

# A sztochasztikus hatások sugárvédelmi vonatkozásai

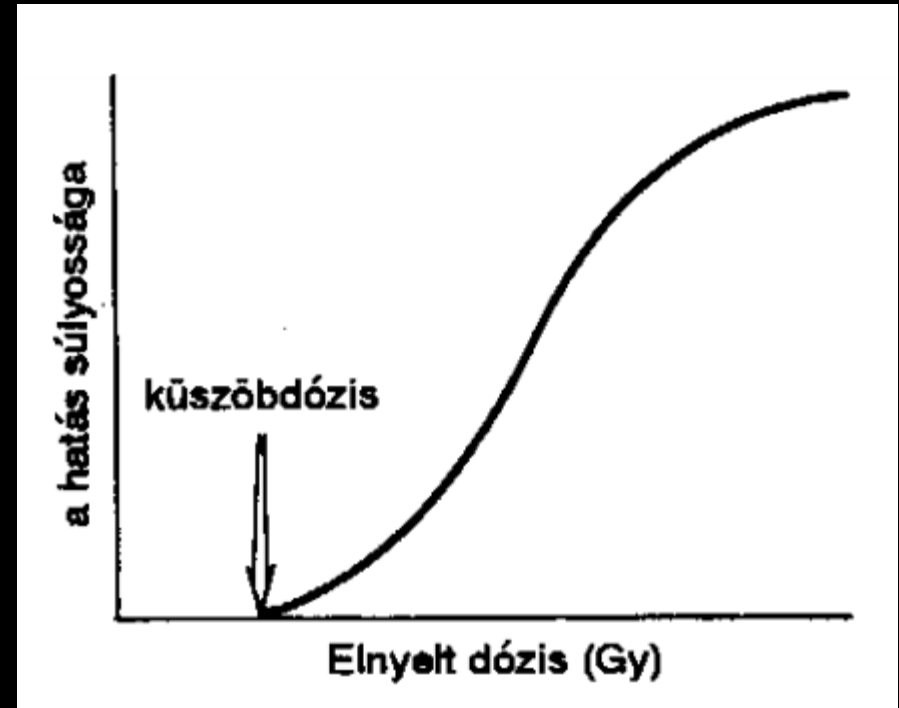
Dr. Sáfrány Géza

Semmelweis Egyetem bővített fokozatú sugárvédelmi tanfolyam, 2026. június 1-4.

# Az ionizáló sugárzás egészségügyi hatásai: determinisztikus károsodások (szöveti reakciók)

- Determinisztikus hatás
  - Sejtpusztulás miatt alakul ki
  - Küszöbdózis megléte
  - Hatás súlyossága függ a dózistól

Példa: akut sugárbetegség  
lokális sugársérülések  
sugárterápia



**Szöveti reakciók:** normál sejtek populációiban bekövetkezett sérülés, amelyet a küszöbdózis megléte és a hatás súlyosságának dóziszfüggése jellemez

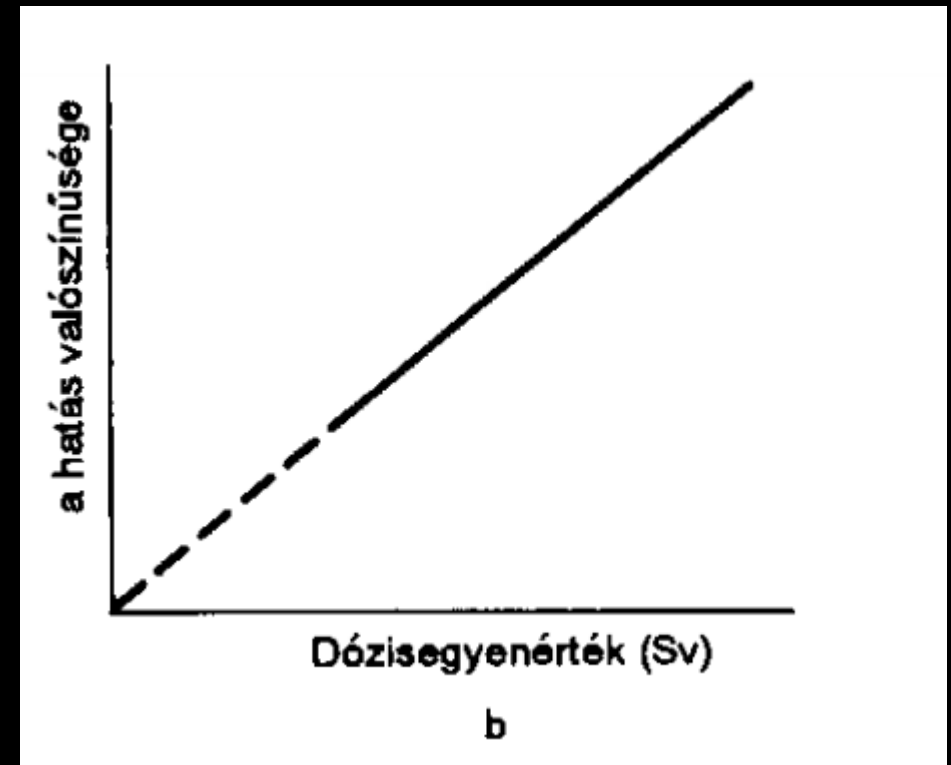
# Az ionizáló sugárzás egészségügyi hatásai: sztochasztikus (véletlenszerű) károsodások

## – Sztochasztikus hatás

- Egyetlen sejtben kialakuló mutáció
- Lineáris, küszöbdózis nélküli hatás
- A hatás kialakulási kockázata függ a dózistól

Példa: daganat kialakulás,  
öröklődő megbetegedések

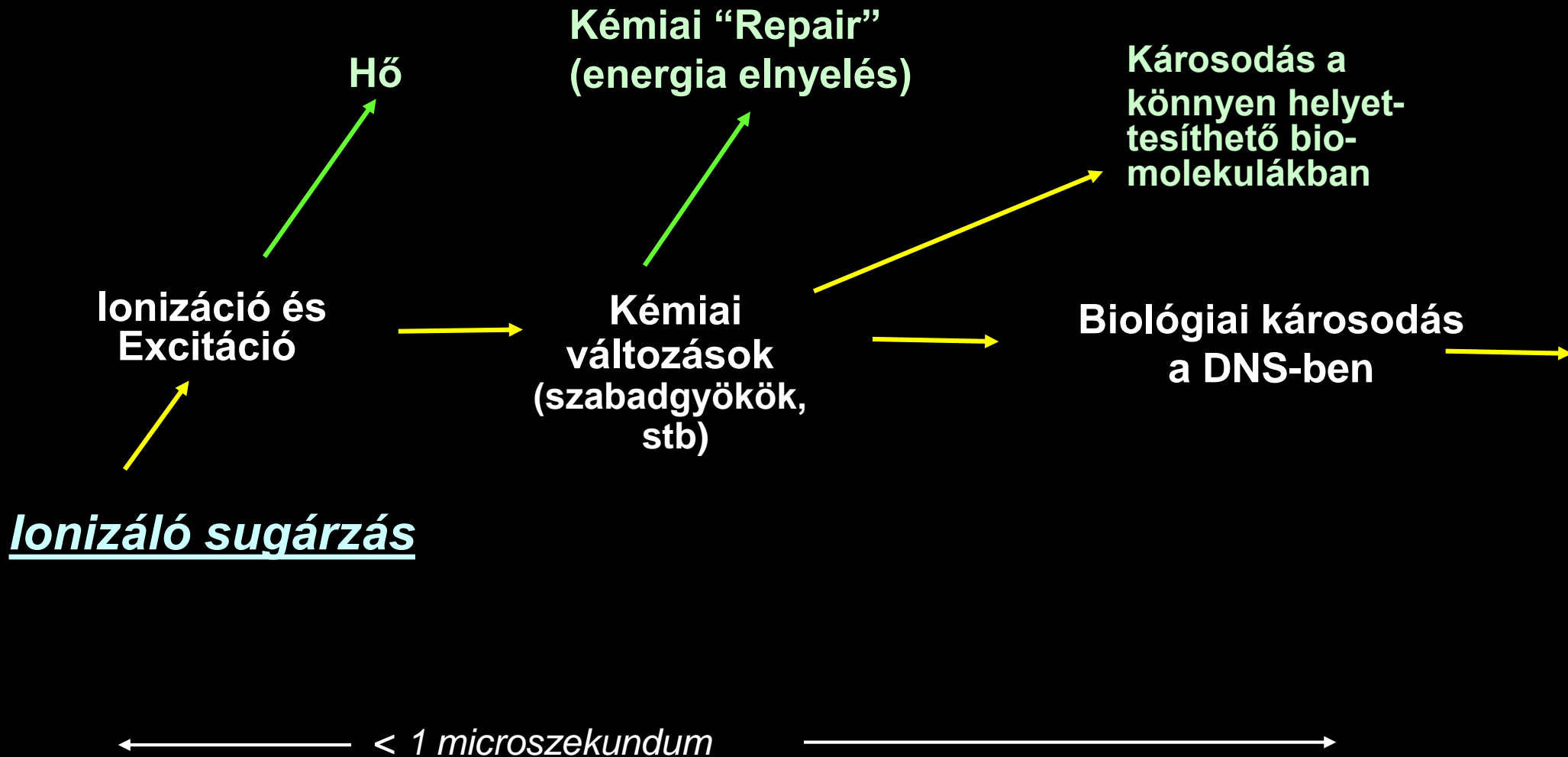
Évtizedes folyamat



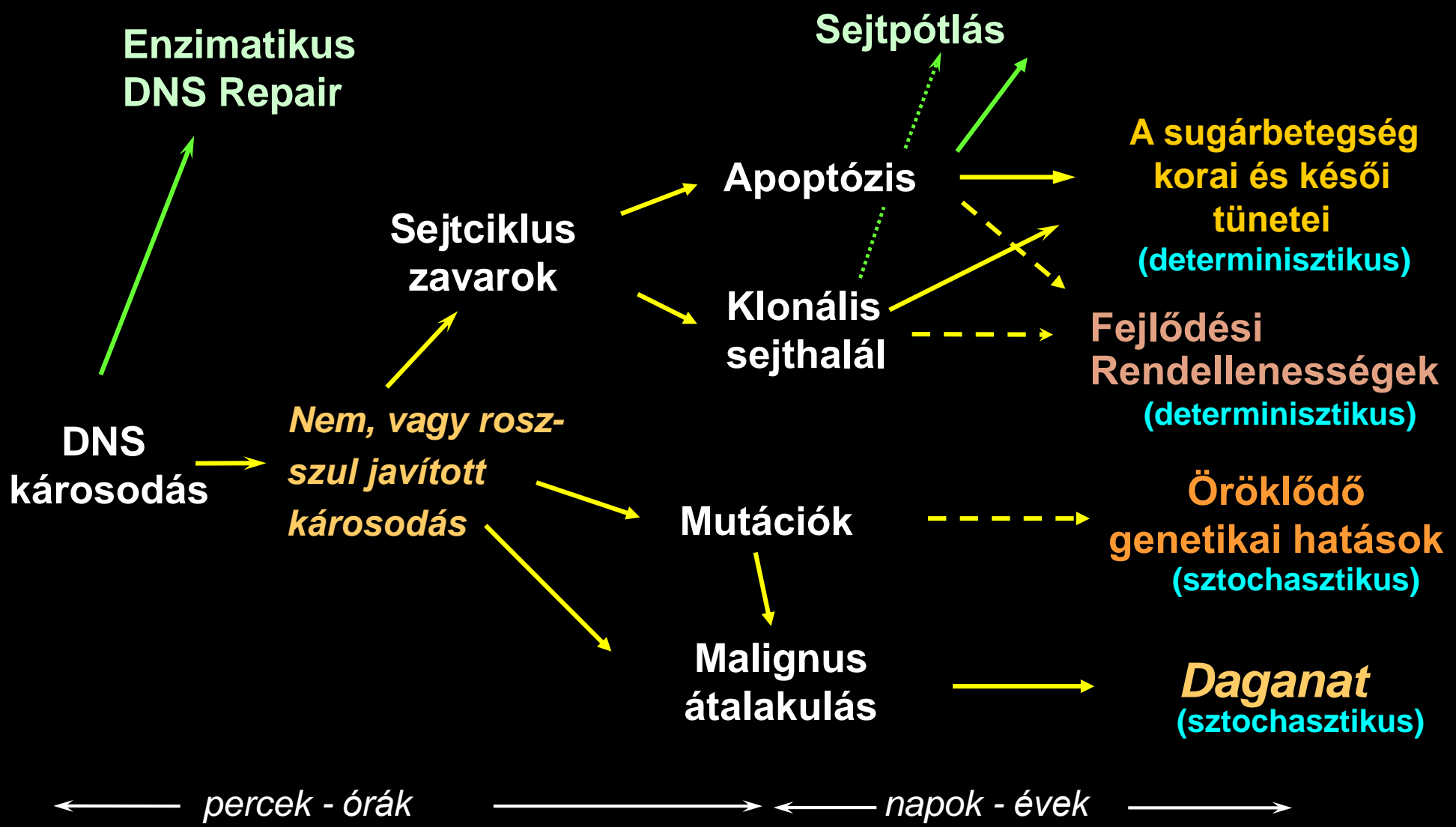
A sztochasztikus hatások meghatározásuk szerint „egyetlen sejt károsodásából eredő hatások, például daganat és öröklődő hatások”.

