

Forskning

---

**Urananrikning med laser och  
plasmaseparation**

- en analys med fokus på exportkontroll

Lena Oliver  
Katarina Wilhelmsen  
Jens Wirstam

2007

# SKI perspektiv

## Bakgrund

Sverige har en exportlagstiftning som kontrollerar utförelse av speciellt känslig utrustning som kan tänkas komma till användning för bl.a. tillverkning av kärnvapen. Syftet är att förhindra att någon stat eller organisation införskaffar sådana vapen. Utrustningen det är frågan om har ofta en legitim användning i civil 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. SKI har 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 anrikning av uran med laser eller med plasmaseparation. Ingen av dessa anrikningsprocesser används idag i industriell skala men eftersom båda processerna är mycket effektiva och kan vara relativt småskaliga och därför lätta att dölja.

## Resultat

Den nu resulterande rapporten berör kortfattat några generella principer för laseranrikning, både separation av atomärt uran – AVLIS - och separation av uran i molekyllär form – MLIS. Vidare berörs mycket översiktligt några andra metoder inklusive plasmaseparation. Dessutom nämns vilken utrustning som kan komma ifråga, indikatorer på laseranrikning, mm. Vi har valt att låta rapporten vara översiktlig utan att gå in på detaljer för att inte sprida information som kan vara känslig. Därmed kan flera intressenter såsom andra myndigheter, berörd industri och intresseorganisationer få tillgång till resultatet. Förutom rapporten har projektet resulterat i att personal på FOI och SKI fått ökad insikt i processerna genom bl.a. litteraturstudier.

Det genomförda arbetet visar att SKI:s mål att ha tillgång till aktuell kompetens inom laseranrikning har uppnåtts. Det finns andra områden som skulle kunna ingå i en framtida studie. SKI ämnar därför låta FOI fortsätta studier i kompetenshöjande syfte inom de områden av kärnbränslecykeln som SKI bedömer vara mest angelägna. FOI har i tidigare projekt studerat tungvattenproduktion (SKI Report 2003:15), anrikning med gascentrifug (SKI Report 2005:44) och urankonvertering (SKI Report 2006:08). 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: 2006/135/200610010



## Forskning

---

# Urananrikning med laser och plasmaseparation

- en analys med fokus på exportkontroll

Lena Oliver  
Katarina Wilhelmsen  
Jens Wirstam

2007

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.



# Sammanfattning

FOI har på uppdrag av SKI gjort en studie om urananrikning med laserbaserade metoder och plasmaseparation. Rapporten är avsedd att kunna användas för att göra goda bedömningar rörande exportkontroll av utrustning relevant för dessa processer. Varken laseranrikning eller plasmaseparation används idag i industriell skala för urananrikning men eftersom båda processerna är mycket effektiva och kan vara relativt småskaliga och därför lätta att dölja, kan de vara intressanta för stater med kärnvapenambitioner. Detta har också varit fallet för laseranrikning. Speciellt fokus har lagts på att förstå de fysikaliska principerna. Med dessa som utgångspunkt har den utrustning som krävs för urananrikning med hjälp av metoderna studerats.

I rapporten beskrivs AVLIS- och MLIS-processerna, både vad gäller fysikaliska principer och utrustning. CRISLA- och SILEX-processerna behandlas endast översiktligt. Plasmaseparationsprocessen behandlas i ett separat kapitel. I varje avsnitt utreds begränsande parametrar och den typ av utrustning som kan komma i fråga att användas för de olika processerna diskuteras. Vidare listas ett antal indikatorer för respektive process.

Rapporten avslutas med en översikt över olika anrikningsprogram som utnyttjat dessa metoder. Eftersom ingen av de studerade processerna har använts i industriell skala finns det mycket lite information om anläggningsdrift. För att trots allt få en uppfattning om en anläggnings storlek avslutas rapporten med några överslagsberäkningar angående produktion av anrikat uran i en anläggning baserad på dessa processer.

# 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 laser-based processes and plasma separation. None of these processes are at present used on an industrial scale for uranium enrichment. However, these are processes of high efficiency which implicates that plants employing any of these processes for production of fissile material for nuclear weapons can be small in size and easily hidden. This has also been the case for laser enrichment. Special emphasis has been put on the understanding of the governing physical principles of the different processes.

In the report the AVLIS and MLIS processes are described in some detail while CRISLA and SILEX are treated in less detail. The plasma separation process is described in a separate section. Limiting physical parameters for the different processes are discussed and equipment relevant to the different technologies is described. Further, some indicators of the different processes are identified and listed.

In the final chapter known research programs where these processes have been used are listed. Since none of the described technologies has been used on an industrial scale, information on plant design and running is scarce.

# Förord

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





# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>BAKGRUND</b> .....	<b>10</b>
2.1	URANANRIKNING.....	10
2.2	OLIKA URANANRIKNINGSPROCESSER.....	11
2.2.1	<i>Gascentrifugering</i> .....	12
2.2.2	<i>Gasdiffusion</i> .....	13
2.2.3	<i>Aerodynamiska metoder</i> .....	13
2.2.4	<i>Elektromagnetisk separation (EMIS)</i> .....	13
2.2.5	<i>Kemisk jämvikt</i> .....	14
2.2.6	<i>Viktiga uttryck och definitioner</i> .....	14
<b>3</b>	<b>LASERANRIKNING</b> .....	<b>16</b>
3.1	PRINCIPEN FÖR EN LASER.....	16
3.2	AVLIS - ATOMIC VAPOR LASER ISOTOPE SEPARATION.....	19
3.2.1	<i>AVLIS-processen</i> .....	24
3.2.2	<i>Utrustning för AVLIS</i> .....	25
3.3	MLIS - MOLECULAR LASER ISOTOPE SEPARATION.....	28
3.3.1	<i>MLIS-processen</i> .....	30
3.3.2	<i>Utrustning för MLIS</i> .....	31
3.4	CRISLA – CHEMICAL REACTION BY ISOTOPE SELECTIVE LASER ACTIVATION.....	35
3.4.1	<i>Utrustning</i> .....	35
3.5	SILEX - SEPARATION OF ISOTOPES BY LASER EXCITATION.....	36
<b>4</b>	<b>ANRIKNING GENOM PLASMASEPARATION</b> .....	<b>37</b>
4.1	PSP-PROCESSEN.....	41
4.2	UTRUSTNING FÖR PSP.....	42
<b>5</b>	<b>INDIKATORER PÅ LASERANRIKNING &amp; PLASMASEPARATION</b> .....	<b>44</b>
5.1	INDIKATORER PÅ LASERANRIKNINGSVERKSAMHET.....	44
5.1.1	<i>AVLIS</i> .....	44
5.1.2	<i>MLIS</i> .....	45
5.2	INDIKATORER PÅ PLASMASEPARATION.....	45
<b>6</b>	<b>ANLÄGGNINGAR OCH ANLÄGGNINGSDRIFT</b> .....	<b>46</b>
6.1	DRIFT AV EN ANRIKNINGSANLÄGGNING.....	47
6.2	ANRIKNINGSANLÄGGNINGARNAS EFFEKTIVITET.....	47
<b>7</b>	<b>REFERENSER</b> .....	<b>49</b>

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

**BILAGA 2:** Iraks laseranrikningsprogram



# 1 Inledning

Denna rapport är resultatet av en studie rörande urananrikning med laserbaserade metoder och plasmaseparation, där syftet har varit att fördjupa våra kunskaper inom områdena. Speciellt fokus har lagts på att förstå de fysikaliska principerna samt att studera den utrustning som krävs för urananrikning medelst dessa metoder, för att kunna göra goda bedömningar rörande exportkontroll av sådan utrustning.

Orsaken till att studera just laseranrikning är att teknologin – även om den är sekretessbelagd och restriktivt spridd – har varit föremål för intresse hos flera länder med kärnvapenambitioner. Under 2003 uppdagades det att Iran haft ett fördolt program för laseranrikning av uran sedan 1991 och även lyckats att anrika små mängder uran<sup>1</sup>. I bilaga 3 beskrivs också kort Iraks laseranrikningsprogram.

Plasmaseparation har också inkluderats i denna rapport då det är en liknande process med hög anrikningsfaktor även om den ännu inte använts i industriell skala för urananrikning. För båda processerna gäller dessutom att de är mycket effektiva och kan vara relativt småskaliga och därför lätta att dölja, varför de speciellt kan vara intressanta för stater med framtida kärnvapenambitioner.

I det följande beskrivs först AVLIS- och MLIS-processerna med en del detaljer, som följs av en mer översiktlig beskrivning av CRISLA- och SILEX-processerna. Vidare beskrivs plasmaseparationsprocessen i ett eget kapitel. I varje avsnitt utreds begränsande parametrar och den typ av utrustning som kan komma i fråga att använda för de olika processerna diskuteras.

Sista kapitlet innehåller en litteraturlista med relevant litteratur som har varit basen för denna studie. Vi har valt att inte ha någon avancerad referenshantering i den löpande texten utom när det gäller mer specifika uppgifter då vi har lagt in fotnoter.

Exportkontrollregimerna Nuclear Suppliers' Group (NSG) och Zanggerkommittén har identifierat "*särskilt konstruerade eller iordningställda system*" som används för olika anrikningsprocesser och som ansetts vara relevanta att belägga med exportkontroll, NSG Part 1<sup>2</sup>. I NSG Part 2<sup>3</sup>, kontrolleras produkter med dubbla användningsområden, s.k. *dual-use* produkter. För de olika anrikningsprocesser som behandlas här återfinns system och komponenter belagda med exportkontroll både enligt NSG Part 1 och Part 2. Såväl NSG Part 1 som Part 2 finns inkluderade i EU:s rådsförordning 1334/2000. Ett utdrag ur denna förordning relevant för de här studerade anrikningsprocesserna bifogas i Bilaga 1.

---

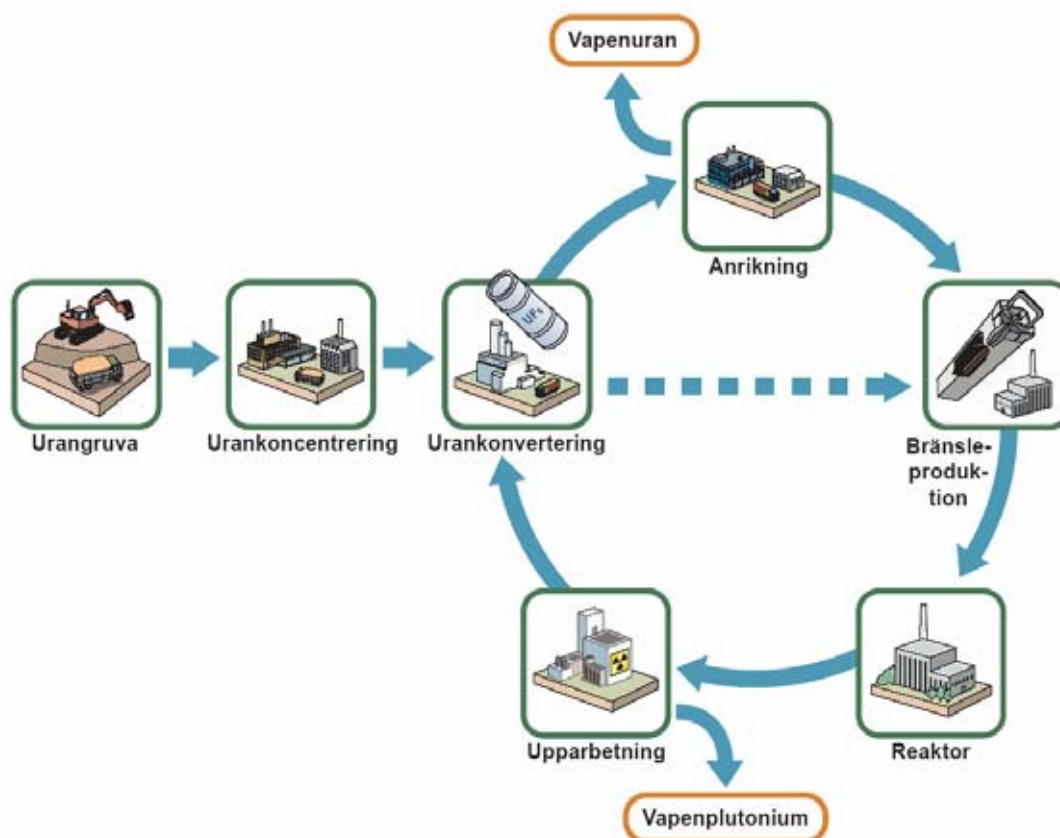
<sup>1</sup> Iran har rapporterat till IAEA att de lyckades framställa milligrammängder av anrikat uran, med anrikningsgrader på i genomsnitt 8 %. Den högsta anrikningsgrad som erhållits anges vara 13 %. IAEA GOV/2004/83.

<sup>2</sup> INFCIRC/254/Rev8/Part 1.

<sup>3</sup> INFCIRC/254/Rev7/Part 2.

## 2 Bakgrund

De olika processer som krävs för att framställa anrikat uran och plutonium, för reaktordrift eller för andra tillämpningar, brukar beskrivas genom den så kallade kärnbränslecykeln (se figur 1). I figuren illustreras alla de processer som krävs för att producera kärnenergi från gruva till slutförvar. Anrikningen är ett nödvändigt steg för att producera låganrikat uran för lättvattenreaktorer. Processerna är dock desamma oavsett om man har för avsikt att tillverka reaktorbränsle eller höganrikat uran för vapenändamål. I denna rapport beskrivs några av de metoder som kan användas för att anrika naturligt uran till reaktorbränsle, men också till vapenuran [1].



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

### 2.1 Urananrikning

Naturligt förekommande uran innehåller tre olika isotoper,  $^{234}\text{U}$  (0,005 %),  $^{235}\text{U}$  (0,720 %) och  $^{238}\text{U}$  (99,275 %). De tre uranisotoperna har alla samma antal protoner, men skiljer sig åt med avseende på antalet neutroner i kärnan<sup>4</sup>. Isotopen  $^{235}\text{U}$  är den enda som är klyvbar med termiska neutroner och är därför den som är av intresse för att utvinna kärnenergi. För att

<sup>4</sup> 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.

användas som bränsle i de flesta kommersiella kärnreaktorer<sup>5</sup> måste andelen av isotopen  $^{235}\text{U}$  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  $^{235}\text{U}$  jämfört med  $^{238}\text{U}$ , och det är denna process som kallas anrikning. Uran där man ökat andelen  $^{235}\text{U}$  till över naturlig sammansättning men mindre än 20 % kallas låganriktat uran (LEU- *Low Enriched Uranium*), anrikningsgrader med 20 % eller mer kallas höganriktat uran (HEU- *Highly Enriched Uranium*).

Skillnaden i kemiska egenskaper hos olika isotoper är oftast försumbar. För att kunna öka koncentrationen av den intressanta uranisotopen på bekostnad av de övriga utnyttjar man i de flesta anrikningsprocesser den direkta masskillnaden mellan isotoperna. Då det bara skiljer tre neutroner mellan  $^{235}\text{U}$  och  $^{238}\text{U}$  är masskillnaden och därmed separationseffekten mycket liten, vilket medför att för de flesta anrikningsmetoder behöver man öka anrikningsgraden successivt i många steg för att nå den önskade anrikningsgraden. När det gäller laserbaserade processer utnyttjas dock inte masskillnaden mellan olika atomer direkt utan det faktum att masskillnaden för olika isotoper av samma grundämne ger upphov till ett isotopskift, dvs. en förskjutning i elektronernas energinivåer hos atomer eller molekyler. Eftersom elektronernas energinivåer är unika för olika atomer eller molekyler kan man om man utnyttjar dessa skillnader separera olika isotoper. Genom att man utnyttjar för atomerna unika egenskaper kan man i laserbaserade processer uppnå hög separationseffektivitet. I plasmaseparationsprocessen (PSP) däremot utnyttjas isotopernas masskillnad direkt. Detta sker genom att joner med samma laddning men olika massa beter sig olika i ett magnetfält. Detta fenomen används för att med hjälp av ett elektriskt fält accelerera enbart den önskade isotopen. I den meningen är PSP snarlik, och närmast en utveckling av, den mer traditionella elektromagnetiska separationen (EMIS).

## 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. Gasdiffusion har upp till tio gånger större energiförbrukning jämfört med gascentrifugering och i takt med att nya anrikningsanläggningar tas i drift ersätts gasdiffusion med gascentrifugering. Laserbaserade anrikningsmetoder och plasmaseparation har varit föremål för riktade forskningsinsatser i ett flertal länder, och på vissa håll har man haft pilotanläggningar, men dessa har stängts ner och man har istället satsat på gascentrifugering som är en beprövad och effektiv metod, i nya kommersiella anläggningar. Ur spridningshänseende är det dock relevant att studera laser- och plasmaanrikning. Speciellt inom laseranrikning har det funnits aktiviteter som man förknippar med fördolda vapenprogram.

Nedan ges en kort beskrivning av några olika anrikningsmetoder, för att ge en inblick i de viktigaste skillnaderna mellan olika metoder. I efterföljande avsnitt kommer det engelska

---

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

uttrycket *feed* eller *feed*-material att användas för att benämna ingångsmaterialet till anrikningsprocessen. I rapporten anges energiåtgång per SWU, (eng. *Separative Work Unit*) som är 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) och priset för anrikning anges i kostnad per SWU. Om priset per SWU är högt och uranpriset lågt kan det vara ekonomiskt gynnsamt att låta avfallsströmmen innehålla en högre anrikningsgrad. Om däremot uranpriset är högt och kostnaden per SWU lägre kan det vara bättre att ha en lägre koncentration  $^{235}\text{U}$  i avfallsströmmen och utnyttja uranråvaran bättre. Detta illustreras med siffror i tabell 1 nedan där vi räknat på produktion av 25 ton LEU (3,5 %).

Tabell 1. Råvaruåtgång och antal SWU för att producera 25 ton LEU (3,5 %) med olika halt  $^{235}\text{U}$  i avfallsströmmen.

Halt $^{235}\text{U}$ i avfallsströmmen	Råvaruåtgång (ton naturlig $\text{UF}_6$ )	SWU
0,5 %	369	55 000
0,2 %	167	96 000

Som framgår av tabellen ovan går det alltså åt drygt dubbelt så mycket uranråvara och nästan halva separationsarbetet för producera samma mängd LEU om koncentrationen  $^{235}\text{U}$  i avfallsströmmen är 0,5 % jämfört med 0,2 %.

### 2.2.1 Gascentrifugering

Vid gascentrifugering utnyttjas skillnaden i massa mellan de olika tunga molekylerna  $^{238}\text{UF}_6$  och  $^{235}\text{UF}_6$ . Genom att rotera gasen i en cylindrisk behållare, en s.k. gascentrifug, mycket fort<sup>6</sup> separeras de olika molekylerna i radiell led. Den lättare isotopen  $^{235}\text{UF}_6$  koncentreras närmare behållarens mitt och de tyngre molekylerna närmare periferin. Ett stort antal serie- och parallellkopplade centrifuger bildar en kaskad. Genom ett speciellt uttagssystem tas den anrikade respektive utarmade strömmen ut i olika rör och leds vidare i kaskaden. Centrifugrotorn består av ett höghållfast material som dessutom är korrosionsbeständigt mot  $\text{UF}_6$ . Exempel på sådana material är höghållfast aluminium, maråldrat stål och olika kolfiberkompositmaterial. För en mer utförlig beskrivning av separation med gascentrifugering se [2].

Separationseffektiviteten är högre än för övriga metoder som används kommersiellt och dessutom är energiförbrukningen låg vilket gör att denna process är attraktiv.

<sup>6</sup> Centrifugen roterar mellan 1000 och 2000 varv/s beroende på rotorns material och diameter.

## 2.2.2 Gasdiffusion

Vid gasdiffusion utnyttjas också skillnaden i massa mellan de olika tunga molekylerna  $^{238}\text{UF}_6$  och  $^{235}\text{UF}_6$ . I denna process trycks  $\text{UF}_6$ -gas genom ett poröst membran. Den lättare molekylerna  $^{235}\text{UF}_6$  rör sig något snabbare genom membranet än den tyngre vilket resulterar i en ökning av halten  $^{235}\text{UF}_6$  på andra sidan membranet<sup>7</sup>.

Membranet är ett tunnväggigt, poröst material som är korrosionsbeständigt mot  $\text{UF}_6$  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 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 masskillnaden<sup>8</sup>, och således också hastigheten, mellan de två molekylerna är mycket liten.

## 2.2.3 Aerodynamiska metoder

Det finns flera olika metoder som går under benämningen aerodynamiska metoder. De mest kända är Vortex-metoden som Sydafrika utvecklade under sitt – nu avslutade – kärnvapenprogram samt Nozzle-metoden (dysmetoden) som utvecklats i Tyskland.

