

Arh. hig. rada 7 (1956) 344

O ZAŠTITI OD ZRAČENJA

VALERIJA PAIĆ

*Fizički institut Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Zagreb
i Institut »Ruđer Bošković«, Zagreb*

(Primljeno 17. XI. 1956.)

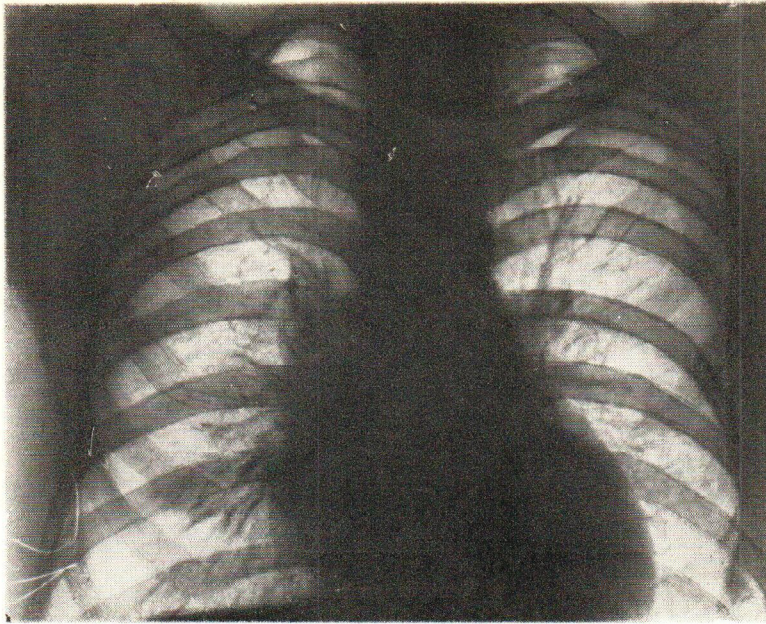
Izgradnja ciklotrona u Institutu »Ruđer Bošković« (Zagreb) i prvog jugoslavenskog reaktora u Vinči te naučna djelatnost triju nuklearnih instituta iziskuje, da se već sada upoznaju opasnosti, kojima su izvrnute osobe, koje rade sa zračenjem, koje ionizira.

Nakon kratkog pregleda nekih nezgoda, koje su se zbile, otkad su otkrivene X i gama zrake, navode se oštećenja nastala zračenjem, koje ionizira, bilo da mu je izvor izvan organizma ili u njemu. Spomenute su opće mjere zaštite od vanjskog zračenja i protiv uvođenja u organizam radioaktivnih tvari, te mjere opreznosti u nekim posebnim slučajevima. Dva pitanja, dekontaminacija i dispozicija otpadaka smatrana su kao osobito važna i potanko su obrađena. Navedene su dopuštene doze za sveukupno ozračivanje i dopuštene količine radioaktivnih tvari u zraku i vodi. Ukazuje se na vjerojatne posljedice jakih i kratkotrajnih doza zračenja X ili gama na zdravlje čovjeka. Upozoruje se na potrebu izobrazbe osoba, koje su izložene zračenju koje ionizira. Uz fizičke mjere zaštite potrebna je i liječnička kontrola, koja daje dragocjene podatke o djelotvornosti zaštite.

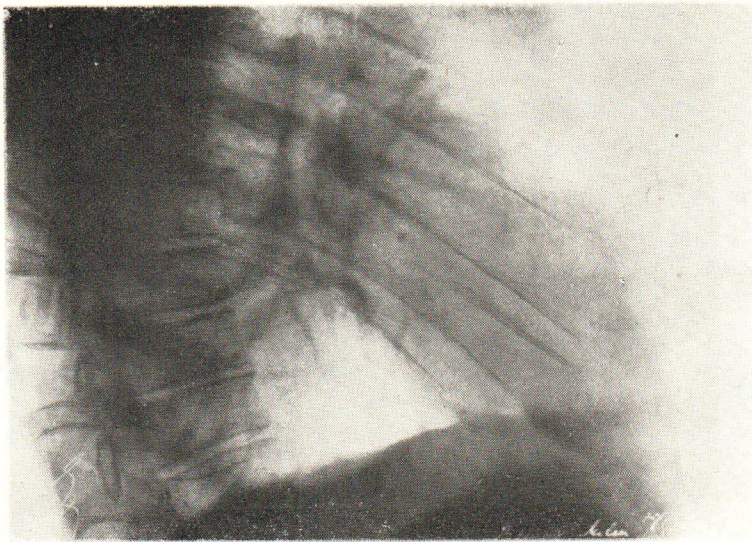
Uvod

Pod utjecajem triju nuklearnih instituta: Instituta »Boris Kidrič« u Vinči, Instituta »Jožef Štefan« u Ljubljani i Instituta »Ruđer Bošković« u Zagrebu, upotreba radioaktivnih tvari u nauci i primjeni znatno će se kod nas povećati. Tome će osobito pridonijeti rad ciklotrona u Institutu »Ruđer Bošković« i prvog jugoslavenskog reaktora u Vinči. Time će se broj osoba izvrnutih zračenju znatno povećati, pa će biti potrebno poznavati opasnosti, koje su s time vezane i način, kako da se one predusretnu.

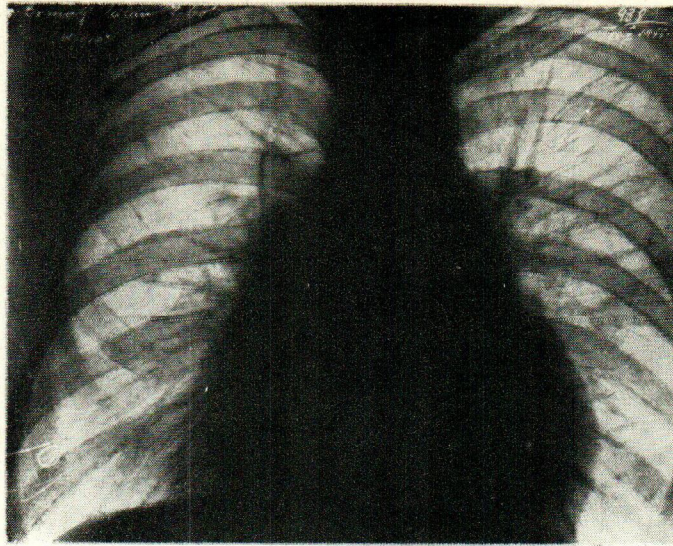
1. *Historijski pregled.* Da pokažemo važnost zaštite od zračenja, dat ćemo najprije kratak historijski pregled nezgoda, koje su se dogodile, otkad su otkrivene rentgenske ili X zrake, a zatim ćemo govoriti o dosad poznatim povredama uzrokovanim zračenjem koje ionizira.



