



Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Per Andersson,  
Fredrik Nielsen,  
Daniel Sundhede

Forskning

# 2015:15

Användning av låg- och hög-  
anrikt uran

– en studie från ett icke-spridningsperspektiv



## SSM perspektiv

### Bakgrund

Arbetet med att ersätta höganrikat uran med låganrikat uran i forskningsreaktorer och i reaktorer för produktion av medicinska isotoper har pågått i flera decennier. Fortfarande finns höganrikat uran för civilt bruk i flera länder och det förs en internationell diskussion hur den mängden kan minska för att minimera risken för spridning till militära användningsområden. Om civila forskningsreaktorer och strålmål kan konverteras till att använda låganrikat uran kan motiven för att producera höganrikat uran försvinna.

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, fungerar som teknisk rådgivare till SSM inom nukleär icke-spridning. FOI har tidigare studerat andra områden inom kärnbränslecykeln med fokus på icke-spridning och exportkontroll på uppdrag av SSM, varav de senaste berör och uppbyggnad av utbränt kärnbränsle (SSM rapport 2013:32) och utrustning för separation av stabila isotoper (SSM rapport 2015:13)

### Syfte

Målet för nukleär icke-spridning är att kärnämne, kärnteknisk utrustning och känslig teknisk information endast används för fredliga ändamål och inte kommer till användning för framställning av kärnladdningar. SSM har sett ett behov av att kompetensen bevaras och förnyas inom icke-spridningsområdet och FOI har fått i uppdrag att studera produkter och tekniker ur ett icke-spridningshänseende. Den här rapporten är resultatet av ett sådant projekt.

Rapporten beställdes för att öka kunskapen kring hur starka argumenten är att behålla höganrikat uran i forskningsreaktorer och i annan civil användning.

### Resultat

Rapporten ger en översiktlig bild av hur användningen av höganrikat uran ser ut i världen utanför de militära programmen samt beskriver och analyserar de tekniska svårigheter som en konvertering till låganrikat uran kan innebära. Rapporten fokuserar på det tekniska perspektivet, utrustning och spridningsrisker.

Vi har valt att låta rapporten vara översiktlig utan att gå in på detaljer för att inte sprida information som kan vara känslig. Därmed kan flera intressenter såsom andra myndigheter, berörd industri och intresseorganisationer få tillgång till resultatet. Förutom rapporten har projektet resulterat i att personal på FOI och SSM fått ökad insikt genom bl.a. litteraturstudier.

### Projekt information

Kontaktperson SSM: Henrik Moberg

Referens: SSM 2014-2812





Strål  
säkerhets  
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

**Författare:** Per Andersson, Fredrik Nielsen & Daniel Sundhede  
Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm

# 2015:15

## Användning av låg- och hög- anriktat uran

– en studie från ett icke-spridningsperspektiv

Datum: December 2014

Rapportnummer: 2015:15 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på [www.stralsakerhetsmyndigheten.se](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se)

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

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	<b>2</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Inledning</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Reaktormodifikationer</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Forskningsreaktorer</b> .....	<b>8</b>
3.1. HEU i forskningsreaktorer .....	8
3.2. Beräkningar.....	9
<b>4. HEU och medicinska isotoper</b> .....	<b>13</b>
4.1. Aktörer, problem och lösningar.....	14
4.2. Beräkningar.....	16
<b>5. Resultat</b> .....	<b>19</b>
<b>Bilaga</b> .....	<b>20</b>

# Sammanfattning

Höganrikat uran definieras som uran med en anrikning av  $^{235}\text{U}$  på minst 20 %. Att minska eller helt eliminera det civila användandet av höganrikat uran är ett viktigt led i internationellt icke-spridningsarbete. Till skillnad från plutonium är höganrikat uran inte en biprodukt utan framställs för ett specifikt ändamål. Detta innebär att om användandet av höganrikat uran kan minskas så minskar även skälen att framställa höganrikat uran. En stor del av allt höganrikat uran som tillverkats har använts i kärnvapenstaternas kärnladdningar, ubåtsreaktorer och militära reaktorer. En del används emellertid fortfarande i civila reaktorer, dels i reaktorer för forskningsändamål, dels i strålmål för framställning av medicinska isotoper.

Om dessa civila forskningsreaktorer och strålmål kan konverteras till att använda låganrikat uran kan mängden höganrikat uran i omlopp minskas samtidigt som motiven för att producera höganrikat uran försvinner. Vilka metoder som kan användas och hur effektiva dessa är har varit föremål för denna studie. Vad gäller forskningsreaktorer är det främst upprätthållandet av kriticitet i härden som är ett problem då låganrikat bränsle används i en reaktor avsedd för höganrikat bränsle. Beroende på hur mycket anrikningen ska sänkas krävs olika modifikationer. I gynnsamma fall kan det räcka att ändra bränslesammansättningen. Därmed kan samma typ av bränsleelement användas och härden kan i princip fortsätta att användas utan övriga modifikationer. I andra hand kan fler bränsleelement, eller bränsleelement innehållande fler eller större bränslestavar eller motsvarande användas. Därefter krävs mer omfattande modifikationer som inte med enkelhet kan genomföras. Även om en reaktor kan fås kritisk med lägre anrikning kommer energifördelningen i härdens neutronspektrum att förändras. Huruvida detta är godtagbart beror helt på vad reaktorn ska användas till.

För medicinsk isotopproduktion används strålmål av höganrikat uran för att kunna producera så mycket önskat material som möjligt i en liten volym. Inte minst är detta eftersträvarvärt på grund av den isotopseparation som måste äga rum efter bestrålning i reaktorn. Själva strålmålen är mycket små och påverkar emellertid inte neutronspektrumet i härden, och energifördelningen hos neutronerna i själva strålmålet påverkas endast i ringa omfattning. Detta innebär att en minskad anrikning i strålmålen kan kompenseras med fler eller större strålmål utan andra nackdelar än att större mängder bestrålat material måste isotopsepareras.



## Summary

Highly enriched uranium is defined as uranium enriched in  $^{235}\text{U}$  to 20 % or more. To decrease, or fully eliminate, civil use of highly enriched uranium, is an important step in international non-proliferation efforts. Unlike plutonium, highly-enriched uranium is not a by-product, but is produced with a specific purpose. This means, if the use of highly-enriched uranium could be reduced, the reason to produce highly-enriched uranium is decreased as well. A large part of all highly-enriched uranium that has been produced has been used in nuclear warheads, submarine reactors, and military reactors of the nuclear weapon states. However, a part is still used in civil nuclear reactors, either in research reactors, or in radiation targets for production of medical isotopes.

If these research reactors and radiation targets could be converted to use low-enriched uranium, the amount of highly-enriched uranium in circulation could be reduced, while also reducing the motives for further production of highly-enriched uranium. Possible methods to achieve this, and their effectiveness, have been the object of this study. Regarding research reactors, the main concern is the ability to maintain criticality when low enriched uranium is used in a reactor designed for highly-enriched uranium. Depending on how much the enrichment is to be decreased, different methods are needed. Under favorable conditions, it could be enough to change the fuel composition. In that case, the same type of fuel elements could be used and the reactor core could be used without further modifications. Other than that, more fuel elements, or fuel elements with more or larger fuel pins or fuel plates could be used. To reduce the enrichment even further, more extensive modifications are necessary. Even if criticality could be maintained with reduced enrichment, the energy distribution of the neutron spectrum in the core will be different, with higher prevalence of thermal neutrons. Whether this is acceptable depends on what the reactor will be used to.

For medical isotope production, highly-enriched radiation targets are used in order to produce large amounts of the desired isotope in a small volume. This is desirable because of the isotope separation necessary after irradiation in the core. The radiation targets are very small and do not affect the neutron spectrum in the core, and the energy distribution of the neutrons in the targets themselves are hardly affected by the enrichment. This means that lower enrichment could be compensated for by introducing more or larger targets, without other drawbacks than the need to separate more radiated material.

# 1. Inledning

Arbetet med att ersätta höganrikat uran (HEU) med låganrikat (LEU) i forskningsreaktorer och i reaktorer för produktion av medicinska isotoper runt om i världen har pågått i flera decennier med i huvudsak gott resultat. Fortfarande kvarstår emellertid ett antal civila reaktorer och så kallade *critical assemblies*<sup>1</sup> som är laddade med bränsle vars anrikningsgrad överstiger 20 %. Denna rapport försöker dels ge en översiktlig bild av hur användningen av höganrikat uran ser ut i världen utanför de militära programmen, dels beskriva och analysera de tekniska svårigheter som en konvertering till låganrikat uran kan innebära och vilka begränsningar den kan ge.

