



FFI-rapport 2015/01688

Uranets vei til kjernekraft og kjernevåpen – en innføring i kjernefysisk flerbruksteknologi



Hege Schultz Heireng



Uranets vei til kjernekraft og kjernevåpen – en innføring i kjernefysisk flerbruksteknologi

Hege Schultz Heireng

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

15. november 2015

FFI-rapport 2015/01688

Prosjekt 125601

P: ISBN 978-82-464-2614-3

E: ISBN 978-82-464-2615-0

Emneord

Kjernerkraft

Kjernevåpen

Uran

Plutonium

Fissile materialer

Godkjent av

Hanne Breivik

Forskningsleder

Janet Martha Blatny

Avdelingsjef

Sammendrag

Denne rapporten gir en innføring i kjernekraftproduksjon og kjernevåpenutvikling. Rapporten er ment som støtte på det tekniske området for diplomater, politikere og rådgivere som har behov for å forstå innholdet i eller betydningen av staters atomprogrammer, nedrustningssamtaler, atomavtaler, relaterte sanksjoner eller eksportkontroll. Rapporten skal gjøre dem bedre i stand til å forstå grunnleggende kjernefysisk teknologi, uten at det stilles krav til spesielle forkunnskaper.

Veien til både kjernekraft og kjernevåpen går via den kjernefysiske brenselssyklusen. Alle som vil forstå hovedelementene ved staters atomprogrammer, må derfor ha en viss kunnskap om brenselssykluseteknologi. Som navnet tilsier handler brenselssyklusen om hvordan kjernebrensel produseres, hvordan det brukes og hvordan det håndteres etter at det har blitt brukt. Rapporten fokuserer på fredelig bruk av kjernefysisk teknologi. Alle stater som realiserer brenselssyklusen vil imidlertid ha en håndgripelig kjernevåpenopsjon. Det gis derfor en overordnet beskrivelse av hvordan kjernevåpen framstilles, for å vise hvordan i utgangspunktet fredelige kjernefysiske prosesser kan utnyttes til våpenformål.

Rapporten gir en forenklet beskrivelse av atomkjernen, radioaktivitet og strålingstyper. Deretter gis en forklaring av de kjernefysiske prosessene fisjon, fusjon og kjedereaksjon. Med disse begrepene som bakgrunn går rapporten mer i dybden på hvert steg i den kjernefysiske brenselssyklusen. Uran produseres i gruver og foredles i møller og konverteringsanlegg, før materialet kan anrikes med en av flere mulige metoder og benyttes enten som reaktorbrensel eller våpenmateriale. Ulike reaktortyper har forskjellig potensial for å produsere plutonium, som er et annet mulig våpenmateriale. For å få tak i det produserte plutoniumet må det brukte brenselet represseres. Dette er også et mulig ledd i fredelig håndtering av brukt reaktorbrensel. Alle disse prosessene og teknologiene forklares nærmere i rapporten.

English summary

This report provides an introduction to nuclear power production and nuclear weapons development. The report aims to give technical support for diplomats, politicians and advisors who need an understanding of states' nuclear programs, disarmament talks, nuclear deals, related sanctions or export control. The report should enable the interested reader to better understand basic nuclear technologies, without any prerequisite knowledge of the subject matter.

In order to understand the main elements of states' nuclear programs, one must have some rudimentary knowledge of the nuclear fuel cycle. The steps associated with the nuclear fuel cycle include the processes on how nuclear fuel is produced, how it is used in a reactor, and how the spent fuel is handled after it has been removed from the reactor. The report focuses on the peaceful uses of nuclear technology. All states developing the nuclear fuel cycle will, however, have the option to later develop nuclear weapons. The report therefore also explains how seemingly peaceful nuclear processes can be exploited for weapons purposes.

The report provides a simplified description of the atomic nucleus, radioactivity and radiation types, in addition to an explanation of the nuclear processes of fission, fusion and chain reaction. With this terminology in place, the report details each step of the nuclear fuel cycle. Uranium is produced in underground or open pit mines and refined in mills and conversion plants, before it can be enriched through one of several possible methods and utilized as either reactor fuel or weapons material. Reactors of various types differ in their potential for plutonium production, which is the other viable weapons material. In order to access the produced plutonium, spent nuclear fuel must be reprocessed. This is also a possible part of the peaceful management of spent nuclear fuel. All of the mentioned processes and technologies are explained further in the report.

Innhold

1	Innledning	7
2	Den kjernefysiske brenselssyklusen	8
2.1	Kontroll med kjernefysiske materialer	10
3	Atomkjernen og radioaktivitet	13
3.1	Atomets oppbygging	13
3.2	Radioaktivitet og stråling	13
3.2.1	Strålingstyper	14
3.2.2	Halveringstid	16
4	Fisjon og fusjon	17
4.1	Fisjon og kjedereaksjon	17
4.2	Fissile materialer	18
4.3	Kritikalitet	18
4.4	Fusjon	19
5	Urangruver og møller	20
5.1	Uranutvinning	20
5.2	Bearbeiding	21
5.3	Konvertering til uranheksafluorid	22
6	Anrikning	22
6.1	Anrikningsgrad	23
6.2	Utarmet uran	23
6.3	Anrikningskapasitet	24
6.4	Anrikningsmetoder	24
6.4.1	Gassdiffusjonsanrikning	25
6.4.2	Gassentrifugeanrikning	25
6.4.3	Laseranrikning	26
6.4.4	Andre typer anrikning	27
7	Brenselproduksjon	27
7.1	Brenselproduksjonsfabrikk	27
8	Kjernereaktorer	28
8.1	Hva skjer i en kjernereaktor?	28
8.2	Hovedtyper av reaktorer	30
8.2.1	Forskningsreaktorer	30
8.2.2	Kjerneraktorer	30

8.2.3	Fartøysreaktorer	31
8.2.4	Breederreaktoren	32
8.3	Virkningsgrad	32
8.4	Bytte av brensel	32
9	Håndtering av brukt brensel	33
9.1	Våtlagring av brukt brensel	33
9.2	Gjenvinning av brukt brensel	34
9.3	Sluttdeponi for høyaktivt avfall	35
10	Kjernevåpen	36
10.1	Hovedkomponenter i kjernevåpen	36
10.1.1	Fissilt materiale	36
10.1.2	Stridshodet	36
10.1.3	Leveringsmidler	38
11	Oppsummering	39
	Referanser	40
	Forkortelser	43
	Vedlegg A Videre lesning	44

1 Innledning

FFI har gjennom en årrekke utgitt tekniske rapporter om statlige atomprogrammer og brenselssykluseteknologi. Det er imidlertid økt etterspørsel etter tekster som kan gi faglig korrekt informasjon om relevante, tekniske atomtemaer i en form som egner seg for ikke-spesialister. Mange samfunnsvitere må forholde seg til tekniske aspekter ved kjernevåpen. Det kan være diplomater som skal forstå innholdet i nedrustningssamtaler og atomavtaler, politikere og rådgivere som skal forstå betydningen av sanksjoner eller eksportkontroll av spredningssensitiv teknologi, eller journalister og studenter som skal forstå betydningen av staters kjernefysiske utvikling. Denne rapporten skal kunne leses og anvendes av personer med faglig interesse for kjernekraftproduksjon og kjernevåpenutvikling, uten at det stilles krav til spesielle forkunnskaper. Personer som ønsker mer fagtekniske rapporter henvises til listen over aktuelle FFI-publikasjoner i vedlegg A.¹

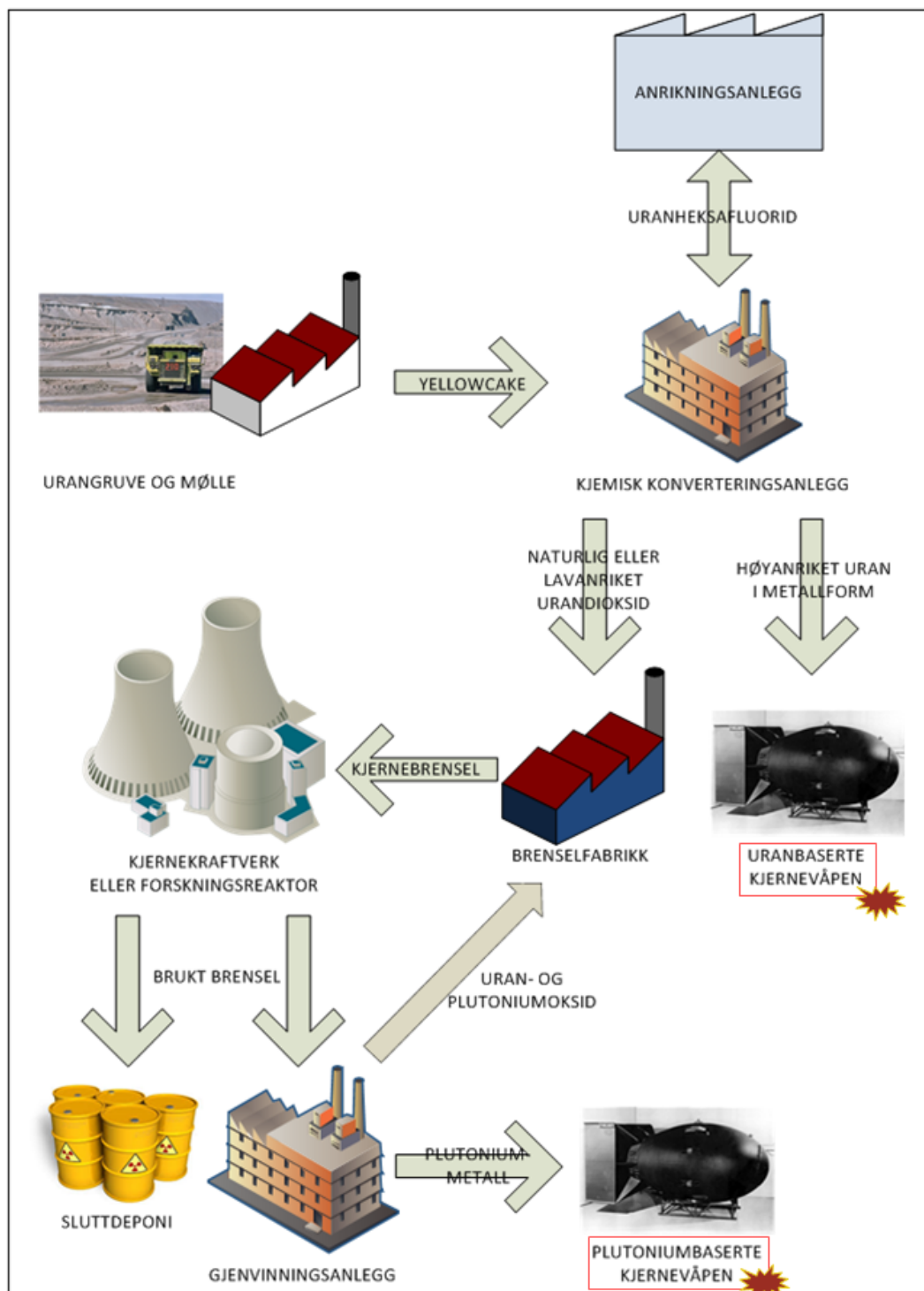
Rapporten fokuserer hovedsakelig på *fredelig bruk* av kjernefysisk teknologi. Alle stater som realiserer brenselssyklusen vil imidlertid ha en håndgripelig *kjernevåpenopsjon*. Det forklares derfor hvordan kjernefysisk teknologi potensielt kan brukes både i sivile og militære atomprogrammer. Mange stater, som eksempelvis Canada, Tyskland og Japan, har bygget omfattende kjernefysiske infrastrukturer, uten å ha kjernevåpenambisjoner. Andre stater, som eksempelvis Iran, har bygget omfattende kjernefysisk infrastruktur til forskning og kraftproduksjon, men samtidig blitt anklaget for å ha hatt kjernevåpenambisjoner i fortiden. India og Pakistan hadde på sin side sivile forskningsprogrammer før de senere utviklet kjernevåpen og gjennomførte prøvesprengninger. Stater som realiserer brenselssyklusen vil uansett ha en håndgripelig kjernevåpenopsjon som gjør det nødvendig å føre kontroll med oppbevaring og bruk av kjernefysisk materiale. Rapporten beskriver hvilke kjernefysiske anlegg som kan ha en mulig rolle i kjernevåpenutvikling, og hvilke kjernefysiske materialer som vanskelig kan skaffes fra andre stater.

Rapporten består av i alt elleve kapitler. Kapittel 2 gir en kort innføring i den kjernefysiske brenselssyklusen inkludert flerbruksaspektet. Kapittel 3 gir en forenklet beskrivelse av atomkjernen, radioaktivitet og strålingstyper. Kapittel 4 beskriver de kjernefysiske prosessene fisjon, fusjon og kjedereaksjon. Lesere som er kjent med dette stoffet kan bla direkte til kapitlene 5–9 som går mer i dybden på hvert steg i den kjernefysiske brenselssyklusen. Kapittel 5 beskriver prosessene som skjer i urangruver, møller og konverteringsanlegg. Kapittel 6 beskriver metoder for anrikning, betydningen av anrikningsgrad og anrikningskapasitet. Kapittel 7 beskriver hvordan brensel bearbeides i brenselssyklusen og klargjøres for reaktorer. Kapittel 8 forklarer hva som skjer i en kjernereaktor og beskriver hovedtyper av reaktorer. Kapittel 9 beskriver metoder for håndtering av brukt brensel, deriblant våtlagring, tørrlagring, repressering og langtidslagring. Kapittel 10 beskriver hovedkomponentene i et kjernevåpen. I kapittel 11 gis det en oppsummering av innholdet i rapporten.

¹ Arbeidet er gjort som en del av FFI-prosjekt 1256 om «Masseødeleggelsesvåpen, trussel og beredskap III».

2 Den kjernefysiske brenselssyklusen

Den kjernefysiske brenselssyklusen handler om hvordan kjernebrensel produseres, hvordan det brukes, og hvordan det håndteres etter at det har blitt brukt. De færreste stater mestrer hele den kjernefysiske brenselssyklusen, da teknologien er kostbar å utvikle og drive. Brenselssyklusen krever utbygging av en rekke kjernefysiske anlegg og utvikling av kompetanse om avanserte tekniske prosesser. Figur 2.1. viser en overordnet framstilling av en kjernefysisk brenselssyklus.



Figur 2.1 Veien til både kjernekraft og kjernevåpen går via den kjernefysiske brenselssyklusen.

Det er vanlig å skille mellom framenden og bakenden av den kjernefysiske brenselssyklusen [1, s.13]. Framenden er stegene før brenselet tas i bruk i en reaktor og inkluderer alle prosessene som utføres i urangruver, uranmøller, konverteringsanlegg, anrikningsanlegg og brenselssyklusfabrikk. Bakenden av syklusen er prosessene etter at brukt brensel er hentet ut av reaktoren. Dette inkluderer nedkjøling, mellomlagring, repressering og sluttlagring. Brenselssyklusen omtales som en *syklus* fordi deler av det brukte brenselet fra en reaktor kan gjenbrukes [2, s.193-194]. I realiteten velger flertallet av stater å behandle brukt brensel som avfall istedenfor å repressere det til videre bruk. I slike tilfeller har man en såkalt *åpen brenselssyklus*. Ved repressering og gjenbruk av uran og plutonium sier vi at vi har en *lukket brenselssyklus*.

