

Kärnkraftens bränslecykler – från urangruvan till slutförvaret

Världens första kärnreaktor som kom att utnyttjas för elproduktion togs i drift 1954 i Obninsk i Ryssland (100 km utanför Moskva). Sedan dess har många kärnkraftverk och allt större reaktorer byggts för att utvinna den energi som frigörs när atomkärnor klyvs. Idag finns 436 kommersiella kärnkraftreaktorer i 31 länder som tillsammans producerar drygt 14 % av världens elektricitet [1]. Enligt IAEA är 53 aggregat under konstruktion med en total effekt om 40 000 MW. Många av reaktorerna byggs i Asien. Över 100 reaktorer är beställda och ännu fler är planerade att byggas i framtiden. Reaktorerna byggs för att täcka det ständigt ökande energibehovet och som ersättning för äldre reaktorer som tjänat ut.

För att utvinna energi i en kärnkraftsreaktor finns ett naturligt förekommande grundämne som kan utnyttjas som bränsle då förutsättningarna är de rätta – uran. Innan uranet kan användas som bränsle i en reaktor krävs brytning av uranmalm och förädling av uranet för att ge ett bränsle med de rätta egenskaperna.

Efter viss tid i en kärnreaktor byts det använda bränslet ut mot nytt. I det använda bränslet finns en betydande mängd outnyttjad energi kvar i form av klyvbart material (samt material som kan bli klyvbart efter neutronbestrålning) som kan



återanvändas. I Sverige utnyttjas kärnbränslet endast en gång i en reaktor, varefter det definieras som avfall. Andra länder har valt att återvinna och återanvända vissa bränslekomponenter för tillverkning av nytt bränsle. Kärnbränslecykler beskriver hur uran utvinns, förädlas, utnyttjas för energiframställning och hur det använda bränslet hanteras eller återanvänds.

Med andra reaktorer och annan lagstiftning än den vi har i Sverige idag skulle uran och använt kärnbränsle kunna bli till en nästintill outsinlig råvara för energiproduktion i framtiden. I denna skrift beskrivs några av de kärnbränslecykler som utnyttjas idag samt möjliga framtida reaktor- och uppdragningskoncept, samt hur uran och plutonium kan utnyttjas för energiproduktion.

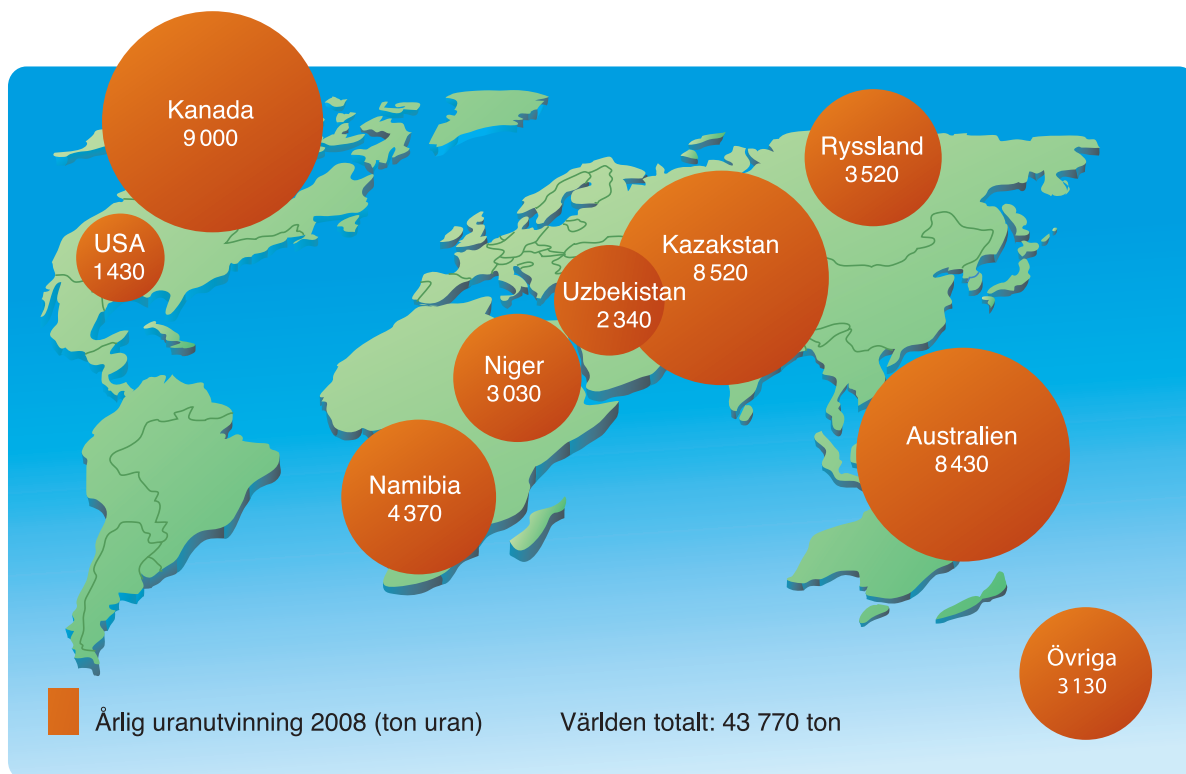
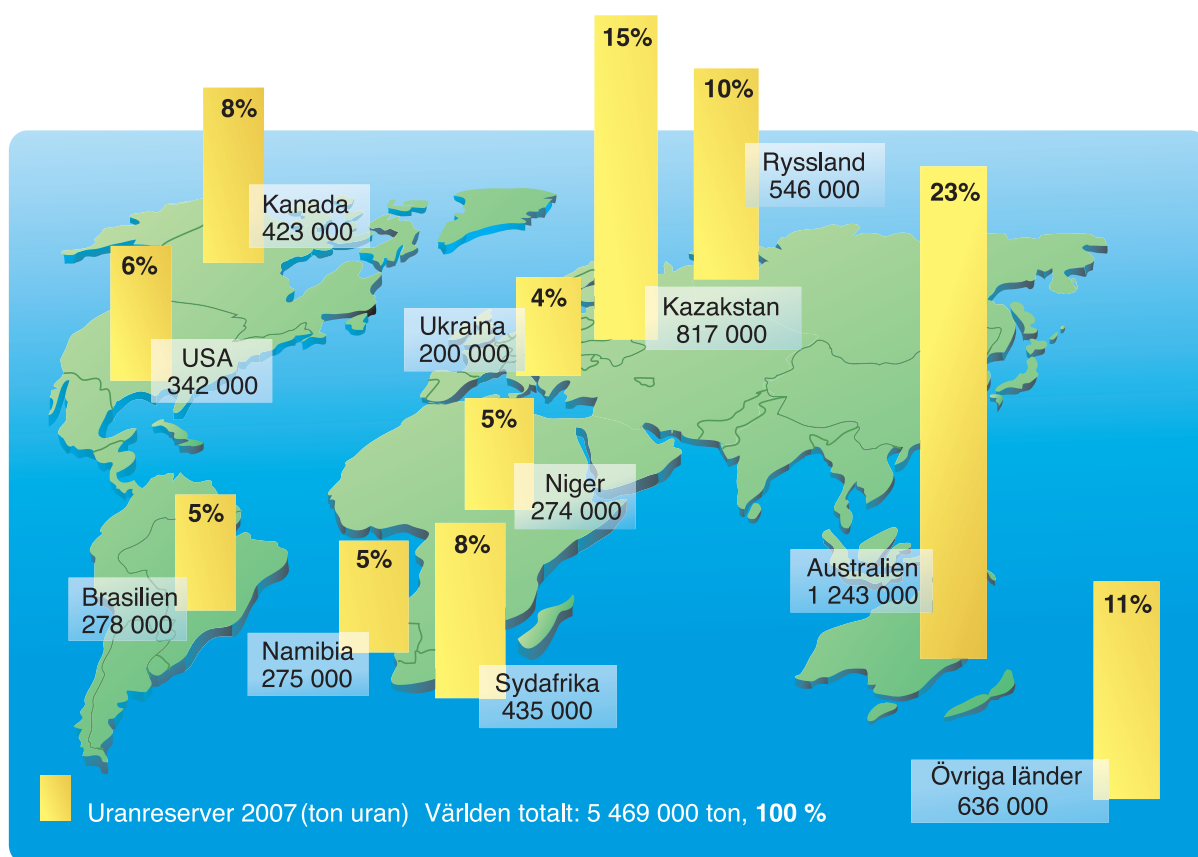


Bild 1. Uranreserver (2007) som kan utvinnas till en kostnad under 130 dollar/kg uran samt uranutvinning i världen år 2008.

Uran

Uran är det tyngsta naturligt förekommande grundämnet sett till atomvikt. Allt uran har bildats i samband med supernovaexplosioner för många miljarder år sedan. I de exploderande stjärnorna skapades tillräckligt högt tryck och höga temperatur för att bilda tyngre atomkärnor genom sammansmältning av lättare atomkärnor och neutroner.

Grundämnet uran består av atomkär-

I naturlig form utgörs grundämnet uran av följande isotoper: uran-238 (99,3 %), uran-235 (0,7%) samt en ytterst liten mängd uran-234. Samtliga uranisotoper är instabila (radioaktiva) och kommer efterhand att falla sönder till nuklider med stabila atomkärnor. Uranisotopernas relativt långa halveringstider innebär att de fortfarande finns kvar i naturen trots att de skapades för många miljarder år sedan. En halveringstid är den tid som åtgår innan hälften av atomkärnorna

dioxid (modernt kärnbränsle) är endast svagt strålande. Stråldosen från uran är jämförbar med städdosen man kan få från granit och andra mineral som innehåller små mängder uran och torium. Det är framförallt dotternukliderna som bildas då uran och torium sönderfaller som bidrar till förhöjd strålnivå. Man kan därför hålla nyframställd uran i handen utan risk för strålningsrelaterade skador. Uran är likt bly en tungmetall, varför materialet bör hanteras med skydds-

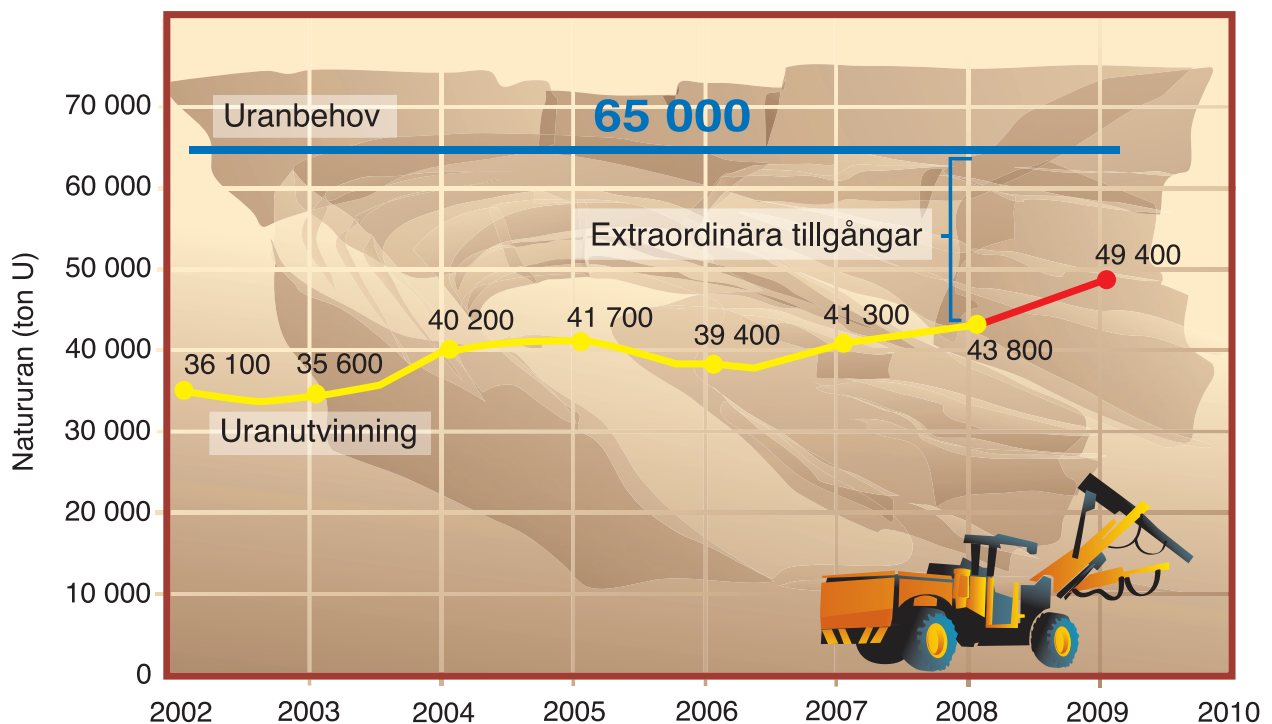


Bild 2. Uranutvinning och uranbehov år 2002–2008 samt prognos för år 2009 (röd linje).

nor med 92 protoner och ett varierande antal neutroner. De olika varianterna av uran (och andra grundämnen) avseende olika antal neutroner i kärnan kallas isotoper.

Exempel på isotoper av olika grundämnen:

- Väte-1, väte-2 (deuterium) och väte-3 (tritium)
- Kol-12, kol-13, kol-14
- Uran-234, uran-235, uran-236, uran-237, uran-238.

En specifik atomkärna, vilken som helst, som har ett bestämt antal protoner och neutroner kallas nuklid. Exempel på nuklider: kol-14, uran-235, nickel-63, järn-59 och så vidare.

av en viss radioaktiv nuklid har fallit sönder till någon annan nuklid. Efter en halveringstid är aktiviteten av en viss nuklid halverad.

Uran-235 och uran-238 har halveringstider om 700 miljoner respektive 4,5 miljarder år. Uranisotopernas olika halveringstider har medfört att andelen uran-235 i det naturliga uranet är begränsad. Andelen uran-235 i naturligt uran minskar ständigt, om än långsamt.