Höganrikat uran, det vill säga uran som är anrikat så att halten <sup>235</sup>U överstiger 20 %, används civilt framför allt i tre sammanhang:

- som bränsle i forskningsreaktorer
- i så kallade *critical assemblies*, det vill säga oftast små och kompakta klot av höganrikat uran (eller plutonium) som kan göras kritiska genom ändring av geometri, moderering, mängd material eller reflektor och som används för flera olika forskningsändamål
- i strålmål för produktion av medicinska isotoper

De olika användningsområdena ställer olika krav och ger olika svårigheter och kräver också olika lösningar, vilket undersöks i den här studien.

Arbetet med att konvertera från hög- till låganrikat uran motiveras av risken för spridning till militära användningsområden. Gränsen för vilken anrikningsgrad som krävs för att uran ska kunna utnyttjas i ett praktiskt användbart kärnvapen är givetvis en mycket känslig uppgift. För att undvika att ge proliferatörer ett recept och samtidigt bibehålla en god säkerhetsmarginal har gränsen bestämts<sup>2</sup> till 20 % men den praktiska gränsen ligger i storleksordningen 80–90 %. Det kan vara värt att notera att varken ickespridningsavtalet NPT, IAEA eller Nuclear Suppliers Group gör någon egen strikt uppdelning mellan hög- och låganrikat uran utan det är den amerikanska standarden som har anammats som internationell de facto-standard. Det HEU som används och har använts civilt kommer direkt eller indirekt från de olika kärnvapenstaternas vapenprogram och de däri ingående anrikningsanläggningarna. Huvuddelen av allt uranbränsle som används i dag är anrikat till 3,5–5,0 %, och de anläggningar som anrikar uran är optimerade för denna anrikningsgrad. Det krävs avsevärda förändringar av de anläggningar som i dag producerar LEU för att de ska kunna producera HEU, vilket inte är ekonomiskt försvarbart för de relativt små mängder det är frågan om. För exempelvis gascentrifugering erfordras mycket långa kaskader för anrikning till HEU, även för mycket små mängder.

Man kan något förenklat säga att man i så kallade nolleffektshärdar<sup>3</sup> använder HEU anrikat till ca 35 % <sup>235</sup>U, i forskningsreaktorer 30–90 %, i *critical assemblies* över 90 %, i strålmål för produktion av medicinska isotoper 80–90 % och slutligen som

---

<sup>1</sup> Det saknas en bra svensk översättning för detta uttryck varför vi kommer att använda den engelska termen i denna rapport. En direkt översättning till svenska är kritiska uppställningar, vilket ganska väl beskriver vad det är frågan om.

<sup>2</sup> American Society of Standards and Testing materials (ASTM) Designation C 1462-00

<sup>3</sup> Nolleffektshärdar är oftast små härdar med försumbar effekt som kan användas för forskning och utbildning.

plutoniums substitut i bränsleforskning för snabba biederreaktorer där anrikningsgrader mellan 40 och 60 % är vanliga<sup>4</sup>.

Arbetet med att minimera – och helst eliminera – all civil användning av HEU tog fart 1978 när USA:s Department of Energy lanserade programmet *Reduced Enrichment for Research and Test Reactors* (RERTR). RERTR, som numera är en del av GTRI (*Global Threat Reduction Initiative*), drivs av *National Nuclear Security Administration* (NNSA)<sup>5</sup>. Genom programmet finansieras ett antal forskningsprojekt vars mål är att hitta fullgoda lösningar där LEU kan användas istället för HEU likväl som rena ombyggnationer och i vissa fall omcertifieringar av reaktorerna. Den största minskningen av det globala innehavet av HEU har skett genom att framför allt USA och Ryssland har förklarat delar av sitt militära innehav som överflödiga och påbörjat processen med att omvandla dessa till LEU i form av bränsle. År 2013 fördelades det totala innehavet av HEU<sup>6</sup> enligt tabell 1. Det bör noteras att de angivna mängderna endast är uppskattningar då rapporteringen av kärnvapenstaternas militära innehav, dit även bränsle för marina reaktorer räknas, är helt frivillig och inte uppdateras regelbundet. De olika länderna har dessutom olika beräkningsgrunder när de rapporterar sitt militära innehav, se den angivna referensen. Tabell 1 anger totalt innehav, militärt innehav samt den kvarvarande mängd HEU av det militära innehavet som länderna har förklarat som överflödigt och som ännu inte har omvandlats till LEU. Denna mängd räknas inte som militär i tabellen, även om materialet ursprungligen tillverkats för militär användning. Differensen mellan den totala mängden och den militära tillsammans med den överflödiga utgörs av civilt HEU under IAEA:s översyn. Det framgår tydligt att den differensen inte överensstämmer med de mängder civilt HEU som IAEA rapporterar om och som står under deras översyn, se nedan. Detta beror dels på de stora osäkerheter som finns i de uppskattningar som finns av det totala innehavet, dels på vad som faktiskt rapporteras. IAEA anger mängden <sup>235</sup>U oavsett anrikningsgrad samtidigt som många andra källor anger den totala mängden HEU. 1 ton HEU anrikat till 40 % skulle IAEA ange som 400 kg samtidigt som t.ex. ryska eller amerikanska redovisningar över HEU-innehav skulle rapportera 1 ton. Denna skillnad skulle kunna vara motiverad av en ovilja bland kärnvapenstaterna att avslöja anrikningsgraden på det militära innehavet, som i sin tur skulle kunna ge ledtrådar om de tekniska lösningar de använder i sina kärnvapen. Det kan noteras att USA och Ryssland tillsammans fram till 2013 har konverterat 629 ton överflödigt HEU till LEU.

**Tabell 1:** Militära lager av HEU.

Land	Total mängd HEU (ton)	Militärt HEU (ton)	Överflödigt mängd (ton)
USA	595	512	63
Ryssland	695±120	646±120	29
Frankrike	26	21,3	0
Storbritannien	21,2	19,8	0
Kina <sup>7</sup>	16±4	16±4	0
Övriga	20±5	0	0
<b>Totalt</b>	<b>1373±129</b>	<b>1215±124</b>	<b>92</b>

<sup>4</sup> I de typiska härdar som räknas till den så kallade Generation IV och som planeras drivas med uranbränsle har man valt bränsle med en anrikningsgrad understigande 20 %, oftast 14-19 %. De högre anrikningsgraderna, 40-60 % används när plutoniums högre reaktivitet ska efterliknas.

<sup>5</sup> <http://nnsa.energy.gov/about/ourprograms/dnn/gtri>

<sup>6</sup> International Panel of Fissile Material: Global Fissile Material Report 2013

<sup>7</sup> I praktiken är delar av det kinesiska innehavet civilt men formellt står allt HEU under militärens kontroll.

Den 31 december 2013 rapporterade IAEA<sup>8</sup> att det globalt fanns 191 *Significant Quantities* av civilt HEU<sup>9</sup> (motsvarande något under 4,8 ton rent <sup>235</sup>U) med varierad anrikningsgrad. För 2011 och 2012 var antalet *Significant Quantities* 215 respektive 212. Huvuddelen av detta civila HEU, ca 10 ton, kommer från den reaktor av typ BN-350 som Kazakstan lät stänga 1999. Stora delar av det använda bränslet i den reaktorhärden är anrikat till under 20 % men det gjordes även försök med bränsle anrikat till 33 % och genomsnittet för hela härden överstiger 20 % varför hela bränslemängden räknas som HEU. I december 2012 hade 33 länder minst ett kilo HEU i någon form inom landet<sup>10</sup>. Under 2013 har allt HEU avlägsnats från forskningsreaktorer i Tjeckien, Ungern och Vietnam genom program i IAEA:s regi och avtal om konvertering av en forskningsreaktor på Jamaica har ingåtts.

---

<sup>8</sup> International Atomic Energy Agency Annual Report 2011, IAEA, Vienna, 2012, Annex, Table A.4, p. 109

<sup>9</sup> En *Significant Quantity* definieras av IAEA som den minsta mängd fissilt material som kan utgöra en risk vid vapenproduktion vilket för HEU har angivits som 25 kg <sup>235</sup>U, se [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/nvs-3-cd/PDF/NVS3\\_prn.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/nvs-3-cd/PDF/NVS3_prn.pdf).

<sup>10</sup> <http://fissilematerials.org/materials/heu.html>

## 2. Reaktormodifikationer

Arbetet med att minska mängden HEU har som det framgår ovan två huvudinriktningar, dels ansträngningen att minimera tillgången på HEU, vilket sker genom olika program för insamling och omvandling av HEU till LEU, dels genom att minska efterfrågan på HEU. Det sker genom att så långt det är möjligt anpassa driften, eller om det så krävs, konstruktionen av de reaktorer som i dag använder bränsle tillverkat av HEU så att de istället kan drivas med LEU.

