

Radiológiai és nukleáris balesetek

(RADIATION ACCIDENTS)



Radiológiai és nukleáris balesetek

Leírás, források, mechanizmusok

A radioaktív anyagok szállítása mellett három esetben fordulhatnak elő ilyen balesetek:

- Nukleáris energia felhasználásánál az energiatermelésben, a hadászatban és a radiológiai és nukleáris kísérletekben
- A sugárforrások ipari alkalmazásában (pl. gamma-radiográfia, besugárzások)
- Radioaktív anyagok alkalmazásánál és kutatásánál a gyógyászatban (diagnózis és terápia).

A balesetek két csoportba sorolhatók: a környezetbe történt radioaktív kibocsátás vagy sem. Utóbbi esetben csak a sugárforrással foglalkozó személyzet szenvedhet el sugárdózist.

A besugárzási veszély nagysága és időtartama a lakosságra a környezetbe került sugárzó anyag mennyiségétől és a jellemzőitől (felezési idő, fizikai és kémiai tulajdonságok) függ. (táblázat). Ilyen kibocsátás történhet erőművi reaktorokból a konténmenten keresztül, ipari vagy orvosi tárolókból kiszabaduló radioaktív izotópok formájában. Környezeti kibocsátás hiányában csak a sugárforrás környezetében jelenlévő személyzet szenvedhet el besugárzást.

Táblázat Tipikus radioaktív izotópok és azok felezési ideje

Radionuclide	Symbol	Radiation emitted	Physical half-life*	Biological half-life after incorporation*
Barium-133	Ba-133	γ	10.7 y	65 d
Cerium-144	Ce-144	β, γ	284 d	263 d
Caesium-137	Cs-137	β, γ	30 y	109 d
Cobalt-60	Co-60	β, γ	5.3 y	1.6 y
Iodine-131	I-131	β, γ	8 d	7.5 d
Plutonium-239	Pu-239	α, γ	24,065 y	50 y
Polonium-210	Po-210	α	138 d	27 d
Strontium-90	Sr-90	β	29.1 y	18 y
Tritium	H-3	β	12.3y	10d

* y = years; d = days.

Radiológiai anyagok tipikus alkalmazási területeit foglalja össze a következő táblázat.

Táblázat radiológiai sugárforrások tipikus alkalmazási területei (izotóp, felezési idő)

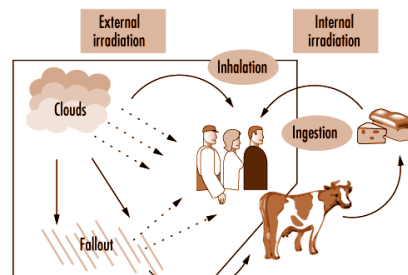
Application	Radionuclide	Half-life
1. Industrial radiography	^{60}Co	5.3 a
	^{192}Ir	74 d
	^{75}Se	120 d
	^{169}Yb	32 d
	^{170}Tm	129 d
2. Irradiators	^{60}Co	5.3 a
	^{137}Cs	30.1a
3. Industrial gauges	^{60}Co	5.3 a
	^{137}Cs	30.1 a
	^{252}Cf	2.6 a
	^{85}Kr	10.7 a
	^{241}Am	432 a
4. Well logging/moisture gauges	^{244}Cm	18.1 a
	^{137}Cs	30.1a
	^{252}Cf	2.6 a
5. RTGs	^{90}Sr	28.6 a
	^{238}Pu	87.8 a
6. Medical (Teletherapy)	^{60}Co	5.3 a
	^{137}Cs	30.1 a
7. Medical (Brachytherapy)	^{60}Co	5.3 a
	^{137}Cs	30.1 a
	^{226}Ra	1600 a
	^{192}Ir	74 d
	^{125}I	60 d
8. Nuclear medicine	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h
	^{131}I	8 d
9. Pacemakers	^{238}Pu	87.8 a
10. Research	$^{241}\text{Am-Be}$	432 a
	$^{239}\text{Pu-Be}$	24100 a

Ionizáló sugárzás révén történő besugárzás 3 úton lehetséges attól függetlenül, hogy a besugárzott emberek a személyzet tagjai vagy a lakosság:

- Külső besugárzás
- Belső besugárzás és
- Bőr, vagy seb kontamináció formájában.

Külső besugárzás történik, ha a személy egy testen kívül elhelyezkedő pontszerű (radioterápia, besugárzások), vagy kiterjedt (radioaktív felhő, kihullás) sugárforrásból szenved el besugárzást (ábra). Az elszenvedett besugárzás lehet a testen lokális (kéz, láb, szem, mellkas stb.), vagy egésztest besugárzás.

Ábra Besugárzási útvonalak baleseti radioaktív kibocsátás esetén



Belső besugárzás történik, ha a radioaktív anyag a testbe kerül belégzés, lenyelés, vagy seben keresztül. A levegőben lévő radioaktív por, köd vagy más anyag, a vízben lévő oldott, vagy szuszpendált izotópok, a táplálékláncban és az ivóvízben lévő izotópok okozhatják a belső besugárzást. Ilyen a ^{137}Cs és a ^{131}I radioaktív izotópok. A belső besugárzás érheti az egésztestet, vagy csak egyes szerveket. A ^{137}Cs általában homogén módon oszlik meg az egész testben, míg a ^{131}I a pajzsmirigyben a ^{90}Sr pedig a csontokban koncentrálódik.

Besugárzást történhet ezen kívül a radioaktív anyag érintkezésével a bőrfelülettel, vagy sebes felülettel.

Nukleáris erőművi balesetek

Atomerőművekben, kísérleti reaktorokban, fűtőelemgyártó és reprocesszáló üzemekben, kutató reaktorokban fordulhatnak elő. Katonai téren a plutónium szaporító reaktorokban és a atomhajtású hajókon és tengeralattjárókon.

Atomerőművek

A maghasadás során keletkezett hőenergiát alakítják át elektromos energiává. Fontosabb részei:

- (1) Az aktív zóna , mely tartalmazza a hasadóanyagot (nyomottvízes raktoroknál 40-120 tonna urán-oxid);
- (2) A hőhordozó közeg berendezései (gőzfejlesztő, szivattyúk, tolózárak, nyomásszabályozók) a hőhordozó közeggel;
- (3) A hőenergiát elektromos árammá átalakító berendezések (hőcserélő, gőzfejlesztő, gőzturbina, generátor, transzformátor), nem radioaktív zóna.

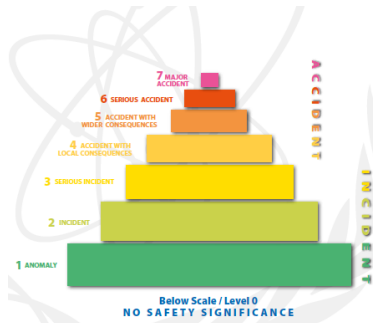
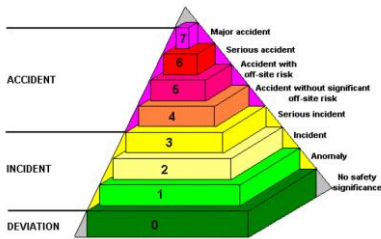
Hirtelen nagy hőenergia felszabadulása zónaolvadást eredményezhet, melynek következtében radioaktív izotópok kerülhetnek a környezetbe. Négy nagy atomerőművi baleset során került jelentősebb mennyiségű radioaktív izotóp a környezetbe: 1957-ben Windscale-ben, Angliában történt tűz, 1979-ben az USA-beli Three Mile Island atomerőműből,

1986-ban a szovjetunió-beli Csernobili atomerőműből és 2011-ben a Japáni Fukushima Daiichi-i atomerőműből.

A csernobili baleset ún. kritikussági baleset volt, melynek során néhány másodperc alatt a 4. blokk hőteljesítménye a megengedett érték 100-szorosára nőtt és gőzrobbanás majd durranógáz robbanás után 1 hétig égett a reaktorban lévő grafit töltet. A 4. blokk aktív zónája teljesen megsemmisült és óriási mennyiségű radioaktív izotóp került a levegőbe a robbanások és a tűz következtében. A 2km magasra is feljutó radioaktív por óriási területeket szennyezett el döntően az Északi-féltéken. A radioaktív felhő mozgását nehéz volt előre jelezni a gyors meteorológiai változások miatt.

The International Nuclear Event Scale (INES)

AZ INES skála



EXAMPLES OF EVENTS AT NUCLEAR FACILITIES

	People and Environment	Radiological Barriers and Control	Defence-in-Depth
7	Chernobyl, 1986 — Widespread health and environmental effects. Partial release of a significant fraction of reactor core inventory.		
6	Yamaguchi, Japan, 1987 — Significant release of radioactive material to the environment from explosion of a high activity waste tank.		
5	Windscale Pile, UK, 1957 — Release of radioactive material to the environment following a fire in a reactor core.	Three Mile Island, USA, 1979 — Severe damage to the reactor core.	
4	Tokaimura, Japan, 1999 — Fatal overexposures of workers following a criticality event at a nuclear facility.	Saint Laurent des Eaux, France, 1980 — Melting of one channel of fuel in the reactor with no release outside the site.	
3	No example available.	Sellafield, UK, 2005 — Release of high quantity of radioactive material, contained within the installation.	Vandenberg, Spain, 1989 — Near accident caused by the resulting in loss of safety systems at the nuclear power station.
2	Atucha, Argentina, 2005 — Overexposure of a worker at a power reactor exceeding the annual limit.	Cadarache, France, 1989 — Spread of contamination to an area not expected by design.	Formakk, Sweden, 2006 — Degraded safety functions for common cause failure in the emergency power supply system at nuclear power plant.
1			Breach of operating limits at a nuclear facility.

EXAMPLES OF EVENTS INVOLVING RADIATION SOURCES AND TRANSPORT

	People and Environment	Defence-in-Depth
7		
6		
5	Goiania, Brazil, 1987 — Four people died and six received doses of a few Gy from an abandoned and ruptured highly radioactive Co-60 source.	
4	Fleussus, Belgium, 2006 — Severe health effects for a worker at a commercial irradiation facility as a result of high doses of radiation.	
3	Yanango, Peru, 1989 — Incident with radiography source resulting in severe radiation burns.	Attilil, Turkey, 1989 — Loss of a highly radioactive Co-60 source.
2	USA, 2005 — Overexposure of a radiographer exceeding the annual limit for radiation workers.	France, 1995 — Failure of access control systems at accelerator facility.
1		Theft of a moisture-density gauge.

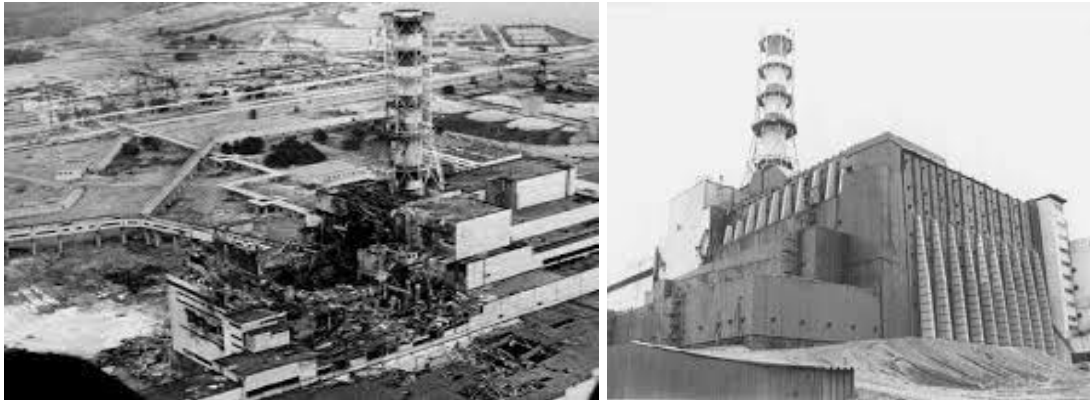
Táblázat A nemzetközi INES skála

Level	Offsite	Onsite	Protective structure
7—Major accident	Major emission, extensive health and environmental effects		
6—Serious accident	Significant emission, may necessitate the application of all counter-measures.		
5—Accident	Limited emission, may necessitate the application of some counter-measures.	Serious damage to reactors and protective structures	
4—Accident	Low emission, public exposure approaching exposure limits	Damage to reactors and protective structures, fatal exposure of workers	
3—Serious incident	Very low emission, public exposure lower than exposure limits	Serious contamination level, serious effects on workers' health	Accident barely avoided
2—Incident		Serious contamination level, over-exposure of workers	Serious failures of safety measures
1—Abnormality			Abnormality beyond normal functional limits
0—Disparity	No significance from the point of view of safety		

1986. április 26-án az ukrán csernobili forralócsöves (RBMK-1000) atomerőmű új, 4. blokkjában bekövetkezett az atomerőművek történetének addigi legsúlyosabb balesete. Az erőmű Kijevtől 100 km-re északra Pripjatj és Csernobil városok közelében helyezkedett el. Az RBMK-1000 reaktor vízhűtésű, víz és grafit moderátorú forralócsöves reaktortípus volt. Mint minden akkori szovjet reaktor, a csernobili reaktor sem rendelkezett biztonsági védőtartály épülettel, konténmenttel. A reaktortípus alapvetően konstrukciós hibával rendelkezett: a víz és a grafit jelenléte miatt alacsony teljesítményen az ún. pozitív üregtényezői hatás következtében labilis volt. Itt a teljesítmény megszabadása könnyen bekövetkezhett, ezért a reaktort tilos volt alacsony teljesítményen üzemeltetni. Ezen felül a grafit moderátor jelenléte fokozott tűzveszélyt is jelentett. A nagyon súlyos baleset fő oka az említett konstrukciós hiba volt mely rendkívül súlyos és felelőtlen emberi hibával párosult. A baleset időrendi eseményeit röviden az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- 1986. április 25-én a reaktor karbantartási szünetének kezdete előtt nem nukleáris képzettségű, külső szakemberek egy ún. turbina kifutási kísérletet kívántak megismételni. A lecsökkentett teljesítményen végzett kísérletben arra kerestek választ, hogy turbina lekapcsolást eredményező kisebb üzemzavar esetén a generátor saját tehetetlenségénél fogva még mennyi ideig forog olyan sebességgel, melyhez tartozó generált elektromos energia még meghajtja a fő keringtető szivattyúkat, a tartalék áramforrást biztosító dízel generátorok beindulása előtt. A kísérlet megkezdésére késő estig várniuk kellett, de már addig is szabálytalanul kikapcsolták a zóna vészhűtő rendszert beindító automatikát.
- Éjjel 11 óra körül hozzákezdtek a kísérlethez, melynek első lépése keretében megkezdték a teljesítmény csökkentését. Sajnos azonban a teljesítmény csökkentést nem jól vezérelték, ezért a csökkentett, de még biztonságos teljesítmény alá került a reaktor teljesítménye. Ekkor a reaktort azonnal le kellett volna állítani, de az automatikát itt is kikapcsolták és megpróbálták a szabályozó rudak fölhúzásával a teljesítményt feljebb tornáztatni. Ez azonban a közismert „jódgödör” effektus (a reaktorban felhalmozódott jóde és egyéb izotópok neutron elnyelése miatt kezdetben nehéz a teljesítményt növelni) miatt nem sikerült. Ezért az összes szabályozó rudat teljesen kihúzták a reaktorból és még a hűtővíz átáramlási sebességét is lecsökkentették.

