

Sfidis científichis e tecnologjichis inte prospetive di un mont cence armis nucleârs

ALESSANDRO PASCOLINI *

Ristret. La prospetive di un disarmament nucleâr e ven cjapade cumò, dopo tancj agns, in serie considerazion tal panorama politic internazionâl, incuinrant il favôr di politcs di prin plan, stîçant dibatiments e discussions vivarosis e disveant l'interès di diversis istituzions, che a studiin modalitâts di atuazion e pus-sibilis iniziativis concretis.

Te prime part dal articul si ricuardin lis iniziativis plui impuantantis cjapadis vie paï agns a pro dal disarmament nucleâr: lis propuestis di un sisteme di control internazionâl presentadis tai agns 1945-46, l'incuintri di Reykjavik e la resinte *Hoover Initiative*.

La corse ai armaments tal temp de vuere frede e à fat di mût che, in diviers païs, si ingrumassin arsenâi enormis di armis nucleârs di tipologjiis differentis; cun di plui, a son stadiis prodotis quantitâts une vore grandis di materiâi fissii. I materiâi fissii, pal pluji plutoni e urani a inricjiment alt (HEU), a son lis components essenziâls di dutis lis armis atomichis e la lôr produzion e rapresente la dificoltât principâl te lôr fabricazion.

L'articul al furnis une introduzion descriptive ai armaments nucleârs, ai materiâi fissii e ae lôr produzion e ûs tes armis nucleârs, dongje di une panoramiche des risiervis mondialis di material fissil.

A vegnîn cjapadis in considerazion, po dopo, lis tantis sfidis científichis e tecnologjichis proponudis dal procès di transizion a un mont stabil e sigûr, sfrancjât des armis atomichis. Tra chestis, la gestion dal procès di disarmament, la cuestion de reversibilitât, la gestion e eliminazion dai materiâi fissii imagazinâts, i pericui de ricostituzion e proliferazion dai armaments nucleârs doprant materiâi e cognossincis madressudis tai programs nucleârs civîi, lis misuris di sigurece.

E je esaminade cun atenzion particolâr la cuestion dal smaltiment dal HEU, considerant anche chel prodot par ûs differents de produzion di armis: propulsion navâl, reatôrs di ricerche e produzion di isotops par ûs medic.

* Dipartiment di Fisiche, Universitât di Padue, Padue, Italie.
E-mail: pascolini@pd.infn.it

Al ven tocjât, in fin, il probleme dal plutoni separât e de in crescere de cuantitât prodote dai reatôrs di ûs civil, come ancke la cuestzion dal so smaltiment, un setôr che al lasse margjins une vore grancj a ricercjis plui aprofondidis.

La comunitàt scientifice e à prodot fin cumò une varietât di studis e ricercjis sui divers aspiets dal procès di disarmament, proponint soluzions teorichis e praticis. Cun dut achel, ricercjis e riflessjons ulteriôrs a coventin par un aproç realistic a un mont cence armis nucleârs.

Key-words. Armaments nucleârs, disarmament, ricercje militâr, relazions internazionâls.

1. La rivitalizazion di un objetif antic.

Al prin di Avril dal 2009 i presidents Dmitry Medvedev de Federazion Russe e Barack Obama dai Stâts Unîts de Americhe a àn dât fûr cheste declarazion unitarie:

Si impegnìn par che i nestris païs a contribuissin a costruî un mont cence armaments nucleârs, ricognossint, tal stes temp, che chest objetif al domandarà di rînovâ e rinfuarcî lis iniziativis di control dai armaments e risoluzion dai conflits, iniziativis che a varan di jessi metudis in vore di dutis lis nazions interessadis. O vin concuardât di puartâ indevant misuris gnovis e verificabilis di riduzion programatiche dai arsenâi ofensâfs strategics, scomençant cul rimplâca il Tratât di riduzion dai armaments strategics cuntun altri tratât juridicamente vincolant.

Il gnûf tratât START, sotscrit ai 8 di Avril dal 2010, al à confermât la credibilitât di chest impegn a pro di un mont cence armis nucleârs¹, impegn condividût di un numar tant plui grant di sostenedôrs: ai 24 di Setembar dal 2009, par iniziative de aministratzion Obama, il Consei di sigurece des Nazions Unidis al à tignût un summit di mût di “atirâ la atenzion des personalitâts di guvier, ai nivei plui alts, viers dai pericui nucleârs frontâts de comunitàt internazional e de nécessitat urgjent di iniziativis concretis par contrastâju”. Cutuardis cjâfs di stât e di guvier a àn adotât ae unanimât la Risoluzion 1887 che, ribadint la volontât dal Consei di sigurece di operâ pe eliminazion dai armaments nucleârs, e met in pîts une strutture organizzative che e judi a rivâ a chest objetif².

Stant che, par plui di sessante agns, lis armis nucleârs a àn detât il program des relazions internazionâls sorevivint ae fin de Vuere Frede, chest intindiment e il riferiment a un “mont cence armaments nucleârs” a somein pardabon rivoluzionaris. Chescj armaments a son i plui disumans mai pensâts dal om, i unics bogns di distruzi dal dut la vite tal ne-

stri planet; cun dut chest, a son acetâts cence dî nuie de opinion publiche mondiâl, che e pâr che si sedi dismenteade de lôr esistence e de menace che, magari cussì no, a rapresentin.

Di chê altre bande, i sienziâts e lis lôr associazions a àn continuât a interessâsi a chest probleme e apei pe eliminazion des armis nucleârs a son stâts fats vie pai agns di figuris culturâls e religjosis impuantantis e dai moviments pacifiscj, licuidâts dai politics tant che utopiscj. Il Tratât cuintri de proliferazion nucleâr, sotscrit tal 1968, al è l'unic document juridichementri vincolant che al dispon il disarmament nucleâr, in ogni câs cence specificâ temps e proceduris. Tes relazions internazionâls, la expression “disarmament nuclear complet” e je spes stade doprade dome in clâf retoriche, cul efet di indebolî i negoziâts pal control dai armaments. Dut câs, in ce che e ven clamade la Ete Atomiche, a son stâts moments che la cuestion e je stade frontade cun serietât, cun propuestis e iniziativis concretis che e vâl la pene esaminâ pe impuantance che a puedin vê in dî di vuê.

1.1. Primis propuestis par un sisteme di control internazionâl. Diviers sienziâts che a colaborarin tal Projet Manhattan, crodint che lis relazions internazionâls di in chê volte no fossin in stât di ghestî un armament distrutif come la bombe atomiche, a presentarin propuestis par un control de energjie atomiche (Smith 1965).

Za sul finî dal 1943 il famôs fisic Niels Bohr al domandà l'intervent de cooperazion internazionâl pe gestion des armis nucleârs dopo de vuere, di mût di evitâ une corse ai armaments di bande de Union Sovietiche e des potencis occidentâls. Par Bohr, la bombe e jere tal stes temp une oportunitât e un pericul: la menace atomiche e jere cussì grande che al sarès stât indispensabil cooperâ tra i stâts, intun gnûf aproç aes relazions internazionâls fondât su la sincerât e il sostegn vicendevul (Bohr 1950). Bohr al sugjerì che la energjie atomiche e fos sometude al control internazionâl, ma nol rivà a convinci Roosevelt o Churchill (Aaserud 1999).

Cun dut achel, la idee di un control internazionâl e continuâ a jessi part de agjende politiche. Tal Zenâr dal 1946 lis Nazions Unidis a meterin sù une comission che e studiâs in ce maniere che si podevin eliminâ lis armis atomichis doprant la energjie nuclear par ûs pacifics. Chei stes obietîfs a forin cjapâts in considerazion ancie di une comission nomena-

de dal Dipartiment di Stât american, cun da cjâf Dean Acheson e David Lilienthal, che si zovave de esperience fondamentâl di Robert Oppenheimer, il diretôr dal Projet Manhattan. Oppenheimer al jere stât influençât in particolâr des ideis di Bohr (Pascolini 2009) e al jere al corint de posizion cjapade dai sienziâts de Universitât di Chicago in cont de energjie atomiche, cussì come descrite tal *Franck Report* (1945).

L'*Acheson-Lilienthal Report* (1946) al proponè che dutis lis atividâts pericolosis a fossin sometudis ae *Atomic Development Authority*, l'ent internazionâl di control dal svilup atomic; lis atividâts no pericolosis, tant che la ricercje e i ûs pacifics de energjie atomiche, a varessin vût invezit di jessi lassadis sot de vigjilance dai singui stâts. La *Atomic Development Authority* e varès vût di monitorâ lis furniduris mondiâls di urani e tori, costruî e ghestî i reatôrs pe produzion di plutoni e i implants di separazion dai isotops di urani, e concedi lis licencis pe costruzion e gestion dai reatôrs atomics e par altris atividâts puartadis indevant dai singui paîs (Pascolini 2009). Chest rapuart al stabili lis basis de propueste americane presentade, di bande di Bernard Baruch, ae Comission pe energjie atomiche dal ONU tal Jugn dal 1946. Cinc dîs dopo, Andrei Gromyko al presentà, par cont dai sovietics, un plan che al proibive la produzion, l'imagazinament e l'ûs des armis atomichis e al ordenave di distruzi dentri di trê mês dutis lis bombis atomichis esistentis, però cence proviodi nissune struture di control internazionâl. La discussion e continuà dentri de Comission, ma lis prospetivis di un acuardi si slontanarin a man a man che lis relazions tra i doi paîs si lerin ruvinant, e il sfuarç di ri-puartâ la cuestion de energjie atomiche sot dal control internazionâl al le in nuie.