**A daganat-kialakulás kockázata  $5,7 \times 10^{-2} / \text{Sv}$ .**

# Sugársérülések kialakulási mechanizmusa (1)



# Sugársérülések kialakulási mechanizmusa(2)



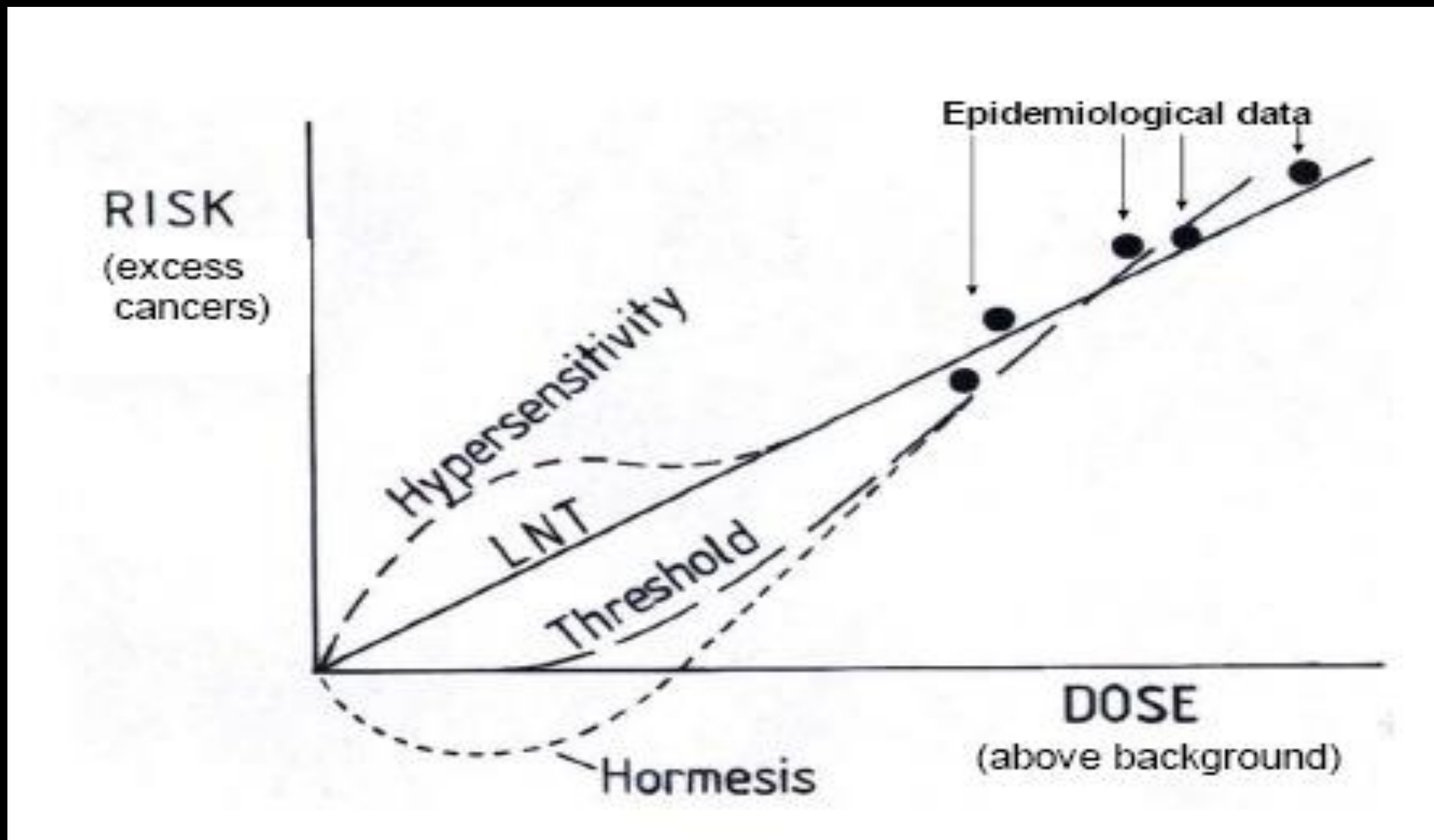
# A kis dózisok sztochasztikus hatásait nem ismerjük?

## Sample size needed to detect tumor induction from radiation (95% certainty)

Whole body dose	Population size required for the study
100 rem (1 Sv)	1,000
10 rem (100 mSv)	100,000
1 rem (10 mSv)	10,000,000

BEIR 1980

## A kis dózisok biológiai hatásaira extrapolációval következtetünk



A jelenleg a lineáris küszöbdózis nélküli modell az elfogadott

Daganatkeletkezés az atomtámadás túlélőiben

# Epidemiológiai alapfogalmak

- **abszolút kockázat (absolut, risk, AR)** - megbetegedés száma, vagy aránya a populációban egy adott időszak alatt.
- **többszörös abszolút kockázat (excess absolut risk, EAR)** - az exponált és a kontroll populáció AR értékeinek a különbsége.
- **relatív kockázat (relative risk, RR)** - hányszor nagyobb az exponáltak megbetegedési/elhalálási kockázata a nem exponáltakhoz viszonyítva (OR - esély hányados).
- **többszörös relatív kockázat (excess relative risk, ERR)** - RR-ből kivonunk 1-et

# A hirosimai, nagaszakii kohort epidemiológiai adatai

RADIATION RESEARCH 177, 229–243 (2012)  
0033-7587/12 \$15.00  
©2012 by Radiation Research Society.  
All rights of reproduction in any form reserved.  
DOI: 10.1667/RR2629.1

Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003:  
An Overview of Cancer and Noncancer Diseases

Kotaro Ozasa,<sup>a,1</sup> Yukiko Shimizu,<sup>a</sup> Akihiko Suyama,<sup>a</sup> Fumiyoshi Kasagi,<sup>a,b</sup> Midori Soda,<sup>a</sup> Eric J. Grant,<sup>a</sup> Ritsu Sakata,<sup>a</sup> Hiromi Sugiyama<sup>a</sup> and Kazunori Kodama<sup>a</sup>

**TABLE 1**  
**Number of LSS Cohort Members by DS02 Dose, City and Sex**

	Subjects with known DS02 dose <sup>a</sup> [weighted colon dose (Gy)]								Unknown <sup>b</sup>	NIC <sup>c</sup>	Total
	Total	<0.005	0.005–	0.1–	0.2–	0.5–	1.0–	2.0+			
Total	86,611	38,509	29,961	5,974	6,356	3,424	1,763	624	7,058	26,529	120,321
Hiroshima	58,494	21,697	22,733	5,037	5,067	2,373	1,152	435	3,442	20,179	82,214
Nagasaki	28,117	16,812	7,228	937	1,289	1,051	611	189	3,616	6,350	38,107
Male	35,687	15,951	12,342	2,382	2,482	1,414	813	303	3,287	11,143	50,175
Female	50,924	22,558	17,619	3,592	3,874	2,010	950	321	3,771	15,386	70,146

*Note.* Among the total of 120,321 subjects, 123 were unavailable for the study because of misidentification or insufficient information.

<sup>a</sup> These numbers exclude the NIC and unknown-dose groups. This group was used for estimating radiation effects.

<sup>b</sup> Those with unknown doses had insufficient location information or were in complex shielding situations where dose could not be estimated reliably.

<sup>c</sup> NIC: Not in the cities of Hiroshima or Nagasaki at the time of bombing.

# Szolid tumor mortalitás dózis függése

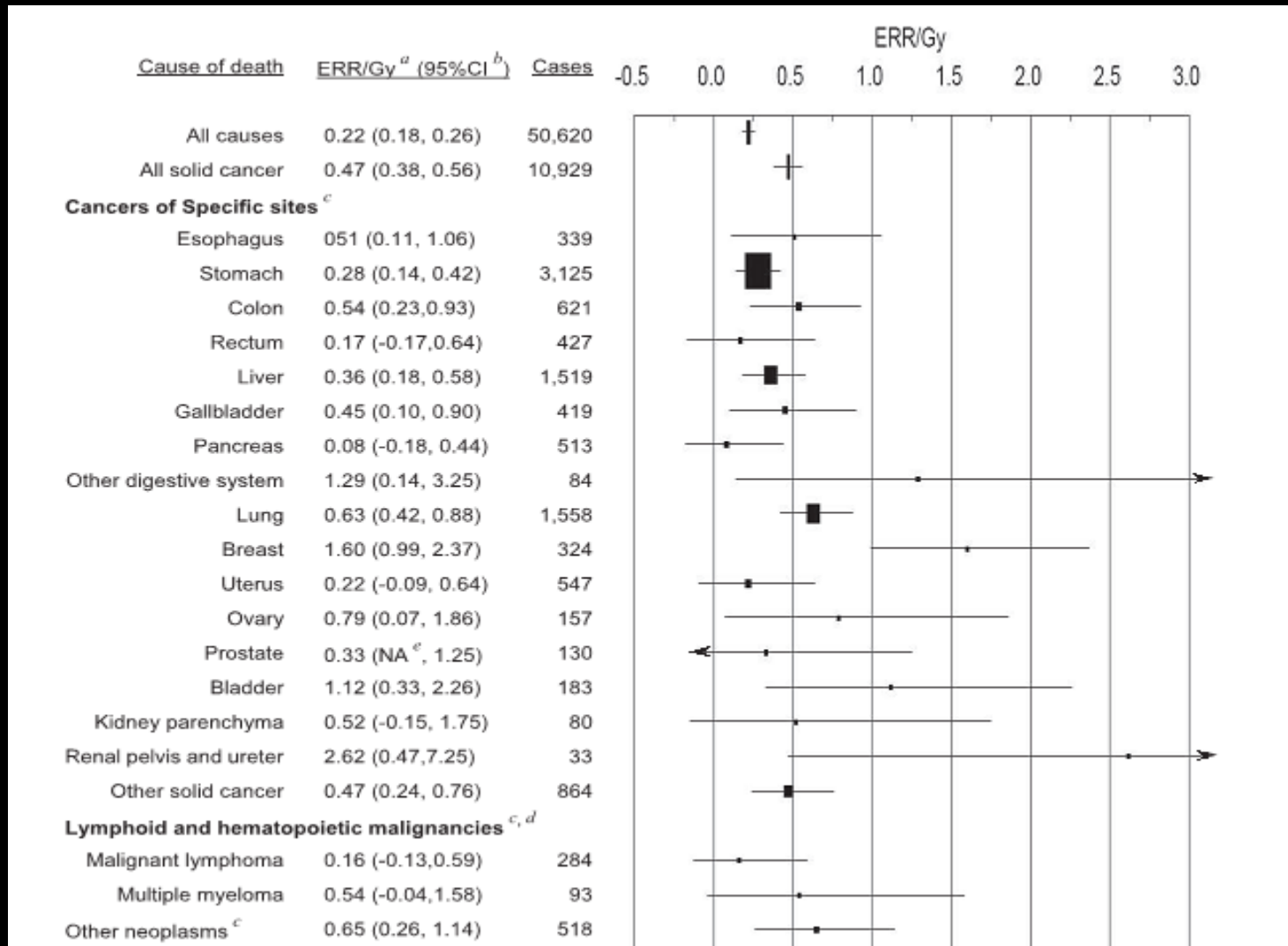
**TABLE 9**  
**Observed and Excess Deaths from Solid Cancer**

Colon dose (Gy)	Number of subjects	Person-years	Solid cancer		
			Number of deaths	Number of excess cases <sup>a</sup>	Attributable fraction (%)
<0.005	38,509	1,465,240	4,621	2	0
0.005–	29,961	1,143,900	3,653	49	1.3
0.1–	5,974	226,914	789	46	5.8
0.2–	6,356	239,273	870	109	12.5
0.5–	3,424	129,333	519	128	24.7
1–	1,763	66,602	353	123	34.8
2+	624	22,947	124	70	56.5
Total	86,611	3,294,210	10,929	527	4.8

<sup>a</sup> Based on the ERR model was defined as the linear model with effect modification:  $\lambda_0(c,s,b,c)$

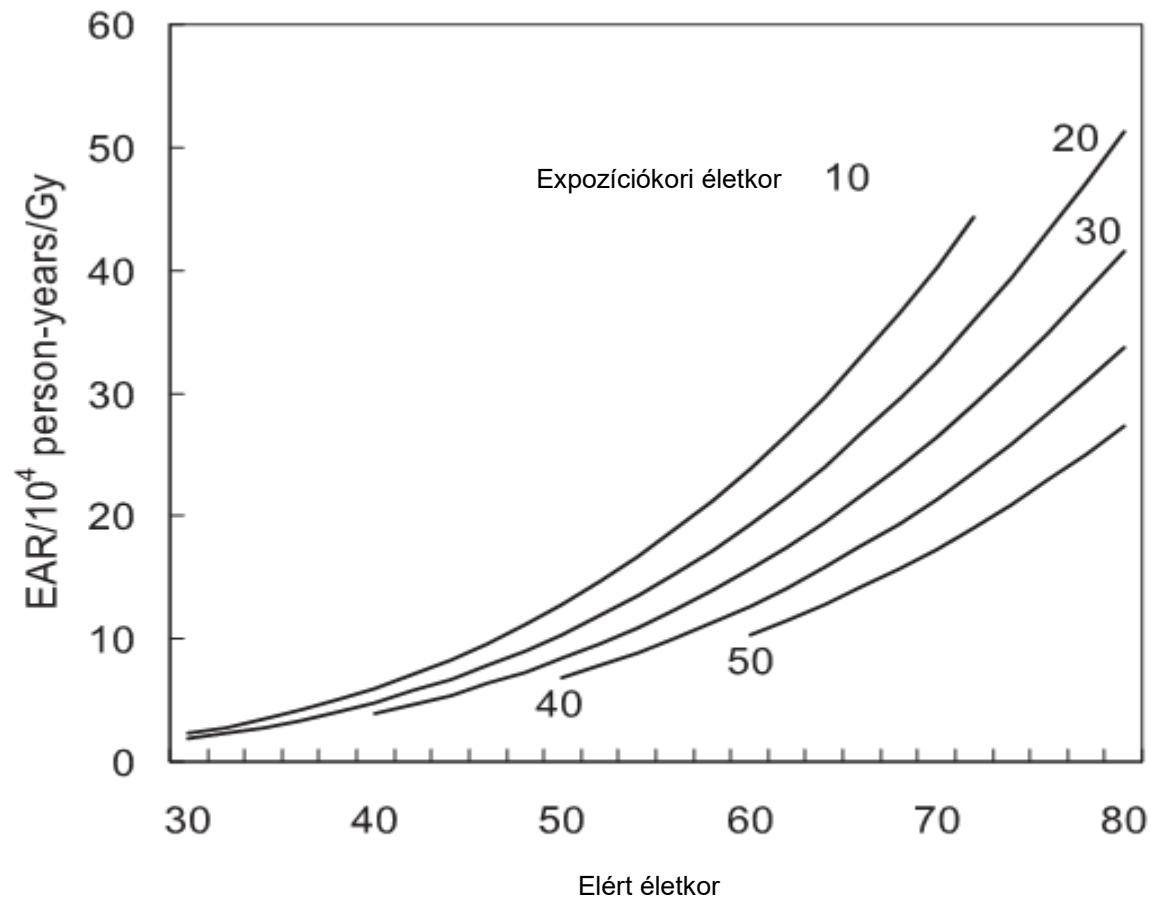
<sup>b</sup> Non-neoplastic blood diseases were excluded from noncancer diseases.

