

Hanka László*, Halász László, Vincze Árpád

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem

Bolyai János Katonai Műszaki Kar

*e-mail:hanka.laszlo@zmne.hu

A NUKLEÁRIS FEGYVEREK ELŐREGEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA, ÉS ÚJ FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGE AZ AMERIKAI EGYESÜLT ÁLLAMOKBAN

Absztrakt

Az Amerikai Egyesült Államokban fontos program a nukleáris fegyverek ellenőrzése és karbantartása. Jelentős intézmények vesznek részt a fegyver összetevők öregedésének vizsgálatában. A Bush kormány vizsgálja egy új bunkerek ellen alkalmazható nukleáris fegyver kifejlesztésének lehetőségét.

The US seeks to maintain its nuclear arsenal with a multifaceted program aimed at understanding more about the material and processes of nuclear weapons. The Bush administration is contemplating a new crop of nuclear weapons that could reduce the threat to civilian population. However, they are still unlikely to work without producing massive radioactive fallout, and their development might require a return to underground nuclear testing.

Kulcsszavak: *fegyverzet korlátozás, nukleáris fegyverek előregedése, többfázisú nukleáris fegyver, földbe fúródó robbanófej, radioaktív kihullás, kis energiájú töltetek, az Egyesült Államok fegyverkezési politikája*

Bevezetés

Az Egyesült Államok arzenáljában jelentős szerepe van az utóbbi évtizedek során felhalmozott nukleáris fegyverkészletnek, amely napjainkban is komoly elrettentő eszköz Amerika hadseregének kezében. Több mint egy évtizeddel ezelőtt a Bush-kormányzat politikai, katonai és technikai megfontolások alapján úgy döntött, hogy nincs szükség új típusú nukleáris fegyverek kifejlesztésére, ezért 1992-ben az Egyesült Államok beszüntette a robbantással járó nukleáris fegyverkísérleteket. Ez a korlátozás nem vonatkozik azokra a tesztekre, amelyeket reaktorokban végeznek szubkritikus körülmények között, illetve azokra a folyamatokra, amelyekben elkerüljük az önfenntartó láncreakciót.

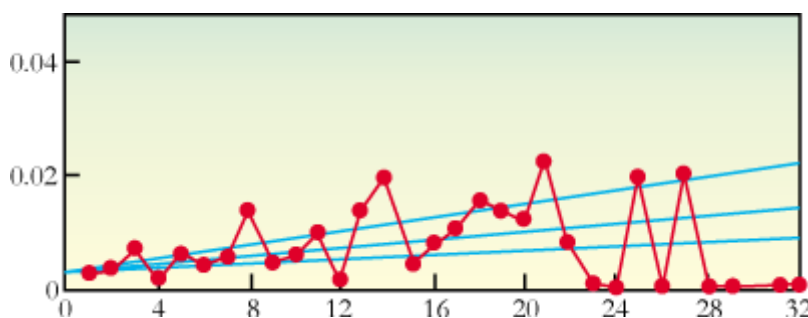
Ezt a moratóriumot 1996-ban Clinton elnök is megerősítette meghirdetve egy egész világot átfogó megállapodást, az ún. „átfogó atomcsend egyezmény”-t, amely megtiltja a nukleáris robbantással járó kísérleteket (Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT). Ez a megállapodás szerves részét képezi a nukleáris fegyverek elterjedését korlátozó törekvésnek, amelynek az Egyesült Államok elkötelezett híve. Ezt az egyezményt azonban eddig még nem ratifikálták, sem az Egyesült Államok sem pedig más nukleáris fegyverekkel rendelkező állam, ugyanis a moratóriummal kapcsolatban felmerül egy alapvető probléma, amely heves viták tárgyát képezi, mégpedig az, hogy kísérletek nélkül bevezethető állapotban lehet-e tartani a meglévő nukleáris fegyverkészleteket, és ha igen milyen módon?

Az Egyesült Államok természetesen arra törekszik, hogy megőrizze nukleáris elrettentő erejét [1],[2],[6]. Ennek érdekében egy komplex programot dolgozott ki azzal a céllal, hogy minél többet megtudjanak a nukleáris fegyverekben lezajló folyamatokról és a fegyvert alkotó anyagokban végbemenő átalakulásokról. Ez a fegyverkészletet felügyelő program (Stockpile Stewardship Program; SSP) nagyjából évi 5 milliárd dollár költséggel gazdálkodik [2],[5]. Célja megóvni és fenntartani az Egyesült Államok nukleáris elrettentő erejét anélkül, hogy újabb nukleáris robbantási kísérletekre kerülne sor. A fegyverkészletek karbantartása mellett hasonlóképpen fontos szempont a magas képzettségű tudósok és mérnökök, technikai szakemberek szellemi tőkéjének megóvása. A programba bevonták a vezető kutatólaboratóriumokat Los Alamos-tól a Nevadai Kísérleti Bázis-ig. A program arra az elvre épül, hogy ha nincs lehetőség új fegyverek tervezésére és tesztelésére, akkor egyetlen lehetőség a meglévő fegyverkészletek felügyelete, megfigyelése, karbantartása, és ha szükséges, akkor a javítása. A programot az tartja életben, hogy az USA Elnökének minden évben hitelt érdemlően igazolni kell, miszerint a nukleáris fegyverek biztonságban vannak, megbízhatóan és hatékonyan működnek!

Egyes kritikusok véleménye szerint ez a program, fenntartja és megerősíti a nukleáris fenyegetettséget [1],[4]. Ők úgy gondolják, hogy a legjobb az lenne, ha hagynák tönkremenni a fegyvereket, a felügyelő személyzet pedig más munkát végezne. Amíg az Egyesült Államok felelős politikai és katonai szakértői Amerika biztonságát a nukleáris elrettentő erő fennmaradásában látják, addig szemszögükből a legrosszabb megoldásnak tűnik a fegyverkészletet a sorsára hagyni. Ez különösen igaz a fegyverzetkorlátozást célzó egyezmények, a ratifikált START II. és a megbeszélések tárgyát képező START III. fényében. Ugyanis a program kiváló alapot biztosít ezen célok eléréséhez, hiszen megfelelő technikai és tudományos eszközt ad az Egyesült Államok kezébe ahhoz, hogy felderíthető és nyomon követhető legyen azon nemzetek tevékenysége, amelyek nukleáris fegyverekkel fenyegetik a globális biztonságot [2],[6]. Így a program végrehajtása során megteremthetőnek tűnik az egyensúly a védelem, a biztonság és a fegyverzetellenőrzés terén.