I färdigt kärnbränsle är det i huvudsak uran-235 som klyvs av fria neutroner. Vid klyvningen frigörs kärnenergi i form av värme som sedan utnyttjas för produktion av elektricitet.

Nyframställd uranmetall eller uran-

handskar. Uranets kemiska giftverkan på människokroppen är betydligt större än materialets strålning. Läs mer om uran i Analysgruppens Bakgrund Nr 1, november 2009.

Urangruvor

En uranförande malmkropp utvinns i likhet med andra mineral i underjordsgruvor och dagbrott. En femtedel av uranutvinningen sker genom in-situ lakning (ISL). ISL innebär att en vätska, i vilken uranet löser sig, pumpas ned i den uranbärande malmkroppen. En bit bort pumpas den uranbärande vätskan upp till markytan varefter uranet tas om-

hand. Lakning kräver att det uranbärande materialet, eller malmen, är porös. Sand eller sandsten ger bra förutsättningar för lakning. I USA, Kazakstan och Uzbekistan sker en stor del av uranutvinningen genom ISL. Att laka fram ett mineral ur marken ger betydligt mindre omgivningspåverkan än konventionell gruvdrift.

Den genomsnittliga uranhalt i jordskorpan är 3 ppm (3 gram/ton). I graniter är uranhalt normalt 4–5 ppm men kan i vissa graniter uppgå till 20 ppm (4–20 g/ton). Ekonomiskt brytvärda fyndigheter har ofta en uranhalt över 1 000 ppm (1 kg/ton). De fyndigheter med högst uranhalt finner man i norra Kanada, där ett flertal gruvområden har en genomsnittlig uranhalt över 200 000 ppm (200 kg/ton). Vid dessa fyndigheter kan uranhalt ibland överstiga 500 000 ppm uran (500 kg/ton).

Sverige ansågs i mitten av 1940-talet förfoga över en betydande andel av världens uranreserver. Som en följd av militär och civil satsning inom det kärntekniska området inleddes uranbrytning vid Billingen i Ranstad år 1965. Gruvan i Västergötland hade potential att göra Sverige självförsörjande på uran. Uranhalten i de stora mängderna alunskiffer i området uppgår dock till beskedliga 300 ppm (300 g/ton). Under

denna tidsepok ökade intresset för uran kraftigt i omvärlden vilket initierade en omfattande våg av uranprospektering. Allteftersom upptäcktes allt större och mer koncentrerade uranfyndigheter än den i Ranstad. Det ökade utbudet medförde att priset på uran föll. I Ranstad lades verksamheten ned efter bara några års drift – utvinning av svenskt uran var inte ekonomiskt försvarbart. Samtidigt skedde förändringar inom utvecklingen av svenska reaktorer. Utvecklingen av tungvattenmodererade reaktorer – som kan drivas av naturligt uran och producera vapenplutonium – skrotades till fördel för fortsatt utveckling av lättvattenmodererade reaktorer, vars bränsle består av låganrikat uran.

De största uranproducenterna finns i Kanada, Kazakstan och Australien och de svarade år 2008 tillsammans för 60 % av världsproduktionen [2], se bild 1.

Mängden uran i jordskorpan är stor. Uran är lika vanligt förekommande som tenn och 500 gånger så vanligt som guld [3]. Tillgången på ekonomiskt brytvärd uran har en stark koppling till råvarupriset. OECD/IAEA räknar konservativt med att de idag kända uranfyndigheterna, som kan utvinnas under en viss kostnad (mindre än 130 dollar/kg uran), kommer att vara tillräckliga för ytterligare 100 års drift [4] med nuvarande reaktorkoncept.

Läs mer om uranpris, prospektering och urantillgångar nedan.

Det årliga uranbehovet till världens reaktorer är ungefär 65 000 ton naturligt uran. Då utvinningen år 2008 var 43 770 ton täcktes endast 67 % av det egentliga behovet. Kapaciteten i befintliga gruvor räcker således inte för att tillgodose samtliga reaktorer med bränsle. Under lång tid har stora civila uranlager utnyttjats för att möta det verkliga bränslebehovet. En del plutonium från använt kärnbränsle återvinns genom upparbetning och återanvänds i nytt bränsle. Under 15 års tid har Ryssland bidragit med en ansevärd mängd uran från militära överskottlager av höganrikat uran som blandas ut och sedan utnyttjas vid tillverkning av reaktorbränsle. Dessa extraordinära civila och militära uranlager, som tillgodoser det verkliga uranbehovet, är ändliga, varför utvinningen av uran i gruvor måste fortsätta att öka under den närmaste framtiden, se Bild 2.

I slutet av 70-talet sjönk råvarupriset på uran. Olyckorna i Harrisburg och Tjernobyl bidrog starkt till minskat förtroende för kärnkraft som en säker och hållbar energikälla. Den goda tillgången på uran i gruvor i kombination med bidraget från de extraordinära källorna innebar att uranpriset hölls kvar på en låg

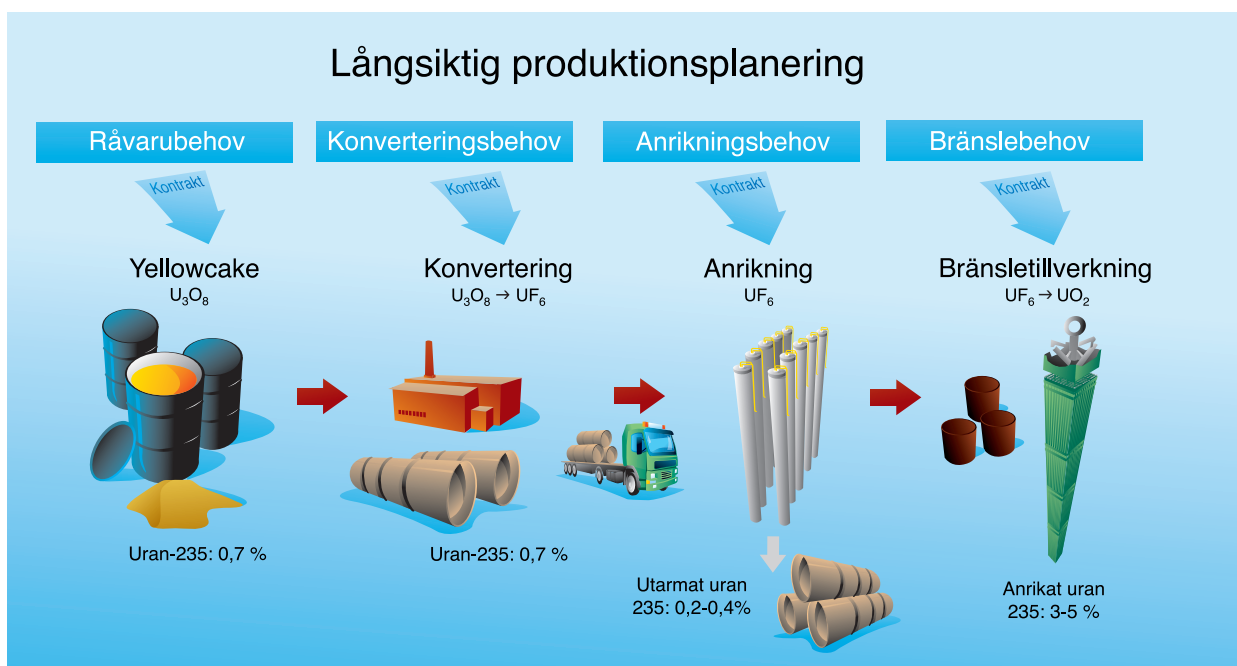


Bild 3. Handeln med uran från råvara Yellowcake till färdiga bränsleelement.

nivå. Kostnaden för gruvdriften översteg ofta försäljningspriset. Det låga uranpriset ledde till att uranprospekteringen i omvärlden minskade kraftigt. Priset höll sig på en låg nivå fram till 2003.

Eftersatt uranprospektering i kombination med ändliga tillgångar av extraordina-
nåra urankällor fick spot-priset på uran att öka kraftigt mellan 2003 och 2007. Prishöjningen har initierat en ny våg av prospektering i omvärlden, däribland i Sverige. Prospekteringsinsatserna har hittills resulterat i att de kända tillgångarna av ekonomiskt brytvärd uran justerats upp med 15 % mellan 2005 och 2007. Mängden ekonomiskt brytvärd uran bedöms komma att öka med mer än 10–15 % per år framöver.

Förutom ökad tillgång på billigt uran genom prospektering, påträffas mycket stora uranfyndigheter som inte är ekonomiskt brytvärda med dagens uranpris.

Uran som hållbar energikälla

Jämfört med kraftproduktion där den kemiska bindningsenergin tas tillvara: olja, gas, kol, biobränslen med flera, påverkas produktionskostnaden för kärnkraft endast marginellt av ökade råvarukostnader. Med ett fördubblat uranpris ökar bränslekostnaden med 1 öre/kWh och elproduktionskostnaden med 5 %. Ett fördubblat uranpris bedöms dessutom leda till att mängden ekonomiskt brytvärd uran blir 10 gånger så stor. Uran är idag en mycket billig råvara.

Genom utveckling av nya reaktorkoncept kan uranet bli möjligt att utnyttja långt mer effektivt än idag. I detta perspektiv har kärnkraften en uthållighet som sträcker sig många tusentals år in i framtiden. Längre fram i denna utgåva av Bakgrund beskrivs några reaktorkoncept och bränslecykler som har potential att ge kärnkraften långt förbättrat bränsleutnyttjande och ökad verkningsgrad.

Miljöpåverkan vid uranbrytning

Utvinning av uran och andra mineral är i de flesta avseenden att betrakta som likvärdig avseende risker för den enskilde gruvarbetaren och den

1 SWU (eng: Separative Work Unit) är en enhet som beskriver hur mycket arbete, eller energi, som åtgår i samband med anrikningen av uran. Det krävs ungefär 6 SWU för att producera 1 kg uran anrikat till 4,5 % där det utarmade uranet innehåller 0,3 % uran-235. Om man vill "dra ut" en större andel uran-235 ur råvaran – ger mindre mängd uran-235 i det utarmade uranet – åtgår en mindre mängd råvara samtidigt som det krävs fler SWU vid anrikningen.

närmaste omgivningen [5, 6]. Oavsett vilket mineral som utvinns i en gruva ställs höga krav från myndigheter för att verksamheten överhuvudtaget ska erhålla drifttillstånd. Förutom tillstånd för verksamheten krävs att tillämpbara lagar inom miljö, säkerhet och arbetsmiljö ständigt efterlevs.

Förutom nationella och internationella krav och riktlinjer för uranutvinning och övriga förädlingsprocesser inom en bränslecykel har de svenska bränsleinköparna utarbetat egna långtgående krav som styr leverantörerna i frågor om miljö, jämställdhet, jämlikhet, etik och moral. Efterlevnad av dessa krav säkerställs genom återkommande auditioner och inspektioner hos de enskilda leverantörerna.

Handeln med uran

För att driva ett kärnkraftverk och årligen förse det med nytt bränsle krävs mycket lång framförhållning. De kontrakt som ingås med råvaruleverantörer och leverantörer av förädlings tjänster är mångåriga och sträcker sig ofta över tidsperioder om 5–15 år.

I Sverige sköts kärnbränsleinköpen till de tio reaktorerna av dels Vattenfall Bränsle som ansvarar för inköpen till reaktorerna i Ringhals och Forsmark, dels av OKG som tillgodoser behovet för de egna reaktorerna i Oskarshamn.

Handeln med uran, från Yellowcake till ett färdigt bränsleelement, omfattar ett flertal bearbetningsprocesser och handelsförbindelser, se Bild 3.

Genom långsiktig planering kan den framtida energiproduktionen i en reaktor uppskattas. Uppskattningen av den framtida produktionen ger information om hur mycket energi som bränslet minst måste ge ifrån sig. Bränslemängd och anrikningsgrad anpassas så att den planerade produktionen blir möjlig att uppfylla. Utifrån dessa data beräknas hur stor mängd Yellowcake som ska

köpas in och sedan konverteras till uranhexafluorid.

Varje delmoment inom ramen för bränsletillverkningen; från inköp av Yellowcake, via beställning av konverteringstjänster och anrikningstjänster till den avslutande tillverkningen av bränsleelement regleras ofta i direkt avtal, utan mellanhänder, mellan beställare och de enskilda leverantörerna.

En begränsad andel av handeln med uran och förädlings tjänster sker på råvarubörser eller genom handelsbolag. Då merparten av bränsletillverkningen regleras genom mångåriga kontrakt påverkas inte priset på naturligt uran och uranbränsle lika mycket som andra metaller och mineral av snabba fluktuationer på råvarubörser. Kostnaden för uranråvaran utgör för övrigt en mindre del av den totala kostnaden för ett färdigt bränsleelement.