Om en reaktor laddas med bränsle med alltför låg anrikning jämfört med vad reaktorn är avsedd för kommer kriticitet inte att kunna uppnås. För att reaktorn ska kunna nå kriticitet krävs då vissa modifikationer. Den tekniskt kanske lättast genomförbara modifikationen är att ändra bränslets sammansättning. Om det är möjligt kan samma typ av bränsleelement användas och egentligen behöver inte reaktorn anpassas i något annat avseende. Avgörande för kriticitet i en reaktor är fria medelväglängden mellan fissila kärnor. Övriga komponenter i bränslet såsom  $^{238}\text{U}$ , syre och andra metaller interagerar förvisso med termiska neutroner men påverkar inte neutronekonomin i härden på ett avgörande sätt. Förenklat skulle alltså kriticitet kunna upprätthållas om anrikningen halveras samtidigt som den fissila delen av bränslet, det vill säga antalet  $^{235}\text{U}$ -atomer, per volymsenhet bibehålls genom olika metoder.

Höganrikat bränsle är ofta legerat med en annan metall. Upp till en gräns kan den andra metallen bytas ut mot bränsle för att på så vis kompensera för lägre anrikning. Icke-metalliskt och en del metalliskt bränsle innehåller oftast porer, och poröst bränsle kan göras mindre poröst vilket också leder till ökad täthet. Att kompensera för minskad anrikning genom att öka tätheten är bara möjligt upp till en gräns. Då bränslematrisen består helt och hållet av icke-poröst uranbränsle kan inte tätheten ökas ytterligare. Detta anger gränsen för hur låg anrikning bränslet kan ha utan att reaktorgeometrin behöver ändras.

Om skillnaden mellan den ursprungliga och den önskade bränsleanrikningen är för stor för att det ska gå att få reaktorn kritisk enbart genom att ändra bränslets sammansättning kan bränsleelementens utformning behöva ändras. Antingen kan antalet bränslestavar, bränsleplattor eller motsvarande ökas, eller så kan volymen av dessa ökas. Principen är även här att fria medelväglängden mellan fissila atomer ska bevaras. Skillnaden är att neutronflödet i härden påverkas eftersom bränslevolymen blir större, och därmed blir exempelvis moderatorvolymen mindre. Detta medför givetvis att det även här finns en gräns för hur låg anrikningen kan vara för bränsle som kan användas eftersom en reaktorhård utformas så att förhållandet mellan bränslevolym och moderatorvolym ska vara optimalt. Introduceras för stora bränslevolymer i härden medför den minskade moderatorvolymen att kriticiteten ändå minskar. Utöver skillnaden i neutronekonomi följer att själva bränsleelementen måste utformas annorlunda vilket innebär betydligt mer komplicerade modifikationer än då enbart själva bränslematrisen byts ut.

I sista hand kan det bli nödvändigt att ändra reaktorns utformning på ett mer omfattande sätt för att kunna använda bränsle med låg anrikning. En metod är att byta ut lättvattenmoderator mot tungvattenmoderator. Mer omfattande modifikationer innebär att själva härdinneslutningen måste bytas ut och man kan då knappast längre tala om en modifikation då det närmast rör sig om ett byte av reaktor.

## 3. Forskningsreaktorer

### 3.1. HEU i forskningsreaktorer

Forskningsreaktorer förekommer i ett stort antal olika storlekar och konfigurationer och de används inom en uppsjö av olika forskningsområden men gemensamt för i princip alla är att reaktorns uppgift är att generera neutroner som sedan kan användas för olika syften, till exempel för utprovning av material eller för bestrålning. Ibland är det härden i sig som utgör forskningsobjektet men återigen är flödet av neutroner en viktig parameter. För de forskningsreaktorer som enbart används som neutronkälla är härdens sammansättning och bränsle mindre viktig så länge neutronflödet och energifördelningen - spektrumet - är oförändrat. Som det framgår av diskussionen ovan kan det finnas begränsningar i hur mycket bränslet kan anpassas inom de begränsningar som härdens utformning utgör, men vissa kompromisser kan göras vad det gäller minskningar i flödet så länge spektrumet förblir oförändrat.

Omställningen från HEU till LEU bromsas inte alltid av tekniska skäl utan även ekonomiska och administrativa skäl. En anledning till att många forskningsreaktorer, framför allt de mindre, ursprungligen laddades med HEU var att de då skulle kunna drivas utan omladdning under hela reaktorns livslängd. Överlag fanns det under 1960- och 1970-talen då många av dessa reaktorer byggdes mer pengar tillgängligt för reaktorbaserad forskning än det finns i dag och många forskningsinstitutioner har helt enkelt inte råd att ladda om sina härdar, än mindre bygga om dem. Här har de medel som gjorts tillgängliga genom de amerikanska programmen RERTR och GTRI gjort stor skillnad.

Det finns också en tröghet i att konvertera härdar på grund av den tid och den arbetsinsats som det krävs för att förnya de certifikat och tillstånd som behövs för att driva reaktorn med en ny typ av bränsle. Detta kan i många fall betyda en process som tar flera år och som inte bara kostar stora summor pengar utan även stoppar all forskning under tiden reaktorn står still.

I december 2014 fanns 247 forskningsreaktorer över hela världen som är inrapporterade till IAEA som operativa<sup>11</sup> men huvuddelen av dem drivs redan med LEU och det är i dag bara en handfull som är laddade med HEU. Forskningsreaktorerna kan mycket grovt delas in i några få huvudgrupper, pool- eller tankreaktorer (med undergrupperna Triga och Argonaut) och MNSR<sup>12</sup>, samt ett antal mer eller mindre unika designar. En pool- eller tankreaktor består av en djup bassäng med eller utan lock där den oftast ganska kompakta härden står på botten av bassängen. Utöver detta gemensamma drag kan reaktorerna ta väldigt skilda former beroende på användningsområde. De kan ha bestrålningsplatser i härden i form av kanaler på olika positioner, strålrör för neutroner och olika former av instrumentering och reglersystem. Effekten kan variera från några få kilowatt för de minsta till flera hundra megawatt för de största.

Enligt den tillgängliga informationen från IAEA har alla MNSR-reaktorerna konverterats till LEU utom den pakistanska reaktorn PARR-2 där konverteringen ännu inte är helt genomförd, och den syriska härden som dock inte är i drift. Statusen för bränslet i denna härd är i dag inte helt fastställd då konverteringsarbetet har avbru-

<sup>11</sup> <http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx>

<sup>12</sup> Miniature Neutron Source Reactor. Denna kinesiska reaktortyp är en direkt kopia av den kanadensiska Slowpoke-reaktorn och är en tank-i-pool-reaktor men då den är så vanligt förekommande tilldelas den en egen huvudgrupp.

tits. Kinesiska källor rapporterar att bränslet är under kontroll men detta har inte bekräftats av obereonde källor. Triga-reaktorer har med framgång drivits med LEU och samtliga reaktorer av denna typ som tidigare drevs med HEU har nu konverterats till LEU<sup>13</sup>.

Ingen av de fem Argonaut-reaktorerna som konstruerats för att drivas med HEU har ännu konverterats men framgångsrika försök med LEU har genomförts vid University of Florida Training Reactor och både Japan och Österrike har meddelat att de avser att konvertera sina reaktorer. Nederländerna har ännu inte sagt något motsvarande om sin anläggning i Petten. Inte heller Frankrike har meddelat något intresse av att konvertera sin Argonaut-reaktor.

Av de kvarvarande reaktorerna av mycket varierande design och storlek som ursprungligen konstruerades för drift med HEU har huvuddelen konverterats. Det exakta antalet kvarvarande reaktorer som fortfarande drivs med HEU är något oklart då det är ett pågående arbete och olika länder rapporterar statusen på olika sätt men de ungefärliga antalen för härdar som laddats med HEU av potentiell vapenkvalitet<sup>14</sup> fördelas enligt följande: Frankrike 5, Tyskland 1, Italien 1, Kazakstan 1 och Storbritannien 2. Till detta kommer ett mindre antal i Ryssland och USA men då de är kärnvapenstater med ett stort överskott på HEU är dessa av mindre intresse ur spridningssynpunkt.

### 3.2. Beräkningar

För att undersöka möjligheterna att konvertera reaktorer till användning av låganrikt uran har en mängd härdberäkningar genomförts. För beräkningarna har skapats en modell av en lättvattenmodererad forskningsreaktor med höganrikt uranbränsle. Modellen är baserad på de uppgifter som finns tillgängliga om Tehran Research Reactor, TRR<sup>15,16,17</sup>. Detaljerade uppgifter om reaktormodellen finns i bilaga i slutet av rapporten. TRR utgör ett lämpligt studieobjekt i flera avseenden. Dels är reaktorn tämligen representativ för de reaktorer som kan komma i fråga för konvertering, dels är den förhållandevis enkel i sin utformning och flexibel avseende härdkonfiguration, dels finns utförliga uppgifter tillgängliga som möjliggör detaljerade härdberäkningar. Kriticitetsberäkningarna har gjorts med neutrontransportkoden MCNP 5 och utbränningsberäkningarna har gjorts med utbränningskoden SCALE 6.1. Modellen beskriver hela reaktorn med bränslekanaler, styrcavar och eventuella bestrålningskanaler för strålmål. Bränsleelementen består av tunna plattor, i grundutförande aluminiumlegerat urandioxidbränsle i aluminiumneslutning. Exempel på härdkonfiguration ses i figur 1 och ett bränsleelement visas i figur 2. För både kriticitets- och utbränningsberäkningar är det viktigt att neutronflödena kan modelleras så noggrant som möjligt. Härdens kriticitet som funktion av styrcavarnas införande visas i figur 3.