A nukleáris fegyverkészlet előregedésének ellenőrzése

Az ellenőrzések során kiderült, hogy a tárolt fegyverek előregedése jelenti a legnagyobb problémát [1],[2]. Az idő múlásával ugyanis az alkotóelemekben végbemehetnek olyan változások, amelyek következtében a fegyverek nem rendeltetésüknek megfelelően működnek, vagy esetleg egyáltalán nem működnek majd. Az 1. ábrán az egy fegyverre jutó meghibásodások száma látható a fegyver korának függvényében. Az erre támaszkodó statisztikai vizsgálat azt mutatja, hogy a meghibásodások aránya kevesebb, mint 1%-kal növekszik negyedszázadonként. Ez nagyon csekély érték, még akkor is, ha figyelembe vesszük, hogy a fegyverek tipikus élettartama több mint 2000 év. Ennek figyelembe vételével kijelenthető, hogy a fegyverkészlet állapotának megóvása megvalósítható feladatnak tűnik.



1. ábra. Statisztikus meghibásodási ráta a nukleáris fegyverek készítését követő idő függvényében [2].

Ez a lineáris amortizációs tendenciára épülő közelítés azonban nélkülöz mindenféle tudományos információt, nem vizsgálja a fegyvereket, az azokat felépítő anyagokat és a bennük lejárló folyamatokat, hanem egyszerűen azt feltételezi, hogy a múltbeli tapasztalatok lineáris extrapolációjának megfelelő események következnek be a jövőben. Ez a feltételezés nem veszi figyelembe azt a lehetőséget, hogy a változások idővel nemlineárisává válhatnak, melynek köszönhetően a hibák esetleg hirtelen bukkannak elő. Következésképpen szükség van tudományos vizsgálatokra annak érdekében, hogy kellő részletességgel megismerjék az öregedés során végbemenő folyamatokat. Csakis tudományos kutatási eredmények birtokában lehet kidolgozni és alkalmazni megfelelő érzékenységű megfigyelő rendszereket ahhoz, hogy még kellő időben észlelni lehessen olyan változásokat a fegyverek állapotában, amelyek azokat használhatatlanná tennék.

Konkrétabbá téve a problémát, gondoljuk meg, hogy egy modern termonukleáris fegyver közel 6000 alkatrészből áll, beleértve ebbe az elektromos, mechanikus és a nukleáris komponenseket (2. ábra). A legtöbb alkotóelem azonban a nukleáris egységen kívül foglal helyet, így teljes egészében vizsgálható, ehhez nukleáris robbantások nem szükségesek. A felszín alatti robbantási tesztek arra szolgáltak illetve szolgálnának, hogy megvizsgálják, a fegyverek nukleáris egysége megfelelően működik-e. Az Egyesült Államok által a múltban végrehajtott több mint 1000 ilyen kísérlet nagyobb része a fejlesztéseket volt hivatott szolgálni, a fegyverek fizikai tulajdonságainak, a katonai szempontból fontos hatásoknak a vizsgálata volt lényeges szempont. Csak elenyésző részben volt kutatás tárgya a felhalmozott készletek és a telepített rendszerek megbízhatósága.

Mivel robbantással járó megfigyelésekre manapság nincs lehetőség, az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma áthidaló megoldásként dolgozta ki a természettudományos és mérnöki kutatásokra épülő SSP programot, melynek tevékenységét az alábbi fő területek kijelölésével határozta meg:

1. A felhalmozott fegyverkészletek folyamatos ellenőrzése.
2. A fegyverek állapotának megőrzése érdekében a szükséges komponensek javítása illetve cseréje.
3. Tudományos kutatómunka, amelynek során vizsgálják a fegyverek öregedése során végbemenő folyamatokat, változásokat annak érdekében, hogy alátámasszák és indokolják a karbantartási munkálatok szükségességét és megfelelő voltát.



2. ábra. A B83 nukleáris töltet szerkezete [1].

A nukleáris fegyverek szerkezetének öregedése

Egy modern termonukleáris fegyver legfőbb része természetesen maga a nukleáris robbanó egység, amely működése tekintetében első, második és harmadik fázisra bontható. A klasszikus osztályozás szerint az 1. fázis az U-235 vagy a Pu-239 maghasadása, fissionja során felszabaduló energiát hasznosítja. A kétfázisú „hidrogénbomba” a Deutérium+Trícium keverék fúziós energiájával növelt hatóenergiát szolgáltatja. A 2. fázisban a fúzió során keletkeznek 14 MeV energiájú gyors neutronok. Ezek a neutronok nagy valószínűséggel hasítják az U-238 magokat. A 3. fázisban a természetes vagy szegényített U-238 atommagjainak gyors neutronok hatására bekövetkező fissionja során termelődik az energia. Ezen kívül vannak a fegyvernek nem nukleáris komponensei, ilyenek például az elektromos, az irányító rendszer, valamint az egyes alrendszereket összekapcsoló egységek. Az öregedési folyamattal kapcsolatos legfontosabb kérdés, hogy az első fázis alkotóelemei hogyan változnak az idők folyamán.

Amint a fegyver működésbe lép, egy hagyományos kémiai detonáció indítja el az első fázist. Ez a kémiai robbanás egy Plutónium-239 tartalmú belső részt présel össze, a folyamatot implózióknak, „berobbanásnak” nevezzük. Az implózió következtében a plutónium sűrűsége növekszik, majd eléri a kritikus sűrűséget, amikor is beindul a plutóniumban az önfenntartó láncreakció. A plutónium hasadása során keletkező energia hivatott beindítani a második fázist. A továbbiakban a klasszikus osztályozás szerinti nukleáris fegyverek felépítését, korszerűsített változatát tárgyaljuk [1], [2],[3].

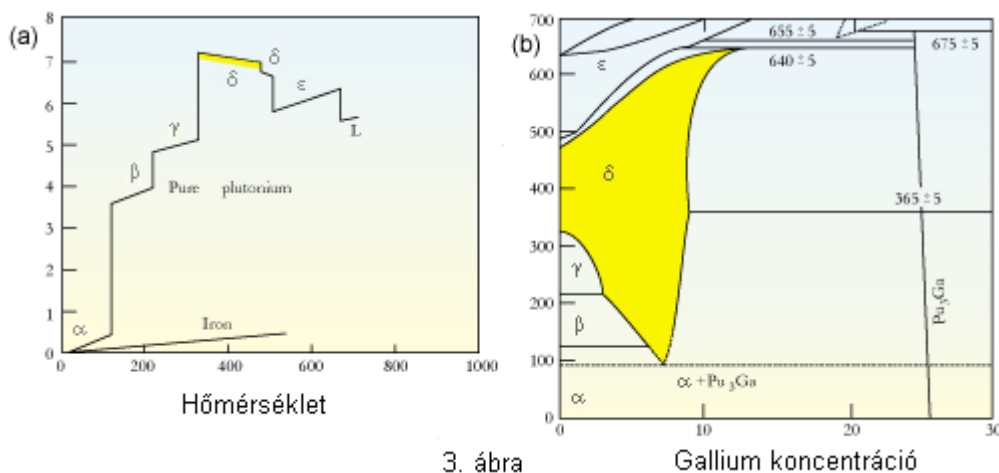
A plutónium maghasadása során felszabadult energia nem elégséges ahhoz, hogy a második fázis beinduljon, ezért az első fázisban található még deutérium-trícium keverék. Ebben a keverékben a Pu-239 nukleáris robbanása következtében beindul a fúzió, amely a fission folyamatot hivatott erősíteni. A két folyamat együttes hozadéka már elégséges ahhoz, hogy beinduljon a második fázis, a termonukleáris reakció. Ebben a fázisban található természetesen fúzióra alkalmas anyag, de tartalmazhat hasadóanyagot is, például U-235-t. A kétfázisú nukleáris fegyver robbanása során felszabaduló energia túlnyomó része a második, fúziós fázisban keletkezik, de mint említettük, a fő fázis csak akkor indul be, ha az első fázisban keletkező energia túllép egy küszöbértéket. A működéshez természetesen elengedhetetlen, hogy az első fázisban felszabaduló minimális energia meghaladja ezt az energiaküszöböt. Ha ennek a két energiának a különbségét, mint a fegyver megbízhatóságára jellemző paramétert definiáljuk, akkor világos, a működéshez az szükséges, hogy a paraméter értéke pozitív legyen. Egyesek azt feltételezik, hogy az öregedés során ez a paraméter csökkenhet, eltűnhet, sőt akár negatív értéket is felvehet!