Kostnaden för uranråvaran och de olika bearbetningsprocesserna varierar beroende av bland annat bränsleinköpets framförhållning och uranmängd. Nedan visas en ungefärlig kostnad (spot-pris) för vissa moment inom förädlingsprocessen av uran [7]:

- Yellowcake 100 dollar/kg U₃O₈
- Konvertering 10 dollar/kg uran
- Anrikning 130 dollar/SWU

Malning och extraktion

För att utvinna uranet ur malmen krossas och mals den till ett pulver. Den pulveriserade malmen slammas upp med vatten. Sura eller basiska lösningar tillsätts slammarna som löser ut uranet från malmen. Efter ett antal processteg som extraherar ut uranet från lösningen erhålls ett urankoncentrat med den kemiska formeln U₃O₈, ett gulbrunt pulver med handelsnamnet Yellowcake (läs mer om

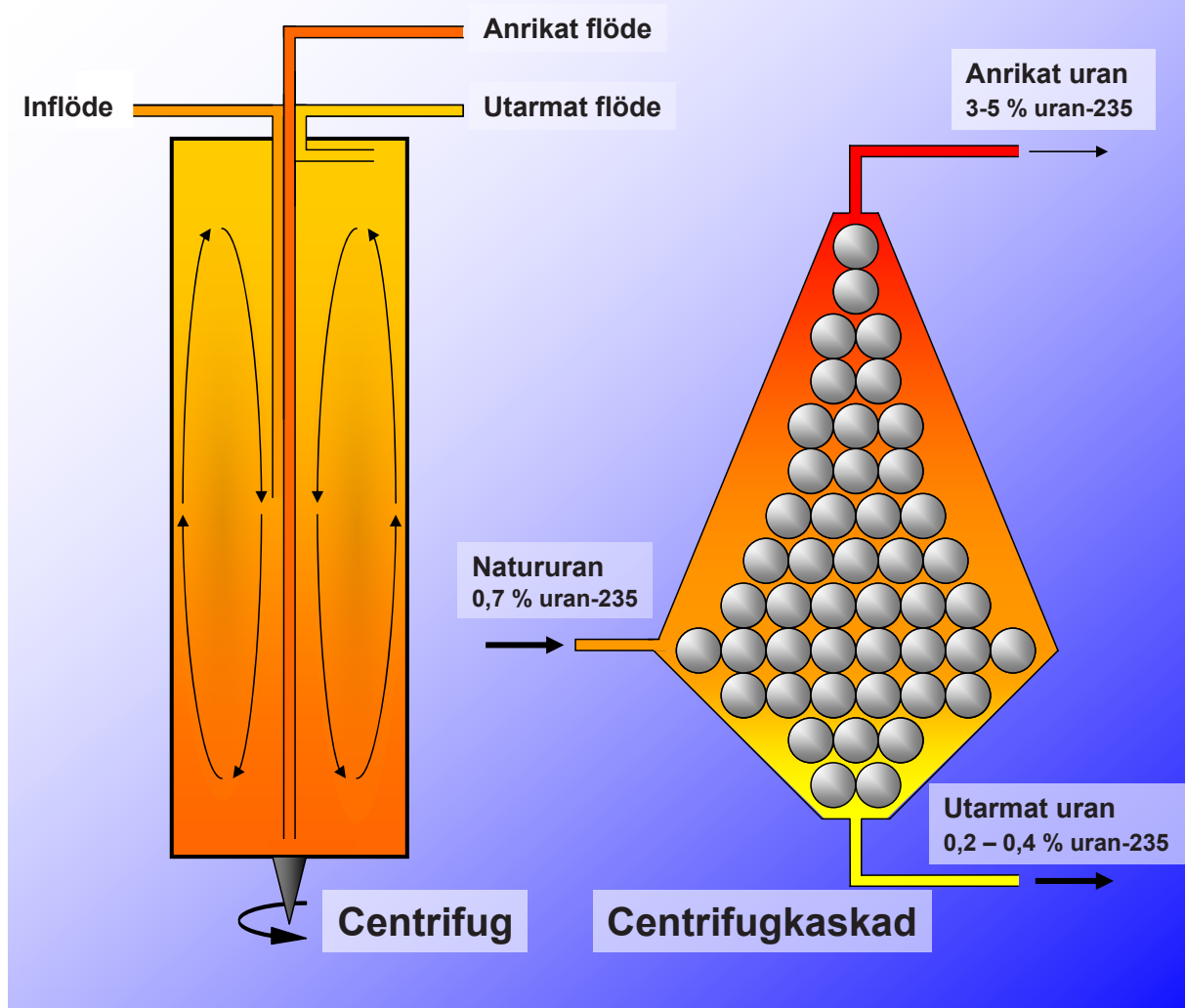


Bild 4. Centrifug för isotopseparation samt en centrifugkaskad.

kemin vid framställning av Yellowcake i [8]). Framställningen av Yellowcake sker ofta i direkt anslutning till gruvorna. Naturligt uran säljs sedan från gruvorna i denna kemiska form.

Konvertering

Yellowcake innehåller förutom uranoxid en del föroreningar. I de efterföljande processtegen rensas först uranoxiden och konverteras (omvandlas) sedan från sin ursprungliga kemiska form U_3O_8 till uranhexafluorid UF_6 i särskilda anläggningar. Att överföra uranet till en annan kemisk form möjliggör hanteringen vid den efterföljande anrikningsprocessen. UF_6 är en kristallin förening med en konsistens som liknar paraffin vid rumstemperatur. Vid temperaturer över $60^\circ C$ är UF_6 gasformigt.

Anrikning

Innan uranet kan användas som bränsle i lättvattenmodererade reaktorer: kokvattenreaktor (BWR/Boiling Water Reactor) och tryckvattenreaktor (PWR/Pressurized Water Reactor), krävs att halten uran-235 höjs. Processen som höjer andelen av en viss isotop i ett grundämne kallas anrikning.

Lättvattenreaktorer använder rent vatten som moderator, eller broms, för de neutroner som frigörs i samband med kärnklyvningsprocessen. Som moderator är vatten både effektivt och billigt. I reaktorn utgör vattnet även kylmedium för den kärnenergi som frigörs i härden. En nackdel med vatten som moderator är att det absorberar en viss andel av de fria neutronerna, vilket minskar möjligheten till ytterligare kärnklyvningar. För att

motverka dessa neutronförluster anrikas uranet till minst 2 %, så kallat låganrikat uran. Ofta anrikas lättvattenreaktorbränsle till 3–5 %. Uran som utnyttjas i kärnvapen måste anrikas till över 90 %, så kallat höganrikat uran.

Den tekniska utvecklingen leder till att energimängden som är möjlig att utvinna ur ett bränslelement ständigt höjs (bränslets utbränning ökar). För att nå en högre utbränning krävs bland annat att bränslet initialt laddas med mer klyvbart material. Ökad utbränning är den främsta orsaken till att uranbränsle anrikas upp till 4–5 %. Uranet i de svenska reaktorerna har en anrikningsgrad mellan 3,5 och 4 %.

I vissa reaktortyper används andra material än vatten för att moderera de fria neutronerna. I den kanadensiska CANDU-reaktorn utnyttjas tungt vat-

ten, och i den ryska RBMK-reaktorn utnyttjas grafit. Grafit och tungt vatten modererar fria neutroner med mindre neutronförlust än vanligt vatten, vilket innebär att bränslet till dessa reaktorer kan vara av lägre anrikningsgrad. Till de tungvattenmodererade CANDU-reaktorerna är uranet ytterst låganriktat eller helt naturligt (0,7–1,2 % uran-235). Bränslet i de ryska grafitmodererade RBMK-reaktorerna anrikas till 2,6 %. Innan olyckan i Tjernobyl var anrikningsgraden något lägre. Anrikningsgraden höjdes efter olyckan för att kompensera för de ytterligare neutronabsorbatorer som infördes i härden för ökad säkerhet.

Isotoper av ett visst grundämne är i princip kemiskt identiska. Därför är det ofta omöjligt att separera isotoper genom kemiska separationsprocesser. För att separera uranisotoper krävs fysi-

kaliska bearbetningsprocesser. Vanligtvis utnyttjas den lilla, men tillräckliga, skillnaden mellan isotopernas atomvikt. Skillnaden i molekylvikt mellan två UF₆-molekyler – en med uran-235 och en med uran-238 – är mindre än en procent.

Gasdiffusion var tidigare den helt dominerande processen för anrikning av uran. I gasform diffunderar (sprider sig) molekyler olika snabbt beroende på molekylvikt. Lätta molekyler rör sig snabbare än tyngre. I gasdiffusionsprocessen låter man gasformig uranhexafluorid passera genom membran av teflon. De UF₆-molekyler som innehåller uran-235 passerar membranet något snabbare än de med uran-238. Över ett enskilt membran sker en ytterst låg isotopseparation, varför processen måste upprepas ett stort antal gånger för att nå tillräckligt hög anrikningsgrad. Gasdiffusion är en

i högsta grad energiintensiv process som dessutom kräver tillgång till stora anläggningar. Gasdiffusionsanläggningar finns i USA, Frankrike och Kina.

Idag anrikas uran ofta genom gascentrifugering. En gascentrifuganläggning använder mindre än 10 % av den energi som går åt vid anrikning genom gasdiffusion. Gasformig uranhexafluorid leds in i flera meter höga och snabbt roterande rör, gascentrifuger. I de extremt välbalanserade centrifugerna, som kan rotera med upp till 100 000 varv per minut [9], genereras en centrifugalkraft som kan bli en miljon gånger starkare än gravitationen. De UF₆-molekyler som innehåller den tyngre uranisotopen, uran-238, ansamlas längs centrifugrörets yttervägg medan molekylerna med de lättare isotoperna uran-235 och uran-234 återfinns längre in mot centrifugens centrum. Om centrifugens yttervägg

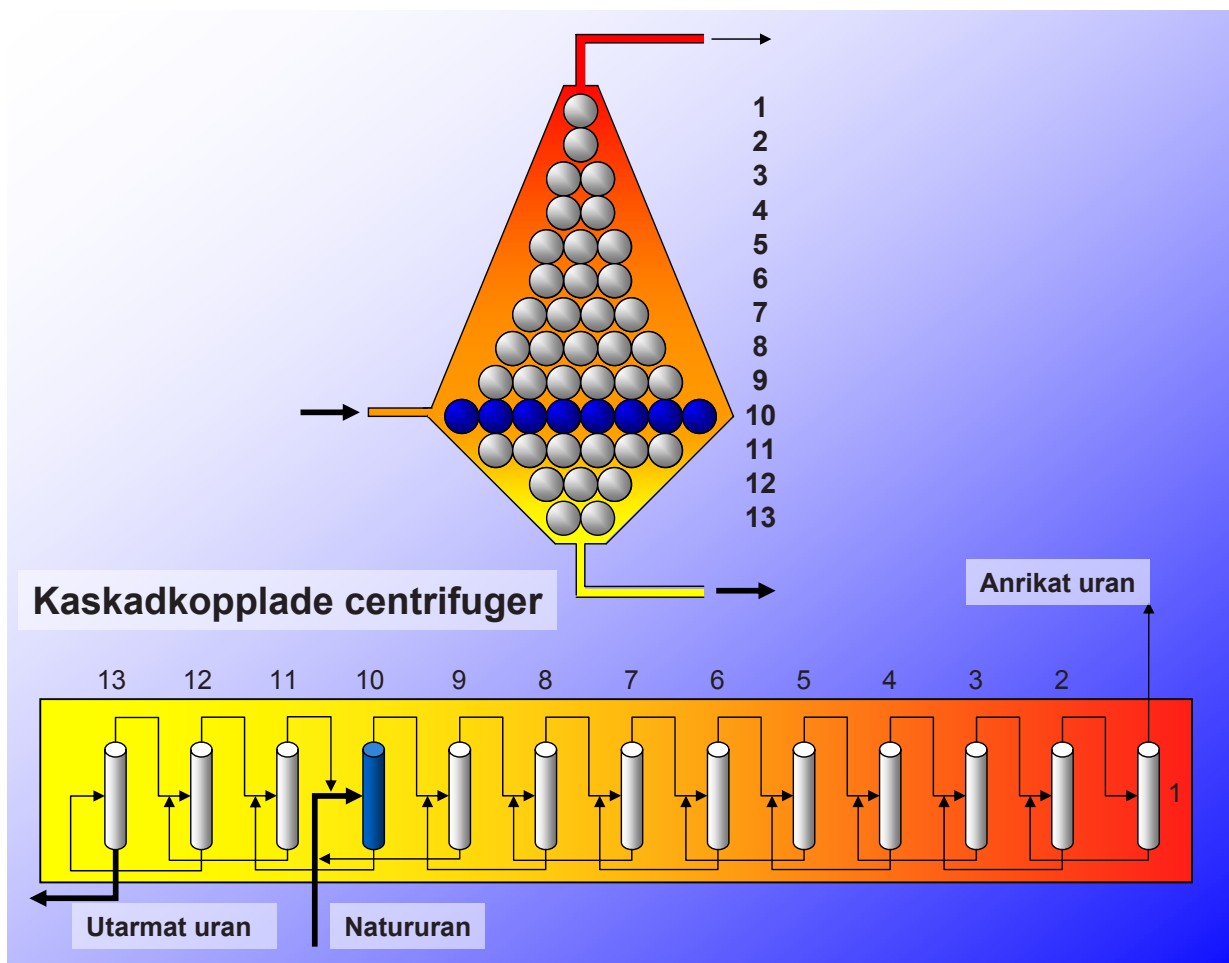


Bild 5. Gasflödet i en gascentrifugkaskad.

Kärnämneskontroll

Internationell kontroll av kärnämnen

Klyvbara kärnämnen används som bränsle i kärnreaktorer men kan också under vissa förutsättningar också användas som den aktiva substansen i atombomber. I världens kärnkraftsreaktorer består bränslet av låg-anrikat uran (upp till 5 % uran-235) och MOX-bränsle (mindre än 10 % plutonium). Halten klyvbart material i dessa kärnbränslen är alldeles för låg för att kunna användas som atombombsmaterial. För detta ändamål krävs att halten klyvbara isotoper är över 90 %.

När utbyggnaden av kärnkraften tog fart under 1950-talet beslöt FN att inrätta ett internationellt atomenergiorgan, IAEA – International Atomic Energy Agency. Dess uppgift sedan 1957 är att understödja den civila användningen av kärnenergi och att samtidigt bedriva en aktiv kontroll av klyvbart material i hela kärnbränslecykeln så att det inte kan användas för militära syften.

IAEA har sitt högkvarter i Wien och styrdes under 36 år av svenska chefer (Sigvard Eklund 1961–1981 och Hans Blix 1981–1997).

IAEA har ett omfattande systematiskt kontrollprogram framför allt i de mest känsliga delarna av kärnbränslecykeln, anriktningsverk och upparbetningsanläggningar. Men även urangruvor, reaktorer och anläggningar för förvaring av använt kärnbränsle kontrolleras kontinuerligt.

