

Sfidis sientifichis 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 panorame politic internazionâl, incuintrant il favôr di politics di prin plan, stiçant dibatiments e discussions vivarosis e disveant l'interès di diversis istituzions, che a studiin modalitâts di atuazion e pusibilis iniziativis concretis.

Te prime part dal articul si ricuardin lis iniziativis plui impuartantis cjapadis vie pai 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 timp de vuere frede e à fat di mût che, in diviers paîs, si ingrumassin arsenai enormis di armis nucleârs di tipologjiis diferentis; cun di plui, a son stadis prodotis cuantitâts une vore grandis di materiâi fissii. I materiâi fissii, pal plui 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 furnìs une introduzion descriptive ai armaments nucleârs, ai materiâi fissii e ae lôr produzion e ûs tes armis nucleârs, dongje di une panoramiche des risiervis mondiâls di materiâl fissil.

A vegnin cjapadis in considerazion, po dopo, lis tantis sfidis sientifichis e tecnologjichis proponudis dal procès di transizion a un mont stabil e sigûr, sfrancjât des armis atomichis. Tra chestis, la gjestion dal procès di disarmament, la cuestion de reversibilitât, la gjestion e eliminazion dai materiâi fissii immagazinâts, 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 ançe chel prodot par ûs diferents de produzion di armis: propulsion navâl, reatôrs di ricercje e produzion di isotops par ûs medic.

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

Al ven tocjât, in fin, il probleme dal plutoni separât e de inressite de cuantitât prodote dai reatôrs di ûs civil, come ançe la cuestion dal so smaltiment, un setôr che al lasse margjins une vore grancj a ricercjîs plui aprofondidîs.

La comunitât sientifiche e à prodot fin cumò une varietât di studis e ricercjîs sui diviers aspîts dal procès di disarmament, proponint soluzionis teorichis e praticis. Cun dut achel, ricercjîs e riflessions ulteriôrs a coventin par un aproç realstic a un mont cence armis nucleârs.

Key-words. Armaments nucleârs, disarmament, ricercje militâr, relazioni internazionali.

1. La rivitalizazion di un obietîf antîc. Al prin di Avrîl 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 impegnin par che i nestris paîs a contribuissin a costruî un mont cence armaments nucleârs, ricognossint, tal stes timp, che chest obietîf al domandarà di rinovâ 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 arsenai ofensifs strategicjs, scomençant cul rimplaçâ il Tratât di riduzion dai armaments strategicjs cuntun altri tratât juridichementri vincolant.

Il gnûf tratât START, sotscrit ai 8 di Avrîl dal 2010, al à confermât la credibilitât di chest impegn a pro di un mont cence armis nucleârs¹, impegn dividût di un numar tant plui grant di sostenidôrs: ai 24 di Setembar dal 2009, par iniziative de amministrazion 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 comunitât internazionâl e de necessitât urgjent di iniziativis concretis par contrastâju”. Cutuardis cjâfs di stât e di guvier a àn adotât ae unanimitât la Risoluzion 1887 che, ribadint la volontât dal Consei di sigurece di operâ pe eliminazion dai armaments nucleârs, e met in pîts une struture organizative che e judi a rivâ a chest obietîf².

Stant che, par plui di sessante agns, lis armis nucleârs a àn detât il program des relazioni 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 distrûzi dal dut la vite tal ne-

stri planet; cun dut chest, a son acetâts cence dî nuie de opinion publiche mondiâl, che e pâre che si sedi dismenteade de lôr existence 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 apeî pe eliminazion des armis nucleârs a son stâts fâts vie pai agns di figuris culturâls e religiosis impuartantis e dai moviments pacifiscj, licuidâts dai politics tant che utopiscj. Il Tratatû cuintri de proliferazion nucleâr, sotscriet tal 1968, al è l'unic document juridichementri vincolant che al dispon il disarmament nucleâr, in ogni câse cence specificâ tîmps e proceduris. Tes relazions internazionâls, la espression “disarmament nucleâr complet” e je spes stade doprade dome in clâf retoriche, cul efiet 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 impuartance che a puedin vê in dî di vuê.

1.1. Primis propuestis par un sisteme di control internazionâl. Diviers sienziâts che a colaborarin tal Proget Manhattan, crodint che lis relazions internazionâls di in chê volte no fossin in stât di gjestî un armament distrutîf 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 gjestion 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 tîmp une oportunitât e un pericol: 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 sinceritât 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 continuà a jessi part de agjende politiche. Tal Zenâr dal 1946 lis Nazions Unidis a meterin sù une comission che e studiàs in ce maniere che si podevin eliminâ lis armis atomichis doprant la energjie nucleâr par ûs pacifics. Chei stes obietîfs a forin cjapâts in considerazion ancje 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 Progjet Manhattan. Oppenheimer al jere stât influençât in particolâr des ideis di Bohr (Pascolini 2009) e al jere al corint de posizion cjapade dai scienziâts de Universitât di Chicago in cont de energjie atomiche, cussì come descritte tal *Franck Report* (1945).

