

Forskning

Urananrikning med gascentrifugering

En analys med fokus på exportkontroll

Lena Oliver

Jenny Peterson

Katarina Wilhelmsen

Augusti 2005

SKI-perspektiv

Bakgrund

Sverige har en exportlagstiftning som kontrollerar utförsel 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 tillräcklig och aktuell kunskap i ämnet för att korrekt kunna bedöma inkomna exportansökningar.

Syfte

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, har sedan länge fungerat som teknisk rådgivare till SKI i exportkontrollärenden. Men eftersom många erfarna personer på FOI har nått pensionsåldern har SKI sett ett behov att 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 urananrikning med gascentrifugering. Anrikning av uran kan vara ett led i en process att tillverka kärnvapen och den troligaste metoden är anrikning med gascentrifugering

Resultat

Den nu resulterande rapporten berör kortfattat teorin och några generella principer för gascentrifugering, vilken utrustning som kan komma ifråga, indikatorer på anrikning med gascentrifugering, 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 en gascentrifugeringsanläggning.

Det genomförda arbetet visar att SKI:s mål att ha tillgång till aktuell kompetens inom gascentrifugering har uppnåtts. Det finns flera 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. FOI har i ett tidigare projekt studerat tungvattenproduktion (SKI Report 2003:15). Dessutom har SKI genomfört en separat studie av grafit ur exportkontrollsynpunkt (SKI:Report 2004:44).

Projektinformation

Handläggare hos SKI har varit Lars Hildingsson
SKI:s referens: 14.10/031266/200410012

Forskning

Urananrikning med gascentrifugering

En analys med fokus på exportkontroll

Lena Oliver

Jenny Peterson

Katarina Wilhelmsen

FOI

Totalförsvarets forskningsinstitut

164 90 Stockholm

Augusti 2005

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 stor 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

1	INLEDNING	9
2	BAKGRUND	10
2.1	VARFÖR ANRIKA URAN?	10
2.2	OLIKA URANANRIKNINGSPROCESSER	11
2.2.1	Gasdiffusion	11
2.2.2	Aerodynamiska metoder	12
2.2.3	Elektromagnetisk separation (EMIS)	12
2.2.4	Kemisk jämvikt	13
2.2.5	Laseranrikning	13
3	HUR FUNGERAR GASCENTRIFUGERING ?	14
3.1	PRINCIP OCH TEORI	15
3.1.1	Viktiga uttryck och definitioner	15
3.1.2	Principen för separationen i en centrifug	16
3.1.3	Motströmscentrifug	17
3.1.4	Maximal rotationshastighet	18
3.1.5	Resonansfrekvenser	18
3.2	SEPARATIONSFÖRMÅGA	19
3.2.1	Separationsförmåga för en enskild centrifug	22
3.3	ROTORRÖRENS LÄNGD OCH TJOCKLEK	23
3.4	KASKADTEORI	23
3.4.1	Square och squared-off kaskader	27
3.5	CENTRIFUGUTVECKLING OCH HISTORIK	28
4	UTRUSTNING OCH MATERIAL	30
4.1	MATERIAL	31
4.2	UTRUSTNING UNDER EXPORTKONTROLL ENLIGT NSG PART 1	33
4.3	UTRUSTNING UNDER EXPORTKONTROLL ENLIGT NSG PART 2	36
4.4	ÖVRIG KÄNSLIG UTRUSTNING	38
5	DRIFT AV EN GASCENTRIFUGERINGSANLÄGGNING	39
5.1	PRAKTISKT KRING DRIFTEN	40
5.1.1	Analysinstrument	40
5.2	KONVERTERING FRÅN PRODUKTION AV LEU TILL HEU	41
6	INDIKATORER PÅ ANRIKNING MED GASCENTRIFUGERING	42
7	PRODUKTIONSANLÄGGNINGAR	44
8	REFERENSER	45

BILAGA 1: Aluminiumlegeringar

BILAGA 2: Maråldrat stål

BILAGA 3: Utrustning för urananrikning med gascentrifuger som är under exportkontroll. Utdrag ur EU:s förordning 1334/2000, bilaga 1.

Sammanfattning

Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI har på uppdrag av Statens Kärnkraftinspektion, SKI, gjort en studie om urananrikning med gascentrifuger där principerna och teorin bakom processen sammanställts och relevant utrustning har identifierats. I rapporten diskuteras också olika frågor kring driften av en anrikningsanläggning och indikatorer på anrikning med gascentrifugering.

Vid urananrikning med gascentrifugering utnyttjas skillnaden i massa mellan de två uranisotoperna ^{235}U och ^{238}U . Det är uranföreningen UF_6 , uranhexafluorid, som används eftersom anrikningsmetoden kräver att uranet måste vara gasformigt. I centrifugrotorn, som roterar med hög hastighet, separeras molekylerna från varandra under centrifugalkraftens inverkan. Denna separation blir mer effektiv ju högre hastigheten är. De höga rotationshastigheterna innebär dels speciella krav på materialhållfasthet och dels krävs hög precision vid tillverkningen av olika komponenter.

Både separationen och materialflödet i en enda centrifug är mycket små och därför krävs det att ett stort antal centrifuger sammankopplas (s.k. kaskad) för att tillräckligt med anrikat material skall kunna produceras inom ett rimligt tidsperspektiv.

Länder med kärnvapenambitioner visar ofta intresse för gascentrifugering då det är en effektiv anrikningsmetod för att producera vapenuran och dessutom relativt lätt att dölja – om man har tillgång till den känsliga teknologin. För att förhindra att länder anrikar uran för kärnvapenändamål i det fördolda är mycket av den utrustning som krävs i processerna belagd med exportkontroll. Nuclear Suppliers' Group har därför utformat listor på kärnteknisk utrustning och komponenter som är relevanta att belägga med exportkontroll och som också inkluderats i EU:s lagstiftning.

Summary

The Swedish Defence Research Agency, FOI, has under contract work financed by the Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI, performed a study on uranium enrichment by gas centrifugation. The theory and principles of gas centrifugation is described in this report and relevant equipment used in the process has been identified. Different aspects of operating a gas centrifuge facility – and its indicators – are also presented.

The mass difference between the two uranium isotopes ^{235}U and ^{238}U is the basis for uranium enrichment by gas centrifuges. The uranium has to be in gaseous form to be used in gas centrifuges and UF_6 , uranium hexafluoride, is used for this purpose. The uranium isotopes are separated by the centrifugal force in the centrifuge rotor, which rotates with high velocity. The separation efficiency increases with increased rotational speed. The rotor has to be constructed of special material to withstand the high velocities. High accuracy in the production of gas centrifuge components is also of importance.

The separation efficiency and the flow of material through a centrifuge are very small, and therefore, a large number of centrifuges in cascades is needed to produce a larger amount of enriched uranium within a reasonable time.

Countries with nuclear weapons ambitions often show an interest in gas centrifuges to produce weapons grade uranium – if they have managed to acquire the technology – because of the efficiency of the process and since it is relatively easy to conceal. Most equipment used in gas centrifuge facilities is under export control to prevent clandestine uranium enrichment. The Nuclear Suppliers' Group has compiled lists of nuclear related equipment and components that are of importance to export control. The control lists have also been included in the EU legislation.

1 Inledning

Denna rapport är resultatet av en studie rörande urananrikning med gascentrifugering där syftet har varit att fördjupa våra kunskaper inom området. Speciellt fokus har lagts på att studera den utrustning som krävs för urananrikning för att kunna göra goda bedömningar rörande exportkontroll av sådan utrustning.

Orsaken till att studera just gascentrifugering är att teknologin – även om den är sekretessbelagd och restriktivt distribuerad – har varit den anrikningsteknologi som flera länder med kärnvapenambitioner har visat intresse för under senare år. Vikten av skärpt exportkontroll gällande utrustning för urananrikning har nyligen aktualiserats då det framkommit att både Iran och Libyen har sökt sådan teknologi och utrustning och att de i hemlighet har lyckats bygga upp relevanta testanläggningar för urananrikning. Det finns också obekräftade uppgifter om att Nordkorea är i färd med att bygga upp en anläggning för gascentrifugering.

Rapporten är upplagd enligt följande: I avsnitt två ges en bakgrund till varför urananrikning är intressant ur ett kärnvapenperspektiv och några anrikningsmetoder beskrivs kortfattat. I avsnitt tre beskrivs gascentrifugering mer i detalj rörande princip och teori, och i avsnitt fyra beskrivs utrustning som är under exportkontroll enligt NSG¹ och EU:s förordning 1334/2000. I efterföljande avsnitt beskrivs drift av en anrikningsanläggning och en sammanställning av indikatorer på urananrikning presenteras. Slutligen listas de civila anrikningsanläggningar som finns i världen, den anrikningsmetod som används vid respektive anläggning samt anläggningarnas kapacitet. Rapporten innehåller också tre bilagor med beskrivningar av vissa relevanta metallegeringar samt ett utdrag ur EU:s förordning avseende utrustning och komponenter rörande urananrikning med gascentrifuger som är under exportkontroll. EU:s förordning innefattar all utrustning som NSG har identifierat vara relevant att belägga med exportkontroll. Kontrollistorna skiljer sig dock i hur detaljerade specifikationerna är.

¹ Nuclear Suppliers' Group

2 Bakgrund

2.1 Varför anrika uran?

Naturligt förekommande uran innehåller tre olika isotoper, ^{234}U (0,005 %), ^{235}U (0,720 %) och ^{238}U (99,275 %). De tre uranisotoperna har alla samma antal protoner, men skiljer sig åt med avseende på hur många neutroner kärnan innehåller². Isotopen ^{235}U är den enda som är klyvbar med termiska neutroner och är därför den som är av intresse för att utvinna kärnenergi. För att användas som bränsle i de flesta kommersiella kärnreaktorer måste andelen av isotopen ^{235}U ökas från den naturliga halten till mellan 2 och 5 % (beroende på reaktortyp). För användning i kärnvapensammanhang måste dock anrikningsgraden ökas betydligt mer, oftast till över 90 %.

För många tillämpningar måste man alltså öka andelen ^{235}U jämfört med ^{238}U , och det är denna process som kallas anrikning. Uran där man ökat andelen ^{235}U till 20 % eller mer kallas höganrikat uran (HEU- *Highly Enriched Uranium*) medan anrikat uran med en anrikningsgrad över naturlig sammansättning men mindre än 20 % kallas låganrikat uran (LEU- *Low Enriched Uranium*).

Skillnaden i kemiska egenskaper hos olika isotoper av samma grundämne är oftast försumbar. För att kunna öka koncentrationen av den intressanta uranisotopen på bekostnad av de övriga utnyttjar man i de flesta anrikningsprocesser masskillnaden mellan isotoperna. Då det bara skiljer tre neutroner mellan ^{235}U och ^{238}U är masskillnaden och därmed separationseffekten mycket liten, vilket medför att för de flesta anrikningsmetoder behöver man därför öka anrikningsgraden successivt i många steg för att erhålla den önskade anrikningsgraden.

² 234, 235 och 238 anger summan av antalet protoner och neutroner i urankärnan hos de olika isotoperna. Antalet protoner hos uran är 92, antalet neutroner är följaktligen 142, 143 respektive 146.

2.2 Olika urananrikningsprocesser

Det finns ett antal olika anrikningsprocesser som har testats mer eller mindre framgångsrikt. Idag sker ca 50 % av den industriella produktionen av civilt kärnbränsle med gasdiffusion och återstoden med gascentrifugering. En nackdel med gasdiffusionsprocessen jämfört med gascentrifugering är att energiförbrukningen är upp till tio gånger större. Skälet till att så stor andel anrikat uran fortfarande produceras med gasdiffusion är att de flesta anläggningar som är i drift idag byggdes upp innan centrifugeteknologin hade fått genomslag. I takt med att nya anrikningsanläggningar tas i drift kommer gasdiffusion att ersättas med gascentrifugering.

Under det amerikanska Manhattanprojektet – då man tillverkade det första kärnvapnet – testades ett flertal anrikningsmetoder, men det var då med hjälp av EMIS (elektromagnetisk separation) som man kunde få fram det första fissila materialet för ett kärnvapen. I EMIS-processen utgick man då från låganrikat uran som hade producerats med andra metoder t.ex. gasdiffusion.

För att få en inblick i vad som skiljer gascentrifugering från andra anrikningsmetoder ges en kort beskrivning av några olika anrikningsmetoder nedan. I tabell 1 görs en jämförelse mellan viktiga parametrar för dessa anrikningsmetoder. I tabellen och efterföljande avsnitt kommer det engelska uttrycket *feed* eller *feed-material* att användas för att benämna ingångsmaterialet.

Tabell 1. Jämförelse mellan viktiga parametrar för några olika anrikningsmetoder, data från referens [1]. För definition och förklaring av enheten SWU, se avsnitt 3.2.

Process	Feed-material	Separationsfaktor q	Uppehållstid per steg [s]	Energiförbrukning [kWh/SWU]
Gasdiffusion	UF ₆	1,0040-1,0045	5-10	2 300-3 000
Gascentrifugering	UF ₆	1,3-1,6	10-15	100-300
Aerodynamisk	UF ₆ + vätgas	1,015-1,030	~2	3 000-3 500
Kemisk jämvikt	Uran i lösning	1,0025-1,0030	20-30	400-700
Laseranrikning	Uranmetall (AVLIS)	5-15 ¹	-	10-50
	UF ₆ (MLIS)			
Elektromagnetisk	UCl ₄	20-40 ¹	-	3 000-4 000

¹ Här anges anrikningsfaktorn α istället för separationsfaktorn q (För definitioner, se avsnitt 3.1.1).

2.2.1 Gasdiffusion

Vid gasdiffusion utnyttjas skillnaden i massa mellan de olika tunga molekylerna ²³⁸UF₆ och ²³⁵UF₆. I denna process trycks UF₆-gas genom ett poröst membran. Den lättare molekylen ²³⁵UF₆ rör sig något snabbare genom membranet än den tyngre vilket resulterar i en ökning av halten ²³⁵UF₆ på andra sidan membranet³.

Membranet är ett tunnväggigt, poröst material som är korrosionsbeständigt mot UF₆ och som innehåller en stor mängd av små hål som gasen kan passera igenom. En av svårigheterna i processen är just att få fram detta porösa material. Membranet måste vara tunt för att ha

³ Då de två molekylerna har samma kinetiska energi vid samma temperatur leder detta till att den tyngre molekylen har något lägre hastighet i enlighet med sambandet $E=mv^2/2$.

tillräcklig genomsläpplighet, men samtidigt starkt för att kunna klara gastrycket. Sintrat nickelpulver, teflon eller vissa keramiska material kan användas som membranmaterial i processen.

Separationseffektiviteten för gasdiffusion är mycket liten då relativa masskillnaden⁴, och således också hastigheten, mellan de två molekylerna är mycket liten.

2.2.2 Aerodynamiska metoder

Det finns flera olika tekniker som går under benämningen aerodynamiska metoder. De mest kända är Nozzle-metoden (dysmetoden) som utvecklats i Tyskland samt Vortex-metoden som Sydafrika utvecklade under sitt – nu avslutade – kärnvapenprogram. Sydafrikas metod syns också under namnet Helikon, vilket är benämningen på själva processkonstruktionen, det vill säga hur de enskilda Vortex-elementen är ihopsatta till större enheter.

Aerodynamiska metoder baserar sig också på skillnaden i hastighet mellan de två molekylerna $^{235}\text{UF}_6$ och $^{238}\text{UF}_6$ då gasen med hög hastighet passerar genom en dysa. Den lättare molekylerna böjer av mer i dysans kurvatur än den tyngre. Genom att samla upp de två isotoperna vid olika böjningsvinklar når man en anrikning av ^{235}U . Även de aerodynamiska processerna är mycket energikrävande och har därför inte nått så stor framgång industriellt. Det är bara Sydafrika som har haft en industriell anläggning i drift.

2.2.3 Elektromagnetisk separation (EMIS)

Denna metod var som nämnts den första som användes för att producera uran av högre anrikningsgrad. Processen har dock ej fått större användning industriellt på grund av den höga energiförbrukningen, men det visade sig efter Kuwaitkriget att Irak använt sig av metoden i sitt kärnvapenprogram. Metoden baserar sig på att laddade partiklar böjer av då de passerar genom ett magnetiskt fält. Utrustningen i EMIS, som ibland även kallas calutroner⁵, innehåller en jonkälla som joniserar uranet, ett accelerationssteg och ett magnetfält som böjer av uranisotopen ^{235}U mer än ^{238}U . Jonerna separeras på detta vis geometriskt till varsitt uppsamlingsområde vilket ger en anrikningseffekt. Som synes i tabell 1 ovan har EMIS en mycket hög anrikningsfaktor vilket innebär att det endast krävs ett fåtal steg för att nå vapenkvalitet på uranet.

⁴ Massan för $^{235}\text{UF}_6$ är 349 amu och massan för $^{238}\text{UF}_6$ är 352 amu vilket betyder att den relativa masskillnaden mellan de båda molekylerna är endast ca 0,8 %.

⁵ Den apparatur som utvecklades i Manhattanprojektet för elektromagnetisk isotopseparation kallades Calutron efter California University Cyclotron.

2.2.4 Kemisk jämvikt

I denna metod utnyttjas istället för masskillnaden den lilla skillnad i kemiska egenskaper som finns hos olika isotoper. Genom att låta de olika uranisotoperna reagera och binda till olika ämnen och komplexbildare kan man separera isotoperna från varandra genom att separera de olika urankomplexen. Denna separation kan ske med t.ex. vätskeextraktion eller jonbyte. Processen är mycket långsam och det kan ta månader till år för processen att komma till jämvikt. Detta kan jämföras med gascentrifugering där jämviktstiden är sekunder till minuter. Separationseffektiviteten med kemisk jämviktsmetoden är relativt bra för lätta isotoper, men för tunga isotoper som uran är effektiviteten betydligt sämre. Som synes i tabellen ovan är anrikningsfaktorn för kemisk jämvikt lägst av alla listade metoder.

2.2.5 Laseranrikning

Denna process är den mest sofistikerade av alla hittills prövade anrikningsprocesser. Det är främst två tekniker som har använts, AVLIS (*Atomic Vapor Laser Isotope Separation*) och MLIS (*Molecular Laser Isotope Separation*). I AVLIS-processen utnyttjas att de atomära energinivåerna i uranatomer är något olika för de båda isotoperna. Med hjälp av laserljus joniseras ^{235}U -atomer specifikt utan att ^{238}U joniseras. Jonisationen sker i flera steg för att öka selektiviteten i processen. Jonerna samlas upp med hjälp av ett elektriskt fält och separeras på så vis från den tyngre icke-joniserade isotopen. Metoden har en mycket hög separationsfaktor vilket gör den mycket effektiv. I MLIS-processen exciteras istället molekyler av UF_6 . I ett första steg exciteras $^{235}\text{UF}_6$ selektivt och i ett andra steg dissocieras de exciterade molekylerna till $^{235}\text{UF}_5$ som är ett fast pulver som kan separeras från gasen.