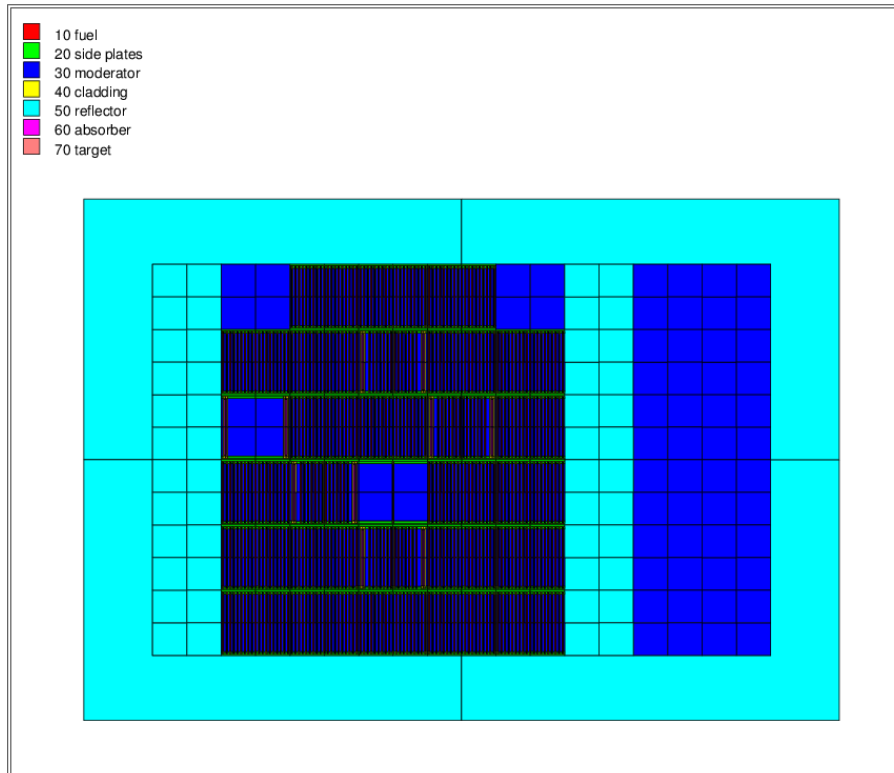
<sup>13</sup> Mexico var det sista landet att konvertera sin Triga-reaktor, se <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical-Areas/RRS/conversion-mexico.html>

<sup>14</sup> Det bör noteras att bränsle som har bestrålats i en härd, även om bara en kort tid, är så kraftigt radioaktiv att det är omöjligt att på något realistiskt sätt använda uranet för att tillverka ett kärnvapen. Många reaktorer levererades dock med reservbränsle som i många fall ännu inte bestrålats.

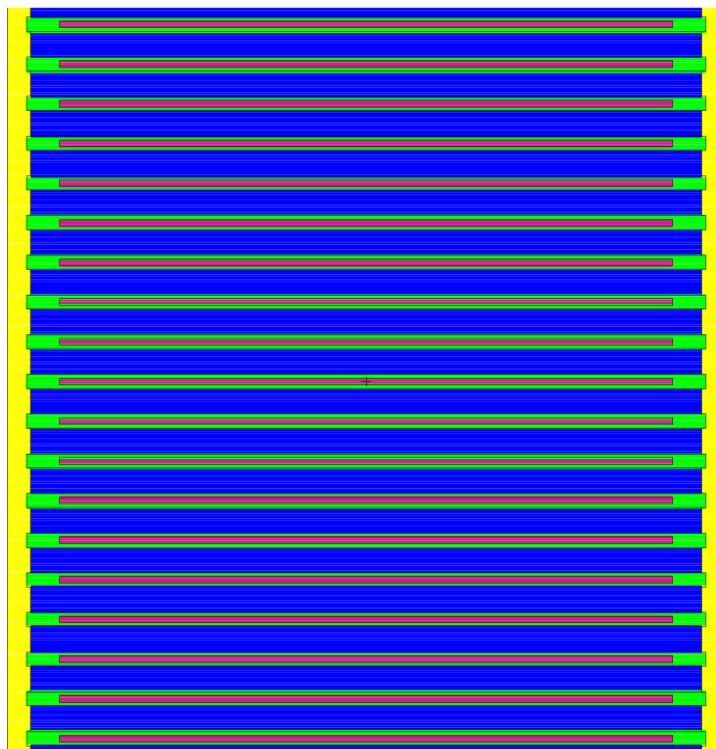
<sup>15</sup> Khalafi, H, Gharib, M, 1999, Computational tools to conduct experimental optimization in Tehran research reactor

<sup>16</sup> Gharib, M, Arkani, M, Hossnirokh, A, 2010, Design and application of MTR fuel assemblies in new proposed inverted mode

<sup>17</sup> Barati, R, Setayeshi, S, 2013, Probabilistic Safety Assessment of Tehran research reactor based on a synergy between plant topology and hierarchical evolutions

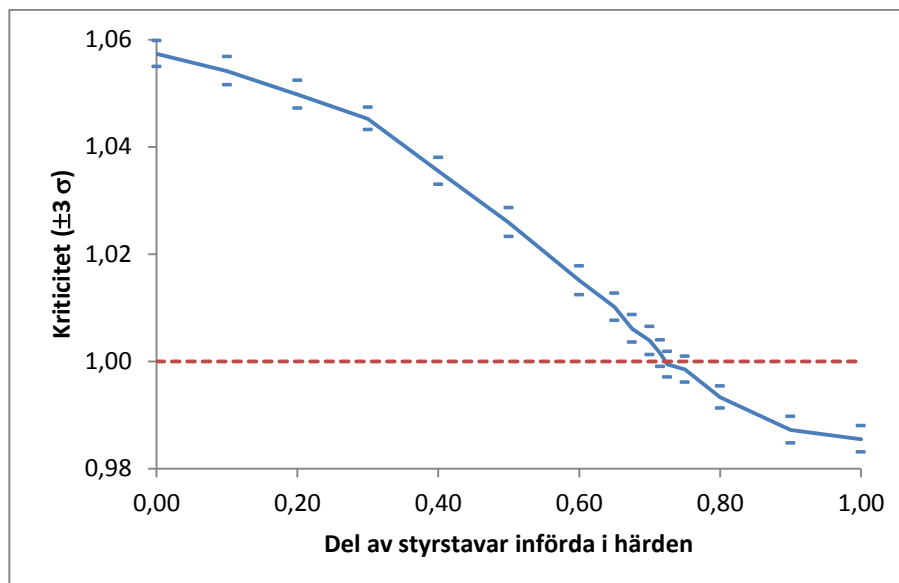


**Figur 1:** Tvärsnitt av härdkonfiguration. Härden är modulär och kan konfigureras om efter behov.



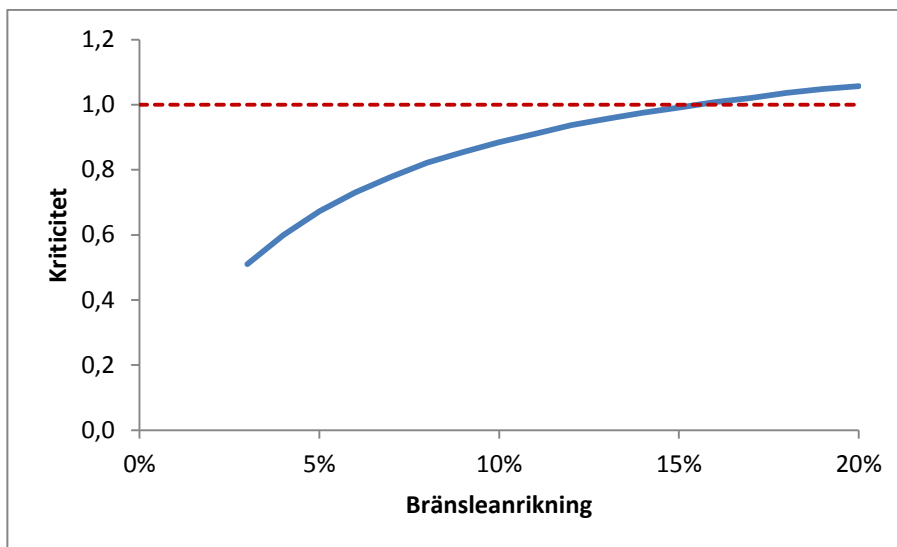
**Figur 2.** Standardbränsleelement bestående av 19 bränsleplattor. Bränslet utgörs av tunna plattor AlU-oxid inkapslat i aluminium.



