



## Miljøkonsekvenser og regulering av potensiell thoriumrelatert industri i Norge



**Referanse:**

Standing WJF, Hassfjell C, Seyersted M

**Rapportens tittel.**

Miljøkonsekvenser og regulering av potensiell thoriumrelatert industri i Norge  
StrålevernRapport 2008:10. Østerås: Statens strålevern, 2008.

**Emneord:**

Thorium, kjernekraft, brenselsyklus, miljøkonsekvenser, gjeldende og fremtidig regulering

**Resymé:**

Rapporten gir en introduksjon til fagfeltet thoriumbasert kjernekraft, drøfter potensielle miljøkonsekvenser av evt. fremtidig thoriumrelatert industri i Norge og regulering av slik virksomhet. Miljøkonsekvensene for drift av thoriumbaserte konvensjonelle reaktorer vil inkludere produksjon av radioaktivt avfall, utslipp av radioaktive stoffer til luft og vann, og reaktorene vil representere en ulykkesrisiko.

**Reference:**

Standing WJF, Hassfjell C, Seyersted M. Environmental impact from and regulation of potential thorium-based industry in Norway. StrålevernRapport 2008:10. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2008. Language: Norwegian.

**Key words:**

Thorium, nuclear power, fuel cycle, environmental impact, current and future regulation

**Abstract:**

The report provides a basic introduction to thoriumbased nuclear power for the non-expert, as well as a discussion on potential environmental impact from potential thoriumbased industry in Norway in the future, and regulation of such activities. Environmental impact from thoriumbased nuclear power will include production of radioactive waste, discharges of radioactive substances and the reactors will represent a potential accidental risk.

Prosjektleder: Ingar Amundsen.

Godkjent:



Per Strand, avdelingsdirektør, Avdeling beredskap og miljø

63 sider.

Utgitt 10-09-2008.

Opplag 200 (08-09).

Form, omslag: LoboMedia AS.

Trykk: LoboMedia AS, Oslo.

**Bestilles fra:**

Statens strålevern, Postboks 55, No-1332 Østerås, Norge.

Telefon 67 16 25 00, faks 67 14 74 07.

nrpa@nrpa.no, www.nrpa.no

ISSN 0804-4910

## Miljøkonsekvenser og regulering av potensiell thoriumrelatert industri i Norge

Will Standring  
Christina Hassfjell  
Mette Seyersted

**Statens strålevern**  
Norwegian Radiation  
Protection Authority  
Østerås, 2008



# Innhold/Contents

---

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>6</b>
<b>2 Nukleær virksomhet i Norge i dag</b>	<b>7</b>
2.1 Haldenreaktoren	7
2.2 JEEP II på Kjeller	7
2.3 Håndtering av brukt uranbrensel i Norge	7
2.4 Miljøkonsekvenser av eksisterende nukleær virksomhet i Norge	8
<b>3 Nukleær virksomhet på verdensbasis</b>	<b>10</b>
3.1 Historikk og omfang av kommersiell kjernekraft	10
3.2 Kjernekraftsikkerhet og spredningsresistens	13
3.3 Generasjon IV- systemer	14
3.4 Thoriumbasert kjernekraft	15
3.4.1 <i>Thorium brenselcyklus</i>	15
3.4.2 <i>Thorium og reaktorteknologi</i>	16
3.4.3 <i>Akseleratordrevne systemer (ADS)</i>	19
<b>4 Thorium i Norge</b>	<b>24</b>
4.1 Thoriumforekomster i Norge	24
4.2 Thoriumscenarioer i Norge	25
<b>5 Potensielle miljøkonsekvenser av thoriumrelatert industri i Norge</b>	<b>27</b>
5.1 Thoriumutvinning og miljøkonsekvenser	27
5.1.1 <i>Noen strålevernmessige krav til thoriumutvinning</i>	28
5.1.2 <i>Thoriumutvinning i Fen i lys av forsvarlighetskravet i strålevernloven</i>	29
5.2 Thorium brenselproduksjon og miljøkonsekvenser	30
5.3 Reaktordrift, potensielle miljøkonsekvenser og spredningsresistens	31
5.4 Spredningsresistens	32
5.5 Avfallshåndtering	32
5.5.1 <i>Lagring og deponering</i>	33
5.5.2 <i>Gjenvinning av brukt thoriumbrensel</i>	34
5.6 Oppsummering av miljøkonsekvenser av thoriumrelatert industri	34
5.7 Thorium versus uran – miljøkonsekvenser	35
5.7.1 <i>Utvinning og brenselproduksjon</i>	35
5.7.2 <i>Reaktordrift</i>	36
5.7.3 <i>Avfall</i>	36
5.7.4 <i>Spredningsresistens</i>	37

---

<b>6</b>	<b>Regulering av evt. thoriumrelatert industri i Norge</b>	<b>38</b>
6.1	Oversikt over relevant regelverk	38
6.2	Plan- og bygningsloven, kap. om konsekvensutredninger (VII- a) med forskrift	40
6.3	Atomenergilovgivningen	40
	6.3.1    Konsesjon	41
	6.3.2    Øvrige sentrale bestemmelser i atomenergiloven	43
	6.3.3    Eksport av thorium	45
	6.3.4    Import av thorium	46
6.4	Strålevernloven med forskrift	46
	6.4.1    Strålevernprinsipper	47
	6.4.2    Risikovurdering, fysisk sikring og beredskapsplikt	48
	6.4.3    Krav om godkjenninger	48
	6.4.4    Dosegrenser til allmennheten	48
	6.4.5    Yrkesmessig eksponering	48
	6.4.6    Bestemmelser angående radioaktivitet i det ytre miljø	49
	6.4.7    Import	49
	6.4.8    Mangler	50
6.5	Annet relevant lovverk	50
	6.5.1    Forurensningsloven med forskrifter	50
	6.5.2    Internkontroll	50
	6.5.3    Energiloven	50
6.6	Konsesjonssøknadsprosess	50
6.7	Oppsummering regelverk	51
<b>7</b>	<b>Referanser</b>	<b>52</b>

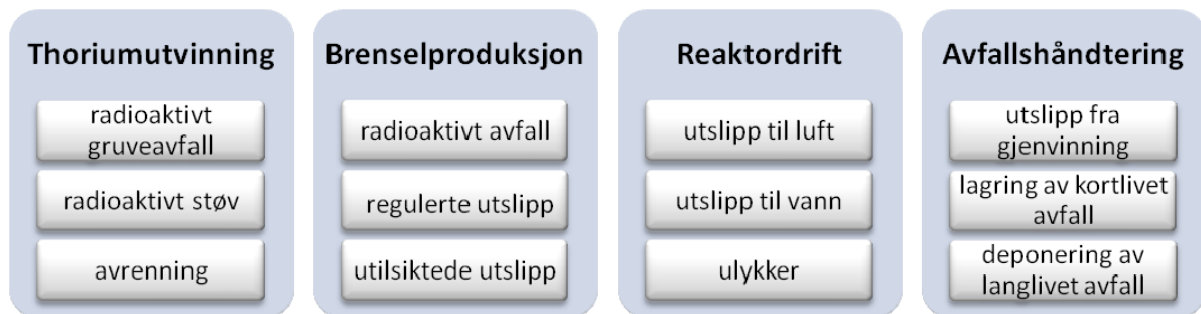
# Sammendrag

Denne rapporten er skrevet på bakgrunn av et notat som Statens strålevern skrev på oppdrag fra Miljøverndepartementet i februar 2008.

Rapporten har et tredelt formål:

- Å gi et faglig fundament for ikke-spesialister innen fagfeltet thoriumbasert kjernekraft
- Å drøfte potensielle miljøkonsekvenser av evt. fremtidig thoriumrelatert industri i Norge
- Å drøfte regulering av slik virksomhet

Thoriumrelatert industri betegnes som hele eller deler av en firedelt verdikjede som omtales som thorium brenselsyklus. Miljøkonsekvenser fra hver del av thorium brenselsyklus drøftes separat og de viktigste konsekvensene er oppsummert i figuren under.



Det er i rapporten forsøkt å gi innblikk i både selve de potensielle miljøkonsekvensene av eventuell norsk thoriumrelatert industri, i tillegg til å belyse forskjeller mellom uran og thorium brenselsyklus der disse er vesentlige. Under reaktordrift gjøres det et skille mellom konvensjonell kjernekraft basert på thorium på den ene side og såkalte akseleratordrevne systemer på den annen, da de potensielle miljøkonsekvensene fra disse to regnes som prinsipielt forskjellige. Aspekter relevante for spredningsspørsmål er også inkludert.

Virksomhet relatert til norsk thoriumbasert industri vil blant annet vurderes i forhold til følgende regelverk: Plan- og bygningsloven med forskrift, atomenergiloven med forskrifter, strålevernloven med forskrift, energiloven og forurensningsloven. Utvinning av thorium vil i tillegg måtte vurderes i forhold til bergverksloven og industrikonsesjonsloven.

Atomenergilovens forskrift om besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale og flerbruksvarer regulerer eksport og import av thorium. Strålevernloven stiller krav til forsvarlig import av thorium.

I tilfelle thoriumrelatert industri realiseres, vil det være behov for en gjennomgang av regelverket. Atomenergiloven ble skrevet for å regulere uranbasert kjernekraft, og er ikke tiltenkt eller tilpasset regulering av thoriumbasert kjernekraft. Et konvensjonelt kjernekraftverk basert på thoriumbrensel vil sannsynligvis likevel dekkes av atomenergi-lovens krav om konsesjon, i motsetning til et rent thoriumbasert akseleratordrevet system (ADS), som per i dag ikke dekkes av denne loven.

---

# 1 Innledning

I forbindelse med at Olje og energidepartementet (OED) i januar 2008 avventet utredningen fra det nedsatte Thoriumutvalget (OED, 2007), ba Miljøverndepartementet (MD) Statens strålevern om å utarbeide et faglig grunnlag vedrørende miljømessige konsekvenser av en eventuell fremtidig thoriumrelatert industri i Norge. Oppdraget fra MD ble mottatt av Strålevernet i januar 2008. I et møte mellom MD og Strålevernet 30. januar 2008 ble oppdraget avgrenset til kun å omfatte nukleær virksomhet, samt utvidet til å inkludere blant annet en sammenligning av thorium- og uranbrensel. Det ble også bedt om at dokumentet skulle være generelt klargjørende på terminologi innen dette fagfeltet. Strålevernets thoriumnotat (NRPA, 2008) ble oversendt MD 14. februar 2008.

Den 15. februar 2008 offentliggjorde OED thoriumutvalgets rapport (TRC, 2008), som umiddelbart ble sendt ut på en bred høringsrunde.

I april 2008 ble det ved Statens strålevern besluttet at Strålevernets thoriumnotat til MD skulle danne basis for en Strålevernrapport. Rapporten skulle skrives slik at den kunne danne et faglig grunnlag for liknende problemstillinger i fremtiden. Rapporten ble skrevet i perioden mai-juni 2008.

Rapporten har et tredelt formål: 1) Den skal gi et faglig fundament for ikke-spesialister innen fagfeltet thoriumbasert kjernekraft. 2) Rapporten skal drøfte potensielle miljøkonsekvenser av evt. fremtidig thoriumrelatert industri i Norge. 3) Rapporten skal også gi oversikt over regelverk og, der det er naturlig, drøfte regulering av evt. fremtidig thoriumrelatert industri i Norge.

Der det har vært formålstjenelig for fremstillingen, har refererte bidrag fra thoriumutvalgets utredning blitt tatt inn for å supplere det opprinnelige notatet til MD. I tillegg har regulering av thoriumrelatert industri blitt viet noe større oppmerksomhet i rapporten.

Rapporten diskuterer potensielle stråleversrelaterte miljøkonsekvenser tilknyttet thorium brenselsyklus i sammenheng med kommersiell eller forskningsrelatert kjernekraft samt regulering av slik virksomhet. To innledende kapitler redegjør for kommersiell og forskningsbasert nukleær teknologi, i Norge og internasjonalt, for å gi nødvendig og grunnleggende innsikt i fagfeltet. Det er blitt lagt vekt på å finne en norsk, forståelig fremstillingsform av stoffet, for å gjøre innholdet tilgjengelig for ikke-spesialister. En ordliste er blitt lagt inn som vedlegg for å definere og forklare fagspesifikk terminologi.

I og med at kommersiell drift av thoriumbasert kjernekraft ennå ikke er realisert verken i Norge eller i utlandet, må det påpekes at en fullverdig redegjørelse av potensielle miljøkonsekvenser som et resultat av thoriumbasert kjernekraft i Norge, er umulig. Det ville kreve detaljert informasjon basert på erfaring som per i dag ikke finnes.

I rapporten forsøker vi likevel, med den kunnskap som finnes tilgjengelig, å belyse aktuelle tema relatert til tenkelige scenarioer av norsk engasjement i thoriumrelatert industri. Tanken er at scenarioanalysen kan bidra til å gi den oversikt og det faglige faktagrunnlaget som er nødvendig for å kunne forstå og delta i en eventuell diskusjon rundt norsk involvering i kommersiell thoriumbasert kjernekraft.



---

## 2 Nukleær virksomhet i Norge i dag

Norge har per i dag to uranbaserte kjernereaktorer i drift. Begge reaktorene er drevet av Institutt for Energiteknikk (IFE) og brukes til forskningsformål. Den ene kjernereaktoren er lokalisert i Halden og den andre på Kjeller utenfor Lillestrøm. Rapportering om de internasjonale forpliktelser og miljømessige konsekvenser av disse to norske kjernereaktorene skjer med jevne mellomrom (for eksempel NRPA, 2005; NRPA, 2006; NRPA, 2007). Reaktorene er regulert av norske myndigheter på grunnlag av gjeldende regelverk (se kapittel 6).

Gitt at Norge allerede stiller krav til og fører tilsyn med de norske forskningsreaktorene, og kjenner og overvåker miljøkonsekvenser av disse, velger vi å legge dette som et bakteppe til rapportens vurderinger av miljøkonsekvensene fra en eventuell ny, utvidet og thoriumbasert kjernefysisk virksomhet i Norge i fremtiden.

### 2.1 Haldenreaktoren

Haldenreaktoren har vært i drift siden 1959 og er en 25 MW tungtvannsmoderert- og kjølt kokevannsreaktor med driftstemperatur på 240 °C (IFE, 2008). Den bruker om lag 60-70 kg anrikt uranbrensel (6 %  $^{235}\text{U}^1$ ) årlig som importeres fra flere land. Tungtvannet (14 tonn totalt) sirkulerer i en lukket primær rørkrets og avgir varme til en sekundær, lukket lett vannskrets. Denne avgir i sin tur varme til en tredje kjølekrets og dette kjølevann slippes ut til rennende vann i elven Tista. Reaktoren er i drift, på effekt, ca. 50 % av året, mens den øvrige tiden nyttes til inn- og utlasting av eksperimentutstyr og brensel, samt til vedlikehold. Reaktoren ligger i en fjellhall (100 meter inn i fjellet, med en fjelloverdekning på 30 til 50 m) på nordsiden av elven Tista, 2 km fra elvemunningen ut til Iddefjorden. Når reaktoren er i drift, er fjellhallen stengt med slusedører. Reaktorhallen inneholder også brenselbrønner for lagring av brukt brensel. Området er inngjerdet, video-overvåket og har døgkontinuerlig adgangskontroll. Volumet som slippes ut er ca. 40 m<sup>3</sup>/time når reaktoren er i drift og ca. halve mengden ved avstengt reaktor.

### 2.2 JEEP II på Kjeller

IFE har vært lokalisert på Kjeller utenfor Lillestrøm siden 1951 (IFE, 1998). Den første norske nukleærreaktoren "JEEP" ble i 1967 erstattet med JEEP II, en 2 MW tungtvannsmoderert og kjølt forskningsreaktor, som har vært i drift siden. Den opereres på atmosfæretrykk og med en moderatortemperatur på 55 °C. Brenselet består av 19 elementer med til sammen 252 kg 3,5 % anrikt urandioksid. Moderatoren/primærkjølekretsen består av 5 tonn tungtvann. Reaktortanken, som er av aluminium, er omgitt av en 2.2 m tykk betongskjerm, og reaktoren er plassert i et stålhus. Stålhuset er konstruert for overtrykk og er stengt med slusedører. JEEP II er i døgkontinuerlig drift ca. 10 mnd. i året med planlagte driftsstans.

Utslipp til luft og vann fra begge disse reaktorene er regulert gjennom utslippsgodkjenningen hjemlet i strålevernlovgivningen (se kapittel 6).

### 2.3 Håndtering av brukt uranbrensel i Norge

Brukt brensel fra IFEs to urandrevne reaktorer er sterkt radioaktivt og langlivet kjernefysisk avfall. Det finnes ingen permanent avfallsdeponeringsløsning for slikt langlivet radioaktivt avfall i Norge<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>  $^{235}\text{U}$  kan også betegnes U-235 og refererer til en spesifikk isotop (se Vedlegg A) av grunnstoffet uran

<sup>2</sup> IFEs avfallsdeponi i Himdalen er til lavt og middels radioaktivt avfall

---

Brukt brensel fra både Haldenreaktoren og JEEP II-reaktoren ligger derfor foreløpig lagret ved reaktor-anleggene. Denne mellomlagringen skjer i henhold til internasjonale retningslinjer og norske myndigheters krav. Lagrene omfattes av konsesjonen for IFEs nukleære anlegg og er under tilsyn av Statens strålevern. IFE følger avtalen mellom Norge og det internasjonale atomenergibyrådet (IAEA) om utføring av sikkerhetskontroll i forbindelse med traktat om ikke-spredning av kjernefysiske våpen (1. mars 1972) og tilleggsprotokoll til denne avtalen (29. september 1999). Det kreves at det føres nøye regnskap for lagring og bevegelse av alt nukleært materiale. IAEA sender jevnlig inspektører til IFEs anlegg for å kontrollere og verifisere regnskap, rapporter og beholdning av nukleært materiale.

Det brukte brenselet lagres i form av metallisk naturlig uranbrensel. Det siste er bestrålt, naturlig uran fra uranrenseanlegget som var i drift på Kjeller rundt midten av 1960-tallet. Anrikningsgraden (det vil si konsentrasjonen av  $^{235}\text{U}$ ) og utbrenningen av det brukte brenselet er sterkt varierende.

Total finnes det i dag ca. 16 tonn brukt reaktorbrensel generert gjennom 50 års virksomhet fra IFEs forskningsreaktorer på Kjeller og i Halden. Årlig tilvekst er estimert til å være mindre enn 200 kg brensel (uranoksid) pr. år. I Halden og på Kjeller finnes det i alt seks brenselslagre. Lagrene tilfredsstiller strenge sikkerhetskrav, og er underlagt inspeksjon fra Det internasjonale atomenergibyrådet (IAEA). For tiden er ca. 6 tonn lagret på Kjeller og 10 tonn i Halden.

Brukt brensel på Kjeller er lagret i tre atskilte bygninger. I Halden lagres det brukte brenselet i kort tid i reaktorhallen inne i fjellet før det overføres til et basseng i en egen bygning utenfor fjellet. I tillegg til det operative bassenget er det i denne bygningen et horisontalt tørrlager.

Nærings- og handelsdepartementet (NHD) igangsatte i 1999 et utredningsarbeid (ved Berganutvalget) for å vurdere strategier for sluttlagring av høyaktivt brensel fra reaktorene på Kjeller og i Halden. Berganutvalgets arbeid ble ferdig i 2001 ("Vurdering av strategier for sluttlagring av høyaktivt reaktorbrensel", NOU 2001:30), og hadde som hovedanbefaling at det burde bygges et eget mellomlager hvor brukt brensel ble lagret i 50-100 år i påvente av en endelig løsning for sluttlagring. Dette arbeidet ble fulgt opp av en ny utredning (ved Fase 1-utvalget) som skulle se på lagringsbehov og mulige tekniske løsninger for et slikt lager. Fase 1-utvalgets arbeid ble ferdig juni 2004 ("Etablering av nytt mellomlager for høyaktivt avfall - Lagringsbehov, alternative tekniske løsninger og momenter for valg av teknisk løsning og lokalisering"), og er tilgjengelig på NHDs nettsider.

NHD kommer til å følge opp dette arbeidet med to nye utredninger. Den ene utredningen skal se på behov og mulige løsninger for spesialbehandling av den delen av det brukte brenselet som er ustabil. Dette gjelder brensel med metallisk uran og brensel som har blitt skadet. Den andre utredningen skal finne fram til den best egnede tekniske løsningen og egnet lokalisering for et mellomlager.

## **2.4 Miljøkonsekvenser av eksisterende nukleær virksomhet i Norge**

IFEs virksomhet på Kjeller gir radioaktive utslipp til luft og vann. Noen av radionuklidene i utslippene har kort (~minutter) halveringstid (se ordliste i Vedlegg A). Slike radionuklider vil derfor ikke gi stråledoser til mennesker over et lengre tidsrom etter utslippene. Andre radionuklider i utslippene har halveringstid på flere år. Disse vil kunne ha mer langvarige radiologiske konsekvenser og fortsette å gi doser over lenger tid.

---

IFE har gjort doseberegninger for lokalbefolkningen rundt IFE Kjellers anlegg basert på en del forutsetninger (NRPA, 2005). I gjeldende utslippsgodkjenning til IFE har Strålevernet fastsatt dosegrenser<sup>3</sup> for utslipp som følger:

*De samlede utslippene av radioaktive stoffer fra IFEs anlegg skal ikke påføre individer i den mest utsatt befolkningsgruppen større stråledoser enn grensene fastsatt nedenfor.*

- *Dose fra utslipp til vann skal ikke overskride: 1  $\mu$ Sv pr år*
- *Dose fra utslipp til luft skal ikke overskride: 100  $\mu$ Sv pr år*
- *Hvorav dose fra utslipp av jodisotoper til luft ikke overskrider: 10  $\mu$ Sv pr år*

*Dosegrensene gjelder for Kjeller-anlegget og Haldenreaktoren uavhengig av hverandre.*

---

<sup>3</sup> 1  $\mu$ Sv (mikrosievert) tilsvarer 0,001 mSv, 10  $\mu$ Sv tilsvarer 0,01 mSv og 100  $\mu$ Sv tilsvarer 0,10 mSv

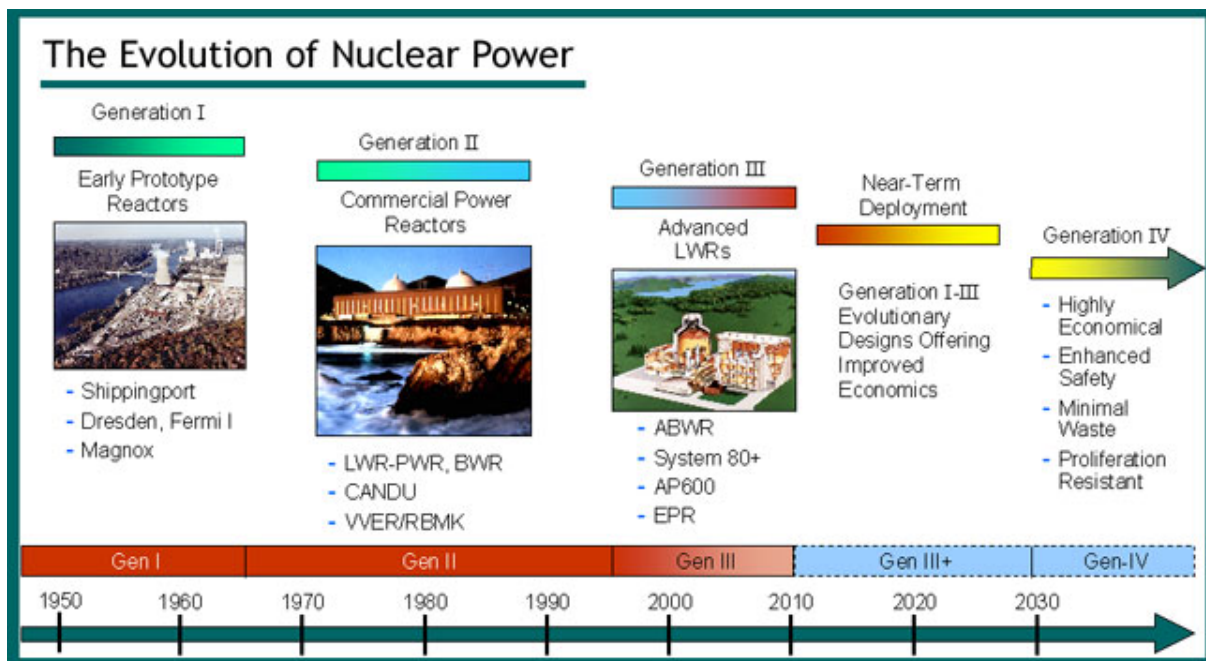
## 3 Nukleær virksomhet på verdensbasis

### 3.1 Historikk og omfang av kommersiell kjernekraft

Den første kommersielle kjernekraftreaktoren ble bygget i 1954 og siden har elektrisitetsproduksjon fra kjernekraftverk økt. Per juni 2007 var det 439 kommersielle kjernekraftreaktorer i verden (se Figur 2), og disse reaktorene står for ca. 16 % av verdens elektrisitetsproduksjon. USA, Frankrike, Japan og Russland er de fire største kjernekraftnasjonene i verden med totalt 239 (over halvparten) av verdens kommersielle kjernekraftreaktorer.

