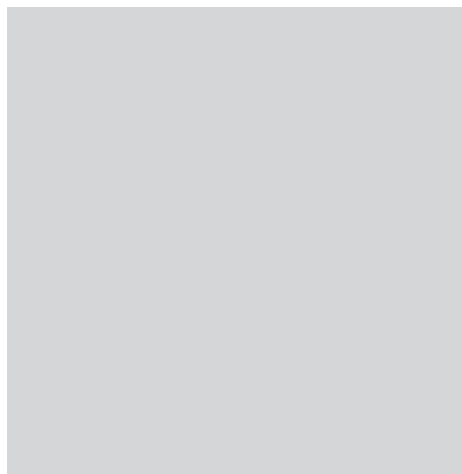
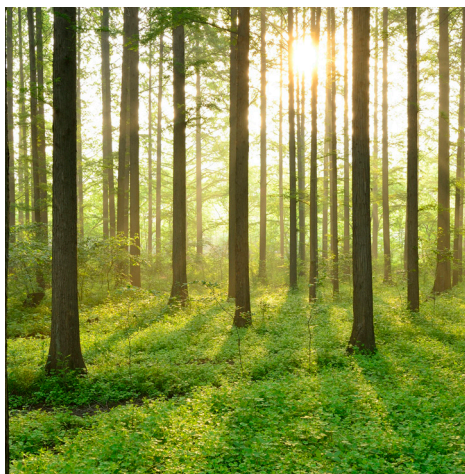


FJÄRDE GENERATIONENS KÄRNKRAFT

RAPPORT 2016:317



Fjärde generationens kärnkraft

Teknik, möjligheter och förutsättningar

DANIEL WESTLÉN

ISBN 978-91-7673-317-2 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Det talas mycket om fjärde generationens kärnkraft och om hur den här nya tekniken skulle kunna leda till ett förändrat framtida energisystem där kärnkraften har en viktig roll. Den nya tekniken har stora möjligheter, men det finns också en del utmaningar som behöver hanteras.

Allt fler pratar om den nya tekniken. Diskussionen förs inte bara bland forskare och ingenjörer utan även bland exempelvis politiker och journalister. Riksdagen har vid flera tillfällen på senare år hanterat motioner som tagit upp ämnet. Energiforsk har därför tagit initiativ till denna summerande rapport för att beskriva var tekniken står i dag och hur den kan komma in i framtidens energisystem. Till att börja med kommer den att samexistera med befintliga lättvattenreaktorer, men förutsett att tekniken håller vad den lovar så kan den ta över i takt med att de befintliga lättvattenreaktorerna når sin livslängd.

I samband med att denna rapport togs fram så skrevs även en sammanfattande skrift som kan laddas ned från Energiforsks hemsida. Författare till båda dessa skrifter är Daniel Westlén, disputerad inom reaktorfysik vid KTH och för närvarande verksam inom Vattenfall och SKB.

Carl Hellesen och Sophie Grape från Uppsala universitet, Christian Ekberg från Chalmers och Carl Berglöf på Vattenfall har bidragit under utarbetandet av texten. Illustrationer är gjorda av Lova Delfin.

Monika Adsten, Områdesansvarig Kärnkraft

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Fjärde generationens kärnkraft eller Generation IV (Gen IV) är benämningen på kärnkraftssystem som kan leverera obegränsade mängder hållbar energi utan att lämna efter sig långlivat avfall. Dessutom finns krav på att både reaktorer och övriga anläggningar ska vara utformade så att de inte kan drabbas av olyckor med stora konsekvenser. Det får inte heller finnas något sätt att avleda klyvbart material från bränslecykeln för att använda det för vapenändamål.

De här kraven sätter upp strikta ramar för hur reaktorer och bränslecykelanläggningar kan vara utformade. Det krävs att kärnbränslet utnyttjas fullt ut genom så kallad bridning. Bridning innebär att nytt bränsle bildas av det uran som i dagens reaktorer aldrig kommer till användning.

Det krävs också att bränslet kemiskt upparbetas så att det klyvbart material som finns kvar i det använda bränslet kan återföras till bränsletillverkningen. I upparbetningen tas också långlivade ämnen omhand. De återförs till reaktorerna där de genom kärnreaktioner ombildas till ämnen med korta halveringstider.

Avfallet från ett Gen IV-system behöver placeras i slutförvar, men dess radioaktivitet klingar av betydligt snabbare än den gör för avfallet från dagens reaktorer. Efter några hundra till tusen år är avfallets radioaktivitet jämförbar med aktiviteten i det uran från naturen som idag används till att producera kärnbränsle.

Det mesta av den teknik som behövs för att börja bygga fjärde generationens kärnkraft finns tillgänglig. Forskningen har pågått sedan 1950-talet och det mesta av tekniken har testats i stor skala. Det som återstår är att visa att systemet som helhet fungerar. Tekniken för att återföra de långlivade ämnena till bränslet behöver också skalas upp till en industriell process.

Det avgörande skälet för att börja bygga ut fjärde generationens kärnkraft är att den ger möjlighet att ersätta de fossila bränslena globalt samtidigt som tillgången på energi kan ökas. Stora delar av världens befolkning skulle behöva använda mer energi snarare än mindre. Att klara av det samtidigt som utsläppen av koldioxid måste minska är utmanande. Kärnkraften har stor potential att bidra, men för att systemet ska bli uthålligt behövs på sikt en övergång till Gen IV.

Summary

Fourth generation nuclear power, or Generation IV (Gen IV), is the label of nuclear power systems capable of delivering unlimited amounts of sustainable energy without leaving long-lived wastes behind. There is also the requirement that reactors as well as other facilities should be designed so that the risk of accidents with significant consequences is practically eliminated. Further, there may not be any routes through which fissile material may be diverted from the fuel cycle to be used for weapons.

These requirements pose strict boundaries for how reactors and fuel cycle facilities may be designed. Full utilisation of the fuel through so called breeding is mandatory. Breeding implies that new fuel is formed out of uranium never coming to use in the operation of today's reactors.

It is also required that spent fuel is reprocessed chemically so that fissile material remaining in the fuel may be returned to the production of new fuel. In reprocessing long-lived nuclides are also retrieved. They are returned to the reactors as part of the fuel, where they may be transformed to short lived nuclides through nuclear reactions.

The waste from a Generation IV-system has to be placed in a repository, but its radioactivity diminishes considerably faster than the radioactivity emanating from the waste from today's reactors. After a few hundred to a thousand years, the radioactivity of the Gen IV-waste is comparable with that from the natural uranium that is today used for producing nuclear fuel.

Most of the technology required to implement the fourth generation nuclear power is available. Research has been ongoing since the 1950s and most of the technology has been tested at large scale. What essentially remains is to prove that the system as a whole works. The technique for returning the long-lived elements to the fuel also needs scaling up to an industrial process.

The main reason to implement fourth generation nuclear systems is its capability of replacing fossil fuels on a global scale while simultaneously allowing the use of energy to increase. A large share of the population of the world would need to use more energy rather than less. Making this happen when the carbon dioxide emissions have to be reduced is demanding. Nuclear power has great potential of contributing, but for the system to become sustainable, a shift to Gen IV is eventually needed.

Innehåll

1	Inledning	9
2	Reaktorfysik	10
2.1	Kärnklyvning	10
2.2	Bridning	12
3	Vägen till Generation IV	15
3.1	Om lättvattenreaktorernas dominans	15
3.2	Utvecklingen av bridreaktorer	16
3.3	Startskottet för Generation IV	16
3.4	Pågående Generation IV-utveckling	18
4	Upparbetning	19
4.1	Akvatisk upparbetning	19
4.2	Pyrokemisk upparbetning	20
4.3	Upparbetning idag	21
5	Bränslecykler	23
5.1	Utvecklingen mot en sluten bränslecykel	23
5.2	Avfallsströmmar	24
5.3	En övergång till Generation IV	25
5.4	Tidsperspektiv	27
6	Framtidsutsikter	28
7	Generation IV i Sverige	29
8	Ordlista	30

1 Inledning

Det var tidigt känt att kärnkraften har potential att lösa en av mänsklighetens stora utmaningar – obegränsad tillgång på energi. Nyckeln ligger i att utforma reaktorerna så att de bildar nytt bränsle samtidigt som de producerar energi. Med sådana reaktorer blir uranförlukningen så liten att tillgången på bränsle aldrig kommer att bli ett problem. Det gäller även om väldigt många reaktorer skulle byggas och även om kärnkraften skulle ersätta de fossila bränslena som basen i energiförlukningen.