# Sugárhatásra kialakuló daganatok típusa



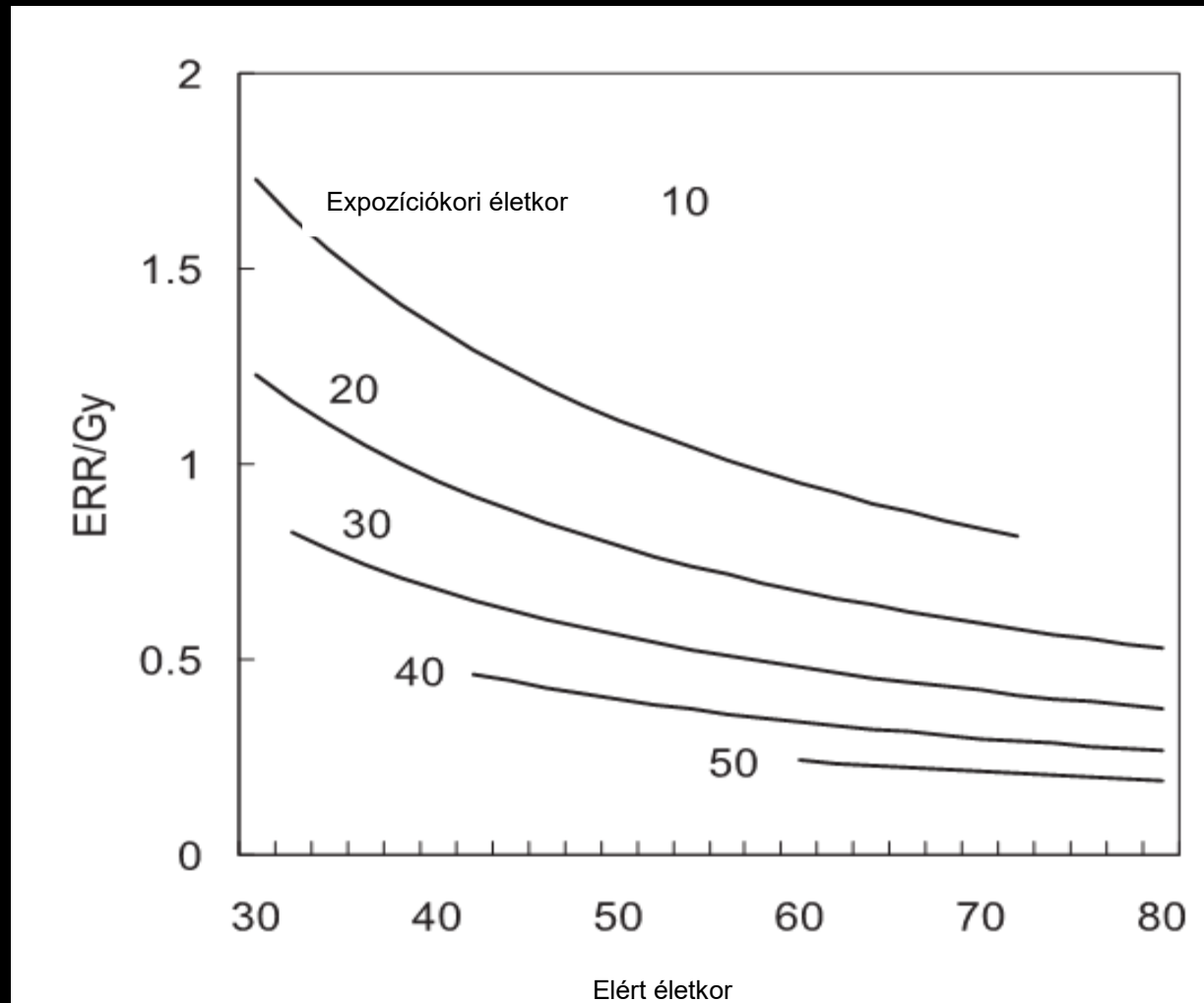
Nincs sugárhatásra specifikus daganat

# Szolid tumor mortalitás az életkor függvényében I: abszolút többlet kockázat alakulása



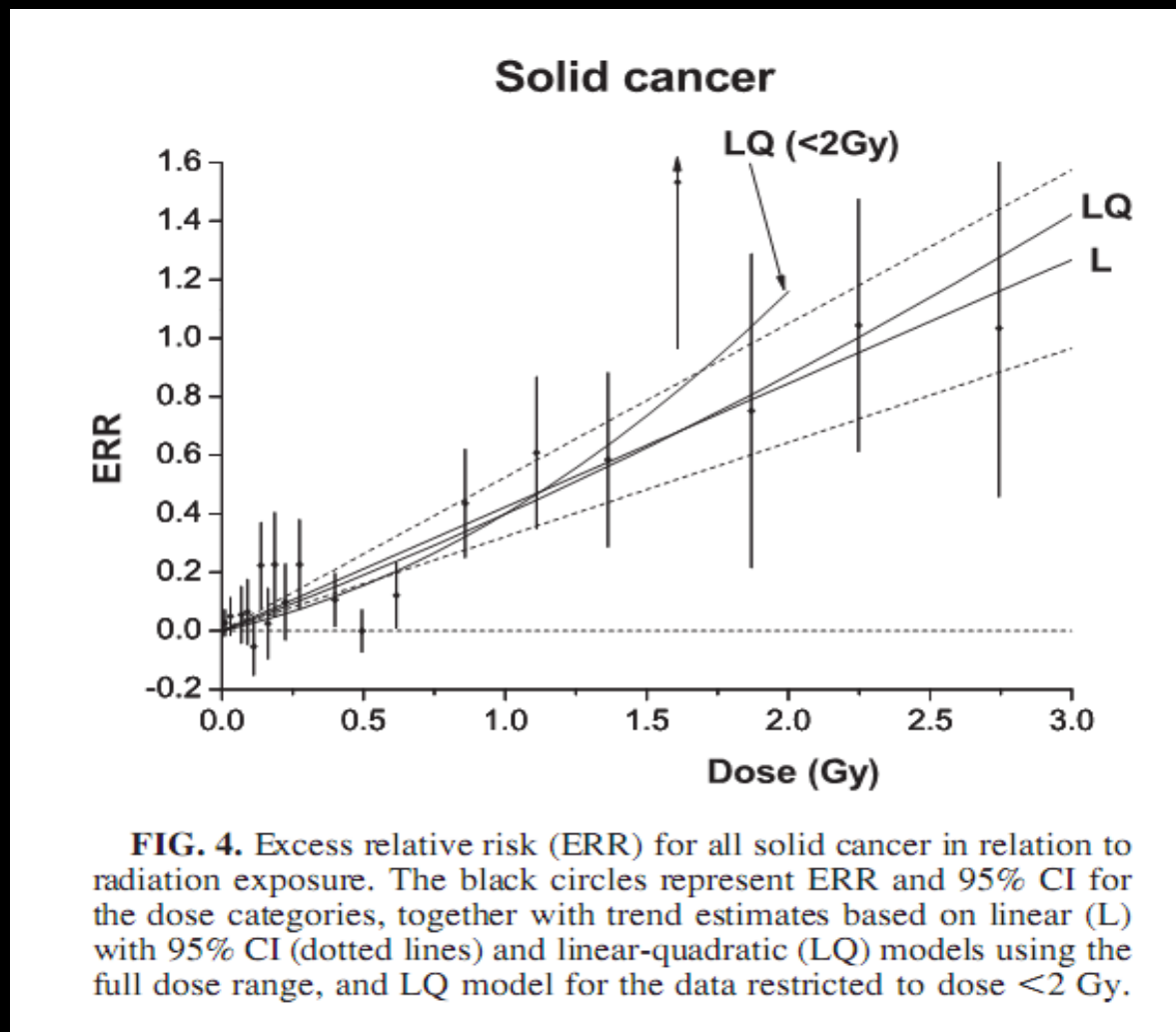
**FIG. 3.** Modification of the excess absolute risk (EAR) for all solid cancer by age at exposure and attained age.

# Szolid tumor mortalitás az életkor függvényében II: relatív többlet kockázat alakulása



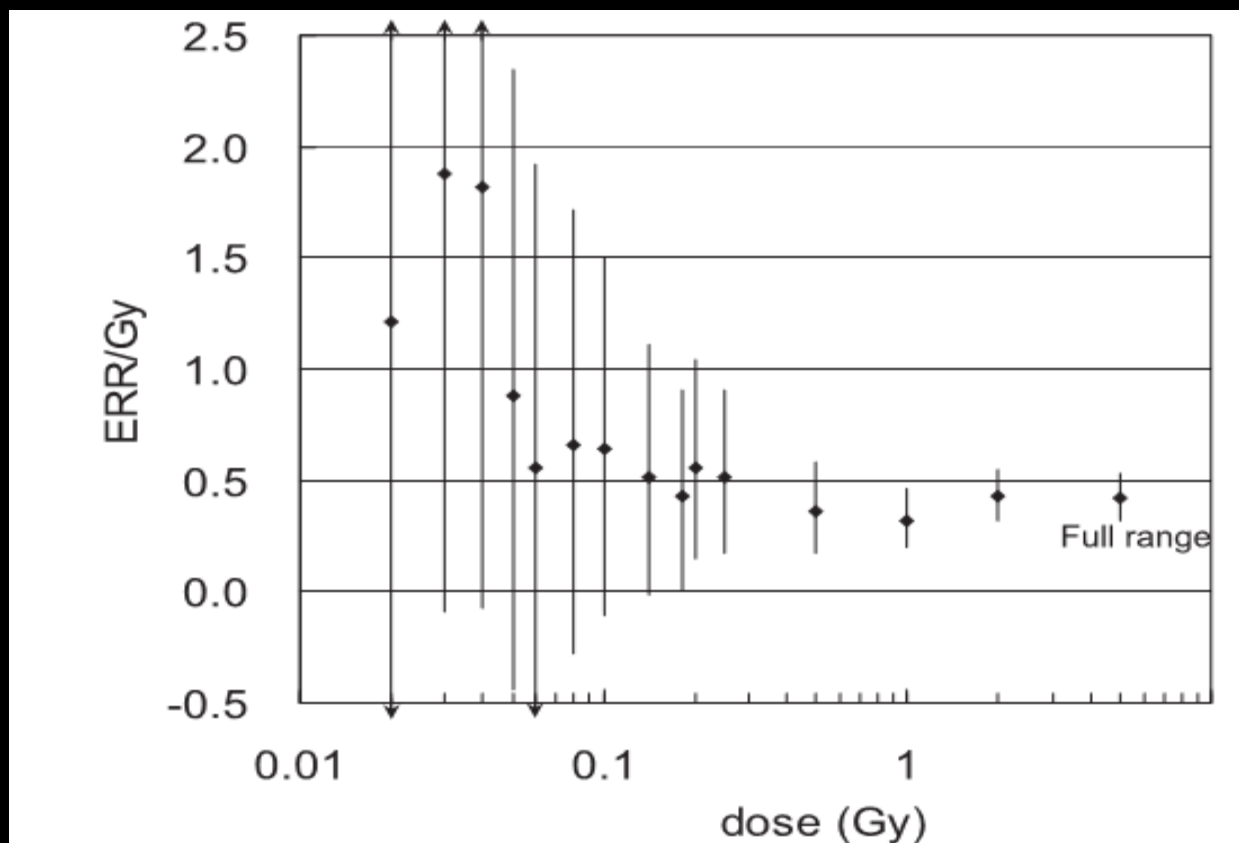
**FIG. 2.** Modification of the excess relative risk (ERR) for all solid cancer by age at exposure and attained age.

# Sugárzás okozta szolid tumoros elhalálozás kockázatának dózis-függése



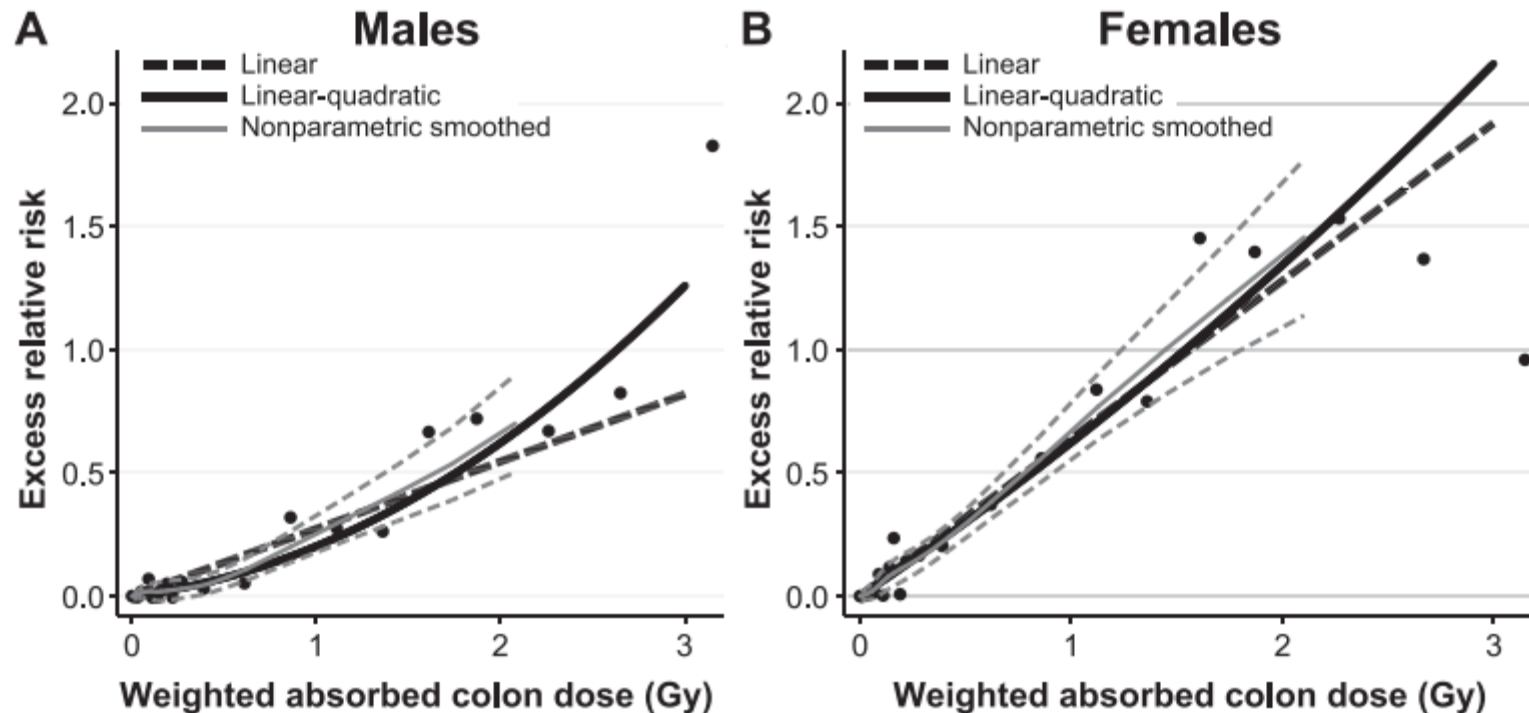
A küszöbdózis 0 Gy

# Kis dózisú ionizáló sugárzás okozta daganatos-elhalálozás kockázatának dózis-függése



**FIG. 5.** Excess relative risk per Gy (ERR/Gy) for all solid cancer for selected dose ranges. The figure shows the ERR/Gy and 95% CI for a dose range from zero to a given dose based on the linear model for the full data that allowed for different ERRs below and above the given dose and taking radiation effect modifiers as common to the two dose ranges. The increased ERR/Gy in the low-dose levels less than 0.1 Gy corresponds to the estimates of ERR higher than the expected linear line in Fig. 4.

# Sugárzás okozta szolid tumoros elhalálozás kockázatának dózis-függése (1958-2009)



**FIG. 4.** Panels A and B: Solid cancer dose-response functions for males and females (full dose range). Fitted linear (black dashed line) and linear-quadratic (black solid curve) ERRs for all solid cancers using linear and linear-quadratic dose-response functions for males and females. Also shown are ERR estimates for all 22 dose categories (points) and a nonparametric smoothed estimate (solid gray curve) with point-wise 95% confidence intervals (dashed gray curves). The ERRs are given for subjects at attained age of 70 years after exposure at age 30 years.

Férfiaknál lehet, hogy nem lineáris a dózis-hatás összefüggés a szolid tumorok esetében.

