



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Lena Oliver
Jenny Peterson
Katarina Wilhelmsen

Forskning 2013:02

Forskningsreaktorer – en analys
med fokus på icke-spridning och
exportkontroll

SSM perspektiv

Bakgrund

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

Syfte

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, fungerar som teknisk rådgivare till SSM i exportkontrollärenden. SSM, liksom tidigare SKI har sett ett behov att försäkra sig om att kompetensen bevaras och förnyas inom området. FOI har därför fått i uppdrag att studera exportkontrollerade produkter. Den här rapporten är resultatet av ett sådant projekt. Rapporten beställdes av dåvarande SKI och har tidigare inte publicerats. Den har nu uppdaterats bl.a. avseende Irans forskningsreaktor och referenser till senaste lagstiftningen. Forskningsreaktorer används för olika forskningsändamål men även för medicinskt bruk och för isotopproduktion. Forskningsreaktorer har dock även används i vissa länder för att producera plutonium för kärnvapen.

Resultat

Den nu resulterande rapporten berör kortfattat några olika typer av forskningsreaktorer liksom några av deras viktigaste användningsområden. Dessutom berörs reaktorernas användbarhet för plutoniumproduktion samt några indikationer på reaktordrift. Vi har valt att låta rapporten vara översiktlig utan att gå in på detaljer för att inte sprida information som kan vara känslig. Därmed kan flera intressenter såsom andra myndigheter, berörd industri och intresseorganisationer få tillgång till resultatet. Förutom rapporten har projektet resulterat i att personal på FOI och SSM fått ökad insikt i processerna genom bl.a. litteraturstudier.

Forskningsreaktorer som syftar till att utveckla nya reaktorkoncept, s.k. Generation IV, t.ex. blykylda forskningsreaktorer, omfattas inte av denna studie. Generation IV-reaktorer kommer att översiktligt belysas i en kommande SSM-rapport "Fjärde generationens reaktorer – en analys med fokus på icke-spridning och exportkontroll".

Projekt information

Kontakt person SSM: Lars Hildingsson

Referens: SSM 2007/443/200710007



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Lena Oliver, Jenny Peterson och Katarina Wilhelmsen
Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm

2013:02

Forskningsreaktorer – en analys
med fokus på icke-spridning och
exportkontroll

Datum: December 2012

Rapportnummer: 2013:02 ISSN:2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

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

Förord

Fördjupade studier av kärnbränslecykelns alla delar är ett led i FOI:s arbete att upprätthålla och vidareutveckla kompetensen på det kärntechniska området. Dessa kunskaper är av vikt, bland annat för att kunna göra goda bedömningar rörande exportkontroll av kärntechnisk utrustning och för att kunna göra bedömningar av ett lands kärntechniska kapacitet och dess möjligheter att framställa kärnvapen. FOI kan genom dessa studier ge ett bättre stöd till SSM rörande nukleär exportkontroll.

Rapporten är ett resultat av litteraturstudier samt studiebesök vid Norges två forskningsreaktorer i Halden och Kjeller. Vi vill härmed ta tillfället i akt att tacka Wolfgang Wiesenack och Jon Rambæk vid Institutt for Energiteknikk i Halden respektive Kjeller för mycket givande och intressanta studiebesök.

Innehåll

Sammanfattning	3
Summary	4
1. Inledning	5
2. Bakgrund	6
2.1. Kärnbränslecykeln	6
2.2. Principer för reaktors konstruktion	8
2.3. Plutoniumproduktion	11
2.3.1. Vanliga reaktortyper för plutoniumproduktion.....	12
2.3.2. Upparbetning	14
3. Vad utmärker en forskningsreaktor?	15
3.1. Användningsområden.....	16
3.1.1. Reaktor- och bränsleforskning.....	16
3.1.2. Materialprovning, -analys, -utveckling och -testning	17
3.1.3. Produktion av radioisotoper.....	17
3.1.4. Medicin och biologi	17
3.2. Olika typer av forskningsreaktorer.....	18
3.2.1. Lättvattenmodererade forskningsreaktorer	18
3.2.2. Tungvattenmodererade forskningsreaktorer	20
3.2.3. Grafitmodererade forskningsreaktorer	21
3.2.4. Homogena reaktorer	21
3.2.5. Snabba forskningsreaktorer	21
4. En forskningsreaktors användbarhet för plutoniumproduktion ..	22
5. Indikatorer på reaktordrift	24
6. Exportkontrollerad utrustning	26
6.1. Material	26
6.2. Reaktordelar	28
7. Referenser	32

Sammanfattning

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, har på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten gjort en studie om forskningsreaktorer med fokus på icke-spridningsproblematiken och exportkontroll. Rapporten beskriver principen för en forskningsreaktor, dess utformning och användningsområden samt vilka krav som kan ställas på en forskningsreaktor för produktion av plutonium för kärnvapenändamål.

Forskningsreaktorer har i vissa länders kärnvapenprogram utnyttjats för att producera vapenplutonium för kärnvapen och det är främst tungvatten- och grafitmoderade reaktor som använts för ändamålet.

För att hindra länder från att framställa plutonium för kärnvapenändamål i det fördolda är mycket av den utrustning och teknologi som krävs i en kärnreaktor belagd med exportkontroll. Nuclear Suppliers' Group har för detta ändamål utformat listor på kärnteknisk utrustning och komponenter som är relevanta att belägga med exportkontroll och som också inkluderats i EU:s lagstiftning (EU-förordning 428/2009).

Den utrustning och teknologi som kan användas i kärnreaktorsammanhang samt yttre indikatorer på drift av en kärnreaktor beskrivs i rapporten och skillnader mellan en större kraftreaktor och en forskningsreaktor i dessa sammanhang belyses.

Summary

The Swedish Defence Research Agency, FOI, has under contract work financed by the Swedish Radiation Safety Authority, performed a study on research reactors.

The principle of a research reactor and its characteristics and uses are described in this report. The potential use of research reactors for plutonium production for nuclear weapons is also described and the parameters of importance for optimal plutonium production are identified.

Research reactors, mainly heavy water or graphite moderated reactors, have been used by some countries to produce weapon-grade plutonium. To prevent nuclear weapons proliferation, the Nuclear Suppliers' Group has identified nuclear reactor equipment and technology that is of importance to export control. This equipment and technology has also been implemented in the EU-regulation 428/2009.

The equipment and technology that can be used in nuclear reactor applications and possible indicators on a nuclear reactor in operation is described in the report. The differences between a power reactor and a research reactor concerning these areas are high-lighted.

1. Inledning

Denna rapport är resultatet av en studie rörande forskningsreaktorer där syftet har varit att fördjupa FOI:s kunskaper inom området för att kunna göra bedömningar om forskningsreaktorers möjliga användning för framställning av vapenplutonium och vilken kärnteknisk utrustning som därför är av relevans att belägga med exportkontroll. Speciellt fokus har lagts på forskningsreaktorers utformning och vilka parametrar som är avgörande för produktion av vapenplutonium jämfört med andra användningsområden för forskningsreaktorer.

Studien har huvudsakligen genomförts genom litteraturstudier. Referenser ges vid behov löpande i texten, men då flera olika referenser använts för att få bakgrundsinformation anges här alla de använda referenserna; [1], [2], [3], [4], [5],[6], [7], [8] och [9].

2. Bakgrund

Kärnreaktorer används i dag främst för elproduktion där man i reaktorn utnyttjar den i uranet inneboende energi som kan frigöras genom fissionsreaktioner. Det finns dock en rad andra användningsområden för en reaktor, där den frigjorda energin, bildade isotoper eller de i reaktionerna frigjorda neutronerna utnyttjas. Forskningsreaktorer är ett samlingsnamn för reaktorer som används för olika forskningsändamål, men i denna grupp kan även inkluderas reaktorer t.ex. för medicinskt bruk och för isotopproduktion (beroende på dess design).

Forskningsreaktorer har i vissa länders kärnvapenprogram utnyttjats för att producera vapenplutonium för kärnvapen. Indien, Israel¹ och Nordkorea² är exempel på länder som utnyttjat forskningsreaktorer för detta ändamål. Ämnet är också aktuellt när det gäller det kärntekniska programmet i Iran och oron för att uppbyggnaden av en tungvattenbaserad forskningsreaktor i Arak skulle kunna användas för produktion av vapenplutonium.

För att avgöra vilka olika typer av forskningsreaktorer som kan vara användbara för produktion av vapenplutonium behöver man känna till hur reaktorer är uppbyggda och vilka parametrar som är av betydelse för olika användningsområden samt vad som krävs för att få en optimal plutoniumproduktion. I avsnitten nedan ges en sammanfattande bakgrund till dessa områden.

Ett annat område som är viktigt ur icke-spridningssynpunkt är de forskningsreaktorer som drivs med höganrikat uranbränsle (HEU). Eftersom forskningsreaktorer ofta körs med låg effekt och låg utbränning förbrukas inte så mycket uran under drift och HEU-bränsle som bestrålats i en sådan reaktor skulle således, efter viss rening, kunna användas som kärnvapenmaterial. Produktionen av plutonium blir sämre i reaktorer med HEU-bränsle än om LEU-bränsle eller naturligt uran används. Detta beror främst på att det i HEU-bränsle finns mindre andel ²³⁸U som är den uranisotop som behövs för att bilda plutonium (se avsnitt 2.3 nedan). I dag finns det program³ som syftar till att konvertera forskningsreaktorer med HEU-bränsle till låganrikat uranbränsle (LEU). Denna rapport kommer dock att fokusera på forskningsreaktorers möjliga användning för produktion av vapenplutonium och HEU-problematiken behandlas därför endast översiktligt här.

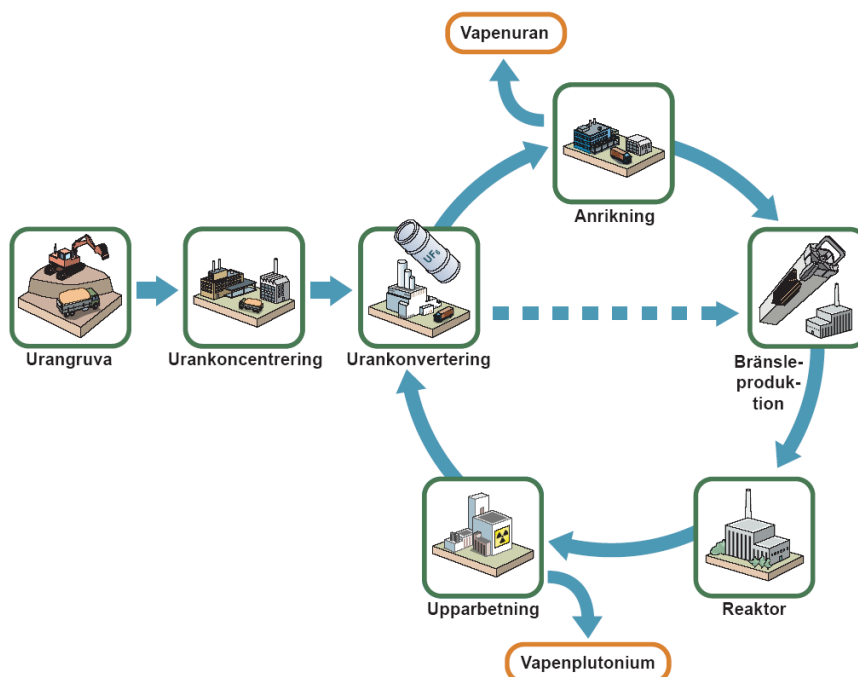
2.1. Kärnbränslecykeln

Uran, låganrikat eller av naturlig isotophalt, är det bränsle man använder sig av i huvuddelen av dagens kärnreaktorer. I kärnvapen kan man använda sig av höganrikat uran eller vapenplutonium som klyvbart material. Uranets livscykel, från utvinning och förädling till användning och eventuell upparbetning, beskrivs i den s.k. *kärnbränslecykeln* (se figur 1).

¹ Israel har inte öppet deklarerat innehav av kärnvapen, men bedöms av omvärlden som en stat med kärnvapenkapacitet.

² Nordkoreas grafitmodererade 5 MW_e reaktor i Yongbyon klassas ibland officiellt som en kraftreaktor, men den låga reaktoreffekten är mer i enlighet med en forskningsreaktor.

