



Accelerator driven **Transmutation**

Evelyn Sokolowski

Verklighet eller förhoppning?

Under senare år har "transmutation" blivit ett begrepp inom kärntekniken som står för förnyelse och framtidsoptimism.

Fördelarna med den nya tekniken är framför allt att de långlivade ämnena i kärnavfallet kan minskas kraftigt, vilket ändrar tidsperspektivet på avfallsproblemet från hundra tusentals till hundratals år, samt att mängden energi som kan utvinnas ur bränsleråvaran kan ökas minst hundrafalt.

Vart tredje år granskar Statens kärnkraftsinspektion (SKI) det forskningsprogram som Svensk kärnbränslehantering (SKB) föreslår och som främst rör hanteringen av kärnkraftens avfall. I sin senaste granskning (april 1999) gör SKI bl a följande sammanfattande bedömning:

"...Transmutation som metod är förknippad med stora tekniska och ekonomiska osäkerheter som sannolikt kräver decennier av teknisk utveckling att överbrygga...

Anläggningarna blir också sannolikt så stora och komplicerade att Sverige inte ensamt förmår utveckla, bygga och driva dem...

Det bör framhållas att någon form av slutförvaring ändå kommer att behövas eftersom all långlivad radioaktivitet inte kan elimineras."

Analysgruppen delar denna försiktiga hållning av skäl som vi utvecklar närmare här. Sammanfattningsvis kan sägas att steget från principlösningar eller t o m pilotprojekt till kommersiellt gångbara system är mycket stort, vilket utvecklingen inom den "konventionella" kärnkraften tydligt visat.

Andra koncept med stora potentiella fördelar, som den snabba bridern, den gaskylda högttemperaturreaktorn eller den passivt säkra PIUS-reaktorn, har trots många års utvecklingsarbete hittills inte lyckats hävda sig på marknaden.

Framgången skulle vara mera given om de nya koncepten erbjöd attraktiva lösningar på annars oöverstigliga problem. Men flera av de problem som den nya tekniken sägs kunna lösa är överdrivna, och lösningarna troligen inte så problemfria som ibland görs gällande.

Ändå är de potentiella fördelarna så intressanta att fortsatt forskning och utveckling kring den nya tekniken är klart motiverad.

Vad är transmutation?

Accelerator drivna System ADS

Ersätter transmutation djupförvar?

Är ADS en angelägen energikälla?

Är ADS säkerhetsmässigt överlägsna?

Minskad risk för kärnvapenspridning?

Slutord

Vad är transmutation?

“*Transmutation*” är helt enkelt *omvandling* (av atomkärnor). Klyvningen av uran-235 i vanliga kärnkraftverk är således en transmutationsprocess. Detsamma gäller omvandlingen av svårklyvbart uran-238 – som är huvudbeståndsdelen i uran – till plutonium.

Numera har ordet framförallt kommit att beteckna transmutation i *accelerator drivna system (ADS)*.

Knappa marginaler

För att åstadkomma kärnomvandlingar använder man företrädesvis *neutroner* som projektiler, eftersom de saknar elektrisk laddning och därför inte stöts bort av de elektriskt laddade kärnorna.

Vid neutroninducerad *klyvning* spjälkas urankärnan i två lättare kärnor (*klyvningsprodukter*). Samtidigt frigörs 2–3 nya neutroner, se fig. 1.

Om åtminstone en av dessa står till förfogande för en ny klyvning, finns förutsättning för en *självunderhållande kedjereaktion*. Den energiproducerande processen kan alltså hålla igång sig själv

utan neutrontillförsel utifrån.

Men marginalen för en självunderhållande process är knapp. Överskottsneutronerna riskerar att absorberas i olika konstruktionsmaterial utan att bidra till kedjereaktionen, eller också kan de läcka ut ur systemet.

Konkurreras klyvningen ut av sådana processer, dör kedjereaktionen ut – reaktorn är *underkritisk*.

