, en einnig siðferðisleg skylda.

Fróðleiksmoli: Kjarnorka í geimnum

Kjarnorkuknúin tæki hafa verið notuð í geimferðum frá því á sjöunda áratug síðustu aldar, fyrst af Sovétmönnum og síðar NASA. Kjarnorkurafmagnsgjafar (RTG) nýta geislavirkt efni eins og plútóníum-238 til að framleiða stöðugt rafmagn fyrir geimför. Slík kerfi hafa knúið Voyager-geimförin, Cassini^a og könnunarfarið **Curiosity** á Mars. Auk þess er verið að þróa kjarnaknúna hreyfla (NTP – Nuclear Thermal Propulsion) sem gætu stýtt ferðatíma til Mars um helming. Kjarnorka í geimnum býður upp á áreiðanlega og langvarandi orku, óháða sólarljósi, og er lykilatriði í framtíðarmögu-leikum mannaferða til fjarlæggra hnatta.

^aCassini (1997) innihélt um 33 kg af plútóníum-238. Þetta olli talsverðum áhyggjum í samfélaginu á þeim tíma.

10 Endurvinnsla úran-úrgangs og tengsl við þóríum

Úran [U-235] er eitt af helstu frumefnum sem notað er í kjarnorkuverum í dag. Við klofnun úran-235 myndast mikil varmaorka, en einnig geislavirkur úrgangur sem krefst langvarandi geymslu og öryggisráðstafana. Í ljósi vaxandi áherslu á sjálfbærni og orkunýting hafa áform um endurvinnslu úran-úrgangs vakið athygli, sérstaklega í tengslum við notkun á þóríum sem valkosti í framtíðarkjarnorku.

10.1 Úran-úrgangur og endurvinnsla

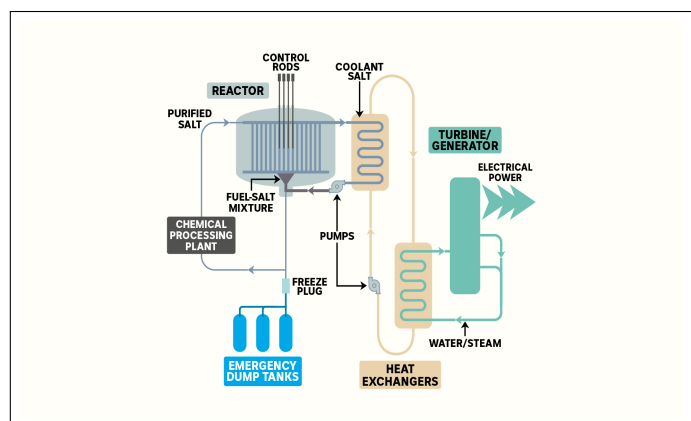
Úran-úrgangur samanstendur af klofnunarefnum, geislavirkum dótturefnum og ónotuðu úrani. Hefðbundin geymsla felur í sér að úrgangurinn sé einangraður í sérstökum ílátum í djúpum berglögum í tugþúsundir ára. Hins vegar eru til tækniáform sem miða að því að:

- **Endurvinnna ónotað úran** úr úrgangi og nýta það aftur í eldsneytishringrás.
- **Minnka geislavirkni úrgangs** með því að umbreyta langlífum í styttri dótturefni.
- **Nota úrgang sem eldsneyti** í nýrri tegund kjarnakljúfa, t.d. hraðakljúfa eða bræðslukljúfa.

11 Þóríum sem valkostur

Þóríum-232 er geislavirkur málmur sem finnst víða í jarðskorpunni og hefur verið rannsakaður sem mögulegt eldsneyti í kjarnorkuverum.³⁰ Þóríum hefur nokkra kosti:

- **Meiri öryggi:** Þóríum-kerfi eru sjálfstýrð og minni hættu á bráðnun.
- **Minni úrgangur:** Geislavirkur úrgangur frá þóríum er í minna magni og með styttri helmingunartíma.³¹
- **Nýting úran-úrgangs:** Í sumum kerfum er hægt að nota úran-úrgang sem upphafsvirkjun fyrir þóríum-hringrás.