IAEA kräver tillgång till den löpande bokföringen av det klyvbara materialets flöde och omvandling i de olika anläggningarna. Inventariet av klyvbart material kontrolleras årligen genom inspektioner och ibland genom oanmälda besök.

IAEA ska rapportera till FN:s säkerhetsråd om man finner bevis för att klyvbart material i den civila kärnbränslecykeln undanhållits. Någon sådan rapportering har hittills inte skett.

(Läs mer om IAEA på www.iaea.org)

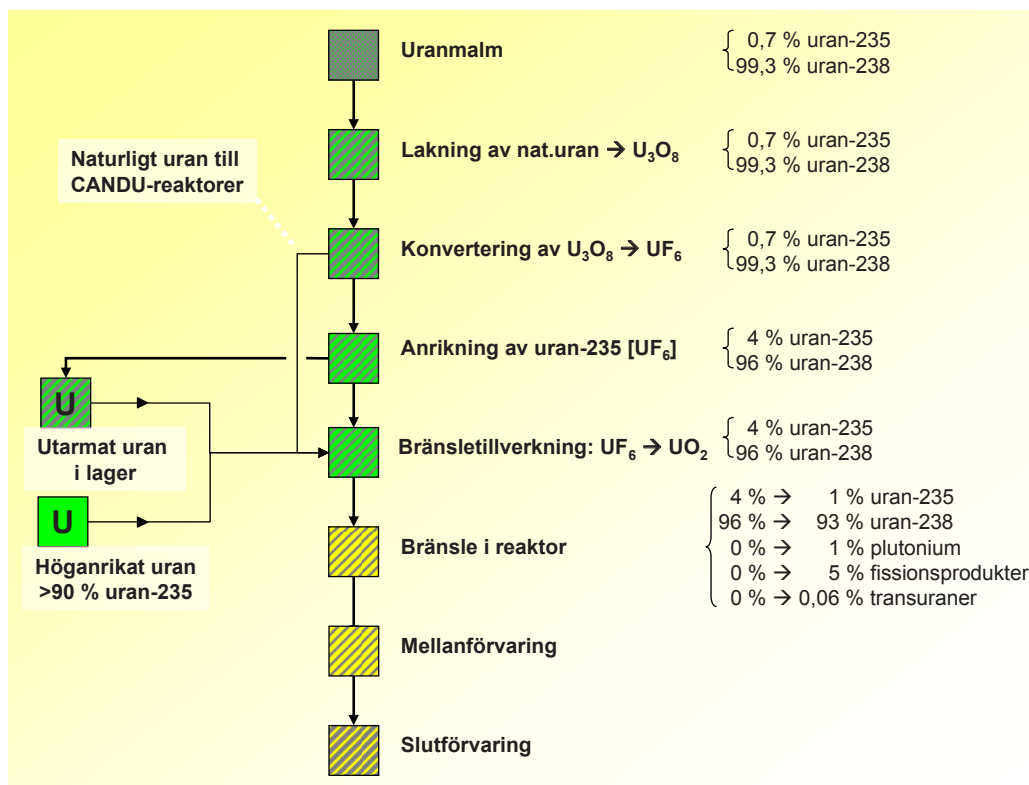


Bild 6. Flödesschema för uran och uranbränsle i en öppen bränslecykel.

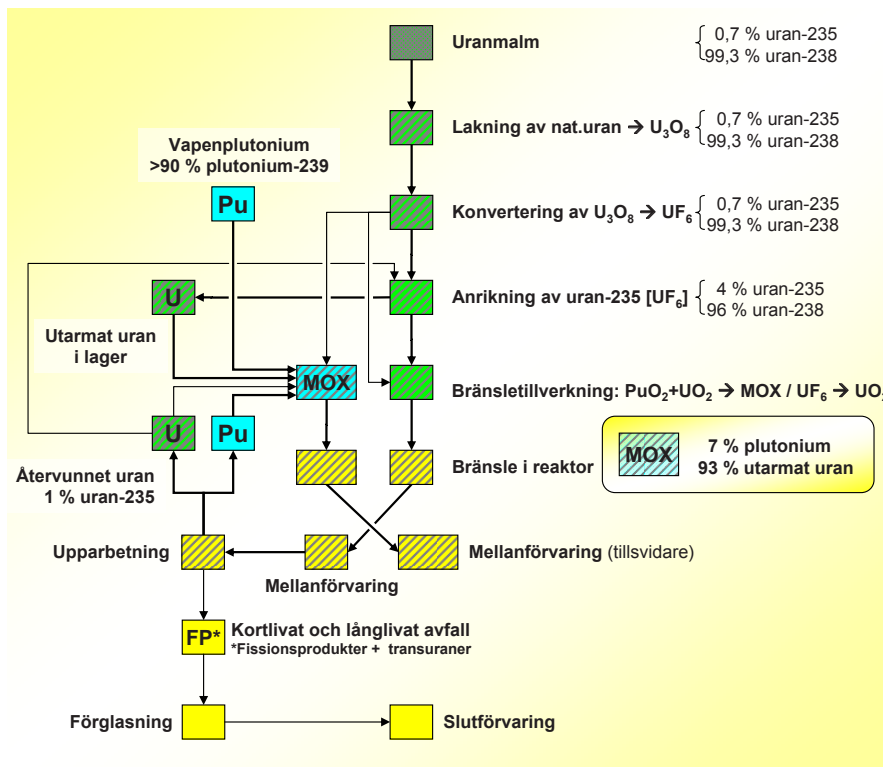


Bild 7. Flödesschema för en sluten kärnbränslecycel.

värms, uppstår ett konvektivt gasflöde som leder de tyngre molekylerna uppåt längs ytterväggen och de lättare nedåt mot centrifugens botten, där de sedan tas ut ur centrifugen, se Bild 4. Den begränsade skillnaden i molekylvikt för UF₆ av olika uranisotoper medför att

en begränsad anrikning erhålls i varje centrifug. För att optimera anrikningsprocessen kopplas därför centrifugerna i kaskad, se Bild 4 och 5.

Genom att koppla centrifugerna i kaskad leds gasflödet mellan centrifugerna på ett sinnrikt sätt. Det anrikade flödet

i en centrifuggrupp (parallellkopplade centrifuger) förs vidare till nästa grupp av centrifuger (centrifuger i serie) till dess att önskad anrikningsgrad uppnås. Det utarmade flödet i respektive centrifuggrupp återförs som inflöde i den närmast föregående centrifuggruppen,

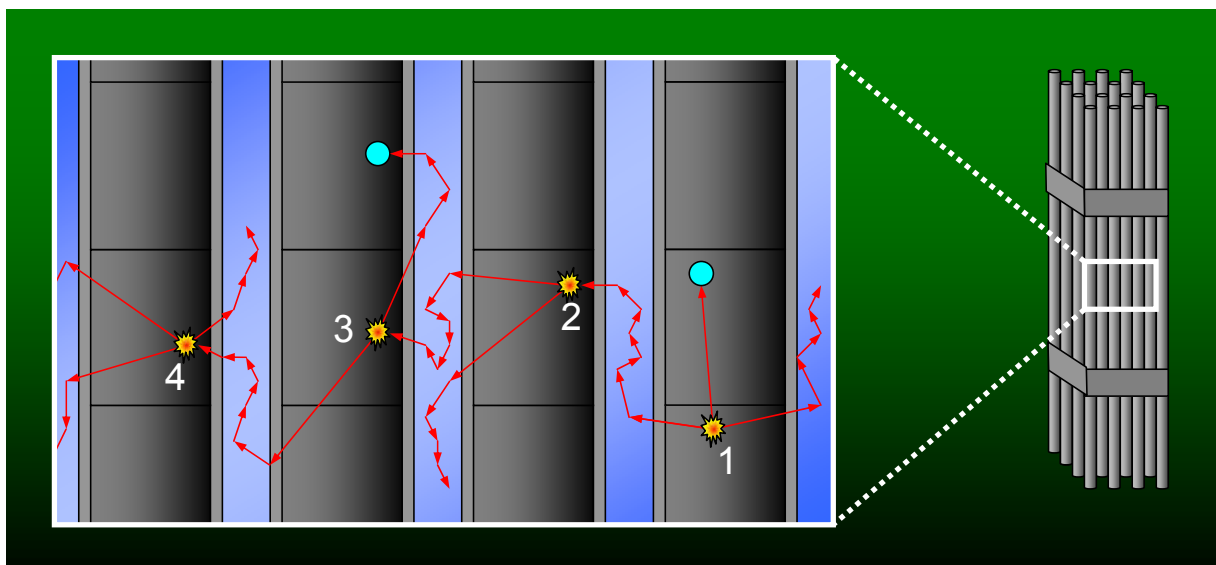


Bild 8. Kedjereaktion i kärnbränsle. Neutroner frigörs i samband med fission (1) som modereras av vatten och sedan bidrar till ytterligare kärnklyvningar (2, 3 och 4) eller fångas in i en kärna av uran-238 och bildar plutonium (turkosa cirklar) eller försvinner ur processen genom att absorberas i moderatorn eller i andra material.

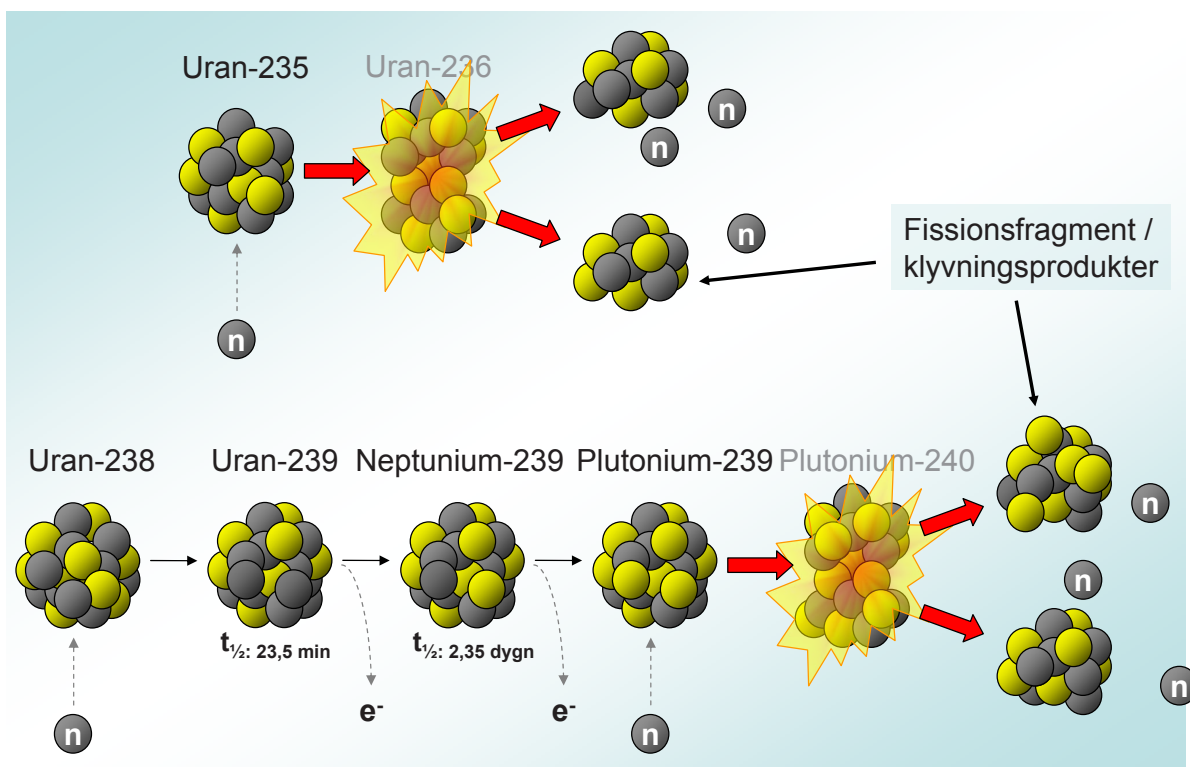


Bild 9. Fission av uran-235 sker då kärnan träffas av en långsam neutron. I uran-238 fångas ofta neutroner in och efter radioaktiva sönderfall omvandlas urankärnan till fissilt plutonium-239. Plutonium-239 kan, liksom uran-235, klyvas om den träffas av en långsam neutron.

se Bild 5.

För att anrika uran till 3–5 % krävs att 10–20 centrifuggrupper, med ett varierande antal centrifuger i varje grupp, kopplas samman i en kaskad. En gascentrifuganläggning består av ett stort antal centrifugkaskader för att ge anläggningen hög produktionskapacitet.

Gascentrifuganläggningar finns i ett tiotal länder där Storbritannien, Ryssland och Nederländerna har störst kapacitet installerad.

Biprodukten vid anrikning, det utarmade uranet, innehåller 0,2–0,4 % uran-235. Utarmat uran utnyttjas bland annat i produkter där ett material med hög densitet är önskvärt. Utarmat uran är dessutom en billig råvara för framställning av MOX-bränsle, läs mer om MOX-bränsle nedan. Merparten av det utarmade uranet utnyttjas dock inte för andra ändamål utan lagras (som UF₆) i stål cylindrar vid anrikningsanläggningarna inför eventuell användning i framtiden.

Bränsle-tillverkning

Bränslet till kärnkraftreaktorer består vanligtvis av ren urandioxid, UO₂. En annan typ av bränsle innehåller förutom urandioxid en mindre mängd plutoniumdioxid, PuO₂. Bränslen som innehåller oxider av både uran och plutonium kallas MOX-bränslen (Mixed OXide Fuel). Nedan beskrivs tillverkningsprocessen för dessa bränslen.

Uranbränsle

Urändioxid är ett keramiskt material som är kemiskt stabilt och mycket svårslutligt i vatten. Smältpunkten är nära 3 000 °C. En av få nackdelar med urandioxid är dess relativt låga värmeledningsförmåga. Vid full effekt i en reaktor uppstår en temperaturgradient mellan bränslekutsens centrum och dess yta som ofta överstiger 1 000 °C, över ett avstånd som ofta är mindre än 5 mm.

