

MOX, En del av kjernebrensesyklusen



Sverre Hornkjøl
Erlend Larsen
Anita Sørlie
Ole Reistad



Statens
strålevern

**Norwegian Radiation
Protection Authority**
Postboks 55
N-1332 Østerås
Norway

Referanse:

Hornkjøl, S, Larsen E, Sørli A og Reistad O. MOX, en del av kjernebrensel-syklusen. StrålevernRapport 2003:3. Østerås: Statens strålevern, 2003.

Emneord:

MOX, kjernebrensel, plutonium, repressering.

Resymé:

Beskriver bruken av MOX i kjernebrensel-syklusen.

Reference:

Hornkjøl, S, Larsen E, Sørli A og Reistad O. MOX, en del av kjernebrensel-syklusen. StrålevernRapport 2003:3. Østerås: Statens strålevern, 2003.

Key words:

MOX, mixed oxide fuel, nuclear fuel, plutonium, reprocessing.

Abstract:

Describes the utilisation of MOX in the nuclear fuel cycle.

Prosjektleder: Sverre Hornkjøl.

Godkjent:



Gunnar Saxebøl, avdelingsdirektør, Avdeling Strålevern og sikkerhet.

15 sider.

Utgitt 2003-05-20.

Opplag 150 (03-05).

Form, omslag: Lobo Media AS, Oslo.

Trykk: Lobo Media AS, Oslo.

Forsidebilde: BNFL

Bestilles fra:

Statens strålevern, Postboks 55, 1332 Østerås.

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

e-post: nrpa@nrpa.no

www.nrpa.no

ISSN 0804-4910

Innhold

1	Brenselsyklusen	5
1.1	Håndtering av brukt kjernebrensel	5
1.2	Reprosessering – en kjemisk prosess	6
1.3	Reprosessering og kjernekraft	7
2	Produksjon og bruk av MOX	8
2.1	Plutonium som råstoff for atomvåpen	8
2.2	Plutonium som råstoff for MOX	9
2.3	Bruk av MOX som reaktorbrensel	9
	2.3.1 Omfang av MOX-bruk	9
	2.3.2 Nukleære og termiske egenskaper for MOX [8,9]	9
	2.3.3 Sikkerhetsaspekter ved bruk av MOX	11
	2.3.4 Sluttbehandling av MOX	11
3	MOX fra våpen eller våpen fra MOX?	11
3.1	MOX fra våpen?	11
3.2	Våpen fra MOX?	12
3.3	Deponering av våpenplutonium uten å gå veien om MOX	12
3.4	Spredningsfare ved bruk og transport av MOX	12
4	Produksjonsanlegg og utslipp	14
4.1	Anlegg som produserer MOX	14
4.2	Utslipp	15
5	MOX i Norge	15
6	Konklusjoner	15
7	Referanser	16

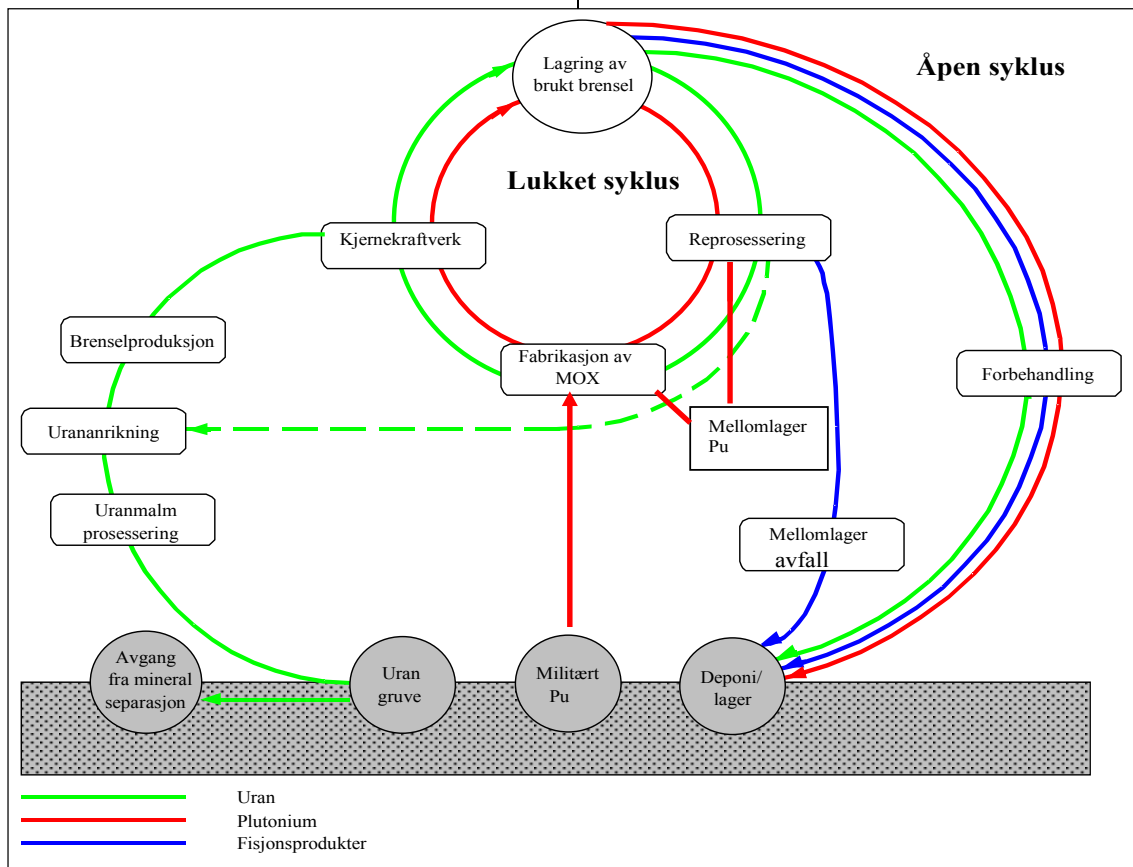
Innledning

Det har i mange år pågått en intens debatt om kjernekraft og forskjellige teknologier som benyttes i utnyttelsen av kjerneenergi. Et stort spørsmål innen dette feltet er hvorvidt brukt kjernebrensel skal resirkuleres eller anses som avfall. Ulike land og miljøer har ulike holdninger i dette spørsmålet, både økonomi, teknologi, miljøvern og risiko for spredning av kjernevåpenmateriale er momenter i vurderingen hvert enkelt land må ta. Velger man å resirkulere det brukte brenselet for å utnytte mest mulig av energien, tar man samtidig en risiko innenfor andre av områdene som er nevnt. Og ved resirkulering av brenselet kommer man ikke utenom MOX (Mixed OXide Fuel) som er det brenselet som lages av de resirkulerte stoffene (uran og plutonium) fra brukt kjernebrensel. Denne rapporten tar for seg MOX og dets egenskaper, produksjon og mulige risiki forbundet med bruk av MOX.