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  $^{235}\text{U}$ . 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.

## 2.2.4 Elektromagnetisk separation (EMIS)

Denna metod var den första som användes för att producera uran av högre anrikningsgrad under det amerikanska Manhattanprojektet då man tillverkade det första kärnvapnet. I EMIS-processen utgick man då från låganrikat uran som hade producerats med andra metoder t.ex. gasdiffusion. 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 calutroner<sup>9</sup>, innehåller en jonkälla som joniserar uranet, ett accelerationssteg och ett magnetfält som böjer av uranisotopen  $^{235}\text{U}$  mer än  $^{238}\text{U}$ . Jonerna separeras på detta vis geometriskt till varsitt uppsamlingsområde vilket ger en anrikningseffekt. Som synes i tabell 2 nedan har EMIS en

<sup>7</sup> Då de två molekylerna har samma kinetiska energi vid samma temperatur leder detta till att den tyngre molekylerna har något lägre hastighet i enlighet med sambandet  $E=mv^2/2$ .

<sup>8</sup> 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 %.

<sup>9</sup> Den apparatur som utvecklades i Manhattanprojektet för elektromagnetisk isotopseparation kallades Calutron efter California University Cyclotron.



mycket hög anrikningsfaktor vilket innebär att det endast krävs ett fåtal steg för att nå vapenkvalitet på uranet.

### 2.2.5 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 nedan är anrikningsfaktorn för kemisk jämvikt lägst av alla listade metoder.

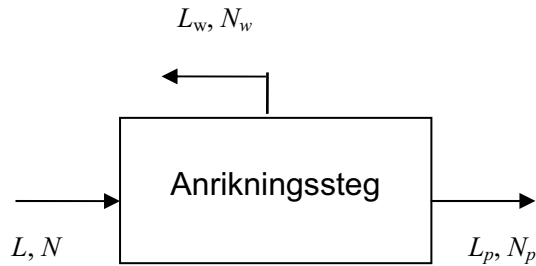
Tabell 2. Jämförelse mellan viktiga parametrar för några olika anrikningsmetoder [1] och [3].

Process	Feed-material	Separationsfaktor $q$	Energiförbrukning [kWh/SWU]
Gasdiffusion	UF <sub>6</sub>	1,0040-1,0045	2 300-3 000
Gascentrifugering	UF <sub>6</sub>	1,3-1,6	100-300
Aerodynamisk	UF <sub>6</sub> + vätgas	1,015-1,030	3 000-3 500
Kemisk jämvikt	Uran i lösning	1,0025-1,0030	400-700
Laseranrikning	Uranmetall (AVLIS)	5-15*	40
	UF <sub>6</sub> (MLIS)		30
	UF <sub>6</sub> CRISLA		10
Elektromagnetisk	UCl <sub>4</sub>	20-40*	3 000-4 000
Plasmaanrikning	Uranmetall	3,5-10	200-600

\* Här anges anrikningsfaktorn  $\alpha$  istället för separationsfaktorn  $q$  (För definitioner, se avsnitt 2.2.6).

### 2.2.6 Viktiga uttryck och definitioner

I detta stycke beskrivs kortfattat viktiga uttryck och definitioner, en mer utförlig beskrivning av de olika termerna finns i [2]. I ett generiskt steg i en anrikningsanläggning benämns flödena  $L$  och isotopfraktionerna  $N$ . I figuren nedan betecknas ingångsflödet (eng. *feed*) med  $L$ , produktflödet (eng. *product*) med  $L_p$  och avfallsströmmen (eng. *waste*) med  $L_w$ . Flödena har enheten massa per tidsenhet. För naturligt uran som innehåller 0,72 % <sup>235</sup>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:

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

där  $R_p$  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.

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

$$q = \frac{R_p}{R_w} . \quad (3:2)$$

Separationsfaktorn anger alltså förhållandet mellan andelen  $^{235}\text{U}$  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 gascentrifuger kan exempelvis ha separationsfaktorer mellan 1,2 och 1,5, vilket är betydligt högre än vid exempelvis gasdiffusion som har en separationsfaktor på endast ca 1,004.

I en anrikningsanläggning är ett stort antal separationssteg hopkopplade i s.k. kaskader. Antalet steg i varje kaskad bestäms av de önskade isotopfraktionerna hos *feed*- och avfallsström. Bredden (totala materialflödet) i varje steg bestäms av flödes hastigheterna av anrikat och utarmat material. Antalet steg är beroende av varje stegs anrikningsfaktor, dvs. en effektivare anrikningsmetod (större  $\alpha$ ) kräver färre steg.

## 3 Laseranrikning

I detta kapitel beskrivs bakgrunden för laserbaserade anrikningsprocesser. Den litteratur som använts är främst [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 och 14].

Laserseparation bygger på att utnyttja de små skillnader i energinivåer som finns mellan olika isotoper av ett grundämne. Denna separation kan ske på ett flertal sätt. De mest kända metoderna är separation av atomärt uran - AVLIS (eng. *Atomic Vapor Laser Isotope Separation*) (fr. *SILVA Séparation Isotopique par Laser sur la Vapeur Atomique de l'uranium*) och separation av uran i molekylär form – MLIS (eng. *Molecular Laser Isotope Separation*) (fr. *SILMO Séparation des Isotopes par irradiation au Laser des MOlécules*). Det finns också möjlighet att använda laserexcitation för att påskynda kemiska reaktioner - CRISLA (eng. *Chemical Reaction by Isotope Selective Laser Activation*). Ingen av dessa metoder har använts i industriell skala, men flera länder har eller har haft pilotanläggningar för både AVLIS och MLIS.

Laserseparation kan vara mycket effektivt i bemärkelsen att separationsfaktorn i varje steg kan bli mycket stor, varför detta är en intressant metod ur spridningshänseende då en relativt liten anläggning skulle kunna användas för att framställa vapenuran. Om man dessutom utgår från låganrikat uran behövs endast några få steg för att anrika till vapenkvalitet. Laserbaserad isotopseparation är också en metod som skulle kunna användas för att separera isotoper av plutonium. I plutonium är masskillnaden endast en enhet på 240, istället för tre enheter på 235 eller 238 som hos uran, vilket gör att de flesta anrikningsmetoder som fungerar för uran inte är möjliga att använda för plutonium. Laseranrikning är dock en metod som kan fungera, även EMIS (elektromagnetisk separation) där man använder elektriska och magnetiska fält för separation av accelererade joner, skulle kunna användas för separation av plutoniumisotoper.

Laseranrikning bygger som nämnts ovan på att utnyttja de små skillnader som uppstår i atomers eller molekylers energinivåer på grund av isotopers olika massa. För att kunna utnyttja dessa mycket små skillnader måste man ha en mycket precis energikälla, eftersom man endast vill påverka den isotop som skall separeras. I de flesta andra anrikningsprocesser påverkas båda isotoperna om än i olika grad. Man kan likna hela processen vid en radio – lasern sänder ut strålning av en speciell frekvens som bara kan tas upp av atomer med energinivåer som motsvaras av exakt denna frekvens liksom en radiomottagare ställs in för att ta emot en viss frekvens.

### 3.1 Principen för en laser

Akronymen LASER står för *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ljuset som emitteras förstärks genom en fysikalisk process som kallas stimulerad emission. Laserljuset som sänds ut är av en och samma våglängd och har samma fas. Eftersom det finns en direkt relation mellan energi och våglängd betyder detta att laserstrålningen också har mycket väl definierad energi. Stimulerad emission är ett slags resonansfenomen. Atomer exciterade till en specifik nivå kan fås att återgå till ett lägre energitillstånd om de påverkas av en foton med energi som exakt motsvarar energiskillnaden mellan de exciterade nivåerna. När atomerna återgår till det lägre energitillståndet sänder de ut ljus som motsvarar energiskillnaden mellan nivåerna.

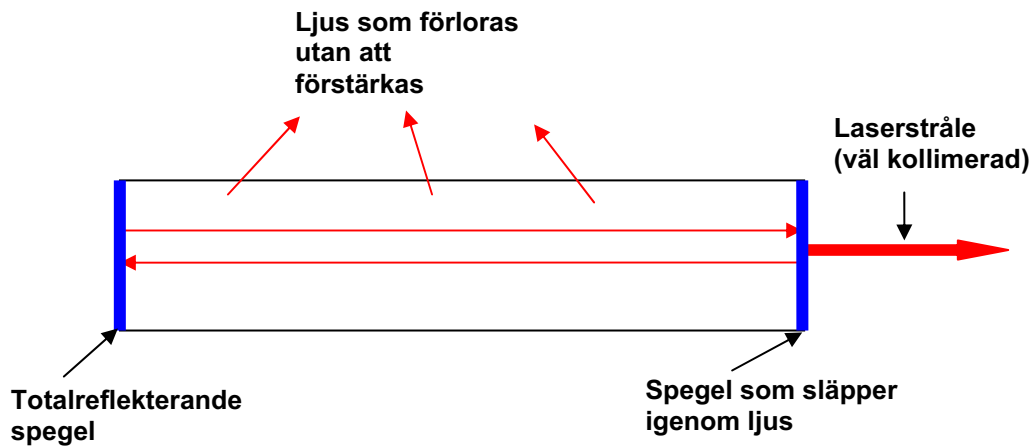
De grundläggande delarna i en laser är lasermediet som genererar ljus, kraftaggregatet som tillför den energi som behövs för att lasermediet skall kunna sända ut ljus och en s.k. resonator eller laserkavitet som koncentrerar ljuset så att stimulerad emission kan uppstå. Det finns många olika typer av lasrande material såsom gaser, vätskor, glas, kristallina material och halvledare. För att stimulerad emission skall kunna uppstå krävs att s.k. populationsinversion skapas, vilket betyder att mer än hälften av elektronerna i lasermediet befinner sig i ett exciterat tillstånd. För att skapa detta tillstånd ”pumpar” man lasermediet, dvs. energi tillförs för att överföra elektronerna från grundtillståndet till det exciterade tillståndet.

Olika lasermedier ger olika våglängder, vissa material kan ha flera nivåer som lasrar, andra bara en enstaka. Materialets egenskaper bestämmer också hur väl definierad laserenergin kan bli. Energin hos laserstrålningen är relaterad till våglängden hos det utsända ljuset genom följande samband;

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \text{ eller } E = h\nu.$$

I detta samband betecknar  $E$  energin [J],  $h$  Plancks konstant [Js],  $c$  ljushastigheten [m/s],  $\lambda$  våglängden [m] och  $\nu$  frekvensen [Hz].

Det räcker inte med populationsinversion för att åstadkomma lasring, ljuset måste också förstärkas genom att passera lasermediet ett mycket stort antal gånger. Detta sker i laserkaviteten eller resonatorn, se figur 3. Resonatorn innesluter lasermediet med en spegel i vardera änden. För att laserljus skall kunna sändas ut är den ena eller båda speglarna gjorda så att delar av ljuset kan passera, antingen genom ett hål, runt kanten eller genom en del av spegeln som är transparent. Stimulerad emission som sker längs laserkaviteten axel mellan speglarna förstärks när ljuset passerar fram och tillbaka genom lasermediet när det reflekteras av speglarna. Stimulerad emission av fotoner i andra riktningar försvinner ut ur lasermediet utan att förstärkas.



Figur 3. Laserkavitet eller resonator med speglar. Det lasrande materialet befinner sig mellan speglarna. Ett externt kraftaggregat levererar energi för pumpningen dvs. excitation av det lasrande mediet.

Hur stor effekt som kan genereras beror på förstärkningen i lasermediet. Låg förstärkning ger låg effekt och hög förstärkning ger hög effekt. För att öka effekten kan man bygga speciella laserförstärkare som ökar effekten ytterligare. Sådana förstärkare har inga speglar i kaviteten och genererar ingen stråle internt utan innehåller ett aktivt medium som förstärker effekten från en enskild oscillator. Effektiviteten hos olika lasrar, dvs. hur stor del av tillförd elektrisk energi som tas ut som laserljus beror på flera faktorer och varierar mellan 0,001 % och 30 %.

Laserljus kan sändas ut kontinuerligt eller i pulser. Många lasrar kan endast sända ut ljus pulsat. Detta kan bero på olika faktorer såsom värmeutveckling eller att populationsinversionen kräver höga effekter som endast kan levereras i korta pulser. Laserljuset är koncentrerat i en mycket tunn stråle vilket gör att även en laser med modest effekt kan uppnå hög effekt per ytenhet. För anrikningsändamål bör ljuset vara pulsat. Det ställs också speciella krav på pulsfrekvens och pulslängd. Pulsfrekvens, pulslängd och effekt kan åstadkommas på olika sätt t.ex. genom Q-switchning. Q-värdet för en laserkavitet definieras av sambandet

$$Q = \frac{\text{lagrad energi per cykel}}{\text{förlorad energi per cykel}}$$

Normalt är Q-värdet konstant, men om man på konstgjord väg håller Q-värdet lågt, t.ex. genom en spegel med höga förluster, för att sedan hastigt ändra det kan man momentant få stor populationsinversion som resulterar i en kort ljuspuls med hög effekt.

## 3.2 AVLIS - Atomic Vapor Laser Isotope Separation

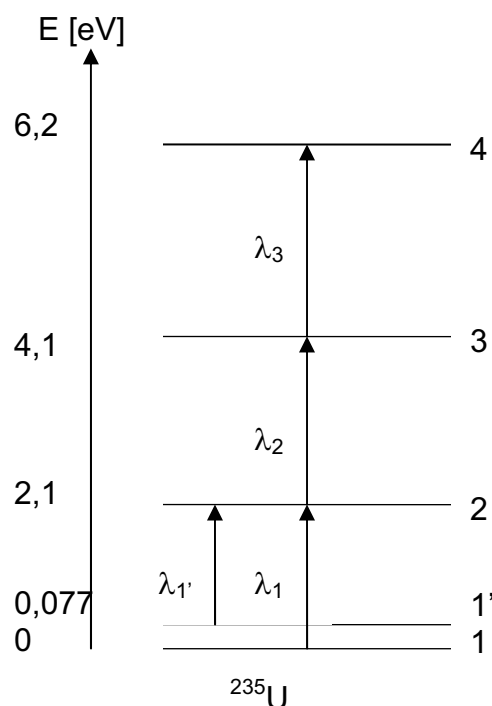
Principen bakom AVLIS är att genom selektiv jonisation skilja ut enskilda atomer  $^{235}\text{U}$  från  $^{238}\text{U}$  genom att bestråla en ånga av uranatomer med laserljus med mycket väl definierade våglängder. Den grundläggande fysikaliska principen som utnyttjas i denna process är det s.k. isotopskiftet<sup>10</sup> mellan  $^{235}\text{U}$  och  $^{238}\text{U}$ . Genom att utnyttja denna skillnad går det att selektivt jonisera  $^{235}\text{U}$  och på så vis separera denna isotop från  $^{238}\text{U}$ . För att jonisera uran krävs totalt energin 6,2 eV<sup>11</sup>. Anrikningen sker genom att göra denna jonisation i flera steg där storleken på stegen är olika för de två isotoperna. Detta kan åstadkommas med laserljus som har tillräckligt god precision för att endast excitera och jonisera övergångar i den ena isotopen och lämna den andra i grundtillståndet. De bildade jonerna kan insamlas med hjälp av ett elektriskt fält som inte påverkar de neutrala atomerna.

I figur 4 visas förenklat energinivåerna för  $^{235}\text{U}$ . Det finns en stor mängd nivåer vid de aktuella energierna och exakt vilka som använts i olika program är inte känt. Isotopskiftet mellan  $^{235}\text{U}$  och  $^{238}\text{U}$  är ca 0,035 meV vilket skall jämföras med energin på de övergångar som skall exciteras som är runt 2 eV. Detta kräver alltså en precision i energi som är ca 1 på  $2 \cdot 10^5$ . Omräknat till våglängd är isotopskiftet ca 0,002 nm vilket skall jämföras med våglängden för övergångarna som är ca 590 nm. Man kan tänka sig flera olika sätt att selektivt jonisera  $^{235}\text{U}$ . Det som har visat sig mest praktiskt är att använda fyra nivåer som visas i figuren. Utgångsmaterialet vid anrikningen är förångad uranmetall och vid de temperaturer som uranångan har (ca 3000 °C) befinner sig ca 44 % av uranatomerna i grundtillståndet och 27 % i tillståndet vid 0,077 eV, återstoden av atomerna återfinns i andra energitillstånd. För att öka effektiviteten i processen använder man sig därför av laserljus med fyra istället för tre olika våglängder eller energier. Först sker excitationen till nivå 2 med ljus av våglängderna  $\lambda_1$  och  $\lambda_1'$ , våglängden  $\lambda_2$  exciterar atomen till nivå 3 och slutligen joniseras den med  $\lambda_3$ . Dessa våglängder ligger nära varandra, vid ca 590 nm, och motsvarar synligt ljus i det röd-orange området.

---

<sup>10</sup> Isotopskiftet är en skillnad i energinivåerna hos atomerna av de olika isotoperna. Denna skillnad beror i tunga atomkärnor, som exempelvis uran, främst på skillnader i kärnans volym och därmed laddningsfördelning. Skillnaden i kärnans volym skiftar s-elektronernas energinivåer för olika isotoper av ett grundämne.

<sup>11</sup> Enheten elektronvolt, eV, används bland annat inom atom- och molekylfysiken. En elektronvolt är den energi en elektron får om den accelereras av en spänning på 1 volt vilket motsvarar  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule.



Figur 4. Schematiskt energinivådiagram för  $^{235}\text{U}$ . Nivåernas energi är angiven i elektronvolt. Vid de temperaturer som är intressanta i anrikningssammanhang befinner sig ca 44 % av atomerna i det lägsta energitillståndet och 27 % i det första exciterade tillståndet vid 0,077 eV, återstoden av atomerna befinner sig i andra tillstånd som ej ritats ut i figuren. Pilarna symboliserar fotoner med olika energi som krävs för att stegvis jonisera uranatomer.

En komplikation som dyker upp är att en av de intressanta energinivåerna, nivå 2 i figur 4, i  $^{235}\text{U}$  är uppdelad i flera subnivåer s.k. hyperfinsplittning<sup>12</sup>, vilket inte är fallet i  $^{238}\text{U}$ . För att man inte skall förlora i effektivitet på grund av denna uppdelning måste laserljuset täcka ett våglängdsintervall som är brett nog för att täcka alla dessa nivåer. Hyperfinsplittningen är av samma storleksordning som isotopskiftet, men lite mindre, ca 0,0014 nm eller 0,025 meV.

Tabell 3. Energi, livslängd och tvärsnitt för de energinivåer i  $^{235}\text{U}$  som visas i figur 4.

Nivå	Energi [eV]	Livslängd [ns]	Tvärsnitt <sup>13</sup> [cm <sup>2</sup> ]
2	2,10	200	$5,4 \times 10^{-13}$
3	4,14	ingen uppgift	Ca. $10^{-14}$
4	6,18	0,1-0,001	Ca. $10^{-15}$

<sup>12</sup> Detta är s.k. hyperfinsplittning som beror på att spinnet hos  $^{235}\text{U}$   $I=7/2$ , vilket innebär att nivån splittras upp i  $2I+1=8$  subnivåer. Spinnet hos  $^{238}\text{U}$  är  $I=0$ .

<sup>13</sup> Tvärsnittet avser tvärsnitt för excitation till nästa nivå.

Tabell 4. Våglängd och energi för övergångarna i  $^{235}\text{U}$  som visas i figur 4.

Övergång	Våglängd [nm]	Energi [eV]
1→2	590	2,10
1'→2	611	2,03
2→3	608	2,04
3→4	< 608	>2,04

För att processen skall fungera måste laserljuset komma i väl synkroniserade pulser och pulserna måste komma tillräckligt tätt. Pulsernas längd och intervallet mellan dem bestäms dels av energinivåernas livslängder<sup>14</sup> och dels av hur lång tid det är i medeltal mellan kollisioner mellan partiklar. Ljuspulsernas längd  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  och  $\tau_3$  för excitation till nivå 2, 3 respektive 4 skall vara kortare än livstiderna för respektive nivå och tiden mellan dessa pulser,  $\Delta\tau$ , måste också vara kortare än livstiden för respektive nivå för att säkerställa att exciterade atomer inte deexciteras innan nästa ljuspuls. För nivå 2 i tabell 3 ovan betyder detta alltså att pulserna som exciterar till denna nivå bör vara kortare än 200 ns och att det bör vara mindre än 200 ns mellan dessa pulser och pulsen som exciterar upp till nästa nivå. Detta återspeglas också i de exportkontrollkrav som ställs på lasrar för AVLIS, med pulslängd mindre än 100 ns. En övre gräns för repetitionsfrekvensen ges av att en hel cykel med excitation och jonisation måste kunna ske innan nästa paket av ljus med olika energier kommer, vilket är i storleksordningen en puls per mikrosekund, eller 1 MHz. I praktiken måste man också ta andra hänsyn och för exportkontroll är den undre gränsen för repetitionsfrekvensen satt till 100 kHz.

