

A lézeres urándúsításról

Cserhádi András

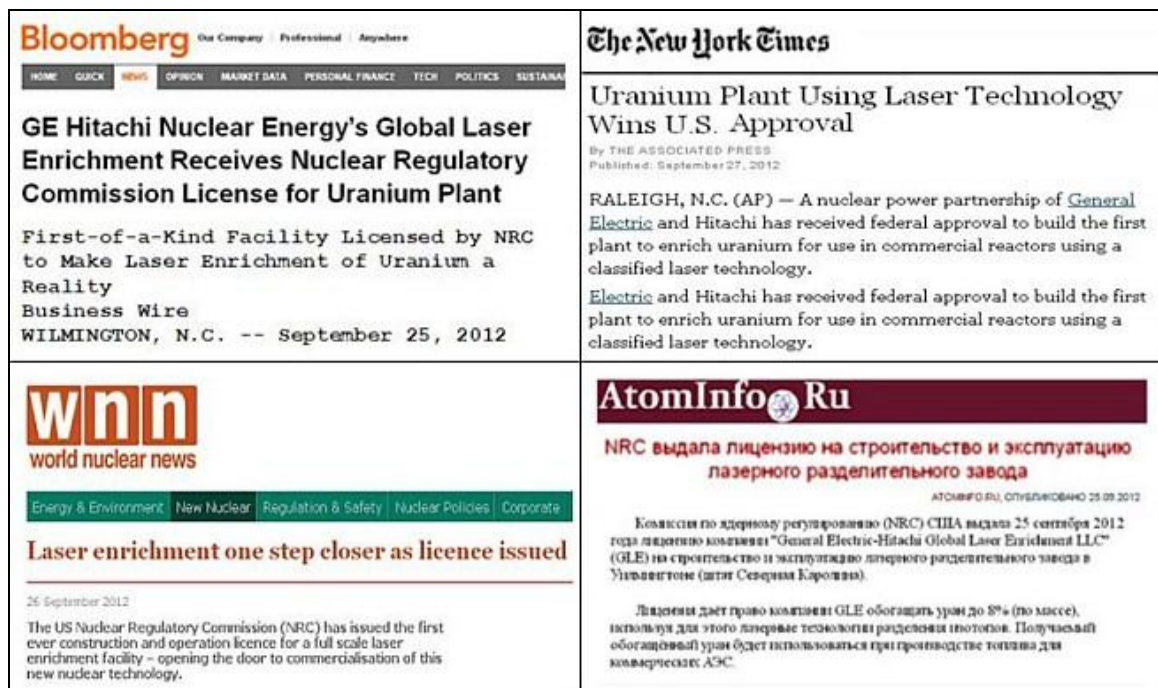
MVM Paksi Atomerőmű Zrt., Műszaki Igazgatóság
7031 Paks, Pf. 71. +3675 508 518

Ausztrál kutatók a kilencvenes években kifejlesztett harmadik generációs SILEX (Separation of Isotopes by Laser Excitation) eljárásában pontosan hangolt hullámhosszú lézerekkel csak az ^{235}U izotópok egy elektronszintjéről „lökkik ki” az oda kötött elektronokat és elektromágneses térrel választják el a keletkezett ionokat. Az ipari bevezetésre amerikaiakkal társultak. Az NRC 2012 szeptemberében engedélyt adott a lézeres urándúsításra: a Global Laser Enrichment projekt cég 6 millió SWU/év kapacitású urándúsítót építhet és üzemeltethet 8% dúsításig bezárólag. Az észak-karolinai Wilmingtonban 2014-ben kezdenék és 2020-ra futtatnák fel a termelést. A titkosított technológia olcsóbb, átrendezheti a piacot, csökkentheti az atomerőművek üzemanyagának árát. Azonban jelentős nukleáris fegyverzetkorlátozási kockázata is van, mert a kisebb üzemméret és energiaigény folytán nehezebben felderíthető és ellenőrizhető, ezért egyszerűbb vele az uránbomba alapanyag rejtett gyártása.