Az öregedés elsősorban a radioaktív komponenseket érinti. Ezek közül a rövid felezési idejű komponenseket, mint például a trícium, amely 12,3 év felezési idővel, β -bomlással bomlik, meghatározott időintervallumonként cserélni kell. Ez egy tervszerű tevékenység. Egészen más a helyzet a plutóniummal és a kémiai robbanószerekkel. Ezek cseréjét sem, elméletileg sem gyakorlatilag nem tervezték, ugyanakkor ezen anyagok állapota jelentősen befolyásolja az első fázis energiahozamát. A második fázissal kapcsolatban nem adódik ehhez hasonló probléma, ugyanis ha az első fázis energiahozama túllépi a küszöbértéket, a második fázis eléggé tág határok között működésbe lép.

Az első fázis összetevőinek öregedése

Az első fázis kulcsfontosságú összetevője a Pu-239, amely tulajdonságai szempontjából nagyon sokrétű, összetett viselkedést mutat. Ez a változatosság az 5f elektronjának tulajdonítható, amely hol lokalizált, hol delokalizált állapotban van. Ahogyan az a 3/a. ábrán látható, a szilárd plutónium a hőmérséklet emelkedése során, számos fázisátalakuláson megy

át, és a hőtágulása is jelentős, több mint 20% a térfogatnövekedés, ha 0°C-ról 400°C-ra melegszik. Ez az extrém hőérzékenység összhangban van bizonyos elemekkel (Ga, Al, Am) alkotott ötvözetek tulajdonságainak alakulásával. A 3/b. ábrán látható fázisdiagram például, azt mutatja, hogy a kis sűrűségű δ fázist már kis mennyiségű gallium is képes stabilizálni, így ez a fázis már viszonylag alacsony, közel szobahőmérsékleten is megjelenik.



3. ábra

Ehhez a komplex viselkedéshez még hozzájárul a Pu-239 α -bomlása 24000 év felezési idővel, a sugárzás ugyanis átalakítja a plutónium kristályszerkezetét. Az α -részecskéket a plutónium-rács lefedezi, ezáltal egyrészt növekszik a rácsban a He mennyisége, másrészt az α -részecskékkel való ütközések a rácsban ún. Frenkel-hibákat hoznak létre. Ez azt jelenti, hogy rácsatomok olyan pozícióba kerülnek, ahol nem kellene, hogy atom legyen. Harmadrészt pedig az α -bomlás során egyes Pu-239 atomokból U-235 atomok keletkeznek. Az említett folyamatok hatására a plutónium-rács folyamatosan átalakul. Évente hozzávetőlegesen a Pu-rácsatomok 10%-a cserélődik ki. Ez egyszerűen fogalmazva azt jelenti, hogy a plutónium-rács a saját radioaktív sugárzása által alakul át, esetleg működésképtelenné téve a nukleáris fegyvert.

Ez a kérdés könnyen tanulmányozható kísérleti úton. Nagy felbontású röntgen-diffrakciós kristályszerkezet elemzést végeznek olyan Pu-mintákon, amelyek több éves vagy évtizedes fegyverekből származnak, és a mérési eredményeket összehasonlítják frissen előállított Pu-mintákon végzett mérésekkel. Az egyik legfigyelemreméltóbb tapasztalat, hogy még több évtized elteltével is nagyfokú rend tapasztalható a kristályrácsban. A röntgensugarakkal végzett elhajlási kísérletek szerint ez a nagyfokú rend nem csak a δ -fázisban jelentkezik, hanem a többi fázisban is. Azt tapasztalták, hogy a rácsatomok kicserélődésének és egyéb rácshibák kialakulásának ellenére a plutóniumban megőrződik a kristálytani rend, ami azt jelenti, hogy a Pu rendelkezik egyfajta figyelemre méltó „önregeneráló” képességgel, egy olyan viselkedéssel, melynek során a kristály saját magát rendbe teszi. Ez a változás egyenértékű azzal az átalakulással, ami a kristály hevítése során következik be, ezért ez a viselkedést nevezhetnénk „önhevítésnek” is.

Természetesen tapasztalható változás a rácsban néhány évtized elteltével, de meglepő módon ez éppen a kristálytani rend növekedése. Los Alamosban végzett röntgen abszorpciós kísérletek tanúsága szerint, egy frissen előállított Pu-kristály δ -fázisában az ideális lapcentrált köbös rácsból eltérések mutathatók ki. A részletes elemzés azt mutatta, hogy a lapcentrált köbös rácsban az atomok helyenként tércentrált köbös elrendezésben találhatók. A vizsgálatok legmeglepőbb eredménye az, hogy az ideális lapcentrált köbös rácsból való eltérések idővel eltűnnek, méghozzá annál hamarabb minél magasabb az ötvözetben a gallium koncentrációja. Ha ismét rápillantunk a Pu-Ga ötvözet fázisdiagramjára (3/b. ábra), amelyen látható, hogy a

gallium stabilizálja a δ -fázist, akkor érthetővé válik, hogy az idő múlása olyan hatással van a plutóniumra, mint a növekvő gallium koncentráció.

Más diagnosztikai eljárásokat is alkalmaztak például a Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumban. Itt lehetőség nyílt nagy felbontású transzmissziós elektronmikroszkóp alkalmazására. Ezzel az eszközzel vizsgálhatók a mikrostruktúrában bekövetkező változások, továbbá kimutatható a He felszaporodása a kristályban. Hasonlóan célszerű tanulmányozni a kristály elektromos ellenállásának hőmérséklettől való függését. Köztudottan ez érzékenyen függ a rácshibáktól és a mechanikai sűrűségtől. Az említett vizsgálati eljárások, összhangban más módszerekkel, például a pozitron annihilációs spektroszkópia mérési eredményeivel, mind arra utalnak, hogy a plutónium minták nem egyszerűen csak „konzerválják” a nagyléptékű rendet a kristályban, hanem az idő múlásával egyre közelebb kerülnek az ideális kristályszerkezethez! Ez a regenerációs folyamat, amely ellentétes hatású a kristályhibákat szaporító folyamatokkal, úgy tűnik, hogy képes ellensúlyozni az α -sugárzás okozta hatást. Legalábbis ez derült ki a nukleáris fegyverek tanulmányozása során.