Figur 1 illustrerer den tekniske utviklingen av reaktorteknologi fra 1950-tallet frem til i dag, samt fremtidige planlagte reaktorsystemer de neste 50 årene. Det er blitt vanlig å omtale de tidlige prototypene for generasjon I-reaktorer og reaktorene bygget fra slutten av 60-tallet frem til slutten av 90-tallet for generasjon II reaktorer.

De fleste kommersielle reaktorer i dag er generasjon II-reaktorer, og en del av dem begynner å bli gamle (oppstartsår for reaktorene er vist i Figur 2). Ca 20 % av verdens kommersielle kjernekraftreaktorer er per i dag mer enn 30 år gamle (TRC, 2008). I 2030 vil over 90 % av reaktorene som finnes i dag være over 30 år gamle, og ca. 80 % av dagens reaktorer vil være mer enn 40 år gamle. Som en konsekvens av høy alder vil ca. 150 av dagens reaktorer måtte stenges innen 2030 (TRC, 2008). Det bygges for tiden også en del nye reaktorer i verden. For eksempel er det i Russland 7 nye reaktorer som planlegges å bygges i nær fremtid, i India 6 og i Kina 4.



Figur 1: Fremstilling av generasjonsutviklingen i reaktorteknologi (hentet fra GIF: <http://www.gen-4.org>)

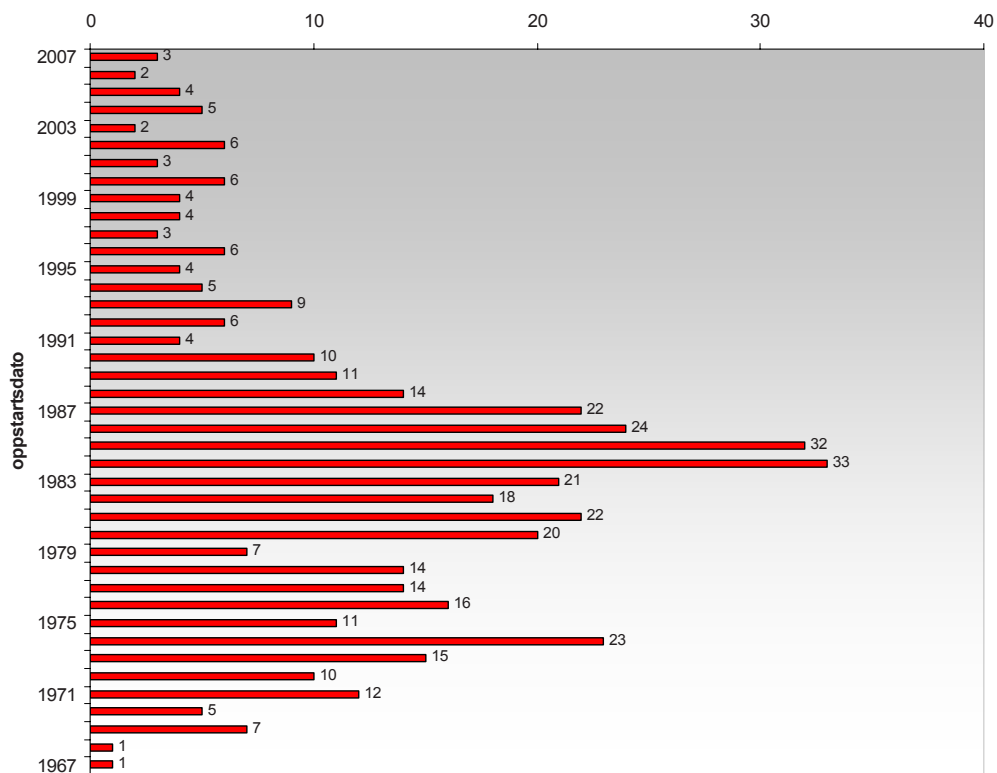
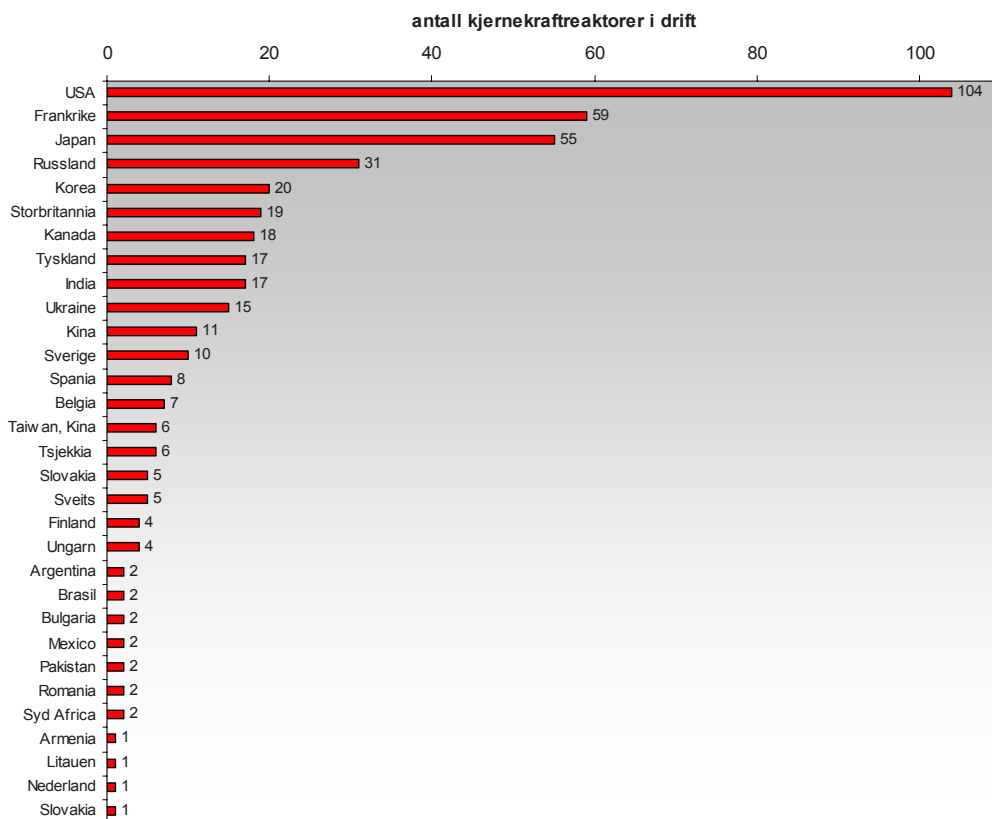
---

Generasjon II reaktorer som er i drift i dag er av følgende typer:

- Lettvannsreaktorer (Light Water Reactor, LWR)
- Trykkvannsreaktorer (Pressurised Water Reactor, PWR)
- Kokvannsreaktorer (Boiling Water Reactor, BWR)
- Grafitt-modererte reaktorer (for eksempel den Russiske RBMK)

Nye reaktorer som bygges i dag er generasjon III og såkalte III+ reaktorer, med utbedret sikkerhets- og effektivitetsteknologi. En ny generasjon III+ kjernekraftreaktor er for tiden under bygging på kjernekraftverket Olkiluoto på vestkysten av Finland. Den nye reaktoren på Olkiluoto, som omtales som Olkiluoto 3, vil når den står ferdig i 2011, være verdens største (1600 MWe) og mest moderne kjernekraftreaktor. Nær Olkiluoto i Finland bygges for tiden også et geologisk permanent avfallsdeponi for brukt kjernebrensel 500 meter under bakken. Etter planen skal dette stå ferdig i 2020. Et tilsvarende deponi er planlagt i Sverige. I Sverige er det per i dag 10 kjernekraftreaktorer i drift, som til sammen produserer ca. 50 % av Sveriges elektrisitet.

Fremtidig reaktordesign, det vil si teknologi som etter planen skal være tilgjengelig fra ca. 2030 og fremover, omtales i dag som generasjon IV-reaktortechnologi. Generasjon IV-arbeidet omtales i avsnitt 3.3.



*Figur 2: Geografisk fordeling (øverst) og oppstartsdato (nederst) for verdens kjernekraftreaktorer. Oppstartsdato refererer til året når reaktoren først ble tilkoblet strømforsyningen. Rådata er oppdatert per juni 2007 og er hentet fra IAEAs Power Reactor Information System (PRIS).*

---

## 3.2 Kjernekraftsikkerhet og spredningsresistens

Det har alltid vært en sterk bevissthet rundt kjernekraftens potensielle risiki, både den risiko som kritikalitet i reaktoren representerer, så vel som risiki forbundet med utslipp og deponering av radioaktive stoffer. Det er sikkerhetsutfordringer i anleggssikkerhet, operasjonell sikkerhet og i forbindelse med potensiell spredning av uran og plutonium til våpenformål.

De største ulykker ved kommersielle kjernekraftverk har hittil vært Three Mile Island-ulykken i 1979 og Tsjernobylulykken i 1986. Disse to ulykkene demonstrerte ytterpunktene av mulige konsekvenser fra reaktorulykker: Three Mile Island-ulykken skjedde uten at noen kom til skade og der konsekvensene av ulykken ble begrenset til selve reaktorområdet, med kun små utslipp av radioaktive stoffer. Tsjernobylulykken derimot, skjedde med utvikling av en intens brann, tap av menneskeliv og store radiologiske konsekvenser inklusive omfattende forurensning av store landområder.

Reaktoren på Three Mile Island var en andregenerasjons trykkvannsreaktor (PWR) og ulykken skyldtes menneskelig svikt. Reaktoren på Three Mile Island var bygget etter internasjonalt aksepterte sikkerhetsprinsipper og reaktorinneslutningen var avgjørende i konsekvensbegrensningen fra ulykken.

Tsjernobylreaktoren var også en andregenerasjonsreaktor, men ikke bygget etter internasjonalt aksepterte sikkerhetsprinsipper. Tsjernobylreaktoren hadde ikke reaktorinneslutning. I tillegg var reaktoren designet med en positiv reaktivitets dampkoeffisient<sup>4</sup>, hvilket betyr at reaktiviteten (reaksjonshastigheten) øker når effekten (varmeproduksjonen) øker. Dette kan medføre akselererende effektøkning. Reactorer designes i dag kun med negativ reaktivitets dampkoeffisient, hvilket gir redusert reaksjonshastighet når varmeproduksjonen øker.

Three Mile Island- og Tsjernobylulykken er de eneste ulykkene i denne størrelsesorden fra kommersiell kjernekrafthistorie<sup>5</sup>, en historie som nå består av ca 13 000 reaktorår (UIC, 2007) (kumulativt, for kommersielle reaktorer i 32 land). De to ulykkene har like vel demonstrert at risikoen for kjernekraftulykker er reell, og at det store sikkerhetsfokus som finnes i kjernekraftindustrien er velbegrunnet.

Moderne kjernekraftreaktorer er utstyrt med flere sikkerhetssystemer for å forebygge og forhindre ukontrollerte utslipp av radioaktive stoffer til omgivelsene. Havariforebyggende og konsekvensreducerende tiltak og systemer kontrollerer spaltningsprosessen, kjøling av brenselet og inneslutning av radioaktive materialer. Det finnes flere uavhengige barrierer som hindrer eller reduserer utslipp av radioaktive stoffer til omgivelsene. Disse omfatter brenselkapslingen, reaktortanken, reaktorinneslutningen og et system for kontrollert trykkavlastning, og filtrert ventilasjon av inneslutningen i tilfelle skader på reaktorkjernen. Videre finnes det sikkerhetssystemer som skal stenge av reaktoren og holde brenselet kjølt etter et uhell. Disse er dimensjonert for kritiske hendelser som kan medføre skader på reaktorkjernen eller svekke barrierene.

Ovenstående avsnitt beskriver veletablerte grunnprinsipper innenfor kjernekraft-teknisk sikkerhet. Resultater fra modellering innen kjernefysisk sikkerhet har indikert at selv om det skulle inntreffe et alvorlig uhell i et kjernekraftanlegg som er bygget i overensstemmelse med disse prinsippene, vil eventuelle konsekvenser for omgivelsene utgjøre relativt små belastninger på helse og miljø.

---

<sup>4</sup> Se Vedlegg A for forklaring av fagterminologi

<sup>5</sup> Merk: Windscale-ulykken i Storbritannia i 1957 var også en alvorlig ulykke med betydelige utslipp, men dette var en forskningsreaktor og ikke en kommersiell kjernekraftreaktor.

---

En ytterligere utfordring for sivil bruk av reaktorteknologi ligger i at uran og plutonium også kan anvendes til å lage kjernefysiske våpen. Internasjonale forpliktelser må etterleves for å kontrollere spredning av slikt våpenmateriale. Spesielt sentralt står ikke-spredningsavtalen og IAEAs "safeguards", internasjonal sikkerhetskontroll<sup>6</sup> og ekspertkontroll (se for øvrig kapittel 6).

### 3.3 Generasjon IV-systemer

I dag deltar 13 medlemmer (Argentina, Brasil, Canada, Kina, EURATOM, Frankrike, Japan, Korea, Russland, Syd-Afrika, Sveits, Storbritannia og USA) i *Generation IV International Forum* (GIF), et prosjekt med mål om å utvikle såkalte fjerdegenerasjons reaktortyper (se også avsnitt 3.1)

GIF beskriver 8 konkrete og ambisiøse mål (kriterier) for fjerdegenerasjons reaktorer (GIF, 2002). Disse målene er gjengitt i Tabell 1 under.

**Tabell 1.**

Generation IV International Forum (GIF) sine mål mht. mulige fjerdegenerasjons reaktorer

---

Bærekraftighet #1	Muliggjør "bærekraftig" strømproduksjon som oppfyller krav om ren luft og økt effektivitet mht. bruk av reaktorbrensel
Bærekraftighet #2	Reduserer radioaktivt avfall og behovet for langsiktig forvaltning av avfall for å forbedre beskyttelse av mennesker og miljø
Økonomi #1	Realiserer fordeler ved kjernekraft vis-a-vis andre energikilder mht. økonomi over hele livssyklusen
Økonomi #2	Likestilt finansiell risiko sammenlignet med andre typer energiprojekter
Sikkerhet og pålitelighet #1	Utmerket sikkerhet og pålitelighet
Sikkerhet og pålitelighet #2	Veldig lav sannsynlighet for skader til reaktorkjernen
Sikkerhet og pålitelighet #3	Fjerne behov for ekstern beredskapsplanlegging
Ikke-spredning og fysisk sikring	Reduserer muligheten for spaltbare materialer å komme på avveie

---

---

<sup>6</sup> IAEAs verifikasjonssystem som innebærer kontroll med kjernefysiske programmer i ikke-atomvåpenstatene



GIF (2002) har valgt ut 6 reaktortyper som satsningsområder for å utvikle fjerdegenerasjons-systemer. Disse er:

- Gasskjølt hurtigreaktor (Gas-Cooled Fast Reactor, GFR)
- Blykjølt hurtigreaktor (Lead-Cooled Fast Reactor, LFR)
- Homogen saltsmeltereaktor (Molten Salt Reactor, MSR)
- Natriumkjølt hurtigreaktor (Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR)
- Superkritisk vannkjølt reaktor (Supercritical-Water-Cooled Reactor, SCWR)
- Veldig-høy temperatur reaktor (Very-High-Temperature Reactor, VHTR)

GIFs mål er å ha generasjon IV-systemer tilgjengelig for internasjonal anvendelse innen 2030.

### 3.4 Thoriumbasert kjernekraft

Thorium ble først vurdert som et mulig nukleært brensel for ca. 50 år siden, men ble skrinlagt til fordel for uranbrensel når uranprisene falt. Uranbrensel ble ytterligere ettertraktet som følge av en etablert atomvåpenindustri med uran som utgangspunkt. De siste årene har uranprisene igjen blitt høye som et resultat av økende etterspørsel og begrensede uranforekomster i verden. Det finnes 3-4 ganger mer thorium enn uran i jordskorpa, og det er mulig å bruke thoriumbasert brensel i de fleste moderne reaktortyper med mindre modifiseringer. De høye uranprisene, kombinert med de antatt store thoriumforekomstene, har ført til en fornyet interesse for thorium som kjernebrensel (TRC, 2008).

#### 3.4.1 Thorium brenselsyklus

Thoriumbasert kjernekraft kan beskrives som en verdikjede, og omtales ofte som thorium brenselsyklus. Som illustrert i Figur 3 har vi valgt å dele denne syklusen inn i 4 hoveddeler:

##### 1) thoriumutvinning

herunder gruvedrift og prosessering av malm for utvinning av thorium

##### 2) brenselproduksjon

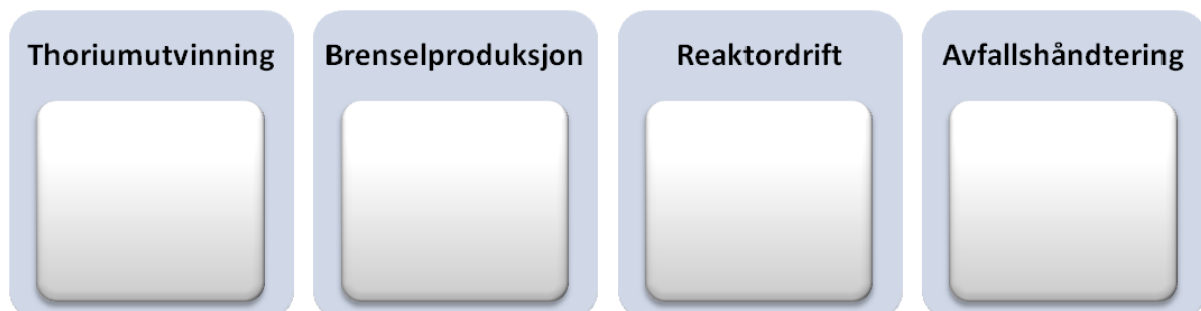
herunder oppkonsentrering og bearbeiding av thoriumholdig utgangsstoff til ønsket brenselmateriale for en gitt reaktor

##### 3) reaktordrift

herunder aktiviteter tilknyttet reaktordrift og/eller kraftproduksjon

##### 4) avfallshåndtering

herunder bearbeiding, lagring, deponering og gjenvinning av brukt brensel



Figur 3: Thorium brenselsyklus

---

Kommersiell thoriumbasert kjernekraft har så langt aldri blitt etablert. Det er fremdeles en rekke utviklingsoppgaver innen samtlige trinn i brenselsyklus før man kan etablere denne kommersielt. Dette utviklingsarbeidet er pågående i verden i dag. Man arbeider blant annet med å utvikle reaktor- og brensel-design for thoriumbrensel, samt utvikler mer effektive gjenvinningsprosedyrer for å gjenvinne thorium og  $^{233}\text{U}$  fra brukt thoriumbrensel (se avsnitt 3.4.2). Mangelen på driftserfaring innen samtlige deler av thorium brenselsyklus medfører også at det hefter usikkerhet ved flere aspekter som ved uransyklus er velkjent.

En annen utfordring i utviklingsarbeidet for å etablere thorium brenselsyklus kommersielt er av økonomisk karakter. Arbeidet skjer i konkurranse med uran brenselsyklus, som er veletablert og utprøvd over mange år. Som det fremgår i neste avsnitt (3.4.2) finnes det drivere i India som gjør at utviklingen av thoriumbasert kjernekraft i stor grad skjer der.

### 3.4.2 Thorium og reaktorteknologi

Thoriumbasert kjernekraft med den reaktorteknologi som er tilgjengelig i dag involverer kritikalitetsreaktorer<sup>4</sup> med thoriumbrensel. Det er flere konvensjonelle reaktortyper som kan tenkes brukt med thoriumbrensel. Disse omtales i denne rapporten med fellesbetegnelsen thoriumbaserte konvensjonelle reaktorer.

Thorium er et såkalt fertilt<sup>4</sup> stoff, og er ikke fissilt (spaltbart) materiale<sup>4</sup>. Dette betyr at thorium som kjernebrensel må tilføres nøytroner for å lage den energiprodukerende kjedereaksjonen som kjernekraft baseres på. Dette er illustrert i Figur 4.

I den øvre delen av figuren (markert **A**) illustreres det hvordan ikke-fissilt thoriumbrensel kan tilføres nøytroner for å produsere fissilt  $^{233}\text{U}$  via  $^{233}\text{Th}$ <sup>7</sup> og  $^{233}\text{Pa}$ <sup>8</sup>. Prosess A er avhengig av tilførsel av nøytroner for å settes i gang og opprettholdes. Disse nøytronene kan forsynes enten fra fissilt materiale som er blitt *tilsatt* i thoriumbrenselet (for eksempel tilsatt  $^{239}\text{Pu}$  eller  $^{235}\text{U}$ ) eller nøytroner som produseres av en ekstern kilde (se avsnitt om akseleratordrevne systemer i avsnitt 3.4.3).

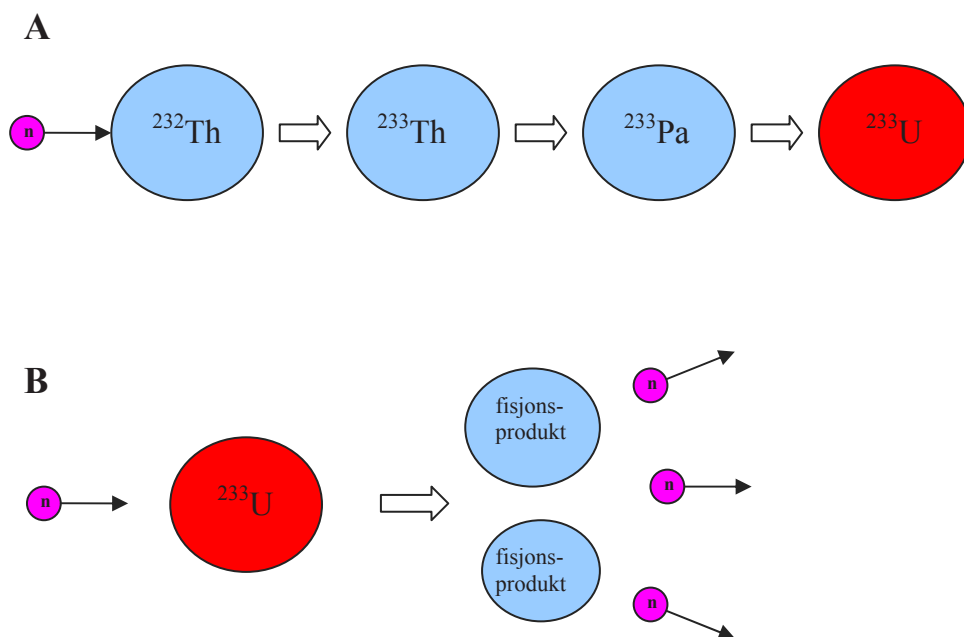
I den nedre delen av Figur 4 (markert **B**) illustreres hva det vil si at  $^{233}\text{U}$  er fissilt. Når  $^{233}\text{U}$  fisjonerer av et innkommende nøytron, skapes fisjonsprodukter og flere nøytroner frigjøres. Når tilstrekkelig  $^{233}\text{U}$  er til stede, vil denne prosessen være selvforsynende med nøytroner og en kjedereaksjon kan opprettholdes. De frigitte nøytronene fisjonerer nye  $^{233}\text{U}$ -kjerner, som frigir nye nøytroner, og så videre.