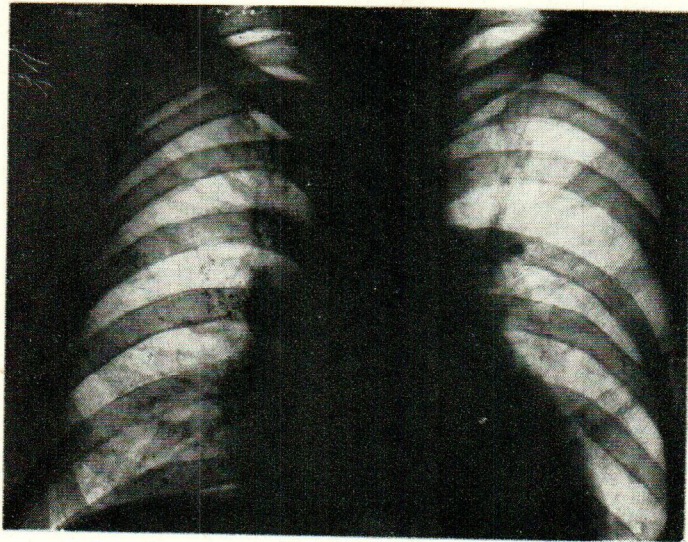
Rentgenogram 1.



Rentgenogram 2.



Rentgenogram 3.



Rentgenogram 4.

Nekoliko mjeseci nakon što je Röntgen 1895. godine otkrio X zrake, Američanin E. H. Grubbe proučavajući fluorescenciju nekih kemijskih tvari pomoću Crookesove cijevi dobio je, pošto je nekoliko dana bio izložen zračenju te cijevi, jaki dermatitis na rukama. Otkriće prirodne radioaktivnosti po Becquerelu 1896. i polonija i radija po Marie i Pierre Curieu 1898. godine potaknulo je njemačke istraživače Walkhoffa i Giesela da proučavaju 1900. godine fiziološki utjecaj toga novog zračenja, u ono vrijeme nazvanog Becquerelove zrake. Pierre Curie činio je na svojoj vlastitoj ruci pokuse sa zračenjem radija: nastala je povreda, kojoj je evoluciju promatrao velikom pažnjom. Marie Curie nosila je uza se u zataljenoj cjevčici i metalnoj kutijici nekoliko stotina miligrama jako radioaktivne tvari: nastala je slična povreda, ovaj puta uzrokovana nehotice. Godine 1901. Becquerel je zadobio površinsku opeklinu kože, koja se pretvorila u otvorenu ranu, što je zarašla nakon dužeg vremena.

Ova se nezgoda dogodila Becquerelu zato, što je šest dana nosio u džepu svog prsluka staklenu bočicu, u kojoj je bilo barijeva klorida, koji je sadržavao znatne količine radija.

Opasnost rentgenijskih zraka i zračenja, što ga odašilju radioaktivne tvari, bila je dakle vrlo rano poznata. Usprkos tome broj nezgoda među istraživačima, radiolozima, liječnicima, a vjerojatno i bolesnicima se neprestano povećavao.

Tek od 1920. godine dalje različne zemlje uvode propise, koji određuju mjere opreza i zaštite. Otad se stanje popravilo. Koliko je javno mišljenje bilo uzbuđeno velikim brojem žrtava novootkrivenog zračenja, pokazuje spomenik podignut 1936. godine u Hamburgu, koji nosi natpis: »Rentgenolozima i radiolozima svih naroda, koji su dali svoj život u borbi protiv bolesti čovječanstva«. (3) U spomeniku je uklesano stošezdeset i devet imena ljudi, koji potječu iz petnaest zemalja. Sve nezgode, koje smo spomenuli, bile su uzrokovane zračenjem, koje je dolazilo izvana.

Prvi slučajevi nezgoda uzrokovanih udisavanjem ili gutanjem radioaktivnih tvari navedeni su u statistikama Sjedinjenih Država i Velike Britanije, a odnose se na radij i mezotorij upotrebljavan za vrijeme Prvoga svjetskog rata u industriji luminiscentnih broččanika. Radnice, koje su pisale brojke na kazalima satova, imale su običaj da zašilje među usnicama kistić, koji im je u tu svrhu služio. Na taj način, malo pomalo, one su unosile u svoj organizam radioaktivne tvari. Osim toga bile su izložene radioaktivnoj prašini. Dvadeset takvih radnica umrlo je između 1918. i 1930. godine.

Velika Britanija donijela je 1942. godine posebne odredbe o radu s luminiscentnim tvarima. Otad se u literaturi više ne pojavljuju slučajevi teških ozljeda ili smrti. Na svaki način vidi se, da su skupo plaćena iskustva pionira na polju izučavanja i primjene zračenja koje ionizira bila dragocjena, kad je trebalo raditi s umjetnom radioaktivnošću, dakle i proizvodnjom atomske energije.

Komisija za atomsku energiju Sjedinjenih Država objavila je u veljači 1955. godine, da je od 1942. godine, obuhvativši čitav program nuklearne energije, bilo svega 2 smrtna slučaja i 17 povreda uzrokovanih zračenjem. Većina tih slučajeva odnosi se međutim na prve godine rada. Od 1952. godine nije javljen ni jedan slučaj nezgoda uzrokovanih zračenjem.

S druge pak strane, u Velikoj Britaniji, prema jednom izvještaju iz Harwella, program nuklearne energije imao je samo jednu žrtvu, i ta je – pala s ljestava.