1 Brenselsyklusen

1.1 Håndtering av brukt kjernebrensel

I et kjernekraftverk blir energi fra spaltning av tunge atomkjerner omformet til varme og deretter til elektrisitet. Brenselet består av lavanriktet (3 – 5 % ^{235}U) uran i form av urandioksid kapslet i zirkoniumrør. Etter at brenselet har stått inne i reaktoren i omtrent tre år, blir det tatt ut. En har da utvunnet energi tilsvarende 35 - 50 MWd pr. kg uran (1 MWd = 24 000 kWh), og brenselet er sterkt radioaktivt. Brukt kjernebrensel kan deretter håndteres på to måter: Enten blir det lagret i påvente av endelig deponering, eller det reposseseres. Av det gjenvunne uran og plutonium kan en produsere nytt brensel, såkalt MOX. Rent skjematisk kan de to opsjonene, åpen eller lukket syklus, illustreres som i figur



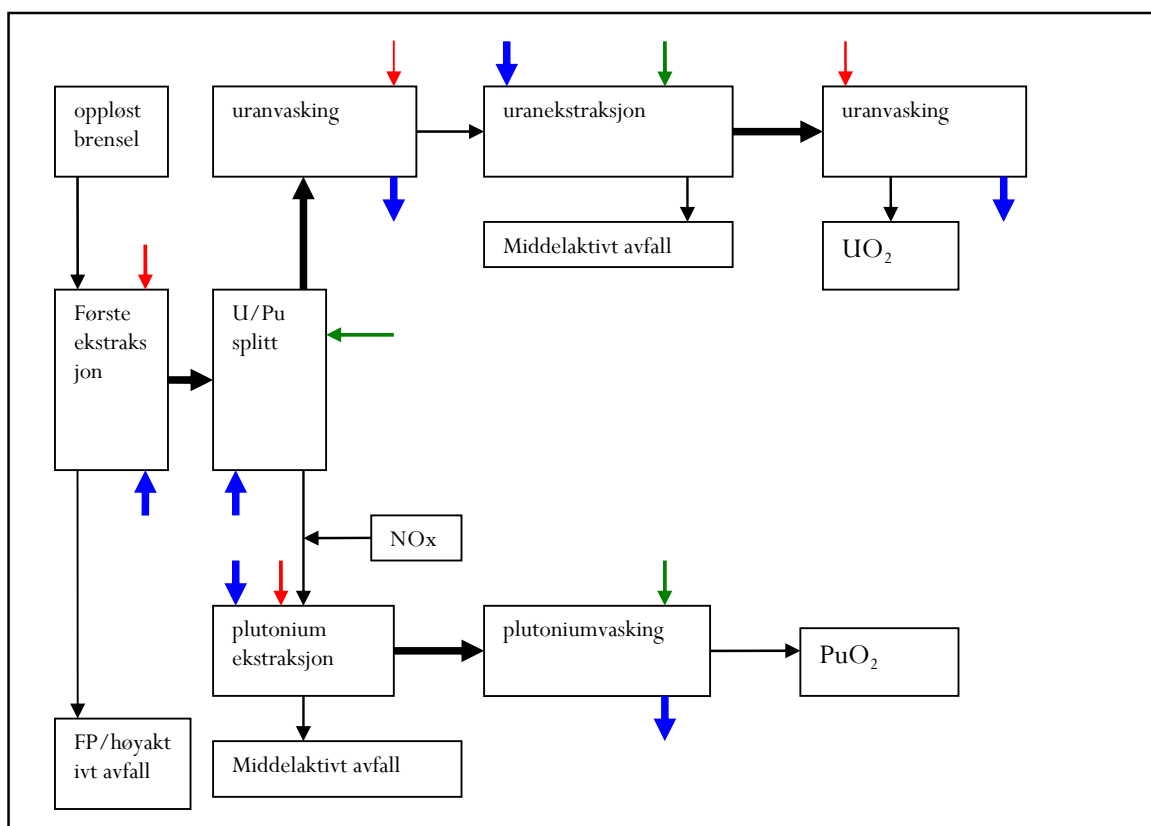
Figur 1: Kjernebrenselsyklusen.

I dagens situasjon finnes det store lagre av plutonium, både sivilt og militært. Dette gir en rekke alternative ruter i prosessen, slik figuren viser.

1.2 Reprosessering – en kjemisk prosess

Reprosessering (PUREX-prosessen) foregår ved at det brukte brenselet etter minst tre års lagring klippes opp i biter og løses i varm salpetersyre. (Øverst til venstre i figur 2 nedenfor.) Urandioksidet, transuranene og fisjonsproduktene løses opp, mens kapslingen blir behandlet som fast radioaktivt avfall. Flyktige fisjonsprodukter, spesielt edelgassene, slippes ut til luft. Den salpetersure løsningen behandles så med tributylfosfat oppløst i luktfri kerosen (en form for parafin). Uran og plutonium trekkes over i kerosenfasen, mens resten av radionuklidene blir igjen i vannfasen.

Vannfasen behandles som høyaktivt avfall, ved inndamping og forglassing. Kerosenfasen tilsettes et vannløselig reduksjonsmiddel slik at plutoniumet trekkes ut til en ny vannfase. De to atskilte fasene, vannfasen med plutonium og kerosenfasen med uran gjennomgår en rensingsprosess før sluttproduktene plutoniumdioksid og urandioksid er ferdige. Begge disse rensingsprosessene produserer middelaktivt flytende avfall. Dette kan forglasses som det høyaktive, men det er vanlig at noe av det ender opp som utslipp til vann basert på en vurdering av mulige stråledoser til mennesker i området veid opp mot kostnadene forbundet med null utslipp. Plutoniumet blandes med naturlig eller utarmet uran for produksjon av MOX, mens det reprosesserte uranet kan anrikes på nytt for produksjon av lavanriktet uranbrensel.



Figur 2: Skjematisk fremstilling av reprosessering i THORP-anlegget.

Tykke piler viser kerosenfasen, tynne piler viser vannfasen.

Blå farge viser tilsats/fjerning av tributylfosfat oppløst i luktfri kerosen.

Rød farge viser tilsats av salpetersyre.