$^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Pa}$  og fisjonsproduktene fra  $^{233}\text{U}$  er i Figur 4 markert i blått, for å indikere at de ikke er fissile atomkjerner, i motsetning til  $^{233}\text{U}$ , som derfor er markert i rødt.

---

<sup>7</sup> Thorium-233, med halveringstid på 22 minutter

<sup>8</sup> Protactinium-233, med halveringstid på 27 dager



*Figur 4: Illustrasjon av basisreaksjonene i en thoriumbasert kjernereaktor.*

Siden thorium ikke er fissilt, må brenselet i thoriumbaserte konvensjonelle reaktorer tilsettes med noe fissilt materiale. Dette er nødvendig for å få nok nøytroner til å starte og holde kjedereaksjonen i gang.

Ved oppstart i en thoriumbasert konvensjonell reaktor ville fissil tilsetning kunne være i form av enten  $^{235}\text{U}$  eller  $^{239}\text{Pu}$ . Man kan blande inn plutonium fra brukt uranbrensel til dette formålet.

Etter en brenselrunde (når man har brukt opp og må skifte ut brenselet i reaktoren) kan man gjenvinne  $^{233}\text{U}$  fra det brukte thoriumbrenselet, og benytte dette fissile materialet som anrikning i neste thoriumbrenselrunde. Dette forutsetter effektive prosedyrer for gjenvinning av brukt thoriumbrensel.

### Utviklingsarbeid av thoriumbasert kjernekraft

Grunnleggende forskning og utvikling av thoriumbasert kjernekraft har funnet sted i Tyskland, India, Japan, Storbritannia og USA (UIC, 2007B). Norge har også vært involvert i tidligere forskning ved et OECD/EURATOM prosjekt<sup>9</sup> hvor 10:1 Th/HEU brensel ble bestrålt i den 20MWth ”Dragon” reaktoren i Storbritannia i 741 dager. I de senere årene har også Russland jobbet med å utvikle Th-U og Th-Pu brensel for en trykkvannsreaktor.

Flere kjernekraftverk basert på thoriumbasert brensel har vært i drift og planlegges nå verden over. Historisk bør det nevnes at en Th høytemperatur reaktor var i drift i Tyskland mellom 1983 og 1989. Dette var en såkalt ”pebble-bed” reaktor utviklet fra tyskernes AVR høytemperatur gasskjølte reaktorteknologi. I USA var reaktoren ”Fort St. Vrain” i drift mellom 1976 og 1989 og brukte i denne perioden ca 25 tonn Th i form av Th-HEU brensel. Thoriumbasert brensel ble også testet og brukt i trykkvanns- og lettvannsformering reaktortyper ved ”Shippingport” anlegg i USA både med U-235 og Pu som blandingsstoff på 70-tallet og tidlig på 80-tallet.

<sup>9</sup> 1964-1973

---

Det landet som for tiden satser mest på å utvikle thorium brenselcyklus er India. Indias ledende rolle kan delvis forklares med at India ikke har signert Ikke-spredningsavtalen (NPT), hvilket har begrenset Indias tilgang til uran. I tillegg har India blant verdens største thoriumforekomster i form av monazittsand, mens deres uranforekomster er beskjedne.

Den langsiktige planen i India er å utvikle en flertrinns Th-<sup>233</sup>U basert brenselcyklus i et oppsett bestående av flere reaktortyper (TRC, 2008; UIC 2007B). Man planlegger å benytte ny avansert tungtvannsreaktor-teknologi (AHWR<sup>10</sup>-teknologi, under utvikling) som utnytter mest energi fra thoriumbrensel, både (<sup>233</sup>U-Th)MOX og (Pu-Th)MOX (TRC, 2008). Første trinn i kjeden er å benytte uranbaserte PHWR<sup>11</sup> (også kalt CANDU-reaktor, se nedenfor) evt. LWR<sup>12</sup> til å danne Pu fra U brensel. Deretter skal hurtige reaktorer benyttes for å danne <sup>233</sup>U fra thoriumbrensel. Da skal reaktorkjernen dekket med både uran (U) og thorium (Th) slik at plutonium (Pu) dannes sammen med den fissionable uranisotopen <sup>233</sup>U. Til slutt skal AHWR-reaktoren benytte seg av det produserte <sup>233</sup>U og plutonium sammen med thorium. I teorien kan ca. 2/3 av energien komme fra thorium.

I henholdsvis 1993 og 1995 ble de indiske reaktorene "Kakrapar" 1 og 2 tilsatt thoriumbrensel for å jevne ut kraftproduksjonen ("power flattening") i reaktorkjernen. Kakrapar-1 ble den første reaktoren på verdensbasis som benyttet thorium i stedet for utarmet uran til denne oppgaven. Thoriumbrensel har også blitt brukt på tilsvarende måte i de indiske reaktorene "Rajasthan" 2, 3 og 4, "Kalpakkam" og "Kaiga" 1 og 2. I India brukes bestrålt thoriumbrensel til forskning og utviklingsarbeid i forbindelse med <sup>233</sup>U gjenvinning. I 1995 kjørte "Kakrapar" 1 og 2 i henholdsvis 300 og 100 dager på thoriumbrensel (UIC, 2007B).

I 2002 godkjente indiske fagmyndigheter bygging av en 500 MW prototyp hurtigreaktor som skal benytte (U-Pu)MOX i "Kalpakkam" og som skal være i drift i 2010. Med dette er India klar for å realisere andre trinnet i det planlagte flertrinns reaktoroppsettet. Etter planen skal bygging av fire nye slike reaktorer påbegynnes i 2020.

Flere konvensjonelle reaktortyper kan tenkes å bli benyttet med thoriumbrensel. En mulighet som har blitt nevnt i flere mediaoppslag som et mulig valg i forbindelse med evt. thoriumbasert kjernekraft i Norge (Dagens Næringsliv, 2008), er CANDU-reaktormodellen ACR-1000. ACR-1000 betegnelsen står for "Advanced CANDU Reactor" og er etter planen tiltenkt å bli en såkalt generasjon III+ reaktor med fordeler med hensyn til effektivitet og sikkerhet.

CANDU står for "Canada Deuterium Uranium" og er utviklet i Canada. Denne reaktortypen er basert på et trykkvannssystem som ble tegnet på 50-tallet. Alle reaktorer i Canada (totalt 18 reaktorer) er av denne typen og teknologien har også blitt solgt utlandet, blant annet til India, før India ble utestengt fra internasjonalt kjernekraftsamarbeid. Thoriumbasert brensel kan benyttes i CANDU-reaktorer slik som i andre trykkvannsreaktorer. Alle CANDU-reaktorer har samme konstruksjonsbasis med unntak av visse forandringer/forbedringer. Energiutbyttet fra CANDU-reaktorer rangerer mellom 125 MWe og over 900 MWe avhengig av antall brenselkanaler i reaktorkjernen. De fleste CANDU-reaktorer som har blitt solgt til utlandet er av typen "CANDU 6" som produserer ca. 700 MWe.

---

<sup>10</sup> Advanced Heavy Water Reactor (AHWR)

<sup>11</sup> Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) også kalt CANDU

<sup>12</sup> Light Water Reactor (LWR)

---

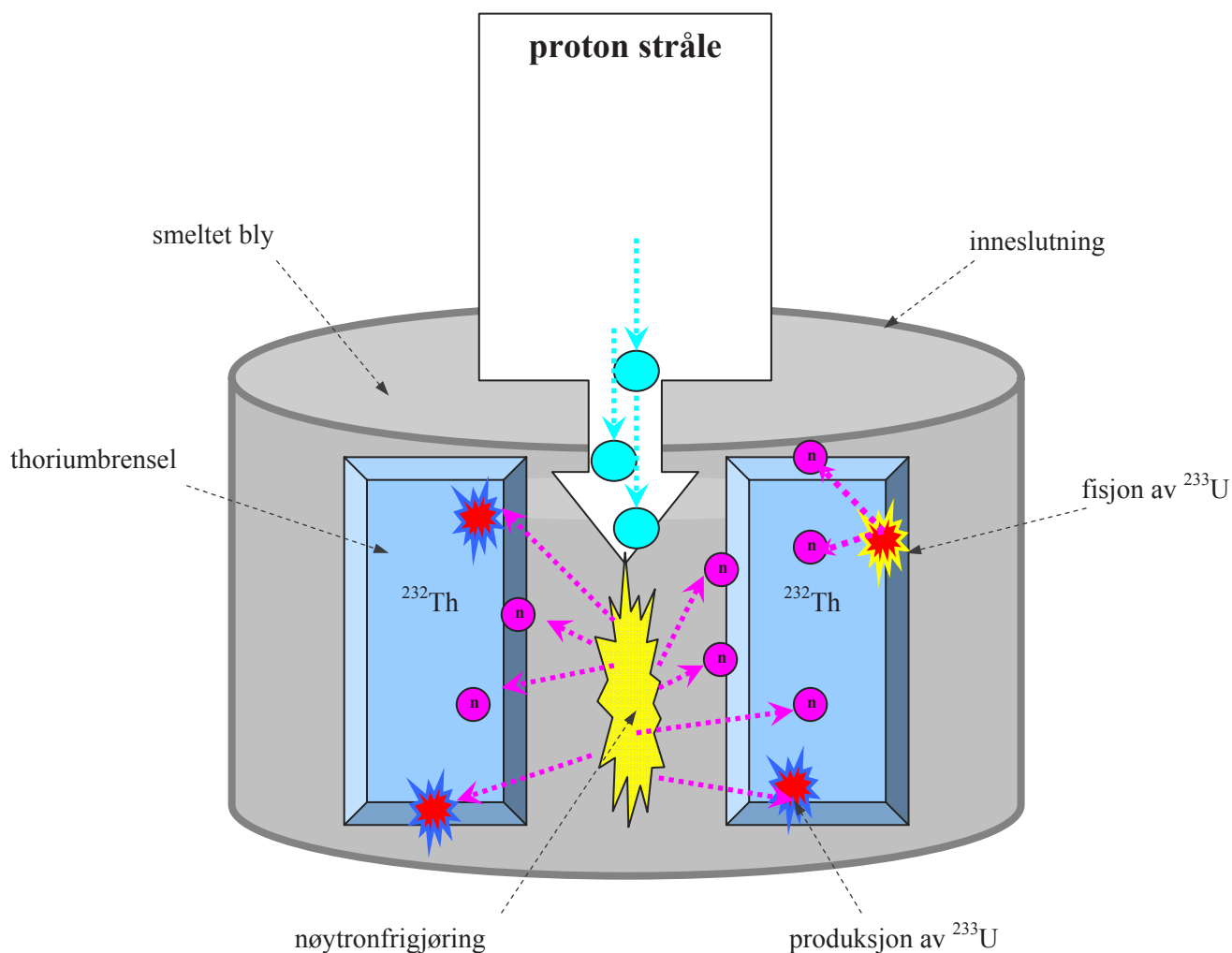
Per 2008 finnes det 30 CANDU kraftproduserende reaktorer på verdensbasis: 18 i drift i Canada; 4 i Sør Korea; 2 i hhv. Kina, India og Romania; 1 i hhv. Argentina og Pakistan, samt 13 andre reaktorer basert på CANDU-design i India.

### 3.4.3 Akseleratordrevne systemer (ADS)

I tillegg til Indias satsning på å utvikle ny avansert tungtvannsreaktor-teknologi (AHWR omtalt i avsnitt 3.4.2) og GIF-landenes satsning på å etablere generasjon IV-reaktorer (se avsnitt 3.3), pågår intensivt forskningsarbeid for å utvikle et reaktorkonsept som omtales som ADS. Forkortelsen ADS står for "Accelerator Driven System" (akseleratordrevet system).

Det må understrekes innledningsvis at dersom et ADS en gang blir bygget, er endelig design per i dag ukjent. Man har heller ingen driftserfaring fra slike systemer. Det hefter derfor vesentlig usikkerhet til vurderinger som gjøres vedrørende fremtidig ADS, og til konseptet som i de neste avsnittene blir beskrevet. Til tross for denne usikkerheten og til tross for at ADS kun er et konsept på forskningsstadiet, er det likevel betydningsfullt å forstå og vurdere ADS-arbeidet, fordi det representerer potensialet for fremtidig kjernekraft som skiller seg konseptuelt fra konvensjonell kjernekraft.

Innholdet i de følgende avsnittene søker å gi et overblikk over hva ADS er og hvilke fordeler og ulemper ADS kan medføre. Avsnittene som følger er hovedsakelig basert på kildene (TRC, 2008) og (IAEA, 2005), men også andre refererte kilder. ADS er en subkritisk reaktor – det vil si en reaktor der kjedereaksjonen kun kan opprettholdes dersom eksterne nøytroner tilføres. I ADS-konseptet produseres slike eksterne nøytroner ved å bombardere et target (for eksempel bly) med høyenergetiske protoner. I kollisjonen mellom proton og blykjernen spaltes blykjernen, som da frigjør et stort antall nøytroner. Disse nøytronene sendes ut i det omliggende thoriumbrenselet (se Figur 5) og bidrar til å drive prosessen (illustrert i Figur 4A) der ikke-fissile thoriumatomkjerner ( $^{232}\text{Th}$ ) omdannes til fissilt  $^{233}\text{U}$ .



*Figur 5: Forenklet illustrasjon av nøytronproduksjon i reaktorkjernen i et akseleratordrevet system (ADS)*

### Historikk og pågående arbeid med en ADS prototype

Konseptet ADS ble etablert så tidlig som på 1950-tallet (TRC, 2008), men mottok stor oppmerksomhet først da Carlo Rubbia gjenopplivet ideen i 1993. Rubbia presenterte ADS-konseptet som et system som produserte energi samtidig som det forbrant eget og andre reaktors nukleære avfall (Rubbia, 1993).

Det er blitt gjort flere pilotprosjekter på ADS; men en full skala ADS er så langt ikke bygget (ENEA, 2002; IAEA, 2005; Agostini et al., 2006). ADS er et satsningsområde i europeisk nukleær forskning og utvikling (FoU) (Ait-Abderrahim et al., 2005). I løpet av de siste 10 årene er det nedlagt ca. 400 årsverk per år på ADS-forskning i Europa. Det skjer også ADS FoU i Japan, USA, Korea, India og Kina.

---

I 1997 startet et stort europeisk prosjekt i Mol i Belgia som ble kalt MYRRHA. Forkortelsen står for Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications og prosjektet utvikler en ADS prototype, som etter planen skal stå ferdig innen 2018 (TRC, 2008). Dette systemet skal etter planen ha en subkritisk reaktorkjerne ( $k_{\text{eff}} = 0.95$ ) med thoriumholdig MOX-brensel (thorium blandet med fissilt plutonium) og kjøles av en bly-vismut-blanding. Partikkelakseleratoren i MYRRHA er en 1.5 MW LINAC med 600 MeV protoner.

### ADS design

Et ADS består av to hovedkomponenter; en reaktorkjerne og en partikkelakselerator. I det følgende beskrives MYRRHA-systemet for å kunne beskrive et ADS i noe større detalj (TRC, 2008):

Reaktorkjernen har et brensel som består hovedsakelig av thorium. Ved oppstart må det også inneholde noe  $^{235}\text{U}$  eller  $^{239}\text{Pu}$  eller noen transuraner fra brukt kjernebrensel, for å øke fisjonsraten. Reaktorkjernen i ADS er plassert nesten nederst i en høy sylindrisk tank (H~25 meter, D~6 meter) med doble vegger. Den innerste tanken er fylt med en blysmelte med en temperatur på 600-700 °C eller en bly-vismut-smelte med en temperatur rundt 500 °C. I de øvre deler av tanken vil metallsmelten utveksle varme med den sekundære kretsen (fylt med metallsmelte eller vann), som igjen utveksler varme og driver en dampturbin. Bly-vismut-smelten sirkulerer ved naturlig konveksjon.

Protonakseleratoren er lokalisert utenfor reaktorinneslutningen. Akseleratoren må ha høy effekt (~10 MW) og levere protoner med høy energi (500-1000 MeV) gjennom en skjermet strålegang inn i reaktorkjernen. Akseleratoren kan enten være en lineærakselerator (LINAC) eller en syklotron.

Protonene sendes inn i blytargetet, som ligger nær sentrum av reaktorkjernen. Det frigjøres omtrent 30 nøytroner per proton som sendes inn. Nøytronene beveger seg inn i brenselet i reaktorkjernen (se Figur 5), og gir hovedsakelig opphav til to prosesser:

- a) Transmutasjon av thorium til protactinium, som henfaller til uran-233 med en halveringstid på 27 dager
- b) Fisjon i uran/plutonium eller transuraner i brenselet og i uran-233 (som er blitt produsert gjennom ovenstående prosess)

### ADS og akselerorteknologi

En 10 MW protonstråle er kraftigere (i betydningen: har høyere effekt) enn noen partikkelakselerator kan produsere i dag, men det anses som realistisk å kunne bygge en akselerator av denne størrelsen. Systemet som behøves for å drive et ADS representerer kun en rimelig ekstrapolasjon av det som allerede har blitt oppnådd med eksisterende partikkelakselerator-teknologi (TRC, 2008). Et av de viktigste kravene til en akselerator til bruk i ADS, er pålitelighet i kontinuerlig drift, da stopp i protonstrålen sliter på vinduet mellom akseleratorens vakuum og reaktorens target. Så langt favoriserer akselerator-forskningsmiljøet LINAC som den beste løsningen for ADS (TRC, 2008).

### ADS versus andre reaktorsystemer

ADS skiller seg fra andre reaktorsystemer på andre måter enn kun gjennom å være subkritisk. ADS benytter ikke kontrollstaver for å kontrollere effekten på reaktoren slik andre reaktorsystemer gjør. ADS-reaktorens effekt er proporsjonal med protonstrålens effekt – og dette medfører at reaktoreffekt kan justeres gjennom å justere partikkelakseleratorens effekt. Det samme gjelder justeringer for reaktivitetsendringer som følge av at brenselet gradvis brenner opp.

---

ADS har to spesifikke karakteristika:

- a) Et godt konstruert ADS vil forhindre kritikalitetsulykker
- b) Det er teoretisk mulig å transmutere langlivede fisjonsprodukter og transuraner i et ADS

### **ADS – ulemper og problemer**

Det må understrekes at dersom et ADS en gang blir bygget, vil man være uten driftserfaring på slike systemer. Det hefter derfor vesentlig usikkerhet til vurderinger som gjøres vedrørende fremtidig ADS. Man forutser dessuten flere problemområder. Et ADS vil være et mer komplekst system enn konvensjonelle reaktorer, da det består av både en partikkelakselerator og en reaktor. Dette kan medføre mer nedetid og dermed en mer usikker kraftproduksjon. Et ADS vil medføre stor produksjon av flyktige radioaktive isotoper i targetmaterialet, og kjølesystemet (bestående av metallsmelte) vil også bli radioaktivt. En svakhet ved ADS er også at strålegangen fra partikkelakseleratoren går inn i reaktorinneslutningen, hvilket representerer et potensielt lekkasjepunkt i systemet. En av utfordringene ved ADS er for øvrig korrosjon og metallslitasje, og man forutser at dette vil kunne bidra til relativt hyppig utskifting av deler i et potensielt fremtidig ADS.

### **Om nedsmeltning av reaktorkjernen og ADS**

En reaktor uten kjøling kan smelte selv om den er subkritisk. Når en reaktor slås av, kommer nemlig ikke varmen i kjernen fra pågående fisjoner i reaktoren, men fra varme som frigis fra radioaktivt henfall av fisjonsprodukter i reaktorkjernen. Denne prosessen fortsetter også etter at systemet er skrudd av. Et ADS vil sannsynligvis likevel ikke smelte selv om bly-vismut-kjølingssystemet stopper, fordi ADS inneholder rundt 8000 tonn metall som vil kunne absorbere varmen fra det radioaktive henfallet i kjernen (TRC, 2008).

### **Valg av ADS target**

Protonstrålen sendes inn i et target som gir et høyt utbytte av nøytroner, har liten vekselvirkning med nøytroner og tåler 10-20 MW protonbestråling over tid. Smeltet bly er nærmest ideelt ut fra disse kriteriene, men dette krever høye temperaturer og ny materialteknologi. Det er derfor ventet at det første ADS i stedet bygges med et bly-vismut target.

### **ADS og avfall**

Et ADS skal kunne ”forbrenne” langlivet avfall fra andre reaktorer og spalte (transmutere) disse til fisjonsprodukter med kortere halveringstid under energigevinst. ADS er derfor ofte fremholdt mer som en fremtidig *avfallshåndteringsteknikk* i en syklus av flere typer kjernekraftverk, enn som en primær kraftproduksjonsenhet. En lukket krets av flere kjernekraftverk, hvor siste stadium i kretsen besto i transmutasjon av langlivet avfall i en ADS, ville potensielt kunne gi kjernekraft uten langlivet avfall og med maksimal utnyttelse av energien i brenselet. Den indiske kjernekraftsatsningen arbeider mot å etablere en slik krets av kraftverk som på sikt skal inkludere et ADS som siste ledd i prosessen.

### **ADS og sikkerhet**

Når et nytt nukleært system foreslås, er det viktig å forsøke å forutse alle potensielle ulykker, for å kunne optimalisere design eller legge inn passive innretninger som kan stoppe ulykkessekvenser. Slike analyser er gjort for ADS og man har identifisert 4 prinsipielt forskjellige kategorier av ADS-uhell og forsøkt å tilpasse ADS-konstruksjonen slik at disse uhellene ikke skal kunne gi alvorlige ulykker. Dette er beskrevet i TRC, 2008.



---

## ADS oppsummering

ADS-konseptet har blitt utviklet over en årrekke, men er ennå ikke på et stadium hvor man kan bygge en prototype av en ADS-kjernekraftreaktor. Ulemper og fordeler i forhold til et thoriumbasert ADS er oppsummert i tabell 2.