For å forstå hva som skjer i en reaktorkjerne og ved en kjernefysisk eksplosjon er det nødvendig å kjenne til prinsippet om *fisjon*. Fisjon er en kjernefysisk reaksjon der en tung atomkjerne spaltes til (vanligvis to) lettere atomkjerne, som generelt omtales som *fisjonsprodukter*. I prosessen frigjøres mye energi og i gjennomsnitt to til tre hurtige nøytroner.² Hvis nøytronene som frigjøres kolliderer med nye, tunge atomkjerne, kan disse atomkjernene i sin tur også fisjonere, og det vil kunne oppstå en såkalt *kjedereaksjon*. Denne kjedereaksjonen er helt sentral for å kunne utvikle kjernekraft og kjernevåpen. De stoffer som har evnen til både å fisjonere og opprettholde en kjedereaksjon kalles *fissile materialer*. Fissile materialer er spesifikke varianter (isotoper) av grunnstoffene uran og plutonium, og de mest aktuelle er betegnet uran-235, uran-233 og plutonium-239. Det vanskeligste steget i kjernekraft- og kjernevåpenutvikling er å skaffe fissilt materiale. Denne rapporten vil gå nærmere inn på hvordan disse materialene produseres, hvordan de brukes, og hvordan de håndteres etter bruk.

Brenselssyklusen starter ved at uranholdig malm hentes ut fra gruver eller dagbrudd.³ Uranmalmen bearbeides i møller for produksjon av såkalt *yellowcake*, som er en blanding av uranoksider. Yellowcake fraktes deretter til et konverteringsanlegg der materialet omdannes til den etsende gassen *uranheksafluorid* som er egnet for anrikning og utgangspunkt for å produsere kjernebrensel. Uran i naturen består av 99,3 prosent av den ikke-fissile uran-238 og kun 0,7 prosent av den fissile uran-235.⁴ Siden kjernereaktorer og kjernevåpen ofte krever høyere konsentrasjoner av uran-235 enn det som er tilgjengelig i naturlig uran, økes andelen av den fissile isotopen uran-235 på bekostning av uran-238 i et *anrikningsanlegg*.⁵ Deretter sendes det anrikede uranet til et anlegg for kjemisk konvertering til *urandioksid*, som er vanligst å bruke i reaktorbrensel.⁶ Urandioksidet fraktes deretter til en brenselssyklusfabrikk der materialet varmpresses til kompakte brenselbriketter og kapsles til brenselstaver. Såkalte *brenselselementer*, som er bunter av brenselstaver, installeres

² Alle atomkjerne er bygd opp av kjernepartikler kalt protoner og nøytroner. Nøytroner er, i motsetning til protoner, uten elektrisk ladning. Hurtige nøytroner er nøytroner som sendes ut med høy energi.

³ Uran er råmateriale for framstilling av plutonium (plutonium finnes ikke i naturen). Også ved plutoniumproduksjon starter derfor syklusen med å hente ut uranmalm fra gruver.

⁴ I tillegg inneholder naturlig uran en svært liten andel (0,0054 %) uran-234.

⁵ Begrepene kjernereaktor/atomreaktor og kjernevåpen/atomvåpen anvendes ofte som synonyme.

⁶ Hva uranheksafluorid konverteres til, avhenger av hvilken type brensel reaktoren bruker. En stat med ambisjoner om å utvikle uranbaserte kjernevåpen vil istedenfor anrike uranet til høyere anrikningsgrad (større andel uran-235) i anrikningsanlegget, og deretter konvertere det til uranmetall.

deretter i reaktorkjernen for bestråling og energiproduksjon. Dette utgjør stegene i framenden av den kjernefysiske brenselssyklusen.

Kjernereaktorer har ulike formål og ulikt design. De fleste (og største) av dagens reaktorer produserer elektrisitet, men noen benyttes til forskning og utvikling, produserer våpenplutonium, eller brukes til fartøydriфт. Strålingsintensiteten fra nytt reaktorbrensel er lav, men over tid når uran spaltes til fisjonsprodukter blir brenselet stadig mer radioaktivt [27]. Etter en periode hentes det brukte brenselet ut av reaktorkjernen og overføres til et kjølebasseng i nærheten av reaktoren, og deretter eventuelt til et tørrlager. Enkelte stater gjenbraker plutonium og uran fra brukt brensel gjennom såkalt repressering. Flertallet av stater velger imidlertid å lagre brukt brensel som avfall. Prosessene med å bygge sluttdeponier for høyaktivt avfall har tatt lengre tid enn ventet. Derfor oppbevares mye svært radioaktivt materiale, i første rekke intakt, brukt brensel, «midlertidig» i mellomagre. Brenselssyklusen krever utbygging av en rekke kjernefysiske anlegg og utvikling av kompetanse om avanserte tekniske prosesser, som illustrert i Tabell 2.1.

	Kjernefysiske anlegg	Prosess
Framenden	Gruver og dagbrudd	→Uthenting av uranmalm.
	Møller	→Produksjon av yellowcake.
	Konverteringsanlegg	→Produksjon av uranheksafluorid.
	Anrikningsanlegg	→Øke andelen av den fissile uranisotopen uran-235.
	Konverteringsanlegg	→Konvertering til urandioksid.
	Brenselabrikk	→Sintring ⁷ og kapsling av urandioksid til staver og elementer.
Bakenden	Reaktor	→Bestråling av brensel i kontrollert kjedereaksjon.
	Våtlager, tørrlager	→Redusere varme og radioaktivitet i brukt brensel.
	Represseringsanlegg	→Gjenvinne plutonium og uran fra brukt brensel, sortere avfall og nytteprodukter.
	Sluttdeponi	→Langtidslagring av avfall.

Tabell 2.1 Relevante anlegg og prosesser i den kjernefysiske brenselssyklusen.

2.1 Kontroll med kjernefysiske materialer

En rekke kjernefysiske anlegg er relevante både i sivile og militære atomprogrammer. Anrikningsanlegg er eksempelvis helt sentrale i utviklingen av uranbaserte kjernevåpen, mens tungtvannsreaktor og represseringsanlegg er svært sentrale i utviklingen av plutoniumbaserte kjernevåpen. Urangruver og møller er derimot mindre sensitive fordi materialet som produseres ikke er direkte anvendbart i kjernevåpen. I tillegg er materialet fra gruver og møller enklere å skaffe fra andre stater.

Tabell 2.2 viser hvilke kjernefysiske anlegg som kan ha en mulig rolle i kjernevåpenutvikling. Det fremkommer hvilke anlegg som er mest sensitive med hensyn til spredningsrisiko (*sensitivitet*),

⁷ Sintring er en prosess hvor et materiale i pulverform varmes og sammenpresses til én fast struktur.

samt hvilke materialer som vanskelig kan skaffes fra andre stater og som også er utfordrende å produsere (*tilgjengelighet*).

	Kjernefysiske anlegg	Mulig rolle i kjernevåpenutvikling		Sensitivitet	Tilgjengelighet
		Uranveien	Plutoniumveien		
Framenden	Gruver og dagbrudd	Ja	Ja	Lav	Høy
	Møller	Ja	Ja	Lav	Høy
	Konverteringsanlegg	Ja	Ja	Middels	Middels
	Anrikningsanlegg	Ja	Nei	Høy	Lav
	Brenselsfabrikk	Nei	Ja	Middels	Middels
	Reaktor	--	--	--	--
Bakenden	- Lettvannsreaktor	Nei	Mulig, ikke ideell	Lav	Middels
	- Tungtvannsreaktor	Nei	Ja	Høy	Middels
	- Grafittreaktor	Nei	Ja	Høy	Middels
	Reprosesseringsanlegg	Ja, men ikke nødvendig	Ja	Høy	Lav
	Sluttdeponi	Ja, men ikke nødvendig	Ja	Middels ⁸	Lav

Tabell 2.2 Kjernefysiske anlegg som kan ha en mulig rolle i kjernevåpenutvikling.

Mange stater, som eksempelvis Canada, Tyskland og Japan, har bygget omfattende kjernefysiske infrastrukturer, uten å ha kjernevåpenambisjoner.⁹ Andre stater, som eksempelvis Iran, har bygget omfattende kjernefysisk infrastruktur til forskning og kraftproduksjon, men samtidig blitt anklaget for å ha hatt kjernevåpenambisjoner i fortiden. India og Pakistan hadde på sin side sivile forskningsprogrammer før de senere utviklet kjernevåpen og gjennomførte prøvesprengninger. Stater som realiserer brenselssyklusen vil uansett ha en håndgripelig kjernevåpenopsjon som gjør det nødvendig å føre kontroll med oppbevaring og bruk av kjernefysisk materiale.

Avtalen om ikke-spredning av kjernevåpen (*the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons* – NPT) skal hindre spredning av kjernevåpen til flere stater (art. I og II), fremme samarbeid om fredelig bruk av kjernefysisk teknologi (art. IV), samt fremme kjernevåpenrustning (art. VI). Alle verdens stater har ratifisert NPT, med unntak av India, Pakistan, Israel, Nord-Korea og Sør-Sudan.¹⁰ NPT skiller mellom kjernevåpenstater og ikke-kjernevåpenstater. *Kjernevåpenstater* er de som prøvesprengte kjernevåpen før 1. januar 1967, som

⁸ Mange stater holder mulighetene for reprosessering åpne. Et deponi er i praksis ikke et sted å hente brukt brensel, men i påvente av bygging av sluttdeponier og eventuell reprosessering lagres mye brukt brensel i mellomlagre.

⁹ Stater med omfattende kjernefysisk infrastruktur uten kjernevåpenambisjoner refereres ofte til som terskelstater (*threshold states*). Dette er stater som antas å kunne utvikle kjernevåpen i løpet av relativt kort tid, hvis de utvikler en kjernevåpenambisjon. Iran anses også som en terskelstat.

¹⁰ Nord-Korea var part i NPT inntil de trakk seg fra avtalen i 2003. Israel har hverken bekreftet eller avkreftet påstandene om at de har et kjernevåpenprogram.

i praksis betyr USA, Russland, Storbritannia, Frankrike og Kina. Disse anses som «legitime» kjernevåpenstater, men det er en ambisjon at de skal ruste ned våpnene på sikt. *Ikke-kjernevåpenstater* er alle andre parter i NPT.

Alle ikke-kjernevåpenstater under NPT er forpliktet til *ikke* å utvikle eller besitte kjernevåpen. Ikke-kjernevåpenstatene skal fremforhandle en sikkerhetskontrollavtale med det Internasjonale atomenergibyrået (IAEA) som gir byråets inspektører tilgang til alle deklarererte kjernefysiske aktiviteter, materialer og anlegg (jf. NPTs art. III). Hensikten med sikkerhetskontrollavtalene (*Comprehensive Safeguards Agreement – CSA*) er å verifisere at de kjernefysiske aktivitetene foregår med fredelig formål. Sikkerhetskontrollavtalene gjelder alle *deklarererte* anlegg, dvs. alle anlegg staten har innrapportert som kjernefysiske til IAEA. I tillegg kan ikke-kjernevåpenstater frivillig implementere en såkalt Tilleggsprotokoll til Sikkerhetskontrollavtalen (*Additional Protocol – AP*) som åpner for at IAEA kan inspisere *udeklarererte* anlegg. Flertallet av verdens ikke-kjernevåpenstater har implementert Tilleggsprotokollen. Ikke-kjernevåpenstater med ingen eller få kjernefysiske anlegg er også forpliktet til å innrapportere det de eventuelt har av kjernefysiske aktiviteter og materialer (*Small Quantities Protocol – SQP*). Det gjennomføres imidlertid få inspeksjoner i disse statene.

Kjernevåpenstatene under NPT er forpliktet til *ikke* å dele kjernevåpenrelevant teknologi eller informasjon med ikke-kjernevåpenstater. Kjernevåpenstatene kan inspiseres av IAEA, men dette skjer på frivillig basis fra kjernevåpenstatene.

Det opereres ofte med en tredje kategori, såkalte *de facto kjernevåpenstater*. Dette er stater som står utenfor NPT og har utviklet kjernevåpen, nærmere bestemt India, Pakistan, Nord-Korea (og eventuelt Israel). Selv om *de facto* kjernevåpenstater står utenfor NPT tillates de å være medlem av IAEA. Disse statene kan dermed tillate frivillige inspeksjoner av utvalgte anlegg.

3 Atomkjernen og radioaktivitet

Den kjernefysiske brenselssyklusen er enklere å forstå hvis man har grunnleggende kunnskap om radioaktivitet og kjernefysikk. I dette kapittelet introduseres sentrale kjernefysiske prinsipper og begreper.

3.1 Atomets oppbygging

Alle atomkjerner er bygd opp av protoner og nøytroner, som under ett benevnes som *kjernepartikler* eller *nukleoner*. Protoner er partikler med positiv ladning, mens nøytroner er partikler som er elektrisk nøytrale. Atomkjernen er omgitt av små, negativt ladede elektroner. Atomer har i regelen like mange elektroner og protoner og er da elektrisk nøytrale. Atomer med et overskudd eller underskudd av elektroner, kalles *ioner*. Antallet protoner i atomkjernen avgjør hvilket *grunnstoff* atomet tilhører (*atomnummeret*).¹¹ Grunnstoffene er ordnet etter stigende atomnummer i grunnstoffenes periodesystem. Hydrogen (med kjemisk symbol H) er det letteste grunnstoffet med kun ett proton, og utgjør dermed atomnummer én, mens grunnstoffene uran (U) og plutonium (Pu) er betydelig tyngre med henholdsvis 92 og 94 protoner i kjernen. Uran er det tyngste grunnstoffet som finnes i naturen. Atomer med høyere atomnummer, som for eksempel plutonium, må produseres i kjernefysiske anlegg.

Ett grunnstoff kan ha flere varianter, såkalte *isotoper*, avhengig av antallet nøytroner i atomkjernen. Tyngre grunnstoff har vanligvis flere isotoper enn lettere grunnstoff [3]. Isotopens *massenummer* er summen av antall protoner og nøytroner i kjernen (eksempelvis uran-235, eventuelt angitt som U-235 eller ²³⁵U).¹² Grunnstoffet uran har tre naturlige forekommende isotoper; uran-234, uran-235 og uran-238. I tillegg eksisterer en rekke kunstig framstilte uranisotoper. Den naturlige forekommende isotopen uran-235, og den kunstig framstilte isotopen uran-233, har begge 92 protoner i kjernen, men et ulikt antall nøytroner (henholdsvis 143 og 141). Uran-238 dominerer forekomsten av naturlig uran med hele 99,3 prosent. Det er vanlig at én spesifikk isotop dominerer den naturlige forekomsten av et grunnstoff [3].

Begrepet *nuklide* forveksles ofte med isotopbegrepet. Isotoper henviser til varianter av et grunnstoff, altså samme protontall, men ulikt nøytrontall. Nuklide benyttes generelt for å spesifisere én bestemt atomkjerne med ett bestemt antall protoner og nøytroner. For eksempel er nukliden plutonium-240 samtidig en *isotop* av plutonium. Isotopbegrepet er gresk og betyr «på samme plass», dvs. med samme plassering i det periodiske system.

3.2 Radioaktivitet og stråling

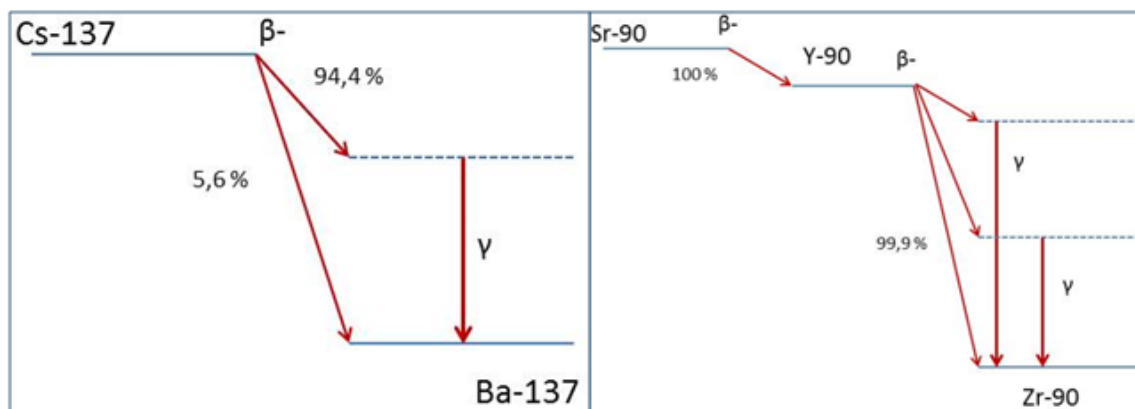
De fleste nuklider er mer eller mindre ustabile. Det innebærer at forholdet mellom antallet protoner og nøytroner er i ubalanse.¹³ Ustabile nuklider kalles *radionuklider*, og disse vil over tid brytes ned

¹¹ Atomnummer/grunnstoffnummer er synonymer.