Laseranrikning har också låg energiförbrukning. Anledningen till att metoden trots detta inte har nått framgång är att det är relativt svårt att erhålla en kontinuerlig process med tillräckligt hög produktionshastighet. USA lade ned sin forskning och utveckling runt laseranrikning 1998 då man drog slutsatsen att metoden ej var ekonomiskt lönsam jämfört med övriga industriella anrikningsmetoder. Det finns dock företag i andra länder (t.ex. Australien och Ryssland) som idag utvecklar laseranrikningstekniker för kommersiella ändamål.

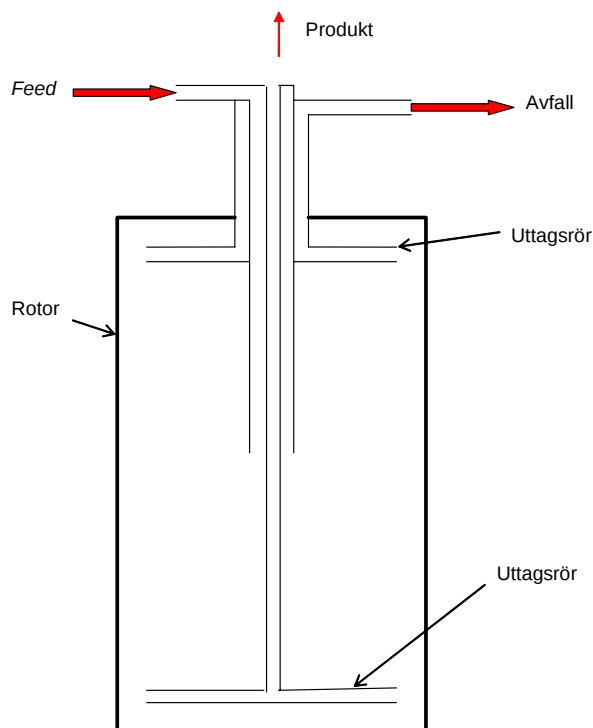
Det har nyligen framkommit att Iran under lång tid – i hemlighet – har ägnat sig åt forskning och utveckling av laseranrikning och till och med har lyckats framställa små mängder anrikat material. Även Sydkorea har genomfört en del forskning kring laseranrikning med uran, utan att deklarerat aktiviteterna till IAEA. Detta visar att det trots allt är en process som kan vara av intresse för länder som har ambitionen att anskaffa egen anrikningskapacitet.

3 Hur fungerar gascentrifugering ?

I detta kapitel beskrivs en del av den teoretiska bakgrunden för gascentrifugering och kaskadteori. Det mesta av den teoretiska beskrivningen är baserad på referenserna [2, 3, 4, 5, 6, 7] och på många ställen används uttryck utan att specifikt referera till dessa källor. Där specifika kvantifieringar presenteras, främst i tabeller, hänvisas dock direkt till källan.

Vid urananrikning med gascentrifugering utnyttjas skillnaden i massa mellan de två isotoperna ^{235}U och ^{238}U . I centrifugrotorn separeras molekyler med olika massor från varandra i radiell led under centrifugalkraftens inverkan. När uranhexafluorid (UF_6) i gasform innehållande båda isotoperna roteras i hög hastighet koncentreras den tyngre av de två isotoperna nära rotorns periferi medan den lättare av de två isotoperna koncentreras något närmare mitten.

UF_6 är den form av uran som används som *feed*-material till gascentrifugeringsprocessen⁶. Orsaken till att man valt just uranföreningen UF_6 för ändamålet är att fluor endast har en stabil isotop vilket resulterar i att skillnaden i massa mellan UF_6 -molekylerna endast beror på de olika uranisotoperna. UF_6 har också gynnsamma fysikaliska egenskaper då den är i fast fas vid rumstemperatur och atmosfärstryck och sublimerar till gasform vid endast 56,5 °C. Detta gör att det är relativt lätt att överföra uranföreningen till gasfas – och som är stabil i gasform vid normala temperaturer och tryck. UF_6 är mycket korrosiv och det krävs därför exempelvis rostfritt stål, nickel- eller aluminiumlegeringar i den utrustning som kommer i kontakt med urangasen. Eftersom UF_6 också reagerar kraftigt med vatten och andra lösningsmedel så är det också av stor vikt att systemet är rent och fritt från läckor.



Figur 1. Schematisk bild av en rotor i en gascentrifug där den anrikade delen tas ut i centrifugens nedre del.

⁶ UF_6 används också som *feed*-material i gasdiffusion, MLIS och aerodynamiska anrikningsprocesser.

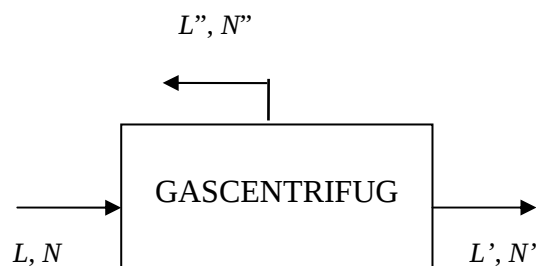
I figur 1 visas en schematisk bild av en gascentrifug. Behållaren (rotorn) roterar kring sin axel. I den här centrifugen förs *feed*-materialet in genom ett rör i toppen. Den anrikade produktströmmen tas ut vid rotorns botten och avfallsströmmen tas ut från rotorns topp. Det finns andra modeller där produkten istället tas ut i toppen och avfallsströmmen i botten av rotorn.

Gasens genomströmningshastighet och täthet i varje centrifug är låg vilket leder till att många centrifuger måste parallellkopplas för att större mängder gas skall kunna anrikas⁷. Separationsfaktorn i varje centrifug är också mycket låg vilket resulterar i att många steg av parallellkopplade centrifuger krävs för att uppnå önskad anrikningsgrad. Dessa system av parallell- och seriekopplade centrifuger kallas kaskader och beskrivs i större detalj i avsnitt 3.4.

3.1 Princip och teori

3.1.1 Viktiga uttryck och definitioner

I ett generiskt steg i en gascentrifugeringsanläggning benämns flödena L och isotopfraktionerna N . I figuren nedan betecknas ingångsflödet (eng. *feed*) med L , produktflödet (eng. *product*) med L' och avfallsströmmen (eng. *waste*) med L'' . Flödena har enheten massa per tidsenhet. För naturligt uran som innehåller 0,72 % ^{235}U är isotopfraktionen $N=0,0072$.



Figur 2. Schematisk beskrivning av generiskt anrikningssteg med beteckningen L för flöde och N för isotopfraktionen.

Anrikningsfaktorn för ett steg definieras som kvoten mellan de relativa isotopkvoterna av utgående produktflöde och ingående flöde:

$$\alpha = \left(\frac{N'}{1 - N'} \right) \bigg/ \left(\frac{N}{1 - N} \right) = \frac{R'}{R}, \quad (3:1)$$

där R' är relativa isotopkvoten av den önskade isotopen i produktflödet efter separationen och R är relativa isotopkvoten av den önskade isotopen före separationen. Anrikningsfaktorn indikerar hur bra anrikning man kan erhålla i ett separationssteg.

⁷ Totalmängden UF_6 -gas i centrifugen är begränsad av desublimeringstrycket (där UF_6 övergår till fast fas). Vid rumstemperatur är desublimeringstrycket för UF_6 1/6 atm.

Separationsfaktorn för ett steg ges istället av förhållandet mellan de relativa isotopkvoterna av de båda utgående flödena:

$$q = \frac{R'}{R''}. \quad (3:2)$$

Separationsfaktorn anger alltså förhållandet mellan andelen ^{235}U i den anrikade strömmen jämfört med den utarmade strömmen och visar därför hur bra separation man kan erhålla mellan produkt- och avfallsström i ett steg.

Anrikningsfaktorn och separationsfaktorn är nära relaterade och i olika texter blandas de ofta ihop. En separations- eller anrikningsfaktor lika med 1 innebär att ingen separation eller anrikning sker. Moderna centrifuger kan ha separationsfaktorer mellan 1,2 och 1,5, vilket är betydligt högre än exempelvis gasdiffusion som har en separationsfaktor på endast ca 1,004 [8].

Eftersom både q och α oftast är nära ett så använder man sig ibland av

$$g = q - 1, \quad (3:3)$$

respektive

$$\varepsilon = \alpha - 1. \quad (3:4)$$

Återflödeskvoten, (eng. *cut*), anger hur stor andel av det inkommande flödet som förs vidare till nästa steg och ges av:

$$\Theta = \frac{L'}{L}. \quad (3:5)$$

Återflödeskvoten är oftast nära 0,5 i kaskader med gascentrifuger. Sambandet mellan ε och återflödeskvoten ges av:

$$\varepsilon = \frac{g(1 - \Theta)}{1 + \Theta g(1 - N')}. \quad (3:6)$$

Då $g \ll 1$ kan dock uttrycket förenklas till:

$$\varepsilon = g(1 - \Theta). \quad (3:7)$$

3.1.2 Principen för separationen i en centrifug

I centrifugrotorn roterar gasblandningen med hög hastighet vilket utsätter gasen för en centrifugalkraft. Centrifugalkraftens storlek beror av gasmolekylernas massa och tyngre molekyler utsätts för en större kraft än lättare molekyler vilket gör att en gasblandning bestående av två olika isotoper med olika massa separeras i radiell led.

Anrikningsfaktorn för den enklaste typen av centrifug kan skrivas:

$$\alpha = \exp\left[\frac{\Delta M v^2}{2RT}\right]. \quad (3:8)$$

Här betecknar ΔM skillnaden i massa mellan de två uranisotoperna ^{235}U och ^{238}U (3 kg/kmol), v periferihastigheten i m/s hos den roterande centrifugen, R allmänna gaskonstanten ($8,314 \times 10^3$ J/kmol K) och T temperaturen i Kelvin.

I tabellen nedan återfinns den maximala anrikningsfaktorn för några olika material och periferihastigheter beräknad enligt ekvation 3:8.

Tabell 2. Maximala anrikningsfaktorn för några olika material och periferihastigheter enligt ekvation 3:8 vid temperaturen 300 K.

Material	v [m/s]	α
Aluminium	400	1,10
Maråldrat stål	500	1,16
Kolfiberkomposit	700	1,34

3.1.3 Motströmscentrifug

Genom att åstadkomma ett flöde längs rotorns längdaxel kan man skapa en koncentrationsgradient även i längdriktningen. Denna koncentrationsskillnad beror av förhållandet mellan längd och diameter hos rotorn och ju större detta förhållande är desto mer ökar anrikningsgraden. Den mest använda centrifugtypen är motströmscentrifugen i vilken gasen vid rotorns vägg strömmar vertikalt åt ena hållet och gasen närmare centrum strömmar i motsatt riktning. Fördelarna med denna typ av centrifug är bland annat att man kan få en högre separationsfaktor i ett enskilt steg vilket leder till att man behöver färre steg för att nå önskad anrikningsgrad. Dessutom kan både den anrikade och den utarmade produktströmmen tas ut i rotorns ändar nära periferin där trycket är som störst vilket förenklar konstruktionen.

Den maximala, teoretiska anrikningsfaktorn för en motströmscentrifug fås då ingen produkt tas ut och ges av:

$$\alpha_{\max} = \exp\left[\frac{\Delta M v^2}{2RT} \frac{Z}{d} \sqrt{2}\right]. \quad (3:9)$$

Här betecknar Z rotorns längd och d rotorns diameter. Övriga beteckningar är desamma som i ekvation 3:8.

Anrikningsfaktorn beror av periferihastigheten i kvadrat och av kvoten mellan längd och diameter. Om $Z/d = 2$ blir anrikningsfaktorn för kolfiberrotorn i tabell 2 ovan 2,3 för en motströmscentrifug, istället för den enklare centrifugtypens värde på 1,34.

Gascirkulationen i centrifugen kan åstadkommas på olika sätt. Ett sätt som testades i några tidiga centrifugkonstruktioner är att värma den ena änden av centrifugen. I Zippes centrifugmodell (se avsnitt 3.5) lät man uttagsrören (skovlarna) som används för att ta ut avfallströmmen röra om i gasen i den nedre delen av rotorn för att på detta sätt åstadkomma gascirkulationen, (se figur 1). I praktiken beror anrikningsfaktorn av flera faktorer bland annat flödes hastigheten och -profilen, turbulens och ändeffekter, och blir aldrig lika stor som den maximalt teoretiskt möjliga.

3.1.4 Maximal rotationshastighet

Rotorn måste rotera med hög hastighet för att ge bra separation, vilket kräver att rotormaterialet har mycket hög hållfasthet.

När centrifugen roterar påverkas rotorns vägg av en kraft på grund av rotationen – centrifugalkraften. För att inte rotorn skall brista krävs det att denna kraft balanseras av materialets draghållfasthet. Draghållfastheten, σ , och densiteten, ρ , hos materialet sätter gräns för hur fort en centrifug kan rotera enligt sambandet:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}. \quad (3:10)$$

Optimala material för rotorerna har alltså hög draghållfasthet och låg densitet (se tabell 6). Hastigheten v i ekvation 3:10 är periferihastigheten hos rotorn. Periferihastigheten är relaterad till vinkelhastigheten ω genom sambandet $v = \omega \cdot r$, där r är rotorns radie.

3.1.5 Resonansfrekvenser

En roterande stel cylinder har naturliga resonansfrekvenser som dels beror av kvoten mellan längd och diameter, Z/d , och dels på vilket sätt rotorn är lagerupphängd. När man konstruerar en centrifug måste man se till att dessa resonanser inte ställer till problem, varken vid acceleration av centrifugen upp till drifhastighet eller vid drift. I praktiken vill man hålla resonansfrekvenserna så låga som möjligt, dels för att de skall ligga långt från den frekvens vid vilken centrifugen normalt körs och dels för att det skall ge så liten påverkan på lagren som möjligt.

Centrifuger delas ofta in i subkritiska och superkritiska beroende på förhållandet mellan längd och diameter. För subkritiska centrifuger gäller att $Z/d \leq 4-5$ och för superkritiska är $Z/d > 10$. De resonansproblem som finns är till viss del olika för sub- och superkritiska centrifuger. För båda typerna uppträder s.k. stelkroppsresonanser vars frekvens beror av Z/d . Vid val av geometri och lager måste man se till att dessa resonanser inte ställer till problem vid drift och att de kan dämpas av systemet. För superkritiska centrifuger finns också andra resonanser, s.k. *flexural criticals* eller böjningsresonanser vars frekvenser också beror av Z/d men även av rotormaterialets egenskaper. I ekvation 3:11 ges ett uttryck för vid vilka hastigheter böjningsresonanser uppstår beroende på kvoten Z/d och rotormaterialets egenskaper:

$$v_n = \frac{(n+1/2)^2 \pi^2}{4(Z/d)^2} \sqrt{\frac{E}{2\rho}}. \quad (3:11)$$

Här är E elasticitetsmodulen för rotormaterialet, ρ dess densitet och v_n hastigheten vid vilken resonans nummer n uppträder. Om rotorn är superkritisk måste kvoten Z/d väljas så att man med god marginal håller sig mellan två resonanser vid driftshastigheten.

Man kan också använda uttrycket (3:11) för att beräkna vid vilka kritiska värden på Z/d böjningsresonanser uppstår för givna materialparametrar och en viss periferihastighet, vilket har gjorts i tabell 4. Om en gascentrifug av aluminium drivs vid hastigheten 400 m/s fås alltså första resonansen vid $Z/d = 7,1$, den andra resonansen vid $Z/d = 11,7$ och den tredje vid 16,4, vilket leder till att en superkritisk design av centrifugen bör ha ett Z/d som inte ligger för nära något av dessa värden.

Tabell 4. Kritiska kvoter Z/d för olika material och hastigheter.

Material	$\sqrt{\frac{E}{2\rho}}$	Hastighet [m/s]	Z/d n=1	Z/d n=2	Z/d n=3
Aluminium	3580	400	7,1	11,7	16,4
Maråldrat stål	3446	500	6,2	10,3	14,4
Kolfiberkomposit	7993	700	7,9	13,3	18,6

Från ekvation 3:11 kan man alltså se att böjningsresonanserna uppstår vid lägre hastighet ju större förhållandet mellan längd och diameter är, och att ju större kvoten mellan elasticitetsmodul och densitet hos materialet är desto större kan kvoten mellan längd och diameter hos rotorrröret vara utan att böjningsresonanser uppstår. Man kan också dra slutsatsen att en centrifug kan förlängas och fortfarande vara subkritisk om diametern samtidigt ökas.

För hastigheterna i tabellen ovan kan man dra slutsatsen att en rotor med exempelvis längden 10 m som skall ha passerat andra resonansen måste ha olika diameter för olika material om man inte skall få problem med böjningsresonanser. För aluminium måste den ha en diameter på minst 85 cm, för maråldrat stål minst 97 cm och för kolfiberkomposit minst 75 cm.

3.2 Separationsförmåga

Separationsarbete är ett begrepp som är relaterat till hur effektiviteten i ett anrikningssteg, i t.ex. en centrifug, beror av både mängden material och anrikningsgraden hos detta material som passerar anrikningssteget. Den är också ett mått på hur mycket produkt av en viss kvalitet som en enskild centrifug kan leverera. Produkten som tas ut beror dels på hur mycket material som flödar genom centrifugen och dels på vilken anrikning man uppnår. Separationsarbetet har enheten kg SW, där SW står för *Separative Work*. Vanligt förekommande är också enheten SWU (*Separative Work Unit*), där 1 SWU motsvarar 1 kg SW.

