

# Yleiskatsaus ydintaisteluvälineiden nykyiseen kehitysvaiheeseen

Yleisesikuntaeverstiluutnantti Y. Keinonen

## I JOHDANTO

Ydintaisteluvälineiden syvälle käyviä vaikutuksia taktiikkaan, strategiaan, organisaatioon ja koulutukseen sekä ydinräjähteiden erilaisia tuhovaikutuksia on käsitelty laajasti ammattikirjallisuudessa. Sen sijaan itse taisteluvälineiden rakennetta, toimintaperiaatetta, valmistusta, tuotantokustannuksia ym teknillisiä kysymyksiä kosketteleva aineisto on hämäämissyistä niukkaa, ylimalkaista ja osittain harhaanjohtavaakin. Kehityksen nopeuden vuoksi käytettävissä olevat tiedot myös vanhenevat yllättävän lyhyessä ajassa. Rajoituksista huolimatta on joka tapauksessa pyrittävä luomaan ajan tasolla oleva kuva ydinaseiden teknillisistä ominaisuuksista, koska täten saadaan luotettavin pohja aseiden käyttömahdollisuuksien ja vastatoimenpiteiden arvioimiselle myös meikäläisiä olosuhteita silmällä pitäen.

Ydinräjähteiden energia syntyy joko raskaiden atomiytimien halkeamisen tai keveiden ytimien yhtymisen tietä. Molemmissa tapauksissa on kysymys ydinreaktioista, joissa muodostuneiden hiukkasten yhteenlaskettu massa on pienempi kuin lähtöaineina olevien. Massojen erotus muuttuu energiaksi Einsteinin lain  $E = mc^2$  mukaan ( $m$  = massavajaus,  $c$  = valon nopeus  $3 \cdot 10^{10}$  cm/sec) ja ilmenee syntyvien osasten suurena nopeutena ja sähkömagneettisena säteilynä. Raskaiden ytimien halkeamisilmiötä nimitetään fissioksi, kevyiden yhtymistä fuusioksi. Vastaavasti ydinräjähteet jaetaan kahteen pääryhmään: fissio- ja fuusioräjähteisiin. Vaikka tämä jako ei enää vastaa ole-

massa olevia taisteluvälineitä, joissa saattaa tapahtua sekä fissio- että fuusioreaktioita, näitä nimityksiä käytetään sen mukaan, kumman reaktiotyyppin puolella on rakenteellinen pääpaino. Fuusioräjähteistä käytetään myös nimityksiä vetypommi, joka on tiettyssä mielessä vanhentunut, ja lämpöydinräjähdde, jota voidaan pitää onnistuneimpana. Yleisessä käytössä ollut fissioräjähteitä tarkoittava nimitys atomipommi on epäjohdonmukainen <sup>1)</sup>).

## II RAKENNE JA VALMISTUS

### A FISSIORÄJÄHTEET

Fissioräjähdysaineen halkeavina raskaina atomiytiminä käytetään luonnossa esiintyvää uraani-isotooppia  ${}_{92}\text{U}^{235}$  ja reaktoreissa tuotettua plutoniumia  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ . Myös uraanin tekoisotooppi  ${}_{92}\text{U}^{233}$ , jota valmistetaan reaktoreissa toriumista  ${}_{90}\text{Th}^{232}$ , voisi teoreettisesti hyvin tulla kysymykseen ydinräjähdysaineena, mutta sen soveltamisesta käytäntöön ei ole esiintynyt varmoja tietoja.

Ytimen haljetessa massavajaus on noin tuhannesosa sen painosta. Siitä huolimatta vapautuva energia halkeavaa ydintä kohti on keskimäärin 200 MeV ( $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  joulea), joka on noin 50 milj kertaa enemmän kuin kemiallisessa räjähdysilmiössä yhtä hapettuvaa molekyyliä kohti vapautuva energia.

$\text{U}^{235}$  ja  $\text{Pu}^{239}$  ovat raskaita (tiheydet 18,7 ja 19,4 g/cm<sup>3</sup>), helposti hapettuvia, radioaktiivisia ( $\alpha$ -säteilijöitä) metalleja, joiden puoliintumisajat ovat  $0,71 \cdot 10^9$  ja  $2,41 \cdot 10^4$  vuotta. Puoliintumisajan pituudesta johtuu, että ne ovat käytännöllisesti katsoen rajattoman kauan säilyviä. Käsittelyn kannalta ne sen sijaan ovat hankalia herkästi syttyvinä sekä niiden pinnalle muodostuvan oksidikerroksen vuoksi, joka pölyttyy helposti.  $10^{-6}$  g tällaista pölyä on jo hengenvaarallinen erä, jos se hengityksen mukana joutuu ihmisen elimistöön.

Ytimen halkeaminen tapahtuu neutronin absorboituessa siihen. Räjähdysten edellyttämä nopea ketjureaktio perustuu siihen, että

<sup>1)</sup> Ydinfysiikan perusteet on esitetty mm teoksessa Finkelnburg: Atomic Physics (myös saksankiel). Yleisesikunnan kirjastossa on myös tähän kirjoitukseen liittyvä suppea moniste: Ydinfysiikan perusteet.

$U^{235}$ -ytimen haljetessa vapautuu keskimäärin 2,5,  $Pu^{239}$ :n haljetessa 3 uutta neutronia. Neutronien energia on 1 MeV:n suuruusluokkaa, joka vastaa neutronin nopeutta noin 10 km/sek. Räjähdyksen teho riippuu ratkaisevasti näiden neutronien kohtalosta. Osa niistä häviää räjähdyksineen oleviin vieraisiin aineisiin, minkä vuoksi ydinräjähdyksineen valmistuksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota aineen puhtauteen. Osa neutroneista poistuu ympäristöön, ja näin ollen vain jäljelle jäävä osa voi aiheuttaa uusia halkeamisia. Jos halkeamisia tapahtuu keskimäärin enemmän kuin yksi alkuperäistä fissiota kohti, tapahtuu ketjureaktio. Tällöin ns kasvutekijä  $k$  on suurempi kuin 1. Ydinräjähdyksen hyötysuhteen kohottamiseksi pyritään mahdollisimman suureen kasvutekijän arvoon.

Neutronihäviöt ympäristöön riippuvat ratkaisevasti räjähdyksikkappaleen koosta. Häviöt ovat verrannollisia kappaleen pinta-alaan ja kasvavat siten säteen neliössä koon kasvaessa säteen kuutiossa. Pienellä kappaleella on kokoonsa nähden suuri pinta, joten siitä pääsee karkaamaan ympäristöön suuri osa neutroneista eikä räjähdyistä tapahdu ( $k < 1$ ). Massan kasvaessa kappaleen  $k$  kasvaa. Kun  $k = 1$ , on saavutettu kriittinen piste. Sitä suurempi kappale räjähtää itsestään, sillä mm avaruussäteilyn vuoksi on aina olemassa joitakin vapaita neutroneja. Kuten edellä esitetystä jo ilmenee, kriittinen koko riippuu kappaleen massan lisäksi sen muodosta, tiheydestä ja puhtaudesta. Esim huokoisen pallon kriittinen massa on suurempi kuin tiukasti kokoon puristetun.