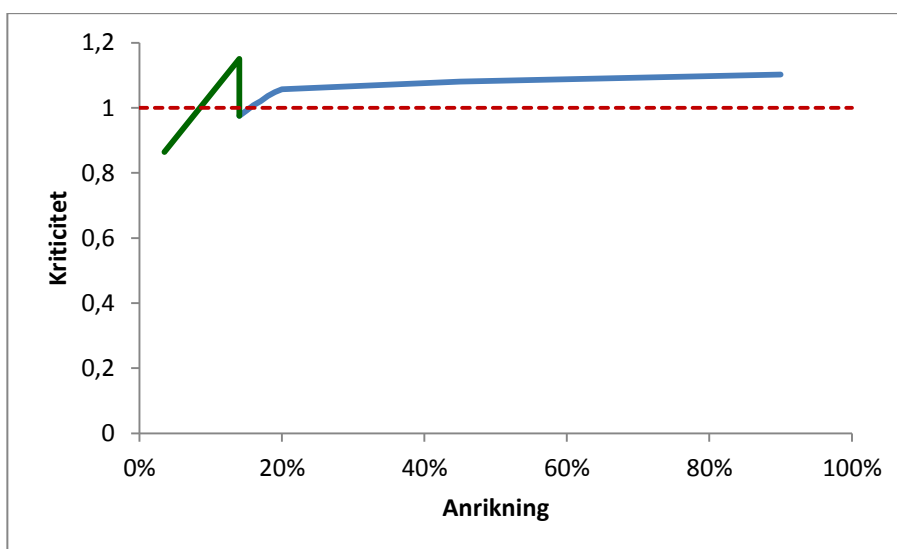


**Figur 3:** Kriticitet som funktion av hur stor del av styrvastavarna som är införd i kärnan.

Det mest uppenbara problemet vid byte av höganriktat till låganriktat uranbränsle är den minskade kriticiteten i reaktorn. De metoder som nämnts tidigare har studerats för att undersöka hur väl de lämpar sig för att konvertera en reaktor. I figur 4 åskådliggörs att en kärna, i det här fallet avsedd för bränsle anriktat till 20 %, blir underkritisk då bränsle med lägre anrikning används. För att kompensera för minskad anrikning kan tätheten hos de fissila atomerna bibehållas. Utan att göra om geometrin på bränslet ändrades anrikningen, samtidigt som bränslesammansättningen ändrades för att bevara tätheten av  $^{235}\text{U}$ -atomer. Vid hög anrikning användes aluminiumlegerat bränsle och ju högre anrikning, desto större andel aluminium. Vid lägre anrikningar har rent urandioxidbränsle använts. I figur 5 visas kriticiteten som funktion av anrikningen hos bränslet. Den blå delen visar aluminiumlegerat bränsle medan den gröna delen visar rent urandioxidbränsle. Ökningen i kriticitet beror på övergången till rent urandioxidbränsle då kriticiteten annars skulle understiga 1. Som synes finns en gräns vid vilken reaktorn inte kan fås kritisk oavsett bränslets sammansättning. Denna gräns varierar för olika reaktorer och beror ytterst på hurdana bränsleelement som används. Om det generella fallet kan enbart sägas att ju högre anrikning en reaktor är avsedd för, desto svårare är det att anpassa bränslet till låg anrikning.



**Figur 4:** Maximal kriticitet som funktion av bränsleanrikning i hård avsedd för bränsle med 20 % anrikning.



**Figur 5:** Kriticitet som funktion av bränsleanrikning med bevarat täthet av fissila atomer i bränslet.

## 4. HEU och medicinska isotoper

Det område där konverteringen från HEU till LEU har stött på störst motstånd är inom produktionen av medicinska isotoper, ett motstånd som i huvudsak motiveras av ekonomiska skäl. Det rör sig främst  $^{99}\text{Mo}$  som i sin tur sönderfaller till  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  som är den isotop som används vid den faktiska behandlingen. HEU används i de strålmål, *targets*, som placeras i en reaktorhård där kärnor av  $^{235}\text{U}$  klyvs genom den intensiva neutronbestrålningen. Processen är densamma som i resten av hårdens där  $^{235}\text{U}$  fissioneras. Det  $^{99}\text{Mo}$  som då skapas som en fissionsprodukt är relativt kortlivat med en halveringstid på 66 h. På grund av den korta halveringstiden kan inte medicinska isotoper lagras utan måste produceras kontinuerligt. Detta medför att strålmålen är mycket små, i allmänhet bråkdelar av ett gram. Tack vare att de separata strålmålen, till skillnad från bränslet, lätt går att ta ut ur hårdens efter en kortare bestrålningstid, kan den producerade isotopen tillvaratas. I kärnreaktorer är det bara urankärnor av isotopen  $^{235}\text{U}$  som kan klyvas. För att kunna klyva även  $^{238}\text{U}$  krävs det betydligt högre neutronenergier, högre än de som förekommer i snabba reaktorer. För att maximera antalet fissioner och därmed även produktionen av  $^{99}\text{Mo}$  vill man därför ha en så stor täthet som möjligt av  $^{235}\text{U}$  i strålmålet vilket fås om man använder HEU. Den kärnreaktor som behövs för att generera de neutroner som behövs för att bestråla målet kan drivas av såväl LEU som HEU. Ett typiskt strålmål<sup>18</sup> består av en platta av aluminium fylld med en uran-aluminium-legering med en densitet mellan 1 och 4 gram per  $\text{cm}^3$  men det förekommer även, var för sig eller i kombination, inkapslingar av rostfritt stål och fyllningar av metalliskt uran (högre densitet) eller uranoxid (lägre densitet). Anrikningsgraden<sup>19</sup> är vanligen runt 93 %, men till exempel Sydafrika använde strålmål anrikade till 45 % innan de konverterade till LEU, se nedan.

Det har genom praktiska försök visat sig vara fullt möjligt att producera  $^{99}\text{Mo}$  i tillräcklig mängd även med strålmål bestående av LEU. Till exempel har Sydafrika sedan 2010 helt gått över till att använda LEU för produktion av  $^{99}\text{Mo}$ , både i hårdens och i strålmålen<sup>20</sup>. I de allra flesta fallen kan strålmålen göras större, eller fler, eller med mer så kallad *meat*, det vill säga med större andel fissilt material, i förhållande till inkapsling och andra strukturella komponenter i strålmålet. Om en legering eller blandning med en lägre densitet än metalliskt uran har använts är det i många fall möjligt att i stället välja *meat* med en högre densitet. De alternativ som främst har diskuterats är strålmål med tunna uranmetallfolier,  $\text{U}_3\text{Si}_2$  samt U-Al-matriser med ökad densitet. De två första varianterna kräver ändrade metoder för att upparbeta strålmålet och tillvarata molybdeniumet jämfört med den metod som i dag används för de vanligare U-Al-strålmålen. Det kan vara värt att notera att det i forskningsreaktorsammanhang studerade ersättningsbränslet U-Mo-matriser, som kan ge en urandensitet på över 9 gram uran per  $\text{cm}^3$  *meat*, inte kan användas då det är mycket svårt och kostsamt att separera den efterfrågade isotopen  $^{99}\text{Mo}$  från den vanligare  $^{98}\text{Mo}$  som skulle finnas i bränslematrisen.

Oavsett vilken metod som väljs för att bibehålla mängden  $^{235}\text{U}$  i strålmålen så kommer det att krävas en omfattande utvärdering och omcertifiering som garanterar säkerheten både i hårdens och vid upparbetningen av strålmålet samt kvaliteten på

<sup>18</sup> IAEA-TECDOC-1340 Manual for reactor produced radioisotopes.

<sup>19</sup> Medical Isotope Production Without Highly Enriched Uranium, National Research Council of the National Academies, The National Academies Press, Washington, D.C, 2009.

<sup>20</sup> NNSA, "Record levels of non-HEU-based Mo-99 supplied to the United States," June 2, 2011, <http://www.nnsa.energy.gov>; Chloe Colby, "The Conversion of South Africa's Medical Isotope Production from HEU to LEU: Policy Implications for Global Conversion," May 2011, <http://www.heuphaseout.org>

den färdiga produkten, vilket är en både lång och kostsam process. Framför allt certifieringen av den färdiga produkten är komplicerad eftersom den av nödvändighet måste ske efter det att konverteringen, med de kostnader och eventuella stillestånd som det innebär, redan genomförts. Eftersom det inte går att lagerhålla  $^{99}\text{Mo}$  så innebär detta ett inkomstbortfall under den tid det tar att certifiera produkten. Den viktigaste parametern vid certifieringen är halten av icke önskvärda instabila fissionsprodukter, med tanke på att preparatet ska användas för injicering i kroppen där okontrollerad joniserande strålning kan orsaka avsevärd skada. Även de ändringar som görs av strålmålets geometri, inkapsling och sammansättning leder till omfattande krav på omcertifiering av reaktorn.