- 1 óra 23 perckor elkezdték a kifizetési kísérletet és az egyik turbinát lekapcsolták, ennek eredményeként lassan csökkent az átáramoltatott hűtővíz mennyisége és a reaktor – mivel a labilis állapotban üzemelt – néhány másodperc alatt megszaladt. Az operátor észlve a veszélyt vészleállítást kísérelt meg, de a lefelé haladó szabályozó rudak már nem tudtak belépni a zónába a megolvadt elgörbült szerkezetek következtében. Igen rövid idő alatt 3000 MW_t teljesítmény helyett 100-szor akkora, vagyis 300 000 MW_t teljesítmény szabadult föl, mely hatalmas hőimpulzus pillanatok alatt elforralt a hűtővizet és a gőzrobbanás szétvetette a reaktort. Az izzó cirkónium, acél, beton és grafit a vízből hidrogént és szén-monoxidot fejlesztett és a második, gázrobbanás tovább rombolta a reaktort és a grafit meggyulladását okozta. A robbanások letépték a reaktor fedelét, elvitték az épület sarkát és a kiszabaduló radioaktív gázok, gőzök, valamint a grafit égésével levegőbe porlasztott illékony szilárd radioaktív anyagok közvetlenül a környezetbe kerültek. Egy részük a közelbe hullott ki, de a finomabb radioaktív por és a légnemű anyagok nagy távolságba és magasságba is eljutottak.
- Óriási emberáldozat és hősiesség árán a kisebb tüzeket hamar, a grafit tüzet kb. 1 hét alatt oltották el. Ezután a reaktor alaplemezen lévő izzó összeolvadt „láva” alá egy második vastagabb és hűthető vasbeton lemezt építettek, hogy az ún. „Kína szindróma” esetleges bekövetkezését megakadályozzák. Ezt követően egy vasbeton szerkezettel (szarkofággal) borították be a sérült reaktort. Ennek jelentős kockázati tényezője, hogy a megépített szarkofág a még épen maradt, de jelentős hő- és sugárdózist szenvedett épületszerkezetekre támaszkodik. Az a., b. ábrákon a sérült reaktor, a reaktor épület épen maradt részére támaszkodó megépített szarkofág látható.



a) A sérült reaktor, b) az épület épen maradt részére támaszkodó megépített szarkofág

- A reaktort övező 30 kilométeres körzet a kihullás következtében jelentősen elszennyeződött, ebből a zónából 135 000 embert kellett kiköltöztetni. A radioaktív porfelhő Európa majd minden országába eljutott és több-kevesebb kihullás, vagy kimosódás révén jelentős területeket szennyezett el. A kezdeti nagyobb aktivitásokban a rövidebb élettartamú jód, tellúr izotópok, néhány év elteltével a hosszabb élettartamú cézium és stroncium izotópok domináltak.

A zónaösszetételt és a kikerült radioaktív izotópok mennyiségét, a 10 nap alatti napi jódkibocsátásokat és a csernobili baleset bekövetkeztéig a környezetbe kikerült radioaktivitás mennyiségét mutatják a következő két táblázat, a 3. táblázatban pedig a környezetbe került becsült radioaktív kibocsátások mennyiségi összehasonlítását mutatjuk be.

Zónaösszetétel 1986 április 26-án		Teljes kibocsátás a baleset során	
Radioaktív	felezési idő	aktivitás (PBq)	a kikerült izotóp (%)
¹³¹ I	5,3 d	8 500	100
¹³² I	8,0 d	3 200	50 - 60
¹³⁴ Cs	2,0 y	180	20 - 40
¹³⁷ Cs	30,0 y	280	20 - 40
¹³² Te	78,0 h	2 200	25 - 60
⁹⁰ Sr	52,0 d	2 300	4 - 6
⁹⁰ Sr	28,0 y	200	4 - 6
¹⁴⁰ Ba	12,8 d	4 800	4 - 6
⁹⁰ Zr	1,4 h	5 600	3,5
⁹⁹ Mo	67,0 h	4 800	>3,5
¹⁰⁶ Ru	39,6 d	4 800	>3,5
¹⁰⁶ Ru	1,0 y	2 100	>3,5
¹³⁴ Ce	33,0 d	5 600	3,5
¹⁴⁴ Ce	285,0 d	3 300	3,5
¹³⁷ Np	2,4 d	27 000	3,5
¹³⁷ Np	86,0 y	1	3,5
¹³⁹ Pu	24 400,0 y	0,85	3,5
²⁴¹ Pu	6 580,0 y	1,2	3,5
²⁴¹ Pu	13,2 y	170	3,5
²⁴¹ Cm	163,0 d	26	3,5

1.táblázat A zónaösszetétel és a csernobili baleset során és a környezetbe került radioaktivitás (PBq és a készlet %-a

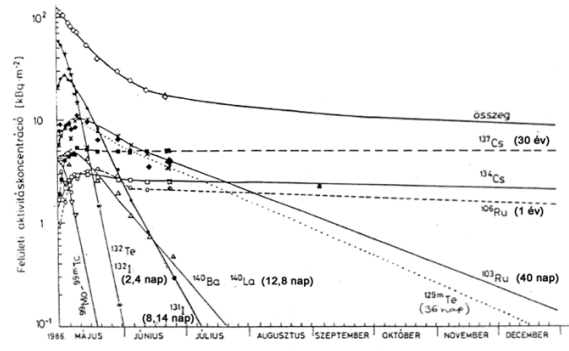
¹³¹ I izotóp napi kibocsátása	
kibocsátás napja	napi kibocsátás (PBq)
április 26	704
április 27	204
április 28	150
április 29	102
április 30	69
május 1	62
május 2	102
május 3	107
május 4	130
május 5	130
összesen	1760

táblázat A környezetbe került jód 131-es izotóp kibocsátások időfüggése (PBq)

táblázat A környezetbe került radioaktív kibocsátások mennyiségi összehasonlítása (Bq)

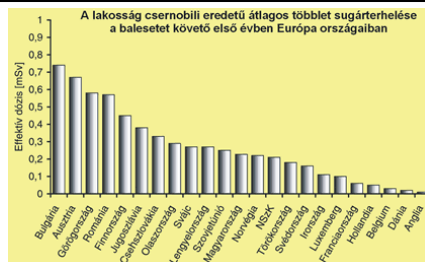
Forrás	Ország	időpont	radioaktivitás (Bq)	fontos izotópok
Hiroshima-Nagaszaki	Japán	1945	4x10 ¹⁶	hasadási termékek, aktinidák
Légköri atomrobbantások	USA-SzU	1963	2x10 ²⁰	hasadási termékek, aktinidák
Windscale	UK	1957	1x10 ¹⁵	¹³¹ I
Cseljabinszk-Kisztim	SzU	1957	8x10 ¹⁶	hasadási termékek, ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs
Three Mile Island	USA	1979	1x10 ¹²	nemesgázok, ¹³¹ I
Csernobil	SzU	1986	2x10 ¹⁸	¹³¹ I, ¹³¹ Cs

A csernobili atomerőművi baleset kibocsátása hatással volt hazánkra is. A következő, ábrán a baleset idején egy budapesti füves futballpálya talajfelszíni radioaktív szennyezettségét mutatja, az egyes komponensekre 1986. december 31-ig extrapolált értékekkel.



ábra A baleset idején budapesti füves futballpálya talajfelszíni radioaktív szennyezettsége, az egyes komponensekre 1986. december 31-ig extrapolált értékekkel (kBq/m^2)

Az ország lakossága által elszennvedett effektív többlet dózis 1986-ban az éves dózis mintegy 10-30%-a volt. Az európai országok lakosságát a baleset következtében ért többlet effektív dózist (mSv/fő) mutatja a következő ábra.



ábra Európa lakosságának többlet sugárterhelése[9]

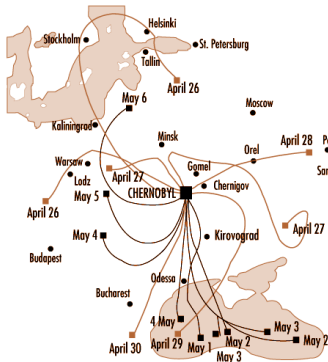
Azóta a sérült szarkofógot 2016-ban egy új biztonságosabb szarkofóggal fedték be (ábra).



ábra Az új csernobili szarkofág

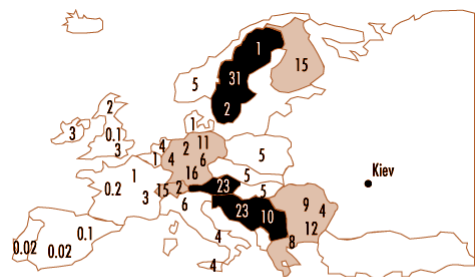
A baleset következményei

- 50 tűzoltó és mentőszemélyzet, akit rövid időn belül sugárbetegségben haltak meg, 135 000 embert kitelepítettek az erőmű 30 km-es körzetéből
- A későbbiek során 9 gyermek pajzsmirigyrákban halt meg
- 3940 ember halálát tételezik fel a jövőben a legszennyezettebb területeken a lineáris küszöbdózis hiányát feltételező elmélet szerint
- Összesen így megközelítőleg 4000 halálessel számolnak



Ábra A csernobili kibocsátások útvonalai 1986 április 26-május 6 között

A legfontosabb emittált radioaktív izotóp akihullott ^{137}Cs mérési adatai alapján szennyezettségi térképeket készítettek Ukrajna, Belorusszia és Oroszország területe szennyeződött el jelentősen, Európa többi területe kisebb mértékben szennyeződött.



Source: UNSCEAR 1988.

Ábra Cézium-137 ülepedés (kBq/km²) Európában a csernobili baleset következtében

Ábra Cézium-137 ülepedés Belorussziában, Oroszországban és Ukrajnában a csernobili baleset következtében

Type of population	Surface area (km ²)	Population size (000)	Main modes of exposure
<i>Occupationally exposed populations:</i>			
Employees onsite at the time of the accident		approx. 0.44	External irradiation, inhalation, skin contamination from the damaged reactor, fragments of the reactor dispersed throughout the site, radioactive vapours and dusts
Fire-fighters (first-aid)		approx. 0.12	
Clean-up and relief workers*		600-800	External irradiation, inhalation, skin contamination
<i>General public:</i>			
Evacuated from the prohibited zone in the first few days		115	External irradiation by the cloud, inhalation of radioactive elements present in the cloud
Residents of contaminated** zones (Mq/m ²) (Ci/km ²)			External radiation from fallout, ingestion of contaminated products
>1.5 (>40)	3,100	33	
0.6-1.5 (15-40)	7,200	216	
0.2-0.6 (5-15)	17,600	584	
0.04-0.2 (1-5)	103,000	3,100	
Residents of other zones <0.04Mq/m ²		280,000	External irradiation by fallout, ingestion of contaminated products

Táblázat Szennyezett zónák területe, a sugárzást szenvedett lakosság típusa és a besugárzás módja Ukrajnában, Belorussziában és Oroszországban a csernobili baleset következtében

* Individuals participating in clean-up within 30km of the site. These include fire-fighters, military personnel, technicians and engineers who intervened during the first weeks, as well as physicians and researchers active at a later date.
** Caesium-137 contamination.

Source: UNSCEAR 1988; IAEA 1991

A Three Mile Island-i baleset termikus balesetnek minősíthető, hiszen a leállított reaktorban lévő forró fűtőelemek néhány óráig elégtelen hűtés következtében olvadtak meg részben. A konténment visszatartotta a radioaktív izotópok zömét és csak kevés radioaktivitás (döntően ¹³¹I) került ki a környezetbe és az aktív zóna részlegesen sérült.

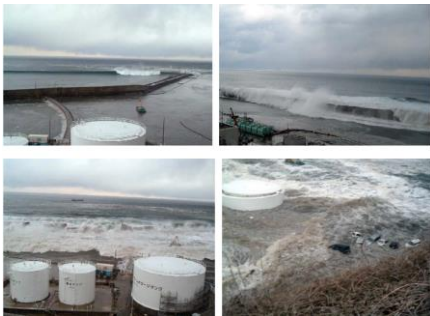
Bár a lakosság evakuálása nem történt meg 200000 lakó elköltözött a területről. Although no evacuation order was issued, 200,000 residents voluntarily evacuated the area.

1957-ben egy plutónium termelő reaktorban Anglia nyugati partján Windscale-ben a grafit meggyulladt és a 120m magas kéményen radioaktív izotópok kerültek a környezetbe.

2011. március 11-én 2 óra 46 perckor a Japán Honshu sziget keleti oldalán a Richter skála szerinti 9-es erősségű földrengés keletkezett, melynek epicentruma 130 km-re volt Sendai városától 11 km-es mélységben. Ez volt Japán eddigi legerősebb és a világ ötödik legerősebb földrengése. A földrengés 3 percig tartott és a ritka dupla rengések csoportjába tartozott. A rengés során a tengerfenék egy része megközelítőleg 10-20 métert mozdult függőleges irányban, Japán e szigete néhány méterre kelet felé mozdult el és a helyi tengerpart 0,5 métert süllyedt. A rengés után keletkező tengerár (cunami) 560 km² szárazföldet árasztott el és 19 000 ember halálát okozta. Több mint 1 millió épület sérült, vagy semmisült meg.

A térségben található 11 atomerőművi blokk közül az éppen üzemben lévő (Fukushima Daiichi 1,2,3, Fukushima Daini 1,2,3,4, Tohoku Onagawa 1,2,3, Japco Tokai 1) mindegyike a földrengés észlelésekor azonnal automatikusan leállt. A földrengés egyik reaktorban sem okozott észlelhető károsodást. A reaktorok mindegyike földrengésálló volt de cunamival szemben sérülékenyek voltak. A 11 blokkból az események után 8 esetén külső hálózatról, vagy tartalék dízelgenerátorokról üzemeltethető maradékhő elvonó rendszer állt rendelkezésre és lehűtve a reaktorokat megakadályozta a zónaolvadást.

A maradék 3 korábban üzemelt és azonnal leállt blokk a Daiichi telephelyen lévő 1,2,3 blokkok a földrengést 1 óra múlva követő 15 méter magas cunami következtében 3 óra 42 perckor elvesztették a maradékhő elvonó rendszerüket, mert a 13 tartalék generátor közül 12 tönkrement és a tengervizes hűtésű hőcserélő rendszerek is megsemmisültek (ábrák).



ábra A Fukushima Daiichi 1.- 4. blokkjai a cunami előtt és után

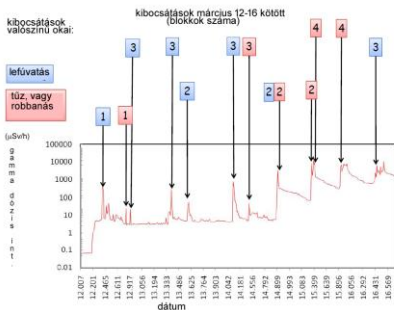
ábra A 6 m magas védőfalon átbukó cunami hullám 5m magasan mindent elpusztított

Ennek következtében az 1,2,3 blokkok és a hideg 4 blokkban lévő a reaktorból frissen kiemelt fűtőelemeket tároló lévő medence maradékhő elvonás nélkül maradt. A földrengés és a cunami következtében 3 erőművi alkalmazott halt meg, de a radioaktív sugárzás következtében senki. A földrengés után, a blokkok leálltak és a teljes telepre megszűnt a külső áramellátás, így bekapcsoltak a turbina épületek alagsoraiban elhelyezett tartalék dízelgenerátorok. 41 perc múlva 3 óra 42 perckor megérkezett az első, majd 8 perc múlva a második cunami hullám. A 15 méteres cunami hullám következtében a turbina csarnokok, ahol a dízel generátorok is elhelyezkedtek 5 méteres víz alá kerültek, a teljes maradékhő elvonó rendszerük megsemmisült, egyedül egy léghűtésű generátor maradt üzemképes, mely az 5. és 6. blokkokat látta el árammal. Az 1. és 2. blokkot ellátó akkumulátorok is tönkrementek, a 3. blokk akkumulátorai pedig 30 óráig adtak áramot.