Tabell 2: Fordeler og ulemper ved ADS

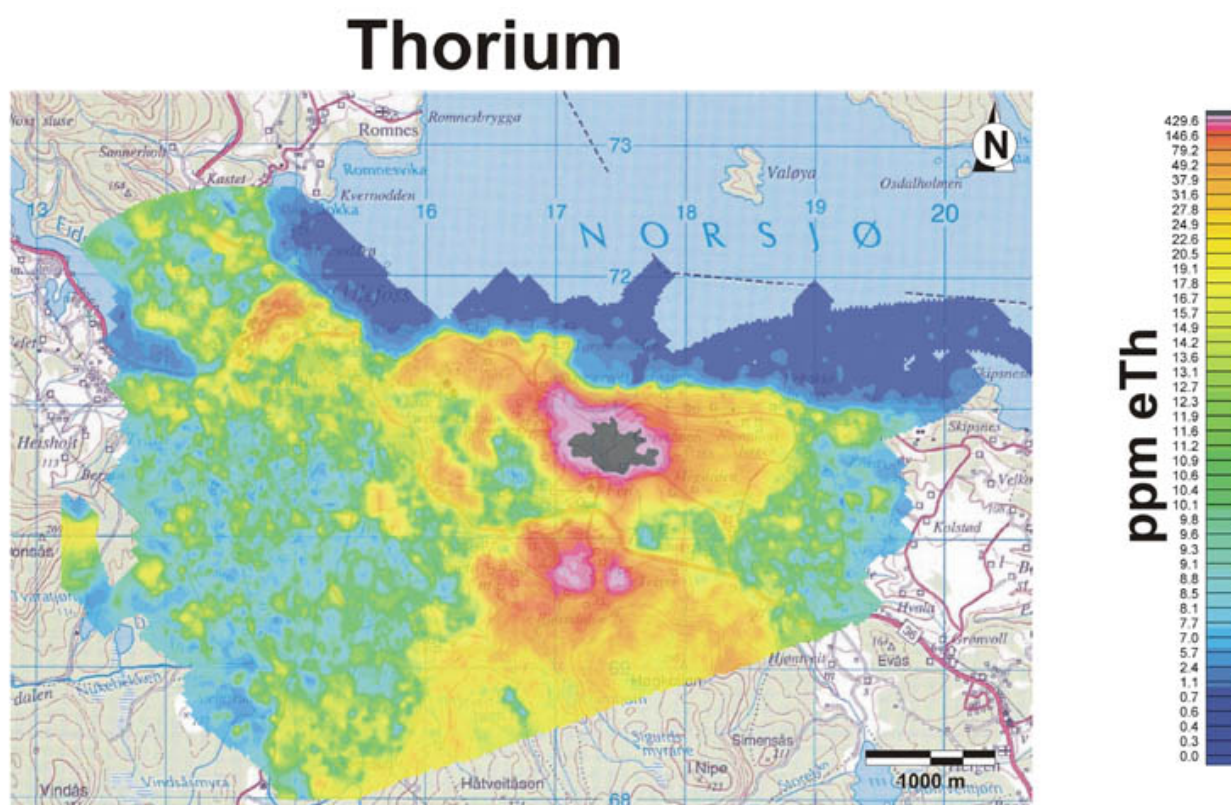
Fordeler	Ulemper
Subkritisk reaktor, bedre sikkerhetsmargin	Manglende driftserfaring
Mindre produksjon av langlivede aktinider	Mer kompleks enn konvensjonelle reaktorer
Minimal sannsynlighet for en løpsk reaktor	Mindre pålitelig kraftproduksjon på grunn av nedetid ved akselerator
Ingen kontrollstaver, enklere reaktorkontroll	Stor produksjon av flyktige radioaktive isotoper i target
Effektiv forbrenning av lette aktinider	Strålegangen fra akseleratoren kan ødelegge inneslutningen
Lavt trykk i systemet (mindre risiko for sprekker)	Akseleratordelen bidrar til økte kostnader ved driften
Kan forbrenne kjernebrensel fra andre reaktorer	Kjølesystemet (metall) vil bli radioaktivt
Høy energiutnyttelse fra nukleært brensel	Metallslitasje og korrosjon vil kreve kontroll/utskifting av deler

I følge ekspertpanelet bak thoriumutredningen (TRC, 2008) er det *ikke* rimelig å forvente et kraftproduserende ADS innenfor de neste 30 årene, da mye forskning gjenstår, blant annet innen akselerator- og materialteknologi.

## 4 Thorium i Norge

### 4.1 Thoriumforekomster i Norge

Forekomst av thorium i Norge har aldri før vært undersøkt med thoriumutvinning som det primære formål. Kunnskap om thoriuminnholdende bergarter i Norge kommer hovedsaklig fra tidligere kartlegginger av *uran* gjennomført av Norges Geologiske Undersøkelser (NGU). Forholdet mellom uran og thorium har blitt kjent gjennom analyser av mineralprøver. Dermed kunne urandataene fra gammakartlegging også brukes for å estimere thoriummengder i de undersøkte områdene. MEGON-rapporten fra 1973 (Megon, 1973) viste at de største thoriumforekomstene i Norge var lokalisert i tre regioner: Fensfeltet (i Telemark), Oslofeltet og sørøstlige kystområder inklusive Kragerø og Langesund. Fensfeltet, som per i dag regnes som den mest aktuelle thoriumforekomsten i Norge med hensyn til utvinning, har nylig (2007) blitt kartlagt med ytterligere gammamålinger (se Figur 6). Thoriuminnholdet i Fensfeltet er på mellom 0,1 og 0,4 vektprosent (TRC, 2008). De nyere analysene fra NGU viser at thorium i Fensfeltet opptrer i flere mineralfaser (i oksider og silikater, i tillegg til noen fluorkarbonatmineraler), og kornstørrelsen er liten<sup>13</sup>.



Figur 6: Dette kartet viser målinger av radioaktiv stråling fra thorium i øvre jordsmonn og bergarter i Fensfeltet. (Kilde, NGU. <http://www.ngu.no/no/Aktuelt/20072/030/>)

<sup>13</sup> [www.ngu.no](http://www.ngu.no)

---

Det er viktig å påpeke at det finnes stor usikkerhet rundt størrelsen til norske thoriumforekomster grunnet manglende thoriumspesifikk kartlegging og undersøkelser. Det gjenstår mye arbeid før man med sikkerhet kan slå fast at Norge har en thoriumreserve, hvor stor denne er og hvorvidt den er lønnsom å utvinne (GEO, 2007). Det siste avhenger av thoriumprisen på verdensmarkedet, hvilket er vanskelig forutsigbar. I thoriumutredningen (TRC, 2008) ble det anbefalt videre undersøkelser av norske thoriumforekomster og utvinningsteknikker.

## 4.2 Thoriumscenarier i Norge

Denne rapporten tar for seg potensielle miljøkonsekvenser samt regulering av *hypotetiske scenarier* der thoriumrelatert industri på ulike måter og i varierende grad er etablert i Norge. Det finnes i prinsippet flere tenkelige scenarier der en eller flere deler av thorium brenselcyklus er realisert i Norge (se Figur 7) og for hvert scenario kan de ulike delene av brenselcyklus bli realisert på ulike måter, i ulik skala<sup>14</sup> eller med ulik teknologi<sup>15</sup>.

I Figur 7 er A og B scenarier der thoriumforekomster i Norge utnyttes for eksport av thorium utgangsstoff eller eksport av ferdig thoriumkjernebrensel.

C og D er scenarier hvor norsk kommersiell kjernekraftproduksjon er etablert, med henholdsvis norsk eller importert thorium som utgangspunkt.

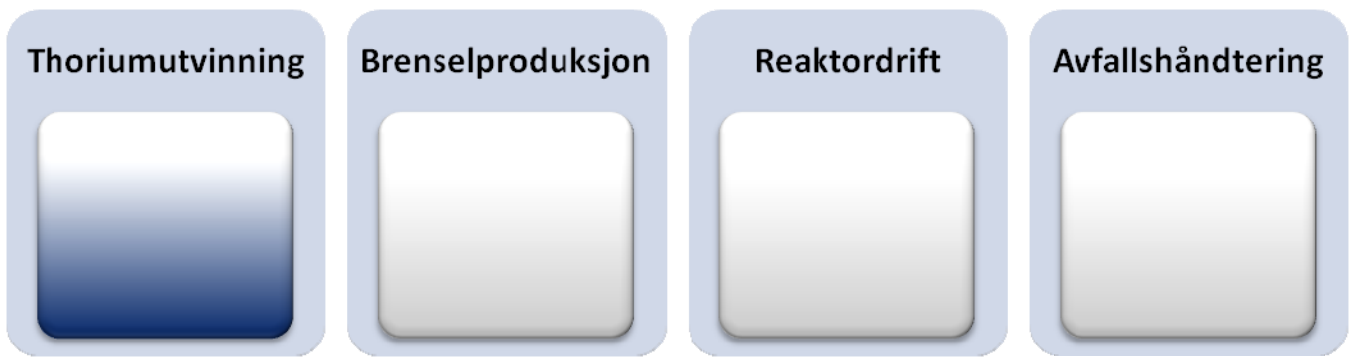
Scenarioene A-D representerer forskjellige sett av potensielle miljøkonsekvenser. For å unngå en altfor komplisert fremstilling av potensielle miljøkonsekvenser av thoriumrelatert industri i Norge, vil konsekvenser fra hver del av thorium brenselcyklus drøftes separat. For hver del av brenselcyklus vil miljøkonsekvensene avhenge av størrelse og teknologivalg for de gitte virksomhetene. Dette vil i noen grad drøftes under hvert punkt, selv om detaljnivået er begrenset av at spesifikke løsninger ikke er fremsatt og miljøkonsekvenser hittil til dels er dårlig dokumentert i litteraturen.

Scenarioene A-D vil også representere forskjeller med hensyn til regulering. I avsnitt 6.1 blir det gitt en oversikt over hvilke regelverk som kommer til anvendelse ved regulering av de ulike deler av thorium brenselcyklus. I det øvrige av kapittel 6 blir disse regelverkene beskrevet i noe mer detalj. Regulering av den første delen av thorium brenselcyklus med hensyn til å regulere miljøkonsekvenser av thoriumutvinning, blir også diskutert i avsnitt 5.1.

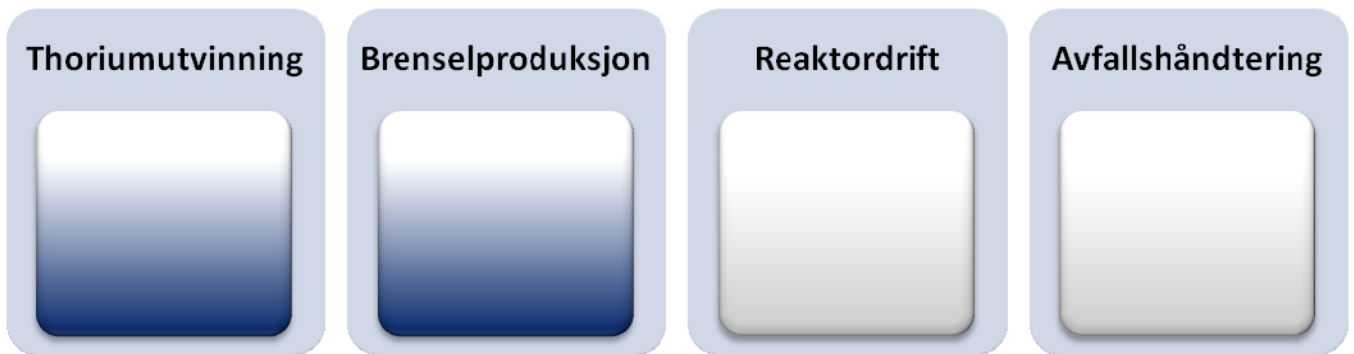
---

<sup>14</sup> F.eks.: Forskningsvirksomhet versus full skala kommersiell virksomhet

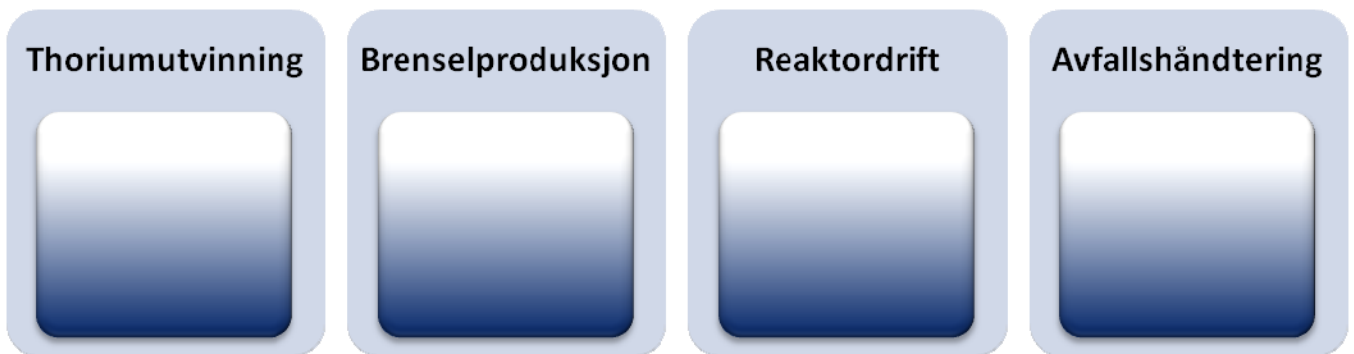
<sup>15</sup> F.eks.: En konvensjonell kjernekraftreaktor versus et fremtidig akseleratorbasert system (ADS)



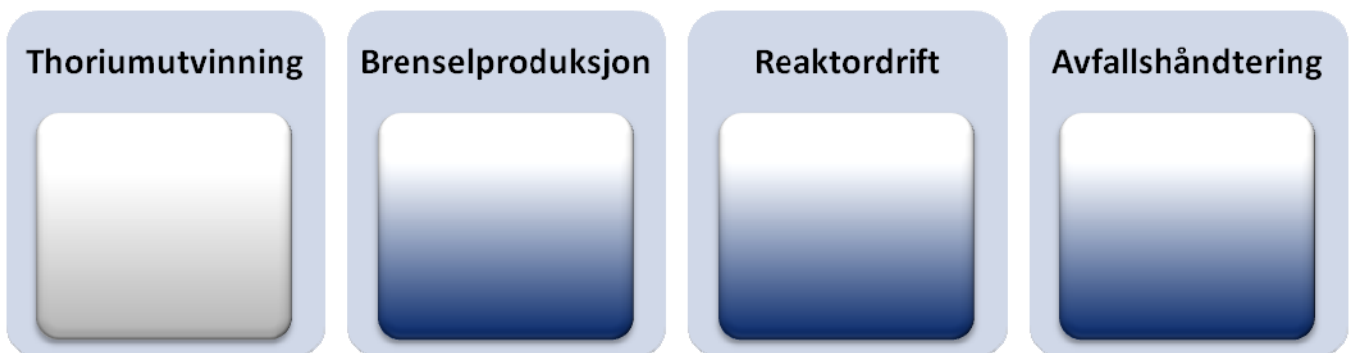
Scenario A: Norsk thoriumutvinning → eksport



Scenario B: Norsk thoriumutvinning og brenselproduksjon → eksport



Scenario C: Selvforsynt norsk thoriumbasert kjernekraftproduksjon



Scenario D: Norsk thoriumbasert kjernekraft med importert thorium

*Figur 7: Ulike norske thoriumscenarier. I hvert tilfelle er de delene av thorium brenselcyklus tenkt realisert i Norge markert i blått*

---

## 5 Potensielle miljøkonsekvenser av thoriumrelatert industri i Norge

Potensielle miljøkonsekvenser fra thoriumrelatert industri i Norge skal i det følgende diskuteres under den firedelte brennsyklus (**Figur 3**). Det er forsøkt å gi innblikk i både selve de potensielle miljøkonsekvensene av eventuell fremtidig thoriumbasert kjernekraft, i tillegg til å belyse forskjeller mellom uran og thorium der disse er vesentlige<sup>16</sup>. Under reaktordrift gjøres det et skille mellom konvensjonell kjernekraft basert på thorium (se avsnitt 3.4.2) på den ene side og akseleratordrevne systemer (se avsnitt 3.4.3) på den annen, da de potensielle miljøkonsekvensene fra disse to regnes som prinsipielt forskjellige. Videre er aspekter relevante for spredningsspørsmål også inkludert<sup>16</sup> da disse aspektene indirekte kan være svært viktige med hensyn til miljøet.

### 5.1 Thoriumutvinning og miljøkonsekvenser

Thoriumutvinning vil kunne utføres på ulike steder (i og utenfor Norge) med ulike teknikker og teknologi, avhengig av thoriumforekomsten. Derfor kan thoriumutvinning resultere i ulike miljøkonsekvenser avhengig av både hvor og hvordan thorium forekommer og avhengig av metodene som velges ved utvinning.

Den største kommersielle kilden til thorium i verden er monazitt (et fosfatmineral) som kan inneholde mellom 3 og 10 % thorium. India er blant verdens største produsenter av thorium som råmateriale. Fra områder langs Malabar-kysten utvinnes inderne thorium fra monazittsand. Utvinning av monazitt skjer ved å samle sand og bruke risting og magnetiske separasjoner. Monazitten løses i enten sterke syrer eller baser<sup>17</sup> under oppvarming. Etter flere kjemiske trinn separeres thorium ut ved hjelp av organiske løsemidler<sup>18</sup> og lagres som thoriumdioksid<sup>19</sup> (ThO<sub>2</sub>).

Fensfeltet er ansett som den mest aktuelle thoriumforekomsten i Norge med hensyn til en eventuell fremtidig utvinning. NGUs thoriumanalyser for Fensfeltet antyder derimot at utvinning kan bli vanskelig grunnet thoriumforekomst i ulike mineralfaser og liten kornstørrelse. I tilfellet fremtidig thoriumutvinning i Norge slik som i scenarioene A til C i Figur 7, vil utvinning derfor trolig måtte foregå på en helt annen måte enn det foregår i India. Dette gjør at miljøkonsekvensene av norsk thoriumutvinning også vil bli helt annerledes. Dersom NGUs thoriumanalyser for Fensfeltet stemmer for hele thoriumforekomsten i området, vil dette komplisere utvinning av thorium i Fen, hvilket igjen vil bidra til ytterligere usikkerhet rundt miljøkonsekvensene av en eventuell utvinning.

Fremtidig kommersiell gruvedrift for thoriumutvinning vil innebære endringer i landskapet. Der thorium forekommer i årer ville det vært mulig både å gjøre dagbrudd eller gruvedrift via sjakt. Et dagbrudd ville være fordelaktig med hensyn til radonproblematikk for yrkeseksponerte, men kan potensielt føre til mer belastning på det ytre miljøet, blant annet på grunn av radioaktivt støv. Thoriumutvinning fra sjakt vil på den annen side måtte løse store utfordringer relatert til yrkeseksponering. Thoriumgruvedrift innebærer videre en risiko for uhell som for eksempel eksplosjon og brann. Slike ulykker kan medføre spredning av radioaktivitet.

---

<sup>16</sup> I tråd med MDs oppdrag til Strålevernet pr. januar 2008

<sup>17</sup> 93 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (svovelsyre) eller konsentrert NaOH (lut)

<sup>18</sup> Blandet med for eksempel kerosin

<sup>19</sup> Thoriumdioksid kalles også for ”Thoria”

---

Kommersiell gruvedrift vil produsere radioaktivt avfall i form av løsmasser (slagghauger). Løsmassedeponiene kan føre til en økning i stråledosen til det ytre miljø og lokalbefolkningen. Avrenning fra slagghauger vil kunne føre til spredning av radioaktivitet. Dette gjelder også *etter* at en eventuell utvinning er avsluttet.

Knusing og bearbeiding av steinmasser som inneholder thorium utgjør de første trinn for produksjon av thoriumutgangsstoff for brenselproduksjon. Transport inn og ut av anlegg der dette arbeidet foregår, vil føre til en viss forurensningsfare, særlig på grunn av radioaktivt støv. I tillegg vil steinarbeidet føre til avfallsprodukter (rester og slagg) med de samme potensielle miljøkonsekvensene som fra selve gruvedriften.

Thorium gjennomgår radioaktivt henfall (se Vedlegg C) via flere grunnstoffer, blant annet via  $^{220}\text{Rn}$ , som er en isotop av edelgassen radon.  $^{220}\text{Rn}$  har kort halveringstid (55,6 sekunder) og gir, sammen med sine datterprodukter, skadelige effekter ved inhalasjon. Steinmassene som knuses vil også inneholde uran, som henfaller radioaktivt via  $^{222}\text{Rn}$ , som er en annen radonisotop, med samme skadelige effekter (halveringstid 3,82 dager). Derfor vil radioaktivt støv inneholdende thorium, uran og datterprodukter av disse samt radonproblematikk representere helse- og miljøutfordringer i områdene hvor bearbeiding av steinmasser fra utvinningen foregår.

### *5.1.1 Noen strålevernmessige krav til thoriumutvinning*

Det er gitt en oversikt over strålevernloven (avsnitt 6.4) og annet regelverk som regulerer thorium brenselcyklus i kapittel 6. Nedenfor er deler av strålevernregelverket trukket frem og utdypet for å kunne drøfte relevante problemstillinger vedrørende regulering av thoriumutvinning i Norge.

Strålevernloven (§ 5) stiller krav om forsvarlighet blant annet i forhold til håndtering og avfallsdisponering (inklusive utslipp) av strålekilder. Forsvarlighetskravet gjelder også menneskelig aktivitet som medfører forhøyet naturlig stråling fra omgivelsene, for eksempel utvinning av thorium. Lovens forsvarlighetskrav knyttes opp til en overordnet målsetning om at virksomheten ikke skal medføre (strålingsrelatert) risiko for dem som utøver virksomheten, andre personer eller miljøet. I følge strålevernloven § 5 og forarbeidene til strålevernloven utgjør grunnprinsippene (se avsnitt 6.4.1) berettigelse, optimalisering og prinsippet om dosebegrensning en del av forsvarlighetsvurderingen, men også andre relevante momenter kan trekkes inn.

Strålevernforskriften stiller krav om optimalisering og dosebegrensning. Stråledoser skal holdes så lave som mulig (ALARA-prinsippet<sup>20</sup>) og fastsatte dosegrenser skal ikke overskrides. ALARA-prinsippet og årlige dosegrenser for yrkesmessig strålingseksponering fremgår av strålevernforskriften § 21 (se forøvrig avsnitt 6.4.5). De årlige dosegrensene gjelder uavhengig av antall virksomheter arbeidstakeren eksponeres fra.

Strålevernforskriften § 16 stiller krav om at en virksomhet skal planlegge skjerming og strålebruk slik at allmennheten ikke under noen omstendighet kan motta stråledoser som overstiger 0,25 mSv/år (se forøvrig 6.4.4).

En oversikt over øvrige krav som stilles i eller med hjemmel i strålevernloven med forskrift er gitt i avsnitt 6.4.

---

<sup>20</sup> ALARA er en forkortelse for "As Low As Reasonably Achievable" (så lavt som praktisk mulig)

### 5.1.2 Thoriumutvinning i Fen i lys av forsvarlighetskravet i strålevernloven

Fensfeltet er i flere henseender et område med ekstra strålingsbelastning sammenliknet med gjennomsnittlige norske forhold. Grunnet geologien i området er den eksterne gammastrålingen atskillig høyere enn det Norges befolkning utsettes for i gjennomsnitt. I tillegg gir geologien i området opphav til at boliger og bygninger er ekstra utsatt for høye nivåer av den radioaktive gassen radon, som er en kjent årsak til lungekreft. Videre har tidligere gruvedrift i Fensfeltet (tidligere Søve gruver) resultert i avfallshauger i naturen. Disse slagghaugene (se Figur 8) inneholder steinmasser med oppkonsentrert naturlig radioaktivitet (fra uran- og thoriumkjeden). Disse avfallshaugene representerer ekstra strålekilder i dette lokalmiljøet og bidrar (der de ligger) til ytterligere forhøyet bakgrunnsstråling.



