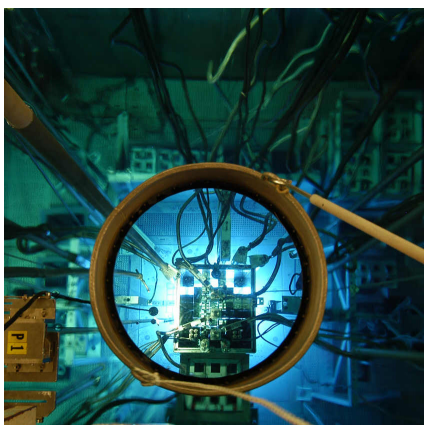
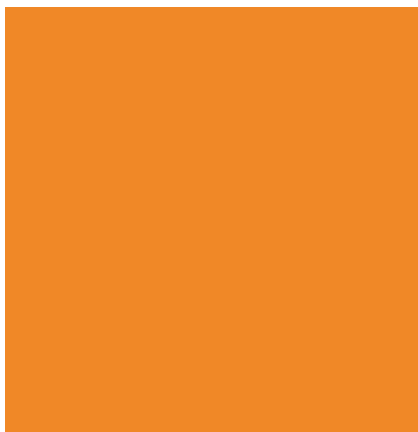
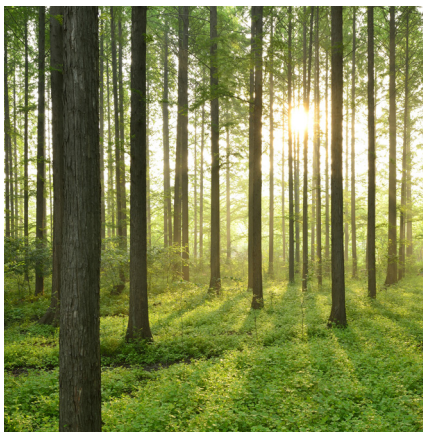
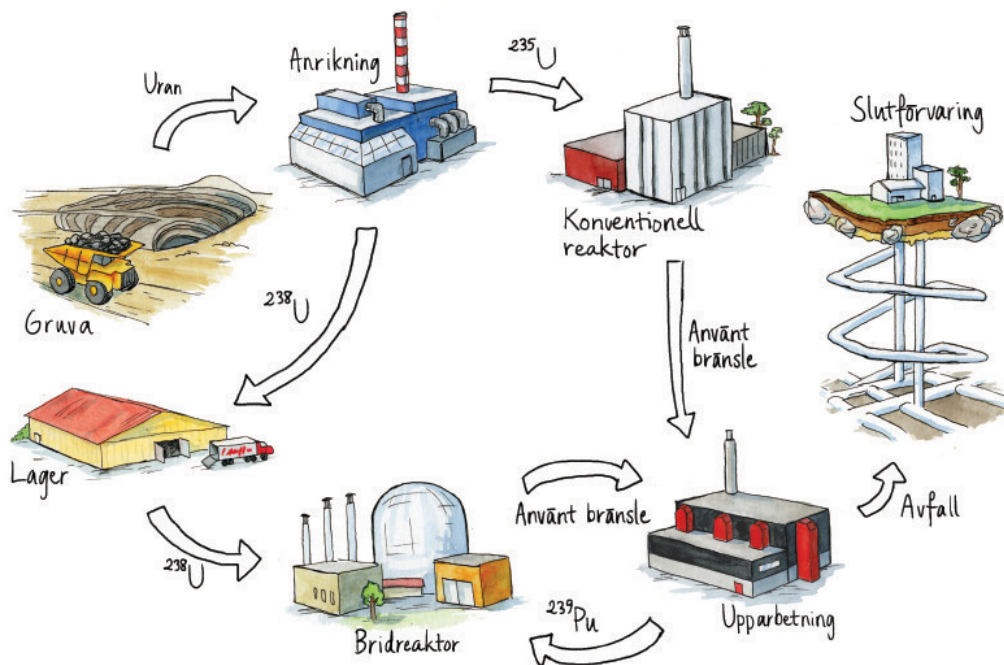


# FJÄRDE GENERATIONENS KÄRNKRAFT



# Fjärde generationens kärnkraft



## Generation IV

Det talas mycket om fjärde generationens kärnkraft och om hur den nya tekniken kan leda till ett framtida energisystem där kärnkraften har en viktig roll. Här besvarar vi de viktigaste frågorna kring nästa generations kärnkraft – vad tekniken kan göra, vilken roll den kan få och när den kan finnas på plats.

