

SKBF KÄRNKRAFTENS SLUTSTEG

Plutoniumanvändning i svenska reaktorer

September 1982

SKBF SVENSK KÄRNBRÄNSLEFÖRSÖRJNING AB

SAMMANFATTNING

Vid upparbetning av använt kärnbränsle i enlighet med de kontrakt, som svensk kraftindustri slutit, kommer drygt sex ton plutonium att renframställas. Denna rapport redovisar hur detta plutonium kan utnyttjas som beståndsdel i bränsle för svenska kärnkraftverk på ett säkerhets- och kostnadsmässigt tillfredsställande sätt. Ifrågavarande bränsle består av en blandning av uranoxid och plutoniumoxid, s k MOX-bränsle (=Mixed Oxide Fuel). Halten plutonium är normalt 3-7%.

I rapporten beskrivs först förutsättningarna för och erfarenheterna från tillverkning och användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer. Därefter redogörs för hur det svenska plutoniet kan användas i två svenska reaktorer. Som exempel har Forsmark 3 och Oskarshamn 3 valts. Den beskrivna bränslecykeln omfattar tillverkning av MOX-bränsle utomlands, transport av plutoniumoxid till bränslefabriken och MOX-bränslestavar därifrån till reaktorerna, användning i reaktorer, ca 40 års mellanlagring av använt bränsle i CLAB och därefter direktdeponering på det sätt som i princip beskrivits i KBS-2. Tillverkning av MOX-bränsle i Sverige förutses således inte.

Användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer bygger på en beprövad teknik. Tillverkning sker idag i halvindustriell skala på flera håll i Europa och tester med MOX-bränsle har pågått i olika reaktorer alltsedan mitten på 1960-talet. Totalt har närmare 20 000 MOX-bränslestavar bestrålats. De största erfarenheterna med modernt MOX-bränsle finns i Västtyskland. MOX-bränslet har visat sig ha egenskaper, som i allt väsentligt är likvärdiga med motsvarande uranbränsle. 30-50% av stavarna i härden kan innehålla MOX-bränsle utan att någon påverkan av betydelse på drift- och säkerhetsegenskaperna erhålles för en reaktor som ursprungligen utformats för uranbränsle.

Det använda MOX-bränslet innehåller en större mängd långlivade nuklider än använt uranbränsle. Detta påverkar endast margi-

nellt de åtgärder som krävs för en säker hantering och slutförvaring av det använda bränslet.

Den radiologiska påverkan på allmänheten påverkas inte av att en viss del av uranet i bränslet ersätts av plutonium. Kollektivdosinteckningen till personalen ökar något i tillverkningsledet.

Risken för spridning av klyvbart material i olika bränslecykler har utvärderats i INFCE. Därvid konstaterades bl a att existerande rutiner för safeguards och fysiskt skydd, t ex i samband med transporter, är tillfredsställande för plutoniumåterföringscykeln.

Intresset för återcyklning av plutonium i lättvattenreaktorer har av olika skäl ökat i flera länder på senare år. Planer finns på en ökning av tillverkningskapaciteten för MOX-bränsle i Europa och några tekniska hinder för att fylla behovet av tillverkningskapacitet torde inte föreligga.

Återföring av plutonium i kokvattenreaktorer, såsom beskrivs i exemplet för F3 och O3, sker i bränsle av s k plutonium-ö-typ. Dessa bränsleelement innehåller MOX-bränsle i de centrala stavarna och uranbränsle i de omgivande. Ca 30% av stavarna är MOX-stavar. Med den förväntade uppbyggnadstakten kommer det årligen framställda plutoniet i det närmaste att motsvara behovet för två kokvattenreaktorer. Alternativt kan plutoniet användas i två tryckvattenreaktorer.

Genom användning av plutonium minskar behovet av anrikt uran. I det genomräknade exemplet ersätter 6,3 ton plutonium anrikt uran motsvarande ca 600 ton natururan och 600 000 SWU anrikningsarbete. En försiktig ekonomisk bedömning visar att de kostnadsbesparingar som därmed erhålls väl kompenserar de ökade kostnaderna för bränsletillverkning etc för MOX-bränslet.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	3
1.1	Plutoniets ursprung	3
1.2	Användning av uran och plutonium från upparbetning	3
1.3	Underlagsmaterial för rapporten	4
2	ERFARENHETER AV MOX-BRÄNSLE I LÄTTVATTENREAKTORER	7
2.1	Historik	7
2.2	MOX-bränsleprogram i olika länder	8
2.2.1	USA	8
2.2.2	Västtyskland	9
2.2.3	Belgien	10
2.2.4	Italien	10
2.2.5	Schweiz	10
2.2.6	Frankrike	10
2.2.7	Japan	11
2.2.8	Sverige	11
2.3	Slutsatser	11
3	BRÄNSLECYKELN FÖR PLUTONIUMÅTERFÖRING	13
3.1	Översikt	13
3.2	MOX-bränsletillverkning	15
3.2.1	Tillverkningsteknik	15
3.2.2	Kontroller	16
3.2.3	Avfall från bränsletillverkningen	17
3.2.4	Tillverkningskapacitet i Västeuropa	18
3.3	Användning av MOX-bränsle i reaktorer	19
3.3.1	Allmänt	19
3.3.2	Reaktorfysik	19
3.3.3	Bränsleerfarenheter	21

3.4	Sluthantering av använt bränsle	22
3.4.1	Allmänt	22
3.4.2	Egenskaper hos använt MOX-bränsle	23
3.4.3	Slutsats	24
3.5	Transporter	24
3.5.1	Allmänt	24
3.5.2	Transport av plutoniumoxidpulver	25
3.5.3	Transport av MOX-bränslestavar	26
3.5.4	Transport av använt MOX-bränsle	27
3.6	Användning av upparbetat uran	27
4	MODELL FÖR ÅTERFÖRING AV PLUTONIUM I SVENSKA REAKTORER	29
4.1	Systembeskrivning	29
4.2	Strategi för plutoniumåterföring	30
4.3	Plutoniummängder	31
4.4	Bränslecykelberäkningar	33
4.4.1	Bränsleledesign	33
4.4.2	Bränslecykelberäkningar	34
4.5	Bränsletillverkning och montage	36
4.6	MOX-bränslets inverkan på reaktorns drift- egenskaper	36
4.7	Sluthantering av använt bränsle	37
4.8	Tillståndsfrågor	39
5	RADIOLOGISK PÅVERKAN AV PLUTONIUMANVÄNDNING	41
6	EKONOMI	43
7	SAFEGUARDS OCH FYSISKT SKYDD	47
7.1	Safeguards, allmänt	47
7.2	Safeguards i samband med plutoniumåterföring	48
7.3	Fysiskt skydd	49
8	INTERNATIONELLA REGLERINGAR	51
8.1	Internationella avtal	51
8.2	Bilateralavtal	51
8.3	International Plutonium Storage (IPS)	53
9	SLUTSATSER	55
10	REFERENSER	57

1 INLEDNING

1.1 PLUTONIETS URSPRUNG

Den typ av kärnkraftverk, som vi har i Sverige, lättvattenreaktorer, drivs normalt med ett bränsle som utgörs av låganrikat uran. Det innehåller ca 3% av den klyvbara uranisotopen uran-235. När bränslet används och genererar energi, förbrukas uran-235. Samtidigt bildas plutonium, vilket också innehåller klyvbara isotoper, som bidrar till energiproduktionen.

Efter 3-5 års användning av bränslet, har dess reaktivitet, dvs förmåga att upprätthålla en kärnreaktion, minskats så att bränslet måste bytas ut. Av den energi, som bränslet då producerat, härrör ca 30% från klyvningar i plutonium. I det använda bränslet finns det kvar klyvbart material, uran och plutonium, vilket kan återvinnas och utnyttjas på nytt som bränsle. Återvinningen sker genom upparbetning, varvid bränslet delas upp i tre beståndsdelar, uran, plutonium samt klyvningsprodukter och transuraner. De senare tas omhand som högaktivt avfall, medan uranet och plutonet renas, så att de åter kan föras in i bränslecykeln.

1.2 ANVÄNDNING AV URAN OCH PLUTONIUM FRÅN UPPARBETNING

Uran från använt bränsle har ett innehåll av uran-235 på 0,6-0,9%, dvs ungefär som det uran man finner i naturen. Detta uran kan efter anrikning åter användas som bränsle i lättvattenreaktorer. Plutonium från använt bränsle innehåller ca 70% klyvbara isotoper. Dessa kan i ett bränsle ersätta uran-235. Istället för att anrika uranet, så att en förhöjd halt av uran-235 erhålles, blandar man in plutonium i uranet. Därvid erhålles ett s k blandoxidbränsle, MOX-bränsle (Mixed Oxide fuel), som har liknande egenskaper som det rena uranbränslet. (Uranet och plutonet i reaktorbränsle är normalt i oxidform. Därav namnet blandoxid.)

Plutonium kan som MOX-bränsle användas i snabba brytare eller i lättvattenreaktorer. Av bränsleekonomiska skäl är det fördelaktigast att utnyttja plutonet i brytare. I den allmänna debatten har det därför ofta framstått som om detta är det enda fredliga användningsområdet för plutonium. Detta är helt felaktigt. Såsom kommer att beskrivas i denna rapport, finns det redan nu omfattande erfarenheter av användning av plutoniumberikat MOX-bränsle i lättvattenreaktorer i flera länder.

Svensk kraftindustri har slutit kontrakt om upparbetning av totalt ca 870 ton använt bränsle vid anläggningarna i Windscale (numera Sellafield) och La Hague. Upparbetningen avses ske under slutet av 80-talet och början av 90-talet. Totalt kommer därvid ca 6 ton plutonium att renframställas. I denna rapport beskrivs hur detta plutonium kan användas såsom bränsle i de svenska lättvattenreaktorerna.

Användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer har aktualiserats i flera länder, främst i Europa och Japan. Orsaken till detta är att efterfrågan på plutonium från brytare under slutet av 1980-talet och under 1990-talet blir mindre än väntat till följd av förskjutningar i planerna för brytarebyggnaden.

1.3 UNDERLAGSMATERIAL FÖR RAPPORTEN

Materialiet till denna rapport är baserat på studier, som utförts på uppdrag från SKBF av ASEA-ATOM och Transnuclear samt inom SKBF. (1-1, 1-2). Material har till stor del även hämtats från tre stora internationella studier av olika aspekter på användning av plutoniumbränsle; INFCE-, GESMO- och CEC-studierna.

INFCE-studien, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, genomfördes i samarbete mellan 46 länder och 5 internationella organisationer under perioden 1977-80. (1-3). INFCE ger en bred översikt över tekniken för och konsekvenserna av olika reaktorstrategier. Den har tyngdpunkten på icke-spridningsaspekterna, men ger även tekniska bedömningar av genomförbarhet och säkerhet.

GESMO-studien, Generic Environmental Statement on the use of recycle plutonium in Mixed Oxide fuel in light water cooled reactors, utfördes på uppdrag av US Nuclear Regulatory Commission och publicerades 1976 (1-4). GESMO ger en detaljerad genomgång av omgivningskonsekvenserna i alla steg av bränslecykeln om plutonium konsekvent återcyklas i lättvattenreaktorer. GESMO innehåller även beskrivningar av använd teknik och till 1976 vunna erfarenheter.

CEC-studien (1-5), som nyligen publicerats, har utförts inom EG-kommissionen i samarbete mellan olika forskningsinstitutioner

och företag från EG-länderna. Studien avser främst att belysa omgivningskonsekvenserna inom EG vid en begränsad återcykling av plutonium. Den innehåller även rapporter om tekniken i MOX-bränslecykelns olika delsteg (1-6).

I Sverige ingick en studie av upprepad plutoniumåterföring som en del av arbetet inom Aka-utredningen (1-7).

2 ERFARENHETER AV MOX-BRÄNSLE I LÄTTVATTENREAKTORER

2.1 HISTORIK

Redan tidigt stod det klart, att det plutonium som bildades i kärnbränslet, kunde användas som nytt bränsle. Under 1960-talet och början av 1970-talet bedrevs därför omfattande utvecklingsverksamhet i flera länder, som syftade till att demonstrera användningen av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer. Under denna period testades drygt 18 000 MOX-bränslestavar i 16 olika lättvattenreaktorer, däribland 51 stycken i Oskarshamn 1-reaktorn. Se tabell 2-1.

Efter 1976 har omfattningen av MOX-bränsletester varit mindre. Endast i Västtyskland har man fortsatt i oförändrad omfattning. Det finns flera orsaker till att intresset för plutoniumanvändning i lättvattenreaktorer minskade under andra hälften av 1970-talet. Den viktigaste var att planerna på utbyggnaden av bredreaktorer fick så stor omfattning, att man bedömde att allt plutonium skulle behövas för dem. Samtidigt visade prognoserna minskad upparbetningskapacitet under 1980-talet, vilket skulle minska mängden plutonium som kommer att framställas. Ett tredje tungt vägande skäl var att USAs inställning till plutoniumanvändning ändrades under president Carter i så måtto, att upparbetning ifrågasattes och att all plutoniumanvändning skulle ske i bredreaktorer. På president Carter's initiativ startades också den s k INFCE-studien (1-3), International Fuel Cycle Evaluation, med syfte att bedöma olika bränslecykler ur bland annat icke-spridningssynpunkt.

Under de senaste åren har intresset för användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer åter ökat efter det att man i INFCE-arbetet dragit slutsatsen att sådan användning inte innebär någon ökad spridningsrisk för nukleärt material.

I det följande ges en översikt av arbetet med MOX-bränsle i några olika länder. I brist på information har öststaterna, främst Sovjet, utelämnats.

Tabell 2-1. Erfarenheter av plutoniumanvändning i lättvattenreaktorer.

Kraftstation	Land	Tillverk- ningsår	Antal stavar	
<u>PWR</u>				
Saxton	USA	65-69	706	
San Onofre	USA	70-73	720	
Chooz-SENA	Belgien/ Frankrike	74-76	576	
Obrigheim	Västtyskland	72-81	5 940	
Mihama	Japan	66	753	
BR 3	Belgien	63-76	848	
Beznau	Schweiz	76	<u>1 800</u>	11 343
<u>BWR</u>				
Dresden 1	USA	67-69	114	
Quad Cities	USA	74	48	
Big Rock Point	USA	69-76	1 248	
Garigliano	Italien	68-75	2 286	
Dodewaard	Holland	71-74	99	
Kahl	Västtyskland	66-75	846	
Gundremmingen	Västtyskland	74-76	2 240	
Lingen	Västtyskland	70	15	
Oskarshamn	Sverige	74	<u>51</u>	<u>6 947</u>
				18 300

2.2 MOX-BRÄNSLEPROGRAM I OLIKA LÄNDER

2.2.1 USA

Redan 1956 inleddes i USA det av NRC (Nuclear Regulatory Commission) finansierade Plutonium Utilization Program. Detta följdes senare av olika testprogram under början av 1970-talet, som direkt syftade till att demonstrera användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer. Dessa program finansierades dels av myndigheterna, dels av bränsletillverkare som Westinghouse, General Electric och Exxon. Programmen omfattade såväl teoretiska studier som praktiska tillämpningar med insättning av ett stort antal MOX-bränslestavar i såväl tryckvatten- som kokvattenreaktorer, tabell 2-1.

