



FFI-rapport 2014/01099

# Utviklingstrekk i de globale uran- og kjernekraftmarkedene



Elin Enger og Halvor Kippe





## **Utviklingstrekk i de globale uran- og kjernekraftmarkedene**

Elin Enger og Halvor Kippe

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

20. mai 2015

FFI-rapport 2014/01099

Prosjekt 1256

P: ISBN 978-82-464-2528-9

E: ISBN 978-82-464-2529-0

## **Emneord**

Kjernekraft

Uran

## **Godkjent av**

Monica Endregard

Prosjektleder

Janet Blatny

Avdelingsjef

## Sammendrag

Økningen i oljeprisene og frykten for global oppvarming har ført til at det de siste ti årene har blitt snakket om en *kjernekraftrenessanse*. Flere land viser interesse for ikke bare å etablere kjernekraftverk, men også for å engasjere seg i andre deler av kjernekraftsyklusen, som anrikning av uran og reprocessing av brukt brensel. Utvikling av slike anlegg medfører en risiko for misbruk av teknologien til kjernevåpenformål. Flere kjernevåpenkapable stater vil kunne gjøre verdenssituasjonen mer ustabil og påvirke alle stater, inkludert Norge.

Denne rapporten vurderer utviklingen innen bruk av kjernefysisk teknologi i dag, hvilke økonomiske og politiske effekter ulike staters valg av løsninger kan gi og hvilke tiltak som blir diskutert for å begrense risikoen for spredning av kjernevåpenteknologi. Det er særlig ulike metoder for å multilateralisere brenselssyklusen som er aktuelle, ettersom dette kan motvirke at nye stater oppretter brenselssyklusanlegg på egenhånd. Dersom flere aktører fra forskjellige stater har tilgang til anleggene, reduseres risikoen for at de kan misbrukes til våpenformål.

Til tross for de negative virkningene Fukushima-ulykken har hatt på kjernekraftens renomme, satser flere stater på kjernekraft, og mange nye kraftverk er under bygging eller planlegging. Alt tyder på at kjernekraft vil spille en større rolle i fremtidens energiforsyning.

Det ser ut til å være en viss interesse for å utvikle nye anrikningsanlegg, men dette er foreløpig hovedsakelig i stater som allerede har utviklet teknologien for både militære og sivile formål. Det er uansett svært vanskelig å gjøre dette lønnsomt nok til å konkurrere med de eksisterende kommersielle aktørene, som franske Areva, britisk-nederlandsk-tyske URENCO og amerikanske United States Enrichment Corporation (USEC). Stater som allerede har utviklet en anrikningskapasitet av militære grunner, enten for våpenformål eller for å produsere ubåtbrensel, kan ønske å oppskalere og på sikt kommersialisere denne teknologien. Eksempler på dette er Brasil, India og Kina. Også for disse vil det være svært vanskelig å gjøre dette lønnsomt nok til å konkurrere med de eksisterende kommersielle aktørene. Sør-Afrika er et annet spesielt eksempel ettersom landet har vedtatt å etablere en komplett kjernebrenselssyklus, men lite konkret har foreløpig kommet ut av dette vedtaket.

I sluttenden av brenselssyklusen skjer det mindre. Løsninger for langtidslagring av kjernefysisk avfall mangler fremdeles i alle stater bortsett fra Finland, og det ser ikke ut til å være noen stor satsning på reprocessing. Utviklingen av kommersielle *Mixed Oxide*-reaktorer (MOX) som kan brenne reprocessert plutonium er fremdeles begrenset, men selve teknologien fungerer. Dersom det blir mangel på uran på markedet eller uranprisene øker sterkt igjen i tiden framover, kan dette bli et mer aktuelt alternativ. Dersom en nykommerstat velger å utvikle brenselssyklusteknologi i dag, så må landet enten ha svært langsiktige ambisjoner, eller ta sine valg ut i fra annet enn økonomiske betraktninger. Spesielt er forsyningsikkerhet for reaktorbrensel og muligheten til å oppnå status som teknologiholder med en kjernevåpenopsjon aktuelle motivasjoner. Den mest realistiske måten brenselssyklusen kan multilateraliseres ser i dag ut til å være ekspansjon for eksisterende kommersielle aktører. Verden vil altså se en rekke nye kjernekraftstater de nærmeste årene, men neppe like mange nye, selvstendige, statlige aktører innenfor sensitiv kjernebrenselteknologi.

## English summary

Rising oil prices and the fear of global warming have led to talk of a nuclear power renaissance in the latest decennium. Several states are showing an interest not only in establishing nuclear power plants, but also to employ other parts of the nuclear cycle, such as uranium enrichment and reprocessing of nuclear fuel. These types of facilities bring about a possibility to misuse the technology for weapons purposes. An increased number of nuclear weapons capable states could change the international political situation and affect all states, including Norway.

This report provides an assessment of the development in the present and future use of nuclear technology, economic and political effects that may be caused by states' different choices in the nuclear field, and measures currently under discussion to reduce the risk of nuclear proliferation. Especially relevant are measures to multilateralize the fuel cycle, which can prevent new states from developing new nuclear facilities independently. If actors from several states have access to the facilities, the risk of misuse is reduced.

In spite of the negative impact the Fukushima nuclear accident has had on the reputation of nuclear power, more and more states are aiming for more nuclear power, and many new nuclear power stations are being constructed or planned. Apparently, nuclear power will play an important part of the future power supply.

There is some interest in developing new uranium enrichment plants, but so far this is mainly among states that already have developed an enrichment capacity for both military and civilian purposes. Regardless of previous experiences, it will be very difficult to compete with established commercial actors, such as Russian Tenex, French Areva, British-Dutch-German URENCO and the United States Enrichment Corporation (USEC). States which have already developed enrichment technology for military purposes, either for weapons or nuclear submarine fuel, may wish to upscale the production and on a longer term commercialize it. Examples include Brazil, India and China. Also for these countries, it will be very difficult to carry out the production efficiently enough to compete with the existing commercial actors.

At the back-end of the nuclear fuel cycle, there seems to be less of a development. Solutions for long-term storage of spent nuclear fuel are still missing in all states except Finland, and there does not seem to be any large new initiatives aiming for fuel reprocessing. The development of reactors that can use reprocessed plutonium in the form of Mixed Oxide (MOX) fuel is still limited, although the technology exists and functions. If there should be a shortage of uranium in the market in the future, or should the uranium prices increase, these technologies might become more relevant. If a new state actor chooses to develop nuclear fuel cycle technology today, the state must have very long-term ambitions, or make its choice from other than economic considerations. Especially important motivations are concerns about the reliability of the state's fuel supply and the possibility of achieving status as a technology holder with a nuclear weapons option. The most realistic method for multilateralization today seems to be further expansion of the existing commercial actors. Several new nuclear power states will thus emerge in the coming years, but not necessarily as many new, self-sufficient, state actors possessing proliferation-sensitive nuclear fuel cycle technology.

# Innhold

	<b>Innhold</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Kjernekraftmarkedet</b>	<b>7</b>
2.1	Kraftbehov og nye energikilder	7
2.2	Kjernekraftverk	8
2.2.1	Små og mellomstore kjernekraftverk	11
2.2.2	Thorium	12
<b>3</b>	<b>Brenselssyklusen</b>	<b>12</b>
3.1	Uranmalm	15
3.2	Uranpriser og global anrikningskapasitet- og etterspørsel	15
3.3	Reprosessering	16
<b>4</b>	<b>Grunnlag for staters beslutninger</b>	<b>17</b>
4.1	Økonomiske vurderinger	17
4.1.1	Når lønner det seg å utvikle anrikningsanlegg?	17
4.1.2	Laserlys i tunnelen?	19
4.2	Andre vurderinger som kan påvirke teknologivalg	20
4.2.1	Energisikkerhet, reell og innbilt	20
4.2.2	Brenselsbankmodell	20
4.3	Virkingen av ulike tiltak	21
<b>5</b>	<b>Spesielle enkeltstater</b>	<b>22</b>
5.1	Kina	22
5.2	India	23
5.3	Brasil	24
5.4	Sør-Afrika	26
5.5	Sør-Korea	27
5.6	Jordan	27
5.7	De forente arabiske emirater	28
<b>6</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>29</b>
	<b>Referanser</b>	<b>30</b>





## 1 Innledning

Økningen i oljeprisene og bekymringen for global oppvarming, som følge av blant annet bruk av fossile brensler, har ført til at de siste ti årene har blitt snakket om en *kjernekraftrenessanse*. Selv om katastrofen i det japanske Fukushima-kraftverket og en økende utvinning av skifergass til en viss grad har dempet påtrykket for mer kjernekraft, spesielt i Japan og Tyskland, er det fortsatt planer om omfattende utbygging i mange land. Hensikten med denne rapporten er å gi en viss oversikt over den internasjonale utviklingen på kjernekraftområdet, og gi en vurdering av hvordan dette vil påvirke risikoen for spredning av kjernevåpenteknologi.

Utstrakt bygging av nye kjernekraftverk vil øke etterspørselen etter kjernefysisk brensel, noe som fører til behov for en økende kapasitet i tilhørende anlegg både for uranutvinning, anrikning og brenselproduksjon. Dette behovet kan møtes enten ved utvidelse av eksisterende anlegg (ved effektøkning eller flere reaktorer) eller ved bygging av helt nye anlegg. Svært mange eksisterende kjernekraftverk ble bygd på 1970-tallet, og nærmer seg derfor slutten på sin forventede levetid. Enkelte av disse settes dermed ut av drift og reduserer således brenselsetterspørselen, men mer vanlig er det at levetiden forlenges med mange år gjennom oppgraderinger. De siste drøyt tretti år har det dessuten vært en klar tendens til at kjernekraftverk i større grad utnytter uranet enn før.<sup>1</sup>

En del land som tidligere kun har hatt en begrenset kjernefysisk infrastruktur har etter hvert uttrykt ambisjoner om å utvikle egen brenselssykluseteknologi. Dette medfører en bekymring i andre stater over den kjernevåpenopsjonen som er naturlig iboende i denne teknologien, spesielt urananrikning. For enkelte av disse nye kjernebrenselaktørene er forsyningssikkerhet et motargument i denne sammenhengen, siden en nasjonal anrikningskapasitet kan forhindre at energisektoren blir rammet ved en politisk motivert utestengelse fra det globale uranbrenselmarkedet.

På den annen side ser man at land som tidligere har hatt omfattende kjernefysisk infrastruktur, er i ferd med å gå bort fra dette. Tyskland ønsker å gå bort fra kjernekraft fullstendig, og Japan forsøker å redusere sin avhengighet av kjernekraft, mens et land som Storbritannia, som fremdeles vil beholde selve kraftverkene, av økonomiske grunner trekker seg ut fra andre deler av brenselssyklusen.

## 2 Kjernekraftmarkedet

### 2.1 Kraftbehov og nye energikilder

Ifølge *World Energy Outlook 2013*, utgitt av *International Energy Agency* (IEA), forventes den globale energietterspørselen å øke med en tredel mellom 2011 og 2035 [1]. Herunder forventer

---

<sup>1</sup> *World Nuclear Association* slår fast at i årene 1980 til 2008 økte den globale kjernekraftproduksjonen med en faktor 3,6, mens uranet brukt til dette kun økte med en faktor 2,5 i samme periode.

de at kjernekraftetterspørselen øker med hele 66 prosent. Til sammenlikning ventes etterspørselen etter olje å øke med 13 prosent, kull 17 prosent, naturgass 48 prosent og fornybar energi hele 77 prosent. Det er verdt å merke seg at denne vurderingen er gjort etter Fukushima-katastrofen.