**Figur 8: Avfall fra gruvedrift i Fensfeltet. Doseraten er her 3-5  $\mu\text{Sv/h}$ . Det tilsvarer ca. 26 mSv i året i ekstern bakgrunnsstråling, hvilket er mer enn 40 ganger høyere enn gjennomsnittlig ekstern bakgrunnsstråling i Norge**

I lys av ovenstående kan det være rimelig å stille spørsmålet om en eventuell ny lokal thoriumutvinning i Fensfeltet, og / eller annen thoriumrelatert virksomhet som kan eller vil gi radioaktive utslipp til miljøet (for eksempel brenselproduksjon, se avsnitt 5.2), bør ta hensyn til *den totale belastning* av lokalmiljøet og befolkningen i området. I strålevernloven med forskrift stilles det ikke eksplisitte krav til at et slikt totalhensyn tas, og grenseverdiene fastsatt i strålevernforskriften for en virksomhet på ett sted i Norge vil i utgangspunktet være lik grenseverdiene for tilsvarende virksomheter på andre steder i Norge (se avsnitt 6.4.6). Det er likevel grunn til å vurdere om ikke strålevernloven, i tilfelle som nevnt her, kan gi grunnlag for å kreve at det tas hensyn også til den totale strålebelastning i området for å sikre at den totale strålebelastningen i et område ikke blir uforsvarlig høy. Denne problemstillingen er utdypet i avsnittet under.

Som nevnt over utgjør grunnprinsippene berettigelse, optimalisering og prinsippet om dosebegrensning en del av forsvarlighetsvurderingen, men i følge forarbeidene til strålevernloven kan også andre relevante momenter trekkes inn. Det fremgår av forarbeidene til strålevernloven (Ot. prp. nr. 88 (1998-99)) at forsvarlighetsbegrepet er en rettslig standard. Det innebærer at begrepets innhold er skjønsmessig, kan forandres over tid og være forskjellig ut i fra omstendighetene. I forbindelse med planlegging av ny virksomhet som kan gi økt helse- eller miljømessig strålingseksponering, vil det som en del av forsvarlighetsvurderingen i henhold til strålevernloven, kunne være aktuelt å vurdere den *totale* potensielle strålingsbelastning av lokalmiljøet og lokalbefolkningen. Dette understøttes av at forsvarlighetskravet er knyttet opp til den overordnede målsetning om at det (som følge av

virksomheten) ikke skal oppstå risiko for dem som utøver virksomheten, andre personer eller miljøet. Videre understøttes dette av lovens formålsbestemmelse (§ 1) som lyder:

*”Formålet med denne loven er å forebygge skadelige virkninger av stråling på menneskers helse og bidra til vern av miljøet (jf § 1).”*

En slik vurdering vil, på grunn av de spesielle strålingsmessige forholdene i Fensfeltet, *kunne* medføre at ny virksomhet som kan gi økt strålingseksposering, ikke anses å oppfylle forsvarlighetskravet i strålevernloven. Dette vil kunne gjelde selv om forskriftsfastsatte dosegrenser for den enkelte virksomhet isolert sett ikke overskrides.

## 5.2 Thorium brenselproduksjon og miljøkonsekvenser

Et eventuelt thoriumkraftverk vil kunne baseres på ulike brenseltyper og geometrier (staver, kuler, fast stoff, smelte) og for hver brenseltype finnes det også prinsipielt ulike fremstillingsformer. Noen av disse er teknisk mer krevende enn andre og involverer strenge sikringskrav, mens andre er enklere og foregår i vanlige laboratorier. Potensielle miljøkonsekvenser vil derfor variere, også innen brenselproduksjon, avhengig av de løsninger som velges. Hvorvidt det er snakk om forskningsbasert eller kommersiell brenselproduksjon vil også gi forskjellige og ulik grad av de potensielle miljøkonsekvenser som diskuteres under. Potensielle miljøkonsekvenser fra forskningsbasert brenselproduksjon utført i liten skala ville antas å være små.

Thoriumbrensel produseres gjennom kjemiske og fysiske prosesser der thoriumholdig utgangsstoff oppkonsentreres og bearbeides gjennom en trinnvis prosess. Før thoriumbrensel kan produseres, må thorium-råstoffet gjennom strenge renseprosedyrer for å fjerne alt 'nøytronabsorberende' materiale. Dette skyldes at man ønsker at alle frigjorte nøytroner skal bidra til å drive reaksjonen illustrert i Figur 4A. Håndtering og behandling av thorium må skje under streng kontroll på grunn av thoriums toksisitet, radioaktive stråling (fra thorium og datterprodukter, se Vedlegg C) og pyroforisitet (selvantennelig materiale).

Utgangsstoffet bearbeides til det ønskede brenselmaterialet (for ulike reaktorer kan dette være ulike kjemiske forbindelser;  $\text{ThO}_2$ ,  $(\text{Th,U})\text{O}_2$ ,  $(\text{Th, Pu})\text{O}_2$ ) og til den ønskede utforming og geometri (pellets, staver, mikrokuler, saltsmelte-væskeform). De kjemiske og fysiske prosessene er beskrevet i litteraturen (for eksempel IAEA, 2005). Det er fremdeles behov for forskning innenfor feltet thorium brenselproduksjon.

For arbeid med radioaktivitetsmengder fra 1-20 GBq, vil produksjonsarbeidet måtte utføres på egnede, klassifiserte laboratorier, med dertil hørende krav til lukket, merket og avgrenset område, egnede bygningstekniske installasjoner, ventilasjon og filtrering. For å minimere risiko for utilsiktet spredning av radioaktivt stoff utenfor laboratoriene, må man påse at området er lukket, inklusive utslippkontroll; lukkede/filtrerte/kontrollerte kretsløp på vann og ventilasjon.

I utgangspunktet vil brenselproduksjonsarbeidet gi opphav til planlagte og regulerte utslipp, som må håndteres i henhold til gjeldende regelverk. Utslippstillatelse kreves for radioaktive utslipp i tråd med strålevernlovens forsvarlighetskrav. Slike regulerte utslipp bør i utgangspunktet forventes å gi relativt små miljøkonsekvenser.

Brenselproduksjonen vil gi radioaktivt avfall. Avfallets innhold og mengde (masse, volum og radioaktivitetsmengde) vil avhenge av brenseltype, utforming og produksjonsprosess. Dette vil kunne



---

omfatte både radioaktive løsninger og fast radioaktivt avfall, samt kjemisk toksiske stoffer. Eventuelle lagrings- og deponeringsløsninger for slikt avfall vil måtte reguleres i henhold til gjeldende regelverk (se kapittel 6).

Ulykkesscenarioer i forbindelse med thoriumbrenselproduksjon, vil i første rekke dreie seg om utilsiktede utslipp til det lokale, omliggende miljø. Brann- og eksplosjonsfare må også vurderes og minimaliseres. Sikkerhetssystemer og sikkerhetskultur vil være vesentlige faktorer for å minimere ulykkesrisiko i forbindelse med brenselproduksjon.

### **5.3 Reaktordrift, potensielle miljøkonsekvenser og spredningsresistens**

Thoriumbaserte og uranbaserte konvensjonelle reaktorer er i prinsippet like reaktorer, og i flere tilfeller kan samme reaktortype benyttes. Både uran- og thoriumbaserte konvensjonelle reaktorer vil medføre utslipp av radioaktive stoffer til luft og vann, og reaktorene vil i begge tilfeller representere en ulykkesrisiko, spesielt med hensyn til potensielle, ukontrollerte kjedereaksjoner, med verste konsekvens i en nedsmeltning.

Selv om konvensjonelle thoriumbaserte reaktorer i flere sammenhenger er tilnærmet like eller sammenlignbare med uranbaserte reaktorer, har thoriumbrenselcyklus likevel noen fortrinn over uranbaserte. Dette gjelder spesielt avfallsegenskaper, da thoriumbrenselet produserer mindre langlivet avfall enn uransyklus (forutsatt gjenvinning av thorium og  $^{233}\text{U}$  fra brukt thoriumbrensel) (se avsnitt 5.5).

Det er flere reaktortyper som kan velges for en thoriumbasert konvensjonell reaktor. Potensielle miljøkonsekvenser og risikobildet vil variere for ulike reaktorvalg. Det antas at eventuell norsk kommersiell kjernekraft (scenario C og D i Figur 7) vil baseres på moderne reaktortechnologi, og vurderingene under tar utgangspunkt i dette. De viktigste potensielle miljøkonsekvenser fra drift av thoriumbaserte konvensjonelle kjernekraftreaktorer vil være:

#### **1. Regulerte og planlagte utslipp av radioaktive stoffer til luft og vann**

I utgangspunktet er utslipp fra konvensjonelle kjernekraftreaktorer sammenlignbare enten de er uran- eller thoriumbaserte. Nasjonalt regelverk, i tråd med internasjonale retningslinjer, vil sikre at utslipp av radioaktive stoffer til omgivelsene holdes på et minimalt nivå og kun medfører små stråledoser til menneske og miljø.

#### **2. Konsekvenser fra ulykker**

Sannsynlighet for en nedsmeltning er til stede for alle konvensjonelle reaktorer, enten de er basert på thorium- eller uranbrensel.

#### **3. Produksjon av langlivet radioaktivt avfall**

Thoriumbaserte konvensjonelle reaktorer vil produsere langlivet radioaktivt avfall som må lagres og deponeres forsvarlig. Avfall og avfallshåndtering er omtalt i eget avsnitt under.

#### **4. Produksjon av materiale som kan benyttes til ikke-fredlige formål**

Både uranbaserte og thoriumbaserte kjernekraftverk kan benyttes til ikke-fredlige formål. Thoriumbaserte kraftverk har imidlertid noen fortrinn med hensyn til spredningshensyn<sup>21</sup>, da de produserer lite plutonium

---

<sup>21</sup> Se flere detaljer i Vedlegg B

---

## 5.4 Spredningsresistens

Ved en lukket thorium brenselcyklus dannes det etter noen runder brensel svært lite nytt plutonium (se avsnitt 5.5). I tillegg dannes  $^{232}\text{U}$  i thoriumbrenselet. Halveringstiden til  $^{232}\text{U}$  er 73,6 år og datterproduktene har korte levetider. Noen av dem, som  $^{212}\text{Bi}$  (Vismut-212, med halveringstid 60,6 minutter) og  $^{208}\text{Tl}$  (Thallium-208, med halveringstid 3,05 minutter) sender ut sterk (høyenergetisk) gammastråling. Dette gjør stoffene vanskelige å håndtere. Ulovlig transport av slikt materiale blir grunnet gammastrålingen vanskeligere å utføre og lettere å oppdage. Begrunnet med argumentene over er brukt thoriumbrensel ansett som et uegnet utgangspunkt for produksjon av våpenmateriale.

## 5.5 Avfallshåndtering

En av de største miljøkonsekvensene fra kommersiell konvensjonell kjernekraft er knyttet til produksjonen av langlivet radioaktivt avfall. Både volumet og radioaktiviteten i det langlivede avfallet er avhengig av hvorvidt det brukte brenselet gjenvinnes før avfallet deponeres. Det prinsipielle valget mellom åpen<sup>22</sup> og lukket<sup>23</sup> brenselcyklus setter føringer for mengden og volumet av avfall som produseres gjennom brenselssyklus. Dette gjelder for både thorium- og uranbasert konvensjonell kjernekraft.

Gjenvinning reduserer avfallets radioaktivitetsmengde betydelig og gjør det mulig å utnytte energien i den uforbrente delen av det brukte brenselet. Gjenvinning fører til at man sitter igjen med mer kortlivet radioaktivt avfall i form av spaltingsprodukter. På den annen side vil gjenvinningsprosessen kunne medføre utslipp til miljøet, og gjenvinning assosieres historisk med flere negative aspekter som våpenbygging, utslipp til miljø og ulykker. Prinsippet bak gjenvinning bør likevel, med forbehold i forbedret teknologi og kontroll, ikke utestenges fra en generell debatt om fremtidig kjernekraft på verdensbasis.

Som diskutert i avsnitt 3.4.2, er thorium et fertilt (ikke fissilt) stoff, hvilket medfører at en thoriumbasert konvensjonell reaktor ved oppstart - i første brenselrunde<sup>24</sup> - er avhengig av en viss andel tilsatt fissilt materiale som  $^{235}\text{U}$  (uran-235) eller  $^{239}\text{Pu}$  (plutonium-239) sammen med thoriumbrenselet, for å starte og holde kjedereaksjonen i gang. Det fissile materialet (uranet eller plutoniumet) som benyttes i første brenselcyklus produserer langlivet avfall, lik det som produseres fra en uranbasert reaktor (se "Ut 1" nederst til venstre i Figur 9).

Ideelt sett er målet å realisere en selvforsynt brenselcyklus da nøytronaktivering av thorium i reaktorkjernen danner det fissile uran-233 (via thorium-233 og protactinium-233), som illustrert i Figur 4A. Ved endt brenselrunde kan det brukte thoriumbrenselet gjenvinnes slik at nydannet fissilt uran ( $^{233}\text{U}$ ) kan gjenbrukes som nøytronkilde i en senere brenselrunde.

Når  $^{233}\text{U}$ -mengden i reaktoren er stor nok<sup>25</sup>, kan den thoriumbaserte konvensjonelle reaktoren opprettholde sin kjedereaksjon (og energiproduksjon) uten eller med svært liten tilførsel av annet nytt fissilt materiale (hvor mye fissilt materiale som må tilføres avhenger av effektiviteten på gjenvinningsprosessen). Når thoriumreaktoren når dette punktet, etter flere brenselrunder, vil reaktoren produsere vesentlig mindre langlivet avfall.

---

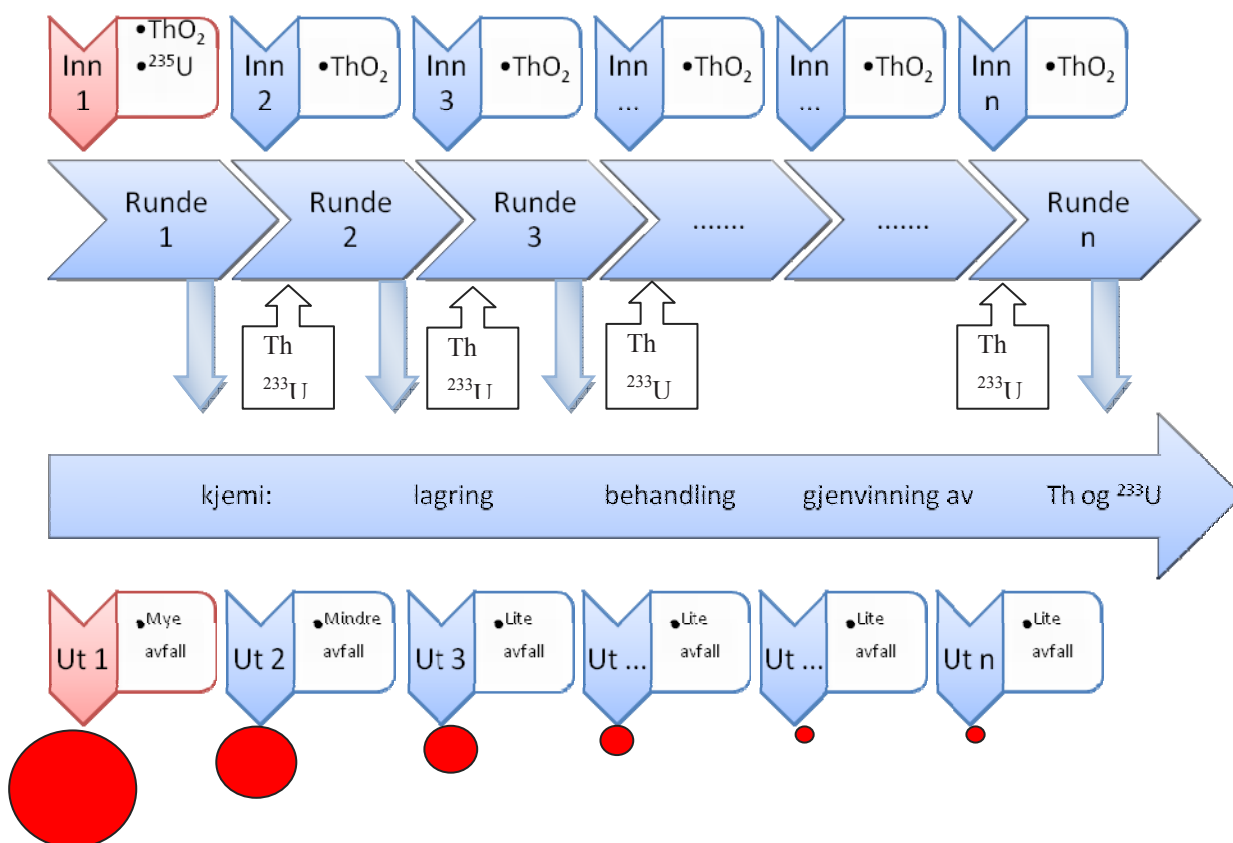
<sup>22</sup> Åpen brenselcyklus: Syklus uten gjenvinning av brukt brensel

<sup>23</sup> Lukket brenselcyklus: Syklus med gjenvinning av brukt brensel

<sup>24</sup> En brenselrunde defineres her som tiden fra man setter thoriumbrenselet inn i reaktor fram til tidspunktet når det må fjernes og erstattes med nytt brensel

<sup>25</sup> Etter noen runder, avhengig av effektiviteten på gjenvinningsprosedyrene (se avsnitt 5.7.3)

Forutsatt effektiv gjenvinning av brukt brensel har vi altså at: Thoriumbaserte konvensjonelle reaktorer produserer ulikt avfall i de første rundene med thoriumbrensel sammenlignet med de etterfølgende runder – den første runden produserer plutonium og annet langlivet avfall, de neste produserer vesentlig mindre plutonium og langt mindre annet langlivet avfall. Dette er illustrert i Figur 9. Gjenvinning av brukt thoriumbrensel vil dermed kunne være gunstig i forhold til energigevinst og avfallsegenskaper.



Figur 9: Illustrasjon av hvordan en thoriumbasert hurtigreaktor i drift med gjenvinning av Th og <sup>233</sup>U produserer mindre langlivet avfall (markert som uskalerte røde sirkler) etter noen runder med utskiftning av brensel. Nytt <sup>235</sup>U brukes kun i vesentlig grad i første brenselrunde. En runde med thoriumbasert brensel varer i ca 5-6 år.

### 5.5.1 Lagring og deponering

Lagring av høyaktivt og langlivet radioaktivt avfall skjer i to faser:

**Mellomlagring (lagring)** er ikke-permanent lagring av avfallet. Mellomlagring krever overvåking og tilsyn. Mellomlagring kan være nødvendig ved varmeproduserende avfall som må kjøles i en gitt tid, før videre avfallsbehandling kan skje. Mellomlagring vil også være en nødvendig løsning for langlivet og høyaktivt avfall der en adekvat sluttlagingsløsning ikke eksisterer. Det høyaktive og langlivede avfallet som i 50 år har blitt produsert ved Norges to forskningsreaktorer, blir foreløpig mellomlagret på grunn av manglende adekvat sluttlagingsløsning.

---

**Sluttlagring (deponering)** er permanent lagring. Ved sluttlagring av høyaktivt og langlivet radioaktivt avfall har man som målsetning å isolere det høyaktive materialet fra det ytre miljø i en lang tidsperiode. Lagringen skal ikke være avhengig av tilsyn eller vedlikehold. Videre ønsker man at de langsiktige radiologiske konsekvensene av lagringen for mennesker og miljø skal være lave og ikke større enn det vi fra dagens strålevernprinsipper aksepterer. Lagringsløsningene må derfor være så robuste at selv under dramatiske hendelser skal de maksimale konsekvensene medføre strålingsnivåer på mennesker og miljø som er under gjeldende grenseverdier for stråling.

For høyaktivt og langlivet avfall er det i dag en internasjonalt akseptert teknisk løsning at sluttlagring kan skje på en sikker måte i stabile geologiske formasjoner 500-1000 meter under terrengoverflaten. Begrunnelsen ligger blant annet i at berggrunnen vil gi avfallet en effektiv beskyttelse mot ytre påkjenninger, samt virke som en barriere mot spredning av radioaktive stoffer. Videre vil slike dype fjellanlegg være upåvirket av dramatiske hendelser på overflaten (jordskjelv, krig, m.v.). Under slike forhold vil risikoen fra avfallet etter hvert representere samme risiko som den radioaktive malmen i berggrunnen. De første anleggene for slik geologisk sluttlagring av høyaktivt og langlivet avfall skal etter planen ferdigstilles og settes i drift rundt 2020, blant annet i Finland, Sverige og USA.

### 5.5.2 Gjenvinning av brukt thoriumbrensel

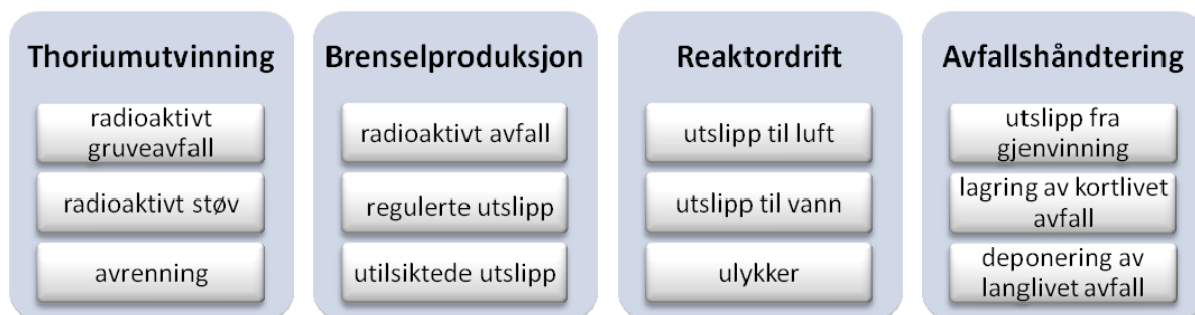
Ved en slik separasjonsprosess må man implementere tekniske løsninger som skjermer de yrkeseksponerte for høyenergetisk gammastråling. Brukt thoriumbrensel inneholder signifikante mengder  $^{232}\text{U}$ , som har en halveringstid på 68,9 år og som genererer de sterke gammaemitterende datterproduktene  $^{212}\text{Bi}$  og  $^{208}\text{Tl}$  med svært kort levetid.

Videre, i brukt thoriumbrensel vil  $^{233}\text{U}$  produseres av  $^{233}\text{Pa}$ . Ved eventuell gjenvinning må brukt brensel mellomlagres i ca. 1 år, så omdanning fra  $^{233}\text{Pa}$  til  $^{233}\text{U}$  er skjedd så fullstendig som mulig, før videre separasjon av  $^{233}\text{U}$  og thorium.

Det påpekes igjen at det er ennå mye forskningsarbeid som gjenstår for å finne en optimal og effektiv gjenvinningsprosedyre for brukt thoriumbrensel. Problemområder inkluderer behovet for bruk av flussyre til å løse opp brukt fast stoff thoriumbrensel, noe som medfører spesielle krav til utstyr og prosedyrer. Det skal også bemerkes at separert  $^{233}\text{U}$  kan benyttes i atomvåpen. Gjenvinning av thoriumbrenselet representerer derfor en viss spredningsrisiko selv om det separerte  $^{233}\text{U}$  beskyttes av  $^{232}\text{U}$  og dennes døtre.