Till en bränslefabrik levereras låganrikt eller naturligt uran i form av UF₆ i cylindrerformade stålbehållare som rym-

mer 14 ton.

Behållaren med uranhexafluorid kopplas till bränslefabrikens processsystem. Behållaren värms upp så att uranhexafluoriden övergår i gasform, varefter den leds in i fabriken. Genom kemiska processer omvandlas UF₆ till pulverformig UO₂. Pulvret pressas under högt tryck till centimeterstora cylindrerformade kutsar som sedan värmebehandlas vid hög temperatur. Under värmebehandlingen sintrar de enskilda urandioxidkornen samman och kutsen når en allt högre densitet. Efter värmebehandlingen har kutsarna krympt betydligt och är nästan helt fria från porer, vilket ger dem hög densitet och stor hållfasthet. Bränslekutsarna slipas till ett exakt ytermått och staplas därefter i fyra meter långa rör av materialet zirkaloy (metalllegering av zirkonium och tenn), så kallade bränslestavar. Knappt 100 bränslestavar sätts samman till en bränslepatron för kokvattenreaktorer. Bränsleelement för tryckvattenreaktorer är betydligt större och består av fler än 250 bränslestavar. Fabriker för tillverkning av urandioxidbränsle finns i ett 20-tal länder.

Kärnbränsletillverkning i Sverige

I Sverige tillverkas kärnbränsle för lättvattenreaktorer vid Westinghouse Electric Sweden AB:s fabrik i Västerås. Verksamheten med bränsletillverkning inleddes 1966 i Aseas gamla fabrik på Finnsletten, där bränsle till Sveriges första kommersiella kärnkraftsreaktor Oskarshamn 1 tillverkades. Efter sammanslagning med statliga AB Atomenergi 1969 bildades Asea-Atom och verksamheten flyttades snart till nya lokaler där bränslet tillverkas än idag.

Idag ägs Westinghousegruppen av Toshiba Corporation i partnerskap med Shaw Group Inc och Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co Ltd.

I Västeråsfabriken tillverkas bränsle för tryck- och kokvattenreaktorer för i huvudsak europeiska kunder. Bränslefabriken i Västerås, med drygt 500 anställda, är en av världens modernaste där många av processerna har hög automationsgrad. Tillverkningen sker huvudsakligen i två flöden: uran- och komponentflödet, som sammanstrålar i det slutliga montaget av bränslepatroner och bränsleelement. Fabriken är licensierad för bearbetning

av 600 ton UO₂ årligen. Westinghouse planerar för att under 2010 höja den årliga produktionen till 900 ton. Nära 5 % av det årliga behovet av kärnbränsle i världen tillverkas i Västeråsfabriken.

MOX-bränsle

Använt kärnbränsle innehåller en viss mängd klyvbart material (uran-235 samt plutonium 239 och -241) och uran-238 som kan återvinnas genom upparbetning (läs mer om detta i avsnittet om upparbetning) och sedan utnyttjas för tillverkning av nytt bränsle. Om plutonium återvinns kan det i form av plutonumdioxid PuO₂ återanvändas för att tillverka nytt bränsle genom att blandas samman med utarmad urandioxid. Plutonumdioxid tillsätts i sådan mängd att det motsvarar ett uranbränsle som anrikats till 3–5 %. MOX-bränsle innehåller därför 7–9 % plutonumdioxid som till två tredjedelar består av fissila isotoper, se även Bild 13 och 14.

Tillverkningen av MOX-bränsle sker på ett liknande sätt som vid tillverkning av uranbränsle. Kulsar pressas och sedan sintras vid hög temperatur med

efterföljande hopsättning till färdiga bränslelement.

Färskt MOX-bränsle är mer radioaktivt än färskt uranbränsle på grund av dess plutoniuminnehåll. Plutoniumisotoperna har kortare halveringstider, jämfört med uran, och sönderfaller därför oftare med högre aktivitet och dosrat som följd. Tillverkning av MOX-bränsle sker av arbetsmiljöskalet därför mer automatiserat jämfört med tillverkning av uranbränsle.

I ett 30-tal reaktorer, framförallt i Europa, utnyttjas MOX-bränsle. I en reaktor som utnyttjar MOX-bränsle laddas härden vanligtvis inte med fler än 30 % MOX-bränslelement.

MOX-bränsle tillverkas i Frankrike och Storbritannien. Produktionsanläggningar för MOX-bränsle håller på att byggas i USA och Japan. I den amerikanska anläggningen kommer bränsle att tillverkas med plutonium från nedmonterade kärnvapen. Liksom höganrikat uran är vapenplutonium en råvara som kan utnyttjas för tillverkning av kärnbränsle.

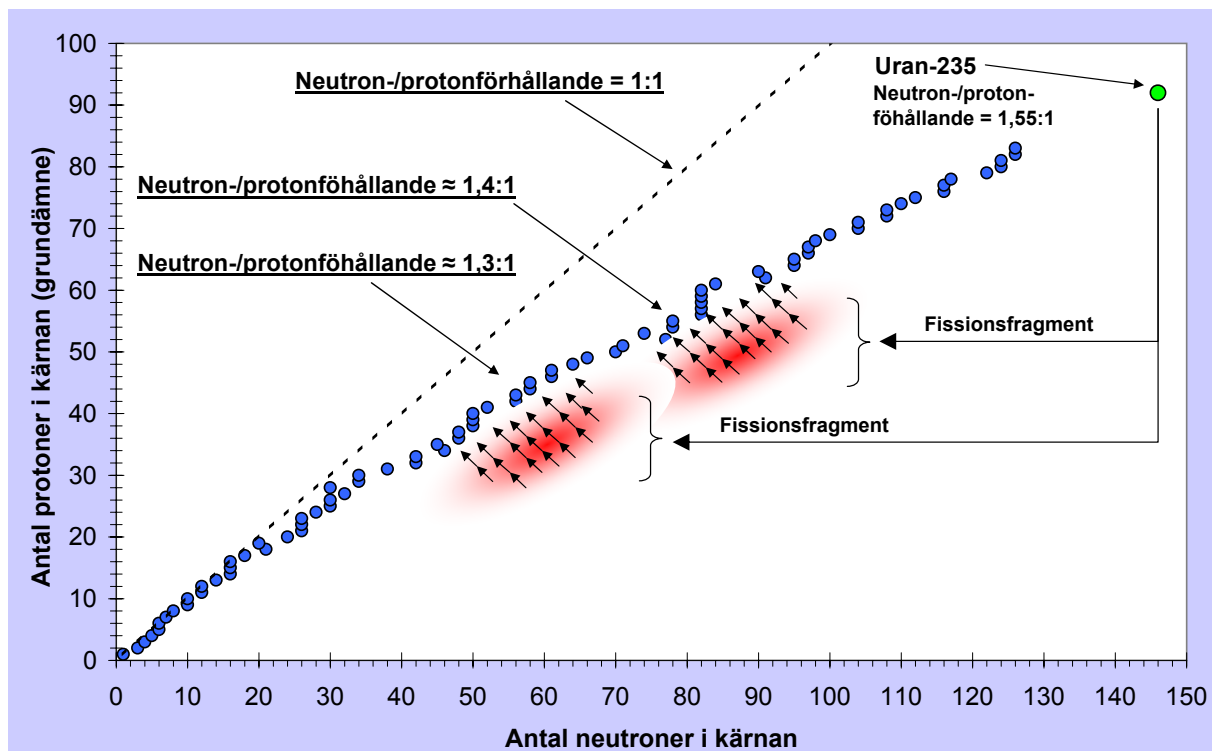


Bild 10. Förhållandet mellan antalet neutroner och protoner i stabila atomkärnor (blå cirklar). Fissionsprodukternas instabilitet orsakas av ett kraftigt neutronöverskott i kärnan efter kärnklyvning. De korta svarta pilarna visar de successiva betasönderfallen i fissionsfragmenten som sker då överskottet av neutroner omvandlas till protoner.

Bränslecykler

Efter tre år i en tryckvattenreaktor eller fem år i en kokvattenreaktor, behöver ett bränsleelement bytas ut. Det använda bränslet definieras nu som avfall eller som en potentiell råvara. Beroende på synsätt talar man om öppen respektive slutna kärnbränslecykel.

I Sverige drivs reaktorerna med öppen kärnbränslecykel, se bild 6. I en öppen kärnbränslecykel utnyttjas uranet som bränsle en gång i en reaktor, varefter det utan ytterligare behandling

mellanförvaras och sedan slutförvaras. En öppen kärnbränslecykel är idag det mest kostnadseffektiva sättet att utvinna kärnenergi på – det låga uranpriset gör det mindre ekonomiskt intressant att återvinna klyvbart material från använt bränsle. Exempel på länder som utnyttjar öppen bränslecykel är USA, Finland, Sydkorea, Spanien och Sverige.

Som råvara för tillverkning av kärnbränsle kan även uran från demonterade kärnvapen användas. Höganrikat uran från kärnvapen består till mer än 90 % av uran-235. Innan detta material kan

användas för tillverkning av kärnbränsle måste det spädas ut kraftigt. Utspädning sker genom att i gasform (UF₆) blanda höganrikat uran med naturligt eller utarmat uran. Nedblandning av uran från kärnvapen sker i Ryssland och i USA. I Ryssland späds uran från kärnvapen ut, varefter materialet säljs till USA för att bli till reaktorbränsle i de amerikanska reaktorerna. Nedblandning av ryska överskottslager ingår i överenskommelsen "Megatons to Megawatts" [10] som slöts mellan USA och Ryssland år 1993. Enligt överenskommelsen kommer 500

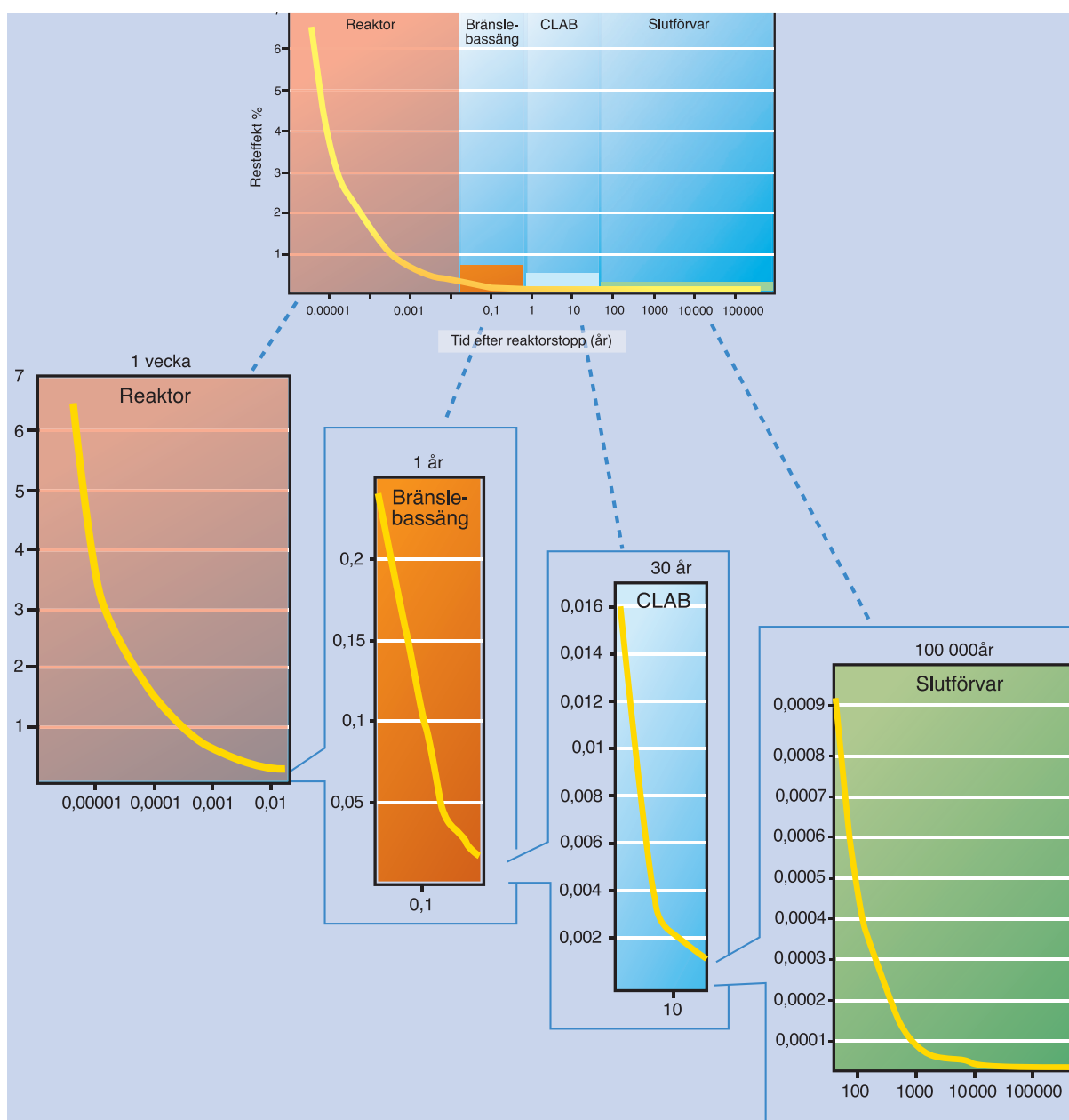


Bild 11. Bränslets resteffekt från radioaktiva sönderfall efter ett reaktorstopp.