Grønn farge viser tilsats av saltfritt reduksjonsmiddel, gjerne hydrazin eller uran(IV)-forbindelser.

1.3 Reprosessering og kjernekraft

Reprosessering ble utviklet for produksjon av plutonium til våpen allerede under 2. verdenskrig. Ettersom sivil bruk av kjernekraft kom i gang, ble reprosessering også tatt i bruk i sivile kjernekraftprogrammer, ofte ved bruk av de samme anlegg som ble brukt til militære formål.

Den viktigste begrunnelsen for sivil reprosessering er gjenbruk av spaltbart materiale som finnes i det brukte kjernebrenselet. Basert på forventninger om stigende priser på uran og erfaringer med knapphet på olje, ville en på syttitallet gardere seg mot forsyningsknapphet. Ingen av forventningene kan sies å ha slått til foreløpig, uranprisene er for tiden forholdsvis lave og noen knapphet på olje er det ikke. Japan, som ikke har vesentlige ressurser av kull og olje, ser imidlertid på reprosessering som en vesentlig del av sin selvforsyningsstrategi på energisektoren.

Reprosessering er også vesentlig ved bruk av såkalte hurtig-reaktorer, der fisjon induisert av hurtige nøytroner er den energiproduerende reaksjon. Disse reaktorene bruker plutonium som brensel og konfigurert riktig kan de til og med produsere sitt eget brensel fra utarmet uran. Med hurtige nøytroner er alle plutonium-isotopene spaltbare, slik at verdien av plutonium som brensel er større enn i vanlige lett vannsreaktorer. Virksomheten rundt denne typen reaktorer er i dag meget beskjeden, men noe forskning pågår fortsatt i Russland og Japan.

En rekke isotoper som har eller har hatt omfattende teknisk og medisinsk anvendelse produseres ved reprosessering, det gjelder i første rekke ^{241}Am (røykvarslere, industri, oljeleting), ^{238}Pu (pacemakere, energiforsyning til romskip), ^{137}Cs (sterilisering, kreftterapi, industri, oljeleting) og ^{90}Sr (termogeneratorer).

Ved gjenbruk av uran og plutonium minker behovet for uranutvinning, og avfallsmengdene for kjernekraftsyklusen sett under ett reduseres fordi avgangen av radium etc. fra mineralseparasjonen reduseres i takt med minket behov for uranutvinning [1]. En studie utført i regi av OECD/NEA [2] konkluderer med at det ikke er noen vesensforskjell på strålebelastningen på befolkningen om man velger reprosessering eller direkte deponering av brukt brensel. Økte doser fra reprosessering spares inn ved redusert behov for uranutvinning. Utslippshåndteringen er med andre ord en vesentlig faktor i dette bildet. I mange tilfeller har avgang fra mineralseparasjonen blitt behandlet meget lemfeldig slik at det har oppstått store deponier med radiumholdig avfall rundt anleggene, deponier som ikke har blitt sikret mot avrenning til grunnvannet eller spredning med vinden. Dette utgjør en økt risiko for lokalbefolkningen. Reprosessering gir med dagens praksis utslipp til miljøet og fører til forurensning over landegrensene. Det er også en viss ulykkesrisiko forbundet med reprosesseringsanlegg.

I de tidligste reaktorene ble det brukt brensel basert på metallisk uran kapslet i ymse kapslingsmaterialer, bl.a. magnesium. Perspektiver som langtidslagring, korrosjonsmotstand etc. ble ikke grundig vurdert. Dette gjelder bl.a. magnox-brensel som fortsatt brukes av de eldste gasskjølte reaktorene i Storbritannia. I ettertid viser det seg at flere av disse brenselstypene ikke egner seg for deponering fordi de består av metallisk uran kapslet med magnesium eller aluminium. Alle disse materialene korroderer for lett til at deponering er mulig fordi deponiet ikke vil være kjemisk stabilt over lang tid. Reprosessering er eneste alternativ og dermed en forutsetning for den videre driften av disse gamle reaktorene. Det er reprosesseringen av magnox-brensel i anlegget B-205 som gir opphav til størstedelen av utslippene av ^{99}Tc fra Sellafield [3]. De gamle gasskjølte reaktorene er planlagt utfaset i løpet av inneværende tiår. B-205 planlegges så nedlagt i 2012 når alt brukt magnox-brensel er reprosessert.

Også for land som ikke utnytter kjernekraft (Australia) har repressering av metallisk brensel blitt løsningen. Svenske myndigheter vurderer for tiden dette for gammelt metallisk brensel, og Statens kärnkraftinspektion anbefalte repressering av sikkerhetsmessige grunner. Dette er imidlertid en meget kontroversiell sak i Sverige, og regjeringen har så langt ikke tatt noen avgjørelse.

Belgia, Frankrike, Japan, Russland, Storbritannia, Sveits og Tyskland har valgt en strategi for sin energiforsyning som impliserer at uran og plutonium fra brukt kjernebrensel kan resirkuleres og brukes om igjen. Russland har i tillegg til denne resirkuleringen MOX som en del av sin strategi for å bli kvitt overskuddsmateriale fra atomvåpennedrustning. USA arbeider langs samme linje [4], ikke minst fordi USA forutsettes å bidra til at Russland økonomisk og teknologisk kommer i gang med sin del av dette arbeidet. Canadiske reaktorer har også vært vurdert som aktuelle for brenning av MOX i denne sammenheng.

2 Produksjon og bruk av MOX

2.1 Plutonium som råstoff for atomvåpen

Plutonium er råstoffet for produksjon av avanserte atomvåpen. Til enklere våpen kan en bruke høyenriktet uran. Plutoniumet deles inn i kategorier etter opprinnelsen og innholdet av de forskjellige isotopene av plutonium [5], se tabellen nedenfor:

Våpenplutonium produseres i spesielle reaktorer der brenselet gis meget lav utbrenning slik at innholdet av uønskede isotoper holdes på et minimum. Økes utbrenningen fås plutonium-typer som inneholder en forholdsvis kortlivet isotop (^{238}Pu , $T_{1/2} = 87,7$ år) som utvikler mye varme. Denne varmen kan skade det konvensjonelle sprengstoffet som må til for å komprimere plutoniummetallet før fisjonsprosessen starter. Videre avgir ^{238}Pu , ^{240}Pu og ^{242}Pu store mengder nøytroner fra spontanfisjon (se høyre kolonne i tabellen).