³ Exempelvis RETR-Reduced Enrichment for Research and Test Reactors som är ett program som startades av amerikanska Department of Energy, DOE 1978, www.retr.anl.gov. Se också Goldman, Adelfang och Ritchie www.iaea.org/NewsCenter/News/PDF/sfr_programs.pdf för aktiviteter som IAEA varit involverade i.



Figur 1. Kärnbränslecykelns olika steg. Copyright © 2005 Totalförsvarets forskningsinstitut

Uranmineral som bryts i urangruvor krossas, lakas och koncentreras till en form av uran som brukar kallas ”yellowcake” (urankoncentrat bestående i huvudsak av uranoxid). I en urankonverteringsanläggning renas detta urankoncentrat och omvandlas till den form av uran som man behöver för fortsatt framställning av reaktorbränsle. Uranbränsle för kärnreaktorer kan, beroende på reaktortyp, antingen vara av naturlig isotophalt (0,7 %) eller anriktat med avseende på ^{235}U , som är den uranisotop som man utnyttjar vid kärnklyvningen. Om man avser att anrika uranet omvandlar man det till en lämplig kemisk form för den anrikningsmetod man avser använda. Det finns en mängd olika anrikningsmetoder varav gascentrifugering är den vanligaste. Andra anrikningsmetoder är under utveckling såsom laseranrikning. Dessa processer har bland annat beskrivits i tidigare SKI-rapporter⁴. I de metoder som används industriellt utnyttjas oftast uranhexafluorid, en uranförening som är lätt att göra gasformig. Om man istället avser att använda uran av naturlig isotophalt, omvandlas urankoncentratet efter rening direkt till urandioxid (för vissa reaktorer används uranmetall) för att kunna användas som reaktorbränsle. Urandioxid är den förening som även anriktat uranbränsle vanligtvis består av.

I de flesta kommersiella kärnreaktorer använder man sig av uranbränsle med en anrikningsgrad av 2–5 %⁵. Under reaktordriften bildas plutonium som sedan kan separeras ut i en upparbetningsanläggning. Dessa steg beskrivs i mer detalj i avsnitt 2.3 nedan.

⁴ Urananrikning med gascentrifugering – en analys med fokus på exportkontroll”, Oliver, Peterson och Wilhelmsen, SKI Rapport 2005:44; ”Urananrikning med laser och plasmaseparation – en analys med fokus på exportkontroll”, Oliver, Wilhelmsen, Wirstam, SKI Rapport 2007:35.

⁵ De flesta energiproducerande reaktorer är s.k. lättvattenreaktorer i vilka man använder låganriktat uran som bränsle. Det finns dock energiproducerande reaktorer i vilka man använder naturligt uran, men med tungt vatten eller grafit som moderator.

2.2. Principer för reaktorers konstruktion

Den fysikaliska principen som utnyttjas i en kärnreaktor är den så kallade fissionsreaktionen i vilken en neutron tas upp av en atomkärna som klyvs varvid energi frigörs. Ämnen i vilket detta kan ske kallas fissila, och de främsta exemplen på sådana är ^{235}U och ^{239}Pu , där det förra är det i särklass mest använda både i kraftreaktorer och i forskningsreaktorer.

För att reaktorn ska kunna leverera energi kontinuerligt krävs att en kedjereaktion upprätthålls i det fissila materialet. Eftersom det är neutronerna som ger upphov till kärnreaktionerna måste man se till att tillräckligt många av de neutroner som frigörs vid fissionsreaktionerna kan återanvändas, detta kallas reaktorns neutronekonomi. Neutroner kan förbrukas i andra reaktioner än kärnklyvningar exempelvis genom absorption, men de kan också läcka ut ur reaktorn. Produktionen av neutroner är proportionell mot reaktorhårdens volym medan läckningen är proportionell mot ytan. Ju större reaktorn är desto mindre blir alltså bråkdelen neutroner som läcker ut. Den storlek som ger en exakt balans mellan produktion och förlust av neutroner så att kedjereaktionen befinner sig i jämvikt kallas reaktorns kritiska storlek och en reaktor som befinner sig i ett sådant tillstånd kallas kritisk.

För att sannolikheten för fission ska bli så stor som möjligt behöver de neutroner som bildas vid kärnklyvningen bromsas ner, vilket i reaktorsammanhang brukar kallas för moderering av neutronerna. Det material som används för detta kallas moderator. Generellt gäller att ju lättare en atom är desto effektivare kan denna bromsa neutronerna. Väte (i vanligt vatten) och deuterium (i tungt vatten) är därför mer effektiva neutronbromsare än till exempel kol (grafit). En annan viktig egenskap hos ett moderatormaterial är benägenheten att absorbera neutroner, som ska vara så låg som möjligt för en bra moderator. Exempel på sådana moderatormaterial är tungt vatten, grafit och beryllium⁶. Beroende på vilket bränsle som används och vilket syfte en reaktor har, där ekonomi och materialtillgång också vägs in, kan dessa två egenskaper – neutronbromsning och neutronabsorption – vägas mot varandra för att hitta ett optimalt moderatormaterial. Om man använder anrikat uran eller MOX-bränsle⁷ kan moderatorn bestå av vanligt vatten. Om man däremot använder naturligt uran som bränsle, vilket inte producerar lika många neutroner, krävs en moderator som absorberar färre neutroner än vad vanligt vatten gör, t.ex. tungt vatten eller grafit. För uran anrikat till 20 % eller mer kan kedjereaktionen upprätthållas utan moderator; dessa reaktorer kallas snabba.

För att minska neutronläckaget omger man ofta reaktorhärden med en reflektor av ett material som effektivt kan bromsa ner neutronerna och på så sätt öka sannolikheten för att de återförs till reaktorhärden där de kan utnyttjas i kedjereaktionen. En reflektor bör därför bestå av ett material med bra inbromsningsförmåga och låg absorption, dvs. samma material som används som moderatorer⁸.

I det praktiska fallet reglerar man kedjereaktionen med hjälp av stavar med neutronabsorberande material⁹, så kallade styrstavar. Dessa används både för att reglera reaktorns effekt och för att starta och stoppa reaktorn.

⁶ Infångningstvårsnittet för termiska neutroner: Vanligt vatten – 0,66 barn, tungt vatten – 0,0013 barn, grafit – 0,0035 barn och beryllium 0,0076 barn. Infångningstvårsnittet är ett mått på sannolikheten för att en neutron ska fångas in (absorberas) av den angivna atomkärnan (1 barn är 10^{-28} m²).

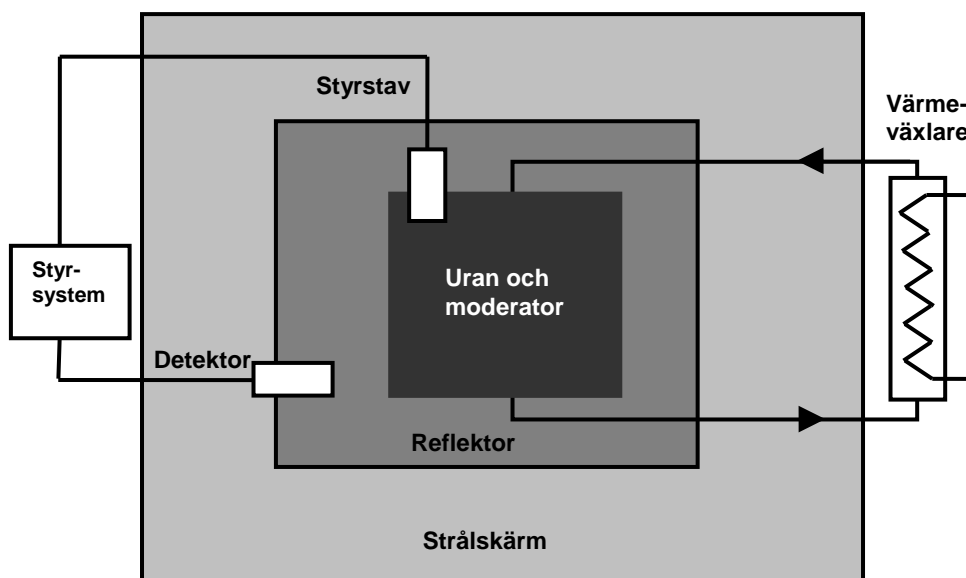
⁷ MOX – Mixed OXide fuel, bränsle som innehåller både uran- och plutoniumdioxid och som framställs ur upparbetat kärnbränsle.

⁸ Vanliga moderatormaterial är vanligt vatten, tungt vatten, grafit eller beryllium.

⁹ Bor, kadmium, indium, silver etc.

Den energi som bildas vid kärnklyvningen uppträder i form av värme som måste transporteras bort från kärnan dels för att utvinna energi men också för att reaktorn inte ska överhettas med materialförstöring som följd. För att åstadkomma detta används ett kylmedel såsom vatten, gas eller luft som ofta värmes ut med ett sekundärt kylmedel.

Vidare måste reaktorn ha ett skydd så att inte joniserande strålning i form av neutroner eller gammastrålning från fissionsprodukterna läcker ut. De radioaktiva produkter som bildas får inte heller läcka ut i omgivningen. För att förhindra läckage är själva bränslet inkapslat i ett material som inte absorberar neutroner för att inte förstöra neutronekonomin i reaktorn. För större reaktorer är dessutom allt bränsle inneslutet i en tjockväggig reaktortank. Större forskningsreaktorer och kraftreaktorer har en trycktät yttre byggnad som kallas inneslutning. Principen för en reaktors konstruktion visas i figur 2.



Figur 2. Principskiss av en reaktor med reaktorhård, moderator, reflektor, styrsystem och strålskärm.

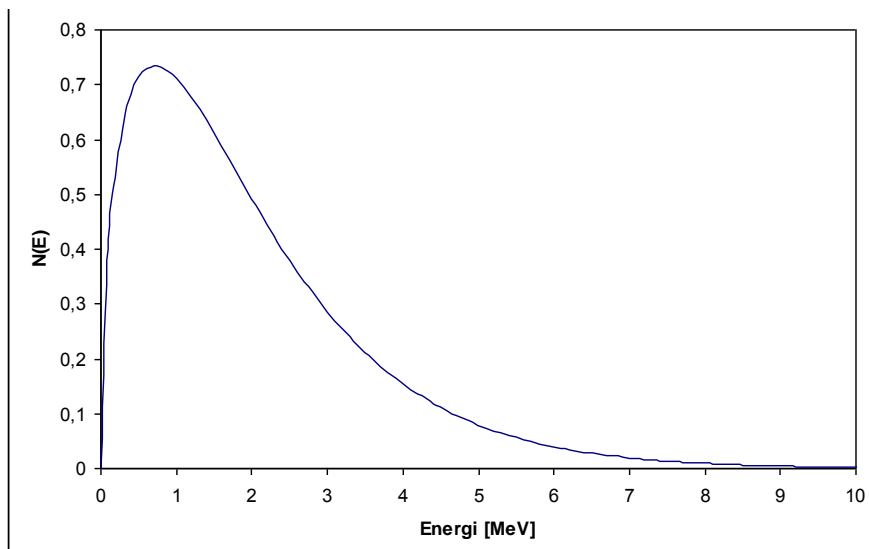
I figuren visas också styrsystemet som reglerar reaktorns effekt. Neutronintensiteten, som är proportionell mot den utvecklade effekten, mäts med hjälp av en detektor. De rörliga styrstavarna (neutronabsorbatorerna) gör det möjligt att stabilisera effekten på en lämplig nivå.

Neutronerna i en reaktor bildas dels genom fission av det klyvbara materialet, så kallade prompta neutroner, och dels från de sönderfallande fissionsprodukterna, så kallade fördröjda neutroner. I figur 3 visas energifördelningen för prompta neutroner producerade genom fission av ^{235}U . Fördelningen har sitt maximum vid 0,72 MeV vilket alltså är den mest sannolika energin för neutronerna, medelenergin är 2 MeV och den maximala energin sträcker sig upp mot ca 20 MeV. Sannolikheten för infångning av neutroner i ^{238}U , och produktion av ^{239}Pu , är hög för låga neutronenergi (<0,1 MeV), så en stor andel av neutroner med relativt låg energi är fördelaktigt då plutoniumproduktion avses¹⁰.