Reaktorer som bildar sitt eget bränsle brukar kallas bridreaktorer. De kallas också ofta fjärde generationens reaktorer eller Generation IV. I begreppet Generation-IV (Gen IV) ingår också att reaktorerna tar hand om de långlivade radioaktiva ämnen som finns i använt kärnbränsle. Det avfall som ett Gen IV-system lämnar efter sig blir kortlivat och ofarligt inom 1000 år.

Intresset för den här tekniken har funnits länge. Bridreaktorer utvecklades redan i kärnkraftens barndom. Men trots det har inget Gen IV-system byggts. Flera av komponenterna har testats var och en för sig, men än så länge är det inte visat att systemet fungerar.

Tanken med den här skriften är att reda ut begreppen och ge en bild av vad vi kan hoppas på av framtidens kärnkraft men också att diskutera varför energisystemen runt om i världen inte redan bygger på fjärde generationens reaktorer.

2 Reaktorfysik

För att det ska gå att förstå hur ett Gen IV-system skiljer sig från dagens kärnkraft behövs en grundläggande förståelse för vad som händer i en reaktor och hur vi kan påverka fysiken genom hur vi utformar härden och hur vi väljer kylmedel och material i reaktorn.

2.1 KÄRNKLYVNING

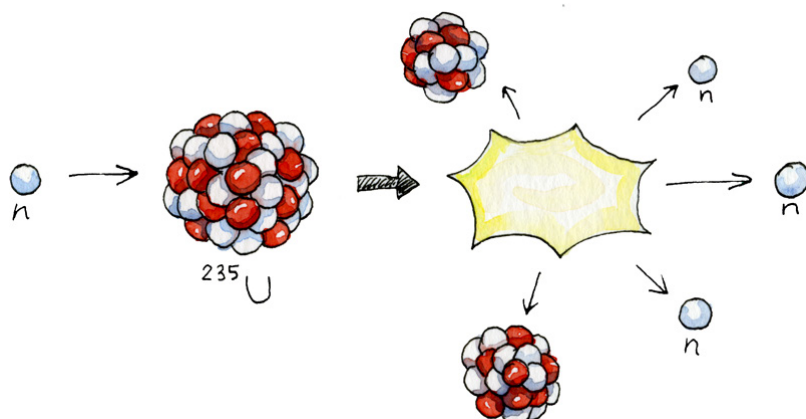
Uran i naturen består av två *isotoper*¹. En av dem, ^{235}U (uran-235), är *klyvbar* i de *lättvattenreaktorer*² som dominerar kärnkraften i världen. Den andra naturligt förekommande uranisotopen, ^{238}U , fungerar inte som bränsle i lättvattenreaktorer. Men den kan genom en kärnreaktion där den fångar in en neutron bilda ^{239}Pu (plutonium-239) som är ett utmärkt kärnbränsle. Plutonium finns inte i naturen. Det måste tillverkas av oss människor³.

När en klyvbar atomkärna träffas av en neutron klyvs den med en viss sannolikhet i två, eller i sällsynta fall tre, lättare kärnor. Ett grundämne omvandlas på det sättet till andra. De atomkärnor som bildas på det här sättet kallas *klyvningsprodukter*. Förutom klyvningsprodukterna uppstår fria neutroner (Figur 1). De kan i sin tur ge upphov till nya klyvningsreaktioner. I en tillräcklig stor mängd klyvbart material - *kritisk massa* - blir en kedjereaktion av kärnklyvningar självunderhållande. Varje klyvning ger i genomsnitt upphov till en ny och kedjereaktionen fortsätter så länge det finns minst en kritisk massa av det klyvbara ämnet kvar.

¹ Isotoper av samma grundämne består av lika många protoner men olika många neutroner. De har samma kemiska egenskaper, men beter sig olika i en reaktor.

² Lätt vatten är vanligt vatten. Uttrycket kommer av att man vill skilja det från tungt vatten där vätet består av den tyngre väteisotopen deuterium. Tungt vatten kan också användas som kylmedel och moderator till reaktorer.

³ På motsvarande sätt bildas en annan klyvbar uranisotop, ^{233}U , genom att ^{232}Th (torium) fångar in en neutron. Även torium finns i naturen men kan alltså inte användas direkt som bränsle till reaktorer. Torium-uranbränslecykeln är tänkbar för flera olika reaktortyper. Den har några för- och några nackdelar i jämförelse med uran-plutoniumbränslecykeln. Men den här skriften beskriver inte dem närmare.

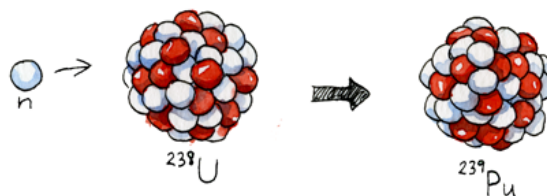


Figur 1: När en klyvbar atomkärna, till exempel ^{235}U , träffas av en neutron klyvs den med en viss sannolikhet i två, eller ibland tre, lättare atomer. Det frigörs också neutroner som i sin tur kan starta nya klyvningsreaktioner. Kärnklyvningen avger stora mängder energi.

Vid kärnklyvningen frigörs stora mängder energi. Energiutvecklingen är miljontals gånger större än i kemiska reaktioner⁴. Det gör att en reaktor kan utvinna mycket stora mängder energi ur små mängder bränsle. Dagens svenska reaktorer behöver förse med ungefär 20-25 ton bränsle per reaktor och år. Som jämförelse konsumerar ett kolkraftverk i samma storlek några miljoner ton kol per år. Då ska vi minnas att de lättvattenreaktorer som finns i Sverige – och som dominerar kärnkraften i världen – bara utnyttjar enstaka procent av uranet innan bränslet behöver bytas ut. Det mesta av uranet finns kvar när bränslet tas ur reaktorn.

När bränslet sätts in i en lättvattenreaktor består det till några procent av ^{235}U . Resten är ^{238}U . Under de vanligen fem år bränslet befinner sig i reaktorn uppstår ämnen lättare än uran, klyvningsprodukter, genom kärnklyvningarna. Det bildas också ämnen som är tyngre än uran genom att neutroner fångas in i de båda uranisotoperna. Det ämne som på det här sättet byggs upp i störst mängd är plutonium (Figur 2).

⁴ Ett exempel på en kemisk reaktion som frigör energi är den oxidation som sker när något brinner.



Figur 2 Förutom klyvningsreaktioner sker också infångningsreaktioner i reaktorn. Om en neutron fångas in i ^{238}U som är en fertil kärna bildas – genom två radioaktiva sönderfall - en ny klyvbar atomkärna, ^{239}Pu .

När bränslet tas ur reaktorn består det fortfarande till runt 95 procent av uran. Omkring fyra procent är klyvningsprodukter och den sista procenten består av ämnen tyngre än uran.

Klyvningsprodukterna har vanligen ganska korta halveringstider⁵. Några få är lite mer långlivade, men några hundra år efter att bränslet tagits ur reaktorn finns i princip inget kvar av klyvningsprodukterna. De tunga ämnena å andra sidan är mer stabila och försvinner mycket långsammare ur bränslet. Det är den lilla andelen av tunga ämnen som byggts upp i reaktorn som gör att det använda bränslet från dagens reaktorer behöver behandlas med respekt under flera hundra tusen år. Gen IV ändrar på det genom att de tunga ämnena inte behandlas som avfall. De återanvänds istället som bränsle i reaktorerna.

2.2 BRIDNING

En reaktor som producerar mer klyvbart material än den konsumerar kallas bridreaktor. Klyvbara kärnor bildas när neutroner fångas in i *fertila kärnor*, till exempel i ^{238}U . För att bridning ska vara möjlig krävs en god neutronekonomi. Det behöver finnas tillräckligt många neutroner i reaktorn för att nya kärnklyvningar

⁵ Varje radioaktiv isotop har en halveringstid. Det är den tid det tar för hälften av atomkärnorna av isotopen att sönderfalla till någon annan isotop.

ska kunna starta trots att neutroner används till att bygga upp mer klyvbart material.