Vill man utnyttja reaktorn för en mängd andra transmutationsprocesser än klyvning stöter detta alltså på svårigheter på grund av brist på neutroner.

Mer neutroner

Vilka andra transmutationsprocesser är man då intresserad av? Framst är det omvandling av särskilt besvärliga radioaktiva ämnen som ingår i avfallet efter energiproduktionen.

Det kan också vara omvandling av vissa svårklyvbara ämnen (uran-238, torium-232) till lättklyvbara som kan bli till nytt kärnbränsle.

Eller man kan vilja framställa en del

radioaktiva ämnen för särskilda ändamål.

Ett sätt att få mer överskottsneutroner är att ansluta en stark yttre neutronkälla till den underkritiska reaktorhärden.

Den senare fungerar då som förstärkare för källan. Förstärkningen beror av hur nära kriticitet härden är. Om källan stängs av slocknar kedjereaktionen.

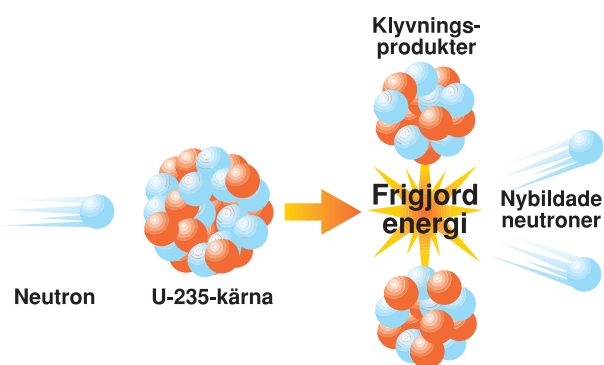
En intensiv neutronkälla kan erhållas om ett tungt ämne, som bly, bombarderas med *protoner* (= vätekärnor) *med mycket hög hastighet*.

Blykärnorna fragmenteras då i lättare kärnor och skurar av småpartiklar, däribland neutroner.

Processen kallas *spallation*, se figur 2. (Många av spallationsprodukterna är radioaktiva, flera av dem långlivade, och utgör alltså nytt kärnavfall.)

För att åstadkomma den erforderliga hastigheten (energin) på protonerna använder man en *accelerator*. □

Figur 1. Klyvning



I konventionella reaktorer är klyvning (fission) av uran-235 den viktigaste energiproducerande processen. En kärnklyvning frigör ungefär hundra miljoner gånger mera energi än förbränningen av en kolatom till koldioxid.

Klyvningen åstadkoms med en neutron som sonderdelar urankärnan i (vanligen) två lättare kärnor, "klyvningsprodukter". Delningen kan ske på många olika sätt, så att det bland klyvningsprodukterna finns ett stort antal olika kärnslag, många av dem radioaktiva.

Utöver klyvningsprodukterna frigörs 2–3 nya neutroner. Om åtminstone en av dessa klyver en ny urankärna, har vi en kedjereaktion.

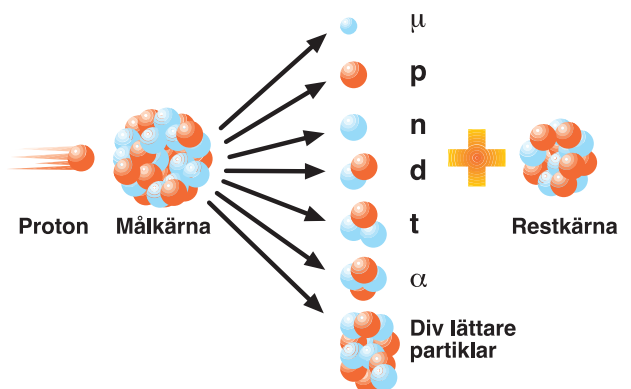
Figur 2. Spallation enl Ref. 1

När en proton med hög hastighet kolliderar med en kärna växelverkar den direkt med en del av de enskilda nukleonerna (protoner och neutroner) och stöter ut dessa från kärnan.