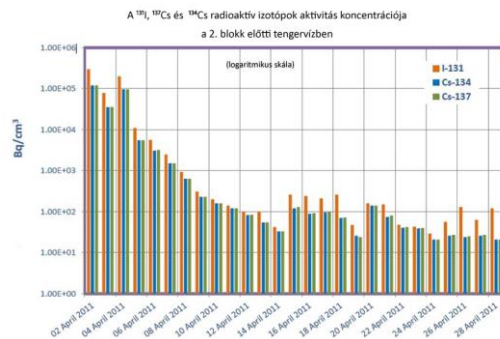
Este 7 óra 3 perckor nukleáris veszélyhelyzetet hirdettek, 8 óra 50 perckor elrendelték a 2 km sugarú körön belüli lakosság kitelepítését, melyet 9 óra 23 perckor 3km-re, hajnali 5 óra 44 perckor pedig 10km-re terjesztettek ki. Még aznap a zónát 20 km-re bővítették.

A baleset során a növekvő nyomású gőzt a reaktorok alatti elnyelető térbe, a nedves aknába (wetwell) engedték és később bekapcsoltak a zóna vészhűtő (ECCS) rendszerek is. Áramellátás hiányában ezek a hűtő rendszerek 3 nap alatt folyamatosan megszűntek üzemelni és szombat után külső tüztöltő fecskendővel, tengervízzel hűtötték a nyomásálló teret, de ehhez le kellett csökkenteni a bennük lévő nyomást, a gőznek az elnyeletőbe történő lefűvadásával. Az elfolyó hűtővizet hűtötték és **recirkuláltatták**.

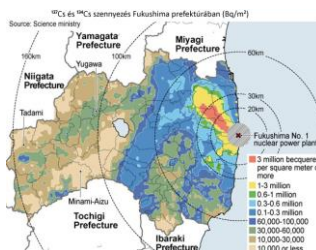
Az 1.-3. blokkok tengervízzel történő hűtése során a hűtővíz mintegy 40 %-a elpárolgott. A reaktorokból kifolyt radioaktív hűtővíz egy része a tengerbe jutott. A radioaktivitás kibocsátási csúcsa 15-én volt, döntően a 2. blokkból. A kibocsátott radioaktív nuklidok zöme ^{131}I és ^{137}Cs , ^{134}Cs volt. A ^{131}I -ekvivalens értékben ($A_{^{131}\text{I}} + A_{^{137}\text{Cs}} \cdot 40$) kibocsátott aktivitás becslült értéke 570 PBq volt, ez ~10%-a volt a csernobili baleset során kibocsátott 5200 PBq ^{131}I -ekvivalens kibocsátott radioaktivitásnak. A blokkonkénti levegőbe történő kibocsátást és a tengervíz, valamint a prefektúrában lévő talaj radioaktivitását mutatja a következő három ábra.



ábra Radioaktivitás kibocsátások következtében mért dózisszintenzitások az 1.-4. blokkokból 2011. március 12.-16. között (mikroSv/h)

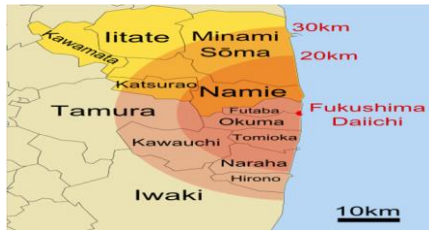


ábra Radioaktív jód és cézium aktivitás koncentrációk (Bq/cm^3) a tengervízben a 2. blokk előtt



ábra A talaj radioaktív cézium szennyezettsége Fukushima prefektúrában

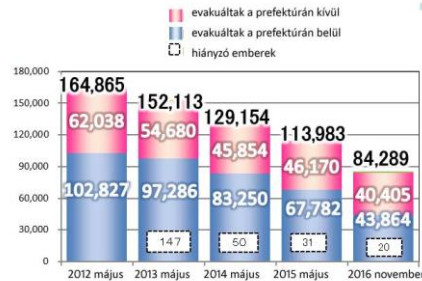
A reaktorok környezetéből a lakosság kitelepítését több lépcsőben végezték. A baleset napján 134 000 embert telepítettek ki az erőmű 3-20 km-es körzetéből, majd 4 nappal később a 20-30 km közötti lakosokat, további 354 000 embert is kitelepítettek. A zónákat mutatja a következő ábra.



ábra A kitelepítési zónák

A 20 km és 30 km zónák közti területre egy 20 mSv/év dózisintenzitási korlátot állítottak fel és ez az érték volt a visszaköltöztetés küszöbértéke is. A 20-50 mSv/év dózisintenzitású területekre tilos volt visszaköltözni és dekontaminálási tevékenységekkel, igyekeztek csökkenteni a szennyezettséget. A cunami a területen működő 24 mérőállomásból 23-at tönkretett. A kitelepítettek arányát és visszaköltöztetését foglalja össze a következő ábra.

Ábra A kitelepítettek száma 2012. május – 2016. november között



A baleset következményei:

- erős földrengés után 15 méteres cunami szökőár tönkretette a maradék hő hűtést 3 reaktornál
- 3 BWR reaktor és 4 pihentető medence sérült, 4 reaktor végleg kiesett az energiatermelésből
- 3 reaktor 30-70 %-os zónasérülést szenvedett (fűtőelemek, reaktortartály primer konténment)
- legalább 4 hidrogénrobbanás következett be, valószínűleg tűz volt több pihentető medencénél is
- a 3 reaktort július végére lehűtötték és december közepére hideg leállítási helyzetbe hozták
- a tengerbe hosszabb ideig szivárgott radioaktív hűtővíz
- az erőmű területe radioaktív hasadási termékekkel szennyeződött
- 20 km sugarú szennyezett zóna keletkezett
- a baleset INES minősítése 7, mert a 4.-5. napok között jelentős radioaktív izotóp kibocsátás történt, melynek becslés értéke 570 PBq ¹³¹I-ekvivalens aktivitás volt
- az erőművi balesetnek nem volt sugárzás okozta halottja, 165 000 embert telepítettek ki, ezek közül 84 000 már visszatérhetett
- a kitelepítések következtében több mint 1000 (főként idős) ember halt meg.

Táblázat A különböző nukleáris balesetek összehasonlítása

Accident	Type of facility	Accident mechanism	Total emitted radioactivity (GBq)	Duration of emission	Main emitted radionuclides	Collective dose (hSv)
Khyshtym 1957	Storage of high-activity fission products	Chemical explosion	740×10^6	Almost instantaneous	Strontium-90	2,500
Windscale 1957	Plutonium-production reactor	Fire	7.4×10^6	Approximately 23 hours	Iodine-131, polonium-210, caesium-137	2,000
Three Mile Island 1979	PWR industrial reactor	Coolant failure	555	?	Iodine-131	16–50
Chernobyl 1986	RBMK industrial reactor	Criticality	$3,700 \times 10^6$	More than 10 days	Iodine-131, iodine-132, caesium-137, caesium-134, strontium-89, strontium-90	600,000

Source: UNSCEAR 1993.

Táblázat Nukleáris balesetek során a levegőbe került ^{131}I aktivitások ($1,18 \times 10^{15}$ Bq egységekben)

Estimates of Iodine-131 released to the environment

I-131 Released Relative to Chernobyl	Geographic Location	Time Period
1*	Chernobyl (Ukraine)	1986
0.10	Fukushima NPP (Japan)	2011
0.0004	Windscale, UK	1957
0.0000003	Three Mile Island, PA	1979

* $1,800 \times 10^{15}$ Bq

Beebe2014-Simon.pdf letöltve 2017 július 24

Táblázat Atomerőművi balesetek és radiológiai balesetek során környezetbe került radioaktív izotópok (10^{15} Bq egységben)

Other radionuclides presented in emissions from nuclear power plant accidents ($\times 10^{15}$ Bq)

	^{131}I	^{137}Cs	^{90}Sr	Other
REACTORS:				
Windscale (1957)	0.6	0.05	<0.001	^{210}Po
TMI (1979)	0.001			^{133}Xe
Chernobyl (1986)	1800	85	10	^{134}Cs , etc.
Fukushima (2011)	160	15	0.14	^{134}Cs , etc.
OTHER:				
Kyshtym (1957)		0.26	4.0	$^{144}\text{Ce-Pr}$, etc.
Goiania (1987)		0.05		

Beebe2014-Simon.pdf letöltve 2017 július 24

Nukleáris üzemzavar a Paksi atomerőműben 2003 április 11

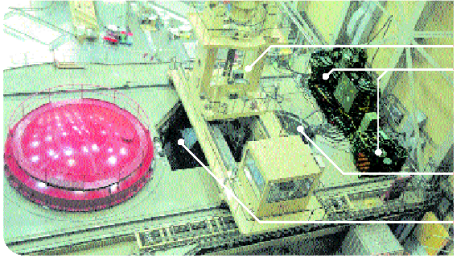
Esemény leírása: Kiegett fűtőelem kötegek sérültek meg 2003 április 10-11-én a Framatome ANP (FANP) által üzemeltetett fűtőelem tisztító tartályban.

Az érintett blokk: 2

Az esemény kezdete: 2003 április 10 22:00

Az esemény besorolása az INES skála szerint: 2 fokozat április 2-11 között, 3 fokozat április 17-től

A fűtőelem tisztító berendezés Pakson



Fűtőelem átrakó gép

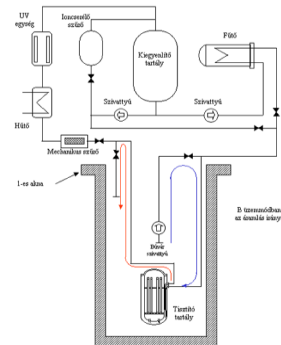
AMDA

1. sz. medence

Pihentető medence

30 köteg fűtőelem tisztítása vasoxidtól a Reaktortartály melletti 1. aknában

Víz alatti medencében lévő tartályban történt a tisztítás a Siemens-Framatome által tervezett tartályban

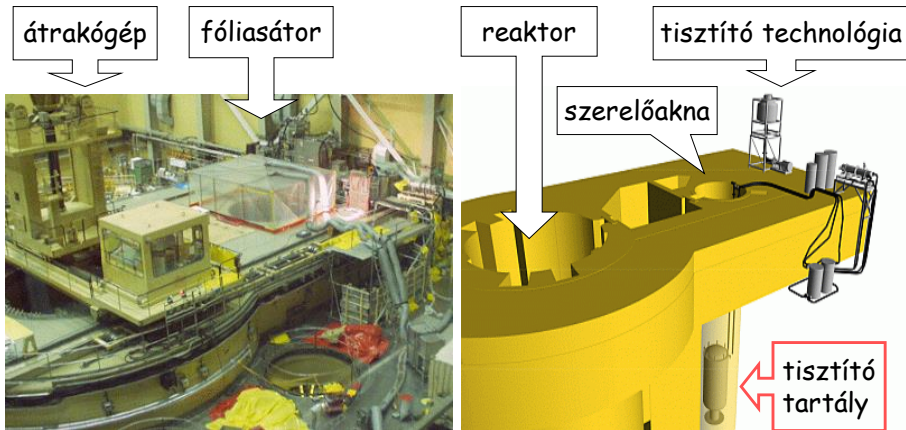


29

Az üzemzavar rövid leírása:

- 2003.04.10-én a 2-es blokk tervezett főjavítás alatt állt. Az üzemanyag kazetták tisztítása az 1. számú aknában zajlott, emellett a reaktor belső elemeinek tisztítása volt folyamatban.
- A 4. tisztító konténerbe (6-os töltet) rakott üzemanyag kazetták tisztítási programja 16:55-re befejeződött, a reaktor belső elemeinek tisztítása még folyamatban volt. A konténer 37°C -os hűtött állapotban tartását FRAMATOME ANP (FANP) dolgozói folyamatosan végezték, búvárszivattyús keringtetéssel.
- 21:53 -kor a tisztító körön elhelyezett kripton mérésen az ott dolgozók aktivitás megjelenését észlelték. Az ÜM elrendelte a reaktorcsarnokban végzett munkák felfüggesztését, illetve a terület elhagyását. A tisztító tartály nyitását, vizuális vizsgálatot, lehetőség esetén az inhermetikus kazetta elkülönítését, illetve a pihentető medence és az 1-es akna vízének elemzését határozták el legsürgősebb feladatként.
- A tisztítókonténer fedelének hidraulikus záró szerkezetét 02:15-kor FANP oldotta. Közvetlenül ez után a dozimetriai ellenőrző rendszeren ugrásszerű aktivitásnövekedés volt tapasztalható és ugyanebben az időpontban a pihentető medence vízszintjének mintegy 7 cm-es csökkenését észlelték. A tisztító tartály fedelének levételi kísérlete során a speciális három ágú fedélemelő kötél egyik ága elszakadt, így a levétel sikertelen volt. 2003. 04. 16-án a fedél leemelését követő videó kamerás ellenőrzés során azt tapasztalták, hogy a kazetták sérülése jelentősebb, mint azt előzetesen feltételezték.