1.2. *L'incuintri di Reykjavik.* La eliminazion des armis nucleârs, si ben che e vignì ricjapade in considerazion plui voltis dilunc de Vuere Frede, e jere considerade pal plui un obietîf no realistic (Larking 2008). La prospetive di une riduzion dai armaments e cjata un sburt gnûf cul incuintri fûr program tra Reagan e Gorbachev a Reykjavik tal Otubar dal 1986. Gorbachev al presentà une schirie di propuestis coragjosis, tant che la riduzion dal 50% des armis nucleârs strategichis e la eliminazion dai missi di rai medi e intermedi in Europe. Ce che Gorbachev si spietave di vê indaûr a jerin limitazions ae Iniziative di difese strategjiche, il program

american di difese antimissilistiche. Dai verbâi de discussion si capìs che a un ciert pont i doi presidents a stevin valutant la possibilitât di un acuardi formâl pe eliminazion totâl dai armaments nucleâr tal zîr di 10 agns. Lis delegazions che a compagnavin Reagan e Gorbachev a puartarin indevant un negoziât impegnatîf, svicinantsi a un acuardi su lis armis strategichis e a rai intermedi ma blocantsi su la cuestzion de Iniziative di difese strategiches. Cun dut achel, i negoziâts di Reykjavik a butarin lis fondis pal tratât INF (Intermediate-Range Nuclear Forces) (1987) e il prin tratât START (Strategic Arms Reduction Treaty) (1991). L'incuintri al representâ un moment fondamentâl pe risoluzion de Vuere Frede, marcant un cambiament tes relazions politichis jenfri i Stâts Unîts e la Union Sovietiche (Holloway 2010a).

1.3. La iniziative de Hoover Institution. Tal Otubar dal 2006, la *Hoover Institution* de Universitât di Stanford³ e organizà une conference par ri-guardâ il 20^{im} aniversari dal incuintri di Reykjavik, dulà che si cirì di ri-considerâ la prospetive di un mont cence armis nucleârs, come che al je-re stât pensât di Reagan e Gorbachev. I organizadôrs principâi a forin George Shultz, Segretari di Stât di Reagan, e Sidney Drell, un fisic di Stanford cuntune grande esperience di cuestions di sigurece e control dai armaments. La conference e produsè un articul che al domandave la eliminazion dai armaments nucleârs, firmât di George Shultz, dal ex Ministri de Difese William Perry, dal ex Segretari di Stât Henry Kissinger e dal ex senatôr Sam Nunn, che al vignì fûr tal *Wall Street Journal* tal Zenâr dal 2007 (Shultz, Perry, Kissinger, Nunn 2007).

I autôrs, cu la partecipazion ative di Drell, a partivin de constatazion che la situazion presinte, fondade suntun sisteme nucleâr discriminatori che al previôt che cierts païs a vedin acès aes armis atomichis e che a al-tris ur sedi dineât il dirit, e presente une instabilitât intrinsiche, e duncje la eliminazion des armis nucleârs e je tal stes temp tal interès di ducj e realizabil. In cont di chest, i statiscj a sugerissin une serie di iniziativis par butâ lis fondis di un mont cence armis nucleârs: une riduzion ulte-riôr dai armaments nucleârs, il de-alertament des armis strategichis rus-sis e americanis, la eliminazion dai armaments nucleârs di rai curt, la ratifiche dal *Comprehensive Test-Ban Treaty* (CTBT) che al proibìs dal dut i esperiments nucleârs⁴, e vie indevant.

A cheste prime conference e vignì daûr, tal Otubar dal 2007, une seconde, simpri organizade de *Hoover Institution*, dulà che si continuà a discuti des misuris di cjapâ par svicinâsi a un mont cence armaments nucléârs (Shultz, Perry, Kissinger, Nunn 2008).

I articui dai cuatri statiscj a stiçarin un interès enorme, sedi tai Stâts Unîts, dulà che a verin la poie di ducj i doi i candidâts ae Presidense, sedi tal rest dal mont. Diviers guviers a cjaparin in considerazion lis prouestis de *Hoover Initiative*: tra chescj, come che o vin viodût, i presidents de Russie e dai Stâts Unîts. Une prime reson dal grant impat dai articui al è che a jerin scrits di personalitâts cognossudis, che a vevin madressût une lungje esperience a nível di politichis di sigurece nazionâls e internazionâls e no vignivin par solit associadis a pinsîrs utopistics; une seconde cause e jere la percezion gjenerâl che lis strategiis di dissuasion nucleâr convenzionâls, come ancje lis politichis atuâls di no-proliferazion, no stevin produsint l'efet desiderât.

Il disarmament nucleâr al è deventât un argoment di discussion e dibatiment impuantant di bande de politiche internazionâl, e diviersis instituzions a son daûr a studiâ manieris di frontâ la cuestion e a svilupâ propuestis concretis (Holloway 2010b).

Stabilî un percors che nus puarti ae eliminazion dai armaments nucléârs e je une sfide plui dificil cumò che no tai agns cuarante, cuant che dome doi paîs a vevin acès ae energie nucleâr, o tai prins agns novante, ae fin de Vuere Frede. Vuê i paîs furnîts di armaments nucleârs a son nûf, stant che Indie, Pakistan e Coree dal Nord si son zontâts al *club* dal nucleâr formât di Stâts Unîts, Russie, France, Ream Unît e Israël, ognidun cun interès particolârs e diferents; cun di plui, plui o mancul il 30% dai stâts de NATO che no disponin diretementri di armis nucleârs si spietin che si podedin doprâ pe lôr difese se a 'nt vessin dibisugne. Te transizion a un mont libar dal nucleâr, cierts stâts a varan la preocupazion che si mantegni la superioritât militâr convenzionâl des grandis potencis mondialâls, altris a ciraran altris manieris di conservâ la lôr posizion atuâl tal sisteme internazionâl.

Come che al à dit il president Obama tal so discors a Praghe ai 5 di Avril dal 2009 (Obama 2009), “mantignî la pâs e la sigurece intun mont cence armis nucleârs nol è alc che si podarà rivâ a vê in curt: forsi jo no rivarai a viodilu. Al è un objetif che al domande pazience e buine vo-

lontât". Pazience e buine volontât a son dôs cualitâts che e varà di vê du-te la comunitàt internazionâl, ognidun daûr des sôs pussibilitâts, e i sien-ziatôs a podaran dâ une man a risvolvi i grancj problemis tecnics leâts a chest objetif ambiziôs.

2. Armis nucleârs e materiâi fissii. Ancje se il numar des ogjivis nucleârs al è lât in mancul tai ultins 20 agns, a 'nt restin tal mont ancjemò almancul 23 mil, cuntune capacitât esplosive plui di 150 mil voltis chê de bombe di Hiroshima (SIPRI 2010). Cuasi metât di chestis bombis a son operativis e plui di 2 mil a son te posizion di alarme massim, vâl a dî che a podaressin jessi fatis partî tal zîr di cuatri-vot minûts dal comant.

Come che nus mostre la Figure 1, l'incuintri di Reykjavík (1986) al à segnât pardabon un pont di svolte te vuere dai armaments tra americans e sovietics: di in chel an, cuant che il numar des armis nucleârs al è rivât al nivel plui alt te storie, al è tacât un procès di riduzion dai armaments che al va indevant ancjemò vuê.

Lis ogjivis e i missii nucleârs a representin, però, dome la ponte dal iceberg di dut un aparât militâr, scientifc, industriâl e burocratic dedicât ae ricerche, al disvilup, ae produzion e ae gestion des armis nucleârs, che al cjape dentri ancje sistemis specifics di comunicazion, informazion e control, simulazion, adestrament dal personâl e inzornament continui des strategjiis militârs. Un mont pardabon libar dai armaments nucleârs

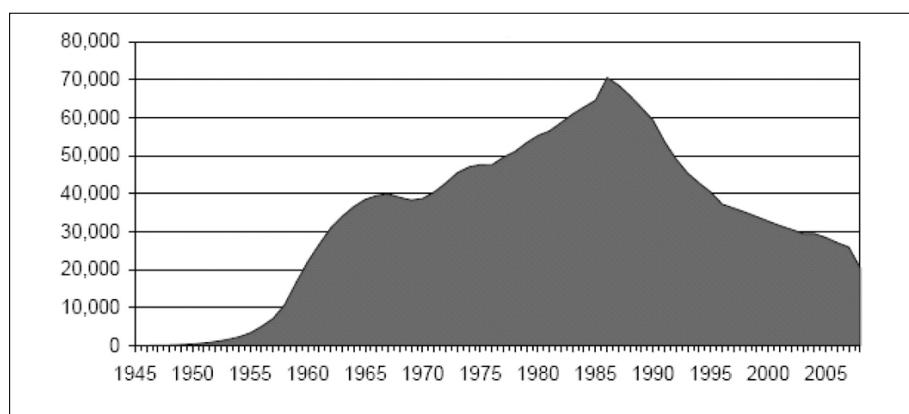


Figure 1. Evoluzion des riservis nucleârs globâls 1945-2008⁵.

al domandarès la dissoluzion totâl di ducj i diviers aparâts vignûts sù ator de struture militâr nucleâr. Par che chest al succedi a coventin une volontât politiche fuarte e la cooperazion totâl de leadership militâr dai stâts nuclearizâts e di dutis lis lôr istituzions burocratichis interessadis ae cuestion.

La eliminazion dai armaments prodots fin cumò e je, in ogni câs, dome une part dal probleme: si varès ancje di fâ in maniere che nissun paîs – e nissun grup sub-nazionâl o organizazion teroristiche – si cjati te posizion di produsi armis nucleârs gnovis.

La cuestion e devente ancjemò plui complesse se si cjapin in considerazion i programs pe produzion di energie nucleâr par ûs civil, che a àn un pês economic impuantant par buine part dai stâts e che a domandin une provision garantide di combustibil nucleâr. Al covente duncje un sisteme di acuardis internazionâi vincolants par che i stâts no vedin di gjavâsi fûr di un regjim no-nuclearizât.

Par dutis chestis reson s e je indispensabil une volontât globâl di cjatâ soluzions ai problemis científics e tecnics che a nassin di cheste gbove sfide. Par capî ce che a son chescj problemis a van sclarîts cierts fats essenziali sui armaments nucleârs⁶.

Lis armis nucleârs produsudis in dì di vuê a son dispositîfs tecnologjics une vore sofisticâts, costruîts par lavorâ intune cierte maniere e cun risultâts diferents, ma in pratiche si puedin sudividi in dôs tipologjiis: dispositîfs a fission o termonucleârs a fission-fusion.