Parallellt med dessa testprogram genomfördes den tidigare omnämnda GESMO-studien (1-4) där olika sidor av användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer belystes. Tyngdpunkten i GESMO

ligger på en utvärdering av omgivningspåverkan. Den innehåller även en genomgång av drifterfarenheterna med MOX-bränsle, varvid slutsatsen dras att tekniken för plutoniumåterföring är tillgänglig:

"As a result of the experience acquired and the technology developed in various plutonium recycle programs, both in the United States and abroad, it has been demonstrated that plutonium recycle is technically feasible. This conclusion is based on successful irradiations of fuel in the Plutonium Recycle Test Reactor at Hanford, and in the Saxton, San Onofre, Big Rock Point, and Dresden Unit No. 1 US reactors. Foreign experiments have involved tests of mixed oxide fuel in a number of reactors, but especially at Garigliano in Italy. The mixed oxide fuels were irradiated to specific power levels and to burnups typical of those expected in LWRs. The irradiations showed no abnormalities with respect to fuel behavior or predicted reactor control and core performance characteristics".

Sedan GESMO publicerades, har inga ytterligare tester av MOX-bränsle genomförts i USA, på grund av den förändring i inställningen till upparbetning och plutoniumanvändning, som skedde under president Carter. Den nuvarande administrationen har en mera positiv inställning till upparbetning, men på grund av bl a finansiella problem har detta ännu inte lett till några fasta planer på upparbetning av civilt bränsle i USA. Frågan om plutoniumanvändning i lättvattenreaktorer röner därför lågt intresse för närvarande, och någon tillverkning av MOX-bränsle för lättvattenreaktorer pågår inte.

2.2.2 Västtyskland

Som tidigare nämnts har Västtyskland ett ambitiöst program för att genomföra plutoniumanvändning i lättvattenreaktorer. Programmet har hittills främst genomförts med statliga medel och med deltagande av tyska kraftföretag samt bränsleleverantörerna KWU och ALKEM. Det första testbränslet sattes in i Kahl-reaktorn 1966. Detta har följts av ett stort antal bränsleelement i såväl tryckvatten- som kokvattenreaktorer under hela 1970-talet. 1981 hade totalt drygt 10 000 stavar, med 650 kg plutonium satts in i 5 stycken tyska reaktorer. De flesta stavarna har testats i Obrigheim, som är den lättvattenreaktor i världen, där man har störst erfarenhet av MOX-bränsle. Huvuddelen av bränslet har tillverkats av ALKEM i Hanau. En del av bränslet har nått sin slututbränning och har tagits ut för efterföljande undersökningar. Genomgående har man funnit, att bränslet uppfört sig på likartat sätt som normalt uranbränsle. Utbränningen har maximalt varit 37 000 MWd/tHM (2-1)*.

* tHM = ton heavy metal = ton uran + plutonium.

Det västtyska programmet siktar till att man 1988 skall ha kapacitet att tillverka MOX-bränsle från allt plutonium, som renframställes vid upparbetning av tyskt bränsle i La Hague och sedermera även i Windscale. Denna satsning, som omfattar ytterligare testbestrålningar, och en modernisering av ALKEMs bränslefabrik, kommer till övervägande delen att finansieras av de tyska kraftföretagen. Det tyska programmet är främst inriktat på återanvändning i tryckvattenreaktorer. Programmet omfattar även studier av upparbetning av MOX-bränsle.

2.2.3 Belgien

Belgien har sedan 1959 med finansiering från Euratom bedrivit ett omfattande plutoniumprogram, som omfattat alla aspekter av MOX-bränslehanteringen; separering av plutonium vid Eurochemic, tillverkning av MOX-bränsle hos Belgonucleaire, test av bränsle i BR 3. Belgonucleaires bränsle har även testats i andra reaktorer, t ex Saxton, Dodewaard, Chooz-SENA och Oskarshamnsverket.

Belgisk kraftindustri undersöker nu möjligheterna till en konsekvent plutoniumåterföring i belgiska reaktorer under senare delen av 1980-talet. Likaså diskuteras det, att upparbetningsanläggningen Eurochemic - om den åter tas i drift - skall användas speciellt för upparbetning av MOX-bränsle.

2.2.4 Italien

Italien har genomfört ett stort testprogram i Garigliano-reaktorn. Studier av en konsekvent plutoniumåterföring i italienska reaktorer pågår.

2.2.5 Schweiz

Schweizisk kraftindustri studerar plutoniumåterföring i lättvattenreaktorer. Man planerar att sätta in testpatroner inom några år i schweiziska reaktorer.

2.2.6 Frankrike

Den franska inställningen har genomgående varit att plutonium skall utnyttjas i bridreaktorer. Man har således utformat en fullständig bränslecykel för bridreaktorbränsle i Frankrike, vilken omfattar framställning av plutonium genom upparbetning av bränsle från lättvattenreaktorer eller gas-grafit-reaktorer, tillverkning av MOX-bränsle med högt plutoniuminnehåll (ca 20%), användning i bridreaktorer (Phenix och Super-Phenix), samt upparbetning av bridreaktorbränsle (pilotskala).

Det franska bridreaktorprogrammet omfattar idag Phenix (250 MW_e), som är i drift sedan 1974 och Super-Phenix (1200 MW_e), som är under byggnad med planerad driftstart 1983/84. Något beslut om en fortsättning med nya bridreaktorer efter Super-Phenix har ännu ej fattats. I det fall dessa skjuts på framtiden, kommer ett överskott av plutonium att erhållas i Frankrike under 1990-talet, vilket skulle kunna användas i lättvattenreaktorer. Det franska kraftföretaget EDF har förberett sig för en sådan utveckling genom att delta vid testning av några bränsleelement i Chooz-SENA-reaktorn.

2.2.7 Japan

I Japan har man liksom Frankrike hittills varit inriktade på att använda plutoniet i bridreaktorer. Bland annat finns en anläggning för MOX-bränsletillverkning för bridreaktorer i Tokai. Parallellt har MOX-bränslestavar med lägre plutoniumhalt testats i tungvattenreaktorn FUGEN. Under senare tid har en förskjutning av bridreaktorprogrammet skett. För att ta hand om det plutoniumöverskott, som man förväntar sig få, ämnar man satsa på återföring i lättvattenreaktorer. MITI (Ministry of International Trade and Industry) har nyligen tillsatt en kommitté för att studera frågan (2-2). De japanska uppdragskontrakten ger totalt ca 30 ton plutonium, huvudsakligen under 1990-talet.

2.2.8 Sverige

MOX-bränsle testades i Sverige redan 1966 i Ågestareaktorn. I början av 1970-talet planerade svensk kraftindustri för användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer, vilket skulle kunna börja omkring 1980. Sålunda innefattade då diskussionerna i samband med bränsleköp även optioner på tillverkning av MOX-bränsle. Som ett led i denna utveckling sattes 1974 tre bränsleelement med totalt 51 MOX-bränslestavar in i Oskarshamn 1. Dessa användes fram till 1980, då den sista nått sin slututbränning. En av stavarna undersöktes därefter i detalj i Studsvik. Undersökningen visar att MOX-bränslet uppfört sig på liknande sätt som motsvarande uranbränsle.

Vid uppdragsenligt gällande kontrakt med Cogema och BNFL kommer ca 6 ton plutonium att renframställas ur svenskt bränsle under slutet av 80-talet och under 90-talet. Denna studie utgör ett underlag för utvärderingen av hur detta plutonium skall användas.

2.3 SLUTSATSER

Användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer har studerats alltsedan slutet av 1950-talet i många länder. Dessa studier har varit dels teoretiska, dels omfattat tillverkning och an-

vändning av MOX-bränslestavar i reaktorer. Erfarenheterna har genomgående varit goda. Redan i mitten av 1970-talet kunde man i flera oberoende utvärderingar konstatera, att några tekniska hinder inte förelåg för plutoniumåterföring i lättvattenreaktorer.

3 BRÄNSLECYKELN FÖR PLUTONIUMÅTERFÖRING

3.1 ÖVERSIKT

I detta kapitel ges en översiktlig beskrivning av de steg, som är specifika för en bränslecykel, som innebär att plutoniet återförs i lättvattenreaktorer. En mera detaljerad genomgång görs i underlagsrapporterna (1-1, 1-2).

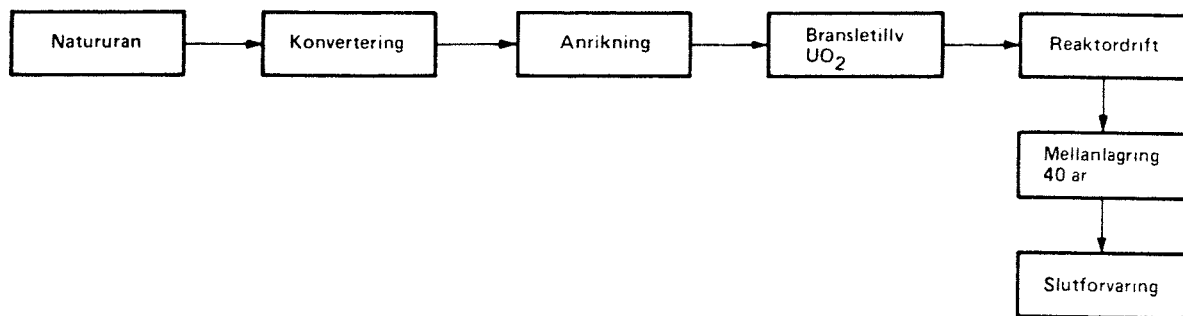
I figur 3-1 jämförs plutoniumåterföringscykeln med direktdeponeringscykeln. Den senare innebär, att bränslet efter att det använts i reaktorn betraktas som avfall och efter ca 40 års mellanlagring placeras i ett slutförvar, utan avsikt att det skall kunna återvinnas. Ett tillvägagångssätt för detta finns beskrivet i KBS 2 (3-1).

I plutoniumåterföringscykeln skickas det använda uranbränslet efter några års mellanlagring till upparbetning, där de högaktiva restprodukterna avskiljs från bränslematerialen uran och plutonium. Det högaktiva avfallet tas om hand för slutförvaring t ex såsom beskrivits i KBS 1 (3-2). I KBS 1 finns också tillvägagångssättet för upparbetning utförligt beskrivet. Det upprepas därför inte här.

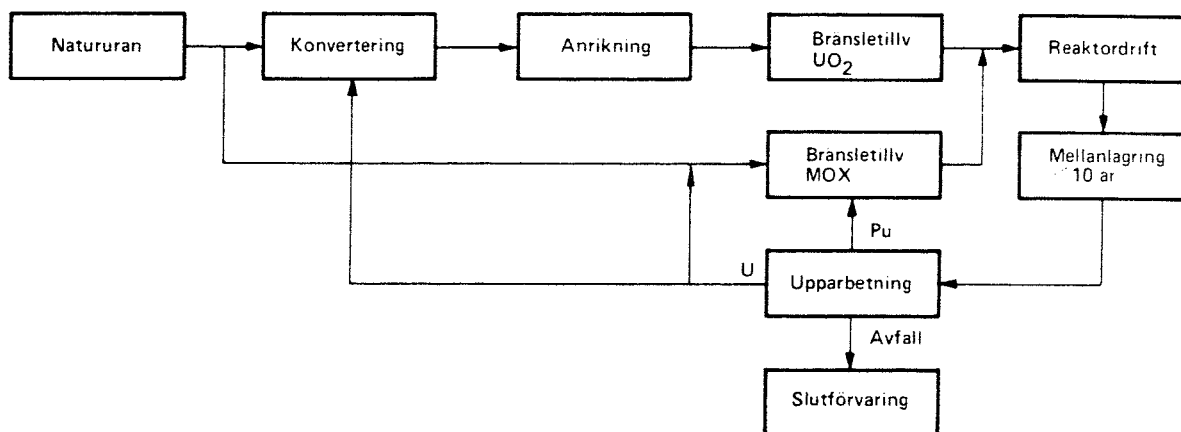
Uranet och plutoniet renas, så att det åter kan användas som bränsle. Uranet konverteras därefter till uran-hexafluorid, så att det kan anrikas, varefter det åter kan användas som utgångsmaterial för standardbränsle. Alternativt kan det direkt användas som utgångsmaterial för MOX-bränsle. Det upparbetade uranet skiljer sig något från natururan, vilket medför vissa komplikationer vid anrikningen. Detta behandlas närmare i avsnitt 3.6.

Plutoniet överförs efter upparbetningen normalt till en oxidform, vilken kan användas direkt för tillverkning av MOX-bränsle. Plutoniumoxiden blandas i MOX-bränslefabriken med uranoxid, så att önskad plutoniumberikning erhålles. Flera olika processer har därvid tillämpats. MOX-bränsletillverkningen beskrivs i avsnitt 3.2.

a) Direkt cykel



b) Plutoniumåterföring

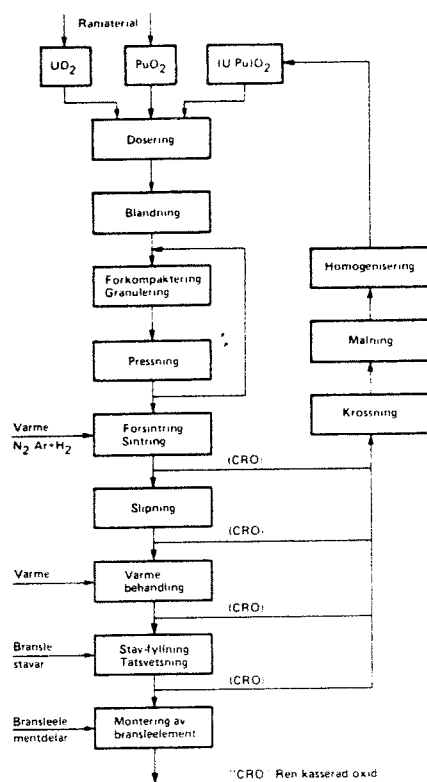


Figur 3-1. Jämförelse mellan direktdeponeringscykeln och Pu-återföringscykeln.

Om bränslefabriken inte är belägen intill upparbetningsanläggningen, måste plutoniumoxiden transporteras dit. Denna transport och transporten av MOX-bränslestavar från bränslefabriken till reaktorstationen är de ur stöldsynpunkt känsligaste delarna i plutoniumåterföringscykeln. Transporten sker därför under sträng bevakning, såsom beskrivs i avsnitt 3.5.

Användningen av MOX-bränsle i reaktorer skiljer sig inte mycket från användning av normalt uranbränsle. Inverkan av MOX-bränslet på reaktorns driftegenskaper vid normal drift och under transienter är ringa. Den beskrivs i avsnitt 3.3, där även resultat från undersökningar av använt MOX-bränsle redovisas.

Det använda MOX-bränslet skiljer sig från anrikat uranbränsle främst genom sitt högre innehåll av tunga nuklider (aktinider). Detta påverkar emellertid inte på något avgörande sätt möjligheten att ta hand om det använda bränslet. Båda alternativen för slutbehandling av bränslet som visas i figur 3-1, direkt deponering eller förnyad återcyklning är därför tillgängliga. Detta beskrivs i avsnitt 3.4.



Figur 3-2. Tillverkningsgången för MOX-bränsle.

3.2 MOX-BRÄNSLETILLVERKNING

3.2.1 Tillverkningssteknik

Plutonium är ett mycket giftigt ämne, såväl ur radiologisk som ur kemisk synpunkt. Hanteringen av plutonium måste därför ske på sådant sätt, att man inte riskerar att sprida det i luften i de lokaler, där det hanteras eller till omgivningen. Detta är speciellt viktigt, när plutoniumoxiden befinner sig i pulverform. All bearbetning av icke inkapslad plutonium sker därför slutet i handskboxar eller liknande. Då plutonet i sig självt och genom föroreningar (främst americium-241), kan avge viss gamma- och neutronstrålning, krävs även att en del av bearbetningen sker strålskärmad.