¹² Massenummer/isotoptall er synonymer.

¹³ Tyngre atomkjerner krever mange flere nøytroner enn protoner for å kunne oppnå en stabil tilstand. Den stabile tilstanden i lettere atomkjerner skyldes en enklere balanse mellom antallet protoner og nøytroner.

(desintegrere, henfalle) til mer stabile former.¹⁴ Når dette skjer endres antallet protoner i atomkjernen, og nye grunnstoffer blir til. Det er dette som kalles *radioaktivitet*. Henfall av radioaktive nuklider fører til såkalte *datterprodukter*. Når nukliden cesium-137 henfaller vil den eksempelvis ende opp som datterproduktet barium-137, som vist i Figur 3.1. Nukliden strontium-90 går derimot over til datterproduktet yttrium-90, før den henfaller videre til den mer stabile zirkonium-90, som vist i Figur 3.1. Nukliden uran-238 går via flere ulike etterfølgende datterprodukter før den ender opp som bly-206.



Figur 3.1 Henfallsskjemaer for nuklidene cesium-137 og strontium-90.

I henfallsprosessen sender atomkjernene ut energi ved utsendelse av partikler og elektromagnetisk stråling. Strålingen fra radioaktive kilder kalles ofte *ioniserende stråling*. Dette er energirik stråling som kan løsrive elektroner fra atomer (lage såkalte ioner) [4, s.9]. På norsk brukes ofte betegnelsen *radioaktiv stråling*, men dette begrepet bør unngås fordi det ikke er selve strålingen som er radioaktiv.¹⁵ Radioaktive prosesser har alltid sitt utspring i atomkjernen. Merk at ioniserende stråling også innbefatter annen energirik stråling som eksempelvis røntgenstråling, som blant annet brukes på sykehus og hos tannleger. Alle isotoper med atomnummer større enn 82 er ustabile og dermed radioaktive. Eksempelvis er alle uran- og plutoniumisotopene radioaktive.

3.2.1 Strålingstyper

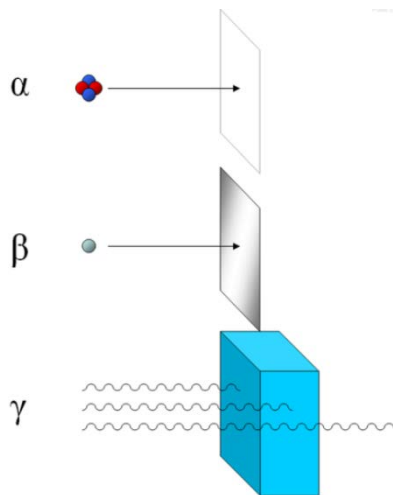
Som hovedregel er det såkalt alfa-, beta- eller gammastråling som frigjøres ved henfall av atomkjerner, og en sjelden gang nøytronstråling. Av disse har gamma- og nøytronstråling størst gjennomtrengningskraft og lengst rekkevidde. Strålingsenergien måles i elektronvolt (eV).¹⁶ Én kiloelektronvolt (keV) tilsvarer 1000 eV, og én megaelektronvolt (MeV) tilsvarer 1 000 000 eV.

¹⁴ Ustabile atomkjerner omtales også som *radioisotoper* av et grunnstoff.

¹⁵ «Radioaktiv» betyr egentlig «strålingsaktiv», altså snakker man da om «strålende stråling». Betegnelsen «radioaktiv stråling» brukes heller ikke internasjonalt.

¹⁶ Elektronvolt defineres som den kinetiske energi et elektron får når det passerer gjennom et elektrisk felt på 1 volt. Denne enheten er mer anvendelig i karakterisering av strålingsenergi enn energienheten *joule*, siden det går omtrent 10 millioner milliarder eV per joule.

Alfastråling (α -stråling). Alfapartikler består av positivt ladete heliumkjerner (He-4-kjerner, bestående av to protoner og to nøytroner). Alfapartikler kan ha energi på opptil 7 MeV [4, s.22], og har en rekkevidde i luft på ca. 4 cm [5]. Alfapartikler har lav gjennomtrengningskraft, som vist i Figur 3.2, og er ufarlige for mennesker så lenge de befinner seg utenfor kroppen [4, s.22]. Dersom de trenger inn i kroppen, for eksempel gjennom inntak eller innånding, er strålingen skadelig og kan være kreftfremkallende. Dette er eksempelvis tilfellet for uran og plutonium. Den høye energien gjør at alfastrålingen blant annet kan skade DNA-molekyler, hvor arvematerialet befinner seg. Det kan medføre kreft og fødselsdefekter.



Figur 3.2 Radioaktivitet og gjennomtrengningsevne. I eksemplene her ser vi at alfapartikler stoppes av et papirark, for betapartikler benyttes aluminium som skjerming, mens gammastråler delvis kan trenge gjennom en tykkere blykloss. Kilde: Wikimedia Commons, offentlig eiendom.

Betastråling (β -stråling). Betapartikler består av elektroner med positiv eller negativ ladning.¹⁷ Disse har en energi på opptil 1 MeV [4, s.22], altså lavere energi enn alfapartikler, og en rekkevidde på om lag 15 cm til 3 m i luft [5]. Betapartikler med lav energi stoppes av tynne klesplagg. I likhet med alfastrålingen er de største faremomentene knyttet til inhalering og inntak [6]. Intens betastråling fra for eksempel radioaktivt nedfall kan imidlertid gi en form for solbrenthet på hud som ikke er dekket til («betaburns»).

Gammastråling (γ -stråling). Gammastråling er elektromagnetisk stråling, som vanlig lys eller røntgen, men med mye mer energi. Gammastråling forekommer i praksis¹⁸ i tilknytning til alfa- eller betastråling. Gammastråling har stor gjennomtrengningsevne og rekkevidde, og trenger enkelt gjennom vev. Den store gjennomtrengningsevnen gjør den også enklere å påvise på avstand enn alfa- og betastråling [4, s.23].

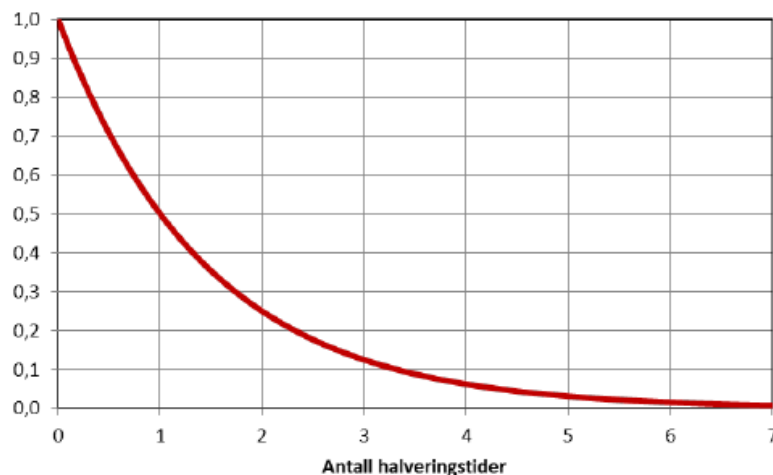
¹⁷ Betapartikkelen kan frigis som et elektron (såkalt *beta minus*) eller positron (såkalt *beta pluss*).

¹⁸ Det finnes andre kilder til gammastråling som ikke er forbundet med radioaktivitet, som for eksempel kosmisk gammastråling, som ikke er relevant for denne rapporten.

Nøytronstråling. Nøytronutsendelse regnes også som en radioaktiv prosess. Denne strålingen oppstår oftest i forbindelse med fisjon, og forekommer med høy intensitet i kjernekraftverk og ved kjernevåpeneksplosjoner.¹⁹ Nøytronstråling har stor gjennomtrengningsevne, og kan forvolde stor skade. Nøytroner stoppes best av lette grunnstoffer (i praksis benyttes vann, betong og parafin).

3.2.2 Halveringstid

Hvis man har en mengde med en bestemt nuklide blir det stadig mindre igjen av den opprinnelige nukliden etter hvert som atomkjernene henfaller. Når mengden er halvert (50 prosent) sier man at det har gått én halveringstid. Det har gått to halveringstider når mengden av dette igjen er halvert (25 prosent av opprinnelig mengde). Figur 3.3. viser henfallet av én nuklide der det blir stadig mindre igjen av det opprinnelige stoffet. Det er stor variasjon i halveringstiden til ulike radionuklider. Enkelte nuklider halveres innen brøkdelen av et sekund, mens andre trenger milliarder av år. De fleste nuklider henfaller gjennom ett eller få trinn til en atomkjerne som er stabil, og da vil strålingsintensiteten være redusert.



Figur 3.3 Etter hvert som en nuklide henfaller blir det mindre igjen av det opprinnelige stoffet.

De naturlige uranisotopene uran-234, uran-235 og uran-238, som alle sender ut alfastråling, har halveringstider på henholdsvis 246 000 år, 704 millioner år og 4,47 milliarder år. Den fissionelle og kunstig framstilte uranisotopen uran-233 har en halveringstid på 159 000 år, mens plutonium-239 har en halveringstid på 24 110 år.²⁰ Aktiviteten til en mengde radioaktivt stoff angis i måleenheten *becquerel* (Bq) som angir antallet henfall per sekund. Eksempelvis vil fem becquerel bety at fem atomer henfaller per sekund.²¹

¹⁹ Den kjernefysiske reaksjonen *fisjon* forklares nærmere i kapittel 4.1.

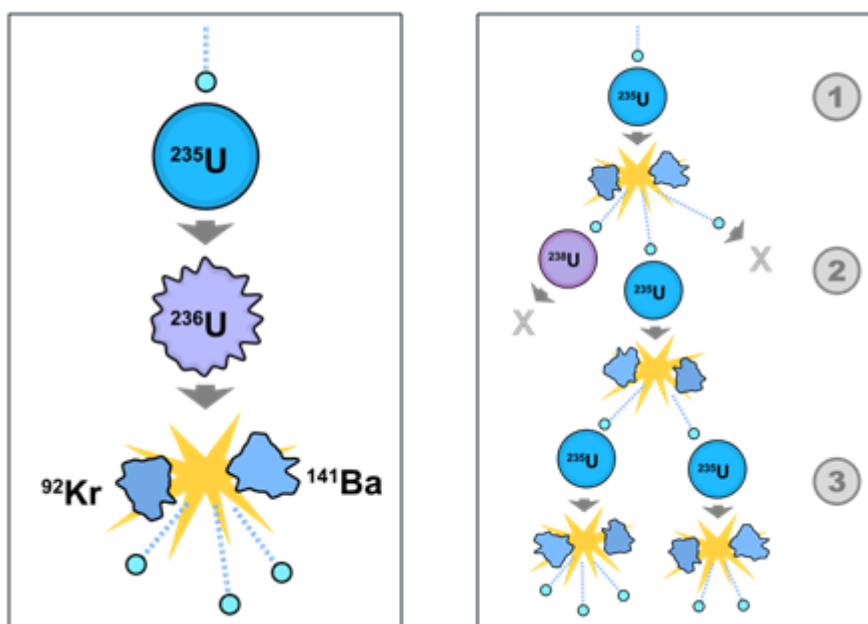
²⁰ Uran-233 produseres ved bestråling av thorium i en reaktor, mens plutonium-239 produseres ved å bestråle uran-238 i en reaktor.

²¹ Oppkalt etter franskmannen Henri Becquerel som i 1896 oppdaget radioaktivitet.

4 Fisjon og fusjon

4.1 Fisjon og kjedereaksjon

Fisjon er en kjernefysisk reaksjon der en tung atomkjerne spaltes til lettere atomkjerne. De fleste fisjoner er binære, det vil si at atomkjernen deler seg i to.²² I prosessen frigjøres store mengder energi og vanligvis to til tre hurtige nøytroner. Hvis nøytronene fra den første spaltingen treffer nye atomkjerne som også fisjonerer, kan det oppstå en såkalt *kjedereaksjon* som vist til høyre i Figur 4.1. Kjedereaksjonen er selvgående dersom nøytronene fra spaltingen av én atomkjerne i gjennomsnitt skaper minimum én ny fisjon. Ved spalting av atomkjerne frigjøres betydelig mer energi enn ved henfall av atomkjerne (beskrevet i delkapittel 3.2). For uran frigis omkring 200 MeV²³ for hver kjerne som spaltes [7]. Hastigheten på nøytronene er høy og kjedereaksjonen skjer svært raskt.



Figur 4.1 Illustrasjon av fisjon av uran-235. I venstre tegning dannes fisjonsproduktene krypton-92 og barium-141. I høyre tegning illustreres en kjedereaksjon av tre etterfølgende fisjoner av uran-235. Kilde: Wikimedia Commons, offentlig eiendom.

De nye atomene som dannes som følge av fisjon er ofte radioaktive og kalles *fisjonsprodukter*. Hvilke fisjonsprodukter som oppstår varierer, og enkelte vil henfalle raskt grunnet korte halveringstider. Kjernen deler seg ofte i én lettere og én tyngre atomkjerne. Dette skjer uavhengig av om det eksempelvis er uran-233, uran-235, plutonium-239 eller plutonium-241 som fisjonerer. Som illustrert i Figur 4.1 til venstre kan eksempelvis krypton-92 og barium-141 oppstå. Spaltingsprosessen bidrar også til ioniserende stråling i form av nøytronstråling og gammastråling. I tillegg kan radioaktive fisjonsprodukter med kort halveringstid slippe ut alfa- og betastråling, men

²² Fisjon er synonymt med spaltning, ofte kalt kjernespløtning.

²³ Strålingsenergien måles i elektronvolt (eV). Én megaelektronvolt (MeV) tilsvarer 1 000 000 eV.

da som følge av henfall av atomkjerner. Det er i første rekke fisjonsproduktene bevegelsesenergi som gir oppgav til varmen i kjernereaktorer.

Fisjon kan skje *spontan* uten ytre påvirkning, eller settes i gang ved hjelp av et innkommende nøytron. Det er spesielt tunge atomkjerner som fisjonerer spontan, og de fleste av disse er kunstig framstilte nuklider. De to mest kjente er uran-235 og plutonium-239, hvor kun den første forekommer naturlig. I 2005 kjente en til totalt 127 nuklider som kunne fisjonere spontan, men ingen av disse nuklidene var lettere enn thorium [8, s.73-74]. Spontan fisjon i en kjernereaktor kan bidra til å sette i gang en kjedereaksjon. Ved oppstart av de fleste reaktorer brukes likevel nøytronkilder. I et kjernevåpen bygges en nøytronkilde oftest inn i våpenkonstruksjonen som sender inn en mengde nøytroner for å sette i gang kjedereaksjonen på riktig tidspunkt (se delkapittel 10.1.2).

4.2 Fissile materialer

De stoffer som har evnen til både å fisjonere og opprettholde en kjedereaksjon kalles *fissile materialer*. Fissile materialer er spesifikke isotoper av grunnstoffene uran og plutonium, der de mest anvendelige er uran-235, uran-233 og plutonium-239. Uran-233 produseres ved å bestråle thorium i en reaktor, og plutonium-239 produseres ved å bestråle uran-238 i en reaktor. De tre fissile nuklidene kan spaltes av nøytroner med alle energier (det vil si alle hastigheter). Sannsynligheten for kjernespalting øker imidlertid sterkt når nøytronenergien reduseres. I såkalte *termiske reaktorer* bremses derfor hastighetene på nøytronene, til de er i likevekt med omgivelsene, for å øke sannsynligheten for fisjon. Det er dette som er mest utbredt i dagens reaktorer.