Vid varje kärnklyvning frigörs ett antal neutroner. En av dem behövs för att klyva nästa kärna och hålla igång kedjereaktionen. Det behövs också neutroner för att reaktorns effekt ska gå att reglera. En viss andel av neutronerna fångas under drift in i reaktorns *styrstavar*. Om styrstavarna dras ur reaktorn fångas färre neutroner in och effekten ökar. När de skjuts in fångar de in fler neutroner och effekten minskar. I en lättvattenreaktor kan man kosta på sig att låta resten av de neutroner som frigjordes vid kärnklyvningen avvaras till förluster. Förlusterna består till exempel i att en del neutroner läcker ut ur reaktorn och att en del fångas in i andra material i reaktorn än i bränslet. Trots förlusterna finns det i lättvattenreaktorn tillräckligt många neutroner kvar för att kedjereaktionen ska vara självunderhållande.

I en bridreaktor är neutronekonomin mer ansträngd. Här behöver det bli en neutron per kärnklyvning över för att bygga upp en ny kärna som kan klyvas. För att det här ska fungera och neutronekonomin gå ihop måste reaktorn optimeras. Kylmedel och konstruktionsmaterial måste väljas med omsorg och läckaget av neutroner till omgivningen måste göras så litet som möjligt.

I en lättvattenreaktor *modereras* neutronerna. Under modereringen bromsas de in tills de nått samma hastigheter⁶ som andra partiklar i reaktorn. Först då startar de nästa kärnklyvning.

När neutronerna inte modereras träffar de atomkärnorna med hög energi. Klyvningsreaktioner som startas av neutroner med hög energi – snabba neutroner – ger ett högre neutronutbyte än klyvning som startas av långsamma neutroner. Fler neutroner frigörs. Det är också så att sannolikheten ökar för att en neutron ska klyva en kärna - istället för att fångas in av den och bygga en tyngre isotop – när energin är högre. Sammantaget ger högre neutronenergi bättre neutronekonomi och gör det lättare att åstadkomma bridning.

En reaktor som är konstruerad för att undvika moderering kallas snabbreaktor. Här vill man att neutronerna ska behålla sin höga energi. Moderering försämrar också neutronekonomin då en del neutroner fångas in i ämnet som används för att moderera dem.

Det går inte att accelerera neutronerna i reaktorn, men det går att minimera inbromsningen mellan det att de föds i en klyvningsreaktion och det att de startar nästa. När neutroner kolliderar med lätta ämnen förlorar de mycket energi. Man vill alltså välja material i reaktorn som består av tunga grundämnen, men man vill också välja grundämnen som har liten sannolikhet att överhuvudtaget interagera med neutroner.

För att minska förlusten av neutroner ut ur reaktorn kan man omge reaktorn med en *mantel* av ^{238}U . De neutroner som läcker ur reaktorn fångas i manteln och bygger där upp klyvbart ^{239}Pu .

⁶ Med ett annat ord kan man säga att neutronerna då har samma temperatur som den omgivande materien.

De stränga kraven på neutronekonomin gör att vatten inte kan användas som kylmedel i en bridreaktor. Vatten skulle effektivt bromsa neutronerna och därmed i praktiken⁷ omöjliggöra bridning. Istället är det främst flytande metaller som används. Bland dem har natrium varit det mest förekommande valet i de bridreaktorer som byggts runt om i världen. Andra möjligheter är bly eller bly-vismutlegering. Man kan också använda gaser som kylmedel, där helium är det bästa alternativet. Helium interagerar väldigt lite med neutroner och modererar därför knappt alls neutroner trots att det är ett lätt ämne.

⁷ Det är möjligt att konstruera reaktorer som uppnår bridning utan att de är snabbreaktorer. Begreppen snabbreaktor och bridreaktor är därför inte helt utbytbara.

3 Vägen till Generation IV

3.1 OM LÄTTVATTENREAKTORERNAS DOMINANS

Dagens kärnkraft domineras av lättvattenreaktorer. Det finns andra typer av reaktorer i drift, men de hör till undantagen. Lättvattenreaktortekniken är väl etablerad och det finns en omfattande drifterfarenhet. Det finns flera leverantörer som bygger reaktorer och som också levererar bränsle och service till de reaktorer som är i drift.

Lättvattentekniken valdes från början ut av den amerikanska flottan för att driva ubåtar. Det fanns en lång rad möjliga reaktortekniker att välja mellan, men man valde av olika skäl reaktorer där vatten används både som kylmedel och som moderator. När man väl kommit igång med att bygga ubåtsreaktorer var det ganska enkelt att flytta iland samma teknik för att bygga kraftverk. Leverantörerna hade skaffat sig erfarenhet och det fanns personal från flottan som kunde driva reaktorerna.

Parallellt med utvecklingen av lättvattenreaktorerna arbetade man i många länder på att ta fram andra typer av reaktorer, alla med sina fördelar och svagheter. I Sverige var utvecklingen till en början inriktad på tungvattenkylda reaktorer⁸. I Tyskland och Storbritannien låg fokus på gaskylda, grafitmodererade reaktorer⁹.

Med tiden blev dock lättvattenreaktorn mer och mer dominerande. Man samlade på sig drifterfarenhet och förbättrade både reaktorernas konstruktion men också rutinerna för drift och underhåll baserat på de lärdomar man drog. Reaktorerna blev också större utan att för den skull kräva särskilt mycket mer personal. Driftkostnaderna sjönk.

För den som ska fatta beslut om en stor investering på affärsmässiga grunder är det intressant att kunna se att någon annan fått den teknik man vill bygga att fungera. Man vill också att det ska finnas flera leverantörer som kan konkurrera om att leverera reservdelar och service. Lättvattenreaktortekniken kunde uppvisa både de här sakerna och kraftbolagen såg därmed fördelar i tekniken gentemot de andra tekniker som var under utveckling. Ju fler lättvattenreaktorer som byggdes, desto intressantare blev det att bygga dem.

Det här är på sätt och vis ett hinder för att ett Gen IV-system ska byggas. Det behövs, precis som för lättvattenreaktorerna, ett helt system av olika anläggningar för att Gen IV ska fungera. Det räcker inte med en enskild reaktor. Snarare skulle det behövas ett helhetsgrepp där man i princip samtidigt beslutade om att utveckla och bygga ett antal olika anläggningar. Med tanke på vilken stor industri ett fungerande Gen IV-system skulle vara är det svårt att tänka sig någon annan aktör

⁸ I en tungvattenreaktor blir neutronekonomin så bra att naturligt uran med bara 0,7 % klyvbart ²³⁵U kan användas som bränsle. Uranet behöver då inte isotopanrikas.

⁹ Om de grafitmodererade reaktorerna byggs tillräckligt stora kan de brida den klyvbara isotopen ²³³U från torium (²³²Th) utan att använda snabba neutroner. Denna möjlighet var drivkraften i det tyska programmet som byggde på idén om att åstadkomma bridning utan snabbreaktorer.

än en stat som skulle kunna fatta de beslut som krävs. Även då får man nog förvänta sig att utvecklingen sker stegvis.

Till en början skulle man i så fall kunna visa att bridning och upparbetning fungerar som ett system. Senare kan man i liten skala börja föra tillbaka de långlivade ämnena till reaktorerna för att så småningom helt sluta bränslecykeln så att inga långlivade ämnen hamnar i slutförvar.

3.2 UTVECKLINGEN AV BRIDREAKTORER

Utvecklingen av bridreaktorer fortsatte parallellt med utbyggnaden av lättvattenreaktorerna. Lättvattenreakortekniken var viktig för snabbreaktorutvecklingen. Dels var lättvattenreaktorerna ett nödvändigt första steg för att producera det plutonium som skulle användas för att starta de första bridreaktorerna, dels byggdes en industri upp som hade förmågan att bygga och driva reaktorer.

Frankrike, Storbritannien, Ryssland, Japan och USA har haft de mer ambitiösa bridreaktorprogrammen, men även andra länder - däribland Sverige - har haft forskningsprogram. I några av länderna finns det, eller har det funnits bridreaktorer i full skala varav flera har drivits i många år.

Alla de stora snabbreaktorerna har varit natriumkylda. Andra metaller har också använts som kylmedel, men då i mindre forskningsreaktorer och i ubåtsreaktorer.

Idag har Ryssland, Indien och Kina aktiva bridreaktorprogram, där det ryska programmet har kommit längst med två stora reaktorer i drift, BN-600 och BN-800. BN-800 startades så sent som 2014 och togs officiellt i kommersiell drift¹⁰ den sista oktober 2016. Frankrikes program har också varit mycket ambitiöst. Men sedan 2010, då Phenix¹¹, stängde har man där ingen snabbreaktor i drift.