Bortsett från dessa strålskyddsaspekter är tillvägagångssättet vid MOX-bränsletillverkning likartad tillverkningen av konventionellt uranbränsle. Några olika processer har utprovats. Den process, som man har mest erfarenhet av, utgår från uran- och plutoniumoxid i pulverform. I figur 3-2 visas tillverkningsprocessen schematiskt. Den består av följande huvudsteg:

1. UO_2 - och PuO_2 -pulvren blandas, så att önskad plutoniumberikning erhålles.
2. Pulverblandningen förkompakteras och granuleras, så att ett friflytande pulver erhålles.
3. Pulvret pressas till kutsar (s k green pellets).
4. Kutsarna sintras.
5. De sintrade kutsarna slipas, så att de får de önskade måtten och värms för att driva av fukt och gaser.
6. Slutligen fylls kutsarna i bränslestavar, vilka svetsas igen, så att de blir gastäta.

Det material, som kasseras vid tillverkningen, återförs efter malning till första steget.

Vid denna process erhålles ett bränsle, där plutoniumoxiden ligger som 0,1 - 1 mm stora korn i uranmatrisen. Det har visat sig att sådant bränsle, första generationen MOX-bränsle, som använts i lättvattenreaktorer inte kan lösas upp helt i salpetersyra vid upparbetningen. Omkring 20% av PuO_2 förblir ouplöst (3-3). För att lösa denna återstod krävs t ex fluorvätesyra.

För att framställa ett MOX-bränsle, som kan lösas i salpetersyra, är det nödvändigt att blanda de båda oxiderna så väl, att man erhåller en fast lösning av plutonium i uran. Några olika processer som åstadkommer detta har testats. De bygger antingen på att ett mycket fint pulver framställs (tyska OKOM- och franska MIGRA-processerna), eller att uranet och plutoniet överförs i en lösning, varefter de fälls ut samtidigt (tyska AUPuC-och olika sol-gel-processer). Ingen av dessa processer har dock ännu förverkligats i industriell skala.

3.2.2 Kontroller

Kontrollerna vid MOX-bränsletillverkningen är omfattande. De består förutom av normal tillverkningskontroll i varje processsteg, även av mängdkontroller av allt klyvbart material, som cirkulerar i processen, i enlighet med de krav, som ställs av IAEAs safeguardssystem, (se kapitel 7). Av särskild vikt är därvid kontrollen av plutoniumhaltigt avfall. Likaså sker kontroller med hänsyn till kriticitetsrisken.

Tillverkningskontrollerna omfattar tester av pulver, kutsar och färdiga bränslestavar.

Tabell 3-1. Plutoniumkontaminerat fast avfall*

Område där avfallet bildats	Avfallstyp	Andel (%) av totala volymer**
Processområdesavfall	Papper, plast, etc	50
Handskboxar och dragskåp	Flytande avfall (fällning och skrotåtervinning)	25
	Gummi och plast	15
	Papper och trasor	7
	HEPA filter	2
	Metall och glas	1

* Data från ref 3-5.

** Totala avfallsvolymer är ca 0,85 m³/kg Pu före behandling (t ex kompaktering, bränning, ingjutning). Genomsnittlig kontamineringsnivå omkring 10 gPu/m³.

3.2.3 Avfall från bränsletillverkningen

Olika typer av avfall erhålles i de olika delarna av tillverkningsprocessen. Huvuddelen av detta är i en sådan form, att det direkt eller efter rening kan återföras i processen, medan en mindre del tas om hand som radioaktivt avfall. Detta avfalls radioaktivitet bestäms av dess plutoniuminnehåll.

Det radioaktiva avfallet innehåller olika typer av fasta material (papper, tyg, plast, gummi, glas, trä, keramik och metall) samt kemiska restprodukter från behandling av flytande avfall. En typisk sammansättning av avfallet ges i tabell 3-1 (3-5). Totalt erhålles erfarenhetsmässigt ca 0,8 m³ obehandlat avfall per kg plutonium, som hanteras. Avfallet har hittills främst behandlats genom kompaktering och cementingjutning, varvid en volymreduktion på ca en faktor 3 erhålles. Utveckling av förbättrade behandlingsmetoder, t ex förbränning, pågår vilket bör leda till minskade avfallsvolymer.

Plutoniumförlusterna till avfallet är erfarenhetsmässigt ca 1%. Utveckling av metoder för ökad återvinning pågår.

Avfallet från MOX-bränsletillverkning är av liknande typ, som det lågaktiva avfallet, som erhålles vid upparbetning, och kan hanteras på samma sätt. Plutoniuminnehållet gör att avfallet är långlivat.

3.2.4 Tillverkningskapacitet i Västeuropa

I Västeuropa finns det idag fyra anläggningar för tillverkning av MOX-bränsle:

Belgonucléaire, Dessel, Belgien
 ALKEM, Hanau, Västtyskland
 CEA, Cadarache, Frankrike
 BNFL, Windscale, Storbritannien

Av dessa är CEA och BNFL främst inriktade på tillverkning av brydreaktorbränsle, medan Belgonucléaire och ALKEM tillverkar båda typerna av bränsle. Anläggningarnas kapacitet framgår av tabell 3-2. Vid tillverkning av 40 ton lättvattenreaktorbränsle, som är ALKEMs årskapacitet, används ca 2 ton plutonium.

Tabell 3-2. Europeiska anläggningar för blandoxidbränsle.

Anläggning	Kapacitet, årston HM	
	Lättvatten- reaktor- bränsle	Bryd- reaktor- bränsle
Belgonucléaire, Dessel, Belgien	25*	5*
CEA, Cadarache, Frankrike	15	20
Alkem, Hanau, Västtyskland	40*	10*
BNFL, Windscale, Storbritannien	-	5
Summa	80	40

* Ej additiva tal för LWR och FBR.

Med hänsyn till att man i flera länder ännu inte fattat något beslut om hur plutonium som erhålles vid upparbetning skall användas, är det svårt att uppskatta marknadssituationen för MOX-bränsletillverkning under början av 1990-talet. Följande överväganden kan dock göras.

Upparbetning av lättvattenreaktorbränsle kommer under den aktuella perioden främst att ske i La Hague och Windscale. Totala mängden plutonium, som därvid årligen framställs, blir 15-20 ton. Av detta härrör 5-8 ton från franskt bränsle och 3 ton från japanskt.

Totala tillverkningskapaciteten för MOX-bränsle vid Belgonucléaire och ALKEM motsvarar idag ca 3,5 ton plutonium per år. Såsom nämnts tidigare, satsar tysk kraftindustri på att bygga upp kapacitet för återcyklning av plutonium i lättvattenreaktorer. Som ett led i denna satsning planeras en utbyggnad av ALKEMs fabrik till 80 årston bränsle, dvs ca 4 ton plutonium, om-

kring 1990. Även Belgonucléaire anser sig ha möjlighet att fördubbla sin kapacitet inom en fyraårsperiod. Totalt skulle i så fall dessa båda anläggningar kunna ta hand om ca 7 ton plutonium per år, vilket är 80-100% av allt europeiskt, icke-franskt, plutonium.

Frankrike planerar som nämnts använda sitt plutonium i bldreaktorer. Skulle en förändring i planerna ske, kan man förvänta sig att kapacitet för plutoniumåtercyklning i lättvattenreaktorerna byggs upp även i Frankrike.

Slutsatsen av dessa överväganden är, att det finns goda möjligheter till att tillräcklig bränsletillverkningskapacitet skall finnas tillgänglig under 1990-talet. En förutsättning är dock, att beslut om hur plutoniet skall användas i olika länder fattas inom några få år, så att bränsletillverkarna ges möjlighet att planera nya utbyggnader. Det bör dock påpekas, att jämfört med flera andra steg i kärnbränslecykeln är tekniken för bränsletillverkning relativt enkel, och tiden för utbyggnad kan beräknas vara ca 4-5 år.

3.3 ANVÄNDNING AV MOX-BRÄNSLE I REAKTORER

3.3.1 Allmänt

I kapitel 2 beskrevs de omfattande testprogram som genomförts med MOX-bränsle i lättvattenreaktorer. Målsättningen för testerna har varit att undersöka, hur bränslet uppför sig under realistiska förhållanden, samt att verifiera de beräkningsprogram, som användes för reaktorfyikalisk dimensionering av bränslet. Baserat på dessa undersökningar och på ett stort antal teoretiska studier, kan man dra slutsatsen, att plutoniumåterföring kan göras i lättvattenreaktorer, utan att det får en störande inverkan på reaktorns drift. Ej heller påverkas risken för haverier eller konsekvenserna i samband därmed nämnvärt.

3.3.2 Reaktorfyisik

Användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer innebär inte någon stor förändring vid beräkningar av reaktorhärden. Redan i normalt uranbränsle bildas ju såsom nämnts inledningsvis plutonium, vilket bidrar till energiproduktionen. När uranbränslet nått sin slututbränning, innehåller det ungefär en fjärdedel av den halt plutonium, som finns i en MOX-bränslestav. Detta innebär att inverkan av plutonium på reaktorns egenskaper redan finns med vid drift med uranbränsle. Användning av MOX-bränsle medför dock att denna inverkan blir starkare. De egenskaper som påverkas är främst:

- relativa verkan av neutronabsorbatorer, t ex styrstavar och bor reduceras,
- andelen fördröjda neutroner är lägre, vilket påverkar reaktorns regleregenskaper och svar på störningar,
- vissa reaktivitetskoefficienter ändras, vilket ävenledes påverkar regleregenskaperna och störningssvaret.

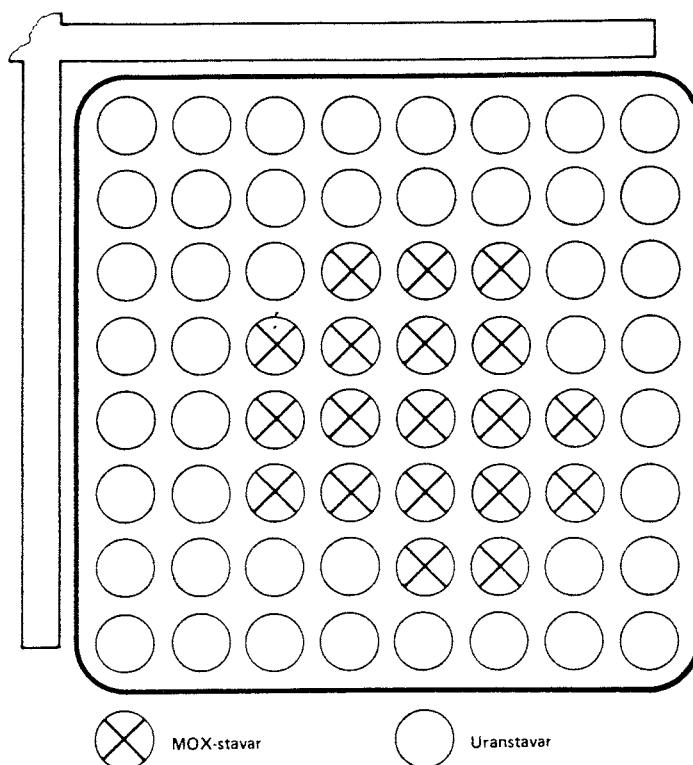
Vid dimensioneringen av en hård laddad med MOX-bränsle, måste hänsyn tas till att dessa förändringar inte får påverka säkerheten. Då de flesta hittills utförda studierna av MOX-bränsleanvändning har gällt reaktorer, som ursprungligen dimensionerats för uranbränsle, har man eftersträvat att använda ett MOX-bränsle, vars egenskaper avviker så litet som möjligt från motsvarande uranbränsle.

Överväganden av denna typ har lett till att man valt olika lösningar för plutoniumanvändning i tryckvattenreaktorer och i kokvattenreaktorer. I tryckvattenreaktorerna används bränsleelement, där alla stavarna innehåller MOX-bränsle. Vid de årliga bränslebytena sätts en del sådana element in tillsammans med vanligt uranbränsle. För att undvika en försämrad styrstavsverkan, söker man undvika att placera MOX-bränslet i styrstavspositioner. För att minska inverkan av randeffekter i gränsen mellan uran- och MOX-element används ofta två eller tre plutoniumberikningsgrader. Olika studier, (t ex 3-6, 3-7) har visat att man kan ha 30-50% MOX-element i en modern tryckvattenreaktor utan att några licensierade gränsvärden överskrides.

I kokvattenreaktorn gränsar varje bränsleelement mot en styrstav och bränsleelementen är dessutom omgivna av vattenspalter. MOX-bränsleelementen utformas därför ofta enligt det s k plutoniumökonceptet. Detta innebär att MOX-bränslestavarna placeras centralt i elementet och skärmas från styrstaven och vattenspalterna av normala uranstavar, se figur 3-3.

I den studie som Asea-Atom genomfört åt SKBF (1-1) visas, att en reaktor av typ Forsmark 3 kan drivas med enbart MOX-element av denna typ. MOX-elementen som beskrives innehåller 18 MOX-stavar centralt placerade, omgivna av 45 uranstavar, dvs andelen MOX-stavar i härden är ca 30%. Motsvarande mängd MOX-bränsle bedöms kunna återföras i alla svenska kokvattenreaktorer.

De studier av användning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer som redovisas i denna rapport har utförts för att verifiera ett möjligt tillvägagångssätt. De omfattar inte något försök att optimera utnyttjandet av plutoniet i dem. Olika möjligheter att förbättra utnyttjandegraden har föreslagits, t ex att minska stavdiametern. En slutlig optimering återstår dock att göra.



Figur 3-3. BWR-bränsleelement av plutonium-ö-typ.

3.3.3 Bränsleerfarenheter

Drygt 18 000 MOX-bränslestavar har testats under realistiska förhållanden i kraftreaktorer. En del av dem har drivits till utbränningar, som är karakteristiska för modernt reaktorbränsle (30-50 MWd/kgHM).

Drifterfarenheterna har genomgående varit goda. Bränsleskador har dock inträffat i flera av programmen. Dessa bränsleskador var emellertid desamma som de som drabbade uranbränsle tillverkat under samma tidsperiod. Ett exempel är hydrering av zircaloy-kapslingen på grund av för hög fukthalt i bränslet. Andelen bränsleskador har snarast varit lägre i MOX-bränslet än i uranbränslet, vilket kan förklaras av att teststavar normalt utsätts för noggrannare kontroll.

En del av de testade stavarna har efter att de nått sin slututbränning genomgått efterbestrålningundersökningar i hot cell. Därvid har det framkommit, att MOX-bränslet i huvudsak uppför sig på liknande sätt som uranbränsle. Vissa skiljaktigheter kan dock konstateras, t ex:

- effektutvecklingen är ojämnt fördelad i staven genom att huvuddelen sker i plutoniumkornen,

Tabell 3-3. Innehåll av några tunga nuklider i använt MOX-bränsle och använt uranbränsle. MOX-bränslet är av plutonium-ö-typ.

Nuklid	Halt (g/t HM)	
	MOX-bränsle	Uranbränsle
U-235	6 400	7 400
U-238	942 000	945 000
Np-237	, 380	440
Pu-238	380	150
Pu-239	7 900	4 700
Pu-240	5 800	2 000
Pu-241	2 600	1 000
Pu-242	2 000	660
Am-243	450	100
Cm-244	160	30

- fissionsgasfyllda porer bildas i plutoniumkornen,
- fissionsgasavgivningen kan vara större,
- MOX-bränsle förtätas mindre än uranbränsle.