Külső tisztítás - a 2. blokki helyszín



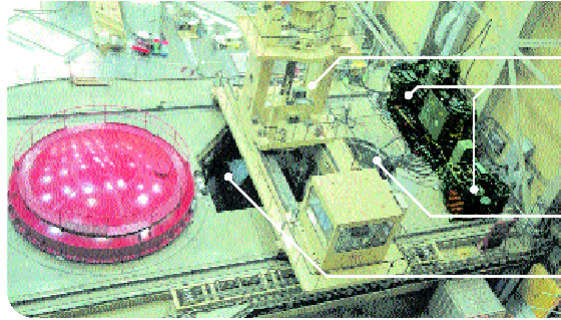
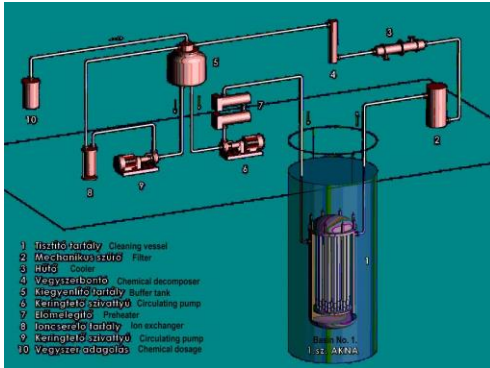
31

Az esemény során kibocsátott radioaktivitás okozta többlet lakossági dózis (Paksra számítva)

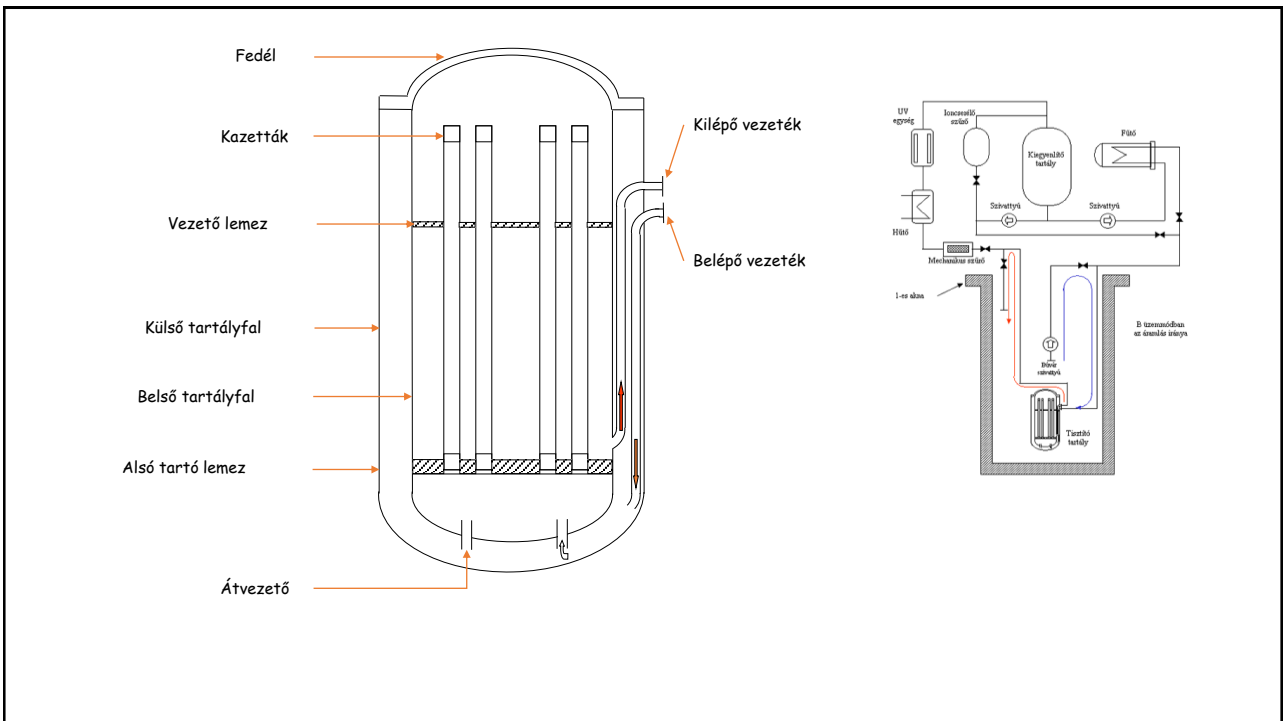
A kibocsátás okozta többlet dózis	0,13 mikroSv
Hatósági éves dózismegszorítás az atomerőműre	90 mikroSv
Mellkas átvilágítás	200 mikroSv
Egy főre eső átlagos éves orvosi alkalmazás hatása	300 mikroSv
Egy évi természetes sugárterhelés	2400 mikroSv

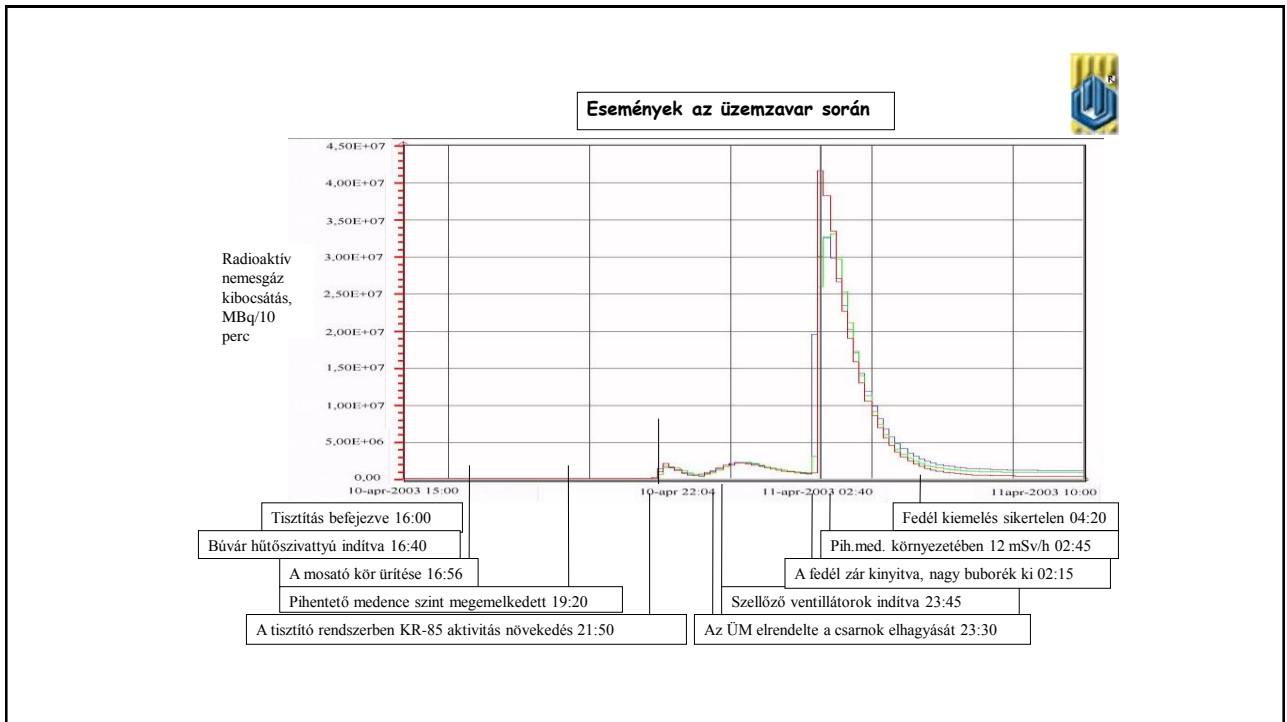
32

A fűtőelem tisztító berendezés Pakson



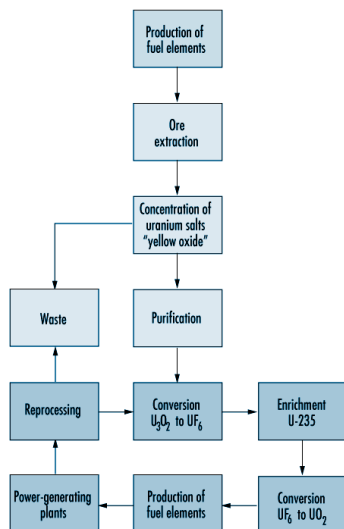
Fűtőelem átrakó gé
 AMDA
 1. sz. medence
 Pihentető medence





Fűtőelemgyártó és reprocesszáló üzemek

A fűtőelemgyártás során a bányászott uránból oxid, vagy fémurán pasztillákat gyártanak fizikai és kémiai műveletek segítségével. A fő veszélyforrás kémiai jellegű, mert az izotóp dúsításhoz alkalmazott gáz halmazállapotú urán-hexafluorid (UF_6) levegővel érintkezve korrozív hidrogén-fluorid gáz képződhet.



A kiégett fűtőelemeket hűtött tárolókban tárolják, illetve reprocesszáló üzemekben dolgozzák fel. Reprocessálás során 4 kritikusági baleset következett be. Ezek a balesetek szemben az atomerőművi balesetekkel néhányszor tíz kilogramm hasadóanyaggal történtek, így elhanyagolható mechanikai sérülések léptek fel, radioaktív kibocsátás pedig nem történt. Besugárzást csak a nagyon magas és rövid idejű (perces nagyságrendű) külső gamma és neutron sugárzás következtében szenvedtek el a dolgozók.

1957-ben Kisztimben (Szovjetunió, Dél Ural, plutónium üzem) egy nagyaktívitású folyadékot tartalmazó tartályban robbanás történt és több mint 16000 km² területet szennyezett el, 740 PBq aktivitású izotóp került a levegőbe.

Ábra. Nukleáris üzemanyagciklus reprocesszáással

Táblázat ⁹⁰Sr radioaktív izotóppal szennyezett területek és a besugárzott lakosság a Kisztimi (SzU, Ural 1957) baleset során

Contamination (kBq/m ²)	(Ci/km ²)	Area (km ²)	Population
≥ 37,000	≥ 1,000	20	1,240
≥ 3,700	≥ 100	120	1,500
≥ 74	≥ 2	1,000	10,000
≥ 3.7	≥ 0.1	15,000	270,000

Kutatóreaktorok

Hasonló veszélyek jellemzik, mint az atomerőműveket, de a veszély kevésbé komoly. Néhány kritikussági baleset történt, melyek során a személyzet szenvedett besugárzást.

Iparban és gyógyításban alkalmazott radiológiai balesetek

A leggyakoribb baleset a hegesztések vizsgálatához alkalmazott elveszett ipari radiográfiai sugárforrásokkal kapcsolatos. Előfordult baleset elveszett gyógyászati sugárforrásokkal is. Kétféle esemény fordul elő, az egyikben illetéktelen személyek a forrást megtalálják és néhány órán át birtokolják, majd bejelentik és elszállítják, a másik esetben a talált forrást hazaviszik. Az első esetben csak helyi, égéshez hasonló sérülés lép fel, a második esetben több ember is hosszú idejű besugárzást kaphat.

isotope/other	incidents	fatalities	injuries
Am-241	1	0	1
Au-197	1	1	1
Au-198	1	1	0
Cf-252	1	0	1
Co-60	56	44	277
Cs-137	26	17	70
H-3	4	4	7
I-125	1	0	1
I-131	6	2	5
I-131, I-123	1	0	1
I-131, Tc-99m	1	0	1
Ir-192	84	16	200
P-32	2	0	2
Po-210	3	2	5
Ra	1	1	0
Ra-226	2	9	81
Rh-106	1	0	1
Sb-124	2	0	2
Sc-46	1	0	1
Sr-90	2	0	4
Sr-90, Y-90	1	0	3
Y-90	1	7	0
accelerator	14	0	16
x-ray	53	0	75
criticality--Pu	8	1	11
criticality--U	15	4	32
criticality--unknown	6	17	13
nuclear test	4	1	193
unknown	100	110	624
TOTAL	399	236	1,628

Táblázat Radiológiai balesetek események radioaktív izotóppokként



Táblázat Radiológiai balesetek események régióként

region	incidents	fatalities	injuries	total casualties
U.S.S.R./former Soviet Union	202	102	827	929
United States	56	42	312	354
Asia	43	15	178	193
Latin America and Canada	25	36	152	188
Europe	63	29	106	135
Africa	9	12	51	63
Australia and Oceania	1	0	2	2
TOTAL	399	236	1,628	1,864

compiled by Wm. Robert Johnston
last updated 20 November 2011

Táblázat Radiológiai balesetek események típusonként

type of event	code	incidents	fatalities	injuries
accident involving nuclear reactor	A-R	11	0	31
accident involving naval reactor	A-NR	8	33	179
accident involving power reactor	A-PR	2	31	255
criticality accident	AC	27	17	51
criticality accident involving research reactor	AC-RR	2	4	5
accelerator accident	A-a	14	0	16
accidental dispersal of radioactive material	A-d	1	0	0
accidental internal exposure to radioisotope	A-i	10	12	79
irradiator accident	A-ir	24	8	33
medical radiotherapy accident	A-mr	31	70	228
medical x-ray accident	A-mx	7	0	19
orphaned source accident	A-os	28	31	104
accidental dispersal of orphaned source	A-od	2	6	24
radiography accident	A-rg	64	1	79
accidental exposure to source	A-s	42	5	65
x-ray accident	A-x	51	0	62
radiation accident (unspecified or other)	A	44	3	93
intentional exposure of individual (assault)	I-a	9	4	81
criminal act (unspecified)	I-c	5	0	12
intentional self-exposure	I-s	5	3	2
exposures resulting from theft of source	I-t	8	7	17
nuclear weapon test	NT	4	1	193
TOTAL		399	236	1628
combat use of nuclear weapon	NW	2	195000	161000

compiled by Wm. Robert Johnston
last updated 20 November 2011

Táblázat Elveszett sugárforrásoktól a lakosság által kapott besugárzásos balesetek

Country (year)	Number of exposed individuals	Number of exposed individuals receiving high doses*	Number of deaths**	Radioactive material involved
Mexico (1962)	?	5	4	Cobalt-60
China (1963)	?	6	2	Cobalt-60
Algeria (1978)	22	5	1	Iridium-192
Morocco (1984)	?	11	8	Iridium-192
Mexico (Juarez, 1984)	approx. 4,000	5	0	Cobalt-60
Brazil (Goiânia, 1987)	249	50	4	Caesium-137
China (Xinhou, 1992)	approx. 90	12	3	Cobalt-60
United States (Indiana, 1992)	approx. 90	1	1	Iridium-192

* Individuals exposed to doses capable of causing acute or long-term effects or death.

** Among individuals receiving high doses.

Source: Nénot 1993.

Radioterápiás berendezésektől származó sugárforrások által néhány besugárzási baleset történt fémmunkásokkal és két esetben (Juarez és Goiânia) a lakosság tagjai is kaptak besugárzást.

Mexikóban (Juarez) 1983. decemberében egy terápiás sugárforrás-tartót eladtak. Azt hitték, hogy a 16,7 TBq ^{60}Co forrást már eltávolították belőle. Több tonna fém termék - amelyet Mexikóban és az USA-ban értékesítettek - , néhány öntöde és több száz ház elszennyeződött. Kb. 1000 ember kapott lényeges sugárterhelést. Hét személy 3-7 Sv, 73-an 0,25-3 Sv és 700 személy pedig 0,005-0,25 Sv közötti effektív dózist. A leírtak szerint 17 ezer épületet kellett átvizsgálni a beépített betonvasak miatt, s végül 21 ezer m^3 hulladék keletkezett.

1984-ben Marokkóban egy radiográfiára használt ^{192}Ir forrást elvesztettek, egy járókelő észrevette és hazavitte. Nyolc fő, azaz egy egész család meghalt a sugárzás hatására, egyéni sugárterhelésük 8-25 Sv volt.

Braziliában (Goiania városban) 1987. szeptemberében egy 50,9 TBq-es ^{137}Cs forrást vittek el, egy elhagyott (részlegesen lebontott) terápiás intézet besugárzójából. A fényesnek és értékesnek látszó forrást szétszerelték és szétszortták az ismerősöknek. A felmérések szerint 129 személy kapott külső vagy belső sugárterhelést. Sokan kézzel megfogták a céziumport, sőt voltak akik festékként bőrükre kenték. A sugárszennyezett kézzel fogyasztott étellel egyesek jelentős belső sugárterhelést kaptak, a legnagyobb dózis az 5,3 Sv-t is elérte. A baleset során 46 személy került kórházba, négyen meghaltak, köztük egy 6 éves kislány, aki a szennyezett kezével evett, s így 1 GBq ^{137}Cs -ot vitt be a szervezetébe. Összesen 249 személyt

ellenőriztek, melyből 121 általánosan szennyezett volt és 21 fő 1 Gy feletti, 8 fő 4 Gy körüli dózist kapott. Összesen 85 épület szennyeződött el, s végül 7 házat le kellett bontani. A keletkezett radioaktív hulladék 3100 m^3 volt.

