



Høgskolen i Telemark



Institutt for energiteknikk

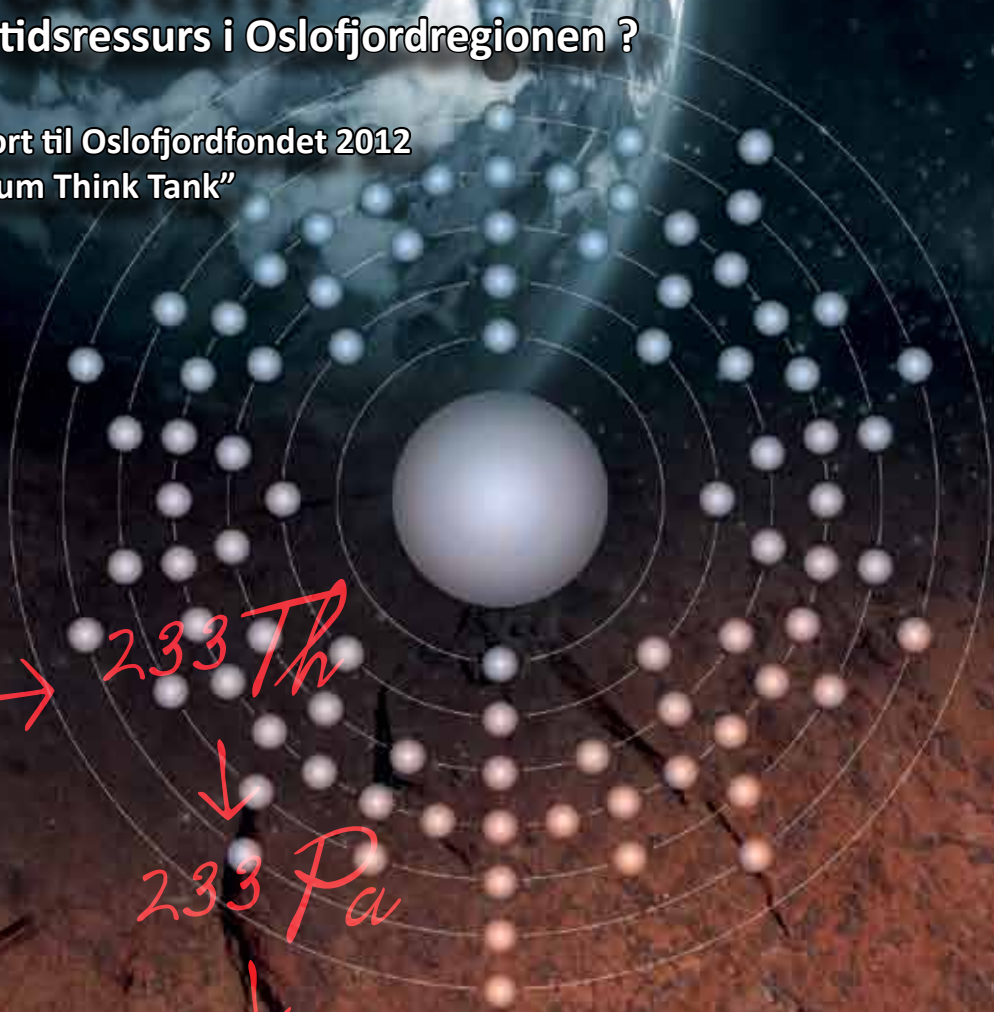
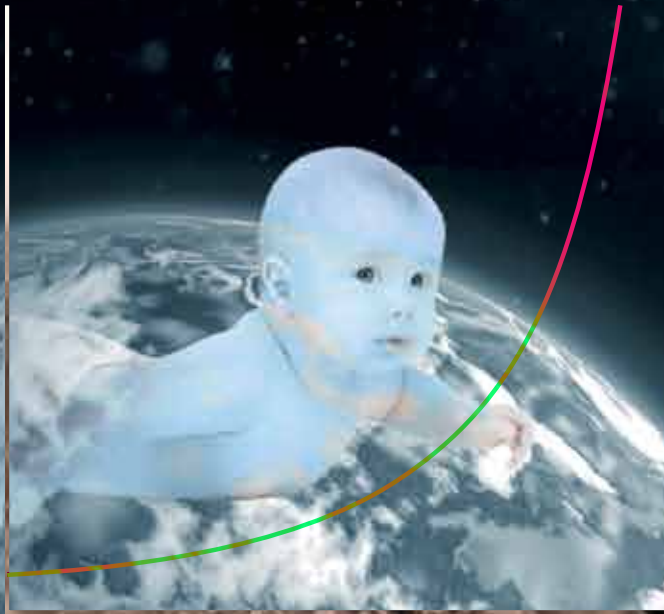


Regiongeologen
Buskerud Telemark Vestfold Fylkeskommuner

Thorium -

En framtidsressurs i Oslofjordregionen ?

Sluttrapport til Oslofjordfondet 2012
fra "Thorium Think Tank"



Teknisk info

Forsideillustrasjon: Yngve Berge Hansen, Artell.
Foto og øvrige illustrasjoner: S. Dahlgren
Produksjon av rapporten tll trykkeklar pdf: S. Dahlgren

Trykk: Pica AS, Tønsberg

Redaksjon avsluttet: Mai 2012
Offentlig presentasjon: 26. november 2012

DENNE RAPPORTEN UTKOMMER SOM EN SPESIALUTGAVE AV RAPPORTER FRA REGIONGEOLOGEN

Redigert av: Øivind Berg og Sven Dahlgren

Utgiver:
Regiongeologen
Buskerud, Telemark og Vestfold fylkeskommuner

Kontaktadresse:
Fylkeshuset, Svend Foynsgt 9, 3126 Tønsberg

Telefoner:
Sentralbord 333 44 000
Mobil 9069 2752

e-post:
svend@vfk.no
eller
sven.dahlgren@online.no

Referanse til denne rapporten:

**Berg, Ø., Bjørnstad, T., Dahlgren, S., Nøvik, S., Rondeel, W. og Totland, A., 2012:
Thorium - En framtidsressurs i Oslofjordregionen?
Thorium Think Tank rapport til Oslofjordfondet.
Rapport nr 2-2012,
Regiongeologen, Buskerud Telemark Vestfold fylkeskommuner. 24 pp.**

Thorium - En framtidressurs i Oslofjordregionen? INNHold

Innhold	Side
Prosjektets mandat og gjennomføring	4
Sammendrag	5
Verdens energiutfordring	6
Kan thorium bidra til å løse verdens energiutfordringer?	8
Thoriumforekomster - Globalt og i Norge	12
Fensfeltet - Thoriumforekomstenes geologi	13
Thoriumførende bergarter og Mineraler i Fensfeltet	14
Thoriumressurser i fensfeltet	15
Thorium fra Fensfeltet: Mer energi enn i all olje og gass fra norsk sokkel!	16
Utvinning av thorium fra Fensfeltet - Gruvedrift og oppredning	18
Økonomiske betraktninger for utnyttelse av thoriumenergi	20
Pågående undersøkelser og planer for anvendelse av thorium til energiproduksjon	21
Anbefalinger og konklusjoner	22
Referanser, ordforklaringer og forkortelser	23

Prosjektets mandat og gjennomføring

Mandat

Denne rapporten til Regionalt Forskningsfond Oslofjordfondet er en direkte oppfølging av thoriumutvalgets rapport fra februar 2008. Arbeidsgruppen - Thorium Think Tank - skal identifisere mulige FOU-tiltak for framtidig utnyttelse av thoriumforekomstene på Fensfeltet som energiressurs.

Målsetninger

Målet er å gi beslutningstakere et grunnlag for langsiktig planlegging av prosjekter som skal få full oversikt over de geologiske ressursene og utvikle nye metoder/teknikker for lønnsom utvinning av thorium fra Fensfeltet. Dette skal bidra til kompetansebygging og legge grunnlag for industriutvikling både nasjonalt og i regionen.

For Regiongeologen for Buskerud Telemark og Vestfold er dette også et delprosjekt i fylkeskommunenes arbeid med kartlegging og evaluering av mineralressurser i de tre fylkene. Dette arbeidet er en fortsettelse av regiongeologens evaluering av thorium på Fensfeltet (Regiongeolograpport 1-2008) etter henstilling fra Telemark fylkeskommunes fylkesutvalg 13. februar 2008.

Finansiering

Oslofjordfondet har bidratt med inntil 50 % til finansieringen av forprosjektet. Øvrig finansiering har kommet fra deltakende organisasjoner.

Denne rapporten

Denne rapporten er ment å være forståelig for ulike beslutningstakere uten dypere kunnskap innen kjemi, fysikk og geologi. Rapporten inneholder bidrag fra alle medlemmene av Thorium Think Tank. Den skal være en oppsummering av status og skal foreslå prosjekter som er viktige framover. Redaktører for bidragene har vært Øivind Berg og Sven Dahlgren.

Delrapporter

Prosjektdeltakerne har skrevet en rekke tematiske notater. De ulike prosjektdeltakerne har også hver for seg utført flere deloppgaver og har gjennomført møter med ulike aktører. Spesielt vil vi nevne:

- Berg & Nøvik: Thorium resources in Norway and potential application in generation-IV reactors. NOMAGE4 seminar.

- Bjørnstad: Extraction of thorium from norwegian mineral resources. NOMAGE4 seminar.
- Dahlgren: Thorium i Fensfeltet - Ressursanslag. Regiongeologen rapport 1, 2012.

Deltakere

Forprosjektet ble initiert og ledet av Øivind Berg, Institutt for energiteknikk (IFE).

Fra IFE deltok:

- Forskningsleder Øivind Berg, fysiker, IFE Halden.
- Seniorforsker Svein Nøvik, kjernekjemiker, IFE Halden.
- Avdelingsleder Tor Bjørnstad, kjernekjemiker, IFE Kjeller.

Fra regionen deltok følgende kompetansepersoner:

- Regiongeolog Sven Dahlgren, geolog/geokjemiker, Buskerud, Telemark og Vestfold fylkeskommuner.
- Førstelektor Arne Totland, kjernefysiker, Høgskolen i Telemark
- Professor Wilhelm Rondeel, fysiker, Høgskolen i Telemark

Vi har kalt arbeidsgruppen "Thorium Think Tank". Se foto på rapportens bakside.

Møter

Vi har hatt 6 prosjektmøter og det er skrevet møtereferater:

1. 1.12.2010: Kick-off møte Fylkeshuset i Vestfold, Tønsberg.
2. 2.3.2011: IFE Halden.
3. 13.4.2011: Høgskolen i Telemark.
4. 26.-27. mai: Bø Hotell og Fensfeltet. Også inkludert møte med Fen Minerals.
5. 4.8.2011: IFE Kjeller. Møte med spesialister på oppredning.
6. 28.10.2011: Høgskolen i Telemark. Også inkludert møte med REE Minerals.

Takk

Vi ønsker å takke følgende personer for kommentarer av ulik karakter til deler av tidligere versjoner av rapporten:

- Tom Heldal, Norge geologiske undersøkelse.
- Per I. Wethe.
- Henning Wold, Akademikerne
- Rune Kippersund, Vestfold fylkeskommune
- Harald Brekke, Oljedirektoratet

Innhold, vurderinger og konklusjoner er imidlertid fullstendig arbeidsgruppens ansvar.

Thorium - en framtidressurs i Oslofjordregionen? Sammendrag

Globalt energibehov og klimavennlig energiproduksjon

OECD antar at i 2050 har verdens befolkning økt til 9 milliarder, at energibehovet øker med 100% og at elektrisitetsbehovet øker med 150%. Dette betyr at CO₂-utslippet pr enhet energiforbruk må reduseres drastisk for å holde den globale oppvarmingen i sjakk. Framtidens energiproduksjon må derfor i stor grad være CO₂-fri og mest mulig effektiv.

Framtidsvisjoner for thorium

I følge FN's klimapanel, IPCC, er kjerneenergi en av de få energikildene som gir nær nullutslipp av drivhusgasser og som kan gi tilstrekkelig og sikker energiforsyning.

Kjernekraft står for 14% av verdens elektrisitetsproduksjon og benytter uran som brensel. Med dagens teknologi og forbruk vil de kjente uranressursene vare i 50 - 100 år. I tillegg til at uranressursene trolig er begrenset, produserer dagens uranreaktorer også mye atomavfall for langtidslagring. Allerede nå kan thorium brukes som brensel sammen med uran i eksisterende uranreaktorer (Generasjon-II/III).

Framtidige reaktorer (Generasjon-IV), som er på forskningsstadiet, vil kunne utnytte uranet mer effektivt. Disse reaktorene vil også være mer effektive for utnyttelse av thorium. Det unike ved å bruke thorium som brensel er at det produseres lite atomavfall som dessuten brytes relativt raskt ned. Hverken brenselet eller avfallsproduktene fra thorium er egnet til å produsere kjernefysiske våpen.

Globale og nasjonale thoriumressurser

De globale thoriumressursene er ca 4 ganger større enn ressursene av uran. Norge har en av verdens største kjente thoriumressurser, minst 56.500 tonn og kanskje så mye som 675.000 tonn. Disse ressursene forekommer i Fensfeltet i Telemark. **Thoriummengden i ressursanlagene har et potensielt energiinnhold som tilsvarer minst 10 og muligens 120 ganger mer enn energiinnholdet all i olje og gass som hittil er produsert pluss den energien som er i olje og gassreservene en i dag vet om, samt det en antar det er mulig å finne på norsk sokkel.**

Det er etter Thorium Think Tank's oppfatning en nasjonal oppgave å undersøke disse forekomstene svært grundig slik at de kan forvaltes i et langsiktig perspektiv og eventuelt utnyttes av våre etterkommere.

Thoriumutvinning

Thoriummineralene i malmene på Fensfeltet er så små, bare noen tusendels millimeter store, at det er en stor teknologisk utfordring å få ekstrahert thorium i industriell skala. I de samme bergartene der thorium forekommer på Fensfeltet, finnes også betydelige forekomster av sjeldne jordartsmetaller (REE). Det er hittil ikke blitt utviklet noen effektiv, industriell metode for å få ut hverken thorium eller REE fra disse bergartene. Uten å løse dette problemet vil de store thorium- og REE-forekomstene aldri kunne bli utnyttet.