A plutóniummal összefüggésben természetesen felvetődik a kémiai robbanószerek időbeli változásának a problémája. A kémiai robbanóanyagok általában szerves polimerek, amelyekről köztudott, hogy tulajdonságaik az előállítást követő első néhány hónapban intenzíven, az ezt követő évek során pedig mérsékelt ütemben változnak. Az első hónapokban az illékony alkotórészek távoznak el, továbbá változás tapasztalható az anyagszerkezetben és a molekulatömegben. Meglepő módon azonban, ezeknek a robbanószereknek a legfontosabb tulajdonságai, mint az explózió során felszabaduló energia mennyisége, vagy a lökéshullámfront sebessége idővel növekszik.

Összefoglalva az eredményeket, a robbanófejek első fázisának alkotórészeit kellőképpen stabilnak tekinthetjük. Korábbiakban a szakemberek általános véleménye az volt, hogy ezek a nukleáris fegyverek legfeljebb 50-60 évig maradnak meg abban az állapotban, amelyben a gyártáskor voltak. Az említett vizsgálati eredmények ezt az időtartamot jelentős mértékben kiterjesztik. A kísérletek eredményeinek sokkal fontosabb hozadéka, hogy megismerték azokat a csekély intenzitású változásokat, amelyek a fegyverek alkotórészeiben végbemennek, sok információt szereztek az anyag szerkezetéről, valamint korábban ismeretlen tulajdonságokra is fény derült. Csak ezekre támaszkodva tervezhetők meg olyan nagy pontosságú és kellő érzékenységgel vizsgálati illetve megfigyelési módszerek, amelyek ahhoz szükségesek, hogy a felhalmozott fegyverkészletek felügyelete során biztonsággal, időben kimutathatóak legyenek azok a változások, amelyek a fegyverek hatékonyságát csökkentenék, vagy akár a bevetetőséget akadályoznák.

Számítógépes szimulációk

Részletes vizsgálatok azt mutatják, hogy az anyagok tulajdonságait érintő árnyalatnyi változások is alapvetően befolyásolják az implóziós folyamat dinamikáját. Mint azt már hangsúlyoztuk, az első fázisnak kellően hatékonyan kell lennie ahhoz, hogy beindítsa a második fázist. Ha az első fázisnak nincs kellő energiahozadéka, akkor ez azt eredményezheti, hogy a fegyver egyáltalán nem működik.

Kiemelt fontossága miatt jelentős figyelmet fordítottak az ebben a fázisban végbemenő folyamatok – a kémiai robbanásnak, a Pu implóziójának, és a deutérium-trícium keverék fúziójának – hidrodinamikai vizsgálatára. Ugyanis ezek a folyamatok mind érzékenyen függhetnek a szereplő anyagok sűrűségétől, a bennük haladó akusztikai hullámok, illetve a robbanáskor kialakuló lökéshullámok sebességétől, illetve a Pu implózióját beindító kémiai robbanás geometriájától. Ez utóbbira hatással lehetnek olyan elhanyagolhatónak tűnő változások, mint például módosulás a robbanószer szemcse méretében, a robbanóanyag textúrájában, vagy akár a nyomelem-koncentrációjában. Alapvető fontosságú tehát

meghatározni azokat a fizikai mennyiségeket, amelyek változása drámai módon befolyásolja az első fázis dinamikáját, és kideríteni, hogy ezek a mennyiségek hogyan változnak, egyrészt az öregedési folyamat nyomon követése miatt, másrészt azért, mert a javítási, felújítási tevékenység során kapott alkotóelemek tulajdonságai különbözhetnek az eredetitől!

A fegyverek hidrodinamikai tulajdonságainak tanulmányozása szoros együttműködést feltételez a laboratóriumi mérések és a számítógépes szimulációk között. A nagy teljesítményű számítógépek kutatólaboratóriumokban történt alkalmazása lehetővé tette olyan precíz, kifinomult programok alkalmazását, amelyekre korábban nem volt lehetőség. A folyamatos fejlesztés alatt álló programok egyre nagyobb megbízhatósággal teszik lehetővé hidrodinamikai folyamatok, illetve ezek instabilitásainak modellezését, tanulmányozását. Ezek a modellek rávilágítanak arra, hogy melyek azok a fizikai paraméterek, amelyek változása lényegesen befolyásolja a robbanáskor lezajló folyamatokat, és melyek azok amelyek nem. A numerikus szimulációknak a validálása mindig laboratóriumi mérésekkel való összehasonlítás útján történik. Olyan folyamatokat vizsgálnak melyeknél a fizikai körülmények nagyon hasonlítanak a fegyverekben levő állapotokhoz, esetleg más geometriai elrendezést, vagy más időskálát valósítanak meg. A mérések során vizsgálják az anyag elasztikus tulajdonságait, a dinamikai állapotegyenletet extrém körülmények között, a kémiai robbanás geometriáját. Ezeknek a méréseknek az eredménye szolgál közvetlen bemenetként a numerikus modellekhez.

A numerikus számítások eredményeinek megerősítéséhez természetesen szükséges, hogy a kísérleteket szubkritikus körülmények között végezzék el. Ez felel meg egyrészt a CTBT megállapodás szellemének, másrészt nyilván ezzel járulnak hozzá leghatékonyabban ahhoz, hogy mind nagyobb biztonsággal kezeljék az Egyesült Államok fegyverkészletét.

A számítástechnika alkalmazására más téren is lehetőség nyílik. A múltban végrehajtott nukleáris robbantásokkal járó kísérletek során rögzített adatokat nagy teljesítményű számítógépekkel újra analizálják. Így napjaink számítástechnikai eszközei különlegesen fontos szerepet kapnak abban, hogy segítségükkel egyesítsék és elősegítsék a kísérleti, a modellezési, a felügyeleti tevékenységeket és az archív anyagok feldolgozását!

Kémiai korrózió

A nukleáris fegyverek összetett, bonyolult rendszerek, melyekben több helyen található olyan anyagok melyek kémiaiilag korrodálódhatnak. Az egyik ilyen kritikus hely maga a nukleáris egység, ahol a hidrogén reakcióba léphet különböző fémekkel. A fémek hidrogénnel történő reakciója elsősorban a fém felületén illetve az érintkező fém alkatrészek határfelületén következik be. A nukleáris egységen kívül a fegyver többi részében nem lehet jelen elemi állapotú hidrogén, ellenben egyes alkotórészek tartalmaznak szerves vegyületeket, amelyekből keletkezhet hidrogén, továbbá a sugárzás hatására kialakulhatnak különböző hidrogén tartalmú sók. Ha ehhez még hozzávesszük a nem megfelelő hőkezelést, illetve az esetleges elégtelen szigetelést, amely lehetővé teszi, hogy nedvesség jusson be a fegyver belsejébe, akkor látjuk, hogy néhány év elteltével felmerülhetnek korróziós problémák az első és a második fázis egységeiben egyaránt.

