



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Per Andersson
Fredrik Nielsen
Daniel Sunhede

Forskning 2013:05

Accelerator drivna subkritiska system
– en analys med fokus på icke-spridning och
exportkontroll

SSM perspektiv

Bakgrund

Sverige har en exportlagstiftning som kontrollerar utförelse av speciellt känslig utrustning som kan tänkas komma till användning för bl.a. tillverkning av kärnvapen. Syftet är att förhindra att någon stat eller organisation införskaffar sådana vapen. Utrustningen det är frågan om har ofta en legitim användning i civil industri men kan ha vissa speciella egenskaper som gör den användbar för kärnvapenframställning. Det är SSM som handlägger ärenden som rör export av kärnämne och kärnteknisk utrustning. Det är viktigt att myndigheten har tillräcklig och aktuell kunskap i ämnet för att korrekt kunna bedöma inkomna exportansökningar.

Syfte

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, fungerar som teknisk rådgivare till SSM i exportkontroll-ärenden. SSM, liksom tidigare SKI har sett ett behov att försäkra sig om att kompetensen bevaras och förnyas inom området. FOI har därför fått i uppdrag att studera exportkontrollerade produkter. Den här rapporten är resultatet av ett sådant projekt. Accelerator drivna Subkritiska system används för olika forskningsändamål och är idag inte under exportkontroll. Systemen är dock intressanta ur ett icke-spridningsperspektiv då dessa kan utformas för produktion av klyvbart material som i sin tur kan komma till användning i ett kärnvapenprogram. Denna studie försöker belysa denna problematik.

Resultat

Den nu resulterande rapporten beskriver översiktligt utrustning och komponenter som behövs för drift av ett acceleratordrivet subkritiskt system, där informationen är baserad på litteraturstudier. Rapporten berör också förutsättningarna för användning av ett sådant system för framställning av klyvbart material, ett resultat av egna datorberäkningar. Rapporten är tänkt att ge en översikt av systemen och samtidigt ge en del djupare information för den intresserade utan att gå in på detaljer som kan anses känsliga ur spridningssynpunkt. Därmed kan flera intressenter såsom andra myndigheter, berörd industri och intresseorganisationer få tillgång till resultatet. Förutom rapporten har projektet resulterat i att personal på FOI och SSM fått ökad insikt i processerna. Resultaten kommer att användas i det internationella arbetet med att ta fram produktlistor för exportkontroll och i SSM:s granskning av European Spallation Source (ESS).

Projekt information

Kontakt person SSM: Jenny Peterson

Referens: SSM2012-577



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Per Andersson, Fredrik Nielsen och Daniel Sunhede
Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm

2013:05

Accelerator drivna subkritiska system
– en analys med fokus på icke-spridning och
exportkontroll

Datum: November 2012

Rapportnummer: 2013:05 ISSN:2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehåll

Sammanfattning	2
Summary	3
1. Inledning	4
2. Vad är ADS?	5
2.1. Acceleratorteknik	5
2.2. Härd och bränsle	9
2.3. Spallationsmål och acceleratorparametrar	11
3. Säkerhet	13
3.1. Neutronkällan.....	13
3.2. Reaktivitetsändringar	14
3.2.1. Protaktinium	14
3.2.2. Xenonförgiftning.....	15
4. ADS som plutoniumproducent	16
4.1. Härdeffekt	16
4.2. Plutoniumproduktion	18
4.3. Plutoniumproduktion – sammanfattning	22
5. Spridningsrisker och exportkontroll	24
6. Diskussion	26
Appendix	28
Spallationsmål.....	28
Härdkonfiguration.....	29

Sammanfattning

Enheten för kärnvapenfrågor vid Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, har på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, studerat acceleratordrivna underkritiska (också kallade subkritiska) fissila härdar eller system, ADS, utgående från ett exportkontrollperspektiv. Ett ADS liknar vid första anblicken en normal kärnreaktor men härden är konfigurerad så att den både vid normal och vid så kallad *off-normal* drift alltid ska vara underkritisk. Istället tillförs neutroner utifrån med hjälp av en protonaccelerator och ett spallationsmål.

Rapporten ger en kortare beskrivning av de fysikaliska processer som styr neutronflödet och reaktiviteten i härden och därmed också effekten samt hur de påverkas av valet av härdkonfiguration inklusive accelerator och strålmål. Vidare presenteras resultatet av härdberäkningar där härdens bränsleinhåll studerats vid olika utbränningsgrader och startkonfigurationer. Slutligen innehåller rapporten en analys av de risker som ett ADS skulle kunna innebära i frågan om nukleär spridning och export.

Studien visar att acceleratordriva subkritiska system i framtiden skulle kunna utgöra en spridningsrisk men att de idag ännu inte har utvecklats förbi det tidiga forskningsstadiet. De aktuella delsystemen och komponenterna liknar till stor del de som finns idag i traditionella kritiska reaktorer och de framtida reaktorer som studeras runt om i världen, med undantag för acceleratorn och spallationsmålet som är unika för ADS. Beroende på härdens utformning kan vissa ADS producera strategiska material av så pass hög kvalitet att de utgör en potentiellt stor spridningsrisk.

Summary

The Department of Nuclear Weapons Related Issues at The Swedish Defence Research Agency, FOI, as commissioned by the Swedish Radiation Safety Authority, SSM, conducted a study concerning Accelerator Driven Subcritical Systems, ADS, with emphasis on non-proliferation and export control. An ADS looks at first glance like a traditional nuclear reactor, but the nuclear core is designed to always remain subcritical, both during normal and off-normal conditions. Neutrons are instead supplied by an external source in the form of a proton accelerator and a spallation target.

This report gives a short walk-through to the physical processes that governs the neutron flux and reactivity in the core and how they are affected by the design of the core including the accelerator and spallation target. Furthermore the results from reactor core simulations are presented, where the isotopic nuclear fuel inventory has been studied as a function of burn up and initial configuration. Finally the report contains an analysis of the potential risks involved from the perspective of nuclear proliferation and exports.

This study shows that ADS in the future could constitute a proliferation concern. The subsystems and components in question share design and materials with the equivalent components in traditional reactors with the exception of the proton accelerator and spallation target, which is unique for accelerator driven systems.

1. Inledning

Accelerator drivna subkritiska system (eller bara accelerator drivna system, ADS) är i strikt mening inga reaktorer. ADS hör till gruppen underkritiska reaktorliknande system och är i princip uppbyggda på samma sätt som vanliga reaktorer men med den avgörande skillnaden att systemet inte kan underhålla en självgående kedjereaktion vilket är den typiska definitionen av en traditionell reaktor. Istället drivs systemet av en extern neutronkälla som i de flesta fall utgörs av en protonaccelerator och ett spallationsmål. Det förekommer även studier av ADS där neutronkällan utgörs av en elektron-, deutron eller myonaccelerator och ett strålmål eller en liten fusionsreaktor men i denna studie kommer vi uteslutande att beskriva proton drivna ADS.

Den uppenbara fördelen med ADS är att man kan avbryta fissionsprocessen genom att stänga av acceleratoren men det sker till priset av ett mer komplicerat och känsligare system. Precis som vid planeringen av andra kärntekniska anläggningar ställs man även i fallet ADS inför olika val där i detta fall en stor fråga är om anläggningen ska optimeras för energiproduktion eller för förbränning av transuraner och fissionsrester. ADS kan, beroende på detaljer i utformningen av systemet och bränsleladdningen, vara mer effektiva på att transmuttera använt kärnbränsle jämfört med vanliga reaktorer, både termiska och snabba.

Eftersom man i ett ADS även ska driva en stor, relativt ineffektiv, accelerator kommer nettoeffekten att bli lägre jämfört med en motsvarande kritisk reaktor vilket leder till en större bränsleåtgång och avfallsproduktion för en given energiproduktion. Ju mer underkritisk härden är, desto större behöver acceleratoren vara för att en viss effekttäthet ska uppnås. Även här beror designvalen på vad man vill uppnå och hur olika parametrar som ekonomi och säkerhet prioriteras. Man måste även ta i beaktande att spallationsmålet utgör en lokal neutronkälla vilket sätter en gräns för härdens storlek och därmed totala effektuttag.

ADS är en teknologi som fortfarande är i ett tidigt stadium av sin utveckling så hur en eventuell anläggning till slut kommer att se kan bara framtiden utvisa. I denna rapport försöker vi utgående från det som är känt om grundförutsättningarna via kemi och fysik extrapolera till hur ett komplett system skulle kunna se ut och framför allt vilka risker det skulle kunna innebära ur ett icke-spridningsperspektiv.

I rapporten kommer vi, i brist på bättre nomenklatur, att använda termer från reaktorbranschen inklusive själva ordet reaktor även om det i strikt mening inte är tillämpligt på accelerator drivna system. Vid de tillfällen då skillnaden är signifikant används uttrycken kritisk och underkritisk reaktor.

2. Vad är ADS?

Konceptet ADS är i princip mycket enkelt. I en traditionell reaktor reglerar man med hjälp av styrstavar reaktiviteten¹ på ett sådant sätt att $k_{\text{eff}}=1$ i snitt² och därmed fås en konstant effekt. I en underkritisk härd utgår man från en konfiguration där $k_{\text{eff}}<1$. Utan en extern neutronkälla skulle neutrontätheten n vid tiden t vara:

$$n(t) = n(0)e^{(k_{\text{eff}} - 1)t / \tau}$$

vilket för en kriticitet $k_{\text{eff}} < 1$ skulle innebära att antalet neutroner med tiden skulle gå mot noll. I en snabb reaktor med en typisk neutronlivslängd, τ , på 10^{-7} s avklingar hela klyvningsförloppet på delar av en millisekund vid $k = 0,97$. Detta får följder för de krav som ställs på acceleratordelen vilket kommer att diskuteras utförligare nedan.

Om neutroner tillförs utifrån i ett konstant och homogent flöde erhåller man som tidsberoende lösning till den neutronkinetiska ekvationen (där S_0 är neutronflödet från källan):

$$n = \frac{\tau S_0}{1 - k_{\text{eff}}},$$

det vill säga en tidsberoende neutrontäthet som beror på källan³. Ju mer underkritisk härd är och ju snabbare neutronförloppet är, desto kraftigare måste neutronkällan vara för att en viss neutrontäthet och därmed effekt ska uppnås.

Om källan inte är homogent fördelad i härd⁴, vilket är fallet i de flesta konstruktioner som föreslagits, så kompliceras bilden avsevärt men det kvalitativa resonemang som förs nedan är fortfarande applicerbart även om de exakta resultaten kan variera något.