L'*Acheson-Lilienthal Report* (1946) al proponè che dutis lis ativitâts pericolosis a fossin sometudis ae *Atomic Development Authority*, l'ent internazionâl di control dal svilup atomic; lis ativitâts no pericolosis, tant che la ricercje e i ûs pacifics de energjie atomiche, a varessin vût inveceit 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 gjestî i reatôrs pe produzion di plutoni e i implants di separazion dai isotops di urani, e concedi lis licencis pe costruzion e gjestion dai reatôrs atomics e par altris ativitâts puartadis indevant dai singui paîs (Pascolini 2009). Chest rapuart al stabìlì 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 distruci denter di trê mês dutis lis bombis atomichis esistentis, però cence proviodi nissune strutture di control internazionâl. La discussion e continuà denter de Comission, ma lis prospetivis di un acuardi si slontanarin a man a man che lis relations tra i doi paîs si lerin ruvinant, e il sfuarç di ripuartâ 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 prospettive di une riduzion dai armaments e cjatà un sburt gnûf cul incuintri fûr program tra Reagan e Gorbachev a Reykjavik tal Otubar dal 1986. Gorbachev al presentà une schirie di propuestis coragiosis, tant che la riduzion dal 50% des armis nucleârs strategjichis e la eliminazion dai missii 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 capîs che a un ciert pont i doi presidents a stevin valutant la pussibilitât di un acuardi formâl pe eliminazion totâl dai armaments nucleâr tal zâr di 10 agns. Lis delegacions che a compagnavin Reagan e Gorbachev a puartarin indevant un negoziât impegnatîf, svinantsi a un acuardi su lis armis strategjichis e a rai intermedi ma blocantsi su la cuestion de Iniziative di difese strategjiche. 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 rapresentâ un moment fundamentâl 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 ricuardâ il 20^{im} aniversari dal incuintri di Reykjavik, dulà che si cirî di riconsiderâ la prospetive di un mont cence armis nucleârs, come che al je 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 vignî 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 paîs a vedin acès aes armis atomichis e che a altris ur sedi dineât il drit, e presente une instabilitât intrinsiche, e duncje la eliminazion des armis nucleârs e je tal stes timp tal interès di ducj e realizabil. In cont di chest, i stâticsj a sugjerissin une serie di iniziativis par butâ lis fondis di un mont cence armis nucleârs: une riduzion ulterîôr dai armaments nucleârs, il de-alertament des armis strategjichis russis e americanis, la eliminazion dai armaments nucleârs di rai curt, la ratifiche dal *Comprehensive Test-Ban Treaty* (CTBT) che al proibîs dal dut i experiments 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 nucleârs (Shultz, Perry, Kissinger, Nunn 2008).

I articui dai cuatri stâts a stiçarin un interès enorme, sedi tai Stâts Unîts, dulà che a verin la poie di ducj i doi i candidâts ae Presidence, sedi tal rest dal mont. Diviers guviers a cjaparin in considerazion lis propuestis 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 maddressût une lungje esperience a nivel 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 strategjiis di dissuasion nucleâr convenzionâls, come ancje lis politichis atuâls di no-proliferaçion, no stevin produsint l'efiet desiderât.

Il disarmament nucleâr al è diventât un argument di discussion e dibattiment impuartant 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 nucleârs e je une sfide plui dificil cumò che no tai agns cuarante, cuant che dome doi paîs a vevin acès ae energjie 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 Israêl, ognidun cun interès particolârs e diferents; cun di plui, plui o mancûl il 30% dai stâts de NATO che no disponin diretamentri 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 mondiâls, 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 Prague ai 5 di Avrîl 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 obietîf che al domande pazienze e buine vo-

lontât”. Pazience e buine volontât a son dôs cualitâts che e varà di vê du-te la comunitât internazionâl, ognidun daûr des sôs pussibilitâts, e i sien-ziâts a podaran dâ une man a risolti i grancj problemis tecnics leâts a chest obietîf ambiziôs.

2. Armis nucleârs e materiâi fissii. Ancje se il numar des ogjivis nu- cleârs al è lât in mancual 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 Reykjavik (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 rapresentin, però, dome la ponte dal iceberg di dut un aparât militâr, sientific, industriâl e burocratic dedicât ae ricercje, al disvilup, ae produzion e ae gjestion des armis nucleârs, che al cjape dentri ancje sistemis specifics di comunicazion, informazion e control, simulazion, adestrament dal personâl e inzornament continui des strategiis militârs. Un mont pardabon libar dai armaments nucleârs

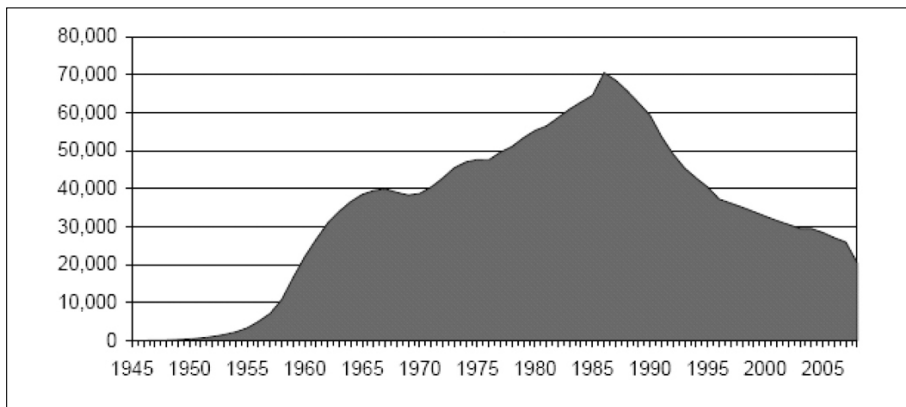


Figure 1. Evoluzion des risiervis nucleârs globâls 1945-2008⁵.

al domandarès la dissoluzion totâl di ducj i diviers aparâts vignûts sù ator de struture militâr nucleâr. Par che chest al sucedi 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 terroristiche – si cjati te posizion di produsî armis nucleârs gnovis.

La cuestion e devente ancjemò plui complesse se si cjapin in considerazion i programs pe produzion di energjie nucleâr par ûs civîl, che a àn un pês economic impuartant 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 resons e je indispensabil une volontât globâl di cjatâ soluzions ai problemis sientifics e tecnics che a nassin di cheste gnove sfide. Par capî ce che a son chescj problemis a van sclarîts cierts fats essenziâi 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 suddividi in dôs tipologjiis: dispositîfs a fission o termonucleârs a fission-fusion.