Az orvosi sugárforrás alkalmazások alkalmával is fordultak elő balesetek, a röntgenberendezéseknél, valamint a radioizotópok beadásánál egyaránt, legtöbbször az expozíció túlméretezésével, ill. az izotóp túladagolásával. Az USA-ban például évente átlagosan 75 téves adminisztrálás történik a terápiás kezeléseknél és 1300 a diagnosztikai vizsgálatoknál. Ahogy a túladagolás, ugyanúgy a komoly aluladagolás is végzetes kimenetelű lehet a gyógyító hatás elmaradása miatt. Az USA-ban leírtak szerint 1986-ban egy 73 éves beteg 7,4 MBq ^{198}Au izotóp helyett 7,4 GBq mennyiséget kapott. Körülötte 350 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ volt a dózisteljesítmény, a beteg csontvelőjére 4-5 Gy, a májra 70-80 Gy dózis jutott, agyvérzésben halt meg.

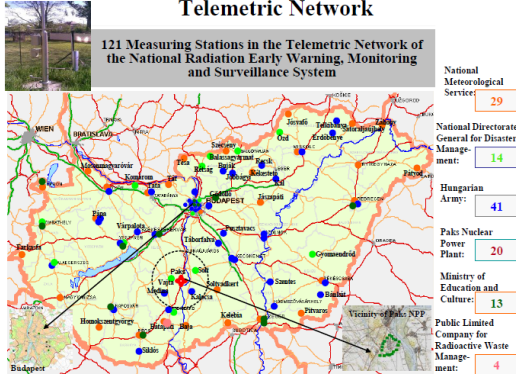
Az erősen szennyezett személyek sugárterhelésének az eloszlása			
Kezelés	Dózis (Gy)	Személyek száma	Meghalt
Kórházban	> 5	5	4
	4 - 5	3	1
	3 - 4	3	-
	2 - 3	2	-
	1 - 2	5	-
	< 1	2	-
Járó beteg	> 1	2	-
	0,5 - 1	6	-
	< 0,5	18	-
	ismeretlen	4	-

Néhány fontos radiológiai esemény Magyarországon az elmúlt évtizedben

Radioaktív jódkibocsátás az Izotóp Intézet Kft telephelyéről

Országos mérőrendszer

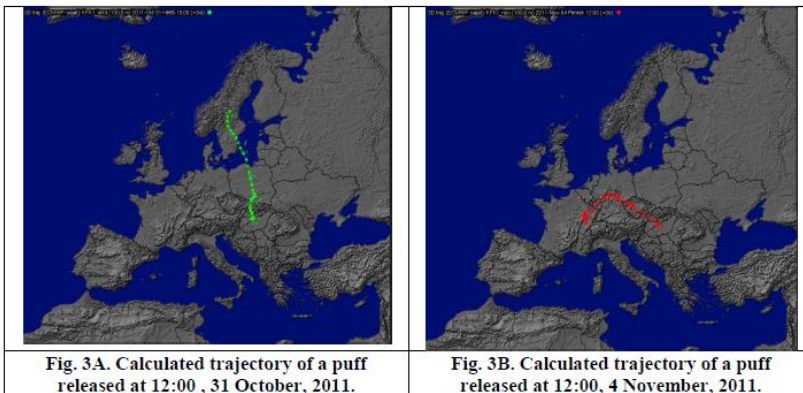
Telemetric Network



Események:

- 2011 november 21 a ^{131}I radioizotóp termelés felfüggesztése
- Új technológia és monitorozó rendszer megtervezése
- 2012 óta csak a külföldről importált jódkibocsátás készítmények kiszállítását végzik

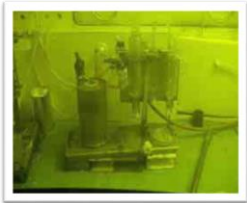
Radioaktív jódkibocsátás az Izotóp Intézet Kft telephelyéről



A 2011 október és november hónapokban
Végbement jódkibocsátások terjedésének modellezése

Radioaktív jódkibocsátás az Izotóp Intézet Kft telephelyéről

Radioisotope	Half life	Energy (MeV)		Product form	Application
		E_{β^-} (max)	E_{γ}		
$^{99\text{m}}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$	67 h	0.87	0.740	^{99}Mo - Na_2MoO_4 in NaOH solution	Preparation of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -radio-pharmaceuticals for diagnosis
^{131}I	8.02 d	0.61	0.140, 0.364, 0.64	^{131}I -NaI in alkaline sulphate solution	Diagnosis and therapy of thyroid disorders and thyroid cancer
^{32}P	14.3 d	1.71	-	^{32}P - H_2PO_4 in dil. HCl	Radionuclide therapy and ^{32}P -labeled nucleotides
^{51}Cr	27.8 d	-	0.323	^{51}Cr -CrCl ₃ in dil. HCl	ERIC labeling—for studies in biology etc
^{153}Sm	1.95 d	0.81	0.07, 0.103	^{153}Sm -SmCl ₃ in dil. HCl	Radionuclide therapy—treatment of bone pain in metastatic cancer
^{166}Ho	1.1 d	1.60	0.08	^{166}Ho -HoCl ₃ in dil. HCl	Radionuclide therapy—treatment of rheumatoid arthritis
^{125}I	60.2 d	EC	0.028-0.035	^{125}I -NaI in alkaline sulphate solution	RIA, brachytherapy of cancers, X-ray source etc.



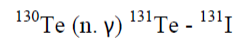
Száraz desztillációs berendezés
 ^{125}I előállítására [3]



Forrókamra sor[3]

A Kísérleti reaktorban neutron aktivációval állítottak elő radioaktív izotópokat (^{131}I , ^{125}I , ^{32}P , ^{35}S , ^{51}Cr) és radiógyógyszereket (^{131}I , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{90}Y).

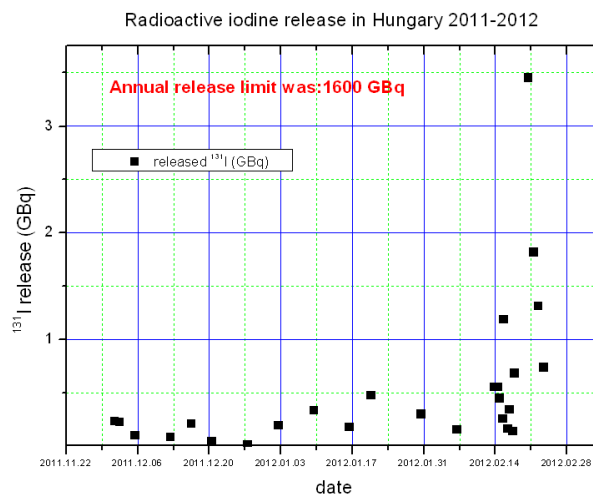
A ^{131}I izotópot tellúr besugárzásával állították elő, majd a keletkezett radioaktív jódkibocsátást száraz desztillációs elválasztásával különítették el forró kamrában

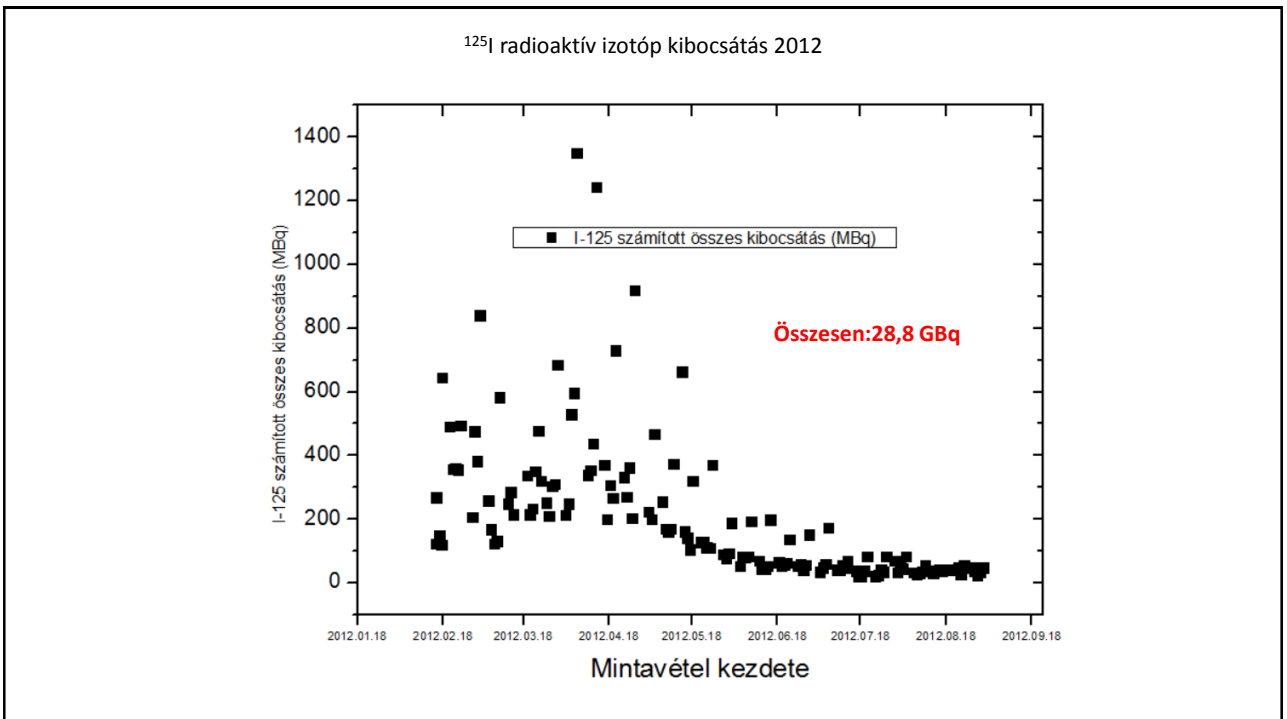
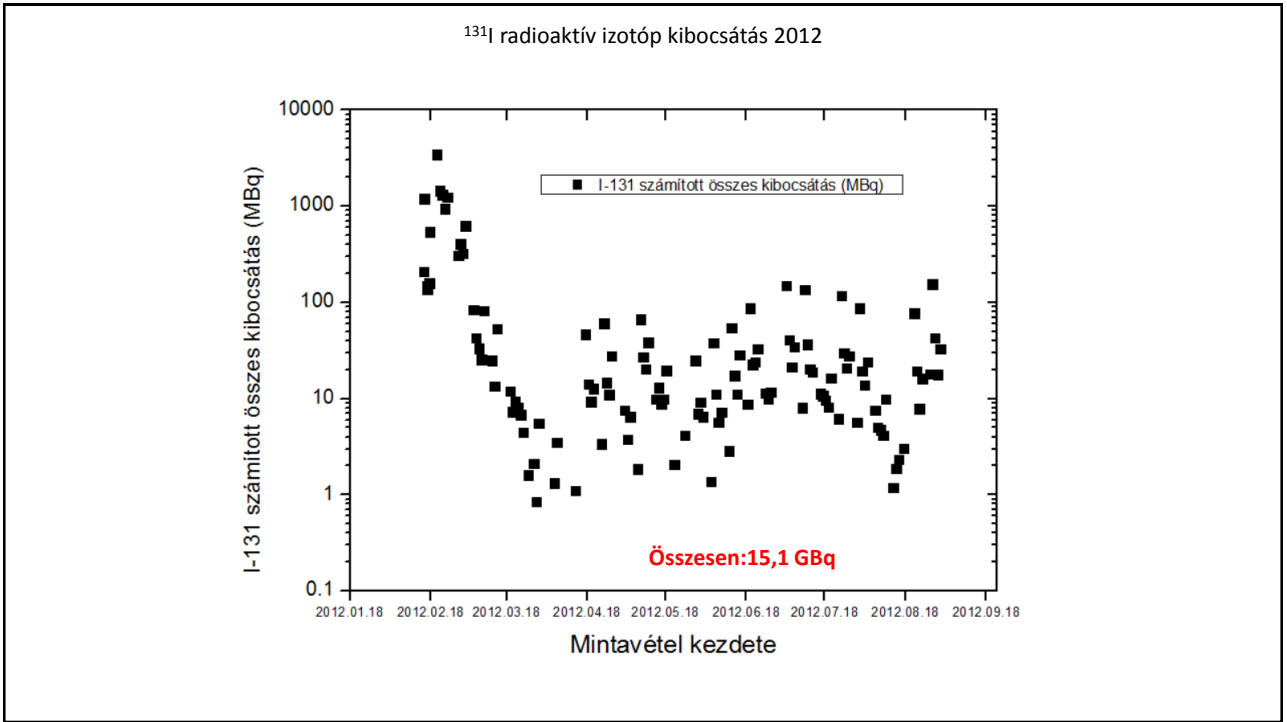


[3] IAEA-TECDOC-1430, Radioisotope handling facilities and automation of radioisotope production, 2004

Radioaktív jódkibocsátás az Izotóp Intézet Kft telephelyéről

Radioaktív ^{131}I kibocsátás Magyarországon 2011-2012

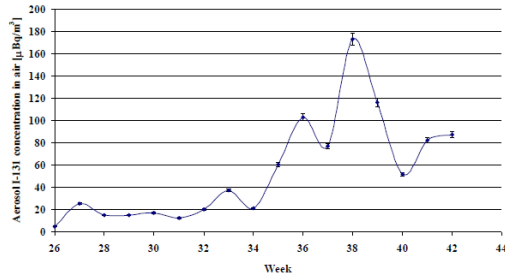




Radioaktív jódkibocsátás az Izotóp Intézet Kft telephelyéről

Beavatkozás:

- Ellenőrzés, mérések, a gyártás felfüggesztése



**Spektrométer
IdentIFINDER NaI
detektorral**

- Aeroszolhoz kötött-131 aktivitás koncentrációk levegőben Frédéric Joliot-Curie Intézet mérései szerint Budapesten 2011-ben.

2014 évi I-125 és I-131 kibocsátások

Izotóp Intézet Kft. Radiógyógyászati Üzletág XVII. épület

I-131

	I-131 kapszula	I-RAO-1	I-RAO-2	NorchoI	I-RA-7	I-RA-6	mAb
Kiosztott aktivitás (GBq)	14125	24,72	507,05	84,87	1903,52	25,73	326,9

Σ I-131 felhasznált (2014)	56703,26 GBq
Σ I-131 kibocsátott (2014)	3,701 GBq

I-125

	Seralb	IRB (I-125 oldat osztás)
Kiosztott aktivitás (GBq)	0,832	886,34

Σ I-125 felhasznált(2014)	1113 GBq
Σ I-125 kibocsátott (2014)	711,54 MBq

Az adatokból az derül ki, hogy:

- 2012 február 15 és 2012 augusztus 31 között 15,1 GBq ^{131}I és 28,82 GBq ^{125}I radioaktív izotópot bocsátottak ki a légkörbe, ami az éves engedélyezett 800 GBq mennyiséghez képest 2-3%
- A legnagyobb kibocsátások 2012 február-március hónapokban történtek. Február 17-21 napokban 1 hét alatt ~8,95 GBq ^{131}I került ki, ami igen jelentős mennyiség, az eddigi összes kibocsátás 59,3%-a!
- A gyártást felfüggesztették, jelenleg csak importált radiojódiód kiszállítása történik

TENORM szennyezett acélcsonkák visszaküldése Udinéből

^{226}Ra szennyezett acélcsonkák visszaküldése Udinéből Ajkára



TENORM szennyezett acélcsonkák [9]



[9] PÁTZAY, Gy.: Personal report, 2013

Megállapítható, hogy:

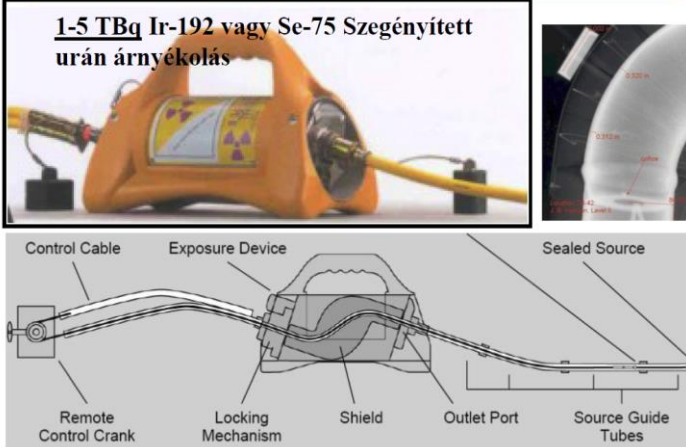
- a jellemzően csővezeték darabokból álló vashulladék ^{226}Ra izotóppal szennyezett.
- A csöveken ipari vízből vagy zagykiválás következtében dúsulhatott fel a természetes folyamatok során jelenlévő ^{226}Ra izotóp, így a háttér öt-nyolcszorosa volt mérhető.
- A szennyezett réteg nem törölhető le, így az nem szennyezi a környezetet és csak alacsony szintű kockázatot jelent.
- A fémhulladék az Üzemeltető elmondása szerint valószínűleg a MAL Zrt.-ből származik
- Tekintettel az alacsony sugárszintet mutató mérési eredményekre és a szakértők véleményére, mely szerint a sugárzás oka természetes eredetű izotópfeldúsulás, ami a környezetet nem szennyezi, a szállítmány elkülönítésén túl további intézkedésre nem volt szükség.