Neutronien karkaamista räjähdyksikkappaleen ulkopuolelle voidaan pienentää ympäröimällä kappale neutroneja heijastavalla aineella. Tällaisena aineena voidaan käyttää mm berylliumia ja raskaita alkuaineita, esim luonnon uraania ja reaktorien jäteuraania.

Geneven atomienergiakonferenssissa elokuussa 1955 julkisuuteen saatettujen tietojen mukaan  $U^{235}$ :n kriittinen massa ilman neutroneja heijastavaa ulkokerrosta ja normaalin tiheänä on noin 40 kg. Täydellisesti heijastavalla kerroksella ympäröitynä se olisi noin 15 kg. Käytännössä kriittinen massa on näiden arvojen välillä.  $Pu^{239}$ :n kriittinen massa on normaalitilassa vain noin 5 kg, mikä johtuu plutoniumytimen haljetessa vapautuvasta suuremmasta neutronimäärästä. Atomiydinkranaatin teoreettisesti pienintä mahdollista kaliperia ajatellen

todettakoon, että 5 kg plutoniumia vaatii tilavuuden, joka on vain  $0,26 \text{ dm}^3$ .

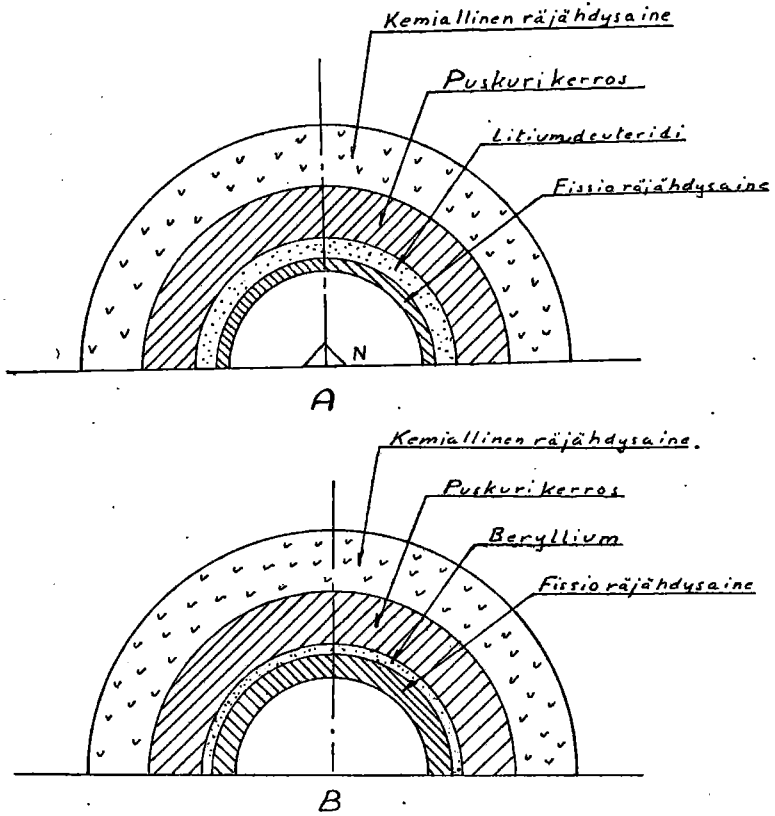
Ydinräjähdysen hyötysuhteen kohottamiseksi on pyrittävä siihen, että räjähdysen alkamishetkellä muodostuu mahdollisimman suuri ylikriittillistä kokoa oleva panos. Lähtien alikriittillisestä tilasta on siten mahdollisimman nopeasti pyrittävä ohittamaan kriittillinen välitila.

Alarajan lisäksi, jota pienempi ydinmassa ei räjäytä, kriittillisestä koosta johtuu myös panoksen suuruuden teknillinen yläraja. Käytännössä on näet mahdotonta saada esim sataa räjähdyspanosta, joista kukin on esim 90 % kriittillisestä koosta, yhtymään riittävän lyhyessä ajassa. Seuraava laskelma osoittaa, kuinka lyhyistä aikamääristä tällöin on kysymys.

Oletetaan, että ydinräjähdyksessä jokainen fissio vapauttaa ketjureaktion kannalta 2 tehokasta neutronia. Ne kulkevat räjähdysaineessa keskimäärin 10,5 cm, ennenkuin absorboituvat johonkin ytimeen. Tähän kuluva aika (yhden neutronipolven elinikä) =  $0,011 \cdot 10^{-6}$  sek. Yksi kg  $\text{U}^{235}$ :tä sisältää  $2,56 \cdot 10^{24}$  atomia. Edellyttäen, että ketjureaktio alkaa yhden ainoan ytimen halkeamisella, tarvitaan uraani-kg:n täydelliseen fission 80 neutronipolvea oli  $0,88 \cdot 10^{-6}$  sek.

Jos räjähdyspanos on 10 kg, vastaa 80 neutronipolvea 10 %:n hyötysuhdetta. Mikäli panos pysyy riittävästi koossa 82 neutronipolven ajan (=  $0,9 \cdot 10^{-6}$  sek), hyötysuhde on jo 40 %. Kasvavassa määrässä syntyvät halkeamistuotteet esiintyvät räjähtävän aineen epäpuhtauksina. Niiden vuoksi tarvitaan todellisuudessa vähän useampia neutronipolvea ja aikaa noin 1,1—1,2 mikrosekuntia.

Jotta ketjureaktio ehtisi kehittyä hyötysuhteen kannalta tyydyttävän pitkälle, pitää siis fissioituvan aineen pysyä riittävästi koossa tietyn ajan verran. Tämä on mahdollista vain käyttämällä puskurikerrosta. Sen mekaanisella lujuudella ei kuitenkaan ole merkitystä, koska syntyvässä kuumuudessa (yli  $5 \cdot 10^7$  °C) aine kaasuuntuu. Vain puskurikerroksen hitausvoima voi pitää räjähdyspanoksen koossa vaadittavan 1—2 mikrosekunnin ajan. Hitausvoima on suoraan verrannollinen pintayksikköä kohti laskettuun massa- ja laajenemiskiiltoyteen, joka pommin sisällä vaikuttavan valtavan paineen (vähintään  $10^8$  atm) vuoksi saa erittäin suuria arvoja (suuruusluokka  $10^{10}$  m/sek<sup>2</sup>).