Den største veksten i energietterspørsel ventes Kina å stå for i de nærmeste årene. Deretter vil India og etter hvert Sørøst-Asia og Midtøsten bidra sterkt til den økte etterspørselen. Alt i alt er det de “nye økonomiene” som vil øke sitt energibehov mest, ikke landene som er med i Organisasjonen for økonomisk samarbeid og utvikling (OECD).

Kjernekraft regnes som et klimavennlig alternativ sammenliknet med tradisjonelle fossile energikilder som olje, kull og gass, siden det ikke slippes ut klimagasser i produksjonsfasen. Det er selvsagt utslipp av klimagasser forbundet ved framstilling og transport av brensel, samt bygging av nødvendige anlegg i hele brenselssyklusen, men det er det også i enda større grad for de fossile energikildene. Kjernekraftens aktualitet skyldes også teknologiens gripbarhet og høye kapasitet sammenliknet med fornybare alternativer som vindkraft, solceller og bølgekraft. Selv om kjernekraft er svært kostbart å bygge ut, så er det en moden teknologi som man vet kan gi betydelige bidrag til energimiksen.

Flere av de fornybare alternativene har i noen år vært i en rivende utvikling, men det er stadig krevende å gjøre disse konkurransedyktige på pris og kapasitet. For eksempel genererer en moderne vindturbin typisk 1 – 3 MW<sub>e</sub> (elektrisk effekt<sup>2</sup>), mens en vanlig trykkvanns- eller kokvannsreaktor<sup>3</sup> i et kjernekraftverk ofte har rundt 1000 MW<sub>e</sub>. En vindpark på tusen turbiner er et betydelig inngrep i naturen. På samme måte vil en trenge nesten 6,7 km<sup>2</sup> med typiske 150 W solcellepaneler i et subtropisk område for å produsere like stor elektrisk effekt som de to nevnte reaktortypene. Det er mer enn arealet til Utsira kommune i Rogaland (6,3 km<sup>2</sup>).

## 2.2 Kjernekraftverk

Bransjeorganisasjonen *World Nuclear Association* (WNA) estimerer at eksisterende kjernekraftprogrammer vil øke sin samlede kapasitet fra 367 GW<sub>e</sub> i 2008 til 559 – 1087 GW<sub>e</sub> i 2030. Tar man med planlagte, men ikke påbegynte, kjernekraftreaktorer i land som i dag ikke har kjernekraft, så regner WNA med en ytterligere økning på 30 – 123 GW<sub>e</sub> innen 2030. Det betyr at WNA forventer at den globale kjernekraftproduksjonen vil kunne dobles de neste 15 årene. Imidlertid er det alltid forbundet med stor usikkerhet når et land hevder å skulle bygge kjernekraft, spesielt land som ikke har det fra før. Det er en meget omstendelig prosess, som ofte viser seg å ta mye lengre tid enn forventet. Av den grunn er det større grunn til å tro på den forventede økningen av kjernekraft i etablerte kjernekraftnasjoner enn de annonserte planene i nykommernasjoner. WNAs samlede estimat har imidlertid ikke tatt høyde for de endrede planene

---

<sup>2</sup> Kapasiteten til et kjernekraftverk uttrykkes enten i *termisk effekt* (MW<sub>t</sub>), dvs. hvor mye varme som produseres, eller i *elektrisk effekt* (MW<sub>e</sub>), hvor mye elektrisitet som kan produseres.

<sup>3</sup> De to vanligste reaktortypene i kjernekraftverk benytter vanlig vann (“lett vann”) som kombinert moderator og kjølemiddel. I det ene tilfellet er vannet satt under trykk, mens det i det andre tilfellet er kokende.

i to store kjernekræftnasjoner, nemlig Tyskland og Japan. Begge disse landene har revurdert sine kjernekræftprogrammer i kjølvannet av Fukushima-katastrofen.

Tyskland har besluttet å fase ut kjernekræft til fordel for fornybare energikilder. De har allerede redusert andelen av kjernekræft fra cirka 25 prosent i mars 2011 til cirka 18 prosent i januar 2014. Det siste kjernekræftverket planlegges stengt innen utgangen av 2022 [2]. Japans 50 kjernekræftreaktorer sto for hele 30 prosent av landets strømproduksjon i 2011. Andelen av kjernekræft i Japan var før Fukushima-katastrofen ventet å øke til 40 prosent i 2017, men endrede planer gjør at utsiktene nå tilsier en økning til rundt 35 prosent. Den totale produksjonen er på rundt 45 GW<sub>e</sub>, altså over 15 prosent av den globale kjernekræftproduksjonen på 287 GW<sub>e</sub> i 2011 [3]. Tabell 2.1 viser en oversikt over hvor mange kjernekræftreaktorer som var under utbygging i 2012, samt hvor mange reaktorer de forskjellige landene hadde i drift fra før. Tabellen inkluderer kun land som er medlemmer av Det internasjonale atomenergibyrået (IAEA). Nord-Korea er det eneste (aspirerende) kjernekræftlandet som står utenfor IAEA.

Byggingen av en ny kjernekræftreaktor ble godkjent i Storbritannia i oktober 2013 [4;5]. Reaktoren, *Hinkley point C*, skal bygges i Somerset, i et område der det allerede ligger to reaktorer, og skal bli en tredjegenasjons europeisk trykkvannsreaktor (*European pressurized water reactor*, EPR), av samme type som blant annet *Olkiluoto 3* som er under bygging i Finland. Dette er det første nye reaktorprosjektet som har blitt godkjent i Europa etter Fukushima-katastrofen. Prosjektet skiller seg økonomisk fra andre tidligere kjernekræftprosjekter i Storbritannia ved at utbyggingen i utgangspunktet finansieres av et privat konsortium. Myndighetene vil imidlertid bidra økonomisk over lengre tid ved at de vil garantere en inflasjonsjustert minstepris på 92,50 pund per megawatt-time (tilsvarende over 90 øre per kilowatt-time) i 35 år framover for strømmen som produseres i kraftverket. Dette er cirka det dobbelte av dagens strømpris i Storbritannia, og tre ganger dagens strømpris i Norge. [6]

Tabell 2.1 Land med nye reaktorer under bygging 2012 (Fra IAEA Tech Review 2013)

Land	Under bygging	Operative reaktorer
Argentina	1	2
Brasil	1	2
Kina	29	17
Finland	1	4
Frankrike	1	58
India	7	20
Japan	2	50
Pakistan	2	3
Russland	11	33
Slovakia	2	4
Sør-Korea	4	23
UAE (De forente arabiske emirater)	1	0
Ukraina	2	15
USA	1	104
<b>Totalt (alle land)</b>	<b>67</b>	<b>437</b>

Det er krevende å anslå investeringskostnadene ved nye kjernekraftverk. I rapporten *Nuclear Loan Guarantees*, utgitt av *Union of Concerned Scientists* i 2009 [7] gjøres det noen beregninger med forskjellig utgangspunkt. Denne kilden angir at de gjennomsnittlige overskridelsene i byggekostnader for amerikanske kjernekraftverk påbegynt i perioden 1966 til 1977, sammenliknet med operatørens estimater, var på over 200 prosent. Det normale har altså vært at kjernekraftreaktorene har blitt tre ganger så dyre å bygge som forventet. Investeringskostnadene har i samme periode i gjennomsnitt ligget på rett under 3000 dollar (2006-priser) per installert kilowatt. Historikken, de høye kostnadene og den høye økonomiske risikoen er nok hovedårsakene til at USA kun hadde én kjernekraftreaktor under bygging i 2012, mens langt mindre kjernekraftnasjoner hadde flere, som angitt i Tabell 2.1.

Den russiske forskeren Anatoli Diakov gjorde i 2013 noen anslag over kostnader knyttet til kjernekraftplanene i Russland [8]. Han beregner 3333 dollar per installert kilowatt for de to nyeste VVER-enhetene<sup>4</sup> i *Novovoronezh kjernekraftverk* og trolig over 4000 dollar per installert kilowatt for to større VVER-enheter ved *Leningrad kjernekraftverk*. Samme kilde anslår at byggeprisen for *hurtige formeringsreaktorer* i Russland er av størrelsesorden 1,5 ganger høyere per installert effekt enn for *termiske reaktorer* som VVER.<sup>5</sup> Det økonomiske innslagspunktet for

<sup>4</sup> VVER-reaktorer er trykkvannsreaktorer av russisk opprinnelse. Trykkvannsreaktorer generelt betegnes gjerne som *PWR* (pressurized water reactor).

<sup>5</sup> Reaktorer som benytter en moderator for å bremse nøytroner til termisk likevekt med omgivelsene sine, kalles *termiske reaktorer*. Nøytroner med termiske energier (noen få elektronvolt, eV) har større sannsynlighet for å spalte fissile materialer enn *hurtige nøytroner*, som typisk har flere megaelektronvolt (MeV) energi. Hurtige reaktorer må typisk ha et drivbrensel av noe høyere anriket uran, eventuelt en

å bygge kjernekraftverk er dermed langt høyere i dag enn det var før. Årsakene til den økte prisen er trolig blant annet skjerpede krav til iboende driftssikkerhet (som passive sikkerhetsmekanismer og høy grad av redundans) og manglende gjennomføringsevne, som har gjort at det nærmest er vanlig med mangeårige forsinkelser i bygging av kjernekraftverk.

### 2.2.1 Små og mellomstore kjernekraftverk

Små og mellomstore kjernekraftreaktorer har vært diskutert blant de globale kjernekrafttilbyderne de senere årene. Slike kan være aktuelle i land med dårlig utbygd elektrisitetsnett og på kraftkrevende anlegg langt fra eksisterende kraftnett, som i offshoreinstallasjoner i Barentshavet i Russlands tilfelle. Et av de viktigste salgsargumentene for slike reaktorer er de lavere investeringskostnadene sammenliknet med fullskala kjernekraftreaktorer. Mens typiske kjernekraftreaktorer av generasjon to gjerne har rundt 1 GW<sub>e</sub> i kapasitet, så kan små og mellomstore kjernekraftreaktorer ventes å produsere mindre enn 300 MW<sub>e</sub>. Da klarer man seg med langt mindre reaktorkjerner og andre vitale komponenter. Kraftreaktorene blir dermed i mye større grad basert på modulære, prefabrikerte løsninger, så man slipper å ha en stor arbeidsstokk bundet til byggeplassen over mange år. Mindre reaktorkjerner gjør dessuten bekymringen knyttet til katastrofale utslipp, for eksempel ved en nedsmelting som følge av tap av kjøling, tilsvarende mindre. [9]

Én av hovedgrunnene til det lave utbyggingstempoet i global kjernekraft de siste par tiårene er de stadig voksende investeringskostnadene. Det tar lengre og lengre tid å tjene inn disse kostnadene etter at en ny kjerneraktor er koblet på el-nettet. Noe av grunnen er de stadig strengere kravene til sikkerhet, og de lange godkjenningsrundene dette medfører hos tilsynsmyndigheten, men kostnadsstigningen skyldes også at trenden har gått i retning av stadig større kjernekraftreaktorer. Installert kraftkapasitet per investeringskrone er i utgangspunktet klart høyest for store kjernekraftreaktorer, men dette bildet kan endre seg hvis et byggeprosjekt trekker veldig ut i tid i perioder med høye renter. Da kan det hende det faktisk er mer lønnsomt å bygge flere små kjernekraftreaktorer på kortere tid. Mindre enheter kan derfor vise seg å ha livets rett i mange land.