2. *Povrede uzrokovane zračenjem koje ionizira.* Dosad smo spomenuli samo X i gama zrake, koje su elektromagnetske naravi. Ali u zračenje koje ionizira pripadaju i alfa i beta zrake, te neutroni. Što razumijevamo pod pojmom zračenja koje ionizira? To je zračenje, koje posredno ili neposredno izbija iz atoma elektrone i na taj način stvara parove iona: pozitivno nabijeni preostali atom ili pozitivni ion, i iz-

bijeni elektron, koji se može spojiti s neutralnim atomom i dati negativni ion. Izbijeni elektroni mogu opet ionizirati atome, koje susreću na svome putu.

Ne ćemo ulaziti u mehanizam štetnog djelovanja zračenja, koje ionizira, na tkivo: ograničit ćemo se samo na činjenice. Sa stajališta zaštite od zračenja treba razlikovati povrede uzrokovane vanjskim zračenjem i povrede uzrokovane zračenjem, kojemu se izvor nalazi u unutrašnjosti živog organizma.

Izvor zračenja je izvan organizma. Kakve povrede nastaju vanjskim zračenjem? Elektromagnetsko zračenje, dakle X i gama zrake, djeluje na isti način: ono ima veliku moć prodiranja i može dosegnuti hematopoetske organe i uzrokovati smetnje u hematopoezi. Rezultat može biti smanjenje broja crvenih krvnih tjelešaca i bijelih polimorfno nuklearnih krvnih tjelešaca. Budući da bijela krvna tjelešca vrše borbu protiv bakterijske infekcije, dolazi do smanjenja otpornosti protiv infekcije. Broj krvnih pločica se također smanjuje, a to može uzrokovati unutarnja krvarenja.

Limfatična tkiva su također vrlo osjetljiva na zračenje koje ionizira, pa prejakozračenje dovodi do smanjenja limfocita.

Koža, osobito kad je izložena X-zrakama, može pokazati teške povrede. Evo simptoma, koji se u tim prilikama pojavljuju: koža postaje najprije crvena, zatim sjajna, osjetljiva, suha i napeta, da konačno izgubi svoje brazde. Nakon toga se pojavljuju mjehurići ili bradavice ili karcinomatozne rane, koje teško zacjeljuju.

Dalje ozljede, koje se pojavljuju na koži, jesu radiodermatitis, pigmentacija, gubitak otisaka prstiju, stvaranja područja hiperkeratoze i nestajanja dlačica.

Može doći i do opeklina rožnice oka i do katarakte. Ozračivanje jakim dozama zračenja ili dugotrajno izvrgavanje zračenju organa za reprodukciju može dovesti do poremećaja rada žlijezda, koji se može ispoljiti u smetnjama kod plodnosti, koje mogu doseći povremenu ili definitivnu sterilnost.

Utjecaj na potomstvo još nije u potpunosti poznat, iako su u mnogim zemljama poduzeta opsežna ispitivanja na tom području. Proučava se genetika bilo kraljevnjaka, bilo insekata, ili biljaka. Pokusi na ljudima se dakako ne vrše, no posebne grupe stručnjaka proučavaju razvoj stanovništva u gradovima Hirošima i Nagasaki, koji su stradali od eksplozije atomskih bomba. Mutacijom gena i kromosoma u ćelijama organa za rasplod uzrokovanom zračenjem nasljedna svojstva prenose se daljim generacijama. (5) Tako nastale genetske promjene mogu biti dominantne i uzrokovati promjene već u prvoj generaciji, ili – budući da su posljedice zračenja obično recesivne – izbiti tek u kasnijim generacijama, kad se sastanu oba promijenjena gena, koji dolaze od mužjaka i ženke. Prema mišljenju genetičara »mutacije uzrokovane zračenjem nisu samo ireverzibilno i gotovo stopostotno morbidne, već su i kumulativne i za individuum i od generacije do generacije, budući da su proporcionalne sveukupnoj količini primljenog zračenja«. (1) S vremenom pokazat će se genetske posljedice zračenja, kojemu je bilo izloženo pučanstvo Hirošime i Nagasakija, no već se sada neki liječnici protive velikim dozama zračenja u terapijske svrhe, baš zbog genetskih opasnosti.

Beta zrake uzrokuju na koži opekline, koje teško zacjeljuju, a mjesto ostaje osjetljivo za svako novo izlaganje zračenju. Slično kao i X i gama zrake, i beta zrake uzrokuju radio-dermatitis, suhu kožu, pucanje i ljuštenje nokata i kože, bradavice pa i, nakon prevelike ekspozicije, karcinom kože. Na očima se javlja upala konjunktive, a može doći i do katarakte.

Alfa čestice prodiru mnogo manje duboko nego beta čestice, pa ne uzrokuju nikakvih ozljeda kože tako dugo, dok se radi o alfa česticama, koje odašilju radioaktivni elementi i kojima energija ne prelazi 9 MeV a. U ciklotronu i drugim akceleratorima alfa čestica ili protona i deuteronu energija čestica može iznositi više stotina MeV-a, pa te čestice prodiru dublje u materiju. Zanimljivo je, da nije poznat nijedan slučaj ozljeda s takvim zračenjem, jer je zaštita oko tih uređaja vrlo dobra.

Neutroni ne ioniziraju direktno atome, kroz koje prolaze. Oni svoju energiju, ako su brzi, predaju protonima, a pomoću nuklearnih reakcija uzrokuju odašiljanje gama zraka, a ponekad i alfa i beta zraka. Ozljede uzrokovane neutronima su dakle iste kao i ozljede, koje nastaju, kad djeluju pojedine vrste zračenja, koje smo spomenuli, ili sve vrste – alfa, protoni, beta i gama – u isto vrijeme. Takvih nezgoda bilo je često među osobljem, koje je radilo u Sjedinjenim Državama Amerike s ciklotronima, i tu se pokazala velika opasnost od katarakte.