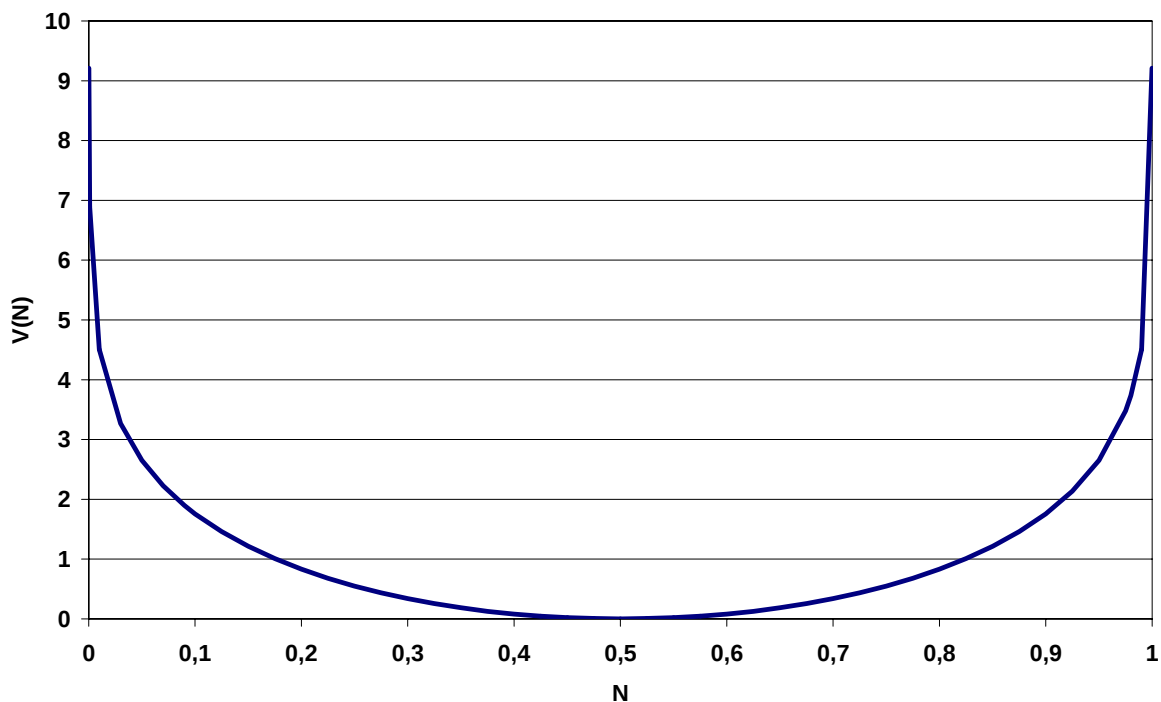
SWU är alltså ett mått på hur mycket separationsarbete som måste utföras för att separera en viss mängd inflöde av en viss isotopsammansättning till en viss mängd produkt med specifik anrikningsgrad. Man använder begreppet för att karakterisera såväl enskilda anrikningssteg

som hela anläggningar. En anläggnings separationskapacitet eller separationsförmåga uttrycks normalt som en separationseffekt, det vill säga separationsarbete per tidsenhet (t.ex. SWU/år).

För att illustrera begreppet separationsförmåga kan man betrakta separationsarbetet som en enskild centrifug utför på det passerande materialet som en ökning av materialets "värde". Värdet för en enhet material med isotopfraktionen N betecknas med $V(N)$, där $V(N)$ är den s.k. värdefunktionen, vilken är dimensionslös. Värdefunktionen för isotopfraktionen N av ett flöde genom en centrifug är oberoende var i anrikningsanläggningen centrifugen befinner sig och ges av:

$$V(N) = (2N - 1) \ln \left(\frac{N}{1 - N} \right). \quad (3:12)$$

Värdefunktionen som funktion av isotopfraktionen, N , åskådliggörs i figur 3 nedan där man tydligt kan se hur "värdet" för en blandning ändras beroende på isotopfraktionen. Som synes ändras värdefunktionen snabbare vid små eller stora isotopfraktioner.



Figur 3. Värdefunktionen $V(N)$ enligt ekvation 3:12.

För att beräkna separationseffekten för en hel anläggning behövs endast värdefunktionerna för de centrifuger som är kopplade till *feed*, avfall respektive produktström. Observera att för hela centrifuganläggningen används flödesbeteckningarna F för *feed*, P för produkt och W för avfall (i stället för L , L' , respektive L'' som används för en enskild centrifug).

Den totala separationseffekten i en anläggning kan uttryckas som ΔU , vilket är en skillnad mellan värdefunktionerna multiplicerade med respektive flöde:

$$\Delta U = PV(N_p) + WV(N_w) - FV(N_f) [\text{SWU} / \text{år}]. \quad (3:13)$$

där N_P , N_W och N_F är isotopfraktionerna i produktström (P), avfallsström (W) och *feed* (F). Separationseffekten borde enligt ekvation (3:13) mätas i samma enhet som *feed*-flödet (t.ex. kg uran/år), men normalt använder man sig i stället av enheten SWU/tidsenhet som nämnts tidigare. Flödena P , W och F i ekvation 3:13 skall vara uttryckta som mängd uran per tidsenhet, t.ex. kg uran/år (och inte som mängd UF₆ eller dylik förening).

Observera att ΔU ibland också används som beteckning för separationseffekt av en enskild centrifug. Ibland syns även ekvation 3:13 tillsammans med begreppet separationarbete, men i detta fall är P , W och F inte uttryck för flöden utan för mängder (med t.ex. enheten kg).

Om ett flöde är känt kan övriga flöden beräknas ur flödesförhållandena utgående från isotopfraktionerna och det kända flödet enligt följande ekvationer,

$$F/P = \frac{(N_P - N_W)}{(N_F - N_W)}, \text{ och} \quad (3:14)$$

$$W/P = \frac{(N_P - N_F)}{(N_F - N_W)}. \quad (3:15)$$

Detta ger till slut följande uttryck för ΔU :

$$\Delta U = P \left\{ V(N_P) + \frac{(N_P - N_F)}{(N_F - N_W)} V(N_W) - \frac{(N_P - N_W)}{(N_F - N_W)} V(N_F) \right\} [SWU / \text{år}]. \quad (3:16)$$

Utifrån en anrikningsanläggnings separationsförmåga i SWU/år (t.ex. angivet som antalet centrifuger med viss separationskapacitet för varje centrifug) kan man således räkna ut hur mycket material av olika kvaliteter som kan produceras i anläggningen. På Internet finns färdiga beräkningsprogram för sådana beräkningar, t.ex. på hemsidan www.antenna.nl/wise/uranium. En kund som köper anrikningstjänster vid en anläggning betalar ett visst pris per SWU. För ett visst antal köpta SWU kan sedan en anläggning med en viss separationsförmåga, antingen användas för att producera en större mängd låganrikt uran eller en mindre mängd höganrikt uran.

Som exempel kan nämnas att en anläggning med kapaciteten 100 000 SWU/år där man utgår från naturligt uran (0,72 % ²³⁵U) skulle kunna producera 30 ton/år uran anrikt till 3 % eller 520 kg vapenuran (90 % ²³⁵U). I dessa beräkningar har antagits att avfallsströmmen håller en halt på 0,3 % ²³⁵U.

Varje centrifug kan ha en separationskapacitet på 2-200 SWU/år – beroende på centrifugens design⁸ – vilket innebär att varje centrifug i genomsnitt kan bidra med mellan 10 g och 1 kg anrikt uran per år.

⁸ De långa amerikanska centrifugerna (10-15 m) kan ha separationskapaciteter upp mot 200 SWU/år.

3.2.1 Separationsförmåga för en enskild centrifug

Den maximala teoretiska separationsförmågan för en motströmscentrifug kan skrivas enligt:

$$\Delta U_{\max} = \rho D \left(\frac{\Delta M v^2}{2RT} \right)^2 \frac{\pi Z}{2} [\text{kgSW} / \text{s}], \quad (3:17)$$

där ρ är gasens densitet och D diffusionskonstanten och övriga beteckningar som i ekvationerna 3:8 och 3:9. För UF_6 är $\rho D = 2,19 \times 10^{-5} \text{ kg/m s}$ vid 300 K.

Jämfört med anrikningsfaktorn som endast anger hur mycket den relativa koncentrationen ökar i ett steg så är separationsförmågan också ett mått på hur mycket produkt i form av anrikat material som kan produceras per tidsenhet.

Enligt detta uttryck ökar alltså separationsförmågan för en centrifug linjärt med centrifugens rotorlängd och med fjärde potensen på periferihastigheten. Separationsförmågan blir också större med lägre temperatur. Även diffusionskonstanten är temperaturberoende och ökar med stigande temperatur. Vid konstant periferihastighet är separationsförmågan inte beroende av centrifugens radie, men radien påverkar dock hur mycket material man kan hantera i varje centrifug.

Rotormaterialets hållfasthet begränsar vilken periferihastighet man kan åstadkomma. För en centrifug med längden 1 m kan man räkna ut maximala teoretiska separationsförmågan för några olika material (se tabell 3). I praktiken är separationsförmågan dock betydligt lägre än dessa värden.

Tabell 3. Maximala teoretiska separationsförmågan för några olika material och periferihastigheter.

Material	v [m/s]	SWU/år
Aluminium	400	10
Maråldrat stål	500	25
Kolfiberkomposit	700	94

Vid separationen är det viktigt att ta hänsyn till att det inte sker någon konvektion mellan gasströmmarna och det är därför av största vikt att rotorn hålls vid låg konstant temperatur. Gastrycket inne i rotorn måste hållas under desublimeringstrycket, annars kommer UF_6 i fast form att ansamlas på rotorns vägg. I praktiken begränsar detta rotorns maximala periferihastighet eftersom denna direkt påverkar gastrycket. Man måste också anpassa rotationshastigheten så att trycket i rotorns centrala delar inte blir för lågt. Om detta sker kommer separationsförmågan att minska och beror inte längre av v^4 utan av v^2 . För de rotationshastigheter som anges ovan minskar det maximala utbytet drastiskt.

3.3 Rotorrörens längd och tjocklek

Det finns ingenting i teorin som direkt talar om hur man på bästa sätt väljer längd och diameter för rotorerna. I själva verket finns det flera faktorer att ta hänsyn till när rotorns dimensioner skall väljas.

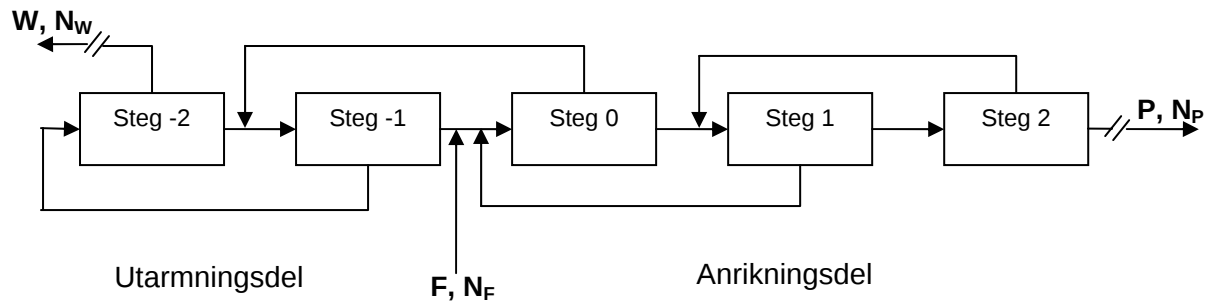
- En lång centrifug är fördelaktig för separationsförmågan (ekvation 3:17), men man måste då ta hänsyn till resonansproblem som kan uppstå vilket kan förstöra centrifugen.
- Man vill maximera rotationshastigheten eftersom detta ger stor anrikningsfaktor (ekvation 3:9).
- Kvoten mellan längd och diameter bör maximeras eftersom detta påverkar anrikningsfaktorn (ekvation 3:9).
- Den möjliga kvoten mellan längd och diameter beror i sin tur av kvoten mellan elasticitetsmodulen och densiteten hos materialet vilket betyder att man vill att detta förhållande skall vara stort (ekvation 3:11).
- Kvoten mellan dragbrottgräns och densitet hos rotormaterialet skall vara så stor som möjligt (ekvation 3:10).

Vad gäller rörens väggdjocklek finns det ingen direkt begränsning i denna. Väggdjockleken kan variera från någon eller några millimeter för subkritiska centrifuger till mer än en centimeter för superkritiska. Man vill hålla rören så tunna som möjligt av två skäl, dels för att de bör ha så liten massa som möjligt och dels för att det är viktigt att rörens geometriska centrum och masscentrum sammanfaller. Vid höga hastigheter kommer rotorn att rotera kring sitt masscentrum och om detta inte är detsamma som dess geometriska centrum kan lagren skadas. Slutligt val av längd, radie och tjocklek hos rotorn begränsas till största delen av lager och dämpning. Lagren bör väljas så att man dämpar naturliga resonansfrekvenser hos rotorn och så att de har så liten effekt på elförbrukningen som möjligt. Det vanligaste valet idag är ett nållager i botten av rotorn och ett magnetiskt lager som håller rotorn på plats i toppen.

3.4 Kaskadteori

För att utforma en optimal kaskad måste man välja rätt flöde och rätt återflödeskvot (*cut*) vid varje steg. I en s.k. ideal kaskad med gascentrifuger är återflödeskvoten nära 0,5 och i en sådan kaskad blandas aldrig två strömmar med olika koncentration vilket leder till att separationsarbetet minimeras. Antalet steg i varje sektion bestäms av de önskade isotopfraktionerna hos *feed*- och avfallsström. Bredden (totala materialflödet) i varje steg bestäms av flödeshastigheterna av anrikat och utarmat material. Antalet steg är beroende av varje centrifugs anrikningsfaktor, dvs. en effektivare centrifug (större α) kräver färre steg.

Den vanligaste typen av kaskad är en s.k. symmetrisk motströmskaskad där produktströmmen från ett steg används som *feed* till nästföljande steg och avfallsströmmen från ett steg återförs ett steg bakåt i kaskaden (se figur 4). På detta sätt utnyttjar man uranråvaran mest effektivt då man återvinner en del av det uran som i en enkel kaskad annars skulle hamnat i avfallsströmmen.



Figur 4. Flödesschema över en symmetrisk kaskad.

En kaskad innehåller dels en anrikningsdel där uran anrikas från halten i inkommande *feed* till produkthalten och dels en s.k. utarmningsdel (*stripper*) där en del av det återstående ^{235}U som finns i *feed*-materialet och återfört material separeras och resulterar i en avfallsström med utarmat uran.

Om en anläggning har naturligt uran som *feed* som skall anrikas till 3 % så sker denna anrikning i anrikningsdelen. Beroende på hur dyr uranråvaran är relativt kostnaden för separationsarbetet (SWU) kan man välja att antingen utnyttja mer uranråvara och mindre separationsarbete (om råvaran är billig) eller tvärtom. Detta varierar genom att välja vilken halt av ^{235}U avfallsströmmen skall ha. I stripperdelen utarmas således uranet från naturlig halt (0,72 %) ner till 0,3 % eller lägre om kostnaden för separationsarbetet är mer gynnsamt än uranråvaran.

Totala antalet steg i anriknings- respektive utarmningssektionen ges av:

$$S + 1 + T = \ln \left(\frac{N_P (1 - N_W)}{N_W (1 - N_P)} \right) / \ln \alpha . \quad (3:18)$$

I ekvationen ovan betecknar $S+1$ antalet steg i anrikningsdelen och T antalet steg i utarmningsdelen av kaskaden. Isotopfraktionerna i *feed*-, produkt- och avfallsströmmar betecknas N_F , N_P respektive N_W .

För anrikningsdelen fås:

$$S + 1 = \ln \left(\frac{N_P (1 - N_F)}{N_F (1 - N_P)} \right) / \ln \alpha , \quad (3:19)$$

och för utarmningsdelen:

$$T = \ln \left(\frac{N_F (1 - N_W)}{N_W (1 - N_F)} \right) / \ln \alpha . \quad (3:20)$$

Flödet genom varje steg n i anriknings- respektive utarmningsdel ges av:

$$L_n = \frac{2P(N_p - N_n)}{\varepsilon N_n(1 - N_n)}, \text{ och} \quad (3:21)$$

$$L_n = \frac{2W(N_n - N_w)}{\varepsilon N_n(1 - N_n)}, \quad (3:22)$$

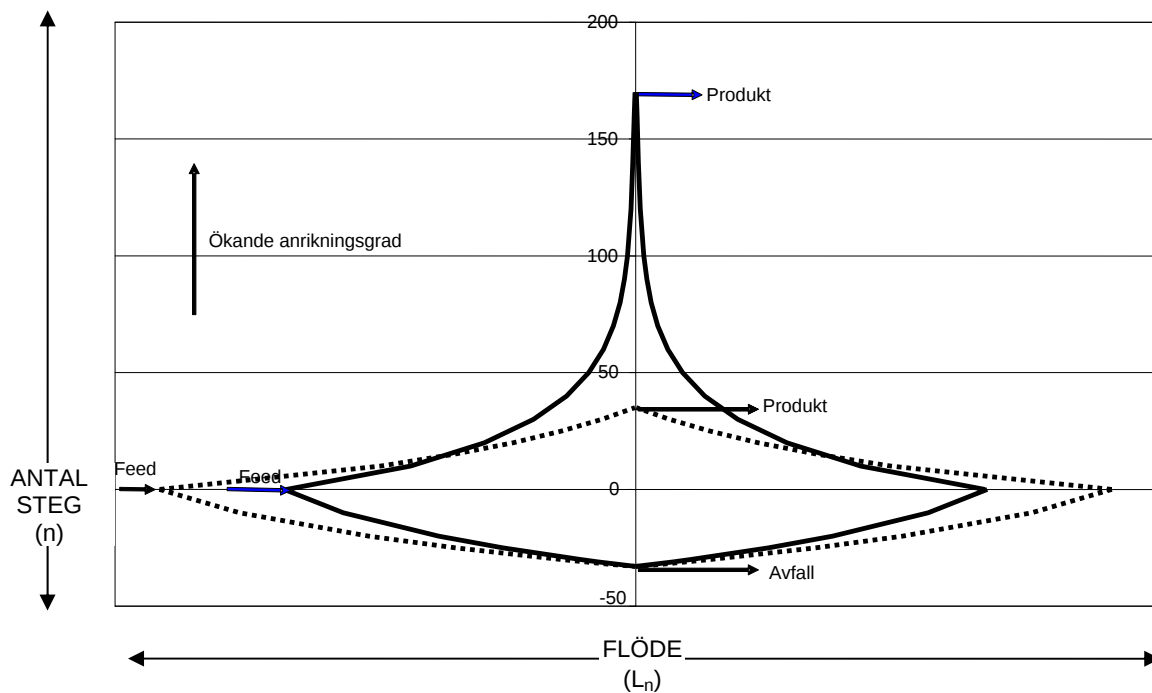
där $\varepsilon = \alpha - 1$. För att bestämma flödet i ett steg måste man således veta N i detta steg vilket kan beräknas genom att utgå från $N_0 = N_F$, där:

$$R_n = \alpha^n \cdot R_0 = \alpha^n \cdot \frac{N_0}{(1 - N_0)}, \quad (3:23)$$

och

$$N_n = \frac{R_n}{(1 + R_n)}. \quad (3:24)$$

Med dessa flöden beräknade kan man göra en grafisk beskrivning av kaskaden med antalet steg på y-axeln och totala flödet genom varje steg på x-axeln, vilket åskådliggörs i figur 5. Y-axelns nollvärde betyder "steg 0", det vill säga det steg där *feed* kommer in. Anrikningsdelens steg räknas sedan uppåt (positiva y-värden) och avtappningsdelens steg nedåt (negativa y-värden). I varje steg motsvaras flödet av figurens bredd.