## Vad är Generation IV?

Med fjärde generationens kärnkraft, eller Generation IV, menas ett system av reaktorer och kärnbränslecykelanläggningar – bränslefabriker och uppberetningsanläggningar – som tillsammans hanterar de svagheter som dagens kärnkraft ofta förknippas med.

## Kort om fjärde generationens kärnkraft

- Använder bränslet betydligt effektivare än dagens kärnkraft.
- Lämnar inte efter sig långlivat avfall.
- Utformas så att det inte kan orsaka olyckor med allvarliga konsekvenser. Det vill säga det får inte finnas scenarier där fel i anläggningen eller yttre påverkan leder till att radioaktiva ämnen sprids i omgivningen.
- Systemet som helhet – reaktorerna och bränslecykelanläggningarna – ska vara ekonomiskt konkurrenskraftigt gentemot dagens kärnkraft och andra energislag.
- Bränslecykeln utformas så att det blir ointressant att avleda klyvbart material för vapentillverkning. Det görs genom att uran och plutonium alltid förekommer utblandade med andra ämnen. Kvaliteten på det klyvbara materialet blir då för dålig för att tillverka vapen, men fullt tillräcklig för att driva reaktorerna.

När samtliga kriterier är uppfyllda har vi ett fjärde generationens kärnkraftssystem. Det kan se ut på olika sätt då det finns flera olika typer av reaktorer som kan uppfylla kriterierna. Det finns också en rad varianter av bränslen och det finns olika möjligheter att kemiskt upparbeta det använda bränslet. I praktiken räcker det med att systemet har förutsättningar att uppfylla kriterierna för att vi ska kalla det Generation IV. Till exempel är det svårt att visa att systemet kommer att bli billigare än dagens energiproduktion innan det är industrialiserat.

## Kärnkraftens generationer

Benämningen Generation IV kommer av att de tidigaste kommersiella reaktorerna utgjorde den första generationens kärnkraft, de uppskalade modellerna blev den andra generationen och de moderna reaktorer som byggs runt om i världen idag tillhör den tredje generationen. Vidareutvecklingen blir således den fjärde generationen.

Från början kommer begreppet från ett amerikanskt forskningsprogram som skulle utveckla de nya kärnkraftssystemen. Det var också där listan över kraven på Generation IV togs fram.

## Bildar mer bränsle än de förbrukar

Kraven på fjärde generationens kärnkraft innebär att reaktorerna ska producera mer bränsle än de förbrukar samtidigt som de långlivade ämnen som uppstår i reaktorn under drift förstörs.

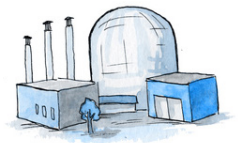
### KÄRNKRAFTENS GENERATIONER

De första kommersiella reaktorerna var små och varje reaktor var ofta den enda i sitt slag. Tekniken förbättrades successivt.

Reaktorerna standardiserades och blev mycket större. De flesta reaktorer från 1970- och 80-talen tillhör generation två.

Dagens reaktorer tillhör generation tre och är vidareutvecklingar av tidigare. Forsmark 3 och Oskarshamn 3, från slutet av 80-talet, har mycket gemensamt med de reaktorer som byggs idag och räknas därför ofta till generation tre.

För fjärde generationens kärnkraft finns krav på uthållighet och mindre mängd långlivat avfall. För att kraven ska uppfyllas krävs ett samverkande system av reaktorer och bränslecykelanläggningar.