Izvor zračenja je u organizmu. Radio-ozljede uzrokovane unutarnjim zračenjem dolaze od udisavanja, gutanja ili upijanja kroz kožu radioaktivnih tvari. Radi se najčešće o prašinama, parama ili plinovima, koji su radio-aktivni, a njihovo ulaženje u organizam može biti olakšano ranama na koži. Unutarnje zračenje je to opasnije, što ne prestaje nakon rada. Vanjsko ozračivanje traje najviše osam sati na dan, a trajanje unutarnjeg zračenja zavisi mnogo o vremenu polovičnog raspada radio-aktivne tvari. Treba dodati, da radioaktivni elementi nisu samo opasni zbog svojeg zračenja; oni mogu biti opasni i zbog svoje kemijske otrovnosti. Međutim, najčešće je opasnost od radioaktivnosti mnogo veća, negoli opasnost od otrovnosti. Mjere opreza usmjerene su dakle protiv zračenja; one su dovoljne da zaštite i od otrovnosti.

Pogledajmo, kakve ozljede mogu nastati zbog unutarnjeg ozračivanja. Što se tiče gama zraka, ozljede su u načelu jednake kao one, što ih uzrokuje vanjsko ozračivanje. Alfa zrake uzrokuju međutim u unutrašnjosti, u svakom obujmu vrlo jaku ionizaciju, koja povećava vjerojatnost razvitka malignih tumora, koji se mogu pojaviti tek nakon 10 ili 20 godina. Rak na plućima može se razviti nakon udisavanja tvari, koje odašilju alfa zrake. Radij, plutonij ili polonij smatraju se najopasnijim alfa-odašiljačima. Radij, koji ima trajanje poluraspada od 1620 godina, taloži se u kostima i njegove alfa čestice bombardiraju moždinu. Budući da moždina igra važnu ulogu pri stvaranju crvenih kao i bijelih krvnih tjelešaca, to dovodi do anemije i do smanjenja

otpornosti prema infekciji. Vrlo teške nezgode, koje su se zbile u radionicama luminiscentnih brojčanika pokazale su, da bombardiranje alfa-česticama može ozlijediti osteoblaste, pa i samu strukturu kosti. Sve su, naime, radnice oboljele od radioosteitisa ili od osteogenog sarkoma.

Te ozljede, karakteristične za alfa zrake mogu biti uzrokovane i beta zrakama, ako je pogođen isti organ. Stroncij 90, na primjer, koji se taloži u koštanom tkivu, daje ozljede, koje su slične ozljedama uzrokovanim radijem. Vidimo, dakle, da organi, ozračeni alfa ili beta zračenjem pokazuju iste ozljede. To vrijedi i za krv.

Stupanj povrede zavisi od kemijskih svojstava radioaktivnih tvari, od njihove topljivosti i adsorpcije, od trajanja poluraspada, od izlučivanja iz organizma, od njihove količine i, ako se radi o prašini, od veličine čestica.

3. *Posljedice kratkotrajnog ozračivanja X ili gama zrakama.* Pitat ćemo se sada, kad ćemo vidjeti pojavljivanja tih ozljeda kod čovjeka. Američka komisija za atomsku energiju objavila je 1950. godine tablicu, koja pokazuje vjerojatne posljedice, osim genetskih, za čovjeka, koji je pretrpio na čitavom tijelu, kratkotrajno – najviše jedan dan – ali jako ozračivanje X ili gama zrakama.

Iz te se tablice razabire ovo:

između 0 i 25 rentgena nema vidljivih ozljeda;

između 25 i 50 rentgena moguće su hematološke promjene, no bez znatnih povreda;

između 50 i 100 rentgena dolazi do promjene tjelešaca u krvi, znakovna povreda, nemoć se ne pojavljuje;

između 100 i 200 rentgena dolazi do povreda i moguća je nemoć;

između 200 i 400 rentgena sigurne su povrede i nemoćnost, a treba se bojati i fatalnog ishoda;

kod 400 rentgena razvoj ozljeda je fatalan u 50 posto slučajeva;

kod 600 rentgena i više razvoj ozljeda je fatalan u 100 posto slučajeva.

Vidjet ćemo kasnije, koje su količine zračenja dopuštene za osobe izvrnute zračenju. One su vrlo male, budući da ozračivanje može trajati za čitavo vrijeme u radu aktivnog života.

4. *Mjere opreza.* Došli smo sada do pitanja, koje nas najviše zanima: kako da se zaštitimo od zračenja, koje ionizira?

Tu treba razlikovati dva različna slučaja: zaštita od zračenja, kojemu je izvor izvan tijela, i zračenja, kojemu je izvor u samom tijelu. U prvom slučaju treba se zaštititi protiv vanjskog zračenja, a u drugom slučaju treba se čuvati unošenja radioaktivnih tvari u tijelo.

Promatrat ćemo najprije zaštitu od vanjskog zračenja. Sasvim općenito, za zaštitu od takvog zračenja postoje dvije mogućnosti: udaljenost i oklop. Udaljenost od izvora je vrlo djelotvorna, pa radnik mora biti koliko je god moguće dalje od izvora zračenja. Što se tiče oklopa

on mora biti što bliže izvoru, da se smanji površina, koju treba zaštititi. Debljina oklopa ide od nule, tamo gdje je udaljenost dovoljna zaštita, do katkad znatnih debljina betona ili olova. Oklop može biti stalan, na primjer u radiografskim ili gamagrafskim laboratorijima, načinjen iz opeka, betona ili olova, može biti prijenosan ili pokretan, posude za odlaganje ili povremni zidovi iz blokova olova. Evo najvažnijih tvari, iz kojih su načinjeni oklopi. Od X i gama zraka zaštićuje se, već prema njihovoj energiji, pomoću olovnog ili betonskog oklopa pogodne debljine. Za alfa zrake dovoljan je tanki sloj tvari, na primjer stakla ili debelog papira. Beta zrake zaustavljene su zastorima iz plastične mase ili metala od nekoliko milimetara debljine. Da se zaustave brzi neutroni potreban je oklop od tvari, koja sadržava vodika, ili općenito relativno lakih atoma, kao što su voda, parafin ili beton. Da se apsorbiraju termički neutroni potrebno je upotrebiti bor ili kadmij. Konačno, da se apsorbiraju alfa zrake nastale reakcijom bora i neutrona, upotrebljava se voda, a da se apsorbiraju gama zrake nastale reakcijom neutrona s kadmijem, upotrebljava se olovo.

