

Sugárvédelmi tervezés alapjai

Milecz-Mitykó Richárd

Biztonsági célok

- Biztonsági célok: az ionizáló sugárzás hatásainak kockázatának minimalizálása
- sugárvédelmi cél személyzet, lakosság és környezet védelme, normál üzem és feltételezett üzemzavarok / balesetek esetén ALARA-elv
- műszaki cél (a tervezési üzemzavarok radiológiai következményei enyhék, a jelentős balesetek bekövetkezési valószínűsége igen kicsi legyen)
- A biztonsági elemzések célja: a biztonsági szint felmérése és megfelelőségének ((biztonsági célok elérésének) bizonyítása

Biztonsági alapelvek (IAEA)

- A biztonságért való felelősség
- A kormány szerepe
- Vezetés és irányítás a biztonságért
- A létesítmények és tevékenységek indokoltsága
- A védelem optimalizálása
- Az egyéneket érintő kockázatok korlátozása
- A jelen és a jövő nemzedékek védelme
- Balesetek megelőzése
- Vészhelyzeti felkészültség és reagálás
- Védőintézkedések a meglévő vagy nem szabályozott sugárzási kockázatok csökkentése érdekében

Mikor kell a biztonsági elemzés

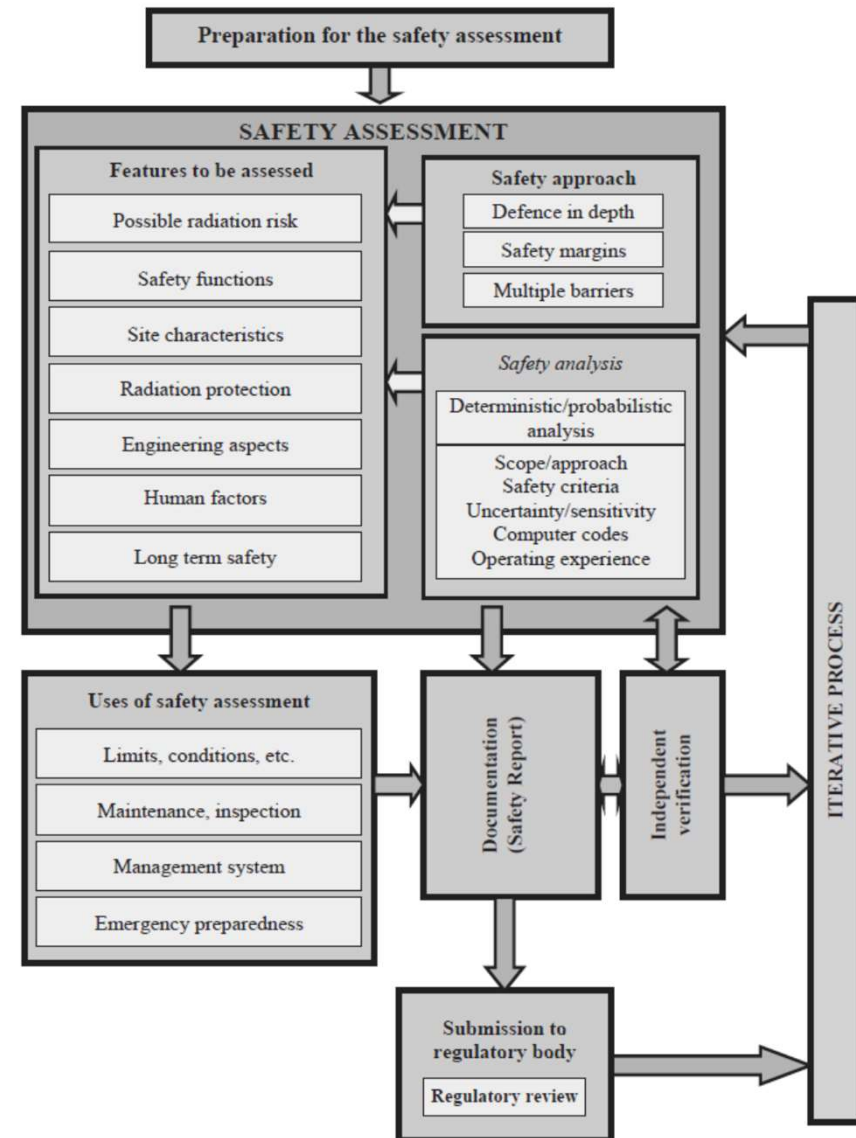
- A létesítmény vagy tevékenység helyszínének értékelése
- A terv(ek) kidolgozása
- A létesítmény megépítése vagy a tevékenység implementálása
- A létesítmény vagy tevékenység megrendelése
- A létesítmény üzemeltetésének vagy a tevékenység végzésének megkezdése
- A létesítmény rendes működése vagy a tevékenység rendes folytatása
- A tervezés vagy a működés módosítása
- Időszakos biztonsági felülvizsgálatok
- A létesítmény élettartamának meghosszabbítása az eredeti tervezési élettartamán túl
- A létesítmény tulajdonosi vagy irányítási változásai
- A létesítmény leszerelése és lebontása
- A radioaktív hulladékok ártalmatlanítására szolgáló létesítmény bezárása és a bezárást követő szakasz
- A telephely kármentesítése és a hatósági ellenőrzés alól való feloldás.

Elemzés komolysága függ

- Potenciális sugárzás veszélytől
- Egy létesítmény megépítéséhez vagy egy tevékenység végrehajtásához szükséges erőfeszítések mértéke és nehézsége
- A kapcsolódó folyamatok száma, amelyek ellenőrzésére szükség van
- A radioaktív anyagok kezelésének mértéke
- A radioaktív anyag élettartama
- a rendszerek és alkatrészek megbízhatósága és összetettsége
- a szerkezetek, rendszerek és alkatrészek hozzáférhetősége karbantartás, ellenőrzés, vizsgálat és javítás céljából.