Det bör påpekas att huvuddelen av erfarenheterna härrör från bränsle tillverkat genom blandning av pulver. Med de nya tillverkningsmetoder som nämndes i avsnitt 3.2, fås ett homogenera re bränsle, där skillnaderna blir mindre uttalade. Tex erhålles lägre fissionsgasavgivning (2-1).

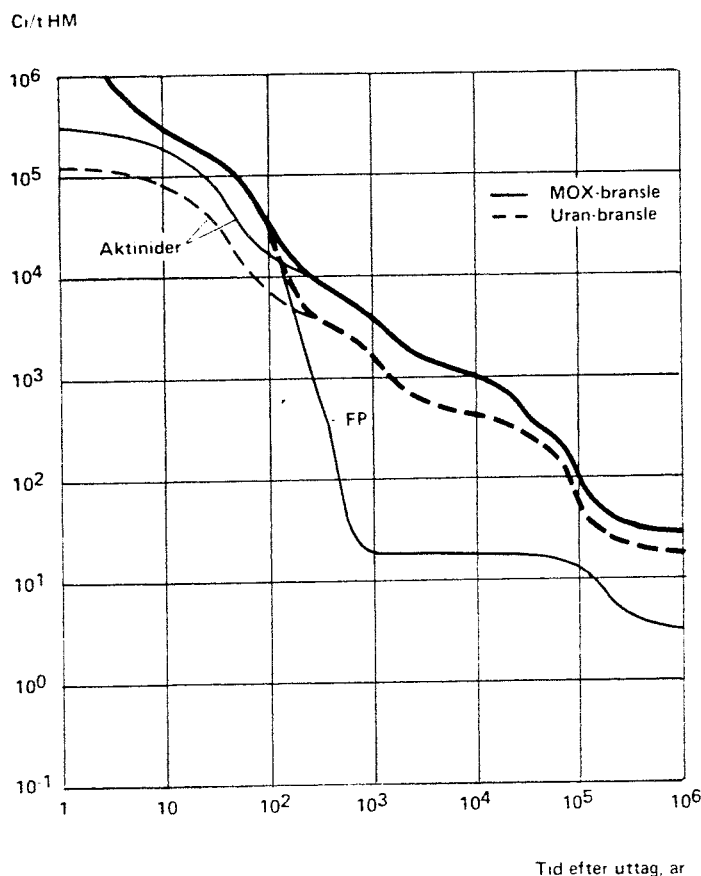
Tester av MOX-bränslets förmåga att klara snabba belastningsändringar har också genomförts. Därvid framkom, att det åtminstone inte är känsligare än normalt uranbränsle.

3 4 SLUTHANTERING AV ANVÄNT BRÄNSLE

3.4.1 Allmänt

När MOX-bränslet uppnått sin slututbränning i reaktorn, tas det ut och placeras på normalt sätt i bassängerna för använt bränsle på kärnkraftverket. Därefter finns det två alternativa möjligheter att förfara med det använda bränslet:

- bränslet transporteras till upparbetning, där uran och plutonium avskiljs, så att det åter kan användas som bränsle. Det



Figur 3-4. Totalinnehåll av radioaktiva ämnen i använt MOX-bränsle och använt uranbränsle. MOX-bränslet är av plutonium- δ -typ. Utbränning 33 MWd/kgHM.

högaktiva avfallet som då erhålles mellanlagras och deponeras t ex såsom beskrivits i KBS 1 (3-2),

- bränslet transporteras till CLAB för mellanlagring i ca 40 år. Därefter kapslas det in och deponeras t ex såsom beskrivits i KBS 2 (3-1).

Det är idag inte möjligt att förorda den ena eller den andra lösningen ur säkerhetssynpunkt. Med nuvarande priser på uran och på upparbetning synes dock direkt-deponeringsalternativet vara mera ekonomiskt. Av detta skäl och med hänsyn till osäkerheten om upparbetningskapaciteten i världen mot slutet av 1990-talet, är denna framställning baserad på direktdeponeringsalternativet.

En genomgång av speciella frågor i samband med upparbetning av MOX-bränsle ges i (1-1).

3.4.2 Egenskaper hos använt MOX-bränsle

Det använda MOX-bränslet skiljer sig från motsvarande uranbränsle främst genom att det innehåller en större mängd tunga nuklider (aktinider), se tabell 3-3 och figur 3-4. Däremot är totala mängden klyvningsprodukter (FP) ungefär densamma för de båda

bränslena. Sammansättningen hos klyvningsprodukterna skiljer sig dock. Vid klyvningar i plutonium-239 erhålles fler klyvningsprodukter med masstal omkring 100-130 än vid klyvningar i uran-235 men färre vid övriga masstal. Denna skillnad har dock ingen stor betydelse för säkerheten i samband med hantering och slutförvaring av det använda bränslet.

Den större mängden tunga nuklider har däremot betydelse, genom att:

- neutronflödet är starkare från MOX-bränslet
- resteffekten är högre från MOX-bränslet
- alfa-aktiviteten är högre för MOX-bränslet
- MOX-bränslet innehåller mer klyvbart material

Neutronflödet påverkar transporter, mellanlagring och deponering såtillvida, att starkare strålskärning behövs.

Resteffekten har främst betydelse för hur tätt bränslet kan placeras vid slutdeponeringen. Mängden bränsle per kapsel bestäms av resteffekten.

Alfa-aktiviteten påverkar bränslets radiotoxicitet och har därigenom betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet. För de nuklider, som ger det dominerande bidraget till den dos, som människor kan få i en avlägsen framtid från förvaret, är ökningen endast liten. Den påverkar därför slutförvarets säkerhet endast marginellt.

MOX-bränslet innehåller mera klyvbart material än motsvarande uranbränsle. Därigenom skulle risken för en kriticitet i slutförvaret kunna öka. I (1-2) visas att så ej är fallet vid den valda utformningen.

3.4.3 Slutsats

Den slutliga hanteringen av använt MOX-bränsle kan genomföras på ett säkert sätt enligt den metod som beskrivits i KBS 2. Hän-syn måste därvid dock tas till de skillnader, som finns, främst vad det gäller neutronflödet och resteffekt.

3.5 TRANSPORTER

3.5.1 Allmänt

De transporter, som blir aktuella i samband med plutoniumåter-föring är:

- transport av plutoniumoxidpulver från upparbetningsanläggningen till MOX-bränslefabriken,
- transport av färska MOX-bränslestavar till reaktorstationen,
- transport av använt MOX-bränsle till mellanlager eller upparbetningsanläggning, samt till slutdeponeringsplats efter mellanlagring.

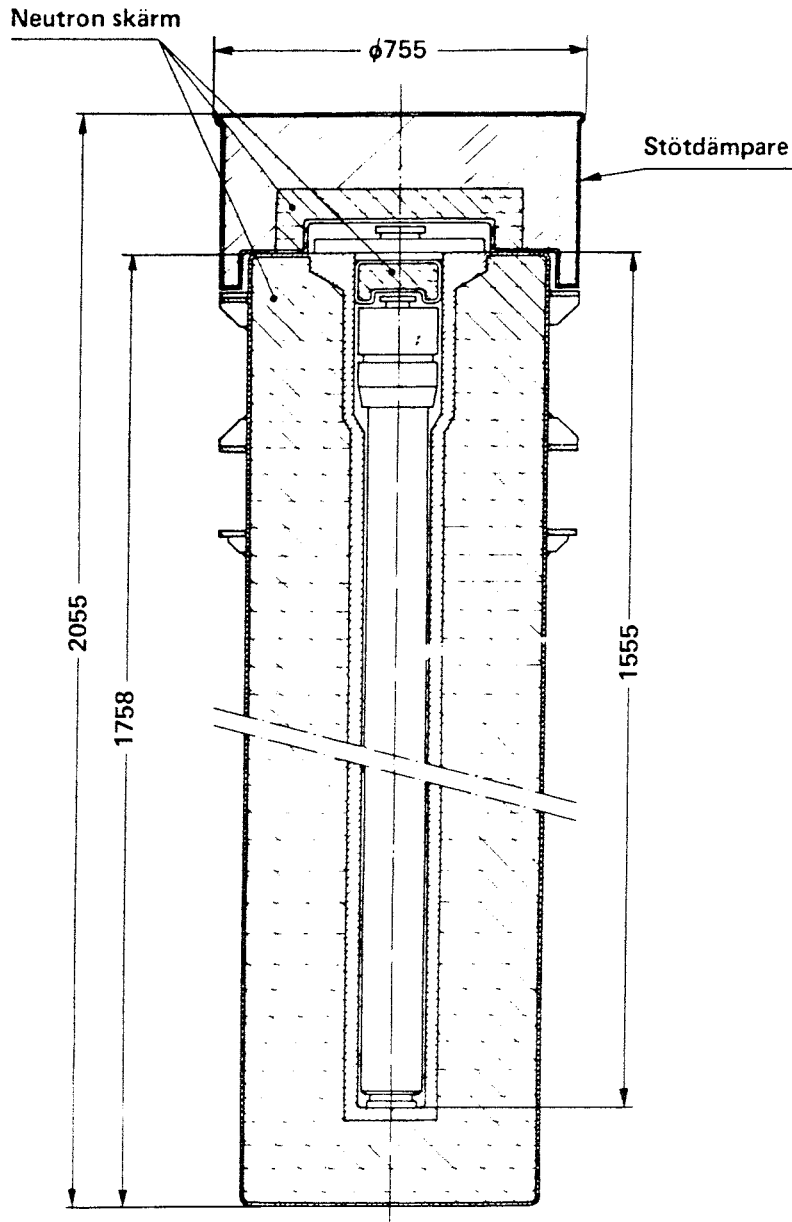
Dyliga transporter har genomförts vid upprepade tillfällen i Europa, och såväl transportemballage som rutiner för transporterna finns tillgängliga. Transportemballagen måste följa IAEAs rekommendationer (3-8), som utformats för att ge ett betryggande radiologiskt skydd i samband med transporter av radioaktivt material. Själva transporten måste dessutom utföras så, att den uppfyller samtliga berörda länders krav på fysiskt skydd, se kap 8. Speciellt transporterna av plutoniumoxidpulver och MOX-bränslestavar är känsliga ur stöldsynpunkt. Det använda bränslet skyddas däremot av den radioaktiva strålning det avger. MOX-bränsle skiljer sig härvid inte markant från normalt uranbränsle.

3.5.2 Transport av plutoniumoxidpulver

För transport av plutoniumoxidpulver har Cogema föreslagit, att en behållare benämnd FS 47 skall användas, se figur 3-5. Varje sådan behållare rymmer 14,5 kg plutoniumoxid. Tio FS 47 kan transporteras i en speciell pansrad 20-fots container. En transport av plutonium från exempelvis La Hague till ALKEM sker idag i stora drag på följande sätt:

Före transporten måste alla behöriga myndigheter i av transporten berörda stater och delstater få ett meddelande om transportväg, tid, typ av fysiskt skydd, material osv. Inlastningen hos avsändaren sker under bevakning. Under transporten rapporterar besättningen, som består av minst två förare och ibland en separat transportledare, vid fastställda tidsintervaller sin position med kod. Vid uppehåll på vägen måste åtminstone en man stanna kvar i det från insidan låsta fordonet. Rapportering av position sker till en ledningscentral. Vid ett eventuellt överfall kan fordonet göras obrukbart av besättningen. Endast från ledningscentralen kan fordonet göras brukbart igen.

Totala mängden plutoniumoxid, som på detta sätt transporterats i Europa, torde ligga kring 15 ton. Då tidigare mindre behållare använts, motsvarar detta att några tusen behållare transporterats.



Figur 3-5. Emballage för transport av plutoniumoxidpulver, FS 47.

3.5.3 Transport av MOX-bränslestavar

Transporter av MOX-bränslestavar i större omfattning har på senare år främst utförts i Västtyskland. Under 70-talet har minst 50 transporter av MOX-stavar genomförts. Därvid har några olika behållare använts, vilka varit speciellt licensierade för MOX-bränsle, t ex General Electric's RA-emballage. Ett sådant tar 190 BWR-bränslestavar.

Fram till årsskiftet 1981/82 kunde transporten av MOX-bränsle i Västtyskland genomföras med lastbil med två förare under eskort av en polisbil och ytterligare en följebil med transportledaren. Kraven skall nu skärpas och kommer troligen att motsvara

dem som gäller för plutoniumoxidpulver. I Sverige tillämpas redan dessa strängare krav.

3.5.4 Transport av använt MOX-bränsle

Transporter av använt MOX-bränsle skiljer sig tekniskt inte från transport av använt uranbränsle. Samma typ av transportbehållare kan användas. För svensk del kan transporterna ske med M/S Sigun som specialkonstruerats för transport av använt kärnbränsle och andra radioaktiva produkter. Det använda MOX-bränslet avger, såsom nämntes i avsnitt 3.4 ett starkare neutronflöde än motsvarande uranbränsle. Transportbehållarnas neutronstrålskärm kan därför behöva förstärkas. En utvärdering visar att de transportbehållare som är aktuella i Sverige, TN 17 Mk2, kan ta full last av BWR-element av plutonium- α -typ utan modifiering. För att de skall kunna ta PWR-element, krävs en ökning av neutronstrålskärmen.

Hittills har endast några enstaka transporter av använt MOX-bränsle skett. För normalt använt bränsle har däremot hundratal transporter genomförts i Europa.

3.6 ANVÄNDNING AV UPPARBETAT URAN (3-4)

Uran som frångår vid upparbetning avviker från natururan på tre sätt:

- halten uran-235 är normalt något högre,
- det innehåller en del uran-232 och uran-236,
- det är nedsmutsat med små mängder klyvningsprodukter och aktinider, som gör att uranet har en viss strålnivå.

Den första egenskapen är positiv, då den medför att mindre anrikningsarbete behövs för att uppnå en önskad anrikningsnivå. De övriga egenskaperna leder till att speciella mått måste vidtagas ur strålskärningssynpunkt. Huvuddelen av klyvningsprodukterna och aktiniderna tas bort i konverteringssteget, då uranet omvandlas till uranhexafluorid. Kvar blir enbart rutenium och teknetium, vilka dock inte ger några problem vid anrikningen.

Uran-232 separeras inte vid konverteringen, utan denna gammastrålende nuklid går med till anrikningssteget. I detta anrikas den mer än uran-235, varför en ökad koncentration byggs upp. Erfarenhetsmässigt är innehållet av uran-232 i sådant uran som bara gått ett varv i bränslecykeln så lågt, att den inte ger några problem. Vid en andra återcyklning blir koncentrationen så hög, att uranet inte kan anrikas i nuvarande anläggningar.

Även uppbyggnaden av uran-236 gör att det är olönsamt att återanvända uranet mer än en gång. Denna nuklid är en neutronabsorbator och minskar därigenom uranets reaktivitetsvärde. "Andragångsuran" bör därför främst komma till användning i brytdreaktor.

Upparbetat uran kan alternativt användas direkt för tillverkning av MOX-bränsle. Det ger då inga tillkommande strålskärningskrav jämfört med vad som härrör från hanteringen av plutonium.