2.1. Acceleratorteknik

Som det framgick av den tidsberoende lösningen till den neutronkinetiska ekvationen så beror neutrontätheten η , och därmed effekttätheten respektive neutronöverskott, på antalet neutroner som källan kan tillföra. Man talar i sammanhanget ofta om neutronutbytet, *neutronic gain* G , som beror på reaktiviteten⁵:

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}.$$

¹ Med k_{eff} menar vi här den härdberoende multiplikationskoefficienten, där effekten av den externa källan inte har räknats in. Det förekommer i litteraturen att k_{eff} även används för det inhomogena systemet härd + extern källa.

² Även i termiska reaktorer är den typiska tiden för olika neutronprocesser fyra storleksordningar snabbare än reaktionstiden i reglersystemet som domineras av tiden som det tar att manövrera kontrollstavarna. Därför är man beroende av att andelen fördröjda neutroner, β , är stor nog för att dämpa fluktuationer i reaktiviteten.

³ Källan kan givetvis vara tidsberoende vilket ger ett implicit tidsberoende neutrontäthet.

⁴ Neutronen har en medelfriväg som beror på vilket material den transporteras genom, vilken energi den har och vilka processer som räknas in. Om härd är betydligt mindre än en absorptionsmedelfriväg kan källan approximeras med en homogen källa. Absorptionsmedelfrivägen för en typisk spallationneutron är i bly ca 10 m och i naturligt uran ca 1.5 m. I absorptionsmedelfrivägen har alla kärnprocesser där neutronen går förlorad räknats in, inklusive fission, men inte geometriska förluster.

⁵ Notera att reaktiviteten är negativ för en underkritisk reaktor.

Antalet genererade neutroner utöver de som tillförs från källan är:

$$n_s(t) = \frac{k_{\text{eff}} n(t)}{\tau} = \frac{k_{\text{eff}} S_0}{1 - k_{\text{eff}}} = -\frac{S_0}{\rho}.$$

Neutronutbytet blir då:

$$G = \frac{S_0 + n_s}{S_0} = 1 - \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1 - k_{\text{eff}}},$$

vilket betyder att för varje neutron från källan får man i snitt G neutroner totalt i härden innan fissionskedjan dör ut. Från de olika sambanden ovan och från grundläggande kärn- och härd fysik kan ett antal slutsatser dras. Ju mindre underkritisk härden är desto färre neutroner från källan behövs för att uppnå en viss neutrontäthet och desto mindre behöver acceleratoren och spallationsmålet vara. Av andra skäl som diskuteras nedan så bör k_{eff} ligga i intervallet från 0,90 till 0,97 vilket innebär att man för varje neutron från källan får mellan 10 och 33 neutroner i härden. Högre värden är möjligt men det innebär stora begränsningar i systemets möjlighet att förbränna tyngre aktinider, så kallade *minor actinides* (MA). Värden så höga som 0,998 är möjliga i en kraftproducerande underkritisk reaktor som drivs med torium och uran-233⁶. Detta motsvarar en utväxling på 1 till 500 men ett mer realistiskt värde⁷ är 1 till 120, det vill säga $k_{\text{eff}} = 0,9917$. Värden över ca 0,98 kräver troligen någon form av stabiliserande funktion liknande de styrtavar som kritiska reaktorer är utrustade med vilket förftar den inbyggda säkerhet som finns i den underkritiska, självstabiliserande härden.

Som det framgår i kapitel 4 så finns det ett enkelt linjärt samband mellan den kinetiska energi som acceleratoren förmår att ge protonerna och antalet spallerade neutroner per proton för ett givet material. Antalet spallerade neutroner per megaelektronvolt, MeV, beror på vilket material som spallationsmålet består av. Det totala flödet av neutroner från källan beror på produkten av protonenergin och antalet protoner per sekund, det vill säga protonströmmen, som oftast mäts i milliampere, mA, samt valet av spallationsmaterial. Effekttågängen i acceleratoren beror förutom på energin och strömmen även på effektiviteten i acceleratoren som i bästa fall⁸ uppgår till 40 %.

Acceleratoren behöver drivas med elektricitet från någon form av källa som i sin tur har någon form av förluster i kraftgenereringen. Om man för enkelhets skull antar att elektriciteten genereras på traditionellt sätt genom att värme från härden tas till vara så är åter igen effektiviteten som bäst ca 40 %. Sålunda kan bara 16 % av den energi som frigörs vid en fission överföras till protonerna så om k_{eff} understiger 0,84 kommer energi att behöva tillföras utifrån för att processen ska kunna fortgå.

För varje MW som acceleratoren kan leverera kan man realistiskt erhålla 20 MW elektrisk effekt från systemet. De kraftigaste acceleratoreorna av lämplig modell levererar idag ca 5 MW vilket skulle motsvara 100 MW elektrisk effekt. Kombinationen av de krav som ställs på härden med avseende på effekttäthet, stabilitet och säkerhet samt neutronkällans räckvidd ger vid handen att acceleratoreorna med en effekt på 20 MW är

⁶ H. Nifenecker *et. al.*, Nuc. Instr. Meth. Phys. Res A 463 (2001) 428-467.

⁷ När härden närmar sig ett kritiskt beteende försämrats samtidigt dess inbyggda stabilitet. I en kraftigt underkritisk reaktor, där underkriticiteten är 2-3 β (se fotnot ovan) vilket motsvarar $k_{\text{eff}}=0,95$ i en reaktor laddad med naturligt uran, ökar effekttätheten med mindre än 200 % även vid stora reaktivitetsökningar. I en härd där underkriticiteten är mindre än 1 β ger samma reaktivitetsökning en 500-faldig ökning av effekten. Ju större andelen transuraner är i bränslet, desto känsligare blir systemet.

⁸ H. Nifenecker *et.al.* Prog. Part. Nuc. Phys. 43 (1999) 683-827.

optimalt, alternativt att använda flera accelerators i samma härd. Med den effektivaste möjliga kylningen, flytande metall, tål strålmålet att utsättas för effekttätheter på upp till 500 kW/dm^3 vilket sätter en gräns för hur kraftiga accelerators som kan användas. Gränsen beror på hur protonstrålen fokuseras och vilken energi som protonerna accelereras till men en realistisk gräns är ca 25 MW, dvs. högre än vad som eftersträvas för energiproduktion.

I princip alla studier av ADS som presenterats bygger på kontinuerligt arbetande accelerators, till skillnad från pulsade accelerators. Som det framgick ovan avklingar klyvningsprocessen på delar av en millisekund i en underkritisk härd med snabba neutroner om neutronkällan stängs av. De snabbaste pulsade acceleratorerna med tillräckligt hög effekt har en repetitionsfrekvens på några tiotal Hz vilket skulle ge en kraftigt oscillerande effekt i reaktor vilket skulle kunna leda till allvarliga utmattningsproblem i bränsle och konstruktionsmaterial.

Den relevanta parametern här är hur snabbt härden kyls av när inga neutroner längre tillförs och hur detta påverkar härdens egenskaper. En blykyld härd med en effekttäthet på 500 kW per liter måste kunna föra bort motsvarande effekt vilket innebär att temperaturen sjunker med 100 K på mindre än $0,3$ sekunder om ingen energi tillförs från fission⁹. Reaktiviteten i metallkylda snabba härdar är mindre känslig för temperaturändringar¹⁰ jämfört med termiska lättvattenreaktorer. En temperatursänkning på 100 K innebär ändå en ökning av reaktiviteten på upp till $0,02$ vilket kan innebära stora öknings i neutronutbytet, se ovan. Detta leder till en förstärkning av oscillationen i effekt som man får med en pulsad källa. För att minimera påfrestningarna på systemet och maximera effekttätheten bör dödtiden mellan pulserna inte överstiga $0,05$ sekunder.

Den accelerator som enligt de preliminära studierna¹¹ ska användas vid European Spallation Source, ESS, planeras ha en dödtid på strax under $0,05$ sekunder vid en ström på $2,0 \text{ mA}$ och en effekt på 5 MW . Sammantaget gör detta acceleratoren, och till den hörande stödsystem, till en olämplig kandidat för användning i ett ADS.

En tydlig fördel med pulsade accelerators är att de har betydligt lägre effektförluster jämfört med kontinuerliga accelerators men de analyser som har gjorts tyder på att denna vinst vägs upp av effektförlusten i härden. Utvecklingen av supraledande komponenter i accelerators har resulterat i minskade effektförluster i framför allt de kontinuerliga accelerators varför utvecklingen av dessa har prioriterats. Det finns dock inga tvingande skäl till att man inte skulle kunna använda en pulsad källa. För en aktör som inte har tillgång till den senaste och mest avancerade teknologin skulle en pulsad källa kunna utgöra ett fungerande substitut.

Idag dominerar två typer av accelerators, linjära accelerators och cyklotroner. Cyklotronacceleratorerna är en mer homogen grupp än de linjära där namnet snarare beskriver geometrin än teknologin. Det finns en omfattande litteratur¹² som beskriver detta både omfattande och teknikintensiva område varför vi inte kommer att gå djupare in på ämnet i denna rapport. Sammanfattningsvis möjliggör linjära accelerators en högre ström, mellan 10 och 100 mA , och därmed en högre effekt än cyklotronacceleratorer där det är mycket svårt att nå strömmar över 5 mA och där 10 mA torde utgöra en absolut gräns. Motsvarande värden för effekten är ca 25 MW (i teorin 100

⁹ Fissionsprodukterna avger fortfarande restvärme från sönderfall men det tillskottet är så pass litet jämfört med den normala effekttätheten att vi bortser från detta i den förenklade analysen.

¹⁰ Se till exempel J. Bussac och P. Reuss, *Traité de neutronic*, Hermann, Paris, 1985.

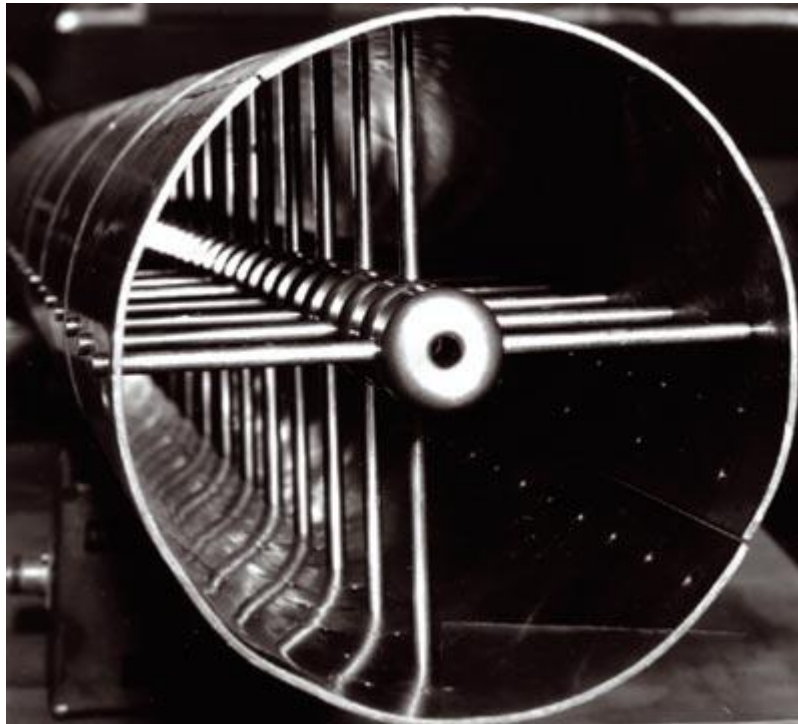
¹¹ ESS SAC Linac-SP, 2010.