Bevezetés

2012. szeptember 25-én az amerikai nukleáris hatóság, a Nuclear Regulatory Commission (NRC) előzetes civil tiltakozások ellenére engedélyt adott lézeres urándúsító

létesítésére és üzemeltetésére az észak-karolinai Wilmingtonban. A hír nyomán felbolydult a gazdasági és nukleáris szaksajtó, és a vezető portálok. Néhány kiragadott tudósítás:



1. ábra: Gazdasági és nukleáris hírportálok a lézeres urándúsító létesítésére kiadott engedélyről (forrás: saját gyűjtés)

Alább látható lesz, hogy a felfokozott érdeklődés oka kettős:

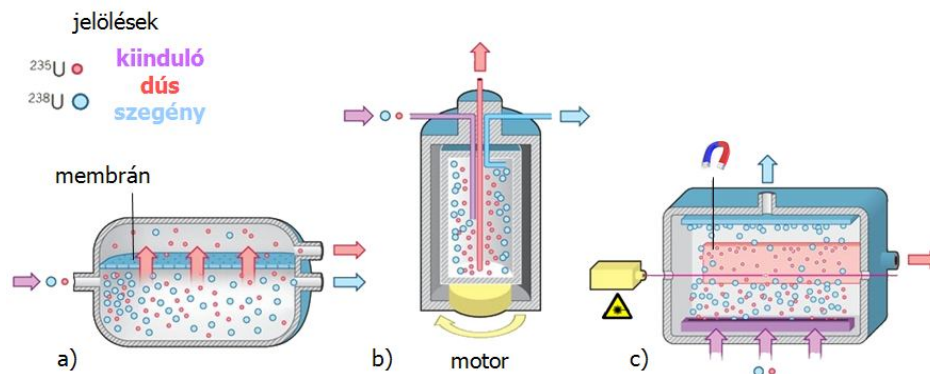
– az új generációs technológia minden bizonnyal áttörést hoz¹,

– hatékonyabb és olcsóbb az eddigieknél, valamint a bevezetése nukleáris fegyverzetkorlátozási problémákat vet fel.

¹ „game changer”

Főbb urándúsítási elvek

Először tekintsük át az eddig használt fontosabb urándúsítási módszereket:



2. ábra: Főbb urándúsítási generációk működési elvei: a) diffúzió, b) centrifuga, c) lézer [1]

Az ábrához és az elvekhez részletes szöveges magyarázat talán nem szükséges. A diffúziós eljárás azon alapul, hogy a könnyebb molekulák valamivel gyorsabban diffundálnak át egy membránon. A centrifugákban a nehezebb molekulák a rotor szélén, a könnyebbek a közepén gyűlnek össze. E módszerek a '40-es évek óta használatosak. A harmadik generációs lézeres technológia szelektíven ionizálja a könnyebb izotóp atomjait vagy disszociálja molekuláit.

A lézeres dúsítás alapvető irányai

Két fő irány alakult ki a fejlesztések során.[2] Alább ezek legfontosabb jegyei szerepelnek:

AVLIS (Atomic Vapour Laser Isotope Separation)

- **Bemenet:** elgőzöltetett fém urán.
- **Lézerek:** rendszerint két lézer; az első optikailag pumpálja (energiával tölti) a második, jól hangolható festéklézert, ami szelektíven gerjeszti és ionizálja az ^{235}U atomokat.
- **Begyűjtés:** az ionok összegyűjtése elektrosztatikusan /mágnessel.

MLIS (Molecular Laser Isotope Separation)

- **Bemenet:** urán-hexafluorid (UF_6) gáz és hordozó gáz, az utóbbi rendszerint hidrogén vagy nemesgáz, a rezonancia csúcsok szétválasztására szupersonikus fúvókán átáramoltatva hűtik le őket.
- **Lézerek:** több lépcsőben alkalmazzák, az első infravörös lézer szelektíven gerjeszti a $^{235}\text{UF}_6$ molekulákat, amelyek az infravörös vagy ultraibolya tartományban működő további lézer(ek) hatására disszociálnak urán-pentafluoridra (UF_5) és fluorra (F).
- **Egyéb:** a F metán befogó gázzal lekötve, hogy ne rekombináljon, illetve az UF_5 a következő fokozat előtt újra fluorozandó (ezek hátrányok, mert tovább bonyolítják a folyamatot).
- **További változatok:** RIMLIS, CRISLA (kémiai reakció izotóp-szelektív lézer aktiválással) stb.

