

Transmutationsteknik i acceleratordrivna hybridssystem

Rapporten är framtagen av Örjan Bernander, CoreTech, på uppdrag av Analysgruppen vid KSU 1999

1 Inledning

Det är ju något av ett naturens under att kärnreaktorer med en självuppehållande neutronkedjereaktion alls kan åstadkommas och därtill realiseras i storskaliga energiproducerande system. När den tekniken idag hunnit så långt i mognad, kan man inte annat än förundra sig över utsagor om "revolutionerande" *underkritiska* reaktorsystem, som man måste skjuta in vätekärnor i för att hålla igång reaktionerna. Nymodigheten sägs så småningom kunna ersätta de *kritiska* systemen. Är det fråga om utveckling eller regression, frestas man fråga sig. Vad kan det nya systemet göra som inte konventionella kritiska reaktorer klarar av?

En ny typ av kärnkraft – transmutationssystem

Under de senaste åren har i nyhetsartiklar om en ny typ av kärnkraft ställts i utsikt att denna kunde råda bot på påstådda svagheter med dagens kärnkraft. På det hela taget har nyheten därför mottagits med positivt intresse, om än i något avvaktande former. Den nya tekniken går under flera namn, bl a acceleratordrivna system (ADS), energiförstärkare (EA), transmutationssystem och hybridssystem (så kallat genom kombinationen av reaktor och accelerator).

Genom att som i Figur 1 koppla en underkritisk reaktor till en partikelaccelerator, liknande dem inom kärnfysikalisk grundforskning, kan i princip en mycket intensiv neutronkälla skapas. Poängen med denna "hybridreaktor" är att processen är fri från de tekniska begränsningar som krävs för att en självuppehållande kedjereaktion kan hållas igång. Detta ger utrymme att använda väsentligt fler neutroner i reaktorn för att inducera önskade kärnomvandlingar – transmutationer – än primärt för kärnklyvning.

Det är framförallt denna egenskap man vill ta vara på. Den större kapaciteten att transmutera olika kärnslag jämfört med kritiska system kan utnyttjas för att i större omfattning oskadliggöra långlivat radioaktivt avfall och för att producera nytt kärnbränsle. En annan intressant egenskap är att fissionseffekten kan regleras mycket enklare och med väsentligt ökad marginal till oavsiktlig överkriticitet.

Dessa fördelar har naturligtvis ett pris, både tekniskt och ekonomiskt. De elektriskt laddade partiklarna, protonerna, från acceleratorm – ett nytt energikrävande hjälpsystem – måste ledas in i reaktorns mitt till strålmålet som utgör den drivande neutronkällan. Det är tekniskt komplicerat och ännu oprövat i sammanhanget. Nya sammansättningar av reaktorhärden avseende bränsle, bestrålningsobjekt, kylning, och eventuellt moderering, kräver dessutom ett omfattande utvecklingsarbete.

Idén med acceleratordrivna system – ADS – för storskalig transmutation har sitt ursprung redan i slutet av 40-talet i USA. Man såg att det i princip var möjligt att producera lätt klyvbart material (^{233}U eller ^{239}Pu) utan att gå vägen över en kritisk reaktor. Problemet då var att acceleratorerna hade alltför låg stråleffekt. Idag tror man att fortsatta förbättringar av de avancerade acceleratorerna inom partikelfysiken möjliggör högintensiva neutronkällor baserade på så kallade spallationsreaktioner.

Frågan vi ställer oss är: Kan transmutationssystem som ADS verkligen realiseras och svara mot de förväntningar man har ställt i utsikt? Svaret är inte helt givet, så låt oss studera tekniken och visionerna bakom hur ADS ska kunna utnyttjas.

Vad är transmutation?

Transmutation är i kärnfysikaliska sammanhang ett annat ord för kärnomvandlingar. Ett kärnslag kan omvandlas till ett annat dels genom spontant radioaktivt sönderfall, dels genom kärnreaktioner, dvs i reaktioner med elementarpartiklar eller andra atomkärnor. I en kärnreaktor sker transmutation i stor skala genom att neutroner absorberas i bränsle, moderator och strukturer. Klyvningen av U-235-kärnor i två nya kärnslag induceras exempelvis genom reaktionen med en neutron.

Några andra exempel på reaktionsprodukter när atomkärnor fångar in en neutron är följande:

Väte	$H-1 + n \Rightarrow H-2$ (stabil)	Väte + neutron = tungt väte, deuterium
Zirkonium	$Zr-96 + n \Rightarrow Zr-97$	Zr är material i bränslekapsling
Torium	$Th-232 + n \Rightarrow Th-233$	Th-233 sönderfaller sedan spontant till U-233
Uran	$U-238 + n \Rightarrow U-239$	U-239 sönderfaller sedan spontant till Pu-239
Cesium	$Cs-137 + n \Rightarrow Cs-138$	Cs-137 är klyvningsprodukt, 30 års halveringstid
Teknetium	$Tc-99 + n \Rightarrow Tc-100$	Tc-99 är klyvningsprodukt, 210000 års halveringstid

Cs-137 och Tc-99 är exempel på radioaktiva klyvningsprodukter där transmutation med neutroner ger isotoper med väsentligt kortare spontan halveringstid.

Drivkrafter för utveckling av acceleratordrivna system – ADS

Även om vi i Sverige kommer att driva de befintliga kärnkraftverken vidare under deras tekniska livslängd, så är en rätt allmän föreställning att inga nya verk skall byggas. Bakom detta ligger en oro för och kritik av dagens kärnkraft, i huvudsak baserad på följande fyra punkter:

- Risken för reaktorolycka – att kedjereaktionen kan skena iväg okontrollerat genom felmanöver eller fel i utrustningen
- Sättet att oskadliggöra det radioaktiva avfallet är inte accepterat av alla
- Risken finns att vapenmaterial – plutonium (Pu) i renad form – kan komma på avvägar (särskilt gäller detta när det förbrukade bränslet kemiskt upparbetas)
- Kärnbränsle sägs vara en begränsad naturresurs och kan alltså inte bidra ”uthålligt” till framtida energiförsörjning.

Kraftindustrin har inte lyckats övertyga om att alla dessa frågor kan bemästras på ett för samhället godtagbart vis. Men om inga fler reaktorer ska byggas i vårt land, är det heller inte intressant att här utveckla en ny typ av kärnkraft. De totala avfallsmängderna från det svenska

programmet är så begränsade, att det planerade geologiska djupförvaret för direkt deponering av utbränt bränsle bör vara fullt acceptabelt. Vad driver i så fall intresset – och Sverige är inget undantag – för ADS som en möjlighet till bättre tekniska lösningar på de förmenta problemen?

Förr eller senare kommer insikten att en vidareutvecklad kärnkraft – sett i ett globalt perspektiv – är nödvändig med hänsyn till miljön. (Detta gäller med dagens kunskap och teknik varför förutsägelsen förstås kräver en brasklapp: nya tekniker vid exempelvis användning av fossilkraft, avancerad solkraft eller fysikaliskt/tekniska genombrott i övrigt, t ex för fusionskraften, kan ge helt nya förutsättningar.) Med globalt flera gånger så många kraftblock som idag blir avfallsmängderna så mycket större, att stark volymreducering blir av intresse, kanske en nödvändighet på längre sikt. Bränslecykler som inte medför renframställning av vapenmaterial är önskvärda. Vidare söks metoder att effektivare än idag resursmässigt utnyttja de *fertila* torium- och uranisotoperna från vilka lätt klyvbara – *fissila* – isotoper kan framställas.