## 5.6 Oppsummering av miljøkonsekvenser av thoriumrelatert industri

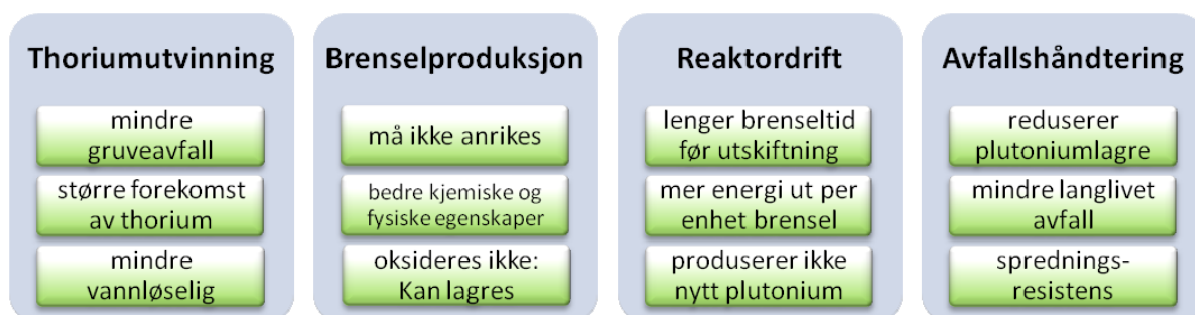
Miljøkonsekvensene for drift av både thorium- og uranbaserte konvensjonelle reaktorer vil inkludere produksjon av radioaktivt avfall, utslipp av radioaktive stoffer til luft og vann, og reaktorene vil i begge tilfeller representere en ulykkesrisiko som inkluderer potensialet for ukontrollerte kjedereaksjoner og i verste tilfellet en nedsmelting. De viktigste potensielle, negative miljøkonsekvensene fra thorium brenselsyklus er oppsummert i Figur 10.



Figur 10: *Potensielle, negative miljøkonsekvenser av thorium brenselcyklus*

## 5.7 Thorium versus uran – miljøkonsekvenser

I avsnittene nedenfor diskuteres forskjeller mellom thorium- og uranbrenselcyklus med hensyn til miljøkonsekvenser. I Figur 11 oppsummeres noen av de fordelene som finnes ved thorium- versus uranbrenselcyklus.



Figur 11: *Noen fordeler ved thorium i konvensjonell kjernekraft, sammenlignet med uran*

Det er viktig å påpeke at det også finnes vesentlige ulemper og utfordringer ved thorium brenselcyklus. Kunnskapsbasen og erfaring med thoriumbasert brensel og brenselssyklus er så langt svært begrenset og må utvides før thorium evt. kan benyttes som fremtidig basis for kommersiell kjernekraft. Det er flere termodynamiske og kjemiske egenskaper ved thorium som gir utfordringer. Blant annet har  $\text{ThO}_2$  et høyt smeltepunkt, hvilket skaper problemer ved brenselproduksjon, og det er lite løselig noe som kan gi problemer i gjenvinningsprosesser. I tillegg kommer  $^{232}\text{U}$ - og protactiniumproblemet som ble omtalt under avsnitt 5.5.2.

Ytterligere omtale av dette tema er gitt i Vedlegg B.

### 5.7.1 Utvinning og brenselproduksjon

Thorium forekommer i naturen tilnærmet utelukkende som  $^{232}\text{Th}$ . Ved en eventuell thoriumutvinning til bruk i kjernekraft vil derfor alt utvunnet thorium kunne benyttes ved brenselproduksjon uten behov for anrikning. Dette står i kontrast til uran, som forekommer i naturen med kun 0,7 % av det fissionable  $^{235}\text{U}$  som man behøver i uranbasert kjernekraft. Uran må gjennom en miljøbelastende prosess, anrikes (til ca 3-6 %) for å fremstille urankjernebrensel.

---

Etter utvinning av thorium og uran blir oksider av de to grunnstoffene fremstilt. Det er vesentlige forskjeller på de kjemiske og termodynamiske egenskapene til thoriumdioksid ( $\text{ThO}_2$ ) og urandioksid ( $\text{UO}_2$ ) hvilket har implikasjoner for brenselproduksjon av henholdsvis thorium- og uranbrensel.

$\text{UO}_2$  oksideres lett, hvilket skaper problemer når uranbrenselet må lagres før eller etter bruk.  $\text{ThO}_2$  oksideres ikke, hvilket ville ha betydning i scenario A og B i Figur 7, med  $\text{ThO}_2$ - eller thoriumbrenselproduksjon for eksport.

### 5.7.2 Reaktordrift

En fordel ved thoriumbrensel er at det kan forbrennes mer fullstendig i en konvensjonell kjernekraftreaktor enn tilfellet er for uranbrensel. Dette gjør at thoriumbrenselet gir mer energi ut per enhet brensel og at reaktoren kan produsere kraft i lenger tid før brenselet må byttes ut med nytt<sup>21</sup>. I en uranbasert reaktor må uranbrenselet byttes ut lenge før all energien i uranet er utnyttet. Ved at thoriumreaktoren kan drives ved å blande inn brukt uranbrensel eller plutonium, bidrar thoriumreaktoren til å utnytte den gjenværende energien i brukt uranbrensel bedre, samt redusere mengden med langlivet avfall fra uranbaserte reaktorer.

Thorium er relativt inert, kjemisk stabilt og tungtløselig. Det har større evne enn  $\text{UO}_2$  til å holde på radioaktive fisjonsprodukter. I tillegg har  $\text{ThO}_2$  positive termodynamiske egenskaper på grunn av sin høyere termiske ledningsevne og på grunn av mindre utvidelse av volum med økning i temperatur, sammenlignet med  $\text{UO}_2$ . Man forventer ut fra dette, at  $\text{ThO}_2$ -basert brensel vil ha fordelaktige egenskaper 'in pile' i en reaktor<sup>21</sup>.

Et siste viktig moment er at ren thoriumbasert brensel med tilsatt  $^{233}\text{U}$  ikke produserer nytt plutonium ved reaktordrift. I det lange løp vil derfor thoriumbrenselssyklusen ikke bidra til å øke verdens plutoniumlagre.

### 5.7.3 Avfall

Forutsatt effektiv gjenvinning, vil det være forskjeller mellom avfallet fra en thoriumbasert og en uranbasert konvensjonell reaktor. Den thoriumbaserte reaktoren vil potensielt produsere mindre avfall og mindre langlivet avfall, grunnet en mer fullstendig forbrenning av brenselet. Det vil allikevel produseres langlivet avfall også fra en thoriumbasert konvensjonell reaktor (hovedsakelig grunnet tilstedeværelse av fissilt uran eller plutonium ved oppstart), og dette avfallet må behandles, lagres og deponeres på en forsvarlig måte (se 5.5.1).

Som påpekt innledningsvis i avsnitt 5.5 finnes det gode faglige argumenter med hensyn til avfallsegenskaper og energieffektivisering for å gjenvinne  $^{233}\text{U}$  fra brukt thoriumbrensel. Forutsatt en effektiv gjenvinningsprosess vil man i teorien unngå å måtte sette inn nytt fissilt materiale ved hver ny runde med thoriumbrensel og dermed unngår man produksjon av langlivet avfall og produksjon av plutonium. Dette står i kontrast til en uranreaktor.

Dersom man allikevel velger å ikke gjenvinne brukt thoriumbrensel, finnes det allikevel fordeler ved brukt thoriumbrensel fremfor brukt uranbrensel, da thoriumbrensel er mer kjemisk stabilt (unngår problemer med oksidering av brukt brensel), mindre radiotoksisk og svært tungtløselig (se Vedlegg B). Dette vil si at lagring og deponering av brukt thoriumbrensel gir mindre risiko for forurensning av grunnvann enn lagring og deponering av brukt uranbrensel.

---

#### 5.7.4 Spredningsresistens

Som påpekt i avsnitt 5.3 finnes det viktige spredningsresistensaspekter ved thorium brenselsyklus. Ved en lukket thorium brenselsyklus dannes det etter noen runder brensel svært lite nytt plutonium (se avsnitt 5.5) i motsetning til tilfellet med uranbrensel. I tillegg dannes  $^{232}\text{U}$  i thoriumbrenselet som medfører at brukt thoriumbrensel vil sende ut sterk (høyenergetisk) gammastråling. Dette medfører at brukt thoriumbrensel er vanskelig å ulovlig transportere samt å bruke i våpenformål, i motsetning til brukt uranbrensel. For forbrenning av plutonium med våpenkvalitet eller sivilt plutonium i en *åpen brenselsyklus*, vil thoriumbrensel fremdeles være å foretrekke fremfor uranbasert, fordi plutonium ikke dannes i den førstnevnte thoriumforbrenningen, og i tillegg dannes  $^{232}\text{U}$  i denne, som gir spredningsresistens.

---

## 6 Regulering av evt. thoriumrelatert industri i Norge

Som illustrert i Figur 7 kan thoriumrelatert industri i Norge omfatte ulike scenarioer (både i type og omfang), som kan spenne fra begrenset thoriumutvinning i Norge til etablering av norsk kommersiell kjernekraft.

Det er en rekke forutsetninger som må antas innfridd for at man skal ta opp forvaltningsmessige og juridiske tilpasninger til etablering av norsk kjernekraft. Det må blant annet forutsettes at Stortinget har gitt sin tilslutning til å etablere og ta i bruk kjernekraft i Norge, at det finnes kompetanse til å gjennomføre de nødvendige prosessene, og også at de øvrige ressursmessige behov er innfridd hos aktørene som blir involvert.

### 6.1 Oversikt over relevant regelverk

I tabell 3 er det gitt en oversikt over regelverk og konvensjoner som må vurderes i forhold til eventuell thoriumrelatert industri i Norge.

Strålevernloven med forskrift vil få anvendelse i forbindelse med utvinning av thorium. Dessuten vil slik utvinningsvirksomhet måtte vurderes i forhold til mer generelt regelverk om bergverk. I denne sammenheng nevnes blant annet bergverksloven og industrikonsesjonsloven. De rette myndigheter for bergverksloven og industrikonsesjonsloven er henholdsvis Nærings- og handelsdepartementet (NHD) og Olje og energidepartementet (OED). For øvrig vil også utvinning av thorium måtte vurderes i forhold til plan- og bygningsloven og forskrift om konsekvensutredninger som forvaltes av Miljøverndepartementet (MD). Deler av dette regelverket gjennomgås i egne avsnitt under.

Resterende deler av brenselsyklus vil blant annet måtte vurderes på grunnlag av plan- og bygningsloven med forskrift om konsekvensutredninger, atomenergiloven med forskrifter, strålevernloven med forskrift, energiloven og forurensningsloven (se egne avsnitt). Atomenergiloven med forskrifter forvaltes av HOD/ Statens strålevern. Strålevernloven med forskrift forvaltes av HOD/ MD/ Statens strålevern.



Tabell 3. Oversikt over norsk regelverk som kan anvendes i tillegg til konvensjonene og internasjonale avtaler som Norge har ratifisert.

---

**Oversikt over norsk regelverk som får eller kan få anvendelse (ikke uttømmende)**

---

Lov om erverv av vannfall, bergverk og annen fast eiendom mv. (industrikonsekvensloven) (14. desember 1917)

Lov om bergverk (30. juni 1972)

Plan- og bygningsloven (14. juni 1985)

Forskrift om konsekvensutredninger (1. april 2005)

Atomenergiloen (12. mai 1972)

Forskrift om fysisk beskyttelse av nukleære materialer (2. november 1984)

Forskrift om besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale og flerbruksvarer (12. mai 2000)

Energiloen (30. juni 1990)

Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven). (17. juni 2005)

Forskrift om arbeid med ioniserende stråling (14. juni 1985, nr. 1157)

Lov om strålevern og bruk av stråling (strålevernloven) (12. mai 2000)

Forskrift om strålevern og bruk av stråling (21. november 2003)

Lov om vern mot forurensninger og om avfall (13. mars 1981) med forskrifter

Forskrift om helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter (internkontrollforskriften) (6. desember 1996, nr. 1127)

---

**Oversikt over konvensjoner og internasjonale avtaler som Norge har ratifisert**

---

Pariskonvensjonen om erstatningsansvar på atomenergiens område (29. juli 1960) med tilleggsprotokoller

Avtale mellom Norge, Danmark, Finland og Sverige og Det internasjonale atomenergibyrå (IAEA) om gjensidig hjelp i forbindelse med strålingsuhell (17. oktober 1963)

Traktat om ikke-spredning av kjernefysiske våpen (1. juli 1968)

Avtale mellom Norge og Det internasjonale atomenergibyrå (IAEA) om utføring av sikkerhetskontroll i forbindelse med traktat om ikke-spredning av kjernefysiske våpen (1. mars 1972)

Konvensjon om fysisk beskyttelse av nukleært materiale (3. mars 1980)

Konvensjon om tidlig varsling av en atomulykke (26. september 1986) samt flere bilaterale avtaler

Konvensjon om bistand (assistanse) i tilfelle av en nukleær ulykke eller radiologisk krisesituasjon (26. september 1986)

Konvensjon om konsekvensutredninger for tiltak som kan ha grenseoverskridende miljøvirkninger (ESPOO-konvensjonen) (25. februar 1991)

Konvensjon om bevaring av det marine miljø i Nordøst-Atlanteren (OSPAR-konvensjonen) (22. september 1992)

Konvensjon vedrørende kjernefysisk sikkerhet (20. september 1994)

Felleskonvensjonen om sikkerhet ved håndtering av brukt kjernebrensel og sikkerhet ved håndtering av radioaktivt avfall (29. september 1997)

Tilleggsprotokoll til Avtale mellom Norge og Det internasjonale atomenergibyrå (IAEA) om utføring av sikkerhetskontroll i forbindelse med traktaten om ikke-spredning av kjernefysiske våpen (29. september 1999)

---

---

## 6.2 Plan- og bygningsloven, kap. om konsekvensutredninger (VII-a) med forskrift

Utvinning, bygging og drift av kjernekraftverk samt avfallshåndtering må konsekvensutredes av tiltakshaver i henhold til plan- og bygningsloven kapittel VII-a og forskrift om konsekvensutredninger. Trussel- og risikovurderinger ved virksomheten inkluderes i konsekvensutredningen. Forholdet til andre stater er regulert i plan- og bygningsloven § 33-3.

## 6.3 Atomenergilovgivningingen

Atomenergiloven ble utarbeidet og vedtatt fordi man i 1973 tok sikte på å fremlegge for Stortinget et forslag om bygging av konvensjonelle uranbaserte kjernekraftverk i Norge. I dag anvendes atomenergiloven først og fremst på Institutt for Energiteknikk (IFEs) forskningsreaktorer på Kjeller og i Halden, samt det kombinerte lageret og deponiet for lav og middelsaktivt radioaktivt avfall i Himdalen som eies av Statsbygg og drives av IFE. Atomenergiloven er derfor ikke tiltenkt eller tilpasset regulering av thoriumbasert kjernekraft.

Norge har ratifisert alle konvensjoner under IAEA som omhandler strålevern, strålingssikkerhet, ikke-spredning og atomberedskap. Eventuell kjernekraft i Norge vil likevel kreve ytterligere regulering. Slikt regelverk vil i stor grad kunne implementeres fra internasjonale retningslinjer slik som fra IAEA Safety Standards om:

- Strålevern
- Kjernefysisk sikkerhet
- Strålingsrelaterte aktiviteter som gruvedrift for utvinning av reaktorbrensel
- Avfallshåndtering og –deponering

Regelverk under EURATOM-traktaten er ikke bindende for Norge da denne delen av EUs regelverk ikke er omfattet av EØS-avtalen. Dette regelverket vil likevel bli vurdert i forbindelse med nyregulering dersom Norge skulle bli en kjernekraftnasjon. Det samme vil gjelde svensk og finsk regelverk om kjernekraft.

Atomenergiloven med forskrifter gir blant annet bestemmelser om:

- Konesjon for oppføring, eierskap og drift av atomanlegg samt løyve
- Tilsynsoppgaver til Statens strålevern
- Sikkerhetstiltak og beredskap
- Gebyr og avgift
- Atomansvaret (erstatning og forsikring)
- Kontroll med fredelig utnytting av atomenergi

Atomenergiloven tar utgangspunkt i et sett med definisjoner:

**§ 1** definisjoner (utdrag)

*” I denne lov menes med*

*(a) atombrensel:*

*spaltbart stoff som består av uran eller plutonium i metallisk form, i legering eller i kjemisk forbindelse, samt annet spaltbart stoff som departementet måtte bestemme;*

*(b) radioaktivt produkt:*

*annet radioaktivt stoff (herunder avfall) som er dannet eller blitt radioaktivt ved bestråling i forbindelse med framstilling eller bruk av atombrensel;*

*(c) atomsubstans:*

*atombrensel, bortsett fra naturlig uran og utmagret uran, samt radioaktivt produkt, unntatt radioisotoper som brukes til industrielt, kommersielt, jordbruksmessig, medisinsk, vitenskapelig eller undervisningsmessig formål eller som er bestemt for og uten videre brukelige til et slikt formål;*

*(d) atomreaktor:*

*innretning som inneholder atombrensel under slike forhold at spalting av atomkjerner kan oppstå i den og selv holde seg ved like i kjedereaksjon uten neutrontilførsel fra annen kilde;*

*(e) atomanlegg:*

*atomreaktoranlegg;*

*fabrikk for framstilling eller behandling av atomsubstans,*

*fabrikk for separasjon av isotoper i atombrensel,*

*fabrikk for opparbeiding av bestrålt atombrensel,*

*innretning for lagring av atomsubstans, bortsett fra innretning som er bestemt til bare å brukes til midlertidig oppbevaring under transport,*

*og etter departementets nærmere bestemmelse annen innretning der det fins atombrensel eller radioaktivt produkt;*

*....”*

Da thorium ikke er et spaltbart (fissilt) grunnstoff, faller ikke thorium inn under ovenstående definisjoner på verken (a) atombrensel, (b) radioaktivt produkt eller (c) atomsubstans. Tilsvarende vil et akseleratordrevet system basert på thoriumbrensel ikke falle inn under definisjon (d) atomreaktor.

### 6.3.1 Konesesjon

Atomenergiloven kapittel II inneholder bestemmelser om konsesjon for oppføring, eierskap og drift av atomanlegg, samt løyve, se blant annet:

**§§ 4 og 10** konsesjon for atomanlegg (utdrag)

*Oppføring, eierskap og drift av atomanlegg krever konsesjon av Kongen (Regjeringen)*

*Myndigheter: OED for kjernekraftverk, HoD for andre former for atomanlegg*

*”Konesesjonen skal gjelde for et bestemt driftssted.”*

*”Konesesjon til bygging av atomkraftverk bør ikke gis før Stortinget har gitt sitt samtykke.”*

*”Strålevernet skal forberede og avgi innstilling om alle søknader om konsesjon og løyve.”*

---

Siden atomenergilovens definisjon av atombrensel ikke omfatter thorium, ville en ren thoriumbasert reaktor heller ikke falle inn under lovens definisjon av atomreaktor. Som tidligere nevnt, vil en thoriumbasert konvensjonell reaktor imidlertid trenge tilsetning av fissilt uran eller annet fissilt materiale for å holde kjedereaksjonen i gang. Det er derfor sannsynlig at en slik reaktor likevel vil omfattes av lovens definisjon av atomreaktor, og derved være konsesjonspliktig.

Et akseleratordrevet system (ADS) basert på rent thoriumbrensel vil derimot ikke omfattes av lovens definisjon av atomreaktor fordi systemet vil være avhengig av en ekstern proton- eller nøytronkilde for å holde kjedereaksjonen i gang. Følgelig vil et ADS falle utenfor lovens begrep atomreaktor. For at et ADS skal dekkes av atomenergilovens konsesjonskrav mv., vil atomenergiloven måtte endres.

Det er gebyr for konsesjonsbehandling og avgift for tilsyn av atomanlegg som fastsettes av Kongen (Regjeringen), jf. atomenergiloven § 57.

Tilsynsoppgaver til Statens strålevern er omtalt i følgende paragrafer i atomenergiloven:

§§ 10, 11, 13, 14, mv

**§§ 10 og 11 (utdrag):**

*”Statens strålevern er det øverste faglige organ når det gjelder sikkerhetsspørsmål.”*

*”Statens strålevern skal føre løpende kontroll med oppføringen av atomanlegg.”*

*”Før et atomanlegg settes i drift, skal innehaveren ha godkjenning til dette av Statens strålevern.”*

*”Det påhviler Strålevernet å føre kontroll med overholdelse og gjennomføring av alle sikkerhetsmessige forskrifter og vilkår, samt pålegg gitt med hjemmel i denne lov.”*

*”Driften av et atomanlegg står under løpende tilsyn av Statens strålevern.”*

### 6.3.2 Øvrige sentrale bestemmelser i atomenergiloven

Krav i forbindelse med oppføring og igangsetting av atomanlegg fremgår av atomenergiloven § 11:

#### § 11

1. *Statens strålevern skal føre løpende kontroll med oppføringen av atomanlegg. Det skal særlig påse at vilkår og bestemmelser i konsesjonen blir fulgt, og at alle tiltak blir iverksatt som sikkerheten krever, derunder sikkerhetstiltak som er beskrevet i foreløpig godkjente sikkerhetsrapporter. Tiltak beskrevet i sikkerhetsrapporter kan Statens strålevern endre når ikke hensynet til sikkerheten taler mot det.*
2. *Før et atomanlegg settes i drift, skal innehaveren ha godkjenning til dette av Statens strålevern. Før slik godkjenning gis, skal Strålevernet forvisse seg om at:*
  - a. *anleggets tekniske standard, driftsforskrifter, sikringstiltak og beredskapsplan for uhell er forsvarlig,*
  - b. *anleggets ledelse og personell har de nødvendige kvalifikasjoner og klare ansvarsområder,*
  - c. *garanti er stillet i medhold av denne lovs § 35, jfr. § 37,*
  - d. *alle godkjenninger foreligger fra vedkommende myndigheter i henhold til lovgivningen ellers.*
3. *I god tid før atomanlegget settes i drift, skal innehaveren legge frem for Statens strålevern en fullstendig sikkerhetsrapport for anlegget.*
4. *Statens strålevern kan, når det finner det hensiktsmessig for sin bedømmelse av anlegget gi særskilt samtykke til begrenset prøvedrift på de vilkår som finnes påkrevet.*

Atomenergiloven § 15 omhandler innehavers plikt til å sikre mot skade:

#### § 15 (utdrag)

1. *Innehaveren av et atomanlegg plikter å holde anlegg og utstyr i forskriftsmessig og forsvarlig stand og å treffe alle nødvendige tiltak for å sikre at det ikke blir voldt skade som følge av radioaktivitet eller andre farlige egenskaper ved atombrensel eller radioaktivt produkt som finnes på anleggets område, eller som fjernes eller slippes ut derfra, eller som er under transport for innehaveren.*
2. *Likeså plikter innehaveren å treffe nødvendige tiltak for å sikre at anlegget etter nedlegging ikke blir til fare for den allmenne sikkerhet.*
3. *Tiltakene krever godkjenning av Statens strålevern.*
4. *Innehaveren og andre som får befattning med atombrensel eller radioaktivt produkt, plikter å treffe alle nødvendige tiltak for å sikre at det ikke blir voldt skade som følge av radioaktivitet eller andre farlige egenskaper ved stoffet*

---

Innehavers plikt til *melding om driftsforstyrrelser og uhell* er regulert i atomenergiloven § 16:

**§ 16** (utdrag)

*Innehaver av atomanlegg plikter uten opphold å melde fra til Statens strålevern om ethvert uhell og enhver driftsforstyrrelse som kan ha betydning for sikkerheten. Tilsvarende gjelder for den som driver virksomhet som er pålagt løyvetvang eller meldeplikt i eller i medhold av § 5, dog slik at tilsynsmyndigheten etter § 13 punkt 3 i tilfelle trer i stedet for Statens strålevern.*

.....

Denne bestemmelsen må sammenholdes med kravet i strålevernforskriften § 11 om å straks varsle Statens strålevern ved ulykker, uhell og unormale hendelser.