¹² Se t.ex. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, W.R. Leo, Springer Verlag eller *Acceleratorteknik*, S Rosander, Inst. f. acc.teknik, KTH.

MW men då uppstår det ohanterligt stora problem med kylningen) för linjära acceleratörer och 10 MW för cyklotroner.

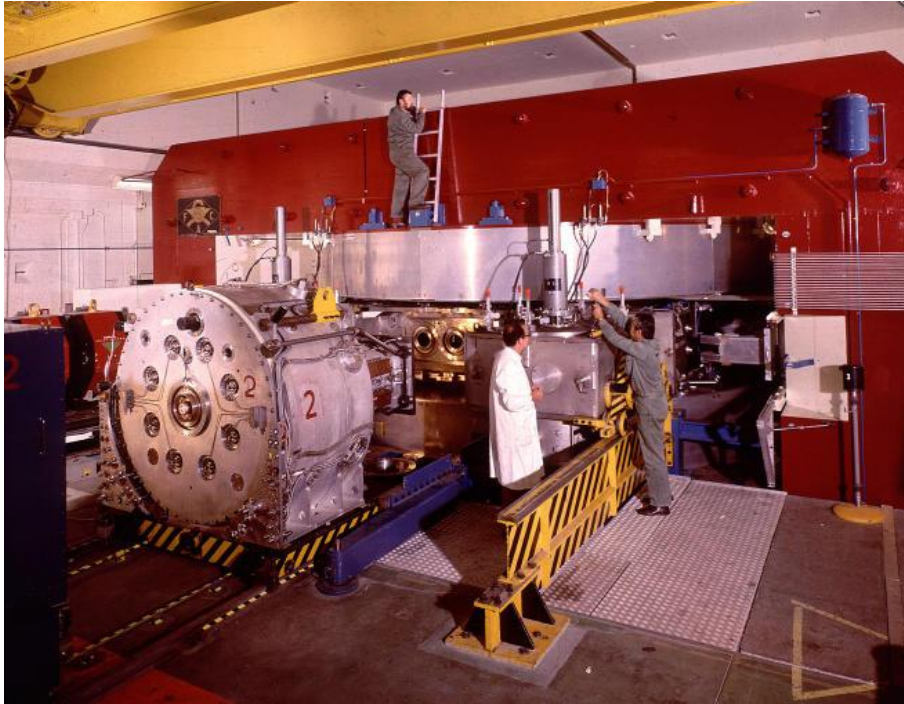
En viktig parameter är antalet strålavbrott, så kallade *trips*, som sker per tidsenhet och hur långa de är i genomsnitt. Ett vanligt fel är att den positivt laddade protonstrålen på grund av inhomogeniteter i det omgivande fältet böjs av och träffar väggen på kaviteten vilket kortsluter systemet. Detta kallas *sparking*. En accelerator med högre fältgradient kan göras kompaktare men samtidigt blir den känsligare för *sparking*. Idag råkar större acceleratörer ut för avbrott i genomsnitt 10 000 gånger per år vilket är två storleksordningar för ofta för att ett ADS ska kunna drivas effektivt. Studier¹³ visar att linjära acceleratörer kan göras så stabila att det sker avbrott färre än 100 gånger per år och att varje avbrott kan göras så kort som ca 1 ms vilket inte skulle påverka driften i någon större utsträckning. Cyklotroner kan fås lika stabila men på grund av fundamentala skillnader i uppbyggnaden blir varje avbrott upp till en minut långt vilket leder till att härden kallnar under stoppet.

Sammantaget tyder de flesta faktorer på att en eventuell framtida ADS-anläggning kommer att drivas av en kontinuerlig linjär accelerator men detta utesluter inte användandet av vare sig cyklotroner eller pulssade acceleratörer.



Figur 1: Komponent till linjäraccelerator

¹³ Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, OECD, 2010.



Figur 2: Cyklotronaccelerator

2.2. Härd och bränsle

Härden och bränslet i ett ADS skiljer sig i princip mycket litet från motsvarande kritiska reaktor, med det uppenbara undantaget att systemet är underkritiskt. Vilka designvägar som står öppna beror till stor del på vad systemet ska användas till. Generellt kan man säga att valfriheten är större om avsikten är att bara producera energi. Om man även avser att transmuttera plutonium ökar kraven och om man dessutom vill kunna förbränna MA återstår det ganska få alternativ. Resonemanget om för- och nackdelar hos snabba respektive termiska härdar är parallellt till det för kritiska reaktorer, därför följer endast en kortfattad sammanfattning.

Den faktor som avgör huruvida det går att antingen omvandla fertila kärnor (torium-232 eller uran-238) till fissila och/eller transmuttera och förbränna oönskade kärnor är neutronöverskottet. Eftersom snabba neutroner även kan fissionera de fertila kärnorna kommer denna härdtyp alltid ha ett försprång när det gäller neutronekonomi och så kallad *breeding*-faktor, det vill säga hur stor mängd nytt fissilt material som skapas i härden i förhållande till hur mycket som förbrukas. Är faktorn större än 1 kommer mängden fissilt material att öka med tiden. På samma sätt kommer den snabba härden att ha ett större överskott av neutroner tillgängligt för transmutering än den termiska¹⁴. Om man även vill kunna transmuttera de tyngre plutoniumisotoperna och americium krävs det ett snabbt neutronspektrum. Med mycket få undantag har man därför valt en härd med snabba neutroner i de befintliga ADS-projekten.

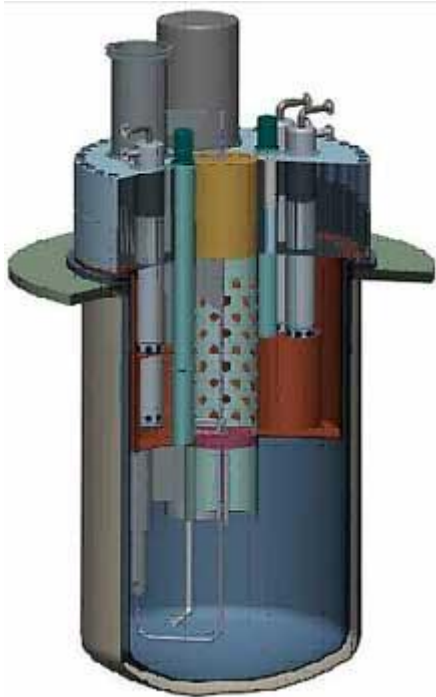
Bland de snabba reaktorerna hittar vi både gas-, salt- och metallkylda härdar. Eftersom neutronkällan i ADS är lokal vill man av naturliga skäl ha en så kompakt härd som

¹⁴ Fissionstvärsnittet är förvisso större för termiska neutroner än för snabba för uran-235 och plutonium-239 men den totala neutronbudgeten är mer fördelaktig för snabba neutroner, framför allt vid förekomsten av tyngre kärnor.

möjligt¹⁵. Gaskylda härdar tål en betydligt lägre effekttäthet¹⁶, 3 till 6 kW/dm³, jämfört med metallkylda som tål upp till 500 kW/dm³ med natriumsaltkylda däremellan med ungefär 50 kW/dm³. Därför kan en metallkyld härd göras betydligt mer kompakt för en given totaleffekt vilket är att föredra i detta fall. Man ska dock inte glömma de fördelar som en gaskyld härd kan ge med potentiellt högre arbetstemperatur och frånvaro av fasövergångar, både vid sänkt och vid höjd temperatur.

Bränslets fysiska form kommer givetvis att bero på vilken typ av härd som väljs, men det rör sig ofta om någon form av oxid, nitrid eller karbid. Om man avser att transmutera MA så kommer bränslet att vara mycket aktivt och hanteringen måste ske automatiserat men åter igen skiljer sig inte ADS från kritiska snabba reaktorer för transmutering av plutonium och MA.

På grund av de ovan nämnda fördelarna samt ytterligare några som diskuteras nedan, har man i de flesta studier valt att fokusera på bly- eller bly-vismutkylda härdar med ett snabbt neutronspektrum. Det projekt som idag har kommit längst är det belgiska forskningsprojektet Myrrha¹⁷.



Figur 3: Den subkritiska forskningsanläggningen Myrrha

Myrrha planeras att drivas både som kritisk och underkritisk härd där man i det senare fallet planerar att förse härden med neutroner från en linjäraccelerator på 600 MeV och en ström på 4 mA. Spallationsmålet utgörs av det flytande bly-vismutkylmedlet. Bränslet kommer enligt planerna att bestå av MOX-bränsle med ca 35 % plutonium, inkapslat i D9-stål¹⁸.

¹⁵ Som det har nämnts ovan ger en stor härd en heterogen förbränning vilket innebär ytterligare en komplicerande faktor. Alternativet är en härd med k_{eff} mycket nära 1 som blir bara svagt beroende av neutronkällan men detta innebär i sin tur problem med säkerhet och stabilitet över tiden då bränslets sammansättning ändras varefter andelen fertila och/eller fissila kärnor ändras.

¹⁶ http://www.iri.tudelft.nl/~rooijen/gen4_en.html.

¹⁷ <http://myrrha.sckcen.be/>.

¹⁸ Också känt som AIM1 och DIN 1.4970.

2.3. Spallationsmål och acceleratorparametrar

Neutronkällan i ett ADS utgörs av spallationsmålet vars primära neutroner multipliceras i den omgivande subkritiska härden. De primära neutronerna produceras då spallationsmålet bestrålas med högenergetiska protoner från acceleratoren, där antalet neutroner som bildas per inkommande proton främst beror av protonenergin och massan hos de bestrålade atomkärnorna. Tungmetaller som t.ex. bly, kvicksilver, uran och volfram är goda neutronkällor vid bestrålning.