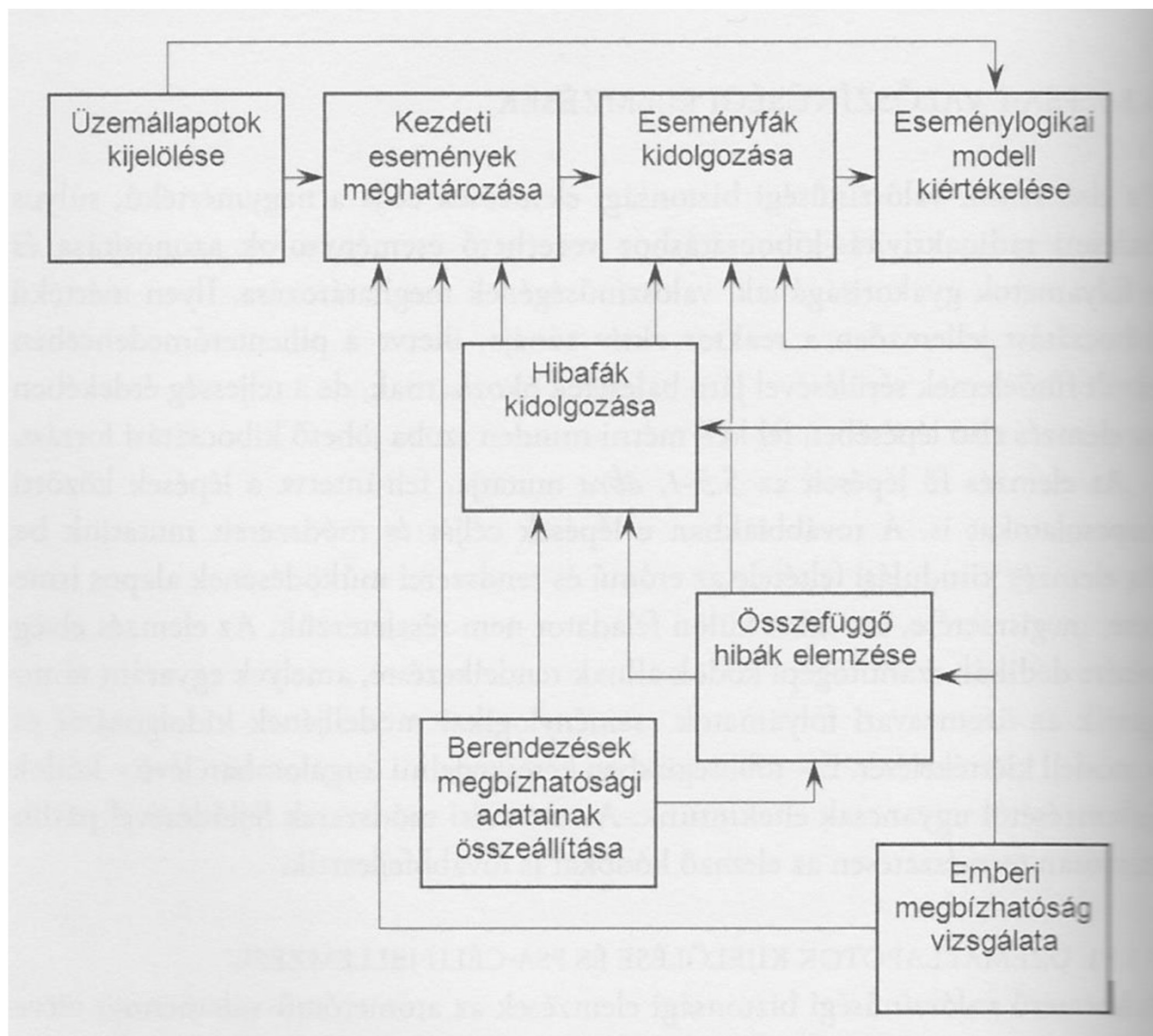
Elemzés menete

- Tisztázás
 - Helyszínnél külső események is
 - Pl. lesz e cunami Pakson
 - Mérnöki aspektusnál tervezési elv és annak való megfelelés
 - Mélységi védelem: eltérések kezelése, ha nem lehet hatás minimalizálásra terv



Determinisztikus és valószínűségi elemzés

- Determinisztikus elemzés a kezdeti állapotból kiindulva, a rendszerek működési feltételei mellett, számítógépes modellel határozzák meg az események biztonsági jellemzőit
 - Pl atomreaktoban reaktorfizikai számítások
- Valószínűségi biztonsági elemzések a súlyos baleseti kibocsátáshoz vezető eseménysorok azonosítása és valószínűségének meghatározása
 - üzemállapotok kijelölése
 - kezdeti események meghatározása
 - folyamatanalízis (eseményfák kidolgozása)
 - rendszeranalízis (hibafák kidolgozása)
 - összefüggő hibák elemzése
 - emberi megbízhatóság
 - berendezések megbízhatósága



Valószínűségi biztonsági elemzések (PSA-2)

- Célja: a súlyos baleseti folyamatok átfogó leírása (zónasérülés, környezeti kibocsátás)
- Az elemzés főbb lépései:
 - a feladat meghatározása (terjedelem)
 - kapcsolódás a PSA-1 elemzéshez
 - baleseti állapotok meghatározása (PDS)
 - zónasérüléssel eseményláncok kiválasztása (CD)
 - a súlyos baleseti folyamat és a konténment viselkedésének leírása
 - forrástagok meghatározása
 - bizonytalanságelemzés

Elemzés része

- Radioaktív források típusa
- Forrásokkal végzett munka jellege / leírása
 - Milyen forrással, mit, hol, gyakoriság, résztvevők
- Kontamináció valószínűsége, jellege
- Használt védőeszközök (szükséges létszám is)
- Keletkező hulladékok és kezelésük
- Ellenőrzés módja
- Tárolás, szállítás
- Kitett csoportok
- Dózismegszorítás és várható dózisok (baleseti is)
- Jellemző besugárzási útvonalak
- Kibocsátási útvonalak
- Hivatkozási alap
 - Törvény / rendelet, szabványok, gyártó / szállító javaslata, korábbi adatok / becslések

Biztonsági eszközök

- Inherent (rövid felezés, hőmérséklet reaktivitás csökkentése)
- Biztonsági rendszer
 - Passzív (hermetikus zártság, kifolyásgátló)
 - Aktív (keringtető rendszer, hűtőrendszer)
- Alapelvei
 - redundancia alkalmazása (a minimumnál több)
 - diverzitás (eltérő működési elvű, üzemeltetési módú rendszerek)
 - függetlenség (funkcionális és fizikai elkülönítés)
 - Meghibásodástűrés
- ad

Fluens

- Φ : részecske fluens [db/m²]
- N: adott sugárzási tér meghatározott pontjában az e pont körüli megfelelően kis gömb felületén belépő részecskék száma [db]
- S: gömb keresztmetszetének felülete [m²]
- $\Phi = \frac{dN}{dS}$, homogén térben $\Phi = \frac{N}{S}$
- időegységre vonatkoztatott részecske fluenst fluensteljesítménynek nevezzük $\Phi = \frac{d\Phi}{dt}$ (ahol t az idő)

Fluxus

- S: adott normálissal jellemzett felületen
- F: Fluxus [db/m² s]
- N: adott sugárzási tér meghatározott pontjában S felületen egységnyi idő alatt átáramló, adott irányban mozgó részecskék száma [db]
- n részecskesűrűség
- t idő, v sebesség
- $\vec{F} = \frac{dN}{dSdt} \vec{e} = \frac{dN}{dV} \vec{v}$, azaz részecskesűrűség sebesség szorzat
- részecskeintenzitás részecskeáramra merőleges felületre vett fluxus
- $I = \int \vec{F} d\vec{S} = \int \frac{\delta N}{\delta V} \vec{v} dS = \int n \vec{v} dS$
- Lebontható adott energiára és térszögre
- Adott irányba haladó nyalábnak az a része fog dt idő alatt dS felületen áthaladni ami egy vdt hosszúságú hengerben van

Bevezetés a reaktorfizikába (Szatmáry Zoltán)

311 oldal megjegyzés

- „Hétköznapi nyelven szoktunk „nvt”-ről is beszélni, hiszen a fluxus $n v$, azaz a neutronsűrűség és a sebesség szorzata, aminek az integrálása t -vel való szorzást jelent, ha a fluxus időben állandó. Többen a latin eredetű „fluens” kifejezést használják. Ez nem szerencsés, mert ez a szó a latinban melléknév. Ezen túlmenően germanizmus, mert a német „Fluente” szó átvétele (eredetileg a matematikában). A fizikában jobb lenne a latin „fluentia” főnévnél, illetve annak magyaros „fluencia” ejtésénél maradni, mint számos ez nyelvben történik: az angol és francia „fluence”, a spanyol „fluencia” mind ebből a főnévből származik.”