# Sugárzás okozta leukémiák számának alakulása az Az elszennvedett dózis függvényében

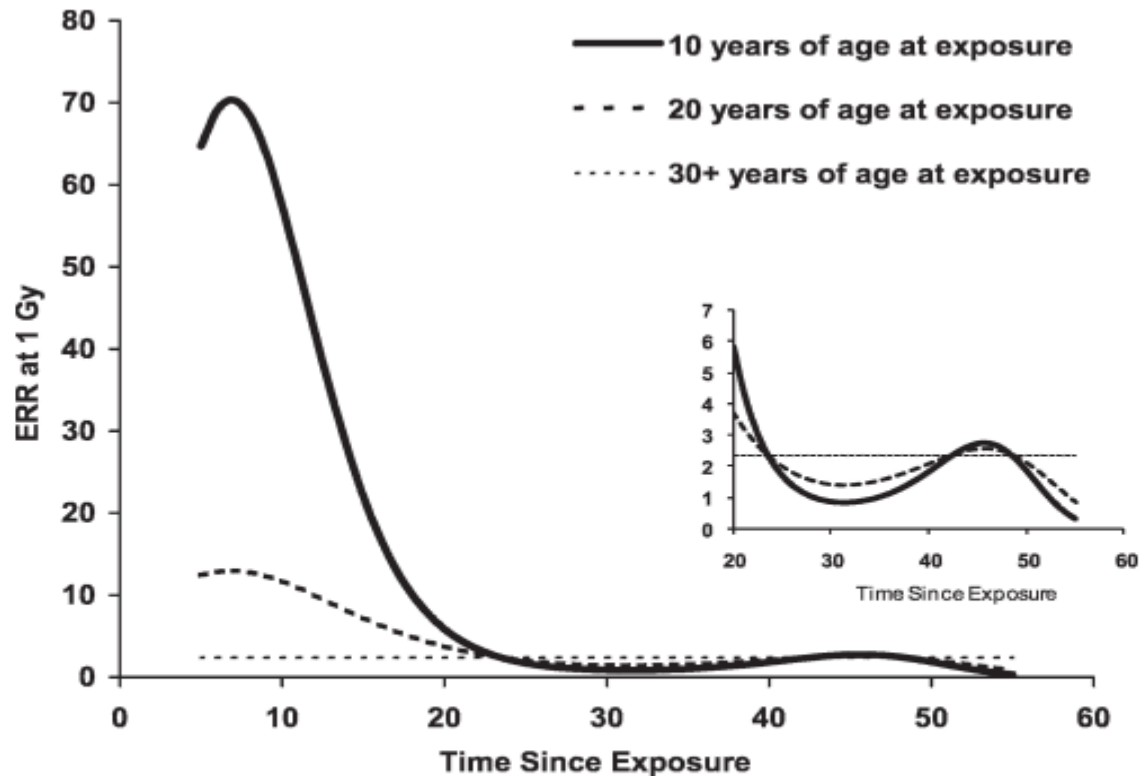
Predicted Number of Background <sup>a</sup> Deaths, Excess Deaths, and the Attributable Fraction of Deaths due to Leukemia of all Types among those Exposed to >0.005 Gy (AF <sub>0.005</sub> ) <sup>b</sup>			
	Leukemia: all types		
	Fitted background	Fitted excess	Sugárzásnak tulajdonítható
Elért életkor (év)			
5-9	0.1	3.9	0.98
10-19	3.0	10.0	0.94
20-29	7.8	14.2	0.80
30-39	12.1	9.9	0.57
40-49	25.2	11.8	0.42
50-59	32.9	11.1	0.41
60-69	55.4	19.6	0.41
70+	70.5	22.5	0.38
Calendar year			
1950-1960	40.1	41.8	0.67
1961-1970	34.9	20.2	0.49
1971-1980	41.3	13.4	0.39
1981-1990	44.9	15.0	0.41
1991-2000	45.7	12.6	0.34
Marrow dose (Gy)			
<0.005	99.1	0.2	— <sup>c</sup>
0.005-<0.1	64.8	5.3	0.08
0.1-<0.5	28.1	19.5	0.41
0.5-<1	8.4	19.5	0.70
1-<2	4.8	26.7	0.85
2+	1.7	31.8	0.95
Total	206.9	103.1	0.49

<sup>a</sup> Estimates of background and excess cases are based on ERR models shown in Table 3.

<sup>b</sup> Attributable fraction among those exposed to >0.005 Gy; AF<sub>0.005</sub> is the excess number of cases among those exposed to >0.005 Gy divided by the fitted number of cases among those exposed to >0.005 Gy.

<sup>c</sup> No value for AF<sub>0.005</sub> is shown for those exposed to <0.005 Gy.

# Leukémiák többlet relatív kockázatának (ERR) alakulása az expozíciókori életkor és az eltelt idő függvényében



**FIG. 1.** Predicted city-averaged ERR at 1 Gy for leukemia (all types) as a function of age at exposure and time since exposure. Inset provides an expanded view of ERR estimates for the period 20 or more years after exposure.

RADIATION ENVIRONMENT 172, 368–382 (2009)  
DOI: 10.1080/13701750802311100

© 2009 by Radiation Research Society

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Ionizing Radiation and Leukemia Mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950–2000

David Richardson,<sup>1,2</sup> Hiromi Sugiyama,<sup>3</sup> Nobuo Nishi,<sup>4</sup> Ritsuo Sakata,<sup>5</sup> Yukiko Shimizu,<sup>6</sup> Eric J. Grant,<sup>7</sup> Midori Soda,<sup>8</sup> Wan-Ling Hsu,<sup>9</sup> Akihiko Suyama,<sup>9</sup> Kazunori Kodama,<sup>9</sup> and Fumiyoshi Kasagi<sup>9</sup>

# Nem-daganatos megbetegedések alakulás a hiroshimai és nagaszakii túlélőkben

**TABLE 8**  
**Excess Relative Risk (ERR) Estimates per Gy for Noncancer Deaths, 1966–2003**

Cause of death	Number of deaths	ERR/Gy <sup>a</sup>	(95% CI <sup>b</sup> )	<i>P</i>
Noncancer disease <sup>c</sup>	25,618	0.13	(0.08, 0.18)	<0.001
Circulatory disease	14,586	0.11	(0.05, 0.18)	<0.001
Respiratory disease	4,190	0.23	(0.11, 0.36)	<0.001
Digestive disease	2,226	0.20	(0.05, 0.38)	0.009
Genitourinary disease	951	0.18	(−0.06, 0.46)	0.15
Infectious disease	781	−0.03	(−0.22, 0.23)	>0.5
Other disease	2,884	0.03	(−0.11, 0.19)	>0.5

<sup>a</sup> ERR was estimated using the linear dose model, in which city, sex, age at exposure, and attained age were included in the background rates, but not allowing radiation effect modification by those factors.

<sup>b</sup> Confidence interval.

<sup>c</sup> Non-neoplastic blood diseases were excluded from noncancer diseases.

# Becsült sztochasztikus kockázat

244

## *RADIOBIOLOGY FOR THE RADIOLOGIST*

**TABLE 15.5.** *Risk Estimates for Cancer and Hereditary Effects*

Exposed Population	Detriment, $10^{-2}$ Sv $^{-1}$			
	Fatal Cancer	Nonfatal Cancer	Severe Hereditary Effects	Total
Adult workers	4.0	0.8	0.8	5.6
Whole population	5.0	1.0	1.3	7.3

Data from International Commission on Radiation Units and Measurements: Recommendations. Report No. 60. New York, Pergamon Press, 1991.

1 Sv sugárexpozíció =  $5,7 \times 10^{-2}$  halálos daganat  
ICRP

# A csernobili baleset következményei

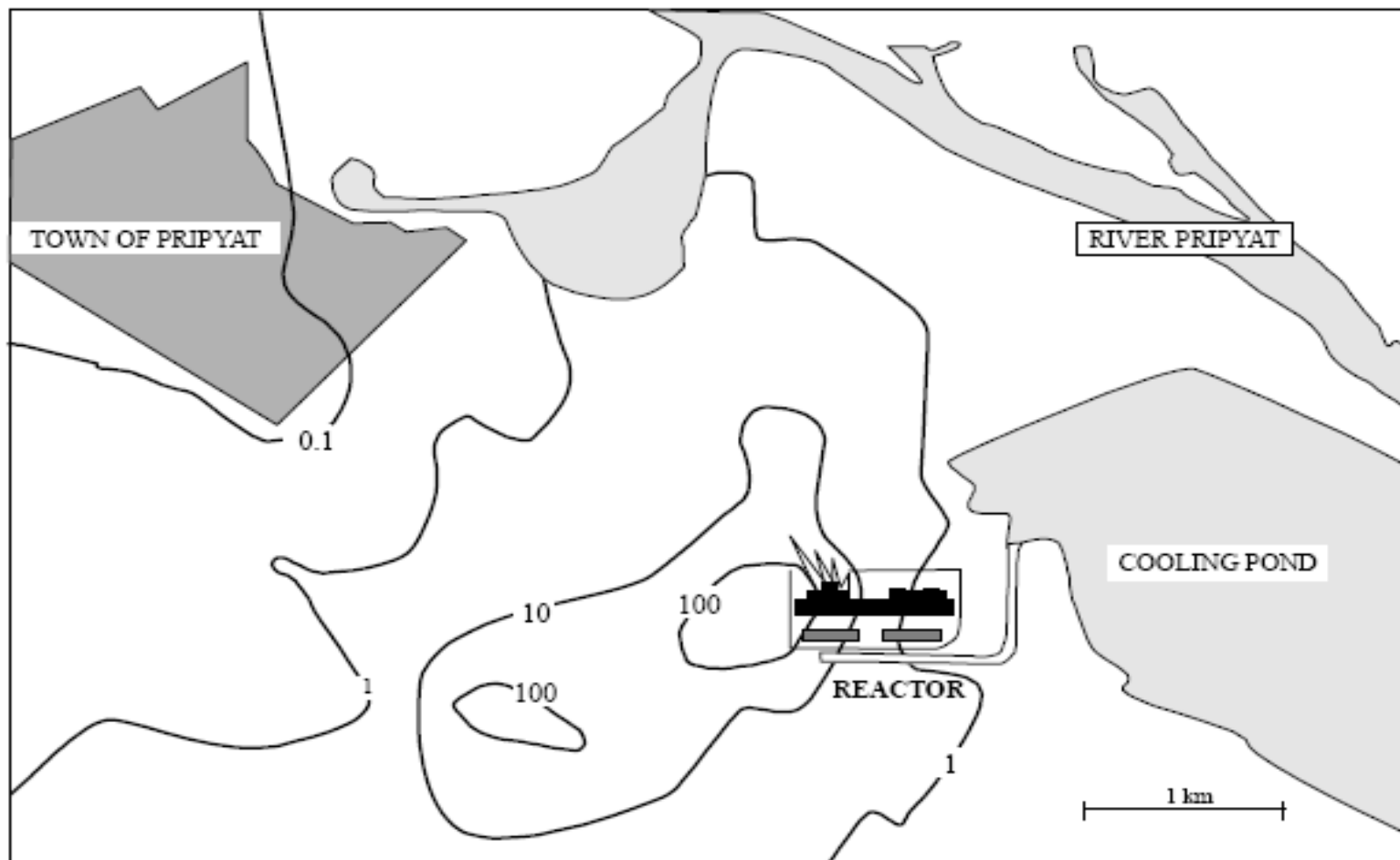


Figure XII. Measured exposure rates in air on 26 April 1986 in the local area of the Chernobyl reactor.  
*Units of isolines are  $R h^{-1}$ .*

# A csernobili nukleáris baleset: determinisztikus hatások

- A balesetkor 1057 ember tartózkodott a helyszínen vagy vett részt az elhárításban, két azonnali áldozat.
- 134 személyben alakult ki akut sugárbetegség, 28-an haltak meg!

## 237 ARS MIATT KÓRHÁZBAN KEZELT CSERNOBILI PÁCIENS MEGOSZLÁSA A SUGÁRBETEGSÉG SÚLYOSSÁGA ÉS AZ EGÉSZTEST-DÓZIS ALAPJÁN

AZ ARS súlyossága	A páciensek száma	3 hónapon belüli halál	Egésztest dózis (Gy)
IV	21	20	6-16
III	22	7	4-6
II	50	1	2-4
I	41	0	1-2
<b>I-IV</b>	<b>134</b>	<b>28</b>	<b>1-16</b>
<b>0</b>	<b>103</b>	<b>0</b>	<b>&lt;2</b>

A 28 halálos esetből 26 főnél önmagukban is letális hűgések is!

Forrás: 1) Ilyin, L. A. Chernobyl - Myth and Reality Megapolis, Moscow 1995

2) Wagemaker, G. et al, IAEA/WHO/CEC Conf., Vienna 1996

Turai-SOT/OSSKI, 2017-2-9



- Még a súlyosan kontaminált személyek sem veszélyeztetik az ellátókat!!!

# ARS betegek túlélési adatai 2004-ig

**Table D7. Causes of death among Chernobyl ARS survivors in the later period [B10, B39, B41, B42, B44, G9, U3]**

<i>Number</i>	<i>Name</i>	<i>ARS grade</i>	<i>Year of death</i>	<i>Age (years)</i>	<i>Cause of death</i>
1	P.V.A.	I	1993	41	Sudden cardiac death
2	V.O.E.	I	1995	51	Lung TB
3	K.A.P.	I	1995	53	Post-traumatic fatty embolism
4	S.M.A.	I	1995	26	Sudden cardiac death
5	S.V.G.	I	2002	51	Myelodysplastic syndrome
6	R.G.I.	I	2002	51	Trauma
7	V.M.P.	II	1987	81	Lung gangrene
8	K.Ya.F.	II	1990	68	Sudden cardiac death
9	B.V.I.	II	1995	46	Liver cirrhosis
10	G.M.Yu.	II	1998	45	Liver cirrhosis
11	Sh.V.K.	II	1998	61	Acute myelomonoblastic leukaemia
12	B.V.M.	II	1998	80	Sudden cardiac death
13	M.A.S. <sup>a</sup>	II	1999	61	Stroke
14	T.L.P.	II	2004	53	Lower jaw neurinoma
15	V.M.P.	III	1992	67	Sudden cardiac death
16	B.G.V.	III	1993	52	Myelodysplastic syndrome
17	D.A.S.	III	1995	64	Myelodysplastic syndrome
18	B.I.Z.	III	2001	87	Sudden cardiac death
19	P.A.N.	III	2004	41	Lung TB

# A csernobili baleset hosszú távú következményei: érintett populációk

Populáció	Létszám	Átlagos dózis (mSv)
Késői liquidátorok (1986-1989)	600000	~100
A szennyezett területekről evakuáltak (1986)	116000	~33
Súlyosan szennyezett területen élők (1986-2005)	270000	~50
Kevésbé szennyezett területen élők (1986-2005)	5000000	10-20

Problematikus radionuklidok: Jód-131 és Cézium-137

# Cancers after Chernobyl: From Epidemiology to Molecular Quantification

Dimitry Bazyka <sup>\*</sup>, Natalya Gudzenko, Iryna Dyagil, Iryna Iliencko, David Belyi, Vadim Chumak, Anatoly Prisyazhnyuk and Elena Bakhanova

National Research Center for Radiation Medicine, 53 Melnikov str, Kyiv 04050, Ukraine