Zaštita protiv unošenja radioaktivnih tvari u organizam uvijek je potrebna, kad se radi s radioaktivnim tvarima, koje se ne nalaze u hermetiski zatvorenim ampulama. Ta zaštita iziskuje prikladno uređene prostorije, snabdjevne sistemom ventilacije. Radna disciplina u takvim prostorijama mora biti vrlo čvrsta. U njima se ne smije jesti, piti, pušiti ili služiti se kozmetičkim sredstvima, treba nositi zaštitna odijela i stalno nadzirati nivo zračenja.

Općim mjerama treba dodati još i ove. Potrebno je široko predvidjeti slobodnu površinu podova, da se može iskoristiti faktor udaljenosti, izbjegavati podrumске prostorije, osim ako su snabdjevne posebnim uređajima za klimatizaciju, i predvidjeti dobru prirodnu i umjetnu rasvjetu, dovod svježeg zraka u radioaktivnim laboratorijima, staviti rentgensku cijev tako, da se zračenje širi samo u određenim smjerovima, tražiti opreznost i čistoću sviju, koji rade s radioaktivnim tvarima bez zaštitne ampule; razmjestiti, gdje je potrebno, pladnjeve, u koje se stavljaju instrumenti i posude, odstraniti ili čistiti odmah svaku tvar, koja se rasula, uhvatiti vodu, koja je služila za ispiranje, u posebne posude; pokriti radne stolove papirom za filtriranje ili bituminiranim papirom ili polivinilom, koji se mogu baciti; nositi kirurške rukavice iz tankog kaučuka ili iz polivinila; oprati rukavice, prije nego se skinu i oprati ruke nakon toga; nositi ogrtače, koji se zatvaraju na leđima, a najbolje bez džepova; te ogrtače ne treba donositi u neaktivne prostorije, već ih treba odložiti u garderobu određenu za tu svrhu, a koja se nalazi u blizini laboratorija; predvidjeti umivaonik i tuševe. Tragovi onečišćenja radioaktivnim tvarima slično će se moći odstraniti pranjem vrućom vodom i sapunom, trljajući blago no metodički onečišćena mjesta; u nekim slučajevima, kad je takvo čišćenje nedovoljno, može se na onečišćena mjesta staviti pasta od titanova

dioksida, ili se mogu oprati zasićenom otopinom kalijeva permangana i nakon toga isprati 5%-otopinom natrijeva bisulfita; radne prostorije treba prati ili čistiti pomoću aspiratora.

U okviru općih mjera preporučuje se, da se zračenju ne izlaže mladež ispod 18 godina, te da se u najvećoj mjeri zaštite žene u drugom stanju zbog osobito velike osjetljivosti ljudskog embriona na zračenje. Što se tiče radnog vremena osoblja, koje je neprestano izloženo zračenju koje ionizira, Internacionalni biro rada preporučuje pet radnih dana u tjednu sa tridesetpet radnih sati, sa najmanje četiri tjedna godišnjeg odmora, uzetog bez prekida. Osim toga preporučuje se, da se nakon petnaest mjeseci rada sa zračenjem najmanje tri mjeseca radi na nekom drugom mjestu, na kojem nema nikakve opasnosti od zračenja. Međutim, mišljenja o trajanju radnog vremena razlikuju se znatno u pojedinim zemljama. Navest ćemo kao kuriosum, da je Brazilija propisala maksimalno radno vrijeme od dvadeset i četiri sata na tjedan, te da daje odmor od dvadeset dana svakih šest mjeseci, dok Velika Britanija predlaže radno vrijeme od četrdeset i osam sati na tjedan.

Što da se čini, ako je maksimalna dopuštena količina zračenja, koju jedan radnik u tjedan dana smije primiti, premašena? U tom slučaju treba odrediti srednju količinu zračenja na tjedan primljenu kroz trinaest posljednjih tjedana, od kojih je posljednji onaj, u kojem je došlo do premašenja količina zračenja: ako taj srednjak prelazi maksimalnu dopuštenu količinu zračenja, radnik mora biti stavljen pod liječničku kontrolu, a za određeno kompenzirajuće razdoblje ozračivanje mora biti znatno smanjeno.

Da se i dalje poveća sigurnost osoblja, postoji čitav niz uređaja za manipuliranje. Ja ću spomenuti samo neke od njih. Ponajprije su to obična kliješta ili pinceta, zatim kliješta, često iz čelika koji ne rda, kojima dužina može iznositi više desetaka centimetara, providena štikaljkama, koje se mogu izmijeniti, obložene gumom i pokretane polugama i drugim uređajima, pričvršćenim na kraju drška.

Postoje oklopljene posude, koje mogu vagati do jedne tone, montirane na kolica i tako upravljane pomoću pneumatskih uređaja ili pomoću čeličnih užeta. Takve posude upotrebljavaju se u industrijskoj gamagrafiji, gdje se radi s vrlo jakim izvorima.

Budući da je strogo zabranjeno staviti u usta pipetu, koja sadržava aktivnu otopinu, treba se služiti pipetama na stap, kad se radi o tome da treba pipetirati radioaktivne otopine. Obično se upotrebljavaju pipete, kojima se upravlja na daljinu, iza zaklona od olova. Postoje osim toga uređaji za filtriranje, taloženje i titriranje radioaktivnih otopina. Napokon se u atomskim centralama upotrebljavaju roboti, kojima se upravlja na daljinu, kao i raznovrsni automatski i telekomandni uređaji.

Osim općih mjera opreza u mnogim slučajevima potrebne su i posebne mjere opreza. Tako na primjer mnoge industrije kontroliraju dijelove koji dolaze iz ljevaonica i svarove, pomoću X-zraka, fluoroskopijom ili radiografijom, kao i gamagrafijom pomoću izotopa kao što su kobalt 60, iridij 192, tantal 182, cezij 137 ili tulij 170. Tekstilna industrija otklanja statičke električne naboje pomoću radioizotopa, a neke druge industrije služe se zračenjem iz radioaktivnih izvora za mjerenje debljine. To su obično odašiljači beta zraka. Industrija luminescentnih boja upotrebljava radioaktivne elemente s vrlo dugim vremenom poluraspada, pa je tamo rad osobito opasan.