Mynd 11.1: Þóríumkjarnakljúfur. Skýringarmynd sem sýnir hönnun á kjarnakljúfi með bráðnu salti, upphaflega þróaður af Orkumálaráðuneyti Bandaríkjanna. (ABC News: Jarrod Fankhauser.)

³⁰Thorium, sótt frá World Nuclear Association: þann 6. ágúst 2025.

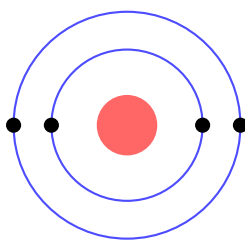
³¹Helmingunartími er sá tími sem það tekur fyrir helming af geislavirkum efnum að brotna niður og breytast í önnur efni. Ef byrjað er með 100 g af efni með helmingunartíma 10 ár, þá verða aðeins 50 g eftir eftir 10 ár, 25 g eftir 20 ár, og svo framvegis. Þetta ferli er ekki háð ytri aðstæðum eins og hitastigi eða þrýstingi — það er innbyggt í eðli kjarnans sjálfs.

12 Tengsl og framtíðarmöguleikar

Samspil úran-úrgangs og þóríum felur í sér möguleika á að umbreyta vandamáli í auðlind. Með því að þróa kjarnakljúfa sem geta nýtt bæði efni, má:

- Draga úr þörf fyrir langvarandi úrgangsgeymslur.
- Auka orkunýtingu og sjálfbærni í kjarnorkukerfum.
- Efla tæknilega nýsköpun og stefnumótun í orkumálum.

Rannsóknir í Indlandi, Kína og Evrópu hafa sýnt að þóríum-kerfi geta verið raunhæfur kostur, sérstaklega í samhengi við endurvinnslu eldri úrgangs og nýtingu á núverandi birgðum.



Mynd 12.1: Einfallt líkan af þóríumatómi. Rauði punkturinn táknar kjarnann (Th-232), bláir hringir eru rafeindabrautir, og svörtu punktarnir eru rafeindir.

13 Framtíðarsýn: Kjarnorka í samhljómi við jörðina

Til að nýta kjarnorku á siðferðislegan og náttúrulegan máta, þarf að:

- Endurhugsa úrgangsgeymslur, þannig að þær líkist jarðlögum — djúpar, stöðugar og „náttúrulegar“.
- Velja efni eins og þóríum, sem eru stöðugri og hættuminni.
- Hanna orkuver þannig að náttúran sé virt, ekki einungis nýtt.
- Hugsa á tímaskala sem nær út fyrir kynslóðir — hugsun sem virðir eilífðina.

Það má ímynda sér framtíð þar sem tækni og náttúra virka saman — þar sem orka er ekki bara afkastamikil, heldur siðferðislega réttlætanleg og vistfræðilega samþætt.

13.1 Niðurstaða

Endurvinnsla úran-úrgangs í tengslum við þóríum er ekki aðeins tæknilegt viðfangsefni heldur einnig stefnumótandi tækifæri. Með því að nýta þessa möguleika má draga úr umhverfisáhættu, auka orkuöryggi og stuðla að ábyrgari framtíð í kjarnorkunýtingu.

14 Niðurlag

Að hugsa eins og jarðfræðingur með sál heimspekings.

Jarðhiti, kjarni jarðar og náttúruleg kjarnorkuver eins og Oklo í Gabon sýna að orku má nýta í samhljómi við náttúruna — hafi fólk visku til að hlusta. Það er val að hugsa á tímaskala eilífðarinnar — og skapa tækni sem er ekki bara öflug, heldur siðferðislega réttlætanleg og náttúrulega samþætt.

Mörg verk byrja með hugsun.