\* Correspondence: bazyka@yahoo.com; Tel.: +380-044-483-0637

Received: 13 June 2019; Accepted: 3 August 2019; Published: 2 September 2019



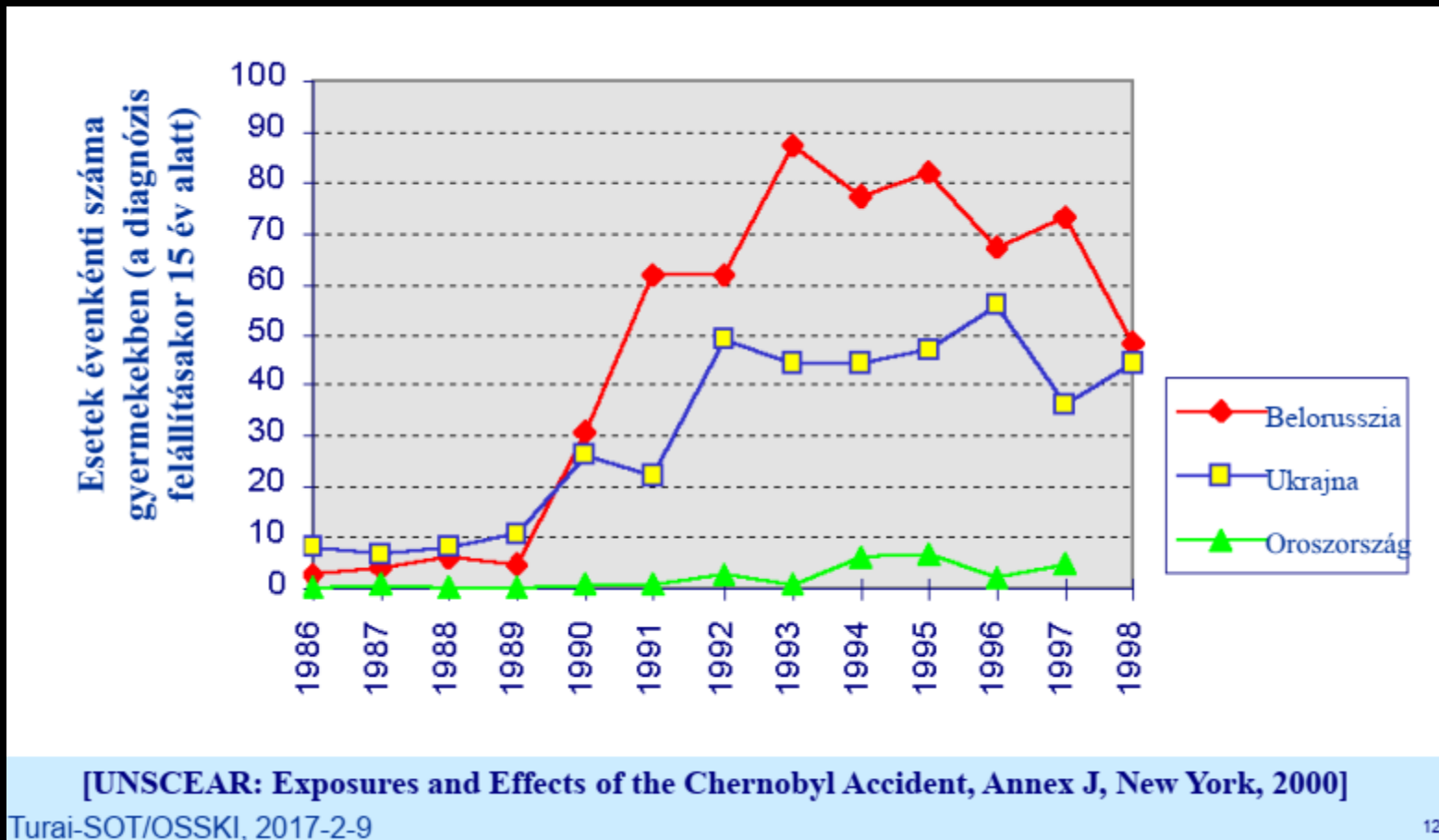
- A szennyezett területen élőkénél csak a pajzsmirigy daganatok gyakorisága nőtt 2016-ig.
- A Pripjatyból kitelepítetteknél csak a pajzsmirigy daganatok gyakorisága nőtt 2016-ig.

## Daganatgyakoriság a késői liquidátoroknál

**Table 1.** Cancer standardized incidence ratios, SIRs, (95% CI), in Ukrainian Chernobyl cleanup workers (1986–1987, both genders) by follow-up period and cancer site.

Cancer Site	Period of Follow-Up				
	ICD-10	1994–1999	2000–2005	2006–2010	2011–2016
All cancers	C00–C96	138.3 (132.5–144.0)	107.1 (103.7–110.4)	103.3 (99.9–106.7)	102.6 (99.2–106.0)
Leukemia and lymphoma	C81–C96	232.6 (200.9–264.3)	201.8 (180.0–223.7)	123.9 (105.4–142.4)	140.8 (121.2–160.6)
Thyroid cancer	C73	554.9 (440.9–668.9)	666.7 (569.8–763.5)	322.2 (250.2–394.1)	250.3 (192.9–307.8)
Breast cancer	C50	185.2 (143.3–227.1)	176.1 (146.9–205.3)	140.3 (113.0–167.7)	130.4 (103.0–157.8)

# Pajzsmirigy daganatok a szennyezett területen élőkből



Jód-profilaxis szükségessége!!!

## Születési rendellenességek gyakorisága a kontaminált területen

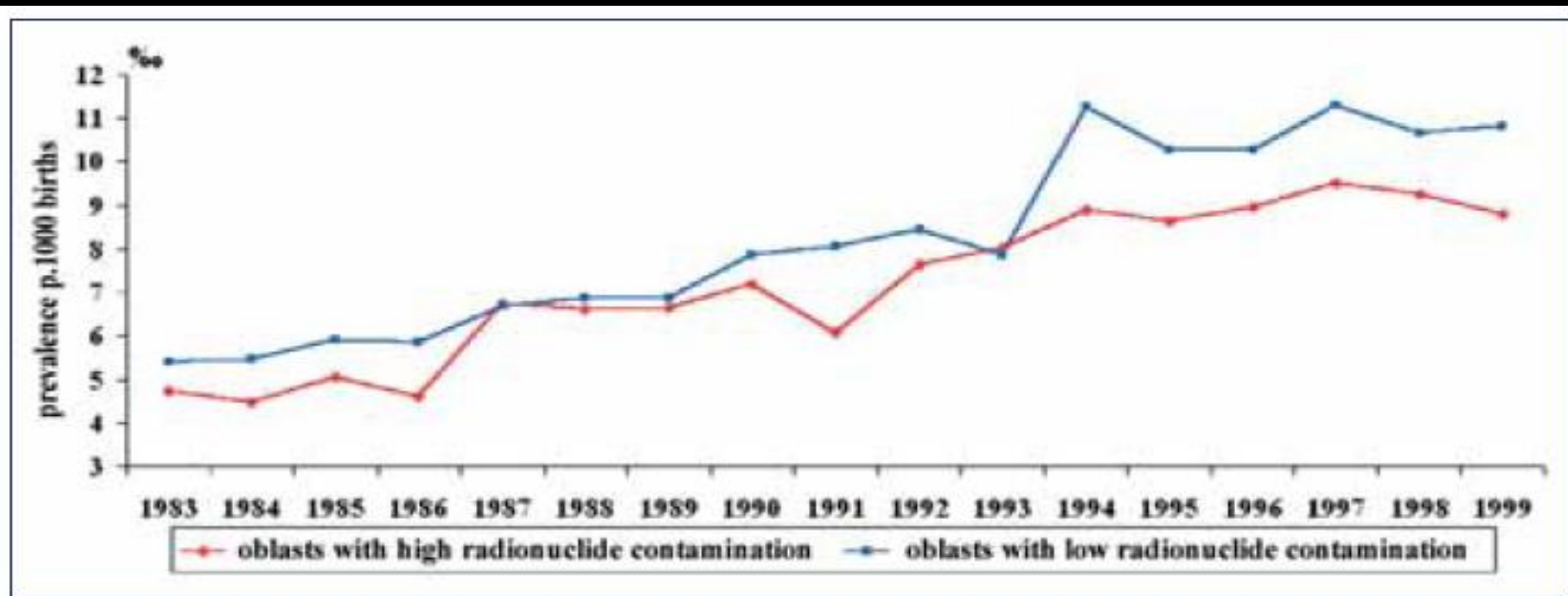


FIG. 4. Prevalence at birth of congenital malformations in 4 oblasts of Belarus with high and low levels of radionuclide contamination (Lasyuk et al., 1999).

# A daganatos elhalálozás várható alakulása a csernobili baleset következtében exponált populációknál

**Table D24. Predictions of background and excess mortality from solid cancers and leukaemia in populations exposed as a result of the Chernobyl accident (based on reference [C1])**

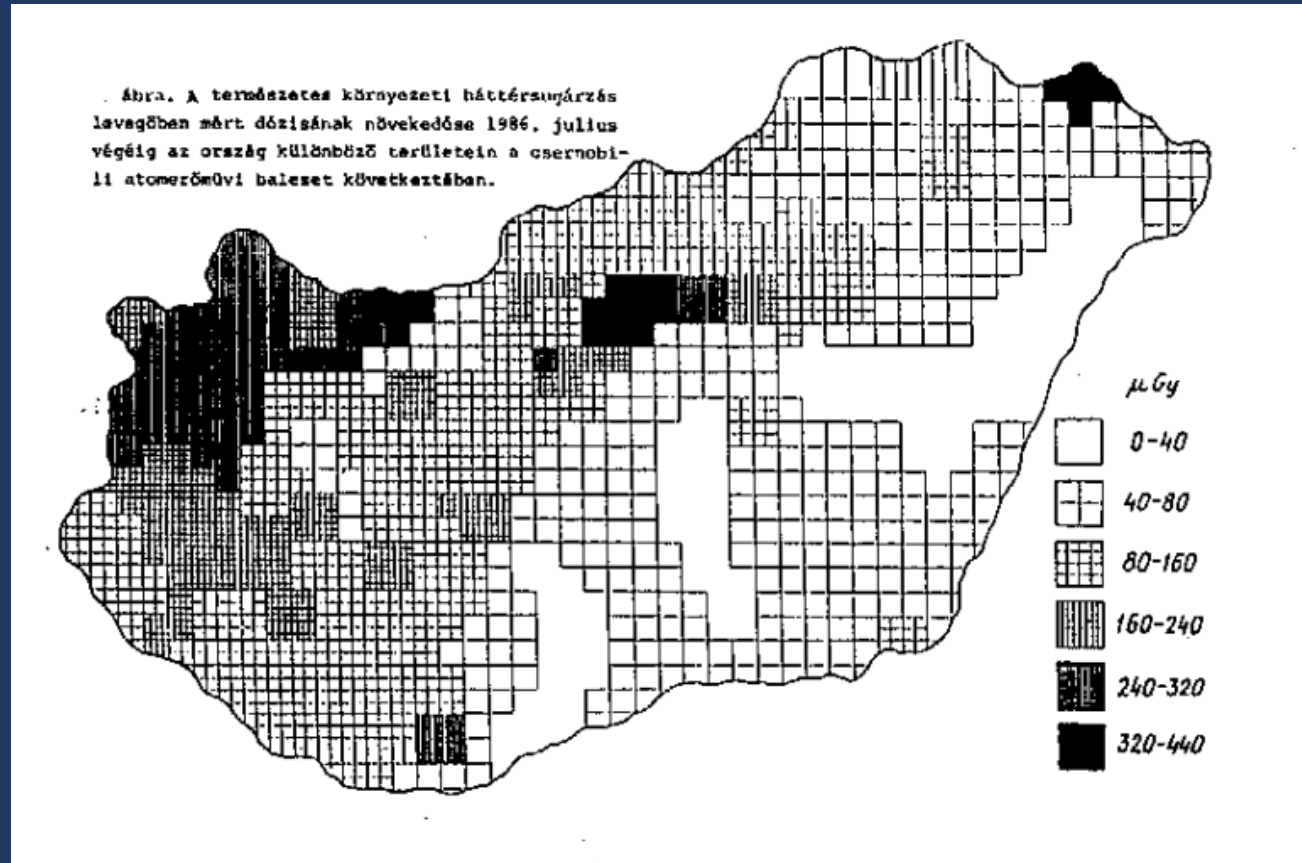
Population	Population size and average dose	Cancer type	Period	Background cancer mortality	Predicted excess cancer mortality	AF <sup>a</sup> (%)
Emergency and recovery operation workers (liquidators), 1986–1987	200 000 100 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	41 500	2 000	5
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	800	200	20
			First 10 years	40	150	79
Evacuees from 30-km zone	135 000 10 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	21 500	150	0.7 <sup>b</sup>
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	500	10	2
			First 10 years	65	5	7
Residents of SCZs <sup>c</sup>	270 000 50 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	43 500	1 500	3
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	1 000	100	9
			First 10 years	130	60	32
Residents of other contaminated areas	6 800 000 7 mSv	Solid cancers	Lifetime (95 years)	800 000	4 600	0.6
		Leukaemia	Lifetime (95 years)	24 000	370	1.5
			First 10 years	3 300	190	5.5

<sup>a</sup> AF: attributable fraction = (excess deaths/total death from the same cause) × 100.

<sup>b</sup> A misprint has been corrected which appeared in references [C1, W5].

<sup>c</sup> Strictly Controlled Zones, i.e. areas with <sup>137</sup>Cs soil deposition above 555 kBq/m<sup>2</sup> (15 Ci/km<sup>2</sup>) in 1986.

# A csernobili baleset magyarországi következményei: a környezeti háttérsugárzás levegőben mért dózisának változása az ország különböző területein



# Külső sugárzásból eredő egyéni effektív dózis Magyarországon

2. táblázat. A levegő külső sugárzásából eredő egyéni effektív dózis (nSv) két időtartamra integrálva, a főváros és környékén.

	1986 május 12-ig		10 évre, 1996 májusig	
	Város	Falu	Város	Falu
Ru-103	8,0	13,8	8,2	14,1
Te-132	6,1	10,6	6,1	10,6
I-131	20,7	35,8	20,9	36,2
I-132	83,1	143,0	83,2	143,2
Cs-134	4,7	8,1	4,8	8,3
Cs-137	3,4	5,9	3,5	6,1
<b>Összesen</b>	<b>126,0</b>	<b>217,2</b>	<b>126,7</b>	<b>218,5</b>

KÜLSŐ SUGÁRTERHELÉS A RADIOAKTIV FELHŐBŐL ÉS A FÖLDFELSZINTŐL.  
A RADIOAKTIVITÁS-MÉRÉSEK ALAPJÁN

Kanvár Béla<sup>1)</sup>, Andrási Andor<sup>2)</sup>, Maschek Ibolya<sup>3)</sup>, Nikl István<sup>2)</sup>, Végvári István<sup>1)</sup>,  
Zombori Péter<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Veszprémi Egyetem Radiokémia Tanszék, Veszprém, <sup>2)</sup> MTA KFKI Atomenergia Kutató Intézet, Budapest, <sup>3)</sup> Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutatóintézet, Budapest.