4 MODELL FÖR ÅTERFÖRING AV PLUTONIUM I SVENSKA REAKTORER

4.1 SYSTEMBESKRIVNING

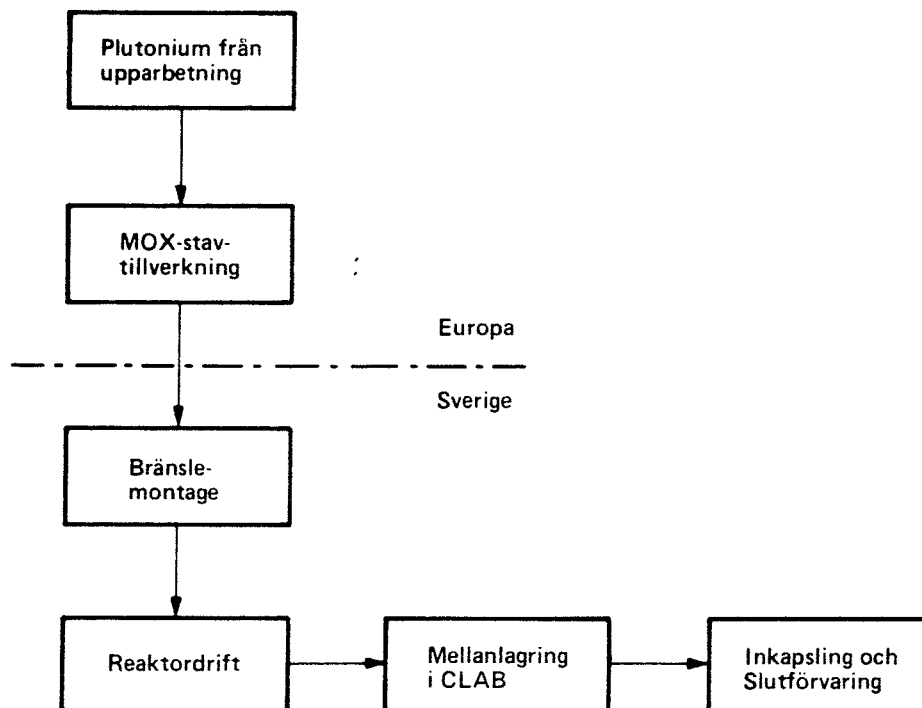
I föregående kapitel gavs en allmän beskrivning av, hur de olika stegen i kärnbränslecykeln påverkas av att plutonium återanvänds i lättvattenreaktorer. I detta kapitel skall ett specifikt exempel beskrivas, vilket är kopplat till det svenska kärnkraftsprogrammet, som det ser ut idag.

Förutsättningen är att det plutonium, som erhålles vid upparbetning av svenskt använt bränsle i enlighet med de kontrakt, som slutits med BNFL och Cogema, skall användas i några svenska reaktorer. Det uran som därvid också erhålles, återcyklas efter anrikning, som vanligt bränsle.

Den skisserade modellen utgör enbart ett möjligt exempel på, hur plutoniet kan användas. Den innebär inte något förslag på att det skall användas på detta sätt. Innan ett sådant förslag ges, måste mera detaljerade utvärderingar av, vilken användningsstrategi som är den optimala, göras; skall t ex PWR eller BWR användas. Möjliga alternativ diskuteras något i de följande avsnitten.

Plutoniet erhålles från Cogema och BNFL, successivt under slutet av 1980-talet och hela 1990-talet. Det förutsätts därefter bli transporterat till en MOX-bränslefabrik i Europa, där bränslestavar tillverkas. Tillverkning av MOX-bränsle i Sverige räknas således inte med. Bränslestavarna sätts sedan samman till bränsleelement. Detta kan göras vid bränslefabriken eller på reaktorstationen, beroende på vilket som är fördelaktigast ur transport- och säkerhetssynpunkt. Transporterna antas ske såsom beskrivits i avsnitt 3.5.

MOX-bränslet används i två kokvattenreaktorer. Som exempel har Forsmark 3 och Oskarshamn 3 valts.



Figur 4-1. Modellsystem för plutoniumanvändning i svenska reaktorer.

När bränslet uppnått sin slututbränning i reaktorn, transporteras det efter ca ett års avsvälning till CLAB för mellanlagring. Valet mellan upparbetning och direkt slutförvaring kan då i princip hållas öppet. Här förutsättes dock, att det använda bränslet direktdeponeras.

Det skisserade systemet visas schematiskt i figur 4-1.

4.2 STRATEGI FÖR PLUTONIUMÅTERFÖRING

Det är möjligt att använda MOX-bränsle i vilken som helst av de svenska reaktorerna. Vid valet av strategi för att återföra den begränsade mängd plutonium, som det för svensk del blir frågan om, bör man ta hänsyn till bland annat följande faktorer:

- ekonomi
- tillståndsfrågor
- säkerhet mot spridning av klyvbart material
- möjlighet till fysiskt skydd
- ägandeförhållanden för plutoniet

Någon detaljerad utvärdering av dessa faktorer har inte gjorts i denna utredning. Det har emellertid bedömts lämpligt att med hänsyn till tillstånds- och säkerhetsfrågor koncentrera använd-

ningen av MOX-bränsle till ett fåtal reaktorer. Som kommer att framgå senare i detta kapitel, kan man förbruka allt plutonium, som erhålles från de gällande upparbetningskontrakten i två reaktorer. Om Sverige i ett senare skede väljer att upparbeta mera bränsle, kan plutoniet från detta utan problem fördelas för återanvändning i flera reaktorer.

Vid bedömningen av vilken strategi, som är ekonomiskt fördelaktigast är det främst valet mellan återanvändning i PWR eller BWR, som får betydelse. Vi har i denna studie valt att koncentrera oss på användning i BWR. Detta motiveras främst med att de flesta svenska reaktorer är av denna typ. Återanvändning i PWR av liknande typ, som de svenska har analyserats på många håll utomlands (t ex 3-6). Någon bedömning att användning av MOX-bränsle i BWR skulle vara fördelaktigare ekonomiskt, har därmed inte gjorts. Det kan i detta sammanhang nämnas, att man i Västtyskland satsar enbart på återanvändning i PWR.

Ägandeförhållandena för plutoniet har inte tagits hänsyn till, utan plutoniet har betraktats som en gemensam svensk resurs.

Baserat på ovanstående överväganden har vi således valt att studera användning av MOX-bränsle i två svenska BWR, Forsmark 3 och Oskarshamn 3, vilka för detta ändamål är identiska.

4.3 PLUTONIUMMÄNGDER

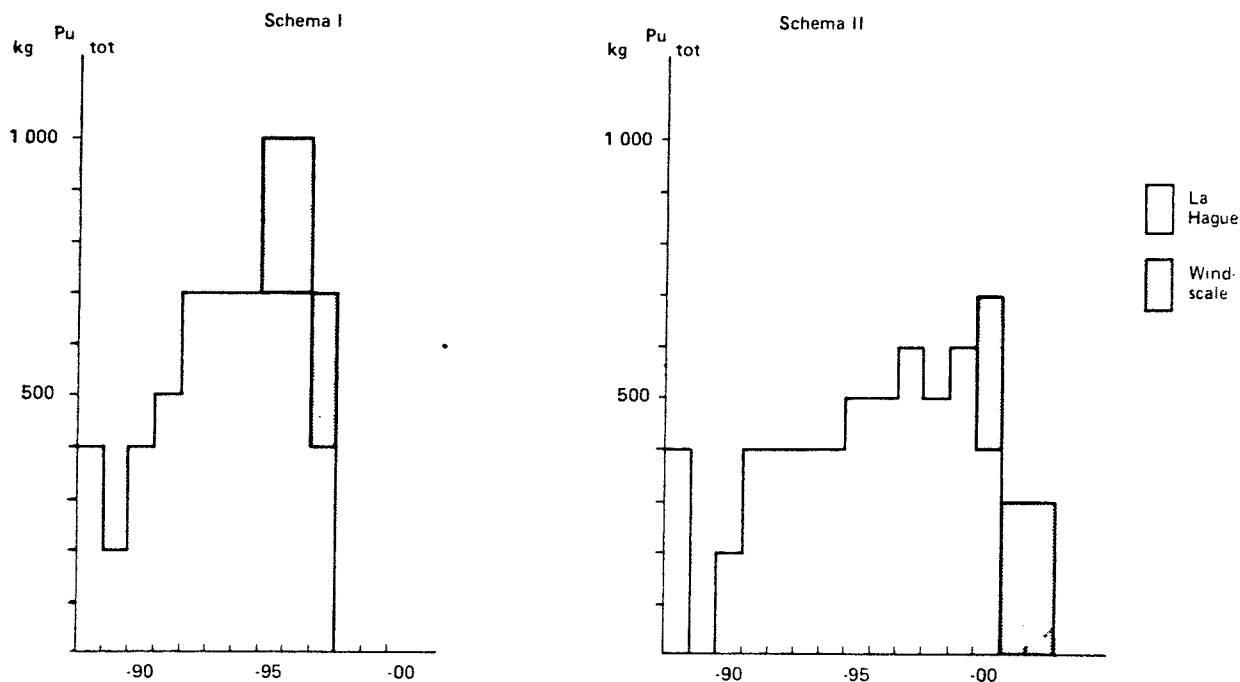
Svensk kraftindustri har upparbetningskontrakt omfattande totalt 867 ton använt bränsle, 140 ton i Windscale och 727 ton i La Hague. Vid upparbetningen av detta bränsle kommer totalt 6,3 ton plutonium att bli tillgängligt för återanvändning (4-1). Upparbetningen kommer att ske under slutet av 1980-talet och en stor del av 1990-talet. Viss osäkerhet råder om den detaljerade tidplanen för när plutoniet blir tillgängligt. Två antagna leveransplaner har därför studerats, schema I och schema II.

Schema I som återspeglar dagens planering förutsätter att upparbetningen vid UP3-anläggningen i La Hague startar 1987 och får full kapacitet 1991. Windscaleplutoniet kommer från 1995.

Schema II avser att belysa förhållandena om förseningar uppstår. Upparbetning i UP3 antas starta 1988 och nå 75% kapacitet från 1993. Full kapacitet uppnås aldrig i detta schema. Från Windscale antas plutoniet komma år 2000.

I figur 4-2 visas de årliga plutoniummängder, som med dessa antaganden blir tillgängliga för återinsättning.

Innan bränslet upparbetas, kommer det att ha gått mellan 6 och 20 år sedan det togs ur reaktorn. Huvuddelen ligger kring 7-10 år. Detta påverkar sammansättningen hos det återvunna plutoniet.



Figur 4-2. Antagna plutoniummängder tillgängligt för insättning.

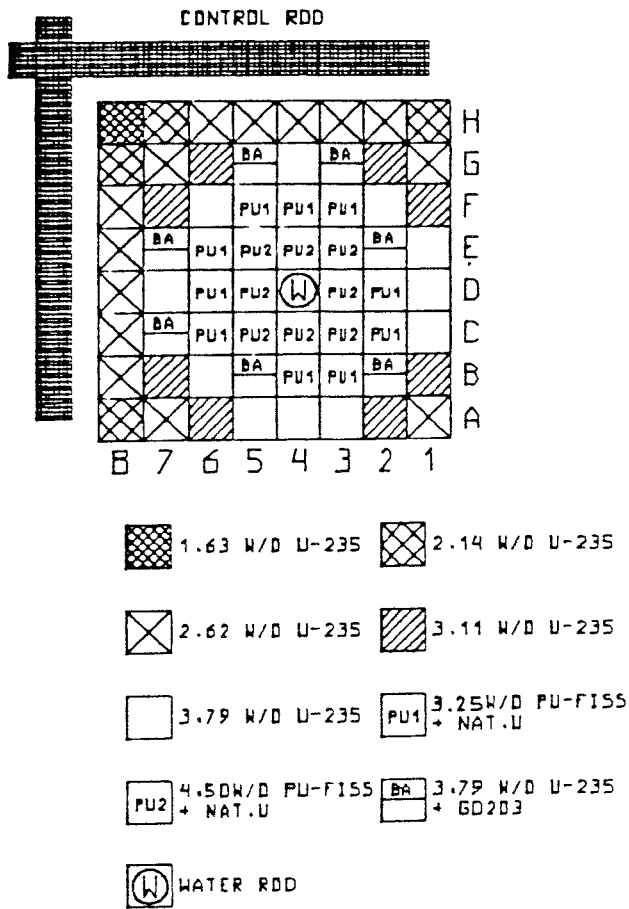
I tabell 4-1 visas den sammansättning som använts i denna studie. Den motsvarar sammansättningen av plutonium i 8 år gammalt bränsle, vars utbränning varit den som förväntas i genomsnitt för det svenska bränsle som skall upparbetas, ca 25 MWd/kg U.

Tabell 4-1. Plutoniumsammansättning.

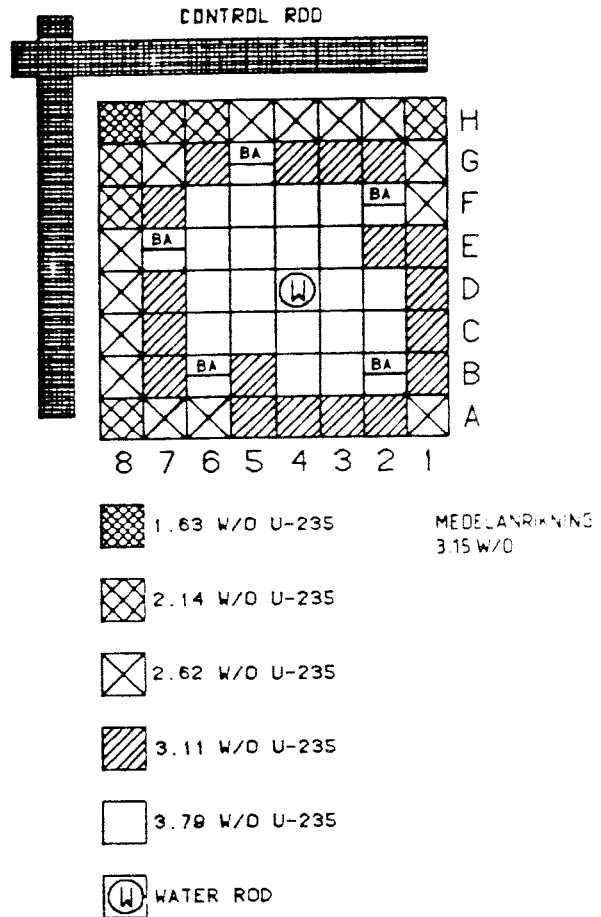
Nuklid	Vikts-%
Pu-238	1,4
Pu-239	58
Pu-240	26
Pu-241	9
Pu-242	5,6

Plutonet innehåller således 67% klyvbara nuklider (plutonium-239 och -241).

a) MOX-BRÄNSLE



b) URANOXID-BRÄNSLE



Figur 4-3. Utformning av studerade bränsleelement, a) MOX-bränsle, b) uranoxidbränsle.

4.4 BRÄNSLECYKELBERÄKNINGAR (1-1)

4.4.1 Bränsledesign

Baserat på de principer för MOX-bränsleutformning i en BWR, som beskrivits i avsnitt 3.3, har ett MOX-bränsleelement för Forsmark 3s ersättningsbränsle dimensionerats. Detta visas i figur 4-3a. Vid dimensioneringen har man strävat efter att göra MOX-bränslet så nära lika det uranbränsle, som normalt används som ersättningsbränsle, som möjligt, se figur 4-3b. Sålunda är de nära utbränningsekvivalenta, dvs de har samma reaktivitetsvärde vid härdens medelutbränning vid slutet av en driftperiod.

MOX-bränslet består av en plutonium-ö, med 18 MOX-stavar med två olika plutoniumberikningar, 3,25 och 4,50 vikts-% klyvbart plutonium (4,9 resp 6,7 vikts-% plutonium totalt). MOX-stavarna har natururan som basmaterial. Även utarmat uran eller upparbetat uran skulle kunna användas, varvid plutoniumberikningen dock måste korrigeras. En sådan optimeringsstudie har ej genomförts. MOX-stavarna är omgivna av 45 stycken uranstavar med en medelanrikning på 3,10 w/o uran-235. Ett MOX-element med denna design innehåller totalt 2,9 kg plutonium och 174,8 kg uran.