ADS kommer in i bilden genom att erbjuda sin större kapacitet för transmutation jämfört med kritiska system. Detta kunde innebära dels att avfallsbördan lindras, dels att kärnbränsleresurserna blir praktiskt taget obegränsade. Nya sätt tillkommer att starkt reducera mängderna vapenmaterial. Förespråkarna hävdar också att risken för oavsiktlig reaktivitetsolycka starkt reduceras. På så vis skulle de nämnda fyra punkterna kunna avföras som möjliga hinder för en fortsatt kärnteknisk energisatsning.

Även om nytt vapenmaterial i princip kan produceras också i ADS (liksom i alla neutronproducerande system, t ex framtida fusionskraft) finns goda möjligheter att göra sådant material mycket svårt att framställa på användbar form.

ADS kontra kritiska system

Har då de kritiska systemen spelat ut sin roll i en fortsatt utbyggnad av kärnkraften? Ett inte alltför vågat antagande är att det kommer att dröja länge än, helt enkelt därför att de är baserade på etablerad teknik och att det tar minst ett par årtionden innan ADS kanske börjar byggas kommersiellt (och först som ett komplement till de kritiska systemen). De kritiska systemen har dessutom en stor utvecklingspotential i flera avseenden. Här ska de endast beröras kortfattat i syfte att ge en bakgrund till den fortsatta beskrivningen av ADS. Vi kan utgå från de kritiska reaktorsystemens prestanda relativt de ovan anförda fyra punkterna.

Den första punkten gäller risken av att reaktivitetsstörningar följs av ett reaktorhaveri. Med dagens eller nya generationers lättvattenreaktorer är den risken utomordentligt liten. Även om ADS blir mycket störningstålig är det inte på detta område som de avgörande fördelarna ligger. För framtida snabba system med bränsle med liten andel fördröjda neutroner kan dock en ökad säkerhetsmarginal för ADS vara betydelsefull.

Jämförelser mellan kritiska system och ADS är intressantast för de tre sista punkterna som berör kapaciteten att transmuttera olika kärnslag. Med tanke på råvaruresurser har ju bridning via uran/plutonium-cykeln i snabba reaktorer sedan länge prövats och demonstrerats. Även torium/uran-cykeln har provats i ett termiskt lättvattensystem. Återföring av plutonium i LWR efter upparbetning av bestrålat uranbränsle är i dag beprövad teknik. En effektivare minskning av Pu-inventarierna via en mera fullgången förbränning av Pu i både snabba och termiska system kan i princip ske med en vidareutvecklad bränsleteknik genom att använda annat bärarmaterial än uran för att minska nybildningen av Pu. När det gäller avfallsförbränning kan

fortsatt utveckling av snabba system i viss utsträckning gynna reduktionen av mängderna för övriga högre aktinider ("minor actinides", MA).

ADS kan sannolikt visas allmänt klara dessa transmutationer effektivare än kritiska system genom sin större transmutionspotential. Till detta bidrar dessutom att bränslets utformning och fördelning kan optimeras friare i ADS genom att mindre hänsyn kan tas till reaktivitetsbeteendet och att reglerstavar kan undvaras.

ADS har ytterligare en fördel i att mycket högre neutronflöden kan åstadkommas än vad som är praktiskt möjligt i kritiska system. Det möjliggör i princip att den del av avfallet som har mycket låga reaktionssannolikheter kan förbrännas inom rimliga tider.

2 Accelerator drivna system (ADS)

2.1 Funktionsprincip

En reaktor som drivs av en "yttre" neutronkälla har en klart annorlunda neutronfysik jämfört med sedvanliga kritiska system. I ADS är reaktorn underkritisk med några få reaktivitetsprocent, vilket innebär att den effektiva multiplikationskonstanten $k < 1$ (k ger förändringen av mängden neutroner från en "generation" till nästa i kedjereaktionen). De kedjeprocesser som initieras av tillförda neutroner, och som ger en självuppehållande neutronkedjereaktion i kritiska system, dämpas och dör ut.

För att trots detta upprätthålla ett neutronflöde och utvinna fissionsenergi krävs att nya neutroner kontinuerligt tillförs från en källa som är oberoende av kedjereaktionen. Detta ser vi t ex när man i en avställd reaktor ändå kan mäta ett neutronflöde med startdetektorerna. Källneutronerna kommer i det fallet i huvudsak från det spontana sönderfallet av högre aktinider (främst curium) som bildats i bränslet. I medel initierar alltså varje källneutron en ny, men avgränsad kaskadprocess av fissioner och neutronalstring. Man säger att reaktorhärden ger en *förstärkning* F av den yttre källan genom *underkritisk multiplikation* (se faktaruta Underkritisk multiplikation). Totaleffekten P för en källa med styrka S neutroner per sekund ges enkelt av

$$P \sim S \cdot F = S / (1 - k) \text{ när } k < 1.$$

Neutronflödet och därmed fissionseffekten beror alltså av både den yttre källstyrkan och k -värdet. För t ex $k = 0,95$, som ofta anförs som typvärde för ADS, är förstärkningen 20 gånger. För att ge en viss kontinuerlig fissionseffekt behöver källan i detta fall alltså producera 5 % av neutronerna, dvs källan ska stadigt tillföra de neutroner som fattas för att, effektivt sett, upprätthålla en obruten kedjereaktion. Figur 1 visar effektsambanden i ett ADS och ger exempel på parameter värdena.

Underkritisk multiplikation

Förstärkningen F av källneutronerna i ett underkritiskt system – så kallad underkritisk multiplikation – beror av multiplikationskonstanten k . Innebörden av k är att det för varje neutron som klyver en atomkärna i medeltal bildas netto k nya neutroner som ger nya klyvningar. Summan (över successiva generationer i kaskaden) av alla sådana neutroner när en tillförd källneutron klyver en atomkärna blir då i medel

$$F = 1 \times \{1 + k + k^2 + k^3 + \dots\} = 1 / (1 - k), \text{ om } k < 1 \text{ (underkritiskt system).}$$

Med $k = 0,95$ blir alltså $F = 20$, dvs 19 nya neutroner som medfört klyvning har tillkommit utöver den initierande källneutronen. För $k = 0,99$ blir $F = 100$.