2.1. Armis nucleârs. La reazion di fission nucleâr e consist te division, in viade di un neutron, dal nucli atomic di isotops di urani (U) o plutoni (Pu) in doi nuclis plui piçui plui altris neutrons, cu la emission di grandis cuantitâts di energie. I neutrons prodots a puedin provocâ altris procès di fission intune reazion a cjadene che, in condizioni particolârs (critichis o supercritichis) e pues interessâ une cuantitât simpri plui grande di materiâl fissil, lant indevant in maniere lente e controlade tai reatôrs nucleârs o rapide e esplosive tes bombis atomichis. Intune calsisedi bombe, diviers kilograms di materiâl fissil a reagjissin in mancul di un microsecont, produsint une energjie equivalent ae esplosion di desenjs di miârs di toneladis di esplosîfs di alt potenziâl⁷. Part di cheste energjie e cree une onde espansive, part e ven difondude sot forme di lûs e radiazion termiche, part e je puartade vie dal flus intens di neutrons,

rais gamma e rais X. Ducj chescj fatôrs a contribuissin al efet distrutif des esplosions nucleârs.

E covente almancul une cuantitat minime di materiâl par mantignî ative une reazion a cjadene, di mût che une percentual masse grande dai neutrons no vedi di distacâsi de superficie invezit di jessi cjapade dentri tal nucli fissil. La cuantitat di materiâl necessari a formâ une masse “critiche” e je une vore variabil, daûr de nature dal materiâl fissil, de sô composition chimiche e des carateristichis dai materiâi disponûts dulintor e che a puedin rifleti indaûr i neutrons. Lis cuantitâts minimis a son 8 kg pal plutoni e 25 kg pal urani 235, ançje se i Stâts Unîts a àn fat savê di resint che cui rifletôrs/tampons adats lis massis critichis si ridusin a 15 kg di urani-235 pûr e a 4 kg di plutoni-239⁸.

Il design di une bombe al à di permeti che il materiâl fissil al puedi reconfigurâsi di colp di une condizion subcritiche di sigurece a une condizion supercritiche esplosive: te metodiche attûl il nusel di une masse subcritiche di urani o plutoni al ven comprimût di là de sô densitât metaliche normâl in maniere che al rivi a une alte densitât supercritiche, travers di une serie di esplosions chimichis che a produsin tal zîr di pôcs microseconts une onde di impat convergent (implosion).

La reazion di fusion nucleâr e consist tal meti dongje doi nuclis plui piçui par formâ un plui grant, un procès che al furnis energie aes stelis e al è responsabil de produzion di elements plui pesants partint dal idrogen. Cheste reazion e je alimentade des fuardis nucleârs ma ostacolade de repulsion eletriche tra nuclis, e e pues verificâsi dome in condizions speciâls di alte densitât e temperaduris extremis (millions di grâts). La fusion dai isotops pesants dal idrogen, il deuteri e il trizi, cu la produzion di eli e la emission di neutrons, e domande temperaduris di plui di 100 millions di grâts ma e prodûs une grande cuantitat di energie: la sô densitât di energie par unitât di masse e je cuatri voltis chê de fission dal urani e 40 millions di voltis chê di une explosion di TNT.

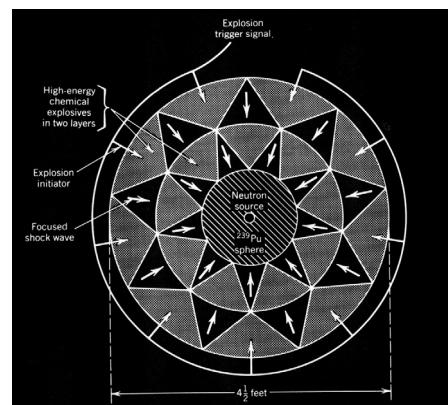


Figure 2. Rapresentazion schematiche dal mecanismi di implosion di une bombe a fission (Schroeder 1984).

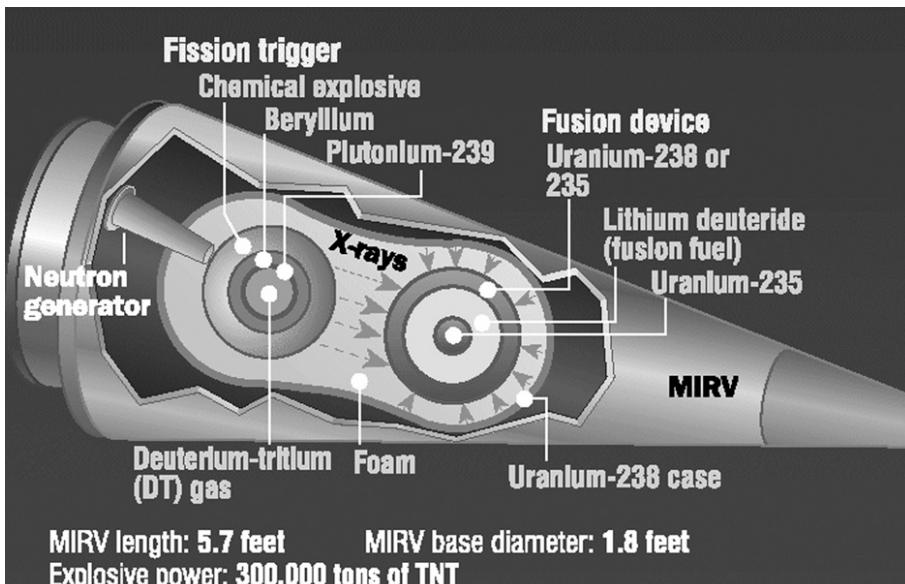


Figure 3. Schema di une ogjive termonucleâr moderne (Cox 2009).

Tes bombis nucleârs modernis, la potence de esplosion di fission e ven aumentade (“boosted”) di dîs voltis introdusint une misture gassose di deuteri e trizi intune calote vueide di materiâl fissil a pene prin de implosion. Cuant che la temperadure dal materiâl di fission e rive a 100 millions di grâts, e invie la fusion dal trizi cul deuteri produsint une esplosion di neutrons che e aumente la cuantitat di materiâi fissii fissionâts e duncje la potence de esplosion.

Intune bombe a fission-fusion, la esplosion causade de fission (prin stadi) e prodûs un flus di rais X che a van a comprimi e inviâ un secont stadi, che al conten combustibil termonucleâr di deuterit di liti-6, dulà che buine part de energjie e je creade de fusion tra deuteri e trizi. Il trizi tal secont stadi al è prodot te esplosion stesse, cuant che i neutrons a dividin il liti-6 in trizi e eli.

Come che si viôt, une bombe a fusion e scuen jessi inviade di une esplosion di fission, par che si puedin verificâ lis temperaduris altis e il flus di rais X di compression necessaris. Se la energjie massime furnide di une bombe a fission “boosted” e je di pôcs centenârs di kilotons, cu



Figure 4. Components de arme nucleâr a gravitât termonuclear B-61 di produzion americane. L'esplosif nucleâr al è indicât cun (*) (Font: Ministeri de Energie, Stâts Unîts).

lis ogjivis termonucleârs nol è nissun limit ae cuantitât di energjie che si pues otignî, e di fat il dispositif plui grant di cheste tipologje, la “Bombe Zar” sovietiche, al è rivât a produsi une energje di 50 megatons.

Une bombe nucleâr e je un mecanism complès, che al domande, dongje dal esplosif nucleâr, sistemis acurâts di sigurece, armament, atiavzion e fûc. Duncje pe produzion di armis nucleâr a coventin dute une serie di competencis diviersis:

- esperience tal setôr de sience nucleâr,
- otime cognossince di diviersis tecnologjiis no nucleârs,
- abilitât tal ûs dai esplosifs a rindiment alt,
- materiâi fissii di cualitât explosive.

2.2. Materiâi fissii. Lis competencis scientifichis e tecnologjichis no pue din jessi controladis o vietadis; ce che al rint il disarmament nucleâr une propueste realistiche al è il fat che i materiâi fissii no si cjatin cun facilitât e a domandin tecничis une vore complessis e grancj stabiliments pe lôr produzion. Di fat il plutoni nol esist in nature e l'isotop fissil ^{235}U si cja-

te dome te percentuâl dal 0,72% tal urani naturâl, dulà che il rest al è l'isotop ^{238}U che nol è (in pratiche) fissil.

Urani inricjît. L'isotop fissil ^{235}U si lu cjate in chestis sostancis:

- urani impuarît, cun mancul dal 0,3% di ^{235}U ;
- urani naturâl, cul 0,72% di ^{235}U ;
- urani par reatôrs, cuntune concentrazion dal 4 al 5% di ^{235}U ;
- urani a bas inricjiment (LEU, low-enriched uranium), cun mancul dal 20% di ^{235}U ;
- urani a alt inricjiment (HEU, highly-enriched uranium), cun plui dal 20% di ^{235}U ;
- urani di gradazion pes armis (WGU, weapon-grade uranium), cun plui dal 90% di ^{235}U .

Ancje se une masse infinide di urani cuntun inricjiment dal 6% di ^{235}U e sarès in stât, in teorie, di alimentâ une reazion a cjadene esplosive, i esperts di armaments a concuardin che une bombe a fission di dimensions realistichis e pues jessi costruide dome doprant HEU, e anzit lis bombis nuclears produsudis cumò a utilizin dome WGU.

Il procès di inricjiment dal urani al è une vore complès e al domande tecnologjiis sofisticadis di separazion dai isotops, implants industriâi di grandis dimensions e cuantitâts enormis di energjie. I isotops ^{235}U e ^{238}U a son, di fat, virtualmentri compagns te strutture chimiche e si differenziin

tal lôr pês specific dome pal 1%. Tal implant di inricjiment, partint dal urani naturâl si prodûs, di une bande, urani inricjît te cuantitât di ^{235}U e, di chê altre, urani impuarît di ^{235}U . In di di vuê, la produzion di urani inricjît su scjale comercial e dopre, in gran part, tecnologjiis basadis su sistemis di centrifughis a gas⁹. Lis centrifughis a fasin zirâ a velocitât enorme un gas, l'esafluorûr di urani (UF_6), di mût che l'urani al ven pressât cuintrì des parêts di une fuarce centrifughe

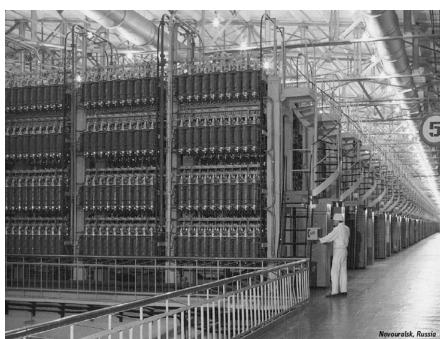


Figure 5. Implant di inricjiment dal urani di Novoułask; lis centrifughis russis a son curtis e metudis une parsore di chê altre (Font: Ministeri pe Energjie Atomiche, Federazion Russe).