3.3 STARTSKOTTET FÖR GENERATION IV

I USA utvecklade man mellan 1984 och 1994 Integral fast reactor, IFR. Projektet skilde sig från tidigare snabbreaktorprogram då man här ställde nya krav på vad reaktorn skulle klara av. IFR skulle förutom att brida klyvbart material också ta hand om långlivade ämnen i det använda bränslet. Reaktorn skulle också vara säker på så sätt att den själv skulle reglera ner effekten om någon störning inträffade. Det skulle ske helt utan att operatörerna ingrep¹². Till sist såg man till att det ingenstans under bränslehanteringen skulle finnas plutonium i ren form.

¹⁰ Att en reaktor tas i kommersiell drift innebär att man har avslutat provprogrammet med godkänt resultat. BN-800 nådde full effekt första gången under sommaren 2016.

¹¹ Phenix var en fransk snabbreaktor som drevs under mer än 30 år. Den användes framförallt för att utveckla tekniken och materialen som behövs för natriumkylda reaktorer.

¹² De flesta av reaktorerna i världen konstruerades innan olyckorna i Harrisburg, Tjernobyli och Fukushima inträffade. Lärdomarna från olyckorna har bland annat lett till att man nu mera strävar efter att göra reaktorer passivt säkra så att de på egen hand enbart med hjälp av naturlagarna ska kunna hantera störningar, utan att några aktiva system startar. De svenska reaktorerna är som jämförelse konstruerade utifrån principen att inga operatörsingripanden ska behövas inom 30 minuter efter en störning. Reaktornas styr- och reglersystem startar de aktiva system som behövs för att stabilisera situationen medan människorna i lugn och ro kan skaffa sig en bild över situationen. Den här filosofin

Trots att IFR-programmet var mycket lovande och på god väg att nå sina mål drogs finansieringen in och utvecklingen avbröts 1994. Bakgrunden var ett generellt motstånd mot kärnkraft hos många av de som arbetade inom den nytilträdde Clinton-administrationen.

Efter att IFR-utvecklingen avbrutits fick de nationella amerikanska laboratorierna istället uppgiften att utveckla vad som kom att kallas Gen IV-reaktorer¹³.

Gen IV-reaktorer ska producera energi till samma kostnad eller billigare än dagens reaktorer. De får inte lämna efter sig något långlivat avfall. Det får inte finnas rent plutonium någonstans i bränslecykeln och till sist ska de vara så säkra att det inte finns något olycksscenario där det skulle bli nödvändigt att evakuera människor som befinner sig utanför kraftverkets staket.

Målen man satte upp liknar väldigt mycket det IFR var på väg att åstadkomma. Skillnaden var egentligen att man ville se en bredare ansats och titta på alla reaktorer som skulle kunna nå målen. Ambitionen var också att genomföra utvecklingen i ett internationellt samarbete. Man skapade Generation IV International Forum där flera länder blev medlemmar.

Sex reaktorkoncept som skulle kunna uppfylla kraven valdes ut. Man valde bland de reaktorer som utvecklades under 1950-, 60- och 70-talet i hopp om att där hitta reaktorer som skulle kunna vidareutvecklas och nå målen. Bland de sex som valdes ut var tre rena snabbreaktorer; natrium-, bly-, respektive heliumkylda. De har alla bra möjligheter att uppfylla kraven på en Gen IV-reaktor och skulle därför kunna vara grunden i ett framtida kärntekniskt system.

Ytterligare en reaktor - saltsmältereaktorn – kan möjligtvis möta kriterierna och åstadkomma uthållig kärnkraft¹⁴. De andra två reaktorerna – högttemperaturreaktorn och den vidareutveckling av lättvattenreaktor som föreslogs – har svårt att uppfylla alla. De är inga snabbreaktorer och kommer att lämna efter sig långlivade ämnen som inte går att klyva i tillräcklig omfattning utan högenergineutroner. De kan inte heller brida sitt eget bränsle¹⁵ och kan därmed inte bli basen för långsiktigt uthållig kärnkraft i någon större skala.

ger betänketid, men den är fortfarande beroende av aktiva system. Risken att något aktivt system inte skulle fungera hanteras genom flera oberoende parallella system och genom att flera olika system löser samma uppgift.

¹³ Namnet Generation IV kommer av att man såg de första prototypreaktorerna på 1960-talet som en första generation. De större reaktorer som följde när tekniken industrialiserades skulle då ha varit en andra generation. Den tredje generationens reaktorer är med samma resonemang de reaktorer som uppförs idag. Ibland kallar man även de sista reaktorerna som byggdes under de stora utbyggnadsvågen på 80-talet för generation tre. I Sverige skulle i så fall Forsmark 3 och Oskarshamn 3 med den definitionen vara Gen III-reaktorer. Gränsdragningen är inte självklar mellan de första tre generationerna.

¹⁴ Saltsmältereaktorn bygger på bränsle i form av flytande uran- eller toriumsalter. Reaktorn har testats i liten skala. Det finns dock en rad olösta problem och reaktorkonceptet är långt ifrån lika välutvecklat som de metallkylda snabbreaktorerna.

¹⁵ Högttemperaturreaktorn kan under rätt förutsättningar uppnå bridning av ²³³U från ²³²Th. Det kräver dock en reaktorutformning där man måste överge de inneboende passiva säkerhetsegenskaper som annars är typiska för högttemperaturreaktorer för att istället förlita sig på aktiva system. För att nå bridning krävs också ett bränsle där material som skulle kunna användas till vapen förekommer i ren form. Högttemperaturreaktorn kan alltså inte samtidigt uppfylla alla krav på ett generation IV-system.

3.4 PÅGÅENDE GENERATION IV-UTVECKLING

Amerikanerna ledde Gen IV-arbetet under de första åren. Under president George W Bush skiftade man dock fokus och började titta mer på hur ett internationellt bränslecykelsystem borde se ut. Numera är det istället Europa, Ryssland och Japan som driver arbetet.

Utvecklingen av den natriumkylda Gen IV-reaktorn bygger på de reaktorer som är och har varit i drift. Anpassningarna som krävs för att möta Gen IV-kriterierna är inte så stora. Planen är att bygga en ny stor prototypanläggning, Astrid, i Frankrike. Där ska man visa att den natriumkylda reaktorn lever upp till kriterierna och att tekniken fungerar¹⁶.

Arbetet med den blykylda reaktorn går också vidare. Främst är det i Ryssland man gör framsteg. Dels byggs där en liten (100 MW el) bly-vismutkyld¹⁷ reaktor SVBR-100, dels är en större blykyld reaktor, Brest-300 (300 MW el), på gång. Tanken är att genom Brest-300 skaffa de erfarenheter som behövs för att senare bygga Brest-1200, en betydligt större reaktor. Ryssland är det land som har praktisk erfarenhet av blykylda reaktorer. Man lyckades trots stora tekniska svårigheter få tekniken att fungera för framdrivning av ubåtar – då med bly-vismutkylda reaktorer. Det är därför naturligt att det är Ryssland som har tagit täten i utvecklingen av de blykylda reaktorerna.

I Europa diskuteras en blykyld prototypreaktor, Alfred. Men arbetet med den har inte alls kommit lika långt som i Ryssland.

Det görs arbete även på de fyra andra Gen IV-koncepten, men det handlar framförallt om teoretiska studier vid universitet runt om i världen. Det mesta talar för att Gen IV-reaktorerna kommer att vara natrium- eller blykylda. Reaktorerna kommer att ha stora likheter med de snabbreaktorer som historiskt har byggts och drivits runt om i världen. Men man kommer att göra mer för att genom reaktorernas design förhindra olyckor med stora konsekvenser samtidigt som man från början ser till att reaktorerna kan ta hand om långlivade ämnen i det använda bränslet.

¹⁶ Det finns i skrivande stund (i november 2016) en utpekad plats precis intill Phenix där Astrid ska byggas, men inget investeringsbeslutet är fattat.

¹⁷ Skälet till att använda bly-vismut är att smältpunkten för legeringen är lägre än för rent bly. Men vismut är en sällsynt metall och kommer inte att kunna användas i stor skala. Dessutom bildas polonium-210 när vismut bestrålas med neutroner. Po-210 är väldigt radiotoxiskt och farligt att få i sig.

4 Upparbetning

De reaktorer som behövs för att bygga ett Gen IV-system kan egentligen sägas finnas tillgängliga redan idag. Natriumreaktorerna är med mindre anpassningar färdiga att byggas och för de blykylda reaktorerna återstår att skala upp tekniken.