Anbefalinger for framtidige forskningsprosjekter

Thorium Think Tank anbefaler videre forskningsinnsats på thorium innen følgende, grunnleggende problemstillinger:

Kjernefysikk

- Teoretiske studier av hvordan thorium kan brukes i reaktorer for å minimalisere produksjonen av langlivet atomavfall og for å forbedre sikkerheten.
- Bestemmelse av ulike fysiske parametre (innfangningstverrsnitt) for thorium og tilhørende atomer.
- Forsøk med thoriumbrensel i eksisterende reaktorer og i nye reaktorkonsepter under utvikling.

Thoriumressursene i Fensfeltet

Det bør etableres et ambisiøst prosjekt, som kan samordne viktige forskningsoppgaver vi står overfor i Fensfeltet. Dette må omfatte:

- Avgrensning av utnyttbart volum med thorium og REE malmer på Fensfeltet i tre dimensjoner ned til 500 m dyp. Dette vil kreve omfattende og detaljerte geologiske undersøkelser på overflaten kombinert med et strategisk program for kjerneboringer av mange dype borhull.
- Bedre karakterisering av de geologiske, mineralogiske, kjemiske og fysiske egenskapene til bergartene der REE og thorium i Fensfeltet forekommer.
- Det må gjennomføres innovative forskningsprosjekter for å finne metoder som er egnet for å ta ut thorium og REE fra Fenbergartene i industriell skala.

Bakgrunn for rapporten

Dette arbeidet er en direkte oppfølging anbefalinger i av rapporten fra "Thoriumutvalget" fra 2008 og Regiongeologens rapport nr 1, 2008.

Verdens energitutfordring

Velstandsutvikling er sterkt koblet til tilgang på kostnadseffektiv energi. Fortsatt utvikling for alle som ikke bor i verdens rikeste land, forutsetter tilgang på billig energi. Samtidig representerer nesten all forbruk av energi en miljømessig og klimamessig belastning. Balansering av økonomisk vekst, energiforbruk og klimaproblemer er et av verdens største dilemmaer og representerer en av vår tids største politiske utfordringer.

Verdens energibehov

Verdens energiforbruk øker raskt. Energisikkerhet er et voksende globalt anliggende både politisk og økonomisk, samt at det har en økologisk klimautfordring. Scenarier utarbeidet av IEA og OECD NEA viser at i 2050 er befolkningsøkningen 50%, energibehovet går opp 100% hvorav elektrisitetsforbruket øker med 150% (figur 1). I dag har 1,3 milliarder mennesker ikke tilgang på noen form for elektrisitet.

Fremtidens energiløsninger vil åpenbart bli underlagt strenge klimapolitiske rammer der lave utslipp av CO₂ vil være et overordnet hensyn. Hvis den globale temperaturstigningen skal begrenses til 2°C målt i forhold til det førindustrielle nivå, må det globale utslippet av klimagasser reduseres med 50 – 85 % innen 2050, i følge det internasjonale klimapanelet, IPCC (IPCC 2007). For å nå dette målet må industrilandenenes utslipp ned med hele 80-95% innen 2050. Det årlige, globale utslippet av CO₂ er 34 milliarder tonn. For å få et inntrykk av hvor mye dette er, kan vi tenke oss at vi kjøler det ned slik at det blir til blokker av tørris (d.v.s. frossen CO₂). Tørrisen vil da kunne samles i en pyramide som er 2500 meter høy og 20 kilometer i omkrets. Hvis vi ikke vil slippe dette direkte ut i atmosfæren må det lagres for all framtid.

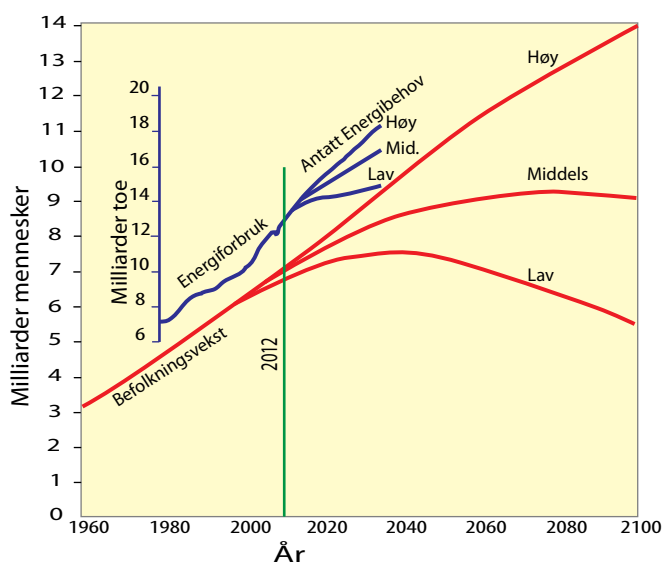
Menneskehetens bruk av diverse energiformer har skiftet over tid. I hovedsak en utvikling fra bruk av fornybare kilder, primært bioenergi (ved) og over til fossile brensler. Verdens velstandsutvikling har så langt vært basert på tilgang til rimelig

og rikelig fossil energi. Energi inngår som en essensiell forutsetning for all prosessindustri og i matproduksjon. Sammenhengen mellom energiforbruk og levestandard er entydig. Dersom alle kinesere – 1,4 milliarder – skal opp på samme energiforbruk som en amerikaner, trenger verden ca. 100.000 TWh mer energiproduksjon per år, noe som tilsvarer ca. 1000 ganger hele Norges strømforbruk!

De fornybare kildene, unntatt vannkraft, har så langt kun hatt en relativt underordnet rolle i energiproduksjonen. Dramatiske endringer må til, både for nasjoners økonomi og for utnyttelse av tilgjengelige land- og havområder, dersom fornybare energikilder skal kunne ta vesentlige deler av den forventede veksten i verdens energiforbruk.

Med de mulige begrensningene som ligger i ny tilgang på gass og spesielt olje, vil det, selv med en stor satsing på fornybare kilder, trolig være kull som må dekke opp for en stor andel av veksten i utviklingslandene, med tilhørende utfordringer på utslipp lokalt og globalt. En betydelig andel av den økte bruken av kull vil gå til kraftproduksjon.

De fossile energikildene vil bli vanskeligere og vanskeligere tilgjengelig og stadig dyrere å produsere. Fossile energikilder kan bli lite tilgjengelige i løpet av de neste 200 – 300 år.



Figur 1
Prognosene for det globale energibehovet følger klart prognosene for jordens befolkningsutvikling.

I 2012 passerte jordas befolkning 7 milliarder (United States Census Bureau). FN's prognoser (røde kurver) indikerer at jordas befolkning kan bli 14 milliarder (Høyt anslag) i 2100. Verdens årlige energibehov (blå kurver) i 2012 er på drøyt 12 milliarder toe, mens behovet kan komme opp mot 18 milliarder toe i 2035.

Figuren er basert på:

United Nations. 2004. World population to 2300.

Energidata fra: World Energy Outlook 2011, OECD/IEA 2011. figur 2.1, side 70.

Klimautfordringer og kjernekraft

Konsekvensene ved utslipp av klimagasser, kostnadene forbundet med å håndtere dem, økt fokus på nasjonal forsyningssikkerhet, samt behov for et rimelig kraftprisnivå, bidrar sterkt til at flere nasjoner nå (re)vurderer kjernekraften som et alternativ. De siste hendelser i Japan, i tilknytning til jordskjelv og tsunami, kan midlertidig endre på dette i flere land, slik vi har sett i Tyskland. Samtidig vil det ikke være overraskende om man over tid, med sannsynlige økende kostnader for fossile energiråstoffer og ytterligere fokus på klimaproblemene, kan oppleve holdningsendringer. Det er verdt å merke seg at Finland har fire kjernekraftverk i drift, ett under bygging og har vedtatt å bygge to ekstra anlegg. Sverige har vedtatt en lovenndring som tillater å erstatte gamle verk med nye, men slik at det begrenses til 10 enheter i drift. Kjernekraften nevnes stadig som en del av løsningen på klimautfordringene. I følge FNs klimapanel (IPCC) er kjerneenergi en av de få energikildene med tilnærmet null klimagassutslipp som kan bidra signifikant til global strømproduksjon (figur 2 og 3).

Det er 435 kjernekraftreaktorer i drift i verden i dag. Disse er spredt over mer enn 30 nasjoner, og står samlet for en kraftproduksjon på ca. 2.500 TWh, ca. 20 ganger Norges årlige kraftproduksjon. Den samlede produksjonen utgjør omtrent 14 % av hele verdens kraftproduksjon. De store kjernekraft-områdene er USA, Japan og Europa inkludert Russland.

Byggeaktiviteten for nye anlegg er størst i land med høy vekst. Veksten i de senere årene har i stor grad vært i Asia. Spesielt utmerker Kina seg med å stå for 27 av de 63 anlegg som nå er under bygging, men Sør-Korea er også en betydelig kjernekraftnasjon og India bygger seg opp. IEA's prognoser for andelen av kjernekraft i fremtidens kraftforsyning har de senere år blitt justert oppover og deres fremtidsscenarier varierer fra 600 til 1400 reaktorer i drift i 2050.

Referanse for oppdatert informasjon finnes på: <http://pris.iaea.org/public/>

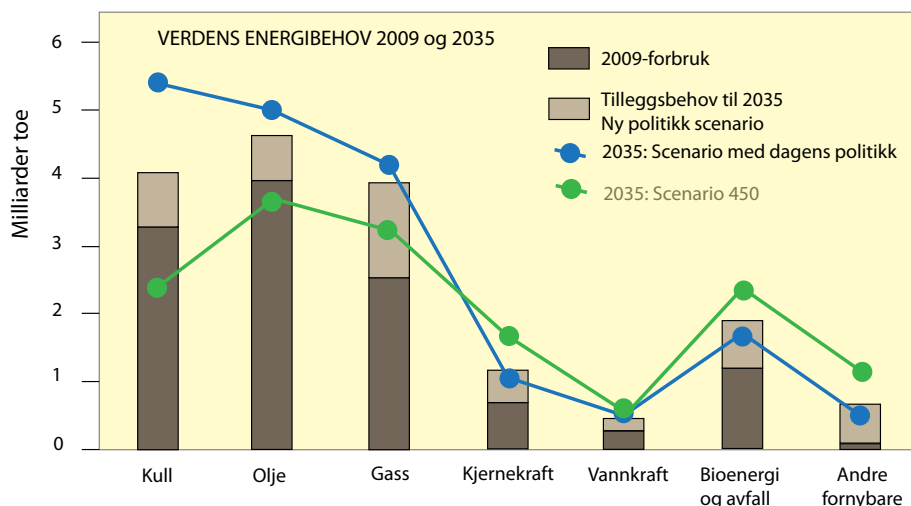
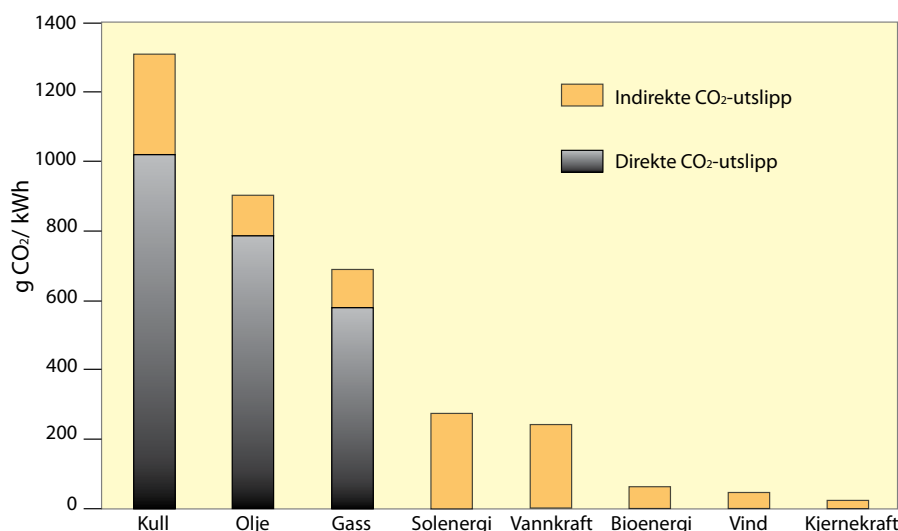


Figure 2
Verdens energibehov i 2009 og 2035 fordelt på de ulike brenselstypene. 3 scenarier er vist: -blå, dersom dagens politikk ikke endres -økningen i stolpediagram viser "ny politikk scenario" som begrenser utslipp slik at jordas temperatur ikke stiger mer enn 3,5 °C -grønn, Scenario 450 som innebærer at konsentrasjonen av drivhusgasser i atmosfæren begrenses til 450 ppm
Data fra: World Energy Outlook 2011@ OECD/IEA 2011, figure 2.2, side 72.



Figur 3
Samlet utslipp av CO₂ pr. kilowattime fra ulike elektrisitetproduserende systemer, regnet over normal levetid for et kraftverk. Indirekte utslipp omfatter bl.a. produksjon av de materialer som inngår i byggefasen av et kraftverk.
Basert på data fra IAEA.

Kan thorium bidra til å løse verdens energiutfordringer?

Kjernekraft gir nær null utslipp av klimagasser og har et potensial for å dekke en større del av verdens framtidige energibehov. I dag benyttes uran som brensel i kjernekraftreaktorer, og med dagens teknologi vil de kjente uranressursene ta slutt i et 50-100 års perspektiv. Thorium ble allerede demonstrert brukt til energiproduksjon i USA på 1970-tallet, og det er sannsynlig at ny teknologi kan benytte thorium i stor skala. Thorium er ca 4 ganger mer vanlig forekommende enn uran i jordskorpa, thoriumavfallet har langt kortere behov for oppbevaring enn uranavfallet, og thorium eller thoriumavfall er i praksis lite egnet for bruk i atomvåpen.