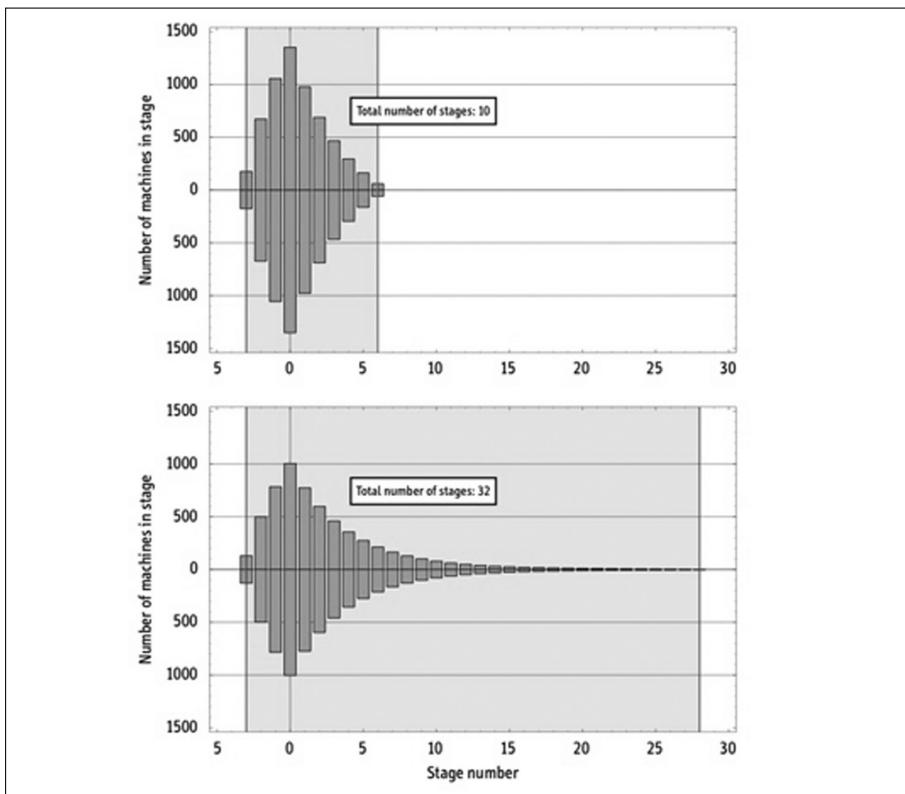


Figure 6. Sistemazions alternativis di chel stes numar di centrifughis, par produsi LEU o HEU par ûs militâr (IPFM 2006).

che e je plui di 100 mil voltis la fuarce di gravitât. Lis moleculis cui atoms di ^{238}U , plui pesants, si concentrin di plui te part esterne dal cilindri des moleculis che a contegnin i atoms di ^{235}U , plui lizêrs; in cheste maniere i doi isotops a puedin jessi separâts. Un implant di inricjiment al consist di miârs e miârs di chestis centrifughis, colegradis in serie a “cascade”.

I implants di inricjiment a son necessaris pe produzion di LEU, doprât te gran part des centrâls nucleârs, ma tal stes temp a coventin anche pe fabricazion di HEU e WGU par ûs militâr. Chel stes stabiliment, a partî di 150 toneladis di urani naturâl, al pues produsi intun an 20 tone-ladis di LEU al 4% par alimentâ une centrâl di 1 gigawatt, o ben 550 kg di HEU inricjît al 93% par produsi 26 bombis. Tal prin câs lis centrifughis a son sistemadis in seriis di 10, tal secont in seriis di 32.

Implants di inricjiment grancj avonde di produsi armis nucleârs o une cuantitât di LEU suficient a alimentâ un reatôr nuclear a esistin dome intun numar relativementri piçul di stâts. Cumò come cumò, a son dîs i païs che a disponin di implants di inricjiment dal urani par ûs civil, considerant sedi chei in plene operativitat sedi chei in vie di costruzion o di progetto: Brasil, Cine, France, Gjermanie, Iran, Japon, Païs Bas, Russie, Ream Unît, Stâts Unîts. Implants come chescj a son stâts pensâts par produsi LEU par alimentâ reatôrs nucleârs, ma a podaressin in teorie jessi adatâts in pôc temp pe produzion di HEU par ûs militâr. In plui, la India e je daûr a produsi HEU pe propulsion dai somerzibii, mintri che il Pakistan al reste l'unic païs a inricjî l'urani pe produzion di bombis.

Plutoni. Il plutoni al è un isotop artificiâl prodot tai reatôrs nucleârs cuant che l²³⁸U al cjape sù un neutron formant ²³⁹U, che subit dopo al decjât trasformantsi in ²³⁹Pu traviers dal stadi intermedi dal isotop netuni 239.

Par podê jessi doprât intune arme nuclear, il plutoni al à di jessi separât dal combustibil esaurît dal reatôr, che al conten prodots di fission une vore radioatîfs. Cu la moderne tecnologie di riprocessament PU-REX, il combustibil esaurît al ven taiât in tocuts e disfat tal acit nitric; doprant un solvent organic che al ven messedât cul acit nitric, si gjave fûr il plutoni che al ven, po dopo, separât in centrifughe. Par vie dal cjamp radioatîf une vore fuart dal materiâl, il procès di trasformazion al ven puartât indevant cun schermaduris pesantis e comants a distance. I de-tais tecnics de procedure di riprocessament da plutoni a son di domini public, ma a coventin tecnologjiis speciâls e une cognossince tecniche

aprofondide. Une volte separât, il plutoni al à une radioativitat lizere e al pues jessi tocjât e lavorât cence schermis di protezion, ma al è pericolos se al ven respirât o ingjerît.

Se un atom di ²³⁹Pu al reste dentri dal reatôr dopo de sô creazion, al è possibil che cul temp al assorbissi un secont neutron devenant ²⁴⁰Pu, o ben un tierç o un cuart neutron devenant ²⁴¹Pu o ²⁴²Pu. Il plu-

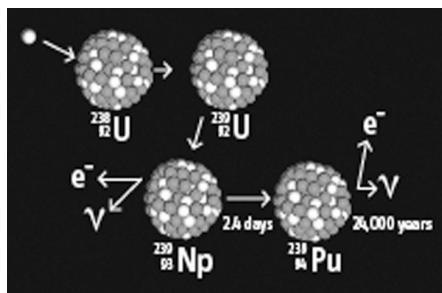


Figure 7. Reazions intun reatôr nuclear pe trasformazion dal urani in plutoni.

toni, duncje, al pues presentâsi cun diviersis cumbinazions di isotops. Par solit, il plutoni contignût tal combustibil esaurît di un reatôr nucleâr (plutoni a gradazion pai reatôrs RPu) al conten pal 50-60% ^{239}Pu e pal 25% ^{240}Pu . I progettoj di armis nucleârs a àn miôr di lavorâ cuntune misture che e vedi une proporzion la plui grande pussibil di ^{239}Pu , par vie de emision relativementri basse di calôr radioatîf come ancje di neutrons e rais gamma, che a podaressin provocâ une pre-detonation ridusint la potenze de explosion di mil voltis. Il plutoni par ûs militâr (WPU, weapon-grade plutonium) al conten plui dal 90% dal isotop ^{239}Pu e al presente une masse critiche che e je trê cuarts chê dal plutoni par ûs tai reatôrs. Lis bombis modernis no son sensibilis aes cumbinazions isotopichis dal plutoni, come che al riferìs un rapuart dal Ministeri pe Energjie dai Stâts Unîts (1997):

In teorie cualsisedi cumbinazion di isotops di plutoni [...] e pues jessi doprade par fabricâ une arme nucleâr [...] il plutoni par ûs tai reatôrs al pues jessi utilizât ancje tes armis, sedi di produtôrs indiscriminâts cence tecnologjiis sofisticadis, sedi dai stâts nuclearizâts avanzâts.

Lis tecnologjiis di riprocessament a son duncje une vore problematisches, in prevision di un disarmament nucleâr e des strategjiis di no-proliferazion. Il probleme principâl al è l'interès di bande de industrie nucleâr civil pal recuper di plutoni dal combustibil esaurît, che al ven convertit in "ossits misturâts" (MOX, *mixed oxides*) doprâts come combustibil tai reatôrs nucleârs. I MOX a son une misture di plutoni (cirche il 4%) e urani naturâl o impuarît sot forme di ossit, dulà che il plutoni al cjape il puest dal ^{235}U tal LEU tant che principâl materiâl di fission. I MOX a son une vore plui pericolôs e costôs dal normâl urani; cun di plui, la gestion di materiâi par ûs militâr come il plutoni e domande normis di sigurece une vore plui rigiidis di chês dopradis tai implants pe fabricazion di LEU. Vuê a son implants di riprocessament par ûs kommerciâl in Cine, France, Japon, Russie e Ream Unît, un piçul implant pe estrazion dal HEU tai Stâts Unîts e implants pe produzion di plutoni par ûs militâr in Indie, Israël, Coree dal Nord e Pakistan.

3. Sfidis. Stant che i armaments nucleârs a àn dominât il senari globâl par cussì tancj agns, al pues risultâ dificil imagjinâsi un mont cence lis armis nucleârs. Come che al fâs notâ Holloway (2010b):

Ce vuelial dî liberâsi des armis nucleârs? Restarano tancj pâs che a rivaressin, tal zîr di pôc temp, a produsi armaments nucleârs? Intun mont cence armis nucleârs, coventaraiai un gnûf, plui intrusif sisteme di ispezions? Vino lis possibilitâts di metilu in pîts? Sarai pericul che cualchidun si gjavi fûr? Ce podarîno fâ par che chest nol sucedi? Ae fin, ce situazion varîno?