Részletesebb ismeretek szerezhetők egyebek közt az NRC mintegy 60 oldalas számítógépes oktatási moduljából.[3]

Eddigi próbálkozások

A '70-es évek óta intenzív K+F folyt a lézeres urándúsítás ipari léptékű megvalósítására. Több mint két tucat ország (sic!) próbálkozott már vele: Argentína, Ausztrália, Brazília, Dél-Afrika, Dél-Korea, Egyesült Államok, Franciaország, Hollandia, India, Irak, Izrael, Japán, Jugoszlávia, Kína, Nagy Britannia, Németország, Olaszország, Oroszország, Pakisztán, Románia, Spanyolország, Svájc és Svédország. [5]

Ismert az is, hogy a felsoroltak közül legalább Brazília, Dél-Korea és Dél-Afrika titkos katonai nukleáris programot is indított, majd idővel nyilvánosan lemondott róla, aláírta az atomsorompó egyezményt, részben feladva a lézeres dúsítást is. A kutatások országonként az egyik, másik vagy mindkét alapvető irányban folytak, ahogy az alábbi táblázat a teljesség igénye nélkül mutatja:

1. táblázat Példák a lézeres urándúsítás kutatására

AVLIS	MLIS
Egyesült Államok (LLNL ²), Franciaország, Japán, Oroszország	Egyesült Államok (LANL ³), Franciaország, Japán, Nagy Britannia, Németország, Dél-Afrika

Úgy tűnik, hogy a laboratóriumi szinten 2000-ig csak az Egyesült Államok, Franciaország és Nagy Britannia lépett több-kevesebb mértékben túl. Általában elmondható, hogy míg a laboratóriumban a legtöbben sikerrel jártak, addig ipari szinten már jóval kevesebben. Ennek magyarázatai lehetnek egyebek közt a szükséges bonyolult lézeroptikák, az extrém hőmérsékletek (forró: urángáz, hideg: cseppfolyós gázok), a kémiailag agresszív anyagok, a lézersugarat a gázokban szétszóró lökéshullámok, a költséges berendezések és néhány országban a beszerzési nehézségek.

² Lawrence Livermore National Laboratory

³ Los Alamos National Laboratory

Az ezredforduló körül a legtöbb helyen leállították az esetenként milliárdokat felemésztő munkákat, éppen akkor, amikor a fejlesztők már-már áttörés közelében érezték azokat. Az elsődleges ok a piac relatív uránbősége, így az alacsony uránár volt. Egyrészt még nem indult be a nukleáris reneszánsz, tehát a kereslet viszonylag nyomott volt, másrészt túlkínálat is fellépett az 1993-ban, a hidegháború után 20 évre megkötött amerikai-orosz „Megatonnából megawattot” egyezmény következtében. 500 tonnányi, eredetileg katonai célokra felhalmozott, magasan dúsított szovjet uránt hígtottak vissza az energetikai reaktorok által igényelt szintre, majd eladták a szabadpiacon.[5],[2]

A Közel-Keleten sem működik?

Bár minden ország próbálkozása érdekes és tanulságos, mégis részletesebben csak egy párost emelek ki, természetesen nem véletlen kiválasztás eredményeként.

Az USA on-line szabadalmi tárából kikereshető egy 1973-ban beérkezett és 1981-ben 4302676 lajstromszámon megítélt szabadalom. Tárgya a lézeres izotóp-szétválasztás, szerzői izraeli mérnökök: Menahm Levin és Isaiah Nebenzahl. A leírás szerint naponta 7 g „60% tiszta” ^{235}U nyerhető az eljárással (ez akkor még inkább csak ígéret lehetett).[6]

1985-ben a világsajtót megrázta, a katonai analitikusoknak és a fegyverzetkorlátozási szakértőknek pedig bőséges beszédtemát adott az izraeli Mordechai Vanunu esete. A titkos sivatagi nukleáris telepen, Dimonában dolgozó technikus „kipakolt” a londoni Sunday Times-nak az ott folyó nukleáris fegyverkezésről. Egyebek közt azt állította, hogy az ún. 9-es üzem rendeltetése már akkor lézeres urándúsítás volt, bár a telepen más módszerekkel is dúsítottak.⁴ [7],[8]