Det normala ersättningsbränslet för Forsmark 3, som visas i figur 4-3b, har en medelanrikning på 3,15 w/o uran-235. Det innehåller 177,7 kg uran.

4.4.2 Bränslecykelberäkningar

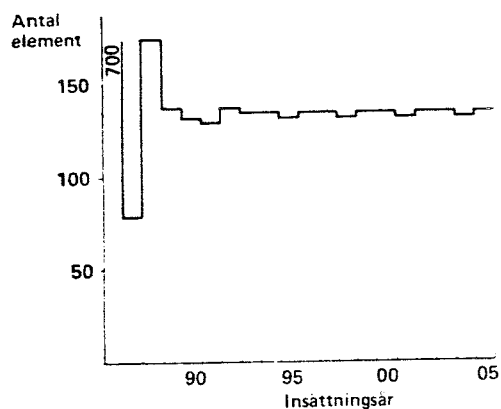
Med den givna bränsledesignen räcker 6,3 ton plutonium till drygt 2 000 bränsleelement, vilka kan framställas under 10-15 år. Den maximala mängden plutonium, som erhålles under ett år är 1 ton, vilket ger 340 bränsleelement.

En serie bränslecykelberäkningar har genomförts med Asea-Atoms bränslecykelprogram IFCA, för att belysa hur bränslecykeln påverkas av plutoniumanvändning. Det tillgängliga plutoniet har i beräkningarna delats lika mellan två reaktorer. Följande fall har studerats:

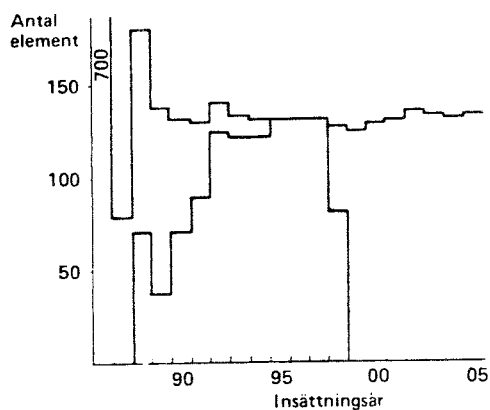
- | | |
|---------------|--|
| Referensfall: | Normal uranbränslecykel. |
| Fall 1: | Uranbränsle i starthärd och första bränslebyte. Därefter MOX-bränsle så långt tillgängligt enligt schema I. Resterande bytesbehov utgörs av uranbränsle. |
| Fall 2: | Som fall 1, men med schema II. |
| Fall 3: | Som fall 1, men med enbart MOX-bränsle från andra bränslebytet. |

Resultaten av beräkningarna visas schematiskt i figur 4-4. Man ser att de förväntade plutoniummängderna, väl ryms inom planerat bytesbehov för två reaktorer. Endast vid två tillfällen, åren 1994 och 95, är den erhållna plutoniumkvantiteten större än vad som kan förbrukas, om plutoniumleveranser enligt schema I antas. Överskottet motsvarar ca 90 bränsleelement.

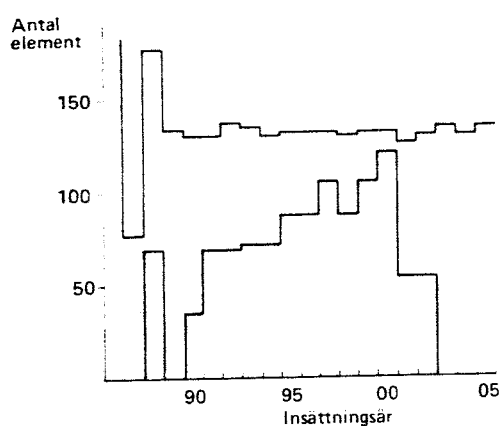
Vid bränsledimensioneringen har den insatta plutoniummängden valts något i överkant. Detta innebär att man vid en optimal bränsledesign kan behöva använda MOX-bränsle i flera reaktorer under några år alternativt lagra bränsle under några år för senare insättning i referensreaktorerna.



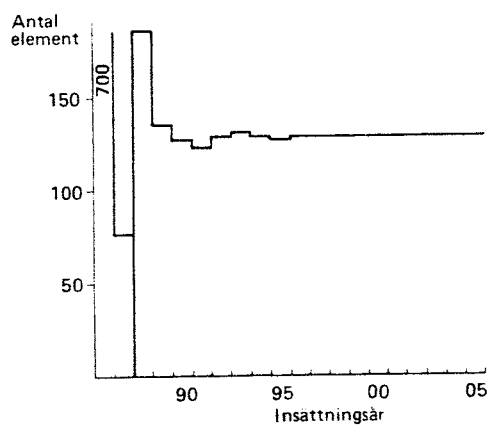
Referensfall: Urancykeln



Fall 1: MOX enligt Schema I



Fall 2: MOX enligt Schema II



Fall 3: MOX-bränslecykeln

□ Uran
□ MOX

Figur 4-4. Resultat från bränslecykelberäkningar med och utan användning av MOX-bränsle. Figurerna visar hur många bränsleelement som sätts in under olika år. De studerade fallen definieras i texten.

Från de genomförda beräkningarna framgår det, att den tillgängliga mängden plutonium räcker till 2 168 MOX-bränsleelement. Dessa ersätter 2 232 uranpatroner. MOX-bränslet har således något högre reaktivitetsvärde.

Genom att använda plutonium i MOX-element, kan man således spara avsevärda mängder natururan och anrikningsarbete. I tabell 4-2 ges en sammanställning av dessa. Besparingen ligger omkring 30% för såväl natururan som anrikningsbehov.

Tabell 4-2. Behov av natururan och anrikningstjänster för uranbränsle och MOX-bränsle. En tail-halt på 0,2 w/o har antagits.

Bränsle	Antal element	Natururan ton	Anrikning ton SWU	Plutonium ton
Uran	2 232	2 232	1 843	
MOX	2 168	<u>1 667</u>	<u>1 249</u>	<u>6,37</u>
Skillnad		626 (27%)	594 (32%)	-6,37

4.5 BRÄNSLETILLVERKNING OCH MONTAGE

MOX-bränslestavarna förutsätts, som nämnts, bli tillverkade utanför Sverige. I den här studerade modellen transporteras de till reaktoranläggningen i speciella transportbehållare och under vederbörligt skydd, såsom beskrivits i avsnitt 3.5. Bränsleelementens övriga delar inklusive uranstavarna skickas också till reaktoranläggningen. Dessa transporter ställer mindre krav på fysiskt skydd.

MOX-stavarna monteras i bränsleelement vid reaktoranläggningen. Detta kan antingen utföras vått i bränslebassäng eller torrt i bränsleförrådet. Monteringen av MOX-bränslet, som sattes in i Oskarshamnsverket 1974, gjordes i bränsleförrådet. Erfarenheterna från denna begränsade operation var goda. När plutoniumåtercyklning skall genomföras i större skala, kommer kraven på strålskärning att öka. I (1-1) beskrivs i detalj det föreslagna tillvägagångssättet.

4.6 MOX-BRÄNSLETS INVERKAN PÅ REAKTORNS DRIFTEGENSKAPER

Det föreslagna MOX-bränslet har utformats så, att dess egenskaper avviker så litet som möjligt från motsvarande uranbränsle. Inverkan av de avvikelser, som man ändå får, har analyserats i (1-1), applicerat på Forsmark 3. Absolutnivån för de studerade effekterna kommer att bli beroende av bränslets detaljutformning. Inte minst har placeringen av brännbara absorbatörer stor betydelse. De erhållna resultaten skall därför tas som indikationer på inverkan av MOX-bränsle.

I analysen har man antagit att man uppnått ett tillstånd där alla bränsleelementen i härden utgörs av MOX-bränsle. Detta tillstånd uppnås aldrig helt med den förväntade plutoniumtillgången. Dessa härdar avviker därför mindre från uranhärden än den analyserade.

Såsom beskrevs i avsnitt 3.3, är det främst verkan av absorbatörer, t ex styrvstavsverkan, och reaktorns dynamiska egenskaper, dvs dess svar på störningar som påverkas av att MOX-bränsle används.

För det analyserade exemplet gäller:

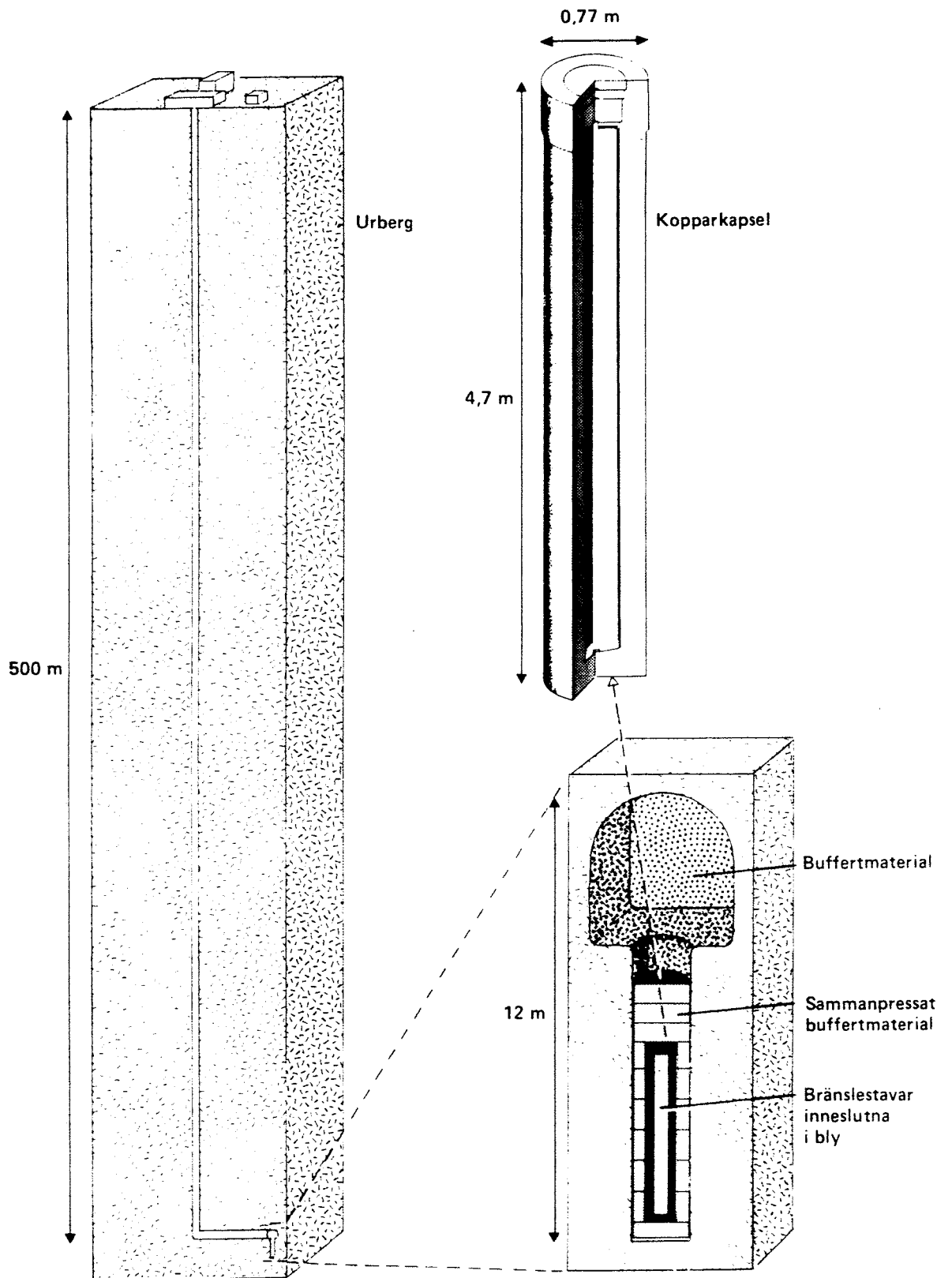
- styrvstavsverkan, minskar ca 3%. Då reaktivitetsnivån för lågutbränt MOX-bränsle vid drift är lägre än för motsvarande uranbränsle innebär detta emellertid ingen minskning av avstängningsmarginalen.
- Den dynamiska voidkoefficienten är mera negativ för en MOX-härd. Detta innebär att reaktorns dynamiska stabilitet minskar. Den dynamiska voidkoefficienten är dock mindre negativ än den som normalt använts i stabilitetsanalyser för säkerhetsredovisningen. Reaktorn är således med god marginal stabil även med MOX-bränsle.
- Transienterna på grund av störningar ökar något med MOX-bränsle. Detta innebär att marginalerna till snabbstopp minskar. Det bedöms dock inte påverka reaktorns tillgänglighet vid driftstörningar nämnvärt.
- De osannolika missöden som studerats tyder på att skillnaden mellan MOX-bränsle och uranbränsle inte inverkar på ett signifikativt sätt på reaktorns säkerhet.

4.7 SLUTHANTERING AV ANVÄNT BRÄNSLE (1-2)

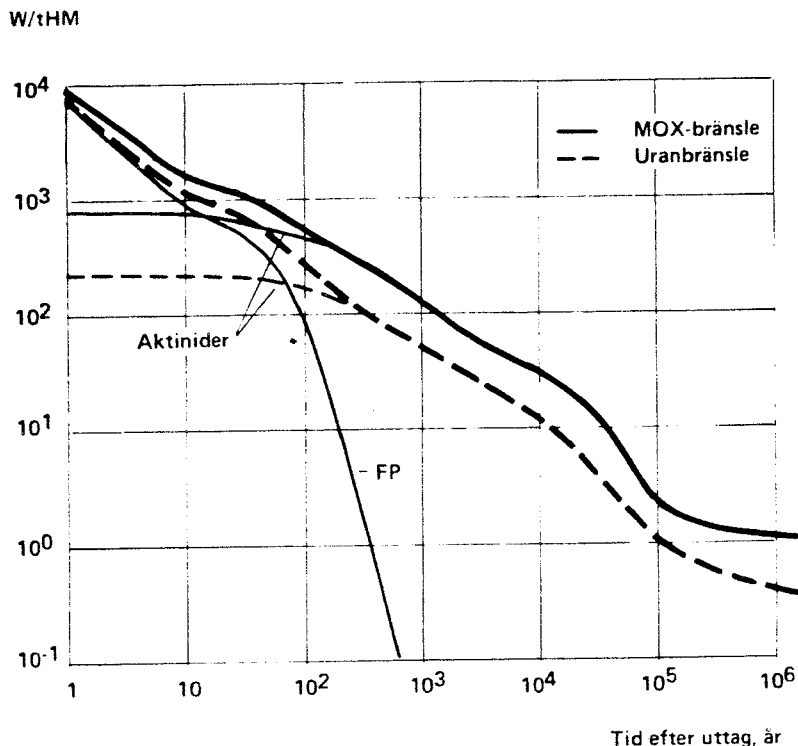
Det använda MOX-bränslet skall när det uppnått sin slututbränning, transporteras till CLAB för 40 års mellanlagring, varefter det skall tas om hand för slutlig deponering, t ex på det sätt som beskrivits i KBS 2. Transporten till CLAB sker i en av SKBFs transportbehållare, TN 17 Mk2. På grund av det högre neutronflödet i MOX-bränslet än i uranbränsle, måste det svalna i ett år, innan det kan transporteras. För övrigt innebär transport och mellanlagring av använt MOX-bränsle ingen skillnad gentemot uranbränsle.