Et våpen laget av reaktorplutonium eller plutonium fra brukt MOX blir derfor ustabil, og verken effekt eller detonasjonstidspunkt kan kontrolleres nøyaktig fordi fisjonsprosessen settes i gang av det store antallet nøytroner fra spontanfisjon før plutoniummetallet er tilstrekkelig komprimert. Antallet nøytroner fra spontanfisjon er m.a.o. så stort at plutoniumet neppe kan brukes til våpenformål. Et våpen laget av et slags fuel-grade plutonium ble riktignok testet vellykket i 1962 [6], men isotopsammensetningen i det plutoniumet var nærmere våpenplutonium enn reaktorplutonium [1]. Se forøvrig ref.[6] for en nærmere beskrivelse av teknologien.

Mulighetene for videre resirkulering av reaktorplutoniumet er begrenset fordi innholdet av spaltbare isotoper synker for hver utbrenningsperiode. Dette kan kompenseres ved økning av plutoniuminnholdet i MOX til 10 %, eventuelt ved blanding av forskjellige "generasjoner" plutonium. Repressering av brukt MOX er derfor mindre attraktivt enn repressering av brukt uranbrensel.

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	n/s kg
Våpenplutonium		93,5 %	6 %	0,5 %		56 000
Fuel-grade plutonium (utbrenning < 13 MWd/kg)	<1 %	>70 %	<19%	<7 %	<3 %	<255 000
Reaktorplutonium (utbrenning 38 MWd/kg):	2 %	52 %	27 %	13 %	6 %	408 000
Plutonium fra brukt MOX	2 %	42 %	31 %	14 %	11 %	538 000

2.2 Plutonium som råstoff for MOX

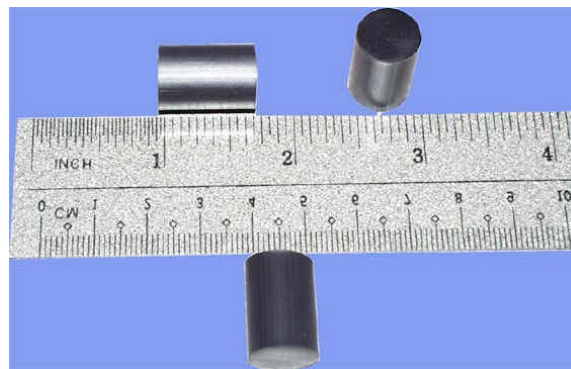
MOX er et blandingsbrensel av uranoksid og plutoniumoksid der det spaltbare materiale er plutonium. Urandioksid blandes med plutoniumdioksid og blandingen sintres til harde pellets. Uranet i MOX er utarmet uran eller naturlig uran som inneholder lite spaltbart materiale (0,7 % ^{235}U eller mindre). Det utarmede uranet kan, men behøver ikke, være avfall fra anriking av repressert uran. Ved produksjon av MOX fra reaktorplutonium brukes 7 – 10 % plutonium i brenselet. Ved bruk av våpenplutonium kan plutoniuminnholdet begrenses til 5 %. Ytterligere detaljer kan finnes i ref.[1].

2.3 Bruk av MOX som reaktorbrensel

2.3.1 Omfang av MOX-bruk

Bruk av MOX som reaktorbrensel utgjør ikke noen ny teknologi [7]. Helt siden 1963 har MOX vært i bruk i lett vannsreaktorer (LWR), og teknologien ble tatt i bruk kommersielt i 1980. MOX brukes i dag i Belgia, Frankrike, Japan, Russland, Sveits og Tyskland.

I forbindelse med avtalen mellom regjeringen i Tyskland og tysk industri, skal kjernekraften utfases. Repressering skal opphøre i 2005, og alt separert plutonium skal brennes i reaktorene som MOX før de stenges. Dette innebærer en plikt til å bruke MOX i tyske reaktorer, og dette vil vare i hele perioden frem til den siste stenges i 2032, fordi det er store mengder plutonium som skal brennes. Både i Belgia, Frankrike, Sveits og Tyskland er det bare en del av reaktorene som er lisensiert for bruk av MOX, men slett ikke alle av disse reaktorene bruker MOX pr. i dag.



Figur 3: MOX-pellets til bruk i brensel.

Japan og Russland befinner seg foreløpig på prøvestadiet. I Japans tilfelle skyldes dette lokal motstand mot bruken. Nederland har latt brukt brensel bli repressert, det samme gjelder Storbritannia. I sin tid ble en del svensk brensel sendt til Sellafield for repressering. Brenselet ble repressert i 1997, og Oskarshamns Kraftgrupp AB eier 900 kg plutonium og 136 tonn uran som i dag er lagret i Sellafield. Statens Kärnkraftinspektion har anbefalt å ta det separerte plutoniumet tilbake til Sverige i form av MOX for brenning i Oskarshamn. Brukt MOX skal så videre til mellomlagring og deponering som alt annet svensk kjernebrensel. Den svenske regjeringen godkjente dette i desember 2002. Ytterligere repressering er ikke aktuelt for svensk kjernebrensel.

2.3.2 Nukleære og termiske egenskaper for MOX [8,9]

Fordi det er forskjeller i nøytronabsorpsjonsevnen mellom ^{235}U og plutonium, må man være forsiktig når man vurderer den fysiske fordelingen av MOX-pinner i brenselelementene for å unngå negative virkninger på effektdistribusjonen og verdien av kontrollstavene.

^{239}Pu og ^{241}Pu har omtrent dobbelt så stort absorpsjonsvernsnitt for termiske nøytroner som ^{235}U . Det trengs omtrent like mange fisjoner av Pu som av U for å skape den samme varmemengden, og en kunne forvente effekt-

topper ved begynnelsen av bestrålingen av MOX hvis MOX ble plassert like ved uranbrensel. Men det høye absorpsjonstverrsnittet senker nøytronfluksen inntil MOX-pinnene. I vanlige trykkvannsreaktorer og kokvannsreaktorer er den midlere frie veilengde et nøytron tilbakelegger så kort at nøytronfluks fra naboelementer kan neglisjeres. Naboelementer med uranbrensel kan derfor ikke bidra til å øke nøytronfluksen rundt MOX-pinnene. Det blir derfor den midlere moderator tettheten umiddelbart inntil MOX-pinnene som bestemmer fluksen av termiske nøytroner og derfor også antallet fisjoner. For sammenlignbar varmeeffekt fra 3,25 % anriket UO_2 og MOX med 7 % reaktorplutonium blir nøytronfluksen i MOX halvparten av fluksen i uranbrensel.