Intensiteten på laserstrålningen bör vara så stark att övergångarna blir mättade, vilket innebär att alla atomer har överförts till det högre energitillståndet. Sambandet som gäller för laserpulsens energitäthet för att en intermediär nivå skall vara mättad är

$$\varepsilon_e = \frac{h\nu}{2\sigma_e},$$

där beteckningarna

$\varepsilon_e$  är energitätheten [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ] som krävs för den exciterade nivån,

$h$  är Plancks konstant [Js],

$\nu$  är laserljusets frekvens [Hz] och

$\sigma_e$  betecknar excitationstvårsnittet [ $\text{cm}^2$ ] till den aktuella nivån

Med siffror insatt för nivå 2, enligt tabell 3, finner man att ljuspulsens intensitet bör vara minst  $4 \cdot 10^{-7} \text{ J}/\text{cm}^2$ . För jonisation krävs sedan att energitätheten

$$\varepsilon_i = \frac{h\nu}{\sigma_i},$$

där index  $i$  betecknar jonisation, i övrigt är beteckningarna desamma som i uttrycket ovan.

<sup>14</sup> Längden på den exciterande pulsen skall vara kortare än nivåns livslängd. Energinivåernas livslängd är i storleksordning 100 ns och tiden mellan kollisioner ca. 1000 ns.



Med siffror för övergång från nivå 3 till nivå 4, enligt tabell 4, som är ett s.k. autojonisationstillstånd<sup>15</sup> betyder detta en energitäthet i pulsen om minst  $4 \cdot 10^{-4} \text{ J/cm}^2$ . Energitätheten som krävs för det sista steget är alltså 3 storleksordningar större än den som krävs för excitation och sätter den lägre gränsen för den intensitet som måste kunna levereras av lasersystemet.

För att separationsprocessen skall vara effektiv krävs att laserstrålningen används så effektivt som möjligt. Det laserljus som används har fyra olika våglängder, tre som orsakar excitation ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_1'$  och  $\lambda_2$  i figur 4) och en ( $\lambda_3$ ) som orsakar jonisation. Tvärsnittet, dvs. sannolikheten, för att laserljuset orsakar excitation är större än att det orsakar jonisation (jfr. tvärsnitten för nivå 2 och 3, respektive 4 i tabell 3). Hur långt laserljuset kan gå genom ångan innan en viss andel av ljuset absorberats kallas penetrationslängden och beror på reaktionstvårsnittet. Eftersom tvärsnittet är olika för ljus av olika våglängd är också penetrationslängden olika för olika våglängder.

För en mättad övergång är penetrationslängden för laserljuset för en joniserande övergång

$$l_i = \frac{2}{N_{10} \sigma_i} = l_e^0 \frac{2\sigma_e}{\sigma_i}, \text{ där}$$

$N_{10}$  betecknar antalet neutrala uranatomer per volymenhet [ $\text{cm}^{-3}$ ],

$\sigma_i$  jonisationstvårsnittet [ $\text{cm}^2$ ],

$\sigma_e$  excitationstvårsnittet [ $\text{cm}^2$ ] och

$l_e^0$  är penetrationslängden [cm] för svag absorptionsmätning.

Penetrationslängden för excitation är, med motsvarande beteckningar,

$$l_e^0 = \frac{1}{N_{10} \sigma_e}.$$

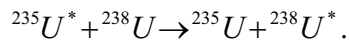
Plasmat som bildas vid excitationen innehåller vid temperaturen 2300 K typiskt  $5 \cdot 10^{13}$  neutrala atomer per  $\text{cm}^3$  (främst  $^{238}\text{U}$ ) varav 1/140 är  $^{235}\text{U}$ -joner. Detta medför att antalet  $^{235}\text{U}$ -atomer i grundtillståndet är  $N_{10} = 4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . Insatt i formlerna ovan ger detta  $l_i = 5000 \text{ cm}$  och  $l_e^0 = 5 \text{ cm}$ , med värden på tvärsnitten för excitation till nivå 2 respektive jonisation från tabell 3. Uttryckt i ord betyder detta alltså att penetrationslängden för laserljus med våglängder som orsakar jonisation ( $\lambda_3$ ) är flera storleksordningar större än penetrationslängden för laserljus som exciterar ( $\lambda_1$  och  $\lambda_1'$ ). För att utnyttja laserstrålningen fullt ut bör våglängden<sup>16</sup> väljas så nära  $l_i$  som möjligt, för att försäkra sig om att så stor andel som möjligt av atomerna joniseras. För att åstadkomma långa våglängder får ljuset passera uranångan ett flertal gånger. Praktiskt åstadkoms detta genom att låta laserljuset reflekteras fram och tillbaka genom ångan med hjälp av speglar.

För att separationsprocessen skall vara effektiv krävs också att det inte sker något laddningsutbyte mellan isotoperna som skall separeras. Det finns två kollisionsprocesser som kan reducera jonisationseffektiviteten: excitationutbyte och laddningsutbyte. I

<sup>15</sup> Ett autojonisationstillstånd är ett exciterat atomärt tillstånd från vilket atomen spontant övergår från ett neutralt tillstånd till ett joniserat.

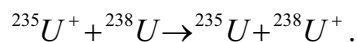
<sup>16</sup> Med våglängd menas här den totala väg laserljuset tillryggalägger i uranångan.

excitationsutbytesprocessen överförs energi mellan en exciterad  $^{235}\text{U}^*$ -atom<sup>17</sup> och en icke-exciterad  $^{238}\text{U}$ -atom enligt processen nedan:



Man brukar definiera en jonisationsselektivitet som för uran är kvoten mellan antalet exciterade  $^{235}\text{U}$ -atomer och  $^{238}\text{U}$ -atomer. Vid de atomtätheter och relaxationstider<sup>18</sup> det är fråga om i AVLIS kan jonisationsselektiviteten bli upp till 1000, dvs. huvudsakligen  $^{235}\text{U}$  exciteras och processen utgör alltså inget praktiskt problem.

Laddningsutbytesprocessen beskrivs enligt



Tvärsnittet för laddningsutbyte beror mycket starkt på uranångans täthet och uranatomernas hastighet, som bestäms av ångans temperatur. För de temperaturer det är fråga om i vårt fall (mellan 2000 K och 3000 K [9]) gäller att tvärsnittet för laddningsutbyte är  $\sigma \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ , vilket ungefär motsvarar en fri medelväglängd<sup>19</sup> om 1 cm. Detta är alltså ett reellt problem man måste ta hänsyn till, eftersom avståndet  $^{235}\text{U}$ -jonerna måste röra sig från det att jonisationen sker tills den träffar kollektorplattan mycket väl kan vara längre än 1 cm. Vid laddningsutbyte är dock rörelsemängdsöverföringen praktiskt taget försumbar vilket man kan utnyttja för att minska effekten av laddningsutbyte. Genom att öka jonernas hastighet momentant genom en kort laddningspuls<sup>20</sup> sådan att jonerna förflyttar sig mindre än laserstrålens diameter under accelerationen kan man minska problemet med laddningsutbyte. En annan effekt man måste ta hänsyn till är sputtring, dvs. att uranjoner slår loss atomer från kollektorerna. Denna effekt begränsar styrkan på det elektriska fältet som används för att accelerera uranjonerna mot kollektorplattan.

Man måste alltså göra en avvägning av flera faktorer för att optimera laserstyrka, pulsfrekvens, förångningstemperatur, ångtäthet och inte minst kavitetens storlek.

Hur mycket uran som kan anrikas med hjälp av AVLIS under en viss tidsperiod beror bland annat på flödet och separationseffektiviteten. Nedan görs ett kvalitativt försök att uppskatta en maximal gräns för hur stor mängd uran som kan anrikas med en viss lasereffekt under ideala förhållanden utan förluster. Vid temperaturen 2300 K är, som nämnts ovan, uranångans täthet ca  $5 \cdot 10^{13}$  atomer/cm<sup>3</sup>, varav ca 1/140 är  $^{235}\text{U}$ , och uranatomernas hastighet,  $v$ , är ca  $5 \cdot 10^4$  cm/s. Detta ger ett flöde  $\phi = n \cdot v \approx 2,5 \cdot 10^{18}$  atomer/cm<sup>2</sup>s.

Om laserstrålen har diametern 1 cm och joniserar atomer längs en sträcka om 5 meter<sup>21</sup> och vi antar att varje  $^{235}\text{U}$ -atom joniserar kan vi beräkna det totala antalet joniserade atomer,  $N$ , under en tidsperiod  $\tau$  motsvarande ett år till

---

<sup>17</sup> Asterisken \* betecknar att atomen är exciterad dvs. åtminstone en av elektronerna befinner sig i ett annat energitillstånd än det lägsta möjliga.

<sup>18</sup> Relaxationstiden för ett system är den tid det typiskt tar att uppnå jämvikt, exempelvis den typiska tiden det tar innan ett exciterat tillstånd återgår till grundtillståndet.

<sup>19</sup> Den fria medelväglängden är ett mått på hur långt en partikel i genomsnitt rör sig mellan två kollisioner.

<sup>20</sup> För att öka effektiviteten kan man använda korsade elektriska och magnetiska fält vilket minskar rymdladdningseffekter.

<sup>21</sup> Här har längden 5 m valts eftersom det motsvarar penetrationslängden för det laserljus som slutligen joniserar atomerna.

$$N = \tau \cdot \phi_{235} \cdot A \approx 110 \text{ kg } ^{235}\text{U}.$$

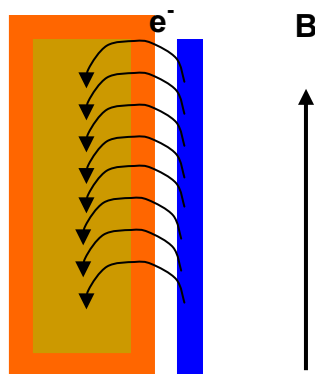
Denna mängd ren  $^{235}\text{U}$  motsvarar ca 2 ton låganriktat kärnbränsle eller ca 120 kg vapenmaterial. Om det kostar 6,2 eV att jonisera en uranatom blir den totala energi i form av laserfotoner från färgämneslasrar, som förbrukas för att producera 110 kg  $^{235}\text{U}$ , ca 280 MJ, vilket motsvarar en medeffekt om 10 W under ett år. Om effektiviteten för att pumpa färgämneslasrar med kopparångelasrar är i storleksordningen 1 % och signalen från den första färgämnescellen förstärks krävs det en effekt om ca 30 W från kopparångelasern, dvs. det skulle teoretiskt sett räcka med en kopparångelaser med denna effekt. Detta måste betraktas som en absolut övre gräns för hur mycket anriktat uran som skulle kunna produceras under de förutsättningar som antagits och i verkligheten är processer alltid behäftade med förluster.

### 3.2.1 AVLIS-processen

De olika delmoment som ingår i AVLIS-processen är:

1. Förångning av uranmetall.
2. Selektiv excitation och jonisation av ångan.
3. Uppsamling av produkt- och avfallsströmmar.

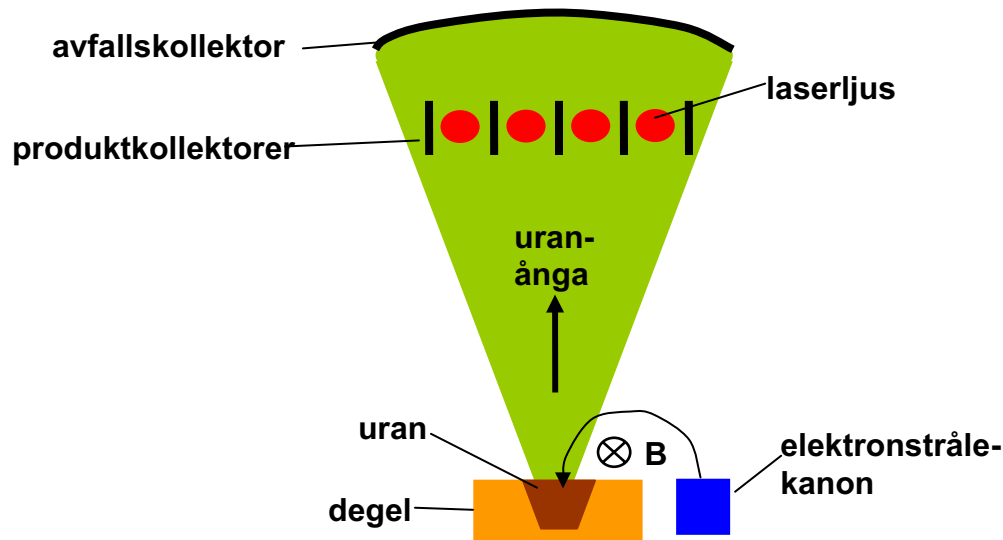
För att framställa uranånga utgår man från uranmetall. Urans smältpunkt är  $1132^\circ\text{C}$  (1405 K). Ångtemperaturen får inte vara för hög eftersom man vill att så stor andel som möjligt av atomerna skall befinna sig i grundtillståndet. Redan vid 2700 K ( $2427^\circ\text{C}$ ) är endast ca 44 % av  $^{235}\text{U}$ -atomerna i grundtillståndet och 27 % i första exciterade tillståndet. Förångningen åstadkoms med hjälp av en elektronstrålekanon. För att inte munstycket på elektronkanonen skall skadas vid direkt exponering för uranångan används ett magnetiskt fält för att styra elektronerna mot uranmetallen (se figur 5).



Figur 5. Elektronkanonen smälter uranet i degeln. För att skydda munstycket böjs elektronbanorna mot uranet i degeln med hjälp av magnetfältet  $\mathbf{B}$  riktat uppåt i figuren.

Uranmetallen förångas från en degel, som är tillverkad i ett material som måste tåla både den korrosiva uranångan och den höga temperaturen, så att inte degeln förstörs och uranångan inte kontamineras av förångat degelmaterial. Ofta är deglarna vattenkylda. Deglarna är nyckelkomponenter i systemet. Metallen matas ner i degeln genom att den får glida ner längs en ränna. Ångan som bildas joniseras sedan i flera steg med laserljus med olika energier. Den

varma uranånga stiger upp mot kollektorplattorna och exponeras för laserljuset, se figur 6. Jonerna samlas upp på de elektriskt laddade produktkolektorerna medan icke-joniserade atomer stiger upp mot avfallskollektorn.



Figur 6. Principskiss över AVLIS-processen. Elektronstrålekanonen förångar uranmetallen i degeln. Ett magnetfält  $B$  riktat inåt i figuren böjer av elektronstrålen. Ångan stiger uppåt och träffas av laserljuset. Joniserade  $^{235}\text{U}^+$  träffas av de laddade produktkolektorplattorna och icke-joniserade uranatomer samlas upp på avfallskollektorn.

### 3.2.2 Utrustning för AVLIS

Utrustning för AVLIS som är belagd med exportkontroll beskrivs nedan. Inom parentes anges referens till EU:s förordning 1334/2000 bilaga 1, som återfinns som Bilaga 1 i denna rapport.

Utrustning under kontroll för förångningssystemet och hantering av flytande uran omfattar:

**Högeffektselektronstrålekanoner (0B001 g1)** som arbetar i band eller med svep och som kan leverera mer effekt än 2,5 kW/cm. Man kan antingen använda en elektronstrålekanon som sänder ut elektroner i ett smalt band längs hela degeln eller en som sveper en smal elektronstråle längs degelns längd. Det finns kommersiella elektronstrålekanoner, t.ex. i vissa svetsaggregat, som kan användas men de måste modifieras för att kunna användas för uran.

**System för hantering av flytande metall (0B001 g2)** avsedda för uran eller uranlegeringar i smält form. Sådana system består av deglar (2A225) som är tillverkade i eller belagda med material som är korrosions- och värmebeständiga. Observera att de deglar som omfattas av NSG Part 2 är sådana som kan användas för att smälta vapenmaterial och därför måste vara små för att undvika kritikalitet. För smältning av naturligt eller utarmat uran är degelmaterialet det viktigaste, ej formen. Dessutom är deglarna utrustade med kylsystem, ofta

vatten. Exempel på material som klarar av den korrosiva och varma miljön är tantal, yttriumoxidbelagd grafit, grafit belagd med oxider av andra sällsynta jordartsmetaller eller blandningar av sådana. Vattenkylda deglar i koppar kan också användas, sådana är inte belagda med exportkontroll.

**System för att uppsamla slutprodukt och restfraktion (0B001 g3)** från anrikningsprocessen. Produkt- och avfallsströmmar kan samlas upp i antingen fast eller flytande form. Komponenterna som behövs är rör, ventiler, kopplingar, genomföringar, värmeväxlare och kollektorplattor. Som syns i figur 6 samlas produkten upp på ett system av rektangulära plattor. Plattorna är elektriskt laddade och man kan även applicera ett magnetfält för att öka kollektionseffektiviteten. Avfallsströmmen passerar genom produktkollektorerna och samlas upp på den välvda ytan ovanför. I system där man samlar upp uranet i flytande form måste ytorna hållas så varma att metallen förblir i flytande fas. Den flytande metallen tas ut genom en tappningsränna och passerar genom ett system av rör, ingöt<sup>22</sup> och andra kopplingar för att till slut samlas upp i en gjutbehållare där uranet får stelna till små bitar som tas ut genom en tappningsränna. För dessa system gäller samma krav på tillverkningsmaterialerna som för deglarna, dvs. materialet skall kunna stå emot den korrosiva påverkan som 1000-gradigt flytande uran innebär. Exempel på sådana material är yttriumoxidbelagd grafit eller tantal. Om man istället samlar upp uranet i fast form gäller inte samma krav på korrosionshårdighet hos materialerna.

**Behållare (0B001 g4)** som innesluter utrustningen ovan kan vara rektangulär eller cylindrisk. Behållaren har ett antal olika genomföringar för elförsörjning och kylvatten, fönster för laserljuset, anslutningar för vakuumpumpar, diagnosticerings- och övervakningsinstrument. Dessutom finns möjlighet att öppna och stänga behållaren för underhåll av komponenter. Det krävs ett pålitligt vakuumpumpsystem som kan hålla behållaren under högvakuum eftersom fukt som läcker in i behållaren reagerar med uranångan. Fönstren i behållaren är gjorda av blyglas för att skydda mot röntgenstrålning från elektronstrålekanonen.

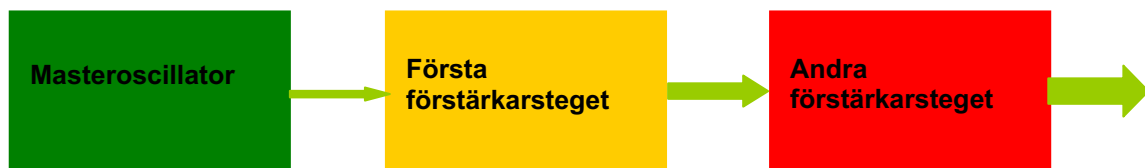
**Vakuumpumpar (2B231)**, för att hålla vakuum i systemet, som är under kontroll har insugningsrör med en diameter 380 mm eller mer, pumphastighet av 15 m<sup>3</sup>/s eller högre och kan åstadkomma ett slutvakuum bättre än 13 mPa. Exempel på sådana pumpar är diffusionspumpar, vissa kryopumpar och jonpumpar, men det skulle också vara möjligt att tillverka turbopumpar som uppfyller kriterierna. Andra användningsområden för sådana pumpar är exempelvis stora vakuumbagnar, accelerators, inom halvledarindustrin och tunnfilmsteknik.

**Lasrar eller lasersystem för separation av uranisotoper som är frekvensstabiliserade för drift över långa tidsperioder (0B001 g4)** är kärnan i anrikningsanläggningen. De lasrar som direkt används för att selektivt excitera och jonisera vissa nivåer i <sup>235</sup>U är olika dyelasrar eller färgämneslasrar i det synliga området. Eftersom färgämneslasern behöver pumpas behövs också en pumplaser med hög effekt, som måste vara pulsad. Lasrar eller lasersystem som är speciellt tillverkade eller iordningställda för separation av uranisotoper kontrolleras enligt ovan under 0B001g i EU-listan, vilket motsvarar NSG Part 1. Dessutom är specifika lasrar kontrollerade under NSG Part 2 och också i EU-listan. Det finns ett antal olika pumplasar som är under kontroll för AVLIS. Generellt för lasrar kan man konstatera att EU-listan och NSG Part 2 inte är lika. Ofta är de effekter som kontrolleras exempelvis lägre enligt EU-förordningen än i NSG-listan, eller beskrivs med andra parametrar.