Dagens bruk av uran

Kjernekraftindustrien bruker årlig omkring 65 000 tonn uran. Med dette forbruket vil de kjente uranressursene vare i nesten 100 år. Naturlig uran inneholder i hovedsak to isotoper: U-238 (99,3 %) og U-235 (0,7%). Bare U-235 er spaltbart og kan opprettholde en kjedereaksjon. For å kunne brukes som brensel i en reaktor må naturlig uran «anrikes» slik at brenselet inneholder 2–5 % U-235. U-238 er på sin side et fertilt materiale (se ordforklaring nedenfor) som kan omdannes til spaltbart plutonium ved nøytroninnfangning, og derved bidra til energiproduksjonen.

Et moderne kjernekraftverk, en lettvannsreaktor (reaktor med vanlig vann) på 1000–1800 MW elektrisk effekt (MWe), har et brenselbehov på 25–30 tonn anrikt uran i året. Dette tilsvarer 150–180 tonn naturlig uran og brytning av 15 000–20 000 tonn uranmalm med en urangehalt på 1 %. Til sammenligning vil et kullkraftverk med tilsvarende energiproduksjon forbruke rundt 2–3 millioner tonn kull i året. Siden energikonsentrasjonen i uranbrenselet er så ekstremt høy, blir det relativt små mengder av uranråstoff som må behandles i prosesskjeden. Dette er det enkelt å transportere, og flere års forbruk av reaktorbrensel kan lagres på et relativt lite område. Ett kg uranbrensel er energimessig ekvivalent med 100 tonn kull, og det «økologiske fotavtrykket» blir derfor relativt lite.

Anvendelse av thorium i en konvensjonell termisk reaktor

Thoriumbrensel ble brukt i Shippingportkraftverket

Et av verdens første kjernekraftverk var den amerikanske Shippingportreaktoren. Den benyttet thorium som brensel i et demonstrasjonsprosjekt (1977-1982). Det ble påvist at den hadde 1,3% mer fissilt materiale etter 5-års drift enn ved oppstart. Omdanning av thorium til fissilt materiale i en lettvannsreaktor ble altså demonstrert for mer enn 30 år siden.

Thorium er i det siste igjen blitt foreslått som reaktorbrensel. Vi vil belyse hva som skiller thoriumbrensel fra uranbrensel, hvilke fordeler dette eventuelt har og hva som trengs for å benytte det som brensel i kjernekraftverk.

Omdanning av fertilt thorium til fissilt uran

Thorium finnes naturlig i bare en variant, thorium Th-232, og forekommer 4 ganger så hyppig som uran i den øvre jordskorpa. Thorium må omdannes til lett spaltbart materiale for å kunne bli utnyttet til energiproduksjon. Thorium kan best sammenliknes med U-238, siden thorium også er et fertilt materiale som gjennom bestråling med nøytroner fra en annen kilde omdannes til spaltbart materiale. Det skjer ved at atomkjernen fanger inn et nøytron og blir til U-233 i løpet av noen uker. Dette kan spaltes lett og mer effektivt enn U-235 som dagens reaktorer benytter seg av. Se figur 4.

THORIUM

Kjemisk kjennetegn: Th

Antall protoner i kjernen: 90

Eneste naturlig forekommende isotop: Th-232

Kjemisk karakteristikk: Metall

Tetthet: 11,7 g/cm³

Forekommer i naturen blant annet i mineralene:

- Thoritt, ThSiO₄
- Thorianitt, ThO₂
- Monazitt, (Ce,La,Nd,Th)(PO₄)

ORDFORKLARINGER

- **Proton:** En positivt ladet partikkel i en atomkjerne. Det er antallet protoner i kjernen som bestemmer hvilket grunnstoff vi har.
- **Nøytron:** Et nøytron er en nøytral partikkel, d.v.s. den har ikke noen elektrisk ladning, i en atomkjerne. Antallet nøytroner bestemmer hvilken isotop vi har av et grunnstoff.
- **Isotop:** Ulike isotoper av samme grunnstoff skiller seg fra hverandre ved at de har ulikt antall nøytroner i atomkjernen.
- **Nøytroninnfangning:** En prosess der en atomkjerne fanger inn et nøytron og lager en tyngre atomkjerne, en annen isotop, av samme grunnstoff.
- **Kjernefisjon:** Atomkjerner som splittes til mindre kjerner (andre grunnstoffer) under frigivelse av store energimengder, og som ofte produserer frie nøytroner.
- **Fertilt materiale:** En isotop som ikke fisjonerer, men som ved kjerneprosesser kan omdannes til en isotop av et grunnstoff som fisjonerer (figur 4).
- **Kjedereaksjon:** En serie med kjernereaksjoner hvor dannelsen av et produkt eller biprodukt forårsaker at det skjer enda flere reaksjoner.

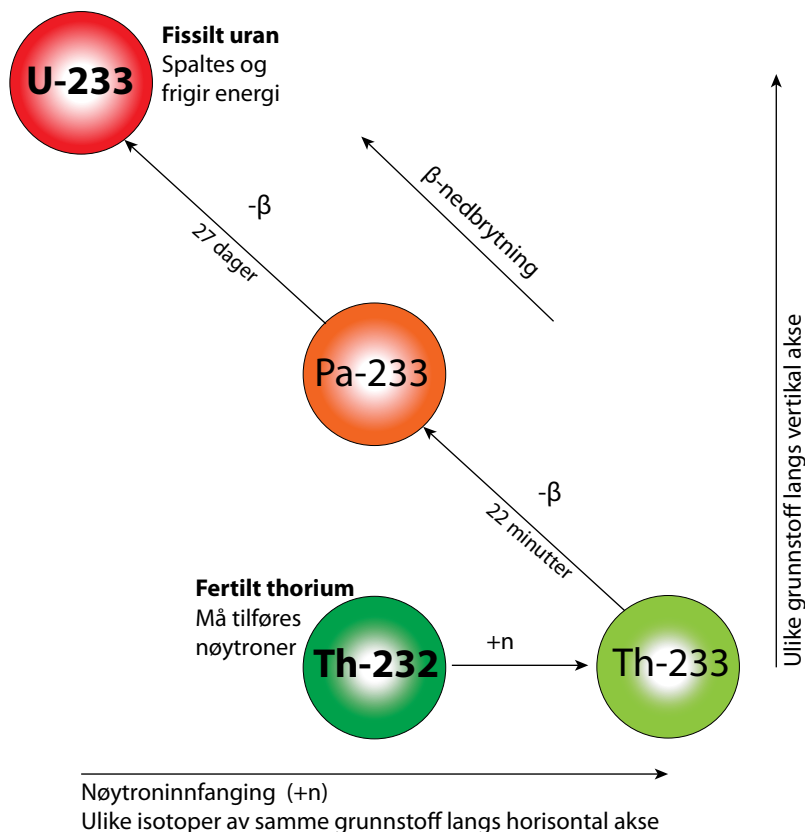
Figur 4.
Hovedprinsipp for produksjon av energi fra thorium.

Thorium er et fertile materiale, og den eneste thoriumisotopen som forekommer i naturen, er Th-232. Naturlig thorium må bombarderes med nøytroner slik at det dannes Th-233. Th-233 er ustabil og går over til Pa-233 ved at et nøytron spalter av en β -partikkel (elektron eller positron; β (beta)-betanedbrytning). Pa-233 er også ustabil og ved en ny betanedbrytning dannes U-233. Det er U-233 som er fissilt, d.v.s. at det kan spaltes og frigjøre energi. Når et nøytron i en atomkjerne avgir en betapartikkel, som er negativt ladet, blir nøytronet omformet til et proton. Antallet protoner i kjernen øker derved og atomet går over til et nytt grunnstoff.

FORKORTELSER

Vi har i denne rapporten valgt skriveformen Th-232, U-233 etc. for ulike isotoper. Dette kan også skrives ^{232}Th og ^{233}U etc.

Th = Thorium
U = Uran
Pa = Protactinium
Pu = Plutonium



Atomavfall fra urankraftverk må lagres svært lenge

Når uran blir bestrålt og forbrent i en reaktor, dannes det også plutonium-isotoper og andre tunge stoffer (fisjonsprodukter) med utgangspunkt i U-238. Disse nye stoffene utvikler mye varme, kan være radioaktive i svært lang tid og må derfor spesielt tas hensyn til når det brukte brenselet skal lagres og sluttforvares (figur 5 og 6).

Thorium som tilleggsbrensel i urankraftverk

Thorium (Th-232) kan anvendes som tilleggsbrensel i de fleste konvensjonelle termiske reaktorer, og ulike reaktortyper er blitt kjørt med thorium som tilsats. Thorium vil, etter bestråling med nøytroner og omdanning til spaltbart U-233, gi et bidrag til energiutbyttet i reaktoren. Forsøk i India og Canada, med thorium i tungtvannsreaktorer synes å være blant de mest omfattende i nyere tid. Tungtvann er spesielt godt egnet for bruk av thorium, i og med at færre nøytroner "forsvinner" i tungtvann enn i vanlig vann, noe som er særdeles viktig når thorium trenger "ekstra" nøytroner for å konvertere Th-232 til spaltbart U-233.

Thorium i trykk- og kokevannsreaktorer

Trykk- og kokevannsreaktorer er de mest utbredte typer reaktorer og kan bruke thorium på flere måter. Slike reaktorer kan effektivt brenne plutonium i thoriumbrensel uten å lage nytt plutonium som uunngåelig skjer i uranbrensel. Disse reaktorene kan også bruke thorium som effektiv nøytronabsorbator istedenfor andre nøytronabsorberende stoffer som er til ulempe etter at de har gjort sitt, mens det blir nyttig uran ut av thorium. Disse anvendelsene fyller et behov og er en god måte å introdusere thorium på i dagens reaktorer. Før slikt thoriumbrensel kan settes inn, må man prøvebestråle det for å skaffe data til sikkerhetsanalyser. Det kan skje i Halden-reaktoren der man har lang erfaring med utprøving av brenselstyper.

Thorium i reaktor med lettvann eller tungtvann

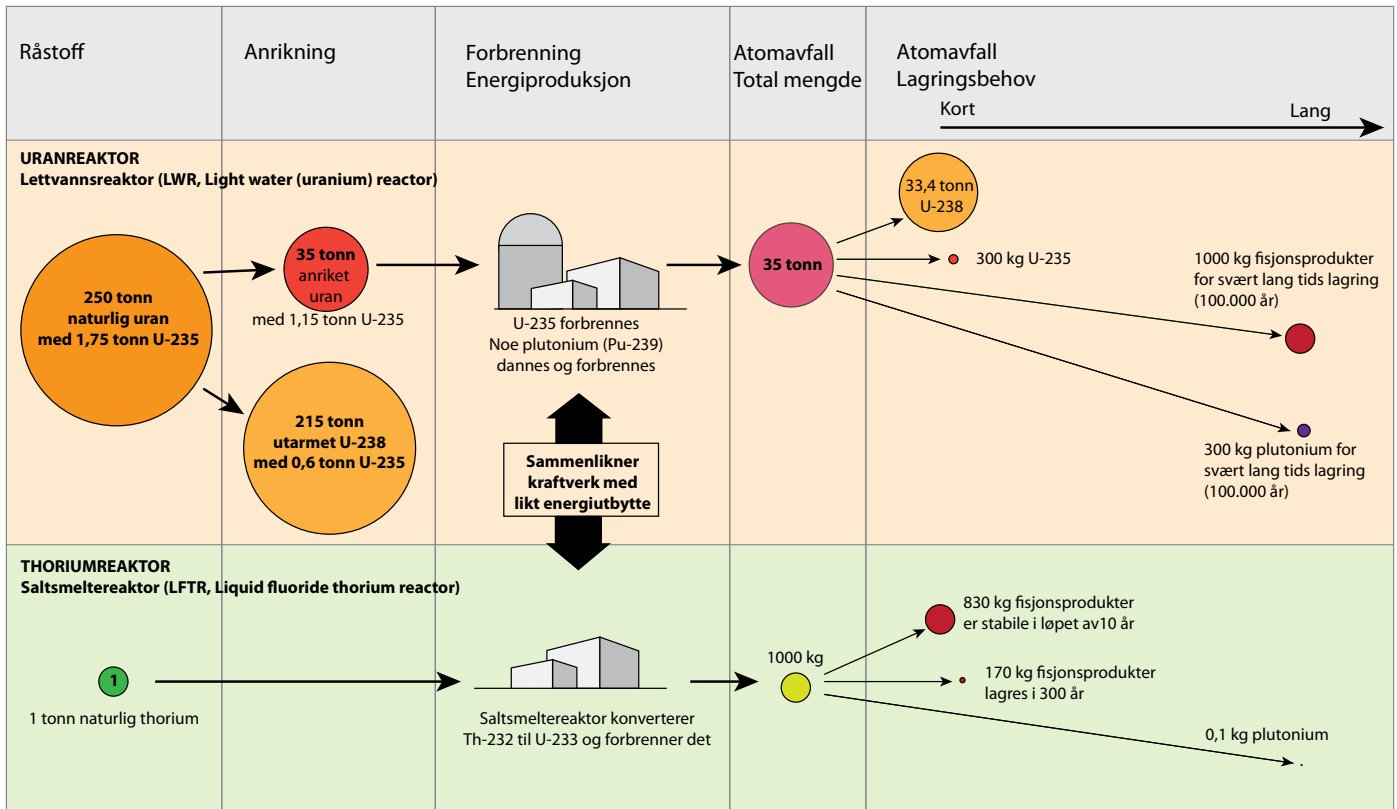
Ved anvendelse i en konvensjonell reaktor, med enten lettvann (vanlig vann) eller tungtvann, vil reaktoren ved oppstart ha en blanding av thorium med plutonium (Pu-239) eller uran (U-235 eller U-233) som nøytronkilde for å konvertere Th-232 til U-233. Ved oppstart av reaktoren vil all energi komme fra plutonium eller uran. For én enkelt lettvannsreaktor ser det ut som om en over tid kan få 50-60% av energien fra thorium.