A son domandis une vore impuantantis, che a àn tacât a ricevi la atenzion che a meretin (Drell e Goodby 2009, Evans e Kawaguchi 2009), ma e je impuantante ancje la cuestion di cemût superâ i ostacui che nus separin di un mont sfrancjât dai armaments nucleârs e di cemût mantignî la pâs e la stabilitât. Chestis sfidis a rivardin, par esempli, i mecanisms che a regolaran il procès di denuclearizazion, la cuestion de reversibilitât, la gestion e il smaltiment des risiervis di materiâl fissil e il pericul de ricostituzion e proliferazion des armis nucleârs doprant materiâi e implants utilizâts tai programs nucleârs par ûs civil. Te transizion al pont zero une ciert nivel di reversibilitât al è inevitabil, par vie des risiervis di materiâl fissil dai armaments smantelâts e des competencis acuisidis dai progetiscj tal setôr militâr. I stâts, cun di plui, a varan di gjestî i implants di produzion e manutenzion dai armaments, che a varan di jessi vuardeâts e controlâts fin che no vignaran sierâts o convertîts a ûs civil.

Cu la eliminazion des armis nucleârs, si varan di smaltî il plutoni e l'HEU che a contegnin tal lôr nusel. In plui, lis risiervis di chescj materiâi, produsûts par alimentâ i reatôrs nucleârs o par altris funzions ma che a podaressin in teorie jessi doprâts par fabricâ armaments nucleârs, a varan di jessi minimizadis e controladis in maniere scrupulose.

Dutis lis centrâls nucleârs a produsin, cul lôr funzionament normâl, une cierte cuantitât di combustibil esaurît, che al conten plutoni; in plui al è il plutoni za separât, par ûs civil, che za cumò al è suficient par fabricâ almancul 30 mil bombis nucleârs.

La eliminazion dai armaments nucleârs e domande, duncje, la elaborazion di une strategie comune di bande de comunitàt internazionâl, che e varà di jessi pronte a rispuindi di colp e cun efficacie a cui che nol larà daûr des regulis. Lis carateristichis essenziali di un sisteme di sigurece efficient a son stadis cjapadis in considerazion za sul tacâ de Ete atomiche dai sienziâts che a vevin lavorât tal Projet Manhattan (Federation of American Scientists 1946). Une liste di chestis carateristichis si le cjate,

par exempli, tal *Acheson-Lilienthal Report*, che al fissee i criteris fondamentâi par ogni plan di sigurece adeguât.

- a. Il plan al à di ridusi a proporzions di podê gjesti il probleme de aplicazion concrete des politichis internazionâls cuintri de vuere atomiche.
- b. Il plan al à di formulâ segnâi di pericul clârs e afidabii tal câs che une nazion si compuarti in maniere che e indichi o che e puei indicâ l'inizi di une vuere nucleâr.
- c. Il plan al à di jessi fat in maniere di garantî sigurece une volte metût in vore; ma se al ves di falî o se la situazion internazionâl e ves di colassâ, lis singulis nazions a varessin in ogni câs di cjatâsi intune posizion sigure.
- d. Par podê garantî sigurece in maniere eficacie, il plan nol à di jessi dal dut negatîf, opressif e autoritari. Invezit, al à di cirâ di svilupâ lis potenzialitâts benefichis de energie atomiche e incoragiâ il svilup des cognossincis di fonde, stiqânt lis pulsions costrutivis e imaginativis des personis pitost di concentrâsi dome sui aspiets difensifs e negatîfs.
- e. Il plan al à di jessi in stât di frontâ i gnûfs periculî che a podaressin manifestâsi tal di-svilup sucessif di chest cjamp avonde gnûf. Dal pont di viste organizatîf, duncje, il plan al à di jessi flessibil e in stât di slargjâsi o ridusisi in curt.
- f. Il plan al à di previodi une azion internazionâl e minimizâ lis rivalitâts tra lis nazions par ce che al rivuarde i aspiets pericolôs dal disvilup atomic.
- g. No vin a ce fâ dome cuntun probleme militâr o scientifc ma cuntune cuestion plui large che e tocje la gestion politiche e la nature umane stesse.

In conclusion, il principi fondant di cheste propueste e jere di impedî che i stâts a svilupassin singolarmentri une lôr struture di produzion de energie nucleâr, fasint in maniere che la part cruciâl dal disvilup nucleâr e passâs sot de supervision di une agjenzie internazionâl.

Vie pai agns e je stade madressude une grande esperience tal esercizi dal control nazionâl e internazionâl sore dai materiâi e des tecnologjiis nucleârs. Lis proceduris di sigurece metudis in vore de Agjenzie Internazionâl pe Energie Atomiche e domandadis dal Tratât di no proliferazion si fondin su la contabilizazion e sul control dal materiâl fissil, di mût di verificâ che i stâts che no disponin di armaments nucleârs a rispietin il lôr impegn di no convertî l'ûs di materiâl fissil ae produzion di armaments. Ma une azion plui incisive e studis plui aprofondîts a son neces-saris par slargjâ il control ancje ai stâts che a disponin di armis nuclears (Johnson 2009).

Une altre opzion di considerâ, lant daûr de propueste di Acheson e Lilienthal, e je che dut il materiâl nucleâr al deventi di proprietât internazionâl, di mût che la apropriazion di materiâl nucleâr di bande di un stât e sedi un reât cuintri de leç internazionâl (Committee on the Internationalization of the Civilian Nuclear Fuel Cycle 2008).

4. Eliminazion dal HEU. La corse ai armaments nucleârs te Vuere Frede e à prodot plui di 2500 toneladis di HEU, in gran part *weapon-grade*, sufficientis par fabricâ 100.000 ogjivis, che a son stadiis dopradis pe costruzion di armis e, intune percentuâl avonde alte, pe propulsion navâl. Plui dal 95% de produzion mondiâl di HEU e rive di Stâts Unîts e Union Sovietiche: i prins a àn prodot 1045 t di HEU cuntun inricjiment medi dal 82%, la seconde a 'nd à fabricadis 1400-1500 t (inricjît dal 90%)¹⁰. Come che si viôt te Figure 8, la produzion massime anuâl dai U.S. e je stade di 102.000 kg di HEU tal 1959, chê de Russie di 60.000 kg a metât dai agns setante.

La Tabele 1 e mostre lis risiervis mondiâls di HEU a metât dal 2009, par un totâl di 1600 ± 300 t, avonde par fabricâ 60.000 bombbis nucleârs. In precedence, la Russie e veve eliminât 367 t di HEU e i Stâts Unîts 124 t. Il grant margjin di inciertece al è dovût al fat che la Russie no à mai fat savê trop HEU che e veve prodot prime di fermâ la produzion ae fin dai agns otante.

4.1. Smaliment dal HEU. Il smaliment dal HEU al è avonde facil, stant che al pues jessi convertît in LEU (inricjît al 4,5% di ^{235}U) traviers de diluzion cun urani impuarît, naturâl o LEU. Il LEU nol è in stât di sostignî une reazion nuclear a cjadene che e risulti intune esplosion, ma al è

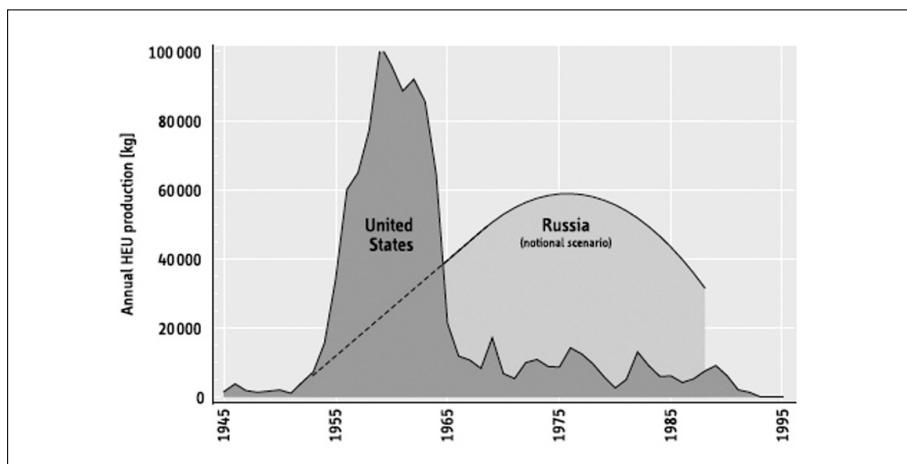


Figure 8. Produzion di HEU vie pai agns di Stâts Unîts e Russie (IPFM 2008).

Tabele 1. Risiervis di HEU in toneladis a metât dal 2009 (IPFM 2009).

Stât	Armis	Navâl	Civîl	Soreplui
Cine	20 ± 4			
France	30 ± 6		5,1	
Indie	$0,6 \pm 0,3$			
Israël	0,1			
Pakistan	$2 \pm 0,4$			
Russie	590 ± 144	150 ± 30	30 ± 6	133
Ream Unît	17,4	4,5	1,4	
USA	250	228	30	109
Altris			10	
Totâl	$910,1 \pm 154,7$	$382,5 \pm 30$	$76,5 \pm 6$	242

doprât par alimentâ gran part dai reatôrs nucleârs mondiâl e duncje al à un valôr comerciâl. Il procès di eliminazion dai armaments al urani al scomence cu la conversion dai diviers components di HEU de bombe in sclesis di metal, che po dopo a veginin convertidis in ossit. L'ossit al passe traviers di un procès di estrazion midiant di un solvent, che i gjave lis impuritâts chimichis, e al ven trasformât intun gas, l'esafluorûr di urani (UF_6), che al è messedât cun UF_6 inricjît al 1,5% di ^{235}U . Cheste seconde cualitât di gas e je prodote gjavant altris isotops ^{235}U di “codis” impuaridis vanzadis di altris procès di inricjiment. A coventin cirche 30 toneladis di cheste misture par diluî une tonelade di HEU, e la cuantitât di LEU prodote e baste par alimentâ un reatôr di 1 gigawatt par un an e mieç.

Ore presint, i Stâts Unîts a comprin LEU prodot cu la diluzion di 30 toneladis ad an di HEU *weapon-grade* di produzion russe, convertidis in 900 toneladis di LEU, suficientis par alimentâ par un an reatôrs a aghe lizere par un totâl di 45 gigawatt eletrics di produzion, vâl a dî il 45% de produzion nucleâr dai USA e il 12% di chê mondiâl. Il contrat tra Russie e Stâts Unîts, che al rivuarde la diluzion di un totâl di 500 t di HEU, che a corispuindin a 20 mil ogjivis nucleârs, al varès di jessi completât dentri de fin dal 2013 (Pascolini 2008).

