

R-06-60

Separation och transmutation

Belysning av tillämpning i Sverige

Bertil Grundfelt, Maria Lindgren
Kemakta Konsult AB

November 2006

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-06-60

Separation och transmutation

Belysning av tillämpning i Sverige

Bertil Grundfelt, Maria Lindgren
Kemakta Konsult AB

November 2006

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se

Sammanfattning

I denna rapport redovisas en genomgång av transmutationstekniken liksom en belysning av konsekvenser av dess användande i Sverige. Transmutation har i den offentliga debatten ofta förts fram som ett sätt att ”oskadliggöra” kärnkraftens högaktiva avfall så att slutförvaringen antingen kan avsevärt förenklas eller till och med helt undvikas. Man kan dock konstatera att man även med utbyggd transmutation får väsentliga mängder radioaktivt avfall som kräver kvalificerad slutförvaring.

Transmutationstekniken möjliggör en minskning av det högaktiva avfallets livslängd genom att framförallt transuranerna omvandlas till klyvningsprodukter med kortare halveringstider. Den långsiktiga radiotoxiciteten i det använda kärnbränslet domineras helt av transuranerna, varför transmutation av dess också medför en kraftig minskning av den långsiktiga radiotoxiciteten.

Forskningen kring transmutation har fokuserats kring underkritiska så kallade ADS-reaktorer (Accelerator Driven System). Systemet bygger på att protoner accelereras upp till mycket höga energinivåer (GeV-skala) i ett elektromagnetiskt fält för att bringas att kollidera med en spaltationskälla bestående av tunga atomer, till exempel bly eller en blandning av bly och vismut. Vid kollisionen splittras de träffade atomkärnorna varvid ett antal neutroner frigörs som kan användas för att klyva atomkärnorna i de ämnen, främst transuraner, som ska transmuteras.

Utvecklingen av ADS-reaktorerna befinner sig i dagsläget på forskningsstadiet. Det är en allmän uppfattning att det kommer att ta flera decennier innan tekniken nått sådan mognad att en demonstrationsanläggning kan uppföras. Beräkningar som inom studien genomförts vid KTH visar att man med ADS-tekniken skulle kunna reducera transuraninnehållet med 50–85 % inom en 50–100 årsperiod, räknad från driftsättandet av ADS-reaktorerna. Målet 99 % transmutation har i beräkningarna uppnåtts endast i teoretiska scenarier vars realism ur teknisk och ekonomisk synvinkel kan ifrågasättas.

För att transmutationen ska fungera tillfredsställande så att det högaktiva avfallets livslängd reduceras väsentligt krävs, att det använda uranbränslet från det svenska kärnkraftsprogrammet upparbetas och att upparbetningen kompletteras med en separation och renframställning av de ämnen som ska transmuteras. För en effektiv transmutation är det viktigt att processförlusterna vid denna separation hålls mycket låga. Man brukar ange att om 99 % av transuranerna ska transmuteras måste processförlusterna i varje cykel understiga 0,1 %.

En annan viktig faktor för att uppnå en hög transmutationsgrad är att man lyckas hålla den erforderliga avklingningstiden, innan det använda ADS-bränslet upparbetas och nytt bränsle tillverkas av de kvarvarande transuranerna, kort. Pyrokemiska separationsprocesser anses allmänt tillåta kortare avklingningstider än våtkemiska. Det är dock i dagsläget osäkert när och om erforderlig separationseffektivitet kan uppnås i sådana processer.

När transuranerna från det högaktiva avfallet har renframställts ska de ingå i bränsle till ADS-reaktorer. Det transuranbaserade ADS-bränslet är betydligt mer radioaktivt än det uranbränsle som tillförs lättvattenreaktorer och måste därför hanteras strålningskärrat och fjärrstyrt. Transporter måste ske i transportbehållare som liknar de som idag används för transport av använt uranbränsle, men som kompletteras med ett förbättrat skydd mot neutronstrålning.

Eftersom upparbetnings- och separationstekniken kräver omfattande och komplicerade kemiska anläggningar förefaller det rimligt att anta att denna tjänst köps från något annat europeiskt land. Sannolikt bör även tillverkningen av ADS-bränsle ske utomlands för undvikande av transporter av renframställda transuraner ”i bulk”. För att Sverige ska kunna nyttiggöra sig energin från ADS-reaktorerna bör dock dessa uppföras och drivas i Sverige.

Enligt IAEA:s avfallskonventionens krävs att vid omhändertagande av radioaktivt avfall ska man sträva efter att inte lägga otillbörliga bördor på kommande generationer. De långa led- och drifttiderna som är förknippade med transmutation medför att ett ansvar överförs på kommande generationer. Det är således tveksamt om transmutation som strategi för slutligt omhändertagande i ett "phase-out" scenario uppfyller avfallskonventionens krav.

Även om separationen och transmutationen kan göras effektiv återstår avfall som måste tas om hand och slutförvaras. Transmutation är således i sig inte ett alternativ till slutförvaring. Transmutation förutsätter fortsatt kärnenergiproduktion i tidsskalan 100 år eller mer och det framstår möjligen som ett realistiskt alternativ i ett långsiktigt perspektiv där man bygger en väsentlig del av energiförsörjningen på nya typer av kärnreaktorer som ersätter nuvarande reaktorer. Härav följer att det krävs långsiktiga satsningar på kärnteknik och transmutation, vilket ställer krav på långsiktiga politiska beslut.

Summary

This report contains a review of the transmutation technology and an elucidation of the consequences of the use of transmutation in Sweden. Transmutation has often been mentioned in the public debate as a way of rendering harmless the high-level waste from nuclear power such that the final disposal of the waste can be substantially simplified or even completely avoided. However, it can be noted that even with an exploitation of transmutation, significant amounts of radioactive waste requiring qualified final disposal will be generated.

The transmutation technology will make it possible to reduce the longevity of the high-level waste by converting primarily the transuranic elements to fission products with shorter half-lives. The long-term radiotoxicity of the spent nuclear fuel is dominated by the transuranics. Hence, transmutation will lead to a substantial decrease of the long-term radiotoxicity of the spent fuel.

The research on transmutation has been focussed on sub-critical so called ADS-reactors (Accelerator Driven System). In such a system protons are accelerated to very high energy levels (in the order of GeV) in an electromagnetic field. The accelerated protons are impacted on a spallation source consisting of heavy atoms, e.g. lead or a mixture of lead and bismuth. At the impact the heavy nuclei are spalled releasing a number of neutrons that can be used for fissioning the nuclei of the substances to be transmuted, primarily the transuranics.

ADS-reactors are still at the research stage. It is a common view that it will take several decades before the technology has reached a maturity that allows the construction of a demonstration facility. Calculations performed at Royal Institute of Technology in Stockholm, KTH, show that using the ADS-technology would allow a reduction of the inventory of transuranics in the spent fuel from Swedish reactors by 50–85% within a 50–100 years period. The goal to transmute 99% of the transuranics inventory has been achieved in the calculations only in theoretical scenarios, the realism of which from a technical and economical point of view can be questioned.

In order for the transmutation to perform properly such that longevity of the high-level waste is substantially reduced, it is required that the spent uranium fuel from the Swedish nuclear power programme is reprocessed and that the reprocessing is complemented by separation and purification of the substances that are to be transmuted. For an efficient transmutation, it is important that the losses in this separation are kept very small. In order to transmute 99% of the transuranics, the process losses must be kept below 0.1%.

Another important factor for achieving a high degree of transmutation is keeping the decay and cooling time short before reprocessing the spent ADS-fuel and producing new fuel for ADS-reactors. Pyrochemical separation processes are normally considered to require shorter decay times than wet extraction processes. However, it is at the present time uncertain when and if the required separation efficiency can be achieved in such processes.

When the transuranics have been separated and transformed into a pure form they shall be included into new fuel for ADS-reactors. This fuel is much more radioactive than the uranium fuel used to feed conventional light-water reactors. Hence, it must be handled by remote handling behind radiation shielding. Transport of the fuel has to take place using transportation casks similar to those used for spent uranium fuel complemented with an improved shielding against neutron radiation.

Because the reprocessing and separation technology requires large and complicated chemical plants it seems reasonable that this service is bought from some other European country. It is likely that also the fabrication of ADS-fuel should take place abroad so that bulk transportation of pure transuranics is avoided. The ADS-reactors should, however, be located in Sweden, in order for the electricity to be utilised by the Swedish market.

According to the IAEA joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management it is required that the waste management should be performed such that undue burdens are not laid on future generations. The long time periods for implementing and performing transmutation imply a transfer of responsibility to future generations. Therefore, it can be questioned if transmutation as a strategy for the final management of the radioactive waste in a “phase-out” scenario fulfills the requirements of the convention.

Even if the separation and transmutation could be performed efficiently, waste that needs handling and final disposal will remain. Thus, transmutation is not an alternative to final disposal. Transmutation will require a continued production of nuclear power for in the order of 100 years or more. It could be a realistic alternative in a long-term perspective in which a significant fraction of the energy supply is based on new types of reactors replacing the current generation. Hence, long-term commitments to nuclear power requiring long-term political decisions are required.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Problemställning	9
1.2	IAEA:s avfallskonvention och kärntekniklagen	9
1.3	Forskning	10
1.4	Ledtid	10
2	Allmänt om separation och transmutation	11
2.1	Transmutation enligt ”phase out”- eller jämviktsprincip	11
2.2	Alternativa sätt att genomföra transmutation	11
2.3	Erforderliga anläggningar	13
2.3.1	Upparbetningsanläggning och separation	13
2.3.2	Bränsletillverkning	14
2.3.3	Transporter	15
2.3.4	Mellanlager för kylning	15
2.3.5	Transmutation i ADS	16
3	Transmutation i ett svenskt perspektiv	19
3.1	Förbränning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer	22
3.2	Förbränning med enbart ADS	24
3.3	Kombinerad förbränning av MOX och ADS-bränsle	25
4	Avfallsmängder	27
5	Kostnader	31
6	Diskussion	33
7	Referenser	35

1 Inledning

1.1 Problemställning

Ordet transmutation kommer från de gamla alkemisternas terminologi och betyder omvandling. I deras fall var syftet att transmutera oädla material till ädla ämnen såsom guld. I samband med hantering av kärnkraftsavfall har transmutation kommit att beteckna processer i vilka långlivade radioaktiva ämnen kan omvandlas till mer kortlivade eller stabila genom att de beskjs med ett stort flöde av neutroner. Tekniken befinner sig fortfarande på forskningsstadiet och det är inte förrän om flera decennier som den tidigast skulle kunna användas i full skala.

Principen för separation och transmutation är att långlivade radionuklider, främst aktinider med högre atomnummer än uran, så kallade transuraner (TRU), separeras från resten av det använda bränslet och återförs till reaktorer för att där klyvas ("brännas") till grundämnen med lägre atomnummer och kortare halveringstid. På grund av transuranernas kärnfysikaliska egenskaper måste klyvningen av dem ske i särskilda kärnreaktorer som bygger på klyvning med snabba neutroner till skillnad från de långsammare, termiska, neutroner som dagens lättvatten reaktorer bygger på.