För en god neutronekonomi krävs det att spallationsmålet är litet i förhållande till härdens storlek¹⁹. Detta innebär i praktiken att spallationsmålet bestrålas med mycket hög effekt, i storleksordningen flera hundra kW/liter, för att producera tillräcklig mängd primära neutroner. Den höga effekten ställer avsevärda krav på kylningen av spallationsmålet och materialets beständighet mot strålningsinducerade defekter. I detta sammanhang är ett spallationsmål av flytande tungmetall mycket fördelaktigt eftersom det både möjliggör avledning av värme genom konvektion, samt markant minskar antalet strålningsinducerade materialdefekter. I nuläget är bly (Pb) och eutektisk bly-vismut (Pb-Bi) de främsta kandidaterna för framtida ADS. Rent bly har fördelen att det producerar betydligt mindre alfastrålning än bly-vismut, medan eutektisk bly-vismut har en betydligt lägre smältpunkt, 124° C jämfört med 327° C för bly. Ett tredje möjligt spallationsmål är kvicksilver (Hg) på grund av materialets mycket låga smältpunkt på -39° C, men ämnets flyktighet och låga kokpunkt (357° C) försvårar inneslutningen av de radioaktiva isotoper som bildas. Kviksilver har även ett högre neutroninfångningsvärde än bly och bly-vismut vilket leder till att färre neutroner tränger ut ur spallationsmålet. En generell nackdel med flytande spallationsmål är att de ger upphov till erosion, korrosion och försprödning (*liquid metal embrittlement*) av det omslutande materialet. Dessa nackdelar uppvägs dock av värmeavledningen och det minskade antalet materialdefekter i själva spallationsmålet.

Antalet neutroner som tränger ut ur spallationsmålet per inkommande proton från acceleratoren är avgörande för härdeffekten i ett ADS. Denna kvot påverkas delvis av spallationsmålets geometri men beror främst av energin hos protonen, vilken avgör det antal neutroner som frigörs inuti materialet. För t ex ett cylinderformat spallationsmål av bly med längden 60 cm och diametern 10 cm, genererar varje inkommande proton med energin 1,2 GeV i genomsnitt 24 utgående neutroner från spallationsmålet, medan en protonenergi på 0,4 GeV minskar antalet till ca 6 neutroner²⁰.

En typisk accelerator för ett ADS genererar en protonstråle med strömmen 10–100 mA och protonenergier från 0,4–2,5 GeV. För representativa spallationsmål av bly, bly-vismut och kvicksilver motsvarar detta grovt sett 5-50 utgående neutroner per inkommande proton, där variationen mellan olika material och geometrier är underordnad variationen för olika protonenergier. Ett stort antal studier av neutronproduktion i olika spallationsmål finns i litteraturen²¹. Vi kommer i den parameterstudie som presenteras i kapitel 4 att vidare undersöka härdegenskaperna för drygt tjugo spallationsmålskonfigurationer av bly, bly-vismut och kvicksilver, vilka finns listade i Appendix. För att begränsa studiens omfattning har vi valt att försumma energifördelningen hos de primära neutronerna och tar endast hänsyn till hur olika konfigurationer påverkar antalet utgående neutroner. Detta är en god approximation eftersom den

¹⁹ Ett stort strålmål leder till en alltför hög självabsorption i spallationsmaterialet.

²⁰ C. Bungau *et al.*, "Neutron Spallation Studies for an Accelerator Driven Subcritical Reactor", Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada (2009) s. 1351–1353.

²¹ Se t ex V.I. Yurevich, "Production of Neutrons in Thick Targets by High Energy Protons and Nuclei", Physics of Particles and Nuclei, Vol. 41, No. 5, (2010) s. 778–825, och referenser däri.

överväldigande majoriteten av de neutroner som ger upphov till en fission i kärnbränslet är sekundära neutroner som genererats i härden²².



Figur 4: Spallationsmål

Den slutliga konfigurationen för spallationsmålet i ESS fastslås inte förrän tidigast 2013 men den teknologi som förespråkas som så kallat *Baseline Proposal* bygger på ett mål av fast wolfram i form av en roterande skiva som kyls med helium eller vatten. Den mycket specifika formen och storleken samt metoden för kylning gör det föreslagna spallationsmålet direkt olämpligt för bruk i en härd. Detsamma gäller för de kylsystem som kan bli aktuella.

²² Det exakta förhållandet beror på k_{eff} . Ett högre värde ger en större andel fissionsneutroner och ett lägre en större andel spallationsneutroner.

3. Säkerhet

I och med att ett ADS är underkritiskt finns det en viss potentiell inneboende säkerhet i systemet men beroende på hur anläggningen är konfigurerad och hur bränslesammansättningen ser ut finns det ett antal möjliga säkerhetsproblem som fortfarande måste tas i beaktande. De system som bygger på snabba respektive termiska härdar med olika typer av kylmedium delar förstås de grundläggande risker som motsvarande kritiska system för med sig. Nedan berör vi endast de risker som tillkommer i och med att ett ADS dels har en neutronkälla och dels kan komma att drivas utan någon form av yttre kontroll av reaktiviteten i form av styrstavar.

3.1. Neutronkällan

I princip hur man än konfigurerar bränslet initialt i ett ADS kommer k_{eff} att variera på ett liknande sätt över tiden om inga förändringar görs i härden. Tidsskalan och storleken på förändringarna beror på om systemet används som *breeder* eller *burner* och på hur bränslet är sammansatt vid laddningen, men man ser i princip alltid en initial ökning av reaktiviteten, på tidsskalan någon månad till något eller några år, följt av en stadig minskning av reaktiviteten. Ett undantag är *breeder*-system med en *breed*-koefficient som överstiger 1 och där överskottet på fissila kärnor inte avlägsnas från systemet. I de flesta förslag på hur ett ADS skulle kunna byggas har man valt att inte använda styrstavar för att undvika en potentiell felkälla och minska komplexiteten i anläggningen utan i stället utnyttja härdens underkriticitet. I och med att man har frångått styrstavarna har man även förlorat möjligheten att påverka reaktiviteten i härden. Man kan dock notera att tidsskalan för effektförändringar i härden med den låga andel fördröjda neutroner som är aktuell vid transmutering av MA är betydligt kortare än den tidsskala som styrstavarna arbetar vid.

Om man avser att driva systemet med en konstant totaleffekt så måste antalet neutroner i systemet anpassas till reaktiviteten och därmed måste protonacceleratorns effekt justeras. Alternativet, om man inte vill ändra bränslekonfigurationen, skulle vara att behålla ett konstant källflöde och låta härdeffekten variera med tiden. Det enda säkra alternativet är då att dimensionera kylning och andra undersystem till den högsta effekten vilken erhålls när reaktiviteten är som högst. Beroende på bränslesammansättningen kan toppen vara från några månader till några år. Anläggningen kan betraktas som överdimensionerad under en betydande del av sin livslängd vilket förvisso inte påverkar säkerheten men väl ekonomin.

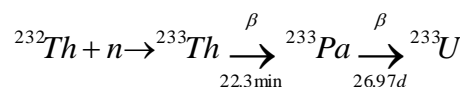
Om man väljer att anpassa protonkällans effekt efter reaktiviteten så är det av yttersta vikt att säkerhetssystemet inte möjliggör ett större effektuttag i acceleratoren för den aktuella reaktiviteten, varken planerat eller oplanerat, än vad den maximalt härdeffekten tillåter. Neutronflödet från källan påverkar inte reaktiviteten men väl antalet neutroner i härden och därmed effekttätheten. Som det framgår av sektion 2.1 är neutronutbytet, G , olinjärt beroende av k_{eff} varför accelerators effekt kan behöva ökas med en storleksordning eller mer. För en konstant reaktivitet skalar neutrontätheten linjärt med flödet från källan, dvs. för varje ingående proton ges ett givet antal utgående neutroner. En oavsiktlig ökning av acceleratoreffekten, dvs. strömmen, kan således på mycket kort tid leda till en kraftig överhettning.

3.2. Reaktivitetsändringar

Om man i en underkritisk reaktor har valt att inte använda styrvavar blir systemet betydligt känsligare för ändringar i reaktiviteten och ju mindre underkritisk härden är, desto känsligare blir den för ändringar.

3.2.1. Protaktinium

I det fall bränslet består av fertilt torium som i härden omvandlas till fissilt U-233 genom neutroninfångning och två där på följande betasönderfall, finns det under vissa omständigheter en risk att härden blir kritisk under ett längre stopp. Torium-232 kan fånga in en neutron och betasönderfaller då till Pa-233 med en halveringstid på 22.3 minuter. Pa-233 betasönderfaller i sin tur till U-233 med en halveringstid på 27 dygn.



Pa-233 har ett högt neutroninfångningstvårnsnitt och minskar reaktiviteten i reaktor²³. I en härd med flytande bränsle kan protaktinium på kemisk väg skrubbas från bränslet och betasönderfalla utan att exponeras för neutronflödet för att sedan föras tillbaka i form av U-233 i kontrollerade mängder.

Hanteringen blir betydligt svårare i en *breeder*-härd med fast bränsle. Först kommer reaktiviteten att sjunka:

$$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = - \frac{\sigma_{Pa}^{(a)} v_c (1 + \alpha)}{\lambda_{Th} n_{Th} \sigma_{Th}^{(a)}} \frac{k_{eff}}{\eta},$$

där v_c är fissionstätheten (antal fissioner per volymenhet), α är kvoten mellan sannolikheten för infångning och fission, λ_{Th} är toriums sönderfallskonstant, n_{Th} antalstätheten och slutligen η som är antalet frigjorda neutroner per infångning, det vill säga faltningen mellan sannolikheten för fission vid en infångning och antalet frigjorda neutroner per fission. v_c , α och η beror på den exakta bränslesammansättningen men man kan dra den enkla slutsatsen att förändringen i reaktivitet ökar ju mindre underkritisk härden är.

Kvoten mellan infångningstvårnsnitten i protaktinium och torium, σ_{Pa} och σ_{Th} , skiljer sig åt i termiska respektive snabba härdar, 7,4 respektive 2,4, vilket gör att man för en given accepterad minskning av reaktiviteten kan utnyttja ett visst neutronflöde och därmed få en tre gånger så stor effekttäthet i en snabb härd som i en termisk härd.

Även om protaktiniumuppyggnad kan ställa till med problem under drift är det under driftstopp som eventuella säkerhetsrisker kan uppstå. Efterhand som Pa-233 sönderfaller till U-233 kommer i stället reaktiviteten att öka eftersom inga urankärnor klyvs i frånvaron på neutroner. Om man inte har tagit hänsyn till detta i härdkonfigurationen eller om koncentrationen Pa-233 är högre än vad man hade förväntat sig av någon anledning kan härden sålunda bli kritisk en tid efter det att den har ställts av. Om man utgår från det minimala värdet under drift så blir ökningen²⁴ till slut

²³ Pa-233 kan efter det att en neutron fångats in omvandlas till U-234 som i sin tur kan fånga in en neutron och bilda den fissila isotopen U-235 men neutronbudgeten för denna kedja är mycket ofördelaktig jämfört med bildandet av U-233 direkt.