Fisjonerbare materialer er atomkjerner som kan fisjonere, men bare når de blir truffet av et nøytron med riktig hastighet.²⁴ Uran-238 er fisjonerbart og kan spaltes av nøytroner med høy energi, men har større vanskeligheter med å fange opp langsomme nøytroner.²⁵ Det kreves derfor betydelig flere nøytroner for å få spalting i uran-238, og en kjernefysisk kjedereaksjon kan ikke opprettholdes i uran-238.

4.3 Kritikalitet

Kritisk masse er betegnelsen for den minste massen av fissilt materiale som er nødvendig for å holde en kjedereaksjon i gang. En slik minimumsmasse er nødvendig for at nøytronene skal ha tilstrekkelig mange fissile atomkjerner tilgjengelig til at de kan utløse tilstrekkelig mange fisjoner. I praksis oppnås kritisk masse hvis det i gjennomsnitt er ett nøytron fra hver fisjon som genererer en ny fisjon. Kjernereaktorer må operere på dette balansepunktet for å sikre en kontrollert kjedereaksjon. Kritisk masse angis i vekt. Omgivelsene til det fissile materialet påvirker størrelsen på den kritiske massen. Uran omgitt av vann går eksempelvis kritisk ved lavere masser enn uran omgitt av luft, fordi vannet reflekterer mange nøytroner tilbake til uranet.

²⁴ Ved FFI benyttes begrepet «spaltbare materialer» som en samlebetegnelse for «fissile materialer» og «fisjonerbare materialer». Enkelte andre bruker imidlertid begrepene «spaltbare» og «fissile» som synonymer. «Fissile» er en direkte oversettelse fra engelsk. «Spaltbare» er et godt alternativ på norsk.

²⁵ Uran-238 vil ikke spaltes hvis nøytronene har en hastighet under ca. 1 MeV.

Underkritisk masse indikerer at massen med fissilt materiale er mindre enn den kritiske massen. Dette skjer hvis i gjennomsnitt mindre enn ett nøytron fra hver fisjon genererer en ny fisjon. Da vil det produseres færre nøytroner enn det forbrukes, noe som innebærer at det kan skje spaltinger men ikke mange nok til å opprettholde en kjedereaksjon over tid.

Overkritisk masse indikerer at massen med fissilt materiale er større enn den kritiske massen. Dette skjer hvis i gjennomsnitt mer enn ett nøytron fra hver fisjon genererer en ny fisjon. Da vil det produseres flere nøytroner i kjedereaksjonen enn det forbrukes, noe som vil skape en mer ukontrollert kjedereaksjon der det frigjøres store mengder energi.

Underkritisk, kritisk og overkritisk masse er gjerne gitt ved normal tetthet av det fissile materialet. Presser man materialet derimot sammen, så kan en svakt underkritisk masse oppnå kritisk eller overkritisk tetthet. Eksempelvis gjelder dette for såkalte *implosjonskjernevåpen*. Der brukes sjokkbølgen fra eksplosiver til å komprimere en underkritisk masse av uran eller plutonium til overkritisk tetthet (se delkapittel 10.1.2).

Et kjernevåpen er så vidt underkritisk for å hindre at det går av på uønsket tidspunkt, men ved hjelp av eksplosiver går man raskt fra underkritisk til overkritisk masse. Med høy hastighet på nøytronene og rask spaltning frigjøres store mengder energi på svært kort tid, og en voldsom eksplosjon finner sted.

4.4 Fusjon

Fusjon er en kjernefysisk reaksjon som oppstår når lette atomkjerner slår seg sammen til én tyngre kjerne.²⁶ For alle atomkjerner som er lettere enn jern (Fe), vil fusjonsprosessen frigi energi, eksempelvis når to hydrogenatomer blir slått sammen til ett heliumatom. Fusjon av lette atomkjerner er energikilden til både stjerner (som sola) og hydrogenbomber. For jern og tyngre grunnstoffer vil fusjonsprosessen derimot kreve tilførsel av energi. Siden alle atomkjerner inneholder positivt ladete protoner, vil kjernene i utgangspunktet frastøte hverandre. For å overkomme denne barrieren (kjent som columbarrieren) må reaksjonens bestanddeler ha svært høy bevegelsesenergi fra før, men da vil en større energimengde bli frigjort etterpå. Fusjonsprosessen krever store mengder energi for å igangsettes, med temperaturer på mange millioner grader celsius.

Kjernevåpen basert på fusjonsladninger frigjør energi både ved fisjon og fusjon, og får dermed mye større sprengkraft enn enklere fisjonsladninger. Energien som er nødvendig for å muliggjøre fusjonsprosessene framskaffes da ved at en fisjonsladning utløses først. Fisjon- og fusjonsladninger gis det mer informasjon om i kapittel 10.

²⁶ Fusjon er synonymt med sammensmeltning.

5 Urangruver og møller

5.1 Uranutvinning

Uran er et naturlig forekommende radioaktivt grunnstoff med relativt stor utbredelse i jordskorpen. Landene med de antatt største uranforekomstene er Australia (29 prosent), Kasakhstan (12 prosent) og Russland (9 prosent) [9]. Konsentrasjonen av naturlig uran i malm ligger på under 1 prosent. Det eksisterer forskjellige metoder for uranutvinning. Uranholdig malm har typisk blitt hentet ut både fra underjordiske gruver og åpne dagbrudd. Valg av teknikk avhenger blant annet av dybden på uranforekomstene [10]. Det er også mulig å utvinne uran fra sjøvann. En økende andel av dagens uranutvinning foregår imidlertid gjennom den såkalte «in situ leach» (ISL) metoden, som foregår ved at et flytende medium pumpes ned i uranmalmen for å løse opp og ekstrahere uran, som så suges opp for videre foredling [11].²⁷ Rundt halvparten av verdens uranutvinning foregår nå ved hjelp av denne metoden, deriblant i USA, Kasakhstan og Usbekistan.



Figur 5.1 Uranmalm til venstre og høyanriket uranmetall til høyre. Foto: United States Government, offentlig eiendom.

Bryting av uran i dagbrudd har medført store inngrep i naturen da teknikken krever at det fjernes mye materiale for å komme til uranreservene [10]. Uranutvinning ved konvensjonell gruvedrift har på sin side medført strålingsfare. Urangruvearbeidere har pådratt seg lungekreft som følge av alfastråling fra radon og «radondøtre» (henfallsprodukter fra radon) som oppstår når uran-238 henfaller [2, s.198]. Velfungerende ventilasjonssystemer er derfor svært viktig i urangruver. Totalt sett anser USA ISL-teknikken for å være mindre belastende for miljøet og mer kostnadseffektiv [11]. Uranutvinning med ISL-teknikken kan imidlertid ikke benyttes i områder der grunnvann kan sige inn i gruveområdet og senere forurense drikkevannskilder [11]. Utvinning av uran foregår i 21 land. Kasakhstan er verdens største uranprodusent, etterfulgt av henholdsvis Canada og Australia. I 2012 produserte imidlertid Kasakhstan mer uran enn Canada og Australia til sammen [12, s.59-62]. Andre store uranproduserende stater inkluderer blant annet Niger, Namibia og Russland.

²⁷ Også kalt «in situ recovery» (ISR).



Figur 5.2 Tidligere område for uranutvinning i Moab, Utah. Foto: United States Government, offentlig eiendom.

5.2 Bearbeiding

Foredlingsprosessen foregår ved at uranholdig malm knuses og males i møller, før uranet separeres fra malmen ved hjelp av lut eller syrer, avhengig av hva malmen ellers består av. Dette gir en blanding av uranoksider (gjennomsnittlig kjemisk formel U_3O_8) som er svakt radioaktivt og kalles *yellowcake*.²⁸ Et «uranoksid» er en kjemisk kombinasjon av uran og oksygen, for eksempel UO_2 , som angir en kombinasjon av ett uranatom med to oksygenatomer. Begrepet *yellowcake* indikerer at pulverblandingen er gul, men dette vil variere avhengig av temperatur ved tørking. I enkelte tilfeller kan eksempelvis pulveret være helt svart [13]. For å produsere noen tonn med *yellowcake* kreves det gjerne hundretusenvis av tonn med malm, avhengig av uraninnholdet i malmen. Drivverdige forekomster har typisk noen brøkdeler av en prosent uran i malmen. Anlegg for bearbeiding av uran ligger derfor ofte nær gruvene. Etter bearbeiding sitter man også igjen med et restprodukt (slagg) med radioaktivt materiale som ofte lagres i nærheten av gruvene.²⁹ Utvinning av uran og produksjon av *yellowcake* er unntatt sikkerhetskontroll av Det internasjonale atomenergibyrådet (IAEA) da materialet betegnes som såkalt «source material».³⁰



Figur 5.3 Pulverblandingen *yellowcake* er en blanding av uranoksider. Foto: United States Department of Energy, offentlig eiendom.

²⁸ *Uranoksidkonsentrat* eller *urankonsentrat* er aktuelle begreper på norsk.

²⁹ Kalt *mill tailings* på engelsk.

³⁰ I motsetning til såkalt «special nuclear material» som IAEA fører sikkerhetskontroll med.

5.3 Konvertering til uranheksafluorid

Det produserte urankonsentratet fraktes til et konverteringsanlegg for omdanning til uranheksafluorid (UF_6), som er velegnet som utgangspunkt for anrikning og produksjon av uranbrensel. Konverteringsprosessen innebærer at urankonsentratet renses, reduseres og fluoriseres gjennom kjemiske prosesser. Mellomproduktet urandioksid (UO_2) tilføres flussyre (HF), som er svært etsende, for produksjon av urantetrafluorid (grønt salt, UF_4), og deretter fluorgass for framstilling av UF_6 i en fast form som likner på bordsalt. Konverteringsprosessen krever store prosessanlegg, avansert utstyr og kompetanse innen prosesskemi. Etter konverteringen overføres produktet til metallsylindere for transport til anrikningsanlegget. UF_6 både lagres og fraktes i fast form, og gjøres kun til gass ved innførsel i anrikningsanlegget.

IAEA fører sikkerhetskontroll med både produksjon og oppbevaring av UO_2 , UF_6 og lavanrikt uranheksafluorid,³¹ som anses for å være såkalt *special nuclear material*.³² En del reaktorer drives av naturlig uran (99,3 % uran-238), som krever at yellowcake konverteres direkte til UO_2 uten å anrikes.

6 Anrikning

Naturlig uran består av 99,3 prosent av den ikke-fissile isotopen uran-238 og kun 0,7 prosent av den fissile uran-235.³³ Kjerneraktorer og kjernevåpen krever ofte høyere konsentrasjoner av uran-235 enn det som er tilgjengelig i naturlig uran. *Anrikning* innebærer å øke andelen av en spesifikk isotop på bekostning av andre tilstedeværende isotoper. I dette tilfellet handler det om å øke konsentrasjonen av den fissile isotopen uran-235 på bekostning av den ikke-fissile uran-238. Dette gjøres ofte ved å utnytte den lille masseforskjellen mellom isotopene. Uran-235 har 3 nøytroner færre enn uran-238, og førstnevnte er derfor omkring 1,3 prosent lettere (nøytroner og protoner har tilnærmet samme masse). Det eksisterer forskjellige metoder for å separere isotopene, som hver for seg er teknisk avanserte og kostbare. De fleste og de mest utbredte anrikningsmetodene anvender uranheksafluorid (UF_6) i gassform.



Figur 6.1 Uranheksafluorid. Foto: United States Department of Energy, offentlig eiendom.

³¹ Lavanrikt uranheksafluorid omtales ofte som forkortelsen LE UF_6 .

³² Gjelder alle ikke-kjernevåpenstater som har ratifisert Ikke-spredningsavtalen for kjernevåpen (NPT).

³³ I tillegg inneholder naturlig uran en svært liten andel (0,0054 %) uran-234.

6.1 Anrikningsgrad

Anrikningsgraden beskriver konsentrasjonen (volumandelen) av isotopen uran-235 i uranet, som vist i Tabell 6.1. *Lavanriket uran* innebærer at andelen uran-235 er økt fra 0,7 prosent i naturlig uran opp til maksimalt 20 prosent. Lettvannsreaktorer drives hovedsakelig av uranbrensel som er anrikt til 3–5 prosent uran-235.³⁴ *Høyenriket uran* innebærer at andelen uran-235 er 20 prosent eller høyere. For eksempel drives russiske atomubåreaktorer typisk av uranbrensel anrikt til mellom 20 og 40 prosent uran-235 [14, s.15]. Enkelte forskningsreaktorer har også denne anrikningsgraden. *Våpenuran* innebærer at anrikningsgraden er rundt 90 prosent eller høyere.³⁵ Med denne anrikningsgraden er uranet anvendbart i kjernevåpen, siden kritisk masse da blir liten nok. Teknologien som brukes for produksjon av lavanriket uran til kjernereaktorer og høyenriket uran til kjernevåpen er den samme. Det er kun driftsstrategien som avgjør om produktet blir lavanriket eller høyenriket uran. Anrikningsanlegg anses derfor som *svært sensitive*, og anrikningsprosessen anses for å være den største terskelen på veien mot uranbasert kjernevåpenutvikling. Det er de første anrikningsprosentene som er mest krevende. Eksempelvis er det mer krevende å anrike fra naturlig uran til lavanriket uran, enn fra lavanriket uran til våpenuran.

Betegnelse	Konsentrasjon av uran-235
Naturlig uran	0,7 prosent uran-235.
Anrikt uran	Høyere enn 0,7 prosent uran-235.
Lavanriket uran	Høyere enn 0,7 prosent uran-235, men lavere enn 20 prosent uran-235.
Høyenriket uran	20 prosent eller høyere uran-235.
Våpenuran	Høyere enn 90 prosent uran-235
Utarmet uran	Under 0,7 prosent uran-235.

Tabell 6.1 Anrikningsnivåer.

6.2 Utarmet uran

Etter anrikningsprosessen sitter man igjen med *produktet*, som er anrikt uran, men også et restprodukt, såkalt *utarmet uran* [2, s.199], som vist i Figur 6.2.³⁶ Utarmet uran består i hovedsak av uran-238, samt en liten rest av uran-235 på mellom 0,2 prosent og 0,4 prosent [2, s.199].

Radioaktiviteten i utarmet uran er lavere enn i naturlig uran, men det vil avgi noe alfastråling og lavenergetisk gammastråling. Lavere konsentrasjoner av uran-235 i det utarmede uranet betyr effektiv utnyttelse av det naturlige uranet i anrikningsprosessen [15, s.26].³⁷ Det produseres relativt store mengder utarmet uran ved anrikning, ettersom naturlig uran i all hovedsak består av uran-238. For å produsere 1 kg uran til et kjernekraftverk vil det samtidig bli produsert omkring 6–7 kg

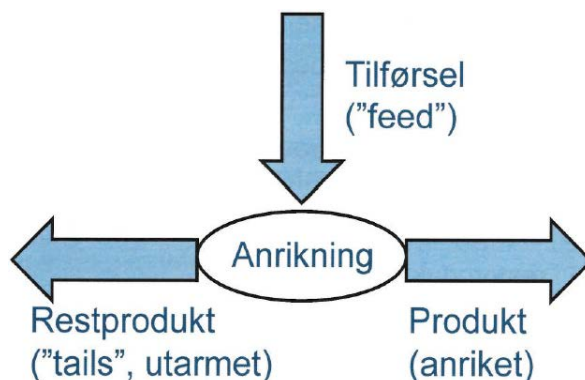
³⁴ Lettvannsmodererte reaktorer er den mest vanlige reaktortypen. Reaktortypen kjennetegnes ved at den bruker lettvann (vanlig vann) både som moderator og kjølevann. Mer om reaktortyper i kapittel 8.