De fördröjda neutronerna skapas senare och lever därför i medeltal längre tid efter fissionen i reaktorn än de prompta neutronerna vilket gör att reaktorn blir lättare att

¹⁰ Sannolikheten för neutroninfångning i ^{238}U är störst i det termiska och epitermiska området, dvs. i området upp till 0,1 MeV. Viss sannolikhet för infångning finns dock upp till ca 1 MeV.

styra. De fördröjda neutronerna har i medeltal lägre energi än de prompta, ca 0,5 MeV.



Figur 3. Energifördelning $N(E)$ av prompta neutroner bildade genom fission av ^{235}U . Maximum i fördelningen är vid 0,72 MeV.

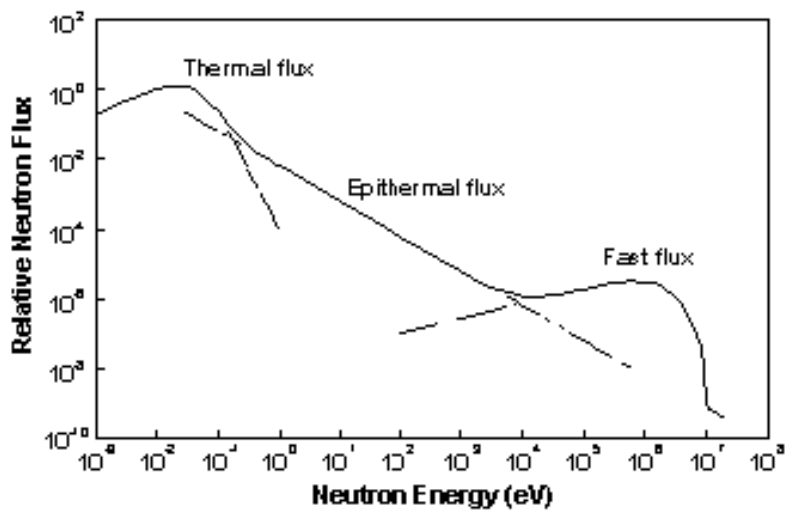
Energifördelningen av neutroner i en termisk reaktor beskrivs ofta i tre delar beroende på neutronernas energi, en långsam (låg energi), en intermediär och en snabb (hög energi). Gränserna för indelningarna är godtyckliga men vanligen kallar man långsamma neutroner sådana som har energier upp till någon eV, snabba neutroner sådana med energier över 0,1 MeV och intermediära är neutroner med energier däremellan. Termiska neutroner kallas sådana som är i temperaturjämvikt med det omgivande mediet och denna energi varierar alltså med den omgivande temperaturen¹¹. Vid rumtemperatur har neutronerna en termisk energi på ca 0,025 eV och en hastighet på 2200 m/s, vid 500°C är den termiska energin 0,07 eV och hastigheten ca 3550 m/s, jämviktstemperaturen påverkar alltså inte den termiska energin i speciellt hög grad om man jämför med medelenergin 2 MeV eller den maximala neutronenergin ca 20 MeV.

Det är främst de termiska neutronerna som man kan utnyttja för fissionerna i en reaktor och som framgår av figur 3 så har huvuddelen av de prompta fissionsneutronerna relativt hög energi, och man behöver därför moderera (bromsa ner) neutronerna till energier där de lättare fissionerar.

Ett annat sätt att beskriva neutronerna i reaktorn är med neutronflödestätheten, som betecknar hur många fria neutroner som befinner sig i reaktorn, dvs. bildade neutroner – både prompta och fördröjda – som inte spridits ut ur reaktorn eller absorberats¹². Eftersom neutronerna har en energifördelning som sträcker sig från långt under 1 eV till tiotals MeV är det lämpligt att istället för totala neutrontätheten betrakta neutrontätheten för de olika energi- eller hastighetsintervallen (termiska, intermediära och snabba). Neutronflödestätheten i en termisk reaktor visas i figur 4.

¹¹ Energin bestäms ur sambandet $E=kT$, där E är energin, k Boltzmanns konstant och T temperaturen uttryckt i Kelvin.

¹² Neutronflödestätheten har enheten neutroner per cm^2 och sekund, och anger antalet neutroner som rör sig genom en enhetsyta (1 cm^2) per tidsenhet (1 s).

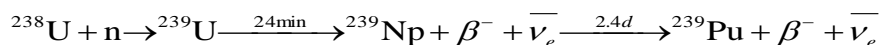


Figur 4. Neutronflödestätheten i en termisk reaktor¹³. Notera att energiskalan i denna figur är logaritmisk medan skalan i figur 3 är linjär.

Flödesbilden i reaktorn ändras med olika moderatormaterial och om man använder en reflektor eller inte. De snabba neutronerna bildas i härden och deras flöde avtar ju längre från härden man kommer. Fördelningen av långsamma neutroner är ganska jämn men ofta som störst i reflektorn alldeles utanför härden. Detta beror på att många neutroner blir termiska i detta område på samma gång som reflektorn absorberar färre neutroner än härden. Andelen snabba neutroner i en reaktor beror på reaktorhårdens geometri. Om avståndet mellan bränsleelementen är litet hinner inte neutronerna bromsas upp så mycket och man får en större andel snabba neutroner.

2.3. Plutoniumproduktion

Plutonium, finns inte naturligt i jordskorpan som uran, utan måste framställas genom bestrålning av uran med neutroner i en kärnreaktor, enligt följande reaktioner;



Plutoniumproduktion är en biprocess i kärnkraftsammanhang där man istället utnyttjar fission av ${}^{235}\text{U}$ för att utvinna energi. Vid längre tids reaktordrift i vanliga kraftreaktorer sker dock upp till en tredjedel av energiproduktionen genom fissioner av ${}^{239}\text{Pu}$ som byggts upp genom neutroninfångning.

För att få så hög plutoniumproduktion som möjligt vill man ha högt så kallat konversionsförhållande i reaktorn – om det är kärnvapenmaterial man vill framställa. Det innebär att man vill ha en hög andel neutroninfångning i ${}^{238}\text{U}$ – som genererar ${}^{239}\text{Pu}$ – jämfört med neutroninfångning eller fission i ${}^{235}\text{U}$. Alla neutroner får dock inte absorberas av ${}^{238}\text{U}$ och bilda plutonium eftersom det samtidigt måste finnas tillräckligt med neutroner för fission i ${}^{235}\text{U}$ så att kedjereaktionen i reaktorn kan upprätthållas. Stor infångning av neutroner till ${}^{238}\text{U}$ kan kompenseras genom att välja en moderator som inte absorberar så många neutroner, exempelvis grafit eller tungt vatten. Det tunga vattnets låga infångningstvärsnitt i relation till inbromsningsförmågan för neutroner gör att tungt vatten är den överlägset bästa moderatoren. Tungt vatten är dock mycket dyrt och detta är en orsak till att man satsat mindre på tungvattenmodererade reaktorer än på grafitmodererade.

¹³ http://www.jeffreycreid.com/Analytical_Methods/NAA_theory.html

Användning av grafit som moderator istället för vatten har, förutom den ekonomiska aspekten, även en annan fördel om man önskar högt konversionsförhållande. Då grafit är en mindre effektiv neutronbromsare än vatten krävs fler kollisioner för att få neutronerna termiska och därför finns fler chanser att neutronerna absorberas i ^{238}U . Konversionsförhållandet beror också på andelen ^{235}U i bränslet så när anrikningsgraden minskar från 3 % till 0,72 % blir absorptionen i ^{238}U mer viktig och därför används med fördel naturligt uran som bränsle för att få en optimal plutoniumproduktion.

Vid reaktordrift bildas efter hand plutoniumisotopen ^{240}Pu genom neutroninfångning i ^{239}Pu . I kärnavapensammanhang önskas så lite ^{240}Pu som möjligt eftersom denna isotop har stor andel spontanfission, vilket genererar neutroner som skulle kunna initiera kärnladdningen vid fel tidpunkt, med minskad energit utveckling som följd¹⁴.

Ju längre tid reaktorn är i drift desto mer klyvbart material förbrukas, vilket brukar kallas utbränning. Utbränningen anges ofta i utvecklad energi per viktsenhet bränsle, exempelvis MWd/ton¹⁵. Med högre utbränning sker också fler andra kärnomvandlingar. För att undvika att för mycket ^{240}Pu bildas håller man en låg utbränningsgrad på bränslet, normalt under 1000 MWd/ton. Det innebär att bränslet tillbringar relativt kort tid i reaktorn så att en gynnsam isotopsammansättning uppnås. I kraftreaktorer, där andelen ^{240}Pu inte har samma betydelse, låter man bränslet nå en mycket högre utbränningsgrad, uppåt tiotusentals MWd/ton, för att utnyttja bränslet maximalt för energitvinning.

Plutonium brukar delas in i kvalitetsklasser beroende på innehåll av ^{240}Pu , se tabell 1.

Tabell 1. Kvalitetsklasser av plutonium

Kvalitetsbenämning	Andel ^{240}Pu
"Supergrade"	<3%
Vapenkvalitet ("weapons grade")	<7%
Bränslekvalitet ("fuel grade")	7–18%
Reaktorkvalitet ("reactor grade")	>18%

Beroende på hur reaktorn är utformad, såsom exempelvis vilken moderator som utnyttjas och hur länge reaktorn körs, produceras således plutonium av olika mängd och kvalitet (se vidare i avsnitt 4).

2.3.1. Vanliga reaktortyper för plutoniumproduktion

Den vanligaste reaktortyp som har använts för produktion av vapenplutonium i kärnavapenprogrammen i USA, Sovjetunionen och Kina är lättvattenkylda, grafitmodererade reaktorer (LWGR¹⁶). I Storbritannien, Frankrike och Nordkorea har man använt gaskylda grafitmodererade reaktorer (GCR¹⁷). Även tungvattenmodererade reaktorer (HWR¹⁸) har använts för plutoniumproduktion av Frankrike, Sovjetunion-

¹⁴ Plutoniumisotopen ^{242}Pu har samma problem med spontanfission som ^{240}Pu . Mängden ^{242}Pu i bildat plutonium är förvisso alltid mindre än mängden ^{240}Pu , men spontanfissionsraten är å andra sidan dubbelt så hög. ^{241}Pu har inte samma problem med spontanfission (den liknar mer ^{239}Pu), men betasönderfaller till ^{241}Am som har en hög värmeavgivning. Givet att halten ^{241}Am är mindre än ^{240}Pu , och att halveringstiden är 14 år, kommer den isotopen att påverka värmen i materialet allteftersom ^{241}Pu sönderfaller.

¹⁵ Som exempel kan anges att en reaktor med effekten 1000 MW som innehåller 100 ton uranbränsle i håren och som körs under 1 år (365 dagar) får utbränningsgraden 3650 MWd/ton.

¹⁶ LWGR = Light Water cooled Graphite moderated Reactor.

¹⁷ GCR=Gas-Cooled Reactor.

¹⁸ HWR= Heavy Water moderated Reactor.

en¹⁹ och USA och är också den reaktortyp som har använts av Israel och Indien för produktion av vapenplutonium [7]. Tungvattenmodererade reaktorer har också använts för att producera tritium²⁰ i bl.a. USA:s och Sovjetunionens kärnvapenprogram. De flesta kärnvapenstaterna har använt sig av relativt stora produktionsreaktorer som var speciellt avsedda för just produktion av vapenplutonium och klassas således inte som forskningsreaktorer. Dessa produktionsreaktorer beskrivs dock översiktligt nedan, då deras konstruktion och design är av vikt när man studerar plutoniumproduktion i andra reaktorsystem.

De flesta plutoniumproduktionsreaktorer uppges ha haft naturligt uran som bränsle [7]. Utbränningsgraden i kärnvapenstaternas produktionsreaktorer låg ofta betydligt lägre än 1000 MWd/ton och resulterade i extremt rent vapenplutonium. Vissa reaktorer behövde stängas ner under bränslebytet, vilket i sig kunde ta några månader, medan andra reaktorer var konstruerade så att bränslebyte kunde ske under drift^{21,22}.

Tabell 2. Data över produktionsreaktorer för vapenplutonium som använts i några olika länder [7].