Egy bizonyos fokú kémiai korrózió még megengedhető, azonban extrém esetekben egyes komponenseket újakra kell cserélni. Megfelelő tervezéssel, tömítő anyagok illetve hidrogént megkötő vegyületek alkalmazásával azonban megakadályozható illetve elfogadható mértékűre csökkenthető a kémiai átalakulásnak ez a fajtája.

Tudományos alap kutatás

Az SSP kutatási program elsődleges feladata szükségképpen az Egyesült Államok nukleáris fegyverarzenáljának megóvása, hadrafoghatóságának fenntartása, azonban ez a program hozzájárul számos alap kutatást érintő kérdéshez is.

Példaképpen megemlítjük a hidrogén állapotegyenletének kiterjesztését extrém nagy nyomású tartományokra ($\sim 1 \text{TPa} = 10^{12} \text{Pa}$). Ez a problémakör természetesen szorosan kapcsolódik a fegyverek fizikájához, hiszen ez éppen az a nyomástartomány, amely a fúzió beindulása során alakul ki, de kapcsolódik más tudományterületekhez is. Például olyan csillagok és óriásbolygók belsejének modellezését is elősegíti, amelyek anyagának túlnyomó része hidrogén.

Mint a periódusos rendszer legegyszerűbb eleme, a hidrogén megfelelő alapul szolgál arra, hogy mind elméletileg mind kísérletileg tanulmányozható legyen szélsőséges körülmények között, akár különlegesen nagy nyomáson, vagy magas hőmérsékleteken. Itt említhető meg Wigner Jenő és Hillard B. Huntington 1935 évi jóslata, mely szerint a hidrogén nagy nyomáson fémes tulajdonságokat mutat. Ez a kijelentés élénk vitákat és nagy érdeklődést váltott ki a tudósok körében, azonban komoly nehézségek merültek fel elméleti téren, mind a szükséges feltételeket, mind a fémes tulajdonságok kialakulásának mechanizmusát illetően. De mik is azok az ismérvek, amelyek igazolják a fémes jellegét? Lézerek alkalmazásával sikerült kiterjeszteni a deutérium állapotegyenletét a nagyon magas hőmérsékletek tartományára. A kísérletek tanúsága szerint a Deutérium 100 GPa nyomás felett 50 %-kal nagyobb sűrűségű, mint azt korábban feltételezték. A technika még viszonylag új, a mérések pontatlansága e téren meglehetősen nagy, de még így is szignifikáns a különbség a korábbi jóslatokhoz képest. Hasonló fizikai körülmények között végzett mérések során az is kiderült, hogy 60 GPa nyomáshoz közeledve éles növekedés tapasztalható az optikai reflexióképességben. Az említett kísérletek közös ismérve, hogy a nagy nyomás kialakítása, az összenyomás dinamikus módon történt, ahogyan az egy bomba robbanásakor is kialakul. Végeztek más jellegű, sztatikus összenyomási kísérleteket is, azonban a vázolt fémes jelleg ekkor nem mutatkozott. Ennek a különbségnek minden bizonnyal az az oka, hogy a sztatikus kísérleteket közel szobahőmérsékleten végezték, a dinamikus jellegű kísérletek pedig több ezer Kelvin hőmérsékleteken folytak le. Az pedig nyilvánvaló, hogy mind a hőmérséklet, mind pedig a sűrűség illetőleg a nyomás fontos szerepet játszik a fémes jelleg kialakulásában.

A vázolt kutatási területeket ízelítőként említettük, azonban az SSP-hez kapcsolódó alap kutatások szerteágazóak és meglehetősen összetett képet mutatnak. Ezért a program jelentős mértékben támaszkodik az Egyesült Államok és más országok kutatólaboratóriumai és egyetemei közötti együttműködésre, és megfordítva éppen ez a tudományos kommunikáció jelenti a kutatási program igazi értékét, és igazolja annak hatékonyságát és hosszú távú fennmaradását.

Új típusú fegyverek?

A Bush-kormányzat 2003-ban fontolóra vette egy új típusú nukleáris fegyver kifejlesztését, amely – terveik szerint – kisebb fenyegetést jelentene a civil lakosságra nézve. Az új fegyverrel kapcsolatos kutatásokhoz azonban ismét szükség volna földfelszín alatti nukleáris kísérletekre, amelynek természetesen következménye, hogy ismét számolni kellene radioaktív környezetszennyezéssel. Ehhez a Kongresszusnak meg kell hatalmazni az Egyesült Államok kutatólaboratóriumait, hogy azok tanulmányozzák az új fegyvert. Ezek a fegyverek földfelszínbe mélyen befürödő, rakétára szerelt robbanófejek, melyek egyik típusa arra szolgál, hogy alkalmazásukkal a felszín alatt mélyen elhelyezett, megerősített építményeket

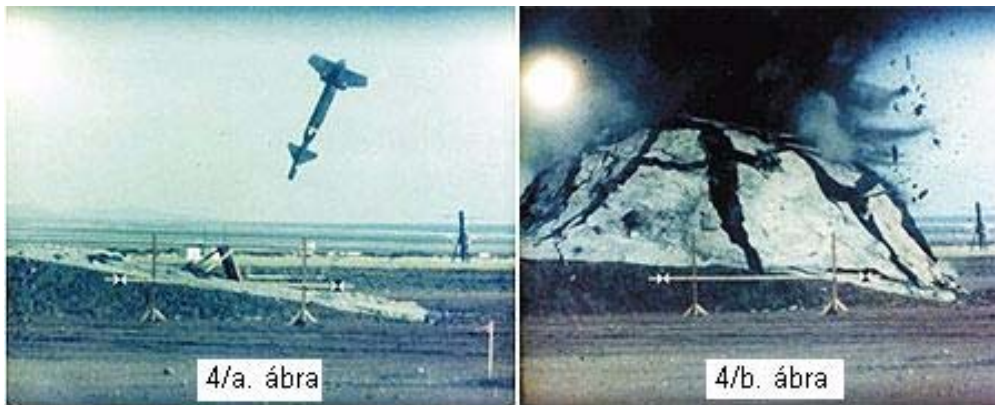
semmisítsenek meg, a másik típusuk pedig speciálisan kémiai és biológiai fegyverek hatóanyagának a közömbösítésére szolgál. A Bush-kormány azzal a kéréssel fordult a Kongresszushoz, hogy hatálytalanítsa azt az 1994-es törvényt, amely korlátozza az ilyen irányú kutatásokat, és tegye lehetővé, hogy folytathassák a kisméretű, 5 kt-nál kisebb hatóerejű nukleáris robbanófejekkel kapcsolatos kutatásokat. (A hirosimai bomba energiája 15 kt volt!) Ez a fejlesztési program – ha megvalósul – további törvényalkotási és módosítási lépést von majd maga után, és nem utolsó sorban jelentős fordulatot jelent a vezető politikai irányzatban. Az Egyesült Államok 1988 óta nem fejlesztett ki új típusú robbanófejet és 1992 óta nem végzett robbantással járó kísérleteket. Bár a Szenátus mindeddig nem járult hozzá, hogy az 1999-ben meghirdetett átfogó CTBT egyezményt ratifikálják, az Egyesült Államok egyelőre tartja magát az egész világra kiterjedő moratóriumhoz.