Í gegnum þessa hugleiðingu er kjarnorka ekki skoðuð einvörðungu sem einangrað tæknilegt fyrirbæri, heldur sem speglun á náttúrulegri „visku jarðar“. Jarðhiti, klofnun, helmingunartími og þróun kjarnakljúfa sýna að orka er ekki aðeins kraftur — hún er tenging við tíma, efni og ábyrgð.

Skoða má hvernig jörðin sjálf meðhöndlar geislavirkni: með dreifingu, einangrun og „þolinmæði“. Menn geta að hluta hermt þessa aðferð — með þóríum, bráðnunarsaltakerfum og endurvinnslu úrgangs. Það má velta fyrir sér siðferðilegum og heimspekilegum spurningum: Hvernig á t.a.m. að nýta orku á tímaskala eilífðarinnar?

Framtíð kjarnorku liggur ekki aðeins í nýrri tækni — heldur í nýrri hugsun. Hugsun sem virðir náttúruna og sækir visku í náttúrulega ferla, og sem skapar kerfi sem eru ekki bara afkastamikil, heldur siðferðislega samþætt og heimsfræðilega réttlætanleg.

15 Eftirmáli

Kjarnorka og viska náttúrunnar

Þóríum, úrgangur og hugsun á tímaskala eilífðar

Skýrslan fjallar um kjarnorku. Hún er skoðuð sem náttúrulegt og siðferðilegt fyrirbæri.

Rætt er um jarðhita sem afleiðingu af náttúrulegri geislavirkni, um Oklo í Gabon sem dæmi um náttúrulegt kjarnorkuver, og um möguleika þóríums sem mögulegs eldsneytis framtíðar, í öruggari og friðsamlegri tilgangi.

Tæknileg þróun og heimspekileg hugsun geta farið saman — með áherslu á ábyrgð, raunhæfa sjálfbærni og virðingu fyrir náttúru og tíma. Það hvetur til nýrrar afstöðu í orkumálum: þar sem tækni og náttúra vinna saman, og þar sem orka er ekki einungis afl, heldur siðferðislega réttlætánleg og vistfræðilega samslungin.

*„Ef jörðin sjálf notar kjarnorku til að halda lífi gangandi,
þá er e.t.v. ekki óeðlilegt að fólk geri það líka
— hafi það visku til að gera það rétt.“*

16 Viðauki

16.1 Eðli geislunar

Tegund	Eðli	Smýgni	Stöðvun / skjöldur	Helstu uppsprettur	Notkun / aðstæður	Hætta og varnir
Alfa (α)	Helíumkjarni (${}^4\text{He}^{2+}$)	Mjög lítil — stöðvast af húð eða pappír	Pappír, húð, nokkrir cm af lofti	Úraníum, plútóníum, raðón	Ekki notað í læknisröntgen; reykskynjarar (gamalt)	Mjög hættuleg ef innbyrt; öndunarvörn og rykstýring nauðsynleg
Beta (β)	Rafeind eða pósitrón	Fer í gegnum húð; stöðvast af létum efnum	Plast, ál, gler	Strontíum-90, fosfór-32, jóð-131	Kjarnalækningar, rannsóknir	Húð- og augnálág; skjöldur og fjarlægð; varast bremsugeislun ³²
Gamma (γ)	Rafsegulgeislun (ljóseind)	Smýgur í gegnum líkamsvefi og efni	Blý, steinsteypa, vatn	Cesium-137, kóbalt-60, kjarnorkuslys	Geislameðferð, myndgreining	Mjög jónandi; ALARA: skjöldur, fjarlægð, tímatakmörk
Röntgen	Rafsegulgeislun (ljóseind)	Svipuð gamma, en með lægri orku	Blý, skermuð rými	Röntgentæki, CT-skannar	Læknisrannsóknir og myndgreining	Stýrt geislaálág; blýsvuntur og skammtalágmörkun

Tafla 16.1: Samanburður á helstu tegundum jónandi geislunar.