Separation och transmutation har i kärnkraftsdebatten framförts som ett sätt att "oskadliggöra" det använda kärnbränslet och därigenom minska kraven på slutförvaringen. Som framgår av KASAM:s rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet /KASAM 2004/ har regeringen i sina beslut med anledning av SKB:s Fud-program fastslagit att utvecklingsarbete ska ske för transmutation, som en möjlig alternativ lösning till slutförvaring enligt KBS-3-konceptet. SKB har sedan 1993 bidragit till finansieringen av forskning rörande separation och transmutation vid flera högskolor.

Är separation och transmutation ett alternativ till slutförvaring? I denna rapport görs en analys av hur ett svenskt system som inkluderar separation och transmutation skulle kunna se ut. Viktiga frågeställningar är:

- Vilka anläggningar behövs?
- När skulle sådana anläggningar kunna startas?
- Hur lång tid skulle det ta att bli av med Sveriges använda kärnbränsle?
- Vilka avfallsströmmar skulle behöva tas omhand?

Grundförutsättningen för analysen är att Sverige ska avveckla kärnkraften i enlighet med den politiska majoritetsuppfattning som hittills har rått. Detta innebär bland annat att den mängd använt kärnbränsle som ska transmuteras är relativt väldefinierad och kommer att uppgå till cirka 9 350 ton uran om reaktorerna drivs under 40 år.

Analysen utgör en del av underlaget för den redovisning av alternativa utformningar som enligt miljöbalken 6 kap ska ingå i en miljökonsekvensbeskrivning.

1.2 IAEA:s avfallskonvention och kärntekniklagen

Enligt IAEA:s avfallskonvention krävs att /IAEA 1997/:

- Radioaktivt avfall ska, om det kan ske på ett säkert sätt, omhändertas inom det land avfallet alstrats.
- Vid omhändertagande av radioaktivt avfall ska man sträva efter att inte lägga otillbörliga bördor på kommande generationer.

Enligt kärntekniklagen, SFS 1984:3, ska:

- Den som har tillstånd att driva kärnteknisk verksamhet se till att uppkommet kärnavfall, eller kärnämne som inte används på nytt, hanteras och slutförvaras på ett säkert sätt.

Dessa bestämmelser tolkas allmänt så att omhändertagandet av avfallet från det svenska kärnkraftsprogrammet ska ske i Sverige och utan onödiga dröjsmål. Omhändertagandet ska dessutom vara slutligt i den bemärkelsen att inga aktiva åtgärder ska krävas av framtida generationer för att säkerställa att omhändertagandet är säkert.

Enligt kärntekniklagen får tillstånd inte lämnas för uppförande av kärnkraftsreaktorer. Däremot har det tidigare ”tankeförbudet” i kärntekniklagen 6§ upphört att gälla från och med 2006-07-01.

1.3 Forskning

Forsknings- och utvecklingsinsatserna inom separation och transmutation har de senaste åren intagit en framträdande roll internationellt inom utvecklingen av framtida kärnkraftssystem och kärnbränslecykler. För att transmutation ska kunna tillämpas återstår omfattande tekniska problem att lösa. Forskningsprogram pågår inom bland annat EU, USA, Ryssland, Japan, Korea samt i flera enskilda länder i Europa. Forskningen har ökat något på senare år. Den största ökningen har skett inom EU där stödet till transmutationsforskning ökat från cirka 5 M€ under tredje ramprogrammet (1990–1994) till 37 M€ för det pågående sjätte ramprogrammet (2002–2006). Forskningen bedrivs i dag med olika inriktningar och det återstår ett antal frågor innan forskningen kan ges en mer fokuserad inriktning.

Svensk forskning bedrivs vid Chalmers Tekniska Högskola, Kungliga tekniska Högskolan och Uppsala universitet. SKB stödjer svensk transmutationsforskning med ett anslag på drygt 5 MSEK per år. De berörda institutionerna deltar även i EU-finansierad forskning, varigenom ett tillskott av ungefär 3 MSEK årligen erhålls. Ytterligare bidrag till den svenska forskningen kring separation och transmutation kommer från Svensk kärntekniskt centrum vid KTH som stöds av kärnkraftverken och SKI, vilket ger en total svensk forskningsbudget inom området på ungefär 9 MSEK per år. Syftet med SKB:s stöd till separations- och transmutationsforskningen är att nå bättre klarhet i grundläggande tekniska frågor såsom säkerhet, materialval, processutformning och avfallsströmmarnas sammansättning. På detta sätt räknar SKB med att bidra till att bygga upp inhemsk kompetens inom området samt att skapa en grund för att bedöma förutsättningarna för separation och transmutation i Sverige.

1.4 Ledtid

Amerikanska och europeiska studier har kommit fram till att ett grundforskningsprogram på sex år och med en kostnad på flera hundra miljoner euro är nödvändigt för att få fram den baskunskap som krävs för att kunna bygga en experimentell transmutationsreaktor av den typ som i flera länder tilldrar sig huvudintresset (ADS). Med denna tidsplan skulle en nästan fullskalig försöksanläggning kunna finnas tillgänglig i mitten av 2030-talet. Det kan noteras att forskningsfinansieringen ännu inte nått den nivå som enligt de nämnda studierna skulle krävas, varför det är troligt att denna tidsplan inte kommer att hålla. Driftsättning av en ADS-anläggning i full skala kan mot denna bakgrund knappast bli aktuell förrän under 2050-talet.

Kritiska snabba reaktorer är ett annat koncept som kan användas för att antingen bränna plutonium och andra transuraner eller som så kallade bridreaktorer i vilka naturligt uran omvandlas till plutoniumbaserat bränsle. Användningen av sådana reaktorer för transmutation studeras i några länder. Även om snabba reaktorer redan finns i drift i nära industriell skala ibland annat Frankrike kommer användningen av sådana reaktorer för transmutationsändamål att kräva väsentliga utvecklingsinsatser vad beträffar materialfrågor, utrustningsutformning och bränsleteknologi.

För denna analys har vi antagit att transmutationsreaktorer skulle kunna vara i drift i Sverige år 2035. Mot bakgrund av det ovan sagda framstår detta som ett optimistiskt antagande.

2 Allmänt om separation och transmutation

Transmutation av ett grundämne innebär att det genom en kärnreaktion övergår till ett annat grundämne genom till exempel klyvning och radioaktivt sönderfall. Således sker transmutation även i en vanlig lättvattenreaktor när uranet klyvs. När man pratar om transmutation av använt kärnbränsle brukar man dock mena transmutation av långlivade ämnen till mer kortlivade. De viktigaste långlivade radionukliderna är transuranerna (det vill säga ämnen med högre atomnummer än uran (U), främst plutonium (Pu), neptunium (Np), americium (Am) och curium (Cm), men även transmutation av långlivade klyvningsprodukter såsom ⁹⁹Tc (teknetium), ¹²⁹I (jod) och ¹³⁵Cs (cesium) har diskuterats. Transmutation av långlivade klyvningsprodukter innebär dock flera tekniska och praktiska svårigheter där ⁹⁹Tc och ¹²⁹I är de mest intressanta, och möjligen enda, kandidaterna. Fortsättningen av denna rapport fokuseras på transmutation av transuraner.

I en bränslecykel som bygger på transmutation avskiljs de nuklider som ska transmutteras från resten av bränslet i en separationsprocess, det vill säga i en utbyggd upparbetningsanläggning. För att transmutationen ska ha en nämnvärd effekt på kraven på ett slutförvar krävs att de restmängder långlivade ämnen som blir kvar i avfallet från upparbetningen, processförlusterna, är mycket små. För att minst 99 % av det ursprungliga inventariet av långlivade ämnen ska kunna transmutteras måste avskiljningsgraden i separationsprocessen vara minst 99,9 %. För att inte mer plutonium och andra transuraner ska bildas måste dessutom det bränsle som går till transmutation vara mycket rent från uran.

I separationssteget avskiljs de ämnen som ska transmutteras från resten av det använda kärnbränslet i en kemisk process. Idag kan använt kärnbränsle upparbetas i en vätske-vätskeextraktionsprocess där uran och plutonium separeras ut för att användas vid tillverkning av nytt kärnbränsle. Om plutonet används i bränslet får man så kallat blandoxidbränsle (Mixed Oxide Fuel, MOX).

Idag pågår forskning för att utveckla separationsprocesser för transuranerna (utöver plutonium) längs två separata spår som bygger på vätske-vätskeextraktion respektive pyrokemisk separation. Hittills har huvuddelen av forskningen rört vätske-vätskeextraktion men forskning omkring pyrokemisk separation pågår i flera länder. Omfattande forskningsarbete återstår innan det finns separationsprocesser i industriell skala.

2.1 Transmutation enligt ”phase out”- eller jämviktsprincip

Transmutation kan teoretiskt drivas enligt två olika principer, ”phase-out” eller jämvikt. Phase out innebär att transmutationen drivs i syfte att minska mängden långlivat avfall från det använda kärnbränslet från Sveriges befintliga kärnkraftsprogram. I ett system i jämvikt utgör transmutationsreaktorerna en del av ett energisystem som drivs optimerat för ett energiuttag. Ett jämviktscenario kräver att nytt bränsle kontinuerligt tillförs till systemet till exempel i form av uran eller torium. Transmutationsforskningen syftar framförallt till att ge underlag för utformningen av optimerade bränslecykler i jämvikt. En drivkraft för denna forskning är att åstadkomma ett bättre utnyttjande av bränsleråvaran.

2.2 Alternativa sätt att genomföra transmutation

Klyvning av många av transuranerna kan bara ske med snabba neutroner. Detta innebär att man för transmutation eftersträvar ett högt flöde av snabba neutroner. Detta kan inte åstadkommas i konventionella lättvattenreaktorer där vattnet tjänar som moderator och bromsar neutronerna till termiska energinivåer. Plutonium kan i någon mån transmutteras även i lättvattenreaktorer och då

i form av MOX-bränsle. Möjligheterna att återcykla plutonium flera gånger som MOX-bränsle begränsas av att plutoniets isotopsammansättning förändras på ett sätt som försvårar användning i lättvattenreaktorer med dess långsamma (termiska) neutroner. Utvecklingsarbete pågår i bland annat Frankrike och USA för att få fram bränsletyper som skulle möjliggöra multipel återcykling av plutonium.

Snabba neutroner kan åstadkommas i såväl reaktorer med en självunderhållande kedjereaktion (kritiska reaktorer) som i acceleratordrivna underkritiska reaktorer, ADS (Accelerator Driven Systems). I figur 2-1 visas schematiskt några karakteristika för de ovan nämnda reaktortyperna.

Flera länder har eller har haft snabba reaktorer som har körts som så kallade bridreaktorer, vilket innebär att de neutroner som inte använts för att klyva fissila atomer har fångats upp av naturligt uran så att plutonium bildats, det vill säga samtidigt som bränsle har förbrukats har nytt bränsle bildats. De snabba reaktorer som hittills har byggts och drivits för kraftproduktion har kylts med flytande natrium. I Ryssland har reaktorer som kyls med smält bly använts i ubåtar.