^{192}Ir gamma-sugárforrást szállító jármű ütközése vasúttal Cegléd körzetében



Ipari radiográfia, defetoszkóp

1-5 TBq Ir-192 vagy Se-75 Szegényített urán árnyékolás



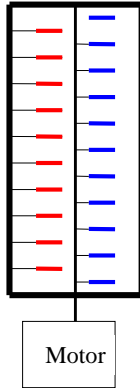
¹⁹²Ir gamma-sugárforrást szállító jármű ütközése vasúttal Cegléd körzetében





Püspökszilágy RHK Kft 2013 december 2 ²⁴¹Am szennyezés

Pulzáló ²⁴¹AmBe n-forrás vázlat



A n-forrás oldal- illetve felülnézetben kikapcsolt állapotban látható. Az acélkorongba ágyazott kék Be körkikkek forgásakor a piros ²⁴¹Am körkikkek közé kerülve az átlapolásnak megfelelően egy szinuszos görbe alakú neutronhozamot szolgáltat.

Az Izotóp Intézet Kft-ből származó 4 db 200 literes hordó **37 GBq ²⁴¹Am** radioaktív izotóppal szennyezett hulladékának bontása, válogatása és tömörítése során elszennyeződött az RHK Kft üzem munkaterületének jelentős része és 3 dolgozó jelentős külső és belső sugárterhelést kapott. Az üzem dekontaminálását, valamint a munkafolyamatok és a mérési technika jelentős fejlesztését rendelte el a hatóság.



A püspökszilágyi RHFT telephely hulladékcsomag-feldolgozó helyiségeiben 2013. december 2-án ^{241}Am -et tartalmazó szennyezés került ki a munkaterületre. A munkahelyen használt eszközök, tárgyak mellett a szennyezés egy része az ott dolgozó személyek ruházatára, illetve szervezetébe is jutott. A szennyezés felismerése és azonosítása az MTA EK Környezetvédelmi Szolgálatához tartozó egészségstámláló laboratóriumban történt meg.

Rövid történeti áttekintés

- 2007 április: „Javaslat új ki-be kapcsolható $^{241}\text{AmBe}$ neutronforrásra” – Veres Árpád előadása az Izotóp Intézet kft. K + F fórumán
- 2007–2012: Forráskészítési kísérletek az Izotóp Intézet kft. „A” szintű izotóplaboratóriumában, az I.I., az MTA Izotópkutató Intézet és a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézete munkatársainak részvételével
- 2012: Az OAH támogatásával folyó kísérleti munka befejezése
- 2013 július: Négy közepes aktivitású radioaktív hulladékot tartalmazó hordó beszállítása Püspökszilágyra
- 2013. december 2.: A hulladék feldolgozása, ^{241}Am szennyezés észlelése a munkaterületen

- Az Am/Be pulzáló neutron forrás készítéséhez beszerzett Am-oxid aktivitása $\approx 37 \text{ GBq}$ volt.
- Feldolgozás: feloldás HCl-ban, átvitel $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ oldatba, elektrolitikus leválasztás acéllemezekre.
- A forrás hozama és fizikai formája nem volt kielégítő.
- A visszamaradt oldatot papírtörlőkkel felitatták.
- Az ILW hulladékot 4 acélhordóban helyezték el.
- Másfél év helyi tárolás után a hulladékot elszállították Püspökszilágyra.

A pulzáló Am/Be forrás elemei

Körcikk alakú acéllemezekre „electroplating” technikával Am borítást vittek fel, amit aranyfóliával fedtek le. A kísérletsorozat befejezése után ólomkonténerben helyezték el a lemezeket.



Használati tárgyakról vett dörzsminták gamma-spektrometriás mérései

Tárgy	Aktivitáskoncentráció (Bq/cm ²)
Bútor	1,0E-03
Ágy széle	<3E-3
Hangszer	1,8E-03
TV távirányító	4,8E-03
Csap	2,2E-03
Autókormány	1,6E-02
Laptop billentyűzet	<8E-4
Laptop "egér"	7,8E-04

Beavatkozási szint „ellenőrzött területen kívül” az MSZ 62-7:2011 szerint: 0,5 Bq/cm²

Következtetések:

- Az ²⁴¹Am izotópot tartalmazó 4 hulladékos hordó dokumentumai hibásak voltak, így a hulladékfeldolgozóban nem tudtak a fokozott veszélyről
- A hulladékfeldolgozóban, a kezelést végző dolgozók képzettsége nem volt megfelelő és súlyosan megszegték a biztonsági előírásokat, a megfelelő mérőműszerek nem álltak rendelkezésre.
- Az esemény bekövetkezése után a hulladékfeldolgozóban megtett intézkedések hiányosak és hibásak voltak

Kasza László, Csákvári Gábor és Demény András esetében az 50 éves időtartamra becsült dózisos alapján a daganatos megbetegedések kockázata mintegy 5-10; 1-5 és 1-3%-ra becsülhető. Emiatt az érintettek rendszeres, egész élettartamukra kiterjedő orvosi követését, daganatszűrését javasoljuk

²³⁹Am – RETENCIÓS JELLEMZŐK

Célszerv	Eloszlás a szervezetben	Kiürülési idő a szervezetből
Csont	45 %	Néhány évtized
Máj	45 %	"
Ivarszervek	0.01%	"
Egyéb szövetek	10%	"

Alapvető kiválasztási mód

²³⁹Am belégzését és lenyelését követően a fekális ürítés dominál a vizelettel való kiválasztás felett. Bőrön át történő felvétel esetében a fekális ürítés kb. megegyezik a vizelettel való kiválasztással.

Kezelés: komplexképzővel (DTPA) mobilizálják, vizelettel távozik

Fegyverkezési balesetek

A katonai célú nukleáris létesítményekben eddig két jelentős környezet-szennyezéssel járó baleset történt. Az Ural hegységben (Oroszország), Kistim-ben 1957. szeptemberében, illetve Anglia nyugati partvidékén, Windscale-ben 1957. októberében. Emellett több kisebb baleset is történt, pl. a nukleáris fegyverek szállításánál.

A Kistimben történt baleset

Egy plutónium termelő üzem nagy aktivitású folyékony hulladékát tárolták betonba ágyazott, vízhűtéses acéltartályban. A korrózió következtében egy 300 m³-es tank hűtőrendszere elromlott, s a folyamatot műszeresen nem ellenőrizték. A nitrát és acetát tartalmú hulladék 1 EBq radioaktív anyagot tartalmazott. A víz elpárolgott és az anyag 330-350 °C-ra felmelegedett, majd 1957. szeptember 29-én felrobbant (robbanóereje 70-100 tonna TNT). Körülbelül 100 PBq aktivitás szóródott szét. A radioaktív felhő 1 km magasba jutott és 11 órán belül 300 km távolságban, ÉK-i irányban, monoton csökkenéssel elszennyezte a területet (15-23 ezer km²). Ez 270 ezer embert érintett.

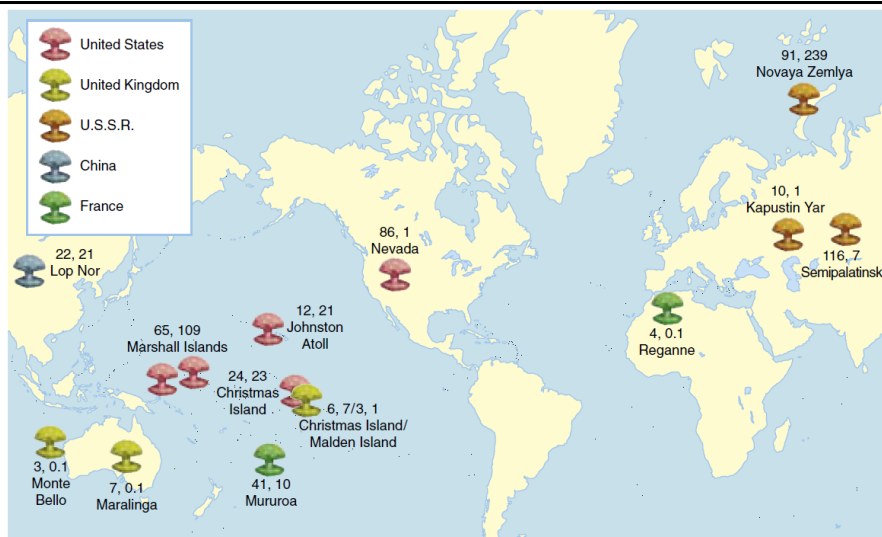
A legnagyobb szennyező a ^{90}Sr izotóp volt, talajfelszíni depozíciója ($150 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-2} \text{ }^{90}\text{Sr}$) eredményeképpen $5 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ dózisteljesítményt mértek. A magas ^{90}Sr tartalom miatt az első két évben 10 ezer tonna mezőgazdasági terméket kellett megsemmisíteni, összesen 11 ezer embert evakuáltak.

Az első 10 napban evakuált néppességi csoport tagjai (1154 fő) 170 mSv külső és 1500 mSv gyomor-béltraktus (azaz belső) sugárterhelést kaptak. Az átlagos effektív dózis 520 mSv volt, az evakuált emberek kollektív dózisa pedig $1300 \text{ személy}\cdot\text{Sv}$.

A baleset közzététele csak az 1980-as évek végén történt, addig igen hatékony hírzárlat működött.

A Windscale-i baleset

Az üzem mai helymegjelölése Sellafield, Anglia. Itt operációs hiba miatt túlhevülés történt, majd tűz ütött ki egy katonai célú plutónium termelő reaktorban (grafit moderátoros, léghűtéses reaktor). A szabadba került $740 \text{ TBq }^{131}\text{I}$, $22 \text{ TBq }^{137}\text{Cs}$, $1,2 \text{ PBq }^{133}\text{Xe}$ és $8,8 \text{ TBq }^{210}\text{Po}$ radioizotóp. A nuklidok közül a ^{131}I 37%-ban, a ^{210}Po 37%-ban és a ^{137}Cs 15%-ban járult a teljes dózishoz. Az érintett terület 580 km^2 (kb. 40 km hosszú) volt. A balesetet követően a teje vonatkozó beavatkozási szintet $3700 \text{ Bq}\cdot\text{dm}^{-3}$ értékben határozták meg, s még így is 3000 tonna tejet öntöttek a tengerbe.



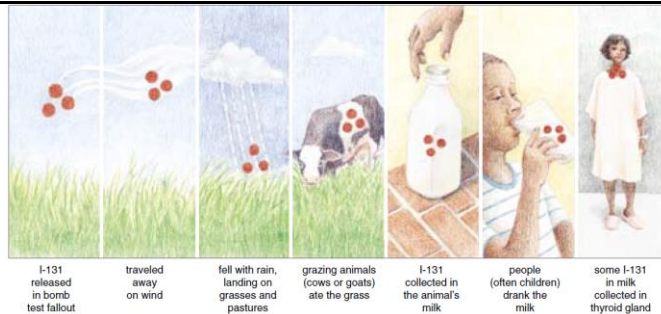
A légi atomrobbantások széleskörűen elterjedtek a Földön az Antarktisz és Dél-Amerika kivételével. A sztratoszférába került radioaktivitás, kihullások formájában szennyezte a Földet. Az első szám a kísérletek számát, a vessző utáni második szám pedig az összesített romboló energiát millió tonna TNT egységben jelzi.

Fallout-pdf.pdf letöltve 2017 július 27

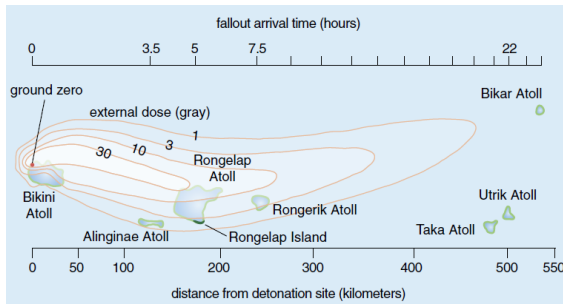
Worldwide nuclear testing totals by country

Country	Tests ^[Notes 1]	Detonations ^[Notes 2]	Peaceful tests ^[Notes 3]	Atmospheric tests ^[Notes 4]	Yield range, kt	Total yield, kt	Percentage by test count	Percentage by yield
USA ^[93]	1032 ^[Notes 5]	1127	27 ^[Notes 6]	231	0 to 15,000	196,513 ^[Notes 7]	48.8%	37.0%
USSR ^{[94][95]}	729 ^[Notes 8]	982	156 ^[Notes 9]	230	0 to 50,000	296,836	34.4%	54.0%
Great Britain ^[95]	88 ^[Notes 10]	88	0	33	0 to 3,000	9,282	4.2%	1.8%
France ^[95]	212 ^[Notes 11]	212	4 ^[Notes 12]	52	0 to 2,600	13,567	10.0%	2.6%
China ^[95]	47 ^[Notes 13]	47	0	22	0 to 4,000	24,409	2.2%	4.6%
India ^[95]	3	6	1 ^[Notes 14]	0	0 to 43	68	0.14%	0.013%
Pakistan ^[95]	2	6 ^[Notes 15]	0	0	1 to 32	51	0.095%	0.0096%
North Korea ^[95]	3	3	0	0	1 to 7	12	0.14%	0.0023%
Totals	2116	2471	188	542	0 to 50,000	540,738		

1. Including salvo tests counted as a single test.
2. Detonations include zero-yield detonations in safety tests and failed full yield tests, but not those in the accident category listed above.
3. As declared so by the nation testing; some may have been dual use.
4. Defined as these classes of tests: atmospheric, surface, barge, cratering, space, and underwater tests.
5. Including five tests in which the devices were destroyed before detonation, and the combat bombs dropped on Japan in World War II.
6. Includes both application tests and research tests at NTS.
7. When the yield reads " < 20 kt" this total assumes the yield was half the maximum, i.e., 10 kt.
8. Includes the test left behind in Semipalatinsk and 13 apparent failures not in the official list.
9. 124 applications tests and 32 research tests which helped design better PNE charges.
10. Includes the 31 Vixen tests, which were safety tests.
11. Including two possible safety tests in 1978, which don't appear or other lists.
12. Four of the tests at In Ekker were the focus of attention by APEX (Application pacifique des expérimentations nucléaires). They even gave them different names, causing confusion.
13. Includes one bomb destroyed before detonation by a failed parachute.
14. Indira Gandhi, in her capacity as India's Minister of Atomic Energy; at the time, declared the *Smiling Buddha* test to have been a test of the peaceful uses of atomic power.
15. There is some uncertainty as to exactly how many bombs were exploded in each of Pakistan's tests. It could be as low as three altogether or as high as six.