²⁴ Resultaten utgår från vissa förenklingar som med god approximation kan göras om reaktivitetsökning är liten vilken den kan anses vara här jämfört med de reaktivitetshöjningar som kan ske i kritiska reaktorer.

$$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = 1.8 \times 10^7 \frac{V_c (1 + \alpha)}{n_{Th}}$$

för snabba härdar och

$$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = 1.6 \times 10^8 \frac{V_c (1 + \alpha)}{n_{Th}}$$

för termiska härdar. Om man tillåter en ökning med 2 % motsvarar det ett neutronflöde som är två storleksordningar större i snabba härdar än i termiska härdar om man även tar hänsyn till skillnaden i fissionstäthet och fissionssannolikhet. Resultatet visar att om man vill uppnå normala neutronflöden i en torium-*breeder* måste härden utrustas med styrstavar om man säkert ska kunna driva härden med ett k_{eff} högre än ca 0,97.

3.2.2. Xenonförgiftning

I termiska reaktorer, både kritiska och underkritiska, kommer det att under drift byggas upp en viss koncentration av Xe-135 som är en mycket kraftig neutronabsorbator. Under konstant drift sjunker reaktiviteten ca 0,0035. Om reaktorn stoppas ökar reaktiviteten på samma sätt när xenonisotopen sönderfaller till Cs-135 med en halveringstid på något under 10 timmar. För en härd med $k_{eff} = 0,98$ vid konstant drift skulle det betyda att k_{eff} ökar till ungefär 0,983 efter några dygn. Om sedan systemet återstartas utan att några övriga åtgärder har vidtagits så kommer effekten att ökas med nästan 20 % jämfört med innan stoppet.

4. ADS som plutoniumproducent

4.1. Härdeffekt

Som tidigare nämnt har ett typiskt ADS en härd med snabba neutroner. Eftersom fissionstvärsnittet är betydligt lägre för snabba än för termiska neutroner, innebär detta att anrikningen av bränslet måste vara betydligt högre än i en neutronmodererande härd. I praktiken innebär detta en anrikning på runt 20 % eller mer, att jämföra med en anrikning på mindre än 5 % i en traditionell termisk reaktor. Som alternativ kan plutonium i en motsvarande mängd användas så att samma reaktivitet uppnås. Detta plutonium kan t.ex. komma från lättvattenreaktorer då inga krav ställs på halten Pu-240 eller andra tyngre plutoniumisotoper. Som det framgår av ovanstående kapitel kan man i ett ADS använda plutonium som har en så hög halt tyngre aktinider, MA, att det inte längre går att använda i kritiska reaktorer.

Härdeffekten i ett ADS påverkas av ett antal olika faktorer. Vi har valt att med hjälp av härdberäkningsprogramsviten SCALE/ORIGEN²⁵ v.6.1 studera hur dessa påverkar en uranbaserad härd konfigurerad likt en typisk blykyld snabbreaktor, se Appendix för en mer utförlig beskrivning. Uranbränslets anrikning och härdens kriticitet, dvs. neutronmultiplikationsfaktor k_{eff} , har varierats mellan 15–25 % U-235 respektive $0,90 < k_{\text{eff}} < 0,99$ för olika spallationsmålskonfigurationer²⁶ och värden på protonenergin E samt acceleratorströmmen I. Tabell 1 visar den beräknade härdeffekten P för ett representativt urval i parameterrummet. Nedan följer en sammanfattning av hur olika parametrar påverkar effekten i härdens.

Bränsleanrikning och kriticitet. Härdens dimensioner har varierats för att uppnå önskad underkriticitet vid en given anrikningsgrad U-235. I likhet med en traditionell, kritisk kärnreaktor ökar effekten i härdens med ökat k_{eff} -värde och ökad bränsleanrikning.

Protonenergi och strömstyrka. Protonenergin E från acceleratorn är avgörande för det antal neutroner som frigörs och sedermera tränger ut ur spallationsmålet per inkommande proton. Ett ADS arbetar typiskt vid protonenergier nära 1 GeV, vilket ger 20–30 neutroner per inkommande proton för ett typiskt spallationsmål av bly, bly-vismut eller kvicksilver. Det inkommande antalet protoner per sekund, dvs. acceleratorströmmen, bestämmer flödet av primära neutroner från spallationsmålet, som i sin tur påverkar fissionsraten och därmed effekten i härdens. Detta innebär att härdeffekten P i princip ökar linjärt med acceleratorströmmen I för ett givet spallationsmål. Sambandet syns tydligt i tabell 1 nedan och även om en minskad acceleratorström till viss del kan motverkas genom att öka protonenergin, är acceleratorströmmen avgörande för energiproduktionen i ett ADS.

Spallationsmål. I praktiken är skillnader i härdeffekt för bly, bly-vismut eller kvicksilver som spallationsmål försumbara. Det är istället materialens övriga egenskaper som smält- och kokpunkt samt bildandet av olika radionuklider som avgör vilket spallationsmål som är att föredra i ett givet ADS. Spallationsmålens dimensioner har mer direkt inverkan på härdeffekten eftersom en ökad storlek generellt leder till att fler

²⁵ <http://scale.ornl.gov>.

²⁶ Se Appendix.

Acceleratorström och spallationsmål	E [GeV]	P [kW/kg]	Kommentar
I = 1 mA			
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	0,1	
	0,8	0,3	
	1,2	0,5	
	2,0	0,8	
I = 10 mA			
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	1,3	
	0,8	3,5	
	1,2	5,2	
	2,0	8,0	
I = 20 mA			
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	0,8	15 % U-235
	0,8	2,0	15 % U-235
	1,2	3,0	15 % U-235
	2,0	4,6	15 % U-235
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	1,8	$k_{\text{eff}} = 0,90$
	0,8	4,7	$k_{\text{eff}} = 0,90$
	1,2	7,1	$k_{\text{eff}} = 0,90$
	2,0	11,0	$k_{\text{eff}} = 0,90$
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	2,6	
	0,8	6,9	
	1,2	10,4	
	2,0	16,0	
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	3,8	$k_{\text{eff}} = 0,97$
	0,8	10,1	$k_{\text{eff}} = 0,97$
	1,2	15,2	$k_{\text{eff}} = 0,97$
	2,0	23,5	$k_{\text{eff}} = 0,97$
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	6,4	$k_{\text{eff}} = 0,99$
	0,8	17,0	$k_{\text{eff}} = 0,99$
	1,2	25,5	$k_{\text{eff}} = 0,99$
	2,0	39,3	$k_{\text{eff}} = 0,99$
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	5,0	25 % U-235
	0,8	13,2	25 % U-235
	1,2	19,9	25 % U-235
	2,0	30,6	25 % U-235
Pb, L = 60 cm, d = 20 cm	0,4	2,4	
	0,8	7,5	
	1,2	11,8	
	2,0	18,9	
Pb, L = 60 cm, d = 40 cm	0,4	2,4	
	0,8	6,6	
	1,2	10,9	
	2,0	18,1	
Pb, L = 30 cm, d = 15 cm	1,2	9,9	
	1,8	13,5	
	2,5	16,8	
Pb-Bi, L = 30 cm, d = 10 cm	0,4	1,9	
	0,6	3,6	
Hg, L = 30 cm, d = 15 cm	1,2	9,0	
	1,8	12,6	
	2,5	15,8	
I = 100 mA			
Pb, L = 60 cm, d = 10 cm	0,4	12,9	
	0,8	34,5	
	1,2	51,8	
	2,0	79,8	

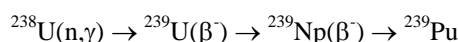
Tabell 1: Effekten P i en blykyld ADS-härd per kg ursprungligt metallbränsle vid varierad acceleratorström I och protonenergi E för cylindriska spallationsmål och härdkonfigurationer i urval. Bränslet är anrikat till 20 % U-235. $k_{\text{eff}} = 0,95$ om inte annat anges.

neutroner frigörs²⁷. Ett större strålmål agerar dock även som absorbatör av sekundära neutroner från härden vilket leder till att härdeffekten minskar trots att det antal primära neutroner som frigjorts från spallationsmålet är större.

Sammanfattningsvis kan spallationsmål och acceleratorparametrar väljas så att härden i ett ADS uppnår en önskad effekt²⁸ på mellan 5–30 kW/kg. Härdeffekten är i princip linjär mot acceleratorströmmen vilken också är den parameter som främst påverkar energiproduktionen. I praktiken är det den valda härdeffekten som tillsammans med bränslets anrikningsgrad som avgör möjlig plutoniumproduktion.

4.2. Plutoniumproduktion

Avsaknaden av egentlig neutronmoderering gör att ett bly- eller bly-vismutkylt ADS innehåller högre andel högenergetiska neutroner än t.ex. en lätt- eller tungvattenreaktor. De primära neutronerna från spallationsmålet är mycket högenergetiska och medför att neutronspektrumet t.o.m. har högre medelenergi än hos snabba blyreaktorer. Neutronspektrumet har mycket stor betydelse för vilka nuklider som bildas under bestrålning, inte minst de olika plutoniumisotoperna. Den kedja av processer som oavsett reaktortyp dominerar bidraget till produktion av Pu-239 är följande:



Neutroninfångning hos U-238 möjliggör betasönderfall i två steg till Pu-239. Neutroninfångning hos U-239 och Np-239 leder till att tyngre plutoniumisotoper bildas. Halveringstiderna hos dessa nuklider är emellertid så korta att neutroninfångning ger ett försumbart bidrag till uppbyggnaden av tyngre plutoniumisotoper. Den stora bidraget till produktion av tyngre plutoniumisotoper är följaktligen neutroninfångning hos Pu-239.

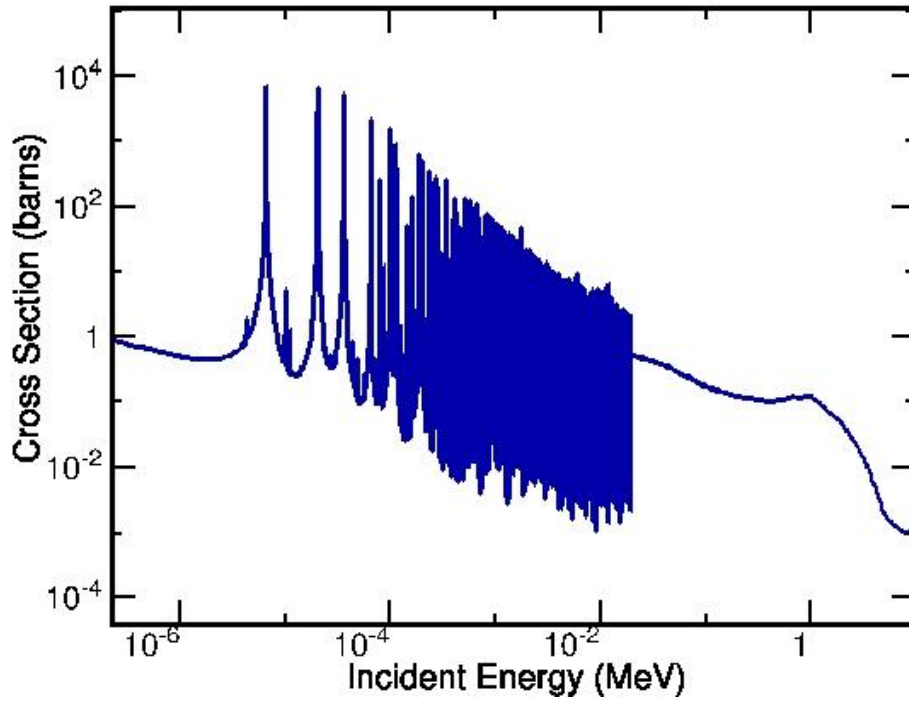
Medelenergin för fissionsneutroner i systemet är 2,1 MeV, att jämföra med ca 0,05 eV för termaliserade neutroner i lätt- eller tungvattenreaktorer. Medelenergin för spallationsneutroner är betydligt högre, ca 6–7 MeV beroende på detaljer i konfigurationen. Energifördelningen för fissionsneutronerna har en betydligt större andel neutroner med en energi lägre än 1 MeV jämfört med spallationsneutronerna, vilket har en avgörande betydelse vilket framgår nedan. Det kan även noteras att energispektrumet för de neutroner som frigörs vid fission förskjuts mot högre energier som funktion av den infallande neutronens energi, det vill säga om en högenergetisk neutron klyver en kärna kommer de frigjorda neutronerna ha en något högre energi jämfört med de i en termisk reaktor.