Iránban a Teheran Nuclear Research Centre már 1975-től folytatott AVLIS és MLIS irányú urándúsítási kutatásokat is. Laskarabadban 2000-tól 2003 közepéig működött egy intézet, melyet AVLIS félüzemi urándúsítás kidolgozására hoztak létre. Rendelkeztek többféle típusú lézerekkel (Nd: YAG, festék-, CO, CO₂ lézerek stb.), kutatási, azon belül is optikai eszközgyártó kapacitással, illetve jól képzett lézerfizikusokkal és technikusokkal. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) jelzések nyomán 2003 augusztusában és októberében ellenőrzéseket tartott a létesítményben. Az iráni fél az inspektorokkal szemben a tőlük megszokott módszert alkalmazta: eleinte mindent tagadtak, később apránként valamit elismertek. Állításuk szerint:

- az intézet tervezett eszközbeszerzései négy külföldi szállítótól is sikertelenek vagy csupán részlegesek voltak,
- lézeres dúsítást csak labor méretben végeztek, azt sem folyamatos üzemben,
- a mintegy 20 kg fém urán kiinduló anyagból pár mg/nap mennyiségben legfeljebb 13%-ban dúsított urán mintákat nyertek.

A NAÜ vizsgálók érkezése előtt a berendezéseket sietve leszerelték, elszállították, azaz az ellenőrzés alól

kivonták.[4],[9] Ma úgy tűnik, hogy egyelőre a biztosabbnak tűnő centrifugákat választották (Natanz, Fordow kísérleti, félüzemi és ipari léptékű üzeimei), de tartalék módszerként a lézeres opciót sem vetették el teljesen.

A SILEX története

A megnevezés egy mozaikszó, a Separation of Isotopes by Laser Excitation (izotóp szétválasztás lézeres gerjesztéssel) szavak kezdőbetűiből állt össze. Az eljárás nem kizárólag urándúsításra irányul, más izotópok elválasztását is megcélozták. Így lehetőség nyílik homogén, szuper tiszta, kedvező termikus tulajdonságokkal bíró félvezető alapanyagok gyártására (pl. ^{28}Si), illetve orvosi diagnosztikai izotópok (pl. ^{13}C , illetve ^{18}O) előállítására is, de felmerült még a nukleáris üzemanyagba keverhető, nagy termikus neutron befogási hatáskeresztmetszettel rendelkező kiegészítő mérgező izotópok (a természetes gadolíniumból a ^{155}Gd és ^{157}Gd) elkülönítése is.

A SILEX jelentős mértékben, de nem kizárólagosan ausztrál fejlesztés. Amellett, hogy integrálta a lézeres dúsítás '70-es évektől folyó különféle kutatásait (pl. eredményeket, eszközöket vett át Dél-Afrika leállított hadi nukleáris programjából), tovább is lépett azokon. Kidolgozóit Michael Goldsworthy és Horst Struve. Munkájukat Sydney peremén, a Lucas Heights nevű ligetes külvárosban végezték, kezdetben a nemzeti nukleáris kutatóintézet, az Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO) keretei között.

A történet folytatása átfogóan, évszámokra lebontva a következő:

1988 - Ausztrál innovációs cég alakul és tőzsdére megy Silex Systems Ltd. (SSL) néven. Az ANSTO addigi épületében maradnak magántársaságként is.

1996 - Kizárólagos licensz- és fejlesztési megállapodást kötnek az United States Enrichment Corporation (USEC) céggel a technológia alkalmazására, és titkosítják az eljárás részleteit.

2002 - Az USEC kiszáll az üzletből, de az SSL a maradék finanszírozásból (és a Greenpeace vádaskodásai szerint rejtett ausztrál kormányzati támogatással [10]) már képes maga befejezni a „közvetlen mérési programot”, ígéretes gazdasági paraméterekkel.

2005 - Előkészítik a kísérleti hurkot.

2007 - Kizárólagos értékesítési és engedélyezési megállapodást kötnek a General Electric (GE) céggel. GE idővel a japán Hitachival lép szövetségre, így már a GE-Hitachi ír alá szándéknyilatkozatot az Exelon és Entergy nagy amerikai nukleáris közműveknek nyújtandó urándúsítási szolgáltatásokra. A kísérleti hurkot áttelepítik a GE wilmingtoni (É-Karolina) létesítményébe.

2008 - GE-Hitachi a SILEX technológia kereskedelmi forgalomba hozására külön vállalatot hoz létre Global Laser Enrichment (GLE) néven, bejelenti az első potenciális SILEX kereskedelmi urándúsítót. Az amerikai nukleáris hatóság (NRC) jóváhagyja a kísérleti hurok működtetését. A GE és a Hitachi társaként üzletrészt vásárol a GLE-ben a kanadai Cameco, a világ legnagyobb urán szállítója; a tulajdoni hányadok rendre 51%, 25% és 24%.