La diluzion in LEU e je la procedure plui doprade pal smaltement di HEU no iradiât. Pal HEU contignût tal combustibil esaurî prodot pe propulsion navâl o par ûs tai reatôrs di ricercje, lis proceduris di smaltement a son dôs:

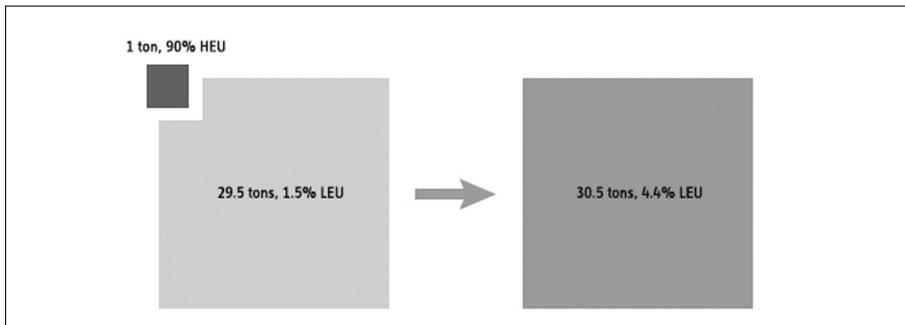


Figure 9. Scheme dal procès di conversion di une tonelade urani inricjît al 90% in LEU.

- riprocessament par recuperâ l'HEU, che po dopo al ven diluît in LEU;
 - smaliment intun dipuesit gjeologjic insieme cul combustibil esaurît dai reatôrs nucleârs.
- Lis tecnichis di riprocessament a son costosis e si è daûr a cirî alternativis di mût di ridusi i coscj e produsi mancul residuis.

4.2. Us no militârs dal HEU. Intune prospetive di abolizion dai armaments nucleârs, dut l'HEU al varès di jessi eliminât e sostituît cun soluzions alternativis. In dì di vuê, in plui che te produzion di armaments nucleârs l'HEU al è doprât soredut in chescj setôrs:

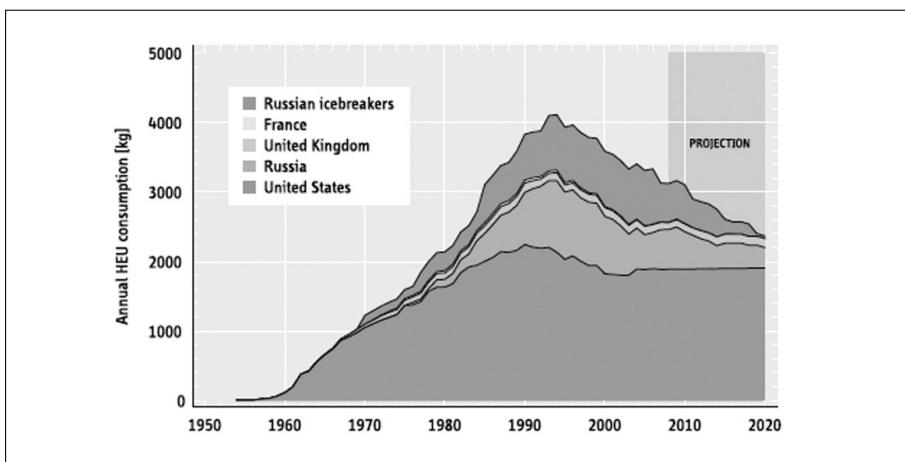


Figure 10. Consum di HEU pe propulsion navâl (IPMF 2009).

- produzion di combustibil pai reatôrs navâi;
- produzion di combustibil pai reatôrs veloçs di fabricazion russe;
- produzion di combustibil pai reatôrs di ricercje;
- fabricazion di targets par ûs radiofarmaceutic.

Reatôrs pe propulsion navâl. L'HEU al è un materiâl une vore adat a jes- si doprât tai reatôrs pe propulsion navâl, tai sotmarins e tes nâfs militârs di superficie, dulà che a coventin nusei compats, vâl a dî piçui ma cun- tun potenziâl di burn-up alt. Vuê a son in funzion 193 dispositifs di propulsions navâl alimentâts a HEU, distribuîts tra cuatri stâts. In particolâr, i Stâts Unîts a disponin, dongje di sotmarins nucleârs, di nâfs puarte- avions e cjacotorpedinieris a propulsion nucleâr; la Russie di incrosadôrs e di une flote di nâfs rompiglace. Il consum totâl di HEU pe propulsion navâl al è stât, in dut il mont e pal 2007, di 3140 kg ($\pm 50\%$), doprâts par doi tierçs di nâfs americanis.

L'ûs di HEU pe alimentazion di chescj reatôrs al è stât une font di preocupazion grande par vie dal pericul di proliferazion. In cont di che- st, la France e je daûr a passâ dal HEU al LEU par resonis economichis; in Russie a son daûr a studiâ metodichis di ûs dal LEU tai reatôrs des nâfs rompiglace, che a podaran vê utilitât ancje par altris tipologjiis di imbarcazions. La conversion a LEU dai reatôrs navâi inglês e americanis, invezit, e je plui complicade. Di fat, se i reatôrs francês e rus a vegin rifornîts di combustibil ogni 5-10 agns, il Ream Unît e i Stâts Unîts, par evitâ periodis di inativitât tal moment dal riforniment, a utilizin nusei projêtats par durâ par dute la vite de nâf, vâl a dî fin a 45 agns (Ma e von Hippel 2001). Par chest, i Stâts Unîts a destinin lis lôr risiervis plui grandis di HEU ai reatôrs pe propulsion navâl.

Reatôrs di ricercje. Reatôrs di ricercje e prototips sperimentâi a son reali- zâts di plui di 60 agns, cu la finalitât principâl di aplicâ lis sorzints di neutrons a une varietât di ûs. Cheste tipologjie di reatôrs e je stade utilizade pal disvilup des tecnologjiis dai reatôrs pe propulsion e produzion di energjie e e je un strument di ricercje fondamentâi tai setôrs de fisiche e inzegnerie nucleâr, de chimiche nucleâr, de sience dai materiâi e de biol- logije, contribuïnt al progrès scientifc e tecnologjc de medisine, de in- dustrie e de agriculture. I reatôrs di ricercje a son deventâts indispensa-

bii pe produzion di isotops medics, di mût di rispuindi ae domande simpri plui grande di proceduris diagnostichis e terapeutichis fondadis su lis tecnichis de medisine nuclear. Plui di 700 reatôrs di ricerche a son stâts comissionâts in dut il mont, e di chescj 240 a son operatîfs in chest moment in 55 païs dal mont; altris 9 a son in fasis diviersis di costruzion e altris ancjmò a son in progetto.

A son plui piçui e plui sempliçs dai reatôrs pe produzion di energjie e a funzionin a temperaduris plui bassis. A òan bisugne di mancul combustibil, ma ancje di urani cuntun grât plui alt di inricjiment, par solit al 20% di ^{235}U , ancje se cierts modei a doprin urani al 93% di ^{235}U . Al è stât calcolât che, tal 2007, il consum dai 18 reatôrs di ricerche plui grancj alimentâts a HEU al è stât di 598 kg e il consum mondiâl totâl di 787 kg (Reistad e Hustveit 2008). La cuestzion dal inricjiment e je stade un dai argoments principâi di discussion di bande dal *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation* (INFCE), une comission di studi sponsorizade de Nazions Unidis che, tal 1980, e concludeve che, par evitâ la proliferazion dai armaments, l'inricjiment al varès di jessi limitât a un massim dal 20% di ^{235}U . In precedence, une iniziative similâr e jere stade cjapade dai Stâts

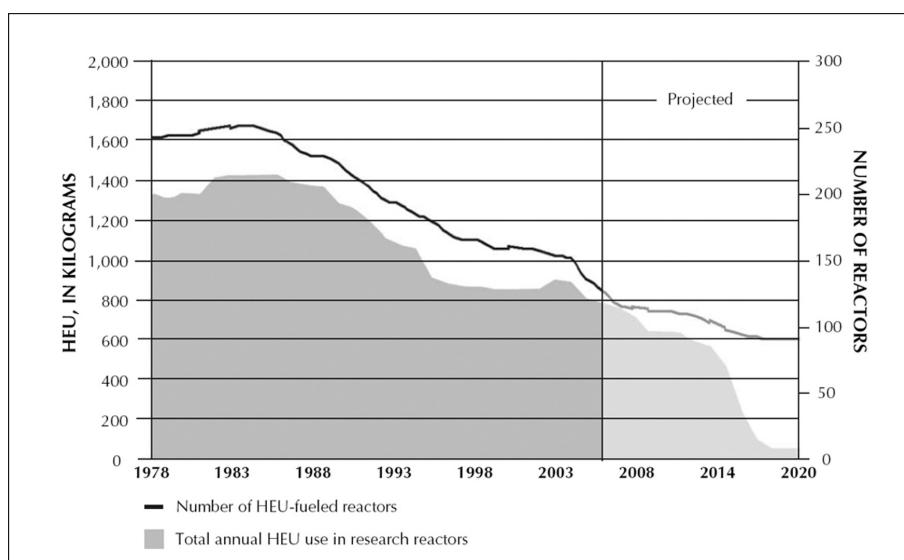


Figure 11. Ús anuâl di HEU tai reatôrs di ricerche e numer di reatôrs alimentâts a HEU, 1978-2020 (Reistad e Hustveit 2008).

Unîts tal 1978, cuant che a inviarin un program di inricjiment ridot par reatôrs di ricercje e sperimentâi.

Il pericul de proliferazion e di apropiazions di bande di grups teroristics si spieghe soredu cu la dispersion di chescj reatôrs e cul lôr nivel di sigurece, dispès no adeguât (von Hippel 2004). Dai 207 reatôrs alimentâts a HEU operatîfs tal 2007, a ‘nt varan di jessi convertîts 129, par un totál di 20 t di urani. Tal Setembar dal 2009, 67 reatôrs di ricercje a jerin stâts sierâts o convertîts a une alimentazion a siliciûr di urani a bas inricjiment; altris 34 a podaran jessi convertîts doprant combustibil disponibil e altris 28 a varan bisugne di combustibii a densitât plui alte no ancjemò disponibii. L’obietîf al è chel di convertîju ducj e 129 dentri dal 2018.