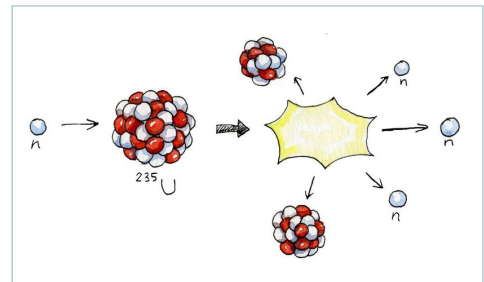


## Uran

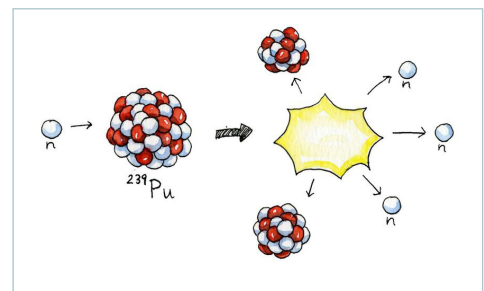
Uran i naturen består av två isotoper. Den ena, uran-235, kan användas som bränsle till reaktorer. Den andra, uran-238, vilket 99,3 % av det naturliga uranet består av, måste ombildas till plutonium för att kunna användas som bränsle. Plutonium bildas när neutroner från kärnklyvningarna fångas in i uran-238. En reaktor som på det här sättet bildar mer bränsle än den konsumerar, kallas för en bredreaktor. De reaktorer vi har i Sverige och i Finland bildar visserligen en del plutonium, men plutonet räcker inte för att tillverka nytt bränsle i tillräcklig mängd för att och ladda reaktorn på nytt. Reaktorerna måste därför förses med uran-235 från naturen oavsett om det använda bränslet skulle upparbetas eller inte. Fjärde generationens reaktorer behöver bara förses med en liten mängd uran-238 för att fungera. Redan idag finns stora lager med den isotopen som blivit över när uran-235 har isotopanrikats till rätt koncentration för dagens reaktorer.

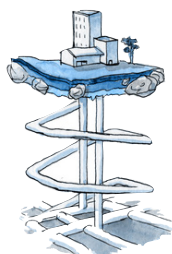
Det finns inget behov av att bryta uran till fjärde generationens kärnkraft förrän efter mycket lång tid även om kärnkraften skulle expandera kraftigt. Om kärnkraftsproduktionen fortsätter på dagens nivå skulle det uran vi redan har brutit räcka för att driva reaktorerna i flera tusen år.

Uran-klyvning  
Illustration:  
Lova Delfin



Pu-klyvning  
Illustration:  
Lova Delfin





## Det långlivade avfallets omhand

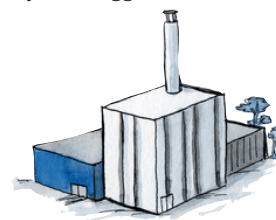
Det plutonium som bildas från uran i reaktorn fångar in neutroner och bygger upp ännu tyngre ämnen. De tunga ämnena har långa halveringstider och gör att det använda bränslet från reaktorerna kommer att vara radioaktivt under lång tid.

Det går att konstruera reaktorer så att de genom kärnklyvningar förstör mer av de tunga ämnena än vad som nybildas. De tunga ämnena som finns kvar i bränslet när reaktorn stoppas kan utvinnas och återföras till nästa laddning bränsle och behöver då inte hamna i avfallet. Det viktiga är att reaktorn förstör mer av ämnena än vad som produceras.

Det här kräver en process som i princip hundra procentigt kan separera ut de tunga ämnena från andra ämnen i det använda bränslet. Om separationen inte blir tillräckligt bra kommer en del av de långlivade ämnena trots allt hamna i avfallet som förluster. Det krävs att bränsletillverkningen anpassas så att radioaktiva ämnen kan hanteras där. Båda de här stegen blir mer komplicerade när de tunga ämnena ska tas omhand istället för att förpassas till avfallet. Det är ett viktigt skäl till att fokus tidigare låg på reaktornas förmåga att bilda nytt bränsle och att intresset var lågt för att återvinna de långlivade ämnena. För att skapa ett Generation IV-system, behöver cirkeln slutas. De tunga ämnena måste tas omhand, trots att de krånglar till bränslehanteringen och gör reaktorfysiken mer utmanande.