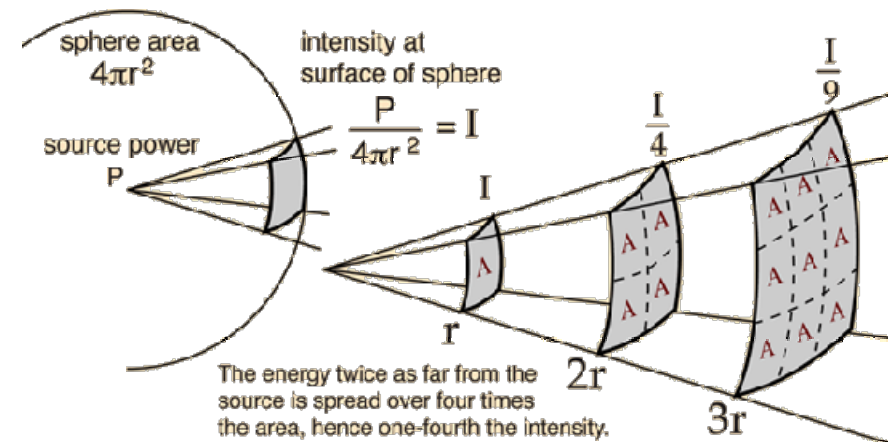
Pontforrás

- Gömbszimmetrikus (izotróp) terjedés
 - Nem érdeemben kölcsönható közegben
- Teljes térszögben Intenzitás az aktivitás
 - Fluxus fordítottan arányos a távolsággal

$$D' = \frac{dD}{dt} = \Gamma \frac{A}{r^2}$$

- Dózisállandó (ún. gamma faktor)
 - I-131 esetén: $50 (\mu\text{Sv/h})/(\text{GBq/m}^2)$
 - Számítható $\Gamma = E\mu$ ahol E energia, μ abszorpciós tényező
 - Több energiánál súlyozott átlag

- Elnyelt dózis $D = \int_0^t \Gamma \frac{A(t)}{r^2} dt$, illetve állandó aktivitásnál $D = \Gamma \frac{A}{r^2} t$



Árnyékolás

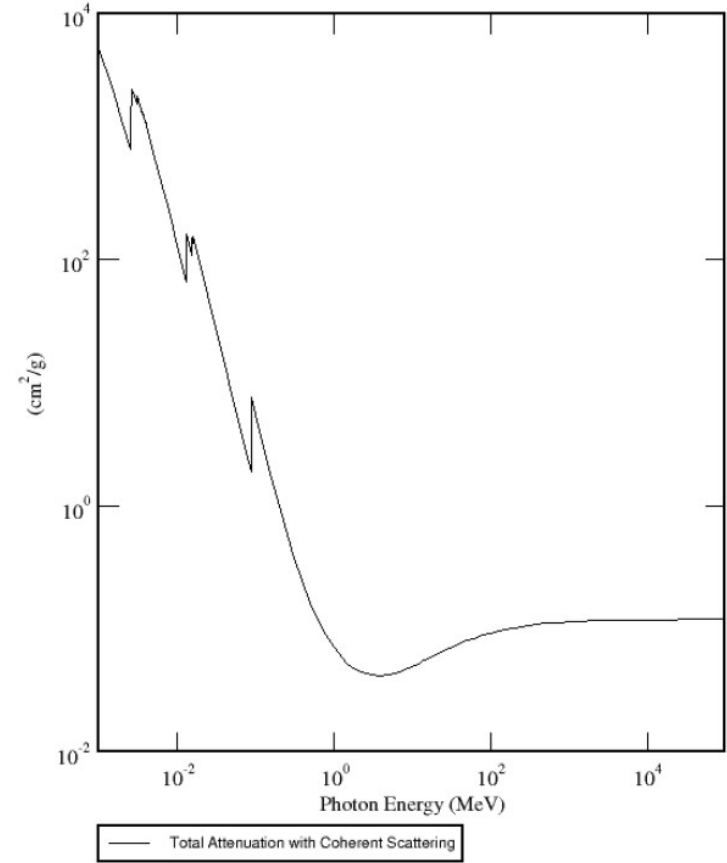
- Intenzitás exponenciálisan csökken
- $I = I_0 e^{-\mu d}$
- I_0 intenzitás az árnyékoló anyag forrás felőli felületén
- μ gyengítési tényező (makroszkopikus hatáskeresztmetszet)
 - Gyakran sűrűségre normálva van megadva az irodalomban $\mu = \mu_m \rho$
 - Additív: keverék tényezője az alkotók súlyozott átlagából
- d anyag vastagsága
- Exponenciálisban nem lehet mértékegység

Gyengítési együttthatók adatbázisa

- <https://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2>

<p>Select by: (only elements 1 - 100)</p> <p>Atomic Number: <input type="text"/></p> <p>or</p> <p>Symbol: <input type="text" value="Pb"/></p>	<p>Options for output units:</p> <p><input checked="" type="radio"/> All quantities in cm^2/g</p> <p><input type="radio"/> All quantities in <i>barns/atom</i></p> <p><input type="radio"/> Partial interaction coefficients in <i>barns/atom</i> and total attenuation coefficients in cm^2/g</p>
<p>Graph options:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Total Attenuation with Coherent Scattering</p> <p><input type="checkbox"/> Total Attenuation without Coherent Scattering</p> <p><input type="checkbox"/> Coherent Scattering</p> <p><input type="checkbox"/> Incoherent Scattering</p> <p><input type="checkbox"/> Photoelectric Absorption</p> <p><input type="checkbox"/> Pair Production in Nuclear Field</p> <p><input type="checkbox"/> Pair Production in Electron Field</p> <p><input type="checkbox"/> None</p>	<p>Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)</p> <p>Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.</p> <div><div><div>512</div></div><div><input checked="" type="checkbox"/> Include the standard grid</div></div> <p>Energy Range:</p> <p>Minimum: <input type="text" value="0.001"/> MeV</p> <p>Maximum: <input type="text" value="100000"/> MeV</p>