Fissiopommin rakennekaava

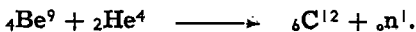
Kuva 1

Koska kriittistä kokoa olevan pallomaisen plutoniumpanoksen säde on vain noin 4 cm, on mahdollista konstruoida kooltaan ja painoltaan varsin pieniä ydinkranaatteja tai -pommeja, jos niiden puskurikerros tehdään ohueksi. Tällöin kuitenkin ydinräjähdysaineen kulutus on epätaloudellista. Hiroshimaan pudotetun pommin hyötysuhde oli 10 %, atomitykistön pienimpien kranaattien osalta se saattaa olla vain 1–3 prosenttia.

Edellä esitetyn mukaisesti fissiopommin rakenneperiaate voisi olla seuraavanlainen. Aluksi halkeava aine on kahtena tai ehkä useam-

pana alikriittillistä kokoa olevana kappaleena, jotka räjähdyshehkellä saatetaan yhteen niin, että muodostuu ylikriittinen räjähdyspanos (Japaniin pudotetut pommit).

Toinen mahdollisuus on se, että räjähdysaine on pommissa yhtenä kappaleena, jonka muotoa ja tiheyttä muutetaan räjähdyshehkellä niin, että kriittinen koko ylitetään. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki tällaisen pommien periaateratkaisusta. Halkeavalla aineella on pallonkuoren muoto. Aine on ympäröity puskurikerroksella, jonka ulkopuolella on kerros kemiallista räjähdysainetta ja sytytysjärjestelmä, jonka avulla detonaatio saadaan tapahtumaan samanaikaisesti kautta koko pinnan. Siten pommi puristetaan kokoon ja fissioituvassa aineessa tapahtuu ketjureaktio. Sen alkaminen halutulla hetkellä mahdollisimman voimakkaana voidaan varmentaa liittämällä pommiin neutronilähde, esim Ra—Be-seos. Radiumista lähtevä  $\alpha$ -säteily aiheuttaa näet berylliumissa reaktion



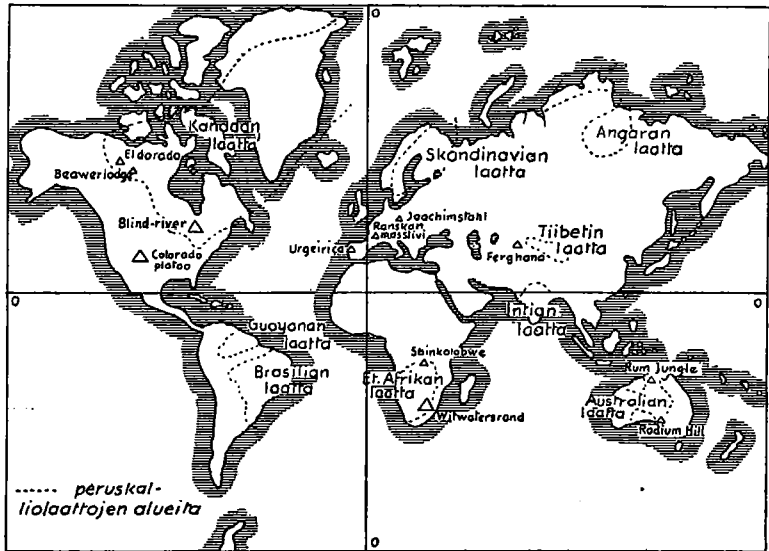
Koska fissiokelpoiset aineet ovat itse  $\alpha$ -säteilijöitä, neutronilähde saadaan aikaan myös siten, että käytetään panoksen ympärillä pelkkää berylliumia neutroniheijastimena (kuva 1B).

Kuvassa 1A on puskurikerroksen sisäpuolella vielä kerros litiumdeuteridia, fuusioräjähdysainetta. Syistä, joiden vuoksi tähän on menty, tulee eri yhteyksissä puhe myöhemmin (s 134, 135, 140, 141, 146 ja 147).

On tärkeätä, että ydinreaktio alkaa hetkellä, jolloin halkeava aine on eniten kokoon puristunut ( $k = K_{\text{maks}}$ ). Kemiallisen räjähdysreaktion ja fissioliömiön synkronoiminen mikrosekunnin tarkkuudella tapahtuvaksi näyttää olevan teknillisesti vaikeasti ratkaistava probleema.

### Fissioräjähdysaineen valmistus

Uraaniraaka-ainetta näyttää maapalloilta löytyvän niin runsaasti, että sen puute ei ainakaan lähitulevaisuudessa rajoita ydintaisteluvälinetuotantoa. Kuvassa 2 on esitetty maapallon tärkeimmät tunnetut uraanimalmia sisältävät alueet. Louhintakelpoisina pidetään tällä hetkellä esiintymiä, joiden pitoisuus on 0,1—0,2 %  $\text{U}_3\text{O}_8$ :aa. Malmin pitoisuutta pidetään korkeana, jos se on 0,5 %  $\text{U}_3\text{O}_8$ :aa tai enemmän. Erit-



Tärkeimmät peruskalliolaattojen ja uraanimalmien alueet maailmassa

Kuva 2

täin runsaasti on uraanimalmia Kanadassa, jonka metallin tuotannossa uraanioksidin tuotanto on saamassa ensi sijan, jos ajatellaan sen arvoa rahaksi laskettuna. Etelä-Afrikassa on luonto järjestänyt asiat niin hyvin, että kultaa ja uraanimalmia on samassa emäkivessä. Yhdysvaltain päätuotanto tapahtuu noin kolmestakymmenestä Colorado-laa-kion esiintymästä, jotka edustavat erityyppisiä muodostumia. Pääosa saadaan hiekkakiviesiintymistä, joiden louhinta on helppoa. Kaivos muistuttaa usein suurikokoista hiekanottoa paikkaa. Vuoden 1957 aikana on USA:ssa saatu toimintaan kaikkiaan 20 uraanimalmin jalostus-tehdasta, joiden  $U_3O_8$ -tuotanto kohoaa 10.000—12.500 tonniin. Näyttää siltä, että jatkuvasti tehdään uusia merkittäviä löytöjä. Suomi kuuluu uraanimalmi-alueeseen, joten teoreettisin perustein voidaan urania olettaa piilevän kallioperässämme. Huomattavia löytöjäkin on jo tehty.