Det går i princip att använda snabba reaktorer som rena plutoniumbrännare. För att undvika bildning av nya transuraner vill man dock vid transmutationen använda uranfritt bränsle. Sådant bränsle ger dock dåliga reaktivitetsegenskaper och en låg andel så kallade fördröjda neutroner vilket medför att reaktorerna blir svåra att styra. Av bland annat detta skäl har intresset i transmutationsforskningen kommit att koncentreras till ADS-baserade bränslecykler. Transmutationsforskningen i Sverige är i stort sett helt inriktad på ADS.

I ett acceleratordrivet system används en kombination av en kraftfull jonaccelerator i kombination med en underkritisk reaktor. I jonacceleratorn accelereras protoner som får träffa en kropp av tungt material (till exempel en blandning av bly och vismut) i reaktorhårdens centrum. När protoner med mycket hög energi (hastighet) träffar atomerna i det tunga materialet så splittras dessa i flera fragment och ett stort antal neutroner frigörs. Processen kallas spallation. Vid varje spallation frigörs några tiotal neutroner. Ett intensivt flöde av neutroner byggs upp och orsakar klyvningar av atomkärnorna i reaktorns bränsle. Bränslet utgörs av de långlivade transuraner som har separerats ut från det använda bränslet från de svenska lättvattenreaktorerna. ADS-reaktorn är underkritisk vilket innebär att kärnklyvningarna i bränslet inte är självunderhållande utan upphör då protonstrålen från jonacceleratorn stängs av.

Reaktortyper			
	Lättvatten	Kritiska	Underkritiska
Exempel:	BWR, PWR	Bridreaktor	ADS
Neutronenegi:	Termiska neutroner	Snabba neutroner	Snabba neutroner
Bränsletyp:	UOX, MOX	UOX, MOX, Pu	Transuraner + ev. långlivade FP
Kommentar:	MOX ger inväxning av Am	Inväxning av Am minskar säkerhetsmarginalerna	Bränslet måste vara uranfritt för att inte mer långlivade ämnen ska bildas

Figur 2-1. Sammanställning av karakteristika för lättvattenreaktorer, kritiska snabba reaktorer samt underkritiska snabba reaktorer.

Den allmänt studerade utformningen av ADS-reaktorer kyls med ett eutektikum av bly och vismut. Eutektikum är en blandning, vars smältpunkt är lägre än varje annan blandning av de ingående ämnena. Beräkningar har visat att även gaskylda ADS-reaktorer skulle kunna användas för transmutation, men att transmutationskapaciteten i en sådan reaktor är väsentligt lägre än i en bly-vismutkyld reaktor.

2.3 Erforderliga anläggningar

I detta avsnitt beskrivs översiktligt de anläggningar som skulle behövas för att transmuttera det använda kärnbränslet från den svenska kärnkraften. Förutom själva anläggningarna beskrivs även de huvudsakliga begränsningar som kan förknippas med respektive anläggning eller process.

2.3.1 Upparbetningsanläggning och separation

Upparbetning av UOX-bränsle från lättvattenreaktorer sker idag med den så kallade PUREX-processen. Denna typ av upparbetning finns idag i drift i industriell skala i Frankrike (La Hague), England (Sellafield) och Ryssland (Majak). I Japan har man nyligen startat provdrift av en upparbetningsanläggning i Rokkasho.

I PUREX-processen löser man upp det använda bränslet i varm koncentrerad salpetersyra varefter man extraherar ut uran och plutonium ur lösningen med vätske-vätskeextraktion. Resultatet blir två fraktioner med uran respektive plutonium samt en ström med högaktivt avfall som innehåller klyvningsprodukter och övriga transuraner. Transuranerna utgörs huvudsakligen av neptunium, americium och curium tillsammans med mindre mängder aktinider med högre atomnummer än curium. Upparbetningsanläggningar är omfattande och komplexa kemiska fabriker, se figur 2-2.



Figur 2-2. Flygfotografi över upparbetningsanläggningarna vid La Hague i Frankrike.

För att möjliggöra transmutation måste transuranerna separeras från det högaktiva avfallet. För att uppnå en effektiv transmutation måste separationsgraden vara minst 99,9 %. Denna separationsprocess finns idag inte industriellt tillgänglig. Forskning pågår längs två huvudspår, nämligen våtkemisk separation med vätske-vätskeextraktion och pyrokemisk separation. En stor del av forskningsinsatserna inriktas på våtkemiska processer medan forskning kring pyrokemiska metoder pågår i främst Japan, USA och Ryssland.

En fördel med de våtkemiska processerna är att de bygger på beprövad teknik vad avser typer av utrustning, kontroll av kriticitetsrisker, etc. Det bedöms finnas goda förutsättningar att få fram en uppskalningsbar process som ger önskad separationsgrad. De problem och nackdelar man hittills sett har främst rört kostnader och extraktionsmedlens livslängd i den intensiva strålmiljö som man får vid extraktion av högaktivt avfall. Man har också haft vissa problem att hitta extraktionsmedel som inte tar med sig lantanider över i transuranfraktionen. För att minimera bildandet av sekundärt processavfall söker man extraktionsmedel som bara innehåller kol, väte, syre och kväve.

Intresset för pyrokemiska processer i samband med transmutation beror på avsaknaden av de strålningskänsliga material som ingår i de våtkemiska processerna. Pyrokemiska processer för upparbetning av bestrålat bränsle började utvecklas tidigt och redan på 1950-talet byggdes en anläggning som baserades på kontrollerad oxidativ slagging av smält metalliskt bränsle i anslutning till en brytareaktor i USA. En annan pyrokemisk metod som prövades tidigt var fluoridförångning av bränsle i form av smälta salter. Man fick emellertid stora problem med materialförluster, kriticitetskontroll och korrosion när metoden i början av 1970-talet applicerades på lättvattenreaktorbränsle. Som en följd av dessa problem minskade intresset för de pyrokemiska processerna under 1970- och 1980-talen för att åter öka i samband med diskussionen om separation och transmutation som tog sin början under 1990-talets första del.

Valet av separationsteknik kan påverka utformningen av en bränslecykel där transmutation ingår. Extraktionsmedlens strålningskänslighet innebär att man vid våtkemisk separation måste vänta längre innan det använda bränslet upparbetas än vid pyrokemisk separation. Vid pyrokemisk separation förekommer inte renframställda klyvbara ämnen i stora mängder vilket har framhållits som en fördel när det gäller kontrollen av det klyvbara materialet ("nuclear safeguard"). En pyrokemisk separationsanläggning förutses allmänt kunna byggas småskaligare än en våtkemisk separationsanläggning vilket skulle kunna medge att de uppförs i anslutning till transmutationsreaktorn. Detta skulle bidra till att minimera transporter och ytterligare förstärka kontrollen över det klyvbara materialet. Det anses dock allmänt att det krävs väsentligt större utvecklingsinsatser innan pyrokemiska anläggningar som uppfyller kravet på separations-effektivitet kan byggas än vad som är fallet med våtkemiska anläggningar.

2.3.2 Bränsletillverkning

Bränsle som är avsett för transmutationsreaktorer får av naturliga skäl inte innehålla uran (ger genom neutronabsorption upphov till nya transuraner) men måste innehålla höga halter av transuraner, det vill säga plutonium, neptunium, americium och curium. Eftersom transuranerna i allmänhet har lägre värmeledningsförmåga och lägre smältpunkt än motsvarande för uran studerar man möjligheterna att späda ut transuranerna med en inert bränslematris. På detta sätt minskar man den termiska belastningen på bränslet vilket ger lägre bränsletemperatur under drift. Olika typer av matriser har undersökts. I Europa har huvudintresset fokuserats på oxid- och nitridbaserade bränslen. Oxidbränsle har nackdelen att lösligheten i salpetersyra minskar när bränslets plutoniumhalt ökar vilket försvårar upparbetning med PUREX-liknande teknik. Nitridbränslen å andra sidan medför nackdelen att ^{14}C (kol) produceras genom en kärnreaktion (n,p) i bränslets innehåll av ^{14}N (kväve) under bestrålningen i reaktorn. Detta försvårar hanteringen av bränslet under upparbetningsprocessen. Den vanligen antagna nitridmatrisen är ZrN (Zirkoniumnitrid) som bildar fast lösning med aktinidnitrider samt har hög smältpunkt (2 960 °C), god värmeledningsförmåga och är stabil (oxideras inte) i luft. ZrN kan dessutom användas i stålkapslat bränsle och kan lösas upp i salpetersyra vilket underlättar upparbetningen.

Inblandningen av transuraner i ADS-bränsle förutsätts variera mellan 30 % och 60 % /Gudowski et al. 2004/ och resten inert matris beroende på placeringen i reaktorn och bränslematris. Om isotopfördelningen av transuraner (inklusive plutonium) antas vara likartad den i använt bränsle från lättvattenreaktorer /Skålberg et al. 1995/ kan radioaktiviteten i ett ton obestrålat ADS-bränsle uppskattas till i storleksordningen 5–20 PBq att jämföra med 16 GBq per ton uranvikt i obestrålat urandioxidbränsle med 5 % anrikning.

Det höga innehållet av transuraner innebär således att bränslets specifika aktivitet blir så hög att det måste hanteras med strålskärning i fjärrstyrda processer. ADS-bränslet innehåller dessutom flera nuklider som avger neutronstrålning vilket kan komma att ställa speciella krav på strålskärningen.

2.3.3 Transporter

Som nämnts ovan är det bränsle som förutses användas i ADS-reaktorer högradigt radioaktivt. Radioaktiviteten i ett ton obestrålat ADS-bränsle är 10^5 – 10^6 gånger högre än i ett ton obestrålat bränsle för lättvattenreaktorer och i samma storleksordning som aktiviteten per ton uran i bestrålat lättvattenreaktorbränsle som fått avklinga tio år efter uttaget ur reaktorn.

Behovet av transporter av bränsle och radioaktivt avfall inom en bränslecykel som innefattar separation och transmutation beror givetvis i hög grad på var anläggningarna förläggs. Eftersom upparbetning och separation kräver omfattande och komplicerade kemiska anläggningar ligger det nära till hands att anta att Sverige skulle komma att köpa in dessa tjänster från utländska anläggningar istället för att bygga upp sådana inom landet. Detta skulle emellertid innebära att såväl det obestrålade bränslet till ADS-reaktorerna som det bestrålade bränslet från dessa reaktorer måste transporteras internationellt. Den transporterade bränslemängden i hela systemet blir 5–25 ton per år räknat som total bränslevikt.

Eftersom både det obestrålade och det bestrålade bränslet är starkt radioaktivt måste kvalificerade transportbehållare, så kallade typ B behållare, användas. Sådana behållare är utformade och testade för att tåla krockväld, bränder och fartygsförlisningar. Existerande behållartyper behöver sannolikt kompletteras för att öka skärningen av neutronstrålning.

Internationella transporter av högradioaktivt och klyvbart material ställer naturligtvis krav också på såväl fysiskt skydd som kontroll av klyvbart material. Sådana transporter sker dock redan idag under väl etablerade former.

2.3.4 Mellanlager för kylning

Upparbetning och separation av det använda bränslet kan, som diskuterats ovan, ske med våtkemiska eller med pyrokemiska metoder. I båda fallen krävs att det använda bränslet avklingar en tid innan det upparbetas. Om våtkemiska metoder används ställer strålningskänsligheten hos använda extraktionsmedel större krav på avklingning än om pyrokemiska metoder används. De senare är dock i dagsläget längre från teknisk tillämpbarhet än de våtkemiska metoderna.