---

<sup>22</sup> Ett ingöt är enligt natalencyklopedien en kanal i en gjutform för ingjutning av smält metall.

**Kopparångelasrar (6A005 a2a)** (*Copper Vapor Laser, CVL*) är den vanligaste typen av pumplaser. Lasrar under kontroll har effekt minst 20 W<sup>23</sup> och våglängd mellan 500 och 600 nm. CVL är alltid pulsade. Kopparångelasrar som används i AVLIS är ofta stora, upp till 5 m långa och 1 meter breda. Förutom elförsörjning krävs kylvatten och tillförsel av neongas. Lasrarna är ofta uppsatta i s.k. MOPA-kedjor (*Master Oscillator Power Amplifier*). Den första delen i kedjan, masteroscillatorn, genererar en svagare signal som sedan förstärks i ett antal förstärkarsteg. Det första steget i kedjan har endast en apertur medan förstärkarna har både en ingångs- och en utgångsapertur. Se figur 7. Det är nödvändigt att använda denna konfiguration eftersom det krävs känsliga precisionsinstrument som inte tål höga effekter i själva kaviteten för att producera en laserstråle med precisa spektrala egenskaper.



Figur 7. En s.k. MOPA-kedja med tre lasrar, en masteroscillator och två förstärkare. Tjockleken på pilarna symboliserar ökande ljuseffekt från förstärkarna.

Andra användningsområden för denna typ av laser är t.ex. för att skära och borra i hårda material och att bränna bort födelsemärken.

**Argonjonlasrar (6A205 a)**, en annan typ av pumplasar, är intressanta för AVLIS om de har våglängd mellan 400 och 515 nm och uteffekt om minst 40 W. Observera att de flesta argonlasrar är kontinuerliga och då inte är intressanta som pumplasar. Icke-nukleära användningsområden för argonjon- eller Ar-lasrar med hög effekt är t.ex. ljusshower.

**Q-switchade neodymdopade lasrar (6A005 c2b2a, 6A205 f)** användas för pumpning. För att neodym eller Nd-lasrar skall vara användbara för pumpning av färgämnen intressanta för AVLIS måste de kunna frekvensdubblas så att våglängden halveras. Lasrar under kontroll har våglängd 1000 -1100 nm och pulslängd större än 1 ns och uteffekt minst 30 W. När det gäller lasrar är EU-listan rörig, och lasrarna är uppdelade på flera olika nummer. En typ av Nd-dopad laser som inte är explicit nämnd är en där frekvensdubblingen är inbyggd i lasern så att den har en våglängd mellan 500 och 550 nm och en genomsnittlig uteffekt om 40 W, den kontrolleras implicit under **6A005 c2c2**. Nd-dopade lasrar har ett brett spektrum av användningsområden förutom som pumplasar.

Pumplasarerna pumpar s.k. dyelasrar eller färgämneslasrar. Även här krävs masteroscillatorer eller DMO – *Dye Master Oscillator*, och förstärkare. Utsignalen från DMO:n är en orange laserstråle med låg effekt som sedan förstärks. Även här kan man använda en s.k. MOPA-kedja. Utrustning under kontroll är:

<sup>23</sup> Gränsen för kontroll av lasereffekt enligt NSG Part 2 är 40 W, dvs. är dubbelt så hög som enligt EU-listan.

**Ställbara pulsade singlemode färgämneslaseroscillatorer (6A005 d2c)** med våglängder mellan 300 och 800 nm, uteffekt större än 1 W, repetitionsfrekvens större än 1 kHz och pulsvidd mindre än 100 ns. Det krävs en oscillator för varje våglängd i systemet. Pulsen från färgämnescellen blir typiskt några nanosekunder kortare än pumppulsen. Icke-nukleära användningsområden är främst för forskning.

**Förstärkare (6A205 c) för ställbara pulsade lasrar och oscillatorer** med våglängd mellan 300 och 800 nm, uteffekt större än 30 W, repetitionsfrekvens större än 1 kHz och pulsvidd mindre än 100 ns. Eftersom den effekt man kan få ut ur en singlemodeoscillator inte är tillräckligt hög för anrikningsändamål måste laserpulsen förstärkas. Därför leds signalen från färgämnescellen in i en kedja av förstärkare. För att åstadkomma olika våglängder behövs förstärkare och oscillatorer för varje enskild våglängd. Pulsningen av färgämneslasrarna måste vara tidssynkroniserad. Icke-nukleära användningsområden är främst för forskning inom atom- molekyl och halvledarfysik, men det finns också medicinska tillämpningar.

Färgämnet är i flytande form<sup>24</sup> och pumpas runt i systemet och det finns dessutom ett hål där ljuset från pumplaseren kommer in. Singlemodeoscillatorn har ganska låg effekt och flödes hastigheten och trycket hos färgämnet är låga<sup>25</sup>. Typiskt används plaströr eller -slang. För förstärkaren gäller att flödes hastigheten är högre än i singlemodeoscillatorn och man använder större färgämnesceller och pumpar som kan ge högre tryck<sup>26</sup>. Därutöver behövs filter, värmeväxlare, tankar för blandning av färgämneslösning och –förvaring och antagligen ett återvinningssystem för lösningsmedel. Det finns också ett påfyllningssystem för färgämne eftersom färgämnet försämras gradvis och behöver bytas ut.

Färgämnesoscillatorerna innehåller förutom själva färgämnescellen optiska komponenter såsom speglar, gitter, prismor och etalonger. Små stegmotorer och piezoelektriska omvandlare används för att positionera de optiska komponenterna. Ljuset från pumplaseren transporteras till färgämneslasern genom en optisk fiber alternativt med speglar. Förstärkaren är ofta större än masteroscillatorn, kanske  $0,6 \times 0,9$  m.

**Optiska speglar (6A005 2e)** och en mängd annan kringutrustning är nödvändig för att kunna sätta upp ett system. Dessutom behövs **masspektrometrar (3A233)** för att analysera isotopsammansättning i *feed*, produkt och avfallsströmmar.

Exempel på utrustning som inte är belagd med kontroll är stråltransportsystem, som består av optiska fibrer eller system av linser, speglar, kristaller och strålkorrigeringsutrustning. Dessutom behövs olika typer av övervakningsutrustning. Inom det optiska området behövs interferometrar, spektrometrar och spektrofotometrar. För termisk övervakning behövs pyrometrar och dessutom behövs system för att övervaka ångflöde och –täthet.

### 3.3 MLIS - Molecular Laser Isotope Separation

Principen för *Molecular Laser Isotope Separation* (MLIS) är liknande den för AVLIS, med den skillnaden att i MLIS är det molekyler och inte atomer som exciteras med hjälp av

---

<sup>24</sup> Färgämnet t.ex. rhodamin är ofta löst i alkohol.

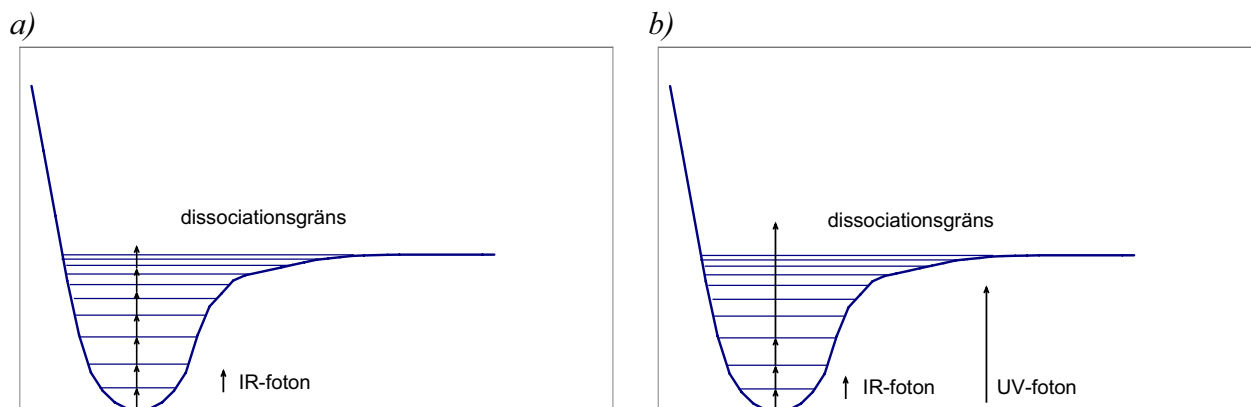
<sup>25</sup> Med lågt tryck avses  $p < 450$  kPa.

<sup>26</sup> Pumpar som kan ge tryck mellan 2,1 och 3,4 MPa.

laserljus. I MLIS efterföljs excitation av  $^{235}\text{UF}_6$ -molekyler av dissociation<sup>27</sup> av gasformig  $\text{UF}_6$  till  $\text{UF}_5$  i fast form.  $\text{UF}_5$  har högre smältpunkt än  $\text{UF}_6$  så det  $\text{UF}_5$  som bildas faller ut som ett fint pulver och kan filtreras från  $\text{UF}_6$ -gasen.

Om man väljer laserljuset så att  $^{235}\text{UF}_6$ -molekylen absorberar energi medan  $^{238}\text{UF}_6$  inte gör det kan man på så sätt erhålla en anrikning med avseende på  $^{235}\text{U}$  i processen. Energin från laserljuset exciterar den ena molekylen och en andra laser slår bort en fluoratom från molekylen så att den dissocierar och bildar  $\text{UF}_5$ . I MLIS krävs IR-ljus eller kombination av IR och UV för excitation och dissociation. Processen brukar kallas isotopsektiv multifotondissociation.

Normalt är energiskillnaden mellan olika vibrationstillstånd mycket mindre än skillnaderna för olika elektrontillstånd vilket medför att det krävs betydligt lägre energier för ändringar i vibrationstillstånd än vad som behövs för att ändra elektrontillstånd. Ett molekylspektrum innehåller mängder av rotations- och vibrationsövergångar som inte existerar för atomer. Det laserljus som krävs i MLIS är i det infraröda området jämfört med det synliga området som krävs för AVLIS.  $\text{UF}_6$  har sex större vibrationsövergångar, men det är bara  $\nu_3=0,078$  eV (16  $\mu\text{m}$ ) och  $\nu_4=0,023$  eV (54  $\mu\text{m}$ ) som kan absorbera ljus i det infraröda området. Vid 0,078 eV är skillnaden i absorptionslinjer störst mellan  $^{235}\text{UF}_6$  och  $^{238}\text{UF}_6$ : 81  $\mu\text{eV}$ . Detta motsvarar en precision i våglängd som är 1 på  $10^3$  eller 0,016  $\mu\text{m}$  vid 16  $\mu\text{m}$ . Det relativa isotopskiftet för  $\text{UF}_6$ -molekylen är alltså flera storleksordningar större än det relativa isotopskiftet för atomerna som utnyttjas i AVLIS. Kopplingen mellan ljuspulsernas längd och nivåernas livstider är mer komplicerad när det gäller MLIS än vad som är fallet för AVLIS, bland annat beroende på termiska effekter och excitationutbyte mellan isotoperna i gasen. Man kan dock konstatera att det räcker med en lägre pulsrepetitionsfrekvens för en effektiv process när det gäller MLIS än vad som är fallet för AVLIS.



Figur 8. Schematisk beskrivning av dissociation av  $\text{UF}_6$  till  $\text{UF}_5$  genom a) ett antal IR-fotoner som tillför tillräcklig energi för att nå dissociationsgränsen och b) ett antal IR-fotoner och en UV-foton som ger dissociation.

Termisk excitation i urangasen är ett ännu större problem i MLIS än i AVLIS. Vid normala temperaturer är kollisionerna mellan  $\text{UF}_6$  molekyler så våldsamma att i princip alla molekyler exciteras över grundtillståndet. Molekylerna får en mängd olika vibrationsenergies vilket gör det mycket svårt att selektivt välja en specifik vibrationsenergies för excitation. Vid

<sup>27</sup> Dissociation innebär att molekylen bryts sönder i mindre delar.



rumstemperatur överlappar därför våglängdsområdet för absorption för  $^{235}\text{UF}_6$ - och  $^{238}\text{UF}_6$ -molekylerna varför det vid rumstemperatur är svårt att hitta en specifik våglängd där bara en av isotoperna absorberar. Genom att kyla ned gasblandningen kan man dock erhålla absorptionspektra som inte överlappar mellan de två uranisotoperna, men då är  $\text{UF}_6$  normalt i fast fas. Lösningen på detta problem är att underkyla (eng. *supercool*)  $\text{UF}_6$ -gasen, dvs. att kyla till temperaturer där  $\text{UF}_6$  normalt skulle kondensera, men "lura" gasen att tro att den fortfarande är en gas. Detta kan man göra genom att späda  $\text{UF}_6$  med en inert bärargas såsom kväve eller argon och expandera gasen snabbt genom en dysa. Den expanderande gasen kyls snabbt och när gasmolekylerna kolliderar nedströms omvandlas vibrationsenergi i  $\text{UF}_6$  till translationsenergi hos gasen istället för till värme. Nästan 95 %<sup>28</sup> av molekylerna kan på detta sätt hållas i det lägsta vibrationsstillståndet och därför behövs bara en enda isotopsektiv laser för att excitera huvuddelen av  $^{235}\text{UF}_6$ .

Om laserbestrålningen sker vid rumstemperatur skulle även de  $^{238}\text{UF}_6$  som är termiskt exciterade kunna dissocieras, vilket skulle minska anrikningseffektiviteten.

Innan lasertekniken var så väl utvecklad som idag så forskades det inte bara på att konstruera lasrar med den önskvärda energin för MLIS utan också på att skapa en uranförening som skulle ha en vibrationsenergi som är enklare att möta med befintliga IR-lasrar.  $\text{UF}_6$  är dock en välkänd molekyl med kända egenskaper och mycket erfarenheter finns om hur denna förening skall hanteras och därför är det mest MLIS-system med  $\text{UF}_6$  beskrivna i litteraturen.

### 3.3.1 MLIS-processen

MLIS-processen innehåller följande delar:

- 1) Framställning av den gasblandning som krävs samt inmatning i systemet genom dysa.
- 2) Selektiv excitation av  $^{235}\text{UF}_6$  med IR-laser.
- 3) Dissociation av  $^{235}\text{UF}_6$  till  $^{235}\text{UF}_5$  med ytterligare en laser (IR eller UV).
- 4) Uppsamling av produkten  $\text{UF}_5$  som fast pulver.
- 5) Återfluorinering av  $\text{UF}_5$  till  $\text{UF}_6$  som sedan kan matas in i nästa steg.

$\text{UF}_6$  blandas först med bärargas (kvävgas eller argon) och eventuell reningsgas (eng. *scavenger gas*). Reningsgasen, som exempelvis kan vara vätgas eller metan, rener gasblandningen från oönskad fluorgas som bildas i processen när  $\text{UF}_6$  dissocierar till  $\text{UF}_5$  genom att reningsgasen reagerar med fluorgas och bildar exempelvis HF. Om fluorgas finns närvarande i gasblandningen kan den annars reagera med den  $\text{UF}_5$  som bildats och till viss del återigen bilda  $\text{UF}_6$  och på så sätt orsaka produktförlust och minskning av anrikningseffektiviteten.

Gasblandningen matas därefter in i systemet genom expansionsdysan varigenom gasen kyls. Laserexcitationen med efterföljande dissociation sker i slutet av dysan och det bildade  $\text{UF}_5$  samlas upp.

---

<sup>28</sup> Vid 77 K är 69 % av  $\text{UF}_6$  i den lägsta vibrationsnivån, vid 55 K är 85 % i den lägsta vibrationsnivån.

### 3.3.2 Utrustning för MLIS

#### Lasrar för MLIS

Den stora skillnaden i absorptionsprocess och aktuella energinivåer för MLIS jämfört med AVLIS gör att man måste använda sig av IR- eller kombination av IR-UV-lasrar. Dylasrar, som ger ljus i det synliga området, som används för AVLIS är således inte aktuella för MLIS.

Våglängden som krävs för den första excitationlasern i MLIS är 16  $\mu\text{m}$  vilket t.ex. kan åstadkommas genom att m.h.a. Ramanspridning<sup>29</sup> i väte skifta våglängden på ljuset från en koldioxidlaser från 10  $\mu\text{m}$  till 16  $\mu\text{m}$ . Andra alternativ är att pumpa en  $\text{CF}_4$ -laser med en koldioxidlaser eller att använda frielektronlasrar.

När  $^{235}\text{UF}_6$  molekylen har exciterats genom att ha absorberat ljuset med 16  $\mu\text{m}$  våglängd kan molekylen fortsätta absorbera energi för att sedan dissociera. För detta behövs ett antal IR-fotoner alternativt en enda UV-foton. Kraftfulla IR-lasrar som använder sig av CO eller  $\text{CO}_2$  och som kan tillhandahålla en mängd olika frekvenser finns på marknaden.

Några av de lasrar som har användning inom MLIS beskrivs nedan. Inom parentes anges referens till EU:s förordning 1334/2000 bilaga 1, som återfinns som Bilaga 1 i denna rapport. Alla lasrar som är särskilt tillverkade eller iordningställda för laseranrikning med MLIS kontrolleras i 0B001 h6.

**Alexandritlasrar (6A005 c1b)** med våglängdsområde 720-800 nm, bandbredd på 0,005 nm eller mindre, en repetitionsfrekvens större än 125 Hz och en genomsnittlig uteffekt större än 30 W är belagd med exportkontroll. Dessa lasrar kan producera laserpulser med en våglängd på  $\sim 0,8 \mu\text{m}$  med hög repetitionsfrekvens för användning i MLIS. Lasrarna har också medicinska användningsområden (borttagande av njursten, tatueringar), inom forskning samt i halvledarindustrin. Alexandritlasrar innehåller kromdopad  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$  (chrysoberyl) och producerar ljus i våglängdsområdet 701-826 nm. Våglängder upp till 2400 nm kan erhållas genom Ramanskiftning.

**Pulsad koldioxidlaser (6A205 d)** med våglängdsområde 9000-11000 nm, en repetitionsfrekvens större än 250 Hz, en genomsnittlig uteffekt större än 500 W och en pulsbredd mindre än 200 ns. Dessa lasrar kan producera högenergetiska infraröda ljuspulser med en våglängd på 10,6  $\mu\text{m}$  vid hög repetitions hastighet för MLIS. Vissa industrilasrar för skärning och svetsning är koldioxidlasrar med mycket hög effekt (1kW till 5 kW), men de är dock antingen kontinuerliga eller är pulserade med pulser över 200 ns. Koldioxidlasrar kan producera pulser från ns till ms. En speciell typ av pulsad  $\text{CO}_2$ -laser är TEA-lasern (eng. *Transverse Excitation at Atmospheric pressure*). TEA-lasern är pulsad (nanosekunder till mikrosekunder) och kan ge korta pulser med hög effekt per volymenhet gas.

**Pulsad excimerlaser (6A005 a1c)** ( $\text{XeF}$ ,  $\text{XeCl}$ ,  $\text{KrF}$ ) med våglängdsområde 240-360 nm, en repetitionsfrekvens större än 250 Hz och en genomsnittlig uteffekt större än 500 W. En pulsad excimerlaser är en källa till ultraviolett laserljus som används för att selektivt dissociera

---

<sup>29</sup> Effekten som utnyttjas är s.k. resonant Ramanspridning. Den uppstår då ett material belyses med fokuserat laserljus med hög effekt vilket ger upphov till att ljus med våglängden skiftad i förhållande till det infallande ljuset emitteras. Våglängdsskiftet motsvarar energinivåer i den molekyl som belyses.

exciterade  $^{235}\text{UF}_6$  molekyler. Dessa lasrar (framförallt XeCl, 308 nm) användes i tidiga versioner av MLIS. Andra användningsområden är för industriell skärning eller i laserkemi. Lasrar för medicinska tillämpningar har betydligt lägre effekter (10-25 W).

**Para-väte Ramanskiftare (6A205 e)** som kan arbeta vid 16  $\mu\text{m}$  våglängd och med en repetitionsfrekvens större än 250 Hz. Denna skiftare omvandlar laserljus från en koldioxidlaser med våglängd på 10,6  $\mu\text{m}$  till 16  $\mu\text{m}$  som används för att selektivt excitera – och i vissa fall dissociera –  $^{235}\text{UF}_6$  molekyler. Det finns industriella tillämpningar inom Ramanspektroskopi och laserforskning.

**Frielektronlaser (FEL)** är främst en forskningslaser, men finns idag även tillgänglig kommersiellt. Dessa lasrar kan dock ge höga effekter och arbetar inom ett stort våglängdsområde – från UV till IR – vilket gör att de kan vara användbara i laserbaserade anrikningsprocesser. Dessa lasrar är dock inte belagda med exportkontroll.