Land	Reaktortyp	Antal	Reaktoreffekt
USA	LWGR	9	4 st 250 MW _t , 1 st 400 MW _t , 1 st 650 MW _t , 2 st 1800 MW _t och 1 st 4000 MW _t
	HWR	5	2200–2900 MW _t
Sovjetunionen	LWGR	13	100–2500 MW ²³
	HWR	2	Ombyggda till LWR ²⁴ , 1000 MW _t
Frankrike	GCR	3	38–42 MW _t (G1), 200–260 MW _t (G2 & G3)
	HWR	2	190 MW _t (Célestin 1-2)
Kina	LWGR	2	1000 MW _t och 400–500 MW _t
Storbritannien	GCR	8	180 MW _t (4 i Calder Hall, 4 i Chapelcross)
Israel	HWR	2	40–150 MW (Dimona)
Indien	HWR	2	40 MW _t (Cirus) och 100 MW _t (Dhruva)
Nordkorea	GCR	1	5 MW _e ²⁵
(Iran)	(HWR)	(1)	40 MW _t

¹⁹ De tungvattenmodererade reaktorer i Sovjet (Chelyabinsk) verkar enbart ha använts för tritiumproduktion och ej för plutoniumproduktion.

²⁰ Tritium är ett ämne som används i mer avancerade kärnvapen för att öka laddningsstyrkan.

²¹ De brittiska produktionsreaktorerna var i drift under 230–300 dagar, då man erhållit önskad isotopsammansättning. Utbränningsgraden var 400 MWd/ton och plutoniumet höll en halt av ²³⁹Pu på hela 97 %, vilket är mycket rent även för vapenändamål. Reaktorn stängdes ner under bränslebytet och hela härden byttes ut, vilket tog ca 70 dagar [7].

²² Frankrike utnyttjade även vissa av sina gaskylida grafitmodererade kraftreaktorer (Chinon 1-3, Laurent 1-2 och Bugey-1) och prototypreaktorn Phénix för produktion av vapenplutonium [7]. Den franska G1-reaktorn behövde stängas av vid bränslebyte medan G2 och G3 kunde byta bränsle under drift. Utbränningsgraden i G1 var bara 100–200 MWd/ton, vilket bör ha resulterat i mycket rent vapenplutonium (~99 % ²³⁹Pu). Härden byttes då 1–2 gånger per år. G2 och G3 hade högre utbränningsgrad (400 MWd/ton).

²³ Reaktorbeteckningar på de Sovjetiska produktionsreaktorerna: A, IR, AV-1, AV-2, AV-3 (Chelyabinsk), I1, I2, ADE 3, ADE-4, ADE-5 (Tomsk), AD, ADE-1, ADE-2 (Krasnoyarsk).

²⁴ Tidigare främst för tritiumproduktion. I dag används de för isotopproduktion.

²⁵ Endast den elektriska effekten är angiven då den termiska effekten ej är känd. En uppskattning ger dock en effekt på upp till ca 30 MW_t.

2.3.2. Upparbetning

Det plutonium som bildats i reaktorn måste separeras från uran och övriga restprodukter i det utbrända bränslet innan det kan konverteras till plutoniummetall, och legeras, för användning i kärnvapen. Denna separationsprocess kallas upparbetning och används också av vissa länder i den civila kärnbränslecykeln för att separera ut plutonium för återanvändning i kraftreaktorer som s.k. MOX-bränsle.

Efter reaktordrift kyls det utbrända bränslet under viss tid för att aktiviteten från de mest kortlivade fissionsprodukterna ska hinna avklinga. Inom civil upparbetningsindustri väntar man 1–3 år, medan det i plutoniumproduktionsreaktorer räcker med några månaders kylning på grund av bränslets låga utbränningsgrad.

Utbränt kärnbränsle innehåller uran som inte fissionerat, plutonium (och vissa andra tyngre ämnen) som bildats genom neutroninfångning samt fissionsprodukter (dvs. en mängd olika ämnen som bildats under fissionsprocessen). Som exempel kan ges att det utbrända bränslet från en kraftproducerande lättvattenreaktor innehåller ca 96 % uran, 1 % plutonium och 3 % fissionsprodukter. Mängden producerat plutonium från bränslen med lägre utbränningsgrad är betydligt mindre än 1 %, men innehåller högre andel ^{239}Pu jämfört med ^{240}Pu . Det är med andra ord en komplex blandning av olika ämnen som plutonium måste separeras ifrån.

Vid upparbetningen klipps först bränsleelementen upp i bitar så att uranbränslet kan frigöras från kapslingsmaterialet. Bränslet löses sedan upp i varm, koncentrerad salpetersyra, varefter lösningen filtreras från eventuellt olöst kapslingsmaterial. De starkt radioaktiva klyvningsprodukterna separeras därefter från uran och plutonium i ett första steg, varefter uran separeras från plutonium i ett andra steg. Vid separationen används ett organiskt extraktionsreagens som selektivt binder till de ämnen man vill separera, i detta fall till uran och/eller plutonium. Detta organiska reagens är i sig inte blandbart med syrafasen som innehåller det upplösta bränslet och kan liknas vid en dressing av vinäger och olja. Genom att först blanda och sedan fysiskt separera de två faserna kan man således också separera de ämnen som binder till organisk fas respektive de som stannar i syrafasen. Den industriella extraktionsprocess som man använder sig av i dag vid civil upparbetning, och som man även använt i de flesta kärnvapenprogram, är PUREX²⁶-processen där man använder sig av TBP (tributylfosfat) som extraktionsreagens.

I en upparbetningsanläggning måste hänsyn tas dels till de höga stråldoserna som bränslet ger upphov till och dels till att undvika kritikalitet i lösningarna under processen. Stråldosproblemen löser man genom att använda fjärrstyrd utrustning samt genom att ha strålskydd av betong, bly, blyglas eller vatten. På grund av plutoniums radioaktivitet och kemiska giftighet måste allt arbete med plutonium ske i handskboxar eller i s.k. *hot-cells*. I större anläggningar är det också nödvändigt att omhändertaga fissionsgaserna som frigörs när bränslet öppnas. För att undvika kritikalitetsolyckor bör tankar och rör ha säker geometri (till exempel annulära) och/eller innehålla neutronabsorberande ämnen (till exempel bor). Man bör också begränsa totalmängden och halten plutonium i lösning. Det kan påpekas att för att erhålla kriticitet i vattenlösning krävs endast 0,51 kg plutonium i 4,5 liter lösning.

²⁶ PUREX=Plutonium Uranium Redox Extraction.

3. Vad utmärker en forskningsreaktor?

Den första forskningsreaktor togs i bruk 1941 (Chicago Pile) och var en del i Manhattanprojektet²⁷. Majoriteten forskningsreaktorer togs sedan i drift från slutet på 1950-talet till mitten av 1960-talet. På senare år har många äldre forskningsreaktorer avvecklats.

Forskningsreaktorer är i allmänhet mindre och enklare uppbyggda än kraftreaktorer och effekterna är lägre i en forskningsreaktor – ofta mellan 10 kW och 10 MW – jämfört med kraftreaktorer som ger från hundratals till några tusen MW värmeeffekt (motsvarar ca 1000 MW elektrisk effekt). Forskningsreaktorer kräver därför mindre mängder uranbränsle och den lägre effekten medför ett mindre kylbehov än för kraftreaktorer. I små poolreaktorer (<100 kW) räcker ofta den naturliga konvektionen av det omgärdande vattnet för kylningen av reaktorn. I större reaktorer behöver vattnet forceras att cirkulera med hjälp av exempelvis pumpar, och därutöver även värmeväxlas för att få tillräcklig kylning.

Liten bränslemängd och lågt effektuttag ger en låg bränsleförbrukning och en mindre mängd bildade fissionsprodukter i härden, vilket följaktligen genererar en lägre stråldos från det utbrända bränslet jämfört med kraftreaktorer. Är forskningsreaktorns syfte att producera plutonium körs bränslet dessutom till en låg utbränningsgrad, vilket gör att inte så mycket högaktiva produkter hinner bildas under drift till skillnad från kraftproducerande reaktorer.

För att få en kompakt reaktor med relativt låg effekt, men högt neutronflöde som ofta är önskvärt, används med fördel uranbränsle av högre anrikningsgrad som inte behöver bytas så ofta. Under de senaste åren har det dock pågått internationella program för att försöka minska användningen av höganrikat uran i forskningsreaktorer – för att minska risken att detta material används i kärnvapensammanhang. Bland annat pågår arbete med att byta ut bränsle med höganrikat uran mot bränsle med lägre anrikningsgrad i existerande forskningsreaktorer.

Bränslet i många äldre forskningsreaktorer hade hög anrikningsgrad (90 %) med densitet på 1,3–1,7 g/cm³. En minskning av anrikningsgraden på bränslet kräver en ökning av densiteten för att få samma täthet av klyvbara atomer i bränslet. Detta kan erhållas med andra typer av bränslesammansättningar t.ex. uran-silicidbränsle istället för urandioxidbränsle²⁸. Vissa befintliga reaktortyper kräver ännu högre bränsledensitet för att kunna konverteras till att nyttja låganrikat bränsle. Forskning pågår med molybdenlegerade uranbränslen för att kunna nå en ännu högre densitet (upp emot 8 g/cm³). Forskningen tampas med problem med svällning av bränslet under drift och andra oönskade resultat.

Bränslet i en forskningsreaktor är ofta i form av plattor eller cylindrar av uran-aluminiumlegering med kapsling av ren aluminium jämfört med kraftreaktorer där man ofta använder urandioxid med zirkaloykapsling. Vid bränsletemperaturer över 300°C krävs dock andra kapslingsmaterial än aluminium, såsom till exempel zirkaloy.

Forskningsreaktorer med anrikat uran och med vanligt vatten som moderator och kylmedel ger vanligtvis ett relativt högt neutronflöde som är en fördel vid isotoppro-

²⁷ Manhattanprojektet är benämningen på det enorma projekt som USA initierade under 1940-talet för att framställa sin första kärnladdning.

²⁸ I Sovjetunionen konverterade man under 1980-talet flera reaktorer från 90 % till 36 % anrikningsgrad genom att byta till ett bränsle med densiteten 2,5 g/cm³.

duktion och materialprovning. Detta beror på att härden kan göras mindre än om naturligt uran används vilket ger en högre effekttäthet i reaktorn. Man kan också erhålla relativt stor andel snabba neutroner i en sådan reaktor, vilket är önskvärt vid studier av materialförstörning på grund av strålning [8].

I en forskningsreaktor med tungt vatten som moderator och reflektor kan man få en hög flödestäthet av långsamma neutroner över en stor volym, eftersom neutronerna inte absorberas lika bra i tungt vatten som i vanligt vatten, vilket är gynnsamt om man vill ta ut neutronstrålar av hög intensitet för olika typer av experiment.

3.1. Användningsområden

Historiskt kan man urskilja tre faser i användningen av forskningsreaktorer. Den första generationen används ofta för utbildning och träning av ingenjörer och forskare. Om den ligger i närheten av ett universitet kan verksamheten bli en central punkt för både grundforskning och tillämpad forskning med många forskare och studenter som använder reaktorn. Här kan en forskningsreaktor med låg effekt vara ett bra val. Man har fortfarande möjligheter att göra de flesta typer av experiment, reaktorerna är säkra, och bestrålade prover får inte speciellt hög aktivitet. Man kan dock inte producera radioisotoper med hög specifik aktivitet och antalet isotoper som kan produceras är begränsat.

Den andra generationens reaktorer är ofta större än första generationens och används för ett flertal syften (*multipurpose*) såsom neutronaktiveringsanalys, produktion av radioisotoper och studier av reaktorfysik.

Den tredje generationens forskningsreaktorer är mer avancerad. Dessa är dyra både i inköp och drift, har höga neutronflöden och används ofta för specifika uppgifter såsom utveckling av reaktordesign och -säkerhet, storskalig testning, industriell produktion av radioisotoper och forskning.

Forskningsreaktorer har en mängd användningsområden både inom grundforskning (fasta tillståndets fysik, kärn- och neutronfysik, radiokemi, biologi och medicin) och mera tillämpade områden (arkeologi, isotopproduktion, medicin, biologi, metallurgi, materialvetenskap, kriminologi och petroleumteknologi). På grund av att kostnaden att konstruera och driva en forskningsreaktor är hög försöker man utnyttja reaktorerna så effektivt som möjligt genom att utnyttja dem inom flera områden. Beroende på tillämpningsområde för en forskningsreaktor kan det t.ex. krävas att det bör vara lätt att sätta in och ta ur proverna ur reaktorn och/eller att proverna sedan kan föras vidare till ett *hot*-lab för kemisk separation och behandling, vilket vanligtvis ligger i anslutning till reaktorn

Nedan beskrivs några huvudanvändningsområden för forskningsreaktorer.