Det finns idag ingen industriskalig erfarenhet av upparbetning av ADS-bränsle, utan de resonemang som förs baseras på expertomdömen och beräkningar. I denna studie har det antagits att upparbetning och separation med våtkemiska metoder kräver tio års avklingning och att pyrokemiska processer skulle kräva 2–3 års avklingning.

Erforderlig mellanlagringskapacitet för avklingningen blir således någonstans i intervallet 20–100 ton total bränslevikt. Eftersom bränslet är starkt radioaktivt måste anläggningen utformas med särskild tonvikt på strålskärning och hanteringssäkerhet.

2.3.5 Transmutation i ADS

Idén att utnyttja acceleratordrivna system, ADS, för storskalig transmutation uppkom i slutet av 1940-talet i USA som ett alternativt sätt att tillverka lätt klyvbara isotoper, främst ^{233}U från ^{232}Th (torium) och ^{239}Pu från ^{238}U . Då föll idén på att man inte kunde framställa acceleratorer med tillräcklig effekt för att man skulle kunna åstadkomma en storskalig process. Denna svårighet har i dagsläget övervunnits med de avancerade acceleratorer som används inom partikelfysiken och som i princip möjliggör högintensiva neutronkällor baserat på så kallade spallationsreaktioner. Det bör observeras att det idag inte finns några ADS-reaktorer i drift ens på demonstrationsskala. Forskning pågår i flera länder för att ge nödvändigt underlag till den tekniska utformningen av ett fungerande system. Den beskrivning som ges här bygger på redovisade forskningsresultat och koncept.

Spallationsreaktioner uppstår genom att protoner som accelererats upp till höga energinivåer bringas att kollidera med en spallationskälla bestående av tunga atomer, till exempel bly eller en blandning av bly och vismut, varvid atomer i spallationskällan splittras i ett antal partiklar. En del av dessa partiklar är neutroner som kan utnyttjas för att reagera med atomer i det bränsle som finns i ADS-reaktors härd. ADS-härden är tänkt att vara utformad så att en självunderhållande kedjereaktion inte kan uppstå utan kärnreaktionen i reaktorn stannar så fort acceleratoren stängs av varvid protonstrålen upphör. Man säger att reaktorn är underkritisk.

ADS-reaktorn består av tre huvudkomponenter:

- accelerator,
- spallationskälla och
- reaktorhärd.

Acceleratorn består av ett långt vakuumsatt rör där protoner accelereras upp med hjälp av ett radiofrekvent elektromagnetiskt fält. Linjära, det vill säga raka, acceleratorer anses idag ha bättre förutsättningar att åstadkomma tillräckligt stora strömmar av protoner med tillräckligt hög energi för att fungera i storskaliga ADS-reaktorer. En linjär accelerator antas typiskt behöva vara cirka en kilometer lång för att ge protoner med tillräcklig energi.

För att en proton med hög sannolikhet ska reagera med någon kärna i spallationskällan krävs att protonens energi är minst 500 MeV och helst i storleksordningen 1 GeV. Det nödvändiga flödet av sådana högenergetiska protoner bestäms av bland annat reaktoreffekten, antalet genererade neutroner per proton i spallationskällan och av graden av underkriticitet i härden. Med typiska värden på dessa parametrar blir den nödvändiga protonströmmen 10–50 mA motsvarande $6 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{17}$ protoner per sekund för en reaktor som ger en effekt på i storleksordningen 1 000 MW_{th}. Energiåtgången för en sådan accelerator blir beroende av verkningsgraden. Med modern teknik för alstring av det radiofrekventa fältet och med användning av supraledande material tror man att en verkningsgrad på 45 % ligger inom räckhåll, vilket skulle ge en energiförbrukning motsvarande cirka 20–100 MW för att driva acceleratoren. Ett särskilt krav på acceleratoren jämfört med dagens forskningsacceleratorer är att tillgängligheten måste vara extremt hög.

Spallationskällan utformas så att protonströmmens hela energi absorberas i källan. Om källan är gjord av bly/vismut och protonernas energi är i storleksordningen 1 GeV krävs en cirka 80 centimeter lång källa. Eftersom stora energimängder deponeras i spallationskällan måste denna kylas. Om källan består av ett flytande material, till exempel ett bly-vismuteutektikum, riskerar vakuumsättningen av acceleratoren att förstöras av källans ångtryck. Man tänker sig därför att protonstrålen får passera genom ett tätande fönster av något utbytbar membran innan den träffar källan. Utformningen och materialvalet för detta fönster är ett av de centrala problemen i transmutationsforskningen.

Härden tänks kylas av flytande bly eller bly/vismut. Vatten är otänkbart eftersom det skulle bromsa upp neutronerna och omöjliggöra transmutationen. Det finns idag flera olika koncept för hur kylningen av härden ska arrangeras. I en del av dessa koncept föreställer man sig att kylningen kan ske genom att kylmediet cirkulerar med naturlig konvektion, det vill säga utan pumpar. Spallationskällan tänks vara placerad i härdens centrum så att neutronerna kan utnyttjas på mest effektiva sätt.

Blykylda reaktorer finns i drift inom den ryska ubåtsflottan. Man har där samlat på sig uppemot 100 driftårs erfarenhet. En fördel med blykylningen är att blyets ångtryck är lågt och att drifttrycket därför kan hållas lågt. Det låga drifttrycket anses även medföra att det är lättare att arrangera en effektiv kylning av resteffekten i härden vid ett reaktorstopp än vad som är fallet i en konventionell lättvattenreaktor.

Eftersom en ADS-härd är underkritisk kan reaktoreffekten styras genom reglering av acceleratoreffekten som påverkar protonströmmen. Man behöver således inte några styrtavar för reaktivitetsreglering. Däremot anses det vara lämpligt att använda säkerhetsstyrtavar som en extra säkerhet mot reaktivitetstransienter i samband med att reaktorn stängs av.

3 Transmutation i ett svenskt perspektiv

Ett svenskt transmutationsscenario antas syfta till att behandla den mängd använt uranbränsle som beräknas för det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet för att reducera dess livslängd och volym, det vill säga ett "phase-out" scenario. Följande förutsättningar antas gälla för:

- Barsebäck 1 och 2 är och förblir avställda. Övriga tio block drivs i 40 år från respektive blocks startdatum. Detta ger en bränslemängd som ska slutförvaras vid direktdeponering som har beräknats till /SKB 2005/ 9 350 ton (initial) uranvikt. Denna finns år 2025.
- I transmutationsscenarioet förutsätts att denna mängd ska transmutteras efter 2025 i stället för att direktdeponeras.
- Allt avfall som uppkommer från upparbetning och transmutation ska slutförvaras i Sverige. Långlivat låg- och medelaktivt avfall från upparbetning samt tillverkning av MOX- och MA-bränsle (mixed actinides) konditioneras och slutförvaras i särskilda förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Rivningsavfall från nya anläggningar behandlas som rivningsavfall från de existerande kraftverken.

Målet för transmutationsscenarioet är att transmuttera minst 99 % av alla transuraner som finns i de 9 350 ton använt uranbränsle, som annars ska direktdeponeras samt likaså alla transuraner som bildas under själva transmutationen. Kvarvarande avfall får således innehålla högst en procent av den transuranmängd som finns i de nämnda 9 350 tonnen använt uranbränsle.

Återvinning och återanvändning av klyvbara ämnen i det använda uranbränslet som alstras i det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet kan ske enligt tre alternativa principer vad gäller bränslecykelns utformning:

- 1) Upparbetning och återföring av uran och plutonium som MOX-bränsle i vanliga lättvattenreaktorer, se figur 3-1.
- 2) Upparbetning och separation där transuranerna avskiljs från uran och övriga ämnen i det använda bränslet följt av framställning av bränsle innehållande transuraner som transmutteras i ADS-anläggning. Denna cykel kan upprepas i flera steg, se figur 3-2.
- 3) Kombination av alternativ 1 och 2, upparbetning och återföring av uran och plutonium som MOX-bränsle i lättvattenreaktorer samt därutöver ytterligare separation och renframställning av transuranerna samt transmutation av dessa i ADS-anläggning, se figur 3-3.

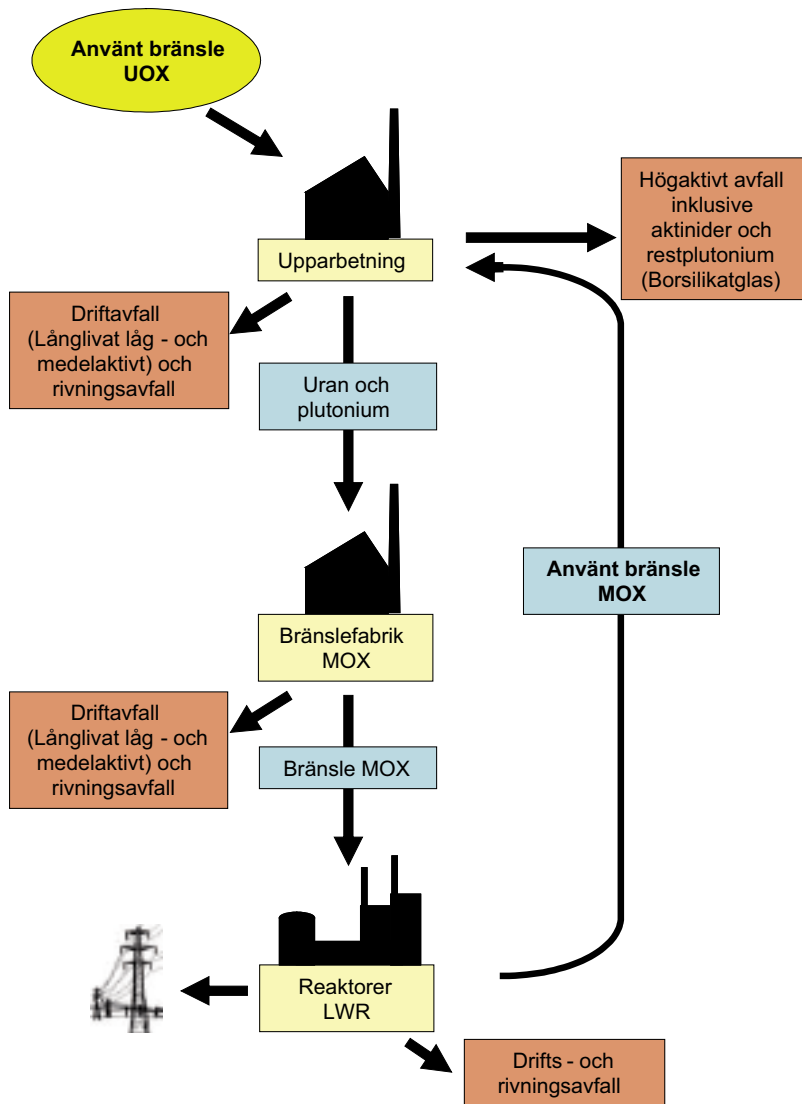
I utgångsläget finns som ovan nämnts använt uranbränsle från de nuvarande reaktorerna motsvarande 9 350 ton uran. I denna bränslemängd finns cirka 100 ton transuraner varav 80 ton utgörs av plutonium, cirka 18 ton av americium samt resten i princip av neptunium och curium med små mängder högre aktinider (californium och berkelium).