2.2 Spallation och strålmål

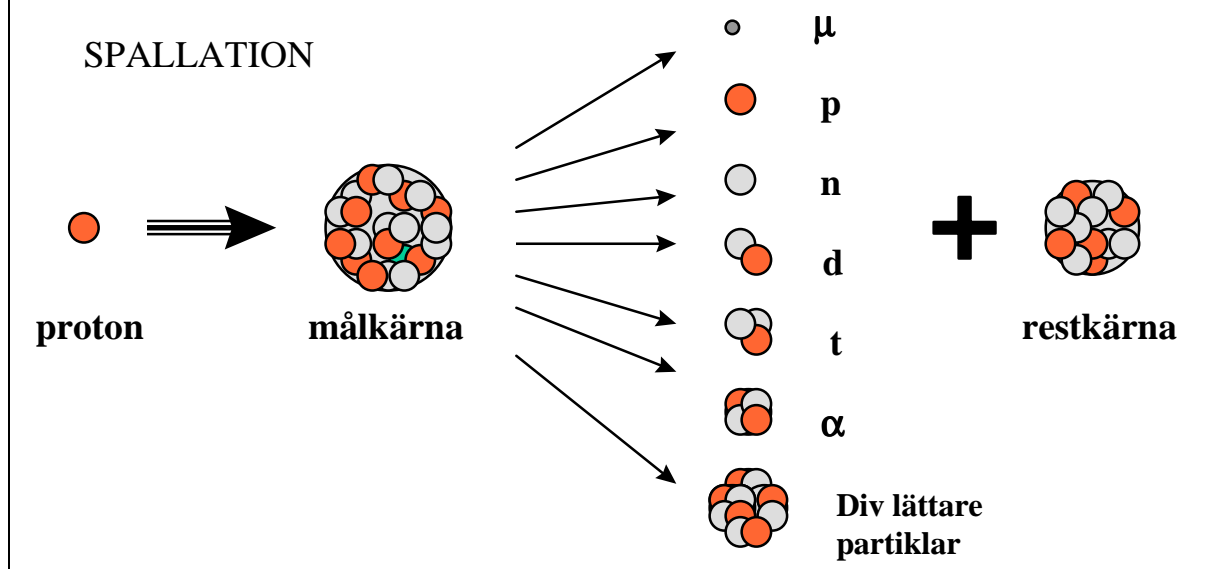
För att få en brukbar fissionseffekt med $k = 0,95$ krävs alltså en mycket stark källa, ca $4 \cdot 10^{18}$ neutroner/s för 1000 MW termisk energi. Med så kallad spallation eller spjälkning av atomkärnor i ett strålmål i reaktorn är detta möjligt. Strålmålet beskjuts med högenergipartiklar, t ex protonerna från en accelerator (se faktaruta om *Spallation*). Denna accelererar protonerna till energier uppåt 1000 miljoner elektronvolt (MeV) eller mer. Detta är 500 gånger större än medelenergin för neutroner (ca 2 MeV) från fission. De flesta av neutronerna, som uppstår vid spallation, har energier ungefär som vid fission, men en mindre andel, kanske någon procent, får energier uppåt 150 MeV eller mer och har stor materialgenomträngningsförmåga.

Av intresse är *neutronutbytet* per proton (Y i Figur 1). Utbytet beror av strålmålets storlek och form och ökar med protonenergin och målkärnornas atomvikt. Protonenergier från lägst 500 MeV och uppåt är önskvärda, eftersom reaktionssannolikheten mellan protonen och någon kärna i strålmålet då närmar sig 100 %. Strålmål av bly, eller av bly plus vismut (ett eutektikum) som har låg smälttemperatur, nämns oftast och kan ge drygt 25 neutroner per proton. Också torium och uran är tänkbara material och ger ännu högre utbyte.

Genomträngningen av en 1000 MeV (1 GeV) proton i bly är ca 80 cm. Huvuddelen av protonernas rörelseenergi deponeras i strålmålet, som alltså behöver kylas. Vid höga stråleffekter kan en metallsmälta användas som cirkuleras till en kylkrets. Nedbromsningen och därmed energidepositionen i blyet av de elektriskt laddade sekundärpartiklarna, sker i en flamlignande fördelning. De elektriskt neutrala neutronerna diffunderar ut i strålmålets omgivning – ofta kallad för ”mantel” – där det klyvbara bränslet finns.

Restkärnorna efter spallation och transmutationer i övrigt är i regel radioaktiva. Medan de flesta reaktionsprodukterna snabbt sönderfaller till stabila kärnslag kan andra bygga upp ett långlivat radioaktivt inventarium. Strukturmaterialen kring en källa, som utsätts för den högenergetiska partikelstrålningen, får ändrade kristallinska egenskaper som påverkar mekanisk hållfasthet och kemiskt beteende. Kring dessa problem krävs omfattande forskning.

När en proton i 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. Även pi-mesoner bildas och bromsas ned i omgivningen. Restkärnan är i regel endast något lättare än den ursprungliga målkärnan, men kärnor från praktiskt taget alla grundämnen lättare än målkärnan genereras.



2.3 Accelerator och stråleffekt

Det finns i grundforskningsvärlden två huvudtyper av accelerators som är lämpliga för att generera protonstrålen som infaller mot strålmålet i spallationskällan. De är den cirkulära cyklotronen och linjäracceleratoren ("linac"), som båda använder radiofrekventa elektromagnetiska fält för att accelerera protonerna (eller andra joner).

Som exempel på en cyklotron – för övrigt kraftigast i världen just nu – kan nämnas den i Paul Scherrer Institut i Schweiz. Maximal protonström är ca 1,5 mA med energin 650 MeV, alltså en stråleffekt (dvs ström x effektivt spänningsfall) på nära 1 MW. Protonerna kan bland annat avlänkas till ett strålmål (kallat SINQ) för att genom spallation ge en stark neutronkälla för grundforskningen vid institutet. Cyklotronen ska inom några år kunna ge en ström på ca 5 mA (effekt 3,25 MW). För cyklotroner tycks ca 700 MeV och 15 à 20 mA utgöra högsta praktiskt möjliga partikelenergi respektive protonström.

Med en linjäraccelerator kan betydligt högre protonströmmar och -energier nås. Värdet man nämner är på upp till 250 mA för protoner med energier på över 1 GeV. I Los Alamos-laboratoriet i New Mexico finns en linac, LANSCE (LA Nuclear Science Center), på ca 1 MW stråleffekt och som tjänar som modell för utvecklingen av prestanda.

För att generera neutronkällstyrkan $4 \cdot 10^{18}$ n/s för 1000 MW fissionseffekt fordras ca $1,3 \cdot 10^{17}$ protoner/s (om $k = 0,95$ och neutronutbytet per proton är ca 30). Detta motsvarar en protonström om ca 21 mA med 1 GeV protoner, dvs en effekt på 21 MW. Stråleffekten måste alltså

ökas kraftigt i en ny generation accelerators för att svara mot kraven för ADS. Detta gäller även om den underkritiska förstärkningsfaktorn F ökas till, säg 50, genom att k -värdet sätts till 0,98 (istället för 0,95). Stråleffekter på lägst 10-50 MW torde behövas, beroende på systemuppgift.

Acceleratorspecialisterna hävdar att en uppskalning i effekt är fullt möjlig tack vare modern teknik (bl a vid alstring av det radiofrekventa fältet och användning av supraledande komponenter) och att systemets verkningsgrad, protonstråleffekt relativt energiåtgången för accelerators drift, kan göras hög – större än ca 45 %. Naturligtvis måste systemet också ha en mycket hög tillgänglighet för oavbruten drift, något som ställer stora krav på konstruktionen.