Det som däremot inte är färdigutvecklat för att systemet ska fungera är tekniken för att kemiskt separera ut de långlivade ämnen som finns i bränslet när det kommer från reaktorn. I de separationsmetoder som har använts i stor skala tar man hand om uran och plutonium, men för att ett Gen IV-system ska fungera behöver man också ta hand om andra långlivade ämnen – i första hand americium och curium. Det behövs ett sätt att utvinna de här ämnena ur det använda bränslet så att de kan blandas in i det nya tillsammans med uran och plutonium. På så sätt kan americium och curium klyvas till kortlivade klyvningsprodukter. Avfallet som till sist återstår klingar av och blir jämförbart med uran i naturen inom några hundra år.

Två metoder har använts för att kemiskt separera, *upparbeta*, använt kärnbränsle. Den vanligaste är den akvatiska metoden, där den mest spridda varianten kallas *Purex*. Alternativet är att separera bränslet elektrokemiskt då man utnyttjar att metaller har olika elektronegativitet. Båda metoderna togs fram för att separera ut i första hand plutonium och i andra hand uran. Utmaningen för ett Gen IV-system är att fler ämnen behöver separeras ut vilket gör upparbetningen mer komplex.

4.1 AKVATISK UPPARBETNING

Akvatisk upparbetning bygger på att de ämnen man vill åt ”handplockas” ur en vattenlösning med hjälp av skraddarsydda molekyler.

Bränslet kapas upp i småbitar som löses upp i en stark syra (vilket kemiskt är en vattenlösning, därav benämningen ”akvatisk”). Den skraddarsydda molekylen blandas ner i fotogen. Syran och fotogenet hålls sedan ihop och man rör våldsamt. Eftersom vatten och fotogen inte blandar sig skapar man på det här sättet en enormt stor gränsyta på alla de små droppar som bildas när vätskorna vägrar blanda sig med varandra. Över den här ytan plockar molekyler i fotogenfasen upp de ämnen ur vattenfasen de utformats för att binda.

När man slutar röra om vätskorna delar de upp sig och kan pumpas åt varsitt håll. I fotogenfasen ändrar man sedan miljön så att metallerna man plockat upp släpper från specialmolekyler. Sedan kan man pumpa tillbaka fotogenet och återanvända sina molekyler.

Det finns några varianter av den här metoden där man använder något olika molekyler för att plocka upp de ämnen man vill åt. Det finns molekyler som effektivt kan utvinna även de tyngre ämnena, americium och curium ur bränslet. Eftersom hela syftet med Generation-IV är att skapa ett långsiktigt hållbart kärnkraftssystem måste molekyler utformas så att de inte är skadliga eller bildar några skadliga ämnen när de bryts ner.

En metod som ser lovande ut är "group actinide extraction" eller *Ganex*. Ganex separerar ut aktiniderna tillsammans så att de hela tiden hålls blandade med varandra. Blandningen man på det sättet får fram duger fint som reaktorbränsle, men är oduglig för att tillverka kärnvapen. På så sätt ser man till att risken för att klyvbart material skulle avledas minimeras. Ganex fungerar i laboratorieskala, men innan metoden kan användas i ett Generation IV-system behöver den skalas upp och fås att fungera i industriell skala.

Styrkan i den akvatiska upparbetningen är att den är väldigt effektiv. Det är möjligt att separera de tunga ämnena i princip fullständigt ur vattenlösningen. Metoden för att separera ut plutonium är också väl beprövad. Det finns sedan många år flera stora upparbetningsanläggningar runt om i världen som utvinnet plutonium ur använt bränsle.

Nackdelen med de akvatiska metoderna är att molekylerna som används är känsliga för strålning. Man behöver vänta flera år innan man upparbetar bränslet. Under den tiden sönderfaller kortlivade klyvningsprodukter till stabila ämnen och strålningen från bränslet avtar kraftigt. Det visar sig att det behövs ungefär lika lång tid för upparbetningen och tillverkningen av nytt bränsle som tiden bränslet befinner sig i reaktorn – runt fem år. Det här gör att det vid varje tillfälle kommer att finnas lika mycket bränsle på andra ställen i bränslecykeln som i själva reaktorn. Varje bldreaktor behöver alltså dubbelt så mycket bränsle för att kunna startas som det som behövs för själva härden. När den väl startats producerar den sitt eget bränsle.

4.2 PYROKEMISK UPPARBETNING

Om det inte är ett alternativ att vänta flera år på att upparbeta bränslet använder man *pyrokemisk upparbetning*. Pyrokemisk upparbetning bygger på att man separerar metaller i bränslet baserat på deras elektronegativitet. Bränslet löses upp i smält salt. Man lägger sedan elektrisk spänning över en anod och en katod som stucks ner i saltsmältan. Genom att variera spänningen får man metallerna i bränslet att dras till katoden.

Metoden är förhållandevis okänslig för strålning och det är därför möjligt att upparbeta färskt bränsle utan att vänta. Tyvärr är effektiviteten inte alls lika bra som för de akvatiska metoderna. Det är svårt att utvinna allt material ur saltsmältan. Det finns än så länge inte heller några bra metoder för att rena saltet från klyvningsprodukter. Man behöver därför ersätta saltet med jämna mellanrum. Så länge saltet inte kan renas ger pyrokemisk upparbetning upphov till stora mängder flytande högaktivt avfall som är besvärligt att hantera.

Den stora fördelen med pyrokemisk upparbetning är just att man kan upparbeta bränslet direkt efter att det tagits ur härden. Mängden bränsle som befinner sig i bränslecykeln men utanför reaktorn minskar då markant. I en bränslecykel där pyrokemisk upparbetning användes skulle det mesta av bränslet befinna sig i reaktorn.

En pyrokemisk upparbetningsanläggning kan också göras liten. I det amerikanska snabbreaktorkonceptet IFR var upparbetningen en integrerad del av samma

anläggning som reaktorn. Inget klyvbart material skulle lämna anläggningen. Tanken var att man genom anläggningens utformning skulle göra det omöjligt att stjäla något klyvbart material. Genom att man ingenstans i processen separerade ut klyvbara ämnen i ren form så skulle materialet bara duga till reaktorbränsle. Det skulle inte kunna användas till kärnvapen.

4.3 UPPARBETNING IDAG

Upparbetningsanläggningar i stor skala finns idag i några länder. Frankrike och Japan är de länder som har haft de tydligaste satsningarna på att återvinna klyvbart material genom upparbetning. I anläggningarna i franska La Hague används akvatisk upparbetning. Där finns kapacitet att upparbeta bränsle från ungefär 100 reaktorer, en fjärdedel av världens kärnkraft. La Hague är en stor industri med runt 8000 anställda. I japanska Rokkasho finns en helt nybyggd anläggning som har mycket gemensamt med La Hague.

Under 1970-talet såg det ut som att det skulle behövas ett stort antal bridreaktorer kring millennieskiftet. För att det skulle finnas tillräckligt med plutonium framme för att kunna starta alla de här reaktorerna behövde upparbetningskapaciteten finnas på plats tidigare. Man såg framför sig att de länder som hade upparbetningskapacitet och lager av plutonium skulle få en stark ekonomisk ställning.

Prognoserna från 70-talet visade sig dock inte stämma. Efterfrågan på elektricitet slutade redan under 1980-talet växa i de industrialiserade länderna. Tillväxten i ekonomierna skedde allt mer i tjänstesektorn där kopplingen mellan ekonomisk tillväxt och ökad elanvändning inte alls är lika stark som i den tillverkande industrin. Samtidigt har energieffektiviseringen fortsatt. Den har dock alltid pågått och alltid varit en viktig del i prognoserna över den framtida energianvändningen.

Det plutonium som separeras ut i La Hague används idag för att tillverka så kallat *MOX-bränsle* ("mixed oxide", blandoxid). Det här är samma typ av bränsle som var tänkt att användas i snabbreaktorerna. Nu – i väntan på snabbreaktorernas genombrott – används det istället i lättvattenreaktorer. När MOX återanvänds en gång – utan att upparbetas igen - minskar behovet av att bryta naturligt uran med 10-15 procent, men ger absolut inte de fördelar ett Gen IV-system skulle ge. För att återanvända bränslet en andra gång behövs snabbreaktorer. Möjligheten att med hjälp av upparbetning spara bränsle i dagens system är alltså begränsad.

MOX-bränsle som har använts i lättvattenreaktorer är betydligt besvärligare att slutförvara än vanligt bränsle. Det beror på att värmeutvecklingen från MOX är mycket starkare och att den avtar betydligt långsammare.