Energiutbytte

Uten repressering, hvor spaltbart U-233 tas ut fra thoriumbrenselet, vil vi sannsynligvis ikke få ut mer enn et par prosent av det teoretiske innholdet. Vi kan sammenlikne med uran, som fra naturens side inneholder 0,7 % spaltbart U-235, og resten er fertile U-238. Noe av sistnevnte isotop omdannes til spaltbart Pu-239 under drift og bidrar til energiutbyttet med ca. 30%. Totalt får vi da utnyttet ca. 1% av råstoffet uran. Prøver med thorium i tungtvannsreaktorer tyder på at det etter en innledende fase med Pu-239 som driver, etter hvert vil være mulig å komme over i en modus hvor det i reaktoren dannes nesten like mye nytt spaltbart U-233 som det som forbrukes. Man er da meget nær at reaktoren vil være selvforsynt med spaltbart materiale.

Løsning av lagringsproblemet for plutonium

Lagring og håndtering av plutonium fra uranforbrenning er et problem, men ved å anvende plutonium sammen med thorium vil man kunne kvitte seg med plutonium, og samtidig få ut energi (figur 5 og 6).



Figur 5. Sammenlikning mellom et tenkt urankraftverk og et thoriumkraftverk (saltsmeltreaktor) som produserer like mye energi. Det brukes ett tonn naturlig thorium i thoriumkraftverket og avfallsproduktene trenger ikke lagres lenger enn i 300 år. Det er da blitt ufarlig. Et urankraftverk må ta utgangspunkt i 250 tonn naturlig uran. Dette må anrikes på U-235 gjennom krevende og dyre prosesser for å få en masse på 35 tonn anriket uran som kan brukes til energiproduksjon. Avfallet fra urankraftverket, minst 1,3 tonn, må lagres i tusener/hundretusener av år i sikre geologiske formasjoner. Figur modifisert etter Hargraves & Moir, American Scientist 2010.

Hvilke andre reaktortyper kan benytte thorium?

Breedere (formeringsreaktorer)

Dagens reaktorteknologi utnytter bare 1 % av uranet. Med formering (d.v.s at det dannes flere nye spaltbare atomer enn de som blir forbrukt) kan uran eller thorium bli utnyttet nesten fullstendig, og ressursene varer tilsvarende lenger. Formering med thorium er mulig med grunnlag i dagens termiske reaktorteknologi (om enn noe marginalt), mens formering med uran krever såkalte hurtige formeringsreaktorer (breedere) som danner plutonium ut av det ikke spaltbare U-238. Formeringsreaktorer er fortsatt på et utviklingsstadium og det vil ta tid før de blir tilgjengelig i stort omfang. I disse reaktorene er uran noe mer effektivt enn thorium. Nye reaktorer utvikles gjennom internasjonale samarbeid som GIF (Generation IV International Forum, www.gen-4.org) og europeiske SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, www.SNETP.eu).

Akselerator-dreven reaktor (ADS)

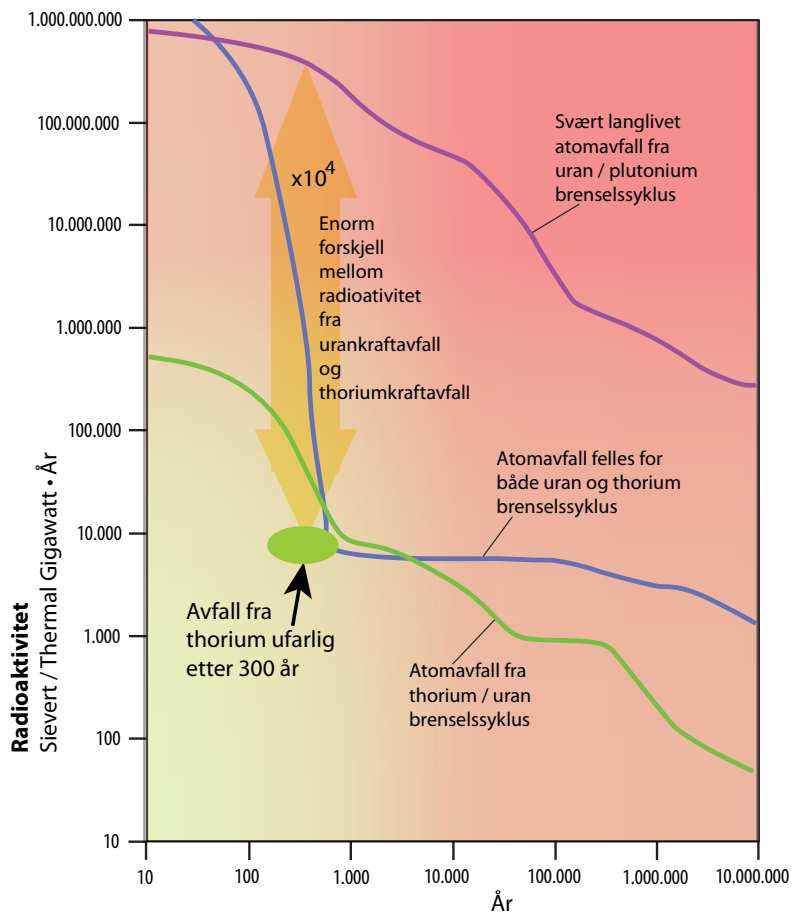
Ideen med en ADS, lansert av Carlo Rubbia, ble diskutert i Norge for noen år siden. I en slik reaktor blir det ikke frigjort nok nøytroner gjennom spaltning for å opprettholde en kjedereaksjon. Underskuddet blir dekket ved å skyte protoner mot et mål av tunge atomer slik at det produseres en skur av nye nøytroner, 30-50 stk pr. proton. Det byr på mange teknologiske utfordringer, ikke minst å utvikle en kraftig nok og driftssikker akselerator for å gi protonene den nødvendige høye energien. Det bygges nå en prototyp ved forskningssenteret SCK•CEN i Belgia med støtte fra EU. Den kan bruke thorium, men det primære målet er å bryte ned det mest problematiske atomavfallet fra eksisterende uranbaserte reaktorer.

Saltsmeltreaktoren (MSR; LFTR)

MSR (LFTR; se figur 5) er den av "Generasjon-IV" reaktortypene som passer best for utnyttelse av thorium. Den er allerede bygget og har vært i drift i flere år ved Oak Ridge National Laboratory i USA fra omkring 1970. Prosjektet ble imidlertid stoppet da det ikke passet inn i amerikanske myndigheters kjernefysiske program. Kina har annonsert at de vil utvikle MSR med thorium. Brenselet er oppløst i kjølemiddelet som er smeltede fluoridsalter og blir kontinuerlig renses og etterfylt. Temperaturen kan være fra 650 til 950 °C. Smeltede fluoridsalter er kjemisk stabile og tåler varme og stråling. Det er ikke høyt trykk i reaktoren, så vi kan ikke få gassseksplisjoner slik vi så i Fukushima og Tsjernobyl. Brenselet fra reaktoren kan bli kontinuerlig repressert i et kjemisk anlegg knyttet til reaktoren. Formering med thorium er spesielt effektiv når man fortløpende skiller ut stoffet protactinium som oppstår i overgangen fra thorium til uran og 99,9 % av thoriumet vil være omdannet til spaltbart U-233 etter 10 måneder.

Gasskjølt høytemperaturreaktor, "Pebble bed"

I en gasskjølt høytemperaturreaktor, "Pebble Bed", er moderator og brensel samlet i et større antall kuler, "pebbles", omtrent på størrelse med bordtennisballer. Under drift benytter man seg av en kontinuerlig inn- og utlasting av brenselkuler. Herved får man tilnærmet noen av de samme egenskapene som tungvanns- og saltsmeltreaktoren. En prototype, THTR-300, med thorium som brensel var i drift i Tyskland fra 1983 til 1989. Den ble stengt av pga tekniske og økonomiske problemer. Siden har særlig Sør-Afrika prøvd å videreutvikle teknologien, men det har stoppet opp pga økonomiske vanskeligheter.



Figur 6. Levetid for radioaktivt atomavfall fra h.h.v. uran- og thoriumkraftverk. Avfall fra thoriumkraftverk trenger langt kortere lagring enn avfall fra uran/plutoniumkraftverk. I en saltmeltereaktor produseres forholdsvis små mengder avfall i en thorium brenselssyklus. Dette avfallet må bare lagres i noen hundre år før det er ufarlig. Avfallet fra uran / plutonium brenselssyklus derimot består av betydelige mengder svært radioaktivt materiale som må lagres i tusener til hundre tusener av år. Legg merke til at skalaene på begge aksene er logaritmiske; d.v.s. det er en økning på 10 ganger mellom hvert intervall på akse. Figur etter Hargraves & Moir, American Scientist 2010.

Candu reaktorer

Candu reaktorer ble utviklet i Canada og er i drift der og i noen andre land. Reaktortypen, som er tungtvannsbasert, tar spesielt godt vare på nøytronene og kan bruke thorium på en forholdsvis uproblematisk måte. India utvikler en formeringsreaktor med utgangspunkt i denne teknologien.

Thorium brenselssyklus

For å bruke thorium som alternativt brensel i en konvensjonell reaktor må det utvikles en ny brenselssyklus. Dette er vesentlig mindre krevende enn å utvikle en ny reaktortype. Det gjenstår, imidlertid, fortsatt mye arbeid før en slik syklus vil være fullt kommersialisert.

I det lange perspektiv, med et stadig større antall konvensjonelle reaktorer som skal ha brensel, må vi anta at thorium vil kunne være et viktig alternativ og supplement. Thorium antas da brukt i tillegg til uran og/eller plutonium.

Bruken av thorium er ikke avhengig av innfasing av såkalte hurtige formeringsreaktorer, eller "breedere", og vil selv etter at disse måtte være introdusert i større skala kunne utgjøre et viktig element i en langsiktig bærekraft for kjernekraft.

Etablering av thoriumbrensel krever ny infrastruktur til produksjon og på lengre sikt også gjenvinningsanlegg for å ekstrahere U-233 fra brukt brensel til videre bruk i nytt brensel. Det er neppe mulig i direkte konkurranse med det vel etablerte og utprøvde uranbrenselet. Hvis man derimot introduserer thorium gradvis med anvendelser som supplerer uranbrensel, vil det kunne vokse og bli utvidet til en hel brenselssyklus med praktisk talt uuttømmelige ressurser. Norge kan bidra ved å støtte nødvendig forskning, ikke minst på universitetene, og utnytte thorium fra Fensfeltet når tiden kommer.

Tar vi utgangspunkt i reprosessering (gjenvinning) av brukt brensel er det vanskelig å sette noen teoretisk grense for hvor stor andel thorium som kan konverteres og spaltes til energi. Men det vil sannsynligvis også da være praktiske begrensninger, blant annet fordi det er grenser for hvor mange ganger brenselet kan reprosesserer.

Thorium i atomvåpen?

Kjernekraft reiser ofte spørsmål om misbruk. Under bestråling av U-233 oppstår det også U-232 som ikke kan separeres kjemisk fra U-233. Det er ganske radioaktivt og danner andre svært radioaktive stoffer. Strålingen fra disse gjør U-232/233 blandingen vanskelig, og i praksis lite aktuell å bruke til atomvåpen.

Mulighetene som thorium byr på:

- Thorium forekommer 4 ganger hyppigere i den øvre jord-skorpa enn uran. Ressurstilgangen er derfor svært stor.
- Thorium Th-232 formeres (breedes) i dagens termiske lettvannsreaktorer
- Formeringsproduktet U-233 kan spaltes effektivt
- Det dannes ikke plutonium
- Formering utnytter thorium fullstendig
- Det brukte thoriumbrenselet er lettere å håndtere enn brukt uranbrensel
- Reaktoravfallet trenger ikke å lagres mer enn noen hundre år (i kontrast til avfall fra uranreaktorer som må lagres i hundretusener av år)
- Noen andre fordelaktige nukleære, fysiske og kjemiske egenskaper kommer i tillegg og bidrar til sikker bruk og lagring
- Thorium er svært vanskelig og lite attraktivt å bruke til atomvåpen

Thoriumforekomster - globalt og i Norge

Store thoriumforekomster finnes mange steder i verden, men noen eksakt oversikt over ressursene finnes ikke. De største forekomster finnes blant annet i USA, Australia, Brasil, India - og, i Norge - i Fensfeltet ved Ulefoss i Telemark.

Thoriumforekomster globalt

Jordas kontinentale jordskorpe inneholder gjennomsnittlig ca 10 gram thorium pr tonn fjell, mens det gjennomsnittlige uraninnholdet er ca 2,5 gram pr tonn. Det betyr at thorium er ca 4 ganger mer vanlig enn uran i den kontinentale jordskorpa. For at vi skal ha en forekomst hvor det er industrielt mulig å utnytte thorium, må vi ha hatt en eller flere geologiske prosesser som har ført til en oppkonsentrasjon av mineraler som inneholder thorium.

Bergarter med høyt innhold av thoriummineraler er blant annet granitter og pegmatitter som har fått det høye thoriuminnholdet pga en magmatisk differensiasjonsprosess. Thoriummineraler er tunge, og ved forvitring og erosjon av thoriummineralrike bergarter blir ofte thoriummineralene sekundært oppkonsentrert langs elver eller på strender hvor bølger skyller vekk de lette mineralpartiklene, mens thoriummineralene og andre tunge mineraler blir liggende igjen. Slike forekomster, kalt placerforekomster, kan være svært rike. En av verdens største placere forekommer på sydvestkysten av India. Her skal det nå settes i gang stortilt utvinning fra strandsand (Geol Survey India, pers. meddelelse mars 2012) som bare kan kjøres vekk i hjullastere for raffinering. India er i dag et foregangsland for bruk av thorium i kjernekraftverk.

Har vi funnet alle aktuelle thoriumforekomster?

Virkelig store forekomster av thoriumholdige mineraler finner vi i USA, Australia, Canada, India, Brasil, Syd-Afrika, samt muligens i Tyrkia, Egypt og Grønland. Siden etterspørselen etter thorium på verdensmarkedet er svært lav, er det heller ingen stortilt leiting etter thoriumforekomster. Thorium framstilles i dag som biprodukt ved ekstrahering av andre metaller fra thoriumholdig malm, og thorium er å anse som et problemavfall. Denne situasjonen kan imidlertid snu meget raskt dersom det blir vanlig å bruke thorium som brensel i kjernekraftverk.