La varietât di tipologije dai reatôrs di ricercje e domande studis personalizâts par ogni implant, di mût che al puedi jessi convertît cence jessi masse penalizât in tiermins di performance. In cont di chest, la comunitât scientifice internazionâl e je daûr a cirî manieris di svilupâ, autorizâ e brevetâ un combustibil di alte densitât basât suntune lee di urani e molibden dispierdude in alumini, che al puedi slargjâ l’us di LEU a chei reatôrs che a àn bisugne di densitâts plui altis di chêss che si puedin otignî cu lis dispersions in siliciûr e, cun di plui, al puedi jessi riprocessât plui facilmentri (Bradley, Adelfang, Goldman 2007).

Il câs plui famôs e dificil al è chel dal reatôr di ricercje FRM-II dongje Munic, che al à tacât a lavorâ tal 2004 e al à bisugne di 35-40 kg di HEU *weapon-grade* ad an. In chest câs, i studiôs a son daûr a cirî di ridusi la percentuâl di inricjiment dal urani al 50% o mancul.

Produzion di isotops par ûs medic. Bersais (*targets*) di urani *weapon-grade* posizionâts in corints di neutrons di alte intensitât dongje dai nusei di reatôrs di ricercje di alte potence a son lis sorzintis principâls di une serie di prodots di fission, di durade curte, che a àn une funzion une vore impuantante te medisine moderne, in particolâr il tecnezi- 99m Tc, il jodi-131 e il xenon-133. Plui di 50 kg di HEU a son doprâts ogni an pe produzion di isotops medics. Il 99m Tc al è doprât in cirche l’80-85% des proceduris diagnostichis par imagjins (tra di lôr la sintigrafie miocardiche perfusionâl e la sintigrafie dai vues), plui o mancul 20 milions di esams ogni an. Il 99m Tc al à une emivite di 6 oris e al emet un rai gamma

quant che si disecite. Associât a diviersis sostancis, al pues jessi seguît tal so moviment ator pal cuarp traviers des sôs emissions gamma e doprât par esaminâ la funzionalitât di varis orghins. La emivite curte e la assen-
ce di radiazion beta a minimizin il pericul di soministrâ dosis di radia-
zioni no necessariis. Si oten de decjadence radioative (emivite di 2,7 dîs)
dal molibden-99 (^{99}Mo), prodot de fission dal urani¹¹. Il ^{99}Mo al è as-
sorbît de superficie di un jet di piçulis parteselis di alumine in “gjene-
radôrs”, e di li il tecnezi al ven gjavât vie in soluzion.

Tal procès di produzion di molibden dal urani *weapon-grade*, a vegin consumâts mancul dal 5% dai targets e dut il rest al è imagazinât tant che residui; i produtôrs di isotops a garantissin il traspuart e la conservazion dal HEU in condizions di sigurece, ma nol è clâr se il nivel di cheste sigurece al sedi avonde alt di eliminâ il pericul di robariis. Inte otiche di eliminazion dal HEU, diviers studis a son daûr a cirî tecnichis alternati-
vis di produzion dal molibden (von Hippel e Kahn 2006).

La sfide e je chê di cjatâ une tecniche che e vedi une alte produzion e alte attivitat specifiche, e che e sedi competitive dal pont di viste econo-
mic cu lis metodologjiis di produzion atuâls. Utilizant rais di parteselis,
si puedin meti in vore trê procès differents (Fong, Meyer, Zala 2008):

- cature di un neutron: un rai intens di neutrons gjenerât di un reatôr nucleâr al cêt un neutron al target di ^{98}Mo produsint ^{99}Mo ;
- fotoneutrons: un rai intens di fotons gjenerât di un aceleradôr di ele-
trons al gjave un neutron a un target di ^{100}Mo produsint ^{99}Mo ;
- fotofission: un rai une vore intens di fotons gjenerât di un aceleradôr di eletrons al puarte un target di urani a fissionâsi produsint ^{99}Mo .

Par che chestis proceduris a puedin jessi dopradis si à di risolvi une serie di problemis, in particolâr la disponibilitât di $^{99\text{m}}\text{Tc}$ intune forme chimiche utile e te stesse cualitât dal prodot di fission, par podê jessi doprât cui tancj kits radiofarmaceutics che si cjatin cumò sul marcjât.

La plui doprade di chestis metodologjiis alternativis e compuarte la cature di un neutron di bande di un target inricjît di ^{98}Mo (il ^{98}Mo si cja-
te in nature intune percentuâl dal 24,13%). La Figure 12 e paragone lis dôs metodichis principâls.

Un altri pont di considerâ, ancje se di impuantance secondarie, al è che tal procès di fission a son coprodots diviers altris radionuclis doprâts

TABLE D.1 Comparison of Fission and Neutron Produced ^{99}Mo

$^{235}\text{U}(\text{n,f})^{99}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}(\text{n},\gamma)^{99}\text{Mo}$
Produces high specific activity ^{99}Mo	Produces low specific activity Mo-99
Requires enriched ^{235}U target	Requires highly enriched Mo-98 target
Complex chemical processing	Simple chemical processing
Requires dedicated processing facility	Requires high flux neutron source
Generates high-level radioactive waste	Generates minimal waste

Figure 12. Comparazion des dôs tecnicis principâls di produzion di Mo-99 (Committee on Medical Isotope Production without Highly Enriched Uranium 2009).

in medisine, che tal câs dal procès di cature dal neutron a varessin di jesi si gjenerâts intune altre maniere.

Un studi resint de Academie nazional americane des sciencis (Committee on Medical Isotope Production without Highly Enriched Uranium 2009) al racomande, tant che la miôr tecniche alternative, di rimplaçâ i targets di HEU cun altris di LEU, une metodiche doprade in Argjentine za dal 2002. Un reatôr di progettazion e fabricazion argentine dongje Sydney, in Australie, al produsarà ca di pôc ^{99}Mo doprant combustibil e targets di LEU, e une dite argentine e je daûr a completâ un implant di fabricazion di ^{99}Mo intun reatôr dongje il Cairo che al do pre dome LEU. Cheste metodologjie e à bisugne di jessi perfezionade, soredut par miorâ la eficience de estrazion dal ^{99}Mo , garantî il nivel cualitatîf dal prodot, ridusi i residuis radioatîfs e mantignî sot control la produzion di plutoni.

5. Smaltiment dal plutoni. Lis risiervis mondiâls di plutoni separât a rivin a plui di 570 t. Chês par ûs civil a son plui grandis di chês par ûs militâr, e chestis secondis a cjapin dentri ancie material declarât in soreplui ma no ancjemò smaltît. Un reatôr a aghe lizere (LWR, *light-water reactor*) di une potenze di 1 gigawatt eletric, che al lavori al 90% dal so potenziâl, al prodûs cirche 250 kg di plutoni ad an. Il combustibil esaurît gjenerât ogni an dai reatôrs nucleârs al è di cirche 10 mil toneladis, che a contegnin 75 t di plutoni. Plui o mancul un cuart dal combustibil esaurît prodot ogni an al ven riprocessât; gran part dal restant al è imazginât tai implants.

Tabele 2. Risiervis nazionâls di plutoni separât in toneladis a metât dal 2009 (IPFM 2009).

Stât	Militâr	Altris ûs strategjics	Civîl conservât dentri dal Stât	Civîl conservât fûr dal Stât	Soreplui militâr
Belgjiche				1,4	
Cine	4 ± 0,8				
France	5 ± 1		54,9		
Gjermanie			1	12	
Indie	0,7 ± 0,14	6,8 ± 1,36			
Israël	0,65 ± 0,13				
Japon			87	38	
Coree dal Nord	0,035 ± 0,018				
Pakistan	0,1 ± 0,02				
Russie	111 ± 25		44,9		34
Ream Unît	3,5		76,8	0,9	4,4
USA	38				53,9
Total	163 ± 27	6,8 ± 1,36	264,6	53,3	92,3

Al contrari dal HEU, il plutoni *weapon-grade* nol pues jessi eliminât diluïntlu cuntun isotop no fissil. Ducej i isotops di plutoni gjavât il ^{238}Pu , che si cjate dome in cuantitâts relativementri scjarsis, a puedin sostignî une reazion a cjadene esplosive. Par cheste reson il smaliment dal plutoni al è forsit il probleme plui dificil intune otiche di disarmament permanent.

Studis aprofondîts puartâts indevant de Academie nazionâl americane des sciencis (Committee on International Security and Arms Control, 1994 e 1995) e di une comission scientifice bilaterâl russe-americane (Holdren e Velikhov 1997) a àn cjapât in considerazion une serie di diversis opzions pal smaliment dal plutoni. Une prime pussibilitât e sarès chê di imagazinâ indefinitementri lis cuantitâts in plui di plutoni separât in struturis di alte sigurece, sot de vigilance des istituzions interessadis: il materiâl, in ogni câs, al restarès disponibil par jessi riutilizât in armis nucleârs tal zîr di pôc temp e cun pocje spese.

Dongje dal imagazinament, lis dôs soluzions mancul problematichis a saressin: messedâ il plutoni cul urani par produsi combustibil MOX di doprà tai reatôrs, o ben imobilizâlu cun residuis di alte radioativitât. In ducj i doi i câs gran part dal plutoni al vignarès, ae fin dal procès, incorporât in struturis di imagazinament dai residuis grandis e une vore radioativis, di indulà che al sarès dificil e costôs tirâlu fûr.

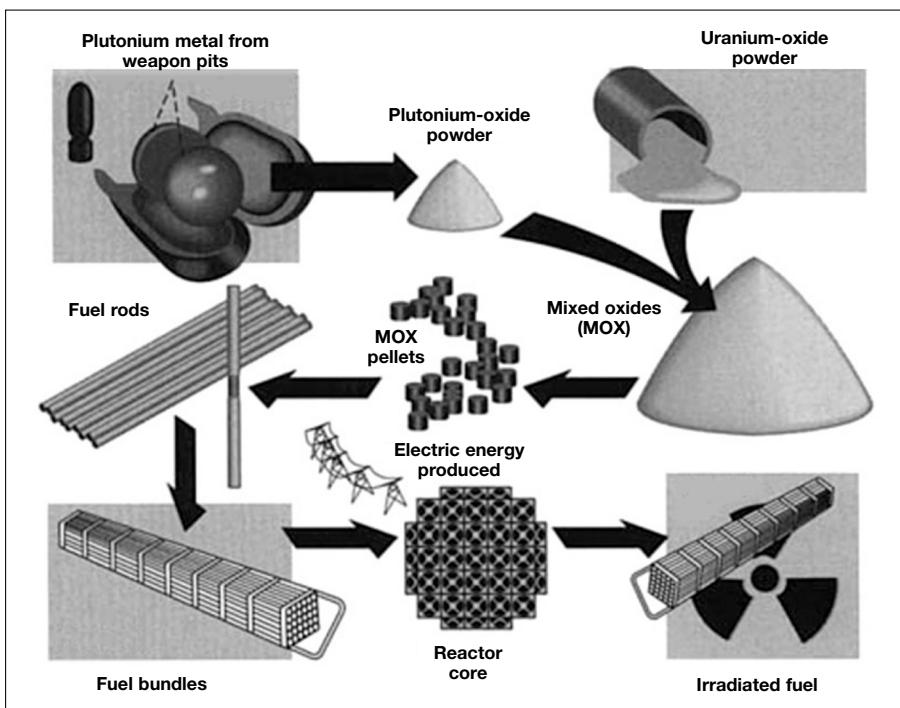


Figure 13. Diagram dal procès di smaliment dal plutoni tant che combustibil MOX (Pascolini 2008).