3.1.1. Reaktor- och bränsleforskning

Utvecklingen av nya reaktorsystem och nya bränslen samt reaktorsäkerhet utgör en stor del av reaktorforskningen. Det rör sig om allt från forskning angående enskilda reaktorkomponenter, och framtagandet av nya bränslen, till tester av helt nya reaktormodeller där nya prototyper av reaktorer byggs för att utvärdera reaktorns möjligheter och brister inför en eventuell större satsning.

3.1.2. Materialprovning, -analys, -utveckling och -testning

Inom detta forskningsområde används de i reaktorn frigjorda neutronerna för att studera material. Neutronerna används dels vid analys för att studera strukturer (och dynamik) i material på atomnivå t.ex. med neutrodiffraction och dels i materialprovning genom att bestråla material med intensiv neutronstrålning och studera förändringar som uppstår i materialet.

Reaktorer som används för materialprovning ska gärna ha ett högt neutronflöde så att man når önskad effekt på relativt kort tid. Ibland önskas en stor andel snabba neutroner för att öka påfrestningen på materialet. Det bör också vara lätt att sätta in och ta ur proverna ur reaktorn.

Bestrålning av kisel är ett stort användningsområde för forskningsreaktorer. Då kisel bestrålas med neutroner bildas fosfor, s.k. *NTD-Neutron Transmutation Doping*. Genom att dopa kisel på detta vis kan resistiviteten i materialet ändras utan att introducera orenheter. Kristaller dopade på detta vis används i elektronikindustrin.

Neutronaktiveringsanalys är en mycket känslig analysmetod som används både för kvantitativ och kvalitativ analys av olika ämnen. Provet som ska analyseras bestrålas med neutroner som aktiverar atomkärnorna i materialet. Genom att detektera den gammastrålning som utsänds när dessa sönderfaller kan man bestämma de ingående ämnena. Neutronaktiveringsanalys används inom många forskningsområden såsom biologi, medicin, agrikultur, arkeologi, geologi, och metallurgi.

3.1.3. Produktion av radioisotoper

Radioisotoper kan produceras antingen genom fission eller genom neutronaktivering och används inom medicin, biologi och industri²⁹.

Neutronaktivering innebär att stabila ämnen bestrålas med neutroner i en reaktor. De reaktorer som ska användas för detta behöver ha ett högt neutronflöde och en bred neutronflödesprofil för att möjliggöra produktion av olika isotoper.

Radioisotoper producerade genom fission kräver kemisk separation efter bestrålning.

De reaktorer som används för isotopproduktion är vanligen forskningsreaktorer, men i några få fall har även kraftproducerande reaktorer använts. Den vanligaste reaktorkonstruktionen är en reaktor av pool-typ med höganrikat bränsle och vanligt vatten som moderator. Reactorer av tank-typ används också, liksom CANDU- och TRIGA-reaktorer, samt i vissa fall snabba och homogena reaktorer (dessa reaktorer beskrivs i mer detalj i avsnitt 3.2 nedan).

3.1.4. Medicin och biologi

Forskningsreaktorer används också inom forskning för medicinsk tillämpning – förutom produktion av isotoper för cancerterapi – såsom läkemedelstillverkning, nukleärmedicin, cancerforskning och neutronterapi av cancertumörer.

²⁹ Som exempel på användningsområden där radioisotoper används industriellt kan nämnas; rökvarnare, brandvarnare, densitetsmätning, fukthaltsmätning, flödesmätningar, nivåmätning, radiografering och sterilisering.

3.2. Olika typer av forskningsreaktorer

Det finns en mängd varianter av forskningsreaktorer jämfört med kraftproducerande reaktorer där ca 80 % utgörs av endast två olika typer – tryckvattenreaktorer och kokvattenreaktorer. Totalt finns ca 229 forskningsreaktorer i drift i dag och ytterligare åtta är planerade eller under konstruktion³⁰ (flera hundra forskningsreaktorer har också avvecklats).

Man kan dela in forskningsreaktorer i olika typer och kategorier t.ex. beroende på vilken moderator som utnyttjas, vilken bränsleform man använder sig av (t.ex. homogen), anrikningsgrad hos bränslet, effekt, om de utnyttjar snabba eller termiska neutroner eller andra tekniska parametrar. Man kan också dela upp dem beroende på vad reaktorerna används till (*critical assemblies*, testreaktorer, utbildning/övningsreaktorer, isotopproduktion eller forskning)

I de fall effekten används för att kategorisera reaktorer är följande en vanlig indelning: mycket låg effekt (< 1 kW), låg effekt (1 kW–100 kW), medeffekt (100 kW–1 MW), hög effekt (1 MW–10 MW) och mycket hög effekt (≥ 10 MW). I tabell 3 nedan anges hur många av de forskningsreaktorer som är i drift i dag som finns i respektive effektområde.

Tabell 3. Antal forskningsreaktorer i drift i respektive effektområde [9].

Effektområde	Antal
Mycket låg < 1kW	70
Låg 1 kW–100 kW	38
Medel 100 kW–1 MW	29
Hög 1 MW–10 MW	45
Mycket hög ≥ 10 MW	47

Nedan görs en indelning avseende på vilken moderator som reaktorn använder sig av. Då många forskningsreaktorer av en viss specifik konstruktion har byggts i flera exemplar beskrivs några av dessa under respektive reaktortyp nedan.

3.2.1. Lättvattenmodererade forskningsreaktorer

De flesta forskningsreaktorer (ca 200 av totalt 250) använder sig av vanligt vatten som moderator. Bränslet måste då vara anrikat till åtminstone 1 %, men många reaktorer har använt sig av betydligt högre anrikningsgrad (90 %) för att hålla reaktorn så liten, kompakt och lätthanterlig som möjligt. Många små forskningsreaktorer, s.k. *critical assemblies*, är lättvattenmodererade.

En vanlig design för lättvattenmodererade forskningsreaktorer är poolreaktorn (*pool type reactor*) med mer än 60 reaktorer runt om i världen. Härden består av ett antal bränsleelement som är placerade i en vertikal låda som i sig befinner sig i en stor pool med vatten. Bränslet är alltid anrikat uran då lättvatten används som moderator. Grafit eller beryllium används ofta som reflektor. Det finns även några exempel av poolreaktorer där man, enligt uppgifter i IAEA:s databas, använder sig av tungt vatten som moderator (FRM II i Tyskland och HANARO i Sydkorea). Dessa konstruktioner har dock det tunga vattnet inneslutet för att minska förångning av det dyra tunga vattnet.

³⁰ Totalt finns 698 reaktorer upptagna i IAEA:s databas över forskningsreaktorer, vilket inkluderar både reaktorer i drift, under konstruktion eller planering och stängda reaktorer.

En annan vanlig design för lättvattenmodererade reaktorer är s.k. tankreaktorer med ca 30 enheter runt om i världen. Tankreaktorn är en liknande typ som poolreaktorn, men där bränslet är inneslutet i en tank av exempelvis aluminium och där kylvattnet cirkulerar med hjälp av pumpar och värmeväxlare. Det finns också några tankreaktorer som är tungvattenmodererade som exempelvis ZED-2 i Kanada som är i drift och PIK i Ryssland, som är under konstruktion. Övriga fyra tungvattenmodererade tankreaktorer är stängda³¹.

Några kända typer av lättvattenmodererade forskningsreaktorer som konstruerats i flera identiska exemplar beskrivs kortfattat nedan.

Argonaut

Ett trettio-tal reaktorer med benämningen Argonaut³², med ursprunglig design från USA, har byggts runt om i världen för utbildning och övning inom reaktorfysik och kärnfysik. Endast fyra reaktorer av denna typ är fortfarande i drift i dag.

TRIGA

TRIGA³³ är en pulsad reaktor, det vill säga en reaktor vars effekt och därmed neutronflöde kan ökas mycket snabbt under en kort tidsperiod. Reaktorn kan användas inom utbildning, för isotopproduktion, icke-förstörande provning och kommersiell forskning. Pulsningen ger möjligheter till forskning som inte ens de största icke-pulsade reaktorerna medger. Till exempel kan neutroner från pulshade reaktorer användas för experiment med strålmål med mycket små effektiva tvärsnitt eller korta halveringstider, och för experiment där stora flödestätheter, mycket större än 10^{15} n/cm²s, krävs. Tillämpningsområden för detta är exempelvis radiokemi, fysik (neutron-neutronspredning, fundamentala neutronegenskaper) och ingenjörsvetenskap såsom tester av bränsleegenskaper, säkerhetsegenskaper hos reaktorer osv.

I dag finns det 35 TRIGA-reaktorer av olika modell i drift globalt varav ca hälften i USA (ursprunglig design från USA). TRIGA är en typ av poolreaktor som kan konstrueras utan inneslutning. Tidigare användes höganrikat bränsle i reaktorerna, men de har nu modifierats för att kunna drivas med LEU. Reaktorn har negativ temperaturkoefficient och anses därför vara mycket säker med liten risk för härdsmälta. Bränslet för TRIGA är en form av uran-zirkoniumhydrid (ZRH) som också verkar som moderator.

SLOWPOKE

SLOWPOKE³⁴ är av kanadensisk design, och i dag är fem av de ursprungliga reaktorerna fortfarande i drift. Reaktorn planerades även att användas som ubåtsreaktor, men projektet blev aldrig genomfört. SLOWPOKE är en lättvattenmodererad poolreaktor med låg kritisk massa (ursprungligen 900 g uran med 93 % anrikningsgrad), berylliumreflektor, låg energi (ca 20 kW) och högt neutronflöde. Bränslet är i form av en uran-aluminiumlegering med aluminiumkapsling. Härden har diametern 22 cm och höjden 23 cm. På grund av den låga utbränningsgraden degraderas bränslet mycket långsamt. På 20 år har bränslet endast bytts i en av de sex reaktorer som fortfarande är i drift sedan starten. Det stabila bränslet ger också ett stabilt neutronflöde. SLOWPOKE används främst för neutronaktiveringsanalys (NAA), i allmän och kommersiell forskning, för utbildning, viss isotopproduktion samt radiografi.

³¹ TR-0 i Tjeckien, FR-2 i Tyskland, JRR-2 i Japan samt GTRR i USA.

³² Argonaut=Argonne Nuclear Assembly for University for Training.

³³ TRIGA= Training, Research, Isotopes, General Atomics.

³⁴ SLOWPOKE=Safe Low-Power Critical Experiment

MNSR

MNSR³⁵ är en kinesisk variant av SLOWPOKE som finns i Kina (två stycken) samt har exporterats till Ghana, Iran, Pakistan, Nigeria and Syrien. Totalt finns det sju stycken MNSR-reaktorer i drift i dag.

R2 och R2-0

Sveriges andra forskningsreaktor, Reaktor 2 (R2), var en lättvattenmodererad tankreaktor med en effekt på 50 MW_t. Denna var placerad i Studsvik och gick kritisk 1960, tätt följd av Sveriges tredje reaktor – en mindre lättvattenmodererad reaktor (1 MW) av pool-typ, kallad R2-0. Bränslet i de båda bestod ursprungligen av uran anrikat till 90 %, men sedan sänktes anrikningsgraden till 19,9 %. De båda användes både för forskning och isotopproduktion, och var i drift fram till 2005 .

KRITZ

I Studsvik, i samma lokal som R0, fanns en lättvattenmodererad nolleffektsreaktor, KRITZ (*critical assembly*, 100W). Reaktorn startades 1969 och i denna provades bl.a. MOX-bränsle på 1970-talet.

3.2.2. Tungvattenmodererade forskningsreaktorer

Det finns 8 tungvattenmodererade forskningsreaktorer i drift i dag och ytterligare 16 som är stängda men ännu inte nedmonterade. Tungvattenreaktorer med (hög)anrikat bränsle kan ge mycket högt neutronflöde. Exempel på sådana reaktorer är exempelvis HFR i Grenoble. Tungvattenmodererade reaktorer har använts i flera militära program för produktion av tritium till bostrade kärnladdningar³⁶.

DIDO

DIDO var en tungvattenmodererad forskningsreaktor med anrikat metalliskt uran-bränsle och grafitreflektor runt härden. Det fanns sex stycken i drift runt om i världen, men alla är nu stängda³⁷. Reaktorerna var designade att ha ett högt neutronflöde för materialtestning.