Uraanimalmista saatava metallinen luonnonuraani on isotooppi-seosta, joka sisältää 99,279 %  $U^{238}$ :aa, 0,715 %  $U^{235}$ :tä ja 0,053 %  $U^{234}$ :ää. Koska isotooppien kemialliset ominaisuudet ovat samat, voi-







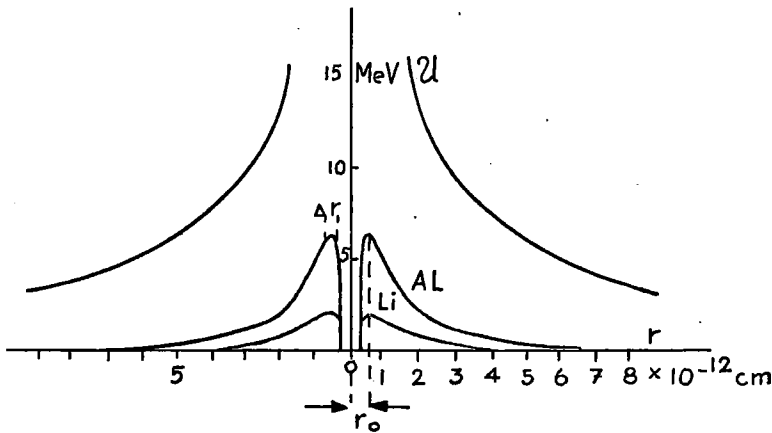
jossa  $e$  = protonin varaus ja  $r$  = ytimien välinen etäisyys. Työ, joka on suoritettava, kun kaksi ydintä lähestyy toisiaan vaikutusalueensa ulkopuolelta etäisyydelle  $r$ , on siten

$$\int_{\infty}^r \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2} dr = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$$

Sähköisen poistovoiman vuoksi atomydintä ympäröi potentiaalivalli, jonka korkeus on siis  $\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$

Poistovoima  $F$  kasvaa etäisyyden  $r$  pientessä vain tiettyyn rajaan  $r_0$ , saakka, jolla etäisyydellä ( $r_0 \approx$  ytimen säde), hyvin lyhyellä välillä  $\Delta r$ , sähköinen poistovoima muuttuu ydinosasten väliseksi vetovoimaksi. Jotta kahden ytimen yhtyminen, fuusio, voisi tapahtua, on niiden siis päästävä etäisyyden  $r_0$  päähän toisistaan.

Alla oleva piirros (kuva 3) esittää ytimen potentiaalivallia. Ordinaattana on MeV:ina mitattuna se liike-energia, joka tarvitaan kuljettamaan deuterium kolmen ytimen, litiumin, aluminiumin ja uraanin, läheisyyteen. Abskissana on ydinten välimatka  $r$ . Mitä suurempi ydinten varaus on, sitä korkeampi on potentiaalivalli.

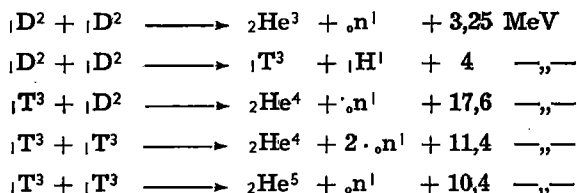


Ytimen potentiaalivalli

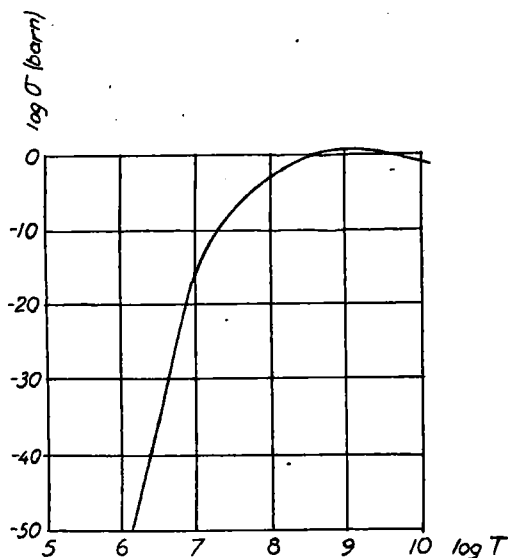
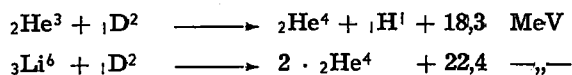
Kuva 3

Fuusioreaktiossa vapautuva energia on painoyksikköä kohti lasketuna 2,5—4,5 kertaa niin suuri kuin fissionissa.

Fuusioreaktiossa kannalta tärkeimmät yhtyvät ytimet ovat vedyn isotoopit deuterium ( ${}^2_1\text{D}$ ) ja tritium ( ${}^3_1\text{T}$ ). Merkittävimmät fuusioreaktiot ja niissä vapautuvat energiat ovat seuraavat:



Fuusiopommin räjähtäessä ovat myös useat muut reaktiot mahdollisia lämpötilan kohotessa riittävän suureksi. Tiedot näistä ovat kuitenkin puutteellisia. Seuraavassa pari lisäesimerkkiä.

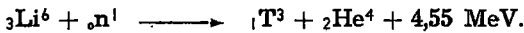


T+D-reaktion vaikutusalan ( $\sigma$ ) riippuvuus lämpötilasta (T)

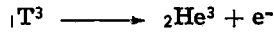
Kuva 4

Kuvassa 4 on esitetty tärkeimmän reaktion, T + D, vaikutusalan riippuvuus lämpötilasta. Reaktion D + D käyrä on samanmuotoinen, mutta sen vaikutusala on noin tuhannesosa edellisestä. T + D-reaktio onkin vilkkain kaikista fuusioreaktioista. Yleisimmän käsityksen mukaan fuusioenergia on valtaosaltaan peräisin juuri siitä.

Puhdasta deuteriumia ja tritiumia ei kuitenkaan enää käytetä fuusioräjähdyksineen. Tritiumin valmistus on kallias ja monimutkainen prosessi, joka perustuu reaktioon



Tritiumin tuotantohinta lieneekin yli 300 milj mk/kg. Kun se lisäksi on radioaktiivista:



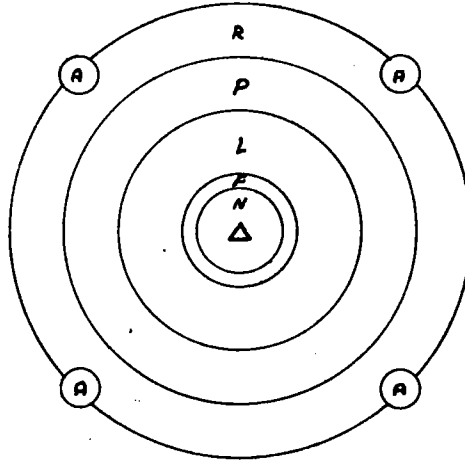
ja puoliintumisaika on vain 10,7 vuotta, eivät vetypommit sitä käytettäessä olisi varastomiskelpoisia. Tällainen pommi olisi myös erittäin painava, koska T + D on pidettävä ylipaineen alaisena nestemäisessä tilassa ( $-190^\circ\text{C}$ ), mikä edellyttää mm tehokkaita jäähdytyslaitteita. Nämä haitat vältetään käyttämällä räjähdyspanoksena litiumdeuteridia ( ${}_3\text{Li}^6$   ${}_1\text{D}^2$ ). Tarvittava tritium syntyy siitä pommin räjähdysprosessin alkuvaiheessa edellä esitetyn reaktion mukaisesti.