Slutförvaringen av använt bränsle enligt KBS 2 innebär i korthet att:

- bränslet innesluts i en 20 cm tjock kopparkapsel, som invändigt fylls med bly,
- kopparkapseln deponeras i kristallint berg på ca 500 m djup. Varje kapsel är placerad i ett eget deponeringshål och omgiven av högkompakterad bentonit, se figur 4-5,



Figur 4-5. Schematisk bild av det föreslagna slutförvaret. Flera barriärer förhindrar och fördröjer spridningen av radioaktiva ämnen från avfallet.



Figur 4-6. Resteffekt i använt MOX-bränsle och använt uranbränsle. MOX-bränslet är av plutonium- δ -typ. Utbränning 33 MWd/kgHM.

- för att temperaturen i bentoniten ej skall bli för hög ($<100^{\circ}$ C) får totala resteffekten av bränslet i kapseln ej överstiga 0,8 kW.

Den sista punkten har betydelse för det använda MOX-bränslet, då detta efter 40 års mellanlagring har ca 1,6 gånger högre resteffekt än motsvarande uranbränsle, se figur 4-6. Den mängd BWR-bränsle, som kan placeras i en kapsel, minskar därmed från 1,4 ton till 0,8 ton. Detta innebär att totala antalet kopparkapslar med de här angivna mängderna återfört plutonium ökar med knappt 200 stycken.

Totalt kommer MOX-bränslet att utgöra några få procent av allt det använda bränsle som kommer från det svenska kärnkraftsprogrammet. I (1-2) visas, att den långsiktiga säkerheten för slutförvaret inte påverkas nämnvärt av att MOX-bränslet placeras där. Individdosen i det pessimistiska spridningsfallet till en brunn, som beskrivits i KBS 2 ökar med ca 3%.

4.8

TILLSTÄNDSFRÅGOR

I koncessionen för de svenska kärnkraftverken ges tillstånd för reaktorinnehavaren att för aggregatets drift förvärva, inneha och i övrigt ta befattning med erforderlig mängd uran. Denna för-

mulering synes utesluta användning av MOX-bränsle. En ändring av koncessionen torde därför erfordras. I samband med ansökan om ändring av koncessionen, förutses reaktorinnehavaren beskriva de mått och steg han avser vidtaga för att MOX-bränslet därvid kan hanteras på ett säkert sätt, både med hänsyn till radiologisk säkerhet och fysiskt skydd.

För övrigt åligger det reaktorinnehavaren att demonstrera att det föreslagna MOX-bränslet uppfyller de krav, som normalt ställs på kärnbränsle.

5 RADIOLOGISK PÅVERKAN AV PLUTONIUMANVÄNDNING

Två av de tidigare nämnda studierna av plutonumanvändning, GESMO (1-4) och CEC-studien (1-5), har speciellt ägnats åt den radiologiska påverkan.

I GESMO, som analyserade en omfattande plutoniumåtercykling i lättvattenreaktorer, dras följande slutsatser:

- Säkerheten för reaktorer och bränslecykelanläggningar påverkas inte på något signifikativt sätt av återcykling av klyvbart material.
- De funna skillnaderna i hälsoeffekter, som kan hänföras till återcykling ger ingen signifikant bas för att välja en viss bränslecykel.
- Inga problem beträffande avfallshantering har identifierats, som förhindrar återcykling av uran och plutonium.

I CEC-studien, som publicerades 1982, har konsekvenserna av en begränsad återcykling av plutonium i lättvattenreaktorer i EG-länderna under 1990-talet analyserats. Totalt förutsätts 10 ton plutonium per år bli använt. Mängden MOX-bränsle, som därvid erhålles, motsvarar 10% av det totala bränslebehovet för alla lättvattenreaktorer i EG-länderna, som är i drift vid den aktuella tidpunkten. Slutsatserna av CEC-studien är även tillämpliga för det svenska systemet, som beskrivits i föregående kapitel. Följande övergripande slutsatser dras:

- Den totala radiologiska påverkan på befolkningen inom EG påverkas inte - möjligen minskas den något - genom att plutonium återcyklas i lättvattenreaktorer istället för att motsvarande mängd uran utnyttjas.
- Individdosen till anställda ökar endast marginellt - storleksordningen 10% - på grund av plutoniumåtercykling. Kollektivdosintäckningen för hela arbetsstyrkan, som berörs av plu-

toniumåtercyklingen, är mindre än 10 manSv vid en återcykling av 10 ton klyvbart plutonium.

- I alla fall är stråldoserna till allmänheten och anställda lägre än de maximalt tillåtna.

De viktigaste skillnaderna ur radiologisk synpunkt mellan användning av MOX-bränsle och uranbränsle finner man vid bränsletillverkningen och transportererna samt vid upparbetning av MOX-bränsle. Det senare blir dock ej aktuellt i den i kapitel 4 redovisade modellen.

Tillverkning av uranbränsle ger praktiskt taget ingen radiologisk påverkan. Vid tillverkningen av MOX-bränsle finns, som beskrivits i avsnitt 3.2, risk för dosbelastning av personalen, dels på grund av plutoniets radiotoxicitet, dels på grund av föroreningar i plutoniet. Genom att allt material hanteras inneslutet i handskboxar eller liknande, kan den resulterande dosbelastningen hållas låg. Erfarenhetsmässigt har personaldoserna legat mellan 3 och 15 mSv/år hos Belgonucléaire.

Vid transport av färskt respektive använt MOX-bränsle erhålles en något förhöjd dosnivå jämfört med motsvarande uranbränsle på grund av den ökade neutronstrålningen. Transportemballagen är dock utformade så att de enligt IAEA:s transportrekommendationer (3-8) tillåtliga dosnivåerna ej överskrides. Ökningen i radiologisk påverkan på grund av transporter blir därigenom liten.

Dessa öknings av dosbelastningen kompenseras i viss utsträckning av att dosbelastningen från reaktordrift, uranbrytning och lagring av plutonium minskar. Totalt sett bedöms plutoniumåterföring i lättvattenreaktorer således ge en obetydlig förhöjning av den radiologiska påverkan från kärnbränslecykeln.

6 EKONOMI

Såsom framgått av den tidigare beskrivningen, befinner sig användningen av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer alltså i ett tidigt utvecklingsstadium. Det är därför svårt att göra en strikt ekonomisk bedömning av värdet av att återcykla plutonium på detta sätt. I det följande diskuteras därför främst kvalitativt, vilken inverkan plutoniumåterföring får på olika kostnader i bränslecykeln. Som ett exempel redovisas också en beräkning av värdet av de olika delposterna.

MOX-bränslet ersätter en viss mängd uranbränsle. Därigenom minskas behovet av natururan och anrikningsarbete. I avsnitt 4.4 visas att 6,4 ton plutonium kan ersätta 626 ton natururan och 594 000 SWU anrikningsarbete.

På minussidan för användning av MOX-bränsle finns ökade kostnader för bränsletillverkning och transporter av plutoniumoxid och MOX-stavar. Likaså ökar kostnaden för sluthantering av bränslet. Däremot bedöms kostnaderna för reaktordriften inte påverkas nämnvärt.

Kostnaden för bränsletillverkning kan idag inte uppskattas med någon större precision. De anläggningar som finns för tillverkning av MOX-bränsle, är i halvindustriell skala. Enligt Belgo-nucléaire (6-1) uppskattas kostnaden för tillverkning av MOX-bränsle vara 4-5 gånger högre än för motsvarande uranbränsle. Denna skillnad bedöms minska i framtiden.

Beräkningsexempel

I det följande ges ett exempel på kostnader för återcyklning av plutonium i svenska reaktorer enligt den strategi som beskrevs i kapitel 4. Följande specifika kostnader har använts:

Natururan	350 kr/kg
Konvertering + transport	50 kr/kg
Anrikning	700 kr/kg
Tillverkning:	
uranbränsle	800 kr/kg
MOX-bränsle	3 600 kr/kg
Transporter:	
MOX-bränsle	200 000 kr/behållare och transport

Kostnaden för natururan motsvarar dagens spotmarknadspris. För långsiktiga kontrakt är kostnaden snarare 500 kr/kg. Kostnaden för tillverkning av uranbränsle och MOX-bränsle är hämtad från (6-1), där tillverkning av ett PWR-element uppges kosta 60 000 dollar resp 280 000 dollar för uran- resp MOX-bränsle. Transportkostnaden är en grov uppskattning, baserad på en jämförelse med transport av använt bränsle.

För sluthantering av använt bränsle erhålles en kostnadsökning, då enligt avsnitt 4.7 ca 200 kopparkapslar extra behövs. Inkapsling och deponering av dessa beräknas kosta 100 MSEK (6-2).

I tabell 6-1 redovisas resultatet av beräkningarna. Man finner att återcykling av plutoniet från upparbetning med valda kostnadsparametrar ger en vinst på ca 220 MSEK. Detta motsvarar ett plutoniumvärde på 35 kr/g Pu.

I tabell 6-1 har även värdet av det upparbetade uranet beräknats. Därvid har detta antagits motsvara natururan anrikningsmässigt. Någon extra kostnad för att uranet är förorenat har inte pålagts.

Det bör observeras att kostnaden för upparbetning av det bränsle plutoniet och uranet härrör ifrån inte har tagits med i beräkningarna. De förutsätter således att beslut och avtal om upparbetning av den aktuella mängden bränsle föreligger, och därför inte berörs av utfallet av denna utvärdering. Likaså behandlas inte kostnaderna för en alternativ hantering av plutoniet, t ex lagring för senare användning i bldreaktorer.

Tabell 6-1. Beräkning av värdet av plutonium och uran från upparbetning vid återanvändning i lättvattenreaktorer.

Kostnadsslag	Kvantitet	Enhetspris	Total kostnad
<u>Plusposter</u>			
Natururan	: 626 ton	350 SEK/kg	220 MSEK
Konvertering	626 ton	50 SEK/kg	30 MSEK
Anrikning	594 000 SWU	700 SEK/SWU	<u>420 MSEK</u>
Totalt +			670 MSEK
<u>Minusposter</u>			
MOX-tillverkning	110 ton	2 800 SEK/kg*	310 MSEK
Transporter	210 beh	200 000 SEK/beh	40 MSEK
Slutförvaring			<u>100 MSEK</u>
Totalt -			450 MSEK
Totalt plutoniumvärde			220 MSEK
Totalt uranvärde			280 MSEK

* Differenskostnad för tillverkning av MOX-bränsle i stället för uranbränsle.

7 SAFEGUARDS OCH FYSISKT SKYDD

7.1 SAFEGUARDS, ALLMÄNT

De kontrollåtgärder som vidtas för att övervaka att klyvbart material endast används för fredligt bruk, i enlighet med vad som avses i icke-spridningsavtalet, NPT-avtalet, sammanförs under begreppet safeguards. Syftet med safeguards är enligt IAEAs INFCIRC/153/(7-1):

"the timely detection of diversion of significant quantities of nuclear material from peaceful nuclear activities to the manufacture of nuclear weapons or other nuclear devices or for purposes unknown, and deterrence of such diversion by the risk of early detection."

Införandet av safeguards kan således inte förhindra att nukleärt material överförs till kärnvapen, men det skall bidra till att man i tid upptäcker om så sker och därigenom avskräcka från att det görs.

Kontrollfunktionen utövas av IAEA, och gäller alla länder som undertecknat icke-spridningsavtalet och därigenom förbundit sig att även teckna ett kontrollavtal med IAEA. Bland de länder, som blir berörda i samband med en svensk plutoniumåterföring är det endast Frankrike som inte undertecknat icke-spridningsavtalet. Frankrike har dock börjat tillåta IAEA-inspektioner av vissa anläggningar för fredligt bruk av nukleärt material. Sålunda kommer upparbetningen vid UP3-A-anläggningen i La Hague att ske under IAEA-kontroll, genom avtal med Euratom.

Safeguardsarbetet sker i nära samarbete mellan IAEA och de nationella säkerhetsmyndigheterna. I Sverige är det SKI, som ansvarar för den svenska kontrollen. Inom EG-länderna sker kontrollen genom Euratom.

Safeguardssystemet är baserat på verifiering av bokföringen av nukleärt material och på inneslutning av materialet och övervakning. Verifiering av bokföringen sker bland annat genom regelbundet återkommande fysiska inventeringar av IAEA-inspektörer vid de anläggningar, där nukleärt material hanteras eller förvaras, t ex upparbetningsanläggningar, bränslefabriker och kärnkraftverk. Inspektionsfrekvensen bestäms normalt av hur snabbt man skulle kunna framställa kärnvapen ur det aktuella materialet. Frekvensen blir därför högre, när man hanterar plutonium än när man hanterar låganrikat uran.

Övervakningen av materialet mellan inspektionerna sker normalt genom att kameror är monterade i de utrymmen, där nukleärt material förvaras. Tillträdet till dessa utrymmen är därtill begränsat, så att endast speciellt utvalda personer får komma in där.

7.2 SAFEGUARDS I SAMBAND MED PLUTONIUMÅTERFÖRING

Kontrollen av nukleärt material sker i alla steg av bränslecykeln. Av speciell betydelse är naturligtvis de steg i vilka materialet omvandlas eller på annat sätt hanteras i fri form. Vid en plutoniumåterföring sker detta i första hand vid plutoniumframställningen i upparbetningsanläggningen, och vid MOX-bränsletillverkningen, samt vid transporter däremellan. På kärnkraftverken hanteras endast materialet inkapslat i bränslestavar.

Omfattningen av kontrollåtgärderna vid de upparbetningsanläggningar, där svenskt bränsle skall behandlas, är ännu ej helt fastlagda. Enligt kontrakten skall det ske under IAEOs eller Euratoms kontroll. Detaljerad information om omfattningen vid La Hague kommer att ges vid samråd mellan franska och svenska myndigheter, SKI.

I (1-1) ges en beskrivning av kontrollverksamheten vid en MOX-bränslefabrik (Belgonucléaire). Av säkerhets- och redovisnings-skäl är anläggningen indelad i ett stort antal materialbalansområden, för vilka materialredovisningen sker separat. Två slags fysiska inventeringar genomförs av IAEA och Euratom. Dels genomförs kontroller var fjortonde dag, som syftar till att kontrollera mängden klyvbart material intill en mängd på 8 kg, inklusive sådant som av praktiska skäl inte kan inspekteras t ex på grund av att det är inne i processen. Två gånger per år genomförs omfattande fysiska inventeringar, varvid allt klyvbart material i anläggningen kontrolleras.

På kärnkraftverken sker IAEA-inspektioner nu vanligen 3-4 gånger per år. Om MOX-bränsle används torde inspektionsfrekvensen öka något, när färskt MOX-bränsle finns lagrat på stationen. När bränslet laddats i reaktorn bedöms dock inga extra inspektioner bli nödvändiga.

Det använda MOX-bränslet skiljer sig inte på något ur safe-guardssynpunkt avgörande sätt från använt uranbränsle. Safeguardsrutinerna för hantering och förvaring av använt bränsle bör därför inte påverkas av en plutoniumåterföring.

Av den givna beskrivningen framgår det att etablerade rutiner finns för kontroll av att svenskt plutonium inte överförs till kärnvapen under vägen från upparbetning till användning som MOX-bränsle i svenska kärnkraftverk. Det var också en av slutsatserna av INFCE-studien (1-3) att plutoniumåterföring i lättvattenreaktorer inte ökar risken för spridning av kärnvapen.