Figur 5. Grafisk beskrivning av kaskad för anrikning från 0,72 % till 90 % (heldragen kurva) respektive från 0,72 % till 3 % (prickad kurva). Avfallsströmmen har antagits ha en isotopfraktion $N=0,2$ %.

I figur 5 ovan åskådliggörs två olika kaskader med olika antal steg och materialflöden för två olika anrikningsgrader. För beräkningen har använts en anrikningsfaktor $\alpha=1,041$, vilket är väl lågt för en modern gascentrifuganläggning, men detta värde har ändå valts eftersom skillnaden mellan olika kaskader då åskådliggörs tydligare.

Den streckade kurvan representerar en kaskad där slutprodukten har hög anrikningsgrad. Som synes ger detta en mer utdragen, avsmalnande form på grafen vilket betyder ett stort antal steg med små flöden.

Antalet centrifuger i varje steg kan erhållas genom att dividera flödet per steg med flödet genom en enda centrifug.

Hela flödet genom kaskaden kan beräknas enligt nedan om man känner g (se ekv. 3:3) och separationsarbetet (Detta värde är också representerat genom arean i figur 5):

$$L_{total} = \frac{8}{g^2} \Delta V. \quad (3:25)$$

För en anläggning med kapaciteten 1000 000 SWU/år och med t.ex. $g \approx 0,5$ (normalt för en gascentrifuganläggning) fås ett totalt flöde på 32 000 ton/år. Om anläggningen är uppbyggd av centrifuger med kapaciteten 15,2 SWU/år (dvs 65 800 centrifuger) skulle det i medeltal ge ett flöde på 486 kg/år genom varje centrifug, dvs 0,015 g/s.

En annan viktig parameter är innehållet (I , *inventory*) av material i anläggningen. Det beräknade flödet genom anläggningen kan antingen nås genom att en stor mängd material pumpas sakta genom anläggningen eller genom att en liten mängd material pumpas snabbt. För att beräkna innehållet av material i anläggningen behöver man veta centrifugens uppehållstid (*hold-up time*) som bestäms av den enskilda gascentrifugens design, enligt nedan,

$$I = L_{total} \cdot t_{hold-up}. \quad (3:26)$$

Då många av detaljerna kring gascentrifugers prestanda är sekretessbelagda har vi valt att använda standardvärden för olika egenskaper hos centrifuger enligt tabell 5 nedan.

Normalt startas kaskaden upp genom att alla steg fylls med material av samma anrikningsgrad, oftast den naturliga halten. Med kaskadens avtappningsventiler stängda körs sedan centrifugerna och gasen cirkulerar genom kaskaden. I de högre stegen börjar gasen anrikas mer och mer, men ingen produkt tas ut ur kaskaden innan koncentrationen i slutsteget nått den önskade anrikningsgraden. Anläggningen sägs då köras med totalt återflöde (*total reflux*). När man nått önskad anrikningsgrad öppnas avtappningsventilerna och ett litet produktflöde tas ut. Produktflödet ökas successivt men långsamt under en period, så att anrikningsgraden i produktflödet hålls konstant. Tiden fram tills jämvikt uppnås i processen kallas jämviktstiden:

$$t_e = \frac{8 \cdot t_{hold-up}}{g^2} \cdot \frac{(N_P - 2N_P N_F + N_F) \cdot \ln(R_P/R_F)}{N_P - N_F} - 2. \quad (3:27)$$

För en gascentrifuganläggning som producerar 3 % anrikat uran från naturligt uran fås med $g \approx 0,5$ en jämviktstid på ca 110 s. Jämviktstiden för en gascentrifuganläggning är betydligt

kortare än för t.ex. gasdiffusion⁹. Tiden för en kaskad med gascentrifuger att komma i jämvikt är endast minuter eller tiotals minuter jämfört med gasdiffusion eller kemisk jämvikt där jämviktstiden kan vara månader till år [9].

Tabell 5. Egenskaper hos en hypotetisk centrifug enligt [1].

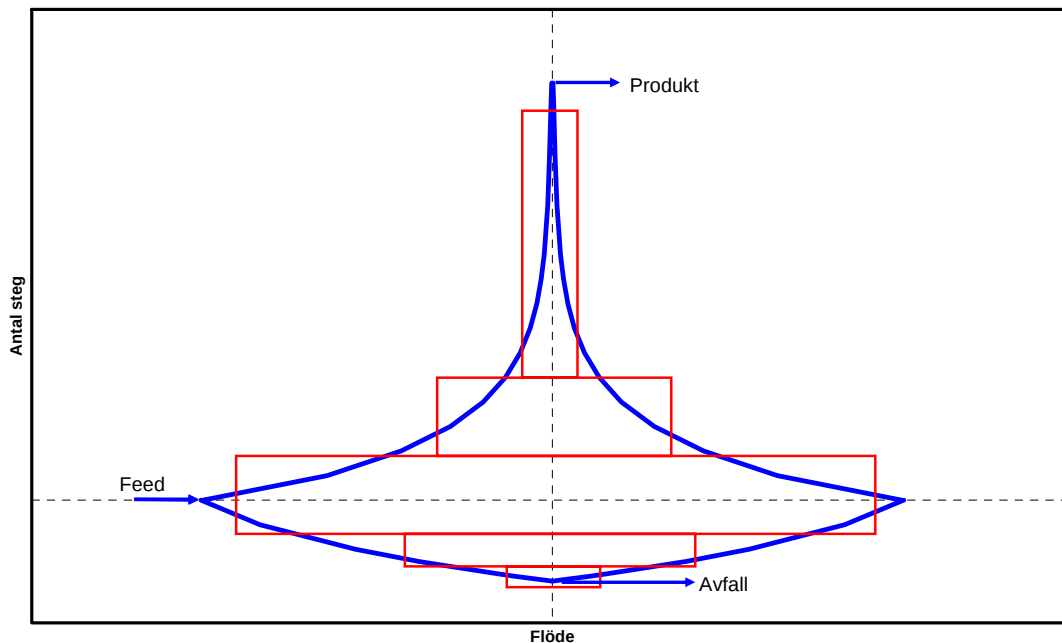
Radie	10 cm
Längd	150 cm
Rotationsfrekvens	800 varv/s
Periferihastighet	500 m/s
Separationsfaktor (q)	1,51
Separationsförmåga	15,2 SWU/år
Innehåll (<i>inventory</i>)	0,26 g uran
Genomflöde (<i>throughput</i>)	600 kg uran/år = 0,019 g uran/s
Uppehållstid (<i>hold-up time</i>)	13,7 s

3.4.1 Square och squared-off kaskader

Ovanstående resonemang rör s.k. ideala kaskader. I en ideal kaskad minimeras förhållandet mellan kaskadflöde och produktflöde och således produceras största möjliga mängd produkt för en given anrikning. Med en ideal kaskad fås också minsta möjliga jämviktstid för en given anrikningsgrad. Nackdelen med en ideal kaskad är däremot att varje steg i kaskaden skulle få olika materialflöde och energibehov, vilket resulterar i att rörkonstruktionen och antalet centrifuger i varje steg skulle bli olika. Att varje steg har olika konstruktion skulle leda till höga kostnader.

Praktiskt approximeras därför en ideal kaskad med en eller flera rektanglar (*squared-off cascade*) som var och en innehåller flera identiska steg. I figur 6 har den ideala kaskaden approximerats med fem olika rektanglar. Alla steg i en och samma rektangel har samma flöde och samma antal centrifuger.

⁹ För en gasdiffusionsanläggning är g betydligt mindre och eftersom t_e är omvänt proportionell mot g^2 blir jämviktstiden i detta fall mycket längre.



Figur 6. En ideal kaskad approximerad med flera rektanglar (squared-off cascade)

3.5 Centrifugutveckling och historik

Isotopseparation med hjälp av gascentrifugering påbörjades redan på trettioalet, då Jesse W Beams, som var specialist på höghastighetsapparater vid University of Virginia, kunde demonstrera en gascentrifug som separerade klorisotoper. Något senare, 1941, klarade Beams och hans kollegor även att separera uranisotoper, vilket var det första kända lyckade försöket av detta. Beams arbete uppmärksammades under Manhattanprojektet, inom vilket det första kärnvapnet byggdes, men gascentrifugspåret gavs dock upp till förmån för gasdiffusion och elektromagnetisk separation. Mycket av teorin runt gascentrifuger hann ändå arbetas fram under denna tid. Bland annat utvecklades både sub- och superkritiska centrifuger som alla separerade UF_6 . Man konstruerade också en motströmscentrifug där gasen cirkulerades längs rotorns axel och visade därmed att separationsförmågan kunde ökas väsentligt. Denna motströmscentrifug var dock fortfarande relativt komplicerad med rotn monterad på en axel.

Även i Europa pågick forskning kring gascentrifuger, bland annat i Tyskland, Österrike och Tjeckoslovakien. Det mesta av detta arbete avbröts dock vid andra världskrigets utbrott, följt av det tyska rikets fall, men mycket kunskap fanns förstås kvar. Detta drog Sovjetunionen nytta av vid krigets slut genom att tvångsförflytta många forskare och experter från dessa länder till de sovjetiska forskningslaboratorierna. Där fick de arbeta för det sovjetiska kärnvapenprogrammet som kämpade för hinna ikapp det amerikanska. Bland dessa forskare fanns Gernot Zippe, en talangfull österrikare som kom att arbeta och leda den sovjetiska utvecklingen av gascentrifuger för urananrikning tillsammans med den tyske fysikern Max Steenbeck. Under sin tid i Sovjetunionen uppfann Zippes forskarlag bland annat en enklare typ av centrifug där den enda fysiska kontakten mellan centrifugrotor och omgivning var ett

nållager i botten, vilket minskade friktionen avsevärt. De arbetade även med att sätta mellanrummet mellan rotor och yttre behållare under vakuum, och utvecklade nya *feed*-system.

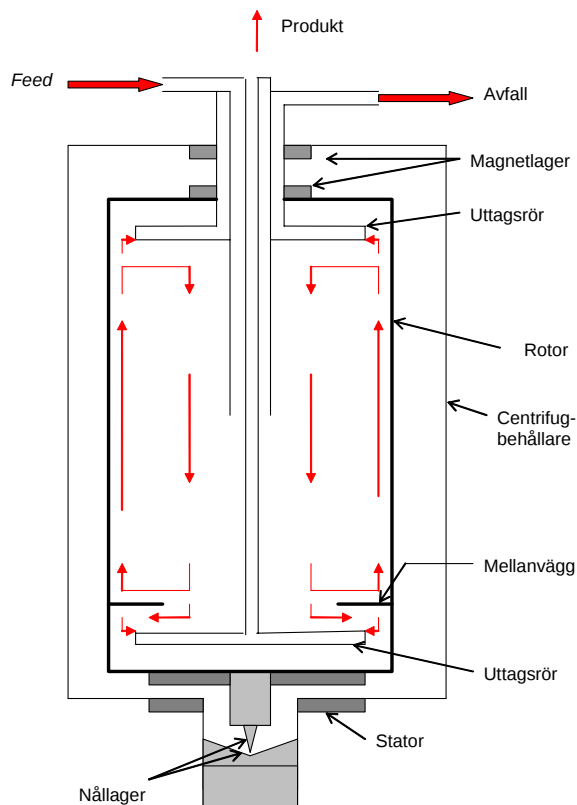
Zippe fick 1956 tillåtelse att lämna Sovjetunionen och han återvände då till Västeuropa för att två år senare resa till USA. Under de närmaste två åren kom Zippe att arbeta med Beams för att vidareutveckla gascentrifugeringstekniken (som mer eller mindre avstannat i väst) med hjälp av de kunskaper som Zippe medtagit från Sovjettiden. När man under sextiotalet kommit så långt i utvecklingen att centrifugerna kunde massproduceras beslutade de mest aktiva länderna inom området (USA, Storbritannien, Tyskland och Nederländerna) att vara mycket restriktiva med att sprida teknologin.

Gascentrifugteknologin hade nu utvecklats så långt att den började bli ekonomiskt intressant. 1964 bildades i Västtyskland det statliga bolaget Gesellschaft für Kernverfahrenstechnik (GKT) för kommersiell utveckling av centrifugtekniken, och bolaget privatiserades sedan 1970. Året därpå skrev Västtyskland, Storbritannien och Nederländerna under Almelo-fördraget. Detta fördrag innebar att de tre länderna förband sig att inom ett gemensamt samarbete utveckla centrifugtekniken för kommersiellt bruk och för detta ändamål bildades bolaget Urenco.

Urenco, liksom många andra av dagens centrifugtillverkare, baserar sina gascentrifuger på Zippes modell. Zippe står också bakom mycket av det arbete om centrifugdrift i vakuum samt konceptet att skapa gascirkulationen i rotorrröret med hjälp av skovlar och mellanväggar, i stället för med hjälp av uppvärmning som tidigare använts. Det var från Urenco som A.Q. Khan lyckades stjäla de konstruktionsritningar på centrifuger som ligger till grunden för det pakistanska kärnvapenprogrammet. Det var också centrifuger av denna typ man fann i Libyen då utrustningen från urananrikningsprogrammet där monterades ned. Även Iran har fått tillgång till gascentrifugteknologi via Khans nätverk.

4 Utrustning och material

I figur 7 visas en schematisk ritning av en centrifug. Centrifugen består av en tunnväggig rotor innesluten i ett vakuumtätt hölje. Den tunnväggiga rotorn drivs av en liten elektromagnetisk motor placerad i botten av rotorbehållaren. I botten av behållaren sitter också det nedre lagret som ofta är ett nållager. Toppen av rotorn hålls på plats av ett magnetiskt lager och har därför ingen kontakt med stationära komponenter. Gasen leds in i rotorn genom ett av de tre centrala koncentriska rören som har sitt inlopp i toppen av behållaren. De övriga två rören är för produkt- respektive avfallsströmmarna. Det stationära uttagsröret i botten ger mekaniskt en vertikal cirkulation av gasen. Utagsröret är till för att hjälpa till att leda ut den anrikade produktströmmen och skyddas av en roterande mellanvägg. Mellanväggen är också till för att inte uttagsröret skall störa det vertikala flödet, och har små hål som den anrikade gasen kan transporteras igenom.



Figur 7. En schematisk bild av en gascentrifug där den anrikade delen tas ut i centrifugens nedre del.

4.1 Material

Rotorn måste rotera med hög hastighet vilket kräver att rotormaterialet har hög hållfasthet i förhållande till densiteten. Material som uppfyller dessa krav är exempelvis aluminiumlegeringar, maråldrat stål, titan, glas- eller kolfiber. Förutom materialvalet i rotordelen är också toleranskraven hos komponenterna mycket strikta för att undvika obalans vid rotationen. För att kunna använda en så lång rotor som möjligt måste också förhållandet mellan elasticitetsmodul och densitet vara högt. Då separationsförmågan beror av v^4 , där v är periferihastigheten, resulterar en liten ändring i hastighet i en stor ändring i separationsförmåga.

Periferihastigheten begränsas av förhållandet mellan dragbrottgränsen och densiteten (se ekvation 3:11 och tabell 6 nedan). För fibermaterial är det parametern ”specifik modul” för en enskild fiber som anges i exportkontrolltexterna inom EU och Nuclear Suppliers’ Group (NSG). Den specifika modulen beror av dragbrottgränsen för den enskilda fibern och fibermaterialets densitet. Dragbrottgränsen för en lindad rotor beror dels av den enskilda fiberns specifika modul och dels av lindningsgeometrin. Moderna fibermaterial kan ha mycket högre dragbrottgränser än de som anges i tabellen.

Tabell 6. Hållfasthetsdata, densitet och maximal periferihastighet för några olika centrifugmaterial. Dragbrottgräns enligt NSG:s kontrolltext [10], förutom för glas- och kolfiber där data är hämtade ur [5].

Material	Dragbrottgräns (MPa)	Densitet (g/cm ³)	Max periferihastighet (m/s)
Aluminium	460	2,7	413
Rostfritt stål	1408	7,8	425
Titan	900	4,54	445
Maråldrat stål	2050	7,8	513
Glasfiber	500 ⁱ⁾	1,8	530
Kolfiber	845 ⁱⁱ⁾	1,6	730

ⁱ⁾ Gränsen för specifika modulen enligt NSG:s lista Part 2 är $3,18 \cdot 10^6$ m [10].

ⁱⁱ⁾ Gränsen för specifika modulen enligt NSG:s lista Part 2 är $12,7 \cdot 10^6$ m [10].

UF₆ är som nämnts ovan också mycket korrosivt och det krävs därför att all utrustning som kommer i kontakt med gasen är tillverkad i eller belagd med ett material som är korrosionsbeständigt mot UF₆. Exempel på sådana material är rostfritt stål, nickellegeringar med mer än 60 % nickelhalt, kompositmaterial, teflon, aluminium, aluminiumlegeringar eller aluminiumoxid.

De för centrifuger användbara material som är under exportkontroll enligt NSG:s lista Part 2 beskrivs kortfattat nedan. Numret vid varje rubrik refererar till det nummer som utrustningen har i EU:s rådsförordning 1334/2000 bilaga 1. Den fullständiga exportkontrolltexten i denna EU-förordning återfinns i Bilaga 3.

De exportkontrollerade materialen finns också medtagna i NSG:s lista Part 1 och under 0B001 i EU-förordningen, där färdiga centrifugkomponenter beskrivs. Dessa kontrolltexter använder samma toleransgränser som de nedan beskrivna förutom vad gäller fiber/fibermaterial (Se under denna rubrik nedan).