³⁵ Historisk sett ofte 93-94 prosent uran-235.

³⁶ På engelsk ofte omtalt som «depleted uranium» eller «enrichment tails». Tilførselen av uranheksafluoridgassen omtales som «feed».

³⁷ Se også [2, s.199]

utarmet uran [16, s.8]. Utarmet uran har imidlertid flere anvendelsesområder der det er uranets kjemiske og fysiske egenskaper som er av betydning, ikke spesielle kjernefysiske forhold som har med de ulike isotopene å gjøre. Kjemiske og fysiske egenskaper er i praksis like for alle isotoper av et gitt grunnstoff. Utarmet uran kan brukes for eksempel til skjerming av strålekilder eller til ballast i fly og båter. Det har også vist seg nyttig til bruk i panserbrytende ammunisjon fordi uranets høye tetthet gir det høy gjennomtrengningsevne og fordi det selvantenner under gjennomtrengningen. Dette bruksområdet er svært kontroversielt på grunn av helsefaren forbundet med innånding av partikler av utarmet uran, og norske styrker anvender ikke slik ammunisjon.



Figur 6.2 Anrikningsterminologi.

6.3 Anrikningskapasitet

Separative Work Units (SWU) er en måleenhet som kan benyttes for å vurdere kapasiteten til et anrikningsanlegg. Det er en komplisert enhet som ofte forklares ved hjelp av eksempler. For å produsere nok lavanriktet uran (3-5 prosent uran-235) til en lett vannsreaktor med 1 GW_e³⁸ kreves det rundt 100 000 SWU per år [15, s.26]. For å produsere kun 25 kg med uran anriktet til våpenkvalitet kreves det derimot ca. 5000 SWU, hvis det er 0,3 prosent uran-235 i restproduktet. Det kreves betydelig flere SWU for å anrike de første prosentene enn de siste prosentene. I begge eksemplene er det lagt til grunn at man starter med tilstrekkelige mengder naturlig uran.

6.4 Anrikningsmetoder

Gjennom en årrekke har to anrikningsmetoder dominert; sentrifugeanrikning og gassdiffusjonsanrikning. De siste årene har imidlertid gassdiffusjonsmetoden blitt faset ut, samtidig som det har blitt gjennomført mer forskning på laseranrikning.³⁹ Energiforbruket ved gassdiffusjonsanrikning er betydelig større enn ved sentrifugeanrikning og spesielt laseranrikning. Laseranrikning, som anses for å være den mest effektive metoden, har imidlertid vist seg vanskelig å oppskalere fra laboratorienivå. Det er den lille masseforskjellen mellom isotopene uran-235 og uran-238 som gjør at separasjonseffekten blir relativt liten ved bruk av de to etablerte metodene. Anrikningsprosessen foregår derfor i flere små trinn, der anrikningsgraden økes etter hvert som gassen passerer gjennom de ulike trinnene.

³⁸ GW_e betyr gigawatt elektrisk effekt. Elektrisk effekt er den effekten som kommer ut av et kjernekraftverk i form av elektrisitet. Mer om dette i kapittel 8.2.

³⁹ For mer informasjon om anrikningsmetoder, se kilde [20].

Ved ankomst til anrikningsanlegget omdannes det etsende uranheksafluoridsaltet direkte fra fast form til gassform (*sublimerer*) ved hjelp av autoklaving (en trykkoker). Det er kombinasjonen av trykk (1 atm) og temperatur (56,5 °C) som gjør at stoffet sublimerer og desublimerer [14, s.85]. Sylinderne med uranheksafluoridgassen kobles deretter til såkalte *kaskader*⁴⁰ i anrikningsanlegget for mating av UF₆-gass.



Figur 6.3 Anlegg for gassdiffusjonsanrikning i Portsmouth, USA. Foto: United States Department of Energy, offentlig eiendom.

6.4.1 Gassdiffusjonsanrikning

Gassdiffusjonsanrikning var den første anrikningsteknikken som ble utviklet i full skala, og teknikken anvendes fremdeles i en rekke stater, deriblant i USA og Frankrike. Ved gassdiffusjon passerer uranheksafluoridgass gjennom porøse membraner, der den lettere uran-235 beveger seg raskere gjennom membranene enn den tyngre uran-238 [18, s.86]. Prosessen gjentas i flere trinn, og etter hvert som uran-235 passerer gjennom membranene øker anrikningsgraden. Restproduktet sendes inn i tidligere anrikningstrinn eller ut av systemet. Teknikken har hatt sin storhetstid, men anses i dag som foreldet. Dette blant annet fordi gassdiffusjon krever omfattende anlegg og høyt energiforbruk. Figur 6.3. viser et anlegg for gassdiffusjonsanrikning i Ohio i USA som lenge produserte anriket uran til amerikanske reaktorer og kjernevåpen.

6.4.2 Gassentrifugeanrikning

Den mest utbredte formen for anrikning er sentrifugeanrikning. Teknikken innebærer å spinne uranheksafluoridgass i sylinderformede høyhastighetssentrifuger slik at den lettere uran-235 legger seg innerst ved rotasjonsaksen, mens den tyngre uran-238 legger seg langs sentrifugeveggen. Sentrifugene er koblet sammen via rør i kaskader som har felles punkter for kontinuerlig mating og tapping av UF₆-gass. Hvert trinn gir stadig høyere anrikningsgrad, og det anrikede uranet tappes ut

⁴⁰ Anrikningsanlegg består ofte av flere kaskader som opererer både parallelt og i serie, og som har felles punkt for mating og tapping av UF₆-gass. Kaskader beskrives nærmere i delkapittel 6.4.2.

fra toppen av sentrifugen. Restproduktene fra de enkelte trinnene sendes enten ut av systemet eller inn i tidligere anrikningstrinn [19, s.7], såkalt *refluks*.



Figur 6.4 Irans tidligere president Ahmadinejad under et besøk til Natanz anrikningssenter i Iran i april 2008. Foto: Iran's Presidency Office Handout.

Lave temperaturer på uranheksafluoridgassen i sentrifugene gir økt separasjonsevne, og ved å holde trykket på et stabilt lavt nivå unngås det at gassen desublimerer til fast stoff, noe som kan ødelegge sentrifugene. Et anrikningsanlegg kan bestå av flere titalls kaskader, og hver kaskade kan bestå av flere hundre eller tusen sentrifuger. Hver sentrifuge er typisk 2–4 meter høy. Sentrifugene er av lette og stive materialer, og består vanligvis av enten mareldet stål eller aluminium.⁴¹ På bildet over (Figur 6.4.) går Irans tidligere president Ahmadinejad mellom to kaskader med sentrifuger i Natanz anrikningssenter.

6.4.3 Laseranrikning

Ved laseranrikning utnyttes forskjellen i energinivåer mellom isotopene uran-235 og uran-238 [17, s.16]. De mest etablerte metodene for laseranrikning, *atomdamplaserisotopseparasjon* (AVLIS) og *molekylærlaserisotopseparasjon* (MLIS), tar utgangspunkt i energitilstandene i henholdsvis atomer og molekyler. AVLIS-metoden innebærer blant annet ionisering av atomer, dvs. å løsrive elektroner fra atomet, mens MLIS-metoden utnytter molekylenes evne til å ta til seg elektromagnetisk stråling.⁴² MLIS-metoden, som er hakket mer komplisert, bruker uranheksafluoridgass, mens AVLIS-metoden anvender fordampet uranmetall [20, s.28-30]. En rekke stater, deriblant Australia, USA og Russland, har forsket på laseranrikning, men foreløpig anvendes metoden hovedsakelig på laboratorienivå. Forskere i Australia og USA har i tillegg arbeidet med en lasermetode med den generiske betegnelsen *separasjon av isotoper med lasereksitasjon* (SILEX), som er mest relatert til MLIS, med ambisjoner om oppskalering til et mer kommersielt nivå. Det gjenstår imidlertid å se hvorvidt laseranrikning kan tas videre fra laboratorieskala.

⁴¹ Det finnes også sentrifuger i titan og karbonfiberkompositt.

⁴² MLIS-metoden er en to-trinns prosess som eksiterer først hele UF_6 -molekylet med uran-235, men ikke med uran-238, med én type laser, før en annen type splitter de eksisterende UF_6 -molekylene til UF_5 , som deretter kan skilles ut.

Laseranrikning har uansett fått fornyet aktualitet med SILEX etter at mange land tidligere har prøvd og feilet.

Fordelene ved laseranrikning er effektiviteten: Det kreves lavere energiforbruk, og separasjonseffekten i hvert trinn antas å være betydelig større enn ved eksempelvis sentrifugeanrikning [17, s.16]. Laseranrikning kan derfor utføres i mindre anlegg som er enklere å skjule. Dette har imidlertid skapt frykt for at teknologien i framtiden kan bli interessant for små stater eller terrororganisasjoner med kjernevåpenambisjoner [2, s.201]. Det er kjent at Irak på 1980-tallet forsket på både MLIS- og AVLIS-teknologiene. Iran har også bedrevet laboratorieforskning på begge disse metodene.

6.4.4 Andre typer anrikning

Det eksisterer en rekke andre relevante anrikningsmetoder, inkludert *elektromagnetisk isotopseparasjon* (EMIS), *termisk diffusjon*, *kjemiske separasjonsprosesser* og *aerodynamiske metoder*. Enkelte av disse metodene, deriblant termisk diffusjon og EMIS, har vært mye i bruk tidligere, men siden metodene ikke antas å dominere framtidens anrikningsteknologier blir de ikke nærmere forklart her.⁴³

7 Brenselsproduksjon

I et konverteringsanlegg omdannes anriktet uranheksafluorid vanligvis til urandioksid (svart pulver, UO_2) som er det vanligste utgangspunktet for produksjon av reaktorbrensel. Kjemisk konvertering fra anriktet UF_6 til anriktet UO_2 innebærer å fjerne fluor. Det er spesielt lettvannsreaktorer, og en del forskningsreaktorer, som drives av *anriktet urandioksidbrensel*. Reaktorer som drives av *naturlig uran* (ikke anriktet) bruker også oftest brensel basert på UO_2 , men dette har da ikke vært gjennom noen anrikningsprosess. Det er også mulig å konvertere UF_6 til *uranmetall*, som er egnet for våpenformål og noen typer reaktorbrensel. Dette gjøres ved å bruke eksempelvis magnesium for reduksjon av mellomproduktet tetrafluorid (grønt salt) til metallisk uran.

7.1 Brenselsfabrikk

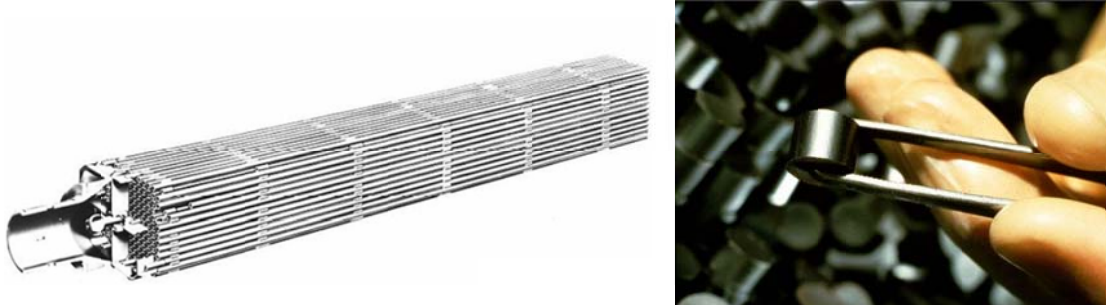
Fabrikasjon av brensel foregår på tilnærmet samme måte uavhengig av type brensel. Ved ankomst til brenselsfabrikken sintres urandioksidpulveret til små keramiske brenselsbriketter, også kalt pellets. I praksis betyr det at materialet varmpresses ved over 1400 °C, som er under smeltepunktet for UO_2 [10]. Brikettene blir kompakte, og er sjelden større enn 1 cm i diameter. Størrelsen og formen på brikettene finjusteres og kontrolleres før hver enkelt brenselsbrikett plasseres oppå hverandre inn i tynne, sylindrerformede kapslinger bestående av en zirkoniumlegering eller aluminium.⁴⁴ På toppen av brikettene gis det rom for termisk ekspansjon fordi brikettene endrer volum som følge av temperaturendringer i reaktorkjernen [21]. De fingertykkede kapslingene med fissilt materiale kalles *brenselsstaver*.⁴⁵ I hver brenselsstav kan det plasseres hundrevis av

⁴³ For mer informasjon om ulike anrikningsteknologier, se kilde [20].

⁴⁴ Dette er stoffer som i liten grad absorberer nøytroner og som derfor ikke hemmer kjedereaksjonen.

⁴⁵ Brenselsstaver kalles også brenselspinner.

brenselbriketter. Brenselstavene er gasstette og plasseres inn i såkalte *brenselementer*, som kan være flere meter lange.⁴⁶ Hvert brenselement kan bestå av flere titalls eller hundretalls brenselstaver. En trykkvannsreaktor kan ha et sted mellom 100 og 200 brenselementer, mens en kokvannsreaktor vil kunne ha mellom 350–800 brenselementer [22].⁴⁷



Figur 7.1 Et brenselement med plass til 164 brenselstaver (til venstre) og en brenselbrikett (til høyre). Foto: United States Government, offentlig eiendom.

Alle prosessene i brenselabrikken utføres med stor grad av presisjon for å sikre at brenselstavene har nøyaktig de fysiske egenskapene som er nødvendig for å fungere optimalt i reaktoren [10]. Det skal blant annet hindres uønskede kjedereaksjoner i det fissile materialet, og kapslingen skal sikre at fisjonsprodukter ikke slipper ut (som i så fall kan gi et forurensningsproblem i reaktoren). Arbeidet som utføres i brenselabrikken sluttfører prosessen med å lage brensel, og ender med at brenselementene transporteres til reaktoren.

8 Kjernereaktorer

De fleste av dagens kjernereaktorer produserer elektrisitet, men mange benyttes til forskning og utvikling, noen produserer våpenplutonium, og en del brukes til drift av fartøyer. Uansett reaktorens formål produserer alle reaktorer varme som følge av at tunge atomkjerner fisjonerer.

8.1 Hva skjer i en kjernereaktor?

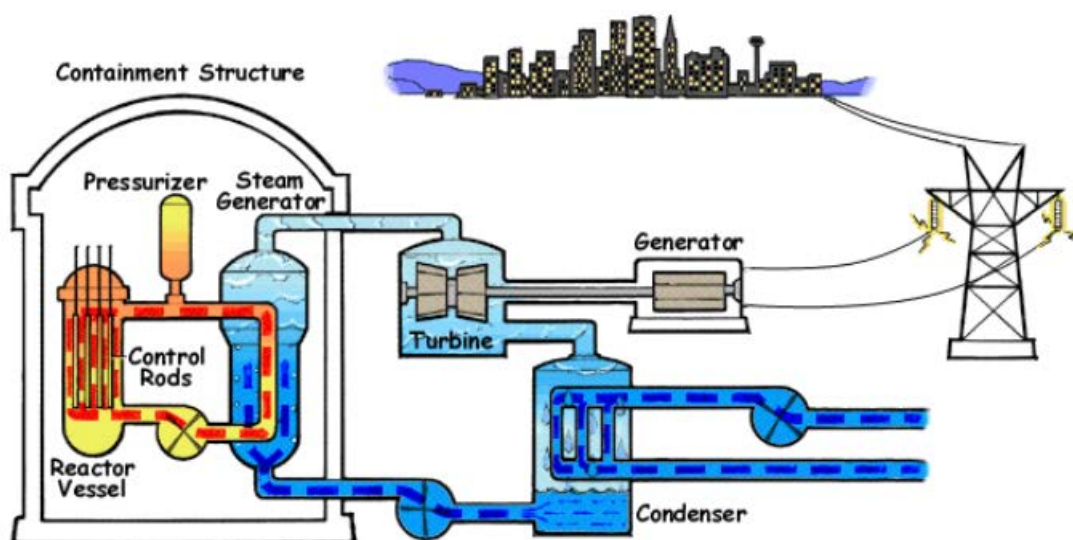
For å forklare hva som skjer i en typisk kjernereaktor tas det her utgangspunkt i trykkvannsreaktoren, som er den mest utbredte reaktortypen. De viktigste prosessene foregår inne i reaktorkjernen. Brenselementene, som består av hundrevis av brenselstaver med *fissilt materiale*, installeres i reaktorkjernen i en reaktortank. Som beskrevet i kapittel 4, vil en atomkjerne av et fissilt materiale, i praksis uran-235, uran-233 eller plutonium-239, ofte spaltes til to lettere atomkjerner dersom den fanger inn et nøytron. I denne prosessen frigjøres store mengder energi og i gjennomsnitt to til tre nøytroner fra hver spaltning. Nøytronene som frigjøres ved spaltning har høy hastighet. For å øke sannsynligheten for fisjon i det fissile materialet bremses hastigheten på disse nøytronene før de treffer nye atomkjerner [23, s.73]. Dette gjøres ved bruk av en såkalt *moderator* i

⁴⁶ Brenselementer kalles også brenselknipper.