16.2 Alþjóðleg kjarnorkuslys og alvarleg óhöpp (hefðbundin kjarnorkuver)

16.3 Evrópa

16.3.1 1957 – Windscale [Nú Sellafield], Bretland

Gerð ofns: Graphite pile

Lýsing: Eldur í kjarna leiddi til jóð-131 losunar; umfangsmikil hreinsun og lokun.

Flokkun: Alvarlegt slys

³²Bremsugeislun (þ.e. Bremsstrahlung) myndast þegar hröð hlaðin ögn hægir á sér nálægt kjörnum og gefur frá sér röntgengeisla. Því getur þykkur skjöldur úr þungu efni (s.s. blýi) í raun aukið geislaálág ef hann er ekki rétt hannaður.

16.3.2 1957 – Kyshtym (Mayak), Sovétríkin

Gerð: Endurvinnslustöð (úrgangur)

Lýsing: Sprenging í úrgangsgeymi; víðtæk mengun á nærliggjandi svæðum.

Flokkun: Hörmung³³³⁴

16.3.3 1969 – Lucens, Sviss

Gerð: CO₂-kældur, þungt vatn

Lýsing: Hluta-bráðnun í neðanjarðarholi; staðbundin mengun; veri lokað varanlega.

Flokkun: Alvarlegt slys

16.3.4 1969 & 1980 – Saint-Laurent, Frakkland

Gerð: UNGG (grafít/CO₂)

Lýsing: Tvö aðskilin alvarleg atvik með eldsneytisskemmdum; endurskoðun öryggis og verklags.

Flokkun: Alvarleg slys

16.3.5 1975 – Greifswald (Lubmin), Atomkraftwerk, Þýskaland

Gerð: VVER (PWR-lík)

Lýsing: Eldur á lagnaleið³⁵ olli bilun í verndarkerfum; margþættar varnir rofnuðu tíma-bundið, bilun í verndarkerfum; margþættar varnir rofnuðu tímabundið.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.3.6 1977 – Bohunice A-1, Tékkóslóvakía (Slóvakía)

Gerð: GCO/HW (gas-kældur, þungt vatn)

Lýsing: Alvarlegt atvik við eldsneytishleðslu; mengun innan kjarnorkuversins; lokun A-

³³Slysið átti sér stað í Mayak-kjarnorkuverinu nálægt borginni Kyshtym í Suður-Úralfjöllum. Þar sprakk geymslutankur með hágeislavirkum úrgangi vegna bilunar í kælikerfi. Um 80 tonn af geislavirku efni dreifðust yfir meira en 20.000 km² svæði, sem myndaði svokallað East Ural Radioactive Trace (EURT). Sovésk yfirvöld héldu atvikinu leyndu í áratugi, og þúsundir voru fluttar frá heimilum sínum án skýringa. Enn í dag er geislun til staðar í afmörkuðum svæðum, sérstaklega í jarðvegi og setlögum, þar sem langlífir samsæt-ur eins og strontíum-90 og plutonium-239 eru enn virkar. Sum svæði eru takmörkuð fyrir almenningi og landnotkun háð ströngu eftirliti. Slysið er metið á stigi 6 af 7 á INES-kvarðanum og telst eitt alvarlegasta geislunarslys sögunnar utan bruna á kjarnakljúfi.

³⁴INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) er alþjóðlegur kvarði þar sem metinn er alvarleiki atvika og slysa tengdum kjarnorku og geislun á bilinu 0 til 7, þar sem 0 er atvik án öryggisáhættu og 7 er hörmung, svo sem kjarnorkuslys eins og Chernobyl eða Fukushima.

³⁵Með „lagnaleið“ er hér átt við kapallennur [cable trays] eða kapalstiga sem bera rafmagnskapla í iðn-aðarkerfum.

1.

Flokkun: Alvarlegt slys

16.3.7 1986 – Chernobyl, Úkraína (SSSR)

Gerð: RBMK-1000

Lýsing: Sprenging og bráðnun; víðtæk losun og rýming stórra svæða.