## Slutförvar

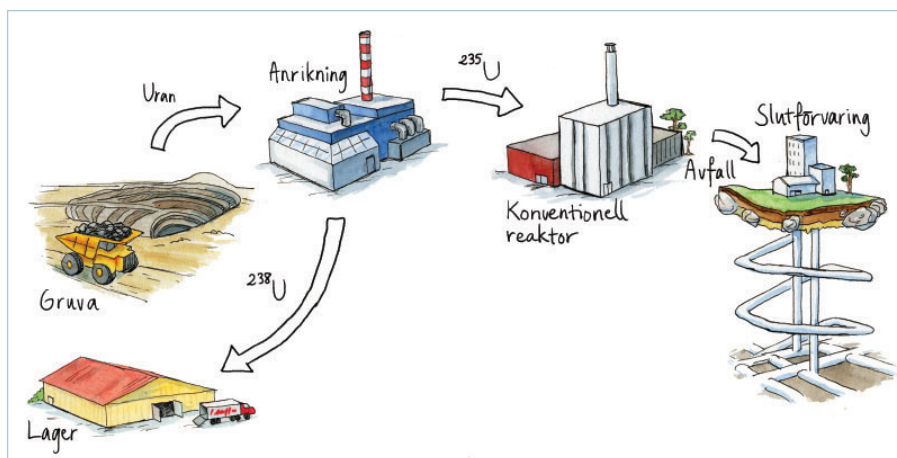
Slutförvar behövs även i ett Generation IV-system. Det uppstår ämnen i reaktorn – klyvningsprodukter – som inte kan återanvändas i bränslet. Klyvningsprodukterna behöver slutförvaras med samma omsorg som bränslet från dagens reaktorer. Det kommer också, på samma sätt som idag, att behövas slutförvar för det avfall som uppstår under driften och vid rivningen av reaktorer och bränslecykelanläggningar.



## Dagens reaktorer

I dag är vattenkylda reaktorer vanligast. De är konstruerade så att de neutroner som bildas i kärnklyvningarna bromsas in och tappar sin energi. Långsamma neutroner, med låg energi, ger reaktorerna bra egenskaper. De duger dock inte vare sig för att åstadkomma bridning – då mer bränsle produceras än vad som förbrukas – eller för att klyva de tunga ämnena.

Ju längre dagens reaktorer drivs, desto större mängd tunga långlivade ämnen får vi. Sättet att hantera de långlivade ämnena idag, är i ett slutförvar där de hålls avskilda från människor och natur. De behöver hållas inneslutna till dess att de genom radioaktiva sönderfall ombildats till stabila ämnen.



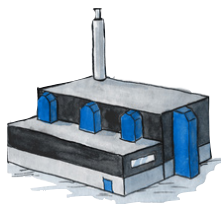
I Sverige och Finland används idag kärnbränslet bara en gång. Bara en liten del av uranet har kommit till användning när bränslet skickas till slutförvar.

## Neutroner med hög energi

Nyckeln både till effektiv bridning och till att förstöra långlivade ämnen, ligger i att neutronerna har hög energi. Högenergineutroner har bra möjligheter att brida och har dessutom förmågan att klyva de tunga ämnena.

Neutronenergin kan inte höjas. Den energi neutronerna bär med sig när de föds i klyvningsreaktionerna måste därför så gott det går bevaras. Så mycket som möjligt av energin behöver finnas kvar när neutronen startar en ny kärnklyvning. Bränslet, kylmedlet och materialen i reaktorn väljs med omsorg för att bromsa neutroner så lite som möjligt. De kylmedel som finns tillgängliga är egentligen bara två flytande metaller – natrium och bly – och en gas – helium. Möjligen kan man också tänka sig en reaktor med ett flytande bränsle i form av smält salt. I en sådan reaktor är bränslet också kylmedlet.

Av de möjliga teknikerna är det natriumkylda reaktorer som är de mest beprövade. Fullskaleanläggningar har drivits i ett flera länder och det finns gott om erfarenhet av både drift och underhåll.



## Upparbetning

Genom upparbetning separeras olika grundämnen i använt kärnbränsle kemiskt ifrån varandra. Historiskt har det varit mest intresserat att komma åt uran och plutonium för att återanvända dem i nytt bränsle. Alla andra ingående ämnen lämnades i det som betraktades som avfall. Med Generation IV återanvänds alla ämnen tyngre än uran, för att de inte ska ge upphov till långlivat avfall.

## Två metoder

Det finns två grundläggande metoder att upparbeta använt bränsle; akvatiskt eller pyrokemiskt.