I bolnice imaju svoje posebne probleme. Prema izvještaju Britanske kraljevske bolnice za rak medicinsko osoblje, koje radi s radioaktivnim uređajima, pače i u slučajevima kad se radi o naponima od 2 MeV ili čak 20 MeV, prima manje doze, nego osoblje, koje radi s velikim količinama izvora slabe aktivnosti.

Poljoprivreda, centri atomske energije, laboratoriji za radiokemiju traže posebne mjere opreza, koje treba prilagoditi svakom pojedinom slučaju.

Navest ćemo samo neke mjere opreza za centre atomske energije i laboratorije za radiokemiju, jer se dosta razlikuju od onoga, što smo dosad naveli. Na primjer, kad se mora raditi u prostoru, u kojem ima radioaktivne prašine, što se zbiva kod demontiranja reaktora, radnici imaju oko sebe zaštitno odijelo iz plastične mase, koje ih potpuno opkoljuje od glave do pete, a naduto je svježim zrakom. To je slično oklopu ronioca.

U centrima atomske energije i u laboratorijima radiokemije uređaji za prozračivanje izbacuju radioaktivnu prašinu, koja se može taložiti u blizini laboratorija. Zato svi atomski centri imaju vrlo visoke dimnjake, kroz koje se radioaktivnim česticama onečišćen zrak raspršuje visoko iznad tla.

U radiokemijskim laboratorijima zamjenjuju se radni stolovi digestorima i staklenim ormarima u kojima su ugrađene rukavice, tako da se može unutra raditi. U tim ormarima nalaze se i uređaji za sisanje i filtriranje.

Potrebno je također predvidjeti safe, obložen olovom, za pohranu radioaktivnih izvora. Zaštita je pojačana, ako se svaki izvor opkoli olovom.

Problemi dekontaminacije i evakuacije otpadaka i radioaktivnih ostataka su također vrlo važni.

5. *Dekontaminacija.* O dekontaminaciji teško je dati opća pravila, jer se metode dekontaminacije znatno razlikuju već prema površini, koju treba očistiti (2).

Površine drva i betona osobito se teško dekontaminiraju, pa treba izbjegavati njihovu upotrebu. Mogu se prati smjesom solne i dušične kiseline, no najčešće će biti potrebno izmijeniti čitavu površinu. Staklo

i porculan mogu se čistiti anorganskim kiselinama, amonijevim nitratom, natrijevim fosfatom. Dekontaminacija može postati vrlo teška, kad je caklina porculana popucala, ili kad se u staklenim posudama vrše isparivanja otopina do suhog ostatka.

Za dekontaminaciju metala upotrebljavaju se razrijeđene kiseline ili amonijev fluorid. Čelik, koji ne rđa, može se dekontaminirati 8N dušičnom kiselinom. Predmeti iz plastičnih masa i linoleum dekontaminiraju se pomoću amonijeva nitrata i razrijeđenih kiselina ili pomoću organskih otapala kao što su petrolej i ugljikov tetraklorid.

Za čišćenje ličenih površina preporučuje se ugljikov tetraklorid, 10% -solna kiselina, ili otopina sapuna, koja sadržava natrijeva fosfata.

Općenito uzevši, otopine koje služe za dekontaminaciju ovise o radioaktivnom elementu, kojeg se treba osloboditi. Vidjet ćemo još, da je najbolje razrijediti radioaktivni element s njegovim stalnim izotopima: za jod 131 upotrebljava se tako 56% -otopina jodne kiseline, a za fosfor 32, 3N otopina dušične i fosforne kiseline.

Evo detaljne sheme, koja pokazuje, kako treba dekontaminirati laboratorijsko suđe.

Treba rasporediti predmete prema stupnju kontaminacije i početi s onima, koji su najmanje onečišćeni. Staviti ih u veliku posudu, koja sadržava 3% -solne kiseline, 3% -dušične kiseline i 1% -citrunske kiseline. Ostaviti u kontaktu za vrijeme od jednog sata, prenijeti predmete u posudu napunjenu vodom i isprati. Uroniti predmete u otopinu kromne kiseline, ostaviti u dodiru petnaest minuta i zatim isprati vodom.

Korisno je znati, kako treba postupati, ako neka radioaktivna tekućina onečisti neku površinu. S čišćenjem treba početi što prije. Treba spriječiti, da se tekućina rasprostrani, na primjer načinivši ogradu od filter-papira; mjeriti aktivnost, odstraniti tekućinu pomoću posebnih pipeta ili filter-papira. Podržavati vlažnost površine; čistiti onečišćenu površinu dva ili tri puta pomoću sredstva za dekontaminiranje, koje treba ostaviti u dodiru s površinom tri minute. To se odstranjuje na isti način kao i radioaktivna tekućina. Trljati dvije do tri minute četkom namočenom u sredstvo za dekontaminaciju, a zatim isprati.

Postoji li unaprijed bojazan od kontaminacije, dobro je predvidjeti mjere opreza: rukavice, zaštitni ogrtač, eventualno masku.

Odiijela onečišćena radioaktivnim tvarima treba najprije podvrgnuti ispitivanju pomoću Geiger-Müllerovih brojača. U tu se svrhu odijela stavljaju na metalnu rešetku. Jedan centimetar iznad njih nalazi se Geiger-Müllerov brojač. Već prema dobivenom rezultatu razlikujemo tri vrste onečišćenja:

Prvo: beta aktivnost manja od tisuću udaraca u minuti;

Drugo: beta aktivnost veća od tisuću udaraca u minuti;

Treće: onečišćenje alfa odašiljačima.

U prvom slučaju odjevni predmeti peru se kao obično. U drugom i trećem slučaju preporučuju se različite operacije, od kojih svaka ima dvanaest zahvata, a svaki od njih traje oko pet minuta. U biti se radi o tome, da se odjevni predmeti ispiru vrućim otopinama, koje mogu sadržavati i kiseline. Upotrebljava se 6% citrunka kiselina. Ostane li aktivnost i nakon takve obrade iznad tisuću udaraca na minutu, odjevni predmeti uklone se, sve dok im se aktivnost ne smanji zbog prirodnog slabljenja. Preostane li i najmanja alfa-aktivnost, odijela moraju biti uništena ili zakopana.