**CF<sub>4</sub>-laser och NH<sub>3</sub>-laser (6A005 a7c, 6A005 a7d)** kan också vara användbara i MLIS. Det önskade IR-ljuset fås då genom att med en koldioxidlaser optiskt pumpa IR-fluorescerande molekyler såsom NH<sub>3</sub> eller CF<sub>4</sub>. En CF<sub>4</sub>-laser kan ge våglängden 16,26  $\mu\text{m}$  och NH<sub>3</sub>-lasern har våglängdsområdet 10,5-14,5  $\mu\text{m}$ . Dessa lasrar är dock inte belagda med exportkontroll enligt NSG, men i EU-förordningen finns vissa gaslasrar under kontroll som skulle kunna innefatta även dessa lasrar.

## Övrig utrustning för MLIS

Den utrustning i en MLIS-anläggning som kommer i kontakt med UF<sub>6</sub> måste vara tillverkad i eller belagd med material som är korrosionsbeständiga mot UF<sub>6</sub>. Exempel på sådana material är koppar, rostfritt stål, aluminium, aluminiumlegeringar, nickel eller legeringar innehållande 60 % nickel eller mer samt teflon som är beständigt mot UF<sub>6</sub>. Exempel på kommersiella legeringar som innehåller mer än 60 % nickel är Inconel<sup>30</sup>, Monel<sup>31</sup> och Hastelloy<sup>32</sup>. Nedan beskrivs den utrustning som behövs i en MLIS-process.

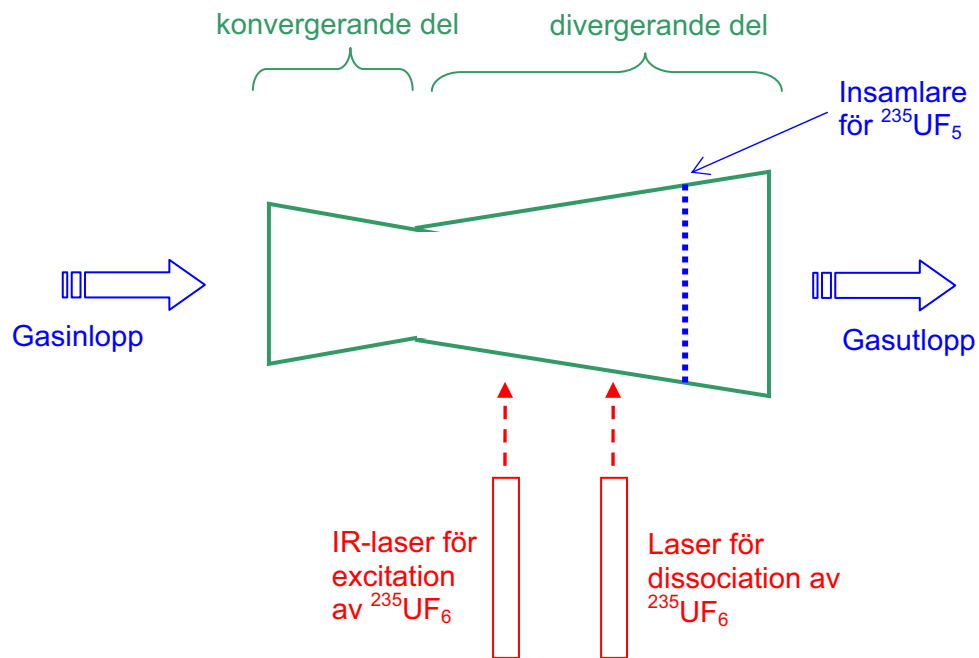
**Expansionsmunstycken (0B001 h1)**, dysor som kan ge gashastigheter som överskrider ljudhastigheten, s.k. De Laval-dysor (eng. *supersonic expansion nozzles*), används för att kyla blandningar av UF<sub>6</sub> och bärargas till temperaturer på -123°C eller lägre. Dysan måste vara tillverkad i, eller belagd med, material som är korrosionsbeständiga mot UF<sub>6</sub> såsom t.ex. koppar. Dysan består av en konvergerande del följt av en divergerande del så att gasen först möter ett minskande tvärsnittsyta och därefter en ökande på sin väg igenom dysan vilket resulterar i snabb expansion – och kylning – av gasen. Laserbestrålningen sker i den divergerande delen. Dysan är försedd med fönster för laserljuset som är tillverkade av ZnSe eller RbCl för att tillåta transmission av laserljus med våglängden 16  $\mu\text{m}$ .

---

<sup>30</sup> Inconel är en kommersiell benämning på en korrosionsbeständig och värmetålig legering med nickel och krom. Inconel-625 innehåller 60 % nickel och 22 % krom.

<sup>31</sup> Monel är en kommersiell benämning på en korrosionsbeständig legering med nickel (65-70 %) och koppar (20-29 %). Legeringen innehåller också järn och mangan (5 %).

<sup>32</sup> Hastelloy är en kommersiell benämning på en korrosionsbeständig och värmetålig legering med nickel, krom och molybden.



Figur 9. Principskiss av ett MLIS-steg med expansionsmunstycket där gasen flödar igenom och komprimeras respektive expanderas (kyls).

**Uppsamlare (0B001 h2)** för  $UF_5$  i form av filter och/eller cykloner<sup>33</sup> som är korrosionsbeständiga mot  $UF_6$  t.ex. nickel eller nickellegeringar med mer än 60 % nickel. En typ av filter liknar ”shell & tube”-värmväxlare där sintrade rörfilter är placerade i en cylinder. Gasen får flöda genom cylindrarna och de anrikade  $UF_5$ -partiklarna fastnar i filtret. När filtret är mättat på  $UF_5$  kopplas cylindern bort och fluorgas eller koltrifluorid tillsätts för att konvertera  $UF_5$  till  $UF_6$  igen som då blir gasformig och kan föras vidare till nästa MLIS-steg. För varje steg behövs således 2-3 filter som växlingsvis kan användas i processen, vara stand-by samt regenereras.

I de steg där lägre anrikningsgrader hanteras kan filtren vara relativt stora (6 m långa, 4 m diameter). Ju högre anrikningsgrader desto mindre filter används pga. kritikalitetsrisken. De sintrade filtterrören kan vara tillverkade av sintrad nickel eller sintrad aluminiumoxid. Insamlaren kan dessutom vara utrustad med instrument för att mäta när filtret är mättat (genom att mäta tryckfallet över filtret) samt utrustning för att mäta temperaturen under fluorineringen.

**Kompressor (0B001 h3)**, för blandningar av bärargas och  $UF_6$ . De delar som kommer i kontakt med gasen skall vara tillverkade av, eller belagda med, material som är korrosionsbeständiga mot  $UF_6$  såsom nickel eller nickellegeringar med mer än 60 % nickel. Kompressorsystemet måste klara av att leverera tillräckligt högt gasflöde med tillräckligt tryck för att kunna pressa  $UF_6$  och bärargas genom dysan och erhålla överljudshastighet på gasen och tillräckligt låg gastemperatur i fotolyszonen<sup>34</sup>. I de steg

<sup>33</sup> En cyklon används för att separera fasta partiklar från gas eller vätska med hjälp av centrifugalkraften. I en cyklon leds materialet tangentiellt in i ett cylindriskt kärl – cyklonen. De fasta partiklarna slungas mot väggarna och tas ut i botten, medan gasströmmen tas ut i toppen.

<sup>34</sup> Fotolyszonen är området där gasen bestrålas med laserljus.

som kräver låga flöden används ofta centrifugalkompressorer. I steg med högre flöden kan axialflödeskompressorer, liknande de som används i gasdiffusionsanläggningar, användas.

Det krävs att kompressorsystemet kan ge ett tryckförhållande<sup>35</sup> runt 10 vilket gör att det kan krävas flera kompressorer i serie i ett MLIS-system. Det kan också krävas viss gaskylning med värmeväxlare mellan varje kompressor i systemet. De typer av kompressorer som är aktuella för MLIS är den typ som används inom kemisk industri. Kompressorhjulena måste klara stora påfrestningar pga. den höga rotationen och är därför ofta tillverkade av höghållfast aluminium.

**Axeltätningar (0B001 h3)**, (eng. *rotary shaft seals*) för kompressorer som används för MLIS liknar dem som behövs i gasdiffusion. Axeltätningar behövs för att förhindra att UF<sub>6</sub> läcker ut ur kompressorn – eller att luft tränger in i gasblandningen. Tätningarna måste vara tillverkade i material som är korrosionsbeständiga mot UF<sub>6</sub>.

**Återfluorineringsystem (0B001 h4)**, för att fluorinera fast anrikad UF<sub>5</sub> från ett steg innan gasen införs i nästa steg för fortsatt anrikning. Fluorineringen kan antingen ske i de uppsamlare som beskrivs ovan eller genom att UF<sub>5</sub> överförs till en separat kemisk reaktor (t.ex. flamreaktor eller fluidiserad bäddreaktor) för fluorinering. Utrustning som krävs för den senare processen är identisk med den som används i en konverteringsanläggning för att konvertera UF<sub>4</sub> till UF<sub>6</sub>. För återfluorineringen av UF<sub>5</sub> behövs, förutom reaktionskärlet (uppsamlaren eller separat reaktor) även annan industriell kemisk utrustning såsom kylfällor, cirkulationspumpar för gas och fluorineringsmedel samt temperatur- och tryckinstrumentering. Transportsystem för pulver krävs därutöver om återfluorineringen sker i separat reaktor. Utrustning som kommer i kontakt med UF<sub>6</sub> behöver vara tillverkad, eller belagd, med material som är korrosionsbeständigt mot UF<sub>6</sub> t.ex. nickel eller nickellegeringar med över 60 % nickel.

**ICPMS (0B002 g)**, (eng. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer*<sup>36</sup>) behövs för att kunna mäta anrikningsgraden on-line i en anrikningsanläggning. Masspektrometerns jonkälla måste därför vara tillverkad i eller belagd med korrosionsbeständigt material.

**In- och utmatningssystem för UF<sub>6</sub> (0B002 a-d)**, som behövs i ett MLIS-system är liknande de som behövs i en gascentrifuganläggning eller i en gasdiffusionsanläggning. UF<sub>6</sub>, som är en fast förening vid rumstemperatur, förångas i speciella behållare i autoklaver. Gasen blandas därefter med bärargas (kvävgas eller argon) i rätta proportioner och leds därefter in i MLIS-processen. Den utrustning som kommer i kontakt med UF<sub>6</sub> måste vara korrosionsbeständiga mot UF<sub>6</sub>. Den utrustning som hanterar bärargasen (behållare, rör, pumpar etc) behöver dock inte vara specialdesignad utan normal industriell utrustning kan användas till dessa gaser.

**Gasseparationssystem (0B001 h5)** behövs för att separera UF<sub>6</sub> från bärargas, och andra lätta gaser som bildats i processen. UF<sub>6</sub> kan därefter återföras till anrikningsprocessen. Dessa separationssystem kan innehålla kylfällor som arbetar vid temperaturer under -20°C för att desublimera UF<sub>6</sub>. Ett annat sätt är att använda sig av kryogena värmeväxlare,

---

<sup>35</sup> Tryckförhållandet är trycket vid utloppet dividerat med trycket i inloppet.

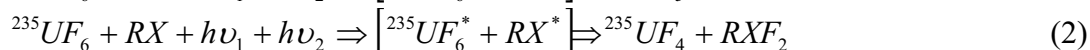
<sup>36</sup> *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer* (ICPMS) är en masspektrometer med hög känslighet som kan analysera en mängd olika metaller och icke-metaller ner till mycket låga halter. ICP (*Inductively Coupled Plasma*) är en metod att framställa joner av de ämnen som skall analyseras och detekteras i masspektrometern.

kryogena kylenheter eller kryogena separatorer som kan arbeta vid temperaturer under -120°C.

### 3.4 CRISLA – Chemical Reaction by Isotope Selective Laser Activation

*Chemical Reaction by Isotope Selective Laser Activation* (CRISLA) är en anrikningsprocess, på forskningsstadiet, som utnyttjar att exciterade  $^{235}\text{UF}_6$  molekyler reagerar kemiskt med en reaktionsgas och bildar en förening som är anrikad med avseende på  $^{235}\text{U}$ . Reaktionshastigheten för laseraktiverad  $^{235}\text{UF}_6$  är betydligt högre än reaktionshastigheten för icke aktiverad  $^{238}\text{UF}_6$ . CRISLA har i laboratorieförsök också använts för att separera deuterium från väte.

En gasblandning innehållande ca 1 %  $\text{UF}_6$  och reaktionsgas (RX) bestrålas med kontinuerligt infrarött laserljus ( $\lambda_1=5,33 \mu\text{m}$ ) som selektivt exciterar  $^{235}\text{UF}_6$ . På grund av isotopskiftet är absorptionssannolikheten, beroende på temperaturen, 2 till 5 gånger större för  $^{235}\text{UF}_6$  än för  $^{238}\text{UF}_6$  vid den aktuella våglängden. För reaktion (1) nedan lagras energin som en excitation i bindningen F- $\text{UF}_5$  vilket gör den exciterade molekylen mer reaktionsbenägen. Den exciterade molekylen reagerar med reaktionsgasen, som också aktiverats av laserljus ( $\lambda_2$ ). Produkten är i fast form, till skillnad från  $\text{UF}_6$ , och kan relativt enkelt separeras från gasblandningen. Den erhållna anrikade produkten konverteras till  $\text{UF}_6$  som sedan kan införas i nästa CRISLA-steg.



Som reaktionsgas (RX) kan användas exempelvis HCl, HBr,  $\text{CH}_4$  eller  $\text{SiH}_4$  för reaktion (1), i olika kombinationer. För reaktion (2) kan RX vara exempelvis  $\text{BrF}_3$ ,  $\text{ClF}_3$ ,  $\text{SF}_4$  eller  $\text{N}_2\text{F}_2$  [14]. I de båda reaktionsformlerna ovan betecknar  $h\nu_1$  och  $h\nu_2$  de olika laserfrekvenserna, se också avsnitt 3.1.

#### 3.4.1 Utrustning

I CRISLA används justerbara lasrar som ger kontinuerligt ljus i det infraröda eller ultravioletta<sup>37</sup> området t.ex. kolmonoxidlasrar ( $5,3 \mu\text{m}$ ) eller koldioxidlasrar ( $9 \mu\text{m}$ ). Koldioxidlasern är belagd med exportkontroll enligt NSG och i EU-förordningen (6A205 d). Kolmonoxidlasern är dock inte belagd med exportkontroll enligt NSG, men i EU-förordningen finns kolmonoxidlasrar medtagna för andra ändamål som också skulle kunna innefatta de lasrar som är användbara för CRISLA (6A005 a3). För övrigt är det liknande utrustning som för MLIS som används (se avsnitt ovan) såsom dysor, insamlare, kompressorer etc.

I MLIS behöver fönster för laserljus vara tillverkade av ZnSe or RbCl för att tillåta transmission av laserljus med våglängden  $16 \mu\text{m}$ . I CRISLA kan man använda sig av

<sup>37</sup> Bestrålning med UV-ljus får dock inte resultera i att molekylen joniseras eller dissocieras.

betydligt billigare fönstermaterial såsom  $\text{CaF}_2$  och  $\text{KCl}$  för att släppa igenom laserljus med våglängd på 5,3  $\mu\text{m}$  eller 9  $\mu\text{m}$ .

För att identifiera de gasformiga produkterna eller andra lättflyktiga föreningar kan man använda sig av diodlaserspektroskopi, FTIR<sup>38</sup> i ångfas och masspektrometri. För laserdiagnostiken behövs våglängdsmeter och en skannande Fabry-Perot interferometer för att mäta stabiliteten hos laserlinjerna. Gasfyllningssystem och vakuumteknologi är också nödvändig utrustning i systemet.

### 3.5 SILEX - Separation of Isotopes by Laser Excitation

*Separation of Isotopes by Laser Excitation*, SILEX, är en laserbaserad anrikningsmetod som utvecklades av ett australiensiskt företag sedan 1988. Metoden avses användas för både urananrikning och för separation av stabila isotoper såsom exempelvis kisel, kol, syre och zirkonium. SILEX beräknas ha låg energiförbrukning och beskrivs vara uppbyggd i relativt enkla moduler. SILEX för användning för urananrikning är fortfarande i utvecklingsstadiet. General Electric Company och Silex Systems Limited håller på att bygga en testanläggning för SILEX-processen i Wilmington, North Carolina, som skall tas i bruk under slutet av 2007<sup>39</sup>. Om företagen vill fortsätta satsa på utveckling av processen kommer en första kaskad att kunna tas i bruk under 2008 eller 2009.

SILEX sekretessbelades i juni 2001 och det finns därför sparsamt med information om metoden öppet publicerad. Varken principen, vilka lasrar som används eller annan nödvändig utrustning som krävs är känd. Uppgifter gör dock gällande att  $\text{UF}_6$  används som utgångsmaterial och även är den kemiska formen hos slutprodukten vid urananrikning med SILEX<sup>40</sup>.

---

<sup>38</sup> FTIR är beteckningen för *analysmetoden Fourier Transform Infra Red spectroscopy*.

<sup>39</sup> Nuclear Fuel, vol. 31, Nr. 21, 9 October, 2006.

<sup>40</sup> <http://www.uic.com.au/nip33.htm>

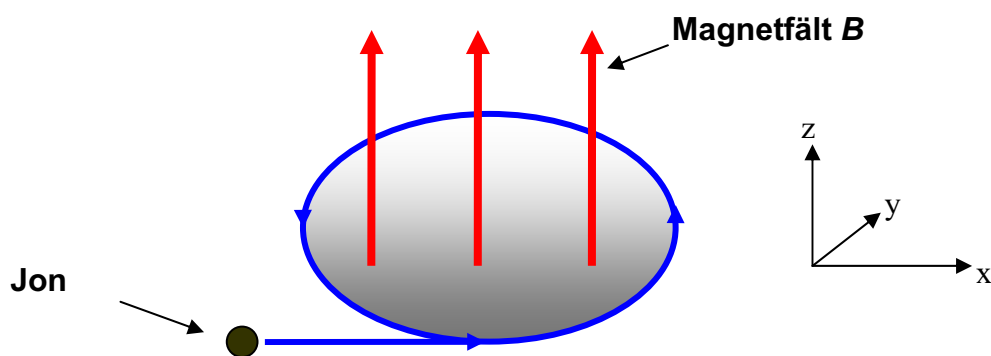
## 4 Anrikning genom plasmaseparation

I detta kapitel beskrivs bakgrunden för plasmabaserade anrikningsprocesser. Den litteratur som använts är främst [1], [9] och [15].

I anrikning genom plasmaseparation, PSP, används isotopernas masskillnad direkt. Detta till skillnad mot den tidigare diskuterade laseranrikningen, där isotopeffekten endast verkar indirekt, genom kärnans påverkan på elektronernas bindningsenergi. I PSP används ett plasma av olika isotoper, vilka på grund av masskillnaden påverkas olika av yttre magnetiska och elektriska fält som får penetrera plasmat.

I processen används ett plasma som består av de joniserade uranisotoper vilka man vill åtskilja och således anrika. Detta plasma får samtidigt växelverka med ett statiskt, homogent magnetfält  $B$  och ett elektriskt fält som varierar med tiden,  $E = E(t)$ . För vissa värden på  $B$  och  $E$  kommer olika isotoper, beroende på deras olika massor, att få väsentligt annorlunda rörelsemönster då det kombinerade elektriska och magnetiska fältet verkar på partiklarna. De olika rörelserna medför att olika isotoper separeras i rummet, varför det – åtminstone i princip – blir möjligt att därefter uppsamla endast den önskade isotopen. På sätt och vis kan anrikning med PSP-metoden karakteriseras som en modifiering av den mer traditionella elektromagnetiska separationen (den så kallade EMIS-processen).

Utgångspunkten för PSP-metoden är rörelsemönstret för en laddad partikel, till exempel en uranjon, i ett statiskt och homogent magnetfält  $B$ . Till att börja med är det viktigt att notera att jonens rörelse endast påverkas i det plan som är vinkelrätt mot själva magnetfältet. En eventuell rörelse parallellt med magnetfältet förblir helt opåverkad. Om vi för enkelhets skull först antar att jonen inte har någon sådan parallell rörelse, utan att den laddade partikeln kommer in med en konstant hastighet vinkelrätt mot ett magnetfält, så påverkar magnetfältet partikeln på ett sådant sätt att jonen beskriver en cirkulär bana enligt figuren nedan.



Figur 10. En laddad partikels cirkulära rörelse i ett magnetfält.