⁴⁷ Dette fordi kokende vann modererer dårligere enn trykksatt, ikke-kokende vann. Da må avstanden mellom hvert element økes for å oppnå et termisk nøytronspektrum, hvilket gjør at energitettheten i kjernen går ned og mer brensel behøves for å oppnå samme effekt.

reaktortanken. Moderatoren består i praksis av enten vann (H_2O , ofte kalt *lett vann* i reaktorsammenheng), tungtvann (deuteriumoksid, D_2O ⁴⁸) eller grafitt (karbon, C). Dermed oppstår det en kjedereaksjon av fisjoner, som forklart i delkapittel 4.1. For å påse at kjedereaksjonen ikke stopper opp eller løper løpsk, har man såkalte *kontrollstaver* i reaktoren. Disse absorberer nøytroner, og føres inn og ut av reaktorkjernen etter behov.⁴⁹ Etter hvert som brenselet «brennes ut» trekkes kontrollstavene ut, for å påse at kjedereaksjonen ikke stanser, ettersom kontrollstavene absorberer nøytroner. Med høy andel av ferskt reaktorbrensel i kjernen kan kontrollstavene puttes inn igjen for å sikre at kjedereaksjonen ikke løper løpsk.

Bevegelsesenergien som oppstår ved spalting av atomkjerner blir til varme i brenselet, som derfor må kjøles ned ved hjelp av et *kjølemiddel* slik at det ikke smelter. Kjølemiddelet kan eksempelvis være lett vann, tungtvann eller gass. I mange kjernereaktorer, som eksempelvis lett vannsreaktorer, fungerer kjølemiddelet også som moderator. Kjølemiddelet beveger seg i en *primærkrets* i reaktortanken der det kjøler ned brenselet, før en pumpe bidrar til å frakte varmen vekk fra reaktorkjernen og overføre energien til en ytre *sekundærkrets* via en varmeveksler [23, s.73]. Det er varmen i sekundærkretsen som får vann til å koke og fordampe. Dampen driver turbiner som i sin tur produserer elektrisitet [24]. Man ser ofte at reaktorer er lokalisert i nærhet til sjø eller elv for å sikre tilstrekkelig nedkjøling av sekundærkretsen. Sekundærkretsen kan også være tilkoblet et kjøletårn. Når dampen avkjøles, kondenserer den til vann som blir sirkulert på nytt gjennom sekundærkretsen. Behovet for nedkjøling av reaktorkjernen vedvarer etter at reaktoren er avstengt fordi radioaktiviteten i fisjonsproduktene vil bidra til en restvarme i reaktorkjernen. Rundt reaktortanken er det skjerming som beskytter mot stråling, samt en reaktorinneslutning. I tillegg bidrar kapsling, brenselstaver, brenselelementer, kjølevannet og reaktortanken til å gi flere lag med beskyttelse. Kjernekraftreaktorer er som dampmaskiner drevet av varmen fra spalting av uran (og i noen grad plutonium).



Figur 8.1 Prosessene som finner sted i en generisk trykvannsreaktor. Kilde: United States Government, offentlig eiendom.

⁴⁸ Deuterium er hydrogen med et nøytron i tillegg til protonet i kjernen, altså tungt hydrogen, derav tungtvann.

⁴⁹ Vanligvis består kontrollstavene av enten kadmium eller borkarbid.

8.2 Hovedtyper av reaktorer

Det er vanlig å skille mellom *forskningsreaktorer*, *kjernerkraftreaktorer* og *fartøysreaktorer*. Forskningsreaktorer er små reaktorer både i størrelse, generert effekt og mengden fissilt materiale som kreves. Effekten fra kjernerreaktorer oppgis i termisk effekt og/eller elektrisk effekt. *Termisk effekt* er den totale varmeeffekten som produseres i en gitt reaktor, mens *elektrisk effekt* er den effekten som kommer ut av et kjernerkraftverk i form av elektrisitet [24]. Effekten oppgis vanligvis i størrelsesorden megawatt (MW_t og MW_e , henholdsvis termisk og elektrisk) og gigawatt (GW_t og GW_e). Forskningsreaktorer produserer typisk under $100 MW_t$, mens kraftreaktorer produserer i gjennomsnitt nærmere 1–3 GW_t . Med en typisk virkningsgrad på ca. 33 % tilsvarer det omkring 0,3–1,0 GW_e . Én gigawatt-dag (GWd) produsert elektrisitet forbruker rundt 3 kg uran-235.

8.2.1 Forskningsreaktorer

Forskningsreaktorer er små reaktorer som hovedsakelig benyttes til forskning og utvikling. Dette inkluderer blant annet nøytronforskning, radiografi, testing av nye brenselstyper, osv. I tillegg brukes en rekke reaktorer for produksjon av medisinske isotoper, eller til å produsere plutonium til kjernevåpen. Det er et stort spenn av forskningsreaktorer både i størrelse og generert effekt.⁵⁰

Forskningsreaktorer benytter alt fra naturlig uranbrensel til uran av våpengrad. Det vanligste er brensel anriket noe høyere enn kjernerkraftbrensel, ofte opptil 20 % uran-235. Reaktorer for produksjon av våpenplutonium drives imidlertid av naturlig uranbrensel.

8.2.2 Kjernerkraftreaktorer

Kjernerkraftreaktorer deles inn i *termiske* og *hurtige* reaktorer.⁵¹ Flertallet av verdens reaktorer baserer seg på termisk fisjon, som innebærer at hastigheten på nøytronene bremses ved hjelp av en moderator, for å øke sannsynligheten for spaltning i atomkjernene. Både lettvanns-, tungtvanns- og grafittmodererte reaktorer er termiske reaktorer. I hurtige reaktorer er det de raske nøytronene som er sentrale i spaltingsprosessen. Hurtige reaktorer trenger derfor ingen moderator, men må til gjengjeld ha høyere anrikingsgrad på uranet, eventuelt i en blanding med plutonium.

8.2.2.1 Lettvannsreaktorer

Lettvannsmodererte reaktorer er den mest vanlige reaktortypen. Lettvannsreaktorer benytter anriket uranbrensel, typisk anriket til 3–5 % uran-235, og lett vann (vanlig vann) som moderator og kjølevann. Alle kjernerreaktorer produserer plutonium, men lettvannsreaktorer er sikrere i et spredningsperspektiv fordi plutoniumet som produseres har en isotopsammensetning som gjør det vanskelig anvendbart i kjernevåpen. Lettvann har en høy evne til å absorbere nøytroner, som gjør at lettvannsreaktorer generelt sett ikke kan drives av naturlig uran (som kunne gitt plutonium av våpenkvalitet).

Lettvannsreaktorer deles typisk inn i *trykkvannsreaktorer* (Pressurized Water Reactor – PWR) og *kokvannsreaktorer* (Boiling Water Reactor – BWR). Trykkvannsreaktorer er mest utbredt og

⁵⁰ Produksjonsreaktorer for plutonium og medisinske isotoper er ofte større i størrelse og generert effekt.

⁵¹ Det finnes også et lite antall hurtige forskningsreaktorer.

kjennetegnes ved at kjølevannet er under et så høyt trykk at vannet ikke koker i reaktortanken, selv om det holder 320–330 °C [25, s.111-112]. I trykkvannsreaktoren fraktes varmen i primærkretsen via en varmeveksler til sekundærkretsen der en dampgenerator produserer damp som driver turbinene. I kokvannsreaktorer koker vannet i reaktortanken og produserer derved damp som ledes direkte til turbinene, uten å gå via noen sekundærkrets [25, s.112].

8.2.2.2 Tungtvannsreaktorer

Tungtvannsmodererte reaktorer (Heavy Water Reactor – HWR) benytter tungtvann som både moderator og kjølevann, og drives normalt av naturlig uranbrensel. Tungtvannsreaktorer kan bruke naturlig uranbrensel fordi tungtvann har en lavere evne til å absorbere nøytroner enn eksempelvis lett vann. En behøver derfor ikke å kompensere for nøytrontapet ved å bruke anriket brensel (selv om det er fullt mulig med anriket brensel også i tungtvannsreaktorer, som i de to norske forskningsreaktorene på Kjeller og i Halden). Nøytronbestråling av uran-238 i reaktorkjernen gir opphav til plutonium-239, som er den plutoniumisotopen som er mest anvendbar i kjernevåpen. De fleste tungtvannsreaktorer minner om trykkvannsreaktorene, blant annet ved at vannet i reaktorkjernen ikke koker,⁵² og at dampen som driver turbinene produseres i sekundærkretsen [25, s.113]. En rekke stater opererer såkalte CANDU-reaktorer som opprinnelig ble utviklet i Canada. Dette er *trykk tungtvannsreaktorer* (Pressurized Heavy Water Reactor – PHWR) der brenselementene i reaktorkjernen ligger horisontalt i trykksatte rør [25, s.113]. CANDU-reaktoren er distribuert til blant andre India, Kina, Pakistan, Romania, Sør-Korea og Argentina, og antas å ha hatt en sentral rolle i Indias kjernevåpenprogram.

8.2.2.3 Grafittmodererte reaktorer

Gasskjølte, grafittmodererte reaktorer bruker karbondioksid eller helium i gassform som kjølemiddel og grafitt som moderator [25, s.114]. De kan gå på naturlig uran, noe som gjør dem anvendbare for plutoniumproduksjon til våpen. Storbritannia hadde eksempelvis «gasskjølte reaktorer» (GCR) og «avanserte gasskjølte reaktorer» (AGR) som gikk på henholdsvis metallisk uran og lavanrikt urandioksid. Begge typene var grafittmodererte reaktorer som ble kjølt med karbondioksid. Kun AGR er i drift i Storbritannia i dag, og ingen andre land har operative AGR-reaktorer lenger. AGR er mer avansert og effektiv enn den opprinnelige gasskjølte reaktortypen, den såkalte *Magnox-reaktoren* (kalt det fordi kapslingen besto av magnesiumlegering). Russland har flere grafittmodererte reaktorer, såkalte RBMK-reaktorer, men disse kjøles av lett vann. Dette reaktordesignet, som er mest kjent fra Tsjernobyl-ulykken, ble opprinnelig utviklet for plutoniumproduksjon til våpen. Både GCR- og RBMK-reaktorene hadde kombinert strømproduksjon og plutoniumproduksjon som opprinnelig hensikt.

8.2.3 Fartøysreaktorer

I tillegg til kjernekraftreaktorer og forskningsreaktorer har man fartøysreaktorer. De er betydelig mindre enn kjernekraftreaktorer og produserer typisk om lag en tidel av effekten til disse, men går ofte på høyere anriket brensel. Det gjør at fartøyene kan bytte brensel sjeldnere enn om de hadde

⁵² Et sjeldent unntak er Haldenreaktoren, som har kokende tungtvann som moderator og kjølemiddel.

gått på lavere anriket uranbrensel. Flere moderne atomubåter bytter faktisk ikke brensel i det hele tatt i løpet av reaktorens levetid.

8.2.4 Breederreaktoren

En type hurtig reaktor er den såkalte *breederreaktoren*, som også er kalt *formeringsreaktor* på norsk. Den kjøles med flytende metall og bruker typisk MOX-brensel⁵³ bestående av 80 prosent urandioksid og 20 prosent plutoniumdioksid [2, s.188-189]. Plutoniumet i MOX-brensel er gjenvunnet fra brukt uranbrensel i et reprosesseringsanlegg, mens uranet oftest består av restproduktet etter anrikning (utarmet uran som inneholder ca. 0,2 % uran-235) eller naturlig uran [21]. I MOX-brensel er det plutoniumet som er det fissionable materialet [26, s.9]. Et interessant moment ved breederreaktoren er at den har evnen til å produsere mer plutonium-239 enn den forbruker, og det er nettopp dette som har gitt opphav til navnet.

Tabell 8.1 angir de viktigste kategoriene av kjernekraftreaktorer og kommenterer på reaktortypenes anvendelighet i plutoniumproduksjon.

Reaktortype	Moderator	Brensel	Sensitivitet
Trykkvannsreaktor	Lettvann	→ Lavanriket UO ₂ (3–5 prosent uran-235)	Lav
Kokvannsreaktor	Lettvann	→ Lavanriket UO ₂ (3–5 prosent uran-235)	Lav
Tungtvannsreaktor	Tungtvann	→ Naturlig UO ₂ (99,3 prosent uran-238)	Høy
Grafittreaktor	Grafitt	→ Naturlig UO ₂ , metallisk uran eller lavanriket UO ₂ ⁵⁴	Høy
Breederreaktor	Ingen	→ MOX (PuO ₂ og UO ₂)	Høy

Tabell 8.1 Kjennetegnet ved hovedtyper av kraftreaktorer. Sensitivitet i denne sammenheng betyr anvendelighet i plutoniumproduksjon.

8.3 Virkningsgrad

Mesteparten av energien som produseres i reaktorer blir ikke til elektrisitet. Trykkvanns- og kokvannsreaktorer kan ha en virkningsgrad på omkring 33 prosent, CANDU-reaktorer på omkring 31 prosent, og grafittmodererte, gasskjølte reaktorer kan ha en virkningsgrad på nærmere 40 prosent [25, s.111-114]. En viktig parameter for virkningsgraden er temperaturen i reaktorkjernen. Grafittmodererte gasskjølte reaktorer har ofte høyere virkningsgrad fordi gassen tillater høyere temperaturer i kjernen (forutsatt at brenselet ikke er av uranmetall).

8.4 Bytte av brensel

Reaktorbrensel har begrenset levetid, og omtrent 1/3 av brenselet må typisk skrives ut ca. hver 18. måned [2, s.213]. Denne prosessen tar ca. 1 måned, avhengig av reaktordesignet.

⁵³ MOX står for *Mixed Oxide Fuel*.

⁵⁴ De grafittmodererte Magnox-reaktorene til Storbritannia brukte naturlig uranmetall, mens de videreutviklede AGR-reaktorene ofte benytter lavanriket UO₂. Grafittreaktorer kan også gå på naturlig UO₂. Mer om dette i delkapittel 8.2.2.3.

Strålingsintensiteten fra nytt reaktorbrensel er lav fordi det eneste radioaktive stoffet det inneholder er uran, som har lang halveringstid [27]. Når det fissile materialet forbrukes, oppstår en rekke fisjonsprodukter ved spalting, og dette fører til at brenselet blir svært radioaktivt.