Neutroninfångningstvärsnittet hos U-238, som huvudsakligen reglerar hur mycket plutonium som produceras totalt, men inte fördelningen av tyngre plutoniumisotoper i någon större utsträckning, uppvisar minst skillnad, se figur 5. I det termiska energiområdet är tvärsnittet för infångning ca 1 barn. I intervallet runt 1 MeV har tvärsnittet sjunkit till ca 0,1 barn för att sedan snabbt avta för högre neutronenergi.

²⁷ Detta är givetvis en sanning med viss modifikation, i princip kan spallationsmålet vara så stort att de bildade neutronerna inte kan tränga ut, men påståendet gäller för all praktisk tillämpning i ett ADS med spallationsmål i bly, bly-vismut eller kvicksilver.

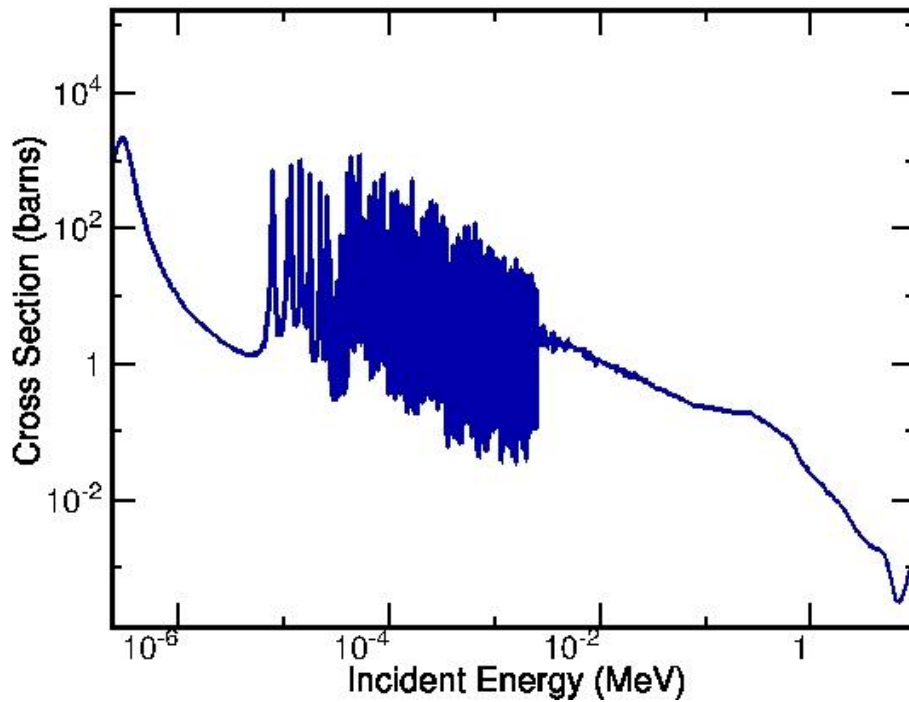
²⁸ Effekten som avses här är frigjord effekt per kilo bränsle. Den i sektion 2.2 angivna effekten avser den termiska effekten per liter som kan hanteras av olika kylmedium. Då bränslepäckningsgraden är olika för olika hårdkonfigurationer och kylmedium är de två olika parametrarna inte helt jämförbara.

Neutron Capture Cross Section, U-238



Figur 5: Neutroninfångningstvärsnittet i U-238 som funktion av neutronenergin. Data från ENDF/B-VII.0.

Neutron Capture Cross Section, Pu-239

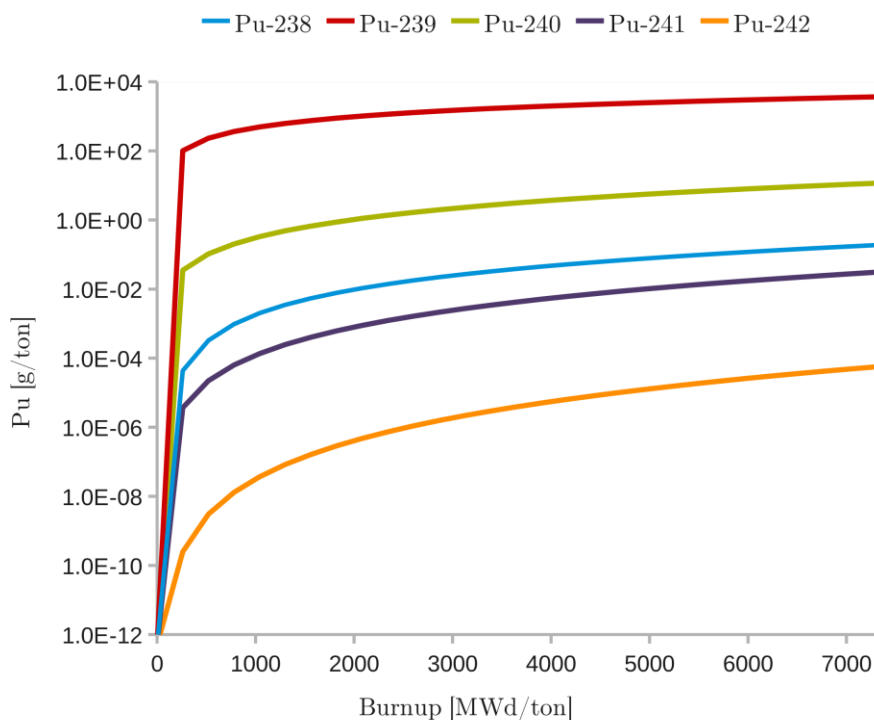


Figur 6: Neutroninfångningstvärsnittet i Pu-239 som funktion av neutronenergin. Data från ENDF/B-VII.0.

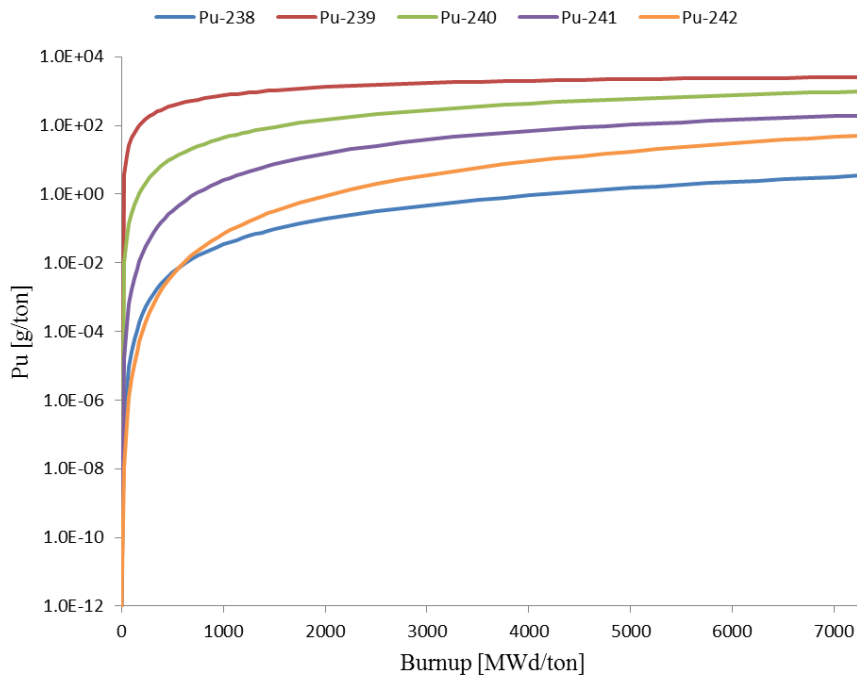
För neutroninfångning för Pu-239, som är den kritiska processen för bildandet av tyngre plutoniumisotoper, ser tvärsnittet lite annorlunda ut, se figur 6.

I den kritiska regionen runt 1 MeV är tvärsnittet betydligt lägre och kurvan viker neråt betydligt tidigare än i fallet U-238. Det betyder att en förskjutning av neutronenergierna mot högre värden, vilket samtidigt innebär en minskning av antalet lågenergetiska neutroner, leder till en betydande minskning av antalet neutroninfångningar i Pu-239. Samtidigt minskar antalet infångningar i U-238 vilket innebär en minskad total produktion av plutonium men inte i samma utsträckning. Detta medför således en drastisk minskning av produktionen av Pu-240 och tyngre plutoniumisotoper, samt en viss minskning i mängden plutonium som produceras totalt. Den totala halten tyngre plutoniumisotoper understiger en procent efter ett års bestrålning i ett ADS med en effekttäthet på 20 kW/kg, vilket åskådliggörs i figur 7. För en tungvattenreaktor med motsvarande effekttäthet överstiger halten 10 % redan efter 70–80 dygn.

Hur effektiv en reaktor eller ett subkritiskt system är för framställning av vapenplutonium avgörs huvudsakligen av två parametrar; plutoniumets önskade kvalitet och mängden plutonium som kan framställas per tidsenhet. Mängden plutonium som produceras är beroende av den termiska effekten, och en låg produktionstakt per MW kan kompenseras med högre total effekt. Andelen Pu-239 kan emellertid inte påverkas lika lätt, utan bränslebyte måste äga rum innan halten understiger för ändamålet acceptabla nivåer. Jämfört med långsamma reaktorer kan bränslet i ett typiskt ADS bestrålas längre innan halten av tyngre plutoniumisotoper blir för hög för användning som vapenplutonium, vilket åskådliggörs i figur 7 och 8.