Når det gjelder *atomansvaret* (erstatning og forsikring) er dette regulert ved at Pariskonvensjonen med tilleggsprotokoller mv. gjennomført i Kap III i atomenergiloven.

Atomenergiloven § 51 handler om *kontroll med fredelig utnyttning av atomenergi*:

**§ 51 (utdrag)**

*”Kongen kan gi de forskrifter som trengs for å sikre og føre kontroll med at atomanlegg, utstyr for atomanlegg, atombrensel, radioaktivt produkt og andre materialer for atomenergiformål som er underlagt internasjonal sikkerhetskontroll etter avtale som Norge er tilsluttet, bare blir benyttet til fredelige og ikke-eksplosive formål. Norske inspektører skal i kontrolløyemed ha adgang til atomanlegg og til andre steder der materiale og utstyr som nevnt finnes eller antas å finnes. Inspektørene har rett til å få de opplysninger de finner nødvendige for å kunne fastslå om slikt anlegg, utstyr eller materiale bare nyttes til fredelige og ikke-eksplosive formål. I den utstrekning det følger av avtale om internasjonal sikkerhetskontroll som Norge er tilsluttet, skal også utenlandske inspektører ha slik rett til opplysninger og, ledsaget av norske inspektører eller bemyndigete personer, ha adgang til atomanlegg m m i samsvar med annet punktum.”*

Norge er tilsluttet avtale om internasjonal sikkerhetskontroll som nevnt i § 51:

- Avtale mellom Norge og Det internasjonale atomenergibyrå (IAEA) om utføring av sikkerhetskontroll i forbindelse med traktat om ikke-spredning av kjernefysiske våpen (1. mars 1972) og
- Tilleggsprotokoll til Avtale mellom Norge og Det internasjonale atomenergibyrå (IAEA) om utføring av sikkerhetskontroll i forbindelse med traktaten om ikke-spredning av kjernefysiske våpen (29. september 1999)

### 6.3.3 Eksport av thorium

Eksport av thorium reguleres av atomenergilovens *forskrift om besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale og flerbruksvarer §§ 11 og 12* (hhv melding til kontrollorganet og tillatelse fra Utenriksdepartementet (UD))

**§§ 11 og 12 (utdrag)**

*”Eksport er ikke tillatt uten at dette er særskilt angitt i løyvet.<sup>1</sup> Innehaveren skal omgående gi melding til kontrollorganet<sup>2</sup> etter avsendelse av materialet.*

*1 Jf. lov av 12. mai 1972 nr. 28 om atomenergivirksomhet § 5 nr. 2 siste punktum. ”*

*”Nukleært materiale og flerbruksvarer skal ikke eksporteres uten tillatelse fra Utenriksdepartementet.<sup>1</sup> Ved utførsel av nukleært materiale og flerbruksvarer vil den innvilgede utførselstillatelsen stille vilkår om at eksportøren rapporterer til Utenriksdepartementet på fastlagt skjema med beskrivelse av den utførte varen, vekt/kvantitet, navn og adresse på sluttbruker og tidspunkt for utførselen. Gyldig utførselstillatelse fra Utenriksdepartementet må fremlegges for Tollvesenet ved utførselen.*

*1 Jf. lov av 18. desember 1987 nr. 93 om kontroll med eksport av strategiske varer, tjenester og teknologi m.v., og tilhørende forskrift av 10. januar 1989 nr. 51 til gjennomføring av utførselsreguleringen for strategiske varer, tjenester og teknologi. ”*

der begrepet nukleært materiale omfatter thorium, spesifisert i § 2. Det følger imidlertid av bestemmelsen at malmer ikke regnes som nukleært materiale. Dette vil kunne ha betydning for scenario A i Figur 7 ved eksport av thoriumholdig malm.

#### § 2 (utdrag)

*"I denne forskrift menes med*

*a) nukleært materiale: plutonium, anriket uran, naturlig uran, utarmet uran, isotopen uran-233, thorium, samt ethvert materiale som inneholder ett eller flere av disse stoffer. Plutonium med mer enn 80 % plutonium-238 regnes også som nukleært materiale dersom det ikke er innoperert i pasienter som ledd i medisinsk behandling. Malmer regnes ikke som nukleært materiale.*

*b) flerbruksvarer: utstyr og ikke-nukleært materiale til bruk ved fremstilling, behandling og bruk av nukleært materiale, slik dette defineres i vedlegg II til Tilleggsprotokollen til Norges avtale om sikkerhetskontroll med Det internasjonale atomenergibyrået, IAEA."*

*j) kontrollorgan: Statens strålevern eller den institusjon som Statens strålevern utpeker til å gjennomføre intern sikkerhetskontroll*

#### 6.3.4 Import av thorium

Import av thorium reguleres av atomenergilovens forskrift om besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale og flerbruksvarer Kap II, som følger:

#### § 3 om løyve for besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale (utdrag)

*"1. Uten løyve av Helse- og omsorgsdepartementet må ingen besitte, omsette eller transportere nukleært materiale. Dette gjelder likevel ikke for besittelse, omsetning eller transport av naturlig uran, utarmet uran eller thorium for ikke-nukleære formål. Løyve trengs ikke i den utstrekning virksomhet er omfattet av konsesjon etter atomenergiloven § 4. Løyve gis på de vilkår som finnes påkrevet av hensyn til sikkerheten og andre allmenne hensyn.*

*2. Med grunnlag i kontrollorganets uttalelse innstiller Statens strålevern overfor Helse- og omsorgsdepartementet om hvorvidt løyve skal gis eller ikke.*

*3. Søknad om løyve til å besitte, omsette eller transportere nukleært materiale sendes Statens strålevern. (forts.)*

*4. Avsender og mottaker av nukleært materiale skal ved omsetning og transport av materialet omgående gi kontrollorganet skriftlig melding om type materiale, formål, avsenders og mottakers navn og adresse, mottaks- og avsendelsesdato og nøyaktig vekt av materialet."*

#### 6.4 Strålevernloven med forskrift

Strålevernloven med forskrift omhandler blant annet:

- Generelle krav (grunnleggende strålevernprinsipper)
- Kompetanse og opplæring
- Risikovurdering og beredskap



- Krav om godkjenninger (strålevernforskriften § 5)
- Yrkesmessig eksponering (strålevernforskriften kapittel IV)
- Bestemmelser angående det ytre miljø
- Strålevernets tilsynsrolle
- Reaksjonsmidler

#### 6.4.1 Strålevernprinsipper

Strålevernloven § 5 omhandler forsvarlighetsbegrepet som blant annet omfatter de grunnleggende strålevernprinsippene (berettigelse, optimalisering og dosegrenser).

Nedenfor er et utdrag fra Ot.prp. nr 88 (1998-99) deler av pkt 7.1.4 gjengitt, der de grunnleggende strålevernprinsippene utdypes:

- **Berettigelse.** *For virksomheter innebærer dette at det må kunne grunngis at fordelene ved virksomheten er større enn ulempene for individer eller samfunn.*

*Dette prinsipp kan for noen, f.eks. strålemedisinske virksomheter, være enkelt å demonstrere, men langt mer komplisert og omstendelig for andre som etablering av deponier for radioaktivt avfall.*

- **Optimalisering.** *Strålebruk og strålevern i virksomheter skal innrettes slik at doser til impliserte personer og antall eksponerte personer blir lavest mulig vurdert utfra praktiske, tekniske, økonomiske og andre forhold.*

*Dette innebærer at arbeid med strålevern må være en kontinuerlig prosess og integreres i virksomhetens gjøremål til enhver tid, siden forutsetninger stadig vil endres. Jo mer en reduserer dosene, desto dyrere vil som regel en ytterligere dosereduksjon være. Det vil i prinsippet finnes et optimalt punkt der ytterligere dosereduksjon ikke kan forsvares ut fra de kostnader som er involvert. Prinsippet omtales ofte som ALARA - en forkortelse for «As low as reasonably achievable.»*

- **Prinsippet om dosebegrensning.** *Som en øvre begrensning på doser til personer som berøres anbefales bruk av dosegrenser. Dosegrenser er tallfesting av øvre akseptable risiki en virksomhet påfører personer.*

*Dosegrenser er fastsatt for yrkeseksponerte og for individer i befolkningen generelt. Det er viktig å merke seg at dosegrenser er øvre akseptable verdier, og at samsvar med disse ikke er ensbetydende med at strålevernet i virksomheten er optimalisert. Etter optimalisering vil normalt doser til yrkeseksponerte og individer i befolkningen være betydelig lavere enn dosegrensene.*

#### 6.4.2 Risikovurdering, fysisk sikring og beredskapsplikt

Et helt sentral bestemmelse i strålevernforskriften er § 9 om risikovurdering, fysisk sikring og beredskapsplikt. Kravet til risikovurdering gjelder for håndtering av strålekilder og det er krav om å foreta en risikovurdering allerede i planleggingsfasen. Risikovurderingen skal gjøres i forhold til ansatte, andre personer eller (ytre) miljø. På grunnlag av risikovurderingen skal virksomheten, i tillegg til helt konkrete forskriftsfaste tiltak, foreta alle rimelige praktiske tiltak for å unngå eller redusere risikoen. Bestemmelsen inneholder også krav om at virksomheten skal utarbeide en beredskapsplan med mer for å håndtere restrisikoen.

#### 6.4.3 Krav om godkjenninger

Godkjenningskrav er fastsatt i strålevernforskriften § 5 og omfatter blant annet:

- Utslipp av radioaktive stoffer
- Anlegg for behandling, lagring og deponering av radioaktivt avfall
- Import og eksport av radioaktivt avfall

Strålevernet har hjemmel til å fastsette nærmere krav til avfallsdisponering, inkl. utslipp samt import og eksport i godkjenninger, jf. strålevernforskriften § 5 siste ledd.

Godkjenningskrav for utvinning av thorium er per i dag ikke nedfelt i strålevernforskriften.

Et slikt krav vil bli vurdert i forbindelse med kommende revisjoner av dette regelverket.

#### 6.4.4 Dosegrenser til allmennheten

Strålevernforskriften § 16 stiller krav om at en virksomhet skal planlegge skjerming og strålebruk slik at allmennheten ikke under noen omstendighet kan motta stråledoser som overstiger 0,25 mSv/år. Bestemmelsen er primært myntet på strålebruk i mer tradisjonell forstand og kravet er ikke motivert ut i fra noen spesifikke miljøhensyn. Som nevnt over har Strålevernet dessuten hjemmel til å fastsette nærmere krav til avfallsdisponering, inkl. utslipp i godkjenninger, jf. strålevernforskriften § 5 siste ledd. Dette tolkes slik at det innebærer adgang til å fastsette strengere krav til dosegrense enn § 16 skulle tilsi. I mangel av spesifikk dosegrense i godkjenning fra Strålevernet, vil det derimot gjelde en dosegrense på 0,25 mSv/år fra hver enkelt virksomhet.

#### 6.4.5 Yrkesmessig eksponering

Strålevernforskriften gir bestemmelser om yrkesmessig eksponering for ioniserende stråling i kapittel IV. § 20 stiller krav om klassifisering og merking av arbeidsplassen, § 21 regulerer dosegrenser og § 22 stiller krav om fastlegging av den personlige stråleeksponeringen. Et utdrag av § 21 er gjengitt under:

##### § 21 (utdrag)

*”All stråleeksponering skal holdes så lavt som praktisk mulig, og følgende dosegrenser skal ikke overskrides:*

- a) *Dosegrensen for arbeidstakere over 18 år er 20 mSv per kalenderår. Statens strålevern kan gi dispensasjon for enkeltpersoner, der det av hensyn til arbeidets art ikke er praktisk mulig å fastsette en årlig grense på 20 mSv. Det kan i slike tilfeller gis tillatelse til å praktisere en grense på 100 mSv over en sammenhengende 5-årsperiode, under forutsetning av at effektiv dose ikke overstiger 50 mSv i noe enkelt år. ”*

Grenseverdiene for yrkeseksponering er i overensstemmelse med internasjonale grenseverdier. Uavhengig av grenseverdiene er hovedregelen i § 21 at all stråleeksponering skal holdes så lav som praktisk mulig.

#### 6.4.6 Bestemmelser angående radioaktivitet i det ytre miljø

Strålevernloven med forskrift regulerer stråling i det ytre miljø. I strålevernforskriften stilles det krav om godkjenning av anlegg for behandling, lagring og endelig forvaring (deponering) av radioaktivt avfall samt for utslipp av radioaktive stoffer. Forøvrig stiller strålevernregelverket krav basert på strålevernlovens formål om å bidra til vern av miljøet, slik det fremgår av strålevernloven § 1. Disse kravene finnes i strålevernloven § 5, samt strålevernforskriften kapitler II, III og V.

Kapittel V omhandler særskilte bestemmelser om utslipp til miljøet og om avfallsbehandling av stoffer som avgir ioniserende stråling. Der stilles det blant annet krav om at radioaktivt avfall skal tas hånd om slik at det fører til minst mulig skade og ulempe, jf. § 25. Dette innebærer krav om at avfallsbehandlingen skal generere minst mulig radioaktivt avfall og foregå med bruk av beste tilgjengelige teknikk, (Best Available Technology, forkortet BAT). Kravet til BAT er utdypet i § 25 og innebærer at virksomheten, for å begrense avfallsproblemer, skal ta utgangspunkt i den teknikk som ut fra en samlet vurdering av nåværende og fremtidig bruk av miljøet og av økonomiske forhold, gir de beste resultater. Kravet om bruk av BAT er også knyttet opp til utslipp av radioaktive stoffer for å underbygge kravet om at utslipp unngås eller, om det ikke er mulig, holdes på lavest mulig nivå.

##### **kap. V (utdrag)**

*”Virksomheter som forårsaker utslipp av radioaktive stoffer, skal inneha godkjenning fra Statens strålevern, jf. § 5 bokstav o. Virksomhetene skal benytte beste tilgjengelige teknologi, slik at utslipp til miljø unngås eller holdes på laveste mulig nivå.” (forts.)*

*”Statens strålevern kan pålegge virksomheter som forårsaker eller kan forårsake radioaktiv forurensning eller stråling i miljøet, å gjennomføre undersøkelser og tiltak som med rimelighet kan kreves for å d) motvirke at forurensningen føre til skade eller ulempe.”*

*”Radioaktivt avfall skal tas hånd om slik at det fører til minst mulig skade og ulempe. Avfallsbehandlingen skal generere a) minst mulig avfall og b) foregå med bruk av best tilgjengelig teknikk”*

Generelt: I forbindelse med utslippsgodkjenninger fra Statens strålevern (iht strålevernforskriften § 5 bokstav o) kan Strålevernet sette krav til avfallsdisponering, herunder utslippsgrenser. Det er etablert forvaltningspraksis for at grenseverdier for radioaktiv forurensning ved utslipp settes lik eller noe strengere enn internasjonale anbefalinger (IAEA).

#### 6.4.7 Import

Import skal utføres på en forsvarlig måte i henhold til strålevernloven § 5. Videre vil import av thorium kunne omfattes av strålevernloven § 20 (import og omsetningsforbud):

*”Statens strålevern kan nekte import eller omsetning av ethvert produkt eller stoff og enhver vare som kan medføre en helse- eller miljørisiko på grunn av stråling, forutsatt at dette ikke strider mot internasjonale avtaler som Norge er tilsluttet.”*

---

### 6.4.8 Mangler

Etablering av norsk kjernekraft vil trolig forutsette en gjennomgang av strålevernloven og/eller forskrift for å avdekke behov og mangler i regelverket og for å sikre at dette regelverket i tilstrekkelig grad utfyller bestemmelser i atomenergiloven. Det vil for eksempel måtte vurderes å forskriftsfeste godkjenningskrav til utvinning av thorium.

## 6.5 Annet relevant lovverk

### 6.5.1 Forurensningsloven med forskrifter

Forurensningsloven regulerer vern mot forurensninger og avfall. Forurensningsmyndigheten (SFT) kan etter søknad gi tillatelse til virksomhet som kan medføre forurensning (§ 11). Forurensningslovens forurensningsbegrep omfatter stråling i den utstrekning forvaltningsmyndigheten (MD) bestemmer (forurensningsloven § 6). Per i dag regulerer forurensningsloven ikke radioaktiv forurensning fra kjernekraftverk.

### 6.5.2 Internkontroll

I henhold til forskrift om helse-, miljø og sikkerhetsarbeid i virksomheter (internkontrollforskriften) skal virksomheter sørge for systematiske tiltak som skal sikre at virksomhetens aktiviteter planlegges, organiseres, utføres og vedlikeholdes i samsvar med krav fastsatt i eller i medhold av helse-, miljø- og sikkerhetslovgivningen. Dette omfatter blant annet krav i stålevernlovgivningen, arbeidsmiljølovgivningen, forurensningslovgivningen og brann- og eksplosjonslovgivningen.

I følge atomenergiloven § 6 kan Kongen (Regjeringen) ved forskrift eller enkeltvedtak gi nærmere regler om internkontroll og internkontrollsystemer for å sikre at krav fastsatt i eller i medhold av denne loven overholdes. Et slikt krav kan derfor stilles som konsesjonsvilkår ifm atomanlegg. Forskriftsfesting av krav til internkontroll vil måtte vurderes i forbindelse med en revisjon av atomenergilovgivningen.

### 6.5.3 Energiloven

Energiloven gir krav om:

- konsesjon på anlegg for produksjon, omforming, overføring og fordeling av elektrisk energi med høy spenning
- områdekonsesjon for bygging og drift av slikt anlegg

## 6.6 Konsesjonssøknadsprosess

Proessen for en norsk konsesjonssøknad for et kommersielt kjernekraftverk vil kunne se slik ut:

1. Plan for utredningsprogram som grunnlag for konsekvensutredning fra forslagsstiller oversendes til ansvarlig fagmyndighet (med påfølgende høring)
2. Dette gir etter behandling grunnlag for et fastsatt utredningsprogram (fastsatt av ansvarlig fagmyndighet)
3. Fastsatt utredningsprogram gir grunnlag for konsekvensutredningen
4. Konsekvensutredning ved forslagsstiller
5. Konsekvensutredning og konsesjonssøknad etter atomenergiloven, oversendes OED samtidig
6. Høring av søknad med konsekvensutredning
7. Konsesjonssøknad med konsekvensutredning forelegges Stortinget?

- 
8. Behandling og innstilling fra Statens strålevern til OED
  9. OED innhenter vurdering og aktuelle konsesjoner/tillatelser fra berørte myndigheter, ferdigbehandler søknaden og fremlegger saken for Regjeringen
  10. Saken forelegges Stortinget
  11. Vedtak v/kgl. res. (atomenergiloven § 4 første ledd)

## 6.7 Oppsummering regelverk

Virksomhet relatert til norsk thoriumbasert kjernekraft vil blant annet måtte vurderes i forhold til følgende regelverk: Plan- og bygningsloven med forskrift, atomenergiloven med forskrifter, strålevernloven med forskrift, energiloven og forurensningsloven. Utvinning av thorium vil i tillegg måtte vurderes i forhold til bergverksloven og industrikonsesjonsloven.

Et konvensjonelt kjernekraftverk basert på thoriumbrensel vil sannsynligvis dekkes av atomenergilovens krav om konsesjon, i motsetning til et rent thoriumbasert akseleratordrevet system (ADS). Atomenergilovens definisjoner vil for å omfatte et ADS måtte endres til å inkludere enhver form for thoriumkraftverk.

Atomenergiloven ble imidlertid skrevet for å regulere uranbasert kjernekraft, og er ikke tiltenkt eller tilpasset regulering av thoriumbasert kjernekraft. I tilfelle et av scenarioene i Figur 7 realiseres, kan det derfor være behov for en gjennomgang av atomenergiloven, samt behov for utfyllende forskrifter, blant annet om sikkerhet og internkontroll til denne. Slike utfyllende forskrifter kan baseres på internasjonale krav og retningslinjer. Det kan også kunne være behov for enkelte endringer i strålevernloven og/eller forskrift. Det kan blant annet bli behov for å forskriftsfeste godkjenningskrav til utvinning av thorium.

Atomenergilovens forskrift om besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale og flerbruksvarer regulerer eksport av thorium. Eksport er ikke tillatt uten at dette er særskilt angitt i løyvet og thorium skal ikke eksporteres uten tillatelse fra UD. Der eksport av thorium tillates, er det meldeplikt til kontrollorganet (Statens strålevern) og UD.

Import av thorium forutsetter løyve i henhold til atomenergilovens forskrift om besittelse, omsetning og transport av nukleært materiale og flerbruksvarer § 3. Strålevernloven stiller krav til forsvarlig import av thorium, og gir Statens strålevern på visse vilkår, adgang å nekte slik import.

---

## 7 Referanser

Agostini P et al (2006). ENEA TRIGA RC-1 research reactor and TRADE project: An important contribution to the ADS roadmap. <http://www.euronuclear.org/meetings/rrfm2006/presentations/1-8%20Agostini,%20ENEA%20TRIGA%20RC-1.pdf> (07.07.08)

Dagens Næringsliv, 28. jan 2008. REC-gründer har atomplaner: Planene er klare for Norges første atomkraftverk. <http://www.dn.no/forsiden/naringsliv/article1300954.ece> (07.07.08)

ENEA, 2002. The Working Group on TRADE. The TRIGA accelerator driven experiment: Final feasibility report. March 2002.

GEO, April 2007. En stor ressurs – men har vi en forekomst? GEO 2007 april: 36-40. <http://www.geoportalen.no/sfiles/2/16/5/file/thorium36.pdf> (07.07.08)

GIF, 2002. A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems. GIF-002-00. Washington DC: U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee / Generation IV International Forum, 2002. <http://gif.inel.gov/roadmap/> (07.07.08)

GoI, 2007. Government of India. National report to The Convention on Nuclear Safety, Fourth Review Meeting of Contracting Parties, April 2008. New Dehli 2007. [www.dae.gov.in/press/cnsrpt.pdf](http://www.dae.gov.in/press/cnsrpt.pdf) (07.07.08)

IAEA, 2005. International Atomic Energy Agency. Thorium fuel cycle: Potential benefits and challenges. IAEA-TECDOC-1450. Wien: IAEA, 2005. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE\\_1450\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1450_web.pdf) (07.07.08)

IFE, 2008. Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project. Sikkerhetsforskning i 50 år: Haldenprosjektet 1958-2008. Halden: IFE, 2008. [http://www.ife.no/filer/hrp/hrp50aar/fss\\_download/Attachmentfile](http://www.ife.no/filer/hrp/hrp50aar/fss_download/Attachmentfile) (07.07.08)

IFE, 1998. Institutt for energiteknikk. Hvorfor har vi en forskningsreaktor på Kjeller? Kjeller: IFE, 1998. [http://www.ife.no/filer/ife\\_brosjyrer/forskningsreaktor\\_new/fss\\_download/Attachmentfile](http://www.ife.no/filer/ife_brosjyrer/forskningsreaktor_new/fss_download/Attachmentfile) (07.07.08)

Megon, 1973. Megon A/S. Thorium-fremstilling i Norge, Oslo 1973.

NOU 30, 2001. Vurdering av strategier for sluttlagring av høyaktivt reaktorbrensel. Avgitt til Nærings og Handelsdepartementet. Norges offentlige utredninger, NOU 2001:30. Oslo 2001. <http://www.regjeringen.no/Rpub/NOU/20012001/030/PDFA/NOU200120010030000DDDPDFA.pdf> (07.07.08)

---

NRPA, 2008. Norwegian Radiation Protection Authority. Potensielle miljøkonsekvenser fra thoriumrelatert industri. Strålevernnotat til Miljøverndepartementet datert 14.02.08. Østerås: Statens strålevern, 2008.