#### 4.1. Aktörer, problem och lösningar

Produktionen av  $^{99}\text{Mo}$  domineras i dag fullständigt av fyra aktörer<sup>21</sup>: MDS-Nordion, Covidien (tidigare Mallinckrodt), Institute for Radioelements, IRE, och NPT Radioisotopes. Den färdiga produkten tillhandahålls sedan av bland annat Covidien (tidigare Mallinckrodt /TYCO Healthcare), Lantheus Medical Imaging (tidigare DuPont / Bristol-Myers Squibb), GE Healthcare (efter uppköp av Amersham) och IBA-Molecular (tidigare CISbio International). Den enskilt största delen, ca 40 %, av produktionen sker vid NRU-reaktorn i Chalk River, Kanada, ca 40-45 % i de tre europeiska reaktorerna HFR i Petten, Nederländerna; BR2 i Mol, Belgien och OSIRIS i Saclay, Frankrike. Resterande del produceras bland annat i Safari-reaktorn i Pelindaba, Sydafrika och av CNEA i Argentina, där de båda senare helt har gått över till att enbart använda LEU i både härden och strålmålet för produktionen av  $^{99}\text{Mo}$ . Gemensamt för samtliga reaktorer är att de är mer än 40 år gamla.

Reaktorerna samägs till viss del och utnyttjandet och framför allt de planerade produktionsstoppen är så långt det är möjligt koordinerade för att säkra tillgången på  $^{99}\text{Mo}$ . Både kostnaderna och priset varierar kraftigt beroende på tillgång och efterfrågan. I produktionsledet kan kostnaden variera med upp till 45 %<sup>19</sup> och i användarleden, det vill säga inom sjukvården, med ca 20 %. Då de olika reaktorerna även används till andra ändamål väljer de olika aktörerna att belasta produktionen av isotoper för medicinskt bruk med varierande andel av de fasta driftkostnaderna, både av praktiska och konkurrensbaserade skäl. Det är därför också svårt att ange en exakt ökning i pris för slutkunden som en konvertering från HEU till LEU i strålmålen skulle kunna leda till.

Om anrikningsgraden sänks från över 90 % till under 20 % i strålmålet kommer man oundvikligen att på något sätt behöva öka den totala uranmängden med ungefär en faktor 5, antingen genom att öka volymen *meat* eller genom att öka densiteten, se ovan. Detta kommer i sin tur ge en ökad materialmängd som behöver upparbetas och processas. Ämnet är noga studerat och flera heltäckande sammanfattningar med omfattande referenser är publicerade<sup>19</sup>. I de fall där man har möjligheten att fortsätta använda U-Al-matris i strålmålet, men med högre densitet och/eller mer *meat*, så kan de uppberedningsmetoder som använts tidigare även fortsättningsvis användas men med större volymer att behandla. Då det totala antalet  $^{235}\text{U}$ -kärnor i princip är konstant och betydligt mer utspädda så utgör den ökade totala mängden material inget problem från kriticitetssynpunkt, snarare tvärt om. Den ökade mängden bestrålat material ger förvisso en ökad stråldos vid uppberedning men den ökningen kompenseras till stor del av minskningen av vissa oönskade uranisotoper som vid höganrikning ökar i relativ andel, till och med snabbare än andelen  $^{235}\text{U}$ , se nedan.

<sup>21</sup> <http://www.euronuclear.org/1-information/news/medical-isotope-crisis.htm>

För de fall där den ursprungliga densiteten är så hög att endast strålmål av uranmetall kommer i fråga har en ny uppberedningsmetod<sup>22</sup> redan utvecklats och testats i laboratorieskala. Metoden kallas Cintichem och bygger på upplösning i syra<sup>23</sup>. Den ursprungliga metoden utnyttjar starka baser för upplösningen. Man har under utvecklingsarbetet kunnat konstatera att för det aktuella referensstrålmålet ökade utbytet av <sup>99</sup>Mo från 530 till 540 µCi utgående från totalt 16 g uran (15 g <sup>235</sup>U) i strålmålet anrikat till 93 % i en U-Al-matris i HEU-målet jämfört med 92 g uran (18 g <sup>235</sup>U) i form av en uranfolie anrikad till 19,8 % i LEU-målet. Den kraftigt ökade mängden <sup>238</sup>U i LEU-målet leder till en 25-faldig ökning av mängden plutonium som produceras genom neutroninfångning men samtidigt ger den lägre anrikningsgraden en betydligt lägre halt <sup>234</sup>U som anrikas parallellt med <sup>235</sup>U. Den totala α-aktiviteten stiger från 1310 µCi till 1560 µCi, en ökning med 19 %.

Den totala mängden material som initialt måste lösas upp i respektive fall är ungefär i samma storleksordning, men i nästa steg, där uranfraktionen hanteras, femfaldigas mängden material efter konverteringen. Emellertid kräver syrabaserad upplösning bara en femtedel så mycket vätska jämfört med den äldre alkaliska metoden, varför den totala volymen faktiskt minskar samtidigt som den totala aktiviteten i avfallet förblir ungefär densamma. Kvaliteten hos slutprodukten beror på mängden instabila föroreningar, framför allt i form av jod och rutenium. Den totala aktiviteten hos de oönskade isotoperna, oräknat uran och plutonium, blir betydligt lägre om LEU-mål används.

Utgående från den tidigare forskning som har genomförts kan man dra, den säkert något förenklade, slutsatsen att det inte finns några helt oöverstigliga tekniska problem som hindrar en konvertering till strålmål av LEU, vare sig i härden, vid beredningen av slutprodukten eller vad det gäller slutprodukternas kvalitet. Det är möjligt att de i dag existerande produktionsreaktorerna inte skulle klara av en omcertifiering, men en sådan analys ligger utanför denna rapportens omfattning. De återstående argumenten mot en konvertering är dels ekonomiska, nämligen att priset för den färdiga produkten skulle kunna öka så pass mycket att det skulle omöjliggöra eller försvåra behandlingar i den omfattning som det finns ett medicinskt behov av, dels en fråga om tillgång i förhållande till efterfrågan, en fråga som i sin tur beror både på det medicinska behovet och på priset per behandling.

Dessa två invändningar mot konvertering till låganrikat uran har studerats noggrant<sup>24</sup> och även om detaljerna skiljer sig i de olika studierna så är slutsatserna tämligen liknande. Det finns självklart flera osäkra faktorer som påverkar bedömningarna men även i de mer – ur ett produktionsvolymsmässigt perspektiv – negativa scenarierna, så sjunker tillgången från dagens producenter inte under efterfrågan före 2018. Detta beror i huvudsak på att flera av dagens produktionsreaktorer då har uppnått sin maximala livslängd. Emellertid ledde den bristsituation som rådde 2008 till att flera projekt för att bygga nya bestrålningsreaktorer initierades och flera anläggningar, bland annat i Ryssland och Frankrike, har redan påbörjats. Om samtliga planerade reaktorer och processanläggningar uppförs kommer inom de närmaste åren produktionskapaciteten överstiga den projicerade efterfrågan flera gånger om. Ett troligt scenario torde ligga någonstans mellan dessa två ytterligheter.

Produktionskostnadens ökning beror givetvis på hur lätt det är att ställa om produktionen för de olika reaktorerna och uppberedningsanläggningarna, som alla använder

<sup>22</sup> Vandegriff, G. 2005. Facts and Myths Concerning <sup>99</sup>Mo Production with HEU and LEU Targets. Presentation at the 2005 International RERT Meeting, Boston, MA, November 6-10.

<sup>23</sup> Foliebaserade strålmål och den tillhörande uppberedningsprocessen är ännu inte testad i full skala och beräknas vara tillgänglig för produktion tidigast 2018.