R1

Sveriges första forskningsreaktor Reaktor 1 (R1), som var placerad vid KTH, var en tungvattenmodererad tankreaktor och använde naturligt uran i metallform som bränsle. Med denna bedrevs först och främst Sveriges inledande forskning inom reaktorfysik och reaktorteknik, där både kraftproduktion och plutoniumproduktion fanns i åtanke. Senare användes reaktorn främst som neutronkälla. R1 gick kritisk för första gången 1954 och drevs fram till 1970. Effekten var från början 300 kW för att senare ökas till 1MW. Sverige har även haft tungvattenmodererade kraftreaktorer³⁸.

R0

En nolleffektsreaktor från 1959 (50 W) placerad i Studsvik. R0 var en tungvattenmodererad tankreaktor med naturligt uran som bränsle. Denna användes för att studera härdkonfigurationer m.m. och var i drift från 1959 fram till 1970-talet.

³⁵ MNSR=Miniature Neutron Source reactor)

³⁶ Tritium kan antingen bildas genom neutroninfångning i tungt vatten eller genom neutronbestralning av anrikat litium (⁶Li).

³⁷ DIDO och Pluto vid Harwell i Storbritannien, HIFAR i Australien, FRJ-2 vid Jülich i Tyskland, DMTR i Dounreay i Skottland samt DR-3 vid Risö i Danmark.

³⁸ Ägesta Kraftvärmeverk, i drift 1963–1974, var tungvattenmodererad och använde anrikat uran som bränsle. I egenskap av Sveriges första fullskaliga kärnkraftverk har Ägesta också haft en forskningsroll, men tas inte vidare upp i denna rapport. (För vidare läsning se SKI Rapport 02:54.) Marviken, ett stort kärnkraftverk utanför Norrköping, byggdes också men togs aldrig i drift på grund av säkerhetsskäl.

JEEP II

JEEP II ("Joint Establishment Experimental Pile No. 2") är en tankreaktor med effekten 2 MW_t som drivs med 3,5 % anrikat urandioxidbränsle fördelat på 19 bränsleelement vilka byts ut i omgångar allteftersom deras utbränningsgrad når runt 18000 MWd/ton . Moderatoren utgörs av 5 ton tungt vatten, tillverkat i Norge. Reaktorn är inte trycksatt, mer än det mättnadstryck som uppkommer vid den måttliga uppvärmningen som härden åstadkommer. Reaktorstopp för bränslebyte och införsel och utförsel av prov går därför snabbt (under en timme). Reaktorn har varit i drift sedan 1966 och är belägen i Kjeller, Norge. Syftet med reaktorn är materialforskning, neutronfysik, strålskyddsexperiment och isotopproduktion. Reaktorkärlet är cylindriskt (innerdiameter 170 cm, höjd 340 cm) med rundad botten, tillverkad av 1 cm tjock aluminium.

HBWR

HBWR (Halden Boiling Water Reactor) är en tungvattenmodererad tankreaktor med effekten 20 MW_t som varit i drift sedan 1959. Uranbränslet (500 kg) är i dag anrikat till 6 %. Värme från reaktorn kyls bort och ger ett energitillskott till en intilliggande fabrik. I reaktorn utförs experiment för materialforskning och bränsleanalys, men man har i dag ingen isotopproduktion då detta inte är lönsamt för denna typ av reaktor med dagens konkurrens.

3.2.3. Grafitmodererade forskningsreaktorer

Det finns i dag bara tre traditionella grafitmodererade forskningsreaktorer i drift samt två grafitmodererade högttemperaturreaktorer. Tidigare fanns ca 20 i främst USA, Ryssland och Storbritannien. Huvuddelen av de reaktorer som användes för produktion av vapenplutonium i kärnvapenstaterna var grafitmodererade. Dessa var dock större än vad som skulle kunna klassas som en forskningsreaktor. Även Nordkoreas grafitmodererade reaktor på 5 MW_e som använts för plutoniumproduktion klassificeras som en kraftreaktor och inte forskningsreaktor.

3.2.4. Homogena reaktorer

Moderatoren i en homogen reaktor är antingen lättvatten, tungt vatten eller polyeten (eng. *polyethelene*). Bränslet är ett lösligt salt av t.ex. uran löst i moderatoren. I dag är ca 20 homogena forskningsreaktorer i drift (tidigare totalt ca 75) varav fem är vattenbaserade, homogena reaktorer (AHR) och övriga använder sig av polyeten som moderator.

3.2.5. Snabba forskningsreaktorer

Det finns 9 stycken s.k. snabba forskningsreaktorer eller experimentuppställningar för snabba reaktorer formellt i drift i dag även om flera av dem inte används aktivt. Dessa använder sig inte av någon moderator, och kyls med flytande metall såsom t.ex. natrium.

FR-0

Sveriges enda snabbreaktor, FR-0, drevs i Studsvik åren 1964–1971. Detta var en nolleffektsreaktor där plastingjutna uranbitar användes för att bygga upp bränsleelement. Uranet var anrikat till 20 % och nådde kriticitet med hjälp av snabba neutroner, och klarade sig därför utan moderator. Reaktorns kriticitet styrdes genom att reaktorhårdens två halvor med bränsleelement fördes mot varandra. Koppas användes som reflektormaterial i reaktorn.

4. En forskningsreaktors användbarhet för plutoniumproduktion

Forskningsreaktorer har i flera fall använts för produktion av vapenplutonium i olika länders kärnvapenprogram (Indien, Nordkorea, Israel) och man är också oroad för att den tungvattenmodererade forskningsreaktor som Iran nu bygger kan komma att missbrukas för plutoniumproduktion. Den iranska reaktorn vid Arak har en planerad termisk effekt på 40 MW vilket typiskt skulle kunna ge ca 10 kg plutonium av vapenkvalitet per år. Konstruktionsarbetet har gått med en ojämn takt men under 2012 har arbetet accelererat och man har i dag monterat primär- och sekundärkylkretsar³⁹. Iranska myndigheter har meddelat att det planerade startdatumet ligger under våren 2014. Iran har enligt IAEA redan producerat tillräckligt med tungt vatten för att kunna fylla reaktorn och det finns inom området så kallade *hot-cells* där upparbetning av använt bränsle i mindre skala kan ske. Det finns inga kända planer på någon iransk upparbetningsanläggning i större skala. Många av kärnvapenstaternas produktionsreaktorer som var konstruerade specifikt för plutoniumproduktion har haft en betydligt högre effekt än en forskningsreaktor.

Man kan använda sig av alla typer av kärnreaktorer med uranbränsle för plutoniumproduktion oberoende av moderatormaterial – det bildas alltid plutonium om man utgår från uranbränsle. Grafit- eller tungvattenmodererade reaktorer är dock mest effektiva vad gäller produktion av vapenplutonium (se avsnitt 2.3).

Man måste dock ha en reaktor med tillräckligt hög effekt för att det ska kunna bildas tillräcklig mängd plutonium inom en realistisk tidsperiod. En grafit- eller tungvattenmodererad reaktor med effekten 1 MW_t skulle uppskattningsvis kunna producera ca 350 gram plutonium per år vid låg utbränning [7]. För att få tillräcklig mängd plutonium för en kärnladdning skulle man följaktligen behöva köra en sådan reaktor i ca 20 år. För en lättvattenmodererad reaktor med samma effekt skulle man istället behöva köra reaktorn nästan dubbelt så lång tid för att få samma mängd vapenplutonium på grund av den sämre neutronekonomin i en lättvattenreaktor jämfört med tungvatten- eller grafitmodererade reaktorer. Reactorer med relativt låg effekt kan anses vara av mindre risk ur spridningssynpunkt än de med högre effekt. Som synes i tabell 3, finns det dock relativt många forskningsreaktorer med effekter över 1 MW.

För plutoniumproduktion vill man, som nämnts ovan, ha en relativt låg utbränningsgrad vilket leder till att man behöver byta ut bränslet i reaktorn med relativt korta intervall. I vissa reaktorer kan man byta bränsle under drift, utan att stänga ner reaktorn. Detta är förstas en fördel om man önskar en optimal produktion av vapenplutonium. Den korta bestrålningstiden leder också till att man inte behöver ”kyla” det utbrända bränslet alltför länge efter reaktorbestrålningen och innan upparbetning jämfört med vad som krävs vid hög utbränningsgrad (se avsnitt 2.3.2). I forskningsreaktorer, som ej är avsedda för plutoniumproduktion, körs bränslet till en så hög utbränningsgrad som möjligt för att utnyttja bränslet maximalt, och det utbrända bränslet blir därmed nästan lika aktivt och svårhanterat som utbränt bränsle från en kraftreaktor.

Den nordkoreanska reaktorn i Yongbyon räknas formellt inte som en forskningsreaktor då den även försåg omgivningen med fjärrvärme. Reaktorn är av typen Magnox som är grafitmodererad och använder naturligt uranbränsle och koldioxid som

³⁹ IAEA/GOV/2012/55.

kylmedel. Effekten på 5 MW motsvarar en plutoniumproduktion på 6 kg plutonium av vapenkvalitet per år. Reaktorn ställdes av 2007 och vitala delar av infrastrukturen revs 2008. Den troliga reaktor som var under uppförande i Syrien och som förstördes under ett flyganfall i september 2007 uppvisade slående likheter med den nordkoreanska reaktorn och en analys av härdeffekten utgående från värmeväxlarnas storlek tyder på en motsvarande effekt. Strykprover som genomfördes på platsen av IAEA visade spår av grafit av en typ som lämpar sig för användning som moderator.

5. Indikatorer på reaktordrift

Att upptäcka en fördold mindre reaktor kan vara mycket svårt, och skulle troligtvis i första hand ske genom underrättelseinformation samt med kompletterande studier av till exempel satellitbilder, flygfotografier och inköpsmönster.

Indikationerna på drift av en liten forskningsreaktor är mycket otydligare än motsvarande för en fullskalig kraftreaktor, i och med att en forskningsreaktor ofta är mindre och genererar en lägre effekt. Några signaturer som ändå skulle kunna ses med satellitbilder är:

- Reaktorbyggnadens storlek och form
- Kylvattensystem, till exempel kyltorn eller utsläpp i vattendrag
- Luftventilation, med luftutsläpp genom skorsten
- Transportvägar, till exempel vägar, järnväg
- Fysiskt skydd, till exempel staket, säkerhetsgrindar och vakter
- Eventuell elektricitetstillförsel

Själva reaktorn kan upptäckas genom att studera storlek och form av den omgivande reaktorbyggnaden, men den kan mycket väl ha förlagts inne i ett bergtrum eller under en yttre skalbyggnad varvid den kan vara mycket svår att upptäcka. Reaktorn består av ett antal ganska stora komponenter, till exempel själva reaktorkärlet. Dessa skulle kunna upptäckas i anslutning till transport och installation, men kan också hemlighållas genom att låta komponenterna levereras i mindre delar, vilket kan göra identifieringen svår, och sedan montera ihop dem under en skyddande byggnad på plats.

Ett kylsystem för vattnet i sekundärkylkretsen är nödvändig, oberoende av reaktortyp och storlek. Värmeväxlingen mellan primär- och sekundärkrets kan ske i anslutning till reaktorn, eventuellt i samma fördolda utrymme som denna. Kylningen av sekundärkylvattnet sker sedan genom att låta kylvattnet svalna av i kontakt med luft i kyltorn eller genom att släppa ut det varma kylvattnet i ett vattendrag. Ett kyltorn är klart synligt från ovan och skulle vara svårt att dölja. Ett utsläpp i ett vattendrag kan ske mer fördolt genom att placera utloppet under vattenytan, men vattendraget måste vara tillräckligt stort för att inte själv värmas upp efterhand och på så sätt indikera värmeutsläpp. Det uppvärmda kylvattnet från båda dessa kylsystem kan detekteras med värmesensorer om avgiven värmemängd är tillräckligt stor. Själva vattenledningarna kan relativt enkelt döljas under jord. Eventuellt kan en kylvattenreservoar finnas i anslutning till reaktorn att användas i nödfall, men denna är också enkel att dölja. Kylbehovet är givetvis lägre för en liten forskningsreaktor, vilket kan göra denna indikator svårtolkad vad gäller inköp av kylutrustning (värmeväxlare) och pumpar som då inte behöver vara speciellt kraftfulla.

För att driva pumpar, elektronisk utrustning etc. krävs extern tillförsel av elektricitet genom redan existerande elnät i omgivningen, eller möjligen genom ett eget elverk. Elledningar kan dock relativt enkelt döljas under jord.