Thorium i Norge

Thorium forekommer i omtrent alle mulige bergarter, men i svært variable mengder. I Oslofjordregionen finner vi thoriumanrikede granitter og granittpegmatitter i Østfold, Kragerø-Bambleområdet, Nissedal-Fyresdal og Sigdal-Krødsheradområdet. I Krekling-Hokksund-Modumområdet forekommer relativt høye thoriumkonsentrasjoner i alunskifer, men disse skiferne er mer kjent for sitt høye uraninnhold. Vest for Oslofjorden finner vi thorium i syenitter og granitter av ulike typer. Alle disse forekomstene, muligens med unntak av Seteråsen i Larvik, er trolig langt under grensene for drivverdighet. Landets klart største thoriumforekomst finnes i Fensfeltet.



Figur 7. Viktige, kjente, store thoriumforekomster i verden. Sannsynligvis finnes det flere store forekomster som ikke er oppdaget enda.

Fensfeltet

- thoriumforekomstenes geologi

I Fensfeltet ble thorium anrikt gjennom en magmatisk prosess under en vulkan for ca 580 millioner år siden. I de østlige delene av Fensfeltet ble thorium ytterligere oppkonsentrert som følge av at supervarmt vann (noen hundre grader) fjernet lettløselige bestanddeler av bergartene, mens thorium ble liggende tilbake. Thorium finnes i høye konsentrasjoner øst i feltet.

Fensfeltets geologi

Fensfeltet ble dannet ved vulkanisme for 580 millioner år siden. Magmaene som strømmet ut på overflaten som lavaer og vulkanske askeavsetninger bygget den gangen opp en vulkan, men denne vulkanen er nå fullstendig erodert bort. De magmaene som aldri nådde opp til overflaten krystalliserte imidlertid til ulike bergarter på dypet under vulkanen, og det Fensfeltet vi ser nå, er et erosjonstverrsnitt av dette tilførselssystemet til vulkanen (Se kart figur 8).

Bergartene i Fensfeltet er ikke som normale bergarter dannet ved "vanlig" vulkanisme. Karakteristisk for Fensfeltet er at magmaene var karbonatrike, og de krystalliserte til kalksteiner som vi kaller karbonatitt.

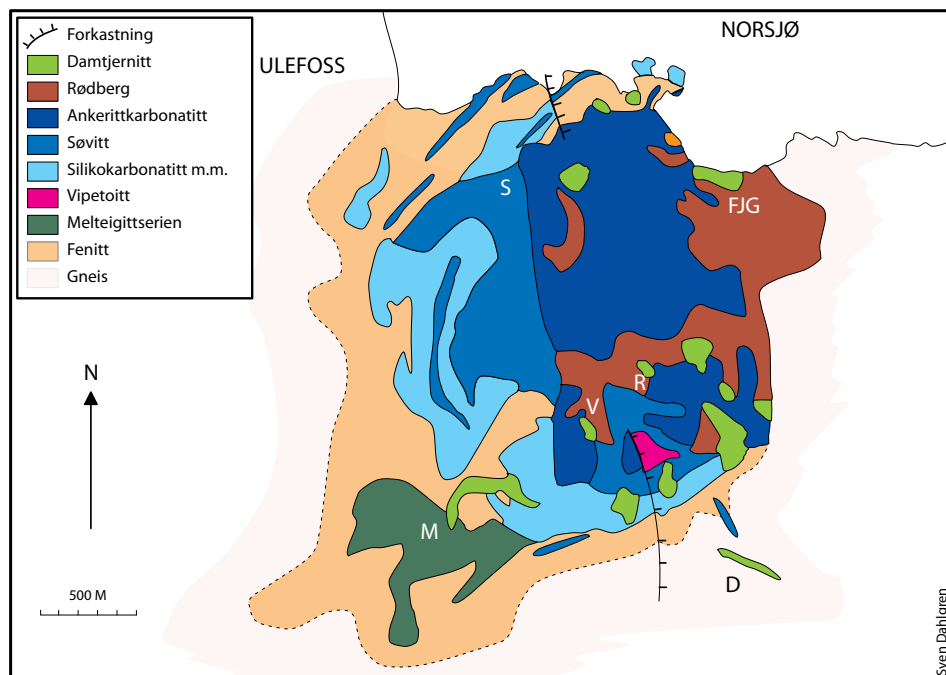
Magmaene som ble til karbonatitt og andre bergarter i Fensfeltet, ble opprinnelig dannet nede i mantelen, minst 80 km under det som var jordoverflaten på tiden Fenvulkanen var aktiv. Det erosjonstverrsnittet vi ser i Fensfeltet i dag, lå trolig ikke så dypt under vulkanen, - en kilometer kanskje?

Magmaene, for det var mange små pulser med magma som

trengte seg opp etter tur, fulgte mer eller mindre samme rørformede kanal fra mantelen mot overflaten. Hver magmapuls kunne være så liten at vi i dag finner "frosne magmaganger" som bare er fra en til noen få cm tykke. Andre pulser var mye større og enkelte førte til kraftige vulkanske eksplosjoner og laget magmatiske breksjer da de nærmet seg overflaten.

Magmaene i Fenvulkanen førte med seg mange gasser og væsker. Da magmaene krystalliserte på dypet, forsvant disse gassene og væskene, som var kjemisk veldig reaktive, ut på sprekker i sidebergartene og omvandlet disse.

Typisk for Fensfeltet er at det er myriader av ganger og magmatiske breksjer som skjærer hverandre på kryss og tvers nesten uansett hvor du ser. I tillegg er mange av disse blitt omvandlet av varme gasser og væsker som kom etterpå. Summen av alt dette er at Fensfeltet er geologisk svært komplekst. En annen følge er at vi har fått dannet uvanlige bergarter, med uvanlige konsentrasjoner av uvanlige grunnstoffer og uvanlige mineraler. Ett av disse grunnstoffene er thorium.



Figur 8. Geologisk kart over Fensfeltet.

Fensfeltet består av mange uvanlige bergarter som for første gang i historien ble beskrevet herfra (Brøgger 1921) og gitt navn etter stedene de ble funnet: M, Melteig funnsted for melteigitt; S, Søve, funnsted for søvitt; V, Vipeto, funnsted for vipetoitt; R, Rauhaug, funnsted for rauhaugitt (nå kalt ankerittkarbonatitt) og D, Damtjern, funnsted for damtjernitt. FJG = Fen Jerngruver. Kartet viser berggrunnen i svært grove trekk slik vi tror det er. I realiteten er feltet svært overdekket med løsmasser og kartet er et tolkningskart som mange steder baserer seg på ytterst få data eller bare "intelligente" gjetninger. Thoriumforekomstene finnes i den østligste delen av Fensfeltet, i bergartene rødberg og ankerittkarbonatitt.

Thoriumførende bergarter og mineraler i Fensfeltet

Rødberg og ankerittkarbonatitt er de thoriumførende bergartene på Fensfeltet. Thorium forekommer blant annet i mineralene thorianitt, ThO_2 og thoritt, ThSiO_4 . Noe thorium forekommer også sammen med sjeldne jordartsmetaller (REE) i mineralet monazitt, $(\text{REE}, \text{Th})\text{PO}_4$. Felles for alle thorium- og REE-holdige mineraler på Fensfeltet er at de bare er noen få tusendels millimeter store og sitter svært finfordelt i bergartene.

Rødberg

Rødberget er som navnet tilsier en rød bergart. Den forekommer i området med de gamle jerngruvene på Fen. Rødfargen skyldes finfordelte flak av ørsmå jernoksider (hematitt).



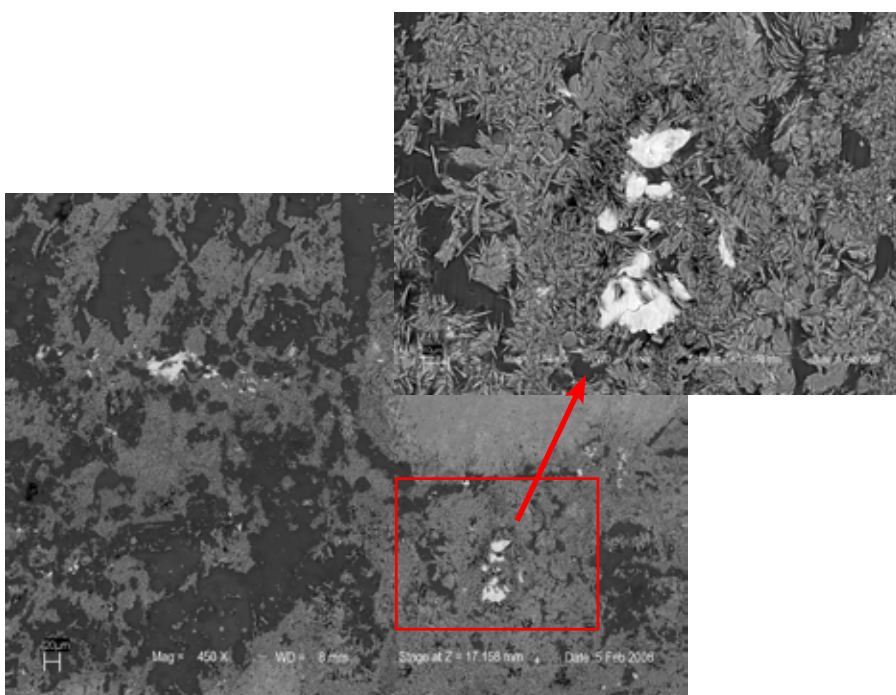
Figur 9. Rødvitret overflate av rødberg fra Gruveåsen. Thoriummineralene er ørsmå og sitter finfordelt i bergarten.

Ankerittkarbonatitt

Ankerittkarbonatittene består blant annet av det jernholdige karbonatmineralet ankeritt. Dette forvitrer lett i overflaten og bergarten får et rustbrunt, jordaktig utseende.



Figur 10. Brunvitret overflate av ankerittkarbonatitt ("rauhaugitt"). Thoriummineralene forekommer også i denne bergarten som svært små, finfordelte korn.



Figur 11. Thorium- og REE-mineraler i rødberg fra Gruveåsen sett i elektronmikroskop. Det lyse området nede til høyre på det nedre fotografiet, og på den øvre forstørrelsen, er thorianitt (et mineral som består av thoriumoksid). Det langstrakte "toget" med lyse flekker oppe til venstre på det nedre fotografiet er mineralet monazitt som inneholder sjeldne jordartsmetaller (REE). Legg merke til skalaen nede til venstre i begge fotografiene; den er på 20 mikron (20/1000 millimeter) i det nedre og 10 mikron i det øvre. Dette er typisk for størrelsen på både thorium- og REE-mineralene på Fensfeltet, og det er dette som gjør industriell ekstraksjon av både thorium og REE til en teknologisk utfordring.

Thoriumressurser i Fensfeltet

Der er målt thoriumkonsentrasjoner på opptil 4000 gram pr tonn rødberg, men gjennomsnittskonsentrasjonen varierer mellom 872 g/tonn og 361 g/tonn i ulike områder. I ankerittkarbonatittene sentralt i området er gjennomsnittskonsentrasjonen 485 g/tonn. Det er stor usikkerhet i anslagene av hvor store thoriumressurser som finnes på Fensfeltet. Nye anslag tyder på at det er minst 56.500 tonn, men muligens finnes det 675.000 tonn eller enda mer.

Totale thoriumressurser på Fensfeltet

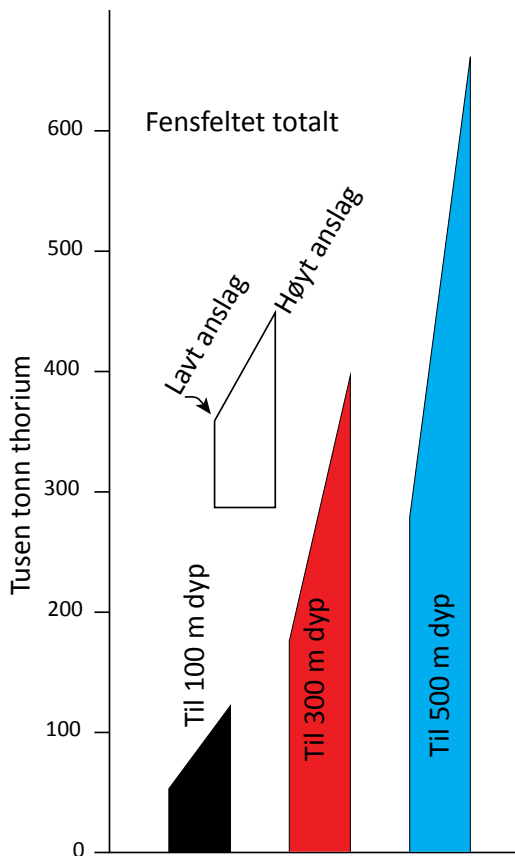
USGS og IAEA har tidligere listet opp Norge, d.v.s. Fensfeltet, som en av verdens største thoriumreserver. USGS har operert med 170.000 til 180.000 tonn, mens IAEA har operert med 132.000 tonn. Ingen har imidlertid kunnet gi noe svar på hva disse tallene er basert på.