Fuusioräjähdyksen syttymiseen tarvittava lämpötila saadaan aikaan käyttämällä detonaattorina fissiopanosta. Alkulämpötila on kohotettava huomattavasti yli syttymisrajan, jotta reaktio alkaisi heti riittävän voimakkaana. Muussa tapauksessa pommi ehtii laajeta ja reaktio sammuu, ennenkuin tyydyttävä hyötysuhde on saavutettu. Sytyttimenä käytettävän Pu- tai  $\text{U}^{235}$ -panoksen täytynee sen vuoksi olla kriittillistä kokoa huomattavasti suurempi.

Laajoja tutkimuksia ja kokeiluja on suoritettu riittävän korkean alkulämpötilan aikaansaamiseksi muuta tietä kuin fissiopanosta käyttäen. Tässä mielessä on kiinnitetty huomiota mm sähköisiin ilmiöihin, suunnattuun räjähdysvaikutukseen ja harvennetun kaasun abiabaattiseen kokoon puristamiseen. Näillä tutkimuksilla on ratkaiseva merkitys myös pyrittäessä soveltamaan lämpöydinreaktioita rauhanajan energian tuotantoon<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Korkeiden lämpötilojen vuoksi ydinreaktiot tapahtuisivat sähkömagneettisissa "astioissa", joiden seinät olisivat siis massattomat.

## Lämpöydinpommin rakennekaava



- A synkronoituja aloitepanoksia
- B räjähdysaine (kemiallinen)
- P puskurikerros, jäteurania  $U^{238}$
- L fuusiokerros, litiumdeuteridia
- F fissiokerros, uraania  $U^{235}$  ( $U^{238}$ )  
tai plutoniumia  $Pu^{239}$
- N neutronilähde

Kuva 5

Lämpöydinräjähteen rakenneperiaate voisi olla kuvassa 5 esitetyn mukainen. Sisimpänä on fissiopanos (Pu tai  $U^{235}$ ) neutronilähteineen. Sen ulkopuolella on fuusiokerros LiD, sitten puskurikerros, jona yleisimmin on käytetty luonnonuraania tai jäteturaania. Uloimpana on kerros kemiallista räjähdysainetta ja sytytysjärjestelmä.

Näin konstruoidun pommin toiminnan voidaan ajatella tapahtuvan seuraavasti.

Kemiallinen räjähdys puristaa pommin eri kerrokset kokoon ja sytyttää siten fissiopanoksen. Sen räjähtäessä syntyy yli 50 milj:n asteen lämpötila ja fissiossa vapautuva neutroniparvi tunkeutuu litiumdeuteridikerrokseen aiheuttaen ydinreaktion, jonka vaikutuksesta syn-

tyy tritiumia ja heliumia. Tämän reaktion vaikutusala on erittäin suuri. Syntyneillä  $T^3$ -ytimillä on suuri energia (3 MeV), minkä johdosta ne reagoivat deuteriumydinten kanssa, jolloin muodostuu heliumia ja neutroneja. Näillä neutroneilla on jopa 14 MeV:n energia ( $v \approx 140.000$  km/sek). Viimeisen vaiheen muodostaa niiden aiheuttama fissio puskurikerroksen uraanissa, joka itse ei pysty pitämään yllä ketjureaktiota.  $U^{238}$ -isotoopin halkeamisen kynnyksenergia on 1,1 MeV, joten siihen ulkopuolelta tulevien 14 MeV:n neutronien fissiovaikutusala on erittäin edullinen. Näin syntyvä lisäenergia ja neutronit suuntautuvat osaksi pommin keskustaa kohti ja kiihdyttävät lämpöydinreaktiota. 1. 3. 54 räjäytetyn vetypommin energiasta jopa 80 % arvioidaan olleen peräisin puskurikerroksen fissioreaktiosta.

Puskurikerroksen päätehtävänä on kuitenkin pitää räjähdyspanos koossa niin kauan, että päästään tyydyttävään hyötysuhteeseen. Hetkellinen reaktionopeus on näet suoraan verrannollinen räjähdyksaineen tiheyteen. Puskurikerroksen pintayksikköä kohti lasketun massan pitää tietenkin olla paljon suurempi kuin fissiopommissa. Huomattavan suuren tiheydensä 11,4 (g/cm<sup>3</sup>) vuoksi myös lyijy soveltuisi uraanin ohella puskuriaineeksi.

Lähtien pommin laajenemiskiihtyvyyttä osoittavasta yhtälöstä

$$\frac{d^2r(t)}{dt^2} = \frac{p(t)}{m_0 r^2} \quad r^2(t)$$

[ $p(t)$  = paine ja  $r(t)$  = säde hetkellä  $t$  sekä  $r_0$  = säde ja  $m =$  pintayksikköä kohti laskettu massa hetkellä  $t = 0$ ] voidaan matemaattisesti osoittaa, että pommin tilavuus  $V$  hetkellä  $t = 10^{-6}$  sek riippuu puskurikerroksen massasta  $m_0$  seuraavassa taulukossa esitetyllä tavalla.  $V_0 =$  tilavuus alkuhetkellä,  $r_0 = 50$  cm = puskurikerroksen sisäsäde. Taulukossa on lisäksi puskurikerroksen vastaava paksuus.

$V_t = 10^{-6}$ sek	$m_0$	Puskurikerroksen paksuus	
		$U^{238}$	Lyijy
2,1 . a . $V_0$	50 g/cm <sup>2</sup>	2,5 cm	4,06 cm
1,5 . a . $V_0$	100 —,—	4,8 „	7,6 „
1,23 . a . $V_0$	200 —,—	8,9 „	13,6 „
1,11 . a . $V_0$	400 —,—	17,7 „	23 „

Tekijän  $a$  arvo riippuu mm pommin energiasta. Numerokertoimen pienenemisnopeus  $m_0$ :n kasvaessa osoittaa puskurimassan ratkaisevan merkityksen. Jos pommin energia on suuruusluokkaa 1—10 megatonnia, päästäneen tyydyttävään hyötysuhteeseen arvoilla  $m_0 = 200—400$  g/cm<sup>3</sup>.

Pintayksikön massan  $m_0$  arvoa määritettäessä on otettava huomioon toisaalta pommin hyötysuhteelle asetettavat vaatimukset, toisaalta pommin painon haitallinen kasvu  $m_0$ :n lisääntyessä. Taulukon arvoja vastaava puskurikerroksen paino on 1,5—12 tonnia.

Lämpöydinpommit voidaan konstruoida kuinka suuriksi tahansa. Myöskään ei ole olemassa mitään lämpöydinräjähdyspanoksen minimikokoa fissiopianosten tapaan. Itse pommin painon alaraja riippuu lähinnä detonaattorijärjestelmästä ja puskurikerroksesta.

Uraanin ja plutoniumin fissiotuloksiin sisältyy yli 200 erilaatuista radioaktiivista isotooppia  ${}_{30}\text{Zn}^{72}$ :n ja  ${}_{64}\text{Gd}^{160}$ :n väliltä. Säteilyn voimakkuuden väheneminen ajan mukaan ilmenee seuraavasta taulukosta, joka koskee 20 kt:n fissioräjähdettä.