# Belső szennyeződésből eredő lekötött effektív dózisegyenértékek 1 éves gyermekekben és felnőttekben Magyarországon

1. táblázat Egyéni lekötött effektív dózisegyenértékek átlagai, minimális és maximális értékei ( $\mu\text{Sv}$ ), a baleset évére, illetve az 1986-1995 közötti időszakra vonatkozó radioizotóp felvételből

Radioizotóp	1 éves gyermekek		felnőttek	
	1986	1986-1995	1986	1986-1995
$^{131}\text{I}$	490 (56-2000)		59 (11-250)	
$^{134}\text{Cs}$	33 (7-97)	48 (18-118)	49 (10-130)	72 (23-170)
$^{137}\text{Cs}$	52 (10-140)	79 (35-180)	69 (14-180)	105 (42-240)
összesen	570 (75-2200)	620 (110-2300)	180 (35-570)	240 (75-650)
teljes [ 2]	800		180	
teljes [3]		666*		308*

\* 1986-90 közötti felvételből számítva

BELSŐ SUGÁRTERHELÉS SZENNYEZETT LEVEGŐ BELÉGZÉSE, ÉLELEM ÉS IVÓVÍZ FOGYASZTÁSA KÖVETKEZTÉBEN, KÖZVETETT MÉRÉSEK ALAPJÁN

Kerekes Andor<sup>1)</sup>, Tarián Sándor<sup>2)</sup>, Guzzi Judit<sup>1)</sup>

1) Országos "Frederic Joliot-Curie" Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet, Budapest; 2) Országos Élelmiszervizsgáló Intézet, Budapest

# Computer tomográf (CT) vizsgálatok kockázata fiatalokban

Követett populáció – ~178000 1985-2002. között CT vizsgálaton átesett nem-daganatos személy

Életkor - <22 év a CT vizsgálat időpontjában

Követési periódus – 1985-2008

Leukémia szám – 74/178604

Agydaganat szám – 135/176587

**Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study**

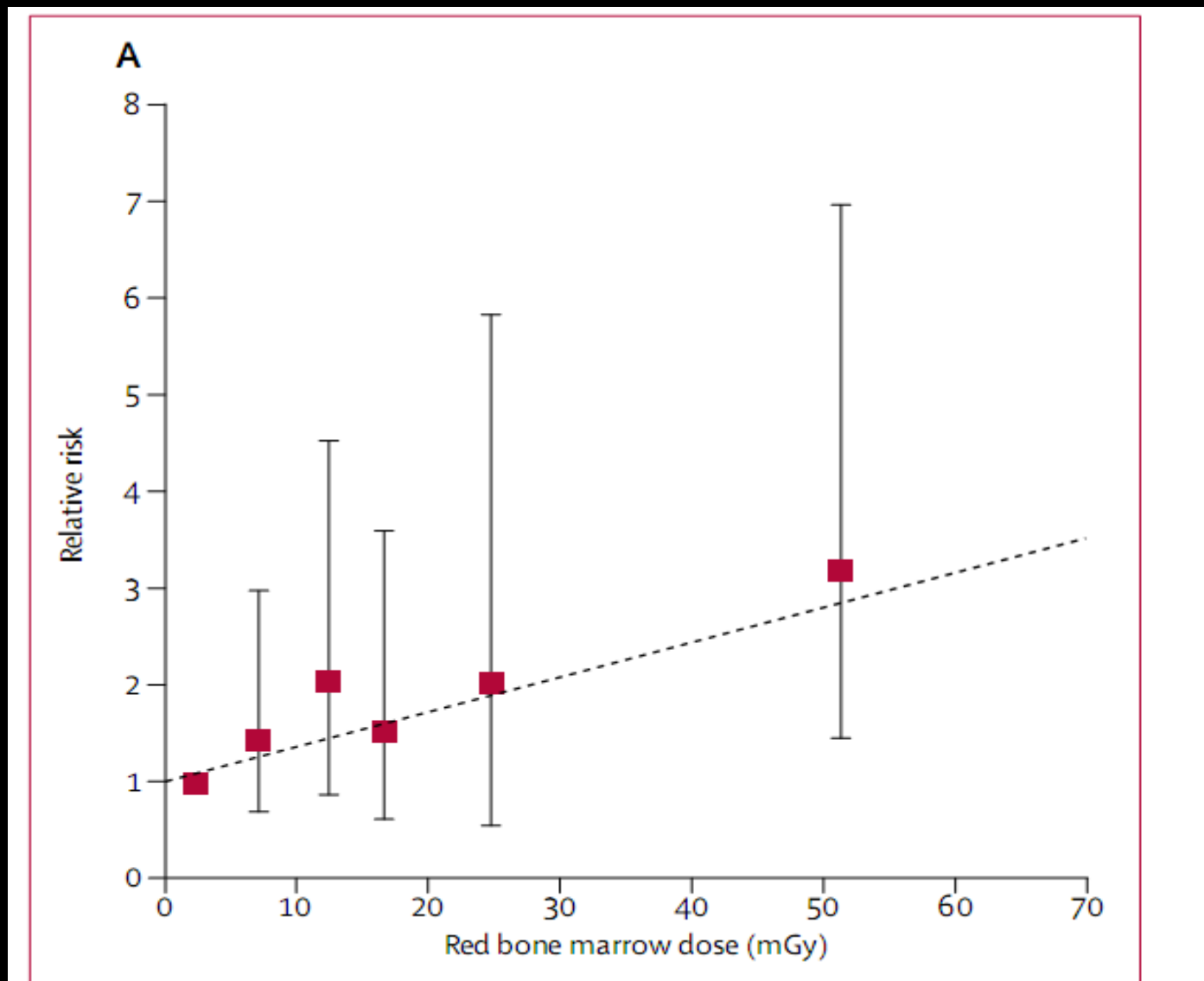
*Mark S Pearce, Jane A Salotti, Mark P Little, Kieran McHugh, Choonsik Lee, Kwang Pyo Kim, Nicola L Howe, Cecile M Ronckers, Preetha Rajaraman, Sir Alan W Craft, Louise Parker, Amy Berrington de González*

# CT vizsgálatonként elszenvedett becsült sugár dózis

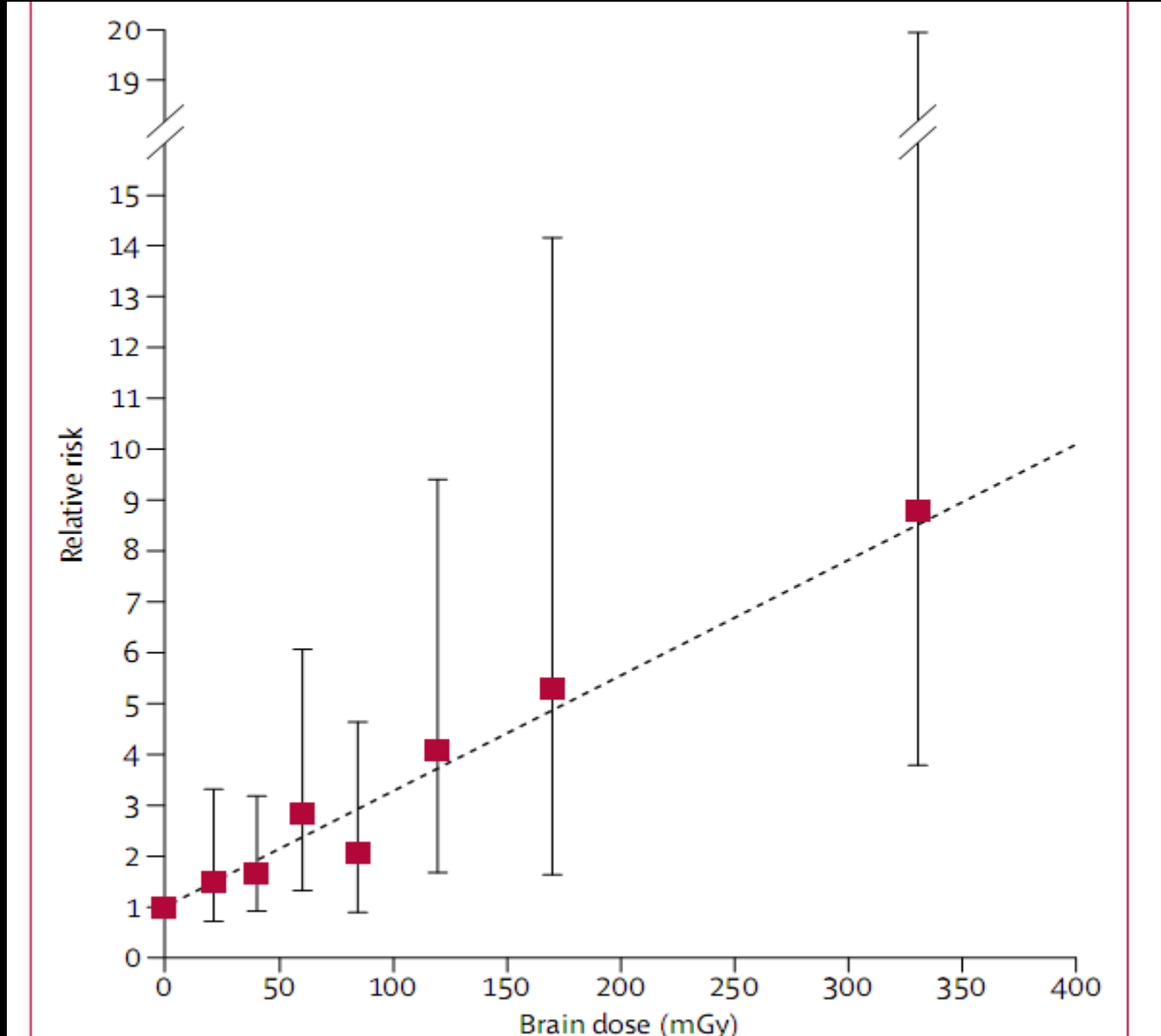
	Male patients		Female patients	
	Brain dose (mGy)	Red bone marrow dose (mGy)	Brain dose (mGy)	Red bone marrow dose (mGy)
<b>Age at brain CT</b>				
0 years	28	8	28	8
5 years	28	9	28	9
10 years	35	6	35	6
15 years	43	4	44	6
20 years	35	2	42	2
<b>Age at chest CT</b>				
0 years	0.4	4	0.4	4
5 years	0.3	3	0.3	3
10 years	0.3	3	0.3	3
15 years	0.2	4	0.3	4
20 years	0.2	4	0.3	4
<b>Age at abdominal CT</b>				
0 years	0.2	3	0.2	3
5 years	0.1	2	0.1	2
10 years	0.1	3	0.1	3
15 years	0.0	3	0.0	3
20 years	0.0	3	0.0	4
<b>Age at extremity CT</b>				
0 years	0.0	1	0.0	1
5 years	0.0	0.2	0.0	0.2
10 years	0.0	0.1	0.0	0.1
15 years	0.0	0.0	0.0	0.0
20 years	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 1: Estimated radiation doses to the brain and red bone marrow from one CT scan, by scan type, sex, and age at scan, as used in this study for scans after 2001

# Leukémiák kialakulásának kockázata a dózis-függvényében



# Agydaganatok kialakulásának kockázata a dózis-függvényében



Fiatalokon elvégzett CT vizsgálatok esetén a leukémiák és agydaganatok kialakulásának kockázata dózis függő, az abszolút daganatszámok azonban nem nagyok

EAR leukémia – 0,83/10 év/10000 személy/CT

EAR agytumor - 0,32/10 év/10000 személy/CT

# Sugárzás-indukálta daganatos elhalálozás a nukleáris iparban dolgozóknál

Cite this article as: *BMJ*, doi:10.1136/bmj.38499.599861.E0 (published 29 June 2005)

## Papers

### Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries

E Cardis, M Vrijheid, M Blettner, E Gilbert, M Hakama, C Hill, G Howe, J Kaldor, C R Muirhead, M Schubauer-Berigan, T Yoshimura, F Bermann, G Cowper, J Fix, C Hacker, B Heinmiller, M Marshall, I Thierry-Chef, D Utterback, Y-O Ahn, E Amoros, P Ashmore, A Auvinen, J-M Bae, J Bernar Solano, A Biau, E Combalot, P Deboodt, A Diez Sacristan, M Eklof, H Engels, G Engholm, G Gulis, R Habib, K Holan, H Hyvonen, A Kerekes, J Kurtinaitis, H Malke, M Martuzzi, A Mastauskas, A Monnet, M Moser, M S Pearce, D B Richardson, F Rodriguez-Artalejo, A Rogel, H Tardy, M Telle-Lamberton, I Turai, M Usel, K Veress

# Résztevő országok

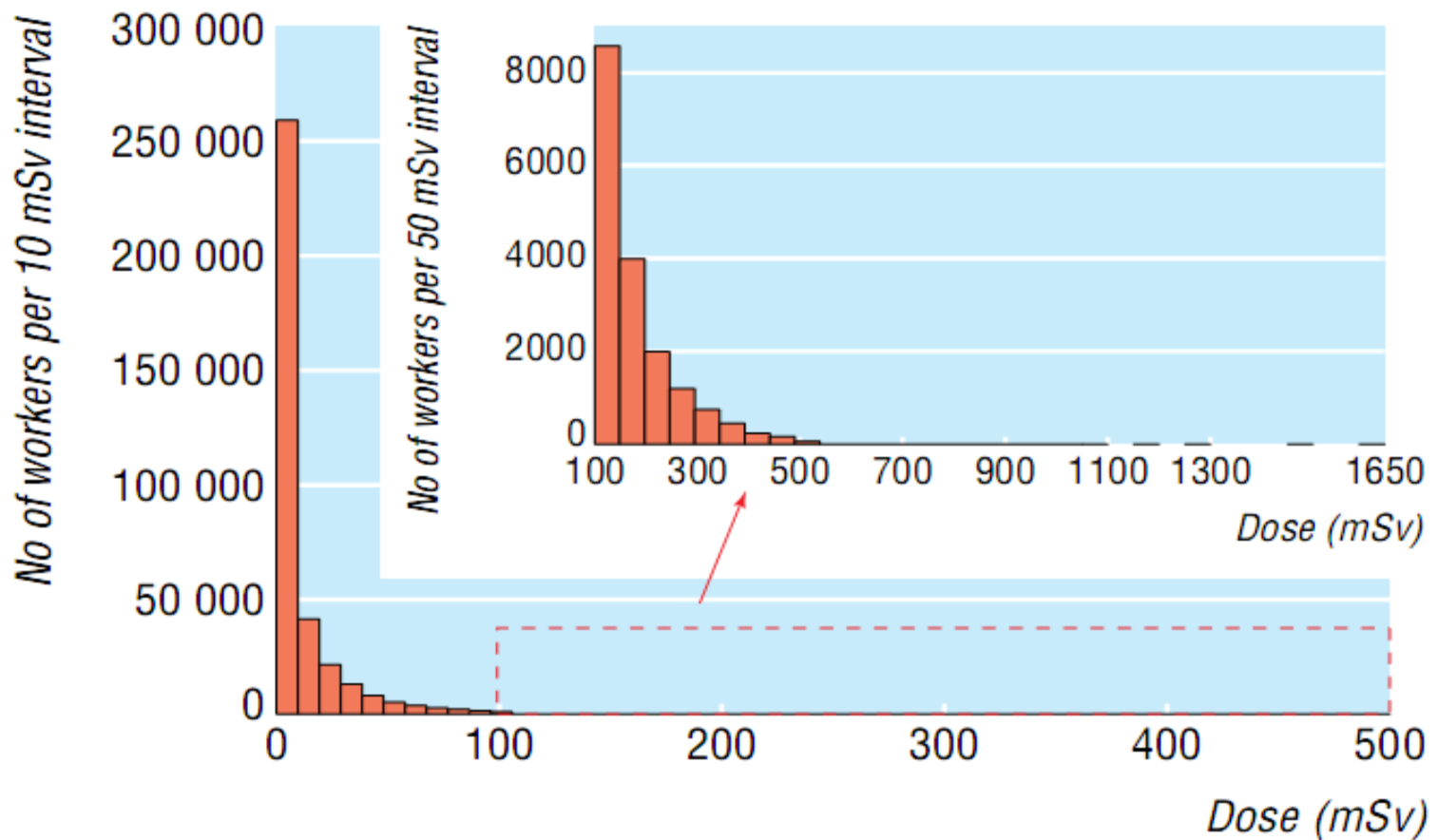
Table 1 Cohorts included in the 15 country study