⁴ Vanunut a Moszad csapdába csalta, elfogta, az izraeli hadbíróság 18 évre ítélte.

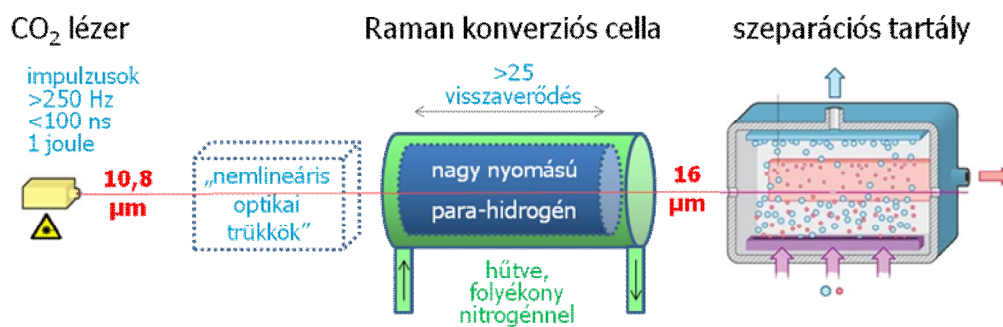
2010 – Egyre több aggály fogalmazódik meg, miszerint az eljárás elősegíti az atomfegyver előállításához szükséges anyagok és technológiák elterjedését, mert jóval nehezebb ellenőrizni.

2011 – GLE engedélykérelmet nyújt be NRC-hoz egy kereskedelmi célú SILEX urándúsító üzem létesítésére Wilmingtonban. A technológia részletei továbbra is titkosak. Civilek és tudósok petíciókat fogalmaznak meg és adnak be az engedélyezés ellen.

2012 – NRC határozata nyomán a GLE 6 millió SWU/év kapacitású urándúsítót építhet és üzemeltethet 8% dúsításig.[2],[4]

A technológia ismert elemei

Az eljárás részletei ugyan titkosak, mégis elérhetők róla olyan ismertetések, amelyek nagy vonalakban felvázolják a lényegét.[11],[2],[4] A SILEX az AVLIS és MLIS kombinációjának is tekinthető. Az AVLIS-hoz hasonlóan foto-ionizációs módszer, de az MLIS-hez hasonlóan molekula szinten működik, ötvözve azok egyszerűbb elemeit. Lényeges sajátossága, hogy a szeparációs tartályba gáz formában bejuttatott $^{235}\text{UF}_6$ gerjesztése és ionizálása egy lépcsőben történik. Egyetlen, elegendően nagy teljesítményű és kellően rövid impulzusokat megfelelő gyakorisággal szolgáltatató CO_2 lézer hajtja. Mivel e lézer a szelektív gerjesztéshez és ionizációhoz szükséges $16\ \mu\text{m}$ helyett csak $10,8\ \mu\text{m}$ hullámhosszú fotonokat szolgáltat, szükség van azok hullámhosszának előzetes eltolására. Erre egy ún. Raman⁵ konverziós cella szolgál. A cellában a fotonok rugalmatlan szóródásaiként áll elő.



3. ábra: A SILEX elvi vázlata (forrás:[11])

Itt közvetőleg tekintsük át röviden a szóródási folyamatok jellegét. A fotonok a közegben majdnem mindig rugalmasan szóródnak (Rayleigh szóródás), és ilyenkor energiájuk nem, csak haladási irányuk változik.