2.1. Armis nucleârs. La reazion di fission nucleâr e consist te division, inviadè 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 energjie. I neutrons prodots a puedin provocâ altris procès di fission intune reazion a cjadene che, in condizions 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 cualsisedi bombe, diviers kilograms di materiâl fissil a reagjissin in mancûl di un microsecont, produsint une energjie ecuivalent ae esplosion di desenis 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 efiet di strutûf des esplosions nucleârs.

E covente almancul une cuantitât minime di materiâl par mantignî ative une reazion a cjadene, di mût che une percentuâl masse grande dai neutrons no vedi di distacâsi de superficie invezit di jessi cjapade dentri tal nucli fissil. La cuantitât di materiâl necessari a formâ une masse “critiche” e je une vore variabil, daûr de nature dal materiâl fissil, de sô composizion chimiche e des carateristi-

chis 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, anچه se i Stâts Unîts a àn fat savê di resint che cui rifletôrs/tampons adats lis massis criticis 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 riconfigurâsi di colp di une condizion subcritiche di sigurece a une condizion supercritiche esplosive: te metodiche atuâl 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, travièrs 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 energjie aes stelis e al è responsabil de produzion di elements plui pesants partint dal idrogjen. Cheste reazion e je alimentade des fuarcis nucleârs ma ostacolate de repulsion eletriche tra nuclis, e e pues verificâsi dome in condizions speciâls di alte densitât e temperaduris estremis (milions di grâts). La fusion dai isotops pesants dal idrogjen, il deuteri e il trizi, cu la produzion di eli e la emission di neutrons, e domande temperaduris di plui di 100 milions di grâts ma e prodûs une grande cuantitât di energjie: la sô densitât di energjie par unitât di masse e je cuatri voltis chê de fission dal urani e 40 milions di voltis chê di une esplosion di TNT.

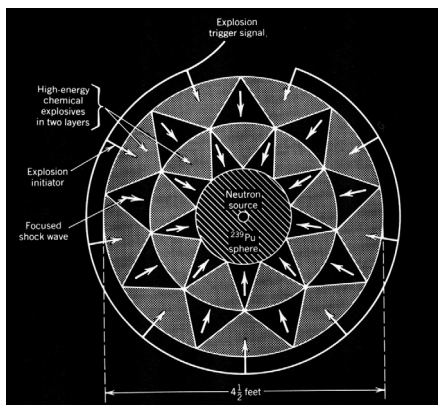


Figure 2. Raprezentazion schematiche dal mecanisim di implosion di une bombe a fission (Schroeder 1984).

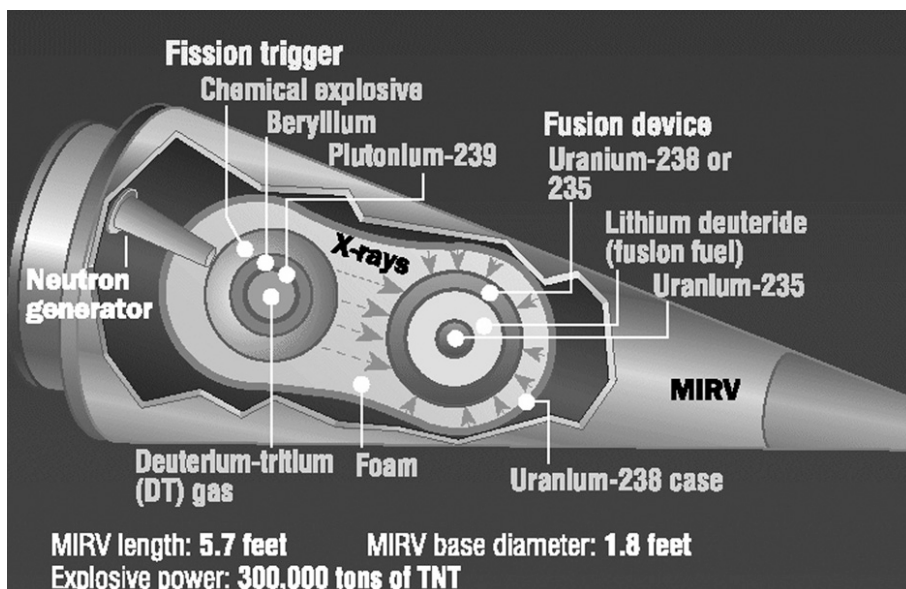


Figure 3. Scheme di une ogive termonucleâr moderne (Cox 2009).

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 im-plosion. Cuant che la temperaturade dal materiâl di fission e rive a 100 milions di grâts, e invie la fusion dal trizi cul deuteri produsint une esplosion di neutrons che e aumente la quantitat 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 scuén jessi inviate di une esplosion di fission, par che si puedin verificâ lis temperaturis 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 termonucleâr B-61 di produzion americana. L'esplosîf nucleâr al è indicât cun (*) (Font: Ministeri de Energjie, Stâts Unîts).

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

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

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

2.2. Materiâi fissii. Lis competencis sientifichis e tecnologjichis no puedin 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 tecnicis 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 inricjât. L'isotop fissil ^{235}U si lu cjate in chestis sostancis:

- urani impuarît, cun mancual 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 mancual 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 nucleârs 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 diferenziin

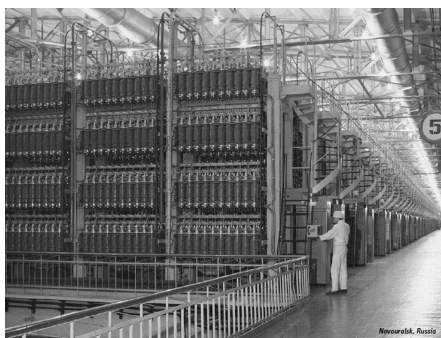


Figure 5. Implant di inricjiment dal urani di Novoulask; lis centrifughis russis a son curtis e metudis une parsore di chê altre (Font: Ministeri pe Energjie Atomiche, Federazion Russe).