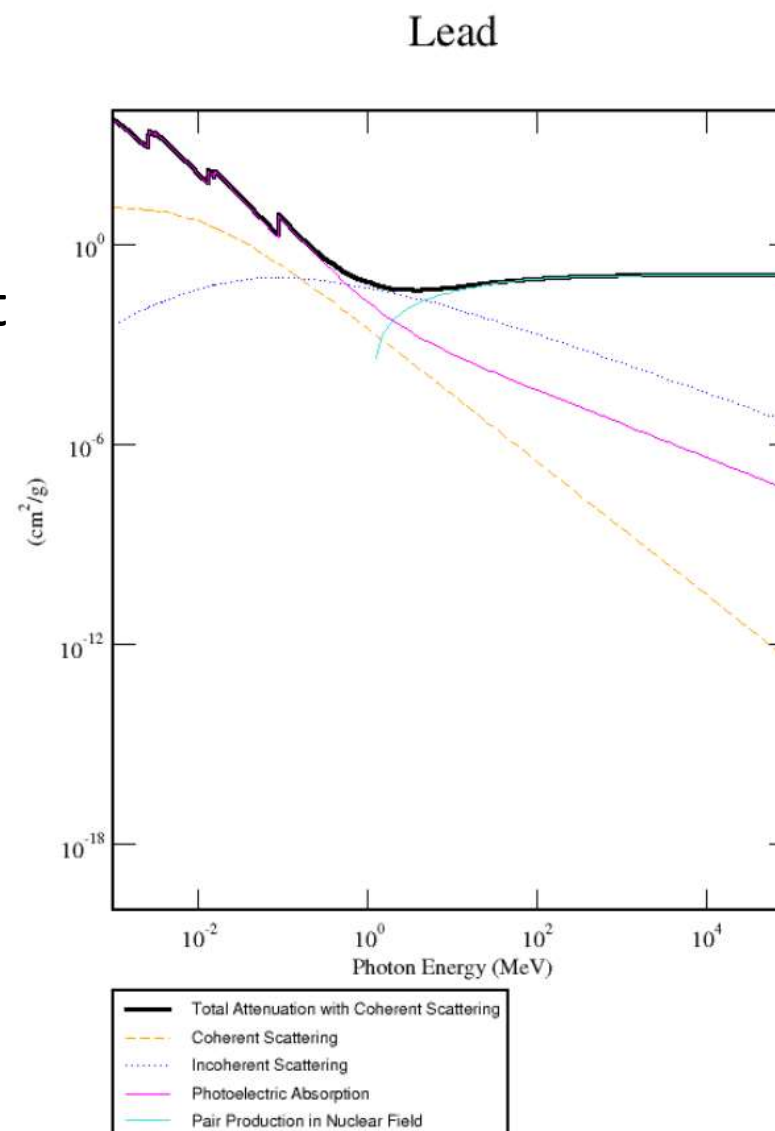
Lead



Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
	1.000E-03	1.251E+01	3.587E-03	5.197E+03	0.000E+00	0.000E+00	5.209E+03	5.197E+03
	1.500E-03	1.201E+01	6.601E-03	2.344E+03	0.000E+00	0.000E+00	2.356E+03	2.344E+03
	2.000E-03	1.144E+01	9.620E-03	1.274E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.285E+03	1.274E+03
	2.484E-03	1.088E+01	1.240E-02	7.900E+02	0.000E+00	0.000E+00	8.009E+02	7.900E+02
82 M ₅	2.484E-03	1.088E+01	1.240E-02	1.385E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.396E+03	1.385E+03
	2.534E-03	1.082E+01	1.268E-02	1.636E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.647E+03	1.636E+03
	2.586E-03	1.076E+01	1.297E-02	1.933E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.944E+03	1.933E+03
82 M ₄	2.586E-03	1.076E+01	1.297E-02	2.439E+03	0.000E+00	0.000E+00	2.450E+03	2.439E+03
	5.120E+02	1.174E-08	4.959E-04	8.125E-06	1.090E-01	1.536E-03	1.111E-01	1.111E-01

A hatáskeresztmetszetekről

- Tipikusan megkülönböztetünk több típust
 - Teljes
 - Elnyelés / fotoeffektus
 - Szórás
 - Párkeltés
- Anyag és E függő
 - Viszonyok az ábrán



Keveréke keresztmetszet

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:

```
H2O 0.9  
NaCl 0.1
```

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

```
H 0.0056  
O 0.4983  
Na 0.0171  
Mg 0.0024  
Al 0.0456  
Si 0.2158  
S 0.0012  
K 0.0192  
Ca 0.0826  
Fe 0.0122
```

Optional output title:

Graph options:

- ☒ Total Attenuation with Coherent Scattering
- ☐ Total Attenuation without Coherent Scattering
- ☒ Coherent Scattering
- ☐ Incoherent Scattering
- ☒ Photoelectric Absorption
- ☒ Pair Production in Nuclear Field
- ☐ Pair Production in Electron Field
- ☐ None

Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)

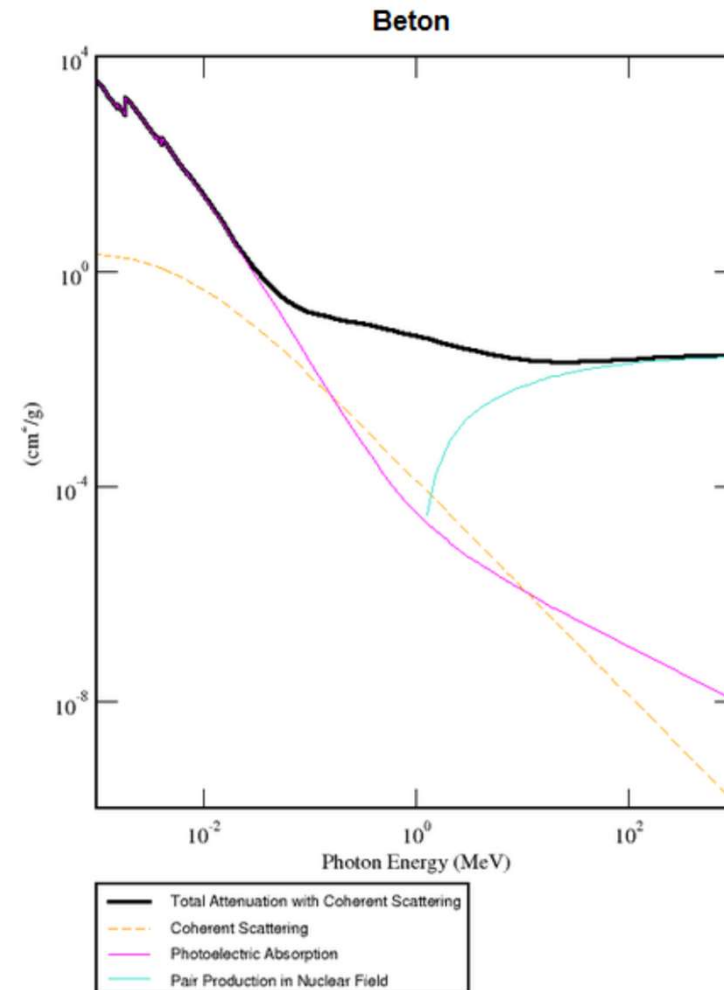
Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV). One energy per line. Blank lines will be ignored.

☒ Include the standard grid

Energy Range:

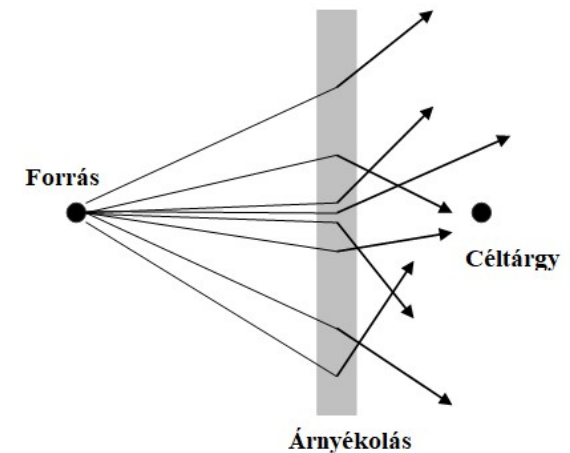
Minimum: MeV

Maximum: MeV



Buildup

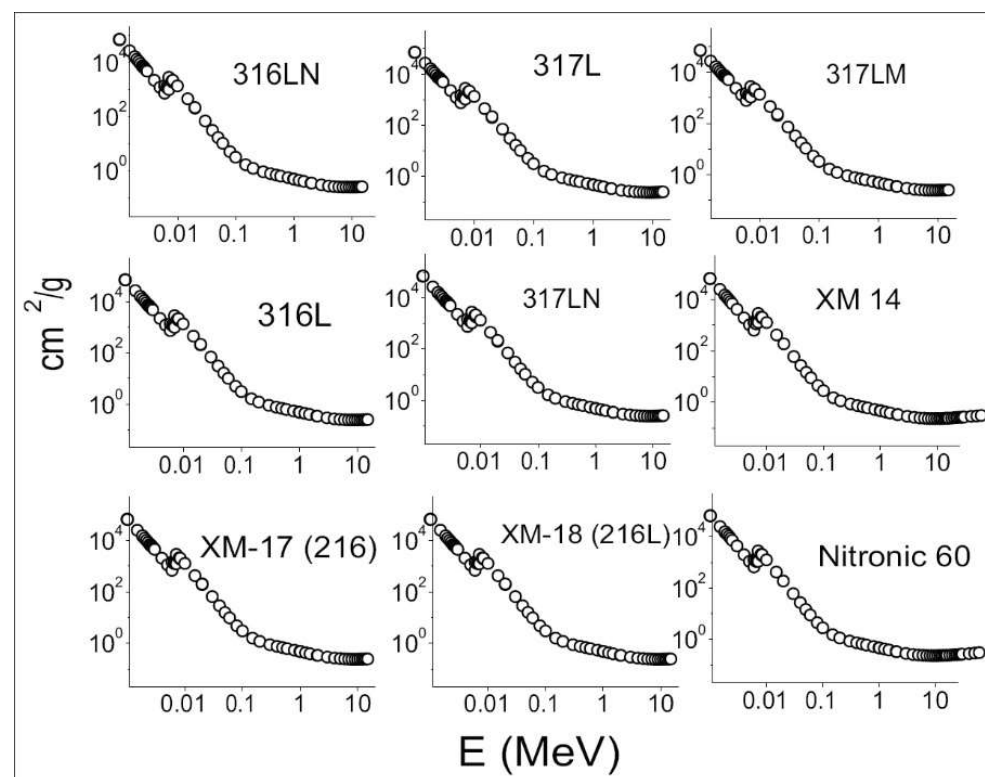
- Elég nagy anyagvastagságnál több reakció
- Részecske visszaszóródik a nyalábba ill. a célpontra
- Külön faktorral kezelik
- $I_{valós} = BI = BI_0 e^{-\mu d}$
- Sugárzás és anyag függő
- Mindig nagyobb mint 1



Buildup faktor példák

R (mfp)	Energy (MeV)	
	15	8
0.5	1.15E+00	1.22E+00
1	1.28E+00	1.43E+00
2	1.47E+00	1.79E+00
3	1.64E+00	2.20E+00
4	1.90E+00	2.54E+00
5	2.11E+00	2.83E+00
6	2.24E+00	3.15E+00
7	2.58E+00	3.49E+00
8	2.80E+00	3.77E+00
10	2.96E+00	4.24E+00

Steel type	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
316LN	0.03	0.75	2	0.045	0.03	18	2	14	65.14
317L	0.03	0.75	2	0.045	0.03	20	3	15	62.14
317LM	0.03	0.75	2	0.045	0.03	20	5	17.5	59.64
317LMN	0.03	0.75	2	0.045	0.03	20	5	17.5	59.64
317LN	0.03	0.75	2	0.045	0.03	20	3	15	62.14
XM-14	0.12	0.75	16	0.06	0.03	19	0	6	58.04
XM-17	0.08	0.75	9	0.045	0.03	22	2	7	61.09
XM-18	0.03	0.75	9	0.05	0.03	22	2	7	61.14
Nitronic 60	0.1	3.5	9	0.06	0.03	18	0	9	63.81

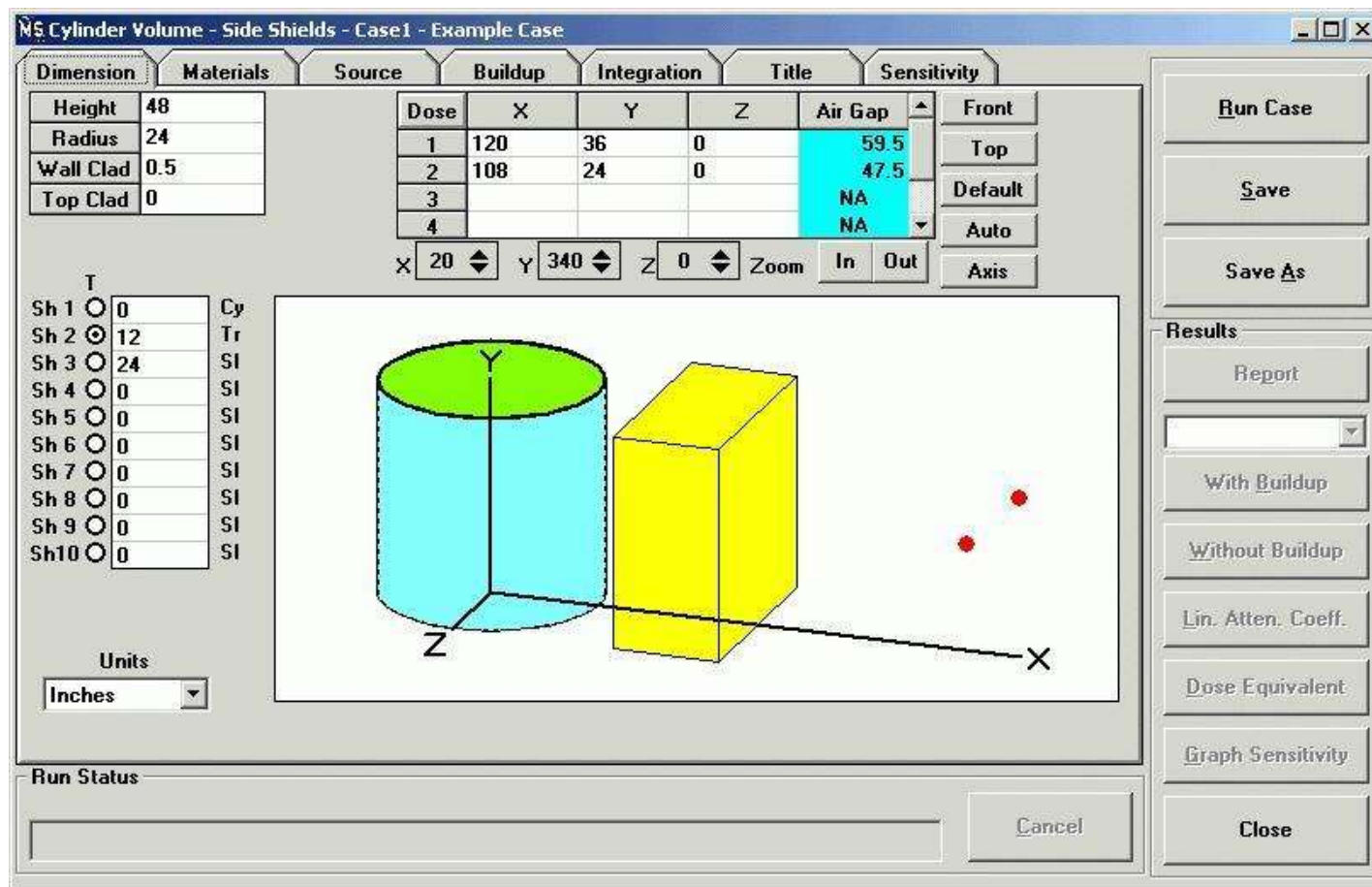


Az egyszerűbb megoldás

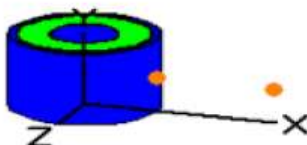
- <http://www.radprocalculator.com/>
- Példa gamma emitternél
- Egyéb funkciók
 - Gamma emitter shielding equations (with or without buildup)
 - Beta emitter dose rate and activity
 - Grams of plutonium (Pu) and uranium (U) from activity (specific activity)
 - Isotope radioactive decay, timed decay and half life equations
 - Bremsstrahlung x-ray calculations for beta interactions
 - Inverse Square Law calculations for electromagnetic energies
 - Minimum detectable concentration and contamination (MDC aka MDA) for counters and scanners (includes LLD and critical level calculations)
 - ALARA calculations for dose and job planning