Flokkun: Hörmung

16.3.8 1989 – Vandellós I, Spánn

Gerð: UNGG (grafít/CO₂)

Lýsing: Eldur í túrbínu/stoðkerfum; verulegt öryggisatvik sem leiddi til lokunar versins, fyrr en ráðgert var.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.3.9 1992 – Barsebäck 2, Svíþjóð

Gerð: BWR

Lýsing: Gufuútblastur losaði einangrunarefni sem stíflaði síubúnað neyðarkælikerfisins; víðtækar úrbætur alþjóðlega.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.3.10 1999 – Blayais, Frakkland

Gerð: PWR

Lýsing: Stormflóð olli yfirfalli og rafmagnsáhættu; flóðavarnir og staðarval endurmetin.

Flokkun: Alvarlegt atvik.³⁶

16.3.11 2003 – Paks, Ungverjaland

Gerð: PWR

Lýsing: Eldsneytisskemmdir við hreinsibúnað í eldsneytisgeymi; staðbundin mengun innan kjarnorkuversins.

Flokkun: Alvarlegt atvik

³⁶Samkvæmt ársskýrslu frönsku kjarnorkuöryggisstofnunarinnar (ASN) fyrir árið 2023 voru alls 1.385 atvik tilkynnt, þar af voru 1.098 metin á INES-kvarðanum. Af þeim voru 86 á stigi 1 og 2 á INES-kvarðanum. Franska kjarnorkuöryggisstofnunin (ASN), *Rapport annuel 2023*, https://www.french-nuclear-safety.fr/annual_report/2023gb/155/ (sótt 2025).

16.3.12 2006 – Forsmark, Svíþjóð

Gerð: BWR

Lýsing: Rafmagnstruflanir og veikleikar í sjálfstæði á milli kerfa; víðtækar betrubætur.

Flokkun: Atvik

16.4 Ameríka**16.4.1 1952 – Chalk River (NRX), Kanada**

Gerð: Rannsóknarofn

Lýsing: Alvarlegt slys í kjarnaofni með skemmdum á kjarna; umfangsmikil hreinsun.

Flokkun: Alvarlegt slys

16.4.2 1958 – Chalk River (NRU), Kanada

Gerð: Rannsóknarofn

Lýsing: Eldur í eldsneytisstöng leiddi til mengunar innan kjarnorkuvers; hreinsun umtalsverð.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.4.3 1959 – Santa Susana (SRE), Bandaríkin

Gerð: Tilraunaofn (natríum-kældur)

Lýsing: Hluta-bráðnun í tilraunaofni; takmörkuð upplýsingagjöf um losun á sínum tíma.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.4.4 1961 – SL-1, Idaho, Bandaríkin

Gerð: Rannsóknarofn

Lýsing: Snögg ofauðgun (prompt criticality); þrír létust; mengun staðbundin.

Flokkun: Banvænt atvik

16.4.5 1975 – Browns Ferry, Bandaríkin

Gerð: BWR

Lýsing: Eldur í köplum (við lekaleit með kerti) skerti öryggi; grundvallarbreytingar á eldvörnum.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.4.6 1979 – Three Mile Island, Bandaríkin

Gerð: PWR

Lýsing: Hluta-bráðnun; takmörkuð losun; markaði þáttaskil í öryggismenningu.

Flokkun: Alvarlegt slys

16.4.7 1987 – Goiânia, Brasilía

Gerð: Geislunargjafi (Cs-137;³⁷ ekki orkuver)

Lýsing: „Týndur“ lækningabúnaður; víðtæk mengun og dauðsföll.³⁸

Flokkun: Alvarlegt slys³⁹

16.4.8 2002 – Davis-Besse, Bandaríkin

Gerð: PWR

Lýsing: Alvarleg tæring í efri hluti þrýstihylkis kjarnakljúfs⁴⁰ (boric acid), uppgötvuð rétt í tæka tíð.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.5 Asía

16.5.1 1993 – Narora, Indland

Gerð: PHWR

Lýsing: Turbínueldur og rafmagnstap; tókst að slökkva örugglega og leiddi til víðtækra úrbóta.