tal lôr pês specific dome pal 1%. Tal implant di inricjiment, partint dal urani naturâl si prodûs, di une bande, urani inricjât te cuantitât di ^{235}U e, di chê altre, urani impuarît di ^{235}U . In di di vuê, la produzion di urani inricjât su scjale comerciâl 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 cuintri des parêts di une fuarce centrifughe

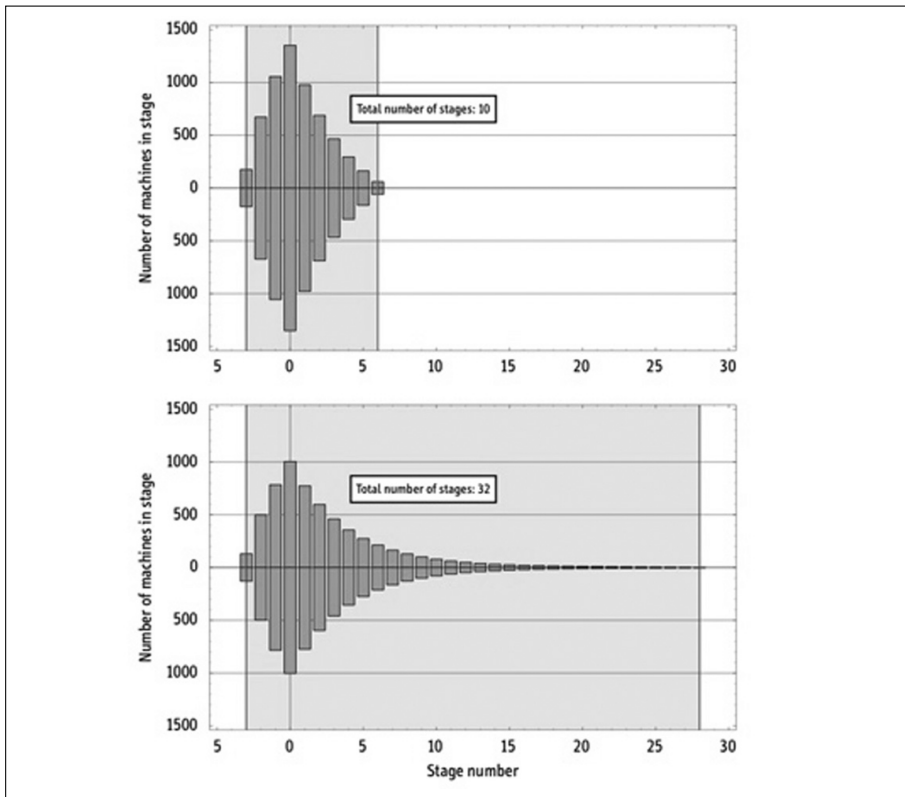


Figure 6. Sistemazions alternativis di chel stes numar di centrifughis, par produci LEU o HEU par ûs militâr (IPFM 2006).

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 externe 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, colegadis 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 timp a coventin ancje pe fabricazion di HEU e WGU par ûs militâr. Chel stes stabiliment, a partî di 150 toneladis di urani naturâl, al pues produci intun an 20 toneladis di LEU al 4% par alimentâ une centrâl di 1 gigawatt, o ben 550 kg di HEU inriciât al 93% par produci 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 nucleâr a esistin dome in tun numar relativementri piçul di stâts. Cumò come cumò, a son dîs i paîs che a disponin di implants di inricjiment dal urani par ûs civîl, considerant sedi chei in plene operativitât sedi chei in vie di costruzion o di progjet: Brasil, Cine, France, Gjermanie, Iran, Japon, Paîs 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 timp pe produzion di HEU par ûs militâr. In plui, la Indie e je daûr a produsi HEU pe propulsion dai somerzibii, mintri che il Pakistan al reste l'unic paîs a inricjî l'urani pe produzion di bombis.

Plutoni. Il plutoni al è un isotop artificiâl prodot tai reatôrs nucleârs cuant che l' ^{238}U al cjape sù un neutron formant ^{239}U , che subit dopo al decjât trasformantsi in ^{239}Pu traviers dal stadi intermedi dal isotop netuni 239.

Par podê jessi doprât intune arme nucleâr, il plutoni al à di jessi separât dal combustibil esaurît dal reatôr, che al conten prodots di fission une vore radioatîfs. Cu la moderne tecnologjie di riprocessament PUREX, 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 details tecnicos 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 radioativitât lizere e al pues jessi tocjât e lavorât cence schermis di protezion, ma al è pericolôs se al ven respirât o ingjerît.

Se un atom di ^{239}Pu al reste dentri dal reatôr dopo de sô creazion, al è pussibil che cul timp al assorbissi un secont neutron diventant ^{240}Pu , o ben un tierç o un cuart neutron diventant ^{241}Pu o ^{242}Pu . Il plu-

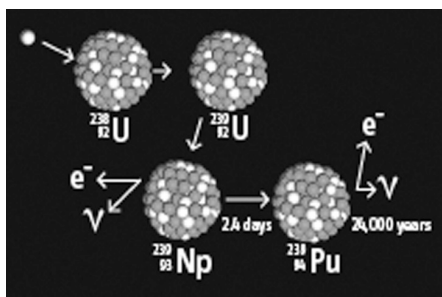


Figure 7. Reazions intun reatôr nucleâr pe trasformazion dal urani in plutoni.

toni, duncje, al pues presentâsi cun diversis 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 progjetiscj 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 emission relativementri basse di calôr radioatîf come ancje di neutrons e rais gamma, che a podaressin provocâ une pre-detonazion ridusint la potence de esplosion 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 riferis 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 problematichis, in prevision di un disarmament nucleâr e des strategjiis di no-proliferaçion. Il probleme principâl al è l'interès di bande de industrie nucleâr civîl pal recupar di plutoni dal combustibil esaurît, che al ven convertît 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 gjestion di materiâi par ûs militâr come il plutoni e domande normis di sigurece une vore plui rigjidis di chês dopradis tai implants pe fabricazion di LEU. Vuê a son implants di riprocessament par ûs comerciâl 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 imaginâsi un mont cence lis armis nucleârs. Come che al fâs notâ Holloway (2010b):

Ce vuelial dî liberâsi des armis nucleârs? Restarano tancj paîs che a rivaressin, tal zîr di pôc timp, a produsi armaments nucleârs? Intun mont cence armis nucleârs, coventaraial un gnûf, plui intrusif sisteme di ispezions? Vîno lis pussibilitâts di metilu in pîts? Saraial pericol che cualchidun si gjavi fûr? Ce podarîno fâ par che chest nol sucedi? Ae fin, ce situazion varîno?