För att vädra ut de radioaktiva ädelgaser som bildas i reaktorsystemet krävs ett luftventilationssystem vars storlek ökar med reaktoreffekten. Luftintaget kan döljas relativt enkelt, medan luftutsläppet är svårare att dölja då detta kräver en hög skorsten som är svår att göra osynlig ovanifrån. Om flödet forceras kan man dock föra ut gaserna någon annan väg långt från reaktorn.

För att transportera komponenter och utrustning till reaktorkonstruktionen krävs vägar eller järnvägsförbindelse där transportfordon kan åka, vilka givetvis är väl

synliga ovanifrån. Spåren kan dock minimeras genom att låta merparten av monteringen av de stora reaktordelarna ske på området, varvid transporterna av dessa blir svåra att upptäcka.

Kraftreaktorer står vanligtvis omgärdade av ett staket och säkerhetsgrindar, medan vakter och övervakningskameror hjälper till att motverka och avskräcka intrångsförsök. Reaktorer vars syfte är att användas i ett kärnvapenprogram står allt som oftast kraftigare skyddade, ofta med luftvärn. Dessutom är närvaro av militär personal eller utrustning en tydlig indikator. För att hålla en reaktor hemlig och inte väcka misstanke kan man dock undvika att installera säkerhetsåtgärder eller ha militär övervakning för att minimera risken för upptäckt.

För att kunna driva en reaktor behövs tillgång på reaktorbränsle, vars tillverkning kräver en mängd andra kärntekniska anläggningar som exempelvis konverteringsanläggningar och bränslefabriker. Dessutom krävs gruvdrift för att utvinna uran med tillhörande renings- och koncentreringsanläggningar om man avser att använda inhemskt uran.

6. Exportkontrollerad utrustning

Kärnreaktorer och utrustning som används i kärnreaktorer eller för reaktordrift är belagda med exportkontroll genom EU:s förordning 428/2009. EU:s exportkontrollregler följer de kontrollistor med kriterier som framtagits inom exportkontrollregimen NSG (Nuclear Suppliers Group). De produkter som har en direkt koppling till kärnteknik kontrolleras enligt NSG Part 1 medan produkter med dubbla användningsområden (s.k. *dual-use* produkter) kontrolleras enligt NSG Part 2⁴⁰. Det kan vara värt att notera att de produkter som listas på NSG:s Part 1 ställer vissa speciella krav för att export ska kunna genomföras såsom regeringsgarantier mellan exportörsländ och mottagarland samt att det klyvbara material som ska hanteras med utrustningen ställs under IAEA safeguards.

Nedan beskrivs kärnteknisk utrustning och reaktorkomponenter som är belagda med exportkontroll. Den numrering som används motsvarar numreringen i EU:s förordning 428/2009 bilaga 1. Inom parentes anges referens till NSG:s listor (Part 1 eller Part 2).

Ett utdrag från EU:s förordning, vad gäller de produkter som rör kärnreaktorer, återfinns som Bilaga 1 till denna rapport.

Det bör poängteras att de kriterier och gränsvärden som anges i kontrollistorna inte nödvändigtvis är de gränser som krävs för att en produkt ska ha användning inom ett kärnvapenprogram. Export av produkter som faller utanför exportkontrollen kan ändå behöva förhindras om misstanke finns att mottagaren kan använda dessa i kärnvapensammanhang. Detta möjliggörs genom den så kallade *catch-all* klausulen. Exempel på sådan s.k. *catch-all* utrustning är pumpar och värmeväxlare. Därutöver kan packningar, detektionsutrustning för joniserande strålning och specialmaterial för reaktortankar eller bränslekapsling vara användbart i reaktorsammanhang.

6.1. Material

0C001 & 0C002 Uran (NSG Part 1)

Uran är under exportkontroll dels i form av naturligt uran och utarmat uran under 0C001 (inkluderar även torium) i form av metall, legeringar, kemiska föreningar eller koncentrat och varje annat material som innehåller ett eller flera av de ovan nämnda materialen, dels som särskilt klyvbart material⁴¹ under 0C002. Undantag finns om uranet uppfyller vissa kriterier med avseende på vikt och tillämpning (se vidare i bilaga 1).

0C003 Tungt vatten (NSG Part 1)

Vatten består av en syreatom och två väteatomer. Dessa väteatomer utgörs till största delen av isotopen ¹H (väte), men även ²H (tungt väte, deuterium, D) förekommer i liten mängd (0,0155 %). Tungt vatten kallas sådant vatten där andelen deuterium anrikats från denna naturliga halt. För användning av tungt vatten som moderator krävs att deuterium är anriktat till över 90 %, men betydligt lägre gränser krävs för exportkontroll. I dag är deuterium samt alla föreningar, blandningar och lösningar – inklusive tungt vatten – som har ett isotopförhållande av deuterium-väte som överstiger 1:5000 (dvs. som innehåller deuterium anriktat till över 0,02 %) under

⁴⁰ NSG Part 1: INFCIRC/254/Rev.9/Part 1; NSG Part 2: INFCIRC/254/Rev7/Part2.

⁴¹ Med klyvbart material avses ²³³U, uran anriktat med avseende på isotoperna ²³⁵U eller ²³³U, samt material som innehåller dessa isotoper.

exportkontroll. Även produktionsanläggningar för tungt vatten⁴² är under exportkontroll under 0B004. Tungt vatten är mycket dyrt att tillverka och därför kan grafit vara ett bättre val. Användandet av tungt vatten som moderator kan också kräva ett reningssystem för att avlägsna bildat tritium. Vidare måste en viss mängd tungt vatten normalt tillsättas med jämna mellanrum på grund av förluster i systemet. Det rör sig dock om en relativt begränsad mängd tungt vatten som måste tillsättas, kanske bara några tiotals till hundratals kg per år beroende på reaktordesign och effekt. Trycksatta reaktorer kan dock kräva något större tillsats på grund av ökat läckage vid högre tryck.

0C004 Grafrit (NSG Part 1)

För att grafit ska fungera tillfredställande som moderator krävs en hög renhet av denna. Som mått på denna renhet används begreppet borekvivalent (BE). BE definieras som koncentrationen av naturligt bor som skulle ge samma absorptionsvärnsnitt för termiska neutroner som grafitens alla föroreningar (inklusive bor, men exklusive kol) sammanslaget ger. Exportlicens krävs för grafit med BE understigande 5 ppm.

En annan parameter av betydelse för moderatoranvändning är densiteten, där en högre densitet ger en bättre moderator, och grafit med en densitet större än 1,5 g/cm³ är därför också under exportkontroll⁴³.

I dag är inte grafit i pulverform exportkontrollerat, ej heller grafitprodukter under 1 kg, förutsatt att de ej ska användas i en kärnreaktor⁴⁴.

1C234 Zirkonium (NSG Part 2)

Zirkonium och zirkoniumlegeringar är tåliga och korrosionsresistenta, har hög smältpunkt samt ett lågt absorptionsvärnsnitt för termiska neutroner. Det passar därför utmärkt att användas i de delar av härden som utsätts för både neutroner och höga temperaturer. Se vidare under 0A001f.

Zirkonium med ett hafniuminnehåll på mindre än 1 viktandel hafnium på 500 vikttdelar zirkonium är under exportkontroll om det föreligger som metall, legeringar innehållande mer än 50 viktprocent zirkonium, föreningar, produkter därav, avfall eller skrot av något av föregående. Tunna folier med en maximal tjocklek på 0,10 mm är dock undantagna från kontroll.

1C230 Beryllium (NSG Part 2)

Beryllium är en tålig och relativt lätt metall med bra modererande egenskaper, då tvärsnittet för absorption av termiska neutroner är litet, varför beryllium kan användas som moderator i kärnreaktorsammanhang. På grund av dess höga neutronspridningstvärnsnitt används beryllium också som reflektor. Både beryllium i form av ren metall och i form av oxid används. Materialet är dock både dyrt och toxiskt. Endast en handfull av de forskningsreaktorer som är i drift i dag använder sig av beryllium som moderator, medan runt 60 stycken använder sig av beryllium i reflektorn.

Berylliummetall, legeringar som innehåller mer än 50 viktprocent beryllium, föreningar innehållande beryllium, och produkter av dessa, liksom avfall och skrot av något av föregående är under exportkontroll. För användning i en reaktor krävs dock en berylliumhalt långt över 90 %.

⁴² För mer information om produktion av tungt vatten hänvisas till *Produktion av tungt vatten*, Oliver, L., Wilhelmssen, K., SKI Rapport 2003:15

⁴³ För mer information om grafit hänvisas till *Exportkontroll av kärnteknisk grafit*, Strömberg, L.G., SKI Rapport 2004:44.

⁴⁴ Det ska påpekas att gränsen för exportkontroll inom EU här skiljer sig från NSG:s riktlinjer, där den senare endast kontrollerar grafit överstigande 30 ton.

Vissa specifika produkter är undantagna från exportkontroll. På grund av berylliums höga röntgengenomsläpp används metallen i olika röntgenutrustningar och är då inte exportkontrollerad. Ej heller är berylliumoxid för användning i elektroniska komponenter och kretsar, under kontroll, och inte heller om det är i form av smaragder och akvamariner där beryllium ingår som beryl (beryllium-aluminiumsilikat). På grund av sin tålighet och lätthet har beryllium en rad andra användningsområden, bland inom flyg- och rymdindustrin, men faller i alla dessa fall under exportkontroll om de uppfyller de ovan ställda kraven (se vidare detaljer i bilaga 1).

1C231 Hafnium (NSG Part 2)

Hafnium är ett korrosionståligt, eldfast material med bra mekaniska egenskaper. Hafnium har dessutom ett högt absorptionsvärnsnitt för termiska neutroner och används därför i reaktorns styrstavar. Civila tillämpningar har hafnium bland annat som komponent i radiorör och glödlampor, jetmotorer och på senare tid även inom halvledarindustrin (i processorer). Hafniumoxid och hafniumkarbid är mycket eldfasta och kan därför också användas i högttemperatursammanhang.

Hafniummetall, legeringar som innehåller mer än 60 viktprocent hafnium, hafniumföreningar som innehåller mer än 60 viktprocent hafnium, produkter av dessa, samt avfall och skrot av något av föregående är under exportkontroll.

1C225 Bor (NSG Part 2)

Borisotopen ^{10}B har ett högt absorptionsvärnsnitt för termiska neutroner och används därför med fördel i reaktorns styrstavar för att justera reaktoreffekten, då i form av borkarbid. Bor, i form av borsyra, används ofta också kärnreaktorers nödkylsystem. ^{10}B används också av samma skäl för att kontrollera kritikaliteten i processer med höganrikat uran och plutonium, liksom i kärnladdningar.

Civilt används ^{10}B vid kliniska tester för cancerbehandling, men är även för detta ändamål under exportkontroll. Naturligt bor är inte under exportkontroll. Det finns en rad hafniumföreningar med civila användningsområden såsom i lättvikts pansar och verktyg, i rengöringsmedel, och i form av amorft bor i exempelvis tändaren i raketmotorer.

Bor, som anrikats med avseende på bor-10-isotopen (^{10}B) till större halt än den naturliga halten av denna isotop är belagd under exportkontroll enligt följande: elementärt bor, föreningar, blandningar som innehåller bor, produkter som innehåller dessa samt avfall och skrot av något av föregående.

6.2. Reaktordelar

0A001b Reaktortankar (NSG Part 1)

En reaktortank är det kärl vari härden är innesluten. Tanken innehåller också kylmedel och moderator, om sådana används, samt en rad andra komponenter (se vidare 0A001h). Tanken kan ha olika utseende beroende på reaktortyp, men generellt är de tillverkade i metall och är cylinderformade. PWR- och BWR-tankar för kraftproduktion är vertikala och kan vara 10–20 meter höga, med en diameter på upp till 50 % av höjden, medan en typisk tank till en CANDU-reaktor⁴⁵ är horisontell och har en längd på under 10 m, men en diameter något större än längden. Reaktortankens tjocklek varierar beroende på vilket tryck den måste klara. En PWR-reaktortank måste motstå ett tryck på över 15 MPa och är således tjockväggig, runt 2 dm, medan en CANDU-reaktors tank endast behöver klara en hundradel av detta tryck och kan klara sig med en 3 cm tjock vägg.