För att transmuttera allt använt uranbränsle från det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet kommer det att krävas lång tid. En begränsande faktor är tillgången på ADS-bränsle med hänsyn till att det bränsle som kommer från ADS-reaktorerna måste avklinga en viss tid för att upparbetning/separation ska vara praktiskt genomförbar.

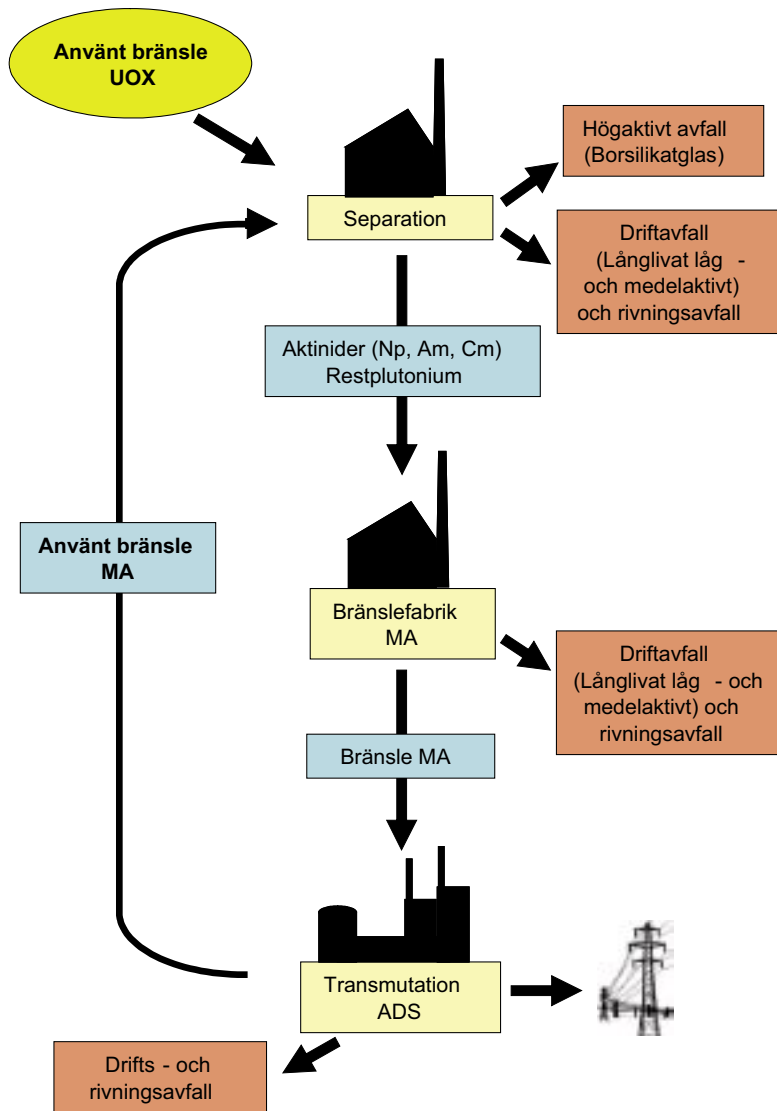
Nedan belyses de i figurerna 3-1 till 3-3 beskrivna scenarierna för transmutation utgående från antagandena att transmutationen sker i:

1. Endast i LWR (MOX-bränsle).
2. Endast i ADS-reaktorer.
3. I en kombination av LWR- och ADS-reaktorer.

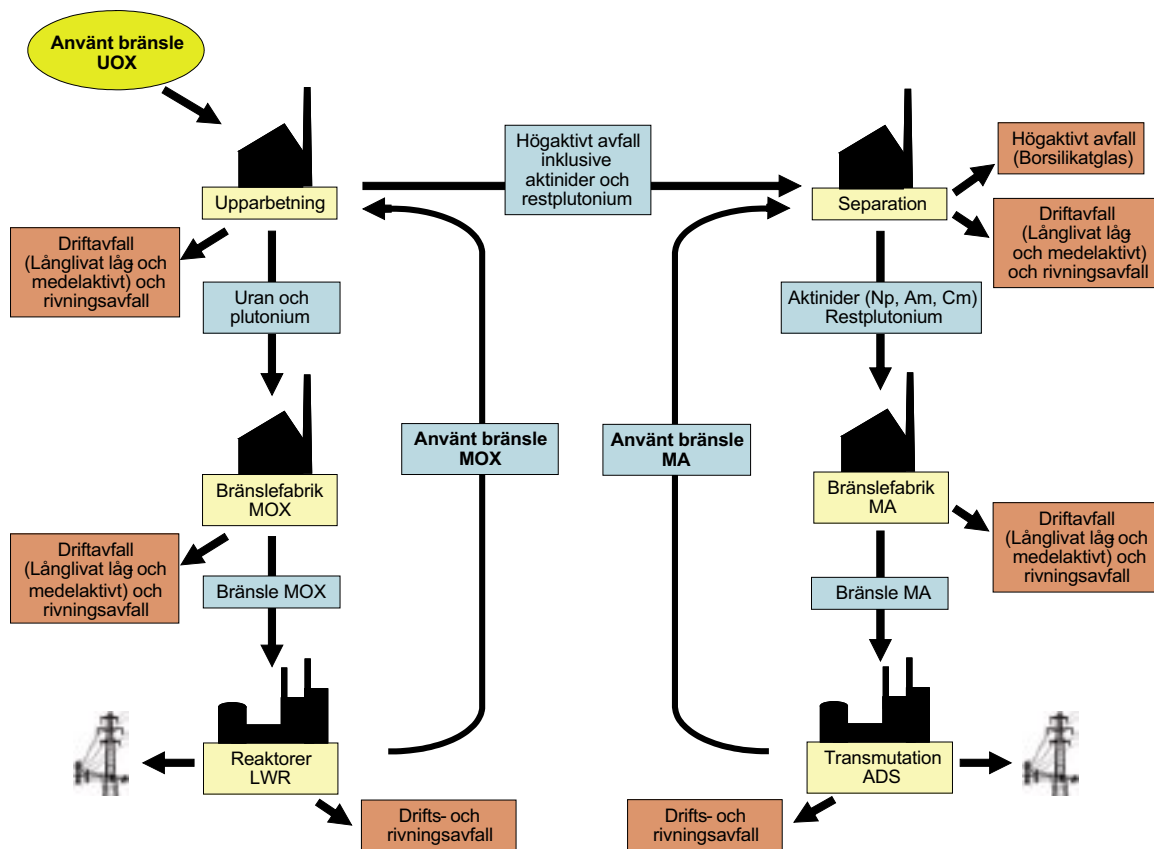
Dessa tre scenarier beskrivs med avseende på den nödvändiga tiden för transmutation av 99 % av transuraner och med avseende på hur långt transmutationen kan drivas under en given tidsperiod. Beskrivningarna bygger på beräkningar gjorda vid KTH /Dufek et al. 2006/.



Figur 3-1. Alternativ 1, upparbetning och återföring av uran och plutonium som MOX-bränsle i lättvattenreaktorer. Denna cykel upprepas i så många steg som är möjligt med hänsyn till förändrad plutoniumsammansättning.



Figur 3-2. Alternativ 2, separation/uppberedning där transuraner inklusive plutonium renframställs, framställning av bränsle innehållande transuranerna inklusive plutonium och därefter transmutation i ADS-anläggning. Denna cykel kan upprepas i flera steg.



Figur 3-3. Alternativ 3, upparbetning och återföring av uran och plutonium som MOX-bränsle i vanliga lättvattenreaktorer. Det högaktiva avfallet genomgår ytterligare separation för att renframställa transuraner som transmutteras i en ADS-anläggning.

3.1 Förbränning av MOX-bränsle i lättvattenreaktorer

Ett flödesschema över en bränslecykel för bränning av plutonium som MOX-bränsle redovisas i figur 3-1 ovan. Detta scenario innebär att:

- Det använda uranbränslet från det svenska reaktorprogrammet upparbetas i en anläggning i annat europeiskt land. Uran och plutonium separeras ut ur det högaktiva avfallet för transmutation. Övriga ämnen omvandlas till fast högaktivt avfall (borosilikatglas) och slutförvaras på i princip det sätt som anges i KBS-1-studien /SKB 1977/. I samband med upparbetningen och separationen uppkommer långlivat låg- och medelaktivt avfall.
- Uran och plutonium överförs till MOX-bränsle som bränns i lättvattenreaktorer. Tillverkningen MOX-bränsle för LWR sker i annat europeiskt land.
- Plutoniumåterföring i MOX-bränsle sker så många gånger som är tekniskt möjligt eller lämpligt. MOX-bränsle från LWR upparbetas på samma sätt som annat LWR-bränsle.

Antalet reaktorer och reaktoreffekten har i detta scenario optimerats för att ge maximal reduktion av mängden plutonium. Gränssättande för den möjliga reaktoreffekten är behovet av att låta avfallet från förbränningen av MOX-bränsle avklinga innan det får ingå i nytt MOX-bränsle. Här har antagits en avklingningsperiod på sex år mellan MOX-cyklerna. I scenariot antas att två lättvattenreaktorer med en sammanlagd termisk effekt på 4 600 MW_{th} körs på enbart MOX-bränsle. Eftersom det i dagsläget inte finns någon industriell erfarenhet av att köra lättvattenreaktorer med rena MOX-bränslehardar är detta ett ur transmutationssynvinkel optimistiskt antagande.

Vid förbränning av plutonium i lättvattenreaktorer utnyttjas främst isotopen ^{239}Pu som är lätt klyvbar i det modererade (termiska) neutronspektrum som fås i lättvattenreaktorer. När MOX-bränsle bestrålas växer plutoniumisotoper med högre masstal in. Det plutonium som separeras ut vid upparbetning av bestrålat MOX-bränsle får därför ett högre innehåll av plutoniumisotoper som inte kan brännas i lättvattenreaktorer. Detta begränsar det antal gånger som MOX-bränsle kan recirkuleras i lättvattenreaktorer. I denna studie har antagits att MOX-bränslet kan recirkuleras tre gånger.