Tal procès di smaliment, il plutoni al ven separât dai altris materiâi e convertît in ossit. Te tecniche di trasformazion in combustibil MOX (*mixed oxides*), l'ossit di plutoni al è messedât cun ossit di urani, pressât, cuet e pestât formant scais cilindrichis di ceramiche, che a vegnîn cja-riadiis in luncs tubui di metal doprâts tant che combustibil. Dopo jessi stât iradiât tal reatôr, il combustibil esaurît al à dentri ancjemò doi tierçs dal plutoni iniziâl, contignût però in grandis misturis une vore radioati-vis di diviersis sostancis, e duncje par recuperâlu a coventaressin procès di trasformazion chimiche comandâts a distance.

La procedure di smaliment dal plutoni midiant de trasformazion in MOX e je lente: par resons di sigurece, i reatôrs a aghe lizere a puedin doprâ MOX dome par un tierç dai lôr nusei, di mût che il plutoni cjariât par GWe/an al è di cirche 300 kg. I reatôrs veloçs progetâts par doprâ dome MOX tai lôr nusei a puedin doprâ ancje combustibil cun concen-

trazions une vore plui altis di plutoni. Il reatôr sperimental rus BN-800 di 0,8 GWe di potence, cumò daûr a jessi costruit, al iradiarà cirche 1,6 toneladis di plutoni in MOX ad an.

Te procedure di imobilizazion, il plutoni, messedât in maniere omogjenie cun residuis di alte radioativitât, al ven imobilizât in forme vetrose o di ceramiche. La metodologje, però, e presente dificoltâts, de necessitat di evitâ criticitâts al probleme di ciatâ procès di lavorazion e formis di imagazinament dai residuis che a puedin gjestî altis concentrations di plutoni e di prodots di fission. Tecничis alternativis a son daûr a jessi investigadis (IPFM 2007).

In Russie, il plutoni in soreplui al è simpri stât considerât un ben di sfrutâ pe produzion di energjie, e duncje la idee di imobilizâlu no je acetade. Tal 2000 al è stât firmât un acuardi tra Russie e Stâts Unîts par eliminâ 34 toneladis di plutoni *weapon-grade* parom, plui 4 toneladis di plutoni par ûs tai reatôrs. Intune prime version dal plan, la Russie e varès vût di convertî il plutoni in MOX di doprâ tai siei reatôrs a aghe lizere, ma l'acuardi al à finît par blocâsi par vie di diferencis programatichis, finanziariis e legâls tra lis dôs potencis. Ai 13 di Avril dal 2010 i doi paîs a àn firmât un protocol di aplicazion dal acuardi dal 2000, che al permet l'ûs dai MOX tai neutron veloçs rus (Horner 2010); il smaliment di bande dai doi paîs al varès di tacâ dentri dal 2018.

6. Conclusion. La eliminazion dai armaments nucleârs a nível mondiâl e je di tant timp un obietif perseguit di diviers grups di pression, ognidun cu lis sôs resonis e motivazions. I sienziâts a son stâts i prins a capî la menace potenziâl rapresentade dai gnûfs armaments indiscriminâts e gran part di lôr si è impegnade a pro dal disarmament nuclear e à colaborât in diviersis iniziativis internazionâls par limitâ la corse ai armaments e controlâju. In di di vuê, ancje i leaders politics a convegnin simpri di plui che un mont cence armis nucleârs al è realistic, realizabil e tal interès di ducj, sticant la atenzion de opinion publiche e dai studiôs su chest probleme. Chest al cree grovis oportunitâts di azion politiche a nível nazionâl e internazionâl in dut il mont, che a varessin di jessi fatis cognos-si a la int e sostignudis di dutis lis organizazions no governativis interes-sadis al teme de pâs e sigurece mondiâl.

Lis enormis dificoltâts scientifichis e tecnologichis associadis ae tran-

sizion de situazion atuâl a un mont sfrancjât dai armaments nucleârs, consideradis dome in part ta chest studi, a domandin di jessi esaminadis cun atenzion di un grant numar di sienziâts cun competencis differentis. Chestis dificoltâts a rapresentin une sfide une vore plui stimolant dal disvilup dai armaments, argoment che al à ocupât gran part de comunitàt scientifice fin cumò, e a puedin furnî gnûfs e interessants argoments di ricercje e oportunitâts di lavor par chei sienziâts e tecnics che a son impleâts te produzion e gestion di chestis armis (Reppy 2010).

Intune imprese di cheste sorte, come che nus ricuardin Acheson e Lillianthal, “no vin a ce fâ dome cuntun probleme militâr o scientific ma cuntune cuestion plui largje che e tocje la gestion politiche e la nature umane stesse”.

¹ Il test dal *Treaty between the United States of America and the Russian Federation on measures for further reduction and limitation of strategic offensive arms* (Tratât tra Stâts Unîts de Americhe e Federazion Russe su lis misuris di riduzion e limitazion ulteriôr des armis ofensivis strategichis), cognossût ancie tant che “New START”, plui il protocol e trê zontis, si lu cjate tal sít dal Dipartiment di Stât dai Stâts Unîts. Il gnûf tratât al è impuantant par resons politichis, screant une gnove fase di relazions positivis tra Russie e Stâts Unîts e furnint un quadri di riferiment par altris riduzions seguitivis des fuarcis nucleârs strategichis, ma al previôt dome piçulis riduzions di une tipologjie di armaments e missii nucleârs (Pascolini 2010).

² Il test de risoluzion si lu cjate tal sít des Nazions Unidis.

³ La *Hoover Institution* al è un istitût di ricercje conservadôr leât al partit republican.

⁴ Il *Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty* (CTBT) (Tratât di interdizion totál dai experiments nucleârs), firmât a New York ai 24 di Setembr dal 1996 ma ancjemò no in vore ai 10 di Jugn dal 2010, al proibis lis esplosions nucleârs te sperimentazion di armis nucleârs o in cualsiedi altre forme. Al met in vore un sisteme di verifiche mondial che al cjape dentri une rêt mondial de stazions di control, un centri di documentazion

internazional cun sede a Viene, un procès di consultazion e sclarimenti, ispezions sul puest e iniziativis di supuart dai paîs membris. Ai 10 di Jugn dal 2010, i stâts membris a son 182, a son stâds depositadis 153 ratifichis e a mancijâ ancjemò 9 dai 44 stâts che a coventin par che il tratât al puedi jentrâ in vore (Cine, Egjip, Indie, Indonesia, Iran, Israël, Coree dal Nord, Pakistan e Stâts Unîts). Il test dal tratât si lu cjate tal sít des Nazions Unidis.

⁵ La Figure 1 si base su lis stimis des riservis nucleârs ripartadis in Norris e Kristensen (2006) e inzornaments. I dâts a puedin jessi no acurâts, stant che nissun guvier al publiche dâts précis su lis sôs ogjivis nucleârs, dividudis tra chêis in diversis fasis di operativitat o in dipuesit, manutenzion e demolizion.

⁶ Informazions introdutivis sui armaments a fission e fusion termonucleâr e sui reatôrs nucleârs pe produzion di energie si cjatin par exempli in Charpak, Garwin e Journé (2005).

⁷ Un chilogram di material fissil – la cuantitat fissionade tes bombis di Hiroshima e Nagasaki – e prodûs energie ecuivalente ae explosion di 18 mil toneladis (18 kilotons) di esplosifs chimics di alt potenziâl.

⁸ In plui dal ^{235}U e ^{239}Pu , ancie i isotops ^{233}U , neptuni-237 e americci-241 a son in stât di sostigni une reazion a cjadene. Se il ^{235}U e ^{239}Pu a son i

unics materiâi fissii che, par chel che si sa, a son stâts doprâts in armaments nucleârs, i Stâts Unîts a àn testât prototips a ^{233}U e la France si pense che e vedi fat esperments cul netuni-237 (IPMF 2006).

⁹ Lis tecnologijis sperimentadis a son differentis, cun diviers nivei di efficacie. In plui che lis centrifughis, la diffusion gasose e je stade par tancj agns la tecnologie dominante. Il gas esafluorûr di urani al ven metûr in pression e pompât traviers di une membrane porose, che e ven traviersade des moleculis gassosis in percentuâls differentis a seconde de diferente masse dai isotops. Ripetint il procès plui o mancul un miâr di voltis, cheste metodiche e prodûs moleculis di esafluorûr di urani une vore inricjidis. Implants di chest gjenar a la-

vorin ancjemò tai Stâts Unîts e in France, ma ducj e doi i païs a previodin di sostituiju cun implants a centrifughis, plui economics e eficients.

¹⁰ I Stâts Unîts e il Ream Unît a àn publicât lis informazions relativis ae lôr produzion e ûs di HEU; i dâts relatûfs ae Union Sovietiche si fondin soreduet su lis stimis de cressite dai implants di inricjiment instalâts, tignint cont ancie dal aument graduâl te produzion di LEU par ûs tai reatôrs pe produzion energetiche.

¹¹ Cuasi dute la produzion mondial di molibden e rive di cuatri ditis specializadis, che a doprin targets di HEU: la *MDS-Nordion* (Canadà), la *Malinckrodt* (Païs Bas), l'*Institut National des Radioéléments* (Belgjiche), la *Nuclear Technology Products* (Sud Afriche).