The screenshot shows the 'Rad Pro Calculator' website. The main title is 'Rad Pro Calculator' in a large, stylized font. Below it is a navigation menu with links: 'Site Navigation Menu', 'Home Page', 'Online Calculators', 'Freeware', 'Rad Pro Information', 'Documents', and 'Help'. A note states: 'For those needing portability, Rad Pro for Desktop works with Windows 8.1/10 tablets. Will not work with Surface tablets running Windows RT.' The main content area is titled 'Gamma Emitter Point Source Dose-Rate <--to--> Activity and Shielding Calculations (In Air)'. It contains several input fields and checkboxes. Under 'Select Calculation', 'Activity and Dose-Rate' is selected. 'Add Shielding' is checked. Under 'Enter or Select Isotope', 'Cs-137' is selected. 'Select Dose-Rate Units' is 'uSv/hr'. 'Select Activity Units' is 'MBq'. 'Select Distance Units' is 'Meters'. 'Enter Activity' is '1e6 MBq'. 'Enter Distance' is '1 Meters'. 'Select Coefficient' has 'Attenuation (mu)' selected. On the right, 'Shielding Entries' includes 'Select Shield Material' (Lead), 'Select Thickness Units' (Centimeters), and 'Enter Shield Thickness' (10 cm). 'Use Buildup Factor (recommended)' is checked. A 'Calculate' button is present. Below it, the results are displayed: '1e6 MBq of Cs-137 at 1 Meters' and 'Calculated Dose-Rate' of '0.642693187773096 uSv/hr'. There are also links for 'About the Gamma Calculator' and 'Gamma Emission and Exposure Rate'.

Microshield

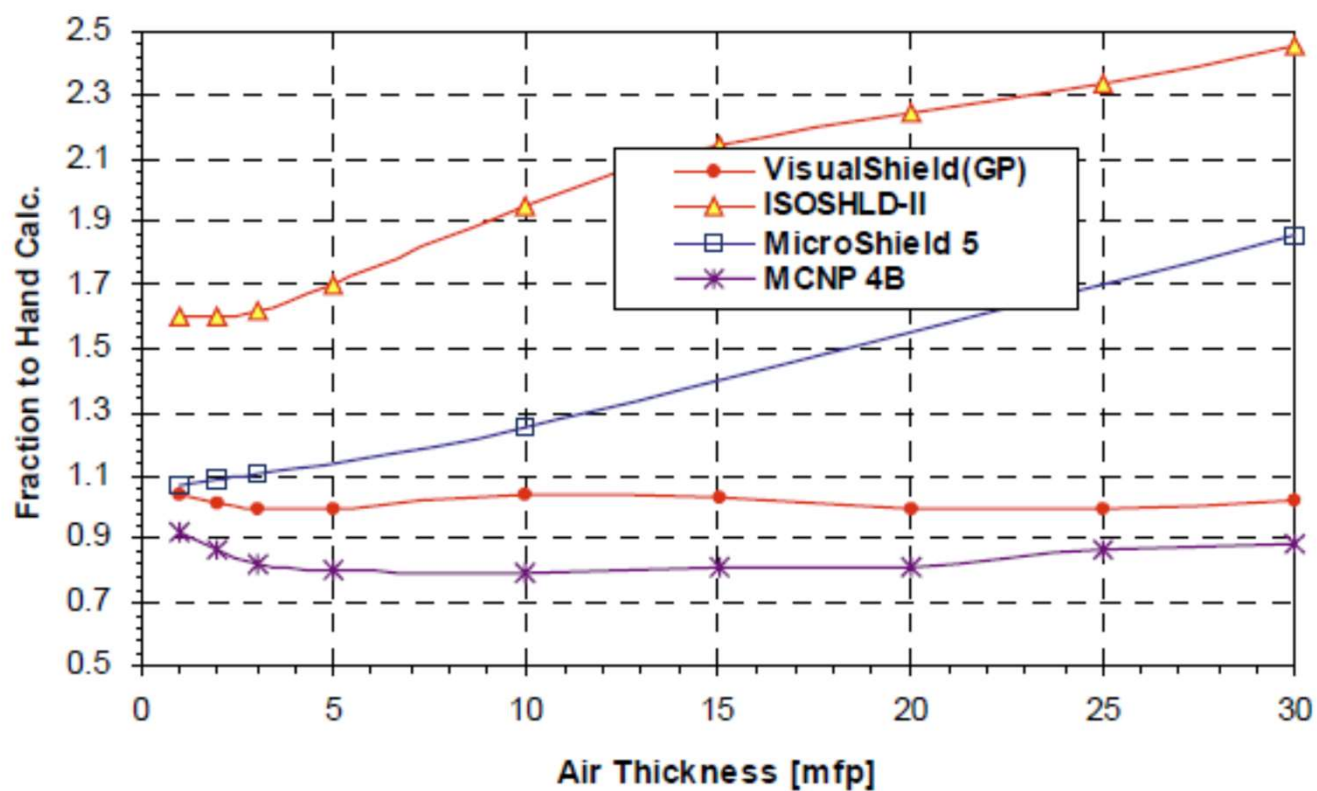


MicroShield 7.02				
KKPR-PSTNT (08-MSD-7.02-1527)				
Date	By	Checked		
Filename	Run Date	Run Time	Duration	
jj□ms7	Juni 21, 2015	14:32:58	00:00:00	
Project Info				
Case Title	Rancangan <i>shielding</i> limbah reflektor reaktor Triga Mark II-Irsvad(2)			
Description	Co-60 0,557 Ci, tebal <i>shielding</i> 2 cm			
Geometry	12 - Annular Cylinder - External Dose Point			
Source Dimensions				
Height	76,3 cm (2 ft 6,0 in)			
Inner Cyl Radius	26,5 cm (10,4 in)			
Inner Cyl Thickness	0,65 cm (0,3 in)			
Outer Cyl Thickness	0,65 cm (0,3 in)			
Source	27,1 cm (10,7 in)			
Dose Points				
A	X	Y	Z	
#1	61,9 cm (2 ft 0,4 in)	35,5 cm (1 ft 2,0 in)	0,0 cm (0,0 in)	
#2	161,9 cm (5 ft 3,7 in)	35,5 cm (1 ft 2,0 in)	0,0 cm (0,0 in)	
Shields				
Shield N	Dimension	Material	Density	
Cyl. Radius	26,5 cm	Air	0,00122	
Shield 1	,65 cm	Aluminum	2,7	
Source	5,29e+05 cm ³	Carbon	2,25	
Shield 3	,65 cm	Aluminum	2,7	
Shield 4	5,0 cm	Air	0,00122	
Shield 5	2,0 cm	Lead	11,34	
Transition		Air	0,00122	
Air Gap		Air	0,00122	
Source Input: Grouping Method - Actual Photon Energies				
Nuclide	Ci	Bq	μCi/cm ³	Bq/cm ³
Co-60	5,5700e-001	2,0609e+010	1,0534e+000	3,8975e+004



Buildup: The material reference is Transition Integration Parameters					
Radial					10
Circumferential					10
Y Direction (axial)					20
Results - Dose Point # 1 - (61,9,35,5,0) cm					
Energy (MeV)	Activity (Photons/sec)	Fluence Rate MeV/cm ² /sec No Buildup	Fluence Rate MeV/cm ² /sec With Buildup	Exposure Rate mR/hr No Buildup	Exposure Rate mR/hr With Buildup
0.6938	3.362e+06	3.172e-01	3.090e+00	6.125e-04	5.966e-03
1.1732	2.061e+10	1.325e+04	6.462e+04	2.367e+01	1.155e+02
1.3325	2.061e+10	1.884e+04	8.172e+04	3.269e+01	1.418e+02
Totals	4.122e+10	3.209e+04	1.463e+05	5.636e+01	2.573e+02
Results - Dose Point # 2 - (161,9,35,5,0) cm					
Energy (MeV)	Activity (Photons/sec)	Fluence Rate MeV/cm ² /sec No Buildup	Fluence Rate MeV/cm ² /sec With Buildup	Exposure Rate mR/hr No Buildup	Exposure Rate mR/hr With Buildup
0.6938	3.362e+06	5.125e-02	4.574e-01	9.894e-05	8.831e-04
1.1732	2.061e+10	1.910e+03	8.590e+03	3.414e+00	1.535e+01
1.3325	2.061e+10	2.666e+03	1.068e+04	4.625e+00	1.853e+01
Totals	4.122e+10	4.576e+03	1.927e+04	8.038e+00	3.388e+01