Ettersom nøytronfluksen i MOX er halvparten av den i uranbrensel, vil verdien av kontrollstavene bli halvert. For å motvirke dette, blir MOX-pinner plassert som øyer inne blant uranpinner i kokvannsreaktorer. I trykkvannsreaktorer sitter kontrollstavene i bunter som erstatter flere brenselspinner. Disse buntene sitter ofte inn mot midten av elementet, så en må begrense antallet MOX-pinner i elementet for å sørge for at kontrollstavene er omgitt av uranpinner. Alternativt kan en bruke rene MOX-elementer der antallet kontrollstaver er økt i forhold til i uran-elementer for å motvirke den reduserte verdien av kontrollstavene. I tillegg til økning av antallet kontrollstaver, øker man konsentrasjonen av bor i kjølevannet. Denne kan siden reduseres i takt med at reaktiviteten i brenselet går ned.

Reduksjonen i reaktivitet med økende utbrenning er mindre for MOX enn for uranbrensel av to grunner: For det første: Absorpsjon uten fisjon av et nøytron i ^{239}Pu gir ^{240}Pu som er en isotop som ved ny absorpsjon gir ^{241}Pu som er spaltbar. For det andre: En tilsvarende absorpsjon i ^{235}U gir ^{236}U som verken er spaltbar eller kan danne spaltbare isotoper. Dette betyr at overskuddsreaktiviteten i brenselet er mindre for fersk MOX enn for

ferskt uranbrensel og dette reduserer behovet for kontrollstaver ved oppstart. Denne effekten oppveier for en del den reduserte verdien av kontrollstavene som oppstår fra den lavere nøytronfluksen.

Ustabilitet i nøytronfluksen kan oppstå i store reaktorer grunnet oppbygging og utbrenning av ^{135}Xe som er en sterk nøytronabsorbator. Den dannes fra ^{135}I ($T_{1/2} = 6,7$ h). ^{239}Pu gir noe mer jod ved fisjon enn ^{235}U , men siden nøytronfluksen er mindre i MOX for et gitt effektnivå, vil en større del av ^{135}Xe gå tapt ved desintegrasjon enn ved nøytronabsorpsjon. Av dette følger at endringer i effekt tettheten har mindre lokale virkninger i MOX enn i uranbrensel, og reaktoren blir mer stabil.

Det er også forskjeller mellom plutoniumdioksid og urandioksid i termisk ledningsevne. Uranbrensel har en bedre termisk ledningsevne enn MOX, hvilket gjør at temperaturen i midten av MOX-pinnene er større enn i midten av uranbrenselspinner ved samme effektnivå. En økning i trykket av fisjonsgass i brenselspinnene skyldes denne temperaturforskjellen uten at dette så langt er blitt påvist å true brenselets integritet [9]. Effekten er velkjent og har i praksis liten betydning. MOX oppviser også noe større svelling av brenselspelletene enn uranbrensel, men denne svellingen tas opp av mellomrommet mellom kapslingsrøret og brenselspelletene og hyppigheten av brensel feil har ikke vist seg å være større for MOX enn for uranbrensel.

Det er også visse forskjeller på MOX laget av reaktorplutonium og MOX fra våpenplutonium. Fordi "våpen-MOX" inneholder plutonium med meget stor andel ^{239}Pu , viser det seg at "våpen-MOX" ligger mellom "reaktor-MOX" og uranbrensel når det gjelder kjernefysiske egenskaper bortsett fra at "våpen-MOX" har den laveste andel av forsinkede nøytroner.

Americium fungerer som nøytronabsorbator og er derfor uønsket, men innen visse grenser (ca. 2 % av Pu-mengden) har americiumet liten betydning ved bruk av MOX [7]. Americium fra gammelt våpenplutonium skaper dermed ingen problemer. Amerikansk våpenplutonium inneholder også små mengder gallium for å stabilisere en spesiell fase hos metallisk plutonium. Slike små mengder av gallium gir ingen problemer verken for nøytronøkonomien eller for kapslingen av brenselet [8].

2.3.3 Sikkerhetsaspekter ved bruk av MOX

En lett vanns reaktor som skal gjøre bruk av MOX må som vist ovenfor tilpasses dette. En slik tilpasning skal ikke svekke sikkerhetsnivået til reaktoren, verken når den står stille, er i drift eller ved unormale hendelser. Nøytronfluksen i kjernen kontrolleres slik at uønskede virkninger av et annerledes nøytronspektrum motvirkes. Ved ikke å plassere MOX i ytterkanten av kjernen unngår man uheldige virkninger av et hardere nøytronspektrum på reaktortanken. Slik tilpasning er allerede foretatt i en rekke lett vanns reaktorer i Belgia, Frankrike, Japan, Sveits og Tyskland [7], samt i Oskarshamn i Sverige. I USA, der MOX ikke har vært brukt, er ikke reaktorene tilpasset bruk av MOX. En amerikansk studie [10] konkluderer imidlertid med at MOX uten større problemer kan tas i bruk også i USA. Teoretisk kan lett vanns reaktorer bruke 100 % MOX i kjernen, men fordi tilpasningsbehovet blir vesentlig mindre er praksis 20-40 %.

2.3.4 Sluttbehandling av MOX

Brukt MOX kan deponeres i underjordiske deponier etter 40 års mellomagring, som for alt annet brukt brensel. MOX brukt i Oskarshamn vil bli overført til det sentrale lageret for brukt brensel, CLAB og lagret der til deponeringsløsningen for svensk kjernebrensel står ferdig. MOX vil da bli overført til deponiet.

I tillegg til plutonium, inneholder alt brukt kjernebrensel grunnstoffer som er tyngre enn uran, mest er det av neptunium (ca. 0,5 ‰), americium (ca. 0,5 ‰) og curium (ca. 0,1 ‰). Selv om innholdet av slike transuraner er større i brukt MOX enn i brukt uranbrensel, får det liten betydning i det lange løp når brukt MOX skal deponeres. Curiumisotopene omdannes til plutonium som det allerede er mye av i brenselet, og americium omdannes til neptunium. Mengden av ^{241}Am ($T_{1/2} = 432$ år) som oppstår med tiden (fra ^{241}Pu) og som siden går over til ^{237}Np ($T_{1/2} = 2,14$ mill. år) er nokså lik for reaktorplutonium og brukt MOX-plutonium. Ved deponering av brukt brensel er med andre ord forskjellene i transuraninnhold uvesentlige.