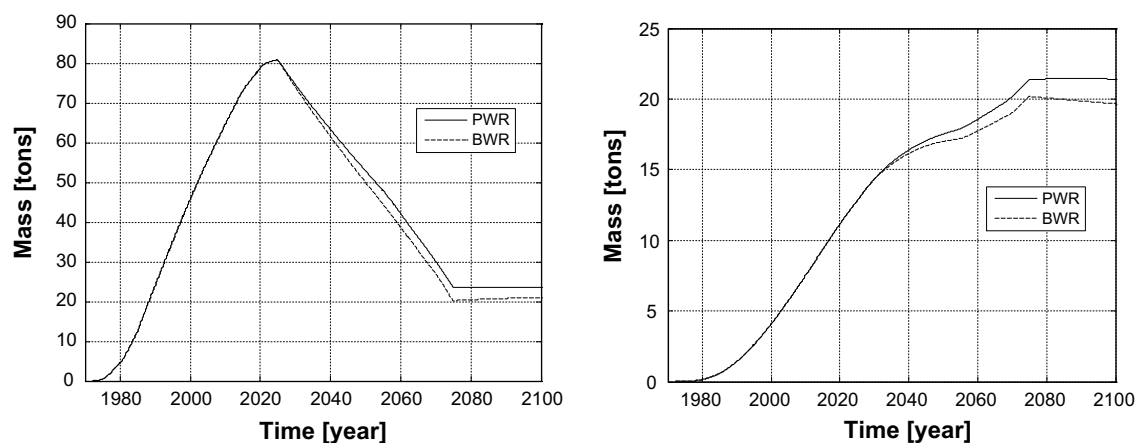
För att kompensera för den avtagande reaktivitet som fås på grund av inväxningen av högre plutoniumisotoper antas halten plutonium i bränslet ökas för varje gång bränslet recirkuleras. Om MOX-bränslet används i tryckvattenreaktorer (PWR) krävs en något högre inblandning av plutonium i bränslet eftersom neutronerna är något långsammare i sådana reaktorer än i kokareaktorer (BWR). I tabell 3-1 redovisas den plutoniumanrikning som antagits i beräkningarna. MOX1 anger bränsle i första cykeln, MOX2 i andra cykeln och MOX3 i tredje cykeln.

I figur 3-4 redovisas hur den totala mängden plutonium och americium förändras vid bestrålning av MOX-bränsle enligt ovan beskrivna scenario. Under de 50 år (2025–2075) som förbränningen tar reduceras mängden plutonium medan americium mängden ökar på grund av neutronabsorption. Observera att tiden fram till år 2025 i figurerna visar hur mängderna byggs upp under de 40 år som de nuvarande reaktorena körs.

Som framgår av figurerna är BWR något effektivare att reducera mängden plutonium liksom också på att undvika uppbyggnad av americium. Detta beror på det något hårdare neutronspektrat i BWR jämfört med PWR. Den totala mängden transuraner reduceras med cirka 50 % under de 50 år som reaktorena körs med MOX-bränsle.

Tabell 3-1. Antagen plutoniumanrikning i MOX-bränsle /Dufek et al. 2006/.

Cykel	Pu anrikning i MOX bränsle [%]	
	PWR	BWR
MOX1	7,65	7,65
MOX2	10,75	9,24
MOX3	12,23	11,97



Figur 3-4. Förändring i tiden av plutonium- (vänster) och americium- (höger) mängderna i bränslet. Från och med år 2025 bränns endast MOX-bränsle. /Dufek et al. 2006/.

3.2 Förbränning med enbart ADS

Ett flödesschema över en möjlig bränslecykel för förbränning av transuraner (inklusive plutonium) i ADS-reaktorer redovisas i figur 3-2. Detta innebär att plutonium och övriga transuraner renframställs och får ingå i uranfritt bränsle som bränns i ADS-reaktorer. Dessa reaktorer antas byggas vid något befintligt kärnkraftverk i Sverige. Här antas (optimistiskt) att ADS-reaktorer kan vara i drift år 2035.

Tillverkning av ADS-bränsle liksom upparbetning av använt ADS-bränsle sker i något annat europeiskt land. Högaktivt avfall från upparbetning av ADS-bränsle förutsätts omvandlas till borosilikatglas som slutförvaras på i princip det sätt som anges i KBS-1-studien /SKB 1977/.

I detta avsnitt redovisas beräkningar för fyra varianter av transmutation av transuraner enbart med ADS-reaktorer:

- Transmutation av 99 % av transuranerna utan internationellt utbyte av bränsle.
- Transmutation av 99 % av transuranerna med internationellt utbyte av bränsle.
- Transmutation med ADS som körs 50 år.
- Transmutation med ADS som körs i 100 år.

Skillnaden mellan scenarierna a och b är att bränsletillgången begränsas av avklingningstiderna på grund av att enbart svenskt bränsle utnyttjas i a medan detta kan kompenseras genom att bränsle från utländska reaktorer kan utnyttjas i b varigenom bränsletillgången inte blir begränsande. Som tidigare har de redovisade beräkningsresultaten hämtats från /Dufek et al. 2006/.

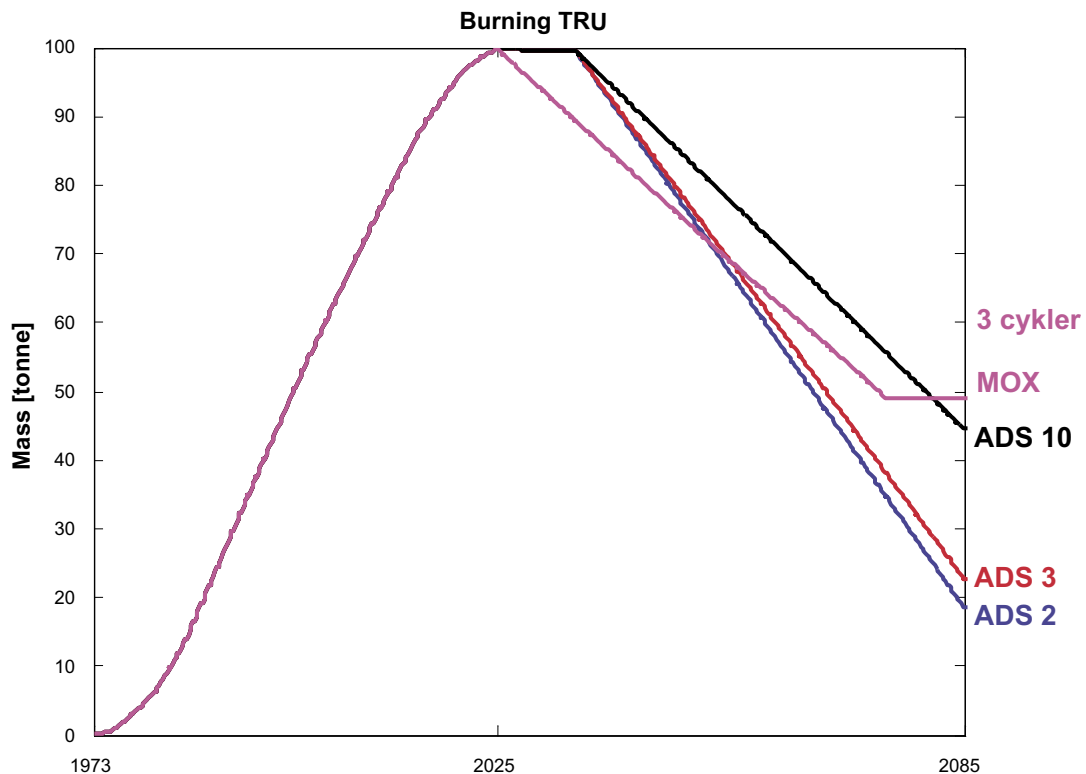
Beräkningar visar att om bränslet i en ADS-härd bränns ut till 200 GW_{d_{th}}/ton reduceras mängden transuraner med 21 %. Ur detta kan man lätt räkna ut hur många cykler, n , som behövs för att reducera mängden transuraner till 1 %:

$$(1-0,21)^n = 0,01 \Rightarrow n \approx 19,5$$

Det krävs således bestrålning av bränslet i 20 cykler för att man ska komma ner under 1 % av ursprungligt inventarium av transuraner. Styrande för tiden att genomlöpa en cykel är som tidigare nämnts kravet på avklingning innan det bestrålade bränslet kan upparbetas och nytt ADS-bränsle tillverkas. Om våtkemisk separation används krävs en längre avklingningstid än om pyrokemisk separation används. Här har antagits att en cykel tar tio år om våtkemisk separation används vilket skulle innebära att det skulle ta uppemot 200 år att åstadkomma den önskade reduktionen av transuranmängden. Med pyrokemisk separation skulle denna tid sannolikt kunna reduceras väsentligt.

Det bör noteras att om transmutationen genomförs med bara svenskt bränsle fås en med tiden minskande bränslemängd att transmuttera. Detta ger i sin tur att ADS-anläggningarna inte kan utnyttjas på ett ekonomiskt rimligt sätt. Med ett internationellt samarbete skulle bränsleförsörjningen kunna säkras genom att bränsle med utländskt ursprung men i en mängd som motsvarar det ursprungliga svenska bränslet används. I detta scenario blir därför istället den installerade ADS-effekten avgörande för hur snabbt transmutationen kan genomföras. Beräkningar visar att transuraninventariet minskar med 347 kg per installerad GW_{th} och år. För att kunna genomföra transmutation av 99 % av det ursprungliga transuraninventariet på 100 ton under 50 år skulle det krävas att ADS-reaktorer med en sammanlagd effekt på $100\,000/(347 \times 50) \approx 5,8$ GW_{th} uppfördes och drevs.

Om ADS-reaktorerna körs under en antagen livslängd på 50 år blir den andel av det ursprungliga inventariet av transuraner som kan transmutteras beroende av installerad effekt. Den maximala installerade effekten blir i sin tur beroende av bränsletillgången, det vill säga av den nödvändiga avklingningstiden per cykel. Det har uppskattats att med tio års avklingningstid fås en maximal effekt på 3 150 MW. På samma sätt har den maximala effekten för tre och två års avklingningstid beräknats till 4 450 MW_{th} respektive 4 700 MW_{th}. I figur 3-5 jämförs beräknade kvarvarande mängder av transuraner efter transmutation under 50 år med avklingningstiderna



Figur 3-5. Mängden transuraner som funktion av tiden vid transmutation i ADS-reaktorer på maximal effekt vid olika avklingningstider. Som jämförelse har även resultatet av beräkningar för tre MOX-cykler lagts in. Notera att ADS har antagits finnas från år 2035 medan MOX-cyklerna antagits starta år 2025. /Dufek et al. 2006/.

10, 3 och 2 år och de beräknade maximala effekterna. Som jämförelse har även kvarvarande mängder efter tre MOX-cykler i lättvattenreaktorer lagts in.

Av figuren framgår att ADS-reaktorer på maximal effekt i 50 år med hänsyn till bränsletillgången ger en reduktion av transuranerna med mellan 55 % och 80 % beroende på avklingningstiden. Det är således efter 50 år långt kvar till målet 99 % reduktion. Noteras kan också att med 10 års avklingningstid får man bara marginellt större reduktion av transuraninnehållet än med tre cykler MOX-bränsle.