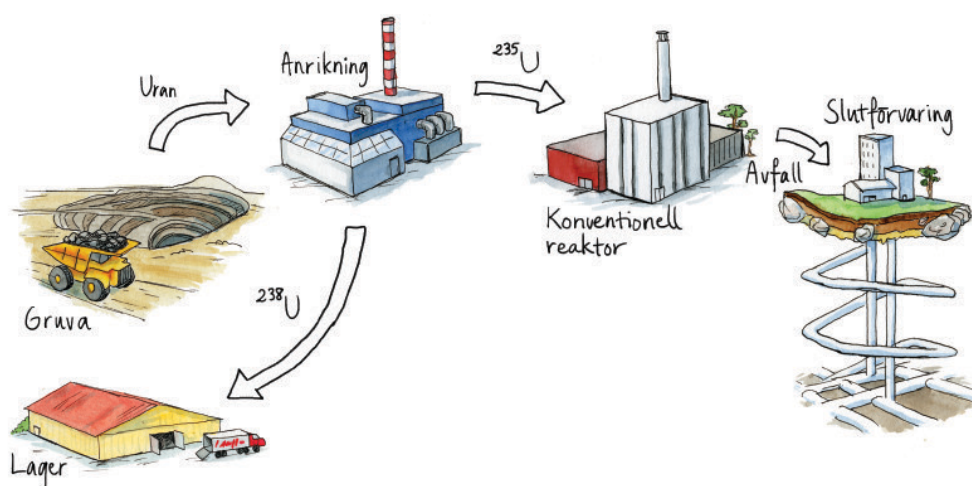
Bränslen baserade på plutonium gör sig bäst i en sluten bränslecykel där de antingen blir bränsle till snabbreaktorer, eller där de – om de har använts i lättvattenreaktorer – kan upparbetas en andra gång och bli snabbreaktorbränsle. Det är på alla sätt effektivare att använda MOX direkt i snabbreaktorer utan omvägen via lättvattenreaktorerna och den uppbyggnad av det tunga ämnet americium som sker när de används där.

Frankrikes strategi med upparbetning och återanvändning av plutonium i lättvattenreaktorer ska ses mot bakgrund av att snabbreaktorerna dröjer. För att inte den upparbetningsteknik som utvecklats och byggts upp i La Hague ska gå förlorad behöver anläggningen användas och nya människor tränas i att använda tekniken. Plutoniet kommer till nytta, men det går inte att motivera upparbetningen bara med att den drygar ut bränslet till lättvattenreaktorerna, särskilt inte som slutförvaringen blir mer komplicerad.

5 Bränslecykler

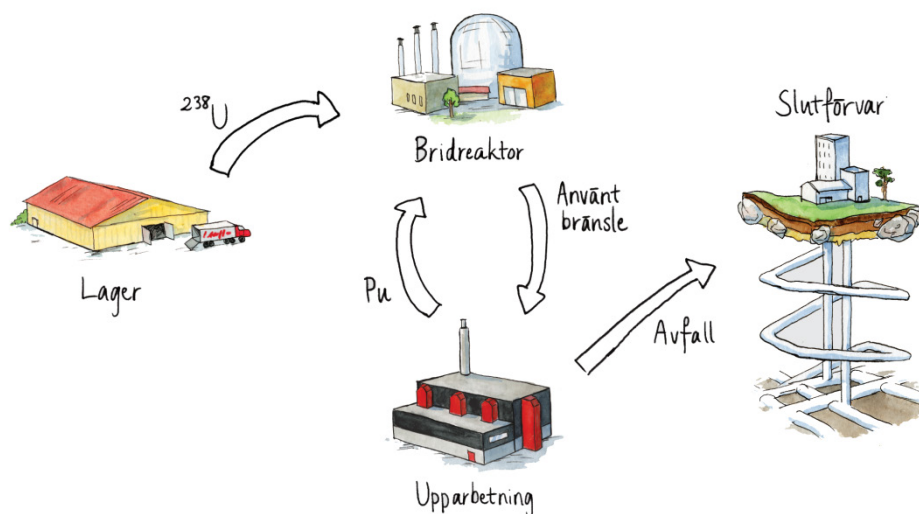
5.1 UTVECKLINGEN MOT EN SLUTEN BRÄNSLECYKEL

Det mesta av det bränsle som under åren har använts i lättvattenreaktorerna runt om i världen har inte upparbetats. Det finns i olika länder varierande syn på vad som ska hända med bränslet. I en del länder, däribland i Sverige, finns en tydlig "en gång igenom"-strategi (Figur 3). Det använda bränslet ska slutförvaras efter att det använts i reaktorerna. Uranet passerar en gång igenom härden. Inget klyvbart material återanvänds. Upparbetning behövs då inte.



Figur 3: I en-gång-igenom-bränslecykeln passerar bränslet en gång igenom reaktorn. Uran bryts ur berggrunden, det isotopanrikas så att andelen ^{235}U blir rätt. Efter ungefär fem år i reaktorn är bränslet utbränt och klassas som avfall. Det här är en enkel bränslecykel som inte kräver upparbetning. Men om kärnkraften skulle byggas ut kraftigt så skulle en-gång-igenom-strategin skapa problem med uranförsörjningen.

Motpolen till en-gång-igenom är en *sluten kärnbränslecykel* (Figur 4). I en sluten cykel återanvänds allt klyvbart material. Även de tunga ämnen som byggs upp genom neutroninfångning i uran och plutonium tas om hand för att undvika att avfallet från kärnbränslecykeln blir långlivat. Det är strategin i Gen IV.



Figur 4: I en sluten kärnbränslecykel återanvänder man de tunga ämnen som bildats genom att ^{238}U fångat in neutroner. ^{239}Pu används för att producera nytt bränsle till snabbreaktorer. Andra ännu tyngre ämnen som bildats genom neutroninfångning i ^{239}Pu klyvs i snabbreaktorer för de inte ska hamna i det avfall som slutligen skickas till slutförvaret. På så sätt undviker man att avfallet blir långlivat.

I kärnkraftens barndom sågs lättvattenreaktorerna som ett första steg mot en sluten cykel¹⁸. Lättvattenreaktorn var ett billigt och tekniskt relativt okomplicerat sätt att producera plutonium samtidigt som man levererade stora mängder energi och skaffade sig praktisk erfarenhet av kärnkraftsteknik.

I ett nästa steg skulle upparbetningskapaciteten byggas ut så att plutoniet kunde utvinnas ur det använda lättvattenreaktorbränslet. Utbygganden av bridreaktorer skulle ta fart så snart tekniken var mogen och tillräckliga mängder separerat plutonium fanns framme. Man såg framför sig att utbygganden av lättvattenreaktorer skulle upphöra och att utbygganden av snabbreaktorer helt skulle ta över.

När de sista lättvattenreaktorerna så småningom stängde skulle uranbrytningen och anrikningsanläggningarna i princip kunna avvecklas. Snabbreaktorerna skulle brida sitt eget klyvbara material från det ^{238}U som lagts åt sidan då naturligt uran en gång isotopanrikats för att förse lättvattenreaktorerna med bränsle.

5.2 AVFALLSSTRÖMMAR

En-gång-igenom lämnar efter sig långlivat högaktivt avfall i form av använt bränsle. Det avfallet behöver förvaras åtskilt från samhället under hundratusentals år.

I den slutna cykeln i ett Gen IV-system uppstår också högaktivt avfall när klyvningsprodukterna separeras från det klyvbara materialet och de långlivade tunga ämnen som ska tillbaka till snabbreaktorerna. Skillnaden är att avfallet som

¹⁸ I kärnkraftens barndom stod bridning av klyvbart material i fokus. Att ta hand om långlivade ämnen i avfallet var inte något man prioriterade.

skickas till slutförvaret klingar av betydligt snabbare än avfallet från en-gång-igenom. Redan efter några hundra år har radioaktiviteten klingat av tillräckligt för att bränslet ska vara jämförbart med det uran som finns i naturen. I en-gång-igenom, där de tunga långlivade ämnena ingår i avfallet, tar det flera hundra tusen år att nå dit.

Det långa tidsperspektivet behöver inte ses som ett problem i sig. De slutförvarsmetoder som finns är utvecklade just för att hålla avfallet åtskilt från människor och miljö under de tider det handlar om. Tidsperspektivet är inte heller unikt, det finns annat avfall som aldrig blir ofarligt, där tungmetallerna kanske är det viktigaste exemplet. Men, det har ändå länge funnits en diskussion om huruvida det är rätt att lämna kvar långlivat avfall som potentiellt skulle kunna bli ett problem för framtida generationer. Ett Gen IV-system skulle göra att den diskussionen inte behövs – åtminstone inte för avfallet från kärnkraften.