A son domandis une vore impuartantis, che a àn tacât a ricevi la atenzion che a meretin (Drell e Goodby 2009, Evans e Kawaguchi 2009), ma e je impuartante 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 rivuardin, par esempli, i mecanims che a regularan il procès di denuclearizazion, la cuestion de reversibilitât, la gjestion e il smaltiment des risiervis di materiâl fissil e il pericol de ricostituzion e proliferazion des armis nucleârs doprant materiâi e implants utilizâts tai programs nucleârs par ûs civîl. 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 civîl.

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 scrupolose.

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 civîl, 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 strategjie comune di bande de comunitât internazionâl, che e varà di jessi pronte a rispuindi di colp e cun eficacie a cui che nol larà daûr des regulis. Lis carateristichis essenziâls 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 Proget Manhattan (Federation of American Scientists 1946). Une liste di chestis carateristichis si le cjate,

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

- a. Il plan al à di ridusi a proporzions di podê gjestî 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 puedi 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 pozizion sigure.
- d. Par podê garantî sigurece in maniere eficacie, il plan nol à di jessi dal dut negatîf, opressîf e autoritari. Invezit, al à di cirî di svilupâ lis potenzialitâts benefichis de energjie atomiche e incoragjâ il svilup des cognossincis di fonde, stiçant lis pulsions costrutivis e imagjativis des personis pitost di concentrâsi dome sui aspiets difensîfs e negatîfs.
- e. Il plan al à di jessi in stât di frontâ i gnûfs pericui che a podaressin manifestâsi tal di-svilup sucessîf di chest cjamp avonde gnûf. Dal pont di viste organizatîf, duncje, il plan al à di jessi flessibil e in stât di slargjâsi o ridusîsi 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 sientific ma cuntune cuestion plui largje 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 energjie nucleâr, fasint in maniere che la part cruciâl dal disvilup nucleâr e passàs sot de supervision di une agenzie internazionâl.

Vie pai agns e je stade madressude une grande experience tal esercizi dal control nazonâl e internazionâl sore dai materiâi e des tecnologjiis nucleârs. Lis proceduris di sigurece metudis in vore de Agenzie Internazionâl pe Energjie 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 necesaris 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 apropiazion 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 stadis 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 (inricjât 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 bombis nucleârs. In precedence, la Russie e veve eliminât 367 t di HEU e i Stâts Unîts 124 t. Il grant margin 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. Smaltiment dal HEU. Il smaltiment dal HEU al è avonde facil, stant che al pues jessi convertît in LEU (inricjât al 4,5% di ^{235}U) travers de diluzion cun urani impuarît, naturâl o LEU. Il LEU nol è in stât di sostignê une reazion nucleâr a cjadene che e risulti intune esplosion, ma al è

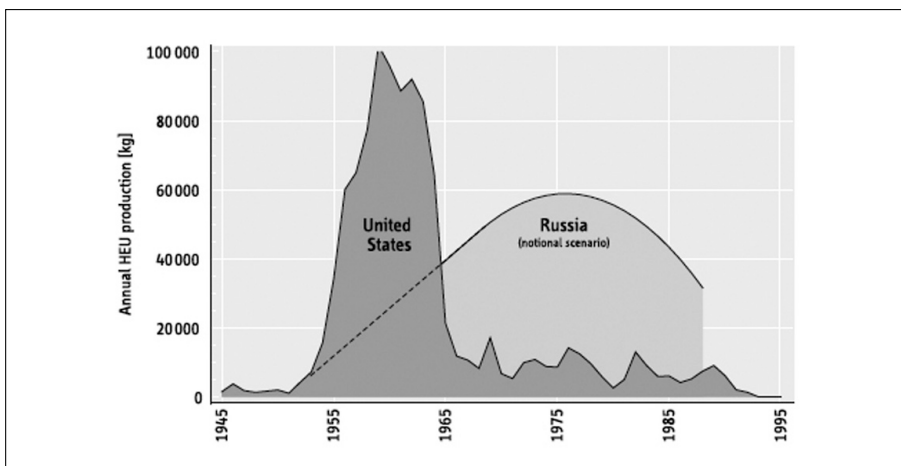


Figure 8. Produzion di HEU vie pai agns di Stâts Unîts e Russie (IPFM 2008).

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

Stât	Armîs	Navâl	Civil	Soreplui
Cine	20 ± 4			
France	30 ± 6		5,1	
Indie	0,6 ± 0,3			
Israël	0,1			
Pakistan	2 ± 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 ± 154,7	382,5 ± 30	76,5 ± 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 vegnin 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'esafuorûr 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 smaltiment di HEU no iradiât. Pal HEU contignût tal combustibil esaurît prodot pe propulsion navâl o par ûs tai reatôrs di ricercje, lis proceduris di smaltiment a son dôs:

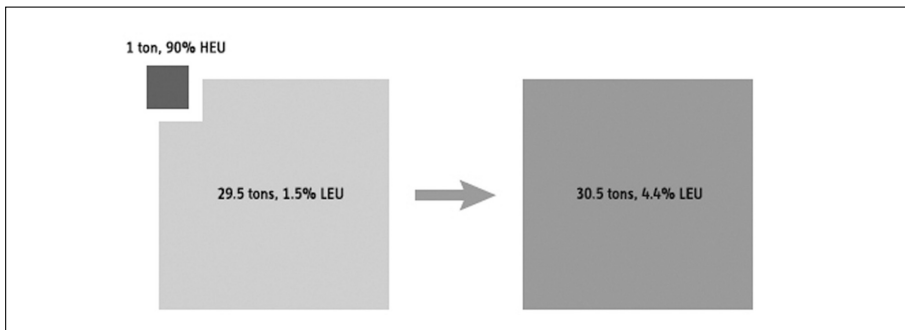


Figure 9. Scheme dal procès di conversion di une tonelade urani intricjât al 90% in LEU.