7.3 FYSISKT SKYDD

Fysiskt skydd är ett sammanfattande begrepp för de åtgärder, som vidtas för att förhindra stöld av nukleärt material eller sabotage. IAEA har givit ut rekommendationer om principerna för fysiskt skydd (7-2). Grundprinciperna i dessa har accepterats av de flesta länder. Med hänsyn till olika länders skilda syn på polisiära säkerhetsfrågor finns det dock stora skiljaktigheter i tillämpningen av det fysiska skyddet. Detaljerna i de nationella föreskrifterna är dessutom hemliga. Skiljaktigheterna har lett till praktiska problem vid gränspassager. Försök pågår att få till stånd en internationell överenskommelse om det fysiska skyddet. En konvention, som innehåller de minimikrav som bör uppfyllas, har öppnats för undertecknande, men ännu inte ratificerats. Likaså pågår arbete inom EG att få fram gemensamma riktlinjer.

I Norden finns gemensamma föreskrifter för fysiskt skydd vid transporter, som färdigställdes 1982 (7-3). Dessa bygger på IAEAs rekommendationer men skärper vissa gränser vid kategoriindelningen av det nukleära materialet och kräver skydd även för naturligt och utarmat uran. För plutonium följer de dock IAEAs rekommendationer.

Vid transporter av mer än 2 kg plutonium, vilket kommer att vara normalt, krävs att transporten sker i pansrat fordon med helt täckt last. Kraven på bepansring innebär att besättningen och lasten skall vara skyddad mot beskjutning med handeldvapen. Lastutrymmet skall ha sådana låsanordningar att hög skyddsnivå upprätthålls. Fordonet skall dessutom vid behov kunna göras obrukbart. Det skall vara utrustat med kommunikationssystem och överfallslarm. Poliseskort krävs inte i bestämmelserna, men i Sverige är detta praxis.

8 INTERNATIONELLA REGLERINGAR

8.1 INTERNATIONELLA AVTAL

Den övervägande delen av internationell handel med klyvbart material, såsom uran och plutonium, regleras av villkor inskrivna i internationella och bilaterala avtal. Dessa avtal har genomgående som syfte att garantera att materialet hanteras och används under betryggande safeguardkontroll och fysiskt skydd. De skall således förhindra att materialet används till kärnvapen.

Det övergripande internationella avtalet är icke-spridningsavtalet (NPT-avtalet) från 1968. Med anledning av detta avtal har flertalet anslutna stater kontrollavtal om safeguards med IAEA. Sverige undertecknade 1975 ett sådant kontrollavtal, vilket innebär att allt nukleärt material i Sverige står under IAEOs kontroll.

För fysiskt skydd finns det en internationell konvention, som öppnades för undertecknande 1980 och hittills undertecknats av ett 30-tal länder. Denna har dock inte trätt i kraft ännu, eftersom den endast ratificerats av ett fåtal länder, däribland Sverige.

8.2 BILATERALAVTAL

De internationella avtalen kompletteras med bilaterala avtal och regeringsöverenskommelser mellan Sverige och ett antal länder, med vilka vi har handelsförbindelser för nukleärt material. De viktigaste av dessa länder, i samband med användningen av plutonium som MOX-bränsle i svenska reaktorer, är USA, Kanada, Australien, Storbritannien och Frankrike. De tre första är länder, som levererat eller anrikat det uran, som plutonet här- rör ifrån och de två senare är de länder, i vilka upparbetning sker. Bilateralavtalen innehåller ömsesidiga överenskommelser om att nukleärt material och viss i avtalen specificerad utrust-

ning till kärnkraftverk, som levererats av den ena parten, skall hanteras på ett kontrollerat sätt av motparten och ej transfereras utanför dennes kontroll utan godkännande av den levererande parten.

De bilaterala avtalen innebär i praktiken att de flesta länder, som på något sätt varit inblandade i framställningen eller behandlingen av det uran eller de bränsleelement, som en viss plutoniummängd härrör ifrån, också i princip skall ge sitt godkännande av att det används som MOX-bränsle i svenska reaktorer. Detta innebär utöver en tung byråkrati också en möjlighet för ett land att av t ex politiska skäl försvåra eller förhindra en rationell användning av plutonium i Sverige. I samband med diskussionerna om de bilaterala avtalen har Sverige dock eftersträvat ett system med så lite restriktioner som möjligt i dessa sammanhang; t ex genom att få ett generellt godkännande av upp- arbetning.

För närvarande gäller följande vad beträffar kontakterna med de länder som blir berörda av ett svenskt beslut om återanvändning av plutonium.

USA

Enligt gällande bilateralavtal från 1966 krävs amerikanskt tillstånd för utförsel och upp- arbetning av bränsle som faller under avtalet. I praktiken berörs därmed allt svenskt bränsle som kommer att upp- arbetas i Windscale och La Hague. Den amerikanska tillståndsgivningen sker f n på en "case by case"-basis.

Även återföring till Sverige av separerat plutonium och dess användning här kräver särskilt tillstånd. Denna fråga har hittills aldrig prövats.

Förhandlingar om ett nytt bilateralt avtal pågår sedan någon tid. De förväntas dock inte ändra på kravet på särskilt tillstånd för återföring och användning av plutonium.

Australien

Ett bilateralavtal undertecknades 1981, som innebär att upp- arbetning samt lagring och användning av det plutonium, som kommer fram vid upp- arbetningen, får ske inom ramen för den i avtalet beskrivna bränslecykeln för det svenska kärnkraftprogrammet. Då denna inte innehåller några detaljer kring en MOX-bränslecykel krävs kompletteringar till avtalet. Dessa bedöms inte innebära ett hinder mot plutoniumanvändning under förutsättning att denna sker under betryggande former för fysiskt skydd och safeguard.

Canada

Gällande bilateralavtal från 1977 kräver kanadensiskt tillstånd för upparbetning av bränsle som faller under avtalet, liksom för ev återanvändning av separerat plutonium. I en tillämpningsöverenskommelse från 1981 gavs generellt tillstånd till sådan upparbetning som faller inom ramen för det fastställda svenska kärnkraftprogrammet. Frågan om plutoniumanvändning har hittills inte berörts, varför användning av MOX-bränsle i svenska reaktorer skulle kräva ytterligare förhandlingar om kompletteringar av samma typ som för Australien.

Frankrike

I samband med att avtalen om upparbetning i La Hague godkändes utväxlade franska och svenska regeringarna brev, i vilka man överenskom att villkoren för innehav, lagring, transport och användning av plutonium vid dettas återskeppning från Frankrike skall bli föremål för en särskild överenskommelse de båda regeringarna emellan. Överläggningar om detta har ännu ej påbörjats.

Storbritannien

Förhandlingar om ett nytt avtal på området pågår. Ett tidigare avtal från 1957 har löpt ut.

I samband med tillverkning av MOX-bränsle i t ex Västtyskland eller Belgien kommer motsvarande avtal att behöva träffas med Euratom, som är sammanhållande organ inom EG för bl a frågor kring safeguards.

Sammanfattningsvis kan man således konstatera att - innan det är möjligt att återföra plutonium för användning i MOX-bränsle i svenska reaktorer - krävs att överläggningar hålles med de nämnda länderna. Materialet i denna rapport bör därvid kunna utgöra ett underlag.

8.3

INTERNATIONAL PLUTONIUM STORAGE (IPS)

En av rekommendationerna från INFCE-arbetet var att IAEA skulle utreda formerna för ett internationellt system för plutoniumlagring i ett International Plutonium Storage (IPS). Avsikten med ett sådant system är främst att skapa bättre kontroll över överskottsplutonium, som inte direkt återanvänds, och att förhindra en lagerupbyggnad i ett enskilt land.

Arbetet med att ta fram alla de regler som erfordras för ett IPS-system pågår. Detta omfattar frågeställningar som, vilket

plutonium i medlemsländerna skall registreras; när inträder lagringsplikt; under vilka förutsättningar skall plutonium lämnas ut från ett lager, etc. De slutliga konsekvenserna kan därför ännu ej överblickas. En bedömning är dock att ett införande av IPS inte skall förhindra att plutoniet återanvänds i lättvattenreaktorer, på det sätt som beskrivits i denna rapport.

9 SLUTSATSER

I denna rapport beskrivs först förutsättningarna för och erfarenheterna från plutoniumanvändning i lättvattenreaktorer. Därefter redogörs för hur det plutonium, som erhålles från upparbetning enligt nu gällande kontrakt, kan användas i två svenska reaktorer. Alla steg i kärnbränslecykeln behandlas.

Följande slutsatser kan dras:

- För användning av plutoniumberikat MOX-bränsle i lättvattenreaktorer föreligger en etablerad teknik. Alltsedan slutet av 1960-talet har mer än 18 000 MOX-bränslestavar testats i olika reaktorer. Bränslet har därvid visat sig ha egenskaper, som i allt väsentligt är likvärdiga med motsvarande uranbränsle.
- Användning av plutoniumberikat bränsle i lättvattenreaktorer innebär inte något principiellt nytt ur reaktor fysikalisk synpunkt. Vid drift med uranbränsle bildas plutonium, som bidrar till energigenereringen. När uranbränslet är slututbränt, har ca 30% av energin alstrats genom klyvning av plutoniumisotoper.
- MOX-bränslet kan dimensioneras så, att det får en acceptabelt liten påverkan på drifttegenskaperna hos en reaktor, som utformats för uranbränsle. För att uppnå detta, får maximalt 30-50% av stavarna i reaktorhärden utgöras av MOX-bränsle.
- Tillverkning av MOX-bränsle sker idag i halvindustriell skala på flera håll i Europa. Om återcykling av plutonium i lättvattenreaktorer skall ske i större omfattning, krävs det en utbyggnad av kapaciteten. En sådan planeras och några tekniska hinder för att fylla behovet av tillverkningskapacitet torde inte föreligga.

- Ett stort antal transporter av plutoniumoxid och färskt MOX-bränsle har genomförts i Europa. Rutiner för transporternas genomförande och för det fysiska skyddet i samband därmed finns utarbetade.
- Det använda MOX-bränslet innehåller en större mängd tunga nuklider än använt uranbränsle. Detta påverkar endast marginellt de åtgärder som krävs för en säker hantering och slutförvaring av det använda bränslet.
- Återanvändning av plutonium i lättvattenreaktorer innebär ingen ökning av den radiologiska påverkan på allmänheten från kärnbränslecykeln. För kärnteknisk personal ökar kollektivdosintekningen något, främst i tillverkningsledet.
- Vid plutoniumåtercyklning förekommer plutonium i ren form vid vissa transporter och under bränsletillverkningen. Stora krav på fysiskt skydd för att förhindra obehörig åtkomst av plutonium ställs därför där. Existerande rutiner för det fysiska skyddet bedöms vara tillfredsställande. Detsamma gäller safeguardskontrollen.
- De svenska kontrakten för upparbetning av använt kärnbränsle kommer att ge upphov till 6,3 ton plutonium, vilket kommer att erhållas under en period av 10-15 år.
- Detta plutonium kan återinföras i MOX-bränsle i svenska lättvattenreaktorer. Det bedöms vara fördelaktigt att koncentrera MOX-bränslet till några få reaktorer. I den skisserade modellen används två reaktorer.
- I det genomräknade exemplet ersätter 6,3 ton plutonium anrikt uran motsvarande ca 600 ton natururan och 600 000 SWU anrikningsarbete.
- En försiktig ekonomisk bedömning visar att minskningen i behovet av natururan och anrikningsarbete väl kompenserar de ökade kostnaderna för bränsletillverkning etc för MOX-bränslet.
- Frågan om plutoniumanvändning i lättvattenreaktorer undersöks nu i många länder, med syftet att bedöma möjligheter och ekonomi i det nationella reaktorsystemet.

Sammanfattningsvis kan konstateras att plutoniumåterföring i svenska reaktorer kan genomföras på ett säkerhets- och kostnads- mässigt tillfredsställande sätt.

10 REFERENSER

- 1-1 HJÄRNE L et al
Återföring av plutonium i svenska reaktorer.
KBS AR 82-31, september 1982.
- 1-2 FORSSTRÖM H
Hantering och slutförvaring av använt plutoniumberikat
bränsle (MOX-bränsle).
KBS AR 82-33, september 1982.
- 1-3 International Fuel Cycle Evaluation, vol 1-9, IAEA, Vienna, 1980.
- 1-4 Final Generic Environmental Statement on the Use of Recycle Plutonium in Mixed Oxide Fuel in Light Water Cooled Reactors. NUREG-0002, August 1976.
- 1-5 A Plutonium Recycling Scenario in Light Water Reactors, Assessment of Environmental Impact in the European Community, EUR-7768. A report prepared by the Commission of the European Communities under the R&D programme on Plutonium Recycling in Light Water Reactors, Harwood Academic Publishers, 1982.
- 1-6 Flera EUR-rapporter publicerade i European Applied Research Reports, A Journal of European Science and Technology, Harwood Academic Publishers, 1979-1982.
- 1-7 Använt kärnbränsle och radioaktivt avfall. Betänkande av Aka-utredningen, SOU 1976:30, 31 och 41.
- 2-1 SCHLOSSER G et al
Start- und Weiterführung des Plutoniumensatzes in Leichtwasserreaktoren, Jahrestagung Kerntechnik '81, Düsseldorf, 24-26 März 1981.
- 2-2 Personlig information från japanska kraftföretag.

- 3-1 KBS, Kärnbränslecykelns slutsteg, Slutförvaring av använt kärnbränsle, Stockholm 1978.
- 3-2 KBS, Kärnbränslecykelns slutsteg. Förglasat avfall från upparbetning, Stockholm, 1977.
- 3-3 DIERKES P
Die Mehrfachrecyklierung aus der Sicht der Wiederaufarbeitung, presenterad vid Bundesministerium für Forschung und Technologie Seminarium, Mehrfachrecyklierung von Plutonium und Uran in Thermischen Reaktoren, 14 Oktober 1981.
- 3-4 MÜLLER R
Wiederanreicherung von rezykliertem Uran, samma seminarium.
- 3-5 RAMSEY JR R W et al
Overview of Management Programs for Plutonium-Contaminated Solid Waste in the USA, Seminar on the Management of Plutonium-Contaminated Solid Wastes, Marcoule 1974, OECD-NEA, 62 (1974).
- 3-6 GIBSON I H
Comparative Steady State and Dynamic Studies on a Large PWR Fuelled with Uranium and Plutonium, European Appl Res Rept - Nucl Sci Techn 2, 865-880, 1980.
- 3-7 BONNET H et al
PWR of 900 MWe Loaded with Plutonium, Tihange Type - Steady State Studies and Accident Analysis, European Appl Res Rept - Nucl Sci Technol 3, 485- 602, 1981.
- 3-8 Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, 1973, Revised Edition (as amended), IAEA Safety Series No. 6, IAEA, Vienna, 1979.
- 4-1 FORSSTRÖM H
Plutonium från upparbetning - Mängd, Spektrum, Tidplan. KBS AR 82-32, Mars 1982.
- 6-1 Föredrag av J van Dievoet, Belgonucléaire vid Third European Nuclear Conference, Brussels, April 26-30, 1982. Citerat i Nuclear Fuel May 10, 1982.
- 6-2 SKBF, Kärnkraftens Slutsteg plan 82, del 2. Anläggningar och kostnader, Stockholm, juni 1982.
- 7-1 The structure and contents of Agreements between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapons, IAEA INFCINF/153 (Corrected) 1972.

- 7-2 The Physical Protection of Nuclear Material, IAEA INFCIRC/225 (Corrected) 1976.
- 7-3 Föreskrifter för fysiskt skydd för transporter av klyvbart material i och mellan de nordiska länderna.