Regiongeologen har foretatt nye ressursanslag for thorium i Fensfeltet. De totale thoriumressursene er betydelige (se tabellen og figur 12). Anslag over ressurser bare til 100 meters dypde utgjør mellom 56500 og 133000 tonn. Det er sannsynlig at de thoriumførende bergartene fortsetter mye lenger

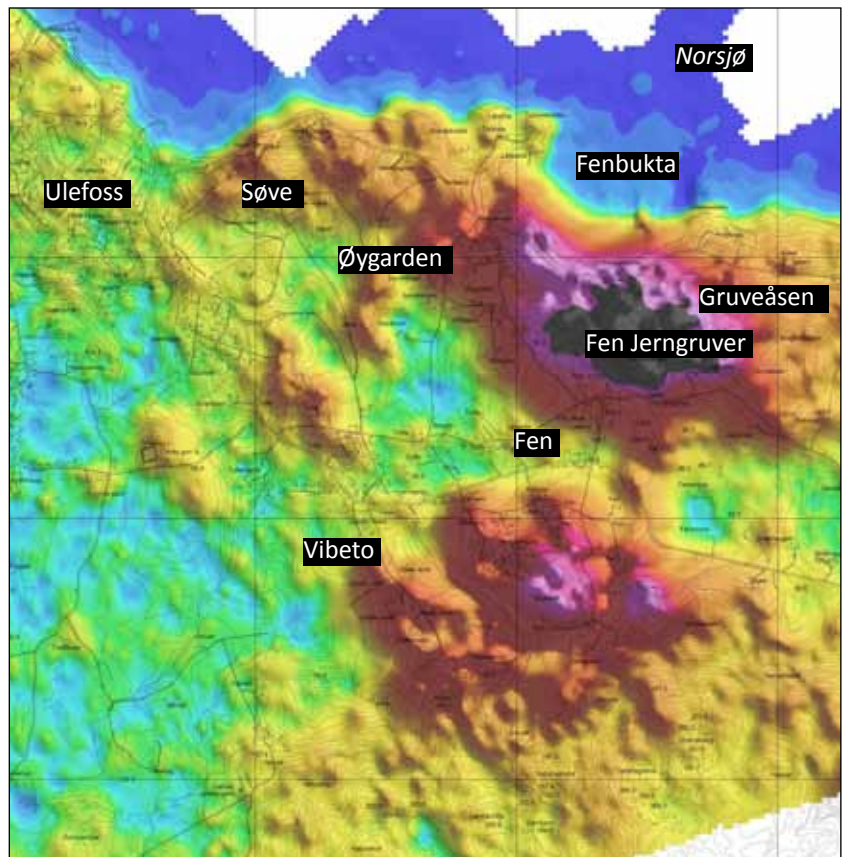
ned mot dypet, trolig ned til 500 meter eller enda mer. De totale thoriumressursene kan være, eller til og med overstige 670.000 tonn (Se Regiongeolograpport nr 1, 2012).

Ned til dypde	Lavt anslag	Høyt anslag
100 m	56 500	133 000
300 m	172 000	405 000
500 m	287 000	675 000

Tabell 1. Totale thoriumressurser i tonn for Fensfeltet.



Figur 12. Totale thoriumressurser i tusen tonn for Fensfeltet. Hver søyle angir et lavt og et høyt anslag for thoriuminnholdet i bergartene ned til angitt dyp.



Figur 13. Gammastrålingskart over den østre delen av Fensfeltet. Kartet viser gammastråling fra thorium og er målt av NGU med helikopter. Svart farge over Gruveåsen viser det høyeste strålenivået, lilla og røde farger viser noe lavere strålenivå. Områdene med blått og grønt har svært lave strålenivåer.

Thorium fra Fensfeltet:

Mer energi enn i all samlet olje og gass fra norsk sokkel !

Selv om det foreløpig er usikkert hvor mye thoriumressurser det er på Fensfeltet så er den potensielle energien fra dette thoriumet minst på størrelse med energien i all olje og gass som totalt er funnet og forventes å kunne bli funnet på norsk sokkel. Kanskje er energien i Fensfeltets thorium langt større.

Energimengden i thoriumforekomstene på Fensfeltet

Vi har i det foregående sett at det finnes minimum 56.000 tonn, og muligens 674.000 tonn eller enda mer, thorium på Fensfeltet. Dette kan potensielt produsere enorme mengder energi. For å få et begrep om hvilke energimengder det dreier seg om skal vi ta utgangspunkt i energimengden i all olje og gass på norsk sokkel, inklusive alt det som hittil er tatt opp, samt alle kjente gjenværende norske reserver og antatte ukjente ressurser av olje og gass. Dette sammenlikner vi med den potensielle energien i de anslåtte thoriumressursene på Fensfeltet.

Energiinnholdet i all olje og gass på norsk sokkel

Oljedirektoratet oppgir summen av alle ressurser av olje og gass som er produsert, påviste reserver og antatt uoppdagete ressurser til 12 834 millioner Sm³ (standard kubikkmeter). Vi regner om Sm³ til toe (tonn olje ekvivalenter):

$$12\,834 \text{ mill. Sm}^3 \cdot 0,858 \text{ toe/Sm}^3 = 11\,012 \text{ mill. toe.}$$

Regner om energiinnholdet til SI-enheten J (Joule).

$$1 \text{ toe} = 4,187 \cdot 10^{10} \text{ J.}$$

Vi får:

$$11,012 \cdot 10^9 \text{ toe} \cdot 4,187 \cdot 10^{10} \text{ J/toe} = 4,61 \cdot 10^{20} \text{ J.}$$

Dette er det TOTALE energiinnholdet i all norsk olje og gass, d.v.s. ALT som er produsert, pluss i alle reserver som er påvist, pluss i antatt uoppdagete ressurser på sokkelen.

Noen enheter:

$$1 \text{ Sm}^3 = 0,858 \text{ toe}$$

$$1 \text{ toe} = 4,187 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{elektronvolt})$$

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (\text{atomær masseenhet})$$

Utrekning av potensiell energi i thorium fra Fensfeltet

Spalting av ett atom thorium frigjør ca. 200 MeV (mega elektronvolt) termisk energi, og thoriumatomet har masse 232 u. Ut fra dette kan vi beregne hvor mye energi som frigjøres per tonn thorium.

Energi pr tonn thorium:

$$E_{\text{Th}} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot 200 \text{ MeV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV}}{232 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 8,31 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Vi beregner så den totale frigjorte energi, E, hvis alle disse atomkjernene spaltes for de anslåtte mengdene med thorium i Fensfeltet. Vi får enorme energimengder fra thorium i Fensfeltet, selv for de laveste ressursanslagene. Se tabell 2.

Sammenlikning av energiinnhold mellom thorium i Fensfeltet og i all olje og gass på norsk sokkel

Vi ser av utregningene ovenfor og tabell 2 at thoriumressursene i Fensfeltet har større, muligens svært betydelig større, energiinnhold enn all olje og gass på norsk sokkel, inkludert alt som er utvunnet, kjente reserver og alle antatt uoppdagete ressurser. Ser vi på forholdstallet mellom disse energiressursene, får vi at Fensfeltets thoriumenergiressurser,

$$E_{\text{Th}} / E_{\text{O\&G}}$$

trolig vil være minst 10 ganger høyere, muligens over 100 ganger høyere enn energien i all norsk olje og gass (tabell 2). Hvor mye thorium som faktisk kan utvinnes og hvor mye energi som i praksis kan utnyttes er foreløpig usikkert, men selv om vi bare skulle kunne utnytte 10% vil vi i Fensfeltets thorium likevel ha mellom 1 og 10 ganger energimengden på norsk sokkel.

Konklusjon: Energiinnholdet i thoriumressursene på Fensfeltet er trolig minst 10, muligens over 100 ganger energiinnholdet i all olje og gass på norsk sokkel, inkludert alt som er utvunnet, kjente reserver og alle antatt uoppdagete ressurser.

Total Thorium i fast fjell til dybde	Tusen Tonn Thorium	Energi x10 ²⁰ [J] i thorium	Energi x 10 ¹⁰ [toe] i thorium	E _{Th} /E _{O&G}
Lavt anslag 100 m	56,5	47,8	11,4	10,4
Høyt anslag 100 m	133	112	26,7	24,3
Lavt anslag 300 m	172	143	34,2	31,0
Høyt anslag 300 m	405	337	80,5	73,1
Lavt anslag 500 m	287	238	56,8	51,6
Høyt anslag 500 m	675	561	134	122

Tabell 2:

Kolonne 2: Tonn thoriumressurser i Fensfeltet med høye og lave anslag til ulike dyp (Regiongeolograpport 1, 2012)

Kolonne 3: Energiinnholdet i thoriumressursene.

Framkommer ved å multiplisere thoriumtonnasjen med $8,31 \times 10^{16}$ J/tonn.

Kolonne 4: Thoriumenergien i tonn olje ekvivalenter (toe).

Framkommer ved å dele tallene i kolonne 3 på $4,187 \times 10^{10}$ J/toe.

Kolonne 5: Det teoretiske energiinnholdet i thorium delt på

energiinnholdet i all olje og gass som var produsert,

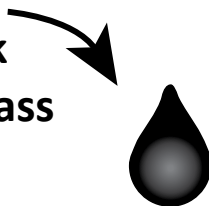
inntil 2010, påviste reserver og antatt uoppdagete

ressurser. Dette er betegnet E_{O&G} og har

verdien $11,012 \times 10^9$ toe eller $4,61 \times 10^{20}$ J.

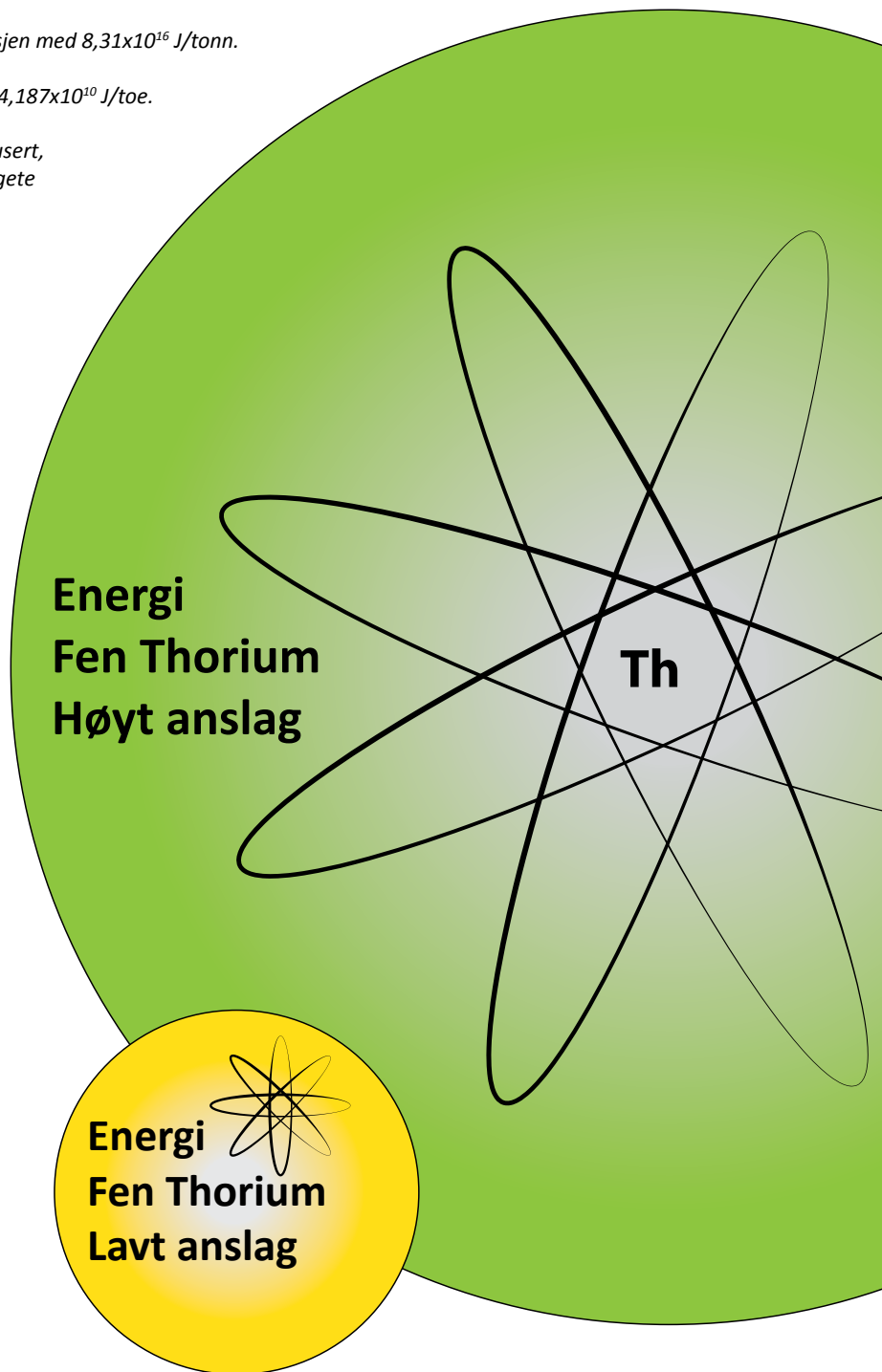
Energien i thorium på Fensfeltet sammenliknet med energien i ALL norsk olje og gass

Energi ALL Norsk Olje og Gass



Energi Fen Thorium Høyt anslag

Energi Fen Thorium Lavt anslag



Figur 14. Sammenlikning av energiinnholdet i ALL norsk olje og gass (sort "dråpe" = utvunnet olje og gass, påviste reserver og antatt uoppdagete ressurser) med det potensielle energiinnholdet i thoriumressursene i Fensfeltet. Arealene for "dråpen" / sirklene er proporsjonale med beregnet energiinnhold. Gul sirkel viser lavt anslag til 100 m dyp, mens grønn sirkel viser høyt anslag til 500 m dyp (sirkelen fortsetter utenfor arket).

Utvinning av Thorium fra Fensfeltet

- gruvedrift og oppredning

Det er store forekomster av thorium i Fensfeltet. En eventuell framtidig gruvedrift vil trolig måtte foregå under jord, og etter høyst mekaniserte "green mining" prinsipper. En hovedutfordring er at thorium forekommer i så ørsmå mineraler som finfordelt i bergartene at vi i dag ikke har metoder for å få thoriumet ekstrahert industrielt. Forskning for å finne en metode for å få thorium ut av bergartene er en forutsetning for å kunne få til en energiproduksjon basert på thorium fra Fensfeltet.

Gruvedrift

Fensfeltet er et av de klassiske gruveområdene i Norge. Det er blitt drevet gruver på jern og niob.

Fen jerngruver

Alt i 1650-årene ble det satt i gang gruvedrift etter jern på Fensfeltet. Jernmalmen var svart eller rød og forekom som linseformete eller plateformete legemer i rødberget. Fen jerngruver lå øst i Fensfeltet, vesentlig i området sør for Fensbukta og opp i Gruveåsen. Noen mindre gruver og skjerp ble også drevet ved Fengårdene og på Rullekoll. De gamle gruvegangene går ned til ca 150 meters dyp på det dypeste. Det er i dag et nettverk av gamle stoller (horisontale gruveganger), synker (vertikale gruveganger), strosser ("gruehaller") og dagstrosser (dagbrudd) i området ved Gruveåsen og ned mot Fensbukta. Jerngruvene leverte malm til ulike jernverk og da spesielt til Ulefoss Jernverk. Gruvedriften holdt på til 2. verdenskrig.