3.3 Kombinerad förbränning av MOX och ADS-bränsle

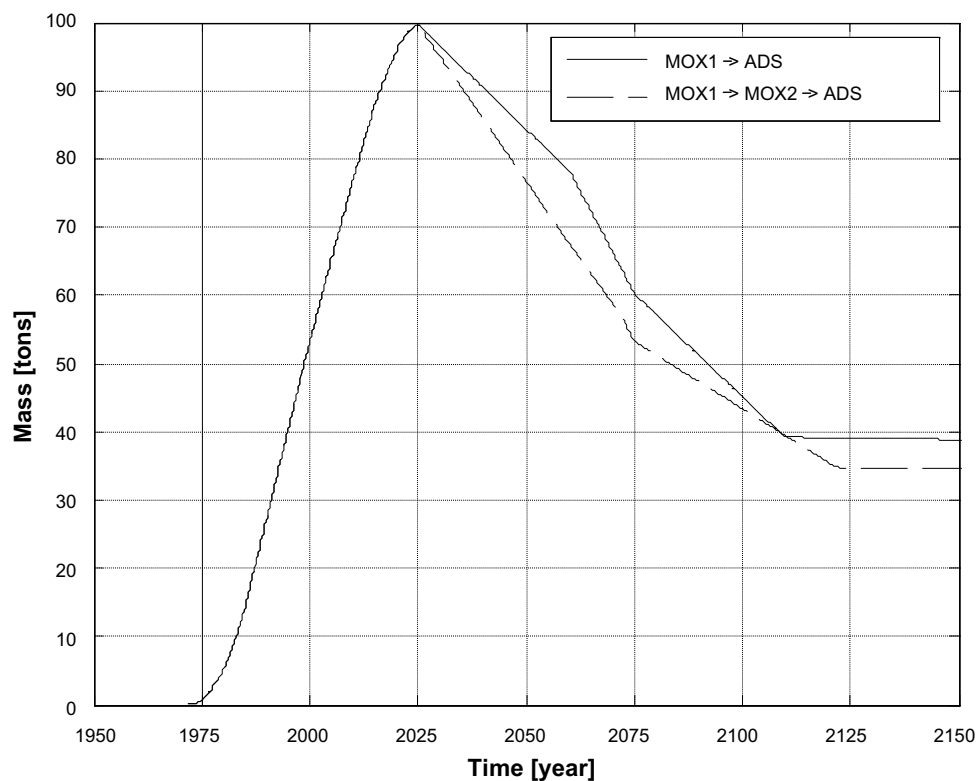
I figur 3-3 redovisas ett flödesschema för en bränslecykel där plutonium bränns som MOX-bränsle i lättvattenreaktorer medan övriga transuraner bränns i ADS-reaktorer. Utformningen av en sådan kombinationscykel lämnar naturligtvis många frihetsgrader. I denna studie har det antagits att MOX-bränsle tillförs lättvattenreaktorer från år 2025. Effekten på MOX-reaktorerna har satts till den högsta effekt som kan upprätthållas under 50 år baserat på de 9 350 ton bränsle som kommer från den svenska reaktorparken. På samma sätt har ADS-reaktorernas effekt satts till den som maximalt kan upprätthållas under 50 år. Starten av ADS-reaktorerna har satts till den tidigaste tidpunkten som är möjlig med tanke på möjligheterna att försörja dessa med bränsle i 50 år.

Baserat på ovan beskrivna förutsättningar har två scenarier belysts. I det första scenariot antas den första cykeln MOX-bränsle upparbetas till ADS-bränsle som sedan recirkuleras så många gånger som man hinner på 50 år. I det andra scenariot körs först MOX-bränslet två cykler innan det övergår till ADS-delen av bränslecykeln. Scenarierna skiljer sig åt vad beträffar antalet reaktorer liksom vad beträffar reaktoreffekt. I tabell 3-2 jämförs huvuddata för de båda scenarierna.

Tabell 3-2. Huvudantaganden för beräkningar av bränslecykler med en kombination av MOX- och ADS-reaktorer. I scenario 1 körs en cykel MOX-bränsle följt av ADS-cykler. I scenario 2 körs två cykler MOX-bränsle.

	Scenario 1	Scenario 2
Antal MOX-reaktorer (BWR)	1	2
Installerad effekt MOX-reaktorer	2 700 MW _{th}	4 100 MW _{th}
Driftperiod MOX-reaktorer	2025–2075	2025–2075
Avklingningstid för upparbetning av MOX-bränsle	6 år	6 år
Antal ADS-reaktorer	2	2
Installerad effekt ADS-reaktorer	1 740 MW _{th}	1 140 MW _{th}
Driftperiod ADS-reaktorer	2060–2110	2072–2122
Avklingningstid för upparbetning av ADS-bränsle	10	10

I figur 3-6 visas hur mängden transuraner utvecklats med tiden för de två scenarierna i figuren kallade MOX1→ADS respektive MOX1→MOX2→ADS. Skillnaden i transuranreduktion begränsas av att americium byggs upp mer i scenario 2 än i scenario 1. I scenario 2 fås 12 % mer reduktion av transuranmängden främst på grund av att den installerade effekten är högre än i scenario 1. Elproduktionen ligger 18 % högre i scenario 2 på grund av inväxning av ²³⁹Pu genom neutronabsorption i ²³⁸U under den andra MOX-cykeln.



Figur 3-6. Mängden transuraner som funktion av tiden för två scenarier med kombinationer av MOX- och ADS-bränsle.

4 Avfallsmängder

En av de centrala frågeställningarna vid användning av ADS primärt för reduktion av det högaktiva avfallets volym och livslängd är naturligtvis: Hur mycket avfall blir det? I ett pågående, delvis EU-finansierat forskningsprojekt kallat REDIMPACT studeras bland annat denna fråga. I projektet, som är planerat att pågå till slutet av år 2006, ska olika bränslecyklers avfallsströmmar karakteriseras och utvärderas vad avser avfallskonditionering, avfallsvolymer, kostnader, miljöeffekter, etc. I en av /NEA 2002/ organiserad studie redovisas bland annat mängden avfall för ett antal olika bränslecykler. En del av dessa bränslecykler påminner om dem som har ingått i de ovan refererade beräkningarna av /Dufek et al. 2006/. De skiljer sig emellertid åt vad beträffar antagna utbränningsgrader, avklingningstider mellan cyklerna, etc. I en nyligen utkommen NEA-studie /NEA 2006/ Redovisas tekniska avfallsproduktionsparametrar för ett antal bränslecykler. I tabell 4-1 sammanfattas uppskattningar av de genererade avfallsmängderna utgående från beräkningar av /Dufek et al. 2006/ och de av /NEA 2006/ angivna avfallsproduktionsparametrarna för följande fall:

- ADS – ADS-reaktorer drivs under 50 år på den maximala effekt som kan fås med hänsyn till tillgången på ADS-bränsle. Tillgången begränsas av att det använda ADS-bränslet måste avklinga en viss tid innan det kan upparbetas och ingå i nytt ADS-bränsle. Avklingningstiden har satts till 10, 3 alternativt 2 år.
- ADS – ”Realistiskt scenario” i vilket initialt fem ADS-reaktorer drivs. Drifttiderna för dessa fem initiala reaktorer varierar mellan 42 och 72 år. Efter 55 år tas en sjätte ADS-reaktor i drift och drivs i 45 år. Avklingningstiden mellan cyklerna har i detta fall satts till tre år.
- MOX – Det använda uranbränslet från det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet upparbetas och får ingå i MOX-bränsle, bestående av plutonium och utarmat uran. Använt MOX upparbetas och plutoniet överförs till nytt MOX etc. Här har antagits att MOX kan återcyklas maximalt tre gånger innan plutoniets isotopsammansättning omöjliggör ytterligare bränning i lättvattenreaktorer. Avklingningstiden mellan cyklerna har satts till sex år.

I tabellen redovisas som jämförelse även de avfallsmängder som beräknas uppstå från det nuvarande reaktorprogrammet om det använda bränslet direktdeponeras enligt KBS-3-metoden. I de olika transmutationsscenarierna ingår även upparbetning av det använda uranbränslet från de nuvarande reaktorerna.

Det bör också påpekas att uppskattningarna i tabellen är osäkra, speciellt för sådana anläggningar som det inte finns några drifterfarenheter från, till exempel ADS-reaktorer och anläggningar för upparbetning av ADS-bränsle. Det bör även påpekas att bakomliggande beräkningsförutsättningar beträffande utbränning och energitillgänglighet i ADS-reaktorerna är initierade bedömningar och inte baserade på faktiska erfarenheter liksom även den erforderliga avklingningstiden före upparbetning och bränsletillverkning. Det bör vidare påpekas att separationen och renframställningen av transuraner bygger på ännu ej utvecklad teknik.

Den totala mängden producerad elenergi är större i de fem transmutationsscenarierna än vad som fås från ”nuvarande reaktorer”. I tabell 4-2 redovisas därför de beräknade avfallsmängderna per producerad mängd elenergi.

Som framgår av tabell 4-1 medför transmutation att den totala mängden avfall som genereras ökar. Framförallt ökar mängden rivningsavfall. Dessutom tillkommer låg- och medelaktivt avfall, LILW liksom LILW från tillverkning av ADS-bränsle.

Tabell 4-2 visar att mängden avfall per TWh_e inte påverkas lika mycket för de flesta avfallskategorierna. Rivningsavfall från reaktorerna utgör undantaget eftersom den ökade energi-produktionen sker i nya reaktorer. Likaså blir mängden restbränsle större vid direktdeponering medan transmutationsscenarierna istället ger upphov till förglasat högaktivt avfall, HLW, och mer avfall från upparbetning/bränsletillverkning.

Tabell 4-1. Beräknade avfallsmängder för några olika transmutationsscenarier.

	ADS, 10 års avklingning	ADS, 3 års avklingning	ADS, 2 års avklingning	ADS, Realistiskt scenario	MOX i LWR, 3 cykler	Direktdeponering av använt uranbränsle från nuvarande reaktorer
Förglasat HLW, ton ¹	4 715	4 491	4 454	4 312	4 669	–
LILW från uppberedning och bränsletillverkning, m ³	25 300	25 900	26 000	26 200	30 000	5 600
LILW från reaktordrift, m ³	39 800	41 000	41 200	41 900	40 700	36 900
Rivningsavfall från reaktorer, ton ²	370 000	395 000	395 000	420 000	270 000	270 000 ³
Restbränsle för deponering, ton tungmetall	53	23	16	27	211 ⁴	9 350 ⁵

¹ Varav 4 200 ton härrör från uppberedning av det använda bränslet från nuvarande reaktorer.

² Osäkerheten i mängden rivningsavfall är minst 25 %, främst på grund av en förväntad utveckling av accelerator-tekniken.

³ Bygger på en beräknad erforderlig slutförvarsvolym på 178 700 m³ /SKB 2005/ och en antagen skrymdensitet på 1 500 kg/m³.

⁴ Varav cirka 50 ton utgörs av transuraner och resten av uran.

⁵ Varav 100 ton transuraner, 200–300 ton klyvningsprodukter och resten uran.

Tabell 4-2. Avfallsmängder per producerad TWh_e energi för olika scenarier.