Aluminiumlegeringar(1C202a) i form av rör eller i massiv form med en ytterdiameter på mer än 75 mm och som har eller kan uppnå en dragbrottgräns på 460 MPa eller mer är under exportkontroll p.g.a. dess möjliga användning i centrifugrotorer. Hållfastheten kan ökas med olika typer av värmebehandlingar. Det finns mängder av olika aluminiumlegeringar, men det är relativt få som kan uppnå de hållfasthetskrav som krävs för centrifuganvändning. De flesta aluminiumlegeringar i den s.k. 7000-serien (t.ex. 7050 eller 7075) och flera i 2000-serien (t.ex. 2014 och 2024) kan värmebehandlas så att dragbrottgränsen överstiger 460 MPa. Man bör dock vara uppmärksam på alla legeringar i dessa serier (2000- och 7000-serien) då det kan finnas möjlighet att även andra legeringar med dragbrottgräns under kontrollvärdet skulle kunna värmebehandlas för att uppnå kontrollerade dragbrottgränser. Aluminiumlegeringar i övriga serier kan inte nå den specificerade dragbrottgränsen. Värmebehandling och bearbetning av aluminiumlegeringar beskrivs i större detalj i Bilaga 1. I Sverige finns det ingen producent som tillverkar aluminiumprofiler med den kontrollerade hållfastheten. SAPA Aluminium i Finspång är dock ett svenskt företag som tillverkar andra aluminiumlegeringar.

Titanlegeringar (1C202b) i form av rör eller i massiv form med diameter på mer än 75 mm och som har eller kan uppnå en dragbrottgräns på 900 MPa eller mer är under exportkontroll p.g.a. dess möjliga användning i centrifugrotorer. Titans höga hållfasthet och låga densitet gör materialet intressant som material för gascentrifuger. Titanpulver som värms till 250°C brinner i luft och större bitar av titan kan brinna vid 450°C – även i kvävgasatmosfär. Dessa brandegenskaper samt den relativt höga kostnaden för titan gör dock att titan inte är ett förstahandsval för centrifugrotorer. Titanlegeringar betecknas med Grade 1 t.o.m. Grade 36 (ASTM standard) där exempelvis Grade 5, Grade 24 och Grade 25 har dragbrottgräns runt 900 MPa. Genom olika värmebehandlingar kan man nå draghållfastheter upp mot 1100 MPa. Titanlegeringar under kontrollgränsen kan således också nå högre draghållfastheter genom värmebehandling – och eventuellt nå hållfastheter över 900 MPa. Sandvik Steel i Sandviken tillverkar – eller har möjlighet att tillverka – en del titanlegeringar med draghållfastheter runt 900 MPa. Det kan påpekas att det är svårt att tillverka rör av dessa mycket hårda legeringar vilket kräver specialutrustning.

Maråldrat stål (1C216) som har eller kan uppnå en dragbrottgräns på 2050 MPa eller mer är under exportkontroll p.g.a. möjlig användning i centrifugrotorer eller för att tillverka topp- och bottenplattor (*end-caps*) för centrifugerna. Metallämnen under 75 mm är inte under kontroll. Det finns olika kvaliteter på maråldrat stål och det är bara de med hög hållfasthet som är intressanta i centrifugsammanhang. Draghållfastheten hos maråldrat stål varierar från 1000-1170 MPa för de sämre kvaliteterna. Vissa sorter av maråldrat stål kan dock efter värmebehandling uppnå draghållfastheter upp emot 2400 MPa. Maråldrat stål beskrivs i mer detalj i Bilaga 2. I Sverige finns ingen producent av maråldrat stål.

Fibrer eller fiberliknande material (1C210) är under exportkontroll på grund av dess möjliga användning i gascentrifuger. Enligt NSG:s lista Part 2 är dessa under kontroll om de är tillverkade av kol eller aramid och har en specifik modul på $12,7 \cdot 10^6$ m eller större eller en specifik draghållfasthet på mer än $235 \cdot 10^3$ m, eller om de är tillverkade av glas och har en specifik modul på $3,18 \cdot 10^6$ m eller större och en specifik draghållfasthet av $76,2 \cdot 10^3$ m eller större.

Observera att för färdiga centrifugkomponenter, upptagna i NSG:s lista Part 1 och i EU-förordningen under 0B 001b, gäller samma gränsvärden för alla fibermaterial oberoende av vilken typ av fiber som komponenten är tillverkad av (Gränsvärdena är desamma som för glasfiber i NSG Part 2).

Varje fiber består av knippen av tusentals filament med en diameter på mellan 0,5 och 1 mikrometer och som sedan kan lindas och impregneras för att öka hållfastheten. Kolfiber som förimpregnerats med harts kallas ofta prepreg. Det tillverkas varken fibrer eller fiberliknande material i Sverige, men däremot finns företag som lindar fibrer för att tillverka kompositmaterial.

4.2 Utrustning under exportkontroll enligt NSG Part 1

Inom exportkontrollregimerna Nuclear Suppliers' Group (NSG) och Zanggerkommittén har man identifierat viss utrustning för gascentrifugering som anses vara relevant att belägga med exportkontroll. Dessa produkter finns idag inkluderade i EU:s lagstiftning i förordning 1334/2000 bilaga 1. Utdrag ur denna förordning rörande utrustning för urananrikning med gascentrifugering bifogas i Bilaga 3.

I detta avsnitt beskrivs kortfattat den utrustning som har anknytning till gascentrifugering och som idag är under exportkontroll enligt NSG Part 1 (INFCIRC/254/Rev.7/Part 1) [11] d.v.s. *”anläggning för separation av isotoper ur naturligt uran, utarmat uran och särskilt klyvbart material samt därför särskilt konstruerad eller iordningställd utrustning eller komponenter (Anläggning för separation med gascentrifugprocesser)”*. I det efterföljande avsnittet beskrivs några ytterligare produkter som har dubbla användningsområden (*”dual-use”* produkter) med anknytning till gascentrifugering, d.v.s. NSG Part 2 (NFCIRC/254/Rev.6/Part 2) [10]. Inom parantes anges referens till EU:s förordning 1334/2000, bilaga 1.

Rotorrören (0B001b-3) är vanligtvis tunnväggiga cylindrar (12 mm eller mindre) och är under exportkontroll om de har en diameter mellan 75 mm och 400 mm och är tillverkade av något av de hållfasta, korrosionsbeständiga materialen som nämns i föregående kapitel. Observera att för rotorror tillverkade av fiber/fiberliknande material gäller att materialet har en specifik modul av minst $3,18 \cdot 10^6$ m och en specifik draghållfasthet av $76,2 \cdot 10^3$ m, oavsett vilken fiber det är frågan om (till skillnad från exportkontrollen av de enskilda fibermaterialen upptagna i kapitel 4.1). Flera rotorror kan monteras ihop med hjälp av bälgar eller ringar för att öka den totala rotorlängden, vilken kan variera från ca 300 mm upp till 15 meter. Förhållandet mellan längd och diameter är oftast större än 2. Rotorändarna kan eventuellt ha tjockare godstjocklek. Insidan av röret måste ha en mycket jämn yta.

Ringar eller bälgar (0B001b-4) används för att förstärka rotorroret lokalt (exempelvis vid rotorgavlarna) eller för att sammankoppla flera rotorlängder. Ringen är en kort, tunnväggig cylinder och bälgen ser likadan ut men med en inklädning (ett utbuktande veck) längs omkretsen. Eftersom de omsluter rotorroret så är diametern följaktligen av samma storlek som rotorrorets diameter.

Mellanväggar, s.k. bafflar, (0B001b-5) är avsedda att monteras inne i centrifugens rotorror för att skydda utloppskammaren där skoveln (se 0B001b-12) för ut gasen ur rotern. I vissa fall är också bafflarna avsedda att hjälpa till att upprätthålla gascirkulationen i utloppskammaren. Bafflarna har ett centralt hål av varierande storlek (alltifrån ring till skiva med hål) och de kan också ha hål cirkulärt placerade närmare periferin. Bafflarna kan tillverkas genom maskinbearbetning från massiv metall, genom pressning från tunna plåtar eller av kompositmaterial. De måste ha en fin ytjämnhet. Bafflarna har samma diameter som rotern de sitter i.

Topp- och bottenplattor (0B001b-6) (*end-caps*) är tillverkade för att precis passa till rotorgavlarna och svetsas fast för att hålla gasen innesluten i rotorn. De kan tillverkas genom maskinbearbetning från massiv metall, genom pressning från tunna plåtar eller av kompositmaterial. Det är viktigt att de har en fin ytjämnhet. Topplattan har ett större hål i mitten (genom vilket de koncentriskt uttags- och *feed*-rören går) och en central knopp för att kunna inhysa den magnet som är del i det övre lagret (Se 0B001b-7). Bottenplattan har en mindre central knopp för att inhysa lagertapp (se 0B001b-8) och den roterande delen av motorn (se 0B001B-10).

Magnetiskt upphängda lager (0B001b-7) kan bestå av en stationär ringformad permanentmagnet. Denna är upphängd i ett lagerhus innehållande ett dämpande medium. Lagerhuset är fastsatt i centrifugbehållaren och måste vara korrosionsbeständigt. Magnetringens undersida utgör en magnetisk pol som växelverkar med en ringformad polkärna eller en annan magnet som är fastsatt på ovansidan av rotorns topplatta. Detta dämpar främst vertikala rörelser, men stoppar även rörelse i radiell led. Materialet i magneterna kan variera, men ett av de bästa är samarium-kobolt eller AlNiCo. Genom hålet i centrum av lagret går uttags- och *feed*-rören.

Höga krav ställs på magnetens egenskaper, bland annat homogenitet och att de magnetiska och geometriska axlarna inte får avvika för mycket från varandra.

Lager (0B001b-8) bestående av en roterande lagertapp och en stationär lagerskålenhet monterad på en dämpare används som stöd för rotorns nedre del. Lagertappen är vanligtvis tillverkad av härdat stål. Dess ena ände är monterad på rotorns bottenplatta och dess andra ände är halvsfärisk för att med perfekt passform vila i den underliggande skålenheten. Lagertappen kan också vara upphängd i ett hydrodynamiskt lager. Skålenheten är puckformad med en halvfärisk fördjupning i ena änden för lagertappen.

Molekylpumpar (0B001b-9) är till för att förhindra UF₆-gas som läcker ut genom hålet där de koncentriskt rören passerar igenom topplattan att nå vakuumområdet mellan rotor och centrifugbehållare (vilket ger oönskad friktion). En molekylpump består av en cylinder, vanligtvis tillverkad av stål, rostfritt stål eller aluminium, med invändigt spiralförsett spår och maskinbearbetad inneryta (vanligen svärtade). Molekylpumpen sitter på centrifugbehållarens insida och kan antingen vara en integrerad del av centrifugbehållaren, eller vara en separat del. För att verka måste molekylpumpen sitta mycket nära rotorns utsida och den har därför en diameter nära den för rotorn samt en mycket god passform.

Ringformade statorer (0B001B-10) för elektriska motorer används för att driva centrifugens rotation. Statorn består av en laminerad järnkärna, vilket minimerar värmeförlusterna. Kärnan är sedan lindad med koppar så att ett antal spolar uppkommer. Genom att använda flerfasig växelström kan spolarna fås att alternera poltyp cykliskt och polerna kan ses som vandrande mellan spolarna i en cirkulär rörelse. Ovanför statorringen, på undersidan av rotorns bottenplatta, sitter en permanentmagnet eller polkärna vilken växelverkar med statorns magnetfält och ger upphov till rotationsrörelsen.

Motorn arbetar synkront och i vakuum. Hastigheten hos en sådan motor är proportionell mot frekvensen hos strömmen som matas in från frekvensomvandlaren. Statorer under exportkontroll arbetar i ett mycket högt frekvensområde: 600 till 2000 Hz. Kontrollerade statorer skall också ligga i effektområdet 50 till 1000 VA.

Centrifugbehållaren (0B001b-11) inhyser rotorn och har dels funktionen att skydda närliggande centrifuger om en rotor går sönder och är dels till för att hålla rotorn i vakuum. Rotation i vakuum ger betydligt lägre energiförbrukning på grund av att friktionen från gasen minskas. Vakuumet upprätthålls genom att en molekylpump är kopplad till centrifugbehållaren (Se 0B001b-9). Behållaren har precisionsbearbetade ändar för att inhysa lager. Det är viktigt att behållarens ändar är vinkelräta mot behållarens längdaxel. Om centrifugbehållaren har en integrerad molekylpump finns spiralformade spår på insidan av ena änden. Det finns behållare som kan inhysa flera centrifuger (bikakestruktur).

Uttagsrör (0B001b-12) (skovlar) med en maximal innerdiameter på 12 mm är under exportkontroll och används för att leda ut UF₆ gasen från rotorn. De är fixerade vid ett stationärt rörsystem, bestående av tre koncentriska rör, som löper längs rotorns längdaxel. Skovlarna pekar radiellt ut mot periferin och mynnar nära rotorväggen. Den yttre änden är böjd så att mynningen vetter mot det roterande gasflödet så att gasen träffar denna vinkelrätt. Principen som utnyttjas är att när gasen trängs in i röret omvandlas dess rörelseenergi till potentiell energi i form av ett tryck. Detta kallas för Pitotrörsprincipen och används vanligtvis för flödesmätning¹⁰. Gasen trycks således in i röret och leds till rotorns mitt och vidare längs ett av de koncentriska rören. Alla rör måste vara korrosionsbeständiga mot UF₆ och är därför ofta gjorda av koppar, aluminium eller rostfritt stål.

Frekvensomvandlare (0B001b-13) behövs för att mata motorstatorn och då den skall användas i en gascentrifuganläggning måste den vara mycket stabil. Frekvensomvandlaren omvandlar en inkommande växelström, vanligtvis med en frekvens på 50/60 Hz, till en i centrifugsammanhang mer användbar frekvens (600/2000 Hz). De kan antingen vara av en typ som levererar en fix utfrekvens eller en varierbar frekvens som maximalt ligger i området 600/2000 Hz beroende på centrifugtyp. Dessa höga frekvenser är inte vanliga för andra tillämpningar. En frekvensomvandlare kan driva en eller flera centrifuger.

In- och utmatningssystem (0B002a,b,c,d,e,f) samt rörsystem behövs för att mata UF₆-gas till och mellan centrifugerna och för att ta ut produkt och avfallsström. Dessa system och rör måste vara korrosionsbeständiga mot UF₆. Den, vid rumstemperatur, fasta föreningen UF₆ förångas i autoklaver och leds genom centrifugerna med hjälp av ett komplext rörsystem. Produkt- och avfallsströmmarna från centrifugerna överförs till fast form via desublimeringsstationer/ kylfällor. Kompressorer kan också användas för uttag av produkt- och avfallsgasen.

Masspektrometer (0B002g) är en typ av analysinstrument som kan användas för att mäta koncentrationen av ²³⁵U. Masspektrometrar som är under kontroll enligt den del av NSG Part 1 som behandlar gascentrifugering används för att analysera halten av ²³⁵U i gasfas "on-line". De krav som utrustningen måste uppfylla är; upplösning större än en massenhet för massor större än 320 amu¹¹ och jonkälla tillverkad i eller ytbelagd med nichrome eller monel vilket båda två är nickelhaltiga material som är korrosionsbeständiga mot UF₆. Vidare måste den ha en s.k. "electron bombardment" jonkälla, dvs jonisation av gasen åstadkoms då den beskjuts med elektroner. Instrumentet skall också vara utrustat med ett kollektorsystem lämpligt för isotopanalys. Flera olika typer av instrument är under kontroll enligt NSG Part 2, det som främst skiljer mellan Part 1 och Part 2 är upplösningen hos spektrometrarna.

¹⁰ För att kunna beräkna flödet måste även trycket i den fria gasen, innan den träffar Pitotrörsmynningen, vara känd. Med hjälp av Bernoullis ekvation kan sedan flödet i den fria gasen beräknas.

¹¹ Amu = Atomic Mass Unit, atomär massenhet på svenska. ²³⁵U har massan 235 amu och ²³⁸U väger 238 amu. UF₆ har massan 349 amu för ²³⁵U och 352 amu för ²³⁸U.

4.3 Utrustning under exportkontroll enligt NSG Part 2

Nedan beskrivs kortfattat den utrustning med anknytning till gascentrifugering som idag är under exportkontroll enligt NSG Part 2 (INFCIRC/254/Rev.6/Part2) [10], dvs produkter som har dubbla användningsområden (*dual-use* produkter). Inom parantes anges referens till EU:s förordning 1334/2000 bilaga 1, som återfinns i Bilaga 3.

Lindningsmaskiner (1B201) används för att tillverka rotdröj av fiberliknande material såsom kol- och glasfiber (Se kapitel 4.1 för definition av fiber). Fibrerna lindas runt en dorn med hjälp av ett styrsystem som koordinerar maskinens rörelser längs flera axlar. Viktigaste axlarna är dornens rotation och lindningsögats rörelser som bestämmer hur fibertrådarna läggs på dornen. Det finns även lindningsmaskiner som kan tillverka flera dröj åt gången. Fiber materialet kan vara förbehandlat med harts, eller så tillsätts harts som ett steg vid lindningen. Fiber materialet bär huvudsakligen last i fiberriktningen, och genom olika lindningar kan man ge materialet olika hållfasthet i förutbestämda riktningar, dvs. anisotropi.

Nickelpulver (1C240) kan användas för att göra korrosionsskyddande skikt i tryckgivare och ventiler som används vid gascentrifugering. Nickelpulver används främst i nukleära sammanhang för att göra diffusionsbarriärer för gasdiffusionsprocessen.

Ventiler (2A226) i en gascentrifuganläggning måste vara korrosionsbeständiga och är under exportkontroll om de är helt tillverkade av eller fodrade med aluminium, aluminiumlegering, nickel eller nickellegering som innehåller över 60 viktprocent nickel. För att minimera risken för läckage i de vakuumsatta centrifugerna används en bälg tätning i korrosionståligt material istället för en vanlig packning inuti ventilen. Bälghkonstruktionen ger en tät förslutning utan skavande delar och därmed uppkommer inte förslitningsskador och läckage lika lätt. Dessa ventiler är oftast mindre och färre i antal än de som används i rörsystemen i gasdiffusionsanläggningar. Nominella storlekar (rördiametrar) över 5 mm är kontrollerade.

Mät- och inspektionsutrustning (2B206) krävs för att inspektera komponenter för gascentrifugering såsom rotdröj, botten- och toppplattor, bafflar och skovlar. En av de mest använda mätutrustningarna för nukleära ändamål är CMM (Coordinate Measuring Machines). De mätutrustningar som är under kontroll har god noggrannhet och bra upplösning.

Rotations- och flödesformande maskiner (2B209) kan användas för att tillverka cylindrar av olika metaller med god noggrannhet för användning till gascentrifuger. Maskinerna pressar materialet runt ett dorn som på så sätt formar cylindrarna. Vid formningen utgår man från ett ringformat metallämne som formas till cylindrar med hjälp av valsar som trycker materialet mot dornet. Vid rotationsformning är trycket lägre och förändringen i godstjockleken hos den färdiga cylindern jämfört med utgångsämnet är i detta fall liten.