Räjähdyksestä kulunut aika	Aktiivisuus (megacurie)
1 min	$8,2 \cdot 10^5$
1 tunti	$6 \cdot 10^3$
1 vrk	133
1 viikko	13
1 kk	2,3
1 v	0,11
10 v	$0,8 \cdot 10^{-2}$
100 v	$0,6 \cdot 10^{-3}$

Vaarallisimpia radioaktiivisia myrkkyjä ovat pitkäikäiset isotoopit  ${}_{55}\text{Cs}^{137}$  (puoliintumisaika 33 vuotta) ja  ${}_{38}\text{Sr}^{90}$  (puoliintumisaika 28 vuotta), joka sitoutuu ihmisen luustoon, kuten siihen luonnostaan kuuluva kalsium. Radioaktiivisuudesta aiheutuvien jälkivaikutusten vuoksi (laajat maaston saastutukset, veden saastuminen ja mihin tahansa maapallolla ilmapirtausten mukana kulkeutuva radioaktiivinen pöly) on tehty intensiivistä tutkimustyötä sellaisen räjähteen konstruoimiseksi, jolla ei olisi näitä haitallisia vaikutuksia. Tähän voidaan päästä

korvaamalla puskuriuraani fissioitumattomalla raskaalla aineella ja konstruoimalla fissiosytytysjärjestelmän tilalle esim sähköinen.

Itse fuusioräjähdyksineen reaktiotulokset eivät ole em mielessä radioaktiivisia, joskin ne voivat synnyttää aktiivisuutta maaperään tai veteen räjähdys tapahtuessa riittävän matalalla.

Syksyllä 1957 on USA:n taholta ilmoitettu "puhtaan" lämpöydin-pommin kehittämisestä ja Englannin lehdistössä on ollut maininta siitä, että uudet kokeilupommit aiheuttavat vain 25 % aikaisempien radioaktiivisuudesta.

Jos puskuriuraani kokonaan tai osaksi korvataan esim lyijyllä, ko-hoa tehoyksikköä kohti laskettu hinta, koska jäteuraani on toistaiseksi ollut varsin halpaa. Sen tilalle tulisivat lisääntynyt fuusioräjähdyksaine-määrä ja lyijy.

"Puhtaan" tai lähes puhtaan pommin etu "likaiseen" verrattuna on suuri. Koska pommin käyttäjän ei tarvitsisi ottaa huomioon häneen itseensä kohdistuvia jälkivaikutuksia, voisi esim hyökkäysliike jatkua kuten tavanomaisen tulivalmistelun jälkeen ja ydinenergian käyttö-mahdollisuudet tuhovälineenä olisivat taloudellisten resurssien puit-teissa rajoittamattomat.

### Fuusioräjähdyksineen valmistuksesta

Luonnossa esiintyvä litium on isotooppiseosta, joka sisältää 7,5 %  ${}^6_3\text{Li}$ :ta ja 92,5 %  ${}^7_3\text{Li}$ :ää. Li on alkalimetalli, jonka tiheys on 0,53 g/cm<sup>3</sup>, sulamispiste 166°C ja kiehumapiste 626°C. Litiummalmeja on maaperässä verrattain runsaasti.

${}^6_3\text{Li}$ :n eristäminen  ${}^7_3\text{Li}$ :stä voi tapahtua samojen menetelmien mu-kaan kuin  $\text{U}^{235}$ :nkin. Eristäminen on kuitenkin paljon helpompaa kom-ponenttien prosentuaalisesti suuremman molekyyli-painojen erotuksen vuoksi. Esim diffuusiomenetelmää käytettäessä tullaan toimeen toden-näköisesti 120—150 kammiolla, kun niitä  $\text{U}^{235}$ :tä eristettäessä tarvitaan yli 4000:n.  ${}^6_3\text{Li}$ :n tuotantokustannukset ovatkin verrattain alhaiset, noin 6—8 % plutoniumin hinnasta.

Fuusioräjähdyksineen toista komponenttia, deuteriumia, voidaan valmistaa raskaasta vedestä ( $\text{D}_2\text{O}$ ) tai tislaamalla nestemäistä vetyä. Deuteriumin kilohinta on samaa suuruusluokkaa kuin  ${}^6_3\text{Li}$ :n.



### III YDINASETYYPIT JA -VARASTOT

#### A ASETYYPIT

Ydinräjähteen teho määritetään tavallisesti ilmoittamalla se trotyylin määrä, joka vastaa ydinpanoksen räjähdysenergiaa. Yksikköinä käytetään kilotonia (kt) =  $10^3$  tonnia ja megatonia (mt) =  $10^6$  tonnia = 1000 kt.

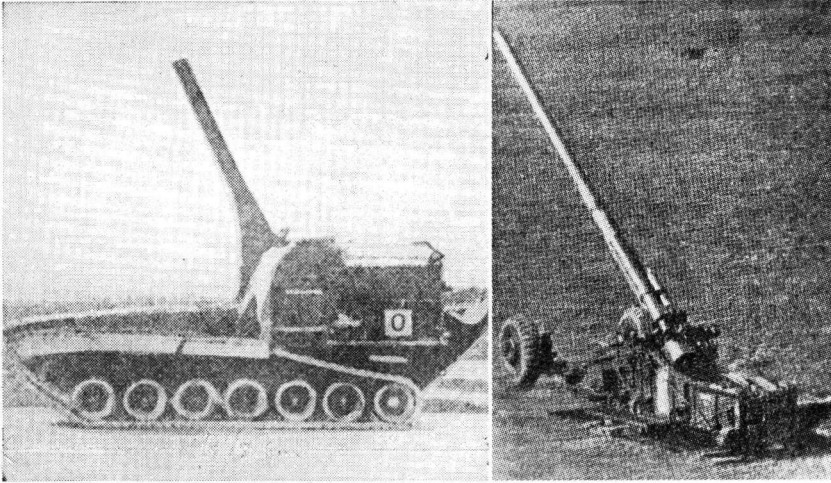
Eri käyttötarkoituksia varten on konstruoitu laaja valikoima teholtaan, painoltaan ja ulkomitoiltaan erilaisia ydinräjähteitä, jotka toimitetaan maaliin tietyllä taisteluvälineellä: tykistöillä, erilaisilla raketeilla ja ohjuksilla, rynnäkkö-, hävittäjä- ja pommikoneilla, torpedoilla; myös ydinmiinoja ja syvyyspommeja lienee konstruoitu.