2.4 Koppling mellan accelerator och strålmål

Protonstrålen, några mm i diameter, leds från acceleratoren via ett vakuumrörssystem med avlänkningsmagneter till strålmålet i reaktorn. När strålmålet består av smält material kan vakuum förstöras av uppkommande ångor, även om ångtrycket är lågt som för bly och vismut. En vakuumpärr och därmed ett ”fönster” för protonstrålen, nu några kvadratcentimeter i tvärsnitt, kan därför behövas. Fönstret kan bestå av en tunn, frekvent utbytbar platta av lämpligt material.

2.5 Reaktorhärden

Spallationskällan placeras centralt i härden som består av bränsle, kylmedel och eventuellt moderator. I härden (manteln) avtar neutronflödet med avståndet från källan, som med bly eller bly/vismut har en aktiv volym av storleken $\phi 0,5 \times 0,8 \text{ m}^3$. Hur stark dämpningen är beror av härdens sammansättning och k -värdet. En lättvattenmodererad härd synes olämplig eftersom effektvariationen över härden lätt blir mycket kraftig. Däremot kan möjligen tungvatten- eller grafitmodererade system ge rimlig effektfördelning om härdvolymen inte är alltför stor. Bäst i detta avseende är kanske snabba system, dvs sådana där huvuddelen av neutronerna har en energi större än ca 1 keV, exempelvis i natrium- eller blykylda härdar.

Med en mycket stark källa kan neutronflödets rumsfördelning i princip utnyttjas för att fylla olika uppgifter. Närmast källan, där neutronflödet kanske uppgår till mer än 10 gånger det i en lättvattenreaktor, bestrålas lämpligen vissa aktinider och valda klyvningsprodukter för effektiv transmutation (se faktaruta om *Reaktionshastigheter för transmutation*). I en mellanzon placerar man ordinärt klyvbart bränsle för energiproduktion och längst bort från källan sker t ex bridning med ^{238}U eller ^{232}Th .

I kritiska system är det en förutsättning att systemet är självreglerande, eftersom vissa driftstörningar annars kan medföra otillåtna effekttökningar. Detta gör att bränslegittret inte optimeras fullt ut med avseende på neutronutnyttjningen. I ADS däremot är, tack vare underkriticiteten, toleransen för störningar större, varför optimeringen av härdens sammansättning kan drivas längre. Vidare kan reglerstavar undvaras (se nedan under 3.1) vilket också gynnar neutronekonomin. (I dagens LWR förbrukas 4–5 % av neutronerna vid parasitisk absorption i styrstavarna eller annan absorber.) För en given bränslesammansättning kan därmed bättre bränsleekonomi uppnås.

Reaktionshastigheter för transmutation

Sannolikheten för att en neutron ska fångas in av en atomkärna uttrycks med att ange en effektiv träffyta, ett "tvärsnitt". Storleken för tvärsnittet per atom (beteckning σ) ges i måttet "barn" (b), som är ytan 10^{-24} cm^2 . Reaktionshastigheten (transmutationer per sekund) i en volym av ett ämne beräknas sedan som produkten av tvärsnitt, atomtätet och neutronflöde.

Tvärsnittet varierar starkt med slaget av kärna och med neutronens rörelseenergi. Exempelvis har ^{235}U och ^{238}U för klyvning med långsamma (termiska) neutroner tvärsnitten 582 b respektive noll b, medan motsvarande för ren absorption (utan klyvning) är 94 b respektive 2,7 b. Med sådana tvärsnitt och de neutronflöden som är vanliga i dagens reaktorer kan fissionsvärme bortföras utan att bränslet tar skada och tidsförloppen för reaktivitetsåterkopplingar blir acceptabelt snabba.

Spallationskällan i ADS tillåter emellertid att generera väsentligt högre neutronflöden än i kritiska system – 10 till 50 gånger – tack vare den större friheten att utforma bränslet och marginalen till överkriticitet. Det ger fördelar vid omvandlingen av icke önskade kärnslag som ofta har låga tvärsnitt.

Bland annat är det möjligt att i de höga flödena väsentligt förkorta tiden för att bränna klyvningsprodukter som t ex ^{99}Tc ($\sigma = 20 \text{ b}$), ^{129}I (18 b) och ^{135}Cs (9 b). Vissa aktinider, t ex ^{237}Np och ^{241}Am , kan transmutteras effektivare efter neutronabsorption. ^{238}Np , som uppstår vid neutroninfångning i ^{237}Np , hinner exempelvis klyvas direkt istället för att sönderfalla till en kärna som på nytt "stjäl" en neutron innan klyvning kan ske.

3 Reaktorns drift

3.1 Driftegenskaper

Effektreglering

Som tidigare nämnts beror effekten hos ett underkritiskt system av multiplikationsfaktorn k och källstyrkan S . Ett reaktorsystem med konstant yttre källstyrka är, jämfört med kritiska system, relativt okänsligt för reaktivitetsändringar så länge det är klart underkritiskt. En ändring med så mycket som en hel procent i k från t ex 0,95 till 0,96 ökar underkritiska förstärkningen och därmed effekten med endast 25 % till ett nytt stationärt tillstånd. Detta pareras lätt med att minska S motsvarande mycket, dvs minska protonströmmen. Enklast sker alltså effektregleringen med att styra acceleratoreffekten. Reglerstyrstavar kan helt undvikas. Detta är en klar skillnad jämfört med kritiska system som kräver effektreglerande mekanismer i anslutning till härden.

Vid en effektnedtagning stänger man alltså helt enkelt av acceleratoren. Självfallet avtar där- efter neutronflödet på samma sätt som i ett kritiskt system (en faktor 0,1 per tre minuter för ett ^{235}U -baserat system). Däremot kan man behöva säkerhetsstyrstavar för att garantera att systemet inte närmar sig kriticitet eller överskrider något valt k -värde (t ex 0,99) till följd av möjliga reaktivitetsändringar.

Driftvillkor

För systemoptimeringen ska k under en driftcykel vara så konstant som möjligt. Den maximala protonström, som kontinuerlig fulleffektdrift för detta k fordrar, ger då underlag för att dimensionera acceleratoren. Från säkerhetssynpunkt kan inte en oavsiktlig strömökning leda till en besvärande övereffekt. En följd av kravet är också att bränslesammansättningen, inklusive bestrålningsobjekt för transmutation, behöver dimensioneras noga.

Nödkylningskrav

Precis som för kritiska system måste efter ett reaktorstopp kylsystemen kunna kyla bort resteffekten från radioaktiviteten i bränslet för att inte skada härden. Här bör man helst finna tekniska lösningar med passiv verkan. Med metalliska kylmedel har systemet lågt drifttryck och passiv kylning är troligen lättare att åstadkomma.

3.2 Energiutbyte

Figur 1 visar relationerna mellan komponenterna och effektutvecklingen i systemet. Begreppet *energiförstärkare* (Energy Amplifier, EA) syftar på att den till acceleratoren inmatade (elektriska) effekten ger en högre (termisk) uteffekt från reaktorn. Detta framgår av att reaktoreffekten P är proportionell mot källstyrkan S (dvs $S \sim P_{prot} \cdot Y$). Förstärkningen är i exemplet av storleken $G = 21$. Ser man till utmatad elektrisk effekt till nätet blir den totala förstärkningen $G_{tot} \approx 7$.