- riprocessament par recuperâ l'HEU, che po dopo al ven diluît in LEU;
- smaltiment intun dipuesit gjeologicj insieme cul combustibil esaurît dai reatôrs nucleârs.

Lis technichis di riprocessament a son costosis e si è daûr a cirî alternativis di mût di ridusi i coscj e produsi mancual residuis.

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

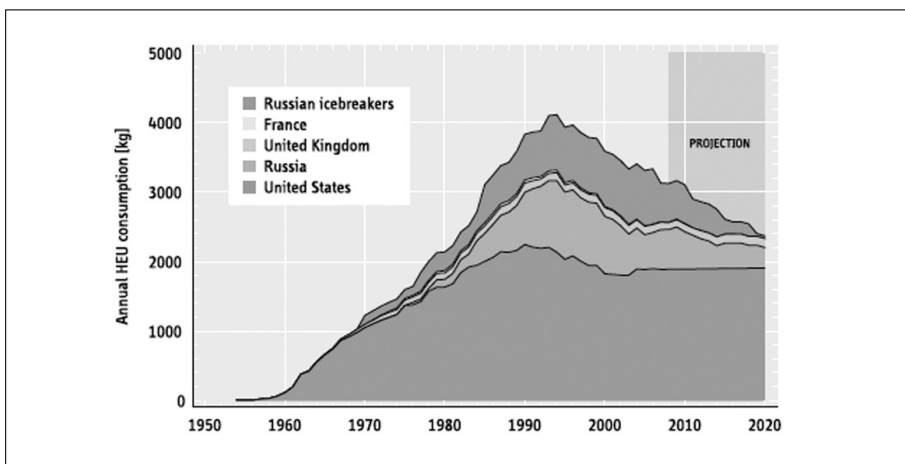


Figure 10. Consum di HEU pe propulsion navâl (IPMF 2009).

- produzion di combustibil pai reatôrs navâi;
- produzion di combustibil pai reatôrs veloços 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 jessi 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 dispositîfs di propulsion navâl alimentâts a HEU, distribuîts tra cuatri stâts. In particolâr, i Stâts Unîts a disponin, dongje di sotmarins nucleârs, di nâfs puarte-avions e cjacetorpedinieris a propulsion nucleâr; la Russie di incrosadôrs e di une flote di nâfs rompiglance. 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 pericol di proliferazion. In cont di chest, la France e je daûr a passâ dal HEU al LEU par resons economicis; in Russie a son daûr a studiâ metodichis di ûs dal LEU tai reatôrs des nâfs rompiglance, che a podaran vê utilitât ancje par altris tipologjiis di imbarcazioni. La conversion a LEU dai reatôrs navâi inglês e americans, invezit, e je plui complicade. Di fat, se i reatôrs francês e rus a vegnin 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 progjetâts 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 realizâts 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 fundamentâi tai setôrs de fisiche e inzegnerie nucleâr, de chimiche nucleâr, de sience dai materiâi e de biologie, contribuint al progrès sientific e tecnologjic de medisine, de industrie e de agriculture. I reatôrs di ricercje a son diventâts indispensa-

bii pe produzion di isotops medics, di mût di rispuindi ae domande simpri plui grande di proceduris diagnosticis e terapeutichis fondadis su lis tecnicis de medisine nucleâr. Plui di 700 reatôrs di ricercje a son stâts comissionâts in dut il mont, e di chescj 240 a son operatîfs in chest moment in 55 paîs dal mont; altris 9 a son in fasis diversis di costruzion e altris ancjemò a son in progjet.

A son plui piçui e plui sempliçs dai reatôrs pe produzion di energjie e a funzionin a temperaduris plui bassis. A àn 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 calculât che, tal 2007, il consum dai 18 reatôrs di ricercje plui grancj alimentâts a HEU al è stât di 598 kg e il consum mondiâl totâl di 787 kg (Reistad e Hustveit 2008). La cuestion dal inricjiment e je stade un dai arguments 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 precedenza, une iniziative similâr e jere stade cjapade dai Stâts

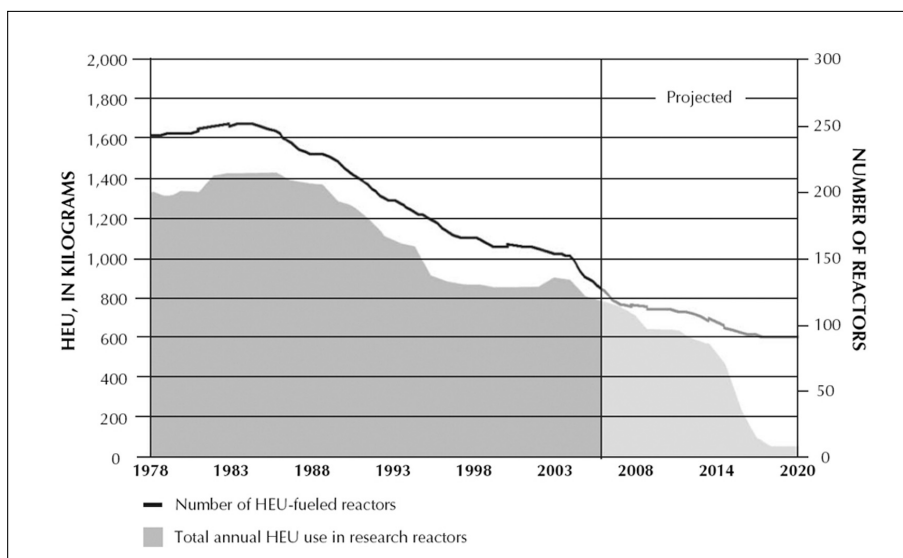


Figure 11. Ûs anuâl di HEU tai reatôrs di ricercje e numar di reatôrs alimentâts a HEU, 1978-2020 (Reistad e Hustveit 2008).