Tietoja ydinräjähteiden tehosta ei ole sanottavasti päästetty julkisuuteen. Arviointien tukena ovat USA:n ydinasekoulutusta varten laadittujen käsikirjojen tiedot. Seuraavassa taulukossa on esimerkkejä ydinräjähteistä.

	teho	paino
Japaniin pudotetut pommit 1945 .....	20 kt	noin 4 tn
Kevyet fissioräjähteet .....	2—40 „	0,1—0,4 „
Keskiraskaat —,— .....	40—250 „	0,4—1 „
Raskas fissiopommi (Eisenhower) .....	500 „	1—2 „
USA:n lämpöydinpommi 1952 .....	3 mt	?
—,— —,— 1. 3. 1954 .....	15 „	2—10 „
Neuvostoliiton lämpöydinpommi 1955 ....	1—10 „	—,— „
Englannin —,— 1957 ....	1—5 „	—,— „
USA:n —,— .....	20 „	6—7 „
—,— —,— .....	200 „ ?	?

Ydinammusten teho lienee pääasiassa 2—40 kt, fissiopommien 2—500 kt, rakettien ja ohjusten ydintaistelukärkien ainakin 5—500 kt ja lämpöydinpommien 1—200 mt. Lämpöydinräjähteiden paino on kriittinen kauko-ohjusten kantokyvyn kannalta. Kehitys johtanee ongelman ratkaisuun aivan lähitulevaisuudessa. Erään tiedon mukaan olisi USA:ssa saatettu sarjavalmistusasteelle Thor-ohjuksen lämpöydintaistelukärki.

Ydinammuksien kaliiperit ovat USA:ssa 28 cm, 20,3 cm ja todennäköisesti 17,5 cm. On ilmeistä, että pyritään tykistön yleiseen kaliiperiin 15,5 cm ja rs krh:n ydinkranaattiin.



20,3 cm:n haupitsi

17,5 kanuuna

Kuva 6

Kuvassa 6 on 20,3 cm:n haupitsi (ampumaetäisyys 17 km, kranaatin paino 100 kg) ja 17,5 cm:n kanuuna, joka lienee uusin "atomitykki" (suuntaussektori on 360°, suuntaaminen ja lataaminen tapahtuvat koneellisesti, meno tuliasemaan on nopea ja tulinopeus suuri).

Suunnitteilla lienee 2 kt:a pienempienkin ydinammusten konstruointi. Kuten edellä on mainittu, kovin pienten räjähteiden valmistaminen on kuitenkin epätaloudellista eikä niistä ole taktillisen käytön kannaltakaan sanottavaa etua mm sen vuoksi, että ammuksen tuhoalueen säteen ja varmuusetäisyyden erotus, josta riippuu, kuinka lähelle omaa etulinjaa tuli voidaan suunnata, pienenee epäedullisen hitaasti ammuksen tehon pienetessä. Esim 2 kt:n ammusta käytettäessä ko erotus on (teoreettisesti) 630 m ja 0,1 kt:n ammusta käytettäessä se olisi 500 m. Kun siis teho alenee 1/20 osaan, vähenee ko erotus vain noin 20 %.

Tiedot lämpöydinräjähteiden tehon ylärajasta ovat hyvin epävarmoja. On epätarkoituksenmukaista konstruoida kovin suuritehoisia pommeja, koska vaikutusalueen keskustassa syntyy tarpeetonta liikatehoa ja vaikutussäteen kasvu energian mukana muuttuu yhä hitaammaksi. Lisäksi pommin paino tulee tällöin epäkäytännöllisen suureksi.

## B VARASTOT

Eri maiden ydinräjähddevarastojen suuruutta arvioitaessa voidaan ottaa lähtökohdaksi ne tiedot, joita on julkaistu ydinräjähdysaineita tuottavista tehdaslaitoksista. Olettaen yhtä ydinpanosta kohti käytetyn 10 kg plutoniumia päätyvät eri lähteissä esitetyt arvioinnit siihen, että

- USA:lla on 12—20000 fissioräjähdettä,
- Neuvostoliitolla useita tuhansia ja
- Englannilla vajaat 1.000 kpl.

Suurin osa varastoista lienee keskiraskaita fissioräjähteitä. Ydinammusten tuotanto on vasta pääsemässä vauhtiin, ja esim USA:ssa arvioidaan kuluvan 3—4 vuotta, ennenkuin ydinammusten määrä on niin suuri, että niillä voidaan korvata 25 % tavanomaisista raskaista kranaateista.

USA:n tuotantokyky arvioidaan 2—3 tuhanneksi vuodessa. USA:n ja Neuvostoliiton tuotantokykyjen suhteen arvioidaan olevan 2,5—5:1.

Kaikissa maissa, joissa energiaa tuottavat reaktiot tulevat käyttöön, on mahdollista valmistaa ydinräjähdysainetta.

Lämpöydinräjähteiden lukumääristä ja tuotantokyvystä ei ole näkynyt yhtä täsmällisiä arviointeja kuin fissioräjähteiden. USA on joka tapauksessa ehtinyt valmistaa niitä hyvinkin huomattavan määrän ja Neuvostoliitolla niitä lienee samassa suhteessa vähemmän kuin fissioräjähteitä. Englanti on myös tehnyt jo useita onnistuneita koeräjäytyksiä, joten lämpöydinräjähteitä valmistettaneen sielläkin sarjatuotantona.

Englantilaisen julkaisun "Military Record of Atomic Happenings" antamat tiedot poikkeavat melkoisesti edellä esitetyistä keskimääräisistä arvioinneista. Sen mukaan USA:n varastot olisivat jo noin 35.000 kpl (joista lämpöydinaseita lähes 2.000 kpl) ja niiden yhteinen energiamäärä olisi 10000 mt. Julkaisussa arvioidaan edelleen, että USA:n varastot ovat nopeasti lähestymässä sitä rajaa, jota enempiä ydinlatauksia ei lyhyen ajan sisällä voida räjäyttää radioaktiivisen pölyn vuoksi, josta tulisi vaara elämälle kaikkialla maapallolla.

## IV KUSTANNUSTEN ARVIOINTIA

### A FISSIORÄJÄHTEET

Plutoniumin tuotantohinta lienee tällä hetkellä noin 4,5 ja  $U^{235}$ :n 9 milj mk/kg. Hyötöreaktoreiden ansiosta Pu:n hinnan arvioidaan laskevan lähitulevaisuudessa kolmannekseen nykyisestä. Toriumista valmistettavan  $U^{233}$ :n hinta tulee olemaan samaa suuruusluokkaa kuin plutoniumin. Kun otetaan huomioon sytytysjärjestelmän ja puskurikerroksen aiheuttamat kustannukset, arvioidaan fissioräjähteen hinnaksi tehon mukaan 75—160 milj mk. Tuotantomenetelmien kehityksessä hinta tulee huomattavasti laskemaan jo lähitulevaisuudessa.

Vertaamme seuraavassa fissioräjähteiden käyttökustannuksia tavanomaisen tykistötulen ja lentopommituksen aiheuttamiin esimerkin valossa.