A szóródás kb. 10 000-ból 1 esetben rugalmatlan. Ekkor a foton energiája is csökkenhet, ha energiája egy részét az atom vagy a molekula átveszi (Stokes szóródás), de nőhet is, ha az atom vagy a molekula energiát ad át neki (anti-Stokes szóródás).[12]

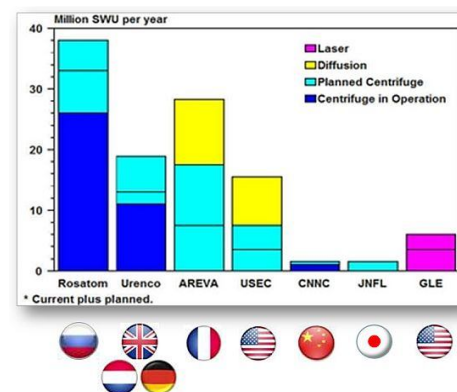
A foton energiaváltozása a szóró közeg anyagi jellemzője. Tehát olyan anyagot kellett találni, amelynek energiaszintjei támogatják a fotonok $10,8 \rightarrow 16\ \mu\text{m}$ hullámhossz eltolását. Egy ilyen anyag az ún. para-hidrogén. A H_2 molekulában a két proton spinje lehet azonos irányú (orto-) vagy ellenkező irányú (para-).

Az orto/para molekulák százalékos aránya függ a hőmérséklettől, 300 K fölött 75:25. Igen alacsony hőmérsékleten, azaz 20 K alatt már közelítőleg 0,1:99,9. Ezért a konverziós cellát cseppfolyós gázzal hűtött nagy nyomású para-hidrogén közeggel töltik ki.[13]

A méternyi hosszúságú és félméternyi átmérőjű hengerben a fotonokat végfali tükrök között sokszor (~25) ide-oda járatják a kívánt rugalmatlan szóródás bekövetkezése érdekében, mielőtt átvezetik a szeparációs tartályba.[11]

Mekkora a tervezett GLE kapacitás?

Az alábbi ábra azt mutatja, hogy a nemrég engedélyezett GLE lézeres dúsító, termelésének felfutása után is csak a világ urándúsítási teljesítményének mintegy 5%-át fogja biztosítani. Ezért, legyen bár a legkorszerűbb és leggazdaságosabb eljárás, rövidtávon nem biztos, hogy ilyen alacsony részesedési arány mellett alkalmas lesz a piac gyökeres átrendezésére.



4. ábra: Meghatározó urándúsítási kapacitások [millió SWU/év] módszer, cég, országok szerint. 2009-es előrejelzés. (forrás: [14])

- Az indiai Csandraszekar Venkata Raman (1888-1970) a fotonok rugalmatlan szóródásának felfedezéséért és az anyagok azonosítására alkalmas vonalak spektroszkópiájáért 1930-ban kapott fizikai Nobel-díjat.
- SWU = separation work unit, izotóp elválasztási munkaegység

Gazdasági hatások mértéke

Végezzünk közelítő számítást arra, hogy mekkora árváltozásokat hozhat a SILEX bevezetése. Tekintsük át 1 kg ~4% dúsítású UO₂ üzemanyag árának főbb összetevőit a következő kiindulási feltételekkel: 2011. márciusi árviszonyok, a dúsítás centrifugával történik, az atomerőművi villamos-energia önköltségének üzemanyag hányada ~10%. A SILEX dúsítási költsége a kifejlesztői szerint a centrifugálásának 1/3-1/10 része, számításunkban vegyünk most 1/5-öt:

2. táblázat A lézeres dúsítás potenciális árcsökkentő hatása [USD]

urán (sárga por)	146 x 8,9 kg U ₃ O ₈	1300		
konverzió	13 x 7,5 kg U	98		
dúsítás, centrifuga	155 x 7,3 SWU	1132	dúsítás, lézer	226
fűtőelem gyártás	1 kg-ra	240		
	Összesen	2770		1864
		100%		67%

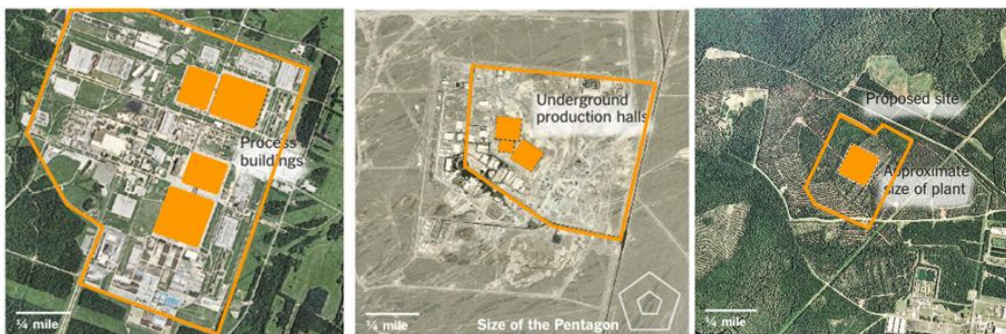
Mint látjuk, az üzemanyag így 33%-kal lehet olcsóbb, ami már elég komoly árcsökkenés lenne. Nagy kérdés persze, hogy a képződő extraprofitot a GLI milyen mértékben osztja meg majd a piaccal, netán teljesen lenyeli saját maga? [4],[15] A paksi atomerőmű termelői önköltségi ára