Maskiner för centrifugalbalansering (2B219) används för att testa alla roterande komponenter innan centrifugen monteras. De kan vara stationära eller mobila, horisontella eller vertikala. Kraven för kontroll skiljer sig lite beroende på maskintyp (två typer upptas på EU:s lista), men gemensamt är att de skall ha en axeltappdiameter på över 75 mm och kunna balansera vikter mellan 0,9 kg och 23 kg.

Induktionsugnar (2B226) vanligaste nukleära användning är för att smälta uran eller plutonium, men de är också användbara för att värmebehandla maråldrat stål. Ugnen är ofta tillverkad i cylinderform med anslutningar för vakuum eller inert gas, elektricitet, kylmedel och instrumentering. Spolen omsluter smältdegeln som värms genom elektromagnetisk induktion. Spolen är ofta gjord av koppar och kan vara ihålig för att kunna innehålla kylmedel. Alla induktionsugnar med kontrollerad atmosfär (vakuum eller inert gas) och en specificerad utgångseffekt på minst 5 kW är under kontroll. Även induktionsugnar med en specificerad ingångseffekt på minst 5 kW är under kontroll men då med ytterligare krav på arbetstemperatur och induktionsspolens storlek.

Utrustning för tillverkning, sammansättning och upplinjering av centrifuger, bälghormande dorn och formar (2B228) behövs vid montering av centrifugdelar (bafflar, topp- och bottenplattor och rotor) samt för att tillverka bälgar. Hopsättning av centrifugdelar sker med utrustning som till exempel precisionsdorn, inspänningsanordningar, och krymppassningsmaskiner. Upplinjeringen av centrifugdelarna måste ske mycket noggrant. Exempel på användbar utrustning är precisionsmätprober och pneumatiska kolvar. För bälghormande dorn och dysor gäller att de skall kunna användas för att tillverka bälgar under exportkontroll (Se 0B001b-4). För att utrustning skall vara under exportkontroll finns också krav på hur stora bälgar som kan tillverkas, men noteras bör att dessa storlekskrav inte är inkluderade under 0B001b-4.

Tryckgivare (2B230) behövs för att mäta och kontrollera gastrycket av UF_6 som lämnar eller tillförs en kaskad. De är under exportkontroll om de är helt tillverkade av eller fodrade med aluminium, aluminiumlegering, nickel eller nickellegering som innehåller över 60 viktprocent nickel. Mätaren måste ha hög noggrannhet och klara av att mäta de låga tryck som finns i gascentrifugsystemet. De placeras vanligen nära kaskadens avtappningsventiler.

Frekvensomvandlare (3A225) behövs för att omvandla strömförsörjningen från normalfrekvensen 50/60 Hz till den frekvens som gascentrifuger normalt arbetar inom (600/2000 Hz). De kan antingen vara av en typ som levererar en fix utfrekvens eller en varierbar frekvens som maximalt ligger i området 600/2000 Hz beroende på centrifugtyp. På de frekvensomvandlare som är under kontroll enligt NSG Part 2 ställs delvis andra krav än på de som är speciellt konstruerade för gascentrifuger (NSG Part 1). De viktiga parametrarna frekvens/frekvensområde och frekvensstabilitet är desamma. Däremot är kraven på harmonisk distorsion inte lika höga (under 10 %). Uteffekten skall vara 40 W eller mer oberoende av omvandlarens effektivitet, för omvandlare kontrollerade enligt NSG Part 1 skall effektiviteten vara över 80 %. Det är inte vanligt att omvandlare som används för att driva höghastighetsverktyg (sågar, borrar m.m.) eller i andra icke-nukleära sammanhang kräver en frekvensstabilitet som är bättre än 0,1 %.

Masspektrometer (3A233) under kontroll enligt NSG Part 2 är instrument som kan användas för att bestämma isotopkoncentrationer av uran, plutonium och andra aktinider i nitratföreningar från upparbetningsanläggningar, fluorföreningar från anrikningsanläggningar och metaller från vapentillverkning. Instrumenten skall kunna mäta joner med massan 230 amu eller större med en upplösning bättre än 2/230. Instrument med olika typer av jonkällor är under kontroll;

- Induktivt kopplade plasmajonkällor (ICP/MS). Dessa instrument kan användas för att analysera både gaser och fasta ämnen upplösta i vätska. Jonkällan är främst lämpad för analys av atomära prover.
- Glödurladdningsjonkällor (GDMS) Jonkällan kan jonisera prover i fast form och är främst lämpad för analys av atomära egenskaper.
- Termisk jonisation (TIMS). Med TIMS kan man få hög precision med små provmängder. Provet, som först måste separeras kemiskt, dunstas oftast in på ett filament som sedan värms för att jonisera provet.
- Elektronbeskjutningsjonkälla (electron bombardment) där jonkällan är tillverkad i eller ytbelagd med material resistent mot UF_6 . Jonkällan är främst lämpad för jonisation av gaser och flyktiga vätskor.
- Molekylstrålemasspektrometrar. Denna typ av masspektrometer kan användas för att analysera laddade molekyler, exempelvis UF_6 . Jonisationen kan ske på många olika sätt, exempelvis med elektronstråle, laser eller mikrovågor.
- Masspektrometrar utrustade med mikrofluorineringsjonkälla speciellt avsedd för användning med aktinider eller aktinidfluorider. Denna typ av masspektrometer har en liten provkammare där ett icke-flyktigt prov kan fluorineras till en flyktig förening. Denna flyktiga förening kan sedan introduceras i en konventionell jonkälla för prover i gasfas, exempelvis en elektronbeskjutningsjonkälla. Som exempel kan nämnas att fasta uranföreningar kan överföras till UF_6 genom fluorinering.

4.4 Övrig känslig utrustning

Anrikningsanläggningar kräver förutom en mängd produkter under exportkontroll även annan utrustning och komponenter som inte kan beläggas med exportkontroll på grund av vitt utbredda användningsområden. De kompressorer och kondensorer som kan användas för utmatning av avfallströmmen ur en gascentrifuganläggning och de transportbehållare som behövs för produkt- och avfallsström är exempel på sådan utrustning som idag ej är under exportkontroll, men som dock behövs i en anläggning.

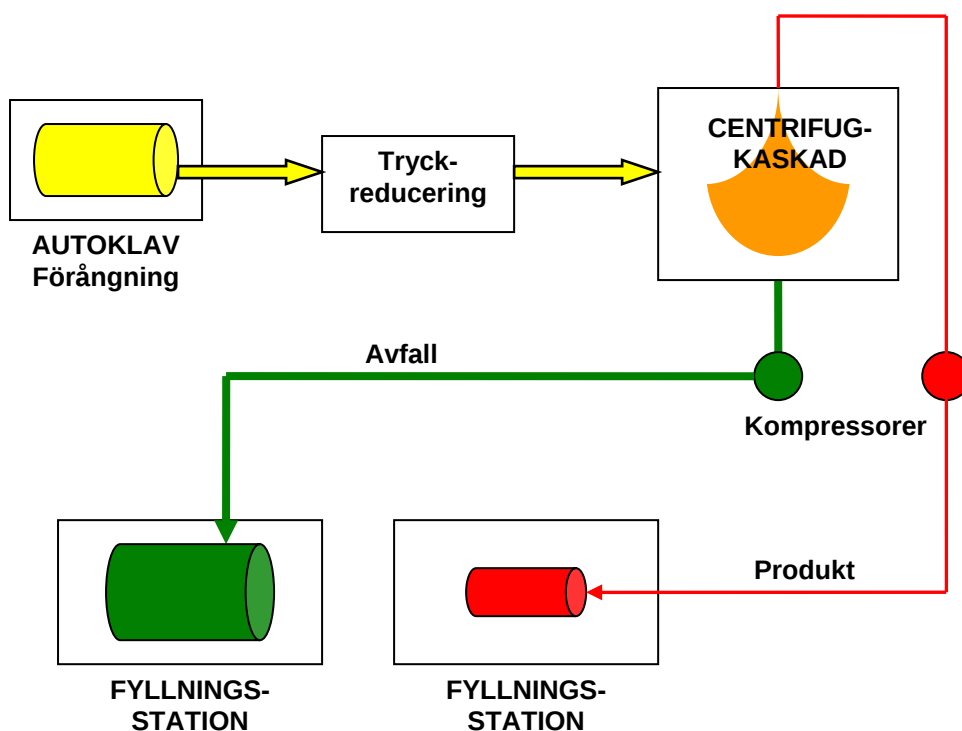
Inom ramen för denna studie har vi av sekretesshänsyn valt att utelämna specifik information angående annan känslig utrustning utanför listorna. Generellt kan dock sägas att utrustning som ligger utanför listornas krav också i många fall skulle kunna användas. Man bör därför vara uppmärksam på att en importör medvetet kan lägga sig precis under de kontrollerade specifikationerna för att undgå kontroll.

Den utveckling som uppenbarats de senaste åren, där vissa länder istället för att försöka importera färdiga centrifugrotorer tillverkar egna, gör att man bör vara extra uppmärksam på den utrustning som behövs för att exempelvis tillverka centrifugrotorer. Andra flödesformande maskiner än de idag kontrollerade kan därför vara intressanta i sammanhanget.

5 Drift av en gascentrifugeringsanläggning

Ett exempel på hur en gascentrifuganläggning kan se ut visas schematiskt i figur 8. Beskrivningen av denna anläggning bygger främst på information från Urenco Ltd.

UF₆-feed anländer i transportbehållare till gascentrifuganläggningen. Denna transportbehållare placeras i en autoklav där UF₆ förångas. Den förångade UF₆-feeden förs via uppvärmda rör (för att förhindra desublimering till fast fas) till en eller flera uppehållsstationer där trycket reduceras till ett så lågt tryck att UF₆ hålls gasformigt vid rumstemperatur. Därefter leds gasen via rör till kaskadhallen där isotopsepareringen sker. Rörsystemet in till kaskaden behöver ej vara uppvärmt eftersom trycket är lågt. UF₆ lämnar gascentrifugkaskaden i två strömmar, en anrikad produktström och en utarmad avfallsström. Trycket är fortfarande mycket lågt när gasen lämnar kaskaden. Uttaget av dessa strömmar sker antingen med hjälp av kylfällor där gasen får desublimera till fast fas, eller med hjälp av kompressorer där trycket ökas till över trippelpunkten¹² så att gasen kondenserar. Vid användning av kylfällor samlas UF₆ upp i en sådan fälla, värms upp tills UF₆ åter förgasas, varefter den leds vidare till en transportbehållare. Produktströmmen och avfallsströmmen förs sedan vidare till varsin transportbehållare.



Figur 8. Schematisk beskrivning av en gascentrifuganläggning.

¹² Trippelpunkten för UF₆ ligger vid 64 °C och 1516,5 mbar. Ökas tryck och temperatur över dessa värden kommer UF₆ att kondensera till vätska i stället för att desublimera till fast fas.

5.1 Praktiskt kring driften

UF₆-*feed* och -avfall förvaras och transporteras normalt i standardiserade cylindriska behållare med en diameter på drygt 1,2 m. Till den anrikade UF₆-produkten används mindre behållare, vars storlek kan variera beroende på anrikningsgrad. En höganrikad produkt har mindre behållarstorlek för att minimera kritikalitetsrisken.

Produkt- och avfallsströmmarna kan tas ut antingen genom kompression/kondensering eller genom kylfällor. I det senare fallet använder man sig ofta av en primär och en sekundär kylfälla för att försäkra sig om att produkten överförs fullständigt till fast fas. Hos Urenco i Gronau, Tyskland, är den äldre avdelningen av centrifuganläggningen utrustad med kylfällor, medan man i den nyare delen endast använder sig av kompressorer.

Generellt är ett system med kylfälla att föredra i de fall då gascentrifugkaskaden skall generera ett litet produktflöde med hög anrikningsgrad.

För gastransporten i en gascentrifuganläggning behövs flera kilometer rör och det är nödvändigt för driften att systemet är rent och fritt från läckor.

En anrikningsanläggning kan drivas så att UF₆ anrikas till en önskad grad direkt, eller så kan UF₆ med två olika anrikningsgrader tillverkas för att efteråt blandas ihop i sådana proportioner att önskad anrikningsgrad uppnås.

Till kylning och värmning kan el, ånga, luft eller vatten användas, liksom kombinationer av dessa, beroende på var i systemet det krävs. Hanteringen av avfallsbehållarna är oftast mindre känslig än den för *feed* och produkt, och kylning kan därför ske genom att vatten sprutas direkt på behållarna.

5.1.1 Analysinstrument

Materialmängderna av *feed*, produkt och avfall kontrolleras genom vägning (gravimetri) av alla behållare före, under och efter påfyllning. Detta görs för att kontrollera fyllnadsgraden av behållare, och för att kontrollera att materialbalansen stämmer över hela anläggningen så att inget material försvinner. Vågarna är extremt känsliga, enligt Urenco kan de uppmäta avvikelser på ned till 100 g hos en behållare på nära 16 ton.

Halten ²³⁵U kan kontrolleras genom isotopanalys (masspektrometri) *on-line* i systemet. Prov för isotopanalys tas också av inkommande *feed* och utgående produkt och avfall. Innan prov av produktens anrikningsgrad tas värms behållaren upp tills UF₆ övergår till vätska. Detta görs för att homogenisera den anrikade UF₆-produkten i en behållare, som kan ha fyllts på i flera omgångar och varpå innehållet kan ha fraktionerat sig. En anläggning av storleksordningen 1000 000 SWU/år uppskattas endast behöva ett fåtal masspektrometrar.

5.2 Konvertering från produktion av LEU till HEU

Det krävs ca 50 gånger mer separationsarbete (SWU) för att producera uran anrikat till 90 % än vad det krävs för att producera uran av 3 % anrikningsgrad – om man utgår från naturligt uran som *feed*. Denna stora skillnad i separationsarbete för en anrikningsanläggning kan minskas något genom att man låter avfallsströmmens halt av ^{235}U öka eller genom att man använder låganrikat uran som *feed*-material. Som exempel kan nämnas en anläggning med kapaciteten 100 000 SWU/år som antingen kan producera 520 kg vapenuran (90 % ^{235}U) utgående från naturligt uran eller 1125 kg vapenuran om man istället utgår från uran med 3 % anrikningsgrad (avfallsströmmen antas i båda fallen ha anrikningsgraden 0,3 %). Man vinner alltså mycket separationsarbete på att utgå från redan anrikat material. Det bör dock påpekas att man behöver mycket *feed*-material i båda fallen vilket skulle kräva stora mängder anrikat uran om man i anläggningen utgår från 3 % anrikat uran.

Det kan dock vara svårt att effektivt använda en kaskad som är designad för produktion av låganrikat uran för att producera vapenmaterial. Det krävs att man kan arrangera om kaskaden från att innehålla relativt få steg med många centrifuger i varje steg till en kaskad med fler antal steg, men med relativt få centrifuger i varje steg. Många moderna anrikningsanläggningar är byggda i moduler för att förenkla omflyttningen av centrifuger för att kunna anpassa produktionen efter vilken produkt som efterfrågas. Detta kan dock vara en negativ utveckling ur spridningssynpunkt då det kan förenkla för stater med kärnvapenambition att snabbt kunna ändra modulerna i en anläggning för produktion av låganrikat material till produktion av kärnvapenmaterial.

I en kaskad designad för anrikning av uran till viss anrikningsgrad kan man dock genom att endast öka återflödeskvoten – dvs. minska uttagsflödet av produkt – nå en något högre anrikningsgrad.

Vid totalt återflöde (inget produktuttag) kan teoretiskt maximal anrikning beräknas genom:

$$R_{P,\max} = \alpha_{\text{tot}}^2 \cdot R_F,$$

där $\alpha_{\text{tot}} = R_P / R_F$ dvs. anläggningens totala anrikningsfaktor.

Som exempel kan nämnas en anläggning som matas med naturligt uran (0,72 % ^{235}U) och som producerar 3 % ^{235}U vilket ger $\alpha_{\text{tot}} = 0,03/0,0071 = 4,2$ och således $R_{P,\max} = 0,13$. Detta innebär att anläggningen teoretiskt kan nå en anrikning på 11,5 % vid totalt återflöde. När man sedan börjar ta ut en produktström minskas dock produktens anrikningsgrad.

Det kan i vissa fall vara energimässigt gynnsamt att köra en mindre anläggning batch-vis (satsvis), dvs. att man först producerar en mängd uran vid någon intermediär anrikningsgrad och sedan kör anläggningen igen utgående från detta anrikade material. Om man vill återcykla en produkt i kaskaden måste dock anläggningen stängas av, allt material måste pumpas ut ur varje steg, återfyllas med nytt *feed*-material och sedan startas igen. Det är i dessa fall av vikt att känna till totala innehållet av material i anläggningen (*inventory*) och jämviktstiden för att utvärdera om batch-vis anrikning är lämplig eller ej.

6 Indikatorer på anrikning med gascentrifugering

Inköp av tidigare nämnda produkter som är kontrollerade enligt NSG Part 1 pekar på att utrustningen skall användas till urananrikning då det rör ”*särskilt konstruerad eller iordningställd utrustning eller komponenter*” för nukleära ändamål. Kontrollerade produkter med dubbla användningsområden (*”dual-use”*) kan också användas i processen för att anrika uran, även om dessa produkter också har icke-nukleära användningsområden. Detsamma gäller produkter med prestanda precis under NSG:s värden som alltså inte är under kontroll, men som efter bearbetning kan vara användbara. Information om den aktuella importören kan då bidra till att avgöra om utrustningen kan vara ämnad för ett kärnvapenprogram.

Maråldrat stål med hög draghållfasthet har få civila användningsområden och kan därmed i sig vara en indikator.

Nedan beskrivs några ytterligare indikatorer som kan användas för att bedöma om ett land ägnar sig åt fördold anrikning med gascentrifuger.

För en fullskalig anrikningsanläggning behövs tusentals gascentrifuger och således behövs det stora mängder av identiska centrifugkomponenter. Inköp av eller förfrågningar angående stora mängder komponenter kan därför vara en indikator för att utrustningen skall användas i en anrikningsanläggning. Inför driften av en anrikningsanläggning måste även råmaterial bestående av UF_6 inköpas eller inhemska produktionsanläggningar för UF_6 byggas. Om man avser att ha en inhemsk produktionskapacitet av UF_6 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 urangruvor varför sådana i sig kan vara indikatorer. Man behöver också fluorgas och/eller HF (fluorvätesyra) för att producera UF_6 och intresse för dessa ämnen eller utrustning för att producera fluorgas (speciella elektrolysceller) kan också vara en indikator. Det bör dock påpekas att sådana anläggningar också kan ha civila förklaringar.