Norsk Bergverk, Søve

I begynnelsen av 1950-årene, og fram til 1965, var det gruvedrift etter niob ved Søve. Det ble utvunnet niob fra mineraler som pyroklor i bergarten søvitt. Dette området er ikke spesielt interessant for en eventuell framtidig thoriumutvinning.

Eventuell framtidig gruvedrift etter thorium

En eventuell framtidig gruvedrift etter thorium vil måtte foregå i de østligste delene av Fensfeltet. Tradisjonelt ville en da kunne tenke seg at malmene ble tatt ut i et kjempestort eller flere "mindre", dagbrudd, eller alternativt fra underjordiske gruvegangsystemer.

I dag vet vi svært lite om den tredimensjonale geometrien av de thoriumholdige malmene. En nøyaktig tredimensjonal forståelse av malmenes forløp mot dypet er en forutsetning for å kunne planlegge og drive et gruvesystem. Sannsynligvis vil en eventuell framtidig gruvedrift konsentrere seg om utvinning av soner som er spesielt anrikt på thorium og sjeldne jordartsmetaller (REE).

"Smart Mining" og "Green Mining"

Den østlige delen av Fensfeltet er som kjent et område med jordbruksarealer, riksvei og boliger. En potensiell framtidig gruvedrift vil etter all sannsynlighet måtte foregå under jord og sterkt mekanisert. Det forskes nå mye på nye driftsmetoder, kalt "Smart (eller Intelligent) Mining" og "Green Mining". En eventuell framtidig gruvedrift på Fen vil være avhengig av at en finner fram til nye smarte, intelligente og grønne måter å ta ut malmene på.

Oppredning

Oppredning defineres som metoder til utskilling av nyttbare mineraler i en malm eller et råstoff fra mineralene som ikke har noen økonomisk verdi. Hver enkelt malmsforekomst har sine unike mineralsammensetninger og egenskaper, og oppredningsprosessene, som består både av fysiske og kjemiske metoder, er nøye tilpasset malmene fra hver enkelt gruve. Hensikten med oppredningen er å framstille et konsentrat av de mineralene som har økonomisk verdi. Dette konsentratet brukes videre i en industriell prosess for å framstille ett eller flere metaller.

Konvensjonelle oppredningsmetoder

Enhver malm består av et aggregat av mange mineraler som hver har sine karakteristiske fysiske og kjemiske egenskaper. En viktig fysisk egenskap er størrelsen på mineralkornene. Moderne malmer blir knust ned til en viss kornstørrelse slik at en får friknust mineralkornene i bergarten. Dersom knuseprosessen fører til at en får mineralaggregater av en blanding av "interessante" og "uinteressante" mineraler, vil det være vanskelig å skille disse i den følgende oppredningen. Oppredning fungerer derfor best der mineralkornene har en relativt stor diameter (mm-skala) og hvor de ulike mineraltypene "slipper" hverandre under oppknusningen.

Problemstilling for Fenmalmen

Oppredning av rødberg og rauhaugitt for framstilling av konsentrat av thorium (og REE) byr på adskillige utfordringer, bl.a.:

1. Kornstørrelsen for thoriumholdige mineraler er vanligvis mindre enn 20/1000 millimeter. Friknusing vil derfor være vanskelig og forutsetter knusing ned til et pulver.
2. De thoriumholdige mineralene er ofte intimt sammenblandet med jernmineraler og andre mineraler med helt ulike fysiske /kjemiske egenskaper. Mineralaggregater er derfor sannsynlig å få selv om en knuser malmene ned til svært fine korn.
3. Thorium er radioaktivt og oppredning kan ikke foregå hvor som helst. Det er ikke lett å få all thorium fra malmen til konsentratet. Det betyr at eventuelt prosessvann eller kjemikalier som brukes i oppredningen ikke kan slippes ut til omgivelsene.
4. Dersom en tar ut det meste av thoriummineralene fra malmene, anslagsvis ca 0,2%, samt det meste av de mineralene som inneholder sjeldne jordartsmetaller, anslagsvis 5%, vil en ha en avfallsmengde på rundt 95%. Dette vil ha et volum på ca 1,3 ganger volumet av bergarten som opprinnelig ble knust ned. Det vil være thorium igjen i dette avfallet som da må lagres på en betryggende måte.

Metoder for oppredning av Fenmalmene og framstilling av thorium og REE.

Utvinning av thorium og REE fra Fenmalmene vil etter all sannsynlighet måtte foregå i en prosess som består av både konvensjonelle fysisk/kjemiske og nye, innovative oppredningstrinn. De konvensjonelle oppredningstrinnene kan bl.a. bestå av:

Fysiske metoder

1. Nedknusing og maling til en finhetsgrad som blottlegger de enkelte mineralkorn.
2. Kalsinering eller røsting (oppvarming til 800-1000 °C) for omdannelse av termisk ustabile mineraler til andre former som letter den videre behandlingen
3. Magnetisk separasjon: a. Magnetiske mineraler (ferromagnetiske som magnetitt) trekkes ut i et magnetfelt. b. Paramagnetiske mineraler (for eksempel jernmalmer som hematitt, limonitt og sideritt) kan separeres i magneter med spesielt høy feltstyrke.
4. Separasjon på basis av mineralkorns forskjell i egenvekt: a) Jigging der en opp- og nedgående vannstrøm presses gjennom besiktningen og resulterer i en lagdeling med de tyngre fraksjoner i bunnen, b) Herdvasking der mineralkorn med ulik egenvekt separeres. Grovmalt gods suspendert i vann mates inn på et skråstilt ristebord med riller og en tverrgående vannstrøm. De tunge mineralkornene følger rillene mens de lette følger vannstrømmen.
5. Flotasjon der nedknust malm oppslemmes med kjemikalier i vann og separeres ut i en skumfase. Brukes for å fjerne sulfider.

Kjemiske metoder

Kjemiske metoder brukes vanligvis først etter en viss forutgående fysisk oppredning. Typiske parametre under oppløsningen er riktig pH, konsentrasjoner, temperatur og eventuelt trykk. Man må benytte kjemikalier for spesifikk mineraloppløsning og ekstraksjon av enkeltgrunnstoffer eller grupper av grunnstoffer. Eksempler er:

Konvensjonelle syrer (mineralsyrer, organiske syrer). Karbonater lar seg angripe med saltsyre. Hvis oksidasjon er nødvendig vil salpetersyre (ev. svovelsyre) kunne nyttes. Silikatmineraler kan nødvendigvis flussyre osv.

Kompleksbindere. Dette er molekyler eller ioner som danner sterke kjemiske forbindelser med ulike grunnstoffer.



Gasser. Et eksempel er anvendelse av metan: Magnetitt (Fe_3O_4) + metan (CH_4) = Jern (Fe) + vann (H_2O) + karbondioksid (CO_2)

Karbonsyre, H_2CO_3 . Denne dannes når CO_2 løses i vann og er allerede i bruk for oppløsning av olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), kalsiumfeltspat ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) og karbonater.

Andre potensielt anvendbare (del-)metoder er:

Mikrober. Mikrober kan potensielt brukes for å framskynde kjemiske prosesser for mineraloppløsning.

Kjøpy-prosessen. Metoden er under utvikling. Den anvender en kraftig repeterende spenningspuls i kombinasjon med syre for hurtigere mineraloppløsning.

Saltsmelter. Benyttes også for å omdanne noen mineraler til mer lettløselige stoffer gjennom såkalt saltsmelteoppløsning.

En oppredning og oppløsning må etterfølges av kjemisk gruppeseparasjon (eller selektiv grunnstoffseparasjon) ved kjemiske separasjonsmetoder. De to mest brukte i industriell skala er væske-væske ekstraksjon og ionebytting. For å oppnå tilstrekkelig renhet på produktet kan man koble sammen flere separasjonstrinn kombinert med inndampning og/eller felling for framstilling av "rene" produkter. Flere omkrystalliseringsstrinn kan være nødvendig.

Oppredning, utfordring 1

Utarbeidelse av en detaljert fysisk / kjemisk oppredningsprosess for utvinning og separasjon av thorium og REE (og eventuelt andre metaller). Denne skal fungere på en industriell skala og være økonomisk forsvarlig.

Oppredning, utfordring 2

Fensfeltet ligger ved Norsjø som er drikkevann for nedre Telemark. Det er derfor vanskelig å tenke seg at oppredningen foregår lokalt. Råmalmen kan tenkes fraktet vekk på båt/lektere ned kanalen for utskipning til oppredning et annet sted. Uansett må oppredningen ha løsninger for at radioaktivt avfallsvann ikke kommer ut i miljøet og at det faste avgangsmaterialet (trolig rundt 95% av opprinnelig bergart) blir lagret betryggende.

Figur 15.

"Vaskebord" (Herdvasking) ved Norsk Bergverk, Sjøve gruver i 1960-årene. Vann som strømmer over et riflete bord som rister skiller lette og tunge mineraler fra hverandre. Dette er en klassisk metode for å oppkonsentrere de metalliske mineralene fra en malm. En slik prosess krever at de interessante mineralene har en viss størrelse. Fordi thoriummineralene fra Fensfeltet er så ørsmå, kan ikke denne metoden brukes, i allefall ikke annet enn som et ledd i en langt mer komplisert prosess. Foto: Ukjent fotograf.

Økonomiske betraktninger for utnyttelse av thoriumenergi

Økonomien i utnyttelse av norsk thorium er knyttet til utbyggingsomfanget av kjernekraften globalt, prisutvikling på uran og utvikling av kostnadseffektive metoder for ekstraksjon av thorium fra malmen i Fensfeltet.

Kostnadene for kjernekraft har tre hovedkomponenter:

1. Kapitalkostnader
2. Drift – og vedlikeholdskostnader
3. Brenselskostnader.

Som en hovedregel kan vi forutsette at kapitalkostnadene utgjør omkring 60 %, drift og vedlikehold ca. 25 % og brenselkostnadene rundt 15 % av de totale kostnadene. Brenselkostnadene omfatter alle kostnader fra innkjøp av uran til kostnader knyttet til fremtidig sikring og deponering av brukt brensel og høyaktivt avfall. Uran står for omkring halvparten av brenselkostnadene, dvs. at kostnadene for uran utgjør 7–8 % av de totale produksjonskostnadene for kjernekraft.

Kostnadene for drift, vedlikehold og brensel er alle små i forhold til kostnadene knyttet til den initielle investeringen. Selv avsetningene for fremtidig rivning av kjernekraftverket og for sikring og deponering av brukt brensel/høyaktivt avfall, blir relativt beskjedne i denne sammenhengen. Rentenivå og avskrivningstid er helt avgjørende for kostnaden for en ny reaktor. Kjernekraften er spesiell fordi den forventede driftstiden for et anlegg er så høy. En reaktor som bygges i dag forventes å være i drift i 60 til 80 år.

Standardiserte konstruksjoner og flere identiske anlegg bygget i serie vil erfaringsmessig redusere disse kostnadene med 20–30 %. OECD har sammenlignet de gjennomsnittlige energikostnadene for kjernekraft og kull- og gasskraft over anleggenes levetid, ved 5 % og 10 % rente. Beregningene viser at kjernekraften er klart konkurransedyktig, selv uten at kostnadene for håndtering og lagring av CO₂ fra kull og gasskraft er regnet med.

Det nye finske kjernekraftanlegget, Olkiluoto 3, har som det første i sitt slag fått betydelige merkostnader, men likevel regnes det med en produksjonskostnad på like under 40 øre/kWh. Ved evt. bygging av et nytt tilsvarende anlegg er kraftprisen beregnet til vel 30 øre/kWh. Til sammenligning blir produksjonskostnadene for kull- og gasskraft henholdsvis 40 og 45 øre/kWh uten at kostnader for CO₂-håndtering er medregnet. Et flertall av dagens kjernekraftverk har vært i drift fra 20 til 30 år. Dette betyr at kapitalkostnadene stort sett er nedbetalte og at produksjonskostnadene i hovedsak er drifts-, vedlikeholds- og brenselkostnader. Brenselkostnadene, 3–4 øre/kWh, består av kostnadene for uran, anrikning og produksjon samt ca. 1 øre/kWh for fremtidige avfallskostnader. Produksjonskostnadene, som også omfatter kostnader for modernisering

av anleggene samt skatter og avgifter, ligger i området 15–18 øre/kWh. Dette er konkurransedyktig selv når avsetninger for fremtidige avfalls- og nedrivningskostnader er regnet med.

Thorium som brensel

Den mest sannsynlige kommersielle utnyttelse av thorium i energisammenheng ser ut til å kunne bli i form av et tilsatsmateriale i dagens konvensjonelle termiske reaktorer sammen med uran eller plutonium. Dersom man klarer å realisere et energibidrag fra thorium i størrelsesorden 50%, betyr det i tillegg til lavere brenselkostnader også at uranressursene kan drøyes med omtrent en faktor to. Innblanding av thorium i dagens termiske reaktorer vil kunne få en svært positiv effekt med hensyn til kostnader knyttet til avfallsproblematikken.

Interessen for å utvikle en ny brenselssyklus for thorium kommersielt vil avhenge sterkt av prisutviklingen for uran, noe som igjen vil avhenge av hvor mange nye reaktorer som vil bli bygd. I et langsiktig scenario med vesentlig utbygging av kjernekraft, vil thorium kunne vise seg å få en økt verdi.

Når verdens begrensede ressurser av det spaltbare U-235 en gang vil kunne ta slutt, må energiproduksjonen baseres på de fertile stoffene Th-232 eller U-238. Etter en omdanning til hhv. U-233 eller Pu-239 vil disse bli spaltbare i en konvensjonell reaktor.