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

Il pericol de proliferazion e di apropiacions di bande di grups terroristics si spieghe soredut 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 totâl 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 disponibili. L'obietf al è chel di convertîju ducj e 129 dentri dal 2018.

La varietât di tipologjie 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 sientifiche 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 chês che si puedin oti-gnî 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 sorzints principâls di une serie di prodots di fission, di durade curte, che a àn une funzion vore impuartante te medisine moderne, in particolâr il tecnezi-99m (^{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

cuant 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 pericol di somministrâ dosis di radia-zions 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 vegnin consumâts mancual dal 5% dai targets e dut il rest al è immagazinât 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 si-gurece al sedi avonde alt di eliminâ il pericol di robariis. Inte otiche di eliminazion dal HEU, diviers studis a son daûr a cirî tecnicis 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 ativitât specifiche, e che e sedi competitive dal pont di viste econo-mic cu lis metodologjîs di produzion atuâls. Utilizant rais di parteselis, si puedin meti in vore trê procès diferents (Fong, Meyer, Zala 2008):

- capture 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 risolfi 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 do-prât cui tancj kits radiofarmaceutics che si cjatin cumò sul marcjât.

La plui doprade di chestis metodologjîs alternativis e compuarte la capture 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 impuartance 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

$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})^{99}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}(\text{n},\gamma)^{99}\text{Mo}$
Produces high specific activity ^{99}Mo	Produces low specific activity ^{99}Mo
Requires enriched ^{235}U target	Requires highly enriched ^{98}Mo 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 tecnichis principâls di produzion di ^{99}Mo (Committee on Medical Isotope Production without Highly Enriched Uranium 2009).

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

Un studi resint de Academie nazionâl 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 progjetazion e fabricazion argjentine dongje Sydney, in Australie, al produserà ca di pôc ^{99}Mo doprant combustibil e targets di LEU, e une dite argjentine e je daûr a completâ un implant di fabricazion di ^{99}Mo intun reatôr dongje il Cairo che al dopre dome LEU. Cheste metodologjie e à bisugne di jessi perfezionade, soredut par miorâ la eficiencie 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 civîl a son plui grandis di chês par ûs militâr, e chestis secondis a cjapin dentri ancje materiâl declarât in soreplui ma no ancjemò smaltît. Un reatôr a aghe lizere (LWR, *light-water reactor*) di une potence di 1 gigawatt eletric, che al lavori al 90% dal so potenzîal, 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 mancun un cuart dal combustibil esaurît prodot ogni an al ven riprocessât; gran part dal restant al è immagazinât tai implants.

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

Stât	Militâr	Altris ûs strategjics	Civil conservât dentri dal Stât	Civil 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			
Israêl	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 diluintlu cuntun isotop no fissil. Ducj i isotops di plutoni gjavât il ^{238}Pu , che si cjate dome in quantitâts relativementri scjarsis, a puedin sostignî une reazion a cjadene esplosive. Par cheste reson il smaltiment dal plutoni al è forsît 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 sientifiche bilaterâl russe-americane (Holdren e Velikhov 1997) a àn cjapât in considerazion une serie di diversis opzions pal smaltiment dal plutoni. Une prime pussibilitât e sarès chê di immagazinâ indefinitementri lis quantitâts in plui di plutoni separât in strutturis 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 timp e cun pocje spese.

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

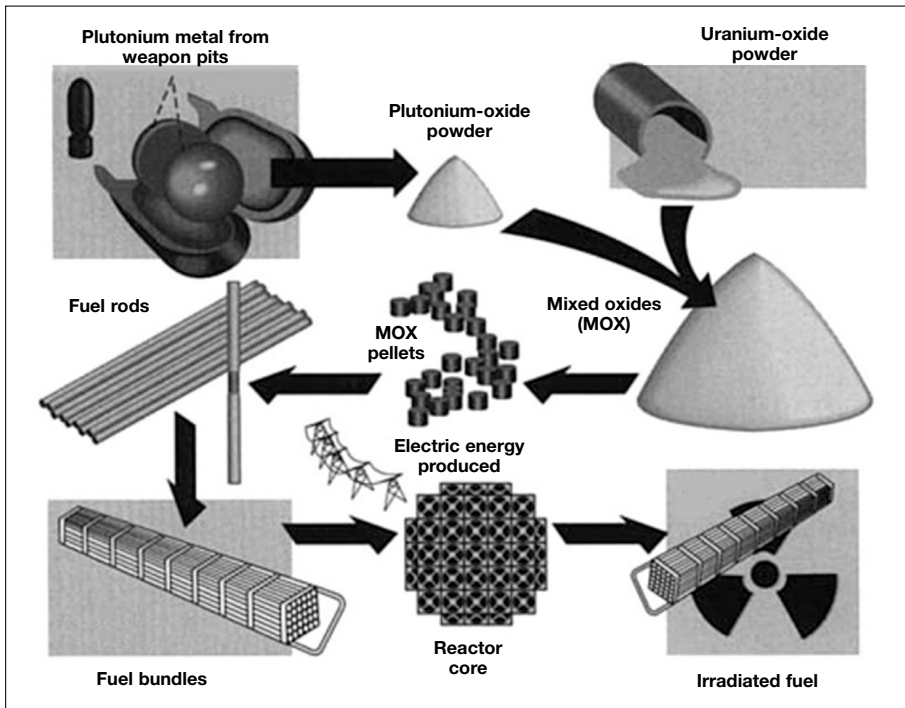


Figure 13. Diagram dal procès di smaltiment dal plutoni tant che combustibil MOX (Pascolini 2008).