<sup>24</sup> Se bland annat OECD-NEA Rapport 7129, The Supply of Medical Radioisotopes, ISBN 978-92-64-99197-2

olika tekniska lösningar, men i bestrålningsledet beräknas kostnadsökningen ligga mellan 4 och 36 %. Ju längre ner i produktionskedjan man rör sig, desto mindre andel av kostnaden utgörs av kostnaden per bestrålad mängd  $^{99}\text{Mo}$ , varför prisökningen i konsumentled beräknas hamna mellan 1 och 8 % vilket i snitt motsvarar en ökning per undersökning på ca 10 kr i 2012 års kostnadsläge. Priset kan troligen sänkas ytterligare om de organisationer och myndigheter som licensierar den slutliga produkten väljer att behandla  $^{99}\text{Mo}$  producerat med utgångspunkt i LEU på samma basis som det producerat av HEU så att tillverkarna slipper skilja de två produktionslinjerna åt. 10 kr kan tyckas vara en försumbar ökning i förhållande till övriga kostnader associerade med en behandling, men studier av den handel som sker i dag med  $^{99}\text{Mo}$  visar tydligt att sjukvården nästan uteslutande köper  $^{99}\text{Mo}$  producerat med hjälp av HEU när båda typerna finns tillgängliga på marknaden under motsvarande villkor. Endast på de marknader där staten väljer att subventionera LEU-produkten (t.ex. USA) eller där endast LEU-producerat  $^{99}\text{Mo}$  finns tillgängligt (t.ex. Sydafrika) handlas det med några större mängder LEU-baserat material. Att reglering av marknaden, via antingen tvång eller subventioner, är en möjlig väg för att fasa ut HEU från  $^{99}\text{Mo}$ -marknaden är en slutsats som flera studier också drar.

## 4.2. Beräkningar

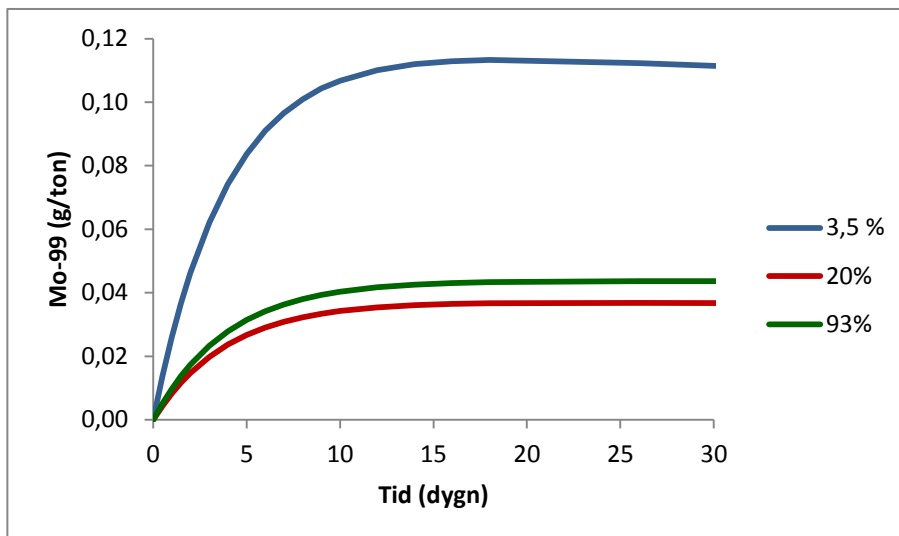
För att undersöka effekten av att byta från höganrikat till låganrikat uran vid produktion av medicinska isotoper har neutrontransport- och utbränningsberäkningar gjorts. För ändamålet har samma reaktormodell som för forskningsreaktorer använts. En parameterstudie har gjorts där bränsle och strålmål bytts ut till låganrikat uran, dels var och en för sig, dels samtidigt.

Vid alltför låg bränsleanrikning kan inte kriticitet nås i reaktorn.. För att göra en så rättvis jämförelse som möjligt mellan låganrikat och höganrikat uran har härdgeometrin bevarats för beräkningarna med låganrikat bränsle men ett neutronflöde motsvarande en kritisk reaktor har forcerats. Detta har gjorts för att kunna jämföra identiska härdar med olika bränsleanrikning. För jämförelsen har produktionen av  $^{99}\text{Mo}$  undersökts.

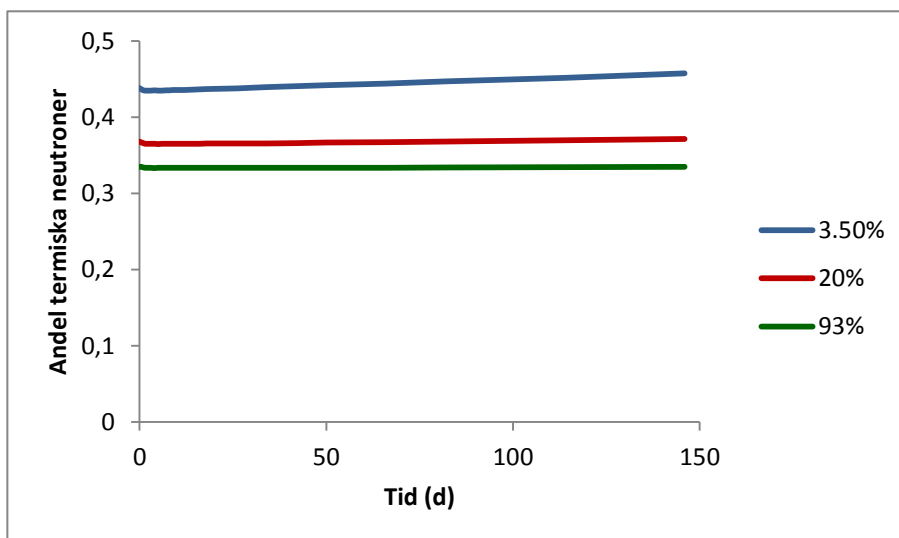
Sekulär jämvikt uppstår då produktionsraten för ett radioaktivt ämne är lika stor som sönderfallsraten. Halten av det radioaktiva ämnet är alltså oförändrad. I naturen uppstår sekulärjämvikt då en dotternuklid har mycket kortare halveringstid än modernukliden. I en reaktor kan jämvikt uppstå när sönderfallsraten är lika stor som summan av alla produktionsrater, där neutronaktivering i allmänhet är den dominerande termen. Vad gäller  $^{99}\text{Mo}$  uppstår något som liknar sekulärjämvikt, men på grund av att bränslesammansättningen, och därmed neutronflödet, förändras över tid, är halten inte helt konstant. På kort tid nås en maximal halt av  $^{99}\text{Mo}$  som därefter minskar mycket långsamt. Eftersom tiden för att nå denna maximala halt är mycket kort är det främst själva halten som är av betydelse för hur mycket molybden som kan produceras.

Produktionen av  $^{99}\text{Mo}$  har jämförts mellan de olika bränsleanrikningarna och visas i figur 6 nedan. Notera att neutronflödestätheten här har anpassats så att effekttätheten är densamma vid båda bränsleanrikningarna. Hur neutronflödestätheten i en verklig härd ser ut beror på vilka modifikationer som gjorts för att härden ska kunna hållas kritisk med låganrikat bränsle. Eftersom mängden  $^{99}\text{Mo}$  i strålmålet redan efter kort tid når sekulär jämvikt är det som tidigare nämnts inte produktionen per tidsenhet utan huvudsakligen den mängd som producerats när jämvikt uppnås som är intressant.

Som figur 6 visar är skillnaden i produktion marginell för bränsleanrikningarna på 20 % och 93 %. För låganrikat bränsle produceras däremot betydligt mer  $^{99}\text{Mo}$ . Orsaken till den högre produktionen är det betydligt mjukare neutronspektrumet hos låganrikat bränsle. I figur 7 visas andelen termiska neutroner vid de olika bränsleanrikningarna.



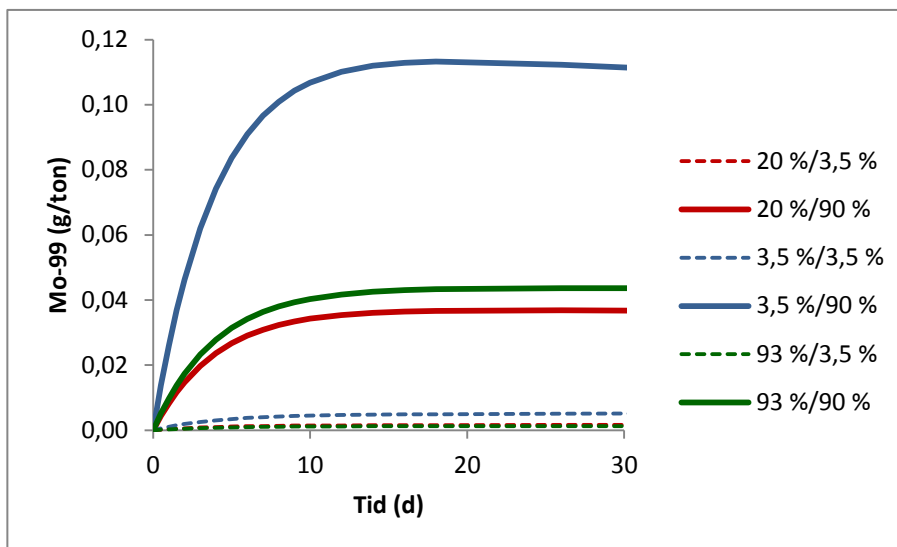
**Figur 6:** Produktion av  $^{99}\text{Mo}$ , angivet som koncentration i strålmålet, vid olika anrikning i bränslet.