Többféle kód

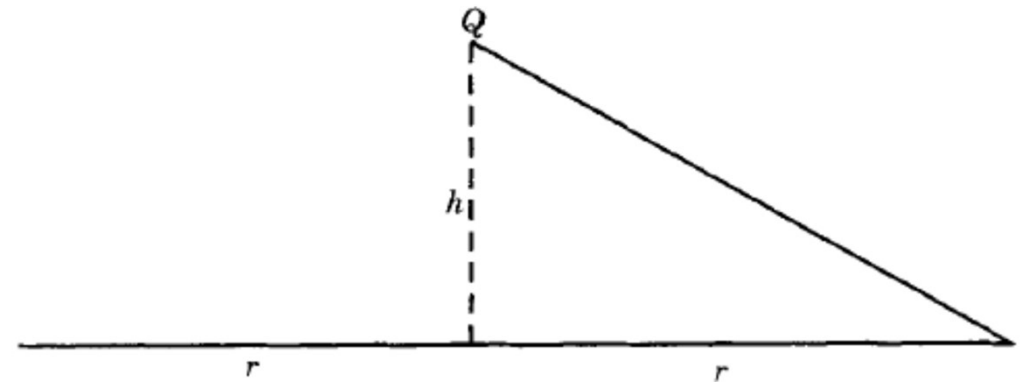
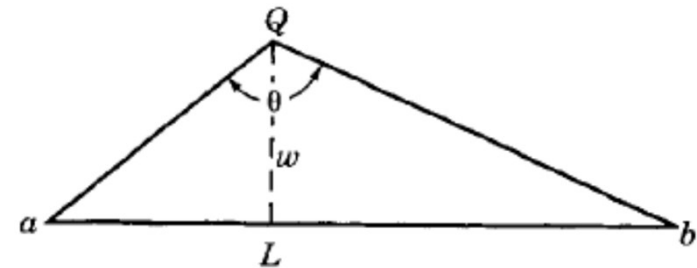


Nem pont forrás

- Dózis additív mennyiség
- Adott térfogatú forrás pontforrások „összege”
- A dózis és dózisteljesítmény a pontforrás terek összege önabszorpció figyelembevételével
- $D' = \int_V D'(r)dr$
- Analitikusan nem (vagy nehezen) megoldható forrásnál közelítés alkalmazható
 - Jellemzően pontforrás közelítés ahol a teljes aktivitás pontba sűrítve a súlypontba vagy a forrás térfogatában lévő legközelebbi pontba van helyezve

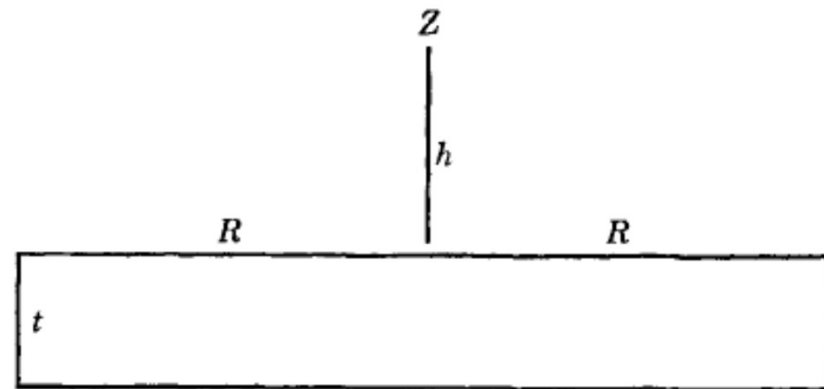
Vonal és korong forrás

- $D' = \Gamma C_L \vartheta / w$
- Ahol C_L a lineáris koncentráció
 - $C_L = A/L$
- $D' = \pi \Gamma C_S \ln \frac{r^2 + h^2}{h^2}$
- Ahol C_S a felületi koncentráció
 - $C_S = A/S$



Henger forrás

- $D' = \pi \Gamma \frac{C_V}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2}$
- $C_V = A/V$



Tervezésben (útmutatókban) használt kifejezések

- Forrás specifikáció pl. 0.8 Gy/min 1m-re
- SAD: forrás tengely (izocenter) távolság
- W: (workload): kibocsátott dózis adott időben pl. Gy/hét 1m-re
- U (use factor): az időhányad amiben a nyaláb az árnyékolást éri a sugárzás
- T (occupancy factor): az időhányad amiben az árnyékolás túloldalán tartózkodnak
- P: megengedett dózis az árnyékolás túloldalán adott időtartamban
- d: távolság
- B gyengítési hányad
- TVL: tizedelő réteg vastagság
- HVL: felező réteg vastagság

Számítási módszerek elsődleges árnyékolásra (útmutatóban)

- Dózis illetve teljesítményre is lehet (van) megszorítás
- $D' = W / t_{nyaláb}$
- $W = N D_{beteg}$
- $B = \frac{P(d^2 + SAD^2)}{WUT}$
- $d = TVL \log(\frac{1}{B})$, $d = HVL \log_2(\frac{1}{B})$

Másodlagos védelem (útmutatóban)

- Nyaláb szóródásából: $B = \frac{P(d^2)}{WUT} \prod_i d_i^2 / (A_i \alpha_i)$ ahol d a forrás első szórópont távolság, d_i a szórási ponttól a cél vagy a következő szórásig vett távolság, A_i a szóró felület nagysága α_i pedig a szóródási frakció
- Szivárgásból $B = k \frac{P(d^2 + SAD^2)}{WUT}$ ahol k a beépített árnyékolás (közelítés $k = 1000$)

Időtényező

TABLE 3. DIFFERENT SUGGESTED OCCUPANCY FACTORS (*T*)
(*whenever possible, the local situation should be assessed before determining the occupancy factor to be used*)

Type of area	NCRP 49 [2]	BIR/IPEM 2000 [12]
Offices, reception areas, laboratories, shops, children's play areas, nurse's stations, staff rooms Control room	1	1
Wards, patient rooms	1	0.2
Patient examination and treatment rooms	—	0.5
Corridors	1/4	0.2
Toilets, bathrooms, outside areas with seating	1/16	0.1
Stairways, unattended waiting rooms, store rooms (not film)	1/16	0.05

Szórási faktorkok

TABLE 12. SCATTER PRIMARY RATIO a , AT 1 m FROM A HUMAN SIZE PHANTOM, FOR A RADIATION FIELD SIZE OF 400 cm² AT THE PHANTOM SURFACE FOR A TARGET TO PHANTOM DISTANCE OF 1 m [38]