Tiiviissä puolustuksessa (kaistan leveys 2 km) oleva pataljoona on kaivautunut, mutta poterot ovat katteettomia. Hyökkääjän päämääränä on aiheuttaa tulivalmistelulla 50 %:n tappiot puolustajalle.

Edellyttäen, että osua saadaan suunnilleen haluttuun pisteeseen, päästään ko vaikutukseen yhdellä 20 kt:n fissioammuksella tai pommeilla, joten kustannukset olisivat 80—100 milj mk. Tykistön 155 mm:n kranaatteja kuluu vastaavan tehtävän suorittamiseen 5.000 kpl, jos käytetään edullisinta tulta, ilmaräjähdyksiä. Kustannukset ovat noin 125 milj mk. Ydinaseen käyttö on siis taloudellisempaa puhumattaan niistä taktillisista eduista, joita mm lyhyt tulivalmistelu-aika ja vähäinen a-tarvikkeiden paino (a-tarvikkeiden painojen suhde 1: 9000) tuovat mukanaan.

Jos puolustuksessa oleva patl on katetuissa, sirpaleen kestävässä poteroissa, tarvitaan tykistön kranaatteja 5-kertainen määrä, mutta yksi 20 kt:n ydinammus riittää edelleen. Kustannuksien suhde ydinaseen eduksi on 1: 6—7.

Verrattaessa kustannuksia tavanomaisia lentopommeja ja ydinpommeja käytettäessä päädytään edellisen esimerkin tapauksessa kustannusten suhdeluukuun 1: 10 ydinaseiden eduksi.

Jos maali on pieni, esim yksi ha, tulee tietenkin tavanomaisten kranaattien käyttö taloudellisemmaksi, koska ydinaseen tehosta suuri osa jäisi käyttämättä hyväksi.

## B LÄMPÖDINRAJÄHTEET

Lämpöydinräjähdeiden kustannuksiin sisältyvät kaikki fissioräjähdeiden kustannukset. Lisäksi tulevat mm fuusioräjähdyksineen, litiumdeuteridin, hinta, joka suurtuotannossa on 280.000—350.000 mk/kg, sekä yleensä useita tonneja painavan puskurikerroksen aiheuttamat kustannukset. Litiumdeuteridin määrä lienee pienimmissäkin räjähteissä muutamia satoja kiloja.

Luonnonuraani maksaa noin 35.000 mk/kg, lyijy yli 1.000 mk/kg. Jäteuraani on toistaiseksi erittäin halpaa, mutta sen hinta saattaa kohota, kun sitä ruvetaan käyttämään hyötöreaktoreissa plutoniumin valmistukseen. Luonnonuraanista valmistetun, 5 tonnia painavan puskurikerroksen hinta on noin 175 milj mk.

Mitä suuremmaksi pommi tehdään, sitä halvemmaksi tulee energia-yksikköä kohti laskettu hinta. Em perustein voidaan aivan karkeasti arvioida, että esim 10 mt:n fuusiopommin hinta on 10 kertaa yksikköpommin (20 kt) hinta, kun taas räjähdysenergiain suhde on 500:1. Kun vastaavasti tuhoalueiden suhde on 60:1, niin tuhoamiskustannusten suhde pinta-alayksikköä kohti on 1:6 fuusiopommin hyväksi. Lentopommitus kemiallista räjähdysainetta sisältäviä pommeja käyttämällä maksaisi sen mukaan 60 kertaa niin paljon kuin lämpöydinräjähdettä käyttämällä.

## V TIIVISTELMÄ

Ydintaisteluväline on erittäin joustava ja monipuolinen ase. Räjähdysenergia samoin kuin paino ja koko vaihtelevat suuresti, joten kutaakin taktillista tai strategista tehtävää varten voidaan valita halutun tehoinen ase. Ydinräjähdeiden eräitä vaikutuksia voidaan myös muuttaa muuttamalla niiden rakennetta ja käyttämällä erilaisia räjähdyskorkeuksia.

Viimeaikainen kehittämistyö on kohdistunut erityisesti pieniin taktillisiin sekä voimakkaisiin lämpöydinräjähteisiin. Radioaktiivisten jälkivaikutusten lieventämiseksi on lämpöydinräjähdeiden fissioituvan puskurikerroksen määrää vähennetty tai se on korvattu kokonaan muulla aineella (samalla fuusioräjähdyksineen lisäten), niin että radioaktiiviset vaikutukset lienevät enää vain pieni osa aikaisemmista. Täten

lämpöydintaisteluvälineiden käyttöä rajoittavat tekijät ovat ratkaisevasti vähentyneet.

Fuusioräjähdyksineen, litiumdeuteridin, käyttö lisäaineena myös fissioräjähteissä näyttää yleistyvän, koska se on halvempaa kuin plutonium ja painoyksikköä kohti laskettuna tehokkaampaa. Lisäksi siitä aiheutuvat radiologiset haitat ovat erittäin vähäiset.

Ydinasevarastot ja tuotantokyky ovat huomattavan suuret. Eniten lienee varastoissa keskiraskaita (20—200 kt) fissiopommeja. Tämän hetken tuotannossa lienevät etusijalla kevyet taktilliset ja lämpöydintaisteluvälineet.

Raaka-ainetta on ainakin toistaiseksi riittävästi saatavissa, joskin haittana on se, että osalla malmeista on pieni hyötyainepitoisuus.

Tuotantokustannukset ovat jo niin alhaiset, että laaja-alaisten maalien tuhoaminen on huomattavasti taloudellisempaa ydinräjähdysainetta kuin kemiallista käyttämällä. Alhaisten kustannusten ansiosta voivat muutkin kuin suurvallat ryhtyä valmistamaan ydintaisteluvälineitä.

Ydinaseiden taktillinen käyttö on mahdollista kaikkialla, missä pyritään vaikkapa vain paikallisiin ratkaisuihin. Niiden käyttömahdollisuudet strategisena tuhovälineenä ovat lisääntyneet niin nopeasti, että puolustus on joutunut vaikeaan kriisiin.

Lähitulevaisuuden teknillisiin kehittämissuunnitelmiin sisältyvät mm

- entistä pienikaliiperisemmat ammukset,
- mahdollisimman ”puhtaat” lämpöydinräjähteet,
- lämpöydinkärkisen kauko-ohjuksen aikaansaaminen ja
- tuotantokustannusten alentaminen.

Tapahtuneesta kehityksestä huolimatta ydinaseet voivat vain osittain korvata tavanomaiset aseet, joiden merkitys tuskin on entisestään vähentynyt. Ydinaseiden runsaastakin käytöstä huolimatta taistelussa jää näet tavanomaisten aseiden osalle pakostakin monia erikoistehtäviä ja lisäksi on pidettävä aina mielessä se mahdollisuus, että ydinaseiden pelottava teho voi johtaa niiden käytön kieltämiseen tulevassa sodassa, kuten oli taistelukaasujen laita II maailmansodassa.