Om ønskelig kan MOX represseres. For hver runde plutoniumet bestråles i en reaktor, blir det imidlertid mindre verdt som brensel, jfr. punkt 2.1. Dagens praksis i Frankrike [8] er at brukt MOX etter to og et halvt års kjøletid fraktes til represseringsanlegget i La Hague for eventuell repressering. Brukt MOX genererer mer varme enn brukt uranbrensel, derfor kreves lengre kjøletid og større kjølekapasitet på kjøleanlegget. BNFL har for tiden ingen planer om å repressere brukt MOX.

3 MOX fra våpen eller våpen fra MOX?

3.1 MOX fra våpen?

Det er i dag et stort overskudd i størrelsesorden flere hundre tonn plutonium som følge av atomvåpenrustning. Etter samtaler mellom presidentene George W. Bush og Vladimir Putin medio november 2001, og undertegning av en ny nedrustningsavtale i mai 2002, er det ingen grunn til å tro at dette overskuddet vil avta.

Bruk av våpenplutonium i MOX er teknisk sett ikke noe problem, ettersom MOX basert på våpenplutonium har egenskaper mellom uranbrensel og ”sivil” MOX. Det ligger et stort energipotensiale i våpenplutoniumet som mange vegrer seg for å anse som avfall. Våpenplutoniumet kommer opprinnelig fra reprosessering i militær regi. Denne reprosesseringen ble gjennomført for lang tid siden og konsekvensene av de til dels store utslipp som den gang fant sted kan ses i dag. Som vist i illustrasjonen på side 2, er derfor produksjon av ”våpen-MOX” mulig uten å fortsette med reprosessering, men i stedet basere seg på overskuddslagrene.

Metallisk plutonium fra våpen må overføres til oksidform før bruk i MOX eller før eventuell deponering. Dette er en prosess som ligner reprosessering og som gjentas med jevne mellomrom for vedlikehold av våpenarsenalene. I den prosessen kan fremmedelementer som americium og gallium renses ut.

Selv om kapasiteten for brenning av våpenplutonium som MOX er langt fra tilstrekkelig, representerer dette en teknologi som allerede er tilgjengelig. Andre alternativer som deponering eller brenning i reaktorer i form av inertmatrix-brensel er i dag på forskningsstadiet. Inertmatrix-brensel er brensel der plutoniumdioksidet er blandet med zirkoniumdioksid som matrix i stedet for urandioksid. Med dette oppnår man forbruk av plutonium uten at det produseres nytt plutonium fra uranet i urandioksidmatrixen.

3.2 Våpen fra MOX?

Mulighetene for å utvinne plutonium fra ferskt MOX vil, grunnet et lavere strålingsnivå, være bedre enn mulighetene for utvinning fra brukt uranbrensel eller brukt MOX. Det vil likevel kreve et anlegg som ligner mye på et reprosesseringsanlegg, så det er ikke snakk om ”enkel kjøkkenkjem” selv om kravene til skjerming er mindre.

Å separere plutoniumisotopene fra hverandre etter utvinning er prinsipielt mulig, men en slik anrikning ved hjelp av tradisjonell anrikningsteknologi som diffusjon eller sentrifuger er ikke praktisk mulig fordi isotopenes masser er for like. Det må brukes spesiell laserteknologi. Dette er teknologi som i prinsippet har vært kjent lenge, men som er så ressurskrevende at den så langt har vist seg oppnåelig kun for stater med store ressurser.

For ytterligere å motvirke spredning av våpenplutonium fra MOX, kan våpenplutoniumet blandes med reaktorplutonium under produksjon av MOX.

3.3 Deponering av våpenplutonium uten å gå veien om MOX

Et alternativ til bruk av våpenplutonium i MOX er innbaking i glassmatrix eller syntetisk stein (synrock). Også i dette tilfelle må plutoniumet overføres til oksidform. Tanken er at en da vil gjøre plutoniumet utilgjengelig både ved deponering på store dyp og ved kjemisk binding som er vanskelig å bryte. Isotopsammensetningen endres i utgangspunktet ikke, men det vil være teknisk vanskelig å utvinne plutoniumet fra matrixen. For å gjøre plutoniumet mindre attraktivt, kan en blande våpenplutonium med reaktorplutonium før innbaking og deponering finner sted. Over meget lang tid vil imidlertid de plutoniumisotopene med kortest halveringstid dø hen, og det er også disse som står for den største produksjonen av nøytroner fra spontanfisjon. Fremtidens generasjoner vil derfor finne et plutonium i det deponerte avfallet som er bedre egnet til våpenbruk enn det plutoniumet som opprinnelig ble deponert [6].

3.4 Spredningsfare ved bruk og transport av MOX

Faren for spredning av spaltbart materiale er for MOX som for uranoksidbrensel knyttet til ferskt brensel fremfor brukt brensel. Dette

skyldes den sterke strålingen som omgir brukt brensel. Ferskt MOX vil ha en større attraktivitet enn ferskt uranbrensel fordi det inneholder plutonium. Dess bedre kvalitet på plutoniumet, dess større attraktivitet. Hvis plutonium skal utvinnes fra ferskt MOX for bruk i våpen, må det skilles fra uranet som finnes i MOX ved en prosess som ligner svært meget på repressering.

Alle verdens land, med unntak av India, Israel og Pakistan, har undertegnet Ikke-spredningavtalen for spaltbart materiale, NPT. Dette setter et strengt rammeverk rundt all aktivitet knyttet til slikt materiale, og det begrenser sannsynligheten for at det skal komme på avveie. Det har imidlertid vist seg at dette regimet ikke følges effektivt opp i alle deler av verden, og særlig gjelder dette etter det tidligere Sovjetunionens oppløsning der kontrollen i mange områder har vært og er mangelfull. Både Irak og Nord-Korea er land der kontrollsystemet ikke har fungert fordi landene ikke har villet overholde inngåtte avtaler. Det har imidlertid pågått et betydelig arbeid for å styrke det internasjonale kontrollregimet de senere årene. Det er også utarbeidet en tilleggsprotokoll til safeguardsavtalene som vil gi IAEA vesentlig bedre kontrollmuligheter versus ikke-deklarete nukleære aktiviteter i et land. IAEA har oversikt over atskillige tilfeller av smugling av ulike typer spaltbart materiale [11]. Bekreftede tilfeller av smugling av tilstrekkelige mengder for et våpen mangler imidlertid, selv om ryktene stadig svirrer i media.

Ved siden av NPT finnes det to eksportkontrollregimer for nukleært utstyr og materiale, nemlig Nuclear Suppliers Group og Zanggerkomiteen. Begge disse regimer er basert på frivillighet, men har vist seg effektive når det gjelder å hindre eksport til mistenkelige områder. Alle land som er aktuelle i MOX-sammenheng deltar i disse gruppene.