A kormány Szenátushoz intézett kérésének alátámasztására azzal érvelt, hogy az Egyesült Államoknak rendelkeznie kell kisebb energiájú robbanófejekkel, hogy továbbra is hatékony elrettentő erőt képviseljen a kémiai, biológiai és nukleáris arzenállal rendelkező államokkal, politikai rendszerekkel szemben. A fegyverzetkorlátozások elkötelezett szószólói hangot adnak azon véleményüknek, miszerint az Egyesült Államok arzenáljának fejlesztése hasonló folyamatot indít majd el a többi nukleáris fegyverekkel rendelkező országban, továbbá kárára volna a nukleáris fegyverek proliferációjának megakadályozását célzó erőfeszítéseknek. Valamint azzal a váddal állnak elő, hogy a kisméretű robbanófejek esetleges alkalmazásával elmosás a különbséget a hagyományos és a globális méretű nukleáris háborúk között, és ezzel egyre valószínűbbé teszik egy nukleáris háború kitörését.

Az új fegyverek kifejlesztésével kapcsolatos program élénk vitákat vált ki mind Washingtonban, mind pedig a nyilvánosság előtt. Ezek a politikát és tudományt egyaránt érintő vitákon részt vesznek mérnökök és fizikusok is, hiszen csak a tudósok tudnak segíteni a politikusoknak abban, hogy különbséget tudjanak tenni elérhető célok és vágyálmok között. A viták felmerülő legalapvetőbb kérdések azok, amelyek az új típusú fegyverek hatékonyságát és korlátait firtatják: Milyen mélyen képes egy ilyen rakéta befúródni egy megerősített betonfalba? Milyen mélyen kell egy robbanófejnek befúródni a talajba ahhoz, hogy a környező szikla- és talajrétegek magukba tudják fojtani a robbanást? A felszín alatti robbanásakor kialakuló hőmérséklet elég magas-e ahhoz, hogy hatástalanítsa a kémiai és biológiai reagenseket? Ezekre a kérdésekre keressük a választ a továbbiakban.

Hagyományos és nukleáris robbanófejek

Az USA hadserege több tízezer olyan földbe fúródó, hagyományos robbanófejjel ellátott rakétával rendelkezik, amellyel képesek megsemmisíteni egy célobjektumot, ha az a felszín alatt legfeljebb 10m mélyen van. Amint az a 4. ábrán látható, egy tipikus 2,4m hosszú, lézervezérelt rakéta, csupán néhány méterre hatol be a megerősített betonba, és a robbanás következtében egy nagyjából 5m sugarú kráter keletkezik. A meglevő hagyományos rakétakészlet kiegészítéseképpen, ugyancsak hagyományos típusú, de kémiai és biológiai harci anyagokat megsemmisítő robbanófejek kifejlesztésével is foglalkoznak, amelyekben egyesítik a megerősített rakétatestek és az alacsony nyomást megvalósító, de gyújtó hatású robbanófejek előnyeit. Ezeket olyan célok támadására tervezték, amelyek a felszínhez közel helyezkednek el. A célobjektumba behatolva a robbanófejben levő éghető töltet alacsony nyomás mellett képes olyan magas hőmérsékletet előállítani és fenntartani percekig keresztül, amely elég ahhoz, hogy a toxikus anyagok, biológiai reagensek hatástalanok váljanak, az alacsony nyomásnak köszönhetően pedig nem szóródnak szét a környezetbe. Az afganisztáni és iraki háborúk tanúsága szerint ezen fegyverek hatékonysága drámai módon növekedett és ez a tendencia várható a jövőben is.



Az említett rakéták azonban hatástalanok azokkal a parancsnoki bunkerekkel, rakétasilókkal szemben, amelyek akár a 100m-t is meghaladó mélységben vannak. Ezeket a célokat még a felszín felett robbanó nukleáris töltetekkel is nehéz megsemmisíteni. Az USA nukleáris arzenáljának jelentős része azonban éppen ilyen, levegőben vagy közvetlenül a földfelszínnel történő érintkezéskor robbanó töltetből áll. Mindkét esetre igaz az, hogy a robbanás során kialakuló lökéshullámnak csak egy elenyésző része hatol be a felszíni rétegekbe és alakul át szeizmikus energiává. A levegő és a földkéreg sűrűsége közötti nagy különbség miatt a felszínről visszavert hullám intenzitása mellett a felszínbe behatoló hullám intenzitása csaknem elhanyagolható. Ha azonban mindössze néhány méterrel a felszín alatt robban fel egy nukleáris töltet, akkor a robbanás energiájának sokkal nagyobb hányada alakul át szeizmikus energiává, így sokkal hatékonyabban fejti ki romboló hatását, mint egy ugyanolyan energiájú, de levegőben robbanó bomba. Példaképpen, egy 10 kt energiájú nukleáris töltet, amely 2 m mélyen robban a felszín alatt, 20-szoros hatást fejt ki, tehát egyenértékű egy 200 kt energiájú, felszínen felrobbant töltettel.

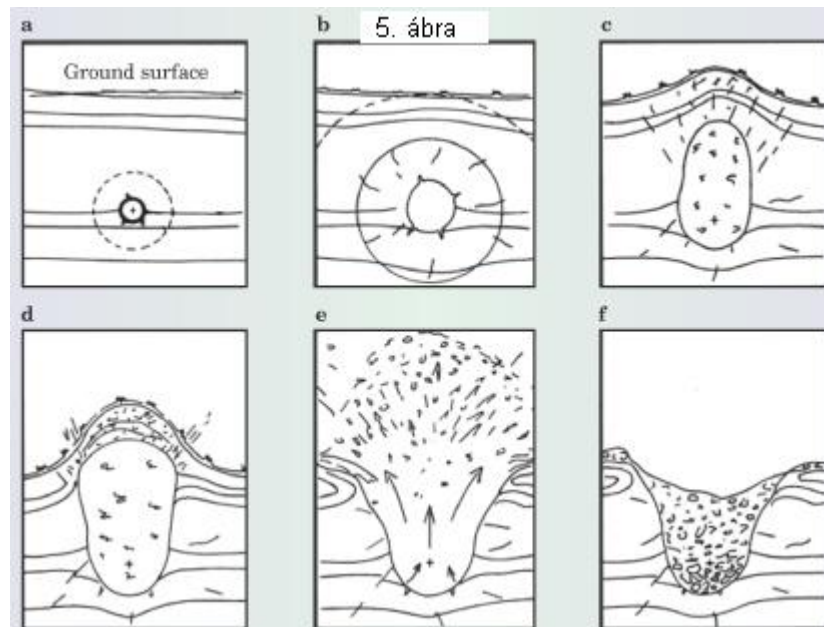
1997-ig felszín alatti célok megsemmisítésére, robosztus 9 Mt energiájú bombákat szándékoztak bevetni. Az említett felismerések birtokában azonban 1997-ben lecserélték az összes 9 Mt energiájú levegőben robbanó bombát 300 kilotonnás felszínbe behatoló típusra. Ezekben a robbanófejet egy megerősített fémötvözet veszi körül, különleges formájú fejkiképzéssel. Ha ezeket a rakétákat egyre erősebb anyagból készítik, belsejükben mind nagyobb tömegű, nagy sűrűségű ballasztokat alkalmazva, akkor a behatolási mélység némileg növelhető. A vizsgálatok kimutatták azonban, hogy ezen paraméterek növelése csak csekély mértékben növeli a fegyver hatékonyságát.