2011-ben 11,7 Ft/kWh volt. Ha ebben megjelenítjük a 33%-os üzemanyag árcsökkenés tizedét, akkor 11,3 Ft/kWh adódik.

Legújabb fejlemények

2012. novemberi hír szerint az amerikai Department of Energy (DOE) előzetes tárgyalásokba kezdett a GLE-vel a jövőre végleg leálló Paducah (Kentucky) állami gázdifúziós telepen egy újabb lézeres dúsítómű létesítéséről.[16],[4] Az ott, illetve a már leállított Portsmouth-ban (Ohio) felgyülemlett 100 000 t dúsítási maradék további feldolgozása a tét.

Hogy felfogjuk az ügylet jelentőségét, adjunk megint egy gyors becslést. A gázdifúziós eredetű szegényített urán jellemző átlagos ²³⁵U tartalma a természetes urán 0,7%-ával szemben még mindig 0,3%.[17] Ha feltesszük, hogy a SILEX eljárás képes a 0,3%-ot lecsökkenteni mondjuk 0,05%-ra, akkor fém uránban megadva összesen további kb. 250 t, termikus reaktorokban hasítható anyag nyerhető ki a maradékból. Ez átszámolva reaktor üzemanyagra (4% dúsítás, tehát szorzandó 25-tel; illetve U→UO₂, tehát szorzandó 1,134-gyel) 7088 t. Ha figyelembe vesszük, hogy egy 1000 MW-os atomerőművi reaktor évente kb. 27 t ilyen üzemanyagot használ el, akkor ez a mennyiség 263 ilyen reaktort lenne képes ellátni egy esztendőn keresztül. Ez meglehetősen nagy szám, tehát az üzlet mérete eléggé számottevő. Paducah-ban ráadásul a dúsítási segédtechnológia több eleme (pl. a teljes UF₆ infrastruktúra) adott, ki sem kell építeni, ami az árat is érezhetően mérsékli.



5. ábra: Üzemméret csökkenése a technológiák fejlődésével (forrás:[18])

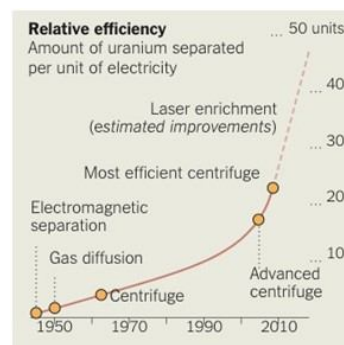
Fegyverzetkorlátozás

A fegyverzetkorlátozással kapcsolatos aggodalmakat az váltja ki, hogy az új technológia akár 75%-kal kevesebb helyet és energiát igényel, mint a jelenlegi dúsítási technológiák, és műholdas módszerekkel gyakorlatilag nem felderíthető.

A New York Times tavalyi infografikáján [18] azonos léptékben megadták a hatalmas méretű amerikai Paducah gázdifúziós telep, az iráni Natanz centrifugás dúsító mű műholdképét, és ennek kontrasztjaként felvázolták a Wilmingtonba tervezett lézeres dúsítót is. A telep méret csökkenése valóban szembeötlő.

A következő grafikon pedig azt mutatja be, hogy ugyanannyi villamos energiával mennyi ²³⁵U-t lehet elválasztani. A '40-es évek elektromágnes alapú dúsítójával előállított mennyiséget egységnek tekintve a gázdifúziós módszer kb. 2, a korai centrifugák 3-4, az ezredforduló

centrifugái 18, a leghatékonyabb centrifugák 22 egységet képesek termelni. Ezt jóval meghaladja a lézerek becsült hatékonysága a 25-50 tartományban:



6. ábra: A relatív hatékonyság növekedése, ugyanannyi villamos energia felhasználásával (forrás:[18])