### *Akvatisk metod*

De akvatiska metoderna bygger på att bränslet löses upp i en stark syra där skraddarsydda molekyler sedan binder de metaller som ska utvinnas. Metoden är mycket effektiv och kan utvinna uran och plutonium i princip fullständigt. Svagheten är att molekylerna som används för separationen är komplexa och lätt förstörs av strålning. Det är därför nödvändigt att invänta att radioaktiviteten avklingar innan bränslet upparbetas. Det behöver gå några år från det att bränslet tas ur reaktorn till dess det upparbetas. I en bränslecykel där bränslet ska återanvändas betyder det att mer bränsle behöver finnas i omlopp än om upparbetningen hade kunnat göras direkt. Mängden bränsle som ligger och väntar på upparbetning blir ungefär lika stor som mängden bränsle i reaktorerna.

### *Pyrokemisk metod*

Den pyrokemiska metoden är okänslig för strålning och kan därför användas direkt. Metoden bygger på att bränslet löses upp i ett flytande salt där det separeras elektrokemiskt genom att spänningen mellan en anod och en katod varieras. Genom att metallerna har olika elektronegativitet kommer de att deponeras på katoden en i taget när spänningen ändras. Tyvärr är metoden inte alls lika effektiv som de akvatiska metoderna. Den ger både förluster av de metaller som ska utvinnas och stora mängder avfall. Avfallet består framförallt av det flytande saltet. Det finns än så länge ingen effektiv metod för att rena och återanvända saltet och därför blir det stora volymer högaktivt salt som behöver hanteras.

## UPPARBETNINGSMETODER

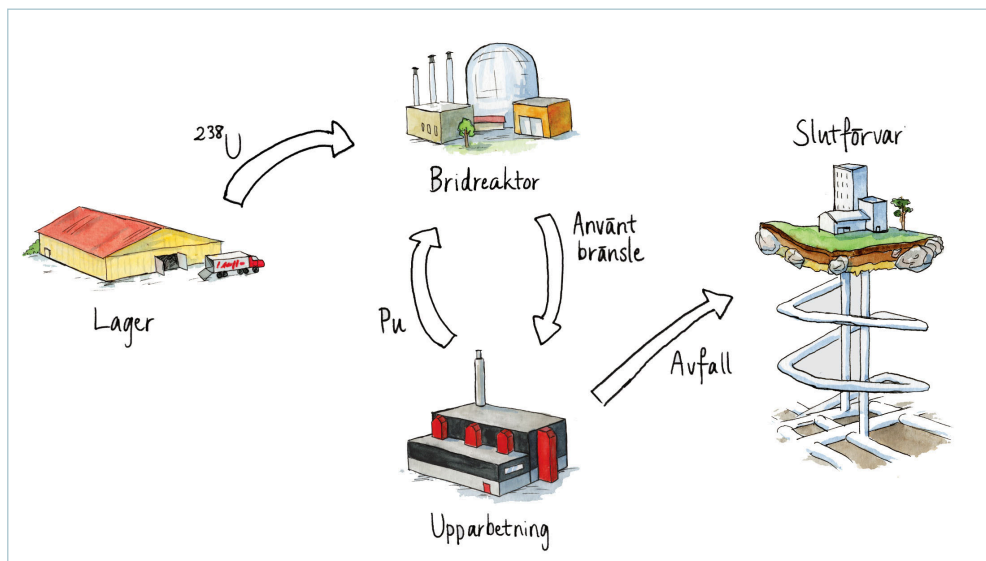
### Akvatisk metod:

Bränslet löses upp i en stark syra och speciella molekyler binder de metaller som ska utvinnas. En effektiv metod som utvinna i stort sett allt uran och plutonium. Upparbetning görs efter några år när radioaktiviteten i bränslet klingat av.

### Pyrokemisk metod:

Bränslet löses upp i flytande salt där det separeras i en elektrokemisk process. Metoden är okänslig för strålning och kan därför användas direkt, men innebär förluster av material och stora mängder avfall.