Jonens periodicitet, det vill säga den frekvens med vilken den laddade partikeln fullbordar ett varv och återkommer till samma position, ges av

$$\omega = eB / m,$$



där  $m$  betecknar partikelns massa och  $e$  elementarladdningen. Vinkelhastigheten  $\omega$  benämns i dessa sammanhang cyklotronfrekvensen, och är alltså olika för olika massor vid ett givet magnetfält. Om jonen dessutom har en hastighet parallellt med magnetfältslinjerna kommer, som nämntes tidigare, rörelsen i denna riktning att förbli oförändrad. Jonens sammanlagda partikelbana är då att likna vid en korkskruvsrörelse.

Det ovan beskrivna situationen utgör principen för anrikning med EMIS-processen. Det som är speciellt med PSP, och är fördelen gentemot EMIS, är att det till detta system nu dessutom läggs på ett elektriskt fält  $\vec{E}(t)$  som beror på tiden  $t$  på ett sådant sätt att både det elektriska fältets styrka och riktning oscillerar med tiden. Det är också viktigt att det elektriska fältet ligger i partikelns rörelseplan, till exempel längs x-axeln i figur 10 ovan. Matematiskt kan det elektriska fältets utseende skrivas på formen,

$$\vec{E}(t) = E_0 \hat{x} \cos(\omega_r t).$$

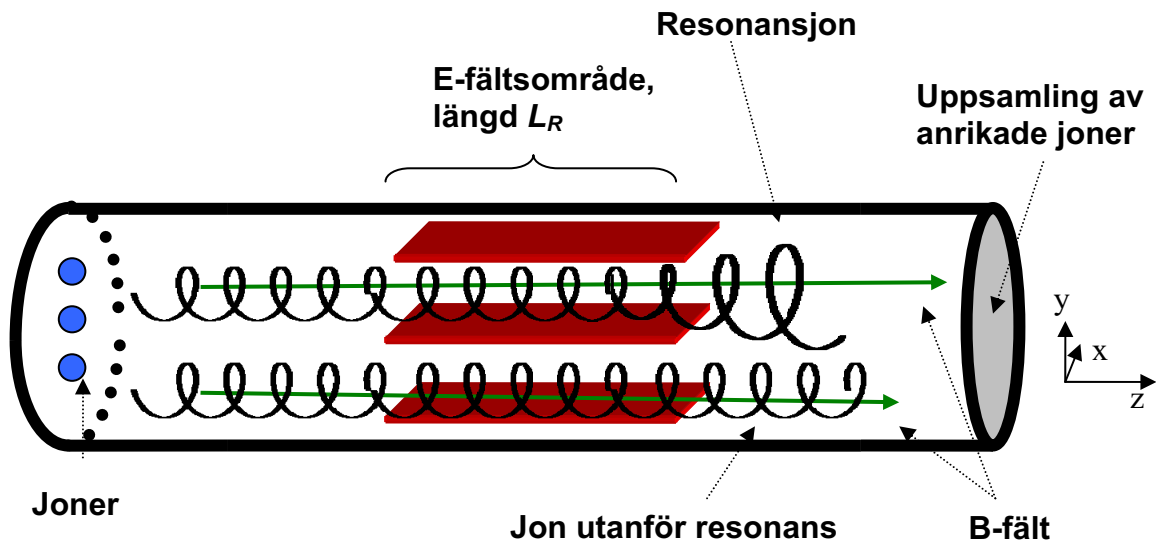
Hur snabbt det elektriska fältets styrka och riktning oscillerar karakteriseras av den så kallade vinkelfrekvensen  $\omega_r$ , och fältets maximala styrka har här getts magnituden  $E_0$ . För sådana värden då det elektriska fältets frekvens inte överensstämmer med den tidigare beskrivna cyklotronfrekvensen, medför det elektriska fältet endast en ytterligare, överlagrad cirkulär rörelse hos jonen ifråga. Då de båda frekvenserna är lika,  $\omega_r = \omega$ , uppstår dock ett resonansfenomen. Det elektriska fältets riktning och styrka överensstämmer då med partikelns rörelse i planet på så sätt att jonen två gånger per varv accelereras av det elektriska fältet. Det betyder att magnetfältet håller kvar jonen i en cirkulär rörelse, samtidigt som det elektriska fältet – som ju ligger i jonens rörelseplan – ökar radien på jonens omlopps bana. Kombinationen av dessa två effekter leder till att jonens radie i xy-planet (enligt figur 10) växer med tiden  $t$ , enligt sambandet nedan,

$$r \propto E_0 t / B.$$

Precis som för fallet med bara det konstanta magnetfältet kan även jonen i detta fall ha en hastighet i z-riktningen (enligt figur 10). Den hastigheten kommer fortfarande att vara opåverkad, även med det elektriska fältet, eftersom  $\vec{E}(t)$  inte har någon komponent i z-riktningen. Jonen kommer då att röra sig i en korkskruvsbana där storleken på skruvarna ökar ju längre tiden går, eller ekvivalent ju längre partikeln kommit i z-led.

Villkoret för resonans är alltså att det elektriska fältets frekvens överensstämmer med cyklotronfrekvensen, vilken i sin tur beror på magnetfältet och partikelns massa. Genom att finjustera både magnetfältet och det elektriska fältet kan därmed resonansvillkoret uppnås för endast en isotopmassa. Då resonansisotopens radiella rörelse konstant ökar med tiden, med de övriga isotoperna kvarhålls inom en begränsad rörelsebana, kan i princip de olika isotoperna skiljas åt otvetydigt och därmed kan en anrikning av den önskade isotopen ske.

Figur 11 visar den principiella funktionen för PSP. Cylinderformen utgör konturen av en så kallad solenoidmagnet, som skapar ett magnetfält riktat längs z-axeln. Partiklarna joniseras längst ut till vänster i figuren och rör sig sedan med konstant hastighet längs z-axeln, utan att påverkas av några krafter i denna riktning. I det vinkelräta planet (xy-planet) påverkas dock partiklarna av både magnetfältet och, under en längd  $L_R$ , också av ett elektriskt fält. Uppsamling sker efter passagen genom det elektriska fältet, längst till höger i figuren.



Figur 11. Principiell funktion för anrikning enligt plasmaseparationsprocessen (PSP).

I praktiken är det elektriska fältets nödvändiga frekvens och styrka enklare att uppnå än magnetfältets homogenitet. Låt oss anta att det elektriska fältets frekvens är givet. För att uppfylla resonansvillkoret bör vi då alltså ha följande relation,

$$B = m\omega_r / e,$$

där  $m$  är atommassan hos den isotop som ska anrikas. Från ekvationen ovan följer att den osäkerhet som kan tolereras i magnetfältets homogenitet är avhängig den relativa masskillnaden mellan den önskade och närmast i massa liggande isotopen. För att endast en isotop ska komma i resonans får den avvikelser högst vara av storleksordningen

$$\Delta B / B \leq \Delta m / m \approx 1,3 \cdot 10^{-2} = 1,3 \%,$$

där den angivna procentnoggrannheten gäller för urananrikning. Vid större osäkerhet än så kommer både  $^{235}\text{U}$  och  $^{238}\text{U}$  att åtminstone delvis befinna sig i resonans samtidigt, vilket omöjliggör en isotopseparation. I detta sammanhang är det värt att notera att kravet på magnetfältets homogenitet generellt minskar för grundämnen med lägre atomnummer: för att exempelvis separera de två kolisotoperna  $^{12}\text{C}$  och  $^{14}\text{C}$  krävs bara  $\Delta B / B \approx 1,7 \cdot 10^{-1} = 17 \%$ .

Längden  $L_R$  på resonansområdet bestäms av att den önskade isotopen ska vara i resonans tillräckligt länge för att en rumslig separation av isotoperna ska bli praktiskt möjlig. På grund av svårigheten med att skapa och bibehålla ett homogent magnetfält är osäkerheten i magnetfältet vid anrikning av uran rimligen i samma storleksordning som den maximalt tillåtna,  $\Delta m / m \approx 1,3 \%$ . I så fall kommer resonanspartikeln, i detta fall  $^{235}\text{U}$ , att behöva fullborda ett visst antal korkskrusvarv, eller perioder, innan separationen har blivit tydlig. Antalet perioder som  $^{235}\text{U}$ -jonen behöver fullborda kan uppskattas till i storleksordningen  $m / \Delta m \approx 80$  perioder för att klart kunna avskiljas från  $^{238}\text{U}$ . Eftersom en sådan period bestäms

av cyklotronfrekvensen tar ett varv tiden  $t = 2\pi / \omega = 2\pi / \omega_r$  att fullborda, och den nödvändiga totala tiden jonerna behöver spendera i resonansområdet blir därför  $t_{tot} = 80 \cdot t$ . De laddade partiklarnas hastighet i utrustningens längdled bör därför inte vara större än

$$v_{\max} = L_R / t_{tot} = \omega_r L_R / (80 \cdot 2\pi) = eBL_R / (m \cdot 160\pi).$$

För ett magnetfält med en typisk styrka  $B = 2$  Tesla och en resonanslängd  $L_R = 1$  meter fås för uran den maximala hastigheten  $v_{\max} \approx 1,6 \cdot 10^3$  m/s, vilket för en given partikeltäthet ger en övre begränsning i det flöde som kan uppnås.

En annan begränsande faktor är den högsta möjliga densiteten av positivt laddade joner, eftersom alltför höga jondensiteter kommer att medföra en ömsesidig påverkan genom den repellerande elektriska Coulombkraften, vilket i sin tur medför att jonerna kommer ur resonans *vis-a-vis* det elektriska fältets frekvens. Villkoret för att dessa Coulombkollisioner inte ska bidra till att förstöra resonansfenomenet kan uttryckas som att den sträcka en jon tillryggalägger mellan två sådana kollisioner, ett avstånd som brukar benämnas den fria medelväglängden  $l_{MFP}$ , ska vara åtminstone lika stor som hela den nödvändiga resonanslängden. Det betyder i sin tur för den maximalt möjliga jondensiteten att

$$l_{MFP} = 1/(n\sigma) \Leftrightarrow n = 1/(l_{MFP}\sigma) = 1/(L_R\sigma).$$

Det typiska kollisionstvårsnittet för enkelladdade joner i det aktuella temperaturområdet är av storleksordningen  $\sigma \approx 10^{-14}$  cm<sup>2</sup>, vilket med  $L_R = 1$  meter ger en begränsning i jondensiteten på  $n \leq 10^{12}$  cm<sup>-3</sup> [15]. Jonernas densitetsbegränsning, och den maximala längsgående hastigheten, ger därför en övre gräns på det totala flödet  $\phi$  av samtliga isotoper av uranjoner,

$$\phi = nv \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ joner}/(\text{cm}^2\text{s}).$$

Den totala mängd <sup>235</sup>U som kan anrikas genom plasmaseparation under en given tidsperiod beror på både flödet, separationsfaktorn och utrustningens storlek. I vårt exempel ovan har vi antagit en fullständig isotopseparation under längden  $L_R$ . Om vi antar att plasmastrålen – det vill säga jonflödet – har en diameter  $D = 50$  cm, fås en total ström av joner motsvarande strömstyrkan  $I \approx 60$  Ampere. Vid kontinuerlig drift en tid  $\tau$ , motsvarandes ett års full drifttid, fås den totala mängden transporterade jonpartiklar till,

$$N = \tau \cdot \phi \cdot (\pi D^2 / 4) \approx 5 \cdot 10^3 \text{ kg uran.}$$

Eftersom ursprungshalten av isotopen <sup>235</sup>U är 0,72 % fås därmed ca 36 kg ren <sup>235</sup>U årligen, vilket motsvarar ungefär 0,6 ton låganrikat bränsle. Diskussionen bör dock snarare ses som av kvalitativ än kvantitativ natur, eftersom de olika storheternas antagna värden naturligtvis kan variera väsentligt.

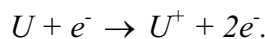
## 4.1 PSP-processen

De olika delmoment som ingår i en plasmaseparationsprocess är:

- 1) Produktion av uranånga.
- 2) Jonisering av uranatomerna.
- 3) Isotopseparation genom selektiv inverkan från de elektriska och magnetiska fälten.
- 4) Insamling av det anrikade uranet.

De första, inledande delmomenten som krävs när denna anrikningsmetod ska användas är produktion av ett flöde av uranjoner. För detta ändamål produceras först en ånga av uranatomer, vanligtvis med en metod kallad sputtring. I denna metod används speciella joner som projektiler, typiskt joniserade ädelgasatomer, som genom kollisioner med en yta av uranmetall bokstavligen slår ut uranatomerna ur metallen. Metoden med en elektronkanon, som diskuterades i avsnittet om AVLIS-processen, är användbar även för PSP-processen.

De frigjorda uranatomerna har nu en hastighet i längdriktningen av magnetcyklindern (solenoiden). Jonisering av dessa förångade, eller vaporiserade, uranatomer sker sedan med hjälp av elektroner i ångan, som upphettas av yttre pålagda mikrovågor och därefter kan åstadkomma en jonisering genom inelastiska elektron-atomkollisioner:



Efter att ett plasma av uranjoner producerats kan det upphettas ytterligare av mikrovågsstrålningen innan plasmat hinner förflytta sig in i området där det påverkas av det magnetiska och elektriska fältet. Givet den önskade isotopens massa måste det elektriska och magnetiska fältet anpassas så att resonansvillkoret uppfylls. Samtidigt bör magnetfältets styrka vara tillräckligt hög för att inte den radie partiklarna beskriver ska bli alltför stor. Problemet här är inte så mycket utrymmesskäl som att ju större volymen blir, desto svårare blir det att erhålla ett homogent magnetfält. Det kombinerade kravet på hög fältstyrka och mycket god homogenitet över en relativt stor volym kan endast erhållas med en supraledande solenoid, som har kapacitet att alstra ett magnetfält i storleksordningen ett fåtal Tesla över en cylinderdiameter om åtminstone 1 meter. Det bör poängteras att en sådan magnetisk fältstyrka, över ett så stort avstånd, utgör en mycket kraftfull och högteknologiskt sofistikerad magnet.

När det gäller det elektriska fältet som appliceras, måste det penetrera hela plasmats tjocklek, utan att till exempel de ytterst liggande plasmajonerna skärmar av det elektriska fältet för jonerna innanför. Eftersom den här typen av skärmningseffekter är en generell tendens i alla plasma, medför penetrationskravet att det elektriska fältet måste induceras med indirekta metoder, som via olika antennformationer.

Uppsamlingsystemet av den anrikade isotopen använder kollektorplattor som är separerade med ett avstånd som är större än korkskruvsradien för  $^{238}\text{U}$ , men samtidigt mindre än motsvarande för  $^{235}\text{U}$ , som ju är (eller har varit) i resonans. Kollektorplattorna fungerar således som ett slags filter, där den önskade isotopen kolliderar mot – och fastnar på – kollektorplattorna.

Den energi som åtgår vid anrikning genom plasmaseparation beräknas till uppskattningsvis några få hundra kWh/SWU (se också tabell 2), även om denna siffra måste betecknas som

högst osäker. Anrikningsfaktorn uppskattas vara mellan 3,5 till 10 och således ungefär lika effektiv som de laserbaserade anrikningsmetoderna.

## 4.2 Utrustning för PSP

Den utrustning som används (eller kan användas) vid plasmaseparation, och som dessutom är under exportkontroll, beskrivs i detalj nedan. Inom parentes refereras liksom tidigare till EU:s förordning 1334/2000. Flera av dessa delsystem är identiska, eller har stora likheter, med den utrustning som diskuterades i samband med AVLIS-processen, se avsnitt 3.2.2.

**System för att generera uranplasma (0B001 i3)** inkluderar, som namnet antyder, många olika utrustningar som kan vara användbara. I EU:s förordning nämns ingen speciell apparatur, men till exempel högeffektselektronstrålekanoner (**0B001 g1**), som diskuterades i avsnitt 3.2.2 om AVLIS-utrustning, kan ingå som en del här.

**Mikrovågskällor och antenner (0B001 i1)** för att upphetta och jonisera uranplasmata. Dessa källor behöver ha en frekvens större än 30 GHz och en medeleffekt om åtminstone 50 kW. Två typiska namn på sådan utrustning är gyrotron och klystron.

**Jonexcitationsspolar (0B001 i2)** används för att generera det elektriska fält som sätter <sup>235</sup>U-jonen i resonans. Med ett typiskt magnetfält om 2 Tesla behöver det elektriska fältet ha en frekvens på ungefär 130 kHz. Exportkontrollgränsen är också satt till minst 100 kHz, och med en effekt större än 40 kW.

**System för hantering av flytande metall (0B001 i4)** är identiskt med det som diskuterades under AVLIS-avsnittet (**0B001 g2**).

**Uppsamlare för slutprodukt (0B001 i5)** är ur förordningssynpunkt identisk med den för AVLIS (**0B001 g3**). I praktiken finns vissa skillnader, som kollektorplattornas geometriska utformning och placering i uppsamlingssteget. Även här ingår andra delsystem, som till exempel deglar (**2A225**).

**Cylindriska behållare (0B001 i6)** för separatormodul. Dessa är avsedda att innesluta alla delsystem i plasmaseparationen förutom den magnetstrande solenoiden, såsom uranplasmakällan, utrustningen som genererar det elektriska fältet och uppsamlingssystemet för slutprodukterna. Behållarna har typiskt en mängd möjligheter till in- och uttag för elektricitet och diagnostiska instrument, och måste vara tillverkade av ett icke-magnetiskt material (som rostfritt stål).

**Elektromagneter med supraledande solenoider (3A201 b)** refererar till den utrustning som skapar det homogena magnetfältet. Kontrollen gäller för sådan utrustning som dels kan producera ett magnetfält starkare än 2 Tesla med bättre än 1 % homogenitet över de centrala 50 % av volymen. Detta uttrycker det som diskuterades tidigare i detta avsnitt, nämligen att magnetfältet måste vara starkt och inte variera med mer än någon procent. För att vara exportkontrollerad måste också måtten vara sådana att innerdiametern är större än 300 mm, samtidigt som längdmåttet ska vara minst dubbelt så stort som innermåttet. Observera att den minsta innerdiametern ju refererar till själva solenoiden, och eftersom den cylindriska behållaren placeras innanför solenoiden är behållaren mindre än solenoiden, och plasmastrålen är i sin tur mindre än behållaren. En av orsakerna till diameterkravet är därför

att jonflödet annars blir lägre än vad som kan anses praktiskt användbart. Det sistnämnda kravet – på måttförhållandena – härrör från det faktum att magnetfältet knappast kan betraktas som konstant över de centrala delarna om kvoten mellan längd och diameter understiger en faktor två.

## 5 Indikatorer på laseranrikning & plasmaseparation

Indikatorer på att anrikning, eller anrikningsrelaterad verksamhet, sker kan delas upp i olika områden, såsom forskning och utveckling, utprovning och full drift. De olika indikatorerna för ett land beror naturligtvis på det stadium landet ifråga befinner sig i; då kunskap inhämtas om, och forskning pågår kring, en anrikningsprocess är indikatorerna annorlunda än då pilot- eller fullskaleverksamhet bedrivs.

### 5.1 Indikatorer på laseranrikningsverksamhet

Driften vid en pilot- eller fullskaleanläggning för AVLIS eller MLIS sker antagligen i kampanjer eftersom man är tvungen att stoppa för utbyte av olika komponenter, underhåll (lasrarna behöver exempelvis underhållas med jämna mellanrum) och kanske t.o.m. för att extrahera produkt och avfall. Anläggningar är antagligen modulära och har laserbyggnader och separatorbyggnader. Byggnaderna måste tåla seismisk aktivitet, speciellt laserbyggnaden är känslig för vibrationer.

En liten anläggning för produktion av vapenmaterial behöver inte så mycket råmaterial i form av uranmetall eller UF<sub>6</sub>, av naturlig isotophalt. En lastbilstransport i månaden, vilket inte innebär något stort flöde och kan därför vara svårt att identifiera utifrån som indikation på urananrikning.

#### 5.1.1 AVLIS

Indikatorer på forskning och utveckling för AVLIS kan vara verksamhet inom laser-spektroskopi, laseroptik, jonfysik och olika egenskaper hos uran. Ett bra surrogatmaterial för uran i AVLIS-forskning är gadolinium. Gadolinium har sju stabila isotoper och uran har tre. Skillnaden mellan <sup>152</sup>Gd och <sup>160</sup>Gd motsvarar <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U. Våglängden för att excitera gadolinium är ca 419 nm och uran ca 413 nm och isotopskiftet i Gd är 9,8775 nm och i uran 11,1221 nm. Då de aktuella gadoliniumisotoperna är stabila så är det också en fördel att använda dem i utvecklingskedet då man då inte behöver kontaminera utrustning med radioaktivitet.

I utvecklingsfasen behöver man olika typer av instrument t.ex. boxcar<sup>41</sup> och oscilloskop.

Eftersom utgångsmaterialet är uranmetall som har få andra användningsområden förutom för vapentillverkning och plasmaseparation kan intresse för uranmetallframställning vara en indikator i sig.