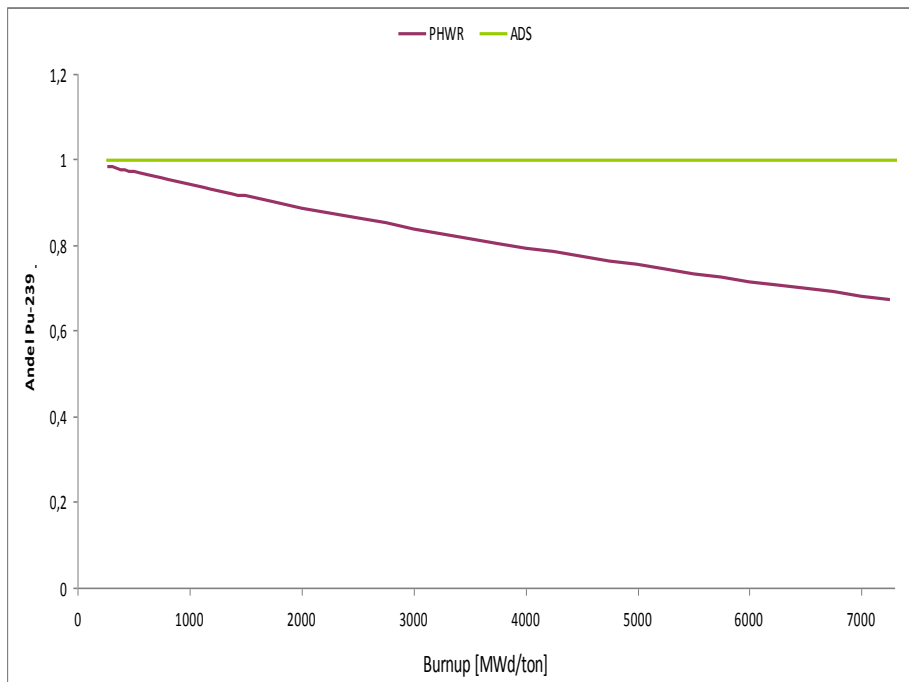


Figur 7: Halter av de olika plutoniumisotoperna Pu-238 till Pu-242 som funktion av bestrålningstid i ett typiskt ADS.

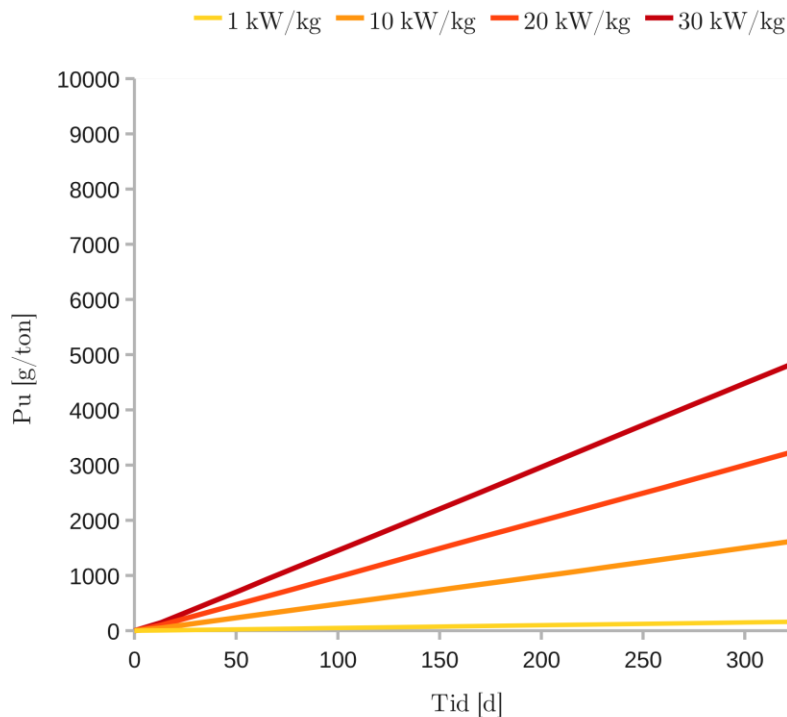


Figur 8: Halter av de olika plutoniumisotoperna i en långsam reaktor, här representerad av en tungvattenreaktor.

Ett ADS kan följaktligen användas för att framställa plutonium av god kvalitet, vilket framgår av figur 9.



Figur 9: Andelen Pu-239 i förhållande till den totala mängden plutonium vid en given utbränningsgrad i en långsam reaktor, här representerad av en tungvattenreaktor, och ett accelerator-drivet system. Plutonium av så kallad vapen kvalitet har en andel Pu-239 som överstiger 93 %.



Figur 10: Mängd plutonium som produceras under ett år per ton initial tungmetall för olika effekttätheter (1, 10, 20, 30 kW/kg metallbränsle). Den näst översta linjen motsvarar ett ADS med en acceleratorström på 20 mA och protonenergin 1–2 GeV, ett cylindriskt spallationsmål med $L = 60$ cm och $d = 10$ cm och en bränsleanrikning på 20 %.

Mängden som kan framställas är beroende av hur hög effekt systemet har, vilket presenteras i figur 10 ovan. En typisk tungvattenreaktor kan generera 5–6 kg plutonium per ton bränsle och år, medan ett ADS med motsvarande effekttäthet ger 3–4 kg. Till skillnad från ADS genereras i en tungvattenreaktor tyngre plutoniumisotoper i icke försumbar halt. Därför måste bränslebyte göras för att hög halt Pu-239 ska bevaras; för en traditionell tungvattenreaktor med en effekttäthet på 20 kW/kg krävs fyra till fem byten per år. Avgörande faktorer för hur hög termisk effekt som kan nås är bland annat accelerators effekt, härdens storlek och hur effektivt värme kan ledas bort från härdens.

4.3. Plutoniumproduktion – sammanfattning

Som det framgår av diskussionen ovan är från ett teoretiskt perspektiv ett ADS ett utmärkt verktyg för att framställa plutonium av vapenkvalitet eftersom produktionen av de tyngre plutoniumisotoperna minimeras och kostsamma eller avslöjande bränslebyten kan undvikas. Det senare kan framför allt vara viktigt för en aktör med en begränsad tillgång på bränsle.

Det framkom även att kvaliteten på det plutonium som bildas berodde på det energispektrum som systemet uppvisar. För lägsta möjliga halt tyngre plutoniumisotoper bör man sålunda undvika natrium- och gaskylda härdar²⁹ utan fokusera på bly- eller blyvismutkylda härdar. Ju högre värdet på k_{eff} är, desto mer kommer härdens att likna en traditionell fissionshärd med en lägre medelneutronenergi och därmed högre produkt-

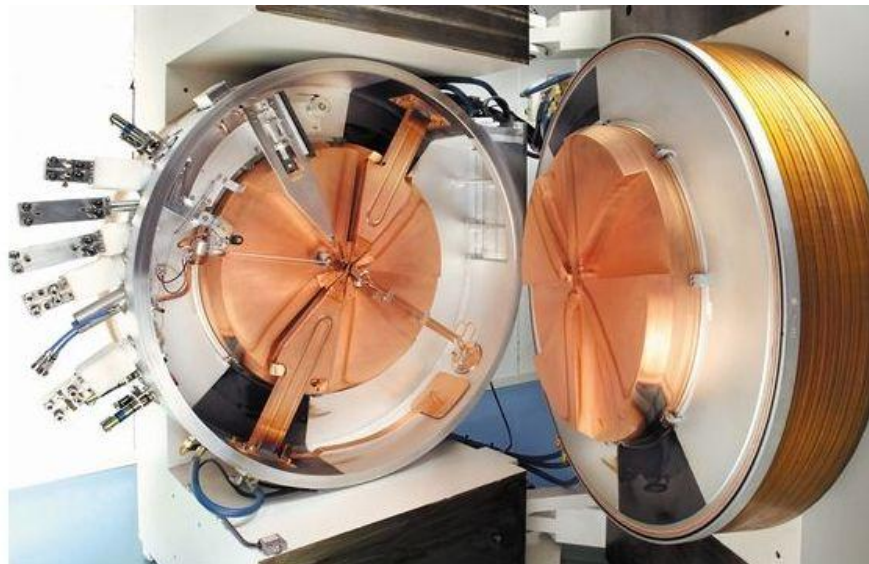
²⁹ Eventuellt med undantag för natriumsaltkylda härdar med flytande bränsle och on-line-separation av plutonium.

ionstakt av tyngre plutoniumisotoper. En mer underkritisk härd ger ett hårdare spektrum och därmed även lägre andel tunga isotoper, men till priset av en större och därmed dyrare och mer komplicerad accelerator. En fortfarande utestående fråga är om det plutonium som produceras i en normal blykyld snabb reaktor är "tillräckligt" bra eller om ADS faktiskt tillför något i plutoniumproduktionshänseende som motiverar den ökade komplexiteten.

5. Spridningsrisker och exportkontroll

Ett underkritiskt system, oavsett om det är för kraftproduktion eller transmutering, och oavsett om det utnyttjar snabba eller termiska neutroner, delar en stor del av sin teknologi med motsvarande kritiska system. Frågan om spridningsrisker och exportkontroll kompliceras av att acceleratordrivna underkritiska system inte täcks av NSG:s Part 1 eller 2 (återfinns i Rådets förordning (EG) nr 428/2009 med uppdateringar) där endast reaktorer, det vill säga kritiska reaktorer enligt den underliggande definitionen, står under exportkontroll. Detta får till följd att en export inte kan beläggas med Part-1-villkor om regeringsgarantier osv. Produkter och teknologi kan dock fortfarande kontrolleras och eventuellt stoppas enligt de villkor som gäller för produkter med dubbla användningsområden, inklusive så kallad *catch-all*, det vill säga kontroll av känsliga produkter utanför kontrollistan.

Neutronkällan och framför allt protonacceleratorn utgör den största skillnaden mellan ett underkritiskt och ett kritiskt system ur ett exportkontrollsperspektiv. Acceleratorer är fortfarande ingen massprodukt även om det finns flera tillverkare av framför allt cyklotroner för framställning av medicinska isotoper, se nedan. För övrigt är accelerators i huvudsak unika produkter som konstrueras för att möta ett visst behov, oftast i nära samarbete mellan kunden och konstruktören. Driften av en accelerator av den storleksordning som är aktuell i ett ADS ställer mycket stora krav på brukarens tekniska kompetens. Därför är det troligt att en proliferator i god tid sänder forskare och studenter till de olika acceleratorcentrum som finns runt om i världen för att tillgodogöra sig den kunskap som finns. Konsulär vaksamhet är därför viktigt som ett icke-spridningsverktyg men frågan kompliceras av att teknologin som ovan nämnts inte är formellt kontrollerad.