I den rena Generation IV-bränslecykeln har alla konventionella reaktorer stängt. Uranbrytning behövs inte så länge det finns kvarvarande lager av uran-238. Med lika mycket kärnkraft som idag räcker lagren i flera tusen år. Avfallet består enbart av klyvningsprodukter. De långlivade ämnena separeras ut och skickas tillbaka till reaktorerna där de klyvs och bildar klyvningsprodukter.



## Separation av tunga ämnen

För att vi ska kunna tala om ett Generation IV-system behöver alla ämnen tyngre än uran tas omhand. De får inte hamna i avfallet som i så fall skulle bli långlivat. Men de uppberedningsmetoder som än så länge har använts i stor skala är alla framtagna för att separera ut uran och plutonium ur bränslet. De är inte gjorda för att också ta ut de tunga ämnena. Därför behöver metoderna anpassas för att kunna separera även de andra tunga ämnena innan den fjärde generationen kan bli verklighet. Det behöver också visas att de nya metoder som är under utveckling fungerar i stor skala.

## Generation IV idag

Ett antal länder har lagt mycket möda på att ta fram både de reaktorer som behövs för den fjärde generationen och på att utveckla fungerande uppberedning. Drivkraften historiskt har varit att använda bränslet effektivare. Det beror på att det på 1970-talet såg ut som att bränsleeffektiv kärnkraft skulle vara det enda sättet att klara av världens växande energibehov. Forskningsprogrammen för att ta fram bridreaktorer och uppberedning var därför fundamentala.

Men tillväxten i efterfrågan på energi avstannade och uran har inte blivit någon bristvara. Det visade sig att ekonomisk tillväxt inte självklart innebär ökad energianvändning. Därmed var det inte längre lika brådskande att få fram de nya reaktorerna och i väst avbröts bridreaktorutveck-

lingen. I Ryssland, Japan, Kina och Indien fortsatte arbetet. Frankrike har sedan dess återupptagit sitt utvecklingsarbete. Den här gången har arbetet delvis en annan inriktning än tidigare. Nu är målet att reaktorerna ska kunna förstöra långlivade ämnen i det använda bränslet och inte bara att de ska kunna brida nytt bränsle.

Det finns inga system av reaktorer och bränslecykelanläggningar i drift idag som skulle kunna kallas ett fjärde generationens system, men utvecklingsprogrammen för bridreaktorer fortsätter och nya fullskaleprototyper är på gång. Samtidigt pågår arbetet med att förbättra uppberedningsmetoderna.

## Fjärde generationen i stor skala

Det behövs en del ytterligare arbete med att få metoderna för uppberedning att fungera i industriell skala, men i princip finns alla komponenter som behövs för ett Generation IV-system. Just nu saknas starka drivkrafter för att systemet ska börja byggas upp.

Generation IV utlovar ett hållbart sätt att producera energi som dessutom kan skalas upp hur mycket som helst. Reaktorerna kan anpassas för att lösa andra uppgifter än att producera el, som att driva fartyg, producera vätgas, leverera het ånga till en industri eller tjäna som en helt oberoende kraftkälla under flera årtionden. Den huvudsakliga styrkan

är dock möjligheten att leverera obegränsade mängder hållbar energi på ett planerat sätt, i det närmaste utan uppehåll.

I övrigt handlar kraven på Generation IV egentligen om att hantera svagheter hos den befintliga kärnkraften. En mycket kraftig expansion av kärnkraften kräver att systemet inte orsakar allvarliga olyckor och att avfallet är enkelt att hantera. Den nya tekniken får inte heller kunna missbrukas för att tillverka kärnvapen. Om inte de här kraven uppfylls kommer det inte att gå att få acceptans för Generation IV. När systemet på allvar börjar implementeras, kommer det att ske gradvis. Till att börja med kommer några enstaka reaktorer att starta och bränslecykelanläggningarna kommer att ha låg kapacitet. Det är inte säkert att de första reaktorerna kommer att uppfylla till exempel kravet på återvinning av de tunga ämnena.

Vartefter fler reaktorer byggs och dagens reaktorer börjar stänga, går systemet sakta mot att fungera som ett Generation IV-system. I de länder som redan har kärnkraft kommer dagens reaktorer att samexistera med det framväxande systemet under flera decennier. Det kan hävdas att den här utvecklingen redan pågår framförallt i Ryssland och Indien, där reaktorer är igång och nya byggs. Men varken den ryska eller den indiska bränslecykeln uppfyller alla kriterierna idag, än så länge är det inte tal om några färdiga Generation IV-system.