För att av den till acceleratoren inmatade effekten ska ge en tillfredsställande effektförstärkning framgår av sambanden i Figur 1 att antalet fissioner per proton ($Y \cdot F / v$, där v är antalet avgivna neutroner per fission) måste vara väsentligt större än kvoten mellan energiutbytet per klyvning och protonenergin, E_{fiss}/E_{prot} . I övrigt bör förstås verkningsgraderna η vara så höga som möjligt.

Hjälpkraften till acceleratoren utgör i exemplet närmare 13 % av elproduktionen. Det är givetvis angeläget att om möjligt reducera denna stora effektpost. Olika sätt är att öka neutronutbytet (Y) per proton eller öka k -värdet, som ökar den underkritiska multiplikationen F . Med exempelvis $k = 0,98$ (i stället för 0,95) blir $G = 52$, $G_{tot} = 20$ och hjälpkraftbehovet ca 5 %. Valet av lämpligt k -värde beror emellertid av systemets uppgift och reaktivitetsegenskaper.

4 Systemuppgifter

4.1 Framtidsscenario

För att bedöma vilken plats ADS över huvud taget kan få i ett framtida energiproduktions-system måste vi förutsätta att kärnkraften kommer utgöra en stor del av energiproduktionen under nästa århundrade. Vi kan då anta att den vidareutvecklade lättvattenreaktorn (LWR), baserad på uranbränslecykeln, i varje fall under de första 30 till 50 åren är den förhärskande reaktortypen. När priset på uranbränsle ökar starkt till följd av höga råvarukostnader ersätter

efter hand olika slag av blyreaktorer de etablerade LWR. Också torium kan då bli en viktig bränsleråvara. Förutsägelse om tidpunkten då detta sker har ständigt förskjutits; idag kan man gissa på mitten av nästa århundrade, men det beror självfallet starkt på den takt varmed kärnkraften ökar och på om fortsatt prospektering ger väsentligt mera av billigt uran.

Med detta perspektiv fortsätter inventarier av förbrukat bränsle och radioaktivt avfall att öka. Efter omkring år 2020 kommer volymerna ha växt bortom nu aktuell planering för att deponera avfallet. Frågan är om avfallet fortsatt ska hanteras på samma sätt som tidigare eller om nya lösningar krävs. ADS erbjuder ett alternativt sätt att behandla avfallet. Men i så fall är det angeläget att en seriös bedömning av hybridssystem kommer igång snart för att ge behövlig tid att utveckla tekniken.

Det kommer att dröja lång tid innan även ett framgångsrikt utvecklingsprogram av ADS leder till att de första kommersiella anläggningarna kommer till stånd – kanske till 2020-talet. Orsaken är att det är på många områden man först måste utveckla och verifiera tekniken.

4.2 ADS-tillämpningar

Som ett mått på överskottet av neutroner för transmutation i ADS kan man ange antalet *neutroner per fission* som är tillgängliga för detta. Då har behovet av neutroner för att upprätthålla den underkritiska fissionsprocessen tillgodosetts för det valda k -värdet. Det gäller att hushålla med överskottet, som man kan prioritera för olika transmutationsuppgifter. I grunden innebär denna flexibilitet att man kan ”bränna vilka kärnslag som helst”.

Vilka tillämpningar av ADS är då av primärt intresse? Man kan se utvecklingen av ADS i ett längre tidsperspektiv där uppgifterna utvidgas efter hand som tekniken förfinas och äldre system fasas ur energiproduktionssystemet. Närmast i tiden ligger rimligen att ta fasta på ADS kapacitet att transmuttera avfallet från lättvattenreaktorerna för att reducera volymerna. Energiproduktion blir då en sekundär uppgift, fastän viktig för driftekonomin. ADS är i ett sådant sammanhang ett relativt begränsat komplement – kanske av storleken 10 % - till tänkta nukleära energiparker med LWR och senare med kritiska blyreaktorer.

Längre fram övergår ADS till att primärt generera energi, förmodligen som blysystem, vilka producerar nytt bränsle med så liten aktiniduppbyggnad som möjligt. Torium kan komma att spela en väsentlig roll både som råvara och med tanke på att just aktinidbildningen minskar starkt jämfört med användningen av uran-238.

Hur stort det nämnda neutronöverskottet blir beror givetvis på hur väl man kan optimera systemet, något som man nu studerar på skilda håll. Spallationskälla, kärnbränsle och avfall ska ges form och fördelning för bästa utnyttjning. Om belastningen från icke klyvbara ämnen blir större än avsett innebär det dock inte att systemet stänger av sig självt (liksom i ett kritiskt system) utan bara att effekten minskar när multiplikationskonstanten k avtar och att driftekonomin blir sämre.

Vad består avfallet av?

Man kan dela upp avfallet i följande komponenter:

- Klyvningsprodukter som uppstår vid all fission

I huvudsak består de av relativt kortlivade kärnslag så att den helt dominerande delen av radioaktiviteten har försvunnit inom 500 år. En mycket liten andel långlivade ämnen, om än med mycket svag strålning, förtjänar dock uppmärksamhet eftersom de är lösliga i vatten. De är teknetium-99, jod-129 och cesium-135 med halveringstider från 0,2 till 16 miljoner år.

- Plutonium

Användningen av uranbränsle genererar flera isotoper av vilka ^{239}Pu och ^{241}Pu är lätt klyvbara. ^{239}Pu har den längsta halveringstiden på 24000 år. Plutonium kan återföras i LWR för att ge nyttig energi, men efter ett par upprepningar blir inslaget av de tyngre isotoperna och övriga aktinider en besvärande reaktivitetsbelastning.

- Övriga aktinider

Dessa avser framför allt ^{237}Np , ^{238}Pu , Am och Cm, som bildas vid bestrålning av uranbränsle. De sänder ut alfastrålning och deras sönderfallskedjor ger en del långlivade isotoper.

Oskadliggörande av plutonium

Idag finns två slag av Pu-inventarier. Ett är innehållet i förbrukat bränsle, som t ex vi i Sverige (enligt nuvarande planer) ska oskadliggöra genom att direktdeponera i berggrunden. Pu förblir i detta fall orenat och uppblandat med andra ämnen. Ett annat inventarium uppstår vid separation av Pu från det använda bränslet genom kemisk uppberedning, vilket sker i flera länder. Sådant renframställt Pu vill man förbruka genom att återföra det som bränsle till reaktorerna. Återföringen kan ske i en takt så att inventariet inte ökar, men det förblir ändå rätt stort.

Oskadliggörande av övriga aktinider, "minor actinides" (MA)

Övriga aktinider är de alfaaktiva kärnslag som tillsammans med dotterprodukterna bildar långlivade sönderfallskedjor. Radiotoxiciteten bestämmer i huvudsak hur länge ett djupförvar vid deponering behöver vara intakt mot biosfären. Speciellt gäller det Np-, Am- och Cm-isotoperna, se Figur 2 – Transmutation vid bridning. Genom att destruera en stor del av dessa kärnslag kan volymerna i ett avfallslager för restmängderna reduceras väsentligt.