Figur 11: Cyklotron för produktion av medicinska isotoper, från GE Healthcare

Tillgängligheten på cyklotroner för framställning av medicinska isotoper ökar och de kan i dag mer eller mindre köpas över disk även om de fortfarande är dyra och kräver installation på plats av kompetent personal. Dock så är de idag tillgängliga acceleratorserna så pass små, typiska energier är under 80 MeV och strömmar på under 1 mA, att

de inte utgör någon större spridningsrisk. Cyklotroner som ska producera protoner med energi kring 1 GeV måste specialdesignas för att ta hänsyn till relativistiska effekter. Cyklotroner för medicinskt bruk är dessutom i de allra flesta fall pulssade vilket gör dem ännu mindre lämpliga för produktion. Det är dock ett fullt möjligt scenario att en proliferator införskaffar en dylik i ett tidigt skede för forskning och utbildning.

Om en proliferator väljer att bygga en underkritisk anläggning baserad på snabba neutroner kommer olika former av höglegerade stål³⁰ att vara en efterfrågad produkt. Dessa är idag inte heller kontrollerade, vare sig NSG:s Part 1 eller Part 2. Framför allt är det frågan om ferritisk-martensitiska stål, t.ex. EM10, EM12, FV448, HT9 och H91, och så kallade ODS-stål, t ex MA956, MA957 och PM 2000.

³⁰ Se till exempel Andersson *et al.*, Fjärde generationens reaktorer, SSM, 2013.

6. Diskussion

Accelerator drivna underkritiska system skiljer sig inte i praktiken från motsvarande kritiska system med några undantag. De har samma behov av sekundära säkerhetssystem, kylsystem och högteknologiska komponenter. De är minst lika komplicerade att bygga och driva, om inte mer på grund av den accelerator som behövs för att få de neutronflöden som eftersträvas i härden.

Det finns tre legitima skäl som talar för ADS. För det första kan klyvningsprocessen när som helst avbrytas genom att neutronkällan stängs av. En metallkyld härd svalnar på mindre än en sekund³¹. För det andra kan ett system som är tillräckligt underkritiskt konstrueras utan styrstavar vilket gör anläggningen billigare och ökar den passiva säkerheten då ytterligare en möjlig felkälla har avlägsnats. För det tredje kan en tillräckligt underkritisk härd på ett betydligt enklare och säkrare sätt transmuttera även tyngre aktinider med en lägre andel fördröjda neutroner än en kritisk härd.

För en proliferator skulle en satsning på ett ADS i stället för en kritisk reaktor av samma grundtyp i princip ske utanför exportkontrollregimernas räckvidd men det är föga troligt att det skulle kunna ske utan att dra oönskad uppmärksamhet till projektet. Antalet leverantörer av den nödvändiga utrustningen är begränsat och de skulle troligen reagera på inköpsförsök utan motsvarande regeringsgarantier då huvuddelen av utrustningen är gemensam.

Studien visar att ett ADS i den populäraste konfigurationen, med snabba neutroner och bly eller bly-vismut som kylmedel, är en oöverträffad producent av plutonium av vapenkvalitet, framför allt om härden är kraftigt underkritisk så att neutronflödet domineras av spallationsneutroner och därför har en låg andel neutroner med en energi som understiger 1 MeV. Bränslet kan förbli i härden under en betydligt längre tid än i både termiska och snabba kritiska reaktorer vilket underlättar för en proliferator med begränsad tillgång på bränsle, eftersom en given mängd uranbränsle då ger mer plutonium. De härdtyper som har störst potential för att kunna producera plutonium av vapenkvalitet förutsätter att härden initialt laddas med uranbaserat bränsle anrikat till ca 20 % U-235 eller motsvarande mängd plutonium i form av MOX-bränsle. Då det i det senare fallet inte ställs några krav på låga halter av tyngre plutoniumisotoper eller andra tyngre aktinider så skulle ADS baserade på denna typ av härdar utgöra utmärkta "plutoniumväxlar" som kan laddas med plutonium med hög halt Pu-240 från t.ex. lättvattenreaktorer för att sedan producera plutonium av vapenkvalitet.

De allra flesta studier av ADS har fastnat för blykylda snabbreaktorer med en linjär protonaccelerator som utnyttjar kylmedlet som spallationsmål. Som alternativ förekommer smältsalthärdar med snabba reaktorer, framför allt i *breeder*-konfiguration. För de som verkar i olika icke-spridningsfunktioner, i Sverige t ex ISP och SSM, ställer underkritiska anläggningar samma identifikations- och klassifikationsproblem som motsvarande kritiska anläggningar där kanske tillkomsten av nya material jämfört med dagens lättvattenreaktorer, utgör den största utmaningen.

De tekniska lösningar som har föreslagits för den europeiska spallationskällan ESS är i huvudsak olämpliga för användning i ett ADS för kraft- eller plutoniumproduktion. Acceleratorn är av pulsad typ med en, i sammanhanget, låg repetitions hastighet och

³¹ Jämfört med den normala drifttemperaturen. Precis som i kritiska reaktorer måste restvärmen från sönderfallet av fissionsprodukterna kylas bort.

hög dödtid vilket gör den olämplig för användning tillsammans med en snabb härd. Spallationsmålet är av en mycket speciell design som i princip är helt omöjlig att använda i en härd utan mycket omfattande modifikationer. De komponenter och under-system hos ESS som skulle kunna vara relevanta i spridningshänseende är av mer generell karaktär såsom pumpar, ventiler och övervakningssystem men dessa är troligen specialanpassade för just ESS med de begränsningar som det innebär, se ovan, eller så är de av liknande modell som de som redan idag används inom den kärntekniska industrin.

En mer komplicerad fråga i samband med ESS är den om teknologi- och kunskapsöverföring. I strikt mening kommer ESS inte att hantera teknologier som är kontrollerade, enligt den bedömning som författarna till denna studie gör, men trots det så kan det finnas kunskap inom projektet som är attraktiv för en proliferatör, framför allt inom acceleratorområdet. Dock så är denna fråga större och av mer generell karaktär och faller utanför ramarna för denna studie.

Appendix

Spallationsmål

Tabell 2 listar de cylindriska spallationsmålskonfigurationer och protonenergier som använts i parameterstudien i kapitel 4.

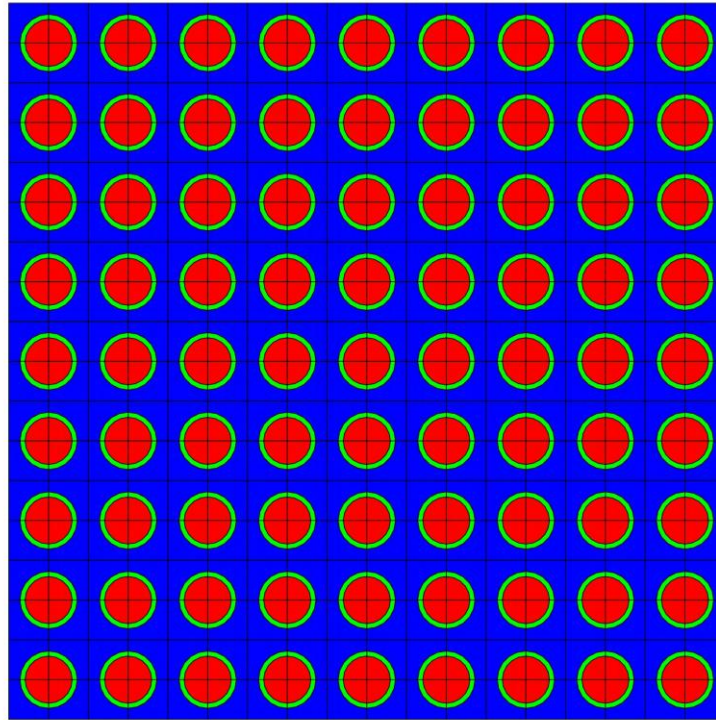
Spallationsmål	L [cm]	d [cm]	E [GeV]	n/p	Spallationsdata ³²
Pb	60	10	0,4	6	Bungau <i>et al.</i>
Pb	60	10	0,8	16	"
Pb	60	10	1,2	24	"
Pb	60	10	2,0	37	"
Pb	60	20	0,4	6	"
Pb	60	20	0,8	19	"
Pb	60	20	1,2	30	"
Pb	60	20	2,0	48	"
Pb	60	40	0,4	8	"
Pb	60	40	0,8	22	"
Pb	60	40	1,2	36	"
Pb	60	40	2,0	60	"
Pb	60	80	0,4	8	"
Pb	60	80	0,8	24	"
Pb	60	80	1,2	40	"
Pb	60	80	2,0	67	"
Pb	30	15	1,2	22,05	Letourneau <i>et al.</i>
Pb	30	15	1,8	29,98	"
Pb	30	15	2,5	37,47	"
Pb-Bi	30	10	0,42	3,80	Meer <i>et al.</i>
Pb-Bi	30	10	0,59	7,10	"
Hg	30	15	1,2	21,91	Letourneau <i>et al.</i>
Hg	30	15	1,8	30,60	"
Hg	30	15	2,5	38,38	"

Tabell 2: Spallationsmålskonfigurationer för parameterstudie där L och d utgör längden respektive diametern på det cylindriska spallationsmålet. E är protonenergin från acceleratorm och n/p är antalet neutroner som tränger ut ur spallationsmålet per inkommande proton. Massandelen vismut i spallationsmålet Pb-Bi är ca 46 %.

³² Spallationsdata, dvs. antalet utgående neutroner per inkommande proton n/p, från följande publikationer:
 C. Bungau et al., "Neutron Spallation Studies for an Accelerator Driven Subcritical Reactor", Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada (2009) s. 1351–1353.
 D. Hilscher et al., "Neutron production by hadron-induced spallation reactions in thin and thick Pb and U targets from 1 to 5 GeV", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 414 (1998) s. 100–116.
 A. Letourneau et al., "Neutron production in bombardments of thin and thick W, Hg, Pb targets by 0.4, 0.8, 1.2, 1.8 and 2.5 GeV protons", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 170 (2000) s. 299–322.
 K. van der Meer et al., "Spallation yields of neutrons produced in thick lead-bismuth targets by protons at incident energies of 420 and 590 MeV", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 217 (2004) s. 202–220.

Härdkonfiguration

Figur 12 visar bränslestavarnas placering i ett utsnitt av den härd som använts i parameterstudien. Konfigurationen är mycket lik en typisk uranbaserad, blykyld snabbreaktor (LFR, *lead-cooled fast reactor*) och härdens totala dimensioner har varierats för att uppnå önskad underkriticitet vid given anrikningsgrad U-235.



Figur 12: Utsnitt av härd med bränsle av uranoxid (röd), inkapslat med zircalloy (grön) och kylt med bly (blå). En bränslestavs diameter är 12,7 mm inklusive inkapsling.



2013:05

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 250 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se