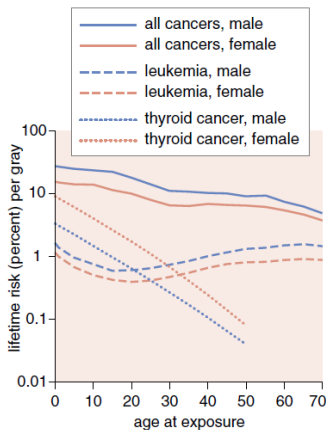


Ábra A ¹³¹I radioaktív izotóp bekerülési útvonala a szervezetbe



Az 1954 március 1-én felrobbantott BRAVO nevű 16 megatonnás hidrogénbomba robbantás az összes nukleáris robbantás között a legnagyobb lakossági besugárzást. A rosszul becsült széljárás és a tervezettnél magasabb robbanási energia következtében a Bikini atollról kihullást okozott a Marshall szigetek Rongelap, Ailinginae, Rongerik és Utrik lakott atolljain. Rongelap és Ailinginae atollokon a külső besugárzás dózisos 1-2 Gy értékűek voltak.

Fallout-pdf.pdf letöltve 2017 július 27



radionuclide	half-life	Nevada Test Site fallout			global fallout		
		thyroid or red bone marrow external dose (mGy)	thyroid internal dose (mGy)	red bone marrow internal dose (mGy)	thyroid or red bone marrow external dose (mGy)	thyroid internal dose (mGy)	red bone marrow internal dose (mGy)
carbon-14	5730 y	-	-	-	-	0.1	0.1
cesium-137	30 y	0.01	0.009	0.009	0.3	0.1	0.1
strontium-90	28.5 y	-	-	0.02	-	0.0009	0.2
					[0.002] ^a	[0.5] ^a	
tritium	12.3 y	-	-	-	-	0.07	0.07
antimony-125	2.7 y	-	-	-	0.03	-	-
ruthenium-106	368 d	-	0.001	0.002	0.04	-	-
manganese-54	313 d	-	-	-	0.04	-	-
cerium-144	284 d	-	-	-	0.02	-	-
zirconium/niobium-95	64 d	0.08	-	-	0.2	-	-
strontium-89	52 d	-	0.001	0.03	-	-	-
ruthenium-103	39 d	0.03	-	-	0.02	-	-
cesium-136	13 d	-	0.002	0.002	-	-	-
barium/lanthanum-140	13 d	0.2	-	0.006	0.05	-	-
iodine-131	8 d	0.02	5	0.001	-	0.4	0.00009
			[30] ^a			[2] ^a	[0.0002] ^a
tellurium/iodine-132	3.3 d	0.1	0.06	0.001	-	-	-
neptunium-239	2.4 d	0.02	-	-	-	-	-
iodine-133	0.9 d	0.02	0.04	-	-	-	-
zirconium/niobium-97	17 h	0.02	-	-	-	-	-
rounded totals:		0.5	5	0.1	0.7	0.7	0.6
			[30] ^a			[2] ^a	[0.9] ^a

Rákos kockázatok(%) 1Gy dózisra vonatkoztatva az életkor függvényében az USA robbantások környezetében lévő lakosságánál a robbantási kísérletek során a fontosabb radioaktív izotópok esetén

Fallout-pdf.pdf letöltve 2017 július 27

Nukleáris fegyverek szállítása

Több mint 10 baleset megtörténte ismert, beleértve azokat a repülőgép baleseteket is, ahol a repülőgép nukleáris fegyvert vagy ezek komponenseit szállította. A két legismertebb a Spanyolországban és Grönlandon, az amerikai légierő kötelékében történt eset.

A spanyolországi Palomaresnál 1966. január 17-én két USA katonai gép összeütközött, levegőben történt üzemanyag felvétel közben. Ennek során 2,26 km² nagyságú (műveletlen ill. lakott) terület ²³⁹Pu és ²⁴⁰Pu izotópokkal elszennyeződött. Két bomba eltűnt (a száraz folyóágyba, ill. a tengerbe zuhant). Az ellenőrzések után, ahol az alfa-sugárzók szennyezettsége 1,2 MBq·m⁻²-nél nagyobb volt (22 ezer m²), a szennyezett növényzetet és a 10 cm vastag felső talajréteget összegyűjtötték, válogatták, illetve radioaktív hulladékként kezelték. Ahol a szennyezettség kisebb volt mint 1,2 MBq·m⁻², öntöztek és 30 cm mélyen felszántották a talajt.

Grönlandon, Thule közelében repülőgép összeütközés következtében 4 bomba nagy robbanóképességű komponensei robbantak fel és 0,2 km²-t elszennyeztek. Összesen 10 TBq plutónium betérítette a hótakaró felső rétegét és kb. 1 TBq a jégbe került. Nyáron, a jég elolvadásakor a tengeri környezetben, 20 km-es távolságban is mérni lehetett a szennyezést. Jelenleg is folyik az ellenőrzés, többek közt a legközelebb lakók vizelete plutónium aktivitásának mérésével.

A tengeri balesetekből kifolyólag legalább 48 nukleáris fegyver és 11 atommeghajtásra használt reaktor fekszik az óceán alján. A legsúlyosabb eset két atommeghajtású tengeralattjáró elsüllyedése, amelyek mindegyikén nukleáris fegyverek is voltak. Az egyik 1986. októberében Bermuda partjainál, a másik 1989. áprilisában a Norvég-tengerbe süllyedt el. 1965-ben Japán mellett egy 1 M tonnás hidrogénbomba kioldódott és a tengerbe esett. Mindezek környezeti hatásáról kevés információ van, a közeli tengervíz és szedimentum azonban ellenőrzés alatt áll.

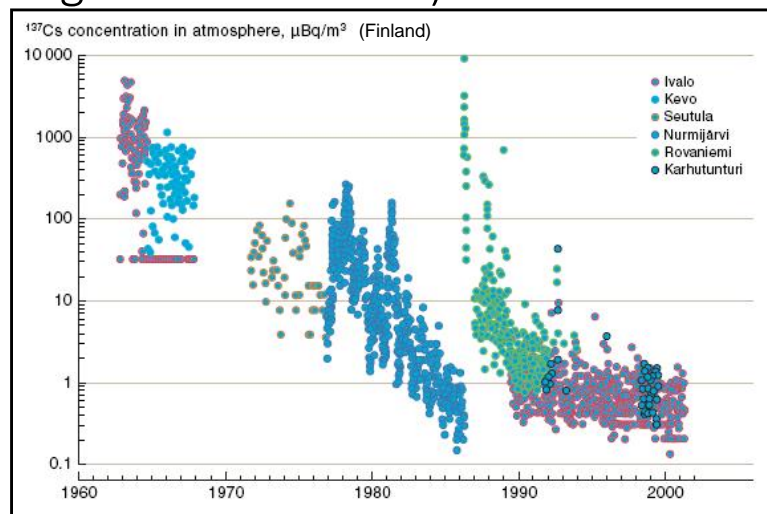
A tengerek szennyezettsége az atomfegyverkezés radioaktív hulladékainak elhelyezéséből is származhat. A korábbi Szovjetunió elsősorban az Északi Jeges-tengerben rakta le radioaktív hulladékát, az USA a nyugati partvidékén, de Nyugat-Európa is rendelkezik tengeri lerakóhelyekkel, elsősorban az Atlanti-óceánban.

Műholdak visszatérése

A Szovjetunióban fellőtt SNAP-9A műhold - energiaforrásként ^{238}Pu -ot tartalmazott - 1964-ben belépett az atmoszférába, elégett és 600 TBq aktivitással szennyezte a sztratoszférát.

1978. januárjában a Kozmosz-954 műhold hasonlóan járt. Ez 20 kg uránt tartalmazott és a radionuklidok 75%-a az atmoszféra magas rétegeiben szóródott szét, míg 25% -a Föld felszínén deponált.

Radioaktív kontamináció - Finnország (mesterséges radioaktivitás)



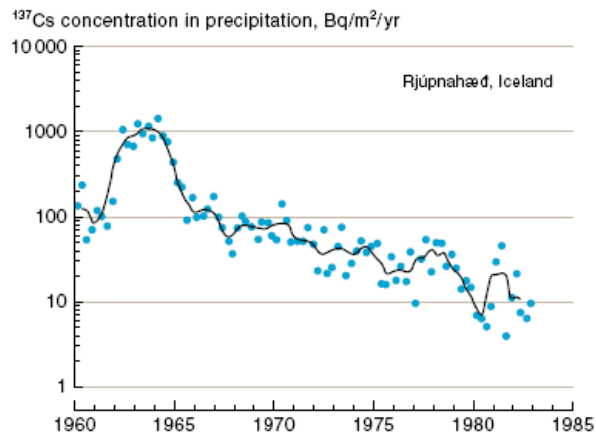


Figure 3-2. Activity concentrations of ^{137}Cs in precipitation at Rjúpnahæð (near Reykjavík). The points are quarterly measurements and the line a four-period moving average.

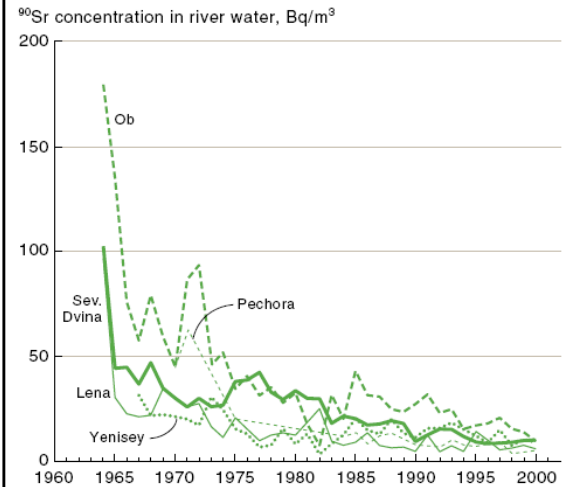


Figure 3-12. Changes in ^{90}Sr activity concentrations in Russian rivers since the mid-1960s.

Táblázat Ipari besugárzó berendezések balesetei

Site, date	Equipment*	Number of victims	Exposure level and duration	Affected organs and tissues	Dose received (Gy), site	Medical effects
Forbach, August 1991	EA	2	several deciGy/second	Hands, head, trunk	40, skin	Burns affecting 25–60% of body area
Maryland, December 1991	EA	1	?	Hands	55, hands	Bilateral finger amputation
Viet nam, November 1992	EA	1	1,000 Gy/minute	Hands	1.5, whole body	Amputation of the right hand and a finger of the left hand
Italy, May 1975	CI	1	Several minutes	Head, whole body	8, bone marrow	Death
San Salvador, February 1989	CI	3	?	Whole body, legs, feet	3–8, whole body	2 leg amputations, 1 death
Israel, June 1990	CI	1	1 minute	Head, whole body	10–20	Death
Belarus, October 1991	CI	1	Several minutes	Whole body	10	Death

* EA: electron accelerator CI: cobalt-60 irradiator.

Source: Zerbib 1993; Nénot 1993.

Végezetül gyógyászati és tudományos dolgozók a sugárforrások elkészítése, kezelése során besugárzást szenvedhetnek el bő, vagy a radioaktív anyag belégzésével. Ez besugárzási esemény előfordulhat nukleáris intézményekben is.

Egészségügyi vonatkozások Temporal patterns

250 mSv egésztest, vagy 6 Sv bőrfelületet, vagy egyéb szervet ért 750 mSv dóziséú besugárzás fölött az USA-ban balesetként kell az eseményt rögzíteni. Accidents that are of interest from the point of view of public health but which resulted in lower exposures are thus excluded (see below for a discussion of the consequences of exposure).

Elyelt dózis Egyenérték dózis Effektív dózis Kollektív dózis

Az 1944-1988 időszakot vizsgálva 1980-tól nőtt a besugárzási balesetek gyakorisága és a besugárzást elszenvedett személyek száma is (táblázat).

Táblázat Besugárzási balesetek a Földön az Oak Ridge (USA) baleseti nyilvántartása szerint (worldwide, 1944-88)

	1944-79	1980-88	1944-88
Total number of accidents	98	198	296
Number of individuals involved	562	136,053	136,615
Number of individuals exposed to doses exceeding exposure criteria*	306	24,547	24,853
Number of deaths (acute effects)	16	53	69

* 0.25 Sv for whole-body exposure, 6 Sv for skin exposure, 0.75 Sv for other tissues and organs.

Besugárzást elszenvedett populációk

Két csoportra oszthatók a foglalkozási és a lakossági csoportokra. Au United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 1993) 4 millió főre teszi a foglalkozás során 1985-1989 között besugárzást kapó emberek számát, ezen belül 20% volt a nukleáris energiatermelés különböző helyein foglalkoztatott emberek száma. A NAÜ tagországaiban 1992-ben 760 besugárzó készülék működött, 600 elektrongyorsító és 160 gamma besugárzó készülék.

Táblázat Foglalkozás besugárzások száma (ezer)

Activity	1975-79	1980-84	1985-89
Nuclear fuel processing*	560	800	880
Military applications**	310	350	380
Industrial applications	530	690	560
Medical applications	1,280	1,890	2,220
Total	2,680	3,730	4,040

* Production and reprocessing of fuel: 40,000; reactor operation: 430,000.

** including 190,000 shipboard personnel.

Source: UNSCEAR 1993.

Egészségügyi hatások**Ionizáló sugárzások közvetlen egészségügyi hatásai**

Általában az ionizáló sugárzások egészségügyi hatásai jól ismertek és a kapott dózistól és a besugárzás idejétől (dózisintenzitás) függenek.

Determinisztikus hatások

Adott küszöbdózis felett, nagyobb dózisok esetén jelentkeznek. A hatás arányos a dózis nagyságával, de a küszöbdózis szervfüggő (táblázat).

Tissue or effect	Equivalent single dose received at the organ (Sv)
Testicles:	
Temporary sterility	0.15
Permanent sterility	3.5-6.0
Ovaries:	
Sterility	2.5-6.0
Crystalline lens:	
Detectable opacities	0.5-2.0
Impaired vision (cataracts)	5.0
Bone marrow:	
Depression of haemopoiesis	0.5

Source: ICRP 1991.

Táblázat Determinisztikus hatások: küszöbdózisok szervenként

Determinisztikus hatások helyi, intenzív besugárzásoknál fordulnak elő, így külső besugárzásoknál, közvetlen bőrkontaktusnál, vagy bőr kontamináció esetén. Minden esetben sugáregés a következménye. Ha a lokális dózis 20-25 Gy szövet üszkösödés léphet fel. Akut besugárzás tünetei emésztési rendellenességek (hányinger, hányás, hasmenés) jelentkeznek és különböző mértékű csontvelő pusztulás kezdődhet, ha az átlagos egészséges besugárzási dózis meghaladja az 500 mGy(1,5Gy) értéket. Gyakran az egészséges és a lokális besugárzás együtt léphet fel. 60 dolgozóból 6 fő kapott besugárzást egy kritikussági balesetben egy reprocesszáló üzemben. A halottak 3-45 Gy, a túlélők 0,1-7Gy közötti dózisokat kaptak. A túlélőknél akut besugárzási tüneteket, gyomor-bélrendszeri és hematológiai hatásokat, mindkét szemén szürkehályogot, amutációt igénylő végtagok üszkösödését figyeltek meg.