Samtidigt har kärnan i sin helhet tillförts så mycket överskottsenergi, att mindre partiklar – protoner, neutroner, heliumkärnor, m m – genast "kokar av" från kärnan.

På så sätt fås en skur av sekundärpartiklar där neutroner är de vanligaste. Dessa partiklar kan i kaskad ge upphov till nya kärnreaktioner.

Restkärnan är i regel endast något lättare än den ursprungliga målkärnan, men kärnor från praktiskt taget alla grundämnen lättare än målkärnan genereras.



ADS Accelerator drivna System

Tanken på hybridsystem av accelerator drivna neutronkällor och underkritiska reaktorhårdar (neutronförstärkare) är inte ny.

Den har emellertid aktualiserats på senare år tack vare de stora framsteg som gjorts på acceleratorsidan.

Två typer av accelerators är aktuella :

- *linjäracceleratorer*, där protonstrålen rör sig i rak bana
- *cyklotroner*, där strålen med hjälp av magnetfält böjs av i cirkulära banor, vilket gör acceleratoren mer kompakt.

I bägge fallen är det dock fråga om stora maskiner: för de protonenergi man siktar på skulle cyklotronen kräva ett utrymme på 50 x 50 m, medan linjäraccelerator skulle bli bortåt 1 km lång (2). Linjäraccelerator har större förutsättningar att leverera den proton effekt (protonenergi gånger -ström) på 10-200 megawatt som är önskvärd för fullstora system.

Svårigheter med uppskalning

Nuvarande maskiners prestanda ligger kring 1 megawatt, alltså minst en faktor tio för lågt.

Uppskalningen kan vara förenad med svårigheter, tex att höga protonströmmar kan göra det svårt att hålla ihop strålen så att den inte snuddar vid acceleratorväggen, vilket skulle ge drift- och strålskyddsproblem.

För att höja acceleratorernas prestanda kan det bli aktuellt att utnyttja relativt oprövad teknik, såsom supraledning, i stor skala.

Strålmålet

En central komponent i ADS-anläggningar är själva *strålmålet*, dvs neutronkällan av bly eller bly/vismut.

Den höga proton effekten på tio- till hundratals megawatt som tillförs strålmålet omsätts till värme och måste kylas bort.

Man utgår oftast ifrån att blyet skall vara i flytande form, och då troligen en integrerad del av neutronförstärkarens kylsystem.

Detta i sin tur kräver ett tätt "fönster" mellan strålmålet och acceleratorens vakuumbakgrunn. Fönstret kommer att vara utsatt för betydligt intensivare hög-

energibestrålning än man har erfarenhet av från konventionell kärnteknik.

För att undvika fönsterhaverier pga strålningsinducerade materialskador måste man räkna med täta byten, som kan bli besvärliga från strålskydds synpunkt.

Olika "tvärsnitt"

Hur den underkritiska reaktorhården – neutronförstärkaren – utformas blir beroende av det primära syftet med anläggningen.

Ett problem är att de olika kärnslag som man vill transmutera har olika lätt för att reagera med neutroner: man beskriver det som att de har olika "träffytor" eller "tvärsnitt" för neutroner.

Tvärsnitten kan skilja sig med många tiopotenser mellan olika kärnslag.

De med stort tvärsnitt transmuteras mest och binder upp tillgängliga överskottsneutroner, medan andra kärnslag hamnar i skuggan.

Det senare gäller bl a många klyvningsprodukter. För att komma åt dessa måste de fränkiljas kemiskt ("upparbetning") och transmuteras separat.

För flera av de aktuella ADS-koncepten föreslås att en upparbetningsanläggning finns i anslutning till eller t o m som en integrerad del av transmutationsanläggningen, vilket ställer stora krav på strålskyddet.

Tunga ämnen (bly) som kylmedel

Flertalet traditionella kärnkraftverk har vattenmodererade och -kylde *termiska* reaktorer. Huvudlinjen för ADS är *snabba* system, där neutronerna inte modereras utan får bibehålla hög hastighet. Sådana system ger bl a fler överskottsneutroner och därmed större transmutationspotential.