Ellenérvként az hozható fel, hogy a SILEX legtöbb eleme nagy műszaki kihívás. Nehéz jól kollimált gázáramot létrehozni, stabilan tartani a hordozó gáz paramétereit, az igen fejlett lézeres technikát beszabályozni. A szükséges számú és felkészült személyzet és a finanszírozás biztosítása sem könnyű.[5]

Paradox módon a lézeres dúsítás berendezéseiről magyar nyelven részletes, helyenként magyarázatokkal is ellátott listát egy magyar jogrendbe is beemelt, a kereskedelmüket korlátozó jogszabály mellékletében lehet fellelni.[16] Az Atomsorompó Egyezményhez fűzött, nálunk 1999-ben kihirdetett bécsi Kiegészítő Jegyzőkönyv tartalmazza. Ugyan nincs benne közvetlen utalás a SILEX technológiára, de az AVLIS és MLIS berendezések legtöbbje lefedi azt is.

Irodalomjegyzék

(források letöltve a 2012. október-november folyamán)

- [1] Weinberger, S.: US grants licence for uranium laser enrichment, *Nature*, 28. September 2012.
<http://www.nature.com/news/us-grants-licence-for-uranium-laser-enrichment-1.11502>
- [2] Atomic vapor laser isotope separation, *Molecular laser isotope separation, Silex Process*, From Wikipedia, the free encyclopedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_vapor_laser_isotope_separation
http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_laser_isotope_separation
http://en.wikipedia.org/wiki/Silex_Process
- [3] Laser enrichment methods (AVLIS and MLIS). E-learning module. NRC - <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1204/ML12045A051.pdf>
- [4] Next Big Future (tudományos és műszaki áttörések) a SILEX technológiáról
<http://nextbigfuture.com/2008/06/gas-centrifuge-versus-laser-uranium.html>
<http://nextbigfuture.com/2010/02/iranian-laser-enrichment-of-uranium.html>
<http://nextbigfuture.com/2011/08/ge-silex-laser-uranium-enrichment.html>
<http://nextbigfuture.com/2012/11/laser-enrichment-for-100000-tons-of.html>
- [5] Boureston, J., Ferguson, C.D.: Laser enrichment - Separation anxiety. *BAS*, March/April 2005.
http://www.cfr.org/content/thinktank/Ferguson_BAS_separation.pdf
- [6] Levin, M., Nebenzahl, I.: Isotope separation, US 4302676 patent
http://www.patentlens.net/patentlens/patents.html?patnums=US_4302676
- [7] Dimona, Negev Nuclear Research Center
<http://www.globalsecurity.org/wmd/world/israel/dimona.htm>
- [8] Mordechai Vanunu - http://en.wikipedia.org/wiki/Mordechai_Vanunu
- [9] Lashkar Ab'ad - Laser enrichment. *ISIS, Nuclear Iran*
<http://www.isisnucleariran.org/sites/detail/lashkar-abad-laser-enrichment/>
- [10] Secrets, lies and uranium enrichment. *Greenpeace Australia*, 2004.
http://www.mapw.org.au/files/downloads/silex_report.pdf
- [11] Lyman, J.L.: Enrichment Separative Capacity for SILEX. LANL
<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/docs4/silex.pdf>
- [12] Raman scattering. From Wikipedia, the free encyclopedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Raman_scattering
- [13] Orto- és para-hidrogén. A Wikipédiából, a szabad enciklopédiából
http://hu.wikipedia.org/wiki/Hidrogén#Típusai_kvantumfizikai_szempontból
- [14] Clark, G.: The coming oversupply, *NEI*, 03 November 2009
<http://www.neimagazine.com/story.asp?storyCode=2054563>
- [15] The economics of nuclear power. The cost of the fuel. *WNA*. 2012. July
<http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>
- [16] Laser enrichment for Paducah tails?
http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Laser_enrichment_for_Paducah_tails-2211124.html
- [17] Uranium Enrichment Tails Upgrading (Re-enrichment)
<http://www.wise-uranium.org/edumu.html>
- [18] Broad, W.J.: Laser Advances in Nuclear Fuel Stir Terror Fear, *NYT*, August 2011
<http://www.nytimes.com/2011/08/21/science/earth/21laser.html>
- [19] 1999. évi XC. törvény a Kiegészítő Jegyzőkönyv kihirdetéséről - http://www.complex.hu/kzldat/t9900090.htm/t9900090_16.htm