Alt kjernebrensel omfattes av strenge sikkerhetstiltak både ved transport og lagring.

Disse sikkerhetstiltak følger Konvensjonen om fysisk sikring av nukleært materiale, CPPNM, og de anbefalinger om tiltak som IAEA har utgitt [12]. Selv om kravene til fysisk sikring ikke er obligatoriske for innenlands bruk, lagring og transport, er det ingen av de land som er aktuelle i MOX-sammenheng som ikke følger de anbefalinger som gis i ref.[12] eller tilsvarende. Arbeidet med å styrke CPPNM har pågått i over to år, og Utenriksdepartementet og Strålevernet deltar i arbeidet der forslag til endringer i konvensjonen konkretiseres. Det har vært stor motstand mot å starte opp dette arbeidet, men hendelsene den 11. september 2001 forandret på dette. Spørsmålet er i dag ikke om konvensjonen skal endres, men hvordan den skal endres.

Alt MOX transporteres i spesielle transportbeholdere fordi plutonium har en større radiologisk giftighet enn uran. Disse beholderne benevnes "Type B" og har gjennomgått omfattende testing for godkjenning [13]. Testingen av beholderne utføres for å godtgjøre at mulige uhell ikke skal føre til uakseptable utslipp til omgivelsene. En IAEA-studie konkluderer med at sjøtransport av radioaktivt materiale herunder MOX ikke vil medføre noen individdose som er signifikant sammenlignet med normal bakgrunn [14].

Bruk av plutonium fra våpenlagre i MOX vil føre til en økning i internasjonal og nasjonal transport av MOX i forhold til dagens situasjon. Som nevnt vil også dette være et MOX med større attraktivitet enn den MOX som transporteres i dag. Imidlertid kan en slik bruk av plutonium gjøre at man blir kvitt overskuddsmaterialet fortere enn om man velger en teknologi som innbaking i glass eller synrock. Dette har medført en stor diskusjon, spesielt i USA, der man ikke har vesentlig erfaring med bruk av MOX i industriell målestokk. Diskusjonen går i stor grad rundt hvordan man skal vurdere forholdene i Russland og eventuell global bruk av MOX ved at nye land begynner å se på MOX som et interessant alternativ til uranbrensel, eller om man vil se på dette som et særskilt tiltak for å løse et akutt

problem med overskuddsmateriale fra atomnedrustningen [15]. US Department of Energy konkluderte i januar med at de ville satse på MOX [4]. En australsk vurdering av spredningsfaren finnes for øvrig som annekset til ref.[1].

4 Produksjonsanlegg og utslipp

4.1 Anlegg som produserer MOX

Reprosessering og produksjon av MOX foregår i anlegg som det er svært kostbart å bygge og drive. Anleggene drives derfor i stor skala og det er behov for å gå ut i det internasjonale marked for å få oppdrag. Følgen er at virksomheten konsentreres på noen få anlegg i Storbritannia og Frankrike. Ettersom Russland ikke har vært en del av markedet, har Russland bygget opp sin egen industri. Anlegg for reprosessering og produksjon av MOX er som regel lokalisert i nærheten av hverandre og ofte i forbindelse med opprinnelig militære anlegg som tidligere ble brukt til produksjon av våpenmateriale. Produksjon av våpenplutonium har i de aller fleste atomvåpenstater opphørt for mange år siden, og produksjonsanleggene er enten nedlagt eller overført til sivil bruk. Pr. i dag er det virksomhet i følgende land og anlegg:

Storbritannia:

Reprosessering foregår i dag i anleggene som drives av BNFL i Sellafield; B-205 og THORP (THERmal Oxide Reprocessing Plant). Reprosesseringen i Dounreay på nordkysten av Skottland er avsluttet. B-205 vil bli drevet videre til alt brensel fra Magnox-reaktorene er repressert. Det anslås at dette vil pågå til 2012.

Produksjon av MOX foregår ved British Nuclear Fuel plc's (BNFL) anlegg i Sellafield. MOX Demonstration Facility ble nylig stengt og driver fra nå av bare testvirksomhet. Arvtakeren Sellafield MOX Plant (SMP) kom i full drift i desember 2001.

Belgia:

I Belgia produseres MOX av firmaet Belgonucleaire i Dessel. Fabrikkene kalles gjerne P0 og P1. Reprosesseringen ved anlegget er avsluttet og reprosesseringsanlegget dekommissionert. Råvarene kommer i dag fra Frankrike og Storbritannia.

Frankrike:

Det er Compagnie Generale des Materieres Nucleaires (COGEMA) som står for reprosessering og produksjon av MOX i Frankrike. Produksjon av MOX foregår ved anleggene MELOX i Marcoule og CFCa i Cadarache. Reprosessering foregår ved anleggene UP2 og UP3 i LaHague, samt ved et anlegg i Marcoule.

Japan:

Japan driver foreløpig bare prøveproduksjon av MOX. Videre har Japan et anlegg for reprosessering under bygging. Målet er at Japan skal kunne drive hele kjernebrenselssyklusen selv. Dersom dette realiseres vil det bety en betydelig reduksjon i behovet for oversjøiske transporter av brensel og høyaktivt avfall. Det vil også bety en usikker fremtid for britisk og fransk reprosessering.

Russland:

Det er anleggene PAKET (også kjent under navnet Mayak) i Chelyabinsk og Research Institute of Atomic Reactors (RIAR) i Dimitrovgrad som produserer det det er behov for av plutoniumholdig reaktorbrensel i Russland. Reprosessering finner sted ved de samme anleggene samt ved RIARs anlegg i Krasnojarsk.

Andre land:

Utover de ovennevnte sivile anlegg, har USA, Kina, India og Pakistan anlegg for reprosessering i forbindelse med sine militære programmer.

4.2 Utslipp

Samtlige reprosesseringsanlegg slipper ut radioaktivitet til miljøet. Utslippene bidrar til en usikkerhet med hensyn til mulige konsekvenser for det marine miljø. Dette skaper stor bekymring, og det øves derfor et stort politisk press på vertsnasjonene for å stanse utslippene. Det finnes teknologi som kan redusere utslippene til svært lave nivåer, og det er ofte et spørsmål om kostnader å ta i bruk slik teknologi. Å ta vare på historisk avfall er forbundet med enda større kostnader. Utslipp fra Sellafield er spredt utover havbunnen spesielt i Irskesjøen og utslipp fra anleggene i Chelyabinsk har fulgt elvene på sin vei mot nord.