6. *Evakuacija.* Dolazimo do pitanja evakuacija otpadaka i ostataka. Otpaci, koji mogu gorjeti, moraju se odijeliti od nesagorivih. Sagorivi otpaci koncentriraju se zagrijavanjem u posebnoj peći. Kutije za smeće treba isprazniti, čim doza zračenja prelazi 12,5 milirentgena na sat. Sadržaj kutije za otpatke obrađuje se prema vremenu poluraspada izotopa. Nuklidi kratkog vremena poluraspada ostave se u posebnom skladištu, sve dok im aktivnost ne postane vrlo mala, pa se onda mogu odstraniti kao obično smeće. Aktivnost po jednom tovaru trebala bi biti ograničena na 5 mikrokirija za najopasnije beta i gama odašiljače, a na 100 mikrokirija za ostale beta i gama odašiljače.

Otpaci, koji sadržavaju radionuklide, velike periode ili alfa odašiljače, dodaju se vodi, koja zatim služi za pravljenje blokova iz betona. Ti se blokovi ukopaju u dubinu od najmanje jedan i po metra u zato određeno i označeno mjesto, ili se bace u more.

Ako je to moguće, cementu se dodaju neradioaktivni izotopi onih radionuklida, kojih se treba riješiti. Na taj način aktivna komponenta razrijeđena je na malu specifičnu aktivnost.

Tekući ostaci mogu se evakuirati nakon koncentracije, nakon razrjeđenja ili nakon prirodne dezaktivacije. Tekućine koncentrirane isparivanjem ili taloženjem mogu se dodati cementu kao krutnine. Razrjeđivanje tekućih ostataka vodom je metoda, koja se najviše upotrebljava. Poznavajući dopuštene doze radioaktivnih elemenata u vodi, lako se može izračunati potrebno razrjeđenje. Ovaj način obrade ostataka nije međutim bez opasnosti, jer neki živi organizmi mogu koncentrirati u vodi vrlo razrijeđene kemijske tvari. Zna se, da planktoni mogu koncentrirati fosfor, bez obzira na to, da li je stalan ili radioaktivan, na dvije stotine hiljada veću koncentraciju, nego što je u vodi, u kojoj oni žive; alge povećavaju koncentraciju pedeset hiljada puta, ribe više od sto hiljada puta. Ova činjenica upotrebljava se pače katkada za čišćenje radioaktivnih voda. Tako se voda onečišćena plutonijem zasije bakterijama, koje gotovo potpuno vežu plutonij. Čišćenje se može poduzeti i pomoću adsorpcije na glinama i anorganskim tvarima sličnih osobina kao i pomoću smola. Osobito zanimljiva pojava zapažena je na Bikiniju, gdje su najprije alge koncentrirale produkte fisije, zatim su oni prešli u male krustaceje, koje žive na tim algama, da se konačno pojave u ribama,

koje se hrane tim krustacejama. No suprotno onome, što bi se na prvi pogled moglo očekivati, ribe su ostale jestive, jer su radioaktivni nuklidi ušli isključivo u kostur, dok ih u tkivu nije bilo.

Da se izbjegnu sve te opasnosti, tekućine, koje sadržavaju beta odašiljače relativno dugog vremena, kao što je na primjer stroncij 90, ili gama odašiljače, bacaju se u kanal, pošto su učinjeni lužnatima i razrijeđeni dodatkom neaktivnog izotopa istog elementa i u istom kemijskom obliku.

Tekućine, koje sadržavaju radionuklide kratkog vremena poluraspada, kao što su natrij 24, fosfor 32 ili jod 131, mogu se staviti u bačve, eventualno oklopljene, gdje ostaju, dok im aktivnost sama od sebe ne padne.

7. *Dopuštene doze.* Budući da je nemoguće izbjeći, da osobe, koje rade sa zračenjem, budu ozračene, pokazala se potreba, da se odrede maksimalne dopuštene doze, kojima neka osoba može biti izvrnuta bez opasnosti za svoje zdravlje (2).

Smatra se, da nije opasno, ako se udiše zrak, koji sadržava: beta ili gama odašiljača: 10^{-7} mikro c cm^{-3} ; alfa odašiljača: $3 \cdot 10^{-11}$ mikro c cm^{-3} .

U vodi se dopušta za beta i gama odašiljače: $5 \cdot 10^{-4}$ mikro c cm^{-3} , a za alfa-odašiljače 10^{-5} mikro c cm^{-3} .

Interesantno je navesti, da većina mineralnih voda sadržava radona (alfa-odašiljač) u količini reda veličine 10^{-5} mikro c.

Usporedimo li otrovnost životinjskih ili anorganskih otrova s opasnošću od radioaktivnih tvari, vidimo, da su te mnogo opasnije. Tako na primjer jedan od najjačih organskih otrova, toksin botulizma ubija čovjeka u količini od jednog mikrograma, dok je stotina mikrograma fosfora 32 u organizmu dovoljna da uzrokuje smrt. Fosfor 32 se naime taloži u kostima i tamo uzrokuje ozračivanje od više stotina rentgena, a to je fatalno.

Za ozračivanje izvana dopuštene su ove doze: 0,3 r na tjedan, za ozračivanje bilo kojeg dijela tkiva.

0,6 r na tjedan za ozračivanje kože.

Za osobe iznad četrdeset i pet godina starosti te se doze mogu dvostručiti.

1,5 r na tjedan za ozračivanje ruku i nogu.

Može se izuzetno dopustiti jedno jedino ozračenje sa 25 rentgena.

Preporuča se, da se uvede biološki koeficijent jednak jedinici za X, gama i beta zrake, 5 za termičke neutrone, a 10 za brze neutrone i alfa-zrake. Biološka efikasnost zavisi naime o gustoći iona, koja zavisi o naravi čestice i materije, kroz koju čestica prolazi.