Enkelte utviklingsland har kritisert promoteringen av såkalte *build-own-operate*-avtaler, siden disse ikke medfører noen teknologioverføring til landet hvor kjernekraftreaktoren bygges. I disse tilfellene er det tilbyderen som både bygger, eier og driver kjernekraftverket, og som da selger strømmen til vertslandet. For små og mellomstore reaktorer er dette spesielt aktuelt, siden leverandøren kan bygge og delvis montere flere av de vitale komponentene på egen jord og så eksportere det ferdige produktet til landet hvor det skal tas i bruk. Kina er et eksempel på det motsatte, hvor landet har videreutviklet en fransk trykkvannsreaktordesign i den grad at de kaller den sin egen, og hvor de så forsøker å eksportere denne under en *build-own-operate*-avtale med land som for eksempel Pakistan. Kina vil da eie kjernekraftverket og selge strøm til det pakistanske el-nettet. (Se for eksempel [10;11].)

---

blanding av uran og plutonium. *Formeringsreaktorer* er reaktorer som i tillegg til vanlig uranbrensel inneholder et *fertil materiale* (se fotnote 7), slik at det produseres fissile materialer samtidig som det ordinære brenselet forbrukes.

## 2.2.2 Thorium

Thorium som alternativ til uran som kjernebrensel har vært mye diskutert i Norge de siste årene. Thorium har enkelte fordeler i forhold til uran som reaktorbrensel, først og fremst at man får en mindre andel av de ofte svært langlivede, tyngre grunnstoffene i det brukte brenselet, noe som reduserer avfallsproblemet. I India, som har store thoriumforekomster, har materialet blitt testet ut som brensel i lang tid. En ny eksperimentell 300 MW<sub>e</sub>-reaktor som kalles *Advanced Heavy Water Reactor* (AHWR) er utviklet av *Bhabha Atomic Research Centre* (BARC) i India og skal etter planene være operativ fra 2020 og i full kommersiell drift fra 2030. Denne reaktoren skal drives med en blanding av *lavanrikt uran*<sup>6</sup> og thorium, hvor 39 prosent av energien skal komme fra thorium [12]. Byggingen av reaktoren har imidlertid ikke startet ennå, og hvor den skal plasseres er heller ikke endelig avgjort.

Thorium er også brukt som såkalt *blanket*-materiale i noen indiske formeringsreaktorer, i stedet for utarmet uran, som har vært det vanlige andre steder.<sup>7</sup> I disse reaktorene bidrar foreløpig ikke thorium i noen større grad til energiproduksjonen. Ulike muligheter for utnyttning av thorium for kraftproduksjon og reduksjon av lagrene av plutonium og høyanrikt uran er grundig beskrevet i IAEA-dokumentet TECDOC-1450 fra 2005 [13]. På verdensbasis anslår IAEA i 2012 at de kjente thoriumforekomstene er mellom 6 og 7 millioner tonn. [14]

Ettersom det finnes til dels store thoriumforekomster i Norge, har det vært en del diskusjon om utvinning av thorium og utvikling av thoriumreaktorer er felt Norge bør satse på. I 2007 ble det satt ned et utvalg av internasjonale eksperter for å se på mulighetene. Dette utvalget leverte sin rapport, *Thorium as an Energy Source – Opportunities for Norway*, i 2008 [15]. Den konkluderte med at det var behov for mer forskning, både i form av geologiske undersøkelser og for å utvikle nødvendig teknologi for økt bruk av thorium, men at Norge heller burde gå inn i eksisterende internasjonale forskningsprosjekter enn å sette i gang alene. I tillegg mente utvalget at det var behov for mer forskning for å vurdere spredningsrisikoen knyttet til thoriumsyklusen. FFI er ikke kjent med at forskning med det spesifikke formålet er igangsatt i Norge siden denne anbefalingen.

## 3 Brenselssyklusen

“Brenselssyklusen” er en betegnelse for alle de prosesser som involverer utvinning, bearbeiding, produksjon og bruk av kjernebrensel, samt håndtering av brukt kjernebrensel, inkludert eventuell gjenvinning av uran eller plutonium til sivile eller militære formål. Se Figur 3.1. I dette kapitlet vil vi se nærmere på global status og sentrale utviklingstrekk i ulike deler av brenselssyklusen. Fokuset vil være på kjernekraftsektoren, ikke de rene militære delene av

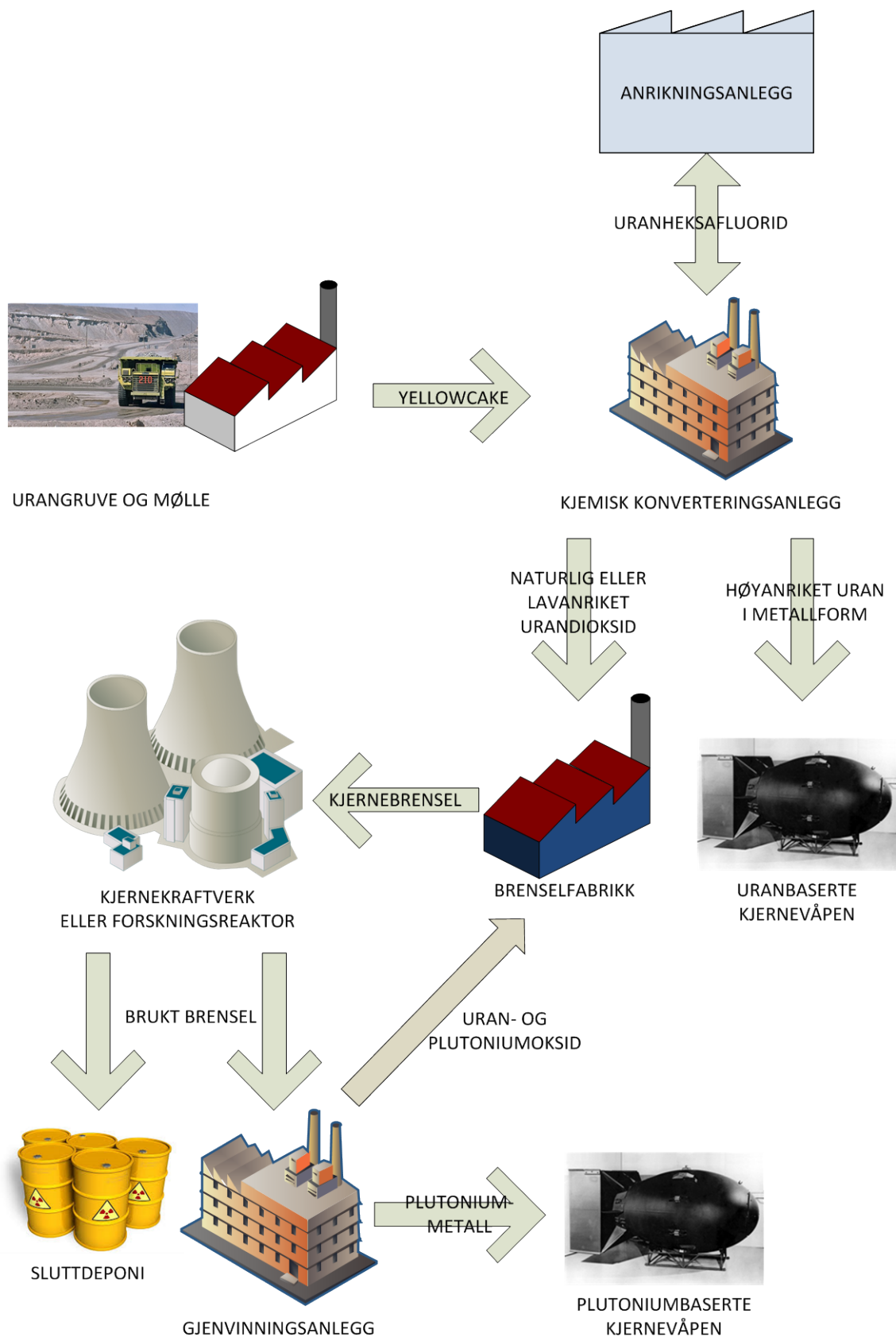
---

<sup>6</sup> *Lavanrikt uran* (*low enriched uranium*, LEU), er uran med en andel av uran-235 som er over 0,7 prosent (tilsvarende naturlig uran), men under 20 prosent. Med 20 prosent eller mer av uran-235 kaller vi det *høyanrikt uran* (*highly enriched uranium*, HEU).

<sup>7</sup> Såkalte *fertile isotoper* er stoffer som kan danne *fissile isotoper* (som uran-235 og plutonium-239) ved innfangning av nøytroner. Thorium-232 danner det fissile uran-233 når det bestråles av nøytroner. Dersom det fertile materialet er fysisk atskilt fra det fissile brenselet i reaktoren, så kalles det gjerne et *blanket*. Fissile isotoper kan spaltes av nøytroner med alle typer energier og kan dermed opprettholde en kjedereaksjon.

brenselssyklusen, som produksjon og støp av uran- og plutoniummetall. Og betraktninger knyttet til anrikning vil komme i neste kapittel.

Ofte snakker man om “framenden” og “bakenden” av brenselssyklusen, hvor “framenden” er alle de prosesser som inntreffer før brenselet tas i bruk i en reaktor (gruver, møller, kjemisk konvertering, eventuell anrikning og til slutt brenselinnkapsling), mens “bakenden” av brenselssyklusen inkluderer alle prosesser knyttet til håndtering av brukt brensel (kjøling, tørr mellomagring, eventuell repressering og gjenbruk av spaltbare materialer, og eventuelt deponering).



Figur 3.1 Den kjernefysiske brenselssyklusen. Uran fra gruver går her igjennom ulike behandlingsledd før det kan brukes enten som reaktorbrensel eller i kjernevåpen.



### 3.1 Uranmalm

I dag er Kasakhstan verdens desidert største produsent av uran, fulgt av Canada. Tidligere har det også blitt produsert en god del uran i Europa, særlig i Tyskland og Tsjekkia. I Tyskland er det i dag helt slutt på uranproduksjon, mens det i Tsjekkia produseres rundt 250 tonn uran per år.

Tabell 3.1 Verdens største uranprodusenter i 2010, i tonn uran per år.[16]

Uranproduksjon 2010	
Kasakhstan	17803
Canada	9775
Australia	5918
Namibia*	4503
Niger	4197
Russland	3562
Usbekistan	2874
USA	1630
Kina	1359
Malawi	681
India	400
Brasil	148

\* Estimert av NEA

### 3.2 Uranpriser og global anrikningskapasitet- og etterspørsel

Spotprisen for uran er svært ustabil. I 2007, samtidig som oljeprisene steg kraftig, nådde uranprisene et historisk høyt prisnivå, 138 dollar/pund<sup>8</sup> for uranoksid kalt *yellowcake* ( $U_3O_8$ ). Etter finanskrisen høsten 2007 sank prisene noe, men lå likevel på over 75 dollar/pund før Fukushima-katastrofen skjedde i 2011. Etter dette besluttet både Japan og Tyskland å stenge ned sine reaktorer, og uranprisene er nå lavere, cirka 35 dollar/pund (oktober 2014). Dette er et kraftig prisfall, men hvis vi går mer enn ti år tilbake til 2003, ser vi at tilsvarende priser var nede i 10 – 15 dollar/pund. [14;17]

Det er teknisk mulig å utvinne uran fra sjøvann. Dette vil være svært kostbart i forhold til utvinning fra gruver, men prisnivået for dette vil kunne gi en pekepinn mot et maksimalnivå uranprisene neppe vil kunne overstige. Siden ingen slik teknikk er i bruk i dag, er det vanskelig å anslå hvor kostbart det vil være. En mulig metode for utvinning av uran fra sjøvann er utviklet av den japanske atomenergiorganisasjonen (*braid-type adsorbent recovery system*). Utviklerne av teknikken anslår at dersom den tas i bruk i stor skala, vil den kunne produsere uran til en pris av rundt 995 dollar/kg, mens uavhengige forskere fra *University of Texas, Austin* anslår kostnadene til omkring 1230 dollar/kg. Begge prisanslagene ligger mer enn én størrelsesorden over uranprisen de siste årene. [18]

<sup>8</sup> Mange forskjellige enheter brukes for å betegne pris for uran, dollar/pund  $U_3O_8$  brukes i en del statistikker (pund = 0,454 kg), dollar/kg eller tonn i andre.