Det som möjligen skulle kunna leda direkt till ett Generation IV-system utan samexistensen med de konventionella reaktorerna vore om något land som inte har kärnkraft idag direkt satsade på Generation IV. Då skulle systemet kunna vara i full funktion, där alla komponenter samverkar som det är tänkt, inom 20 år. Enskilda delar av systemet skulle kunna komma på plats tidigare. Men en sådan satsning skulle kräva ett starkt politiskt stöd under flera decennier. Behovet av politiskt stöd och det stora åtagandet gör också att det krävs att en eller flera stater tar det övergripande ansvaret för att projektet genomförs.

## Kärnkraft i Sverige och Finland

De sex svenska reaktorer som startades efter folkomröstningen 1980 har precis moderniserats och kommer att kunna drivas i åtminstone 30 år till. Elen från dem tillsammans med vattenkraft och vindkraft ser ut att täcka de svenska elbehoven i många år. Det är ingen brådska för Sverige att välja en satsning på fjärde generationens kärnkraft. Flera av de finska reaktorerna kommer att drivas länge än

och nya reaktorer byggs. Även om den finska utbyggnaden skulle fortsätta med flera reaktorer de kommande årtiondena, så skulle en övergång till Generation IV kräva att andra länder också började bygga ut snabbreaktorer och upparbetning. Finland har en för liten reaktorflotta för att ensam välja en Generation IV-strategi.

Det mest intressanta perspektivet på Generation IV för svensk och finsk del är snarare teknikens löften om att på allvar kunna bidra till att få ner klimatgasutsläppen. Det viktiga är att det finns ambitiösa kärnkraftsprogram, och i förlängningen ett seriöst arbete på Generation IV, i de länder som idag är beroende av fossila bränslen för sin energiförsörjning.



Den natriumkylda snabbreaktorn Beloyarsk 4 togs i kommersiell drift den sista oktober 2016. Även om den inte uppfyller alla kriterier för Generation IV så visar den att tekniken för stora brytare finns.

Foto: Rosatom

## Framtidens kärnkraft

I en framtid där kärnkraften i världen har expanderat och priset på uran har gått upp kan det finnas ekonomiska drivkrafter för en nordisk satsning på fjärde generationens kärnkraft. Det är i så fall troligt att en del av bränslecykelanläggningarna skulle delas mellan flera länder. Det gäller särskilt anläggningar för storskalig akvatisk upparbetning, men även till exempel för bränsletillverkning.

Den fjärde generationens kärnkraft är framför allt ett sätt att hantera klimatfrågan. Varken Sverige eller Finland har något akut behov av tekniken, men båda länderna kommer att gynnas indirekt när de fossila bränslena fasas ut och fler människor får riklig tillgång till energi.

# FJÄRDE GENERATIONENS KÄRNKRAFT

Fjärde generationens kärnkraft diskuteras numera i olika sammanhang inte enbart bland forskare och ingenjörer utan också av politiker, journalister och mer i allmänhet. Den här skriften svarar på några av de vanligaste frågorna kring ett system av fjärde generationens kärnkraft – vad tekniken kan göra, vilken roll den kan tänkas få och när den kan finnas på plats.

Daniel Westlén, som har disputerat inom reaktorfysik, har tagit fram texten och ansvarar för faktainnehållet. Carl Hellesen från Uppsala Universitet och Carl Berglöf på Vattenfall har båda bidragit vid framtagandet av texten. Idén till den här faktaskriften kommer från Energiforsks styrgrupp för kärnkraftforskning.

Vi gör energivärlden smartare!

Genom samarbete och dialog bedriver vi energiforskning så att ny kunskap skapar värde för näringsliv, kunder och samhället i stort. Vi är det naturliga navet i energiforskningen – en opartisk aktör till nytta för framtidens energisystem.



---

Energiforsk AB | Org.nr 556974-2116 | Telefon: 08-677 25 30 | Fax: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se  
Besök: Olof Palmes gata 31, Stockholm. Nordenskiöldsgatan 6, Malmö | Post: 101 53 Stockholm | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)