	No of facilities	First year of operations	Follow-up period	No of workers	Person years	Deaths			Collective cumulative dose (Sv)	Average individual cumulative dose (mSv)
						All causes	All cancers excluding leukaemia	Leukaemia excluding CLL		
Australia	1	1959	1972-98	877	12 110	56	17	0	5.4	6.1
Belgium	5	1953	1969-94	5 037	77 246	322	87	3	134.2	26.6
Canada	4	1944	1956-94	38 736	473 880	1 204	400	11	754.3	19.5
Finland	3	1960	1971-97	6 782	90 517	317	33	0	53.2	7.8
France CEA-COGEMA	9	1946	1968-94	14 796	224 370	645	218	7	55.6	3.8
France EDF	22	1956	1968-94	21 510	241 391	371	113	4	340.2	15.8
Hungary	1	1982	1985-98	3 322	40 557	104	39	1	17.0	5.1
Japan	33*	1957	1986-92	83 740	385 521	1 091	413	19	1526.7	18.2
Korea (south)	4	1977	1992-97	7 892	36 227	58	21	0	122.3	15.5
Lithuania	1	1984	1984-2000	4 429	38 458	102	24	1	180.2	40.7
Slovak Republic	1	1973	1973-93	1 590	15 997	35	10	0	29.9	18.8
Spain	10	1968	1970-96	3 633	46 358	68	25	0	92.7	25.5
Sweden	6	1954	1954-96	16 347	220 501	669	190	4	291.8	17.9
Switzerland	4	1957	1969-95	1 785	22 051	66	24	0	111.2	62.3
UK	32	1946	1955-92	87 322	1 370 101	7 983	2201	54	1810.1	20.7
US Hanford	1	1944	1944-86	29 332	678 833	5 564	1279	35	695.4	23.7
US INEL	1	1949	1960-96	25 570	505 236	3 491	886	26	254.6	10.0
US NPP	15	1960	1979-97	49 346	576 682	983	314	19	1336.0	27.1
US ORNL	1	1943	1943-84	5 345	136 673	1 029	225	12	81.1	15.2
Total	154	—	—	407 391	5 192 710	24 158	6519	196	7892.0	19.4

CEA-COGEMA=Commissariat à l'Énergie Atomique-Compagnie Générale des Matières Nucléaires; EDF=Electricité de France; NPP=nuclear power plants; INEL=Idaho National Engineering Laboratory; ORNL=Oak Ridge National Laboratory; CLL=chronic lymphocytic leukaemia.

\*No information available to allow separation of different facilities.

# Dózis megoszlás



**Fig 1** Distribution of cumulative radiation doses among workers included in the analyses

## Többlet relatív kockázat per 1 Sv

**Table 2** Estimates of excess relative risk per Sv (95% confidence interval) for all cancers excluding leukaemia, solid cancers, and leukaemia excluding chronic lymphocytic leukaemia, for nuclear workers and survivors of A bomb in Japan\*

	15 country study		Atomic bomb survivors (men exposed at age 20-60)	
	No of cancers	Risk	No of cancers	Risk†
All cancers excluding leukaemia	5024	0.97 (0.14 to 1.97)		
Solid cancers	4770	0.87 (0.03 to 1.88)	3246	0.32‡ (0.01 to 0.50)
Leukaemia excluding CLL:				
Linear model	196	1.93 (<0§ to 8.47)	83	3.15¶ (1.58 to 5.67)
Linear quadratic model				1.54** (-1.14 to 5.33)

CLL=chronic lymphocytic leukaemia.

\*Colon dose used for all cancers and solid cancer analyses, bone marrow dose for leukaemia.

†Note that because analyses were restricted to men aged 20-60 at exposure the confidence intervals are much wider than those presented by other investigators<sup>13 14</sup> and are based on the full cohort.

‡Analyses carried out at IARC with excess relative risk model that allows for age at exposure modification, adjusted for attained age, calendar period, and city. Estimate for men exposed at age 35.

§Estimate on boundary of parameter space.

¶Analyses carried out at IARC with constant excess relative risk model, adjusted for attained age, calendar period, and city.

\*\*Analyses carried out at IARC—linear term of linear quadratic model—preferred model for describing leukaemia mortality in analyses of data on A bomb survivors.<sup>14</sup>

Összes daganat:

$$\text{ERR}/1 \text{ Sv} = 0,97$$

$$\text{RR}/100 \text{ mSv} = 1,1$$

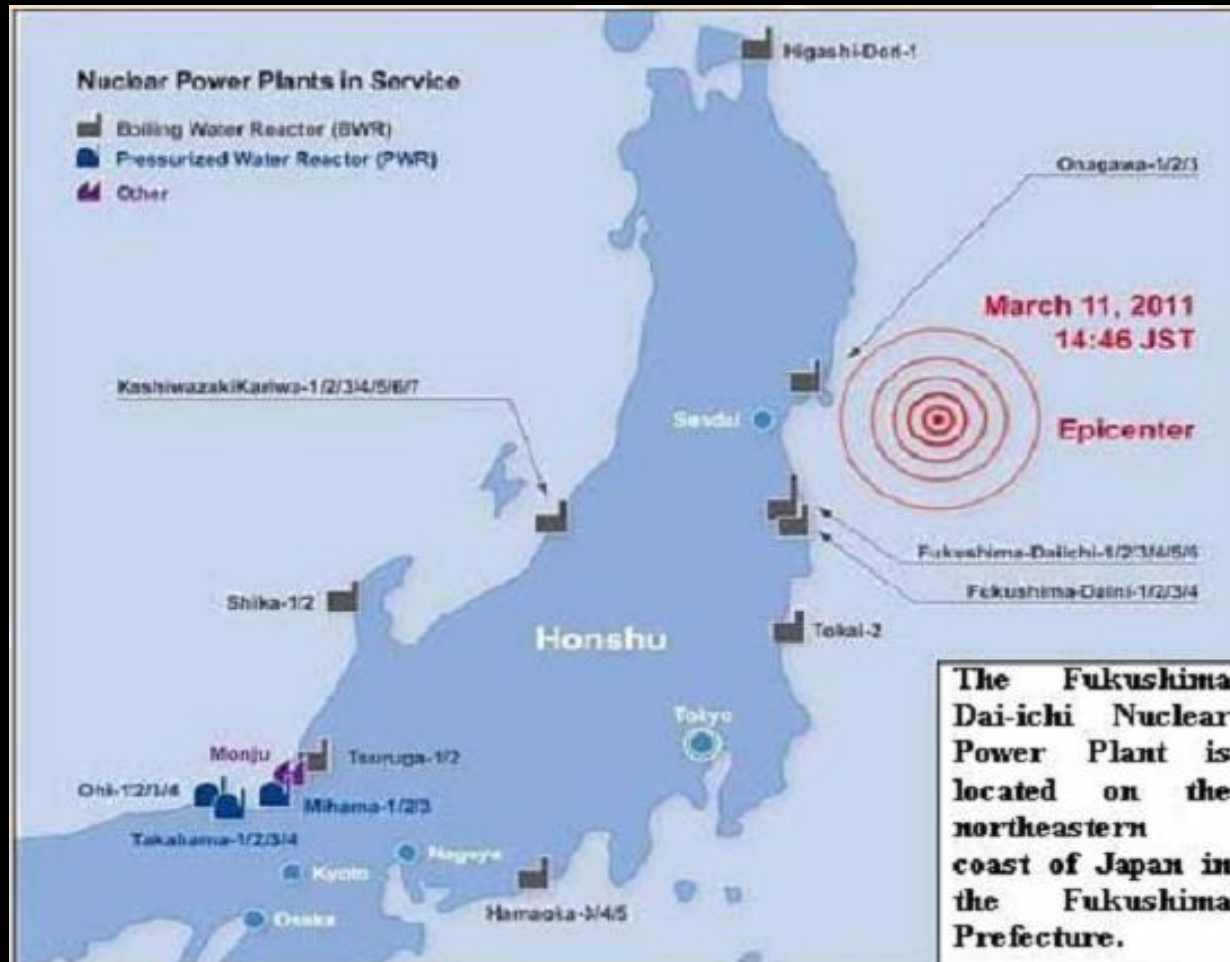
Leukémia:

$$\text{ERR} /1 \text{ Sv} = 1,93$$

$$\text{RR}/100 \text{ mSv} = 1,19$$

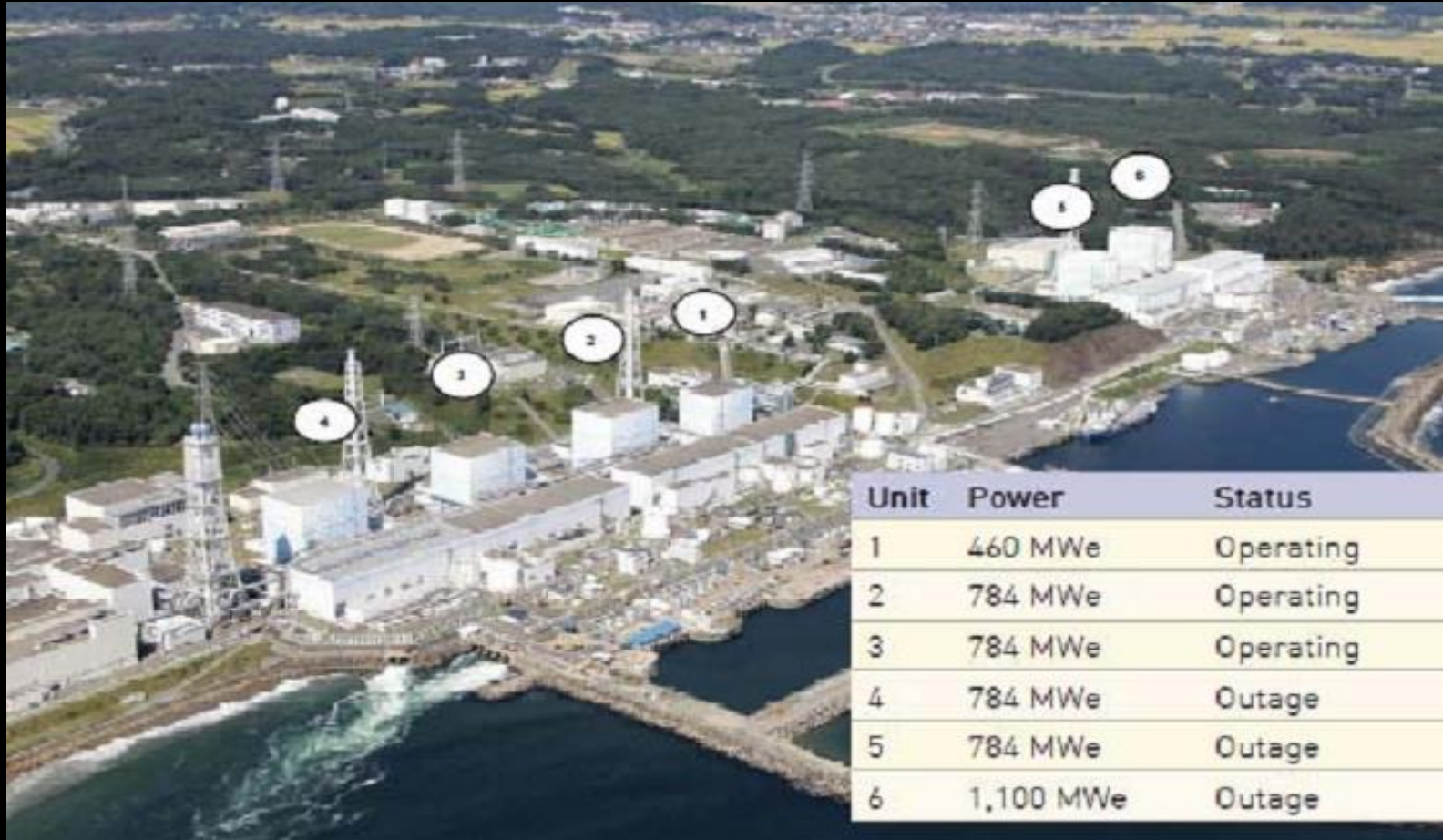
100 mSv expozíció esetén a szolid tumor halálozások ~6%-át, a leukémiás halálozások ~19%-át okozza a sugárexpozíció. Atomerőműi dolgozóknál a sugár expozíció a daganatok 1-2%-áért felelős.

# Fukushima reaktorbalet



# Fukushima reaktorbaleset II.

- 2011. március 11-én a Japánban valaha előfordult legnagyobb földrengést követően hatalmas cunami érte el Japánt. A vízoszlop magassága a Fukushima reaktoroknál 8-14 m magas volt, az Iwate prefektúra területén a 40 m-t is elérte. A földrengés és cunami következtében 15854-en haltak meg, és 3155 személy tűnt el. Kb. 27000 személy sérült meg.
- A fukusimai erőmű védelmi rendszerét 5,7 m magas vízoszlop visszatartására tervezték.