Det sier seg selv at med slike prisvariasjoner er det vanskelig å beregne hvor lønnsom en urangruve kan bli over tid. Til en viss grad påvirkes også vurderingene av forventet lønnsomhet videre i brenselssyklusen av uranprisen. For eksempel vil etterspørselen etter anrikningstjenester styres av etterspørselen etter brensel, som svinger med uranprisene.

Ifølge IAEA er dagens totale anrikningskapasitet omkring 65 millioner SWU (*Separative Work Units*)<sup>9</sup> per år. Det meste av anrikningsarbeidet gjøres i store, kommersielle anlegg i Kina, Frankrike (Arevas anlegg Eurodif), Russland (fire anlegg drevet av Tenex) og USA (USEC og URENCO). Det finnes også noen mindre, kommersielle anlegg i Nederland, Storbritannia og Tyskland, drevet av det europeiske anrikningskonglomeratet URENCO. Russiske Tenex står for omlag halvparten av den globale kapasiteten, mens URENCO står for rundt en tredel. Den globale etterspørselen er på rundt 45 millioner SWU per år, som er vesentlig lavere enn produksjonskapasiteten. Det er altså en viss overkapasitet på det kommersielle urananrikningsmarkedet. Dersom de mange nye kjernekraftverkene som er under planlegging faktisk blir bygget, vil naturligvis denne situasjonen endre seg. På samme måte er det overkapasitet i brenselproduksjonsanleggene. [19]

### 3.3 Reprosessering

Et stort problem ved all bruk av reaktorteknologi er avfallsproduksjonen. Brukt brensel fra reaktorer er svært radioaktivt, og må lagres i lang tid før aktiviteten har sunket såpass at det kan håndteres videre. Per i dag har ingen land fullt ut løst problemet med langtidslagring av avfall, men to av de landene som har kommet lengst er Sverige og Finland som begge har gjort vedtak om bygging og plassering av langtidslagre, såkalte *dype, geologiske deponier*. I Finland har byggingen startet. I Sverige vil prosessen sannsynligvis ta noe lengre tid. Disse to landene har lover mot å ta imot radioaktivt avfall fra utlandet, og vil derfor kun lagre avfall fra egne kraftverk. Norge har ikke kjernekraftverk, men brenselet fra landets forskningsreaktorer på Kjeller og i Halden lagres på midlertidig basis på Kjeller i påvente av mer varige løsninger.

Et alternativ til lagring er reprosessering av avfallet. Dette betyr at avfallet blir løst opp i sterke syrer, og at det som kan brukes om igjen, som ikke-forbrent uran og plutonium, blir trukket ut. De mest radioaktive stoffene blir dermed skilt ut fra hoveddelen av brenselet, men de vil fortsatt utgjøre et problem som må lagres. En del nyttige, radioaktive isotoper kan også skilles ut og brukes i industrielle og medisinske formål samt forskning. Reprosessering kan ses på som en sortering av de ulike bestanddelene av bestrålt kjernebrensel.

Avfallsproduksjon kan måles i tonn tungmetall (*tons of Heavy Metal, t HM*). I 2012 var avfallsproduksjonen på verdensbasis 10 000 t HM, og total akkumulert mengde i verden var cirka 360 500 t HM. Kun en liten andel av dette blir reprosessert. Reprosesseringen er kostbar og medfører risiko for ulykker. Ettersom reprosessering kun reduserer mengden høyaktivt avfall, men ikke ødelegger det, vil uranprisen og muligheten for å utnytte uran og plutonium fra det

---

<sup>9</sup> *Separative Work Units* er en enhet som brukes som mål for anrikningsarbeid. Den er ikke enkelt definert. Hvor mye anriket uran én SWU vil gi avhenger både av anrikningsgraden og av andelen U-235 i restproduktet. Se for øvrig eksempler i neste kapittel.

brakte brenselet på nytt som såkalt MOX-brensel (*Mixed OXide fuel*) være avgjørende for om prosessen er økonomisk lønnsom.

Som kjernekraftleverandør har Russland utmerket seg ved å tilby ordninger der stater som kjøper kraftverk og brensel fra Russland, også kan inngå avtaler om tilbakelevering av brukt brensel for reprosessering eller lagring. Brenselet vil da formelt eies av Russland hele tiden, men leies ut til brukeren. Dette kan være svært attraktivt for stater som ikke ønsker å etablere egne lagre, men løsningen vil nødvendigvis medføre at svært radioaktivt avfall må fraktes over lange strekninger. Det vil medføre en økt risiko for katastrofale utlipp. (Se for eksempel [20].)

## 4 Grunnlag for staters beslutninger

### 4.1 Økonomiske vurderinger

Brenselssyklusen er teknologisk og økonomisk krevende å bygge opp, og land som starter med å utvikle denne teknologien i dag, vil ha en vesentlig ulempe i forhold til etablerte stater som har drevet med dette i over 50 år. På den annen side kan energisikkerhetsmessige forhold bidra til at nye stater kan anse det å bygge opp en komplett brenselssyklus å være i deres interesse på lang sikt.

Ettersom Ikke-spredningstraktaten for kjernevåpen (*The Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*, NPT) gir alle medlemsstater rett til å bruke kjernevåpenteknologi til fredelige formål, er det få direkte måter å hindre spredning av slik teknologi på dersom det ikke er mistanke om brudd på NPT. Derimot kan man ta i bruk indirekte tiltak. Ved å gjøre det enklere for stater å ta i bruk kjernekraftteknologi uten å utvikle alle typer brenselssykluseteknologi på egenhånd, reduseres muligheten for misbruk av slik teknologi. Tiltak av denne typen kalles gjerne multilateralisering av brenselssyklusen.

#### 4.1.1 Når lønner det seg å utvikle anrikningsanlegg?

Enkelte uranproduserende stater har ved noen anledninger uttrykt en interesse for å utvikle egen anrikningskapasitet. Disse inkluderer blant andre Australia, Sør-Afrika og Jordan. For en stat som selger yellowcake på det globale markedet kan det være fristende å tilføre en merverdi til denne og selge ferdigbehandlet uran til en mye høyere pris. Samtidig er det forbundet med betydelig økonomisk risiko å utvikle en så sofistikert teknologi fra bunnen av. En stat som vurderer å gå denne veien av økonomiske, ikke forsyningssikkerhetsmessige årsaker, må stille seg spørsmålet om hvor lang tid en kan forvente at det vil ta før investeringen betaler seg. Det er åpenbart at svaret på dette spørsmålet ligger i statens evne til effektivt å utvikle og etablere en operativ kapasitet, og på hvilken skala. Det er også å vente at en stat vil skjele til historiske eksempler på andre stater som har utviklet anrikningsteknologi på kommersiell skala med høyst vekslende hell. I de fleste tilfeller har stater først utviklet denne kapasiteten med tanke på våpenbruk, og har siden satt ressursene inn på sivil brenselproduksjon. To moteksempler er Tyskland og Japan, hvor førstnevnte har lyktes i å bli en kommersiell anrikningsaktør gjennom konsortiet URENCO (sammen med Storbritannia og Nederland), mens Japan har brukt store

ressurser uten ennå å ha blitt en kommersiell tilbyder av anrikningstjenester på det internasjonale markedet.

Prisene på både naturlig og anrikt uran er dessuten helt bestemmende for om dette vil være lønnsomt eller ikke. Prisen på yellowcake har variert mellom ti og hundre dollar per pund, med en hovedvekt rundt femti dollar per pund siden 2007. Med en dollarkurs på litt over seks kroner, så tilsvarer det omkring 600 kr/kg yellowcake i årene fra 2007 [14;17]. Hva er så markedsprisen for anrikt uran? De få, store eksportørene av anrikningstjenester har gjerne langsiktige avtaler med operatørene, hvor prisene på anrikt uranoksid ofte ikke er kjent for utenforstående. Derimot finnes det data for prisen på selve anrikningstjenesten målt i SWU. Anslagsvis behøves det 100 000 SWU for å anrike naturlig uran til lavanrikt brensel nok til et 1 GW<sub>e</sub> kjernekraftverk (lett vannsmoderert). Ifølge Geoffrey Rothwell i 2009, har prisen per SWU variert mellom 80 og 160 dollar mellom 1991 og 2008 med en hovedvekt rundt 150 dollar siden 2005 [21]. Med en dollarkurs litt over seks kroner, tilsvarer det omtrent tusen kroner per SWU siden 2005. De rene anrikningskostnadene forbundet med det årlige brenselforbruket til et kjernekraftverk på 1 GW<sub>e</sub> er dermed av størrelsesorden 100 millioner kroner.

Dersom det skal være noe poeng å etablere en kommersielt relevant anrikningskapasitet, så bør kapasiteten ligge på minimum én million SWU per år. Det skulle kunne gi en bruttoinntekt på rundt én milliard kroner per år for solgte anrikningstjenester. Da er ikke produksjonskostnadene trukket fra, som antas å være langt lavere enn de stipulerte inntektene for gassentrifugeanlegg (gassdiffusjonsanlegg har langt høyere energiforbruk og dermed kostnader). Den typen vurderinger kan være veiledende for hvor lang tid det vil ta å tjene inn investeringskostnadene for et fullskala anrikningsanlegg. En statlig aktør som søker å besitte hele framenden av brenselssyklusen bør også ta hensyn til økonomien i å bygge og drive et konverteringsanlegg, hvor naturlig yellowcake renses og konverteres til uranheksafluorid, og hvor anrikt uranheksafluorid kan reduseres og oksideres til anrikt uranoksidpulver egnet til brensel.

Det franske kjernekraftkonsernet Areva er i ferd med å bygge et nytt, svært stort anrikningsanlegg, Georges Besse II, i Sør-Frankrike. Anlegget vil bruke samme type gassentrifuger som URENCO benytter, og vil erstatte et gammelt gassdiffusjonsanlegg. Ifølge Areva vil anlegget nå en full kapasitet på 7,5 millioner SWU per år i 2016, og de totale kostnadene forventes å bli 3 milliarder euro [22]. Dette gir en installasjonskostnad på 400 euro per installert SWU, noe som stemmer relativt godt overens med en kilde fra *Energy Policy* i 2008, Cabrera-Palmer og Rothwell [23], som estimerer investeringskostnadene forbundet med nye, store gassentrifugeanlegg til å være cirka 500 dollar (2006-verdi) per installert SWU. Begge tallene tilsvarer rundt 3000 kroner per installert SWU.