Utslipp fra reprosesseringsanlegg og deres konsekvenser for miljøet i Nordsjøen er grundigere beskrevet i en rapport som nylig er utarbeidet av Strålevernet [16]. Det er først og fremst anleggene i Sellafield og utslippene av ^{99}Tc som volder bekymring. Utslippene fra Russland er mindre relevante i nordsjøsammenheng, men er behandlet grundig i tidligere studier [17,18]. Utslippene fra selve fabrikkasjonen av MOX fra plutoniumdioksid og urandioksid er meget beskjedne.

5 MOX i Norge

MOX brukes ikke som driftsbrensel i norske reaktorer. Noen få av eksperimentene i Haldenreaktoren er imidlertid rettet mot MOX, slik at det står noen få MOX-pinner inne i reaktoren til enhver tid. Formålet med forskningen på MOX i Halden er å få fram flere data om MOX egenskaper ved høy utbrenning slik at sikkerheten ved bruk av MOX i kjernekraftverk kan bedres ytterligere, spesielt når brenselet har høy utbrenning (har stått inne i reaktorene i lang tid). Når man tar kravet om bruk av MOX i tyske kjernekraftverk med i betraktning, er dette gode data å ha. I Tyskland vil MOX bli brukt som brensel i lang tid fremover. Bruk av MOX er allerede vel etablert

mange steder, og det er helt andre faktorer enn et enkelt forskningsprogram som styrer dette. Forskningen som foregår i Halden endrer ikke på det bildet. Til det er forskningsprogrammet for lite.

6 Konklusjoner

Resirkulering av uran og plutonium i form av MOX som brensel i kjernekraftverk har i Europa og Japan blitt en kommersiell teknologi. Denne teknologien har sine fordeler og ulemper som de ulike aktører i samfunnsdebatten vektlegger svært forskjellig.

Som reaktorbrensel har MOX noe annerledes egenskaper enn tradisjonelt uranbrensel, og bruk av MOX krever en tilpassing av reaktorene. Normalt blir bruken av MOX tatt høyde for allerede ved konstruksjonen av en reaktor, og det er ingen holdepunkter for at bruk av MOX svekker sikkerheten. Sammenlignet med bruk av tradisjonelt uranbrensel vil bruk av MOX isolert sett kunne betraktes som en risiko i ikke-spredningssammenheng. I litt lengre perspektiv er det imidlertid grunn til å tro at dette oppveies av at lagrene av plutonium reduseres.

Fordi lagrene av både sivilt og militært plutonium er store, lar det seg gjøre å bruke MOX uten å fortsette med selve reprosesseringsen. MOX kan også produseres fra våpenplutonium som nå finnes i militære overskuddslagre i atomvåpenstatene. En effektiv avhending av plutonium er et viktig tema i ikke-spredningssammenheng, og det er allment akseptert at lagrene av plutonium på verdensbasis må reduseres. Økt bruk av plutonium som reaktorbrensel i form av MOX eller inertmatrixbrensel representerer en løsning der plutonium brennes og i form av brukt brensel er mindre tilgjengelig på et senere tidspunkt.

Et alternativ er innbaking av plutonium i ulike matrix som glass og synrock. Dette er teknologi

det forskes en del på, men som ikke er kommersielt tilgjengelig. Det er også verdt å merke seg at denne løsningen ikke medfører en faktisk reduksjon i mengden spaltbart plutonium, men bare er en måte å gjøre det mindre tilgjengelig på. Store energimengder vil i så fall gå tapt ved at en potensiell energikilde behandles som avfall.

Det regnes i dag ikke som realistisk å kunne avhende plutonium i tilstrekkelig grad bare ved brenning som MOX. Det er et valg som må tas i hvilken grad man vil balansere sine tiltak mellom bruk av MOX eller innbaking av plutoniumet i glass/synrock. Med dagens lagre av plutonium er det neppe behov for å øke reprosesseringskapasiteten, og de anlegg som i dag finnes bør kunne brukes alternativt til omgjøring av våpenmateriale til plutoniumdioksid for bruk som MOX eller eventuell innbaking i glass/synrock.

7 Referanser

1. Uranium Information Centre Ltd.: "Nuclear Issues Briefing Paper 42" Melbourne, Australia. August 2001 via www.uic.com.au.
2. OECD/NEA: "Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options", Paris 2000.
3. "Annual Report on Discharges and Monitoring of the Environment in the United Kingdom 1999. BNFL 2000.
4. DoE News, Press Release January 23, 2002.
5. Data om plutonium fra BNFL (RECOD 1994) og Per-Eric Ahlström, Svensk Kärnbränslehandtering AB rapport R-99-58, Stockholm 1999.
6. Swahn, Johan: "The Long-Term Nuclear Explosives Predicament", Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 1992.
7. "Management of Separated Plutonium, the Technical Options." OECD/NEA, Paris 1997.
8. "Physics and Fuel Performance of Reactor-Based Plutonium Disposition." Workshop Proceedings, Paris, France 28-30 September 1998. OECD/NEA Paris 1999.
9. Marshall, W. (Ed.): Nuclear Power Technology, Vol. 2 Fuel Cycle. Clarendon Press, Oxford, 1983.
10. Goldstein, L. and Malone, J.: "Safety and Licensing of MOX versus UO₂ for BWRs and PWRs: Aspects applicable for civilian and weapons grade Pu." MOX fuel cycle technologies for medium and long term deployment, p. 399. IAEA, Vienna 2000.
11. International Atomic Energy Agency: The Illicit Trafficking Database.
12. IAEA. "The Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities" INFCIRC 225/Rev. 4 (Corrected) Wien 1999.
13. IAEA: "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Safety Standards Series TS-R-1, 1996 Edition Revised, Wien 2000.
14. IAEA-TECDOC-1231: "Severity, probability and risk of accidents during maritime transport of radioactive material." Wien 2001.
15. Bernstein, Adam: "Getting Burnt by Weapons Plutonium: Security Implications of U.S. Disposition Options." Non-Proliferation Review, Winter 1997.
16. Statens strålevern. StrålevernInfo 01/02.
17. "Reprocessing Plants in Siberia." Bellona Working Paper 4:1995.
18. Joint Norwegian-Russian Expert Group: "Sources contributing to radioactive contamination of the Techa River and areas surrounding the "Mayak" production association, Urals, Russia." Østerås 1997.

StrålevernRapport 2003:1
Virksomhetsplan for 2003

StrålevernRapport 2003:2
Utslipp av radioaktive stoffer fra Sellafield-anleggene
En gjennomgang av britiske myndigheters
regulering av utslippstillatelser