**Figur 7:** Andel av neutronerna som ligger i den termiska delen av spektrumet för olika bränsleanrikningar.

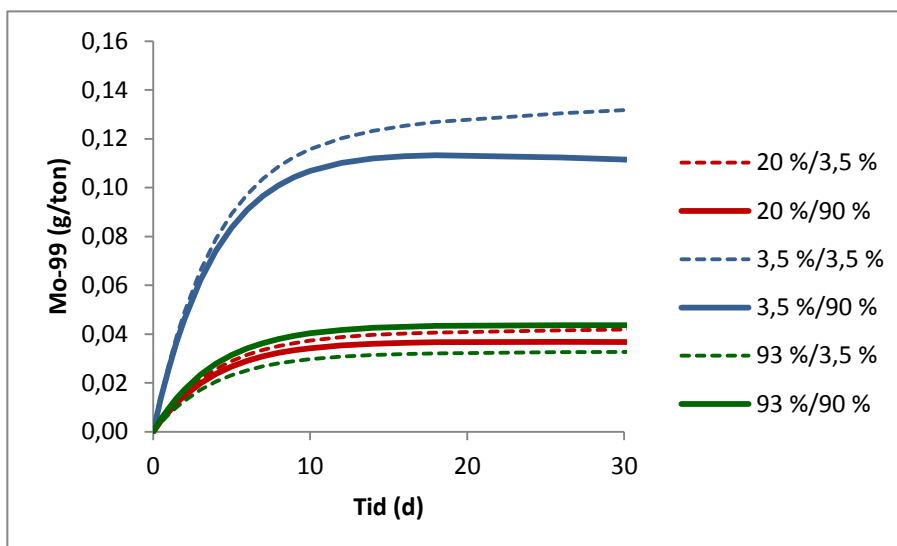
Även för härdar som använder låganrikat bränsle används ofta strålmål av höganrikat uran. Som synes i figur 8 minskar produktionen dramatiskt med strålmål av låganrikat uran. Om man jämför produktionen i förhållande till mängden  $^{235}\text{U}$  i strålmålet får man emellertid en liten ökning. Eftersom strålmålet tar upp en mycket liten del av härden och följaktligen inte påverkar neutronspektrumet i nämnvärd omfattning kan således den minskade produktionen kompenseras med ett större antal strålmål. Ett förfarande där en bestämd mängd höganrikat uran blandas ut till låganrikat uran skulle då leda till en marginell ökning av produktionen jämfört med att

använda strålmål av höganrikat uran. Produktionen i strålmål med olika anrikning men samma mängd  $^{235}\text{U}$  ses i figur 9.



**Figur 8:** Produktion av  $^{99}\text{Mo}$  angivet som koncentration i strålmål för olika anrikningar i bränsle och strålmål. Det första värdet anger anrikning i bränslet, det andra anrikning i strålmålet

Anrikningen hos själva bränslet ger en betydande skillnad i produktion. Den producerade mängden vid jämvikt, dvs. då ingen ytterligare nettoproduktion äger rum, blir ca tre gånger högre vid en bränsleanrikning på 3,50 % jämfört med 20,00 %. Som visades i figur 7 ovan ger det låganrikade bränslet ett något mjukare neutronspektrum, vilket leder till fler fissioner i strålmålet och därmed högre produktion. Anrikningen i själva strålmålet påverkar inte neutronspektrumet i härden över huvud taget och har endast marginell påverkan på spektrumet i strålmålet. Det är det marginellt mjukare spektrumet i själva strålmålet som ger upphov till den något ökade produktionen vid låganrikade strålmål.



**Figur 9:** Produktion av  $^{99}\text{Mo}$ , angivet som koncentration i strålmålet, med olika anrikning där mängden  $^{235}\text{U}$  i strålmålen är densamma. Det första värdet anger anrikning i bränslet, det andra anrikning i strålmålet.



## 5. Resultat

De beräkningar som gjorts visar att det centrala problemet då en reaktor konverteras från att använda höganrikat uran till att använda låganrikat uran är att bibehålla kriticitet. Genom att ändra bränslesammansättningen kan anrikningen sänkas till en viss gräns utan att särskilt omfattande modifikationer av reaktorn behöver göras. Sänks anrikningen för mycket kan reaktorn inte fås kritisk. Behöver anrikningen sänkas ytterligare måste mer omfattande förändringar utföras. Den mest genomförbara förändringen utöver att ändra bränslesammansättningen är att modifiera bränsleelementen. Dessa kan ändras till att innehålla fler eller större bränslestavar, bränsleplattor, eller motsvarande. På så vis upprätthålls kriticitet genom att mängden fissilt material bibehålls trots lägre anrikning. Även detta är bara görbart till en viss gräns. Behöver bränsleanrikningen sänkas ytterligare måste mer omfattande ändringar göras, såsom byte av moderator, och man kan inte längre prata om lätt genomförbara förändringar. Hur lätt en reaktor kan konverteras till att använda låganrikat uran beror således huvudsakligen på hur stor skillnaden i anrikning är mellan det bränsle reaktorn ursprungligen är avsedd för och det bränsle den ska konverteras till. Med lägre anrikning fås dessutom ett mjukare neutronspektrum i härden. Beroende på vad en forskningsreaktor är tänkt att användas till kan detta få mer eller mindre betydande konsekvenser. Experiment som kräver ett neutronspektrum med högre energier kan inte genomföras helt utan höganrikat uranbränsle i härden.

När det gäller produktion av medicinska isotoper är det anrikningen i själva strålmålet och inte nödvändigtvis i reaktorbränslet som ska sänkas, Anrikningen i strålmålet har mycket liten inverkan på själva produktionen av medicinska isotoper. Den minskning så fås beror på att de medicinska isotoper som eftersträvas är fissionsprodukter eller döttrar till fissionsprodukter, och mindre fissilt material ger mindre produktion av fissionsprodukter. Själva strålmålen är mycket små och påverkar inte neutronspektrumet i härden så detta kan följaktligen kompenseras för genom att använda fler eller större strålmål. Den enda nackdelen med den metoden är att det blir större volymer bestrålat material som måste isotopsepareras för att utvinna de önskade medicinska isotoperna. Vad gäller bränsleanrikningen ger låganrikat bränsle ett neutronspektrum med större andel termiska neutroner. Vid bibehållet neutronflöde kommer alltså en härd med låganrikat bränsle att vara mer effektiv vid produktion av medicinska isotoper.

# Bilaga

## Reaktordata

Reaktor	
Termisk effekt	5 MW
Bränslekanaler	6 × 9
Uran i härd	36.3 kg
Bränsle i härd	58.3 kg
Specifik effekt (metall)	137.8 kW/kg
Specifik effekt (bränsle)	85.8 kW/kg

Bränsleelement	
Längd	80.1 mm
Bredd	76.0 mm
Höjd	900.0 mm
<b>Laddningsvikt <sup>235</sup>U</b>	
Standardbränsleelement	290.7 g
Styrelement	214.2 g
<b>Antal bränsleelement i härd</b>	
Standardbränsleelement	22
Styrelement	4
<b>Antal aktiva bränsleplattor i element</b>	
Standardbränsleelement	19
Styrelement	14
<b>Antal dummy plates</b>	
Standardbränsleelement	0
Styrelement	4
Tjocklek, sidoplattd av aluminium	4.5 mm

<b>Bränsleplatta</b>	
Densitet	4.76 g·cm <sup>-3</sup>
<b>Viktandel (ej normerad i källan)</b>	
<sup>235</sup> U	0.1244
<sup>238</sup> U	0.4978
O	0.1117
Al	0.2650
Void	0.10
Anrikning	0.200
Tjocklek, vattenkanal	2.7 mm
Mellanrum, topp/botten <sup>1</sup>	1.5 mm
<b>Tjocklek, aktiva plattor</b>	
"meat"	0.7 mm
Cladding	0.4 mm
Totaltjocklek	1.5 mm
<b>Bredd</b>	
"meat"	65.0 mm
Totalbredd	72.0 mm
<b>Höjd</b>	
"meat"	615.0 mm
Totalhöjd	750.0 mm
<b>Kontrollplattor</b>	
Tjocklek	4.334 mm
Bredd	60.0 mm

<b>Shim safety rods</b>	
<b>Viktandel</b>	
Ag	0.8150
In	0.1360
Cd	0.0490
	1.0000
<b>Absorbant</b>	
Tjocklek	2.60 mm
Cladding	0.4 mm
Totalt	3.40 mm
Bredd	62.5 mm
Höjd	635 mm











2015:15

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

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

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Swedish Radiation Safety Authority

SE-17116 Stockholm  
Solna strandväg 96

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

E-mail: [registrator@ssm.se](mailto:registrator@ssm.se)  
Web: [stralsakerhetsmyndigheten.se](http://stralsakerhetsmyndigheten.se)