Neutronbestrålning klyver antingen MA direkt eller först efter transmutation till kärnor som i sin tur lättare kan klyvas. Samtidigt alstrar reaktionerna förstått nyttig fissionsenergi. I ett hårt neutronspektrum i snabba reaktorer sker det bäst och prov har gjorts och pågår i speciellt Frankrike på hur man ska dimensionera bränslestavar med MA. Men även termiska system kan ge god verkan ifall man bestrålar MA i mycket höga neutronflöden (se faktaruta Reaktionshastigheter för transmutation, sid 8).

Förbränning av vissa klyvningsprodukter

^{99}Tc , ^{129}I och ^{135}Cs är framförallt de långlivade kärnslag som man önskar destruera (se fakturata Radioaktivt avfall). De behöver alltså separeras från övriga klyvningsprodukter innan de transmuterar till kortlivade kärnor i ett ADS. På grund av den låga reaktionssannolikheten tar det lång tid, men mängderna är å andra sidan relativt små. För att nå en effektivt kort halveringstid på några tiotals år behöver ämnena exponeras i mycket höga neutronflöden.

Ett förslag är att förbränna också ^{137}Cs och ^{90}Sr i ADS trots deras relativt korta halveringstiden på ca 30 år och låga neutronvärsnitt (< 1 barn). Orsaken är att dessa kärnslag till en del bestämmer ett avfallsförvars storlek med hänsyn till värmeavgivningen till omgivande berg. Det är knappast troligt att sådan transmutation blir aktuell i de första hybridsystemen, vilka istället kommer att prioritera tillgängliga neutroner för transmutation av MA och de långlivade klyvningsprodukterna, samt för bridning.

5 Avfallshantering

Driften av ADS blir oundvikligen förbunden med hantering av avfallsströmmar, separation (upparbetning) av förbrukat bränsle både från kritiska system och ADS självt samt tillverkning av element innehållande bränsle eller valda aktinider och klyvningsprodukter. I de länder där upparbetning sker är så kallade våtkemiska metoder väl etablerade, exempelvis i La Hague i Frankrike. Pu kommer till nytta för energiutvinning vid återföring till LWR eller bridreaktorer medan MA och klyvningsprodukter var för sig tas om hand för framtida deponering i långtidförvar. Hanteringen innebär emellertid att Pu förekommer som rent ämne, att det förflyttas och att inventarierna är relativt stora. Detta är ogynnsamt med hänsyn till möjlig spridning av Pu för vapenändamål.

Ett annat sätt, som man nu undersöker, är att istället använda pyrometallurgiska separationsmetoder i direkt anslutning till driften av reaktorer i en energipark. Processerna hanterar de klyvbara kärnämnen i slutna kretsloop utan att renframställa dem. Metoden bör också vara tekniskt enklare än de våtkemiska metoderna, något som dock framtiden får bevisa.

Pyrometallurgi innebär att alla processer sker vid hög temperatur i smältor av såväl metaller som salter eller vid kontakt mellan smältorna. Elektrokemisk separation och centrifugering är tänkbara i sammanhanget. Problemen idag är att demonstrera dessa tidigare kända processer vid storskalig transmutation och påvisa en sådan separationsgrad av ingående ämnen, att restmängderna av långlivat avfall för deponering till sist blir små.

6 Bränsleförsörjning

Kärnbränsle utgör en energiresurs på mycket lång sikt genom att exempelvis i ADS omvandla de "fertila" isotoperna ^{232}Th och ^{238}U till de lättare klyvbara ^{233}U respektive ^{239}Pu (se Figur 2, Transmutation vid bridning). För att systemen ska bli självförsörjande behöver de produ-

cera minst lika mycket bränsle som går åt. Driften av de snabba bldreaktorerna har redan demonstrerat U/Pu-cykeln för bränsle i oxidform och med natrium som kylmedel, men metoden är ännu alltför kostsam för kommersiell tillämpning. Även Th/U-cykeln har provats med framgång i ett termiskt LWR-system.

En väsentlig fördel med Th/U-cykeln är att den genererar betydligt mindre mängder MA, kanske 50 till 100 gånger, än U/Pu-cykeln. I Figur 2 antyder pilarna uppbyggnaden av de vanligaste aktiniderna. Upparbetningen av Th-baserat bränsle är dock besvärlig genom att också något ^{232}U bildas som har en starkt radioaktiv dotterprodukt, tallium-208.

Initialcyklerna måste i kritiska reaktorer använda klyvbart ^{235}U eller ^{239}Pu för att få igång systemet att från Th alstra ^{233}U . I ADS kan bridningen bli mer effektiv än i kritiska system tack vare det större neutronöverskottet. ADS kan därtill bygga upp sitt eget fissila inventarium genom bridning utan att från början tillgå klyvbara kärnslag. Driftekoniskt är det emellertid bäst att börja med ett fissilt inventarium för att redan från starten generera nyttig energi.

7 Utvecklingsuppgifter

Ett mycket omfattande utvecklingsarbete krävs innan man kan bedöma hur realistiskt det är att med acceptabel säkerhet och ekonomi bygga och driva ADS. Detta gäller såväl verifikation av grundprincipen om att kunna skapa en effektiv och driftuthållig neutronkälla i en reaktorhård som systemets kapacitet att transmuttera. Materialteknik, materialhantering och anläggnings-säkerhet måste utforskas i detalj. Beräkningssystem och databaser behöver utvecklas. Till sist måste man visa att ADS kan få en viktig roll i den framtida energiförsörjningen.

Mycket av detta är att hänföra till grundforskning och många laboratorier har goda möjligheter att studera enskilda fenomen. Den elektrotekniska industrin förhåller sig därför tills vidare av-vaktande till att satsa på utvecklingen av ADS.

För att styra forskningen effektivt med målet att pröva konceptet önskar tillskyndarna av ADS att inom ca 10 år bygga en "förprototyp". En sådan kunde vara på 50–200 MW termisk effekt med en accelerator som ger några MW protonstråleeffekt, dvs med vad som bedöms vara möjligt med tillämpning av dagens acceleratorteknik. Driften av prototypen skulle demonstrera kopplingen mellan accelerator och hård, utformningen av strålmålet för spallations-källan och konstruktionen av bränslet för skilda val av transmutationer.

Parallellt med en sådan verksamhet måste framtagningen av lämpliga material gå vidare och utprovningen ske av effektiva och ekonomiska metoder för att hantera avfall och återföring av bränslematerial.

Aktuell forskning

Intresset för utvecklingen av ADS är stort inom ramen för ett omfattande internationellt samarbete. De mest aktiva länderna är Frankrike, Italien, Spanien, Sverige, Tjeckien, Ryssland, USA och Japan. Allmänt sett minskar den statliga finansieringen av de nationella forskningslaboratorierna varför utvecklingsprojekten hittills varit kostnadsmissigt rätt blygsamma. Trots detta synes en ökad insats kunna bli aktuell inom en relativt snar framtid.

Längst i planeringen tycks man ha kommit i Frankrike där staten har utlovat stöd för demonstration av alternativa sätt att hantera avfallet, bland annat med ADS. Enligt planerna ska man bygga en förprototyp som ansluts till en accelerator. Emerging Energy Technologies Group på CERN i Genève, där professor Carlo Rubbia medverkar, har likartade planer på en förprototyp med cyklotron. Också LANL i USA får forskningspengar för bland annat prov av spallationsskällor i anslutning till LANSCE. I Sverige avser insatserna, förutom aktivt stöd till internationella program, både teoretiska och experimentella arbeten, såsom studier av härdkonfigurationer och mätning av nukleära data.