A rakéta behatolási mélysége – amely a hatékonyság szempontjából kardinális kérdés – jelentős mértékben függ mind a rakéta, mind a céltárgy anyagának mechanikai tulajdonságaitól. Első közelítésben igaz, hogy egy nagyobb sebességgel becsapódó rakéta mélyebbre hatol, és a két mennyiség között a korreláció nagyjából lineáris körülbelül 1 km/s sebességig. Nagyobb sebességeknél a korreláció megszűnik, mert a becsapódás pillanatában erőteljes deformációk tapasztalhatóak, sőt extrém esetben a becsapódó fémtárgy folyékonyvá válik, ha a nagy sebességből adódó $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ torlónyomás meghaladja a kohéziós erőből származó nyomást. Mindent összevetve még a legellenállóbb anyagból készült rakéta esetén is legfeljebb néhány km/s lehet a becsapódási sebesség, különben a robbanófej burkolóanyaga erőteljesen deformálódik. A felhasználható anyagok listáját áttekintve, a legellenállóbb burkolóanyag esetén is a rakéta legfeljebb 10-20 m mélyre hatolhat be egy szikla- vagy betontömbbe úgy, hogy az még megőrzi eredeti formáját és egységét.

Radioaktív kihullás

A 10 m-től 20 m-ig terjedő mélységi tartomány sokkal kevesebb annál, mint ami ahhoz kellene, hogy akár a legkisebb energiájú robbanófej esetén is elkerülhető legyen a radioaktív szennyeződés környezetbe történő kijutása. Egy mindössze 1 kilotonnás töltet esetén is nagyjából 90 méteres mélységre lenne szükség ahhoz, hogy a talajrétegek teljesen magukba fojtsák a robbanást. A kérdés azonban fordítva is feltehető. Egy adott energiájú töltet milyen mélyen levő cél megsemmisítésére alkalmas? Ha a cél 100 m-nél mélyebben van, akkor nagyon nagy energia, így legalább 100 kt szükséges a cél megsemmisítéséhez.

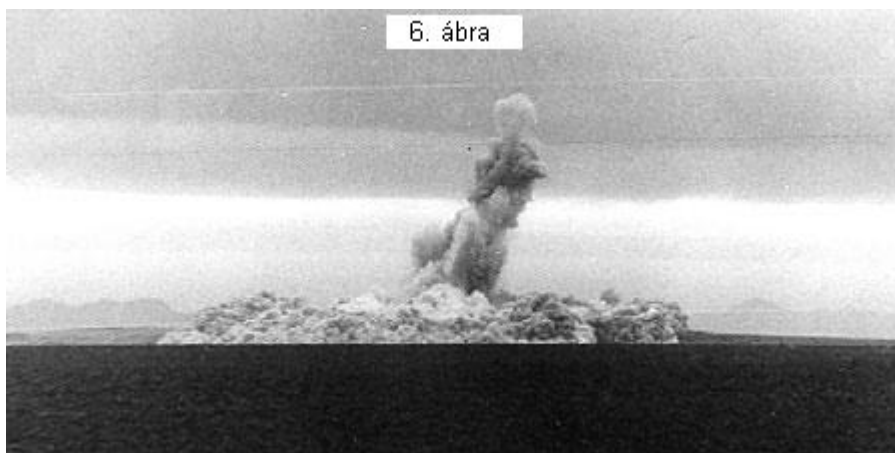
Ahhoz, hogy megbecsüljük a következményeket, értékeljük a kialakuló veszélyhelyzetet, tekintetbe kell vennünk a felszín alatti robbanás folyamatának egyes fázisait. Tekintsünk ehhez egy földfelszín alatti, de felszínhez közeli robbanást. Ennek során először elpárolog a robbanás közvetlen környezetében levő anyag és keletkezik egy magas hőmérsékletű üreg. A kezdeti nyomás ebben az üregben több nagyságrenddel meghaladja az üreg felett levő talajrétegek nyomását, aminek következtében az üreg gyorsan tágul. Ez a tágulás elindít egy szeizmikus lökéshullámot, ami összezúzza a környező kőzetrétegeket. (5. ábra)



Egy nukleáris töltet felszínen illetve a felszín közvetlen közelében bekövetkező robbanása sokkal intenzívebb lokális radioaktív kihullással jár, mint egy légi robbanás, ugyanis ez utóbbi esetben a tűzgömb nem éri el a talajszintet, a felszín alatti robbanás viszont nagy mennyiségű radioaktív port és törmelékot juttat a közvetlen környezetbe¹. Összehasonlítva a két robbanás dinamikáját jellegzetes különbségek fedezhetők fel. A felszín alatti robbanás során kialakult radioaktív felhő nem emelkedik olyan magasra, mint egy klasszikus gombafelhő, hanem tartalmaz egy viszonylag kis átmérőjű, magas hőmérsékletű áramló gázokból álló oszlopot, amelyet a felszínen körülvesz egy lapos, de terjedelmes por és törmelékfelhő (6. ábra). Egy ilyen bomba romboló hatásáról a következőket állíthatjuk: Ha W jelöli egy bomba hatóerejét kilotonna egységben, akkor egy W hatóerejű töltet robbanása során hozzávetőlegesen egy $10^5 W$ m³ térfogatú kráter keletkezik, ami annyit jelent, hogy

¹ A „felszín alatti” robbanás nem azonos a „földalatti” robbanással, ugyanis a jelentősen eltérő robbanási mélység miatt az előbbi esetben a felszínre kerül radioaktív hulladék, por, talajtörmelék, az utóbbi esetben viszont csak a robbanáskor keletkező szeizmikus lökéshullám jut a felszínre.