Unit	Power	Status
1	460 MWe	Operating
2	784 MWe	Operating
3	784 MWe	Operating
4	784 MWe	Outage
5	784 MWe	Outage
6	1,100 MWe	Outage

# A földrengés alatti helyzet

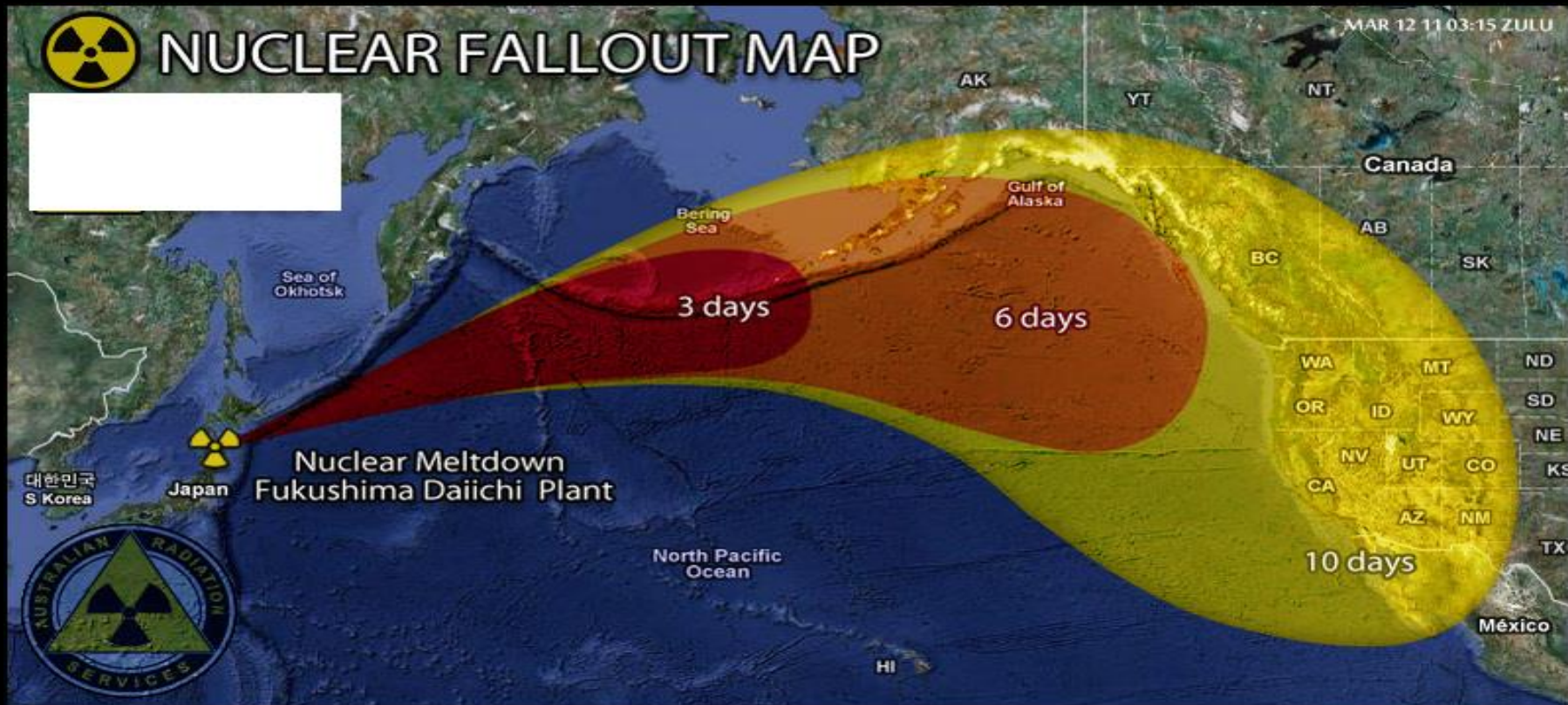
- Az erőmű 6 reaktorából az, 1, 2 és 3 működött. Ezeket az automata védelmi rendszer leállította, és bekapcsolta a vészhelyzeti generátorokat, amelyek a hűtővízellátást biztosító pumpákat működtették.
- A cunami a földrengés után 15 perccel érte el az erőművet, amely teljesen a víz alá került, a generátorok működése leállt.
- A hűtés nélkül a leállított reaktorok felmelegedtek és részleges leolvadás alakult ki. A hűtővíz felforrt, hidrogén keletkezett, amely felrobbant. Az 1-4 reaktorok károsodtak, a 2-ben tűz is kiütött. A robbanás következtében radioaktív anyagok (pl. Cs-137, Cs-134, I-131) kerültek a környezetbe.

# A baleset utáni helyzet

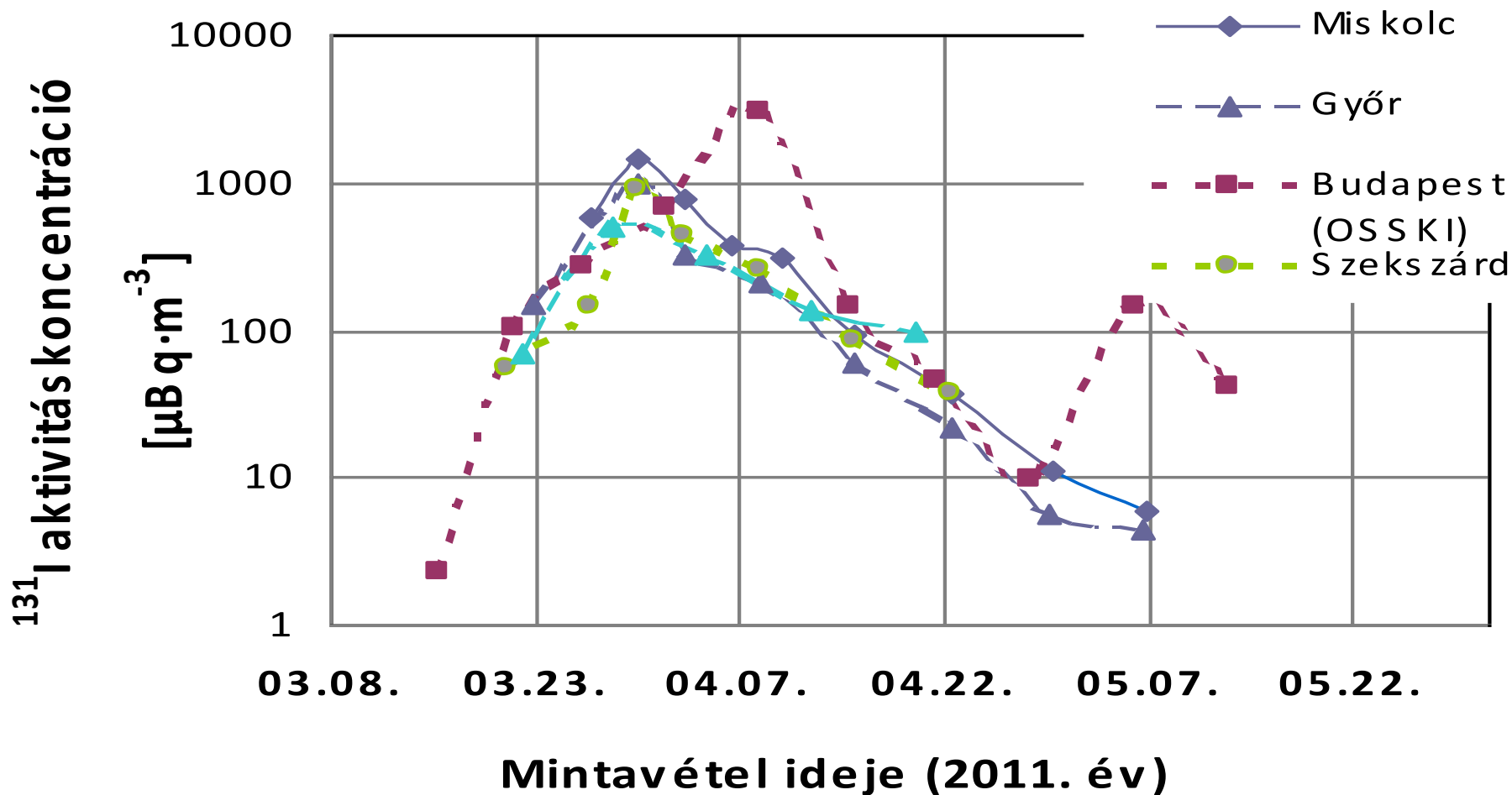


source: Digital Globe

# A radioaktív szennyezés terjedése a levegőben



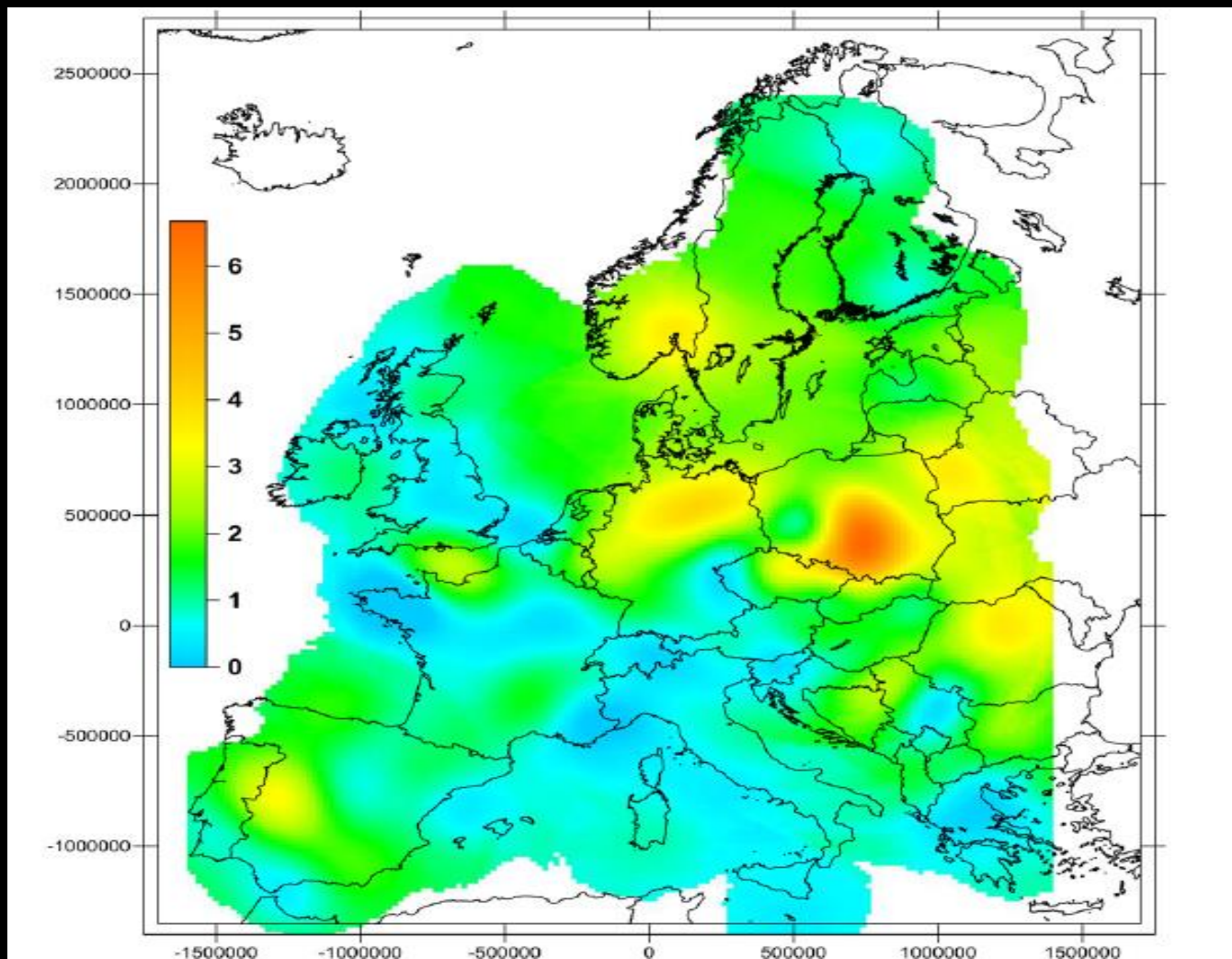
# Aeroszolhoz kötött $^{131}\text{I}$ aktivitáskoncentrációjának időbeli változása Magyarországon



A csernobili erőmű balesete után Budapesten  
(1986.05.06.)

$^{131}\text{I}$  2,15  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$

# Levegő I-131 kontamináció Európában (mBq/m<sup>3</sup>)



Intézkedés nem volt szükséges

# Korai következmények a fukushimai elhárító személyzet esetében

- Az elhárító személyzetből ~100 személy kapott >100 mSv-et.
- Néhány elhárító 2-3 Sv helyi (láb) dózist kaphatott.

# Magyarországi szabályozás

2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről

- Általános veszélyhelyzeti munkavállalók sugárterhelésének vonatkoztatási szintje 50 mSv effektív dózis
- A lakosság jelentős sugárterhelésének megakadályozását célzó veszélyhelyzeti munkavállalók külső sugárterhelésének vonatkoztatási szintje 100 mSv effektív dózis
- Emberélet megmentése esetén a veszélyhelyzeti munkavállalók sugárterhelésének vonatkoztatási szintje 250 mSv effektív dózis
- A személyek felkészítését és tevékenységük megtervezését úgy kell végrehajtani, hogy a várható sugárterhelésük az irányadó vonatkoztatási szinteket lehetőleg ne, a teljes veszélyhelyzet-kezelési időszakra vonatkoztatva pedig az 500 mSv effektív dózist semmiképpen se haladja meg
- Ha az elhárítás során 100 mSv-nél nagyobb effektív dózis várható, az elhárítási feladatok csak önkéntesen végezhetők.

# Korai intézkedések

- Március 11. – 3 km-en belül a lakosság evakuálása 10 km-en belül elzárkóztatás
- Március 12. – 20 km-en belül a lakosság evakuálása
- Március 15. – 30 km-en belül a lakosság evakuálása

A lakosság részére ~230000 jódtablettát osztottak ki.

Több mint 60 személy meghalt a kiürítés alatt, vagy röviddel utána! A kiürítés utáni 3 hónapban a mortalitás 1,5-re nőtt az idősek körében!

# A fukusimai reaktorbaleset várható hosszú távú következményei (2013. február 28. WHO jelentés)

- Újszülött fiúk leukémia kockázata várhatóan 7%-al nő, vagyis 10000 újszülött közül 60 helyett 64-ben fog kialakulni leukémia a várható teljes élettartama alatt.
- Újszülött lányok esetében az emlőrák kockázata várhatóan 6%-al nő, vagyis 10000 nő közül 553 helyett 586-ban alakul ki emlőrák.
- A legnagyobb kockázattal a pajzsmirigy daganatok esetében kell számolni. Az újszülött lányok kockázata 70%-al nő, vagyis 10000 személy esetében az eredetileg várható 75 helyett 125 pajzsmirigy daganat fog kialakulni.

# Sugaras munkahelyek kockázata

Table 5: Loss of life expectancy correlated with various activities

Activity	Days of life lost
<u>Being unmarried (male)</u>	<u>3500</u>
<u>Cigarette smoking</u>	<u>2250</u>
<u>Being unmarried (female)</u>	<u>1600</u>
Being 30% overweight	1300
<u>Working as coal miner</u>	<u>1100</u>
Being 20% overweight	900
Less than 8th grade education	850
Stroke	520
Motor vehicle accidents	207
Accidents in home	95
Diabetes	95
Average job-accidents	74
Drowning	41
Job with radiation exposure (5 mSv per year)	40
<u>Background radiation</u>	<u>8</u>
Coffee	6
Oral contraceptives	5
Diet drinks	2
Pap test	-4
Smoke alarm in home	-10
Air bags in car	-50

# Összefoglalás

- Az ionizáló sugárzás általános daganatkeltő ágens.
- Nincs ionizáló sugárzásra specifikus daganat.
- Fiatalon exponálódott személyekben hamar megugrik a leukémiák gyakorisága, majd a megnőtt kockázat eltűnik.
- Az ionizáló sugárzás okozta szolid tumorok abszolút száma nő az idővel.
- Az ionizáló sugárzás nem-daganatos betegségeket is okozhat.
- Ismeretlen eredetű csontvelői rendellenességek esetén gondoljunk akut sugárbaleset lehetőségére is.

*Köszönöm a figyelmüket!*