Förutom det högaktiva kärnavfallet uppstår en del annat radioaktivt avfall i kärnbränslecykeln. Driften av reaktorer och andra kärntekniska anläggningar skapar låg- och medelaktivt avfall som kan vara kort- eller långlivat beroende på hur mycket av de långlivade ämnena det innehåller. Låg- och medelaktivt avfall uppstår också vid rivningen av de kärntekniska anläggningarna. Det här avfallet är dock betydligt enklare att hantera än det använda bränslet. Slutförvar för låg och medelaktivt avfall finns sedan länge i drift i många länder.

Det är inte säkert att volymen avfall från Gen IV-systemet skulle bli mindre än från en-gång-igenom. Det kan istället bli så att avfallsströmmarna från upparbetningen blir så omfattande att volymen faktiskt ökar. Det är till och med ganska sannolikt eftersom den slutna cykeln kräver fler kärntekniska anläggningar som en dag ska rivas och då ger avfall.

Däremot minskar mängden högaktivt avfall och då särskilt mängden långlivat högaktivt avfall. En stor skillnad i dagens syn på bränslecykler och slutna cykler – som vi kallar Gen IV – gentemot 70-talets syn är just hur man resonerar kring de långlivade ämnena i avfallet. På 1970-talet såg man inte framför sig att förvaring av radioaktivt material under långa tider skulle vara ett problem och därför fanns ingen anledning att ta hand om americium och curium i det använda bränslet. Det räcker enligt det resonemanget med att återvinna uran och plutonium.

Egentligen har ingenting ändrats. Det finns fortfarande ingen anledning att tro att det inte skulle vara möjligt att förvara avfallet på ett säkert sätt. Att man genom Gen IV tänker sig att ta hand om de långlivade ämnena beror snarare på en vilja att undvika att lämna efter sig ett avfall som skulle kunna bli ett bekymmer långt in i framtiden.

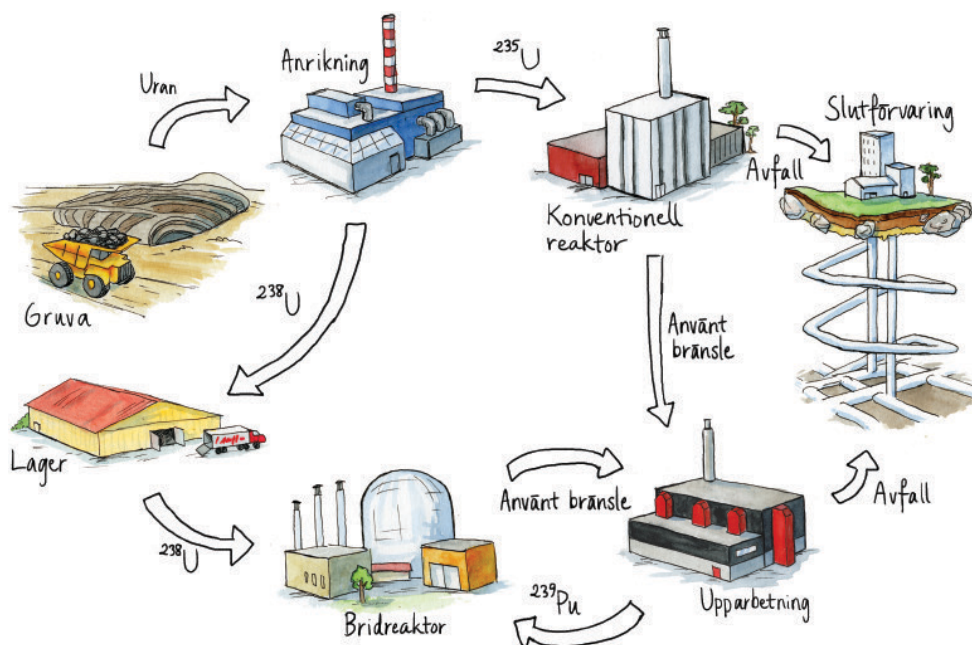
5.3 EN ÖVERGÅNG TILL GENERATION IV

Att gå över från dagens kärnkraft med lättvattenreaktorer och en-gång-igenom-strategi till en framtida slutna cykel tar lång tid och kräver en del nya anläggningar. Låt oss göra tankeexperimentet att vi i Sverige skulle byta bränslecykelstrategi och gå mot en slutna cykel:

Under de runt trettio år våra lättvattenreaktorer fortfarande kommer att vara i drift behöver upparbetningskapacitet byggas upp. Det behövs också en bränslefabrik som kan producera bränsle från plutonium blandat med högaktivt americium och curium. Upparbetningskapaciteten och bränsletillverkningen behöver finnas på plats något innan den första snabbreaktorn tas i drift så att det finns tid att separera fram det plutonium som krävs för att starta reaktorn och tillverka bränslet till den.

Varefter mer plutonium tas fram kan fler snabbreaktorer startas. Plutonet utvinns ur det bränsle som under åren tagits ur lättvattenreaktorerna. Ungefär en procent av bränslet är plutonium. Med runt 6000 ton använt bränsle i mellanlagret Clab vid Oskarshamns kärnkraftverk finns det alltså runt 60 ton plutonium tillgängligt i Sverige för att producera snabbreaktorbränsle. Dessutom produceras ungefär två ton nytt plutonium varje år genom driften av de svenska lättvattenreaktorerna.

För att starta en ny snabbreaktor i en bränslecykel med akvatisk upparbetning behövs ungefär tio ton plutonium. Det plutonium som finns i Clab räcker alltså till de första sex reaktorerna och därefter kan en ny reaktor startas vart femte år. Det finns alltså gott om plutonium i Sverige idag. Alla länder som har haft kärnkraft en tid befinner sig i en liknande situation. Plutonium, som på 1970-talet var en bristvara, finns nu i tillräcklig mängd även för att starta en ganska stor snabbreaktorflotta. I ett scenario där Sverige beslutat bygga snabbreaktorer kan man dessutom tänka sig att en del andra kärnkraftsländer inte skulle välja samma väg. Det skulle då potentiellt finnas tillgång till ännu mer plutonium än bara det svenska.



Figur 5: Under övergången från dagens kärnkraft till ett rent Generation IV-system skulle de båda systemen vara integrerade. Använt bränsle från dagens reaktorer skulle upparbetas och användas för att starta de nya reaktorerna. Så småningom skulle de konventionella reaktorerna stängas. Då upphör också behovet av gruvbrytning och anrikning. De nya reaktorerna drivs då helt av de lagren av ^{238}U som en gång blev över vid anrikningen av bränsle till de konventionella reaktorerna. Lagren räcker i flera tusen år med en energiproduktion från kärnkraften på dagens nivå.

Under en tid skulle lättvattenreaktorer och snabbreaktorer drivas sida vid sida, men var efter lättvattenreaktorerna stänger skulle utvecklingen gå allt mer mot en ren snabbreaktorflotta. När den sista lättvattenreaktor stänger finns inte längre något behov av uranbrytning¹⁹. Snabbreaktorerna producerar sitt eget klyvbara material och behöver bara tillföras ²³⁸U, vilket finns i riklig mängd i lager från den tid då bränsle anrikades för lättvattenreaktorernas behov.

5.4 TIDSPERSPEKTIV

Om ambitionen är att snabbreaktorerna inte ska lämna efter sig något långlivat avfall krävs det att man ser kärnkraften som ett sätt att producera energi för överskådlig tid. Varje gång de långlivade ämnena passerar genom reaktorn försvinner någonstans mellan tio och tjugo procent av materialet. Det krävs alltså mellan fem och tio passager genom reaktorn innan materialet är borta.

Bränslet befinner sig fem år i reaktorn och ska sedan upparbetas. Om upparbetningen görs med akvatiska metoder tar det ytterligare fem år innan den kan påbörjas. En hel cykel tar alltså minst tio år. Fem till tio cykler tar 50 till 100 år. Det är den tid som krävs innan de långlivade ämnena som först skickades in i processen tagits om hand. Eftersom mer material hela tiden matas in behöver tidsperspektivet vara en god bit längre än så.