Man kan då inte använda vatten som kylmedel utan är hänvisad till tunga ämnen som flytande bly.

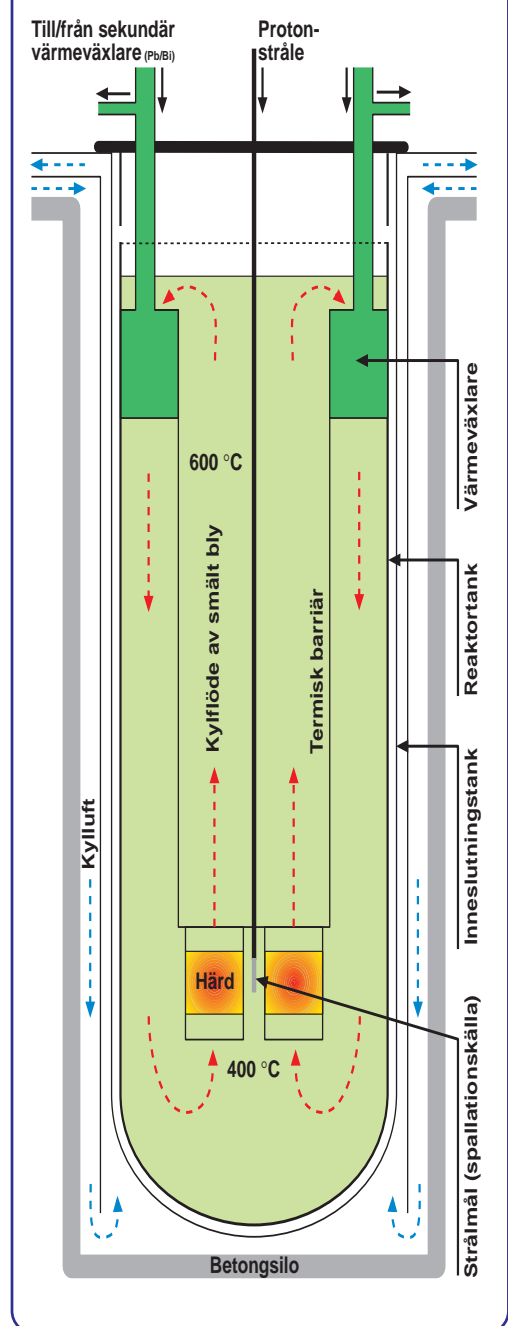
(Också principiellt annorlunda koncept har föreslagits, tex grafitmodererade termiska system, där bränslet cirkulerar i form av en saltsmälta som samtidigt utgör värmetransportmedium. Den tekniska detaljutformningen av tex strålmålet blir då givetvis en annan.)

Bly har flera i detta sammanhang

gynnsamma egenskaper, som hög värmekapacitet och lågt ångtryck. Det reagerar inte med neutroner och utgör en effektiv strålskärm.

Det har testats som kylmedel i det ryska programmet för atomdrivna ubåtar, men en del frågetecken återstår för de aktuella driftbetingelserna, tex långsiktig materialpåverkan. □

Fig. 3 Energiförstärkaren enl. Rubbia
(Ur ref. 1.)



Kan transmutation ersätta djupförvar?

Det kanske intressantaste potentiella användningsområdet för ADS är transmutation av långlivat kärnkraftsavfall.

Aktinider

En viktig komponent i förbrukat kärnbränsle är de så kallade *aktiniderna*, som bildas genom neutroninfångning i utgångsmaterialet uran.

De består av *plutonium, neptunium, americium och curium*, och utgör merparten av *den mycket långlivade delen* av kärnavfallet.

Plutonium är den mängdmässigt helt dominerande aktiniden och brukar räknas som en kategori för sig.

Det är till största delen lättklyvbart och kan återcyklas som kärnbränsle både i termiska reaktorer och framförallt i snabba brydreaktorer.

Klassningen som avfall kan därför ifrågasättas.

Det plutonium som bildas i kärnkraftverk är bundet i uranbränslet. Återcyklingen förutsätter därför att det uttjänta bränslet upparbetas, en process som Sverige avstått från av ekonomiska och politiska skäl.

En stor del av världens plutoniumlager härrör idag från skrotade kärnvapen. Även om plutoniumförbränning är möjlig, och beprövad, i vanliga kärnkraftverk, kan förbränningen bli fullständigare och inventariet minskas fortare med ADS.

Neptunium, americium och curium benämns *minoritetsaktinider* och räknas generellt som avfall.

För både plutonium och minoritetsaktinider är klyvning en dominerande transmutationsprocess, som resulterar i energifrigörelse och klyvningsprodukter.

Klyvningsprodukter

Den andra avfallskomponenten i förbrukat kärnbränsle är klyvningsprodukterna, som representerar ett stort antal olika grundämnen och kärnslag.

De allra flesta är icke-radioaktiva eller mycket kortlivade, och bidrar alltså inte till den långsiktiga avfallsproblematiken.

Ett fåtal klyvningsprodukter, främst cesium-137 och strontium-90, dominerar avfallets radioaktivitet *i ett medellångt perspektiv*, till ca 500 år, varefter aktiniderna tar över.

Dessvärre har dessa klyvningsprodukter ett litet tvärsnitt för neutroner, så att de inte minskar nämnvärt utan snarare byggs upp vid transmutation av oseparatorat avfall.

För cesium gäller dessutom att de radioaktiva isotoperna alltid uppträder tillsammans med stabilt cesium-133, som vid transmutation omvandlas till de radioaktiva former man vill bli av med.

Också *i det mycket långa tidsperspektivet*, som aktivitetsmässigt domineras av aktiniderna, spelar vissa långlivade klyvningsprodukter en roll, trots deras låga radioaktivitet.

Det beror på att de, i motsats till aktiniderna, är mycket lättrorliga och på lång sikt kan ta sig upp till biosfären från ett geologiskt slutförvar.

Exempel är teknetium-99 (214 000 år) och jod-129 (17 miljoner år).

Några av dessa ämnen, men inte alla, kan transmutteras effektivt. För samtliga gäller att deras bidrag till stråldoser i biosfären under alla omständigheter blir ytterst små.

De stråldoser som hanteringen vid transmutationen medför måste då vägas mot den ringa dos man eventuellt kan undvika genom transmutationsprocessen.

Geologiskt slutförvar ofrånkomligt

Den allmänt rådande uppfattningen är idag att transmutation av långlivade ämnen i kärnavfallet inte kan göras fullständig. Systemen och processerna är komplicerade, och det blir många små avfallsströmmar. Man talar om att kanske kunna minska mängden aktinider upp till en faktor 100. Återstoden, från ca 10 % till i bästa fall 1 % blir restavfall som måste långtidsförvaras.

Huruvida transmutation av långlivade klyvningsprodukter blir tekniskt och ekonomiskt möjligt är tveksamt. I alla händelser kommer geologiska slutförvar att behövas för det långlivade "restavfallet".

De långsiktiga kraven på ett sådant restförvar blir mindre än på ett förvar för uttjänt kärnbränsle.

Man måste dock hålla i minnet att det är klyvningsprodukterna som står för den initiala, höga radioaktiviteten i djupförvaret, och som därför också bestämmer dess storlek med hänsyn till värmeavgivningen till omgivande berg.

Som framgått ovan kan transmutation ge energi som biprodukt. Denna energiproduktion blir troligen en förutsättning för acceptabel driftekonomi. □

ADS som energikälla – ett angeläget mål?

Accelerator driven transmutation med huvudsyftet att producera el och samtidigt framställa mera klyvbart material (brydning) ligger sannolikt betydligt längre fram i tiden, bl a eftersom syftet tillsvidare inte fyller något starkt behov.

I motsats till ADS är de traditionella

kärnkraftverken i alla avseenden verifierade för detta ändamål.

Kärnbränsle är idag billigt, och någon brist – med åtföljande kraftig prisökning – väntas inte under överskådlig tid.

Enligt färsk prognoser (4) räcker de billiga urantillgångarna i 250 år med

nuvarande förbrukningstakt (man har då också tillgodoräknat sig förbränningen av klyvbart material från skrotade kärnvapen).

Stigande uranpriser skulle öppna marknaden för den sedan länge demonstrerade snabba brydreaktorn som, liksom ADS, är så bränslesnål att

råvarupriset förlorar i betydelse.

Stora uranförekomster, som idag är olönsamma, kan då räknas in i resursbilden och vidga perspektivet mer än hundrafalt.

I en fransk vision ser man framför sig stora elproduktionsparker, bestående av i huvudsak konventionella reaktorer (inklusive bridrar som bränner plutonium), kompletterade med ett mindre antal ADS för transmutation av det samlade avfallet av minoritetsaktinider (3).

Torium

I marknadsföringen av ADS-konceptet har möjligheten att bränna *torium* (via transmutation till lättklyvbart uran-233) lyfts fram.

I en toriumbaserad bränslecykel blir produktionen av långlivade minoritetsaktinider väsentligt mindre än i en uranbaserad. Å andra sidan sker transmutationen till uran-233 via ett strålskyddsmässigt besvärligt mellansteg.

Torium är mer rikligt förekommande än uran, men då uran inte på länge blir

någon bristvara, är det svårt att under överskådlig tid tänka sig något större kommersiellt intresse för en alternativ bränslecykel.

Det kan för övrigt nämnas att flera länder redan på 70-talet utvecklade neutron-snåla reaktorvarianter (tungvatten- och gaskyld högttemperaturreaktor) mot en toriumcykel, en utveckling som kom av sig av ovannämnda skäl.

ADS är alltså en av flera tekniker som kan utnyttja torium som energiråvara. □

Är ADS säkerhetsmässigt överlägsna?

En säkerhetsmässig fördel med ADS är att kedjereaktionen inte kan "skena", eftersom den är beroende av utifrån tillförda neutroner som stängs av med acceleratorn.

En olycka av tjernobylytp är alltså principiellt omöjlig åtminstone så länge marginalen mot kriticitet är tillräckligt stor.

(Anm. Denna fördel är väsentlig för system som arbetar med snabba neutroner och en hög andel tyngre plutoniumisotoper och minoritetsaktinider, där andelen fördröjda neutroner är avsevärt mindre än i konventionella lättvattenreaktorer.)

Det måste dock understrykas att i alla moderna reaktorer av *konventionell typ* har just denna olycksrisk i praktiken konstruerats bort genom att reaktorhärden har en inbyggd negativ effektåterkoppling som gör den självstabiliserande.

Därutöver finns ett antal oberoende yttre avställningsmekanismer. I vissa avancerade koncept (PIUS) är dessa mekanismer helt passiva.

Den olycksrisk som fortfarande är en realitet i nuvarande kärnkraftverk är överhettning av bränslet till följd av otillräcklig kylning.

Risken kvarstår även när kedjereaktionen avbrutits, eftersom radioaktiva klyvningsprodukter, som byggts upp i bränslet, fortsätter att avge strålning som omvandlas till värme. Denna risk finns emellertid i princip också i accelerator-drivna system.

Utvecklingen går dock mot passiva kylsystem med naturlig konvektion, såväl i accelerator-drivna som i konventionella, kritiska anläggningar.

Då det gäller reaktorsäkerhet bör alltså fördelarna med ADS i förhållande till konventionella reaktorsystem inte överdrivas. □

Minskad risk för kärnvapenspridning?