Separatormodulerna för AVLIS är i storleksordningen 10-tals meter långa (minst). Energiförbrukningen är ca 40 kWh/SWU och det mesta av energin går åt till att smälta uranmetallen (75 %). En typisk signal är elektriskt brus från lasrarna typiskt med frekvenser mellan 5 och 10 kHz. Eftersom man regelbundet måste öppna vakuumbehållarna och rengöra

---

<sup>41</sup> Boxcar är ett instrument som används för att mycket precist mäta och styra våglängder.

kommer det med stor sannolikhet att frigöras uranrester från rengöring av inre delar av separationsmodulerna. Uranmetall används i processen och då uranmetall reagerar lätt med luftens syre och bildar uranoxid skulle eventuellt spår av uranoxid kunna påvisas även utanför anläggningen.

### 5.1.2 MLIS

Svårigheten i MLIS är den selektiva excitationen och dissociationen av  $UF_6$ . Hantering av  $UF_6$  är också ett område som man måste behärska samt hur man tar vara på det bildade  $UF_5$ . Forskning och utveckling av MLIS involverar därför laserteknologi rörande koldioxidlasrar och Ramanskiftare samt laserspektroskopi. Det behövs också utveckling och forskning kring expansionsdysor samt kunskap om hur man hanterar och processerar fluorföreningar.

MLIS-teknologi kan även användas för separation av svavelisotoper. Det bör dock påpekas att tekniken som används för svavel inte är direkt applicerbar på uran. Dels är vibrationsenergin annorlunda, 0,077 eV eller 16  $\mu\text{m}$  för  $UF_6$  och 0,12 eV eller 10,4  $\mu\text{m}$  för  $SF_6$ , och dels är isotopskiftet mycket mindre för uran, 81  $\mu\text{eV}$ , än hos svavel som har ett isotopskift på 210  $\mu\text{eV}$ . Detta resulterar dels i att man behöver Ramanskifta laserljuset för uran men ej för svavel och dels att lasrarna för uran måste ha högre precision. Förfarandet är dock likartat och utveckling av övrig teknik för  $SF_6$ , förutom lasrarna, kan delvis utnyttjas även för urananrikning.

Nickelbaserade legeringar behövs i den utrustning som kommer i kontakt med fluorföreningar, för att motstå korrosion.

## 5.2 Indikatorer på plasmaseparation

Precis som för laseranrikning är det troligt att även anrikning med plasmaseparation sker med avbrott för underhåll av olika komponenter och/eller extraktion av den anrikade respektive utarmade urankomponenten. Eftersom plasmaseparation åtminstone inte ännu har utvecklats till en kommersiellt gångbar metod för uran, kan det förmodas att en anläggning för PSP idag antingen används för utveckling eller i militärt syfte för att framställa vapenuran – i båda fallen (som inte är ömsesidigt uteslutande) kan anläggningen vara relativt småskalig. Förutom den direkta anrikningsutrustningen kan eventuellt även byggnader och utrustning för underhåll av PSP-komponenter och tillverkning av flytande helium ingå i komplexet.

Indikationer på forskning och utveckling inom PSP kan vara verksamhet inriktad på plasmafysik och diagnostik av plasman, supraledande elektromagneter för att framställa extremt kraftiga och homogena magnetfält, samt bestämmande av isotopsammansättningar i metalliska material. Även intresse för framställning av uranmetall, uranånga eller uranplasma kan vara en indikation, eftersom dessa intresseområden har få andra användningsområden än inom anrikning. Komponenter och utrustning för sådana applikationer är dock generella och därför svåra att entydigt knyta till just urananrikning.



## 6 Anläggningar och anläggningsdrift

Inget land idag har, som tidigare nämnts, industriella program där man använder laseranrikning för att framställa kärnbränsle eller vapenmaterial. Länder som har haft aktiviteter utöver forskning på området är bland annat USA, Frankrike, Kina, Ryssland, Storbritannien och Japan. Forskning har också bedrivits ibland annat Australien, Brasilien, Indien, Iran, Israel och Sydkorea.

Det amerikanska AVLIS-programmet lades i malpåse 1999. Programmet som var förlagt till Lawrence Livermorelaboratoriet började redan på 1970-talet och i början av 1990-talet hade man en pilotanläggning för anrikning i industriell skala. Under slutet av 1990-talet hade man pilotanläggningen i drift under mer än 400 timmar innan man behövde stoppa för underhåll och utbyte av komponenter. Vid anläggningen producerades flera tusen kilogram låganrikat uran där man kunde köra processen under tiotals timmar åt gången.

År 2003 lades den franska forskningen om SILVA ner till fördel för gascentrifugering. Innan dess hann man dock producera drygt 200 kg LEU (2-3%  $^{235}\text{U}$ ) vid pilotanläggningen Memphis vid Pierrelatte. Om man inte hade lagt ner aktiviteterna vid anläggningen skulle man, enligt företrädare för CEA<sup>42</sup> kunnat konvertera Memphis till produktion i industriell skala.

Utvecklingsarbetet i de ryska AVLIS-, och MLIS-programmen skedde vid Kurchatovinstitutet i Moskva. Vid pilotanläggningen för AVLIS, ”Talisman”, förångades 750 g uranmetall per timme och man producerade 150 mg uran anrikat till 2-6 %  $^{235}\text{U}$  per timme.

Los Alamos National Laboratory har haft forskning kring MLIS sedan 1970-talet. Även Tyskland har haft forskning på MLIS och producerade även anrikat uran i milligramskala per timme med anrikningsfaktor på 5. Vid senare optimering kunde man erhålla anrikningsfaktorer på 10-20.

I Sydafrika lyckades man med MLIS nå anrikningsgrader på 3,25 % på ett enda steg, dock i mikrogrammängder.

Vad gäller satsningar i industriell skala finns en anläggning i Kaliningrad där MLIS används för att separera kolisotoper. I anläggningen separeras 30 kg kol-13 per år anrikat till 30 %. Man använder sedan andra processer, exempelvis gascentrifugering, för att rena till 99 % kol-13.

När det gäller isotopseparation med hjälp av plasmaseparationsprocessen finns för närvarande en kommersiell anläggning i drift. Den drivs av det privatägda företaget Theragenics Co. vid Oak Ridge National Laboratory i Tennessee, USA, och används för separation av isotoper för medicinskt bruk, mer specifikt palladium. Teknologin och utrustningen vid Oak Ridge utvecklades från början av det amerikanska energidepartementet, otvivelaktigt i militära syften, men övertogs år 2002 av Theragenics. En intressant detalj i detta sammanhang är att Theragenics håller både det amerikanska energi- och försvarsdepartementet underrättade om utvecklingen av PSP-processen<sup>43</sup>. Även den franska atomenergikommissionen har åtminstone tidigare visat intresse för den här anrikningsmetoden.

---

<sup>42</sup> CEA, Commissariat à l'Énergie Atomique är den franska atomenergikommissionen.

<sup>43</sup> Theragenics Co. resultatrapport för fjärde kvartalet och året 2004.

## 6.1 Drift av en anrikningsanläggning

En anläggning baserad på AVLIS eller MLIS byggs i kaskader på samma sätt som exempelvis en gascentrifuganläggning, dvs. att man har flera steg i serie för att erhålla önskad anrikningsgrad och ett antal enheter parallellt för att erhålla önskat materialflöde.

Det bör noteras att det kan vara processtekniskt svårt att köra kontinuerlig drift i en AVLIS-anläggning. Dels måste man antagligen öppna och byta ut delar i separatortankarna och dels kräver kontinuerlig drift att pulsningen av lasrarna med nanosekundprecision kan vidmakthållas under långa tider. Vidare kräver kontinuerlig drift att man kan ta ut produkten kontinuerligt vilket innebär att uranet antagligen måste samlas upp i flytande form. Samlas uranet upp i fast form krävs att extraktionselektroden byts ut och att uranet löses upp, vilket implicerar satsvis drift av anläggningen.

Även driften i en MLIS-anläggning sker antagligen satsvis eftersom man är tvungen att stoppa för utbyte av olika komponenter och underhåll. Varje MLIS-steg behöver innehålla alla processdelar såsom gasinmatningssystem, kompressor och insamlare. Det är dock möjligt att använda ett och samma lasersystem i flera steg.

## 6.2 Anrikningsanläggningarnas effektivitet

Det finns inga entydiga siffror för anrikningsfaktorer för de laserbaserade anrikningsmetoderna, men de flesta källor anger mellan 5 och 15 för AVLIS och MLIS. För PSP anges separationsfaktorer mellan 3,5 och 10. Laseranrikning och plasmaseparation är därmed, tillsammans med EMIS, de mest effektiva av de idag kända anrikningsprocesserna. Som jämförelse kan anges att gasdiffusion har en separationsfaktor på ca 1,004 och gascentrifugering max ca 1,5.

I tabell 5 nedan anges dels den anrikningsgrad man kan uppnå för ett AVLIS-, MLIS-, eller PSP-steg för olika anrikningsfaktorer<sup>44</sup>. Beräkningen är gjord dels utgående från uran med naturlig isotophalt och dels för utarmat uran med en halt  $^{235}\text{U}$  på 0,2 %. Som synes kan man uppnå en anrikningsgrad om 7 % i endast ett steg om anrikningsfaktorn är 10. Detta betyder alltså att om man avser att framställa låganrikat uran kan man till och med vara tvungen att blanda ut det anrikade uranet med naturligt uran.

Tabell 5. Anrikningsgrad som uppnås med ett AVLIS-, MLIS-, eller PSP-steg för olika anrikningsfaktorer och olika isotophalt i utgångsmaterialet. Halten avser  $^{235}\text{U}$ .

Anrikningsfaktor ( $\alpha$ )	Anrikningsgrad för ett steg Från nat U	Anrikningsgrad för ett steg Från 0,2 % U
5	3,5 %	1 %
10	7 %	2 %
15	11 %	3 %

<sup>44</sup> För PSP anges separationsfaktorn på andra ställen i texten, för denna beräkning har dock anrikningsfaktorn använts. Anriknings- och separationsfaktorn definieras i avsnitt 2.6.6.

Vill man nå högre anrikningsgrader behöver man återcykla den mer och mer anrikade produkten genom ett antal steg. I tabell 6 listas hur många steg som behövs för att anrika från naturligt uran till vapenuran (90 %  $^{235}\text{U}$ ) utgående dels från uran med naturlig isotophalt, från utarmat uran samt från låganrikat uran (3,5 %  $^{235}\text{U}$ ). För de två högre anrikningsfaktorerna blir det samma antal steg oavsett om man utgår från utarmat eller naturligt uran. Om man utgår från låganrikat uran (3,5 %) klarar man sig dock på endast två steg för att framställa vapenuran.

Tabell 6. Antal steg som krävs för att framställa vapenuran (90 %  $^{235}\text{U}$ ) med exempelvis AVLIS, MLIS eller PSP antaget olika anrikningsfaktorer. I beräkningarna har endast antalet steg i anrikningsdelen av en eventuell kaskad beräknats.

Anrikningsfaktor ( $\alpha$ )	Antal steg från 0,2 % $^{235}\text{U}$	Antal steg från nat $^{235}\text{U}$	Antal steg från 3,5 % $^{235}\text{U}$
5	6	5	4
10	4	4	3
15	3	3	2

Eftersom det inte finns några industriella AVLIS-, MLIS-, eller PSP-anläggningar i drift för urananrikning är det svårt att veta hur stor kapacitet som är praktiskt för en anläggning. En typisk separatormodul för AVLIS beräknas kunna ge ca 100 gånger större produktionskapacitet jämfört med gasdiffusion och 1000-2000 gånger högre kapacitet jämfört med gascentrifugering.

Vid Lawrence Livermorelaboratoriet planerades för en AVLIS-anläggning med kapaciteten 5 miljoner SWU/år där det var tänkt att man skulle använda 6 laserfaciliteter och 6 förångningsmoduler. Varje lasermodul innehåller ett stort antal CVL, förstärkare och dyelasrar. För hela anläggningen går det åt ett par hundra CVL. En sådan anläggning skulle kunna producera 1600 ton LEU eller 26 ton vapenuran per år. Där gjordes också beräkningar som visade att det skulle vara ekonomiskt försvarbart att använda AVLIS för att anrika avfall från gasdiffusion (*tails*), som innehåller låga halter  $^{235}\text{U}$  (0,2-0,3 %). Enligt dessa beräkningar skulle man kunna minska totala mängden *tails* med 60 % och få det att gå ihop ekonomiskt.

## 7 REFERENSER

---

- [1] “*Uranium enrichment and Nuclear Weapon Proliferation*”, Krass, Boskma, Elzen och Smit, SIPRI, Taylor & Francis Ltd, SIPRI, 1983.
- [2] “*Urananrikning med gascentrifugering*”, Oliver, Peterson och Wilhelmsen, SKI Rapport 2005:44.
- [3] “*Laser Methods of Isotope Separation*”, Baranov, Grigorev, Kolesnikov, Mishin, Proc. Int. Conf. Lasers’97, 15-19 Dec, New Orleans 1997, SPIE, 1998.
- [4] “*Topics in Applied Physics, Volume 35, Uranium Enrichment*”, p. 269-290, Editor S Villani, Springer Verlag, 1979.
- [5] “*Nuclear Chemical Engineering*”, p. 915-921, Benedict, Pigford och Levi, McGraw-Hill Company, 1981.
- [6] “*A Handbook for Annex 3*”, Prepared by The U.S. Department of Energy Nuclear Transfer and Supplier Policy Division, (<http://www.iraqwatch.org/government/US/DOE/DOE-Annex3.htm>), April 1998.
- [7] “*Chemical and Biochemical Applications of Lasers*”, Vol. II-III, Edited by C. Bradely Moore, Academic Press Inc., 1977.
- [8] “*Laser Separation of isotopes*”, V.S. Lethokov, Ann. Rev. Phys. Chem., 28, pp.133-159, 1977.
- [9] “*Nuclear science and technology, Advanced Uranium Enrichment Processes*”, M. Clerc och P. Plurien, EU-kommissionen Nr EUR 10743 EN, 1986.
- [10] “*Laser Isotope Separation of Uranium*”, P. Ramakoteswara Rao, Current Science, Vol. 85, No. 5, 10 September 2003.
- [11] “*Laser Photolysis of Molecules UF<sub>6</sub>*”, Baranov, Kolesnikov, Kotov, Proc. Int. Conf. Lasers’98, 7-11 Dec, Tucson 1998, SPIE, 1999.
- [12] “*The Laser Guidebook*”, Jeff Hecht, McGraw-Hill, 1992.
- [13] “*Laser Techniques Applied to Isotope Separation of Uranium*”, Schwab, Damião, Silveira, Neri, Destro, Rodrigues och Riva, Progress in Nuclear Energy, Vol. 33, No.1/2, pp. 217-264, 1998.
- [14] “*Molecular Laser Isotope Separation versus Atomic Vapor Laser Isotope Separation*”, Parvin, Sajad, Silakhori, Hooshvar och Zamanipour, Progress in Nuclear Energy, Vol. 44, No. 4, pp. 331-345, 2004.
- [15] “*Physics of shock waves and high- temperature hydrodynamic phenomena*”, Ya. B. Zeldovich och Yu. P. Raizer, Dover Publications, 2002.



## BILAGA 1

### Exportkontrollerad utrustning för urananrikning med laseranrikning och plasmaseparation.

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. Den text som inte berör laseranrikning eller plasmaseparation är i vissa fall gråmarkerad i utdraget nedan.

OB001 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 som är 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 isotopseparation med "laser" och atomär ånga (AVLIS).
  7. Anläggning för isotopseparation med "laser" och gasmolekyler (MLIS).
  8. Anläggning för separation med plasmaprocess.
  9. Anläggning för separation med elektromagnetisk process.

:  
:  
:
- g) Utrustning och komponenter som är särskilt konstruerade eller iordningställda för isotopseparation med "laser" och atomär ånga (AVLIS), enligt följande:
  1. Högeffektselektronstrålekanoner som arbetar i band eller med svep och som kan leverera mer effekt än 2,5 kW/cm och som är avsedda att användas för att förångas uran.
  2. System för hantering av flytande metall avsedda för uran eller uranlegeringar i smält form, bestående av deglar som är tillverkade av eller skyddade med lämpligt korrosions- och värmebeständigt material (t.ex. tantal, yttriumoxidbelagd grafit, grafit belagd med oxider av andra sällsynta jordartsmetaller eller blandningar av sådana) samt kylutrustning för deglarna.  
**ANM.: SE ÄVEN AVSNITT 2A225.**
  3. System för att uppsamla slutprodukt och restfraktion tillverkade av eller fodrade med material som är resistent mot värmen och korrosionen från förångad uranmetall eller flytande uran, t.ex. yttriumoxidbelagd grafit eller tantal.
  4. Behållare för separatormodul (cylindriska eller rektangulära behållare) som skall användas för att innesluta källan som producerar uranmetallånga, elektronstrålekanonen och uppsamlare av slutprodukt och restfraktion.
  5. "Lasrar" eller "laser"-system för separation av uranisotoper som är frekvensstabiliserade för drift över långa tidsperioder.  
**ANM.: SE ÄVEN AVSNITT 6A005 OCH 6A205.**

- h) Utrustning och komponenter som är särskilt konstruerade eller iordningställda för isotopseparation med "laser" och gasmolekyler (MLIS) eller kemisk reaktion genom isotopselektiv laseraktivering (CRISLA), enligt följande:
1. Expansionsmunstycken för överljudshastighet som är avsedda att kyla blandningen av  $UF_6$  och bärgasen till 150 K (-123°C) eller lägre och är tillverkade av "material som är resistent mot korrosion orsakad av  $UF_6$ ".
  2. Uppsamlare för uranpentafluorid ( $UF_5$ ) bestående av filter, uppsamlare av impakt- (anslags-) eller cyklontyp, eller kombinationer av dessa typer, och som är tillverkade av "material som är resistent mot korrosion orsakad av  $UF_5/UF_6$ ".
  3. Kompressorer som är tillverkade eller skyddade av "material som är resistent mot korrosion orsakad av  $UF_6$ " samt axeltätningar för sådana kompressorer.
  4. Utrustning för att fluorera  $UF_5$  (fast) till  $UF_6$  (gas).
  5. Processystem för att separera  $UF_6$  från bärgasen (t.ex. kväve eller argon), innefattande följande:
    - a) Kryogena värmeväxlare och kryogena separatorer som kan arbeta vid temperaturer på 153 K (-120°C) eller lägre.
    - b) Kryogena kylenheter som kan arbeta vid temperaturer på 153 K (-120°C) eller lägre.
    - c) Kylfällor för  $UF_6$  som kan arbeta vid temperaturer på 253 K (-20°C) eller lägre.
  6. "Lasrar" eller "laser"-system för att separera uranisotoper som är frekvensstabiliserade för drift över långa tidsperioder.  
**ANM.: SE ÄVEN AVSNITT 6A005 OCH 6A205.**
- i) Utrustning och komponenter som är särskilt konstruerade eller iordningställda för separation med plasmprocess, enligt följande:
1. Mikrovågskällor och antenner som kan producera eller accelerera joner och som har en utgångsfrekvens som är högre än 30 GHz, och en utgångseffekt (medeleffekt) som är större än 50 kW.
  2. Jonexcitationsspolar för radiofrekvenser över 100 kHz och som kan arbeta med mer än 40 kW medeleffekt.
  3. System för att generera uranplasma.
  4. System för hantering av flytande metall avsedda för uran eller uranlegeringar i smält form, bestående av deglar som är tillverkade eller skyddade av lämpligt korrosions- och värmebeständigt material (t.ex. tantal, yttriumoxidbelagd grafit, grafit belagd med oxider av andra sällsynta jordartsmetaller eller blandningar av sådana), samt kylutrustning för deglarna.  
**ANM.: SE ÄVEN AVSNITT 2A225.**
  5. Uppsamlare för slutprodukt och restfraktion tillverkade av eller skyddade med material som är resistent mot värmen och korrosionen från uranånga. Skyddande material kan vara yttriumoxidbelagd grafit eller tantal.
  6. Cylindriska behållare för separatormodul avsedda att innesluta uranplasmakällan, radiofrekvensdrivspolen samt uppsamlare för slutprodukt och restfraktion tillverkade av lämpligt icke-magnetiskt material (t.ex. rostfritt stål).