Cabrera-Palmer og Rothwell utleder dette tallet fra eksempler i stater som allerede besitter konkurransedyktig teknologi, og som har bygget anlegg med kapasitet på noen millioner SWU per år. I det tilfellet vil det koste noe over tre milliarder kroner å bygge et anlegg med en kapasitet på én million SWU (dollaren lå på noe over seks kroner gjennom 2006). Verdens nest største anrikningsaktør, URENCO, hadde i 2013 nettoinntekter på 337 millioner euro med en anrikningskapasitet på 17,6 millioner SWU [24]. Det tilsvarer en nettoinntekt på rundt 150

millioner kroner per million SWU i kapasitet med en eurokurs på rundt åtte kroner. Dersom dette er representativt for andre, store anrikningsaktører så vil det ta rundt tjue år bare å tjene inn kostnadene direkte forbundet med byggingen av et anrikningsanlegg på én million SWU, dersom vi holder kapitalkostnader ute. Samme kilde bruker også det brasilianske anrikningsanlegget i Resende som eksempel. Dette anlegget har en kapasitet på 203 000 SWU per år og angivelig en byggekostnad på 1500 dollar per SWU. Med denne prisen vil det ta tre ganger så lang tid å tjene inn investeringskostnadene som i det første eksempelet, altså rundt seksti år for et anlegg med en kapasitet på én million SWU (igjen sett bort kapitalkostnader). For land som har utviklet en gassentrifuge som fungerer, men som ikke nødvendigvis er på nivå med de mest avanserte blant de store aktørene, så er trolig eksempelet fra Brasil det mest representative. Prisforskjellen per installert kapasitet tilskrives allikevel først og fremst forskjellene i total kapasitet. Land som starter fra null må også påregne mange års kostbar utvikling før de kan begynne å bygge et fullskala anlegg. Med en lite avansert sentrifugeteknologi vil det kreve enorme anlegg for å oppnå over én million SWU per år. Én sentrifuge opptar typisk én kvadratmeter gulvplass. Land som Kina og Russland har gjerne korte sentrifuger i flere etasjer i et anlegg, mens det i andre land oftest er én sentrifuge i høyden. Dersom en ikke oppnår mer enn 1 SWU per sentrifuge per år – noe som tilsvarer teknologi fra tidlig 1960-tallet – så må en altså ha anlegg på over én million kvadratmeter for å oppnå én million SWU per år og således bli konkurransedyktig. Det tilsvarer en kvadratisk hall med én kilometer lange vegger.

#### 4.1.2 Laserlys i tunnelen?

Både Australia, USA, Sovjetunionen/Russland, Tyskland, Japan, Iran og Irak har forsøkt å utvikle urananrikning ved hjelp av ulike lasermetoder, som *molekylær laserisotopseparasjon* (MLIS), *atomdamplaserisotopseparasjon* (AVLIS) og *separasjon av isotoper med lasereksitasjon* (SILEX).<sup>10</sup> Sistnevnte slektskap til de to andre er noe uklart. Disse teknikkene, åpenbare fortrinn sammenliknet med tradisjonelle teknikker som gassdiffusjon og gassentrifuger, er at prosessen er særdeles energieffektiv og kompakt. Hvert ledd har en høy grad av separasjon med lite strømforbruk. Den store utfordringen har imidlertid vært å oppskalere det til noe mer enn laboratoriebenskala. Australske forskere er de eneste som har sett ut til å kunne oppskalere dette til kommersiell skala med sin SILEX-prosess, som siden ble solgt til USA, hvor det for tiden tas videre. I 2012 fikk *Global Laser Enrichment* (eid av kjernekraftgiganten GE Hitachi og uranprodusenten Cameco) tillatelse til å bygge et SILEX-anlegg på kommersiell skala utenfor Wilmington i Nord-Carolina. [25]

Dersom SILEX faktisk lar seg kommersialisere, så er det flere som frykter at teknologien etter hvert vil spre seg til mange hender, på samme måte som gassentrifugeteknologi. Faren er at stater med fordekte anrikningsprogrammer langt enklere kan skjule et laseranrikningsanlegg enn et gassentrifugeanlegg. (Se spesielt [26].)

---

<sup>10</sup> For en innføring i kjente anrikningsteknologier, inkludert de nevnte laserbaserte metodene, se FFI-rapport 2008/02376 “Uranium enrichment technologies” av Siv Gundrosen Aalbergsjø.

## 4.2 Andre vurderinger som kan påvirke teknologivalg

En mulig løsning som er lansert for å kunne øke anrikningskapasiteten på verdensbasis, uten risiko for at teknologien misbrukes til våpenformål, er å bygge nye anlegg etter det såkalte *black box*-prinsippet. Dette vil si at landet får installert et ferdig anlegg av en utenlandsk produsent, og at lokalt ansatte kun får nok informasjon til å kunne drive anlegget til daglig, men ikke nok til å kunne kopiere teknologien. I dag drives anrikningsanlegg i USA med sentrifuger levert av URENCO på denne måten. Sentrifugene produseres ved URENCOs anlegg i Europa, fraktes til USA og installeres der av URENCOs personell. Selv en teknologiholder som Kina har kommersielle anrikningsanlegg med russisk gassentriqueteknologi etter dette prinsippet. Det argumenteres for at bygging av nye anlegg på denne måten ikke bare unngår å øke spredningsrisikoen, men at det faktisk reduserer den, ettersom det reduserer behovet for egenutvikling i flere land. På den annen side kan man vanskelig tenke seg at et eksisterende anlegg på egen jord, *ikke* ville være en fordel for en stat som ønsker å etablere et skjult anrikningsanlegg.

### 4.2.1 Energisikkerhet, reell og innbilt

Sør-Afrika er et land som er aktuelt som en ny såkalt *tilbyderstat*. Landet har både uranforekomster og en forhistorie med et skjult kjernevåpenprogram som også innebar utvikling av teknologi for urananrikning. I dag driver Sør-Afrika uranproduksjon, men uranet må fraktes ut av landet, anrikes og omgjøres til brensel, før det fraktes tilbake for bruk i reaktorer. Med dette systemet er landet både avhengig av utenlandske leverandører og at transporten av brenselet foregår uhindret. Man ser dermed for seg at landet kan ha fordel av å opprette et lokalt anrikningsanlegg og anlegg for brenselproduksjon. På lang sikt har landet som mål å bli selvforsynt i alle deler av brenselssyklusen. (Se også avsnitt 5.4.)

Per i dag har eksisterende anrikningsanlegg og brenselabriker mer enn nok kapasitet. Derimot har man eksempler på at land uforskyldt kan bli rammet av politiske forandringer i eksportlandene. Etter at India utførte sin prøvesprengning i 1974, skjerpet både USA og Canada sine eksportbetingelser, og dette gikk også ut over tredjeland som ikke selv hadde brutt noen forpliktelser.

### 4.2.2 Brenselsbankmodell

For å bøte på problemet med risiko for leveranseavbrudd, vedtok IAEA's styre i 2010 at det skulle opprettes en internasjonal brenselsbank som skulle kunne garantere forsyning av kjernekraftbrensel. Ideen er ikke ny; da IAEA ble etablert, var det en utbredt tanke at organisasjonen med tiden skulle fungere som mellomledd mellom produsenter og forbrukere av kjernefysisk brensel, og på den måten bidra til å hindre misbruk. Dette ble imidlertid ikke virkelighet, men tanken om en brenselsbank har blitt tatt opp igjen i nyere tid. Tanken er da at en bank i regi av IAEA kan garantere forsyninger til alle stater med behov for brensel som ikke har brutt noen avtaler med IAEA, og dermed redusere behovet for etablering av nye anlegg. Til sammen har over 100 millioner dollar blitt bevilget til nå, hvorav 50 millioner kommer fra den amerikanske stiftelsen og "tankesmia" *Nuclear Threat Initiative* (NTI) og et tilsvarende beløp fra Norge, EU, Kuwait og De forente arabiske emirater. Kasakhstan har sagt seg villig til å huse en slik brenselsbank.

Fra før finnes det en IAEA-kontrollert brenselbank, eller *LEU Guaranteed Reserve* i Angarsk i Russland. Denne ble opprettet i 2010 etter en avtale mellom IAEA og den russiske atomenergiorganisasjonen *Rosatom*. Uranet i denne banken eies av Russland, men kontrolleres av IAEA [27]. Brenselbanken har cirka 120 tonn uran anrikt til inntil 4,95 prosent uran-235 [28]. Det er nok til omtrent fem års forbruk av brensel i en 1000 MW<sub>e</sub>-reaktor.

Hittil har ingen stat faktisk tatt i bruk brensel fra denne banken. Det kan derfor diskuteres om dagens brenselbank gir en reell forsyningssikkerhet, eller kun gir en teoretisk sikring av brenselssituasjonen. Uansett størrelse vil brenselbankmodellen heller ikke kunne gi noen sikkerhet dersom det skulle oppstå avbrudd i transportkjedene. En kan for øvrig argumentere for at bare eksistensen av slike mekanismer kan virke betryggende på stater som vurderer om de skal forsøke å utvikle brenselssyklus teknologi selv eller stole på uavbrutte forsyninger fra eksisterende tilbydere, selv om det i praksis ikke viser seg nødvendig å kjøpe brensel fra en slik brenselbank.

### 4.3 Virkningen av ulike tiltak

Multilateralisering av brenselssyklusen vil kunne redusere mulighetene for at nye kjernefysiske anlegg misbrukes til våpenformål. Dersom flere stater er involvert i driften av et anlegg, både økonomisk og med personell, vil ingen av statene kunne endre driften av anlegget uten at dette oppdages.

Det er flere måter brenselssyklusen kan multilateraliseres. Eksisterende tilbyderstater kan ekspandere ved å eksportere ferdige løsninger med reaktor og brenselforsyning. Slike ordninger kan gjøres enda sikrere ved å legge til tilbakeførselsordninger for brukt brensel. Selve reaktoren kan også selges ferdig som et *black box*-anlegg, der kjøperstaten ikke trenger mer kunnskap om anlegget enn det som kreves for å drifte det til daglig. Alt annet vil tilbyderstaten ta seg av. Det samme gjelder eksempelvis anrikningsteknologi, som er sensitiv både av ikke-spredningssyn og av kommersielle grunner.

Det kan også opprettes nye tilbyderkonglomerater, etter en modell tilsvarende URENCO. Dette er mer på planleggingsstadiet, og det finnes ingen konkrete planer for dette per i dag. Ettersom det skal mye til å få nye anlegg til å lønne seg økonomisk, er det heller ikke svært sannsynlig at dette kan skje i fremtiden.

Til det siste kan man se for seg ordninger der IAEA får en større rolle enn i dag. I dag er det under etablering i Kasakhstan en brenselbank under IAEA-kontroll, men tiltaket er av omfang mer å regne som et symboltiltak enn noe som vil ha en større konkret rolle i kjernekraftmarkedet. Hensikten er å redusere motivasjonen stater måtte ha for å søke å utvikle sensitiv brenselssyklus teknologi på egenhånd begrunnet i forsyningssikkerhet.

## 5 Spesielle enkeltstater

Dette kapitlet inneholder en kort vurdering av visse utviklingstrekk i enkelte stater som er relevante fordi de enten er kommende aktører i produksjon av uran, har utvist interesse for brenselssyklus teknologi, har ambisjoner om å etablere kjernekraft eller står overfor en økt satsing på eksisterende kjernefysisk infrastruktur (brenselssyklus og/eller kjernekraft). Noen av statene som oppfyller disse kriteriene vil allikevel ikke gis en spesiell behandling her. Årsaken er at disse statenes sivile og militære atomprogrammer ble grundig behandlet i en FFI-rapport fra 2013 [29]. Vi vier heller ikke spesiell oppmerksomhet til de store, veletablerte tilbyderstatene på kjernekraftsiden, som Frankrike, Japan, Russland og USA, siden disse allerede behersker hele brenselssyklusen og besitter konkurransedyktig kjernekraftteknologi.

### 5.1 Kina

Kina utførte sin første prøvesprengning i 1964, og er dermed en av de fem statene som kunne tiltre NPT som kjernevåpenstat. De første årene etter at NPT var utarbeidet, uttrykte Kina stor misnøye med avtalen, som de oppfattet som diskriminerende ettersom den ikke gir samme rettigheter til alle land. I 1992 tiltrådte de likevel traktaten.

Kina har et relativt begrenset kjernevåpenprogram. De første våpnene var basert på høyanriket uran, og landet har kun hatt to kjente anrikningsanlegg for våpenformål og to reaktorer for produksjon av våpenplutonium. Alle disse anleggene har vært forholdsvis små, og ingen av dem skal være i drift til våpenformål i dag.