	ADS, 10 års avklingning	ADS, 3 års avklingning	ADS, 2 års avklingning	ADS, Realistiskt scenario	MOX i LWR, 3 cykler	Direktdeponering av använt uranbränsle från nuvarande reaktorer
Totalt producerad energi, TWh _e	3 250	3 427	3 462	3 556	3 376	2 820
Förglasat HLW, ton/TWh _e	1,45	1,31	1,29	1,21	1,38	–
LILW från uppberedning och bränsletillverkning, m ³ /TWh _e	7,8	7,6	7,5	7,4	8,9	2,0
LILW från reaktordrift, m ³ /TWh _e	12,2	12,0	11,9	11,8	12,1	13,1
Rivningsavfall från reaktorer, ton/TWh _e	114	115	114	118	80	95
Restbränsle för deponering, ton tungmetall/TWh _e	0,016	0,007	0,005	0,008	0,062	3,3

Det avfall som genereras i transmutationsscenarierna innehåller mindre mängder av långlivade transuraner än det använda uranbränsle som i det nuvarande programmet avses direktdeponeras. I inget av de redovisade scenarierna når man dock målet att transmutera minst 99 % av transuranerna. Det ur denna synvinkel bästa scenariet är bränning i ADS-reaktorer med två års avklingningstid mellan cyklerna där restmängden transuraner utgörs av 16 ton vilket motsvarar transmutation av 84 % av det ursprungliga uranbränslets innehåll. Detta scenario förutsätter att man utvecklar de pyrokemiska separationsmetoderna så att en avskiljningsgrad på 99,9 % av de ämnen som ska transmuteras. Det är idag osäkert hur långt man kan nå med denna utvecklingsprocess.

När transuranerna bränns bildas klyvningsprodukter med kortare halveringstid än transuranerna. Detta medför att den totala radioaktiviteten ökar på grund av transmutationen jämfört med radioaktiviteten i det använda uranbränslet som utgör råvara. Klyvningsprodukternas kortare halveringstider medför givetvis också att deras radioaktivitet avtar snabbare än vad transuranernas radioaktivitet gör. Inom ramen för detta projekt har det inte funnits möjlighet att beräkna hur radioaktiviteten i det avfall som behöver slutförvaras i de olika scenarierna varierar med tiden. Man brukar dock ange att den tid det tar för det högaktiva avfallens radiotoxicitet att minska till en nivå som motsvarar toxiciteten av den mängd naturligt uran som gett upphov till avfallet minskar från drygt 100 000 år för dagens använda uranbränsle till mellan 500 och 5 000 år för det avfall som fås från transmutationsreaktorerna, se till exempel /IAEA 2004/. Även avfallet från transmutation måste således hållas isolerat från människan och miljön under lång tid sett ur ett mänskligt perspektiv. Det råder en enighet om att detta lämpligen sker med slutförvaring i ett geologiskt medium.

5 Kostnader

Kostnader för bränslecykler som inkluderar transmutation har beräknats i flera studier, se till exempel /Westlén 2001/ och /Dufek et al. 2006/. Alla sådana kostnadsuppskattningar blir med nödvändighet osäkra eftersom utvecklingen av de anläggningar som ingår i systemet befinner sig på ett forskningsstadium och anläggningarna därför endast finns som koncept. Såväl separationstekniken som ADS-tekniken förväntas inte finnas som demonstrationsanläggningar förrän om flera decennier. För att kunna minimera avklingningstiderna mellan de cyklerna i en ADS-bränslecykel och därmed optimera transmutationseffekten krävs en separationsteknik i dagsläget inte är utvecklad.

I /Dufek et al. 2006/ har elproduktionskostnaden uppskattats för de scenarier som redovisats i föregående kapitel. De uppskattade elproduktionskostnaderna ligger 60–90 % över kostnaderna för el som producerats i en ren urancykel. De högsta kostnaderna fås för el som produceras genom att bränna plutonium som MOX i lättvattenreaktorer medan el producerad med ADS-reaktorer hamnar i den undre delen av det beräknade kostnadsintervallet. Kostnaderna påverkas i väsentlig grad av antaganden om utbränning, nödvändig avklingning mellan cyklerna, etc. De beräknade kostnaderna är således endast indikativa.

6 Diskussion

I denna rapport redovisas en genomgång av transmutationstekniken liksom en belysning av konsekvenser av dess användande i Sverige. Transmutation har i den offentliga debatten ofta förts fram som ett sätt att ”oskadliggöra” kärnkraftens högaktiva avfall så att slutförvaringen antingen kan avsevärt förenklas eller till och med helt undvikas. Man kan dock konstatera att man även med utbyggd transmutation får väsentliga mängder radioaktivt avfall som kräver kvalificerad slutförvaring.

I denna rapport beskrivs teknik och anläggningar som skulle behövas samt diskuteras vilket stadium av utveckling som de olika nödvändiga teknikerna befinner sig. Inom uppdraget har beräkningar genomförts av en forskargrupp vid KTH av förändringarna av inventariet av transuraner för olika transmutationsscenarier liksom av elproduktion och kostnader för dessa scenarier.

Transmutationstekniken möjliggör en minskning av det högaktiva avfallets livslängd genom att framförallt transuranerna omvandlas till klyvningsprodukter med kortare halveringstider. Forskningen kring transmutation har fokuserats kring underkritiska så kallade ADS-reaktorer (Accelerator Driven System). Systemet bygger på att protoner accelereras upp till energinivåer i GeV-skala i ett elektromagnetiskt fält för att bringas att kollidera med en spallationskälla bestående av tunga atomer, till exempel bly eller en blandning av bly och vismut. Vid kollisionen splittras de träffade atomkärnorna varvid ett antal neutroner frigörs som kan användas för att klyva atomkärnorna i de ämnen, främst transuraner, som ska transmuteras.

För att transuranerna ska kunna klyvas krävs snabba neutroner. Av denna anledning kan inte vatten användas som kylmedel i reaktorn eftersom vattnet bromsar upp, modererar, neutronerna till så kallade termiska energinivåer på samma sätt som i en konventionell lättvattenreaktor. ADS-reaktorerna antas därför kylas med flytande bly alternativt ett eutektikum av bly och vismut.

ADS-reaktorer befinner sig i dagsläget på forskningsstadiet. Det är en allmän uppfattning att det kommer att ta flera decennier innan tekniken nått sådan mognad att en demonstrationsanläggning kan uppföras.

För att transmutationen ska fungera tillfredsställande så att det högaktiva avfallets livslängd reduceras väsentligt krävs att det använda uranbränslet från det svenska kärnkraftsprogrammet upparbetas och att upparbetningen kompletteras med en separation och renframställning av de ämnen som ska transmuteras. För en effektiv transmutation är det viktigt att processförlusterna vid separationen hålls mycket låga. Man brukar ange att om 99 % av transuranerna ska transmuteras måste processförlusterna i varje cykel understiga 0,1 %.

När transuranerna från det högaktiva avfallet har renframställts ska dessa ingå i kärnbränsle till ADS-reaktorer. Det pågår i dagsläget forskning som syftar till att få fram lämpliga bränsletyper för detta ändamål. Viktiga faktorer är här bränslets värmetekniska egenskaper samt förutsättningarna för att lösa upp bränslet i någon syra i samband med upparbetning. Huvudintresset riktas mot oxid- eller nitridbaserat bränsle alternativt bränsle i en metallmatris.

Det transuranbaserade ADS-bränslet är betydligt mer radioaktivt än det uranbränsle som tillförs lättvattenreaktorer. Detta innebär att all hantering måste ske strålningskärrat och fjärrstyrt. Transporter måste vidare ske i transportbehållare som liknar de som idag används för transport av använt uranbränsle. ADS-bränslet kräver dock sannolikt att dessa transportbehållare kompletteras med ett förbättrat skydd mot neutronstrålning.

Eftersom upparbetnings- och separationstekniken kräver omfattande och komplicerade kemiska anläggningar förefaller det rimligt att anta att denna tjänst köps från något annat europeiskt land. Upparbetning bedrivs idag i industriell skala bland annat i Frankrike (la Hague) och

Storbritannien (Sellafield). Dessa anläggningar måste dock kompletteras med anläggningar för separation och renframställning av transuraner. Sannolikt bör även tillverkningen av ADS-bränsle ske utomlands för undvikande av transporter av renframställda transuraner ”i bulk”. För att Sverige ska kunna nyttiggöra sig energin från ADS-reaktorerna bör dock dessa uppföras och drivas i Sverige. Det kan noteras att kärntekniklagen i dagsläget förbjuder vidare utbyggnad av nya reaktorer. Enligt den nuvarande svenska policyn ska vidare inte kärnbränsle upparbetas, bland annat på grund av risken för spridning av kärnvapenmaterial. För att möjliggöra transmutation måste således beslut om både lagändring och ändring av policy genomdrivas.

De beräkningar som genomförts vid KTH visar att man med ADS-tekniken skulle kunna reducera transuraninnehållet med 50–85 % inom en 50–100 årsperiod räknad från idriftsättandet av ADS-reaktorerna. Målet 99 % transmutation har i beräkningarna endast uppnåtts i teoretiska scenarier vars realism ur teknisk och ekonomisk synvinkel kan ifrågasättas.

En viktig faktor för att uppnå en hög transmutationsgrad är att man lyckas hålla den erforderliga avklingningstiden innan det använda ADS-bränslet upparbetas och nytt bränsle tillverkas av de kvarvarande transuranerna. Detta kräver att lämplig separationsteknik används. Forskning pågår avseende såväl våtkemiska som pyrokemiska metoder. De extraktionsmedel som förutses komma till användning i våtkemiska processer är strålningskänsliga och kräver därför förhållandevis lång avklingningstid innan bränslet matas in i processen. De pyrokemiska processerna anses allmänt tillåta kortare avklingningstider, men det är istället mer osäkert när och om erforderlig separationseffektivitet kan uppnås i sådana processer.

Enligt IAEA:s avfallskonventionens krävs att vid omhändertagande av radioaktivt avfall ska man sträva efter att inte lägga otillbörliga bördor på kommande generationer. De långa led- och driftstiderna som är förknippade med transmutation medför att ett ansvar överförs på kommande generationer. Det är således tveksamt om transmutation som strategi för slutligt omhändertagande i ett ”phase-out” scenario uppfyller avfallskonventionens krav.

Transmutation är i sig inte ett alternativ till slutförvaring. Transmutation medför ett samhälle som fortsatt har kärnkraft som en väsentlig energikälla.

7 Referenser

- Ahlström P-E (ed.), 2004.** Partitioning and transmutation – Current developments – 2004, A report from the Swedish reference group on P&T-research, SKB TR-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dufek J, Arzhanov V, Gudowski W, 2006.** Transmutation scenarios – Status and assessment report, SKB R-06-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gudowski W, Wallenius J, Tucek K, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Cetnar J, Jollkonen M, Lagerstedt C, Talamo A, Westlén D, Grisell A, 2004.** System and safety studies of accelerator driven transmutation. Annual Report 2003, SKB R-04-79, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- IAEA, 1997.** Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, INFCIRC/546, 24 December 1997.
- IAEA, 2004.** Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management, Technical Report Series no, 435, International Atomic Energy Agency, Wien.
- KASAM, 2004.** Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2004, Rapport från Statens råd för kärnavfallsfrågor, SOU 2004:67, Stockholm.
- NEA, 2002.** Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study, Organisation of Economic Co-operation and Development/ Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA, 2006.** Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste management, NEA report 5990, Organisation of Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, Paris.
- SKB, 1977.** Kärnbränslecykelns slutsteg – Förglasat avfall från upparbetning, KBS-1, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2005.** Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter, Plan 2005, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Skålberg M, Landgren A, Spjuth L, Liljenzin J-O, Gudowski W, 1995.** Partitioning and transmutation (P&T) 1995 – A review of the current state of the art, SKB TR 95-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Westlén D, 2001.** A Cost Benefit Analysis of an Accelerator Driven Transmutation System, Examensarbete vid KTH, Stockholm.