nagyjából $2 \cdot 10^8 \text{ W kg}$ por és törmelék szóródik szét a környezetben. Ha feltételezzük, hogy a felszabaduló 10^{12} W kalória energia egyenletesen oszlik el, akkor a szétszóródott anyag tömegegységére 5 kilokalória energia jut. Ez ahhoz elég, hogy a szétszóródott anyag hőmérséklete $5\text{--}10^\circ\text{C}$ -kal emelkedjen. Természetesen az energia nem oszlik el egyenletesen, hanem túlnyomó része egy viszonylag kis üregre koncentrálódik, ahol a kőzetek elpárolognak. Ez az üreg tágul, majd eléri a felszínt és tartalma a légkörbe jut. A keletkező neutron- és gamma sugárzás a robbanás néhány méteres környezetében abszorbeálódik. Annak ellenére, hogy a kezdeti hőmérséklet meghaladja a millió $^\circ\text{C}$ -t, az elpárolgó kőzetek egy nagyjából $2 \cdot W^{0,33} \text{ m}$ sugarú üreget töltenek ki, és egy mindössze kétszer ekkora sugarú körzetben olvad meg a talaj kőzetanyaga. Ahogyan az üreg tágul, a kőzetek hűlnek és kondenzálódnak. Az üregeken kívül a hőmérséklet intenzíven csökken a távolsággal, és néhányszoros üregsugárnyi távolságban a hőmérséklet eléri a környező talajhőmérsékletet. A felhőoszlopban áramló gáz hőmérséklete még intenzívebben csökken.



Képzeljünk most el egy felszín alatti, kémiai és biológiai hatóanyagok tárolására szolgáló bunkert. Ha ez a robbanás közvetlen közelében van, akkor a bunker anyaga és az abban tárolt valamennyi konténer, fegyver, vegyszer, stb. pontosan olyan hatásnak lesz kitéve, mint a kialakuló kráter közvetlen közelében levő kőzetek. Így a biológiai és vegyi reagensek csak és kizárólag akkor semmisülnek meg, illetve válnak hatástalanná, ha a nukleáris töltet a közvetlen közelükben robban. Ha nem így történik, akkor nagyon valószínű, hogy a továbbra is halálos toxinok keverednek a kidobott porral, törmelékkel és a radioaktív szennyeződéssel együtt kihullanak a felszínre.

A mondottak alapján kijelenthetjük, hogy sokkal előnyösebb stratégiai koncepció lenne a már meglévő toxikus anyagkészleteket megőrizni azokban a földfelszín alatti tárolókban, ahol jelenleg vannak, és azokat a helyszínen kellene semlegesíteni.

Ha a vegyi hatóanyagokat nem vesszük figyelembe, egy felszín alatti nukleáris robbanás következtében a személyi sérülések elsősorban a lokális ionizáló sugárzásnak tulajdoníthatók. A sugárbetegség következtében a halálos esetek száma sok paramétértől függ. Ilyen tényezők a népsűrűség, a helyi terep- és időjárási viszonyok, a terület evakuálására fordított idő, az elnyelt dózis, stb. Becslések szerint, a robbanást körülvevő $3 \cdot W^{0,6} \text{ km}^2$ területen tartózkodó személyek minden bizonnyal halálos dózist kapnak. Ez azt jelenti, hogy egy átlagos harmadik világbeli városban, ahol a népsűrűség $\sim 6000 \text{ fő/km}^2$, egy 1 kilotonnás bomba akár tízezrek, egy 100 kilotonnás töltet akár százazrek életét is kiolthatja.

Mi a helyes döntés?

Ha a kongresszus végül meghatalmazást ad az új nukleáris fegyverek tervezéséhez, felmerül a kérdés, hogy valóban szükséges-e újra elkezdni a nukleáris robbantással járó kísérleteket? A válasz attól függ, hogy egészen pontosan milyen típusú fegyver teszteléséről van szó. Ettől függetlenül is kijelenthető azonban, hogy nagy valószínűséggel robbantásokra nem volna szükség, ugyanis a nukleáris fegyvereknek csaknem minden részegysége és folyamata, még a Pu-239 implóziója is tanulmányozható nukleáris robbantás mellőzésével. Ez utóbbihoz „mindössze” helyettesíteni kell a hasadóanyagot egy kémiaileg egyenértékű izotóppal, amely nem produkál láncreakciót. Ha a Kongresszus az elemzett kis hatóerejű nukleáris fegyverek fejlesztése mellett dönt, a kísérletek akkor is elkerülhetőek, hiszen a meglévő robbanófejek már a tervezéskor rendelkeznek bizonyos rugalmassággal. Ez pontosabban azt jelenti, hogy minden nukleáris robbanófejnek van egy kis energiájú módusa. Ha ugyanis kiiktatják a második fázist, azaz a termonukleáris reakciót és ugyancsak kiiktatják vagy csökkentett hatékonysággal tartják meg a deutérium-trícium keverék fúziós reakcióját, akkor a megmaradó fegyver egy „közönséges” egyfázisú, hasadóanyagot tartalmazó robbanófejjel tekinthető azonosnak, melynek energiáját némileg szabályozni lehet a D-T keverék mennyiségével.

Ha ellenben a Kongresszus egy teljesen új típusú bomba kifejlesztésével bízza meg a kutatólaboratóriumokat, akkor az elkerülhetetlen bizonytalansági tényezők miatt mindenképpen szükség lesz a kísérletek elvégzésére, mielőtt az új fegyverek csatlakoznának az Egyesült Államok arzenáljához.

A hidegháború befejezése óta a nukleáris fegyverek veszítettek jelentőségükből. A nagy pontosságú hagyományos kémiai töltettel felszerelt fegyverek képesek megoldani mindazokat a harci feladatokat, amiket eddig kizárólag nukleáris fegyverektől vártak el. Hogy hogyan dönt az Egyesült Államok Kongresszusa, az nagyban függ Oroszország, Kína és a többi nukleáris fegyverrel rendelkező nemzet fegyverkezési politikájától. Ha az Egyesült Államok folytatja a kísérleteket biztosra vehetjük, hogy válaszképpen a többi ország is belefog nukleáris arzenáljának fejlesztésébe, és elképzelhető, hogy túlszárnyalják majd az Amerikai Egyesült Államokat. A moratórium megsértése biztosan lerombolja majd az eddigi megállapodások gyümölcsét, és jelentősen megnehezíti a nukleáris fegyverek elterjedésének korlátozására tett erőfeszítéseket!

Hivatkozások

1. Sidney D. Drell: On Physics and National Security. *Physics Today* 2000/12. 25-29.p.
2. Raymond Jeanloz: Science-Based Stockpile Stewardship. *Physics Today* 2000/12. 44-50.p.
3. Robert W. Nelson: Nuclear Bunker Busters, Mini-Nukes, and the US Nuclear Stockpile. *Physics Today* 2003/11. 32-37.p.
4. <http://www.physicstoday.org/vol-56/iss-11/p32.html> (2007.09.20)
5. <http://www.physicstoday.org/vol-53/iss-12/p44.html> (2007.09.20)
6. <http://www.physicstoday.org/pt/vol-53/iss-12/p25.html> (2007.09.20)