På den sivile siden har derimot Kina svært store ambisjoner. Kina har i følge siste IAEA *Tech Review*-rapport 17 operative reaktorer og 29 under bygging (se Tabell 2.1) [14]. De fleste av de nye reaktorene er av den kinesiskutviklede, annengenerasjons trykkvannsreaktortypen CPR-1000, men det bygges også fire amerikanske Westinghouse AP1000. Dette er en tredjengenerasjons trykkvannsreaktor som er godkjent for bruk i USA, men som hittil ikke har blitt bygget utenfor Kina [30;31]. Flere nye, mer avanserte kinesiske reaktortyper er under utvikling, også med tanke på eksportmarkedet.

Kina har også et *hurtig formeringsreaktorprogram*. En slik reaktor, *Chinese Experimental Fast Reactor* (CEFR) ble ferdigstilt i juli 2010, og ble knyttet til strømmettet i 2011. Denne reaktoren er på kun 20 MW<sub>e</sub>, men skal etter planen brukes som modell for større, hurtige formeringsreaktorer.

De første kinesiske anrikningsanleggene ble bygget på 1960-tallet som et ledd i kjernevåpenprogrammet. I dag har også Kina en stor sivil anrikningskapasitet. Byggingen av et stort anrikningsanlegg basert på russisk teknologi ble påbegynt på 1990-tallet i Hanzhun i Shaanxi-provinsen. Anlegget ble ferdig i 2011, og World Nuclear Association anslår at det har en kapasitet på cirka 1 million SWU per år [32]. I tillegg ble det i 2001 ferdigstilt et nytt, sivilt anrikningsanlegg i tilknytning til et eldre, militært anlegg i Lanzhou i Gansu-provinsen. Dette anlegget, som også bruker russisk teknologi, har en kapasitet på 0,5 millioner SWU per år.



Imidlertid er Kinas behov for anrikningskapasitet større enn det disse anleggene kan levere, og ettersom flere kraftverk bygges, vil behovet være økende. WNA anslår at behovet var 2,5 millioner SWU i 2010, og at dette vil øke fram mot 2020 til nesten 9 millioner SWU per år. Det er inngått avtaler om import av lavanriket uran både fra URENCO og det russiske selskapet Tenex.

Selv om Kina utvikler stadig flere typer kjernefysiske anlegg hjemme, er de avhengig av import av både brensel og teknologi fra utlandet. Dette ser foreløpig ikke ut til å endre seg.

## 5.2 India

India utførte sin første prøvesprengning i 1974. Denne prøvesprengningen ble forklart av indiske myndigheter som en ”fredelig sprengning” (*peaceful nuclear explosion*, PNE) som et ledd i et program som skulle finne fredelige, sivile formål med kjernefysiske eksplosjoner, som utgravning av store havner og liknende. I praksis er det liten forskjell på en første prøvesprengning i et våpenprogram og en slik ”fredelig” prøvesprengning. I 1998 utførte imidlertid India to prøvesprengninger til, og denne gangen var det ingen tvil om at dette var å betrakte som militære prøvesprengninger. Ettersom India aldri har undertegnet NPT, har landet ikke brutt noen internasjonal avtale ved å utvikle kjernevåpen, og India regnes i dag som en *de facto* kjernevåpenstat.

India har i følge siste IAEA *Tech Review*-rapport 20 operative reaktorer og 7 nye under bygging (se Tabell 2.1) [14]. Av de 20 eksisterende reaktorene er rundt halvparten definert som militære og dermed ikke underlagt sikkerhetskontroll av IAEA. Disse anleggene er ikke nødvendigvis bygget for plutoniumproduksjon, men kan være alternative reaktordesigner eller annen teknologi India er interessert i å holde hemmelig.

Etter 1970 har alle igangsatte indiske reaktorer vært av indiskutviklede typer, drevet av det nasjonale selskapet *Nuclear Power Corporation of India Ltd* (NPCIL) [33]. To nye kraftproduserende reaktorer, *Kudankulam 1* og *Kudankulam 2*, som er under ferdigstilling i Tamil Nadu, er i midlertid russiske, VVER-1000/AES-92. Hver av disse vil ha en kapasitet på 917 MW<sub>e</sub>. Avtalen med Russland om disse reaktorene innebærer ikke tilbakeføring av brukt brensel, og det er planer om at brenselet skal reprosesserer i India. Nye indiskutviklede 700 MW<sub>e</sub> trykkvannsreaktorer som benytter tungtvann (PHWR-reaktorer) er under bygging i Gujarat og i Rajasthan, som en utvidelse av allerede eksisterende kraftverk [34].

India inngikk en avtale om sivilt samarbeid innen kjernekraft med USA og fikk i 2008 en avtale med *Nuclear Suppliers Group* (NSG) som ga India rett til å handle med NSG-medlemslandene på lik linje med stater som er part i NPT. Likevel har det ikke blitt igangsatt bygging av flere utenlandske kraftverk etter dette. Dette skyldes til dels en indisk lov vedtatt i 2010, *Civil Liability for Nuclear Damage Act* [35], som vil ilegge operatøren av et kjernefysisk anlegg et stort erstatningsansvar på opptil 15 milliarder rupi (cirka 1,5 milliarder kroner) ved eventuelle ulykker som skyldes feil eller svakheter ved komponenter. Flere kjernekraftverkleverandører, både Westinghouse, GE Hitachi, Areva og Atomstroyexport skal være i forhandlinger med NPCIL om

etablering av nye anlegg, men ingenting konkret er avgjort. Utbyggingen av to planlagte russiske enheter, *Kudankulam 3* og *Kudankulam 4*, ser også ut til å bli forsinket. (Se f.eks. [36])

Imidlertid har India etter 2008 inngått flere avtaler om kjøp av uran i ulike former, fra blant annet Frankrike, Russland og Kasakhstan, og landet skal ha mottatt til sammen cirka 870 tonn uran fra disse tre landene i 2010 [34].

India har to urananrikningsanlegg, begge temmelig små. Det ene ligger nær Mysore i delstaten Karnataka, *Ratthalli Rare Materials Plant* (RMP), og det andre er tilknyttet *Bhabha Atomic Research Center* (BARC) i Mumbai i delstaten Maharashtra. Ratthalli-anlegget ble påbegynt på 1980-tallet og ble deklarerert av myndighetene i 1992. Anlegget drives av selskapet *Indian Rare Earths Limited* (IREL), og skal bestå av noen hundre sentrifuger, hver med en kapasitet på cirka 3 SWU per år. Anlegget skal være bygget for å produsere anriket uran til ubåtrektorbrensel fra indiskutvunnet uran [37;38]. Noen kilder mener at India er i ferd med å bygge et nytt, større anlegg i tilknytning til det eksisterende, noe som ville flerdoble kapasiteten [39]. Anlegget i Mumbai ble etablert som et pilotanlegg på i begynnelsen av 1980-tallet og er etter alt å dømme mindre enn Ratthalli-anlegget[40]. Et annet nytt, større anlegg har vært planlagt i delstaten Karnataka, men arbeidet er foreløpig stoppet av indiske miljøvernmyndigheter.

India har også en stor satsning på alternative reaktortyper, blant annet for å kunne få utnyttet landets thorium-reserver. I tillegg til en ny 300 MW<sub>e</sub>-reaktor som kalles *Advanced Heavy Water Reactor* (AHWR) (omtalt i avsnitt 2.2.2), er det også under bygging en ny, stor prototype *fast breeder*-reaktor i Kalpakkam i Tamil Nadu. Denne reaktoren skal benytte uran-plutoniumoksid som brensel. Planlagt oppstart var i september 2014, men den ser ut til å ha blitt noe utsatt [41].

India har store ambisjoner om å bli en viktig stat innen kjernekraftområdet, også som teknologiutvikler. I hvilken grad ambisjonene vil bli virkelighet gjenstår å se.

### 5.3 Brasil

Mange regner med at Brasil hadde et aktivt kjernevåpenprogram fram til den demokratisk valgte president Fernando Collor de Melo i full offentlighet avdekket og avsluttet det hele i 1990. Landets militære våpengrener hadde da i noen år bedrevet fordekt kjernefysisk utvikling med det formål å kunne utføre “fredelige kjernefysiske sprengninger”, samt utvikle fartøysreaktorer for ubåtvåpenet. Det var allment antatt at det tidligere militære lederskapet også hadde en kjernevåpenopsjon for øyet. I nyere tid har det blitt bestridt hvor reelt og omforent det angivelige kjernevåpenprogrammet faktisk var, men realiteten var at Brasil med dette hadde skaffet seg evnen til å anrike uran og produsere uranheksafluorid til anrikningsprosessen ut fra egne uranreserver. Nyere forskning antyder at elementer i våpengrenene hadde et sterkt ønske om kjernevåpen, men at det aldri ble fattet noen endelig beslutning om dette fra høyeste politiske hold. [42;43]

Helt siden 1940-tallet har Brasil hatt velkjente ambisjoner om et selvforsynt kjernekraftprogram. På den tiden spilte landet en viktig rolle som råvareleverandør til det amerikanske kjernevåpenprogrammet. Til gjengjeld krevde Brasil kjernefysisk teknologioverføring, som

dannet en sped start mot målet om å beherske hele brenselssyklusen selv. Allerede i 1956 klarte Brasil å sikre seg tre eksperimentelle utgaver av vesttyske gassentrifuger. Og mot slutten av 1960-tallet inngikk de et samarbeid med både Frankrike og Vest-Tyskland om utvikling av anrikningsteknologi. Dette førte til overføring av den tyske "jet-dyse"-teknologien for anrikning av uran, som aldri har blitt realisert på industriell skala, under en kontrakt med "Kraftwerk Union" i 1975 som inkluderte alle aspekter av brenselssyklusen. [23;44]

Kontrakten med Kraftwerk Union medførte et krav om IAEA-sikkerhetskontroll på alle anlegg som benyttet seg av teknologi av vesttysk opphav. Det forhindret derimot ikke Brasil i å utvikle kjernefysiske anlegg med egenutviklet teknologi uten sikkerhetskontroll. Landet var ikke forpliktet til å underlegge alle sine anlegg slik kontroll, siden de ikke tiltrådte NPT før i 1998. Traktaten om en kjernevåpenfri sone i Latin-Amerika, *The Treaty of Tlatelolco*, fra 1967 ble ratifisert med alle tillegg i 1994. Parallelt med det kjente kjernekraftprogrammet utviklet den brasilianske marinen gassentrifuger for anrikning av uran til bruk i ubåtreatorbrensel. Luftforsvaret forsøkte på sin side å utvikle laseranrikning uten særlig hell, mens hæren skal ha sett nærmere på gass-grafitt-reaktorer for plutoniumproduksjon, uten at det kom noe håndfast ut av det. [23;43]

Militærdiktaturet endte i 1985. Året etter kom gassentrifugeprogrammet for dagen. Og i 1988 ble det første pilotanlegget i Iperó innviet. Dette anlegget har sporadisk blitt brukt til å produsere brensel anriket til nær 20 prosent til landets forskningsreaktorer. I 2003 annonserte Brasil planer om å bygge sitt første anrikningsanlegg på kommersiell skala. Anlegget i Resende begynte så smått produksjon av anriket uran i 2009, men sto i 2012 kun for rundt fem prosent av det årlige anrikningsbehovet i Brasil. Det er fortsatt den brasilianske marinen som eier og kontrollerer gassentrifugeteknologien, selv i Resende. Den sivile operatøren i Resende må kjøpe sentrifugene av marinen, uten selv å ha tilgang til teknologien. Marinen selv har et eget anrikningsanlegg, *Centro Experimental Aramar* i Iperó, for produksjon av anriket uran til ubåtbrensel. Uttalelser antyder at ubåtbrenselet vil være anriket til 18-19 prosent, altså i det høyere sjiktet av lavanriket brensel. Inntil videre anrikes det imidlertid til under 5 prosent til kjernekraftsektoren. [43]