8 Exempel på ett ADS-koncept – Rubbias ”energiförstärkare”

Hur kan ett acceleratordrivet system komma att se ut? Möjligheterna är många och beror på vad man vill prioritera, avfallsförbränning (”incineration”) eller energiproduktion. I det förra fallet gäller det vilket slag av avfall man avser att välja (långlivade klyvningsprodukter, plutonium eller högre aktinider) och vid energiproduktion om mängden av högre aktinider ska minimeras. Bränslevallet – uran-233, uran-235 eller plutonium-239 – har därvid stor betydelse.

Optimeringen av ADS-härdens reaktivitet ska ge ett så högt neutronöverskott som möjligt för effektiv transmutation (avsnitt 4.2). Reaktiviteten (eller multiplikationskonstanten k) bör variera så litet som möjligt under driftcyklerna och därmed den erforderliga protonstråleffekten. Acceleratorns effekt bestäms av den specificerade variationen i k och dess lägsta värde för full reaktoreffekt. Ett största k -värde på 0,97-0,98 eller något högre (i stället för 0,95) bör vara tänkbart, även om det innebär att säkerhetsstyrstavar blir nödvändiga.

CERN-gruppens förslag på en energiförstärkare, EA, är intressant både för energiproduktion och förbränning av avfall, se Figur 3 som visar en förenklad skiss baserad på Referens 1.

Härden skiljer sig på många sätt från konventionella kraftreaktorer. Konceptet, som framtagits av Carlo Rubbia och hans medarbetare (Referens 1), ser ut att bilda skola för den närmaste tidens ansatser på att bygga en förprototyp för att demonstrera energigenerering och metoder för incinerering. På så vis kan man samordna insatserna på flera forskningslaboratorier.

EA är en snabb underkritisk reaktor med i rör inkapslat keramiskt eller metalliskt toriumbränsle och med smält bly (eller bly/vismut) som kylmedel vid lägst 550 till 600 °C utloppstemperatur från härden. Bly, som Ryssland har processteknisk erfarenhet av från ubåtsreaktorer, har mycket liten neutronabsorption. Neutronspektrum blir mycket hårt eftersom modereringen är obetydlig, särskilt när bränslet är av metall. Detta är en fördel vid transmutation av de högre aktiniderna. Strålmålet i spallationsskällan är likaså av bly eller bly/vismut.

Bly smälter vid 328 °C och kokar först vid 1743 °C. Värmeutvidgning och specifik värme är gynnsamma för konvektiv kylning. Radioaktiveringen av bly är obetydlig, men om vismut blandas in för att sänka smältemperaturen kan möjligen inducerad aktivitet från polonium bli besvärande. Jämfört med flytande natrium som kylmedel har blysmältan fördelen att vara mindre kemiskt reaktiv vid atmosfärskontakt och reaktiviteten minskar vid eventuell kokning. Dock måste korrosionsproblemen och hanteringen av flytande bly i stor skala kartläggas i detalj.

Blyets låga ångtryck tillåter förstås ett lågt systemtryck. Genom att använda en stor kylmedelsmängd i ett 30 m högt reaktorkärl med 6 m diameter – ca 9500 ton bly för en EA på 1500 MW(term) och 675 MW(el) – uppstår naturlig konvektiv cirkulation och värmekapaciteten är så stor, att inga cirkulationspumpar behövs. Temperaturstegringen över härden är ca 200°C. Värmeväxlarna får plats upptill i reaktorkärl och överför värmen till en sekundärkrets med flytande Pb/Bi, vars eutektiska sammansättning har en smältpunkt på bara 125°C. Sekundärkretsen i sin tur överför värmen till en ånggenerator. Nödkylningen kan utnyttja passiva luftkylda system. Reaktorkärl står i en betongsilo.

Med Th/²³³U-cykeln blir uppbyggnaden av de högre aktiniderna av storleken en hundradel av den med ²³⁸U/Pu-cykeln. Men eftersom det tar lång tid att från ²³²Th bygga upp ²³³U-halten i bränslet måste systemet startas första gången med hjälp av tillsatta fissila bränslen (²³³U, ²³⁵U eller ²³⁹Pu). Under fortsatt drift räcker det att upparbeta förbrukat bränsle till att återvinna och återcykla ²³³U plus övriga genererade aktinider. Utbränningar på ca 100 MWd/kg bränsle efter ca fem fulleffektår förutses, vilket kan jämföras med de ca 50 MWd/kg uran som idag gäller för lättvattenreaktorer.

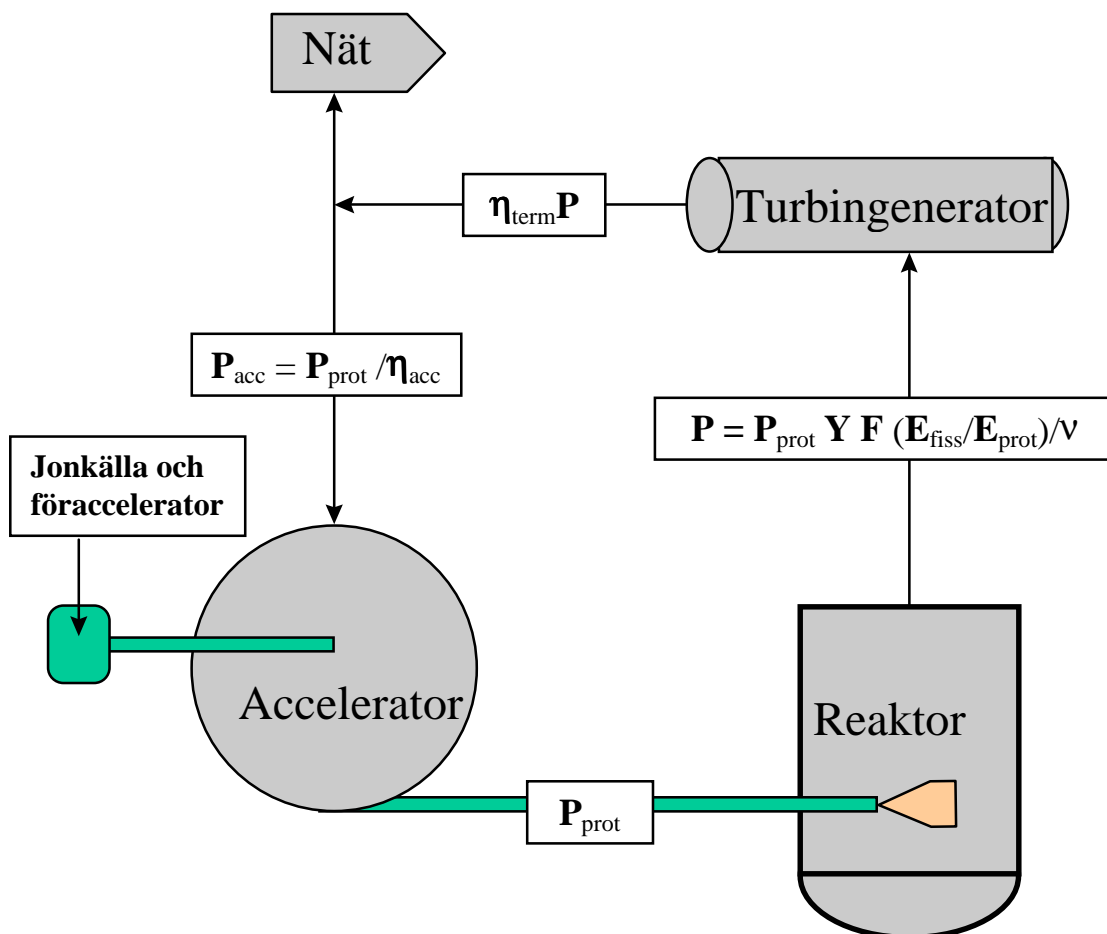
Energiförstärkaren ska idealt få en underkriticitet i intervallet $k = 0,96$ till $0,98$. Acceleratorn är tänkt att vara av cyklotrontyp, vilket förutsätter att förväntade prestanda på 10 till 15 MW stråleffekt realiserar (dvs 10 till 15 mA för 1 GeV protoner). Detta bör räcka för en större EA-prototyp. För $k = 0,98$ ($F = 50$) och stråleffekten 12,5 MW får man med data i övrigt enligt Figur 1, att EA-effekten blir 1454 MW, dvs nära den önskade märkeffekten 1500 MW. Men för att klara märkeffekten kontinuerligt när k varierar mellan 0,96 och 0,98 under driftcykeln, behöver i detta fall ytterligare en cyklotron anslutas parallellt.