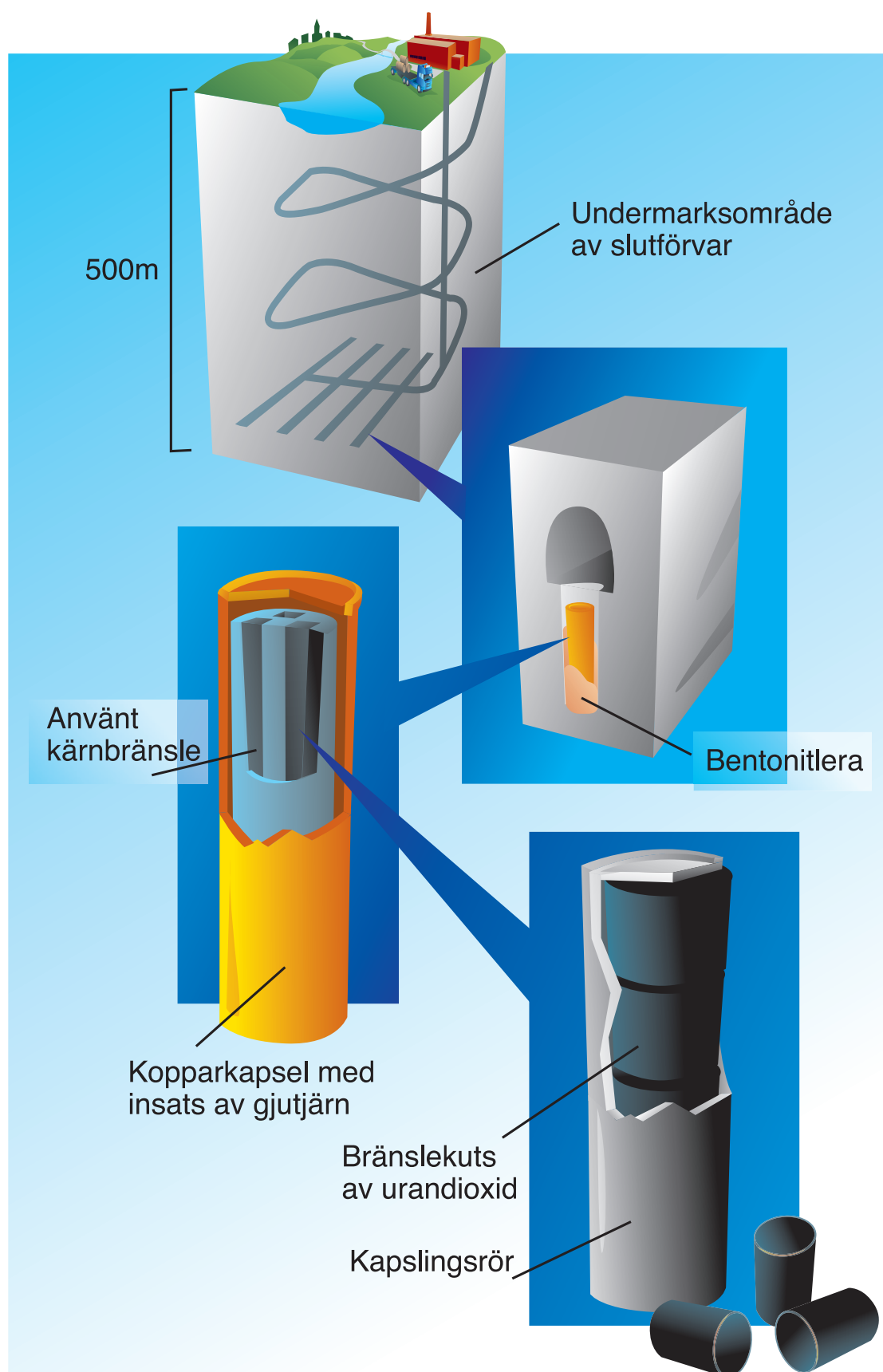


Bild 12. Den svenska slutförvarsmetodiken, KBS-3, innebär att ett flertal barriärer hindrar eller fördröjer spridningen av radioaktiva nuklider i bränslet till omgivningen.

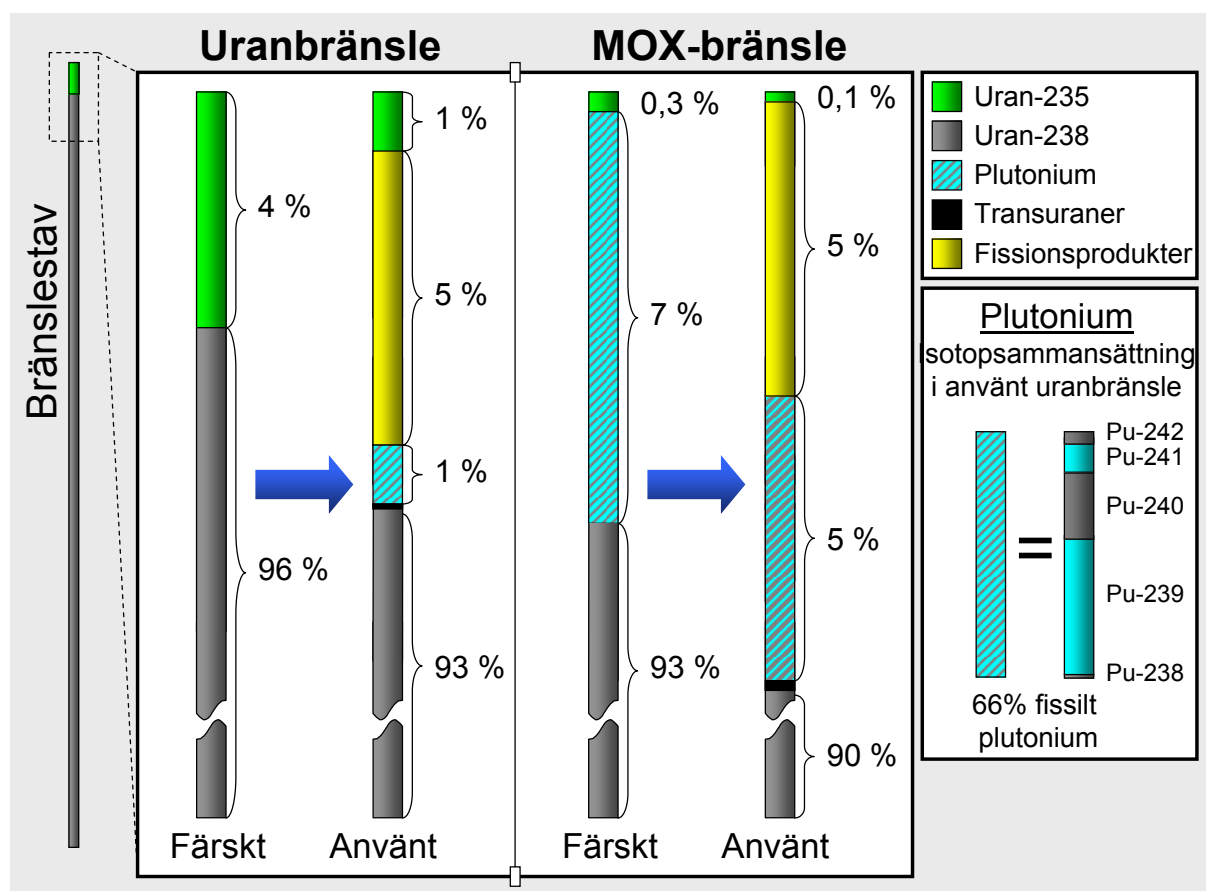


Bild 13. Nuklidsammansättning i färskt och använt kärnbränsle, se även Bild 14 [13, 14].

ton höganrikat ryskt uran, motsvarande 20 000 kärnstridsspetsar, att blandas ned i Ryssland och säljas i USA, där det omvandlas till reaktorbränsle (25 % återstår att hantera). USA deklarerade 1996 ett överskott om 175 ton höganrikat uran. Idag har 40 % av detta material omvandlats till reaktorbränsle.

I en sluten kärnbränslecykel, se Bild 7, kan merparten av bränslet återvinnas för att tillverka nytt bränsle. Det är i stor utsträckning det plutonium, som bildas vid neutronbestralning av uran-238, som återanvänds för tillverkning av MOX-bränsle. Uran kan återanvändas för tillverkning av nytt uranbränsle till lättvattenreaktorer först om det anrikas igen. I det använda uranbränslet återstår nära 30 % av den ursprungliga mängden uran-235.

Länder som utnyttjar en sluten kärnbränslecykel är Belgien, Kina, Frankrike, Indien, Schweiz, Ryssland, Japan med flera.

En sluten kärnbränslecykel liknar en öppen kärnbränslecykel fram till det att

uranbränslet mellanförvarats ett antal år efter användning. Istället för fortsatt mellanförvaring, följt av slutförvaring, genomgår det använda bränslet en process som kallas upparbetning (se avsnitt om upparbetning för ytterligare information) där bränslet löses upp och plutonium, uran samt klyvningsprodukter och andra radioaktiva ämnen separeras ut på kemisk väg.

Använt MOX-bränsle upparbetas inte på nytt utan mellanförvaras i avvaktan på beslut om framtida användning. Idag är en sluten kärnbränslecykel därför inte att betrakta som sluten då det använda MOX-bränslet inte upparbetas ytterligare. Med andra reaktortyper än de vi utnyttjar idag skulle en sluten bränslecykel vara möjlig att "sluta" betydligt mer, se avsnittet om framtidens reaktorer för mer information.

Det höga aktiva avfallet från upparbetningsprocessen: fissionsprodukter och transuraner (se avsnitt om reaktordrift för mer information) från upparbetningsprocessen hamnar idag i en gemensam

avfallsström som behandlas för slutförvaring genom att blandas samman med smält glas. Den förglasade högaktiva avfallsprodukten är kemiskt och mekaniskt stabil under lång tid framöver. Metalliskt avfall från bränsleelementen gjuts in i betong inför slutförvaring.

Reaktordrift

I reaktorhärden utsätts bränslet för intensiv neutronstrålning i samband med klyvning av fissila atomkärnor. Då uran och plutonium klyvs frigörs i genomsnitt 2,5–3 neutroner. Genom att moderera (bromsa upp) de fria neutronernas hastighet efter en kärnklyvning ökar sannolikheten att de ska träffa och klyva andra fissila atomkärnor i bränslet. Då de fria neutronerna stöter på ett modererande material (vatten, tungt vatten, grafit m fl) avtar deras hastighet snabbt på grund av upprepade kollisioner med atomerna i moderatorn – de fria neutronernas rörelseenergi överförs successivt till moderatorn. I den mest förekommande

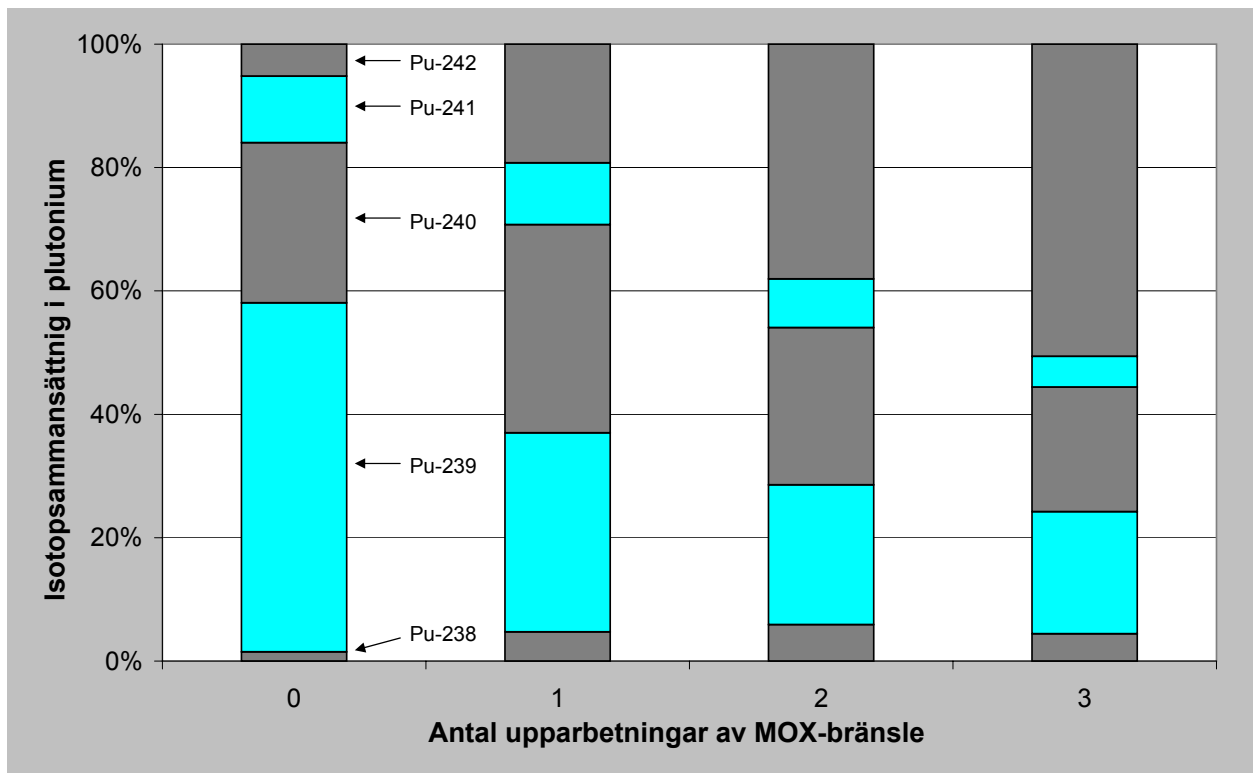


Bild 14. Isotopsammansättning i plutonium. 0) Upparbetat uranbränsle, 1) Upparbetat MOX-bränsle (första generationen), 2) Upparbetat MOX-bränsle (andra generationen), 3) Upparbetat MOX-bränsle (tredje generationen) [14].