Miljöprover kan påvisa avvikelser i den naturliga isotopsammansättningen hos uranpartiklar som kan indikera att anrikat material producerats. En sådan provtagning måste dock ske relativt nära den misstänkta anläggningen. Spår av höganrikat uran (av vapenkvalitet) är svårt att förklara med civila aktiviteter och kan vara en indikator på att något oegentligt pågått¹³.

Förutom de stora mängder utarmat uran som fås som avfallsprodukt från en anrikningsanläggning fås inga andra utsläpp från processen. Det utarmade uranet lagras vanligtvis utomhus i anslutning till anläggningen och skulle i sig kunna vara en indikator. För att producera 10 kg vapenuran fås ca 2 ton utarmat uran.

En gascentrifuganläggning skiljer sig inte utvändigt från andra typer av industribyggnader. Dock har kärntekniska anläggningar ofta hög säkerhetsnivå.

¹³ Höganrikat uran används också som bränsle i vissa forskningsreaktorer och i atomdrivna ubåtar och förekomsten behöver alltså inte med nödvändighet indikera att det finns ett kärnvapenprogram.

En anläggning i drift behöver kylvatten och elektricitet, som måste kunna tillföras anläggningen. Men detta gäller även många andra industrier. Elbehovet för en gascentrifuganläggning är betydligt lägre än för andra anrikningsmetoder (t.ex. gasdiffusion) och elförsörjningen till en mindre anläggning skulle inte skilja sig i elbehov från vad som krävs till att försörja ett mindre villaområde. Energiförbrukning för gascentrifugering är 100-300 kWh/SWU och de energikrävande processerna är friktion för roterande delar, elförluster via värme från motorn samt tryckförlust då gasprodukterna extraheras. Kylvattenbehovet (för kylning av centrifugerna) är också måttligt och ej i samma omfattning som behövs för att kyla en kärnreaktor – vilket skulle kunna detekteras med värmekänslig satellitövervakning.

Kylfällorna som behövs för att ta ut den anrikade produkten behöver också något kylmedium, där konventionella kylmedier som t.ex. freon är användbara.

7 Produktionsanläggningar

Nästan hälften av den globala anrikningskapaciteten är idag baserad på gascentrifugering. Majoriteten är fortfarande gasdiffusion, men i takt med att gamla gasdiffusionsanläggningar stänger ökar andelen gascentrifugering.

Tabell 7. Civila anrikningsanläggningar [12].

Land	Anrikningsprocess	Anläggning	Kapacitet (SWU/år)
Argentina	Gasdiffusion	Pilcaniyeu (operativ)	20 000
	Gasdiffusion	Pilcaniyeu (under konstruktion)	100 000
Brasilien ¹	Gascentrifugering	Sorocaba (planerad)	?
Frankrike	Gasdiffusion	Georges Besse Plant	10 800 000
Japan	Kemisk jämvikt	Hyuga	2000
	Gascentrifugering	Ningyo-Toge (Demo)	(200 000*)
	Gascentrifugering	Ningyo-Toge (Pilot)	
	Gascentrifugering	Rokkasho	1050
Kina	Gasdiffusion	Lanzhou I	200 000
	Gascentrifugering	Lanzhou II	200 000
Nederländerna	Gascentrifugering	Almelo SP3	100 000
	Gascentrifugering	Almelo SP4	1 500 000
	Gascentrifugering	Almelo SP5 (under konstruktion)	1 000 000 ²
Pakistan	Gascentrifugering	Kahuta	5000 ³
Ryssland	Gascentrifugering	Angarsk	2 000 000
	Gascentrifugering	Ekaterinberg (Sverdlovsk)	9 000 000
	Gascentrifugering	Krasnoyarsk-45	5 000 000
	Gascentrifugering	Tomsk-7	3 000 000
Storbritannien	Gascentrifugering	Capenhurst	1 100 000
Sydafrika	Aerodynamisk	Valindaba (Pelindaba East)	(300 000*)
Tyskland	Gascentrifugering	Gronau	1 350 000
USA	Gasdiffusion	Paducah	11 300 000
	Gasdiffusion	Portsmouth	7 400 000
	Gasdiffusion	Oak Ridge	(7 700 000*)
	Gascentrifugering	Piketon	3 500 000 ⁴
	Gascentrifugering	LES, Eunice	3 000 000 ⁴

*) Anläggningen stängd och under nedmontering

1) Brasilien har även två uppskjutna/avbeställda anläggningar med Jet Nozzle teknologi

2) Aktuell driftskapacitet: 500 000 SWU/år

3) Kapaciteten skall utökas till 15 000 SWU/år

4) Planerad anläggning som beräknas tas i drift 2010 (Källa: www.usec.com och www.nrc.gov).

8 Referenser

- [1] "*Uranium enrichment and Nuclear Weapon Proliferation*", Krass, Boskma, Elzen, Smit, SIPRI, Taylor & Francis Ltd, 1983
- [2] "*Review of the gas centrifuge until 1962. Part I Principles of separation physics*", Stanley Whitley, Rev. Mod. Phys. Vol 56, No 1, (1984) p. 41-66
- [3] "*Review of the gas centrifuge until 1962. Part II Principles of high speed rotation*", Stanley Whitley, Rev. Mod. Phys. Vol 56, No 1, (1984) 67-97
- [4] "*Uranium Enrichment by Gas Centrifuge*", D.G. Avery & E. Davies, Mills and Boon, London, 1973
- [5] "*Nuclear Chemical Engineering*", Benedict, Pigford, Levi, McGraw-Hill Company, 1981
- [6] "*Isotope Separation*", Stelio Villani, American Nuclear Society, 1976
- [7] "*Uranium Enrichment*", Editor: S. Villani, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1979
- [8] "*Nuclear Weapons Databook, Volume II, US Nuclear Warhead Production*", Natural Resources Defense Council, Inc., 1987
- [9] "*Technologies underlying weapons of mass destruction*", Office of Technology Assessment, US Congress, December 1993
- [10] "*Information Circular INFCIRC/254/Rev.6/Part 2*", International Atomic Energy Agency (IAEA), februari 2005.
- [11] "*Information Circular INFCIRC/254/Rev.7/Part 1*", International Atomic Energy Agency (IAEA), februari 2005.
- [12] "*2004 World Nuclear Industry Handbook*", Nuclear Engineering International, 2004.

BILAGA 1

ALUMINIUMLEGERINGAR

Benämningen av aluminiumlegeringar är internationellt standardiserad där första siffran i de olika serierna (från 1000- till 9000-serien) anger vilken som är den huvudsakliga legeringsmetallen (se tabell nedan). Andra siffran anger annan förändring av legeringens sammansättning, där noll betecknar normallegeringen. De två sista siffrorna är löpnummer för olika legeringar, förutom i 1000-serien där de två sista siffrorna anger de två först decimalerna i renheten av aluminium (angett i %).

Tabell 1. Standardiserade seriebeteckningar för aluminiumlegeringar. Maximal dragbrottgräns är efter mest optimala värmebehandling.

Seriebeteckning	Huvudsaklig legeringsmetall	Maximal dragbrottgräns (MPa)
1xxx	> 99% aluminium	~ 150
2xxx	Koppar	~ 460
3xxx	Mangan	~ 200
4xxx	Kisel	Ej applicerbart, oftast gjutgods
5xxx	Magnesium	~ 300
6xxx	Magnesium och kisel	~ 350
7xxx	Zink och magnesium	~ 630
8xxx	Övriga metaller	
9xxx	Ej använd	

Draghållfastheten hos ren aluminium varierar mellan 90-150 MPa, men draghållfastheter upp mot 550 MPa kan erhållas för vissa legeringar med viss typ av värmebehandling. Enligt NSG Part 2 (item 1C202a) så är aluminiumlegeringar i form av stavar eller rör kontrollerade om de kan nå en draghållfasthet på 460 MPa, vilket således är en väldigt hållfast typ av aluminium.

Vilken värmebehandling eller annan behandling som aluminiumlegeringen utsatts för anges med en siffer- och bokstavskombination som anges efter seriebeteckningen. Det är endast legeringarna i 2000-, 6000- och 7000-serierna som kan värmebehandlas till högre hållfasthet (betecknas med Txx). Övriga aluminiumlegeringar kan istället kallhärddas för att öka hållfastheten. Kallhärddade legeringar betecknas med Hxx.

Kallhårdning

Dragbrottgränsen kan ökas med över 100 MPa genom olika kallbearbetningsmetoder jämfört med obehandlad legering. Det bör dock påpekas att obehandlade legeringar – oavsett sammansättning – har en så pass låg dragbrottgräns att man inte kan erhålla den kontrollerade dragbrottgränsen (460 MPa) endast med hjälp av kallbearbetning.

Den andra siffran i beteckningen för kallhärddade material (Hxx) är oftast ett jämnt tal och anger hårdheten hos materialet i relation till maximal hårdhet för materialet. Hårdheten fås genom att dividera den andra siffran – som då oftast är 2, 4, 6 eller 8 – med 8. Hårdheten fås då som en andel av maximal hårdhet ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ eller full hårdhet). Man kan ibland ange andra siffran med ett udda tal vilket då innebär att hårdheten är intermediär. Den första siffran anger på vilket sätt man erhållit den ökade hårdheten (se Tabell 2).

Tabell 2. Beskrivning av och beteckningar för kallbearbetade eller obearbetade aluminiumlegeringar.

Härdningsbeteckning	Beskrivning
F eller M	I den form den är tillverkad. Ingen ytterligare kallbearbetning eller värmebehandling. Ingen kontroll över mängden deformationshärdning.
O	Utglödgd (annealed), dvs mjukgörning genom värmning. Härdning som ger lägst styrka och högst duktilitet
H1x	Endast deformationshärdad. Kallreducerad, ingen uppvärmning.
H2x	Deformationshärdad och delvis utglödgd.
H3x	Deformationshärdad och stabiliserad med låg temperatur.

Värmebehandling

Legeringar ur 2000-, 6000- och 7000-serierna kan värmebehandlas för att öka hållfastheten. Detta sker efter att man erhållit den form av legeringen som man önskar. Behandlingen omfattar ofta s.k. upplösningsbehandling följt av en åldringsprocess.

Upplösningsbehandlingen innebär att man värmer legeringen till ca 500°C tills legeringens beståndsdelar ”löser” sig – dock fortfarande i fast form (s.k. fast lösning). Därefter ”släcker” man lösningen genom snabbkylning i t.ex. vatten eller eventuellt luft. Legeringens beståndsdelar är då fortfarande i lösning, men faller med tiden ut i form av små, hårda kluster som försvårar dislokationsrörelser och på så sätt ökar hållfastheten. Denna process kallas åldershärdning (utskilningshärdning).

Åldring innebär att materialet når sin jämviktsstruktur vilket kan ske antingen naturligt i rumstemperatur eller genom att man snabbar upp åldringsprocessen med hjälp av värme.

Åldringen efter upplösningsbehandlingen kan antingen ske naturligt i rumstemperatur under några dagar eller på konstgjord väg genom uppvärmning i ugn vid 150°C -180°C under några timmar (varmåltring). Beroende på hur snabbt släckning och åldring sker fås olika hållfastheter hos materialet. En snabb process (som vattensläckning eller varmåltring) ”låser” materialet i en mikrostruktur som gör materialet hårdare, men mindre formbart. Ett T6-behandlat material blir således starkare än ett T4-behandlat material, men mindre formbart.

De olika värmebehandlingarna anges med T och en sifferbeteckning från 1 till 10. De vanligaste värmebehandlingarna är T4, T5 och T6.

Tabell 3. Beskrivning av och beteckningar för värmebehandlade aluminiumlegeringar.

Beteckning	Värmebehandling
T1	Kyls från förhöjd bearbetningstemperatur, följt av naturlig åldring.
T3	Upplösningsbehandlad, kallbearbetad, följt av naturlig åldring.
T4	Upplösningbehandlad följt av naturlig åldring
T5	Luftkyls från förhöjd bearbetningstemperatur och följs av varmåltring.
T6	Upplösningbehandlad följt av varmåltring.
T7	Upplösningbehandlad och stabiliserad
T8	Upplösningbehandlad, kallbearbetad, följt av varmåltring.

Om materialet har sträckts efter värmebehandlingens släckning används ibland ytterligare en sifferbeteckning för att ange detta. För plattor och skivor lägger man till 51 efter t.ex. T4 eller T6 och om det rör sig om strängpressat (extruderat) material lägger man till siffrorna 510.

Som synes i Tabell 1 är det endast legeringar i 2000-, och 7000-serierna som kan nå kontrollerade dragbrottgränser efter värmebehandling. Man bör därför vara uppmärksam på alla legeringar i dessa serier då det kan finnas möjlighet att en legering med dragbrottgräns under kontrollvärdet skulle kunna värmebehandlas för att uppnå kontrollerade dragbrottgränser. Som exempel kan anges legering 2030-T4 som har en dragbrottgräns på 370 MPa, men som efter T3-behandling kan nå en dragbrottgräns på 440 MPa.

Tabell 4. Några exempel på värmebehandlade aluminiumlegeringar med dragbrottgräns i närheten av NSG:s kontrollerade draghållfasthet.

Aluminiumlegering	Dragbrottgräns
2014-T3, T6	440 MPa
2014-T4, T6510	460 MPa
2024-T3, T4, T3510	440 MPa
2024-T351	426 MPa
2030-T3	440 MPa
7022-T6	470 MPa
7022-T6510	460 MPa
7049-T6	630 MPa
7075-T6	510 MPa
7075-T6510	520 MPa

Vanligaste tekniken att tillverka aluminiumrör är strängpressning (extrudering). För rör med diameter på 70 mm kan man nå väggjocklekar på några millimeter. För rördiameter på 400 mm så måste väggjockleken vara i centimeter för att materialet skall klara belastningar. Strängpressningen görs vanligtvis från massivt aluminium i block. Strängpressning av sömlösa rör, vilket är en betydligt mer avancerad och ovanligare teknik, görs istället från cylindriska ämnen. Man kan också tillverka rör genom att tunna band svetsas ihop, men detta är ej aktuellt för rotoror som skall användas i gascentrifuger.

De flesta länder har förmodligen tillgång till strängpressningsteknik. Det är dock svårare att bearbeta mer höghållfasta legeringar då det kräver mer kraft och större bearbetningsmaskiner och det är också svårt att nå de små dimensioner som behövs.

Legeringarna värmebehandlas efter bearbetning/strängpressning. Efter värmebehandling fås inre spänningar i materialet (materialet slår sig) och måste ofta svarvas eller på annat sätt bearbetas efteråt.

REFERENS: "Aluminium Design and Construction", J.B. Dwight, E & FN Spon, an imprint of Routledge, 1999.

BILAGA 2

MARÅLDRAT STÅL

Maråldrat stål är utskiljningshärdat stål med god slagseghet, är lätt att forma och har god svetsbarhet. De kan formas till komplicerade detaljer i martensitiskt tillstånd och sedan anlöpas till dragbrottgränser på 1000-2400 MPa – med minimal förändring av strukturen. Högre sträckgräns kan uppnås genom kallbearbetning i martensitiskt tillstånd. I dessa stål används nickel (upp till 18%) istället för kol som austenitbildare.

Den goda styrkan hos maråldrat stål fås genom mikroskopiska intermetalliska utfällningar vid omkring 480°C istället för reaktioner med kol – som ger ökad styrka hos vanliga stål. Kol räknas i princip som en förorening i dessa stål och kolhalten hålls därför så låg som möjlig.

Maråldrat stål kan smältas med bland annat induktionssmältning i vakuum, vilket gör att induktionsugnar som är under exportkontroll även kan ha detta användningsområde (förutom användning för att smälta uran och plutonium).

Maråldrat stål kan varmbearbetas genom vanliga tekniker, men vissa legeringar med titan kräver högre temperaturer (dock ej högre än 1260°C).

En vanlig beteckning för olika legeringar anger först nickelhalten och sedan draghållfastheten i enheten ksi¹ i parentes (se tabell nedan). De olika draghållfastheterna beror av legeringens sammansättning. Normal sammansättning; 18% nickel, 3,3-5 % molybden, 8,5-12 % kobolt, <0,03% kol.

Tabell 1. Några olika legeringar av maråldrat stål

Legering	Värmebehandling	Draghållfasthet (MPa)
18 Ni (200)	A	1500
18 Ni (250)	A	1800
18 Ni (300)	A	2050
18 Ni (350)	B	2450
18 Ni (cast)	C	1750

A: upplösningsbehandlad 1 h i 820°C, åldrad 3h i 480°C

B: upplösningsbehandlad 1 h i 820°C, åldrad 12h i 480°C

C: annealed 1 h 1150°C, åldrad 1 h 595°C, upplösningsbehandlad 1 h i 820°C, åldrad 3h i 480°C

¹ Enheten 1 ksi = 1000 psi där 1 psi (pound force per square inch, lbf/in²) motsvarar 6,9 kPa.

BILAGA 3

Exportkontrollerad utrustning för urananrikning.

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

0B001 Anläggning för separation av isotoper ur "naturligt uran", "utarmat uran" och "särskilt klyvbart material" och utrustning och komponenter som är särskilt konstruerade eller iordningställda härför enligt följande:

a) Anläggning, särskilt konstruerad, för separation av isotoper ur "naturligt uran", "utarmat uran" och "särskilt klyvbart material" enligt följande:

1. Anläggning för separation med gascentrifug.
2. Anläggning för separation med gasdiffusion.
3. Anläggning för separation med aerodynamisk process.
4. Anläggning för separation med kemisk utbytesprocess.
5. Anläggning för separation med jonbytesprocess.
6. Anläggning för separation med "laser" och atomär ånga (AVLIS).
7. Anläggning för separation med "laser" och gasmolekyler (MLIS).
8. Anläggning för separation med plasmprocess.
9. Anläggning för separation med elektromagnetisk process.

b) Gascentrifuger, hopsatta delar och komponenter som är särskilt konstruerade eller iordningställda för separation med gascentrifuger enligt följande:

Anm.: I avsnitt 0B001.b betyder 'material med hög hållfasthet i förhållande till sin densitet' något av följande:

- a) Maråldrat stål som kan ges en brottgräns på 2 050 MPa eller mer.
- b) Aluminiumlegeringar som kan ges en brottgräns på 460 MPa eller mer.
- c) "Fibrer eller fiberliknande material" med en "specifik modul" större än $3,18 \times 10^6$ m och en "specifik draghållfasthet" större än $76,2 \times 10^3$ m.