Forskningslaboratorierna har planer på att utnyttja den här skisserade tekniken, som alltså är baserad på snabba neutroner, med de redan idag befintliga cyklotronerna, som klarar att ge 50 till 100 MW(term) reaktoreffekt i en provanläggning. En sådan anläggning ger möjligheter att forska kring kopplingen mellan accelerator, strålmål och härd samt optimera sammansättningen av bränslet för effektiv transmutation. Som kylmedel är både bly och natrium tänkbara.

Litteratur

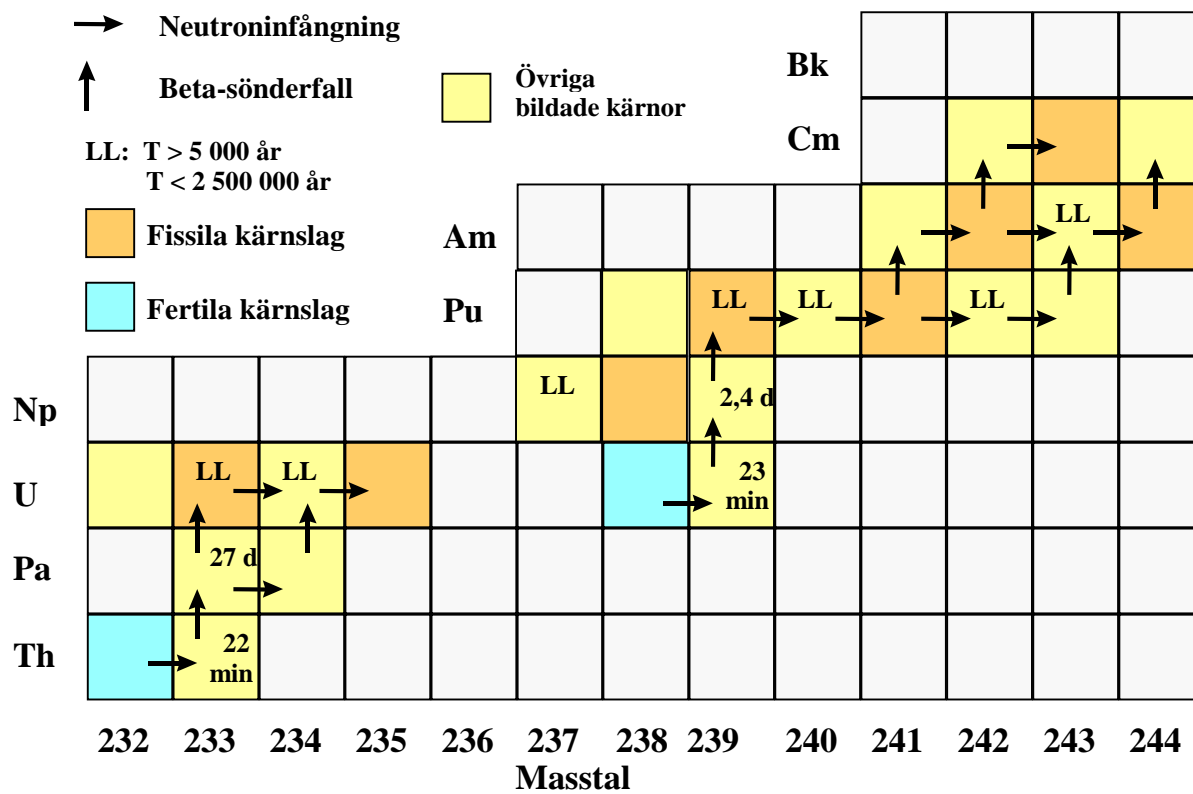
1. Proceedings of the International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 1996. Editor H. Condé (Uppsala University), printed by Gotab, Stockholm 1997. ISBN 91-506-1220-4 (2 volumes).
2. Accelerator driven systems: Energy generation and transmutation of nuclear waste. Status report. International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-985 (November 1997).
3. Acceleratordriven transmutation och energiproduktion. H. Condé. Kosmos 1998, band 75, 137-167 (Svenska Fysikersamfundet).
4. Separation och transmutation (S&T) 1997. En genomgång av nuläget. SKB-rapport R-98-06, maj 1998 (Bidrag från KTH och Chalmers TH).

Figur 1. Effektförhållanden i ett acceleratordrivet system

**Definitioner**Effekt = P Effektverkningsgrad = η Underkritisk neutronmultiplikation $F = 1 / (1 - k)$ Neutronutbyte per proton = Y ; Neutronutbyte per fission = ν Nyttig energi per fission = E_{fiss} ; Protonenergi = E_{prot} Effektförstärkning $G = P / P_{\text{acc}} = \eta_{\text{acc}} Y F (E_{\text{fiss}} / E_{\text{prot}}) / \nu$ Andel hjälpkraft till acceleratoren = $P_{\text{acc}} / (\eta_{\text{term}} P) = 1 / (G \eta_{\text{term}})$ **Exempel** $E_{\text{fiss}} = 190 \text{ MeV / fission}$; $E_{\text{prot}} = 1000 \text{ MeV / proton}$ $k = 0,95$ ger $F = 20$ $Y = 30$ neutroner / proton; $\nu = 2,45$ neutroner / fission $\eta_{\text{term}} = 0,38$; $\eta_{\text{acc}} = 0,45$

Då blir $G = 21$ och andelen hjälpkraft till acceleratoren blir nära 13 %. Energiutvecklingen i strålmålet har försumrats.

Figur 2. Transmutation vid bridning



Figur 3 Energiförstärkaren enligt Rubbia

(Ur referens 1)