Bränsleutnyttjande

Oavsett vilken kärnbränslecykel som utnyttjas för energiproduktion genom kärnkraft utnyttjas endast en liten del av det naturliga uranets fulla potential som kärnbränsle. Av den ursprungliga mängden klyvbart uran-235 i naturligt uran tas drygt hälften tillvara i samband med anrikning, resterande mängd återfinns i det utarmade uranet. För att tillverka 1 kg låganrikat uran skapas 7 kg utarmat uran som biprodukt. I reaktorn klyvs ungefär 70 % av den ursprungliga mängden uran-235 i bränslet. Av andelen uran-238 omvandlas ungefär 3 % till plutonium, som i stor utsträckning klyvs och bidrar till energiproduktionen i reaktorn. Med hänsyn till den stora mängd uran som bryts i gruvorna, och den begränsade mängden uran som förbrukas i en reaktor, utnyttjas endast 0,5 % av uranet i den ursprungliga uranmalmen för värmeproduktion. I slutna kärnbränslecykler ökar denna låga bränsleutnyttjandegrad med 12 % (till 0,56 %) om plutonium återanvänds och med 22 % (till 0,6 %) om även uranet återanvänds. En tredjedel av energin som frigörs i härden omvandlas till elektricitet, resten kylv bort i havet. Oavsett hur kärnbränslet utnyttjas, och eventuellt återanvänds, förblir utnyttjandegraden av uran under en procent.

Vid betraktande av denna låga utnyttjandegrad har kärnkraften stor potential att utvecklas mot ett förbättrat råvaru- och energikutnyttjande. För att kunna utnyttja en större andel av uranets potential som bränsle, samt öka andelen nyttig energi som är möjlig att tillvarata, krävs att nya reaktorer utvecklas.

reaktortypen, lättvattenreaktorn, modereras de fria neutronerna av vanligt (högrent) vatten.

Då en långsam neutron träffar en atomkärna av uran-235 bildas uran-236 som snabbt klyvs till två mindre fragment genom fission. Som ett resultat av kärnklyvningen frigörs ett antal neutroner som kan kollidera med andra fissila atomkärnor och därmed underhålla kedjereaktionen, se Bild 8 och 9.

Merparten av den energi som frigörs vid kärnklyvning överförs till fissionsfragmenten i form av rörelseenergi. När fissionsfragmenten bromsas upp i den närmaste omgivningen omvandlas rörelseenergin till friktionsvärme som hettar upp bränslet. Förutom att klyva atomkärnor kan de fria neutronerna fångas in i atomkärnor utan att kärnklyvning sker. Neutroninfångning sker framförallt i uran-238, varvid uran-239 bildas. Efterhand sönderfaller uran-239 (halveringstid: 23,5 minuter) till neptunium-239 (halveringstid: 2,35 dygn) som sönderfaller till fissilt plutonium 239, se bild 9.

Fissionsprodukter och transuraner

När en tung atomkärna träffas av en fri neutron kan kärnan klyvas eller bli ytterligare något tyngre.

Fissionsprodukter

Uran-235 och de fissila plutoniumisotoperna (-239 och -241) kan genomgå kärnklyvning om de träffas av långsamma fria neutroner. De lättaste stabila nukliderna har ofta ett förhållande mellan antalet neutroner och protoner i kärnan som är nära 1 till 1. I tyngre atomkärnor krävs fler neutroner för att kärnan ska vara stabil. I en riktigt tung atomkärna är förhållandet mellan antalet neutroner och protoner 1,55 till 1 (avser uran-235). Det stora neutronöverskottet i kärnan ärvs i stor utsträckning av de mindre fissionsfragmenten som uppstår då den tyngre kärnan klyvs, se bild 10.

Det ogynnsamma neutronförhållandet i fissionsprodukternas kärnor direkt efter kärnklyvningen gör dem extremt instabila (radioaktiva). Fissionsfragmentens kärnor blir alltmer stabila genom att successivt omvandla neutroner till protoner. Vid dessa omvandlingar sänds en elektron

(betastrålning) ut från kärnan. Betasönderfallen följs ofta av att ytterligare överskottsenergi i form av elektromagnetisk strålning (gammastrålning) sänds ut från kärnan. De radioaktiva sönderfallen inleds omedelbart efter en kärnklyvning och sker sedan allt långsammare efterhand som neutronöverskottet i kärnan jämnas ut – bränslets aktivitet minskar. Då fissionsfragmenten, som uppstår i samband med en kärnklyvning, sällan är lika stora bildas två ”öar” av något tyngre och något lättare nuklider, se de rödmarkerade områdena i Bild 10. Merparten av fissionsprodukterna definieras som kortlivade då deras sönderfall till stabila nuklider sker inom loppet av ett par hundra år. Endast ett fåtal fissionsprodukter är långlivade.

Transuraner

Genom neutroninfångning, primärt i uran-238, bildas efterhand allt tyngre atomkärnor i bränslet, så kallade transuraner (tyngre än uran), jämför bildandet av plutonium i Bild 9. Samtliga transuraner är instabila. Transuranerna sönderfaller ofta genom att sända ut en heliumkärna (alfastrålning). Transuranerna har ofta långa halveringstider, vilket innebär att deras radioaktivitet finns kvar i det använda kärnbränslet under väldigt lång tid. Det är kärnbränslets begränsade innehåll av dessa långlivade nuklider som är huvudorsak till att använt bränsle måste hållas avskilt från biosfären under 10 000-tals år.

Mellanlagring och resteffekt

En gång per år stoppas en kärnreaktor för underhåll och bränslebyte. I kokvattenreaktorer byts en femtedel, och i tryckvattenreaktorer en tredjedel, av alla bränsleelement ut mot nya. Bränslet hanteras fjärrmanövrerat under minst tre meter vatten som effektivt skyddar personalen från bränslets höga strålnivå. Då en reaktor stoppas, och kärnklyvningen upphör, ger de radioaktiva sönderfallen i bränslet fortfarande upphov till nära 7 % av reaktorns maximala effekt. Resteffekten härrör initialt från sönderfallen av de mest instabila och kortlivade nukliderna - fissionsprodukterna. Resteffekten i bränslet avtar snabbt och har efter en vecka i den avstängda reaktorn minskat

med 95 %, se Bild 11.

En vecka efter att reaktorn stoppats tas de använda bränsleelementen ut ur härden och placeras i en bränslebassäng i reaktorbyggnaden och förvaras där i drygt ett år. I bränslebassängen minskar bränslets aktivitet och värmeutveckling med ytterligare 90 %, se Bild 11.

Tidigast ett år efter bränslebytet transporteras bränslet i specialbyggda transportbehållare till det centrala lagret för använt kärnbränsle (Clab) i Oskarshamn. Clab – Centralt Lager för Använt Bränsle – är ett underjordiskt mellanförvar för använt bränsle. Clab ligger i närheten av Oskarshamnsverket. I Clab förvaras det använda bränslet i stora vattenfyllda bassänger som kylv kontinuerligt. I Clab mellanlagras bränslet i 30 år inför slutförvaring. Under denna tid avtar bränslets aktivitet och värmeutveckling med ytterligare 90 %, se Bild 11.

Innan bränslet ska slutförvaras, tidigast efter 30 år, har resteffekten i bränslet avtagit med mer än 99,99 %.

Slutförvaring

I länder som utnyttjar en öppen kärnbränslecykel, där bränslet utnyttjas en gång i en reaktor, ska bränslet slutförvaras efter användning. I Sverige är det ägarna till kärnkraftverken som ansvarar för att bränslet tas omhand på ett säkert sätt. Transporter och mellanlagring av använt kärnbränsle samt forskningen kring ett framtida slutförvar hanteras av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) som ägs gemensamt av kärnkraftsbolagen.

I mitten av 70-talet inledde SKB en kartläggning av den svenska berggrunden för att ta reda på mer om förutsättningarna för ett framtida slutförvar för använt kärnbränsle. Under 1991 inledde SKB förstudier i åtta utvalda kommuner. De två kommuner som bedömdes ha bäst förutsättningar för ett framtida slutförvar gallrades så småningom fram: Oskarshamn och Östhammar. I dessa två kommuner genomfördes omfattande platsundersökningar under åren 2002–2007. År 2009 offentliggjorde SKB vilket av de två undersökta områdena som hade de bästa förutsättningarna för den långsiktiga säkerheten. SKB valde Forsmark.

Innan slutförvaret kan byggas måste

SKB beviljas tillstånd från regeringen. Tillståndsansökan delges under 2010, varefter den granskas av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) och miljödomstolen. Regeringen beslutar tidigast 2013 om slutförvaret kan byggas i Forsmark. Byggtiden för slutförvaret beräknas till omkring 10 år.

Den svenska (och även den finska) slutförvarsmetodiken, KBS-3, innebär att det använda bränslet placeras i kopparkapslar som deponeras på 500 meters djup i urberget. I slutförvaret omges det radioaktiva bränslet av ett flertal barriärer som ska hindra eller fördröja transporten av radioaktiva nuklider från bränslet upp till biosfären, se Bild 12.

Under den långa tidsperiod som krävs för att bränslets aktivitet ska minska till ofarliga nivåer, är bränslets kapslingsrör inte tillräckligt som skydd för att hindra vatten från att nå fram till de keramiska bränslekutsarna. Trots att bränslet är mycket svårslutligt kommer en viss aktivitet att lakas ut vid kontakt med vatten. För att hålla bränslet torrt under lång tid krävs att bränslet placeras i behållare av koppar. Koppar uppvisar mycket goda

uppgå till bråkdelar av en millimeter under de inledande 100 000 åren [11]. Kopparkapseln tillverkas därför med 50 mm tjocka väggar, vilket ger kapslarna motståndskraft mot korrosionsskador under många miljoner år. Det är svavelföreningar i slutförvaret som i störst utsträckning bidrar till de korrosionsangrepp som uppstår på kopparkapslarna i slutförvaret. För att hindra grundvatten (med svavelföreningar) att nå fram till kopparkapseln återfylls hålet runt kopparkapseln med bentonitlera. Samtliga transportgångar i slutförvaret återfylls också med bentonitlera efterhand som deponeringen framskrider. Bentonitlera sväller kraftigt vid kontakt med vatten.

Genom svällning blir leran helt tät och förhindrar ytterligare inträngning av vatten. Den sista barriären mellan bränsle och biosfär består av 500 meter urberg som har mycket stor förmåga att fänga upp och kvarhålla radioaktiva nuklider. Berget i Forsmark är dessutom ovanligt sprickfritt och torrt, vilket ytterligare minskar möjligheten för radioaktiva nuklider att transporteras upp till markytan.

let och det närmast omgivande berget. Bränslets resteffekt i en kopparkapsel är initialt 1 700 W, vilket ger upphov till följande temperaturer i slutförvaret (tio år efter deponering, vid temperaturmaximum) [12]:

- Bränsle 140 °C
- Kopparkapsel 90 °C
- Bentonitbuffert 70 °C
- Bergvägg 65 °C

Efter 1 000 år är temperaturen i slutförvaret drygt 40° C och efter 10 000 år har temperaturen sjunkit under 20° C.

Upparbetning

I länder med slutna kärnbränslecykler återanvänds vissa komponenter i det använda bränslet efter en viss tids mellanlagring. En sluten kärnbränslecykel syftar till att tillvarata och återanvända delar av kärnbränslet genom upparbetning. I samband med upparbetning avskiljs även den begränsade mängden högaktivt material som bildas i bränslet vid reaktordrift. Använt kärnbränsle består av:

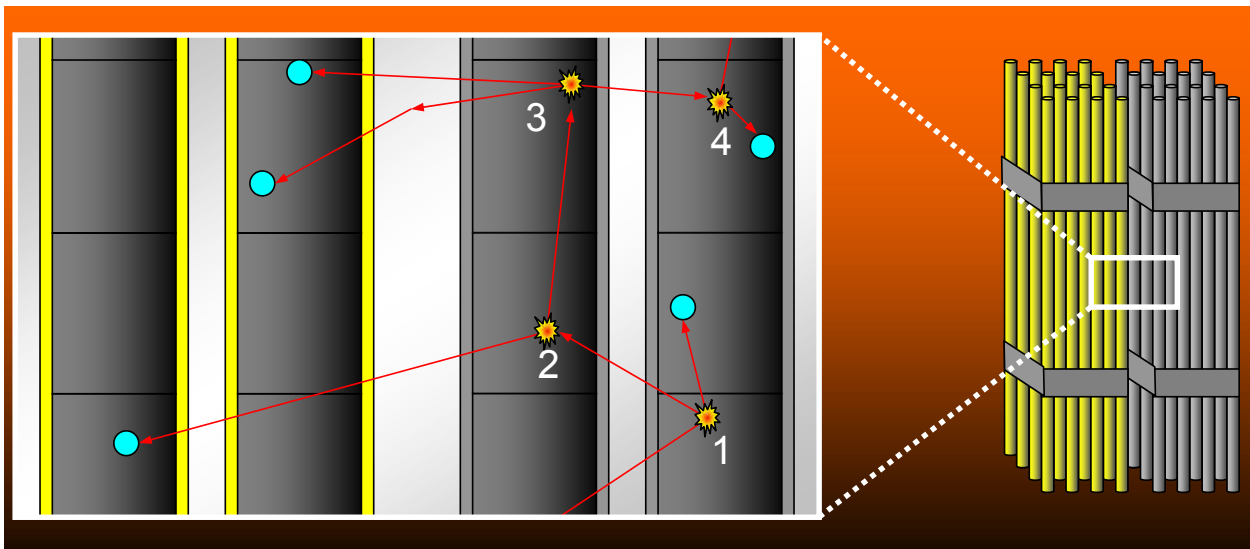


Bild 15. Kedjereaktion med framavling av plutonium i en snabb reaktor. I den inre hårdan (grå kapslingsrör) med MOX-bränsle sker kärnklyvning som frigör neutroner (1, 2, 3 och 4). I den yttre hårdregionen finns bränslestavar med utarmat uran (gula kapslingsrör) som genom neutroninfångning i uran-238 bidrar till att bilda fissilt plutonium (turkosa cirklar).

korrosionsegenskaper i den syrefattiga miljö som uppstår i slutförvaret efter förslutning.