1. Gascentrifuger.
2. Kompletta rotorenheter.
3. Rotorrör med en vägg tjocklek av 12 mm eller mindre med en diameter mellan 75 mm och 400 mm tillverkade av 'material som har hög hållfasthet i förhållande till sin densitet'.
4. Ringar eller bälgar med en vägg tjocklek som är 3 mm eller mindre och en diameter mellan 75 mm och 400 mm som är avsedda att lokalt förstärka rotorret eller för att förena ett antal sådana rör och är tillverkade av 'material som har hög hållfasthet i förhållande till sin densitet'.
5. Mellanväggar (bafflar), med en diameter mellan 75 mm och 400 mm avsedda att monteras inne i centrifugens rotorret, tillverkade av 'material som har hög hållfasthet i förhållande till sin densitet'.
6. Topp- eller bottenplattor med en diameter mellan 75 mm och 400 mm avsedda att passa till ändarna av rotorret och tillverkade av 'material som har hög hållfasthet i förhållande till sin densitet'.
7. Magnetiska, upphängda lager bestående av en ringformig magnet som är upphängd i ett lagerhus tillverkat eller skyddat av 'material som är resistent mot korrosion orsakad av

UF6'', och som innehåller ett dämpande medium där magneten är kopplad till en polkärna eller en annan magnet som är monterad på rotorns topplatta.

8. Särskilt iordningställda lager som består av en lagertapp/lagerskålenhet monterad på en dämpare.

9. Molekylarpumpar bestående av cylindrar med invändigt maskinbearbetade eller utpressade spiralformade spår och maskinbearbetade innerytor.

10. Ringformade statorer för elektriska motorer till flerfasiga växelströmshysteres-(eller reluktans-) motorer för synkron drift i vakuum i frekvensområdet 600 till 2 000 Hz och i effektområdet 50 till 1 000 VA (Voltampere)

11. Centrifugbehållare som skall innesluta gascentrifugens rotor och som består av en styv cylinder med vägg tjockleken upp till 30 mm och med precisionsbearbetade ändar. Cylindern skall vara tillverkad eller skyddad av ''material som är resistent mot korrosion orsakad av UF6''.

12. Uttagrör med upp till 12 mm innerdiameter, för avtappning av UF6-gas från centrifugens rotor rör enligt pitotrörsprincipen, tillverkade eller skyddade av ''material som är resistent mot korrosion orsakad av UF6''.

13. Frekvensomvandlare som är särskilt konstruerade eller iordningställda för att mata motorstatorn vid anrikning med gascentrifuger och som har alla följande egenskaper samt därför särskilt konstruerade komponenter:

- a) Flerfasig utgång inom frekvensområdet 600 Hz till 2 000 Hz.
- b) Frekvenskontroll bättre än 0,1 %.
- c) Harmonisk distorsion mindre än 2 %.
- d) Verkningsgrad bättre än 80 %.

0B002

Särskilt konstruerade eller iordningställda hjälpsystem, utrustning och komponenter, enligt följande, för isotopseparationsanläggningar som omfattas av avsnitt 0B001 och som är tillverkade av eller skyddade med ''material som är resistent mot korrosion orsakad av UF6''.

a) Matningsautoklaver, ugnar eller system som används för att överföra UF6 till anrikningsprocessen.

b) Desublimeringsutrustning eller kylfällor som används för att bortföra UF6 från anrikningsprocessen och för vidaretransport efter upphettning.

c) Stationer för slutprodukt och restfraktion vilka används för att överföra UF6 till behållare.

d) Kondenserings- eller solidifieringsstationer som används för att avlägsna UF6 från anrikningsprocessen genom att komprimera, kyla och överföra UF6 till flytande eller fast form.

e) Rörssystem och grenrör som är särskilt avsedda för transport av UF6 inom kaskader som utnyttjar gasdiffusion, centrifuger eller aerodynamiska processer.

f) 1. Samlings- och förgreningsrör för vakuum som tillåter en sugkapacitet på 5 m³/min, eller
2. vakuumpumpar som är speciellt konstruerade för användning i UF6-haltig atmosfär.

g) UF6-masspektrometrar/jonkällor som är särskilt konstruerade eller iordningställda för on-line-prover på matarflöde, slutprodukt eller restfraktion och som har alla följande egenskaper:

1. Upplösning lika med en massenhet för massor större än 320 amu.
2. Jonkälla tillverkad av eller fodrad med kromnickellegering (NiCr) eller monel eller som är nickelpläterad.
3. Jonkälla med indirekt upphettning (electron bombardment).
4. Uppsamlingsystem lämpligt för isotopanalys.

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 gram eller mindre av "naturligt uran" eller "utarmat uran", när det ingår i sensorkomponenter, 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 vilka har framställts för icke-nukleär användning.

0C002 "Särskilt klyvbart material".

Anm.: 0C002 omfattar inte mängder om fyra "effektiva gram" eller mindre när materialet ingår i sensorkomponenter i instrument.

1A202 Kompositmaterial, andra än de som omfattas av avsnitt 1A002, i form av rör och som har båda följande egenskaper:

ANM.: SE ÄVEN 9A010 OCH 9A110.

- a) En inre diameter mellan 75 mm och 400 mm och
- b) tillverkade av "fibrer eller fiberliknande material" som omfattas av avsnitten 1C010.a, b. eller 1C210.a eller med förimpregnerade mattor med kol som omfattas av avsnitt 1C210.c.

1B201 Lindningsmaskiner för fibrer, andra än de som omfattas av avsnitt 1B001 eller 1B101, och tillhörande utrustning, enligt följande:

- a) Lindningsmaskiner för fibrer som har samtliga följande egenskaper:
 1. Koordinerade och programmerade för positionering, omslagning och lindning av fibrer i två eller flera axlar.
 2. Speciellt utformade för tillverkning av kompositmaterial och laminat utgående från "fibrer och fiberliknande material" och
 3. i stånd att linda cylindriska rotoror med en diameter mellan 75 mm och 400 mm och med en längd av 600 mm eller mer.
- b) Styrutrustning för koordinering och programmering för de lindningsmaskiner för fibrer som omfattas av avsnitt 1B201.a.
- c) Precisionsdorn för de lindningsmaskiner för fibrer som omfattas av avsnitt 1B201.a.

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

- 1C202 Legeringar, andra än de som omfattas av avsnitten 1C002.b.3 eller 1C002.b.4 enligt följande:
- Aluminiumlegeringar med båda följande egenskaper:
 - 'I stånd till' en draghållfasthet av 460 MPa eller mer vid 293 K (20°C), och
 - föreligger som rör eller som cylindrar i massiv form (även smidesämnen) med en yttre diameter av mer än 75 mm.
 - Titanlegeringar med båda följande egenskaper:
 - 'I stånd till' en draghållfasthet av 900 MPa eller mer vid 293 K (20°C), och
 - föreligger som rör eller som cylindrar i massiv form (även smidesämnen) med en yttre diameter av mer än 75 mm.
- Teknisk anm.:
Uttrycket legeringar 'i stånd till' omfattar legeringar före eller efter värmebehandling.*
- 1C210 'Fibrer eller fiberliknande material' eller förimpregnerade mattor, andra än sådana som omfattas av avsnitten 1C010.a, b eller e enligt följande:
- 'Fibrer eller fiberliknande material' med någon av följande egenskaper:
 - Har en "specifik modul" av $12,7 \times 10^6$ m eller större, eller
 - en "specifik draghållfasthet" av 235×10^3 m eller större.
- Anm.: 1C210.a omfattar inte fibrer eller fiberliknande material av aramid som har 0,25 viktpcent eller mer av en esterbaserad ytmodifierare för fibrer.*
- 'Fibrer eller fiberliknande material' av glas som har båda följande egenskaper:
 - En "specifik modul" av $3,18 \times 10^6$ m eller större och
 - en "specifik draghållfasthet" av $76,2 \times 10^3$ m eller större.
 - Härdade hartsimpregnerade kontinuerliga "garner", "väv", "drev" eller "band" med en bredd som inte överstiger 15 mm (prepregs) tillverkad av 'fibrer eller fiberliknande material' av kol eller glas och som omfattas av avsnitt 1C210.a eller b.
- Teknisk anm.:
Hartsen bildar kompositens matris.*
- Anm.: 'Fibrer eller fiberliknande material' i avsnitt 1C210. är begränsade till kontinuerliga "enfibertrådar", "garn", "väv", "drev" och "band".*
- 1C216 Maråldrat stål som inte omfattas av avsnitt 1C116 och 'i stånd till' en draghållfasthet av 2 050 MPa eller mer vid 293 K (20°C),
- Anm.: Avsnitt 1C216 omfattar inte former i vilka inga linjära dimensioner överstiger 75 mm.*
- Teknisk anm.:
Uttrycket maråldrat stål 'i stånd till' omfattar maråldrat stål både före och efter värmebehandling.*
- 1C240 Nickelpulver och porös nickelmetall som inte omfattas av avsnitt 0C005, enligt följande:

- a) Pulver med båda följande egenskaper:
1. En nickelrenhet på 99,0 viktprocent eller bättre, och
 2. en partikelstorlek som i medeltal är mindre än 10 µm mätt enligt ASTM B330 standard.

- b) Porös nickelmetall som framställts av material som omfattas av avsnitt 1C240.a.

Anm.: Avsnitt 1C240 omfattar inte följande:

- a) Fiberliknande nickelpulver.
b) Enkla porösa nickelskivor med en yta på 1 000 cm² per skiva eller mindre.

Teknisk anm.:

Avsnitt 1C240.b avser porösa metaller som formats genom komprimering och sintring av materialen i 1C240.a för att skapa ett metallmaterial med fina porer som är internt förbundna genom hela strukturen.

2A226 Ventiler som har alla följande egenskaper:

- a. En 'nominell storlek' av 5mm eller mer,
b. med bälgtätning, och
c. helt tillverkade av eller fodrade med aluminium, aluminiumlegering, nickel eller nickellegering som innehåller över 60 viktprocent nickel.

Teknisk anm.:

För ventiler med olika in- och utloppsdiametrar avser den 'nominella storleken' i 2A226 den minsta diametern.

2B201 Verktygsmaskiner, andra än de som omfattas av avsnitt 2B001, enligt följande, för avverkning eller fräsning av metaller, keramer eller "kompositer" som enligt tillverkarens specifikationer kan utrustas med elektronisk styrning för simultan styrning av minst två axlar för att uppnå "konturstyrning":

- a) Verktygsmaskiner för fräsning som uppfyller något av följande krav:
1. Positioneringsnoggrannheten med "alla kompensationsmöjligheter inkopplade" är lika med eller mindre (bättre) än 6 µm enligt ISO 230/2 (1988) (1) eller nationella motsvarigheter längs med någon linjär axel, eller
 2. minst två roterande axlar som kan utföra konturfräsning.

Anm.: Avsnitt 2B201.a omfattar inte fräsmaskiner som har följande egenskaper:

- a) X-axelns förflyttning större än 2m, och
b) totala positioneringsnoggrannheten hos x-axeln är mer (sämre) än 30 µm.

- b) Verktygsmaskiner för slipning som uppfyller något av följande krav:

1. Positioneringsnoggrannheten med "alla kompensationsmöjligheter inkopplade" är lika med eller mindre (bättre) än 4 µm enligt ISO 230/2 (1988) (1) eller nationella motsvarigheter längs med någon linjär axel, eller
2. minst två roterande axlar som kan utföra konturfräsning.

Anm.: Avsnitt 2B201.b omfattar inte följande slipmaskiner:

a) Rundslipmaskiner för invändig, utvändig eller kombinerad invändig och utvändig slipning som uppfyller alla följande krav:

1. Begränsade till cylindrisk slipning.
2. Begränsade till ett arbetsstycke som är högst 150mm i ytterdiameter eller längd.
3. Högst två axlar kan styras simultant för att uppnå "konturstyrning".
4. Ingen konturstyrning med c-axeln.

b) Jiggslipmaskiner begränsade till att ha x-, y-, c- och a-axlar och där c-axeln används för att hålla sliptrissan vinkelrätt mot arbetsstycket och a-axeln används för att slipa cylindriska kammar.

c) Verktygs- eller frässlipmaskin med "programvara" och som är speciellt konstruerade för produktion av verktyg eller fräsar.

d) Slipmaskiner för kam- eller vevaxlar.

2B206

Mät och inspektionsutrustning, andra än de som omfattas av avsnitt 2B006, enligt följande:

a) Avsyningsmaskiner som styrs av datorer, "numerisk styrning" eller annan datautrustning och som har båda följande egenskaper:

1. Två eller fler axlar, och
2. en endimensionell längd- "mätosäkerhet" som är lika med eller mindre (bättre) än $(1,25 \times L/1\ 000) \mu\text{m}$ mätt med en testkropp vars "noggrannhet" är mindre (bättre) än $0,2 \mu\text{m}$ (L är den uppmätta längden i mm). (Referens: VDI/VDE 2617 Del 1 och 2.)

b) System för samtidig linjär mätning och vinkelmätning av ett halvskal som har båda följande egenskaper:

1. "Mätosäkerheten" längs med någon linjär axel är lika med eller mindre (bättre) än $3,5 \mu\text{m}$ per 5 mm, och
2. "vinkelavvikelsen från en position" är lika med eller mindre (bättre) än $0,02^\circ$.

Anm. 1: Verktygsmaskiner som kan användas som mät eller avsyningsmaskiner skall kontrolleras om de motsvarar eller överskrider kriterierna för verktygsmaskiner eller mät och avsyningsmaskiner.

Anm. 2: En maskin som beskrivs i avsnitt 2B206 omfattas om den överstiger angivna parametrar någonstans inom sitt arbetsområde.

Teknisk anm.:

1. Testkroppen som används för bestämning av mätosäkerheten för en mätmaskin finns beskriven i VDI/VDE 2617 del 2, 3 och 4.

2. Alla parametrar för mätvärden enligt avsnitt 2B206 motsvarar plus/minus, dvs. inte hela bandet.

2B209

Rotationsformande maskiner, flödesformande maskiner, som kan skapa andra flödesformande funktioner än de som anges i avsnitten 2B009 eller 2B109, och mandreller enligt följande:

a) Maskiner som har följande två egenskaper:

1. Tre eller fler rullar (aktiva eller styrnings-), och
2. som enligt tillverkarens specifikation kan utrustas med "numerisk styrning" eller datorkontroll.

b) Rotorskapande mandreller konstruerade för att bilda rotoror med en inre diameter på mellan 75mm och 400 mm.

Anm.: Avsnitt 2B209.a omfattar maskiner som endast har en rulle för att deformera

2B219

Maskiner för centrifugalbalansering i flera plan, stationära eller portabla, horisontella eller vertikala, enligt följande:

a) Maskiner för centrifugalbalansering av böjliga rotoror med en längd av 600mm eller mer och som uppfyller samtliga följande villkor:

1. Axeltappdiameter större än 75 mm.
2. Balanserar vikter från 0,9 kg till 23 kg, och
3. kan balansera med en rotationshastighet större än 5 000 varv/min.

b) Maskiner för centrifugalbalansering av ihåliga cylindriska rotorkomponenter, som uppfyller samtliga följande villkor:

1. Axeltappdiameter större än 75 mm.
2. Balanserar vikter från 0,9 kg till 23 kg.
3. Balanserar till en återstående obalans lika med eller mindre än $0,01 \text{ kg} \times \text{mm/kg per plan}$, och
4. Använder remdrift.

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 K (850 °C),
2. har induktionsspolar med 600mm 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, särskilt konstruerade för ugnar specificerade i 2B.226.a.

Anm.: Avsnitt 2B226.a omfattar inte ugnar konstruerade för behandling av halvledarwafers.

2B228 Utrustning för tillverkning, sammansättning och upplinjeri ng av rotor er för gascentrifuger, bäl gformande dorn och formar enligt följande:

a) Utrustning för hopsättning av rotor rörsektioner för gascentrifuger, mellanväggar och ändstycken.

Anm.: Avsnitt 2B228.a omfattar precisionsdorn, inspänningsanordningar och maskiner för krymppassning.

b) Utrustning för upplinjeri ng av rotor rörsektioner längs en gemensam axel.

Teknisk anm.:

I avsnitt 2B228.b består sådan utrustning vanligen av precisionsmätprobar kopplade till en dator som kontrollerar exempelvis pneumatiska kolvar som används för att rikta rörsektionerna.

c.) Bäl gformande dorn och formar för produktion av bäl gar med en enkel utbuktning.

Teknisk anm.:

I avsnitt 2B228.c skall bäl garna ha alla följande egenskaper:

1. Innerdiameter mellan 75 mm och 400 mm.
2. Längd 12,7mm eller mer.
3. Utbuktning djup större än 2 mm, och
4. Tillverkade av höghållfasta aluminium-legeringar, maråldrat stål eller höghållfasta "fibrer eller fiberliknande material".

2B230 "Tryckgivare" som kan mäta absolut tryck i området 0 till 13 kPa och som har följande två egenskaper:

- a) Tryckkännande element tillverkat av eller skyddat av aluminium eller aluminiumlegering, nickel eller nickellegering med mer än 60 viktprocent nickel, och
- b) någon av följande egenskaper:

1. Fullt skalutslag är mindre än 13 kPa och 'noggrannheten' bättre än $\pm 1\%$ av fullt skalutslag, eller
2. fullt skalutslag är 13 kPa eller mer och 'noggrannheten' är bättre än ± 130 Pa.

Teknisk anm.:

Med 'noggrannhet' avses i avsnitt 2B230 ett värde som innefattar icke-linjäritet, hysteres och repeterbarhet vid omgivningstemperaturen.

3A225 Frekvensomvandlare eller generatorer andra än de som omfattas av 0B001.b.13, som uppfyller samtliga följande villkor:

- a) Flerfasig utgång och som kan producera en effekt av 40W eller mer.
- b) Kan arbeta inom frekvensområdet 600 till 2 000 Hz.
- c) Total harmonisk distorsion bättre (mindre) än 10 %.
- d) Frekvensstyrning bättre (lägre) än 0,1 %.

Teknisk anm.:

Frekvensomvandlarna i avsnitt 3A225 kallas även konverterers eller inverters.

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 resistent mot UF₆ (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 UF₆.
- f) Masspektrometrar utrustade med jonkälla med mikrofluorering konstruerad för att användas med aktinider eller aktinidfluorider.

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

WEBBPLATS/WEB SITE www.ski.se