Tal procès di smaltiment, il plutoni al ven separât dai altris materiâi e convertût 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 scaiis cilindrichis di ceramiche, che a vegnin cjaradis in luncs tubui di metal doprâts tant che combustibil. Dopo jessi stât irradiât tal reatôr, il combustibil esaurît al à dentri ancjemò doi tierçs dal plutoni iniziâl, contignût però in grandis misturis une vore radioattivis di diversis sostancis, e duncje par recuperâlu a coventaressin procès di trasformazion chimiche comandâts a distance.

La procedure di smaltiment 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-

trazioni une vore plui altis di plutoni. Il reatôr sperimentâl rus BN-800 di 0,8 GWe di potence, cumò daûr a jessi costruît, 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 metodologjie, però, e presente dificoltàs, de necessitât di evità criticitâts al probleme di cjatâ procès di lavorazion e forms di immaginament dai residuis che a puedin gjestî altis concentrazions di plutoni e di prodots di fission. Tecnichis 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 Avrîl 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 smaltiment di bande dai doi paîs al varès di tacâ dentri dal 2018.

6. Conclusion. La eliminazion dai armaments nucleârs a nivel mondiâl e je di tant timp un obietîf perseguît di diviers grups di pression, ognidun cu lis sôs resons 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 nucleâr e e à colaborât in diviersis iniziativis internazionâls par limitâ la corse ai armaments e controlâju. In di di vuê, ancje i leaders politics a conveggin simpri di plui che un mont cence armis nucleârs al è realistic, realizabil e tal interès di ducj, stiçant la atenzion de opinion publiche e dai studiôs su chest probleme. Chest al cree gnovis oportunitâts di azion politiche a nivel nazonâl e internazonâl in dut il mont, che a varessin di jessi fatis cognossis a la int e sostignudis di dutis lis organizazions no governativis interessadis al teme de pâs e sigurece mondiâl.

Lis enormis dificoltàs sientifichis e tecnologjichis 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 diferentis. Chestis dificoltàs a rapresentin une sfide une vore plui stimolant dal divvilup dai armaments, argument che al à ocupât gran part de comunitât sientifiche fin cumò, e a puedin furnî gnûfs e interessants arguments di ricercje e oportunitâts di lavôr par chei sienziâts e tecnics che a son impleâts te produzion e gjestion di chestis armis (Reppy 2010).

Intune imprese di cheste sorte, come che nus ricuardin Acheson e Lienthal, “no vin a ce fâ dome cuntun probleme militâr o sientific ma cuntune cuestion plui large che e tocje la gjestion 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 offensivis strategjichis), cognossût ancje tant che “New START”, plui il protocol e trê zontis, si lu cjate tal sît dal Dipartiment di Stât dai Stâts Unîts. Il gnûf tratât al è impuartant par resons politichis, screant une gnove fase di relazions positivis tra Russie e Stâts Unîts e furnint un cuadri di riferiment par altris riduzioni seguitivis des fuarcis nucleârs strategjichis, ma al previôt dome piçulis riduzioni di une tipologjie di armaments e missii nucleârs (Pascolini 2010).

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

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

⁴ Il *Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty* (CTBT) (Tratât di interdizion totâl dai esperimentis nucleârs), firmât a New York ai 24 di Settembar 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 cualsisedi altre forme. Al met in vore un sisteme di verifiche mondiâl che al cjape dentri une rêta mondiâl di stazions di control, un centri di documentazion

internazionâl cun sede a Viene, un procès di consultazion e sciariment, ispezions sul puest e iniziative di supuart dai paîs membrîs. Ai 10 di Jugn dal 2010, i stâts membrîs a son 182, a son stadis depositadis 153 ratifiche e a mancjin ancjemò 9 dai 44 stâts che a coventin par che il tratât al puedi jentrâ in vore (Cine, Egjit, Indie, Indonesie, Iran, Israël, Coree dal Nord, Pakistan e Stâts Unîts). Il test dal tratât si lu cjate tal sît des Nazions Unidis.

⁵ La Figure 1 si base su lis stimis des risiervis nucleârs ripuartadis in Norris e Kristensen (2006) e inzornaments. I dâts a puedin jessi no acurâts, stant che nissun guvier al publiche dâts precis su lis sôs ogjivis nucleârs, dividudis tra chês in diversis fasis di operativitât 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 esempli in Charpak, Garwin e Journé (2005).

⁷ Un chilogram di materiâl fissil – la cuantitât fissionade tes bombis di Hiroshima and Nagasaki – e prodûs energie ecivalente ae esplosion di 18 mil toneladis (18 kilotons) di esplosifs chimics di alt potenzial.

⁸ In plui dal ^{235}U e ^{239}Pu , ancje i isotops ^{233}U , netuni-237 e americ-241 a son in stât di sostignî 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 esperiments cul netuni-237 (IPMF 2006).

⁹ Lis tecnologjiis sperimentadis a son diferentis, cun divers nivei di eficacie. In plui che lis centrifughis, la difusion gasose e je stade par tancj agns la tecnologjie dominante. Il gas esafluorûr di urani al ven metût in pression e pompât travièrs di une membrane porose, che e ven travièrsade des moleculis gassosis in percentuâls diferentis a seconde de diferente masse dai isotops. Ripetint il procès plui o mancun 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 paîs a previodin di sostituîju 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 relatîfs ae Union Sovietiche si fondin soledut su lis stimis de cressite dai implants di inricjiment instalâts, tignint cont ancje dal aument graduâl te produzion di LEU par ûs tai reatôrs pe produzion energjetiche.

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