SKB uppskattar att korrosionsangreppen på kopparkapslarna under normala förhållanden i slutförvaret kommer att

I slutförvaret leds den ständigt minskande värmeeffekten från de radioaktiva sönderfallen genom kopparkapseln och bentonitbufferten ut i det omgivande berget, se Bild 11. Tio år efter deponering uppnås maximal temperatur i bräns-

- uran kan återvinnas
- plutonium kan återvinnas
- transuraner och fissionsprodukter avfall

Efter ett antal år i en reaktor har ande-

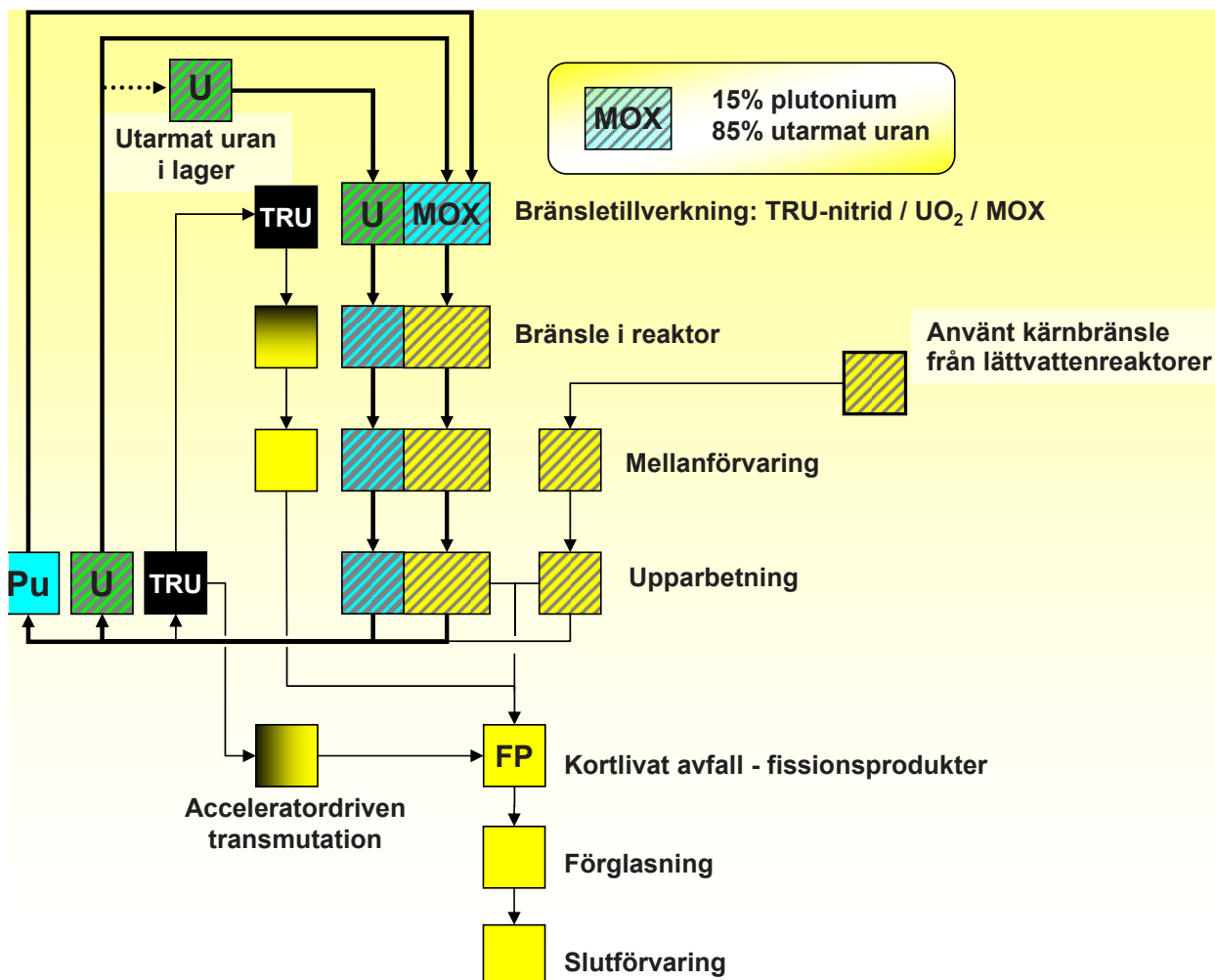


Bild 16. Framtida kärnbränslecykel som möjliggör hög utnyttjandegrad av naturligt uran. De sammanlänkade rutorna (U och MOX) symboliserar den inre härden med MOX-bränsle som omges av bränsleelement med utarmat uran där framavling av plutonium sker.

len klyvbart material i bränslet minskat – och fissionsprodukter och transuraner bildats – i sådan utsträckning att bränslet måste bytas ut. Innehållet av uran-235 är ungefär 1 %. Plutoniuminnehållet uppgår till 1 % (varav två tredjedelar är klyvbara isotoper), se Bild 13.

I samband med upparbetning löses det använda bränslet upp i varm salpetersyra. Genom upprepade extraktionsprocesser separeras bränslets olika komponenter i tre vätskeströmmar: en för plutonium, en för uran samt en för fissionsprodukter och transuraner.

En nackdel med befintlig upparbetningsprocess är att långlivade transuraner och kortlivade fissionsprodukter hamnar i en gemensam avfallsström, samt att plutonium hanteras i en enskild procesström. I framtiden är det önskvärt att separera avfallsströmmen

(fissionsprodukter och transuraner) med avseende på de radioaktiva nuklidernas olika halveringstider. Detta i syfte att minimera mängden långlivat avfall som måste slutförvaras under lång tid. Att utvinna plutonium tillsammans med någon annan nuklid som gör materialet omöjligt att utnyttja för framställning av kärnvapen, är önskvärt.

Använt MOX-bränsle upparbetas inte i dag utan mellanlagras i avvaktan på beslut om framtida användning. Orsaken till detta är att andelen klyvbara plutoniumisotoper minskar för varje reaktorcykel, se Bild 14. Tillverkning av MOX-bränsle är idag betydligt mer kostsamt än att tillverka ett nytt bränsle av uran. Att utnyttja återvunnet plutonium från använt MOX-bränsle, som innehåller en mindre andel fissilt plutonium, är ytterligare ekonomiskt ofördelaktigt.

Använt uran- och MOX-bränsle kan dock komma att utgöra en mycket betydelsefull bränsleråvara för framtida reaktorkoncept, se avsnitt nedan om framtidens reaktorkoncept och kärnbränslecykler.

Framtidens reaktorer och kärnbränslecykler

Idag bedrivs omfattande forskning kring ett flertal reaktorkoncept och upparbetningsprocesser med målsättningen att ytterligare höja säkerheten, förbättra bränsleutnyttjandegraden, öka verk-

ningsgraden samt försvåra för spridning av fissilt material i samband med upparbetning.

Med gaskyllda högttemperaturreaktorer kan en större andel av den frigjorda energin i härden tillvaratas för produktion av nyttig elektricitet samtidigt som en mindre mängd energi behöver kylas bort (ökad verkningsgrad). I dagens lättvattenreaktorer kyls nära två tredjedelar av frigjord energi bort. Drygt en tredjedel av frigjord energi tillvaratas i form av elektricitet, vilket ger reaktorerna en verkningsgrad runt 33 %. Med gaskyllda högttemperaturreaktorer kan verkningsgraden höjas till drygt 45 %. Dessa reaktorer är väl lämpade för produktion av bland annat vätgas för transportsektorn samt för produktion av elektricitet till energislukande avsaltningsanläggningar.

Ett flertal av de reaktorkoncept som studeras omfattar snabba reaktorer. Dessa reaktorer utnyttjar snabba (ej modererade) neutroner för kärnklyvning. Snabba reaktorer kan konstrueras så att de producerar mer klyvbart material än vad som åtgår vid drift genom att effektivt omvandla uran-238 till plutonium. Dessa reaktorer kallas bridreaktorer (eng: Breed = avla fram). Genom att utnyttja snabba bridreaktorer, och kontinuerlig upparbetning, kan uranets bränsleutnyttjandegrad höjas 60–100 gånger jämfört med hur uranet utnyttjas idag. En betydligt större andel av det uran som utvinns i en gruva kommer att kunna utnyttjas för energiproduktion jämfört med dagens reaktorer där knappt en procent utnyttjas.

Ett flertal tekniska utmaningar är förknippade med utvecklingen av framtidens reaktorkoncept. Bland annat krävs nya konstruktionsmaterial som klarar högre drifttemperaturer och samtidigt är motståndskraftiga mot kylmediet som kommer att bestå av smält metall eller salt. Snabba neutroner har dessutom en mer negativ inverkan på konstruktionsmaterialens hållfasthet i händregionen. Det låga uranpriset är, och har under lång tid varit, den viktigaste anledningen till att utvecklingen av bland annat snabba reaktorer skett långsamt.

En snabb bridreaktor är konstruerad med en inre härd som laddas med MOX-bränsle, som innehåller 15 % plutonium. Utanför den inre härden placeras element

med utarmat uran. I den inre härden sker kärnklyvning och energifrigörelse. De snabba neutroner som läcker ut ur den inre härden fångas upp av bränsleelementen med utarmat uran, varvid plutonium bildas, se Bild 15. Jämför även med Bild 8 över kärnklyvningsprocessen i lättvattenreaktor med modererade långsamma neutroner.

I den inre härden är det främst fissilt plutonium som klyvs av snabba neutroner. Snabba neutroner kan dock klyva de flesta av de tyngre atomkärnorna (transuraner och uran) i bränslet. Det plutonium som bildas i elementen av utarmat uran tillvaratas i samband med upparbetning och utgör en förträfflig råvara för tillverkning av nytt MOX-bränsle för lättvattenreaktorer, eller som bränsle för den inre härden i snabba reaktorer. Det utarmade uran som återstår efter upparbetning kan återföras till den snabba reaktorns yttre händregion för framavling av nytt plutonium. De stora mängder utarmat uran som uppstått i samband med 50 års anrikning av uran kommer således att vara möjligt att utnyttja till de snabba bridreaktorerna samt för tillverkning av MOX-bränsle i framtiden, se bild 16.

Det högaktiva och kortlivade avfallet – fissionsprodukterna – tas kontinuerligt ut ur kärnbränslecykeln i samband med upparbetning. Detta avfall kan stabiliseras genom att blandas samman med smält glas, som sedan förvaras i ett strålskrämat utrymme i några hundra år till dess att aktiviteten avtagit till ofarliga nivåer.

Det långlivade avfallet som består av transuraner och vissa fissionsprodukter kan förstöras och samtidigt bidra till energiproduktionen om det placeras i en snabb reaktor eller i en accelerator med ett snabbt neutronflöde. Då tunga och långlivade nuklider bombarderas av snabba neutroner klyvs kärnorna och bildar fissionsfragment med betydligt kortare halveringstider (genom så kallad transmutation), samtidigt som energi frigörs, jämför med fission av plutonium och uran i bild 9.

Vissa fissionsprodukter som bildas i bränslet har ett stort kommersiellt värde som strålkällor, radiofarmaka eller för andra applikationer i vårt samhälle. Dessa nuklider kan komma att bli intressanta att utvinna i samband med upparbetning av använt kärnbränsle.

Den franska atomenergikommissionen har redovisat planer på att etablera ett program för utveckling av snabba bridreaktorer med målsättningen att år 2020 driftsätta en demonstrationsanläggning. Frankrike planerar för att i framtiden ersätta sin flotta av reaktorer med snabba reaktorer varefter de tjänar ut.

Målsättningen med de framtida reaktorkoncepten är att minimera mängden radioaktivt avfall (i synnerhet det långlivade), maximera bränsleutnyttjandegraden, höja den termiska verkningsgraden samt ytterligare höja säkerheten vid reaktordrift. Målsättningen med de framtida upparbetningsprocesserna är att försvåra för spridning av klyvbart material genom att implementera processer där avfallsströmmar med helt rent plutonium undviks samt att utveckla metoder för separation av nuklider med korta respektive långa halveringstider.

Kärnkraften, så som vi utnyttjar den idag, har en mycket stor potential att utvecklas ytterligare för att uppnå bättre bränsleutnyttjande. Genom utveckling av nya reaktorkoncept och upparbetningsprocesser finns möjlighet att kunna utnyttja råvaran uran upp till 100 gånger mer effektivt än idag. Men så länge som uran är så billigt som idag kommer exempelvis bridreaktorer inte vara ekonomiskt intressanta att bygga. ■

Referenser

- [1] <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>
- [2] <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>
- [3] Uran. Bakgrund utgiven av Analysgruppen vid KSU, november 2009.
- [4] <http://www.nea.fr/html/general/press/2008/2008-02.html>
- [5] <http://www.world-nuclear.org/info/inf25.html>
- [6] <http://www.world-nuclear.org/info/inf24.html>
- [7] Uranium Intelligence Weekly. Vol III, Nr 36, 8 september 2009.
- [8] <http://www.world-nuclear.org/education/chem.htm>
- [9] <http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-centrifuge.htm>
- [10] <http://www.usec.com/megatonstomegawatts.htm>
- [11] Inkapsling – När, var, hur och varför? Informationsmaterial från SKB, 2008.
- [12] Kapsel för använt kärnbränsle – Konstruktionsförutsättningar. SKB Rapport R-06-02, september 2006
- [13] <http://www.world-nuclear.org/info/inf29.html>
- [14] Radiochemistry and Nuclear Chemistry – tredje upplagan. Liljenzin J-O, Choppin G, Rydberg J. 2002

Författare

Fredrik Ekenborg, civilingenjör 2009-11-19

Illustrationer

Lasse Widlund (Omslagsbild samt bild 1—3, 11 och 12)

Fredrik Ekenborg (Bild 4—10 och 13—16)