Strålingsintensiteten vil avta over tid etter hvert som nuklider med kort halveringstid henfaller, men deretter vil stoffene med lang halveringstid bli igjen.

Det er generelt ønskelig å skifte brensel så sjelden som mulig. Trykkvannsreaktorer og kokvannsreaktorer krever at reaktoren stoppes ved bytte av brensel [25, s.111-112]. Flere tungtvanns- og grafittreaktorer åpner derimot for brenselsskifte mens reaktoren fremdeles er i drift, deriblant CANDU, RBMK og AGR. Ved produksjon av våpenplutonium er det nødvendig med hyppig brenselsskifte, for å sikre tilgang til renest mulig plutonium-239 som er mest anvendbart i kjernevåpen. Hvis uran-238, som det er mest av i naturlig uran, bestråles lenge i reaktorkjernen vil det etter hvert bygges opp betydelige mengder av tyngre plutoniumisotoper, spesielt plutonium-240 og plutonium-241, som ikke lar seg separere fra plutonium-239, men er mindre egnet for våpenbruk [28, s.25]. Reactorer for produksjon av våpenplutonium åpner derfor for hyppig brenselsskifte. Fartøysreaktorer benytter ofte svært høyt anriket uranbrensel for å oppnå en kompakt design og for å slippe å skifte brensel så ofte. Høyenriket uranbrensel er imidlertid svært anvendelig i uranbaserte kjernevåpen. Spredningsaspektet gjør det derfor ønskelig at ubåter går på lavere anriket uranbrensel.

9 Håndtering av brukt brensel

Brukte brenselelementer hentes ut av reaktorkjernen og kjøles ned i et våtlager i nærheten av reaktoren. Etter måneder eller år, når materialet er mer håndterbart med hensyn til både stråling og varme, fraktes det til et reprosesseringsanlegg for gjenvinning av uran og plutonium, eventuelt til et (tørt) mellomlager. Selv om flere stater har hatt planer om å bygge sluttdeponier for permanent lagring av høyaktivt langlivet avfall, har det latt vente på seg, og ingen slike deponier er ennå tatt i bruk i noe land.

9.1 Våtlagring av brukt brensel

I brukt brensel er det gjenværende uran, fisjonsprodukter og andre stoffer som har oppstått som følge av nøytronstråling, som for eksempel plutonium og andre tunge grunnstoffer.⁵⁵ På lik linje med fisjonsproduktene utgjør de også betydelig strålingsfare. Enkelte radioaktive isotoper vil forsvinne raskt grunnet kort halveringstid. De radioaktive fisjonsproduktene som har størst strålevernmessig betydning i brukt kjernebrensel er blant annet cesium-137 og cesium-134, som begge er betastrålingskilder med halveringstider på henholdsvis 30 år og 2 år.⁵⁶ Andre eksempler er strontium-90, med en halveringstid på 29 år, og jod-131, med en halveringstid på 8 dager. Alle de nevnte eksemplene er betakilder, men betastrålingen følges vanligvis av gammastråling (strontium-90 er ett av få unntak).

⁵⁵ I tillegg til fisjonsprodukter vil det i brukt brensel også være radioaktive «aktinider», dvs. grunnstoffer tyngre enn uran, som er dannet ved innfangning av nøytroner i uran. Plutonium er det mest kjente eksempelet på dette.

⁵⁶ Forholdet mellom de to cesiumisotopene kan si noe om hvorvidt utslippet som har ført til forurensning er gammelt eller nytt, ettersom den ene isotopen lever betydelig lenger enn den andre.

Det var tidligere en ambisjon at brukt brensel ikke skulle lagres i våtlager lenger enn 150 dager [2, s.254]. I påvente av bygging av både sluttdeponi og reprosesseringsanlegg har enkelte stater valgt å lagre det brukte brenselet lengre i våtlageret (enkelte ganger over 20 år), og deretter flytte det radioaktive avfallet til et tørrlager i nærheten av reaktoren, som en midlertidig løsning [2, s.213, s.254]. Noen stater har fått på plass rutiner for gjenvinning av brukt brensel, men bygging av fjellanlegg for langtidslagring av avfall har tatt lengre tid enn ventet.



Figur 9.1 Våtlagring av brukt brensel ved et kjernekraftverk. Brenselselement med brukt brensel føres ned i kjølevannet. Foto: United States Government, offentlig eiendom.

9.2 Gjenvinning av brukt brensel

Bestrålt brensel inneholder betydelige mengder med uran og plutonium som ved hjelp av mekaniske og kjemiske prosesser kan separeres fra fisjonsproduktene og de andre stoffene som har oppstått i brenselet, såkalt *reprosessering* (også kalt gjenvinning). Prosessene utføres ved hjelp av fjernstyring med robotarmer i rom med tykke vegger og blyglassvinduer, såkalte hot-celler. Dette for å beskytte arbeiderne mot de radioaktive fisjonsproduktene. Såkalte hanskebokser anvendes ved mindre aktive, små gjenstander. Den vanligste metoden for reprosessering er den såkalte PUREX-metoden,⁵⁷ som baserer seg på væske-væske-ekstraksjon [29, s.4]. Det innkapslede brenselet kjøles ned i et vannbasseng for reduksjon av både radioaktivitet og temperatur, noe som kan ta flere år, før brenselet skilles fra kapslingen og løses opp i en sterk salpetersyre. Ved bruk av det organiske løsemiddelet tributylfosfat (TBP) separeres uranet og plutoniumet fra fisjonsproduktene [29, s.4]. Etter en rekke renseprosesser sitter man igjen med uranoksid og plutoniumoksid. Det vanligste er at uranet på nytt anrikes, mens plutoniumoksidet ved tilsetning av utarmet eller naturlig uranoksid gir MOX-brensel [26, s.6]. Dermed kan uranet og plutoniumet på nytt brukes som fissilt materiale i en reaktor, og en har da en lukket kjernefysisk brenselssyklus. Brukt brensel inneholder også andre

⁵⁷ PUREX står for *Plutonium and Uranium Recovery by Extraction*.

radioaktive isotoper som kan være nyttige eksempelvis til forskning. Det gjenværende avfallet med de høyt radioaktive fisjonsproduktene omgjøres deretter til fast stoff før det kan lagres i et sluttdeponi.

Kun få stater reprosesserer brukt kjernekraftbrensel, nemlig Storbritannia, Frankrike, Russland, India og Japan [2, s.217]. Kina og Pakistan har kun militære reprosesseringsanlegg, altså for plutoniumproduksjon til kjernevåpen. I tillegg er flere stater åpne for å reprosessere i framtiden. For å kunne anvende gjenvunnet plutonium i en reaktor må det bygges reaktorer som kan gå på MOX-brensel. Skal plutoniumet benyttes i kjernevåpen må det konverteres til metall. Dette kan gjøres ved at plutoniumoksidet tilføres flussyre for produksjon av plutoniumtetrafluorid, som videre reduseres til metall ved bruk av eksempelvis kalsium. Denne prosessen er altså ganske lik som ved produksjon av metallisk uran. Det kan imidlertid brukes litt andre reduksjonsmidler. Uran og plutonium i metallform kan deretter støpes til ønsket form.



Figur 9.2 Håndtering av plutonium med beskyttelsesutstyr. Foto: United States Department of Energy, offentlig eiendom.

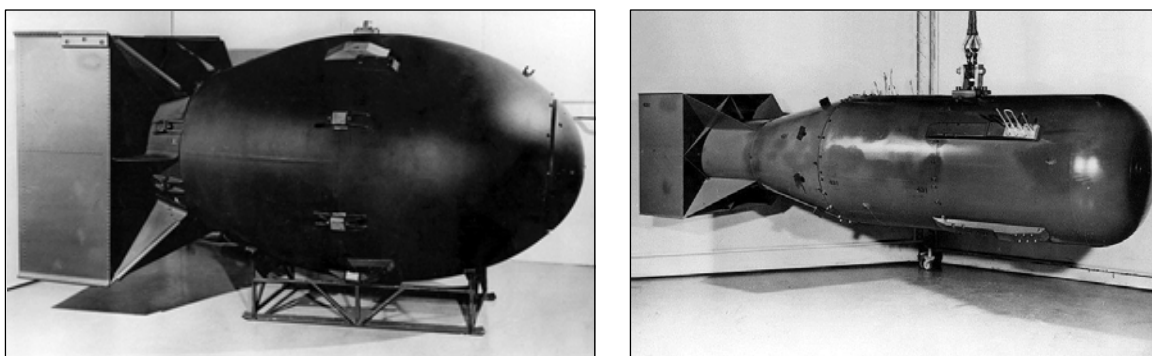
9.3 Sluttdeponi for høyaktivt avfall

Selv om man har hatt kjernekraft siden 1950-tallet har det fremdeles ikke blitt utviklet et operativt sluttdeponi for langtidslagring av brukt brensel. De statene som har kommet lengst er Sverige, som har fattet vedtak om bygging av sluttdeponier og utredet et godt alternativ, og Finland som har startet byggingen. I tillegg har blant andre USA, Tyskland og Frankrike lenge arbeidet med å utvikle planer for sluttdeponi. Foreløpig har imidlertid ingen stater løst utfordringen med permanent langtidslagring av høyaktivt langlivet avfall [1, s.15]. Det er imidlertid utbredt enighet om at et sluttdeponi skal ligge godt beskyttet i omfattende fjellhaller omkring 500–1000 meter under bakken i geologisk stabile områder [30]. I påvente av deponier benyttes midlertidige lagre.

10 Kjernevåpen

10.1 Hovedkomponenter i kjernevåpen

Dette kapitlet gir en overordnet beskrivelse av hvordan kjernevåpen framstilles. Et kjernevåpen består av tre hovedkomponenter: fissilt materiale, resten av komponentene som utgjør stridshodet, og et leveringsmiddel. Den største terskelen til kjernevåpen er anskaffelse av fissilt materiale.



Figur 10.1 Kjernevåpnene «Fat Man» og «Little Boy» som ble sluppet over henholdsvis Nagasaki og Hiroshima i august 1945. Foto: United States Government, offentlig eiendom.

10.1.1 Fissilt materiale

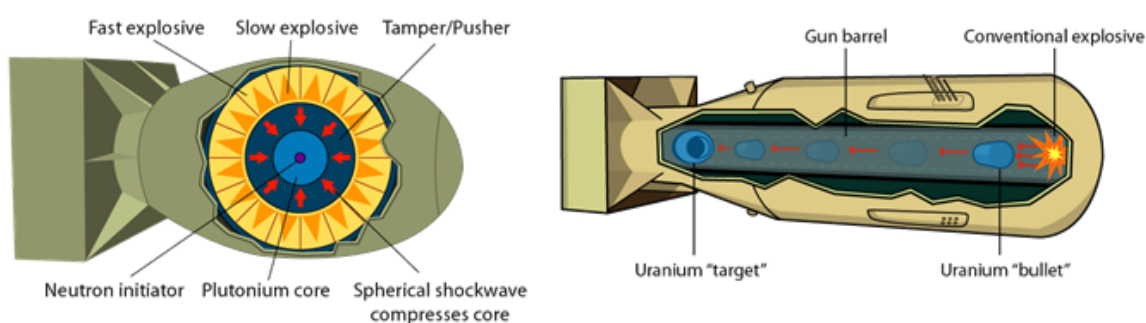
Fissilt materiale til kjernevåpen er i praksis høyanriket uran eller plutonium. Høyanriket uran er som regel anriket til høyere enn 90 prosent uran-235, såkalt *våpenuran*, som forklart i delkapittel 6.1. *Våpenplutonium* inneholder gjerne mer enn 93 prosent av plutonium-239, men plutonium av lavere kvalitet kan i prinsippet brukes.

Fissilt materiale av våpenkvalitet er nærmest umulig å skaffe fra andre stater [31, s.15]. Som vist i kapitlene 5–9 kreves det omfattende anrikningsanlegg for produksjon av våpenuran, og reaktor og gjenvinningsanlegg for produksjon av plutonium. Uranveien anses som teknisk mer krevende enn plutoniumveien grunnet den utfordrende prosessen med å anrike uran, men begge alternativene er både teknisk krevende og kostbare [28, s.25]. Plutoniumkjernevåpen krever mindre fissilt materiale enn uranbaserte kjernevåpen, siden kritisk masse for plutonium er mindre enn for uran. Det er som oftest tilgangen til kjernefysisk teknologi som avgjør om stater går for plutoniumveien eller uranveien.

10.1.2 Stridshodet

I tillegg til fissilt materiale må det utvikles en design for de kjernefysiske ladningene. Den komplette ladningen med alle nødvendige deler kalles et *stridshode*. Hovedskillet går mellom fisjonsladninger og fusjonsladninger. Fisjonsladninger utnytter energien som frigjøres ved fisjon, mens fusjonsladninger utnytter fusjon i tillegg til fisjon. Sprengkraften til en fusjonsladning er i prinsippet ubegrenset, mens fysikken legger begrensningen på hva som kan oppnås med fisjonsladninger.

Fisjonsladninger deles inn i kanonløpsvåpen og implosjonsvåpen, som vist i Figur 10.2. I et *kanonløpsvåpen* har man to stabile (underkritiske) uranstykker, og ved hjelp av sprengstoff sammenføres det ene stykket via et kanonl p med det andre slik at uranet blir overkritisk. Dette setter i gang en kjedereaksjon der store mengder energi frigjøres.⁵⁸ Kanonl psv pen bruker h yanriktet uran som fissilt materiale. Bomben «Little Boy» som ble sluppet over Hiroshima i august 1945, var et slikt våpen. Dagens kjernevåpen er i hovedsak *implosjonskjernev pen*, som krever mindre mengder fissilt materiale, men som er teknisk mer krevende. I et implosjonskjernev pen komprimeres en underkritisk masse med våpenuran eller plutonium ved hjelp av eksplosiver. Dette gir mindre volum og derfor også større tetthet (såkalt overkritisk tetthet), og dermed setter kjedereaksjonen i gang. Bomben «Fat Man» som ble sluppet over Nagasaki i august 1945, var et slikt våpen basert på plutonium. Implosjonsv pen anses som langt vanskeligere enn kanonløpsvåpen.



Figur 10.2 To typer fisjonsladninger, henholdsvis implosjonsv pen og kanonløpsvåpen.
 Illustrasjoner: Modifisert fra Wikimedia Commons, offentlig eiendom.

I enkelte implosjonskjernev pen vil sprengkraften forsterkes ytterligere gjennom fusjon ved at det tilsettes små mengder av hydrogenisotopene deuterium og tritium i fisjonsbomben [32, s.60-61]. Disse stoffene smelter sammen og produserer samtidig flere nøytroner, som gir flere fisjoner og tilsvarende mer energi. Slike ladninger kalles virkningsforsterkede fisjonsladninger.⁵⁹ Da er det ikke fusjonen selv som bidrar til energiproduksjonen, men den høyere omsetningsgraden i det fissile materialet som følge av de mange flere nøytronene.

Fusjonsladninger fungerer i flere trinn og frigjør energi både ved fisjon og fusjon. I *prim rladningen* skapes fisjon slik som beskrevet ovenfor, og strålingstrykket fra prim rladningen komprimerer så sekund rladningen [32, s.62]. Dette gjør at massetettheten og temperaturen i sekund rladningen øker, og fusjonsprosessen settes i gang.⁶⁰ Fusjonsladninger har generelt mye større sprengkraft enn enklere fisjonsladninger. Fusjonsladninger omtales også som termonukle re våpen eller hydrogenbomber.

Den kritiske massen i uranbaserte kjernevåpen påvirkes av anrikningsgraden, som vist i Tabell 10.1. Hvis anrikningsgraden er omkring 40 prosent med uran-235 vil den kritiske massen på ei urankule

⁵⁸ Kritikalitet er nærmere forklart i delkapittel 4.3.

⁵⁹ Eller «boosted» på engelsk.