NRPA, 2007. Norwegian Radiation Protection Authority. Implementation of the obligations of the Convention on Nuclear Safety. StrålevernRapport 2007:7. Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2007.  
<http://www.nrpa.no/applications/system/publish/view/showLinks.asp?ips=1&archive=1002206>  
(07.07.08)

NRPA, 2006. Statens strålevern. Tre årig tilstandsrapport for konsesjonsbelagte anlegg ved Institutt for energiteknikk. StrålevernRapport 2006:24. Østerås: Statens strålevern, 2006.  
<http://www.nrpa.no/applications/system/publish/view/showLinks.asp?ips=1&archive=1001859>  
(07.07.08)

NRPA, 2005. Statens strålevern. Kartlegging av historiske utslipp til Kjeller-området og en vurdering av helsemessige konsekvenser. StrålevernRapport 2005:3. Østerås: Statens strålevern, 2005.  
<http://www.nrpa.no/applications/system/publish/view/showLinks.asp?ips=1&archive=1000182>  
(07.07.08)

Ot.prp. nr 88, 1998-99. Om lov om strålevern og bruk av stråling. Odelstingsproposisjon (1998-1999). Oslo: Sosial- og helsedepartementet, 1999.  
<http://www.regjeringen.no/nb/dep/hod/dok/regpubl/otprp/19981999/Otprp-nr-88-1998-99-.html?id=160048> (07.07.08)

OED, 2007. Olje- og energidepartementet. Utvalg skal se nærmere på bruk av thorium til energiproduksjon. Pressemelding Nr. 26/07. Oslo: OED, 2007  
<http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/pressemeldinger/2007/Utvalg-skal-se-narmere-pa-bruk-av-thorium.html?id=450226> (07.07.08)

Rubbia C. 1993. An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle accelerator. CERN/AT/93-47(ET). Geneve: CERN, 1993.

TRC, 2008. Thorium Report Committee. Thorium as an energy source – oppurtunities for Norway. Oslo: Olje og energidepartementet / Norges forskningsråd, 2008.  
<http://www.regjeringen.no/upload/OED/Rapporter/ThoriumReport2008.pdf> (07.07.08)

UIC, 2007. Uranium Information Centre, Australian Uranium Association. Safety of nuclear power reactors. Melbourne: World Nuclear Association, 2008. <http://www.uic.com.au/nip14.htm> (07.07.08)

UIC, 2007B. Uranium Information Centre, Australian Uranium Association. Thorium. Melbourne: World Nuclear Association, 2008. <http://www.uic.com.au/nip67.htm> (07.07.08)

Wethe PI. 2005. Reaktorsikkerhet. <http://www.ife.no/detaljer/kernekraft/Reaktorsikkerhet>

## VEDLEGG A:

### Ordliste

#### ADS

Konsept på forskningsstadiet som omtales som Akseleratordrevet System, og som består av to hovedkomponenter; en reaktorkjerne og en partikkelakselerator. Et ADS representerer en subkritisk reaktor – det vil si en reaktor der kjedereaksjonen kun kan opprettholdes dersom eksterne nøytroner tilføres via partikkelakseleratoren.

#### ALARA

Akronym for "As Low As Reasonably Achievable". Konsept for dosebegrensning lansert av den internasjonale strålevernkommisjonen (International Commission of Radiation Protection, ICRP), beskrevet og begrunnet i anbefalingene i ICRP Publication 60 utgitt i 1991.

#### Becquerel

Radioaktiviteten til et radioaktivt atomkjerne (en radionuklide) tallfester gjennomsnittlig hvor mange nedbrytninger som skjer per sekund blant atomkjernene. Enheten for radioaktivitet (også betegnet som "aktivitet") er Becquerel (forkortet Bq) oppkalt etter fysikeren Henri Becquerel.

#### Dose (absorbert dose)

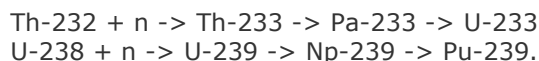
Absorbert dose er mengden energi et stoff absorberer når det blir bestrålt med ioniserende stråling. Måleenheten er Gray (Gy - joule/kg) som kan konverteres til måleenheten for doseekvivalent, Sievert (Sv) ved å vekte med strålingstypens relative biologiske effekt.

#### Fissilt materiale (=spaltbart materiale)

En hver substans som kan bli fisjonert (spaltet) av nøytroner, og som i spaltningprosessen frigir flere nøytroner, for eksempel U-235 og Pu-239.

#### Fertilt materiale (ikke-spaltbart materiale)

Ikke-fissilt materiale som ved absorpsjon nøytroner og påfølgende kjerneomvandlinger kan danne fissilt materiale. Fertile materialer er thorium-232 som ved absorpsjon av et nøytron kan konvertere til fissilt uran-233, og uran-238U, som ved absorpsjon av et nøytron konverterer til fissile plutonium-239.



#### Halveringstid

En halveringstid er den tiden det gjennomsnittlig tar før mengden av en radioaktiv isotop i et stoff, (og dermed mengden ioniserende strålingen den sender ut) er halvert. For eksempel har  $^{232}\text{Th}$  og  $^{239}\text{Pu}$  halveringstider på henholdsvis  $14,05 \cdot 10^9$  år og 24119 år.



**Ioniserende stråling**

Ioniserende stråling er stråling med høy nok energi til å ionisere et atom eller molekyl. Det kan være elektromagnetisk stråling (fotoner) eller partikkelstråling (for eksempel protoner, nøytroner, elektroner sendt ut fra en radioaktiv atomkjerne).

**Isotop**

Alle atomkjerner i ett og samme grunnstoff har samme antall positivt ladde protoner, men de kan ha et varierende antall nøytroner (og dermed varierende masse). Nøytroner har ca. samme masse som et proton, men ingen elektrisk ladning. Atomkjerner med samme antall protoner og nøytroner sies å være *samme isotop* av et grunnstoff, mens atomkjerner med like mange protoner, men ulikt antall nøytroner er *ulike isotoper* av samme grunnstoff. Alle isotoper (gresk isos - lik, topos - plass, sted) av et grunnstoff finnes på samme sted i det periodiske systemet og har mer eller mindre like kjemiske egenskaper.

**Kritikalitet**

En tilstand da man har en kjedereaksjon som er selvforsynende. Tilstanden til en kjernereaktor der en reaksjon initierer repetisjon av seg selv (en kjedereaksjon).

**Kritikalitetsreaktor**

En kjernereaktor som må opereres ved kritikalitet.

**LINAC**

Forkortelse for lineærakselerator (på engelsk: Linear Accelerator). En lineærakselerator er en partikkelakselerator der partikler (for det meste elektroner eller protoner) kan akselereres av elektrostatiske felt eller elektronmagnetiske bølger, og på denne måten oppnå svært høye energier.

**MWe**

Elektrisk utbytte fra et kraftverk oppgitt i MW (MegaWatt =  $10^6$  Watt). Det elektriske utbyttet fra et kraftverk er lik den totale termiske kraften multiplisert med effektiviteten til kraftverket. Effektiviteten til moderne lettvannsreaktorer er ca. 35 % sammenlignet med opp til 40 % for moderne kull-, olje- og gassdrevne kraftverk.

**MOX-brensel (Mixed oxide-brensel)**

Blandingsbrensel for kjernereaktorer, tradisjonelt ofte en blanding av uran og plutonium

**Radionuklide**

En radionuklide er et atom med en ustabil (radioaktiv) atomkjerne. Overflødig energi i atomkjernen fører til en nedbryting (radioaktivt henfall). I denne prosessen omdannes radionukliden ved å sende ut ioniserende stråling i form av fotoner, elektroner, nøytroner eller andre subatomære partikler. Det finnes både naturlige (for eksempel thorium-232) og kunstige radionuklider (for eksempel plutonium-239).

**Reaktivitets dampkoeffisient**

På engelsk “void coefficient of reactivity” – et mål for å estimere hvor mye reaktiviteten i en kjernekraftreaktor vil endre seg når tomrom (bobler) oppstår i reaktorkjernens moderator evt. i nedkjølingskretsen. Positiv dampkoeffisient kan bety at reaktiviteten i reaktorkjernen øker ved økt temperatur i kjølingskretsen, noe som kan danne positiv tilbakekobling d.v.s. videre økning i reaktivitet samt videre temperaturutvikling, hvilket kan føre til en løpsk reaktor, slik forløpet var ved Tsjernobyl-ulykken.

**Sievert**

Måleenheten Sievert (Sv) er den internasjonalt aksepterte SI-enhet for doseekvivalent (også omtalt under ”Dose”). En millisievert (mSv) er en tusendel av en Sv.

**Target**

Materiale som stråling sendes inn mot, hvilket forårsaker nukleær omdannelse i atomkjernene i materialet.

**Transmutasjon**

Omdannelse av de langlivede nuklidene i grunnstoffene plutonium, neptunium, americum og curium, generert ved drift av kjernekraftreaktorer ved nøytroninnfangning i uran-238.

## VEDLEGG B: Thorium versus uranbrensel (IAEA 2005)

Dette vedlegget er en oversettelse av materiale fra IAEAs dokument TECDOC-1450 fra 2005 der en sammenligning er gjort mellom thorium og uran brenselssyklus. Vedlegget gir et sammendrag av IAEAs vurderinger i dette dokumentet, innledet av en kort formulert oppsummering under.

### Fordeler ved thoriumbasert reaktorbrensel ( $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ )

sammenlignet med  $\text{UO}_2$  brensel

- Store naturlige forekomster av thorium
- Redusere plutoniumlagre (ved å destruere plutonium i thoriumreaktoren)
- Lenger brenselssyklus (6-9 år)
- Høyere forbrenningsgrad → mer energi ut av brenselet
- Fordelaktige kjemiske og termodynamiske egenskaper
- Spredningsresistens
- Bedre avfallsegenskaper → mye mindre langlivet avfall
- Kjemisk inert; mindre problemer med oksidering og mer stabilt avfall (lite reaktivt og lite løselig)

### Utfordringer ved thoriumbasert reaktorbrensel ( $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ )

sammenlignet med  $\text{UO}_2$  brensel

- Høyt smeltepunkt
  - krever høye temperaturer i brenselproduksjon
- Løselighetsproblemer ( $\text{ThO}_2$  har lav løselighet i salpetersyre)
  - Det fins kjemiske løsninger av problemet (HF), men de gir utfordringer med korrosjon
- $^{232}\text{U}$ -problemet
  - krever avansert skjerming fra  $^{208}\text{Tl}$ -gamma ved gjenvinning
- Protactiniumproblemet
  - gjør at man må vente 12 måneder før gjenvinning
- Lite erfaring

Fremtidsutsiktene for kjernekraft i verden har blitt lysere med progressive forbedringer i drift av eksisterende reaktorer og liberaliserte el-marked. På slutten av 2002 var 441 kjernekraft-reaktorer i drift, med en samlet kapasitet på 358 GW(e) og som genererer 16 % av den globale elektrisiteten. I et referansescenario, med en årlig vekstrate på 0,9 % i den globale kjernekraftkapasiteten frem til 2025, ville den totale installerte kjernekraft innen 2025 være på 438 GW(e).

Det er 3-4 ganger større forekomst av thorium (Th) enn uran (U) på jorda, og i flere land er det lett å utnytte Th-ressursene. Thorium i naturen inneholder ikke fissilt (spaltbart) materiale – men kun fertilt  $^{232}\text{Th}$ . Th har derfor blitt utnyttet i sammenheng med kjernekraft og kjernekraft-forskning, i kombinasjon med fissile materialer som  $^{235}\text{U}$  eller  $^{239}\text{Pu}$ , som omdanner fertilt thorium til fissilt  $^{233}\text{U}$ . På denne måten ”utvides” verdens ressurstilgang på fissilt materiale ved å benytte thorium i kombinasjon med fissile materialer.

I kjernekraftens pionertid, fra midten av 1950-tallet til midten av 1970-tallet, var det stor interesse verden over for å utvikle thoriumbrensel for kjernekraft. Tanken var å supplere de uranforekomstene man hadde, så de varte lenger. Spesielt var det aktuelt for de landene som ikke hadde egne uranforekomster, men derimot hadde egne thoriumforekomster. Det ble i denne perioden demonstrert at det *var* mulig å benytte thoriumbrensel i mange ulike typer reaktorer. Dette ble dokumentert grundig i flere store publikasjoner fra denne perioden (1950-1980), i tillegg til flere store og mer nylige publikasjoner fra IAEA og andre i perioden fra 2000-2005.

Den første entusiasmen for thoriumbrensel i kjernekraft ga seg da man fant nye og lettere tilgjengelige uranforekomster.

Det er først i den senere tid, når man har fått behov for brensel med nye og bedre egenskaper (behov for høyere resistens mot spredning av nukleært materiale, lenger brenselssyklus, større forbrenningsgrad, bedre avfallsegenskaper, reduksjon av de plutoniumlagre som bygger seg opp) at det igjen er blitt interesse for thoriumbrensel.

To internasjonale prosjekter (INPRO initiert av IAEA og GIF ledet av USA) vurderer thoriumbrensel.

Thoriumbrensel har følgende fordeler og ulemper:

### **Fordeler ved thoriumbasert brensel og brenselssyklus:**

#### **Store naturlige forekomster av thorium**

Det er 3-4 ganger mer thorium enn uran på jorda, og thoriumet forekommer i naturen som en enkelt utvinnbar ressurs i mange land, og har så langt ikke blitt utnyttet kommersielt. Thoriumbrensel er derfor et supplement til uranbrensel som sikrer mer langsiktig opprettholdelse av kjernekraft.

#### **Redusere plutoniumlagre**

Thorium brenselssyklus er en attraktiv måte å produsere kjernekraft i et langsiktig perspektiv med lavt radiotoksisk avfall. I tillegg, overgangen til thorium kunne bli gjort gjennom å forbrenne plutonium med våpenkvalitet ('weapon grade plutonium') eller sivilt plutonium.

#### **Høyere forbrenningsgrad (mer energi ut). Lenger brenselssyklus. Mindre langlivet avfall**

Tverrsnittet for absorpsjon av termiske nøytroner er ca. 3 ganger større enn for  $^{238}\text{U}$ . Dette betyr at  $^{232}\text{Th}$  har en høyere konversjon (til  $^{233}\text{U}$ ) enn  $^{238}\text{U}$  har (til  $^{239}\text{Pu}$ ) – hvilket betyr at  $^{232}\text{Th}$  er et mer fertilt stoff i en termisk reaktor enn  $^{238}\text{U}$  (men det er omvendt i en reaktor med hurtige nøytroner, hvor  $^{238}\text{U}$  er mer fertil enn  $^{232}\text{Th}$ ).

For det fissionable  $^{233}\text{U}$  er antall nøytroner som frigis per nøytron som blir absorbert, større enn 2 i et stort område av nøytronspekteret, i motsetning til for  $^{235}\text{U}$  og  $^{239}\text{Pu}$ . Dette betyr at 'breeding' for  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  brenselssyklus er mulig med alt fra raske til termiske nøytronspektra, i motsetning til  $^{238}\text{U}$ - $^{239}\text{Pu}$  hvor 'breeding' er avhengig av raske nøytronspektra.

### Fordelaktige kjemiske og termodynamiske egenskaper

Thoriumdioksid ( $\text{ThO}_2$ ) er kjemisk mer stabilt og har en høyere strålingsmotstand enn urandioksid ( $\text{UO}_2$ ). (Radioaktive) fisjonsprodukter fra  $\text{ThO}_2$  sendes ut 10 ganger mindre hyppig enn fra  $\text{UO}_2$ .  $\text{ThO}_2$  har positive termodynamiske egenskaper på grunn av sin høyere termiske ledningsevne og på grunn av mindre utvidelse av volum med økning i temperatur, sammenlignet med  $\text{UO}_2$ . Man forventer ut fra dette, at  $\text{ThO}_2$ -basert brensel vil ha fordelaktige egenskaper 'in pile' i en reaktor.

### Kjemisk inert

$\text{ThO}_2$  er relativt inert – og den oksiderer ikke – i motsetning til  $\text{UO}_2$  som lett oksiderer, hvilket skaper problemer når det må lagres før (eller etter) bruk.  $\text{ThO}_2$  kan lagres i lang tid før eller etter bruk, uten problemer med oksidering.

### Spredningsresistens

Th-basert brensel og thorium brenselssyklus har intrinsikk (les: iboende) resistens mot spredning på grunn av dannelsen av  $^{232}\text{U}$  via (n,2n)-reaksjoner med  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Pa}$  og  $^{233}\text{U}$ . Halveringstiden til  $^{232}\text{U}$  er bare 73.6 år og datterproduktene har også svært korte levetider, og noen av dem, som  $^{212}\text{Bi}$  og  $^{208}\text{Tl}$  sender ut sterk gammastråling. Ut fra de samme hensyn, kunne man benytte  $^{232}\text{U}$  som en attraktiv "bærer" av høyanriket uran og plutonium av våpenkvalitet (weapon grade plutonium eller WPu), for å unngå spredning til bruk med ikke-fredelige formål.

For forbrenning av WPu (plutonium med våpenkvalitet) eller sivilt plutonium i en 'once through' syklus, vil thoriumbasert brensel være å foretrekke fremfor uranbasert, fordi plutonium ikke dannes i den førstnevnte thoriumforbrenningen, og i tillegg dannes  $^{232}\text{U}$  i denne, som vil beskytte mot at det brukte brenselet benyttes i ikke-fredelige formål.

### Fordelaktige avfallsegenskaper og mindre langlivet avfall

I  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  brenselssyklus vil mye mindre mengder plutonium og mye mindre langlivede aktinider (Np, Am, Cm) dannes enn det som vil være tilfelle i  $^{238}\text{U}$ - $^{239}\text{Pu}$  brenselssyklus. På denne måten blir radiotoksisiteten i det brukte brenselet langt lavere for thoriumbrensel enn uranbrensel. På den annen side vil  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  brenselssyklus innebære dannelsen av  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{229}\text{Th}$  og  $^{230}\text{U}$ , som kan ha radiologiske effekter i lang tid.

## Utfordringer ved thoriumbasert brensel og brenselssyklus:

### Høyt smeltepunkt

Smeltepunktet til  $\text{ThO}_2$  er 3350 grader C, mye høyere enn for  $\text{UO}_2$  (2800 grader C). Dette vil kreve svært høye temperaturer (>2000 grader C) for å produsere høy tetthet  $\text{ThO}_2$ - og  $\text{ThO}_2$ -baserte blandingsbrensel (mixed oxide fuels).

### Løselighetsproblemer

$\text{ThO}_2$ - og  $\text{ThO}_2$ -basert blandingsbrensel er relativt inert (reagerer lite med andre stoffer) og (til forskjell fra  $\text{UO}_2$  og  $[\text{U}, \text{Pu}]\text{O}_2$ -brensel) løser seg dårlig i salpetersyre ( $\text{HNO}_3$ ). Det er derfor nødvendig å tilsette HF (Flussyre), hvilket igjen skaper korrosjonsproblemer i stålutstyr og rør i gjenvinningsanlegg. Korrosjonsproblemene minimeres ved å benytte aluminiumnitrat. Koking i THOREX-løsning (salpetersyre, flussyre og aluminiumnitrat) ved temperatur på ca. 120 grader C og lang oppløsningstid er nødvendig for  $\text{ThO}_2$ -brensel.

### $^{232}\text{U}$ -problemet

Det bestrålte Th- eller Th-baserte brenselet inneholder signifikante mengder  $^{232}\text{U}$ , som har en halveringstid på kun 73,6 år og som assosieres med de sterke gammaemitterende (gamma-utsendende) datterproduktene  $^{212}\text{Bi}$  og  $^{208}\text{Tl}$  med svært kort halveringstid. Som et resultat av dette, er det en stor stråledose som bygges opp ved lagring av brukt thoriumbrensel, eller separert  $^{233}\text{U}$ , noe som gjør det nødvendig å bruke automatiserte gjenvinning og refabrikkering i hotceller med betydelig skjerming. Slike tiltak vil øke kostnadene av aktiviteter i denne brenselssyklusen.

### Protactiniumproblemet

I omdanningsprosessen fra  $^{232}\text{Th}$  til  $^{233}\text{U}$  går man via  $^{233}\text{Pa}$ .  $^{233}\text{Pa}$  har en halveringstid på 27 dager som betyr at man har en relativt lang nedkjølingstid på ca 1 år for å fullføre omdanningen av  $^{233}\text{Pa}$  til  $^{233}\text{U}$ . Ved prosessering av brenselet er det viktig at  $^{233}\text{Pa}$  separeres ut før videre separasjon av  $^{233}\text{U}$  og thorium.

Prosessen med å separere uran, plutonium og thorium i det brukte  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$ -brenselet, er mulig å gjøre, men så langt ikke utviklet.

### Lite erfaring

Kunnskapsbasen og erfaring med thoriumbasert brensel og brenselssyklus er så langt svært begrenset og trenger å utvides før man gjør store investeringer til kommersiell utnyttelse av thoriumbrensel og brenselssyklus. Tabell 1 på side 4 i rapporten oppsummerer de eksperimentelle reaktorene og kjernereaktorene hvor thorium blir eller har blitt benyttet tidligere.

**VEDLEGG C:****Thoriumkjeden**

## Uran-235-kjeden (hoveddesintegrasjonssvei)

**U-235**

↓ Alfa

**Th-231**

↓ Beta

**Pa-231**

↓ Alfa

**Ac-227**

↓ Beta

**Th-227**

↓ Alfa

**Ra-223**

↓ Alfa

**Rn-219 (gass)**

↓ Alfa

**Po-215**

↓ Alfa

**Pb-211**

↓ Beta

**Bi-211**

↓ Alfa

**Tl-207**

↓ Beta

**Pb-207 (stabil)**



### Uran-238-kjeden (hoveddesintegrasjonssvei)

**U-238**

↓ Alfa

**Th-234**

↓ Beta

**Pa-234**

↓ Beta

**U-234**

↓ Alfa

**Th-230**

↓ Alfa

**Ra-226**

↓ Alfa

**Rn-222 (gass)**

↓ Alfa

**Po-218**

↓ Alfa

**Pb-214**

↓ Beta

**Bi-214**

↓ Beta

**Po-214**

↓ Alfa

**Pb-210**

↓ Beta

**Bi-210**

↓ Beta

**Po-210**

↓ Alfa

**Pb-206 (stabil)**



Statens strålevern  
Norwegian Radiation Protection Authority

**StrålevernRapport 2008:1**

Virksomhetsplan 2008

**StrålevernRapport 2008:2**

Совершенствование Российской нормативной базы в области обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации и утилизации радиоизотопных термоэлектрических генераторов

**StrålevernRapport 2008:3**

Mayak Health Report. Dose assessments and health of riverside residents close to "Mayak" PA

**StrålevernRapport 2008:4**

Bruk av laser og sterke optiske kilder til medisinske og kosmetiske formål

**StrålevernRapport 2008:5**

Strålevernets overvåking av radioaktivitet i luft – beskrivelse og resultater for 2000-2004

**StrålevernRapport 2008:6**

Strålevernet si overvåking av radioaktivitet i luft – resultatrapport for luftfilterstasjonar 2005-2006

**StrålevernRapport 2008:7**

Regulatory improvements related to the radiation and environmental protection during remediation of the nuclear legacy sites in North West Russia. Final report of work completed by FMBA and NRPA in 2007

**StrålevernRapport 2008:8**

Усовершенствование законодательного регулирования в области радиационной защиты и охраны окружающей среды при проведении реабилитационных работ в местах расположения объектов ядерного наследия на северо-западе России. Окончательный отчет по работам, выполненным ФМБА и НРПА в 2007 г

**StrålevernRapport 2008:9**

Indoor Tanning in Norway. Regulations and inspections

**StrålevernRapport 2008:10**

Miljøkonsekvenser og regulering av potensiell thoriumrelatert industri i Norge