Ett Gen IV-system ska inte ses som en "snabbfix" eller ett alternativ till geologiskt slutförvar av radioaktivt avfall. Dels behöver fissionsprodukterna som uppstår i snabbreaktorerna lagras i uppemot tusen år, vilket gör att ett geologiskt förvar behövs oberoende av vilken bränslecykelstrategi man valt. Dels finns vid varje tidpunkt en mängd långlivat material i reaktorerna och i bränslecykeln. Om man skulle överge snabbreaktorstrategin och stänga anläggningarna så skulle även detta material behöva slutförvaras. Det material som inte hunnit tas omhand av snabbreaktorerna skulle då fortfarande innehålla en del långlivade ämnena. Det kommer också alltid att finnas en sista härd som består av det bränsle som fanns i reaktorerna när man fattade beslutet om att sluta ta hand om de långlivade ämnena. Det materialet behöver också slutförvaras om strategin ändras.

Det rationella motivet för att bygga ett Gen IV-system vore att man såg ett värde i en hållbar energiproduktion som kan skalas upp obegränsat och som kan fungera oberoende av väder och oberoende av försörjning utifrån. Generation IV är ett sätt att kostnadseffektivt förse det hållbara samhället med obegränsade mängder energi under obegränsad tid. Synsättet som driver fram ett sådant system är att tillgång till energi är något gott. Energi ses som en möjliggörare som ger alla människor chansen till liv i överflöd.

¹⁹ Man kan till och med tänka sig att behovet av uranbrytning upphör en god tid innan lättvattenreaktorerna avvecklas eftersom upparbetningen även tar omhand uran som finns kvar i det använda bränslet. Det här uranet kan mycket väl användas för att förse lättvattenreaktorerna med klyvbart material. Mängden ²³⁵U i det använda bränslet är ungefär lika stor som mängden plutonium och räcker som bränsle för tiotals reaktorår.

6 Framtidsutsikter

Den drivkraft som ledde till snabbreaktorutvecklingen i västvärlden – löftet om en obegränsad tillgång på energi - gäller fortfarande i öst. I Kina och Indien ser man framför sig att bridreaktorer kommer att vara helt nödvändiga för att försörja de mycket stora befolkningarna med energi. Fossila bränslen är av flera skäl uteslutna på sikt. Lättvattenreaktorer byggs i rask takt, men de använder så pass mycket uran att en snabb utbyggnad efter en tid inte kan fortsätta. I det läget återstår bridreaktorer i kombination med förnybara energislager, var och en med sin roll i energisystemet.

Om kärnkraftsutbyggnaden i Asien fortsätter i den takt den just nu har och särskilt om den fortsätter accelerera är det troligt att intresset för bridreaktorer återigen kommer att öka även i väst. Uranförsörjningen har länge varit god, men med mycket fler reaktorer kommer behovet av att använda bränslet bättre tillbaka.

I västvärlden kommer man säkerligen att vara intresserad av den möjlighet att bli av med långlivade ämnen i avfallet som snabbreaktorerna ger. Det kan tänkas att den drivkraften inte blir lika stark i till exempel Kina där fokus i första hand ligger på att expandera kärnkraftsproduktionen för att minska beroendet av kolkraften, särskilt som säker hantering av långlivat avfall rent tekniskt inte är ett problem.

7 Generation IV i Sverige

För att Sverige skulle börja bygga ut ett Gen IV-system krävs flera stora förändringar. Först och främst krävs det att kärnkraften – politiskt och brett bland väljare – ses som ett viktigt sätt att producera energi för lång tid framöver. Det krävs också internationella samarbeten både kring utveckling av teknik och kring driften av systemet.

Sannolikt skulle det ekonomiskt rationella vara att bygga Gen IV-systemet större än vad som behövs för att försörja Sverige med energi. Ett nära samarbete med något eller några grannländer skulle då kunna hålla nere kostnaderna.

Sverige saknar idag några viktiga faktorer som skulle behöva finnas på plats för att bygga systemet. Idag skulle vi vara hänvisade att importera både reaktor- och uppabetningsteknik från leverantörer i andra länder. Däremot har vi en väl fungerande kärnkraftsindustri i landet som mycket väl skulle kunna lära sig att driva och underhålla de nya reaktorerna. Vi har också starka samhälleliga institutioner som kan utöva oberoende kontroll av verksamheten.

Sverige i samarbete med några andra nordeuropeiska länder med stabila samhällsinstitutioner, väletablerad högteknologisk industri och välutbildade befolkningar vore på många sätt ett idealiskt område för att bygga ett väl fungerande Gen IV-system.

8 Ordlista

Akvatisk upparbetning	Akvatiskt upparbetning bygger på att specialdesignade molekyler plockar ut metaller ur kärnbränsle som lösts upp i en syra.
Bridreaktor	En bridreaktor producerar mer klyvbart material än den förbrukar.
Clab	Clab – Centralt lager för använt bränsle – är en anläggning i Oskarshamn där det använda svenska kärnbränslet förvaras under tiden radioaktiviteten klingar av innan bränslet såsmåningom slutförvaras.
En-gång-igenom	En-gång-igenom är en bränslecykelstrategi där bränslet passerar en gång igenom reaktorn. Man bryter uran, tillverkar bränsle, använder bränslet en gång och slutförvarar det sedan.
Fertil	När en fertil atomkärna fångar in en neutron bildar den en kärna som är klyvbar med långsamma neutroner, till exempel i en lättvattenreaktor. Exempel på fertila kärnor är ^{238}U och ^{232}Th .
Ganex	Group actinide extraction är en akvatisk upparbetningsmetod som separerar ut tunga ämnen i grupp blandade med varandra.
Generation IV	Generation IV (eller Gen IV) är benämningen på ett system av reaktorer och bränslecykelanläggningar som uppfyller ett antal krav på resurseffektivitet, ekonomi och säkerhet. Bland annat krävs resurseffektivitet och att systemet inte lämnar efter sig långlivat avfall.
Isotop	Olika isotoper av ett grundämne skiljer sig åt genom att de har olika många neutroner i sina atomkärnor. I en reaktor har isotoper av samma grundämne olika egenskaper även om de kemiskt har samma egenskaper.
Klyvbar	Klyvbara isotoper kan undergå kärnklyvning
Klyvningsprodukter	De ämnen som bildas när en atomkärna klyvs kallas klyvningsprodukter.
Kritisk massa	Kritisk massa är den mängd av ett klyvbart ämne som krävs för att en kedjereaktion av klyvningar ska kunna vara självunderhållande.
Lättvattenreaktor	En lättvattenreaktor kylv och modereras av vanligt vatten (lättvatten). Lättvattenreaktorerna finns i två typer: tryck- och kokvattenreaktorer. De dominerar idag världens kärnkraft.
Mantel	Ibland omger man en bridreaktor med en mantel av fertil material. Neutroner som läcker ut ur

	reaktorhärden omvandlar då materialet i manteln till klyvbart material och förbättrar därmed reaktorns bridegenskaper.
Moderering	En moderator är ett ämne som i en reaktor används för att bromsa neutroner. Vatten, tungt vatten och grafit är exempel på moderatorer. För vissa isotoper ökar sannolikheten för klyvning när klyvningen orsakas av långsamma neutroner.
MOX-bränsle	MOX står för "mixed oxide", blandoxid. Det är en bränsletyp där klyvbart plutonium som återvunnits genom upparbetning späts ut med fertil ^{238}U .
Purex	Purex är en akvatisk upparbetningsmetod som används i industriell skala idag. Metoden separerar ut uran och plutonium.
Pyrokemisk upparbetning	Pyrokemisk upparbetning bygger på elektrokemisk separation av ämnen i använt kärnbränsle där man utnyttjar att olika metaller har olika elektronegativitet.
Sluten kärnbränslecykel	I en sluten cykel cirkulerar man plutonium och andra tunga ämnen till dess de kluvits till klyvningsprodukter. Idealt hamnar inga långlivade tunga ämnen i kärnavfallet.
Snabbreaktor	En snabbreaktor är designad så att neutronerna har hög energi – är snabba – när de ger upphov till kärnklyvningar. I snabbreaktorer är möjligheterna att uppnå bridning goda.
Styrstav	Styrstavar innehåller ämnen som har stor sannolikhet att fånga in neutroner. De används för att reglera eller stoppa en självunderhållande kedjereaktion.
Upparbetning	Genom upparbetning separerar man kemiskt olika grundämnen i använt kärnbränsle från varandra.

FJÄRDE GENERATIONENS KÄRNKRAFT

Det talas mycket om fjärde generationens kärnkraft och om hur den här nya tekniken skulle kunna leda till ett förändrat framtida energisystem där kärnkraften har en viktig roll. Den här rapporten svarar på de viktigaste frågorna kring Generation IV; vad tekniken kan göra, vilken roll den kan tänkas få och när den kan finnas på plats.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk