

Forskning

---

## Urankonvertering

Lena Oliver

Jenny Peterson

Katarina Wilhelmsen

Mars 2006

# SKI 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 kärnteknisk industri men kan ha vissa speciella egenskaper som gör den användbar för kärnvapenframställning. Det är SKI som handlägger ärenden som rör export av kärnämne och kärnteknisk utrustning. Det är viktigt att myndigheten har tillgång till aktuell kunskap i ämnet för att korrekt kunna bedöma inkomna exportansökningar.

## SKI:s syfte

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, har sedan länge fungerat som teknisk rådgivare till SKI i exportkontrollärenden. SKI försäkra sig om att kompetensen bevaras och förnyas inom området. Vi har därför lagt ut projekt hos FOI att studera exportkontrollerade produkter. Den här rapporten är resultatet av ett sådant projekt och berör konvertering av uran. Efter att uranmalm brutits och koncentrerats är konvertering nästa steg i framställningen av en förädlad uranprodukt. Konvertering sker före anrikning av uran och bränsletillverkning. Urankonvertering sker också vid framställningen av uranmetall.

## Resultat

Den här rapporten berör kortfattat några generella principer för urankonvertering, vilken utrustning som kan komma ifråga, indikatorer på konvertering, mm. Vi har valt att låta rapporten vara översiktlig utan att gå in på detaljer. Detta för att inte sprida information som kan vara känslig ur kommersiell eller icke-spridningssynpunkt. Därmed kan flera intressenter såsom andra myndigheter, berörd industri och intresseorganisationer få tillgång till resultatet. Förutom rapporten har projektet resulterat i att personal på FOI och SKI fått ökad insikt i processerna genom litteraturstudier och besök på olika kärntekniska anläggningar.

Det genomförda arbetet visar att SKI:s mål att ha tillgång till aktuell kompetens inom urankonvertering har uppnåtts.

## Eventuellt fortsatt verksamhet inom området

Det finns andra områden som skulle kunna ingå i en framtida studie. SKI ämnar därför låta FOI fortsätta studier i kompetenshöjande syfte inom de områden av kärnbränslecykeln som SKI bedömer vara mest angelägna. Ett kommande projekt blir studie av laseranrikning. FOI har i tidigare projekt studerat tungvattenproduktion (SKI Report 2003:15) och urananrikning (SKI Report 2005:44). Dessutom har SKI genomfört en separat studie av grafit ur exportkontrollsynpunkt (SKI:Report 2004:44).

## **Effekter på SKI:s verksamhet**

SKI har fått tillgång till dokumenterad kunskap om urankonvertering samt tillgång till extern teknisk kompetens för bedömning av exportkontrollärenden.

## **Projektinformation**

Handläggare hos SKI har varit Lars Hildingsson

SKI:s referenser: Diarienummer 2005/92, Projektnummer 2005/10005

## Forskning

---

# Urankonvertering

Lena Oliver

Jenny Peterson

Katarina Wilhelmsen

Mars 2006

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI. Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens/författarnas egna och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKI:s.

# Förord

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

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>BAKGRUND</b> .....	<b>7</b>
2.1	VAD INNEBÄR URANKONVERTERING?.....	7
2.2	DE OLIKA KONVERTERINGSPROCESSERNA .....	8
<b>3</b>	<b>URANUTVINNING OCH FRAMSTÄLLNING AV UOC</b> .....	<b>10</b>
3.1	LAKNING .....	11
3.1.1	<i>Fysikaliska separationsmetoder</i> .....	11
3.1.2	<i>Lakning</i> .....	11
3.1.3	<i>Lakning med mikrober</i> .....	12
3.2	URANKONCENTRERING.....	13
3.2.1	<i>Utfällning</i> .....	13
3.2.2	<i>Vätskeextraktion</i> .....	13
3.2.3	<i>Jonbyte</i> .....	15
3.3	UTRUSTNING.....	15
<b>4</b>	<b>URANKONVERTERINGSPROCESSER</b> .....	<b>17</b>
4.1	KONVERTERING FRÅN UOC TILL $UO_3$ .....	17
4.2	KONVERTERING FRÅN $UO_3$ TILL $UF_6$ .....	18
4.2.1	<i>Direktfluorinering</i> .....	18
4.2.2	<i>Fluorinering i flera steg</i> .....	19
4.2.3	<i>Utrustning</i> .....	23
4.3	KONVERTERING AV $UF_6$ TILL $UO_2$ FÖR BRÄNSLETILLVERKNING .....	24
4.4	KONVERTERING TILL $UCl_4$ FRÅN $UO_2$ ELLER $UO_3$ .....	26
4.5	KONVERTERING TILL URANMETALL.....	27
4.5.1	<i>Konvertering av <math>UF_6</math> till uranmetall via <math>UF_4</math></i> .....	27
4.5.2	<i>Konvertering av <math>UCl_4</math> till uranmetall</i> .....	29
4.5.3	<i>Konvertering av uranoxid till uranmetall</i> .....	29
<b>5</b>	<b>INDIKATORER PÅ URANKONVERTERING</b> .....	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>KONVERTERINGSANLÄGGNINGAR</b> .....	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>REFERENSER</b> .....	<b>33</b>

**BILAGA 1:** Utrustning för urankonvertering som är belagd med exportkontroll. Utdrag ur rådets förordning (EG) nr 1504/2004 av den 19 juli 2004 om ändring och uppdatering av förordning (EG) nr 1334/2000, bilaga I.

**BILAGA 2:** Produktion av fluorgas och vätefluorid.

**BILAGA 3:** Kemiska analyser som krävs i en urankonverteringsanläggning.

# Sammanfattning

FOI har på uppdrag av SKI gjort en studie om de urankonverteringsprocesser som är relevanta inom den kärntekniska industrin vid framställning av olika typer av uranföreningar. Samma konverteringsprocesser är intressanta både för produktion av kärnbränsle och vid produktion av det klyvbara materialet för kärnvapen. Länder med kärnvapenambitioner och som har för avsikt att producera vapenuran genom urananrikning behöver således urankonverteringskapacitet i större eller mindre omfattning beroende på vilken uranråvara man utgår ifrån.

Rapporten beskriver först de inledande processerna från uranutvinning till urankoncentrering, för att sedan gå in på de konverteringsprocesser som omvandlar urankoncentrat till uranhexafluorid, vilken är den uranförening som används i större delen av dagens anrikningsanläggningar vid produktion av anrikat uran. Slutligen beskrivs konvertering till urandioxid för användning som kärnbränsle samt den konvertering som sker från olika uranföreningar till uranmetall – den form av uran som används i en kärnladdning. Då uranråvaran man utgår från i en konverteringsanläggning är urankoncentrat beskrivs också framställningsprocessen av denna uranförening utgående från uranmineral.

Förutom att kemin och principen bakom de olika konverteringsprocesserna presenteras så beskrivs också den utrustning som behövs i processerna. Större delen av den utrustning som krävs i en urankonverteringsanläggning är konventionell, kemisk industriutrustning vilket gör att det kan vara svårt att bedöma om en viss typ av utrustning är ämnad för urankonvertering eller inte. De processer som involverar  $UF_6$  och  $UF_4$  kräver dock korrosionsbeständig utrustning.

# Summary

The Swedish Defence Research Agency, FOI, has under contract work financed by the Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI, performed a study on uranium conversion processes that are of importance in the production of different uranium compounds in the nuclear industry.

The same conversion processes are of interest both when production of nuclear fuel and production of fissile material for nuclear weapons are considered. Countries that have nuclear weapons ambitions, with the intention to produce highly enriched uranium for weapons purposes, need some degree of uranium conversion capability depending on the uranium feed material available.

This report describes the processes that are needed from uranium mining and milling to the different conversion processes for converting uranium ore concentrate to uranium hexafluoride. Uranium hexafluoride is the uranium compound used in most enrichment facilities. The processes needed to produce uranium dioxide for use in nuclear fuel and the processes needed to convert different uranium compounds to uranium metal – the form of uranium that is used in a nuclear weapon – are also presented. The production of uranium ore concentrate from uranium ore is included since uranium ore concentrate is the feed material required for a uranium conversion facility.

Both the chemistry and principles of the different uranium conversion processes and the equipment needed in the processes are described. Since most of the equipment that is used in a uranium conversion facility is similar to that used in conventional chemical industry, it is difficult to determine if certain equipment is considered for uranium conversion or not. However, the chemical conversion processes where  $UF_6$  and  $UF_4$  are present require equipment that is made of corrosion resistant material.



# 1 Inledning

Denna rapport är resultatet av en studie rörande de mest relevanta urankonverteringsprocesserna som används i kärntekniska sammanhang. Syftet har varit att fördjupa våra kunskaper om de olika processerna och speciellt fokus har lagts på att studera bakomliggande principer och den utrustning som behövs för de olika urankonverteringsprocesserna. Fördjupad kunskap om dessa processer, teknologier och utrustning är av vikt för att kunna göra goda bedömningar rörande exportkontroll av sådan utrustning samt för att kunna bedöma ett lands kärntekniska infrastruktur och eventuella kapacitet att framställa kärnvapen

Att producera det fissila materialet – höganriktat vapenuran eller vapenplutonium – är ett av de mest kritiska stegen vid framställningen av kärnvapen. Ett land med kärnvapenambitioner har behov av teknologi och kunskap om flera olika urankonverteringsprocesser för att producera de uranföreningar som behövs för urananrikning och/eller för att tillverka uranbränsle för reaktordrift om man har för avsikt att producera vapenplutonium. Processerna som används är i de allra flesta fall desamma som dem som utnyttjas vid anrikning och bränsletillverkning för civil energiproduktion. Oberoende av om man har för avsikt att producera vapenuran eller vapenplutonium är alltså urankonverteringsprocesserna av stor vikt. Men en aktör som har för avsikt att anrika uran och således kan behöva uranhexafluorid kan försöka anskaffa en mer förädlad uranråvara genom import, vilket skulle innebära att landet inte behöver alla steg i urankonverteringsprocessen.

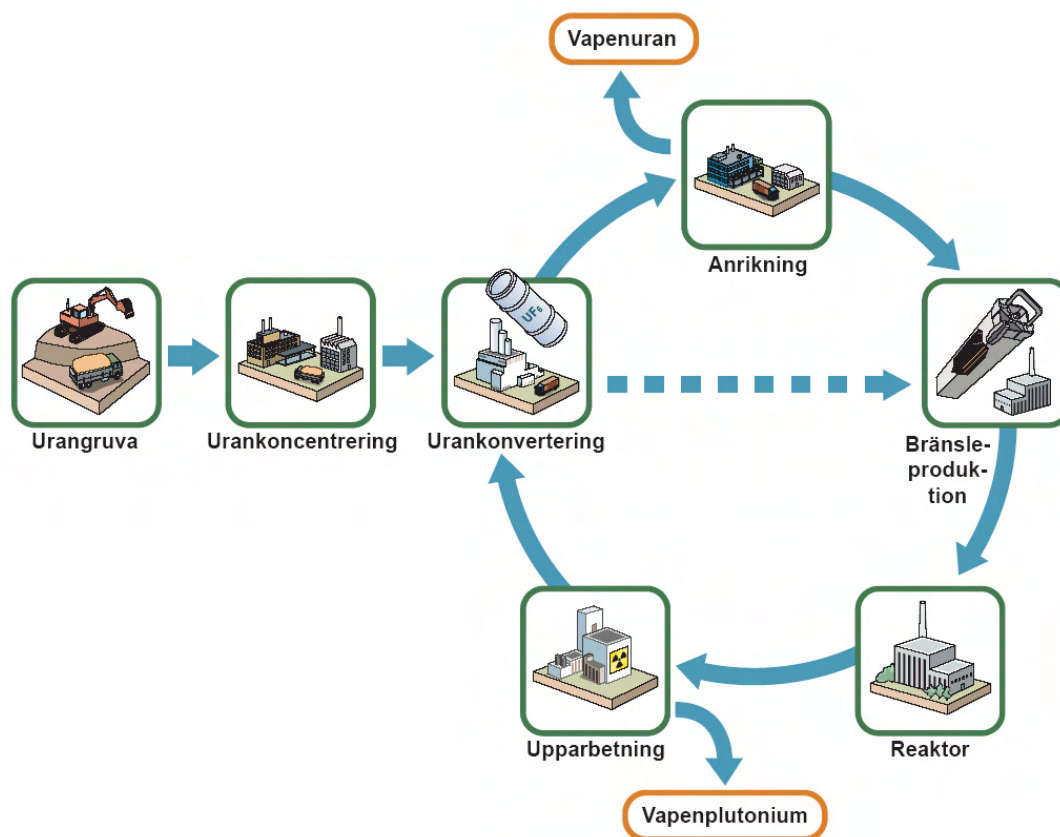
Rapporten är upplagd enligt följande: I avsnitt två ges en bakgrund till olika typer av urankonverteringsprocesser som används i nukleär industri. I avsnitt tre och fyra beskrivs de olika processerna i större detalj med avseende på de kemiska reaktioner som sker och den utrustning som behövs för processerna. I efterföljande avsnitt ges sedan en sammanställning av indikatorer på urankonvertering. Slutligen listas de civila urankonverteringsanläggningar som idag är i drift runt om i världen.

En av rapportens bilagor innehåller ett utdrag ur EU:s förordning avseende material och utrustning rörande urankonvertering som är under exportkontroll. I övriga bilagor beskrivs produktion av fluorgas och vätefluorid – två viktiga komponenter vid produktionen av uranhexafluorid och urantetrafluorid – samt vilka kvalitetskrav som ställs på uranråvara och processkemikalier i en urankonverteringsanläggning.

## 2 Bakgrund

### 2.1 Vad innebär urankonvertering?

Uran finns naturligt i berggrunden med en medelhalt på ca 3 g/ton (3 ppm eller 0,0003 %), vilket är jämförbart med jordskorpans innehåll av tenn<sup>1</sup>. Vissa mineral har dock betydligt högre halt av uran. Uranhaltiga mineral är den råvara man utgår ifrån när man skall vidareförädla uran till diverse uranföreningar för användning i kärnreaktorer, men också i kärnvapen. De olika processer som krävs för att framställa uran och plutonium, för reaktordrift eller för andra tillämpningar, brukar beskrivas genom den så kallade kärnbränslecykeln (se figur 1).



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

Som synes krävs flera steg för att omvandla uranmineral från en urangruva till vapenuran eller vapenplutonium. I denna rapport beskriver vi de processer som behövs i de inledande stegen i kärnbränslecykeln, från urangruva till och med urankonvertering där de uranföreningar som behövs i olika anrikningsprocesser framställs. Vi beskriver också de konverteringssteg som krävs för att överföra olika uranföreningar till metall, som är den form av uran man använder sig av i kärnvapen men också den form av uran som används som bränsle i vissa typer av reaktorer, samt konvertering av anrikad uranhexafluorid till urandioxid som sker vid bränsleproduktionen efter anrikningen. Då system för att producera urantetraklorid också är belagda med exportkontroll kommer vi även kort att beröra detta konverteringssteg.

<sup>1</sup> Som jämförelse kan ges att jordskorpans innehåll av aluminium, som är dess vanligaste metall, är 82 kg/ton.

Inom exportkontrollregimerna Nuclear Suppliers' Group (NSG) och Zanggerkommittén har man identifierat ”*särskilt konstruerade eller iordningställda system*” som behövs för de olika urankonverteringsprocesserna och som ansetts vara relevanta att belägga med exportkontroll. Dessa system, enligt NSG Part 1, finns idag inkluderade i EU:s rådsförordning 1334/2000. Ett utdrag ur denna förordning rörande system för urankonvertering bifogas i Bilaga 1.

I NSG Part 2 kontrolleras produkter med dubbla användningsområden, s.k. *dual-use* produkter. En stor del av utrustningen som används vid urankonvertering såsom kemiska reaktorer, tankar, vätskeextraktionsutrustning, fluidiserade bäddar och olika ugnar har så utbredd användning inom konventionell, kemisk industri att det inte är möjligt att kontrollera utrustningen i NSG Part 2. Elektrolysceller för produktion av fluorgas samt högren magnesium och kalcium är dock belagda med exportkontroll enligt NSG Part 2.

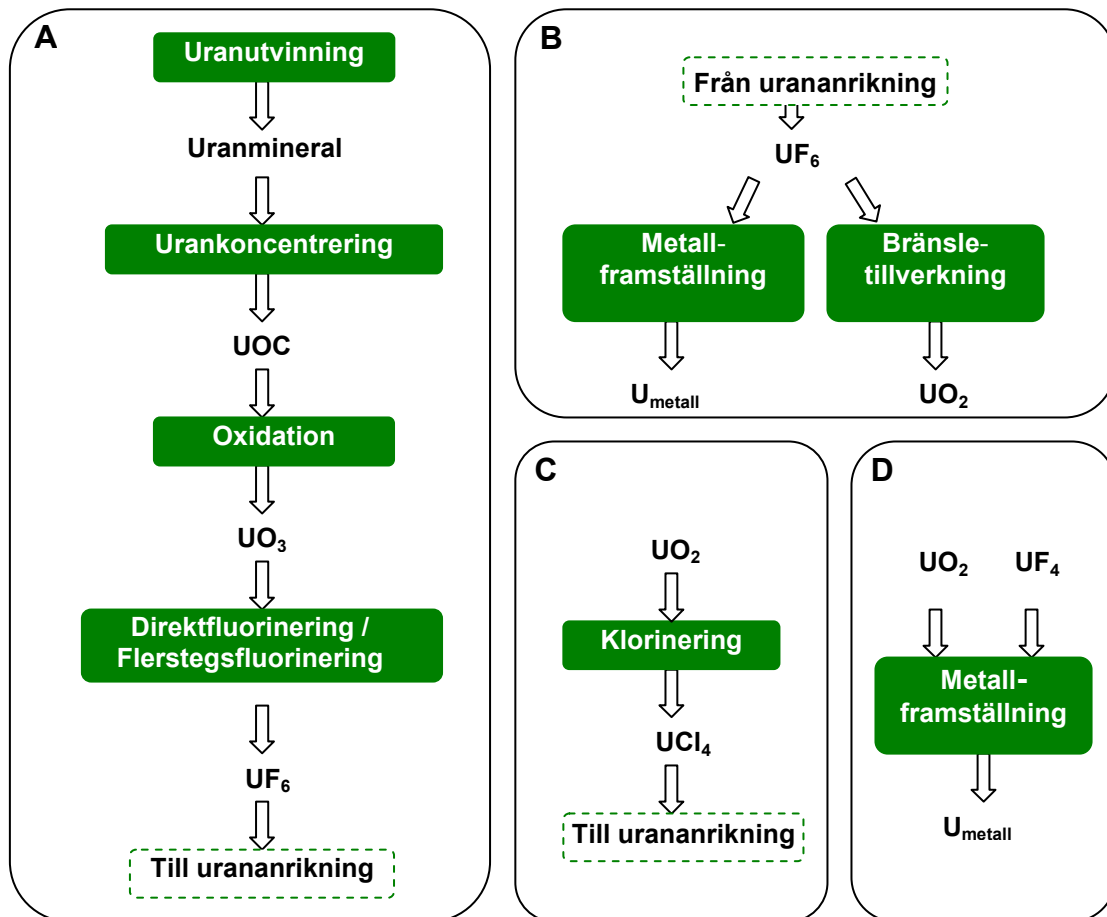
Det är sällan som denna typ av utrustning kan köpas direkt från utrustningsleverantören, utan normalt specialbeställs utrustningarna utgående från den tänkta tillämpningen. Andra processer än sådana knutna till kärnbränslecykeln kanske inte behöver uppfylla de speciella materialkrav som urankonverteringen ställer för att hantera korroderande ämnen som fluorföreningar. Det är värt att notera att utrustning, som inte betecknas som ”*särskilt konstruerad för urankonvertering*”, ändå kan användas i en urankonverteringsanläggning.

De urankonverteringsprocesser som vi kommer att beskriva, och som även har identifierats av NSG som relevanta att belägga med exportkontroll, utgår från s.k. urankoncentrat som kan bestå av olika uranföreningar, ofta  $U_3O_8$ . Vissa urankoncentrat kallas ibland för *yellowcake*, men i denna rapport kommer vi att använda oss av benämningen urankoncentrat eller den engelska förkortningen UOC (*uranium ore concentrate*). Då de relevanta urankonverteringsprocesserna utgår från UOC kommer vi först att beskriva hur man ur uranmineral framställer detta råmaterial.

Det mesta av den teoretiska beskrivningen i de följande kapitlen är baserad på referenserna [1, 2, 3, 4, 5].

## 2.2 De olika konverteringsprocesserna

Konvertering från urankoncentrat till lämplig uranförening att anrika eller för användning i uranbränsle innebär kemisk omvandling mellan oxid, klorid, fluorid eller metall. De olika kemiska konverteringssteg som behövs kan sammanfattas som följer (se figur 2):



Figur 2: Översiktligt flödesschema över de olika konverteringsstegen.

- Översikt av de konverteringssteg som behövs från gruva till anrikningsanläggning. UOC betecknar urankoncentrat,  $\text{UO}_3$  urantrioxid och  $\text{UF}_6$  uranhexafluorid.
- Anrikat uran i form av  $\text{UF}_6$  kan användas som ingångsmaterial vid framställning av uranmetall eller urandioxid,  $\text{UO}_2$ , som exempelvis kan användas i kärnbränsle.
- $\text{UO}_2$  kan användas för att producera  $\text{UCl}_4$ , urantetraklorid, som är ingångsmaterial vid anrikning med elektromagnetisk isotopseparation och vid anrikning genom kemiska utbytesreaktioner.
- Både  $\text{UO}_2$  och  $\text{UF}_4$ , urantetrafluorid, kan användas för att producera metall av naturligt uran.

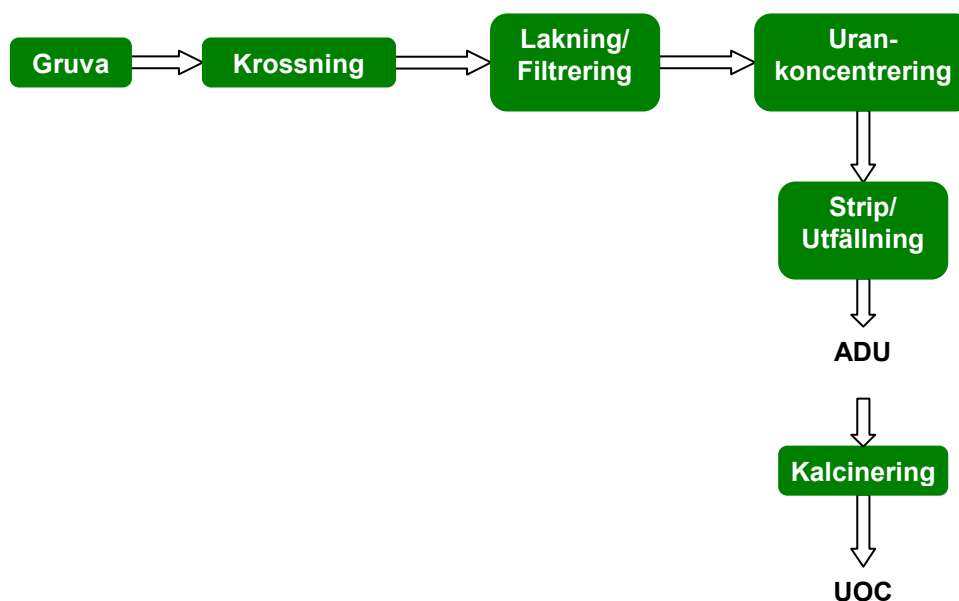
Vissa konverteringsprocesser delas in i två huvudkategorier; våt och torr. Våt konvertering innebär att processerna kräver hantering av vätskor, vilket kan vara en nackdel. Fördelen är att föroreningar oftast kan avlägsnas lättare än under en torr process, vilket ger en renare produkt. Torra processer är inte möjliga för alla konverteringssteg.

### 3 Uranutvinning och framställning av UOC

Uran bryts som mineral i dagbrott eller i underjordiska gruvor. Utvinning från underjordiska gruvor är dock mindre vanlig idag på grund av arbetsmiljöskäl. En annan metod är s.k. *in-situ* lakning (ISL) där laklösning pumpas ner direkt i fyndigheten varefter det upplösta uranet i laklösningen pumpas upp. Fördelarna med *in-situ* lakning är att gruvarbetarna utsätts för mindre strålning och att det inte blir stora resthögar av krossat och lakat berg. Metoden medför dock risk för grundvattenförorening.

Grundämnet uran är relativt vanligt förekommande i naturen med en medelhalt på 0,0003 %. Det är dock få fyndigheter som har mer än 1 % uranhalt. Med dagens uranpriser anses mineral med en uranhalt av 0,1 % (1000 ppm) eller högre vara ekonomiskt brytvärda.

För att separera ut uranet från mineralet krossas och mals först mineralet. Krossningen sker med konventionell krossningsteknik och malningen sker oftast under vatten för att undvika damm. Uranet separeras sedan vanligtvis ut genom lakning med en sur eller basisk lösning. Vid lakningen löses även vissa oönskade metaller ut som t.ex. molybden, vanadin, järn, aluminium, zirkonium, bly och arsenik. Laklösningen separeras från olöst krossmaterial och uranet separeras från laklösningen med någon separationsprocess såsom utfällning, vätskeextraktion, eller jonbyte. Uran som har separerats med vätskeextraktion fälls därefter ut som ammoniumdiuranat<sup>2</sup> (ADU) varefter fällningen filtreras och konverteras till UOC genom kalcinering<sup>3</sup> (figur 3).



Figur 3: Flödesschema över en framställningsprocess av UOC från uranmineral.

Under dessa inledande steg koncentreras uranhalten från någon bråkdel av procent i mineralet till 65-85 % i UOC. Mängden UOC som behöver transporteras vidare till konverterings-

<sup>2</sup> ADU = Ammoniumdiuranat =  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$

<sup>3</sup> Kalcinering innebär att materialet upphetas kraftigt varvid det sönderdelas. Frigjorda lättflyktiga ämnen kan därigenom avlägsnas. Från början innebar metoden framställandet av kalciumoxid ur kalksten där koldioxid drevs bort genom upphetningen.

anläggningen blir således betydligt mindre än de stora mängder uranmineral som hanteras. För att framställa ett ton uran krävs ca 1000 ton uranmineral om uranhalten i mineralet är 1000 ppm (0,1 %). Det bör påpekas att system för uranutvinning och utrustning som behövs för att framställa råvaran UOC ej är belagda med exportkontroll.

## 3.1 Lakning

Det krossade och malda uranmineralet måste behandlas ytterligare för att uranet skall kunna separeras från övrigt material. Vanligtvis används lakning, men i vissa fall kan en fysikalisk separationsmetod räcka.

### 3.1.1 Fysikaliska separationsmetoder

För vissa mineral kan man använda sig av fysikaliska separationsmetoder baserade på skillnaden i massa mellan olika föreningar för att effektivisera den efterföljande lakningsprocessen. På så sätt kan man lösa större mängder uran utan alltför mycket störande föroreningar. Dessa metoder används i kombination med vanlig lakning.

En teknik som kallas våtmekanisk anrikning (*gravity concentration*) används för att separera vissa mineralpartiklar från varandra vid konventionell mineralutvinning. Inom uranutvinningsindustrin används metoden ibland för vissa pechbländemineral<sup>4</sup>. Metoden används för att separera mineralpartiklar med olika specifik vikt från varandra. Man utnyttjar att en tyngre partikel rör sig fortare i ett gravitationsfält än en lättare partikel av samma storlek genom friktion med en viskös vätska såsom vatten. Antingen utnyttjar man jordgravitationen eller också används stora centrifuger.

Flotation – där man istället låter vissa av mineralpartiklarna lyftas till vätskeytan som ett skum med hjälp av ett flotationsmedel – är också en teknik som är vanlig i konventionell mineralutvinning. Det är dock ej så vanligt förekommande vid uranutvinning på grund av uranpartiklarnas tyngd, men används i vissa fall för att separera bort vissa oönskade, lättare metaller, exempelvis järn.

### 3.1.2 Lakning

Beroende på uranets oxidationstillstånd<sup>5</sup> i de olika mineral som bryts krävs olika sätt att lösa ut uranet ur det krossade mineralet. Uran i sitt sexvärda oxidationstillstånd, U(VI), är den form av uran som är mest löslig och kan lösas ur mineralet med en svag syra eller svagt basisk lösning. Fyrvärd uran, U(IV), är däremot nästan olösligt i utspädda laktlösningar och kräver därför en starkare syra eller en starkt basisk lösning för att lösas. Det mest använda uranmineralet uraninit (pechblände) innehåller uranjoner i fyrvärd oxidationstillstånd och måste därför lösas med svavelsyra (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) eller basisk natriumkarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>),

---

<sup>4</sup> Pechblände är en mikrokristallin form av uranmineralet uraninit. Båda innehåller huvudsakligen U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

<sup>5</sup> Metaller i sur eller basisk lösning förekommer oftast i form av joner. Beroende på vilket grundämne det rör sig om, och i vilken miljö de befinner sig i, har jonerna olika laddning. Man anger ett grundämnes s.k. oxidationstal, vilket är den laddning som jonen har, med romerska siffror i parentes, t.ex. U(IV) vilket är en uranjon som har fyrvärd laddning (oxidationstal fyra).

tillsammans med ett oxidationsmedel, t.ex. mangandioxid ( $\text{MnO}_2$ ) eller natriumklorat ( $\text{NaClO}_3$ ) i närvaro av järn för att överföra uranet till sexvärt oxidationstillstånd.

Vissa uranmineral såsom t.ex. carnotit<sup>6</sup> innehåller sexvärt uran och är således lösligt och här räcker det att lösa med utspädd svavelsyra eller natriumkarbonatlösning.

Det finns också andra typer av mineral där uran ingår i mindre mängd, men som kan utnyttjas för att utvinna uran – ibland som en biprodukt. Exempel på dessa är fosfatmineral som innehåller 100-200 ppm uran och skiffer<sup>7</sup> med en uranhalt på 250-325 ppm.

Vilken lagningsprocess man väljer beror förutom på själva uranmineralet även på vad mineralet består av därutöver. Om det är silikater eller andra ämnen som inte löser sig så bra i syra så föredras svavelsyra som lagningslösning för att laka uran så selektivt som möjligt. Svavelsyra är dessutom billigare än karbonatlösning och löser också uranet snabbare. Vissa uranmineral med titan-, niob- eller tantaloxider är så svårlösliga att det krävs het, koncentrerad svavelsyra för att lösa ut uranet. Ca 80 % av all uranlagning i världen uppskattas ske med svavelsyra.

Om det resterande mineralet är kalksten – som också löses av syra – föredrar man att lösa uranet med natriumkarbonat eller ammoniumkarbonat. Vid lösning med karbonat krävs att mineralet finkrossas för att inte upplösningen skall gå för sakta. Man kan också behöva lösa vid högre temperatur för att öka lagningshastigheten. I gengäld är karbonatlagning mer selektiv än svavelsyra.

Man kan också låta svavelsyra under lång tid långsamt rinna igenom en hög av krossat mineral och lagningslösningen i botten kan då samlas upp efter hand för vidare kemisk behandling. Denna process kallas *heap leaching*.

### 3.1.3 Lakning med mikrober

Lakning med hjälp av mikrober, s.k. biolakning är en metod där man löser metaller ur mineral med hjälp av bakterier (mikrober). Denna metod har använts i gruvindustrin för att utvinna t.ex. guld och koppar, men har också tillämpats för uranutvinning.

I processen utnyttjar man att mikroorganismerna oxiderar svavel så att svavelsyra bildas, vilken i sin tur löser ut uranet. Denna typ av lakning har fördelen att den kan öka lösligheten i mineral med låga metallhalter, men processen är mycket långsammare än konventionella lakningstekniker.

---

<sup>6</sup> Carnotit,  $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , innehåller upp till 7% uran med bland annat vanadin bundet till sig.

<sup>7</sup> Skiffer var det mineral som användes för uranutvinning i Sverige (Billingen, Kvarntorp).

## 3.2 Urankoncentrering

Efter att uranet lakats ut ur mineralet filtreras det ouplösta krossmaterialet från laklösningen innan uranet sedan separeras selektivt genom utfällning, vätskeextraktion eller jonbyte. Vid svavelsyralakning löses även en del andra metaller vilket gör att man i dessa fall inte kan använda sig av utfällning utan man behöver använda sig av jonbyte eller vätskeextraktion för att kunna separera uran selektivt.

### 3.2.1 Utfällning

Utfällning av uran (i form av natriumdiuranat eller ammoniumdiuranat) sker från karbonatlösning med hjälp av natriumhydroxid, NaOH, eller ammoniumhydroxid, NH<sub>4</sub>OH. Utfällning är i princip bara möjlig efter lakning med natriumkarbonat då man huvudsakligen bara löst ut uranet och lösningen i princip är fri från andra metaller<sup>8</sup>. En alltför oren produkt skulle annars erhållas.

### 3.2.2 Vätskeextraktion

Separation genom vätskeextraktion används då lakningen har utförts med syra. Extraktionen sker genom att de metaller man ämnar separera binder selektivt till en organisk molekyl som är löst i ett organiskt lösningsmedel. Den organiska fasen och syrafasen, som är vattenbaserad, är inte blandbara med varandra vilket leder till att uranet kommer att hamna selektivt i den organiska fasen. De två faserna separeras sedan från varandra – och då separeras också uranet från övriga metaller i vattenfasen.

Några av de organiska molekyler, s.k. extraktionsreagens, som används vid uranutvinning presenteras i tabell 1. Som lösningsmedel används ett organiskt lösningsmedel<sup>9</sup>. Isodekanol (C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>OH) kan användas som tillsats för att förhindra fasproblem såsom att en oönskad tredje fas bildas.

Tabell 1. *Kemisk formel och namn på extraktionsreagens som används vid uranutvinning.*

Extraktionsreagens	Kemisk formel
Di(2-ethylhexyl) fosforsyra (HDEHP eller D2HEPA)	(C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> O) <sub>2</sub> PO(OH)
Trioktylamin (TOA)	(C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> ) <sub>3</sub> N
Tridecylamin (TDA)	(C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> ) <sub>3</sub> N
Tributylfosfat (TBP)	(C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O) <sub>3</sub> PO
Trioktyl fosfinoxid (TOPO))	(C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> ) <sub>3</sub> PO
Alamine-336*	TOA+TDA
Adogen-364*	TOA+TDA

\* Alamine-336 och Adogen-364 är kommersiella blandningar av TOA och TDA.

<sup>8</sup> Vid lakning med karbonatlösning löses även molybden och vanadin ut till viss del.

<sup>9</sup> Exempelvis används ofta ett fotogenliknande kolväte med låg flampunkt.



Det är främst aminen<sup>10</sup> TOA och dess kommersiella blandningar samt det fosforbaserade extraktionsreagenset HDEHP som används vid uranutvinning industriellt. TBP är ett vanligt extraktionsreagens vid den fortsatta reningen av uranet innan konvertering till uranhexafluorid samt i uppberedningsindustrin vid separation av uran och plutonium.

HDEHP och TOA har tre fördelar jämfört med TBP för att extrahera uran från laktlösning:

- 1) Extraktionseffektiviteten (fördelningskonstanten) är högre.
- 2) Genom att justera syrahalten kan man enkelt justera extraktionen och styra om man vill ha hög eller låg uranseparation.
- 3) Uran kan extraheras från svavelsyralösning med HDEHP och TOA.

Fosforbaserade reagens används i mindre skala idag till fördel för aminerna. Aminerna verkar som anjonbytare<sup>11</sup> och ”byter” t.ex. en sulfatjon som är bunden till aminen mot ett negativt uransulfatkomplex jämfört med fosforreagensen som verkar som katjonbytare. Då färre metaller i laktlösningen – förutom uran – bildar anjonkomplex än katjonkomplex är aminextraktionen mer selektiv för uran än vad fosforreagensen är.

I tabell 2 ges en sammanställning av vilka laktlösningssmedel och vilka separationsmetoder som man använder sig av för att koncentrera uran från olika mineral.

*Tabell 2. Sammanställning av vilka laktlösningar och separationsmetoder som används vid olika typer av mineral.*

Laktlösningssmedel	Separationsmetod	Användning
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Utfällning med NaOH eller NH <sub>4</sub> OH	Basiska mineral (carnotit)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + ox-medel	Vätskeextraktion med: 1) Dialkylfosforsyror (t.ex. HDEHP) 2) Trialkylaminer (Alamine-336, Adogen-364)	Sura mineral (pechblände)
HNO <sub>3</sub>	Vätskeextraktion med TBP (tri-butylfosfat)	Höggradig pechblände
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Vätskeextraktion med HDEHP & TOPO	Fosfater

Efter att uranet extraherats till den organiska lösningen och separerats från övriga metaller återför man uranet till en ny vattenlösning genom så kallad återextraktion (*strip*). Vid extraktion från svavelsyra kan man använda ammoniumsulfat som striplösning genom att samtidigt tillsätta gasformig ammoniak. Ammoniumdiuranat (ADU) kan sedan fällas ut genom att man höjer pH i lösningen och fällningen separeras i en centrifug. U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> kan därefter fås genom behandling av ADU i ugn. Vanlig koksaltlösning (NaCl) skulle eventuellt också kunna användas som striplösning.

<sup>10</sup> En amin är en kolväteförening som även innehåller enkelbundet kväve.

<sup>11</sup> Joner med positiv laddning kallas katjoner. De flesta metalljoner är katjoner och dessa positivt laddade joner kan lätt attraheras av negativa joner, anjoner.

### 3.2.3 Jonbyte

I laktlösningar med svavelsyra finns flera olika negativa uran-sulfatkomplex som möjliggör uranseparation med anjonbytare. Då laktlösningen också innehåller många oönskade positiva metalljoner är anjonbyte mer effektivt för uranseparationen än katjonbyte. Bara järn(III), vanadin(V) och molybden(VI) bildar sulfatkomplex som kan störa under anjonbytet. Jonbyte av dessa joner kan dock minimeras genom oxidationskontroll dvs. att man ser till att pH och jonhalterna är i sådan koncentration att man undviker oönskade oxidationstal.

Även från basiska laktlösningar kan uran separeras selektivt – då i form av negativa karbonatkomplex.

Jonbyte är dock inte lika selektivt som vätskeextraktion, speciellt när det gäller järn- och silikatföreningar.

Anjonbytare som används är till exempel s.k. kvarternära ammoniumföreningar. I jonbytar-kolonner flödar laktlösningen nedåt igenom kolonnen och de negativa uran-sulfatkomplexen fastnar selektivt på jonbytar-massan – som är i form av små pärlor i storleken runt 1 mm. De uppsamlade urankomplexen kan sedan elueras<sup>12</sup> ut med svaga syralösningar med natrium- eller ammoniumklorid eller nitrat.

## 3.3 Utrustning

Förutom själva uranfyndigheten och konventionell kross- och gruvbrytningsteknologi krävs en kemisk anläggning för lakning och koncentrerings. Mycket av den utrustning som behövs i denna anläggning liknar den som används i konventionell kemisk industri.

Lakningen sker i tankar, vilka för svavelsyralakning ofta är gummibelagda för att vara korrosionsbeständiga och de är dessutom försedda med omrörare. I flera delar av processen behöver man separera fast fas från vätska och för dessa separationer använder man sig av förtjockare<sup>13</sup>, cykloner<sup>14</sup>, sorteringsapparater<sup>15</sup> (*classifiers*) och olika typer av filter.

Om man utnyttjar vätskeextraktion för att koncentrera uran behöver man extraktionsutrustning såsom ett antal mixer-settlers (MS). Varje MS består av en mixerdel som placerats i anslutning till en settlertank som kan vara upp emot 10-15 m lång (se figur 4). I strip- och tvättstegen kan även pulskolonner<sup>16</sup> användas som extraktionsutrustning.

---

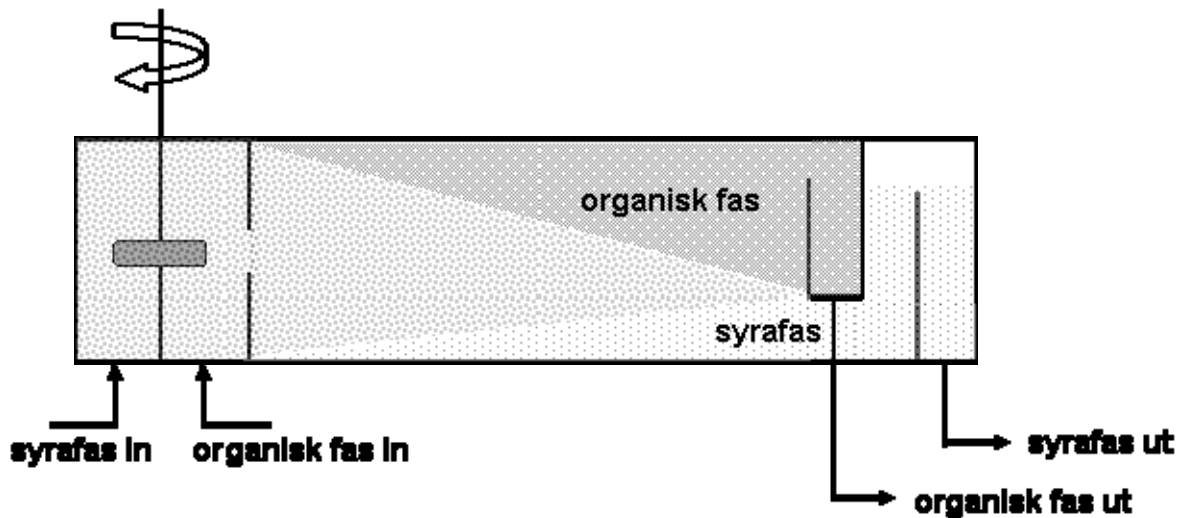
<sup>12</sup> Vid elueringen löses de adsorberade komplexen ut från kolonnen med hjälp av en lämplig lösning. Denna lösning får rinna igenom kolonnen och lösa komplexen, vilket kallas eluering.

<sup>13</sup> En förtjockare används för att koncentrera det fasta materialet i inkommande lösning genom att låta det fasta materialet sedimentera eller separeras med hjälp av ett gravitationsfält.

<sup>14</sup> En cyklon används för att separera fasta partiklar från gas eller, som i detta fall, vätska med hjälp av centrifugalkraften. I en cyklon leds materialet tangentiellt in i ett cylindriskt kärl – cyklonen. De fasta partiklarna slungas mot väggarna och tas ut i botten, medan vätskeströmmen tas ut i toppen.

<sup>15</sup> En sorteringsapparat (*classifier*) är i princip en typ av förtjockare, men där syftet främst är att separera ut det fasta materialet från en relativt utspädd lösning.

<sup>16</sup> En vertikal kolonn i vilken syrafasen möter den organiska fasen motströms. Kontakten mellan de två vätskorna ökas genom att med korta pulsningar pressa vätskorna genom perforerade plattor som sitter i kolonnen.



Figur 4: Principskiss över en mixer-settler där blandning sker i blandningsdelen till vänster och faserna separeras därefter i "settler"-delen till höger.

För separationen behövs också stora mängder extraktionsreagens, men då reagentet kan renas och återvinnas i processen är detta främst en engångstilläts och man behöver alltså inte återkommande köpa mer reagens.

Vid anjonbytesprocessen sker separationen i jonbytarkolonner (fasta eller rörliga) eller i s.k. *Resin-In-Pulp*<sup>17</sup> (RIP).

<sup>17</sup> *Resin-in-Pulp* innebär att man rör korgar med jonbytarmassa upp och ner i den mättade laktlösningen.

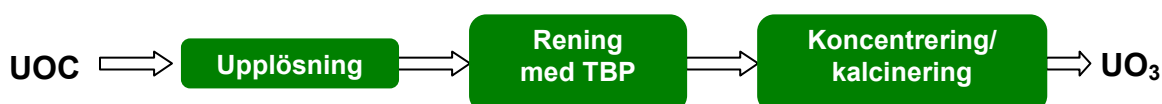
## 4 Urankonverteringsprocesser

I detta kapitel beskrivs processerna för att konvertera UOC till uranhexafluorid,  $UF_6$ , antingen genom direktfluorinering via urantrioxid,  $UO_3$ , eller genom en fluorineringsprocess i flera steg via  $UO_3$ , urandioxid ( $UO_2$ ), och urantetrafluorid ( $UF_4$ ). Dessa konverteringsprocesser är av stor vikt inom kärnteknisk industri då de anrikningsmetoder som används kommersiellt utgår från  $UF_6$ . Efter anrikning vill man konvertera  $UF_6$  till den form av uran man behöver för vidare användning, exempelvis till urandioxid för uranbränsle eller uranmetall (via  $UF_4$ ) för användning i kärnladdningar eller som bränsle för vissa reaktortyper. I kapitlet presenteras dessa processer samt några övriga konverteringsprocesser med något mer begränsad användning.

### 4.1 Konvertering från UOC till $UO_3$

De olika steg som ingår i konverteringen från UOC till  $UO_3$ , i den våta processen, illustreras i figur 5. Den UOC som producerats enligt processen som beskrivs i föregående avsnitt är fortfarande inte tillräckligt ren för vidare användning i en konverteringsanläggning. Det första steget i anläggningen är därför en reningsprocess.

Urankoncentratet löses i 40-60 % salpetersyra ( $HNO_3$ ) till uranyl-nitratlösning<sup>18</sup> och eventuella rester av fast material filtreras bort.



Figur 5: Flödesschema över konverteringsstegen för framställning av  $UO_3$  från UOC, enligt den våta processen.

Lösningen renas därefter med vätskeextraktion där uranet extraheras från resterande metaller med 30 % TBP. Detta sker genom motströmsextraktion i ett antal seriekopplade mixer-settlers, pulskolonner eller eventuellt packade kolonner (fyllkroppskolonner). Uranet återextraheras från organfasen genom en striplösning med låg salpetersyrhalt. Uranet från extraktionen är fortfarande i form av en uranyl-nitratlösning som måste konverteras till  $UO_3$  innan vidare konvertering till olika fluorföreningar kan ske. Denna konvertering sker antingen genom att lösningen koncentreras och kalcineras i ugn (denitreras) eller genom att uranyl-nitratlösningen neutraliseras med gasformig ammoniak som fäller ut uranet som ADU varefter fällningen filtreras, torkas och därefter kalcineras till  $UO_3$ . Istället för ammoniak kan man använda väteperoxid ( $H_2O_2$ ) för utfällning till  $UO_4 \cdot 2H_2O$  eller karbonatlösning för utfällning till AUC<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Uranyl-nitrat =  $UO_2(NO_3)_2$

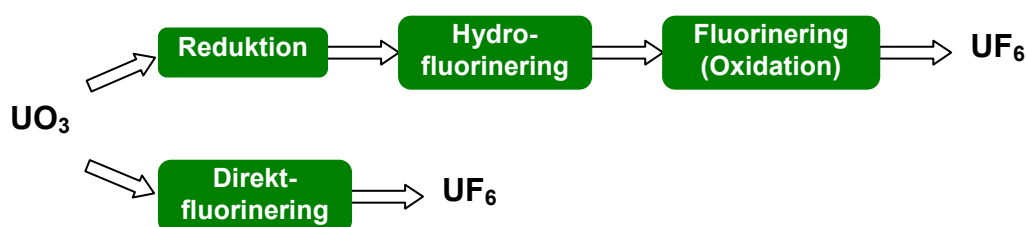
<sup>19</sup> AUC = ammoniumuranylkarbonat =  $(NH_4)_4UO_2(CO_3)_3$ .

Om man har för avsikt att producera UF<sub>6</sub> genom flerstegsfluorinering kan man också konvertera UOC direkt till UO<sub>2</sub> genom en torr process med hjälp av vätgas. Denna processväg ger färre processteg och har också fördelen att inga vätskeformiga ämnen måste hanteras. Nackdelen är att fler föroreningar kommer att stanna kvar och måste hanteras i de efterföljande processerna, vilket beskrivs vidare i avsnitt 4.2.2.

## 4.2 Konvertering från UO<sub>3</sub> till UF<sub>6</sub>

Dessa konverteringssteg syftar till att framställa uranhexafluorid, UF<sub>6</sub> (även kallad HEX), som sedan används som ingångsmaterial i de flesta urananrikningsprocesser (gasdiffusion, gascentrifugering, aerodynamisk separation och MLIS – molekylär laserisotopseparation).

I konverteringen fluorineras UO<sub>3</sub>, som produceras ur UOC (enligt föregående avsnitt), vilket antingen kan ske i ett enda steg, direktfluorinering, eller i flera steg, enligt figur 6.



Figur 6: Flödesschema över konverteringsstegen för fluorinering av UO<sub>3</sub>.

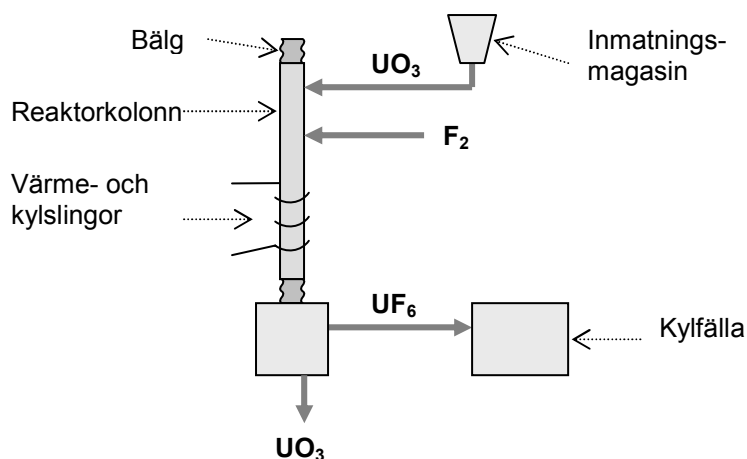
### 4.2.1 Direktfluorinering

Direktfluorinering kan användas både för storskalig och småskalig produktion av UF<sub>6</sub>, men är sannolikt mer fördelaktig för en mindre anläggning då den kräver färre utrustningsdelar och mindre utrymme. Nackdelen är dock att stora mängder fluorgas krävs, vilket är mycket dyrt (till skillnad från flerstegsfluorineringen där även vätefluorid används). UO<sub>3</sub> i fast fas samt fluorgas (F<sub>2</sub>) matas från toppen av en reaktor<sup>20</sup> varifrån UF<sub>6</sub> bildas, enligt följande reaktion:



UF<sub>6</sub> fångas sedan upp genom kondensering i en kylfälla och fast material, som oreagerad UO<sub>3</sub>, filtreras bort eller avlägsnas genom sedimentering. Fluorgas tillverkas ofta i en separat anläggning (se Bilaga 2). I stället för fluorgas kan även klortrifluorid, ClF<sub>3</sub>, användas som fluorkälla.

<sup>20</sup> I följande beskrivningar av de kemiska konverteringsprocesserna innebär benämningen *reaktor* kemiska reaktionskärl där de kemiska reaktionerna sker och det rör sig således i dessa fall inte om kärnreaktorer.



Figur 7: Schematisk bild av en reaktor för direktfluorinering.  $UO_3$  matas från en behållare och producerad  $UF_6$  samlas upp i en kylfälla.

Reaktorn (se figur 7), som består av ett vertikalt, kylt rör är inte speciellt platskrävande. En reaktor för produktion av flera tusen kg  $UF_6$  per dag kan vara 3 meter hög och ha en diameter på 20-25 cm. Reaktorväggarna värms upp till en arbetstemperatur på 450-540°C som hålls konstant med hjälp av ett ång- och kylvattensystem. För att uppnå en jämn och fin fördelning av  $UO_3$  i systemet finns vibrationssystem monterade på både reaktorn och inmatningssystemet. De vibrationer som uppkommer kompenseras av vibrationsdämpande expansionskopplingar, t.ex. bälgar, vilka också kompenserar för termisk expansion. Reaktorn är tillverkad i till exempel Monel<sup>21</sup> som tål den varma fluormiljön.

#### 4.2.2 Fluorinering i flera steg

Den vanligaste kommersiella metoden att framställa  $UF_6$  är att konvertera  $UO_3$  i flera steg. Konverteringen inleds med en reduktion av  $UO_3$  till  $UO_2$  och därefter fluorineras  $UO_2$  i två steg. Reduktionen till  $UO_2$  krävs eftersom det första fluorineringssteget kräver uran med oxidationstal fyra<sup>22</sup>.  $UO_3$  skulle ge en helt annan produkt än den eftersökta  $UF_4$ .

##### Reduktion: $UO_3 \rightarrow UO_2$

I denna reaktion leds  $UO_3$  in i en reaktor där den möts av motströmmande vätgas. I mötet mellan dessa får vätgasen urantrioxiden att reducera till urandioxid ( $UO_2$ ) enligt formel 2.



Trots att reaktionen är värmealstrande – exoterm – krävs tillförsel av ytterligare värme för att komma upp i en för reaktionen gynnsam temperatur och för att kompensera för värmeförluster. Vilken temperatur som är mest lämplig beror på reaktormodell, allt från 525°C till 820°C finns omnämnt i litteraturen. Som upphettningshjälp kan vätgasen förvärmas innan den

<sup>21</sup> Monel är en kommersiell benämning på en korrosionsbeständig legering med nickel (65-70 %) och koppar (20-29 %). Legeringen innehåller också järn och mangan (5 %).

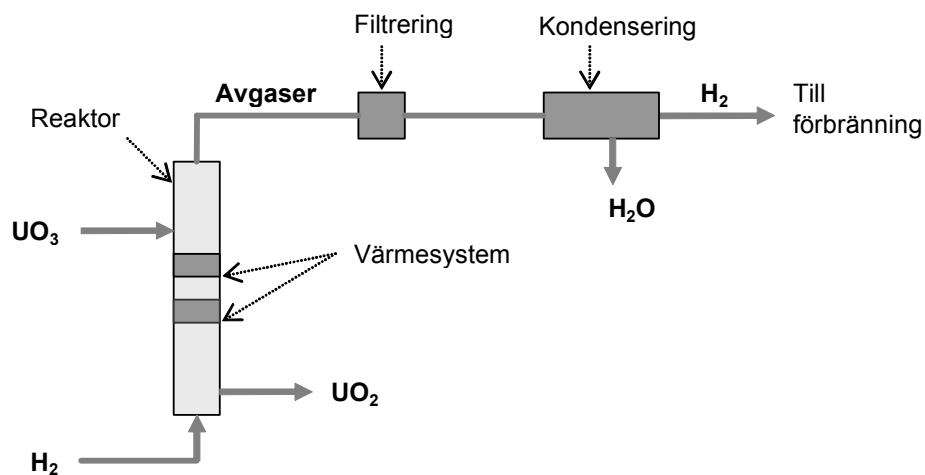
<sup>22</sup> Se fotnot 4.

introduceras i reaktorn. I stället för ren vätgas kan krackad ammoniak<sup>23</sup> användas. Dels är ammoniak en bra vätgaskälla och dels uppnås en mer kontrollerad reaktion.

Avgaser (vatten, oreagerad vätgas och eventuell kvävgas) från reaktorn filtreras för att avlägsna fasta partiklar och kyls sedan så att det i processen bildade vattnet kondenserar. Oreagerad vätgas förbränns sedan i ett anslutande gasförbränningssystem. Det är viktigt att inte  $\text{UO}_3$  tillåts sintra<sup>24</sup> i reaktorn, vilket sker vid för höga temperaturer och får till följd att den efterföljande hydrofluorinering försämras. En låg temperatur är å andra sidan ogynnsam då reaktiviteten minskar. Det är därför viktigt att temperaturen är noga kontrollerad. Den bildade urandioxiden, som är ett svart pulver, kan sedan fluorineras enligt beskrivningen nedan, men kan också användas direkt som reaktorbränsle i till exempel CANDU-reaktorer. Vid direkt bränsletillverkning sker dock reduktionen vid en högre temperatur varvid en kompaktare oxid erhålls.

Det är möjligt att hoppa över denna reduktion av  $\text{UO}_3$  till  $\text{UO}_2$  om den torra processen använts för att konvertera UOC – då ju  $\text{UO}_2$  fås direkt (se avsnitt 4.1).

Reduktionsreaktorn kan vara av typen fluidiserad bäddreaktor där den uppåtströmmande vätgasen (eller krackade ammoniaken) håller den nedåtfallande urantrioxiden i ett ”flytande” – fluidiserat – tillstånd, vilket ger stor kontaktyta och bättre reaktionseffektivitet. Figur 8 visar en schematisk bild av en sådan reduktionsreaktor, vilken typiskt kan bestå av ett 1-1,5 m högt rör med en diameter på mellan 15 och 25 cm. Denna reaktortyp kan med fördel vara konisk med den större diametern i toppen och fluidiseringen kan också förbättras genom tillsats av t.ex. kvävgas.



Figur 8: Vertikal reaktormodell för reduktion av  $\text{UO}_3$ .

En annan reaktortyp som kan användas är en skruvreaktor, vilken består av ett horisontellt rör med en skruvformad omrörare, där omröraren både tjänar som draghjälp för att förflytta  $\text{UO}_3$  genom reaktorn, och som finfördelare av  $\text{UO}_3$ -pulver.

För småskalig produktion och i det fall uranet är höganrikat med avseende på  $^{235}\text{U}$  kan en enklare reaktor användas bestående av vanlig kemisk laborieutrustning och en ugn där urantrioxiden placeras med vätgas eller krackad ammoniak strömmande över. Denna typ av

<sup>23</sup> Ammoniak,  $\text{NH}_3$ , som sönderdelats och bildat en gasblandning med tre delar vätgas och en del kvävgas.

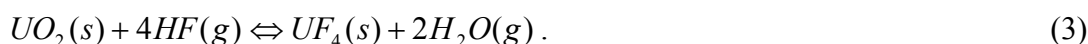
<sup>24</sup> Sintring är en kemisk process där ett mineral eller kemisk förening börjar smälta och kan bilda en ny form av fast fas vid stelning.

reaktor kan köras satsvis, eller kontinuerligt med hjälp av ett transportband som för in  $\text{UO}_3$  och ut  $\text{UO}_2$  ur ugnen. Reaktorerna är tillverkade i korrosionsbeständig och värmeresistent material, som Hastelloy<sup>25</sup>, Inconel<sup>26</sup>, Monel, eller rostfritt stål.

Utrustningen för denna reduktion är ofta sammankopplad med den för konvertering av  $\text{UO}_2$  till  $\text{UF}_4$ .

### Hydrofluorinering: $\text{UO}_2 \rightarrow \text{UF}_4$

Den bildade urandioxiden, vars konvertering beskrivits i föregående stycke, reageras sedan med vätefluorid, HF, i en exoterm reaktion, för att bilda urantetrafluorid,  $\text{UF}_4$ , (*green salt*) enligt formel 3.



Reaktionen kan ske vid temperaturer från  $300^\circ\text{C}$  till långt över  $500^\circ\text{C}$ . Vid  $500^\circ\text{C}$  sker reaktionen snabbt, men skapar en oönskad jämviktsblandning med vatten och vätefluorid. Problem med sintring av  $\text{UO}_2$ -partiklarna kan också uppstå vid högre temperatur vilket minskar kontaktytan med gasen. Vid en temperatur på  $300^\circ\text{C}$  kommer i stort sett all vätefluorid att reagera men i gengäld är reaktionen långsam. För att lösa detta temperaturproblem kan ett system med stegvis ökande temperatur användas. Man startar vid en lägre temperatur, runt  $300^\circ\text{C}$ , och ökar temperaturen successivt längs reaktorns längd. Flera reaktorer kan sedan seriekopplas där temperaturen höjs mellan reaktorerna. Avgaserna från fluorineringsprocessen filtreras och kyls till kondenserad HF. Därefter tvättas avgaserna i en skrubber<sup>27</sup> för att rena gasen från de sista spåren av HF.  $\text{UF}_4$ -produkten samlas upp, vägs och förvaras sedan i cylindriska behållare.

Det finns vitt skilda reaktortyper av olika geometrier som kan användas för  $\text{UF}_4$ -produktion beroende på produktionsbehov. Utrustningen är vanligtvis konstruerad så att  $\text{UO}_2$  möter HF motströms i reaktorn. Det viktiga är att skapa en så stor kontaktyta som möjligt mellan den fasta urandioxiden och den gasformiga vätefluoriden och låta reaktionsblandningen utsättas för värme.

En större anläggning använder vanligtvis en kontinuerlig process. Denna kan ske i en skruvreaktor, dvs. en horisontell reaktor där  $\text{UO}_2$  transporteras med hjälp av en skruvformad omrörare. Denna omrörare finfördelar också  $\text{UO}_2$ -partiklarna och förhindrar att de kakar sig. I reaktorn får  $\text{UO}_2$  sedan möta motströmmande HF.

En vertikal reaktor använder sig vanligtvis av en fluidiserad bädd för att skapa kontaktyta mellan de reagerande komponenterna. Den fasta urandioxiden hålls svävande – fluidiserad – genom uppåtströmmande HF-gas. Tillsats av annan, inert gas förekommer ibland i dessa reaktorer för att förbättra fluidiseringen. Den vertikala reaktorn kan vara konisk eller cylindrisk i formen och upp till 3 m hög, med en diameter på mellan 15 och 50 cm.

---

<sup>25</sup> Hastelloy är en kommersiell benämning på en korrosionsbeständig och värmetålig legering med nickel, krom och molybden .

<sup>26</sup> Inconel är en kommersiell benämning på en korrosionsbeständig och värmetålig legering med nickel och krom. Inconel-625 innehåller 60 % nickel och 22 % krom.

<sup>27</sup> Skrubbing innebär att avgaserna duschas med en vätska (vatten och kaliumhydroxid) som reagerar med HF som därmed tvättas ur avgaserna.



Horisontella reaktorer kan vara längre, mellan 1 och 7 m, med en diameter på mellan 10 och 40 cm. Utrustningen är tillverkad i Hastelloy, Inconel, Monel eller annat material som är både korrosions- och värmetåligt. Uppvärmningen av reaktorn sker genom ett externt värme- och kylsystem, för skruvreaktorer kan detta ske genom att reaktorn är placerad i en ugn. Kylningen sker då genom att luft strömmas genom ugnen.

Denna fluorineringsprocess utförs ofta i anslutning till reduktionen av  $UO_3$  till  $UO_2$ . De två processerna kan då ske i en så kallad L-reaktor där en vertikal reduktionsreaktor följs av en horisontell fluorineringsreaktor, vilka tillsammans bildar ett "L". De två processerna kan till och med, i liten skala, ske i samma utrustning.  $UO_3$  placeras då i en försluten reaktionskammare inuti en ugn. Under kontrollerad vätgasatmosfär reduceras  $UO_3$  till  $UO_2$ , varefter temperaturen sänks och HF flödas genom kammaren varvid  $UF_4$  bildas. I storskaliga system vill man dock skilja de två processerna åt för att försäkra sig om att både åtgången av HF och  $UF_4$ -produktens renhet optimeras.

### **Oxidation: $UF_4 \rightarrow UF_6$**

För att oxidera  $UF_4$  krävs ett starkt oxiderande ämne som fluorgas,  $F_2$ . Denna process körs normalt i en vertikal reaktor där den fasta urantetrafluoriden från föregående process matas in i toppen, via en fördelare som finfördelar pulvret, tillsammans med förvärmad (till över  $300^\circ C$ ) fluorgas. Ett litet överskott av fluorgas används för att säkra en fullständig reaktion. I annat fall kan oreagerad  $UF_4$  täppa till kärnen.  $UF_4$  hettas upp till flampunkten varvid den oxiderar<sup>28</sup> till  $UF_6$  enligt formel 4.



Reaktionen är snabb och exoterm.  $UF_4$  reagerar nästan omedelbart med en flamtemperatur på över  $1000^\circ C$ , så för att hålla reaktorn vid en optimal temperatur på ca  $500^\circ C$  kyls reaktorväggarna kontinuerligt. En för låg temperatur ger produktion av intermediära fluorider vilka lättare kan fastna på väggarna. Utgående gaser,  $UF_6$  och  $F_2$ , kyls och filtreras för att avlägsna partiklar av  $UF_4$ . Därefter kyls gaserna ytterligare i en kylfälla tills  $UF_6$  omvandlas till fast fas – ett vitt pulver. Överbliven fluorgas från kylfällan kan reageras med tillskott av  $UF_4$  i en sekundär reaktor vilket ger ytterligare  $UF_6$ . Oreagerad  $UF_4$  samt icke-gasformiga mellanprodukter såsom  $UF_5$  kan återmatas in i den primära fluorineringsreaktorn alternativt föras till den sekundära reaktorn.  $UF_6$  från den sekundära reaktorn leds till en kylfälla där  $UF_6$  tillåts övergå till fast fas. Fyllda kylfällor värms upp med extern uppvärmning så att  $UF_6$  övergår till vätska, vilken sedan transporteras till uppsamlingscylindrar. Dessa cylindrar kan sedan transporteras till en anrikningsanläggning och användas som ingångsmaterial – *feed* – i denna. Flera fluorineringsreaktorer och kylfällor kan användas parallellt.

Reaktorerna som används för fluorinering av  $UF_4$  kan vara s.k. flamreaktorer<sup>29</sup>. Dessa utgörs vanligtvis av vertikala kolonner vars höjd kan vara några meter och vars diameter kan vara ett par decimeter. En annan reaktortyp som kan användas är en fluidiserad bäddreaktor där  $UF_4$  hålls fluidiserad – svävande – med hjälp av den uppåtströmmande fluorgasen. Ett utmärkande drag hos utrustningen är kolonnens kylsystem (kylslingor runt kolonnen), liksom de

<sup>28</sup> Oxidation kallas en process där huvudkomponenten ökar sitt oxidationstal (se fotnot 4).

<sup>29</sup> I en flamreaktor sker reaktionen i kontakt med en öppen flamma. I detta fall utnyttjar man att reaktionsblandningen  $UF_4$  och fluorgas flammar upp vid uppvärmning. I annat fall kan en gas- eller oljeeldad flamma tillsättas i reaktionskammaren.

anordningar i toppen av reaktorn som finfördelar  $UF_4$  till ett fint pulver, till exempel genom vibrationer eller rotationsrörelser. För att kompensera för de vibrationer som uppkommer, men också för termisk expansion är reaktorn försedd med dämpande expansionskopplingar, t.ex. bälgar. Reaktorerna liknar därmed mycket de som används för direktfluorinering (Se avsnitt 4.2.1, figur 7). Utrustningen är tillverkad av korrosionståligt material, som Monel.

Ett exempel på en anläggning för fluorinering av  $UF_4$  består av en 4 m hög reaktorkolonn med en diameter på 20 cm. Till detta hör kylfällor med en längd på c:a 4,5 m och en diameter på 135 cm med tillhörande vågutrustning kopplad till kylfällorna. Uppsamlingscylindrarna för  $UF_6$  är typiskt omkring 3 m långa, med en diameter på ca 120 cm.

I stället för kylfällor kan en kyld cyklon användas för att separera ut producerad  $UF_6$  och då kan kylning och separering (med hjälp av centrifugalkraften) av utgående gaser utföras i ett enda steg. Komprimering av gaserna efterföljt av kondensering av  $UF_6$ , eller absorption av  $UF_6$  med efterföljande fraktionsdestillering, kan också ersätta kylfällorna.

Fluorgasen som behövs för detta konverteringssteg produceras elektrolytiskt i en separat anläggning, se Bilaga 2.

Har den torra processen använts för att framställa  $UO_2$  ur UOC (se avsnitt 4.1) kommer  $UF_6$ -produkten inte att vara tillräckligt ren.  $UF_6$  måste därför eftertvättas vilket kan ske genom en tvåstegsdestillering<sup>30</sup>. För reningsprocessen behövs korrosionsbeständiga destillationskolonner.

### 4.2.3 Utrustning

De konverteringssteg som beskrivits i avsnitt 4.2.1 och 4.2.2 innebär i många fall både värmning och kylning, samt hantering av korrosiva ämnen som  $F_2$ , HF,  $UF_4$  och  $UF_6$ . Material som klarar av dessa förhållanden är rostfritt stål samt olika nickelförstärkta legeringar som Monel, Hastelloy och Inconel. Dessutom krävs hantering av de värme- och kylmedium som används, till exempel vatten och ånga, samt temperaturkontroll. Utrustningen innefattar ofta hantering av gas (till exempel pneumatisk transport) och pulverformiga kemikalier, där den senare innebär dels transport och dels finfördelning av kemikalier (exempelvis tryck-, skak- och skruvanordningar). I de fall fasta partiklar kan störa fortsatt hantering av gas krävs filter (till exempel av sintrad metall eller grafit) och ibland en skrubber. Övrig utrustning som behövs är inmatningsmagasin, kylfällor och motorer för att driva till exempel transportanordningar och omblandare.

För småskalig konvertering av  $UO_3$  till  $UF_6$  kan många av reaktionerna ske med en enklare utrustning, exempelvis en ugn med kontrollerad miljö. Till detta kan en s.k. muffelugn användas. Detta är en ugn med indirekt uppvärmning där kemikalierna upphettas i en kontrollerad atmosfär i en innesluten kammare, ofta av keramiskt material. Denna typ av ugn används också i andra sammanhang, till exempel vid metallsintring och vid keramik- och glasarbeten. Det som skiljer en ugn för urankonvertering från standardutrustning är materialvalet i de komponenter som kommer i kontakt med kemikalierna, exempelvis insidan

---

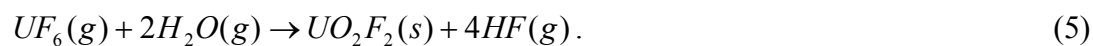
<sup>30</sup> Urankonverteringsanläggningen Metropolis Works i Illinois, USA, använder sig av denna torra process med efterföljande destillering.

av ugnen. Materialet måste klara den korroderande fluormiljön och legeringar som Monel och Inconel är därför vanliga.

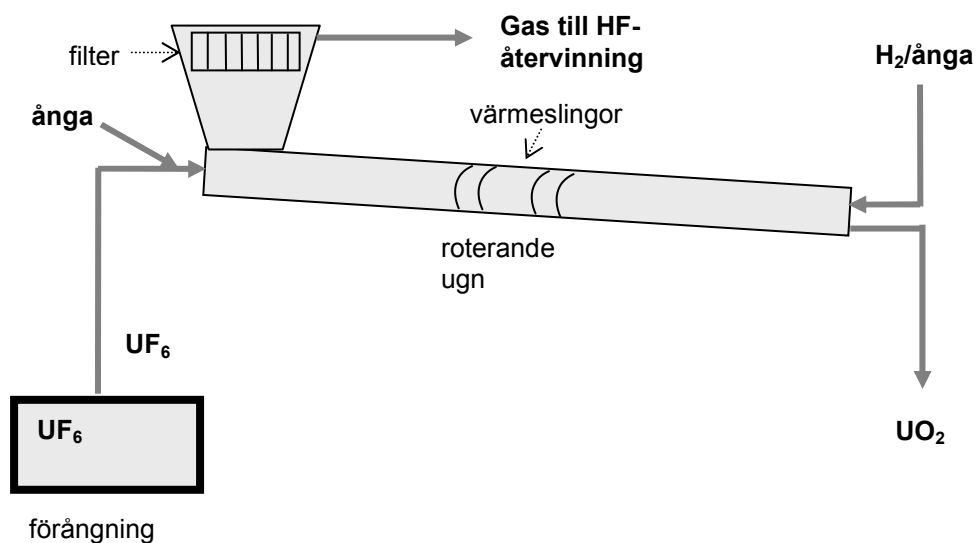
### 4.3 Konvertering av UF<sub>6</sub> till UO<sub>2</sub> för bränsletillverkning

För att tillverka bränsle av anrikat uran måste den förening som anrikats konverteras till antingen UO<sub>2</sub> eller i vissa fall metall, beroende på reaktortyp. I detta avsnitt beskrivs konverteringen av UF<sub>6</sub> till UO<sub>2</sub>, vilken kan ske genom tre olika processer, en torr och två våta.

En torr process som används för kommersiell tillverkning av reaktorbränsle är den s.k. IDR-processen<sup>31</sup> som utvecklats av BNFL och används vid konverteringsanläggningen Springfields i Storbritannien. I denna process matas förångad UF<sub>6</sub> och vattenånga in i en roterande ugn varvid uranylfluoridpulver (UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) bildas enligt

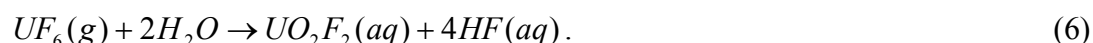


I andra delen av ugnen reduceras UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> till UO<sub>2</sub> i pulverform genom att vätgas och ytterligare vattenånga tillförs processen. En schematisk bild av denna process ges i figur 9.



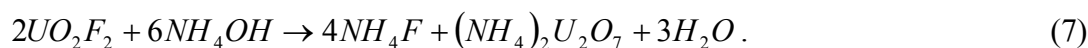
Figur 9. Schematisk bild av IDR-processen.

I de våta processerna löses och hydrolyseras UF<sub>6</sub> till UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> i vatten enligt reaktionen



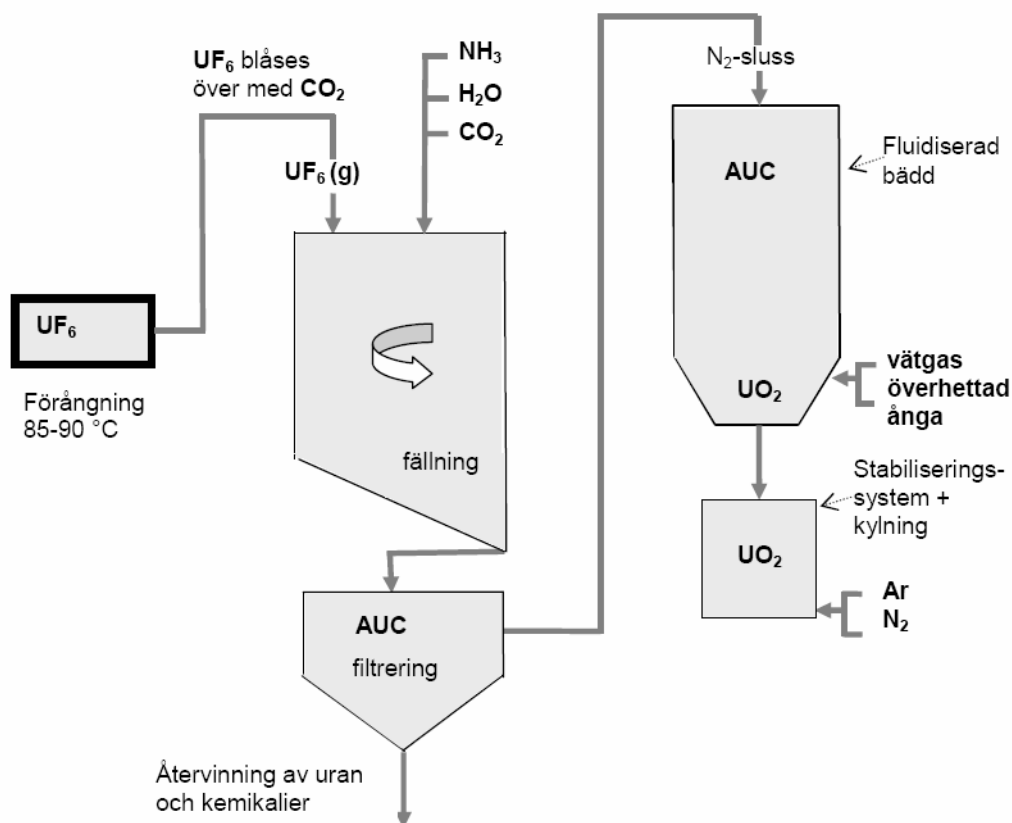
En värmeväxlare används för att värma inkommande UF<sub>6</sub> och kyla uranylfluoriden som bildas i processen. I den ena processen tillsätts sedan ammoniak för att fälla ut ammoniumdiuranat, ADU, enligt

<sup>31</sup> IDR står för Integrated Dry Route.



Efter filtrering, tvättning och torkning konverteras diuranatet till  $\text{UO}_3$  i en roterande ugn i vattenånga-kvävgasatmosfär vid  $450\text{-}500^\circ\text{C}$ . Slutligen reduceras  $\text{UO}_3$  till  $\text{UO}_2$  med vätgas, också det i en roterande ugn, vid  $570\text{-}650^\circ\text{C}$ .

I den andra våta processen, AUC-processen<sup>32</sup> som beskrivs i figur 10, fäller man ut AUC genom att förångad  $\text{UF}_6$  får reagera med ammoniumkarbonat.



Figur 10. Schematisk bild av AUC-processen vid Westinghouse bränslefabrik i Västerås.

Förångad  $\text{UF}_6$  blåses in i ett fällkärl innehållande en ammoniumkarbonatlösning. Blandningen cirkulerar i tanken och AUC fälls ut. När blandningen är klar sugs AUC-blandningen från fälltanken till ett roterande filter. Den AUC-fällning som samlas på filtret tvättas och torkas med torr, varm luft. Det torra pulvret sugs sedan in i en fluidiserad bädd. I den fluidiserade bädden tillförs vätgas och överhettad ånga och AUC-pulvret oxideras till  $\text{UO}_2$  vid en ugnstemperatur av ca  $600^\circ\text{C}$ . Detta pulver stabiliseras och kyls i en vattenkyld stabiliseringskanna med tillsats av kvävgas och argon.

<sup>32</sup> AUC = ammoniumuranylkarbonat =  $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ . AUC-processen används bland annat vid Westinghouse bränslefabrik i Västerås.

Utrustning för konvertering av  $UF_6$  till  $UO_2$  är konventionell kemisk processutrustning tillverkad i material som är beständiga mot  $UF_6$  och fluorgas. Fällkärlen är tunna, rektangulära skivtankar för att minska kritikalitetsrisken och har dessutom sluttande botten för att förhindra sedimentering.

I den torra processen används en roterande ugn. I de våta processerna blandas  $UF_6$  med de andra kemikalierna i en tank med kontrollerad temperatur. Gasen förs ofta in genom ett speciellt munstycke för att förhindra att fasta partiklar bildas. I storskaliga processer används industriugnar eller fluidiserade bäddar med kontrollerad atmosfär. Dessa är ofta 30-60 cm i diameter och 3-8 m långa för låganrikat material. Ju mer höganrikat material desto mindre är utrustningen på grund av kritikalitetsrisken.

## 4.4 Konvertering till $UCl_4$ från $UO_2$ eller $UO_3$

Skälet till att konvertera uran till  $UCl_4$  (urantetraklorid) är företrädesvis för anrikning. Denna förening används i två olika former i två olika processer: vattenfria kristaller för EMIS och vattenlösning för den kemiska utbytesprocessen (CHEMEX). Det finns flera olika sätt att framställa  $UCl_4$  där några av de vanligaste processerna som använts i större skala beskrivs nedan.

En möjlig framställningsprocess är att lösa  $UO_3$  i saltsyra (HCl), vilket ger  $UO_2Cl_2$  som sedan kan reduceras till  $UCl_4$  genom elektrolys. Denna process har dock inte använts i större skala och ger inte heller en helt vattenfri produkt – vilket är önskvärt om man har för avsikt att använda producerat  $UCl_4$  i EMIS.

Om man vill framställa en vattenfri produkt kloreras istället  $UO_2$  med hjälp av något klorinnehållande reagens som exempelvis  $CCl_4$  (koltetraklorid) eller klorgas (tillsammans med kolpulver och kolmonoxid). I större skala har man främst använt sig av kloreringsreaktioner med  $CCl_4$  – antingen i vätskefas eller i ångfas.

I den vätskebaserade processen används en mantlad reaktor med omrörning i vilken  $UO_2$ -pulver tillförs koltetrakloriden. För att reaktion skall ske måste systemet värmas till ca  $400^\circ C$  ( $CCl_4$  reagerar vid  $375^\circ C$ ). När reaktionen är fullständig tas  $UCl_4$  ut genom centrifugering och torkas. Orenheter kan destilleras bort genom sublimering.

I ångfasprocessen placeras  $UO_2$  i en gasuppvärmd roterande, omrörd reaktor genom vilken gasformig koltetraklorid flödar. Vid slutet av körningen kyls reaktorn och  $UCl_4$  tas ut. Även här kan orena satser destilleras.

Utrustningen är företrädesvis småskalig standardmässig kemisk processutrustning. I den vätskebaserade processen med  $CCl_4$  används ett mantlat, uppvärmt reaktorkärl med inmatningsträtt och återflödestorn. Satsstorleken är ofta 500 kg eller mindre för båda processerna. Tankarna har en sprängplatta och rörledningar för att innesluta och minimera effekterna av en snabb tryckökning. I ångprocessen används en trycksatt roterande ugn. Det behövs också viss kringutrustning såsom cyklonseparatorer, uppsamlingstrattar, plattformsvågar, sodaskrubbers och tankar. Ovanlig, och därmed karakteristisk utrustning, som kan användas för att rena urantetraklorid är en utrustning för vakuumdestillering.

## 4.5 Konvertering till uranmetall

Vid konvertering till metall används olika metoder beroende på vilket material man utgår från. I detta avsnitt beskrivs konvertering till uranmetall genom reduktion av  $UF_4$ , reduktion av  $UO_2$  och reduktion av  $UCl_4$ . Det kan dock nämnas att den första rena uranmetallen som framställdes under Manhattanprojektet<sup>33</sup> tillverkades genom elektrolys. Man utgick då från  $KUF_5$  (kaliumuranyl-pentafluorid) eller  $UF_4$  som löstes i en saltblandning (80 %  $CaCl_2$  och 20 %  $NaCl$ ). Metoden övergavs 1943 till förmån för den mindre kostsamma reduktionen av  $UF_4$  med magnesium.

### 4.5.1 Konvertering av $UF_6$ till uranmetall via $UF_4$

Om man ämnar producera anrikad uranmetall utgår man vanligtvis från  $UF_6$  eftersom de flesta anrikningsmetoder använder sig av denna uranförening. Det första steget i processen är då att reducera  $UF_6$  till  $UF_4$  som sedan kan reduceras vidare till metall.

#### Reduktion: $UF_6 \rightarrow UF_4$

Reduktion av  $UF_6$  till  $UF_4$  med vätgas sker enligt



Processen kan ske såväl i en kallväggig som i en varmväggig reaktor. I en varmväggig reaktor tillförs processen värme genom uppvärmning av reaktorns vägg. Reaktorväggen är isolerad för att upprätthålla en processtemperatur på  $630^\circ C$ . Både  $UF_6$  och vätgas tillförs processen. Urantetrafluoriden tas ut från botten av reaktorn och pulveriseras. För att minimera deposition av  $UF_4$  på väggarna och för att underlätta transporten av  $UF_4$  genom systemet är reaktorn utrustad med pneumatiska vibratorer. I denna typ av reaktor kan mer än 10 ton  $UF_6$  processas per dygn vilket innebär att processen inte är lämplig för reduktion av höganrikat uran på grund av risk för kritikalitet. Processen går kontinuerligt utom då reaktorn rengörs.

För reduktion av höganrikad  $UF_6$  har man utvecklat en smal kallväggig reaktor. I den kallväggiga reaktorn förs reaktanterna,  $UF_6$  och vätgas, tillsammans med en liten mängd fluorgas in i en vertikal tubreaktor genom ett speciellt munstycke. Reaktorns dimensioner är typiskt 10 cm i diameter och 2,5 m hög. Den exoterma bireaktionen som sker mellan väte och fluor ger det värme som krävs för att huvudreaktionen skall kunna starta<sup>34</sup>.  $UF_4$  i fast form bildas i den varmaste delen av reaktorn och tas ut från botten med hjälp av en skruvtransportör. Vid reduktion av  $UF_6$  innehållande höganrikat uran kyls väggarna i reaktorns övre del till  $150-200^\circ C$ . Även denna typ av reaktor är utrustad med vibratorer för att minimera deposition av  $UF_4$  på reaktorväggen.

Såväl kallväggiga som varmväggiga, temperaturreglerade reaktorer, rör, ventiler, filter och rörkopplingar är tillverkade i korrosionsbeständiga material såsom Monel eller Inconel. Det behövs också kringutrustning i form av cykloner, filter, fällor, kylfällor och skrubbers.

<sup>33</sup> Manhattanprojektet är benämningen på det amerikanska programmet för att framställa den första atombomben.

<sup>34</sup> Reaktionen mellan vätgas och fluorgas är endast till för att alstra det värme som behövs för reaktionen.

### Reduktion: $UF_4 \rightarrow U$ (metall)

Två processer som har utvecklats kommersiellt är reduktion av  $UF_4$  (*green salt*) med kalcium,



och magnesium,



till metall. Både  $UF_4$  och de reduktionsmedel man använder (Mg eller Ca) måste vara mycket rena. Det finns för- och nackdelar med både magnesium och kalcium. I reduktionsreaktioner där tillräckligt mycket värme utvecklas för att smälta både uran och slagg gör de olika densiteterna att faserna separeras i två lager och en urantacka bildas. Detta är fallet för både magnesium och kalcium.

Reduktion med kalcium kan ske under atmosfärstryck eftersom kalciumfluorid,  $CaF_2$ , har lägre smältpunkt än kalciummetall. Det är en starkt exoterm process och värmets utvecklas i reaktionen är tillräckligt för att smälta både uranmetallen och fluoridrestprodukterna, i form av  $CaF_2$ , även då reaktionen börjar vid rumstemperatur. En nackdel är dock att högren kalcium är dyrt. Denna process används företrädesvis vid reduktion av höganrikat uran. Reduktionen sker i mindre satser under vakuum.

Reduktion med magnesium används oftare kommersiellt, exempelvis i tillverkningen av naturligt uranmetallbränsle, eftersom magnesium är billigare och lättare att hantera än kalcium. Det är också lättare att få tag på högren magnesium. En nackdel är dock att reduktionsreaktionen med magnesium inte utvecklar lika mycket värme varför reaktanterna måste förvärmas till smältpunkten för  $MgF_2$ . Värmningen orsakar ett högt ångtryck varför reaktionen måste ske i en förseglad reaktor. En blandning av magnesium och  $UF_4$  värms till  $600^\circ C$  i en elektrisk ugn. När reaktionen väl initierats stiger temperaturen till ca  $1500^\circ C$  vilket är högre än urans smälttemperatur,  $1130^\circ C$ . Reduktion med magnesium sker i större satser i inert atmosfär.

Det är också möjligt att använda natrium för reduktionen men mindre praktiskt eftersom natrium har så låg kokpunkt att processen skulle behöva köras under mycket högt tryck.

Reduktionen sker i en s.k. retort eller reduktionsbomb av metall som på insidan är klädd med en s.k. liner. Linern är tillverkad i ett eldfast material, ofta i keramisk form, av exempelvis magnesiumoxid ( $MgO$ ). En blandning av granulärt  $UF_4$  och magnesium eller kalcium hålls i retorten som sedan förseglas (exempelvis genom att locket fästs med bultar). Om kalcium används tillsätts också en liten mängd jod för att reaktionen skall starta fortare. Retorten placeras sedan i en ugn och värms tills reaktionen startar. När reaktionen är klar innehåller retorten flytande uranmetall i botten och flytande  $CaF_2$  eller  $MgF_2$  ovanpå. När systemet svalnat och slaggen avlägsnats återstår ett uranblock. För småskalig produktion används en högfrekvent induktionsugn och för produktion i större skala resistansuppvärmda industriugnar. I båda typerna av ugnar används termoelement och termiska styrenheter (*thermal controllers*) av standardtyp. Retorter som används för produktion i liten skala eller för höganrikat uran är typiskt smalare än de som används inom konventionella metallo-

termiska reduktionsprocesser. I retorter för småskalig produktion tas linern eller smältdegeln ut tillsammans med uranet och bryts sedan bort.

#### **4.5.2 Konvertering av $UCl_4$ till uranmetall**

Uranföreningen urantetraklorid,  $UCl_4$ , används som ingångsmaterial för anrikning med EMIS och i den kemiska utbytesprocessen, CHEMEX. Vid anrikning med EMIS bryts  $UCl_4$ -molekylerna upp och uran i metallform samlas på kollektorn. I CHEMEX-processen är dock  $UCl_4$  slutprodukten. Det är möjligt att reducera  $UCl_4$ -ånga med hjälp av smält magnesium. Detta är den s.k. Krollprocessen som används för att framställa metalliskt zirkonium och hafnium. Processen försåras dock av att  $UCl_4$  är starkt hygroskopiskt och processen måste därför ske i kontrollerad atmosfär eftersom uranmetallen annars kontamineras med  $UO_2$  (vilken bildas då  $UCl_4$  reagerar med vatten). En annan svårighet är att  $UCl_4$  måste tillföras processen som ånga eftersom den har så låg kokpunkt ( $789^\circ C$ ) jämfört med uran ( $1457^\circ C$ ).

System för denna konvertering är ej belagd med exportkontroll.

#### **4.5.3 Konvertering av uranoxid till uranmetall**

Den enda uranoxid som är praktiskt möjlig att reducera till metall är  $UO_2$ , vilket kan göras med kalcium, varvid kalciumoxid ( $CaO$ ) bildas. Smältpunkten för  $CaO$  är dock så hög ( $2615^\circ C$ ) och värmeutvecklingen vid reaktionen så låg att endast uranet – och inte slaggen – smälter. Man måste därför utveckla en metod för att skilja slaggen från uranet om man ämnar utnyttja denna konverteringsprocess.

System för denna konvertering är ej belagd med exportkontroll.



## 5 Indikatorer på urankonvertering

Inköp av urankonverteringssystem som är kontrollerade enligt NSG Part 1 (*”särskilt konstruerat eller iordningställt system”*) betyder att utrustningen skall användas för kärntekniska ändamål. Om utrustningen skall användas i kärnvapensammanhang eller inte, är dock inte möjligt att utläsa bara ur vilken urankonverteringsutrustning man är intresserad av, åtminstone inte om det rör sig om utrustning för konvertering av naturligt eller låganrikat uran.

Det mesta av den utrustning som används i en konverteringsanläggning är i princip konventionell, kemisk industriutrustning och således ej under exportkontroll över huvud taget. När det gäller sådan utrustning är det mycket svårt att dra slutsatsen om den skall användas för urankonvertering eller inte. Viss utrustning måste dock vara kritikalitetssäker, och både utrustningens dimensioner och geometri kan då vara indikatorer på att den är avsedd för hantering av fissilt material. En anläggning kan på grund av kritikalitetsrisken också behöva kritikalitetsdetektorer (dvs neutrontektorer). Huvuddelen av utrustningen måste dessutom vara korrosionsbeständig mot UF<sub>6</sub>, vilket innebär att den är tillverkad i Monel, Inconel eller Hastelloy.

Då UF<sub>6</sub>, HF och F<sub>2</sub> är hälsovådliga gaser kan skyddsutrustning för dessa gaser vara en indikator.

Vissa konverteringssteg kan dock anses vara mindre användbara i civila applikationer som exempelvis konvertering till uranmetall. Uranmetall är den form av uran som används i kärnladdningar, men kan dock också användas i vissa reaktortyper och som ingångsmaterial för laseranrikning med AVLIS-metoden. Inköpsförsök av högren kalcium eller magnesium – som används för framställning av uranmetall – kan vara en indikator på att man har intresse för uranmetall.

Om man avser att ha en inhemsk produktionskapacitet av UF<sub>6</sub> kräver det i sin tur råmaterial i form av urankoncentrat eller uranmineral. Om man avser att använda inhemskt utvunnet uranmineral för kärnvapenändamål krävs tillgång till uranutvinningsanläggningar och urangruber varför sådana i sig kan vara indikatorer. Man behöver också fluorgas, och vanligtvis även vätefluorid, för att kunna producera UF<sub>6</sub>. Idag används 70-80 % av den globala fluorgasproduktionen för UF<sub>6</sub>-produktion och ett intresse för fluorgas eller fluorgasproduktion kan således vara en indikator på urankonvertering. Det bör dock påpekas att sådana anläggningar också kan ha andra förklaringar. Om man avser att producera sin fluorgas själv krävs exportkontrollerade elektrolysceller. Däremot är elbehovet inte särskilt stort för att driva en relativt stor fluorgasfabrik.

Intresse och inköpsförsök av större mängder extraktionsreagens såsom TOA, TBP, TOPO eller HDEHP kan också vara indikatorer på uranutvinning och urankonvertering. Övriga processkemikalier (olika syror, baser, gaser, lösningsmedel och oxidationsmedel) som används har så utbredd användning inom konventionell kemisk industri att de inte kan användas som indikatorer på urankonvertering.

För att kunna analysera sin framställda uranprodukt och för analys för processkontroll behöver man analysutrustning som exempelvis ICP-MS<sup>35</sup> som med vissa specifikationer är under exportkontroll.

---

<sup>35</sup> ICP-MS = Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer

## 6 Konverteringsanläggningar

I tabellen nedan ges en sammanställning över de urankonverteringsanläggningar som idag är i drift runt om i världen. Notera dock att det i sammanställningen inte ingår bränslefabriker, även om det i vissa sådana anläggningar sker en del konverteringsprocesser.

Tabell 3. Civila konverteringsanläggningar i drift [6].

Land	Process	Anläggning	Produktion (ton U/år)
Argentina	$U_3O_8 \Rightarrow UO_2$ , TBP/NHU	Cordoba (Phase 2)	180
Brasilien	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Sao Paolo	90
	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Resende (planerad)	500
Frankrike	$U_3O_8 \Rightarrow UF_4$ , U	Malvesi	11 000
	$UF_4 \Rightarrow UF_6$	Pierrelatte (Comurhex)	11 000
	upparbetat U $\Rightarrow$ $UF_6$	Pierrelatte (Comurhex)	300
Indien	$U_3O_8 \Rightarrow UO_2$	Hyderabad	250
	$U_3O_8 \Rightarrow U$	Trombay	i.u.
Japan	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Ning-yo-Toge	93
Kanada	$U_3O_8 \Rightarrow UO_3$	Blind River	10 190
	$UO_3 \Rightarrow UF_6$	Port Hope ( $UF_6$ )	10 127
	$UO_3 \Rightarrow UO_2$	Port Hope ( $UO_2$ )	2500
Ryssland	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Angarsk, Irkutsk	18 700
	upparbetat U $\Rightarrow$ $UF_6$	Elektrostal	700
	upparbetat U $\Rightarrow$ $UF_6$	Tomsk 7 Conversion	i.u.
Storbritannien	U residues $\Rightarrow$ $UO_2/U_3O_8$	EURRP	65
	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Springfields ( $UF_6$ )	6000
	$UF_6 \Rightarrow UO_2$	Springfields ( $UO_2$ )	710
Sydafrika	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Valindaba	700
Sydkorea	$UF_6 \Rightarrow UO_2$ , AUC	Taejeon	200
Turkiet	$U_3O_8 \Rightarrow UO_2$	CNRC Nuclear Fuel Pilot Plant	1
USA	$U_3O_8 \Rightarrow UF_6$	Metropolis Works	14 000

## 7 REFERENSER

---

- [1] "*Nuclear Chemical Engineering*", Benedict, Pigford, Levi, McGraw-Hill Company, 1981
- [2] "*Metallurgy of the rarer metals, No 8, Uranium*", J.H. Gittus, Butterworths, 1963
- [3] "*Chemistry in Nuclear Technology*", S. Peterson & R.G. Wymer, Pergamon Press, 1963
- [4] "*Principles and Practices of Solvent Extraction*", Rydberg, Musikas, Choppin, Marcel-Dekker Inc., 1992
- [5] Global Security, <http://www.globalsecurity.org/wmd/facility/metropolis.htm>
- [6] "*2004 World Nuclear Industry Handbook*", Nuclear Engineering International, 2004

# BILAGA 1

## Exportkontrollerad utrustning för urankonvertering.

Utdrag ur rådets förordning (EG) nr 1504/2004 av den 19 juli 2004 om ändring och uppdatering av förordning (EG) nr 1334/2000, bilaga I.

0B003 Anläggning för omvandling av uran och utrustning som är särskilt konstruerad eller iordningställd för detta, enligt följande:

- a) System för omvandling av uranmalmkoncentrat till  $UO_3$ .
- b) System för omvandling av  $UO_3$  till  $UF_6$ .
- c) System för omvandling av  $UO_3$  till  $UO_2$ .
- d) System för omvandling av  $UO_2$  till  $UF_4$ .
- e) System för omvandling av  $UF_4$  till  $UF_6$ .
- f) System för omvandling av  $UF_4$  till uranmetall.
- g) System för omvandling av  $UF_6$  till  $UO_2$ .
- h) System för omvandling av  $UF_6$  till  $UF_4$ .
- i) System för omvandling av  $UO_2$  till  $UCl_4$ .

0C001 "Naturligt uran" eller "utarmat uran" eller torium i form av metall, legeringar, kemiska föreningar eller koncentrat och varje annat material som innehåller ett eller flera av de ovan nämnda materialen.

*Anm.: 0C001 omfattar inte följande:*

*a) Fyra g eller mindre av "naturligt uran" eller "utarmat uran", när det ingår i sensorkomponenten, i instrument.*

*b) "Utarmat uran" speciellt framställt för följande civila icke-nukleära tillämpningar:*

- 1. Skärmning.*
- 2. Emballering.*
- 3. Ballast med en massa som inte är större än 100 kg.*
- 4. Motvikter med en massa som inte är större än 100 kg.*

*c) Legeringar innehållande mindre än 5 % torium.*

*d) Keramiska produkter innehållande torium som har framställts för icke-nukleär användning.*

1B225 Elektrolytiska celler för produktion av fluor med en produktionskapacitet större än 250 g fluor per timme.

1C227 Kalcium med båda följande egenskaper:

- a) Innehåller mindre än 1 000 viktdelar per miljon (ppm) metalliska orenheter andra än magnesium, och
- b) innehåller mindre än 10 ppm bor.

1C228 Magnesium med båda följande egenskaper:

- a) Innehåller både mindre än 200 viktdelar per miljon (ppm) metalliska orenheter andra än kalcium, och
- b) innehåller mindre än 10 ppm i vikt räknat av bor.

- 1C238 Klortrifluorid ( $\text{ClF}_3$ ).
- 2A225 Smältdeglar tillverkade av material som är resistent mot flytande aktinidmetaller, enligt följande:
- a) Smältdeglar som har följande två egenskaper:
1. En volym mellan  $150 \text{ cm}^3$  och  $8\,000 \text{ cm}^3$ , och
  2. tillverkade av eller belagda med något av följande material med en renhet av 98 viktprocent eller högre:
    - a) Kalciumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ).
    - b) Kalciumzirkonat (metazirkonat) ( $\text{CaZrO}_3$ ).
    - c) Ceriumsulfid ( $\text{Ce}_2\text{S}_3$ ).
    - d) Erbiumoxid (erbia) ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ).
    - e) Hafniumoxid (hafnia) ( $\text{HfO}_2$ ).
    - f) Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ).
    - g) Nitrerade niob-titan-volframlegeringar (ca 50 % Nb, 30 % Ti, 20 % W).
    - h) Yttriumoxid ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). eller
    - i) Zirkoniumoxid ( $\text{ZrO}_2$ ).
- b) Smältdeglar som har följande två egenskaper:
1. En volym mellan  $50 \text{ cm}^3$  och  $2\,000 \text{ cm}^3$ , och
  2. tillverkade av eller fodrade med tantal som har en renhet av 99,9 viktprocent eller högre.
- c) Smältdeglar som har alla följande egenskaper:
1. En volym mellan  $50 \text{ cm}^3$  och  $2\,000 \text{ cm}^3$ ,
  2. tillverkade av eller fodrade med tantal som har en renhet av 98 viktprocent eller högre, och
  3. belagda med tantalkarbid, nitrid eller borid (eller någon kombination därav).
- 2B226 Induktionsugnar med kontrollerad atmosfär (genom vakuum eller inert gas) och kraftförsörjning till dessa enligt följande:
- ANM.: SE ÄVEN AVSNITT 3B.**
- a) Ugnar med alla följande egenskaper:
1. Kan arbeta vid temperaturer över  $1\,123 \text{ K}$  ( $850 \text{ °C}$ ),
  2. har induktionsspolar med 600 mm i diameter eller mindre, och
  3. är konstruerade för en ingångseffekt på minst 5 kW.
- b) Kraftförsörjning med en specificerad utgångseffekt på minst 5 kW.
- Anm.: Avsnitt 2B226.a omfattar inte ugnar konstruerade för behandling av halvledarwafers.*
- 2B227 Vakuumkontrollerade eller andra ugnar med kontrollerad atmosfär för smältning och gjutning av metall och därtill hörande utrustning enligt följande:
- a) Omsmältningsugnar (ljusbåge) och gjutugnar med följande två egenskaper:
1. Elektrodåtgång mellan  $1\,000 \text{ cm}^3$  och  $20\,000 \text{ cm}^3$ , och
  2. som kan arbeta med smälttemperaturer över  $1\,973 \text{ K}$  ( $1\,700 \text{ °C}$ ).
- b) Ugnar med elektronstrålesmältning samt plasmaatomisering och smältning med följande två egenskaper:
1. En effekt på minst 50 kW och
  2. som kan arbeta med smälttemperaturer över  $1\,473 \text{ K}$  ( $1\,200 \text{ °C}$ ).
- c) Datorstyrning och datorövervakning speciellt utformade för någon av ugnarna i avsnitt 2B227.a eller 2B227.b.

3A233

Masspektrometrar, andra än de som omfattas av avsnitt 0B002.g, som kan mäta joner med en massa av 230 amu (amu = atommassenhet) eller mer och som har en upplösning bättre än 2/230, samt jonkällor till sådana, enligt följande:

- a) Masspektrometrar med induktivt kopplad plasmajonkälla (ICP/MS).
- b) Masspektrometrar med glimurladdningsjonkälla (GDMS).
- c) Masspektrometrar med jonkälla som bygger på termisk jonisation (TIMS).
- d) Masspektrometrar med jonkälla som använder indirekt upphettning ("electron bombardment") och med en jonisationskammare tillverkad av, fodrad eller klädd med material som är motståndskraftigt mot  $UF_6$  (uranhexafluorid).
- e) Masspektrometer av molekylstråletyp, antingen
  1. med en jonisationskammare gjord av, fodrad eller klädd med rostfritt stål eller molybden och som är försedd med en kylfälla för 193 K (-80 °C) eller lägre, eller
  2. med en jonisationskammare gjord av, fodrad eller klädd med material som är resistent mot  $UF_6$ .
- f) Masspektrometrar utrustade med jonkälla med mikrofluorering konstruerad för att användas med aktinider eller aktinidfluorider.

## BILAGA 2

### Produktion av fluorgas och vätefluorid

För att producera  $UF_6$  eller  $UF_4$  krävs ett fluoreringsmedel såsom fluorgas ( $F_2$ ) eller vattenfri vätefluorid (HF). Även klortrifluorid ( $ClF_3$ ) är möjlig att använda vid konvertering till  $UF_6$ , men används huvudsakligen för rengöring av metallytor som skall exponeras för  $UF_6$ .  $ClF_3$  är därför belagd med exportkontroll.

Vattenfri HF är den fluorförening som har störst användning globalt vid produktion av fluorinnehållande kemikalier och är därför en vanligt förekommande kemikalie industriellt. För att framställa HF utgår man t.ex. från det fluorinnehållande mineralet fluorit (kalciumdifluorid,  $CaF_2$ ) som får reagera med svavelsyra. En liten del av det HF som produceras används till fluorgasproduktion.

Fluorgas används huvudsakligen för att producera olika inorganiska fluorider.  $UF_6$  är den viktigaste fluoriden och 70-80 % av den globala fluorgasproduktionen används inom den kärntekniska industrin för  $UF_6$ -produktion. Intresse för fluorgas eller fluorgasproduktion kan således vara en indikator på urankonvertering. Övriga användningsområden för fluorgas är rengöring av elektronikkomponenter inom halvledarindustrin.

Fluorgas produceras genom elektrolys av en saltblandning av HF och KF (kaliumfluorid<sup>1</sup>), där fluorgas genereras vid anoden och vätgas vid katoden i elektrolyscellen. På grund av den korroderande miljön måste elektrolystankarna vara tillverkade av något korrosionsbeständigt material (t.ex. Monel). Anoden hos elektrolyscellen är av stor betydelse för att få en effektiv produktion. Den är tillverkad av grafitfritt kol och är skuren i rektangulära bitar.

NSG exportkontrollerar elektrolysceller som kan producera 250 g fluorgas per timme. Ett företag som producerar fluorgasceller som används i halvledarindustrin är BOC Edwards. En enda cell kan producera så mycket som 16 kg fluorgas per dygn. Nominellt skulle detta räcka för att producera ca 50 kg  $UF_6$  /dygn. För att producera 5 ton  $UF_6$  – vilket efter anrikning skulle motsvara material för en kärnladdning – skulle det behövas ca 1600 kg fluorgas vilket skulle kunna levereras av en cell på ca 3 månader.

Det krävs höga strömstyrkor för elektrolysen (6000-12000 A), men då spänningen är låg (ca 10 V) är behovet av elenergi relativt litet. En elektrolyscell med kapacitet att producera 16 kg fluorgas per dygn (som i exemplet ovan) kräver 10 kW, vilket inte är mer än vad några el-radiatorer drar.

---

<sup>1</sup> Kaliumfluorid används exempelvis som katalysator vid framställning av polyuretaner, i metallurgisk industri, och som fluorineringsmedel vid organisk syntes för andra halider. Detta används bland annat vid framställningen av vissa pesticider och insekticider.



## BILAGA 3

### **Kvalitetskrav som ställs på uranråvara och processkemikalier i en urankonverteringsanläggning**

Renheten på inkommande uranråvara till en konverteringsanläggning är ca 60-85 %  $U_3O_8$ . När uranråvaran anländer till konverteringsanläggningen vägs uranet och vissa föroreningar analyseras. Om uranet exempelvis innehåller för mycket bor blandas uranråvaran med annan uran av bättre kvalitet för att minska borhalten<sup>2</sup>.

Om producerad  $UF_6$  innehåller för mycket orenheter skulle det kunna ge problem under anrikningsprocessen när man separerar isotoperna från varandra.

$UF_6$ -produkten måste hålla en koncentration av  $UF_6$  på mer än 99,5 g av ett prov på 100 g. Detta är för att minimera potentiellt väteinnehåll i materialet som kan leda till kritikalitetsproblem<sup>3</sup>.

Totala halten av kolväten och klorerade kolväten får inte överstiga 0,01 mol% av  $UF_6$  då dessa föreningar kan orsaka kraftig reaktion med  $UF_6$  vid uppvärmning.

Det finns ASTM-standarder med rekommendationer som anger maximala föroreningshalter i  $UF_6$  av en mängd olika grundämnen [ASTM C 787 - 03]. Det finns också en speciell standard för hur dessa föroreningar analyseras [ASTM C761-01].

Renheten på övriga processkemikalier måste också kontrolleras för att man skall klara renhetskraven på uranprodukten. Utrustningen som används i processerna måste också vara korrosionsbeständig för att inte bidra till att öka föroreningshalten i slutprodukten.

---

<sup>2</sup> Bor är en kraftig neutronabsorbator och för höga föroreningshalter av bor i uranbränsle skulle kunna ge en sämre neutronekonomi i en kärnreaktor i drift.

<sup>3</sup> Väte är en god neutronmoderator och kan bromsa snabba neutroner till en hastighet som är gynnsam för fission.

[www.ski.se](http://www.ski.se)

**STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION**  
Swedish Nuclear Power Inspectorate

**POST/POSTAL ADDRESS** SE-106 58 Stockholm

**BESÖK/OFFICE** Klarabergsviadukten 90

**TELEFON/TELEPHONE** +46 (0)8 698 84 00

**TELEFAX** +46 (0)8 661 90 86

**E-POST/E-MAIL** [ski@ski.se](mailto:ski@ski.se)

**WEBBPLATS/WEB SITE** [www.ski.se](http://www.ski.se)