USA bygde Brasils første kjernekraftreaktor, trykkvannsreaktoren "Angra 1", som begynte kommersiell strømproduksjon i 1985. Men USA krevde både å levere brenselet og ta det tilbake igjen etter bestråling og mellomlagring som en del av avtalen, så Brasil oppnådde ingenting i retning av å bli selvforsynte i kjernekraftsektoren med dette. Derimot var det ingen sånne betingelser ved "Angra 2", en trykkvannsreaktor bygd av Kraftwerk Union. Denne ble påbegynt allerede i 1976, men ble ikke satt i drift før i 2000 på grunn av en rekke økonomiske og politiske problemer. En tredje trykkvannsreaktor av samme type, "Angra 3", ble påbegynt på 1980-tallet, men er ennå ikke bygd ferdig. Franske Areva er nå i ferd med å ferdigstille denne med forventet oppstart sent i 2015. [43;45]

Etter 2020 har Brasil ambisjoner om å utvide kjernekraftsektoren betraktelig med bygging av hele åtte nye trykkvannsreaktorer på over 1 GW<sub>e</sub> hver. Det er imidlertid ikke bestemt hvem som skal stå for byggingen, men amerikanske, franske og russiske modeller regnes som de mest aktuelle reaktortypene. [45]

Etter at Brasil offisielt hadde lagt bort sine planer om å utvikle PNEer, så inngikk de et unikt, bilateralt samarbeid med Argentina om gjensidig sikkerhetskontroll på kjernefysiske anlegg og beredskapssamhandling. Dette ble formalisert gjennom opprettelsen av *The Brazilian-Argentine Agency for Accounting and Control of Nuclear Materials*, ABACC, i 1991. Samme år inngikk ABACC, Brasil, Argentina og IAEA en avtale om byrdefordeling av sikkerhetskontroll, så begge land i praksis fikk oppfylt sine forpliktelser under Artikkel III av NPT om internasjonal sikkerhetskontroll. Brasil har i årevis vært en innbitt motstander av Tilleggsprotokollen. Utover rent prinsipielle årsaker knyttet til misforholdet mellom NPTs pilarer (ikke-spredning, nedrustning og deling av kjernefysisk teknologi for fredelige formål), har landet uttrykt bekymringer knyttet til at teknisk informasjon fra landets anrikningsanlegg skal komme andre, konkurrerende aktører i hende gjennom for inntrengende IAEA-inspeksjoner.

#### 5.4 Sør-Afrika

Sør-Afrika har i dag kun ett kjernekraftverk, Koeberg, med to reaktorer med en nominell kapasitet på 900 MW<sub>e</sub> hver. Den første av disse reaktorene ble koblet til nettet i 1984, den andre året etter. Disse reaktorene står for cirka 6 prosent av strømforsyningen i landet. I tillegg finnes det en forskningsreaktor i Pelindaba, som også produserer isotoper for medisinske formål. [46]

Under apartheidtiden hadde Sør-Afrika et skjult kjernevåpenprogram og i forbindelse med dette to anrikningsanlegg for uran. Ingen av disse anleggene var kommersielt bærekraftige, og de ble i ettertid nedlagt. I tillegg har landet tidligere hatt stor utvinning av uran, hovedsakelig som biprodukt i gullgruver. I dag er det lite igjen i av dette, men flere områder er under vurdering for mulig ny utvinning av uran, avhengig av hvilken markedspris som kan oppnås. [47]

Et dokument fra sørafrikanske myndigheter fra 2008 [48] åpner for utvikling av mer kjernefysisk industri og større utvinning av uran. Dokumentet sier blant annet at målet på lang sikt er å være selvforsynt i alle deler av brenselssyklusen, dermed også urananrikning og brenselproduksjon. Hensynet til miljøet og at formålet skal være fredelig, er viktige prinsipper i satsingen. Selv om det er politisk vilje til å gjennomføre en stor satsing, har Sør-Afrika ikke en sterk økonomi, og det vil være vanskelig å få til de nødvendige økonomiske investeringene.

Landet nevnes ofte som en viktig framtidig kjernekraftstat, men foreløpig foreligger det ingen konkrete planer om bygging av anlegg, hverken for anrikning eller reprosessering. Se også avsnitt 4.2. Derimot er de eksisterende lagrene for brukt brensel snart fulle, og en, i hvert fall midlertidig, løsning på dette vil kunne tvinge seg fram. Det har også vært gjennomført utredninger om mulige plasseringer av nye kraftverk, og tre områder, Thyspunt, Bantamsklip, og Duynefontein, alle i Kapp-provinsen, har blitt plukket ut som mulige steder. Sør-Afrika har hatt forhandlinger med flere mulige leverandører av kjernekraftverk, både Westinghouse, Areva og Rosatom. I tillegg har landet nylig undertegnet en samarbeidsavtale med Kina. [47]

Sør-Afrika har uranressurser og en del kjernefysisk teknologi. Myndighetene har et ønske om å utvikle dette videre, men det vil kreve store økonomiske investeringer.

## 5.5 Sør-Korea

Den koreanske republikk, eller Sør-Korea, tar mål av seg til å bli en global tilbyder av kjernekraftverk. Ambisjonene er å bli verdens tredje største eksportør av kjernekraftreaktorer innen 2030. De moderne trykkvannsreaktorene er videreutviklet fra fransk og amerikansk reaktorteknologi, i den grad at koreanerne eksporterer den som sin egen. Per 2014 produserer landet over 20 GW<sub>e</sub> kjernekraft fra 23 kraftreaktorer. Deres første eksport av kjernekraftverk vil bli til De forente arabiske emirater, hvor et konsortium ledet av sørkoreanske Korean Electric Power Corporation (KEPCO) skal bygge fire kjernekraftreaktorer, hvorav den første allerede er påbegynt. [49]

Landet er part i NPT og har ratifisert og implementert Tilleggsprotokollen for IAEA-sikkerhetskontroll. Seoul har dessuten en bilateral avtale med USA fra 1974 som forbyr landet å utvikle anrikning og repressering [50]. Denne avtalen løp egentlig ut i mars 2014, men har blitt forlenget siden partene ikke har blitt enige om betingelsene. Det er nemlig ikke gitt at Sør-Korea også i framtiden går med på å avstå fra å bli en aktør også på de sensitive delene av brenselssyklusen. Det har i de senere år kommet fram at sørkoreanske forskere har studert laseranrikning på laboratorieskala uten å deklare det til IAEA [51]. I tillegg har Seoul ambisjoner om å utvikle såkalt *pyroprosessering* [52], som er en form for repressering som i prosess skiller seg fra den standard såkalte *PUREX-prosessen*. USA ønsker ikke å akseptere at flere stater utvikler verken repressering eller anrikning, selv deres nære allierte. Det vanskelige forholdet til Nord-Korea gjør dette til et ekstra betent tema. Sør-Korea er for øvrig omfattet av amerikansk, utvidet kjernevåpenavskrekking på linje med nabolandet Japan.

## 5.6 Jordan

Jordan har blant verdens største utnyttede uranreserver. Landet tar mål av seg til å bli en stor uranprodusent i den nærmeste framtiden. Ifølge "Red Book" fra 2009 [53] hadde Jordan på det tidspunktet 111 800 tonn uranreserver. Disse inkluderte påviste og antatte reserver, økonomisk utvinnbare for en uranpris på mindre enn 80 dollar/kg. Dette tilsvarte rundt to prosent av de kjente globale reservene (da antatt en pris på mindre enn 130 dollar/kg uran). Nyere tall fra *World Nuclear Association* [54] angir hele 140 000 tonn økonomisk drivverdige uranreserver samt 59 000 tonn uran bundet i fosfater. I fosfatproduksjon skiller gjerne uran ut som et biprodukt. Ammann har annonsert planer om å utvinne de økonomisk drivverdige reservene, og de er i gang med å vurdere muligheten for å produsere uran også fra fosfatreservene.

I 2007 ble det bestemt at det skal bygges kjernekraftverk i Jordan, som innen 2030 skal stå for minst 30 prosent av strømproduksjonen og åpne for strømeksport. Først ble det ventet at eventuelle kjernekraftverk ville bli etablert langs kysten av Rødehavet ved Akababukta. Denne korte kystlinjen er det mest realistiske alternativet for å etablere kjernekraftverk med en tertiærkjølekrets fra en stor vannkilde. Tanken var dessuten å bruke inntil 40 prosent av energiproduksjonen til ferskvannsproduksjon. Da ekskluderes Dødehavet som et praktisk alternativ grunnet det enorme saltinnholdet. I tillegg er Dødehavet et mer politisk betent alternativ. En potensiell utfordring for å etablere kjernekraftverk i Akababukta er for øvrig nærheten til turistområdet Sharm el-Sheikh på sørspissen av Sinai-halvøya, ved munningen av

Akababukta. Per 2014 ser det imidlertid ut til at Jordans første kjernekraftverk vil bli etablert i det seismisk mer stabile området Al Amra, 40 km nord for Amman i Al Mafraq-provinsen. Uten tilgang til sjøvann er ideen å bruke spillvann fra et vannrenseanlegg i den eksterne kjølekreten. Flere internasjonale kjernekraftleverandører har vært i forhandlinger med Amman, men per 2014 ser det ut til at den første kjernekraftreaktoren vil bli bygd av russiske *Atomstroyexport*. Atomenergikommisjonen har også annonsert planer om å få bygd flere små kjernekraftreaktorer med en produksjonskapasitet på 180 MW<sub>e</sub> hver. Det er ikke klart hvor disse skal ligge eller hvem som skal bygge dem. [54]

Jordan er som andre aspirerende kjernekraftnasjoner avhengig av bistand fra veletablerte tilbyderstater for å skaffe seg konkurransedyktig kjernekraftteknologi. Landet har lenge forhandlet med USA om en såkalt “123-avtale” for kjernefysisk bistand<sup>11</sup>. En slik avtale er nødvendig for at amerikanske selskaper skal kunne eksportere til Jordan. Men USA krever at Jordan finner seg i de samme betingelsene som De forente arabiske emirater, hvilket innebærer å forplikte seg til aldri å utvikle anrikning eller repressering. Selv om Jordan langt fra er i en industriell eller teknologisk posisjon til å kunne utvikle spesielt urananrikning, så vil landet ikke uten videre gå med på disse betingelsene. Det kan tenkes at de ser for seg at en av de store anrikningsaktørene vil kunne etablere et anlegg i Jordan, hvor man har en såkalt “black boxing” av teknologien (som forklart i delkapittel 4.2). Det innebærer at det ikke forekommer teknologioverføring til vertsstaten. I anrikningsbransjen er ikke dette uvanlig. I Jordans tilfelle åpner dette i så fall for muligheten for å bli en eksportør av anriket uranoksid, som kan gi langt større inntekter enn kun eksport av uranråstoff som yellowcake. Ammans motstand mot Washingtons betingelser kan også være av rent prinsipiell art, siden NPTs artikkel IV absolutt ikke forbyr utvikling av hele brenselssyklusen, så lenge den anvendes til fredelige formål. Det bør sitte langt inne for en stat å si fra seg en viktig rett under en folkerettslig avtale. I tillegg har ikke USA stått like hardt på disse kravene overfor alle andre nasjoner med en 123-avtale. Spesielt har de latt være å kreve dette av Vietnam i en slik avtale inngått i 2014. USA henviser til at Midtøsten er en spesielt utsatt region. [55]

Uansett om USA og Jordan blir enige eller ikke, så er kjernekraft fortsatt flere år unna for Jordan, og egenutviklet anrikningsteknologi forblir utenfor landets rekkevidde i overskuelig framtid.