⁶⁰ Fusjonsbrenselet består ofte av litiumdeuterid (LiD).

utgjøre hele 228 kilo. Er anrikningsgraden derimot nærmere 80 prosent uran-235 vil den kritiske massen utgjøre 70 kilo. Det utgjør ei urankule med mye mindre radius.

Anrikning (% uran-235)	Masse (kg)	Radius (cm)
10	3870	36.5
15	1399	26
20	769	21
30	373	16.5
40	228	14
60	114	11
80	70	9.5
100	47	8.5

Tabell 10.1 Sammenheng mellom anrikningsgrad, kritisk masse og radius for uran i kuleform.⁶¹

For å sette i gang kjernevåpenet kreves det høyeksplosiver og en nøytroninitiator som sender inn masse nøytroner for å sette i gang kjedereaksjonen på riktig tidspunkt under den såkalte *sjokkkompresjonen* forårsaket av eksplosivene. Dette er komponenter som bygges inn i våpenkonstruksjonen. Fissilt materiale kan varmpresses til våpenform, eller støpes fra flytende form.

10.1.3 Leveringsmidler

I tillegg er det nødvendig med *leveringsmidler* for stridshodene, noe som i praksis betyr fly eller missiler. Missiler med kjernefysiske ladninger kan avfyres fra bakkenivå, fra skip (eksempelvis atomubåter) eller fra fly. Fly kan i tillegg slippe bomber direkte. Missilene kan ha ulik rekkevidde, og det er vanlig å skille mellom kortdistanse-, mellomdistanse-, langdistanse-, og interkontinentale missiler. En rekke leveringsmidler kan også bære konvensjonelle våpen som gir teknologien et flerbruksaspekt. Det internasjonale atomenergibyrådet (IAEA) fører ikke sikkerhetskontroll med staters leveringsmidler, men det finnes et eksportkontrollregime for missiler og deres komponenter, såkalt Missile Technology Control Regime (MTCR).⁶²



Figur 10.3 Indisk ballistisk mellomdistansemissil Agni II under Republikkens dag 2004.
Foto: Wikimedia Commons/Antônio Milena (ABr)

⁶¹ Beregningene ble gjort med MCNPX 2.4.0 av FFI. For mer informasjon, se kilde [33].

⁶² Ikke-spredningsavtalen for kjernevåpen (NPT) nevner leveringsmidler innledningsvis i avtaleteksten, men kun i forbindelse med det overordnede målet om total kjernevåpennedrustning. Det stilles ingen spesifikke krav til sikkerhetskontroll.

11 Oppsummering

Denne rapporten gir en innføring i kjernekraftproduksjon og kjernevåpenutvikling. Rapporten er ment som støtte på det tekniske området for diplomater, politikere og rådgivere som har behov for å forstå innholdet i eller betydningen av staters atomprogrammer, nedrustningssamtaler, atomavtaler, relaterte sanksjoner eller eksportkontroll. Rapporten fokuserer hovedsakelig på fredelig bruk av kjernefysisk teknologi. Alle stater som realiserer brenselssyklusen vil imidlertid ha en håndgripelig kjernevåpenopsjon. Det forklares derfor hvordan kjernefysisk teknologi potensielt kan brukes både i sivile og militære atomprogrammer.

Veien til både kjernekraft og kjernevåpen går via den kjernefysiske brenselssyklusen. Som navnet tilsier, handler brenselssyklusen om hvordan kjernebrensel produseres, hvordan det brukes, og hvordan det håndteres etter at det har blitt brukt. Uran produseres i gruver og foredles i møller og konverteringsanlegg, før materialet kan anrikes med en av flere mulige metoder og benyttes enten som reaktorbrensel eller våpenmateriale. Ulike reaktortyper har forskjellig potensial for å produsere plutonium, som er et annet mulig våpenmateriale. For å få tak i det produserte plutoniumet må det brukte brenselet represseres. Dette er også et mulig ledd i fredelig håndtering av brukt reaktorbrensel. Rapporten går nærmere inn på alle disse prosessene og teknologiene.

Referanser

- [1] Enger, E. og Kippe, H., (2015), «Utviklingstrekk i de globale uran- og kjernekraftmarkedene», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2014/01099.
- [2] Bodansky, D., (2004), «Nuclear Energy. Principles, practices, and prospects», Second Edition. Springer-Verlag, New York, ISBN 0-387-20778-3.
- [3] United States Environmental Protection Agency, (2012), «Nuclides & Isotopes», oppdatert 06.07.2012, tilgjengelig her: <http://www.epa.gov/radiation/understand/isotopes.html>
- [4] Henriksen, T., Ingebretsen, F., Storruste, A., Strand, T., Svendby, T. og Wethe, P. (1993), «Stråling og helse», Oslo: Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, 2. utgave 1995, ISBN 82-992073-2-0.
- [5] Institutt for Energiteknikk (i/d), «Hva er radioaktivitet?», tilgjengelig her: http://www.ife.no/no/ife/avdelinger/miljo_og_stralevern/faq-no/radioaktivitetogstraling
- [6] Miljøstatus (2015), «Radioaktive stoffer», publisert av Statens strålevern 4. juni 2015, tilgjengelig her: <http://www.miljostatus.no/Tema/Straling/Radioaktiv-forurensning/Radioaktive-stoffer/>
- [7] Store norske leksikon (2009), «Fisjon», publisert 14. februar 2009, tilgjengelig her: <https://snl.no/fisjon/fysikk>
- [8] Magill, J. og Galy, J. (2005), «Radioactivity, Radionuclides, Radiation», Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, and European Communities, ISBN 3-540-21116-0.
- [9] World Nuclear Association (2015), «Supply of Uranium», oppdatert september 2015, tilgjengelig her: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Supply-of-Uranium/>
- [10] World Nuclear Association (2015), «The Nuclear Fuel Cycle », oppdatert juni 2015, tilgjengelig her: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Introduction/Nuclear-Fuel-Cycle-Overview/>
- [11] World Nuclear Association (2014), «In Situ Leach (ISL) Mining of Uranium», juli 2014, tilgjengelig her: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/In-Situ-Leach-Mining-of-Uranium/>

- [12] International Atomic Energy Agency (2014), «Uranium 2014; Resources, Production and Demand; A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency», (The Red Book), s. 59-62, tilgjengelig her: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2014/7209-uranium-2014.pdf>
- [13] United States Nuclear Regulatory Commission (2015), «Yellowcake», oppdatert 20. mars 2015, tilgjengelig her: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/yellowcake.html>
- [14] Høibråten S., Breivik, H., Enger, E., Schultz Heireng, H. og Kippe, H. (2011), «Atomprogrammene i India, Pakistan, Nord-Korea, Israel, Iran og Syria», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2011/01603.
- [15] Kippe, H. (2009), «Irans kjernefysiske program – for kraftproduksjon eller kjernevåpen?», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2009/00083.
- [16] Høibråten, S., Dullum, O. og Aas, P. (2001), «Ammunisjon med utarmet uran – bakgrunn og virkninger», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2001/04471.
- [17] Oliver, L., Wilhelmsen, K. og Wirstam, J. (2007). «Urananrikning med laser och plasmaseparasjon - en analys med fokus på eksportkontroll», SKI Rapport 2007:35.
- [18] Toft, H.K. (2003), «Indias kjernevåpenprogram», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2003/00460.
- [19] Henderson, S. og Heinonen, O. (2013), «Nuclear Iran: A Glossary of Terms», Policy Focus 121, The Washington Institute & Belfer Center for Science and International Affairs, Mai 2013.
- [20] Aalbergsjø, S.G. (2008), «Uranium enrichment technologies», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2008/02376.
- [21] World Nuclear Association (2015b), «Nuclear Fuel Fabrication», oppdatert 28. juli 2015, tilgjengelig her: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Fuel-Fabrication/>
- [22] World Nuclear Association (2015), «How uranium ore is made into nuclear fuel», i/d, tilgjengelig her: <http://www.world-nuclear.org/Nuclear-Basics/How-is-uranium-ore-made-into-nuclear-fuel/>
- [23] Forskningsrådet (2008), «Nukleære virksomheter ved Institutt for energiteknikk – IFE. En samfunnsøkonomisk kost/nytte-analyse», Evaluering, Divisjon for innovasjon, mars 2008, appendix om atomreaktorer.

- [24] Statens strålevern, (2014), «Hvordan fungerer et kjernekraftverk?», publisert 24. januar 2014, tilgjengelig her: <http://www.nrpa.no/artikler/1/91138/hvordan-fungerer-et-kjernekraftverk>
- [25] Thoriumutvalget (2008), «Thorium som energikilde - muligheter for Norge», januar 2008, tilgjengelig her: <http://org.uib.no/energiformef/Artikler/Thoriumrapporten%202008.pdf>
- [26] Hornkjøl, S., Larsen, E., Sørli, A. og Reistad, O. (2003), «MOX, En del av kjernebrenselssyklusen», Strålevernrapport 2003:3, utgitt 20. mai 2003, Statens Strålevern.
- [27] Statens strålevern (2013), «Brenselssyklusen», publisert 5. november 2013, oppdatert 24.januar 2014, tilgjengelig her: <http://www.nrpa.no/temaartikler/90321/brenselssyklusen>
- [28] Kippe, H. (2003), «Nord-Koreas kjernevåpenprogram», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2003/00942.
- [29] Eilertsen, E.A. (2009), «Nuclear Fuel Reprocessing», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-notat 2009/00499.
- [30] Institutt for Energiteknikk, «Radioaktivt avfall», i/d, tilgjengelig her: <http://www.ife.no/no/ife/detaljer/kernekraft/radavfall>
- [31] Toft, H.K. og Høibråten, S. (2004), «En vurdering av Indias og Pakistans kjernevåpenprogrammer», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2004/00801.
- [32] Toft, H.K. (2004), «Pakistans kjernevåpenprogram», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2004/00113.
- [33] Breivik, H. (2008), «Highly Enriched Uranium and Crude Nuclear Weapons», Forsvarets forskningsinstitutt, FFI-rapport 2008/00490.

Forkortelser

AGR	Advanced Gas Cooled Reactor (Avansert gasskjølt reaktor)
AP	Additional Protocol
AVLIS	Atomdamplaserisotopseparasjon
Bq	Becquerel
BWR	Boiling Water Reactor (Kokvannsreaktor)
CSA	Comprehensive Safeguards Agreement
D ₂ O	Tungtvann
EMIS	Elektromagnetisk isotopseparasjon
eV	Elektronvolt
Fe	Jern
GCR	Gas Cooled Reactor (Gasskjølt reaktor)
GW _e	Gigawatt elektrisk
GW _t	Gigawatt termisk
H	Hydrogen
H ₂ O	Vann
HEU	Høyanriket uran
HF	Hydrogenfluorid
HWR	Heavy Water Reactor (Tungtvannsreaktor)
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISL	In situ leach
ISR	In situ recovery
keV	Kiloelektronvolt
LEU	Lavanriket uran
LEUF ₆	Lavanriket uranheksafluorid
MeV	Megaelektronvolt
MLIS	Molekylærlaserisotopseparasjon
MOX	Mixed Oxide Fuel
MTCR	Missile Technology Control Regime
MW _e	Megawatt elektrisk
MW _t	Megawatt termisk
NPT	Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (Ikke-spredningsavtalen)
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor (Trykktungtvannsreaktor)
Pu	Plutonium
PUREX	Plutonium and Uranium Recovery by Extraction
PWR	Pressurized Water Reactor (Trykkvannsreaktor)
R&D	Research and Development
SILEX	Separasjon av isotoper med lasereksitasjon
SQP	Small Quantities Protocol
SWU	Separative Work Units
TBP	Tributylfosfat
U	Uran
UF ₄	Urantetrafluorid
UF ₆	Uranheksafluorid
UO ₂	Naturlig urandioksid

Vedlegg A Videre lesning

FFI har utgitt en rekke rapporter om statlige atomprogrammer og beslektede temaer. Rapportene listet nedenfor er tilgjengelige på www.ffi.no

Ammunisjon med utarmet uran – bakgrunn og virkninger Steinar Høibråten, Ove Dullum, Pål Aas, FFI-rapport 2001/04471, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2001/04471.pdf>

De kjernefysiske prøvesprengningene i India og Pakistan (1974 og 1998) Heidi Kristine Toft, FFI-rapport 2003/00459, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2003/00459.pdf>

Indias kjernevåpenprogram Heidi Kristine Toft, FFI-rapport 2003/00460, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2003/00460.pdf>

Nord-Koreas kjernevåpenprogram Halvor Kippe, FFI-rapport 2003/00942, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2003/00942.pdf>

Kjernevåpenrelaterte folkerettslige avtaler Heidi Kristine Toft, 2003/00996, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2003/00996.pdf>

The environmental impact of the sunken submarine Komsomolets Steinar Høibråten, Are Haugan, Per Thoresen, FFI-rapport 2003/02523, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2003/02523.pdf>

Pakistans kjernevåpenprogram Heidi Kristine Toft, FFI-rapport 2004/00113, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2004/00113.pdf>

En vurdering av Indias og Pakistans kjernevåpenprogrammer Heidi Kristine Toft og Steinar Høibråten, FFI-rapport 2004/00801, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2004/00801.pdf>

India og Pakistan – historiske, politiske og tekniske perspektiver på kjernevåpenkonflikten Heidi Kristine Toft og Laila Bokhari, FFI-rapport 2004/00906, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2004/00906.pdf>

Weapons of mass destruction free zones in the Middle East Linda Marie Holøien, FFI-rapport 2006/02488, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2006/02488.pdf>

Environmental risk assessment for non-defuelled, decommissioned nuclear submarines Steinar Høibråten et al., FFI-rapport 2007/00337, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2007/00337.pdf>

The A. Q. Khan network Hanne Breivik og Heidi Kristine Toft, FFI-rapport 2007/00535, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2007/00535.pdf>

Establishing a Weapons of Mass Destruction Free Zone in the Middle East - prospects and challenges Sara Kristine Eriksen, FFI-rapport 2007/01821, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2007/01821.pdf>

Highly enriched uranium and crude nuclear weapons Hanne Breivik, FFI-rapport 2008/00490, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2008/00490.pdf>

South Africa's nuclear weapons programme Elin Enger, FFI-rapport 2008/00696, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2008/00696.pdf>

Uranium enrichment technologies Siv Gundrosen Aalbergsjø, FFI-rapport 2008/02376, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2008/02376.pdf>

Irans kjernefysiske program – for kraftproduksjon eller kjernevåpen? Halvor Kippe, FFI-rapport 2009/00083, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2009/00083.pdf>

Islamist opposition in the Islamic Republic – Jundullah and the spread of extremist Deobandism in Iran Audun Kolstad Wiig, FFI-rapport 2009/01265, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2009/01265.pdf>

The role of non-nuclear weapons states in a disarmament regime driven by the vision of a world free of nuclear weapons Hege Schultz Heireng og Elin Enger, FFI-rapport 2010/02475, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2010/02475.pdf>

New multilateral approaches solving the nuclear energy dispute with Iran Hege Schultz Heireng, Maryam Moezzi og Halvor Kippe, FFI-rapport 2011/00005, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2011/00005.pdf>

Atomprogrammene i India, Pakistan, Nord-Korea, Israel, Iran og Syria Steinar Høibråten, Hanne Breivik, Elin Enger, Hege Schultz Heireng og Halvor Kippe, FFI-rapport 2011/01603, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2011/01603.pdf>

Feasibility and benefits of converting the Iranian heavy water research reactor IR-40 to a more proliferation-resistant reactor Thomas Mo Willig, FFI-rapport 2011/02283, <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2011/02283.pdf>

Forhandlingene om Irans kjernefysiske program – Hassan Rouhanis vei fra Paris til Genève Aslak Heldal og Hege Schultz Heireng, FFI-rapport 2014/01547, <https://www.ffi.no/no/Rapporter/14-01547.pdf>