- 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 UF<sub>6</sub>".
- a) Matningsautoklaver, ugnar eller system som används för att överföra UF<sub>6</sub> till anrikningsprocessen.
  - b) Desublimeringsutrustning eller kylfällor som används för att bortföra UF<sub>6</sub> från anrikningsprocessen och för vidaretransport efter upphettning.
  - c) Stationer för slutprodukt och restfraktion vilka används för att överföra UF<sub>6</sub> till behållare.
  - d) Kondenserings- eller solidifieringsstationer som används för att avlägsna UF<sub>6</sub> från anrikningsprocessen genom att komprimera, kyla och konvertera UF<sub>6</sub> till flytande eller fast form.
  - e) Rörsystem och grenrör som är särskilt avsedda för transport av UF<sub>6</sub> inom kaskader som utnyttjar gasdiffusion, centrifuger eller aerodynamiska processer.
  - f)
    1. Samlings- och förgreningsrör för vakuum som tillåter en sugkapacitet på minst 5 m<sup>3</sup>/min, eller
    2. vakuumpumpar som är speciellt konstruerade för användning i UF<sub>6</sub>-haltig atmosfär.
  - g) UF<sub>6</sub>-masspektrometrar/jonkällor som är särskilt konstruerade eller iordningställda för on-line-prover på matarflöde, slutprodukt eller restfraktion från UF<sub>6</sub>-gasflöden 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.: Avsnitt 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.
- 2A225 Smältdeglar tillverkade av material som är resistent mot flytande aktinidmetaller, enligt följande:
- a) Smältdeglar som har följande två egenskaper:
    1. En volym mellan 150 cm<sup>3</sup> och 8 000 cm<sup>3</sup>, och
    2. tillverkade av eller belagda med något av följande material med en renhet av 98 viktprocent eller högre:
      - a) Kalciumfluorid (CaF<sub>2</sub>).



- b) Kalciumzirkonat (metazirkonat) ( $\text{CaZrO}_3$ ).
  - c) Ceriumsulfid ( $\text{Ce}_2\text{S}_3$ ).
  - d) Erbiumoxid (erbia) ( $\text{Er}_2\text{O}_3$ ).
  - e) Hafniumoxid (hafnia) ( $\text{HfO}_2$ ).
  - f) Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ).
  - g) Nittrade niob-titan-volframlegeringar (ca 50 % Nb, 30 % Ti, 20 % W).
  - h) Yttriumoxid (yttria) ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) eller
  - i) Zirkoniumoxid (zirkonia) ( $\text{ZrO}_2$ ).
- b) Smältdeglar som har följande två egenskaper:
1. En volym mellan  $50 \text{ cm}^3$  och  $2\,000 \text{ cm}^3$ , och
  2. tillverkade av eller fodrade med tantal som har en renhet av 99,9 viktprocent eller högre.
- c) Smältdeglar som har alla följande egenskaper:
1. En volym mellan  $50 \text{ cm}^3$  och  $2\,000 \text{ cm}^3$ ,
  2. tillverkade av eller fodrade med tantal som har en renhet av 98 viktprocent eller högre, och
  3. belagda med tantalkarbid, -nitrid eller -borid (eller någon kombination därav).

2A226 Ventiler som har alla följande egenskaper:

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

*Teknisk anm.:*

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

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  $\pm 130 \text{ Pa}$ .

*Teknisk anm.:*

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

2B231 Vakuumpumpar som har alla följande egenskaper:

- a) Insugningsrör med en diameter 380 mm eller mer,
- b) pumphastighet av  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  eller högre, och
- c) kan åstadkomma ett slutvakuum bättre än 13 mPa.

*Teknisk anm.:*

1. Pumphastigheten bestäms vid mätpunkten med kväve eller luft.
2. Slutvakuumet bestäms i pumpens ingång med pumpens inlopp blockerat.

- a) Kondensatorer som har någon av följande uppsättning egenskaper:
1. a) Märkspänning större än 1,4 kV,  
b) energiinnehåll större än 10 J,  
c) kapacitans större än 0,5  $\mu\text{F}$ , och  
d) serieinduktans mindre än 50 nH, eller
  2. a) märkspänning större än 750 V,  
b) kapacitans större än 0,25  $\mu\text{F}$ , och  
c) serieinduktans mindre än 10 nH.
- b) Elektromagneter med supraledande solenoider och som uppfyller samtliga följande krav:
1. Kan producera magnetfält kraftigare än 2 T.
  2. Längdens förhållande till innerdiametern är större än 2.
  3. En inre diameter större än 300 mm, och
  4. ett magnetfält som är homogent, bättre än 1 % över de centrala 50 % av den inre volymen.

Anm.: Avsnitt 3A201.b omfattar inte magneter som är särskilt utformade för och exporterade 'som del av' bildsystem för medicinsk tillämpning baserade på kärnspinnresonans (NMR). Frasen 'som del av' avser inte nödvändigtvis fysisk del av samma skeppning; separata skeppningar från olika källor är tillåtna, under förutsättning att ifrågasvarande exportdokument tydligt anger att skeppningarna används 'som del av' bildsystemen.

- c) Röntgenblixtaggregat eller pulsade elektronacceleratorer som har någon av följande uppsättning egenskaper:
1. a) En toppenergi för de accelererade elektronerna om 500 keV eller mer men mindre än 25 MeV, och  
b) ett 'godhetstal' (K) lika med 0,25 eller mer, eller
  2. a) en toppenergi för de accelererade elektronerna om 25 MeV eller mer, och  
b) en 'toppeffekt' större än 50 MW.

Anm.: Avsnitt 3A201.c omfattar inte acceleratorer som ingår som delar i apparatur utformad för annat än användning av elektronstråle eller röntgenstrålning (t.ex. elektronmikroskop) och sådana som utformats för medicinska ändamål:

Tekniska anm.:

1. 'Godhetstalet' (K) definieras som

$$K = 1,7 \times 10^3 V^{2,65} Q$$

$V$  är elektronernas toppenergi i millioner elektronvolt.

Om pulslängden i acceleratorstrålen är kortare än eller lika med 1  $\mu\text{s}$ , då är  $Q$  den totala accelererade laddningen i Coulomb. Om strålens pulslängd är längre än 1  $\mu\text{s}$  då är  $Q$  den maximala accelererade laddningen på 1  $\mu\text{s}$ .

$Q$  är lika med integralen av  $i$  med avseende på  $t$ , över den tidslängd som är kortast 1  $\mu\text{s}$  eller tidslängden av pulsen ( $Q = \int i dt$ ) där  $i$  är strålströmmen i ampere och  $t$  tiden i sekunder.

2. Toppeffekt = (toppspänning i volt)  $\times$  (toppström i ampere).
3. I maskiner baserade på accelerations-kaviteter för mikrovågor är pulsens tidsutsträckning det mindre av 1  $\mu\text{s}$  och längden av det klungade vågpaketets varaktighet genererad av en modulatorpuls.
4. I maskiner baserade på accelerationskaviteter för mikrovågor är strålens toppström lika med medelströmmen under det klungade vågpaketets varaktighet.

6A005

"Lasrar", andra än de som specificeras i avsnitt 0B001.g.5 eller 0B001.h.6, komponenter och optisk utrustning enligt följande:

**ANM.:** SE ÄVEN AVSNITT 6A205.

*Anm. 1:* Pulsade "lasrar" inkluderar "lasrar" som arbetar i kontinuerlig mod (CW) men med överlagrade pulseffekter.

*Anm. 2:* Pulsexciterade "lasrar" inkluderar "lasrar" som arbetar i kontinuerlig mod men med överlagrad excitering.

*Anm. 3:* Om Raman-"lasrar" omfattas eller inte bestäms av parametrarna för de pumpande laserkällorna, som kan vara vilken som helst av följande "lasrar".

a) Gas-"lasrar" som följer:

1. Excimer-"lasrar" som har något av följande:

- a) En utgångsvåglängd som inte överstiger 150 nm, och har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 50 mJ/puls, eller
  2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 1 W.
- b) En utgångsvåglängd som överstiger 150 nm men inte 190nm, och har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 1,5 J/puls, eller
  2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 120 W,
- c) En utgångsvåglängd som överstiger 190 nm men inte 360 nm, och har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 10 J/puls, eller
  2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 500 W.
- d) En utgångsvåglängd som överstiger 360 nm, och har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 1,5 J/puls, eller
  2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 30 W.

*ANM.:* Se avsnitt 3B001 för Excimer-"lasrar" som speciellt konstruerats för litografisk utrustning.

2. Metallång-"lasrar" enligt följande:

- a) Koppar(Cu)-"lasrar" med en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 20 W.
- b) Guld(Au)-"lasrar" med en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 5 W.
- c) Natrium(Na)-"lasrar" med en utgångseffekt som överstiger 5 W.
- d) Barium(Ba)-"lasrar" med en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 2 W.

3. Kolmonoxid(CO)-"lasrar" som har något av följande:

- a) En utgångsenergi som överstiger 2 J/puls och en "pulsad toppeffekt" som överstiger 5 kW, eller
- b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 5 kW.

4. Koldioxid(CO<sub>2</sub>)-"lasrar" som har något av följande:

- a) En kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 15 kW.
- b) En pulsad uteffekt med en varaktighet hos pulsen som överstiger 10 µs, och som har något av följande:
  1. En genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 10 kW, eller
  2. en pulsad "toppeffekt" som överstiger 100 kW.

- c) En pulsad uteffekt med en "varaktighet hos pulsen" som är lika med eller mindre än 10  $\mu$ s, och har något av följande:
  - 1. En pulsenergi som överstiger 5 J/puls, eller
  - 2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 2,5 kW.
  
- 5. "Kemiska lasrar" enligt följande:
  - a) Vätefluorid(HF)-"lasrar".
  - b) Deuteriumfluorid(DF)-"lasrar".
  - c) "Transfer-lasrar", enligt följande:
    - 1. Syre-jod (O<sub>2</sub>-I)-"lasrar".
    - 2. Deuteriumfluorid-koldioxid (DF-CO<sub>2</sub>)-"lasrar".
  
- 6. Kryptonjon- eller argonjon-"lasrar" som har något av följande:
  - a) En utgångsenergi som överstiger 1,5 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 50 W, eller
  - b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 50 W.
  
- 7. Andra gas-"lasrar" som har något av följande:  
*Anm.: Avsnitt 6A005.a.7 omfattar inte kväve-"lasrar".*
  - a) En utgångsvåglängd som inte överstiger 150 nm, och har något av följande
    - 1. En utgångsenergi som överstiger 50 mJ/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 1 W, eller
    - 2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.
  - b) En utgångsvåglängd som överstiger 150 nm men inte 800 nm, och som har något av följande:
    - 1. En utgångsenergi som överstiger 1,5 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 30 W, eller
    - 2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 30 W.
  - c) En utgångsvåglängd som överstiger 800 nm men inte 1 400 nm, och har något av följande:
    - 1. En utgångsenergi som överstiger 0,25 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 10 W, eller
    - 2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 10 W.
  - d) En utgångsvåglängd som överstiger 1 400 nm och en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.

b) Halvledar-"lasrar" enligt följande:

1. Individuella, transversell singelmodhalvledar-"lasrar" som har någon av följande egenskaper:
  - a) En våglängd på högst 1 510 nm och med en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 1,5 W, eller
  - b) en våglängd över 1 510 nm och med en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 500 mW.
2. Individuella, transversell multipelmodhalvledar-"lasrar" som har någon av följande egenskaper:
  - a) En våglängd på mindre än 1 400 nm och som har en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 10W,
  - b) en våglängd på 1 400 nm eller mer och som understiger 1 900 nm och som har en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 2,5W, eller
  - c) en våglängd på 1 900 nm eller mer och som har en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 1W.
3. Individuella system (matriser) av halvledar-"lasrar" som har någon av följande egenskaper:
  - a) En våglängd på mindre än 1 400 nm och som har en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 80W,
  - b) en våglängd på 1 400 nm eller mer och som understiger 1 900 nm och som har en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 25W, eller
  - c) en våglängd på 1 900 nm eller mer och som har en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt på över 10W.
4. System (matriser) av halvledar-"lasrar" som innehåller åtminstone ett system som omfattas av avsnitt 6A005.b.3.

Teknisk anm.:

1. Halvledar-"lasrar" kallas ofta "laser"dioder.
2. Ett 'system' (matriser) består av flera emitterar till halvledar-"lasrar" som tillverkas som ett enda chips så att de utsända ljusstrålarnas centrum följer parallella banor.
3. Ett 'system' tillverkas genom att 'system' radas upp eller på annat sätt samlas så att de utsända ljusstrålarnas centrum följer parallella banor.

Anm. 1: Avsnitt 6A005.b omfattar halvledar-"lasrar" som har ett utgående optiskt anslutningsdon (t.ex. optisk kopplingsfläta).

Anm. 2: Halvledar-"lasrar" som ingår i och speciellt konstruerats för annan utrustning klassificeras som denna andra utrustning.

c) Halvledarbestyckade "lasrar", enligt följande:

1. "Avstämbara" "lasrar" som har något av följande:

Anm.: Avsnitt 6A005.c.1 omfattar även titansafir- ( $Ti-Al_2O_3$ ), tulium-YAG- {YAG = yttrium, aluminium, granat}, tulium-YSGG- {YSGG = yttrium, svavel, granat, granat}, alexandrit- ( $Cr BeAl_2O_4$ ) {krom-berylliumaluminiumoxid} och färgcenter-"lasrar".

- a) En våglängd under 600 nm, och som har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 50 mJ/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 1 W, eller
  2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.
- b) En våglängd som överstiger 600 nm men inte 1 400 nm, och har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 1 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 20 W, eller

2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 20 W, eller
- c) En våglängd som överstiger 1 400 nm, och har något av följande:
  1. En utgångsenergi som överstiger 50 mJ/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 1 W, eller
  2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.

2. Icke-"avstämbara" "lasrar" enligt följande:

Anm.: Avsnitt 6A005.c.2 omfattar halvledar-"lasrar" med atomär övergång.

- a) Neodymglas-"lasrar" enligt följande:
  1. "Q-switchade lasrar" som har något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 20 J/puls men inte 50 J/puls och med en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 10 W, eller
    - b) en utgångsenergi som överstiger 50 J/puls.
  2. Icke-"Q-switchade lasrar" med något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 50 J/puls men inte 100 J/puls och som har en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 20 W, eller
    - b) en utgångsenergi som överstiger 100 J/puls.
- b) Neodium-dopade (annat än glas-) "lasrar" med en utgångsvåglängd som överstiger 1 000 nm men inte 1 100 nm, enligt följande:

Anm.: För neodium-dopade (annat än glas-) "lasrar" med en våglängd understigande 1 000 nm eller överstigande 1 100 nm, se avsnitt 6A005.c.2.c.

1. Pulsexciterade, modlåsta "Q-switchade lasrar" med en "varaktighet hos pulsen" som understiger 1 ns, och som har något av följande:
  - a) En "toppeffekt" som överstiger 5 GW,
  - b) en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 10 W, eller
  - c) en pulsad energi som överstiger 0,1 J.
2. Pulsexciterade "Q-switchade lasrar" med en varaktighet hos pulsen som är lika med eller längre än 1 ns, och som har något av följande:
  - a) En utgång som arbetar i transversuell singelmod och har
    1. en "toppeffekt" som överstiger 100 MW,
    2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 20 W, eller
    3. en pulsad energi som överstiger 2 J, eller
  - b) en utgång som arbetar i transversuell multipelmod och har
    1. en "toppeffekt" som överstiger 400 MW,
    2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 2 kW, eller
    3. en pulsad energi som överstiger 2 J.
3. Pulsexciterade icke-"Q-switchade lasrar", som har:
  - a) En utgång som arbetar i transversuell singelmod och har
    1. en "toppeffekt" som överstiger 500 kW, eller
    2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 150 W, eller
  - b) en utgång som arbetar i transversuell multipel mod som har
    1. en "toppeffekt" som överstiger 1 MW, eller
    2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 2 kW.

4. Kontinuerligt exciterade "lasrar" som har
    - a) en utgång som arbetar i transversuell singelmod som har
      1. en "toppeffekt" som överstiger 500 kW, eller
      2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 150 W, eller
    - b) en utgång som arbetar i transversuell multipelmod som har
      1. en "toppeffekt" som överstiger 1 MW, eller
      2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 2 kW.
- c) Andra icke "avstämbara lasrar" som har något av följande:
1. En våglängd mindre än 150 nm, och som har något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 50 mJ/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 1 W, eller
    - b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.
  2. En våglängd som är lika med eller överstiger 150 nm men inte 800 nm, och som har något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 1,5 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 30 W, eller
    - b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 30 W.
  3. En våglängd som överstiger 800 nm men inte 1 400 nm, enligt följande:
    - a) "Q-switchade lasrar" som har:
      1. En utgångsenergi som överstiger 0,5 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 50 W, eller
      2. en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger,
        - a) 10 W för singelmod-"lasrar",
        - b) 30 W för multipelmod-"lasrar".
    - b) Icke "Q-switchade lasrar" som har:
      1. En utgångsenergi som överstiger 2 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 50 W, eller
      2. en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 50 W.
  4. En våglängd som överstiger 1 400 nm, och som har något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 100 mJ/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 1 W, eller
    - b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.
- d) Färgämnes-"lasrar" och andra vätske-"lasrar", som har något av följande:
1. En våglängd som är mindre än 150 nm, och
    - a) en utgångsenergi som överstiger 50 mJ/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 1 W, eller
    - b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 1 W.
  2. En våglängd som är lika med eller större än 150 nm, men som inte överstiger 800 nm, och som har något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 1,5 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som överstiger 20 W,
    - b) en genomsnittlig eller kontinuerlig utgångseffekt som överstiger 20 W, eller
    - c) en pulsad oscillator som arbetar i longitudinell singelmod med en genomsnittlig utgångseffekt som överstiger 1 W och en repetitionsfrekvens som överstiger 1 kHz om "varaktigheten hos pulsen" är mindre än 100 ns.
  3. En våglängd som överstiger 800 nm, men inte 1 400 nm, och har något av följande:
    - a) En utgångsenergi som överstiger 0,5 J/puls och en pulsad "toppeffekt" som





3. en pulsrepetitionsfrekvens högre än 1 kHz, och
4. en pulsbredd mindre än 100 ns.

*Anm.: Avsnittet 6A205.c omfattar inte single-mode oscillatorer.*

- d) Pulsade koldioxid-"lasrar" med alla följande egenskaper:
  1. Verksam vid våglängder mellan 9 000 nm och 11 000 nm,
  2. med en pulsrepetitionsfrekvens som är högre än 250 Hz,
  3. en medeleffekt större än 500 W och
  4. en pulsbredd mindre än 200 ns.
- e) Para-vätefyllda Ramaceller utformade att arbeta vid en utgående våglängd av 16  $\mu\text{m}$  och en repetitionsfrekvens som är högre än 250 Hz.
- f) Pulsexiterade "Q-switchade lasrar" neodym-dopade (andra än glas) "lasrar" med alla följande egenskaper:
  1. En utgångsvåglängd som överskrider 1 000 nm men inte 1 100 nm,
  2. en varaktighet hos pulsen som är lika med 1 ns eller mer, och
  3. multipla transversella moder med en medeluteffekt på mer än 50 W.

## BILAGA 2

### Utdrag ur rapport från ISIS<sup>1</sup> om Iraks laseranrikningsprogram

#### The laser enrichment program

In May 1994, the IAEA learned from member states that Iraq had pursued uranium enrichment through laser isotope separation (LIS) at the Al Tuwaitha site. According to member states, Iraq had studied both molecular (MLIS) and atomic vapor (AVLIS) technologies.

In 1991, Iraqi officials denied that Iraq had undertaken any laser enrichment activities. During the 26<sup>th</sup> IAEA inspection in the summer of 1994, after continuing to deny the existence of the program for four days, Iraqi officials finally admitted that the existing Laser Section 6240 had 'received an objective [in 1981] from the Atomic Energy Commission to work in Laser Isotope Separation.'

Following Hussein Kamel's defection, Iraq provided more information about its laser separation program. However, the basic story has remained unchanged. In 1987, with little progress to show, the program was downgraded to a 'watching brief' and a number of key personnel were transferred to other programs, particularly EMIS. The remaining personnel in the Laser Section worked in basic research and in improving Iraq's scientific expertise.

The IAEA concluded that Iraq's LIS program was loosely coordinated, largely empirical and had not made much progress. The inspectors found no indications that this program had reached the point of an integrated experiment that separated any uranium, although a rudimentary laser excitation experiment related to MLIS was carried out on 1 gram of uranium hexafluoride.

According to statements made by Iraqis to the inspectors, export controls and voluntary refusals by several suppliers had prevented the Iraqi program from importing critical pieces of equipment, such as advanced laser instrumentation and related accessories.

---

<sup>1</sup> Institute for Science and International Security, [http://www.isis-online.org/publications/iraq/iraqs\\_fm\\_history.html](http://www.isis-online.org/publications/iraq/iraqs_fm_history.html)

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

**STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION**  
Swedish Nuclear Power Inspectorate

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

**BESÖK/OFFICE** Klarabergsviadukten 90

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

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

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

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