A csernoili baleset során –védeleszközök híján –a személyzet és a mentőalakulatok tagjai magas béta-gamma sugárdózisokat kaptak a baleset első óráiban. 500 ember került kórházba, 237 ember akut besugárzási tüneteket mutatott, és 28 ember halt meg a kezelések ellenére. Többen a későbbiek során bőr rendellenességekkel küzdöttek.

Severity of AIS	Equivalent dose (Gy)	Number of subjects	Number of deaths (%)	Average survival period (days)
I	1–2	140	–	–
II	2–4	55	1 (1.8)	96
III	4–6	21	7 (33.3)	29.7
IV	>6	21	20 (95.2)	26.6

Táblázat A csernobili baleset során akut besugárzási tüneteket mutatott emberek csoportjai

Source: UNSCEAR 1988.

Táblázat Különböző mértékű dózissal előforduló egésztest beruházások eredményei

whole body dose (rad)	number exposed	fatalities (percent)	survival time for fatal cases, median (range)
4,100-12,000	16	16 (100%)	6 d (1.5-38 d)
1,610-4,000	15	15 (100%)	14 d (2-207 d)
610-1,600	48	35 (73%)	24 d (10-750 d)
410-600	50	15 (30%)	34 d (16-48 d)
110-400	142	5 (4%)	49 d (37-96 d)
10-100	84	0 (0%)	N/A

Stochasztikus hatások

Ezek valószínűségi természetűek. Nincs alsó küszöbdózisuk és a nagyobb dózissal nő az előfordulások gyakorisága. A fontosabb sztochasztikus hatások:

- Mutáció. Állatkísérletekben figyelték meg de emberekre nehézkes vonatkoztatni.
- Rákbetegségek. Sugárterápiával kezelt emebereken és a Hiroshimai és Nagaszaki-i túlélőkön vizsgálták a besugárzás hatására kifejlődött rákbetegségeket. A lappangási periódus 5-15 év a besugárzás után szervtől és szövetből függően (táblázat). Az atomtámadások túlélőinek vizsgálata alapján 0,2 Sv dózis fölött megfigyelhető volt a rákos betegségek számának növekedése.
- Különböző jóindulatú daganatok, jóindulatú pajzsmirigy daganatok.

Az kis dózisu besugárzások esetén két fontos ellentmondás létezik.

Az első tisztázatlan kérdés az, hogy az alacsony besugárzási dózisoknak (<0,2 Sv) milyen hatása van? Lehetséges-e a kis dózisok tartományába extrapolálni a nagyobb dózisoknál nyert eredményeket? Ez a kérdés a mai napig nem tisztázott!

A második ellentmondás az, hogy létezik-e egy olyan küszöbdózis, mely alatt nincs kimutatható károsodás? Ez is viták tárgya.

Cancer site	Hiroshima/Nagasaki		Other studies No. positive/ total No. ¹
	Mortality	Incidence	
<i>Haematopoietic system</i>			
Leukaemia	++	++	6/11
Lymphoma (not specified)	+		0/3
Non-Hodgkin lymphoma		++	1/1
Myeloma	+	+	1/4
Oral cavity	+	+	0/1
Salivary glands		++	1/3
<i>Digestive system</i>			
Oesophagus	++	+	2/3
Stomach	++	++	2/4
Small intestine			1/2
Colon	++	++	0/4
Rectum	+	+	3/4
Liver	++	++	0/3
Gall bladder			0/2
Pancreas			3/4
<i>Respiratory system</i>			
Larynx			0/1
Trachea, bronchi, lungs	++	++	1/3
<i>Skin</i>			
Not specified			1/3
Melanoma			0/1
Other cancers		++	0/1
Breast (women)	++	++	9/14
<i>Reproductive system</i>			
Uterus (non-specific)	+	+	2/3
Uterine body			1/1
Ovaries	++	++	2/3
Other (women)			2/3
Prostate	+	+	2/2

Táblázat Epidemiológiai vizsgálatok eredményei nagy dózisu külső besugárzások rákkeltő hatásáról

<i>Urinary system</i>			
Bladder	++	++	3/4
Kidneys			0/3
Other			0/1
Central nervous system	+	+	2/4
Thyroid		++	4/7
Bone			2/6
Connective tissue			0/4
All cancers, excluding leukaemias			1/2

+ Cancer sites studied in the Hiroshima and Nagasaki survivors.

* Positive association with ionizing radiation.

¹ Cohort (incidence or mortality) or case-control studies.

Source: UNSCEAR 1994.

Egyéb hatások

Végül a terhes nők besugárzásával kapcsolatos lehetséges teratogén hatások említendők. Az atombomba támadásokban szenvedő terhes nőknél a gyermekek kisfejlését és mentális visszamaradottságát figyelték meg, ha a terhesség első harmadában 0,1 Gy dózis fellei besugárzást kaptak. Vita van arról, hogy ez a hatás determinisztikus, vagy sztochasztikus, bár az adatok küszöbdózis jelenlétét mutatják.

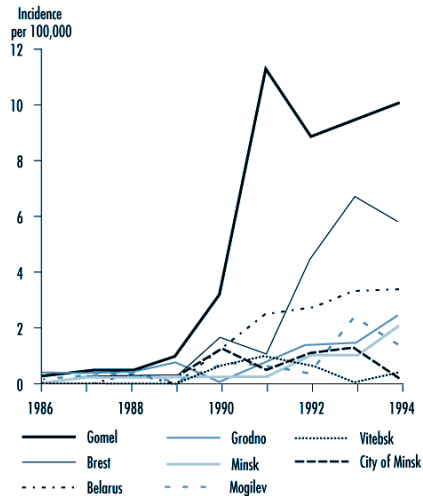
A csernobili baleset után megfigyelt hatások

10 évvel a legnagyobb nukleáris baleset után sem tudják egyértelműen meghatározni a nagyobb besugárzásokat szenvedett emberek egészségügyi károsodását. Ennek okai:

- Néhány hatás csak többéve eltelttel jelentkezik, például a szilárd szövetek rák betegsége csak a besugárzást követő 10-15 évben jelentkezik.
- A baleset után azonnal jelentkező hatások egy részét a később kezdődött egészségügyi vizsgálatok során már nem észlelték.
- A rákosodási kockázatra vonatkozó mennyiségi adatokat az idő függvényében nem gyűjtötték. Például a pajzsmirigyet károsító (tellúr-132, jód-133) izotópok kezdeti kibocsátási értékeit nem mérték.
- Számos besugárzást kapott ember eltávozott a térségből és kiesett a további megfigyelésből.

A sugárzás által érintett területeken viszont a gyerekpopulációt érintő pajzsmirigyrák gyakorisága 10-szeresre növekedett a legszenyzeztebb részeken.

Ábra 15 év alatti gyermekek pajzsmirigyrák megbetegedése Belorussziában



*Incidence: number of new cases of a disease during a given period, expressed as a fraction of the exposed population.

Táblázat Gyermekek pajzsmirigyrák megbetegedése Belorussziában, Ukrajnában és Oroszországban 1981-1994

	Incidence* (/100,000)		Number of cases	
	1981-85	1991-94	1981-85	1991-94
Belarus				
Entire country	0.3	3.06	3	333
Gomel area	0.5	9.64	1	164
Ukraine				
Entire country	0.05	0.34	25	209
Five most heavily contaminated areas	0.01	1.15	1	118
Russia				
Entire country	?	?	?	?
Bryansk and Kaluga areas	0	1.00	0	20

Pszichoszociális hatás

A lakosságot ért traumák (kitelepítés, ideiglenes szállás, változó életkörülmények) hatása nagy valószínűséggel jelentős. A csernobili és a fukushimai balesetek során kitelepített emberek között, főleg az idősebb korosztályoknál számos haláleset előfordult, mely kapcsolatba hozható a nukleáris balesettel. Emellett tömegesen komoly pszichológiai problémák merültek fel a kitelepítettek között.

Nukleáris és radiológiai balesetek megelőzése

Sugárforrások ipari és orvosi alkalmazása

Bár a legnagyobb sugár-balesetek az atomerőművi balesetek körébe tartoznak, a sugárforrások alkalmazása sajnos sokszor súlyos következményekkel jár. Sajnos a nagy dózisu besugárzásokkal kapcsolatos események növekvő számára számíthatunk. A megelőzés alapja a karbantást érző alkalmazottak megfelelő képzése, a sugárforrás jellemzőinek és elhelyezkedésének ismertetése. A NAÜ biztonsági útmutatókat és irányelveket állított össze az iparban, gyógyászatban és kutatásban alkalmazott sugárforrások alkalmazásához.

Atomerőművek sugárbiztonságának biztosítása (IAEA Safety Series No. 75, INSAG-3)

A fő cél a környezet és az emberek védelme a radioaktív anyagok kibocsátásától minden körülmények között. Ezért a tervezés, az építés, az üzemelés és felszámolás során megfelelő intézkedéseket kell végrehajtani a biztonságért. Az atomerőmű biztonsága a mélységi védelem elvén nyugszik, melyben a rendszerek és eszközök redundanciája biztosítja mindenféle technikai és emberi hiba ellensúlyozását. Konkrétan a radioaktív anyagot megfelelő gátak egymás utáni sorozatával izolálják a környezettől. A legutolsó gát a biztonsági tartály, vagy konténment.

Ezen gátak áttörését és az esetleges következmények hatásának mérséklését a következő három biztonsági intézkedéssel akadályozzák meg, illetve biztosítják az erőmű működése során:

1. A magreakciók megfelelő ellenőrzésével,
2. A forró fűtőelemek megfelelő és kielégítő hűtésével, és
3. A radioaktív anyagok megfelelő elszigetelésével.

Egy másik alapvető biztonsági elv a műveleti tapasztalatok elemzése ("**operating experience analysis**"), azaz a korábbi bárhol előfordult, bármilyen kicsi események alapos elemzése és a tapasztalatok alapján végrehajtott változásokkal az adott erőműben a biztonság növelése. Így a Three Mile Island-i és a Csernobili balesetek alapján számos módosítást vezettek be, hogy hasonló baleset ne fordulhasson elő.

Végül jelentős erőfeszítéseket tettek a biztonsági kultúra növelésére a szervezésben, a tevékenységekben és a gyakorlatban, valamint az egyéni tevékenységekben. Az átláthatóság növelésére bevezették a nemzetközi nukleáris eseményskálát (INTERNATIONAL SCALE OF NUCLEAR EVENTS, INES), mellyel a földrengések és tornádók hatásainak értékeléséhez hasonlóan a nukleáris és radiológiai események súlyosságát is rangsorolják. Ugyanakkor az INES skála (0-7) nem alkalmas a nukleáris biztonság értékelésére.

A lakosságvédelem alapelvei

A lakosság besugárzásának megakadályozása, illetve korlátozása során főleg a determinisztikus hatások elkerülése a cél.

Az első alkalmazandó tevékenységek a kitelepítés, elzárkóztatás és a jódtabletták kiosztása. Az inaktív jód alkalmazása során a pajzsmirigyet inaktív jóddal telítve, megakadályozzuk a radioaktív jód felvételét. A hatékonysághoz feltétlen szükséges a tabletták bevétele a besugárzás előtt, illetve közvetlenül a besugárzás idején.

Végezetül ideiglenes, vagy végleges kitelepítés, dekontamináció és a mezőgazdasági és élelmiszeripari forgalom ellenőrzése hasonlóan fontos. Mindegyik intézkedésnek létezik megfelelő beavatkozási (elkerülhető dózis) szintje, mely nem összekeverendő a személyzet és a lakosság számára meghatározott nem-baleseti körülményekre meghatározott dóziskorlátokkal.

Táblázat Lakossági védelmi intézkedések küszöbértékei (elkerülhető többlet dózisos)

Protective measure	Intervention level (averted dose)
Emergency	
Containment	10mSv
Evacuation	50mSv
Distribution of stable iodine	100mGy
Delayed	
Temporary resettlement	30mSv in 30days; 10mSv in the next 30days
Permanent resettlement	1Sv lifetime

Source: IAEA 1994.

A mélységi védelem szintjei

Levels of Defence-In-Depth

Levels	Objectives	Essential means	Category
Level 1	Prevention of abnormal operations and failures	Conservative and high quality in <ul style="list-style-type: none"> □ design □ construction □ operation 	PREVENTION
Level 2	Control of abnormal operations and detection of failures	<ul style="list-style-type: none"> □ Control systems □ Protection systems □ Associated surveillance programme 	
Level 3	Control of accidents	<ul style="list-style-type: none"> □ Engineered safety features 	MITIGATION
Level 4	Control of severe plant condition (accident progression) and mitigation of consequences	<ul style="list-style-type: none"> □ Procedures for accident management • Complementary measures • Accident management 	
Level 5	Mitigation of radiological consequences 'on release of radioactive material'	<ul style="list-style-type: none"> □ Off-site emergency response 	EMERGENCY PREPAREDNESS

List of Instruments and Equipment, and Protective Gear for Specialised Response Teams

S.No.	Equipment and Instruments
1	Ambulance with radiation monitoring and decontamination facility
2	Portable gamma ray spectrometer for isotope detection
3	Requirement for aerial survey monitoring: <ul style="list-style-type: none"> (a) Aerial monitoring system (b) Monitors, protective equipment, PC/laptop, etc.
4	Environmental Radiation Monitor with Navigational Aid (ERMNA) with monitoring vehicle
5	Alpha, beta and gamma counting setup
6	Digital dosimeter
7	GPS for monitoring van
8	T.L. dosimeter
9	Portable contamination monitor
10	CBRN suit with respirator, rubber clothes, gloves and gum boots
11	Dust mask
12	Comfo respirator
13	Decontamination kit including monitoring facility
14	Potassium Iodide/Potassium Iodate tablets
15	Operational manuals for all equipment training and guidance literature
16	Protective coverall, cotton gloves, caps, socks and shoes
17	Electric generator
18	Torch
19	Binoculars
20	Miscellaneous sampling kits: (a) Charcoal papers and cartridges (for iodine sampling/protection) <ul style="list-style-type: none"> (b) Plastic sheets (for packing of contaminated material) (c) Spare batteries
21	Micro R Survey meter
22	Mini Rad meter
23	GM Survey meter
24	Teletector
25	Portable Alpha Contamination monitor
26	First aid kits
27	Radiation tags/symbols
28	PA system
29	Battery operated air sampler with filter paper
30	Cordoning tape
31	Tongs (2 ft) and lead flask of 1" thickness and 5" diameter
32	Breathing apparatus set with spare cylinders

Mentő és beavatkozó egységek berendezéseinek és eszközeinek listája

Sugársérülések (Somlai János: Esetek, Sugárbaesetek (2008))



M1. kép. Lilo. Egy katonánál a jobb combján a sugárzás hatására kialakult fekély



M12. kép. Yanango. A hegesztő combja a sérülést követő 2. napon



M18. kép. Samut Prakarn. A balesetet követő 23. napon a sugárzás hatására kialakult felhólyagosodások a megduzzadt kézen



M13. kép. Yanango. Kiterjedt sérülés a 10. napon



These photos display the progression of erythema in a patient involved in an x-ray diffraction accident, 9 days to 96 days