Flokkun: Alvarlegt atvik

³⁷Þess má geta, til samanburðar, að **Polonium-210** er alfa-geislandi efni sem getur verið banvænt ef það kemst inn í líkamann; dánarskammtur er innan við míkrógramm. Cesium-137 er beta- og gamma-geislandi og þarf mun meira magn til að valda sambærilegum áhrifum. Polonium-210 hefur helmingunartíma upp á um 138 daga.

³⁸Sjá einnig: Clemons J, Blumenberg A. *The Goiânia incident, the semiotics of danger, and the next 10,000 years*. Clin Toxicol (Phila). 2023 Jul;61(7):551–558. doi: 10.1080/15563650.2023.2235889. PMID: 37535035. The Goiânia incident, the semiotics of danger, and the next 10,000 years.

³⁹Slysið varð þegar tveir menn fundu yfirgefinn geislagjafa í rústum gamallar læknastöðvar í borginni Goiânia í Brasilíu. Gjafinn, sem áður hafði verið notaður í geislameðferð, var í málmíláti sem einstaklingarnir tóku með sér heim og opnuðu. Innan ílátsins var Cesium-137 í duftformi sem lýsti í myrkri, og vakti forvitni þeirra og fjölskyldna þeirra. Efninu var dreift ómeðvitað til annarra heimila, og snerting við það olli alvarlegri geislun, veikindum og dauðsföllum. Atvikið olli útbreiddri mengun og leiddi til víðtækra hreinsunar, rýmingar og endurskoðunar á geislunareftirliti í Brasilíu og almannavarnaaðgerðum. Cesium-137 (¹³⁷Cs) hefur helmingunartíma upp á um 30 ár. Það þýðir að eftir þrjátíu ár hefur helmingur af upphaflegri geislavirkni dafnað. Þar sem slysið átti sér stað árið 1987, hefur upphafleg geislun nú minnkað mikið, og með aðgerðum yfirvalda hefur svæðið verið hreinsað og metið öruggt til búsetu. Goiânia er í dag talin ein af lífsgæðabestu borgum Brasilíu.

⁴⁰Reactor pressure vessel head.

16.5.2 1999 – Tokaimura (JCO), Japan

Gerð: Eldsneytisvinnsla

Lýsing: Óeðlileg blöndun leiddi til stjórnlausrar klofnunar; tveir létust; staðbundin geislun.

Flokkun: Alvarlegt atvik

16.5.3 2004 – Mihama-3, Japan

Gerð: PWR

Lýsing: Tæring olli leka í gufukerfi (secondary system), rör rofnaði. Engin geislavirkni losnaði út. Kælikerfi kjarnakljúfsins var óskemmt; mannfall vegna hita/gufu, án geislalosunar.

Flokkun: Banvænt atvik (iðnaðarslys)

16.5.4 2011 – Fukushima Daiichi, Japan

Gerð: BWR (Mark I)

Lýsing: Jarðskjálfti og flóð; skortur á kælingu; bráðnun í þremur ofnum; umfangsmikil losun og rýming.

Flokkun: Hörmung

16.5.5 2021 – Taishan-1, Kína

Gerð: EPR (PWR)

Lýsing: Eldsneytisskemmdir leiddu til aukinnar virkni geislavirks eðalgass, virkni innan lokaðra kerfa; rekstur stöðvaður til viðgerða.

Flokkun: Atvik

16.5.6 2012 – Kori-1, Suður-Kórea

Gerð: PWR

Lýsing: Rof á ytra rafmagni og vararafmagni; tilkynningavandamál; víðtækar stjórnsýslu- og öryggisúrbætur.

Flokkun: Atvik