⁴⁵ CANDU-reaktorers tank benämns ofta calandria.

Forskningsreaktorer, som vanligtvis är mindre är kraftproducerande reaktorer, har således också mindre reaktortankar. De kan vara så små som en meter höga och en meter breda. Rostfritt stål, kolstål och aluminium (eventuellt överdragen med rostfritt stål) är vanliga tankmaterial. Flertalet av de i dag existerande forskningsreaktorerna är lättvattenkylda pool-reaktorer som har en öppen reaktortank. Denna tank utsätts inte för några stora tryck och därför är en tunnväggig tank tillräcklig.

0A001c Hanteringsutrustning för omladdning av bränsle i reaktorn (NSG Part 1)

Denna utrustning används för omladdning av bränsle i en reaktorhård där den höga strålningen gör att direkt åtkomst och övervakning inte är möjlig. Utrustningen är därför kraftigt strålskyddad och har en sofistikerad styrning som möjliggör att arbetet kan fjärrstyras. Utrustningen avlägsnar använt bränsle i en reaktorhård samt laddar den åter med färskt bränsle.

Utrustningen arbetar antingen vertikalt från ovansidan i vertikala reaktorer, eller horisontellt i horisontella reaktorer (t.ex. CANDU), vilket underlättar i de fall bränslebyte sker under drift. För vertikala reaktorer lyfts utbränt bränsle upp och in i en kraftigt strålskyddad tunna som placerats på reaktorns ovansida, varefter tunnan försluts och avlägsnas från reaktorn. Horisontella reaktorer använder sig av hydrauliska plattformar för att nå rätt position i höjd- och sidled.

I forskningsreaktorer används vanligtvis samma typ av utrustning som kraftreaktorer. Ett enklare gripverktyg (en hake eller liknande), festsatt vid en flera meter lång stång av solitt eller ihåligt stål eller aluminium som sticks ned till härden (längden är beroende på hur mycket vatten som används som strålskydd ovanför reaktorhärden), kan också användas. Detta kan ske manuellt för små reaktorer, eller med någon form av mekanisk eller eldriven lyftanordning.

0A001d Styrstavar (NSG Part 1)

Rörliga neutronabsorbatorer – styrstavar – används för att reglera fissionsprocesserna i en kärnreaktor. Dessa inkluderar tillhörande stöd- och upphängningsanordningar samt drivdon och styrrör för att styra stavarna rätt i härden. Vanliga material i styrstavarna är bor, hafnium, kadmium och andra material som har hög neutronabsorption⁴⁶. I en PWR är styrstavarna formade som långa, smala rör, ihopsatta i kluster som införs i bränsleelement innehållande styrrör. För en BWR kan styrstavarna vara korsformiga med fyra blad.

Då reaktoreffekten önskas bromsas förs styrstavarna längre in i reaktorhärden varefter antalet kärnklyvningar minskar då styrstavarna absorberar en del av de neutroner som behövs för att fission ska ske. På samma sätt kan reaktoreffekten åter ökas genom att styrstavarna dras ut från härden, varefter antalet neutroner som kan orsaka fission ökar igen. Styrstavarna drivs med hjälp av drivdon och sitter för en PWR på reaktorns ovansida och för en BWR på reaktorns undersida (då utrymmet på en BWR:s ovansida upptas av ett ångsystem). Vid ett snabbstopp har styrstavar placerade på ovansidan (som för PWR, och poolreaktorer exempelvis) fördelen att snabbt kunna införas endast med hjälp av gravitationen, medan styrstavar på undersidan (som för BWR) måste införas med hjälp av till exempel ett hydrauliskt system. Enklare lågeffektsreaktorer kan kontrolleras manuellt med mycket enkla styrsystem, men någon form av säkerhetssystem kan dock krävas.

0A001e Tryckrör för inneslutning av bränsleelement (NSG Part 1)

⁴⁶ Bor förekommer i form av borkarbid, och är vanligt i PWR och BWR. Kadmium förekommer till exempel som en silver-indium-kadmiumlegering och är vanligt i PWR.

Tryckrören innesluter bränsleelement och primärkylmedel i vissa kärnreaktorer med lättvattenkylning och grafitmoderering, samt vissa tungvattenmodererade reaktorer. Tryckrören är ofta tillverkade i zirkonium, zirkoniumlegeringar eller aluminium. Rören är generellt flera meter långa och har en diameter på omkring 1 dm. Då de ska tåla höga tryck är väggjockleken stor – upp till flera cm. Rören har avtagbara ändplattor, fastsatta med bultar. CANDU-reaktors tryckrör innehåller ett flertal inre rör fyllda med urandioxidbränsle (de hopbuntade bränslerören kallas ”fuel bundles” och är runt en halv meter långa), omgivet av tungvatten som kylmedel. Tryckrör är under exportkontroll om de klarar av att hålla ett driftryck som överstiger 5,1 MPa.

0A001f Zirkoniummetall och -legeringar i form av rör (NSG Part 1)

Zirkonium i olika former klassas som *dual use*-produkt och finns kontrollerat enligt NSG:s lista Part 2 och i EU-förordningen under 1C234 (se ovan). Zirkoniummetall och zirkoniumlegeringar som är i form av rör anses däremot extra känsliga på grund av sin direkta tillämpning i kärnreaktorer och kontrolleras därför även under NSG:s lista Part 1, motsvarande 0A001f i EU-förordningen.

Zirkonium och zirkoniumlegeringar används i termiska reaktorer både som kapslingsmaterial, i en del interna delar i kärnreaktor och i tryckrör (se 0A001e) på grund av deras utmärkta egenskaper då de är tåliga och korrosionsresistenta, har hög smältpunkt samt ett lågt absorptionstvårsnitt för termiska neutroner.

Hafnium, som naturligt förekommer tillsammans med zirkonium till en grad av 2 %, har däremot ett högt absorptionstvårsnitt för termiska neutroner, och måste därför renas bort från zirkoniumet. Andelen hafnium i förhållande till zirkonium ska vara mindre än 1:500 per viktenhet i godset för att exportkontroll ska krävas. EU har exportkontroll på alla produkter som uppfyller ovannämnda villkor, medan NSG också har en viktgräns på 500 kg.

Vanliga zirkoniumlegeringar är zirkaloy-2 och zirkaloy-4. Den senare är nickelfri vilket gör att den bättre motstår att bli spröd på grund av väteabsorption än zirkaloy-2. Zr-2.5 Nb och Excel är två andra legeringar som är mycket starkare än zirkaloy-legeringarna och framtogs för att användas i CANDU-reaktorens tryckrör.

0A001g Kylmedelpumpar (NSG Part 1)

Dessa pumpar används för att pumpa runt reaktorns primärkylmedel. Beroende på reaktortyp kan dessa pumpar se mycket olika ut till både form och storlek. Motorn kan vara en vertikal, trefas AC induktionsmotor och kan ha en effekt på flera MW för en kraftproducerande reaktor, medan en liten forskningsreaktor kan klara sig med en pumpeffekt på några tiotals kW. Ett svänghjul/balanshjul som kan ta över om elmotorn skulle bli strömlös finns ofta kopplad till pumpen. Stora kraftreaktorer kräver självklart större pumpar, kanske flera meter långa, medan en liten forskningsreaktor kan klara sig med en mindre pump på runt en meter. Vilken typ av pump som används avgörs av krav på tryck och flödes hastighet bland annat. En vanlig pumptyp är en eldriven centrifugalpump, vilken kan bestå av en eller flera impellrar som driver kylmedlet genom pumpen. En vertikal pump har elmotorn på toppen och impellern i botten. Kylvattnet, som först passerat en värmeväxlare, förs in vertikalt i botten på pumpen, passerar roterande impeller/impellrar och förs ut horisontellt en bit upp på pumpen varefter det leds tillbaka in i reaktorn.

0A001h Kärnreaktors interna delar (NSG Part 1)

De delar som avses är varje större konstruktion inuti ett reaktorkärl som fyller en eller flera funktioner, till exempel som att bära upp hårdens, upprätthålla hårdens geometri, rikta primärkylmedlets flöde, utgöra strålskärmar för reaktorkärl och leda hårdinstrumentering på plats. Detta inkluderar bottenplatta för hårdens, bränslekanaler (bränsleboxar), termiska skärmar, bafflar, hårdgaller samt diffusorplåtar. Material som används för dessa är rostfritt stål eller legeringar som Inconel.

0A001i Värmeväxlare (ånggeneratorer) (NSG Part 1)

Dessa värmeväxlare används för att leda bort värme från primärkylkretsen. I värmeväxlare hos CANDU och lättvattenkylda PWR överförs värmen till sekundärkretsen, bestående av vanligt vatten som genom den tillförda värmen förångas. Ångan kan sedan användas för att driva turbiner för elproduktion. Dessa värmeväxlare är externt placerade utanför reaktorhärden. Hos BWR däremot, agerar reaktorn själv ånggenerator, där primärkylkretsens vatten förångas i härden och leds direkt till turbinerna. Även hos gaskylda reaktorer tillåts kylmedlet (koldioxid eller helium) flöda direkt till turbinerna, efter uppvärmning i härden.

Generellt menas med denna kategori *ånggenererande* värmeväxlare. Snabbreaktorer med flytande metall (främst natrium) som kylmedel kan dock använda sig av en extra tredje intermediär kylkrets (också med flytande metall som kylmedium) mellan primär- och sekundärkrets. Både värmeväxlare som krävs mellan primär- och intermediär kylkrets samt värmeväxlare mellan intermediär och sekundärkretsen (ånggeneratorn) ska inräknas under denna exportkontrollkategori.

Värmeväxlare är oftast vertikala, och deras storlek samt antal beror på reaktorns effekt. En stor kraftproducerande PWR kan ha över 20 m höga värmeväxlare. Forskningsreaktorer, som oftast inte används för att producera energi, kan låta primärkylmedlets energi övergå till sekundärkylmedlet utan förångning. Dessa värmeväxlare liknar vanliga kommersiellt tillgängliga värmeväxlare för icke-nukleär industri och är inte under exportkontroll. Den överförda värmen i sekundärkretsen leds sedan över till omgivningen via kyltorn.

0A001j Instrument för detektering och mätning av neutroner (NSG Part 1)

Dessa instrument används för detektering och mätning av neutroner, och är särskilt konstruerade eller iordningställda för att bestämma neutronflödesnivåerna inuti härden i en kärnreaktor. Neutronflödesnivåerna är proportionella mot reaktorns effekt. Denna kategori innefattar både detektorer som mäter inuti härden och detektorer som mäter strax utanför härden. Instrumenten ska klara av att mäta i ett brett energispektrum, med flöden från 10^4 neutroner/cm²s upp till runt 10^{10} neutroner/cm²s, och ska vid en ändring i neutronflödesnivån omedelbart ge en signal till automatiska kontroll- och säkerhetssystem som ombesörjer åtgärder, t.ex. att ändra styrstavarnas placering. Detektorsignalerna kan vara kopplade till reaktoroperatörens kontrollpanel där de synliggörs genom mätare eller ett signalsystem.

Exempel på instrument som är användbara till detta är proportionalräknare, fissionskammare och jonkammare.

Neutrondetektorerna ingår i det omfattande kontrollsystem som krävs vid reaktor-drift. Övrig instrumentering, som tryckmätare, flödesmätare, termometrar, är av konventionell typ, och är därmed inte belagd med exportkontrollerade.

7. Referenser

- [1] "Nuclear Energy – Principles, Practices and Prospects", David Bodansky, Springer Verlag, 1996
- [2] "2007 World Nuclear Industry Handbook", Nuclear Engineering International, 2007.
- [3] "Nuclear Chemical Engineering", Benedict, Pigford, Levi, McGraw-Hill Company, 1981
- [4] Global Security, <http://www.globalsecurity.org/wmd/facility/metropolis.htm>
- [5] "Nuclear Chemistry and Radioanalytical Chemistry", G. Choppin, J. Rydberg, J.O. Liljenzin, Butterworth-Heinemann, 2002
- [6] Nuclear Threat Initiative, www.nti.org
- [7] "Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996, World Inventories, Capabilities and Policies, David Albright et al, SIPRI, Oxford University Press, 1997
- [8] "Reaktorfysik", N.G. Sjöstrand, Institutionen för reaktorfysik, Chalmers, 1992
- [9] IAEA:s databas över forskningsreaktorer, <http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/>



2013:02

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

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

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

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

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

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