Som tidligere beskrevet pågår flere internasjonale utviklingsprosjekter av nye reaktortyper som vil utnytte thorium mer effektivt (Generation-IV) enn dagens reaktorer. Av spesiell interesse vil det være å følge utviklingen av MSR (saltmelte), HTGR (høy-temperatur gasskjølt reaktor) og MYRRHA for uttesting av thorium i ADS

Oppredning

Thoriummineralene i flere av verdens thoriumforekomster er forholdsvis lette å bearbeide for å ekstrahere thorium. Ved utvinning av andre råstoffer, for eksempel ved utvinning av sjeldne jordartsmetaller (REE) fra enkelte forekomster, er thorium i dag et biprodukt og et problemavfall. Forutsatt at thorium blir et etterspurt produkt på verdensmarkedet, må thoriumutvinning i Fensfeltet kunne foregå til en konkurransedyktig kostnad i industriell skala.

Pågående undersøkelser og planer for anvendelse av thorium

De geologiske undersøkelsene av REE, og derved indirekte thoriumressursene, i Fensfeltet utføres for tiden i all vesentlighet av to private selskaper. UiO studerer fundamentale kjernefysiske egenskaper ved thorium i samarbeid med flere internasjonale forskningsmiljøer. Thor Energy utvikler thorium brenselssyklus for eksisterende reaktorer og IFE tester brensel i Haldenreaktoren. Utvikling av neste Generasjon-IV reaktorkonsepser gir flere muligheter for anvendelse av thorium.

Geologiske undersøkelser og mineralprosessering

To selskaper har rettigheter i de aktuelle thoriumrike områdene av Fensfeltet:

1. **Fen Minerals** har utvinningsrett i området ved Gruveåsen og leier Statens rettigheter som grenser til på vestsiden.
2. **REE Minerals** har undersøkelsesrett i de sydøstre delene av Fensfeltet (Fensmyra - Fen skole - Bjørndalen)

Fen Minerals er en gruppe som blant annet består av grunneier Cappelen, og som, gjennom selskapet Fenco, gjorde omfattende undersøkelser i området tidlig på 1980-tallet. Hovedhensikten var og er å undersøke REE-forekomstene. Dette selskapet konsentrerer for tiden innsatsen på å utvikle en metode for utvinning av REE fra Fenbergartene. Selskapet arbeider ikke direkte med thorium.

REE Minerals har det siste året utført geologisk feltkartlegging og prøvetatt og analysert bergarter i de sydøstre delene av Fensfeltet. Våren 2012 utførte selskapet et omfattende kjerneboreprogram i dette området. Når analysene fra disse borhullsprøvene foreligger, vil det bringe på det rene hvor store REE-, og derved thorium-ressursene er i denne delen av feltet. REE Minerals har parallelt i gang forsøk med utvinningsteknologi for REE-mineraler i Fensfeltbergartene. Selskapet arbeider ikke direkte med thorium.

Regiongeologen har gjennom mange år hatt aktivitet i Fensfeltet. Dette foregår leilighetsvis og med lavt budsjett. Det omfatter feltundersøkelser, og kjemiske undersøkelser av bergarter og mineraler. Se også rapporten "Thorium i Fensfeltet - ressursanslag" (Regiongeolograpport 1, 2012).

Norges geologiske undersøkelse har ikke noen prosjekter i gang i Fensfeltet.

Universitetet i Oslo, kjernekjemi har også i gang et prosjekt hvor masterstudent Henrik Noren undersøker kjemiske metoder for ekstraksjon av thorium fra mineralerprøver tatt i Fensfeltet.

Kjernefysikk - Kjernekjemi: Miljøer i Norge og samarbeidspartnere

Cyclotron gruppen ved UiO (SAFE) samarbeider med Institute de Physics Nucléaire Orsay, og Saclay (CEA) i Frankrike om flere tema som angår Thorium. Det gjelder 1) bedre bestemmelse av reaksjonstverrsnitt for mange nuklider som er viktig for thorium brenselssyklusen, 2) analyser om hvordan thorium kan benyttes i eksisterende reaktorer. PhD-student Sunniva Rose arbeider på dette prosjektet. Videre samarbeides det med ERINDA prosjektet under Euratom for å bestemme tverrsnitt på actinider som er radioaktivt avfall som søkes omdannet i transmutasjoner.

Thor Energy arbeider med utvikling av thorium brenselssyklus for eksisterende reaktorer, bl.a.

- 1) preparering av brensel for testing i Haldenreaktoren i samarbeid med flere internasjonale bedrifter,
- 2) design av thoriumbrensel for BWR (Kokevannsreaktorer) hvor de har en PhD-student Klara Insulander i samarbeid med Chalmers.

Thor Energy har også etablert samarbeid med SCK-CEN (Belgia), University of Tokyo (Japan), og Los Alamos National Laboratory (USA).

Aalto universitetet i Finland driver også med teoretiske studier for å vurdere bruk av Thorium i BWR-anlegg.

Chalmers undersøker mulig bruk av thorium i PWR (trykkvannsreaktorer) med det formål å erstatte gadolinium for å dempe reaktiviteten i starten av en brenselssyklus samt å lage en jevnere effektfordeling i reaktoren. Derved oppnås bedre sikkerhetsmarginer.

Institutt for energiteknikk har gjennom Haldenprosjektet testet thoriumbrensel tidligere og har høy kompetanse på brenselstester. Derfor ligger det vel til rette for å gjennomføre fremtidige tester med thorium. IFE samarbeider med belgierne som skal bygge MYRRHA ADS som er pekt ut som en fremtidig akseleratordrevet løsning for å anvende thorium som brensel. IFE har også koordineringsansvaret for NOMAGE4 (Nordic Nuclear Materials Forum for Generation-IV Reactors) som er et viktig nettverk for å fremme anvendelse av thorium i fremtidens reaktorkonsepser.

Anbefalinger og konklusjoner

ANBEFALINGER

Thoriumressursene i Fensfeltet

De foreliggende anslagene for thoriumressurser i Fensfeltet er svært usikre. Minst 50% av Fensfeltet har aldri blitt geologisk kartlagt. Dette skyldes at feltet geologisk sett er meget kompleks, og at store deler av området er dekket med mange meter tykke marine leireavsetninger og som derved gjør undersøkelse av berggrunnen krevende.

Utnyttelse av thoriumressursene på Fensfeltet fra kommerisielle interessenter er neppe nært forestående. Ressursene kan imidlertid få en stor samfunnsmessig framtidig betydning. De geologiske undersøkelsene bør derfor hovedsakelig finansieres med offentlige midler.

Det bør lages et omfattende program for geologiske undersøkelser av Fensfeltet. Det foreslås at regiongeologen i samarbeid med Norges geologiske undersøkelse som et forprosjekt utarbeider et detaljert prosjektforslag for omfattende geologiske undersøkelser. Et slikt prosjekt må foregå over mange år, ha en fast prosjektledelse og ha et svært betydelig budsjett.

De geologiske undersøkelsene bør foregå som samarbeid mellom fylkeskommunen ved regiongeologen, staten ved Norges geologiske undersøkelse, private aktører som har mineralrettigheter i området og ulike forskningsinstitusjoner.

Prosjektet bør ha som mål å kartlegge ressurser av thorium, samt andre kritiske / strategiske ressurser som REE, niob, scandium med mer. Dette gjelder forekomstenes utstrekning i 3 dimensjoner, mineral karakterisering og geohalter/tonnasjer. Parallelt må det foregå et fokusert prosjekt for bærekraftig industriell ekstraksjon av thorium og REE fra Fenmalmene. Aktører som hver for seg holder på med dette i dag bør oppfordres til samarbeid.

Alt dette er helt grunnleggende informasjon for planlegging av en eventuell framtidig utnyttelse av de ulike ressursene. Som en fortsettelse av de grunnleggende undersøkelsene bør det igangsettes en tankesmie som skal utvikle forslag for utnyttelse av ressursene på Fensfeltet gjennom "Green Mining" og "Smart Mining" konsepter.

Thorium som kjernebrensel

Det bør utføres teoretiske studier av hvordan thorium kan brukes i dagens reaktorer (lett vannstype PWR, BWR). Dette vil være videreføring av pågående arbeid med ytterligere fokus på:

- utvikling av Th-U brenselssyklus
- optimalisere konfigurering og sammensetning av Th-U brensel
- minimalisere produksjonen av langlivet atomavfall
- forbedre sikkerheten
- økonomiske analyser

Det er viktig å bestemme ulike fysiske parametre (innfangnings-tverrsnitt) for thorium og tilhørende atomer ved å videreføre og utvide eksperimenter knyttet til Cyclotronen ved UiO (SAFE).

Eksperimentell testing av ulike thoriumbrenselkonfigurasjoner må utføres ved:

- Forsøk i Haldenreaktoren for å fremskaffe fundamentale brenseldata
- Testing av brensel i operative reaktorer (PWR, BWR)

For nye reaktorkonsepter anbefaler vi å:

- innlede samarbeid med de internasjonale organisasjonene som er engasjert i Generasjon-IV utvikling og hvor thorium er spesielt egnet som brensel, MSR (saltmelte) og HTGR (høy-temperatur gasskjølt reaktor)
- søke samarbeid med MYRRHA for uttesting av thorium i ADS konseptet.

KONKLUSJONER

Fensfeltet har thoriumressurser av sannsynlig framtidig nasjonal og internasjonal interesse. Foreløpige ressursanslag indikerer at det finnes mellom 56.500 og 675.000 tonn thorium i Fensfeltet. Dette har et potensielt energiinnhold på mellom 10 og 120 ganger energien i all olje og gass fra norsk sokkel, inkludert det som hittil er utvunnet og som kan komme til å bli utvunnet.

Thoriumressursene i Fensfeltet må vurderes i et globalt langsiktig perspektiv der verden vil trenge tilgang på kostnadseffektiv, bærekraftig og klimavennlig energi.

Thoriumressursene i Fensfeltet er store i verdensskala, men de er dårlig kartlagt og det er en stor utfordring å få ut thorium fra bergartene i industriell omfang. Det må gjennomføres omfattende undersøkelser og forskning for å få kartlagt og utnyttet ressursene.

Thorium er det eneste materialet som kan supplere uran som brensel i kjernekraftreaktorer. Kjernekraften vil være en del av en framtidig energimiks og har ingen utslipp av CO₂ eller klimagasser. Knapphet på uran kan medføre større interesse og behov for å ta i bruk thorium.

Thorium er ca 4 ganger mer vanlig enn uran i øvre jord-skorpe, fører til 100 ganger kortere behov for oppbevaring av radioaktivt avfall fra kjernereaktor brensel sammenliknet med uranavfall, og er et materiale som er svært dårlig egnet for bruk i atomvåpen.

Thorium i Fensfeltet forekommer sammen med sjeldne jordartsmetaller (REE). Interessen for REE er globalt økende og prisene er høye på verdensmarkedet. Ved et eventuelt uttak av REE fra Fensfeltet er det samtidig viktig at thoriumressursene i de samme bergartene sikres for fremtidige generasjoner.

Referanser

REFERANSER - RAPPORTER , BØKER, KART OG ARTIKLER

Dahlgren, S., 2008: Thorium i Buskerud, Telemark og Vestfold fylker. Regiongeologen Buskerud Telemark Vestfold fylkeskommuner rapport nr. 1 2008.

Dahlgren, S., 2012:: Thorium i Fensfeltet - Ressursanslag. Regiongeologen Buskerud Telemark Vestfold fylkeskommuner rapport nr. 1 2012.

Fazio, C. et al.: European cross-cutting research on structural materials for Generation IV and transmutation systems, Journal of Nuclear Materials, 392, p. 316-323, 2009

Generation IV Roadmap Crosscutting Fuel Cycle R&D Scope Report, GIF-009-00

Hargraves, R. & Moir, R., 2010: Liquid fluoride thorium reactors. An old idea in nuclear power gets reexamined. American Scientist 98, 304-313.

IAEA 2005, Thorium fuel cycle - Potential benefits and challenges. IAEA-Tecdoc-1450

IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4): "Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", eds.: Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer, 2007, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Norges geologiske undersøkelse 2007: Helikoptergammaspektrometriske kart, Fensfeltet. Uran, thorium, kalium.

Nuclear Energy Outlook, NEA (OECD), 2008.

Sokolov, F., Fukuda, K. & Nawada, H.P. 2005: Thorium fuel cycle – Potential benefits and challenges, IAEA-TECDOC-1450, Nuclear Fuel Cycle and Materials Section, Vienna, Austria.

Thorium as an Energy Source – Opportunities for Norway, NFR Thorium Committee, Feb 2008.

Totland, A. og Sevje, T., 2008: Thorium - bærekraftig og miljøvennlig kjernekraft. Tapir forlag. 143 pp.

Rudnik, R.L. & Gao, S., 2003, Composition of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry, vol.3, 1-64. Elsevier.

United Nations. 2004. World population to 2300. 254pp.

World Energy Outlook 2011, OECD/IEA 2011

REFERANSER - WEBLINKER

http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/2005_06_green_paper_book_en.pdf (ISBN 92-894-9819-6, European Communities, 2005).

http://www.energy.eu/directives/2006_03_08_gp_document_en.pdf

http://ec.europa.eu/energy/technology/set_plan/set_plan_en.htm

<http://www.iaea.org/programmes/a2/>

<http://www.studsvik.se/GenerationIV>

<http://nomage4.org/>

<http://www.gen-4.org/Technology/systems/scwr.htm>

http://en.wikipedia.org/wiki/Shippingport_Atomic_Power_Station

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/thorium/index.html>

www.oljedirektoratet.no

www.unpopulation.org

Anbefalt litteratur:

Hargraves, R. & Moir, R., 2010: Liquid fluoride thorium reactors. An old idea in nuclear power gets reexamined. American Scientist 98, July-August, 304-313.



Regiongeologen
Buskerud Telemark Vestfold Fylkeskommuner



Høgskolen i Telemark



Institutt for energiteknikk



**“Thorium Think Tank”
i Storgruva på Fensfeltet, Telemark.
Fra høyre: Øivind Berg (leder), Tor Bjørnstad, Svein Nøvik,
Wilhelm Rondeel, Sven Dahlgren og Arne Totland.
Foto: S. Dahlgren**