## 5.7 De forente arabiske emirater

De forente arabiske emirater (UAE) annonserte i 2008 omfattende planer om å satse på kjernekraft. Et konsortium ledet av sørkoreanske KEPCO vant året etter den første store kontrakten med UAE om å bygge det som trolig blir Midtøstens andre kjernekraftverk, etter det iranske i Bushehr. For over 20 milliarder dollar skal de bygge fire reaktorer på 1,4 GW<sub>e</sub> hver i Barakah. Den første ventes å kobles til elektrisitetsnettet allerede i 2017. [56]

Selv om Sør-Korea er først ute med konkret, kjernefysisk bistand til Emiratene, så har landet inngått bilaterale avtaler og MoU-er med flere av de store tilbyderstatene om ulike former for

---

<sup>11</sup> Slike avtaler kalles “123-avtaler” fordi de omtales i seksjon 123 av den amerikanske atomenergilooven fra 1954

bistand. Spesielt har de en 123-avtale med USA som inneholder både et løfte fra Abu Dhabi om aldri å utvikle anrikning og reprosessering på egen jord, men også et løfte fra USAs side at alle tilsvarende avtaler USA inngår *med land i regionen* vil inneholde de samme betingelsene. Avtalen mellom UAE og USA får derfor ringvirkninger både på USAs forhandlinger med Jordan om en tilsvarende avtale og for en forventet framtidig forhandling mellom Saudi-Arabia og USA. En kan si at tilbyderstatene håper at 123-avtalen med Emiratene vil danne en norm for hvordan avtaler om kjernefysisk bistand skal være i tiden framover.

## 6 Oppsummering

Til tross for de negative virkningene Fukushima-ulykken har hatt på kjernekraftens renommé, ser vi at stadig flere stater ønsker å satse på kjernekraft, og at mange nye kraftverk er under bygging eller planlegging. Alt tyder på at kjernekraft vil spille en større rolle i framtidens energiforsyning.

Når det gjelder andre deler av brenselssyklusen, er utviklingen mer blandet. For stater som ikke har anrikningsteknologi, vil det være svært lite økonomisk lønnsomt å opprette en slik kapasitet. Utvikling av anrikningskapasitet vil også ha negative politiske effekter, siden teknologien kan misbrukes til kjernevåpenutvikling. Derimot ser man at stater som allerede har utviklet en anrikningskapasitet av militære grunner, enten for våpenformål eller for å produsere ubåtbrensel, kan ønske å oppskalere og på sikt kommersialisere denne teknologien. Eksempler på dette er Brasil, India og Kina. Det er uansett svært vanskelig å gjøre dette lønnsomt nok til å kunne konkurrere med de eksisterende kommersielle aktørene, som franske Areva, britisk-nederlandsk-tyske URENCO og amerikanske USEC. Sør-Afrika er et annet spesielt eksempel ettersom landet har vedtatt å etablere en komplett brenselssyklus, men lite konkret har foreløpig kommet ut av dette vedtaket.

I sluttenden av brenselssyklusen skjer det mindre. Løsninger for langtidslagring av kjernefysisk avfall mangler fremdeles i de aller fleste stater, og det ser ikke ut til å være noen stor satsning på reprosessering. Utviklingen av kommersielle MOX-drevne reaktorer som kan anvende repossert plutonium er fremdeles begrenset, men selve teknologien fungerer. Dersom det blir mangel på uran på markedet, eller uranprisene øker sterkt igjen i tiden framover, kan dette bli et mer aktuelt alternativ.

Dersom en nykommerstat velger å utvikle brenselssykluseteknologi i dag, så må landet enten ha svært langsiktige ambisjoner, eller ta sine valg ut fra annet enn økonomiske betraktninger. Spesielt er forsyningssikkerhet og muligheten til å oppnå status som teknologiholder med en kjernevåpenopsjon aktuelle motivasjoner. Den mest realistiske måten brenselssyklusen kan multilateraliseres ser i dag ut til å være ekspansjon for eksisterende kommersielle aktører. Dette vil ytterligere redusere fordelene for nye aktører ved å etablere egne anlegg. For at dette skal være attraktivt nok er det imidlertid nødvendig at de potensielle kjøperne stoler på at leveransene vil bli opprettholdt uavhengig av politiske forhold.

## Referanser

- [1] IAEA, "World Energy Outlook," 2014.
- [2] WNA, "Nuclear Power in Germany," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.14 A.D.
- [3] WNA, "Nuclear power in Japan," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.14 A.D.
- [4] BBC, "UK nuclear power plant gets go-ahead," BBC, oppdatert 21.10.2013, lastet ned 26.05.2014.
- [5] "Britain runs towards nuclear energy as other countries flee," *The Economist*, oppdatert 26.10.2013, lastet ned 26.05.2014.
- [6] SSB, "Elektrisitetspriser, 4. kvartal 2013," SSB, oppdatert 26.09.2013.
- [7] UCS, "Nuclear Loan Guaranties," 2009.
- [8] A. Diakov, "Status and Prospects for Russia's Fuel Cycle," *Science & Global Security*, vol. 21, pp. 167-188, 2013.
- [9] Benedict, "Are small reactors the answer?," *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2014.
- [10] M. Hibbs, "Pakistan's Next Chinese Reactor," Carnegie Endowment for International Peace, oppdatert 28.09.2013, lastet ned 26.05.2014.
- [11] "Contracts for new Pakistan reacor," World Nuclear News, [http://www.world-nuclear-news.org/NN-Contracts\\_for\\_new\\_Pakistan\\_reactors-1009134.html](http://www.world-nuclear-news.org/NN-Contracts_for_new_Pakistan_reactors-1009134.html), oppdatert 10.09.2013.
- [12] BARC, "Advanced Heavy Water Reactor (AHWR)," BARC, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.2014.
- [13] IAEA, "Thorium fuel cycle - Potensial benefits and challenges," IAEA-Tecdoc-1450, 2005.
- [14] IAEA, "IAEA Tech review 2012," 2013.
- [15] M. Kara, "Thorium as an Energy Source - Oportunities for Norway," 2008.
- [16] NEA, "Uranium 2011, Resources, Production and Demand," OECD, 2012.
- [17] UxC, "UxC Nuclear Fuel Price Indicators," The Ux Consulting Company, oppdatert 2013.
- [18] E. Schneider og D. Sachde, "The Cost of Recovering Uranium from Sea Water," *Science & Global Security*, vol. 21, pp. 134-163, 2013.
- [19] IAEA, "Annual Report 2012," 2013.
- [20] WNA, "International Nuclear Waste Disposal Concepts," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2012, lastet ned 26.05.2014.
- [21] G. Rothwell, "Market Power in Uranium Enrichment," *Science & Global Security*, vol. 17, pp. 132-154, 2009.



- [22] Areva, "Georges Besse II, A new era for enrichment," Areva, <http://www.areva.com/mediatheque/liblocal/docs/activites/amont/enrichissement/pdf-plaquette-gb2-va.pdf>, oppdatert 2010, lastet ned 26.05.2014.
- [23] B. Cabrera-Palmer og G. Rothwell, "Why is Brazil enriching uranium?," *Energy Policy*, vol. 36, 7, pp. 2570-2577, 2008.
- [24] "Urenco Annual Report & Accounts 2013," 2014, <http://www.urengo.com/annualreport2013/index.html>.
- [25] United States of America Nuclear Regulatory Commission, "In the Matter of Ge-Hitachi Global Laser Enrichment LLC," Docket No. 70-7016-ML, 2012.
- [26] S. R. Kemp, "SILEX and Proliferation," *Bulletin of the Atomic Scientists*, July 2012.
- [27] Y. Yudin, "Multilateralization of the Nuclear Fuel Cycle, A long Road Ahead," UNIDIR, UNIDIR/2011/5, 2011.
- [28] IAEA, "IUEC and the LEU Guaranteed Reserve," IAEA, oppdatert 31.10.2011.
- [29] S. Høibråten, H. Breivik, H. Hege, E. Enger og H. Kippe, "Atomprogrammene i India, Pakistan, Nord-Korea, Israel, Iran og Syria," FFI, 2011/01603, 2013.
- [30] WNA, "Nuclear Power in China," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.14 A.D.
- [31] Westinghouse, "AP1000," Westinghouse Electric Company LLC, oppdatert 2012, lastet ned 26.05.2014.
- [32] WNA, "China's Nuclear Fuel Cycle," World Nuclear Assosiation, oppdatert 12.05.2014, lastet ned 26.05.14 A.D.
- [33] IAEA, "Nuclear Power Reactors in the World," 2012.
- [34] WNA, "Nuclear Power in India," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.14 A.D.
- [35] PRS, "The Civil Liability for Nuclear Damage Bill," PRS Legislative Research, oppdatert 2010, lastet ned 26.05.2014.
- [36] "Sorting out nuclear liability", *The Hindu*, 23.10.2013.
- [37] M. Hibbs, "Second Indian Enrichment Facility Using Centrifuges is Operational," *Nuclear Fuels*, Mar. 1992.
- [38] Ramona, "An Estimate of India's Uranium Enrichment capacity," *Science & Global Security*, vol. 12, pp. 115-124, 2004.
- [39] D. Albright og S. Kelleher-Vergantini, "Construction of Likely New Indian Centrifuge Facility at Rare Materials Plant," ISIS, 2013.
- [40] NTI, "Uranium Enrichment Plant," Nuclear Threat Initiative, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.2014.
- [41] "Start-up of India's PFBR delayed," Nuclear Engineering International, <http://www.neimagazine.com/news/newsstart-up-of-indias-pfbr-delayed-4340186>, oppdatert 11.08.2014.

- [42] M. Hibbs, "Looking Back at Brazil's Boreholes," ArmsControlWonk, oppdatert 22.04.2014, lastet ned 26.05.2014.
- [43] T. Kassenova, "Brazil's Nuclear Kaleidoscope - An Evolving Identity," Carnegie Endowment for International Peace, oppdatert 28.09.2014, lastet ned 26.05.2014.
- [44] C. Patti, "Origins and Evolution of the Brazilian Nuclear Program (1947-2011)," Wilson Center, oppdatert 28.09.2014, lastet ned 26.05.2014.
- [45] WNA, "Nuclear Power in Brazil," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.2014.
- [46] "Koeberg Nuclear Power Station," ESKOM, oppdatert 2014, lastet ned 27.05.2014.
- [47] WNA, "Nuclear Power in South Africa," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 26.05.2014.
- [48] Department of Mining and Energy, "Nuclear Energy Policy for the Republic of South Africa," 2014.
- [49] WNA, "Nuclear Power in South Korea," World Nuclear Assosiation, oppdatert 30.01.2014.
- [50] "Agreement for Cooperation between the Government of the United States of America and the Government of the Republic of Korea Concerning Civil Uses of Atomic Energy," 15.05.1974, [http://nnsa.energy.gov/sites/default/files/nnsa/05-13-multiplefiles/2013-05-02%20Korea\\_South\\_123.pdf](http://nnsa.energy.gov/sites/default/files/nnsa/05-13-multiplefiles/2013-05-02%20Korea_South_123.pdf).
- [51] IAEA, "Implementation of the NPT Safeguards Agreement in the Republic of Korea," GOV/2004/84, 2004.
- [52] Seong Won Park, "Why South Korea needs pyroprocessing," *Bulletin of the Atomic Scientists*, Oct. 2009.
- [53] NEA, "Uranium 2009, Resources, Production and Demand," OECD, 2010.
- [54] WNA, "Nuclear Power in Jordan," World Nuclear Assosiation, oppdatert 2014, lastet ned 27.05.2014.
- [55] NEI, "Nuclear Trade Cooperation Agreements," Nuclear Energy Institute, oppdatert 2014.
- [56] WNA, "Nuclear Power in the United Arab Emirates," World Nuclear Assosiation, oppdatert 01.04.2014.