I kritiska reaktorsystem måste bränslet bytas ut relativt tidigt (efter ett energiuttag kring 45,000 megawattdygn per ton), allt eftersom de lättklyvbara ämnena förbrukats och nya, neutronabsorberande ämnes byggts upp, så att kriticitet inte längre kan upprätthållas.

Det använda bränslet innehåller då fortfarande en betydande mängd plutonium, som man kan vilja återcykla.

Detta erfordrar kemisk separation (upparbetning) som i dagläget sker i stora centralanläggningar som La Hague i Frankrike och Sellafield i England.

Det kan då inte uteslutas att renat

plutonium under processens gång kommer på avvägar och används för vapentillverkning.

Nuvarande system med internationell övervakning har dock hittills kunnat förhindra spridning av klyvbart material i den civila kärnbränslecykeln

I ett ADS kan förbränningen av plutonium drivas betydligt längre utan upparbetning – man talar om energiuttag på 150,000 megawattdygn per ton bränsle. (Hur realistiskt detta är med hänsyn till materialskador på bränslet återstår att se.)

Å andra sidan är ADS genom sin

höga transmutationspotential särskilt lämpade för storskalig framställning av vapenmaterial med anläggningsägarens goda minne.

Det kan nämnas att den relativt kraftfulla satsningen på ADS-utveckling i USA till en del varit betingad av behovet att framställa tritium för vätebomber genom transmutation.

Liksom konventionella kärnkraftverk i länder som anslutit sig till icke-spridningsavtalet kommer ADS-anläggningar att behöva spridningssäkras genom internationell övervakning. □

Slutord

ADS utgör ett stort forskningsområde med betydande utrymme för nytänkande.

Det engagemang som finns främst på akademiskt håll är därför av godo: det blåser nytt liv i den grundläggande kärntekniska forskningen, som stagnerat i och med att utvecklingen alltmer kommit att knytas till existerande industriprojekt.

Förnyelsen är viktig för bibehållandet av den rekryteringsbas för högkompetent

personal som tekniken långsiktigt behöver.

Som tidigare erfarenhet har visat, måste man dock vara försiktig med att dra växlar på förväntade forskningsresultat som ännu inte föreligger.

Industriell tillämpning av ADS förutsätter uppskalning av viktiga parametrar med tiopotenser i förhållande till nuvarande erfarenhet.

Relativt oprövade material i kombination med intensiva, högenergetiska

strålningsfält kan förutses ge problem, vilket många år av konventionell kärnkraft lärt oss.

Det interna strålskyddet kan ställas inför betydligt större utmaningar än i nuvarande kärnkraftverk, särskilt om separation av olika transmutionsobjekt (upparbetning) sker on-line.

Slutligen kräver ett genombrott för tekniken att anläggningarna som helhet kan uppvisa hög drifttillgänglighet under lång tid. □

Litteratur

- [1] Ö. Bernander. "Transmutationsteknik i accelerator drivna hybridsystem. En rapport framtagen på uppdrag av KSUs Analysgrupp". April 1999.
- [2] H. Condé. "Accelerator driven transmutation och energiproduktion". Kosmos 1998.
- [3] "Why Research on Accelerator-driven Transmutation Technology?", Proceedings from an international conference arranged by IVA 1997. IVA-M 318, 1998.
- [4] I. Lindholm. Analysgruppen vid KSU. Kärnkraftsfakta nr 18, sept 1998.
- [5] Å. Enarsson et al. "Separation och transmutation S&T 1997. En genomgång av nuläget". SKB Rapport R-98-06, 1998.

Analysgruppen vid KSU

*Per-Åke Bliseli*us, tekn lic, Sycon Energikonsult AB

Hans Ehdwall, radiofysiker, K S U AB

Carl-Göran Lindvall, radiologisk föreståndare, Barsebäck Kraft AB

Anders Pechan, utredn. sekr, Analysgruppen vid KSU

Agneta Rising, radiofysiker, Vattenfall AB

Gunnar Walinder, professor, strålningsbiolog

Carl-Erik Wikdahl, civilingenjör, EnergiForum AB