8. *Mjerni aparati.* Zračenje, koje ionizira, ne djeluje, nažalost, ni na koji organ naših osjeta. Potrebno je stoga upotrebiti aparate, koji omogućuju mjerenje zračenja, kojemu su osobe izložene.

Ti aparati mogu mjeriti bilo efektivni intenzitet zračenja, ili integrirati doze. To su onda dozimetri.

Najuobičajeniji detektori su Geiger-Müllerovi brojači, ionizacijske komore, scintilacijski brojači, kristalni brojači i detektori neutrona.

Najčešće upotrebljavani dozimetar je mala ionizaciona komora s elektroskopom na nit iz kremenca. Taj dozimetar ima oblik nalivpera. Elektroskop se najprije nabije, a zatim se nosi u džepu. Izbijanje elektroskopa proporcionalno je primljenom zračenju. Mjerenje doze vrši se očitavanjem položaja kremene niti na skali, na kojoj su označeni milirentgeni.

I fotografski film služi u svrhe dozimetrije. Za velike doze mogu služiti i kemijski dozimetri.

9. *Općenito o službi zaštite od zračenja.* Potrebno je, da se provođenje spomenutih mjera zaštite kontrolira. A to je zadatak službe zaštite od zračenja.

Problemi, na koje služba zaštite nailazi u istraživačkom institutu, lijepo su iznijeti u članku T. C. Evansa »Mjere zaštite na univerzitetu (4): Na velikim univerzitetima zračenje može biti upotrebljeno u ovom ili onom obliku gotovo na svim poljima prirodnih nauka. No gotovo sve opasnosti (prodorno zračenje, lokalizirano ozračenje, uvođenje u organizam, udisavanje, kontaminacija, biološka koncentracija, odstranjivanje otpadaka) mogu se ostvariti i moraju se unaprijed ocijeniti. Osim toga pojavljuju se problemi, koji nastaju zbog toga, što istraživači imaju različnu izobrazbu i iskustva. Oni, općenito, pristupaju s osjećajem odgovornosti tim pitanjima i žele surađivati, no pojedini mogu naginjati tome, da zanemaruju svoju sigurnost u gorljivu nastojanju da dođu do novih spoznaja.

10. *Služba zaštite od zračenja u Institutu »Ruder Bošković«.* Organizacijska shema službe zaštite od zračenja u Institutu »Ruder Bošković« slična je shemama, koje se najčešće upotrebljavaju u inostranstvu i poseban odbor brine se za nju.

Treba razlikovati dva odjela te službe: jedan se bavi zdravljem osoba izloženih zračenju, a drugi zaštitom od zračenja u užem smislu.

Svaka osoba, prije nego li je izložena zračenju, mora se sistematski liječnički pregledati, naročito u hematološkom pogledu. Na taj način dobivaju se podaci o općem zdravstvenom stanju osobe i baza za ocjenu kasnije dobivenih krvnih slika. Osim toga može se spriječiti, da se uposle osobe, koje pokazuju anormalnosti kože, kostiju, gonada, krvi, pluća i drugih organa. Kad ti ljudi počinju raditi, u prvih tri mjeseca ponavlja se hematološki pregled svaki mjesec, a zatim svaka tri mjeseca. Za one, koji rade sa X zrakama, hematološki pregled vrši se samo svakih šest mjeseci. Klinički pregled ponavlja se svake godine. Brigu oko toga dijela službe zaštite od zračenja vode po jedan hematolog, internista, rentgenolog i okulista.

Služba zaštite od zračenja u užem smislu ima ove zadatke: utvrđivanje dnevne količine zračenja pomoću džepnih ionizacijskih komora, te pomoću radiografskih filmova, kontrola zračenja u laboratorijima pomoću brojila, kontrola baždarenja dozimetra, nadzor i savjeti nad odstranjivanjem otpadnog radioaktivnog materijala i nad dekontaminacijom, sastavljanje pravila, kojih se moraju držati osobe, koje rade na izloženim mjestima, koordinacija zdravstvenog pregleda osoba i sudjelovanje u ocjeni pojedinih slučajeva.

Završavajući ovaj prikaz, u kojem su izneseni samo neki problemi zaštite od zračenja, željeli bismo još jednom istaknuti važnost izobrazbe osoblja, koje je izvrgnuto zračenju.

Literatura

1. La protection des travailleurs contre les radiations ionisantes. (Rapport présenté à la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. Genève, août 1955).
2. Genaud, P.: La protection contre les radioéléments, 1951.
3. Spear, F. G.: Radiations and living cells, 1953.
4. Evans, Titus C.: Radiology, 65 (1955) 875.
5. Stone, Robert S.: Industrial Medicine on the Plutonium Project, 1951.

Résumé

SUR LA PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS

La construction du cyclotron à l'Institut Ruder Bošković à Zagreb et du premier réacteur yougoslave à Vinča, ainsi que l'activité scientifique des trois Instituts de science nucléaire expliquent la nécessité de bien connaître les risques auxquels sont exposés tous ceux qui travaillent avec les radiations ionisantes.

Après un bref aperçu historique des accidents survenus depuis la découverte des rayons X et gamma, on montre les lésions, dues aux radiations ionisantes soit que la source de radiation se trouve à l'extérieur ou à l'intérieur de l'organisme.

On indique les mesures générales de protection contre l'irradiation externe et contre l'absorption interne des matières radioactives et on passe ensuite aux précautions à prendre dans certains cas spéciaux.

Deux problèmes, la décontamination et l'évacuation des déchets et résidus sont considérés comme particulièrement importants et traités en détail.

On donne les doses de tolérance en irradiation générale, les doses de tolérance dans l'air et dans l'eau et on montre les conséquences probables sur l'homme d'une forte dose aiguë de rayons X ou gamma.

On insiste sur la nécessité d'enseigner sur les dangers des radiations ionisantes et sur l'utilité d'ajouter la surveillance médicale au contrôle des doses reçues et à la protection assurée par les moyens physiques.

*Institut de Physique
de la Faculté des sciences, Zagreb
et
Institut Ruder Bošković, Zagreb*

Travail reçu le 17 novembre 1955