Scatter angle (from central ray)	Peak X ray energy				
	50 kVp	70 kVp	100 kVp	125 kVp	150 kVp
0	0.0029	0.0030	0.0032	0.0034	0.0035
10	0.0025	0.0026	0.0028	0.0030	0.0031
20	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028
30	0.0019	0.0020	0.0022	0.0024	0.0025
40	0.0017	0.0018	0.0020	0.0022	0.0023
50	0.0016	0.0017	0.0019	0.0020	0.0022
60	0.0015	0.0016	0.0018	0.0020	0.0021
70	0.0015	0.0016	0.0018	0.0020	0.0021
80	0.0015	0.0016	0.0018	0.0020	0.0021
90	0.0016	0.0017	0.0019	0.0021	0.0022
100	0.0017	0.0018	0.0020	0.0022	0.0023
110	0.0018	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025
120	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0027
130	0.0022	0.0024	0.0026	0.0027	0.0029
140	0.0025	0.0026	0.0028	0.0030	0.0031

TABLE 13. RATIO OF SCATTER KERMA TO DOSE-AREA PRODUCT (SCATTER FACTOR) S (μGy) (Gy · cm²)⁻¹ AS A FUNCTION OF SCATTERING ANGLE (α) AND KILOVOLTAGE [37]

Scattering angle	Kilovoltage				
	50	70	85	100	125
30°	1.77	2.11	2.41	2.71	3.18
60°	1.82	2.14	2.40	2.70	3.16
90°	2.99	3.43	3.79	4.08	4.56
120°	5.53	6.32	6.82	7.27	7.89
150°	7.85	8.96	9.67	10.31	11.11

TVL

TABLE 4. TENTH VALUE LAYER (TVL) FOR ^{60}Co AND X RAY ENERGIES

(approximate values based on large attenuation)

	Co-60 ^a	4 MV ^b	6 MV ^b	10 MV ^b	15 MV ^b	18 MV ^b	20 MV ^b	24 MV ^b
TVL for concrete (density $2350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) (in mm)								
Primary beam gamma/ X rays	218	290	343	389	432	445	457	470
Leakage gamma and X rays (90°)	218	254	279	305	330	330	343	356

TABLE 18. TENTH VALUE LAYER DATA FOR EFFECTIVE GENERATING VOLTAGES (BROAD BEAM) IN THE RANGE OF SUPERFICIAL AND ORTHOVOLTAGE ENERGIES [41]

Effective generating voltage	Attenuating material (mm)		
	Lead	Steel	Concrete
50 kV	0.2	1.6	17
100 kV	0.9	8.1	61
200 kV	1.7	17.8	93
250 kV	2.8	20.1	98
300 kV	4.6	22.2	106

Transzport egyenlet

- Boltzman alkotta
- Kinetikus gázmodellből (statisztikai mechanika)
- Lényegében egy megmaradási egyenlet

$$\frac{d}{dt} \int_V N(r, v, t) dr^3 = \int_V S(r, v, t) dr^3 - \int_V \mu_c v N(r, v, t) dr^3 - \oint J(r, v, t) n dA$$

Változás
mértéke

Forrástag

Részecske
befogás

Kilépő
részecskék

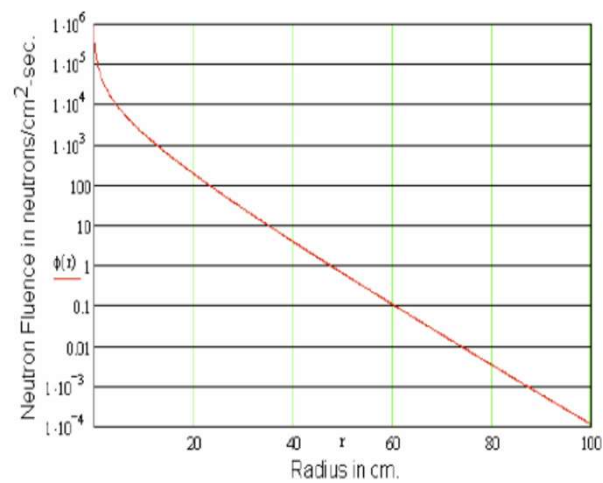
- Megoldás módjai
 - Analitikus (egyszerűsítés alkalmazása)
 - Számítógépes szimuláció (transzport kódok) determinisztikus, Monte Carlo

Kis matek

- Gauss–Osztrohradszkij-tétel: Felületi integrálból divergencia térfogati integrálja
- Ezt követően térfogat integrált „eltüntetjük”
- $\frac{d}{dt}N(r, v, t) = S(r, v, t) - \mu_c v N(r, v, t) - \vec{\nabla} J(r, v, t) n$
- Divergencia diffúzió közelítéssel kezelhetjük ($\vec{\nabla} J = D \nabla^2 F$)
 - Egyenletes közeg
 - Nincs pont neutron forrás
 - Izotróp szórás
 - Neutron fluxus térfüggése lassan változó
 - Neutron fluxus időben állandó
 - Bizonyos energiákra fizikai tulajdonságok átlagok (nincs E függés)
- Végző alak $\frac{d}{dt}N(r, v, t) = S(r, v, t) - \mu_c F(r, v, t) + D \nabla^2 F(r, v, t)$

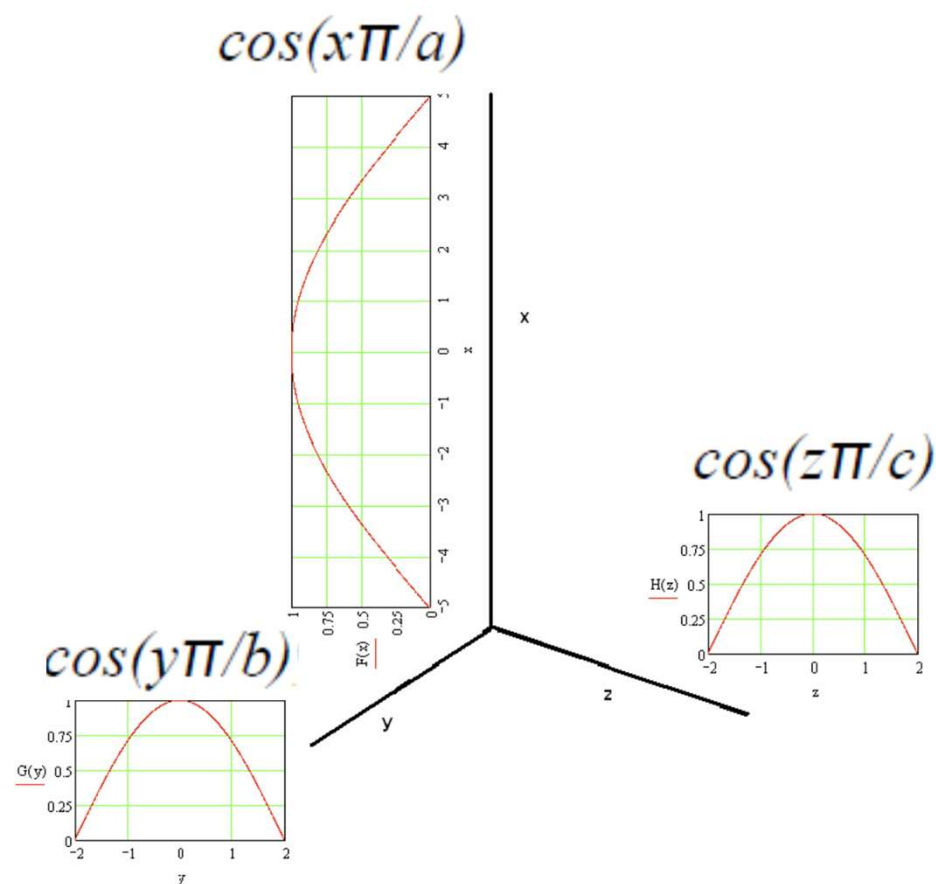
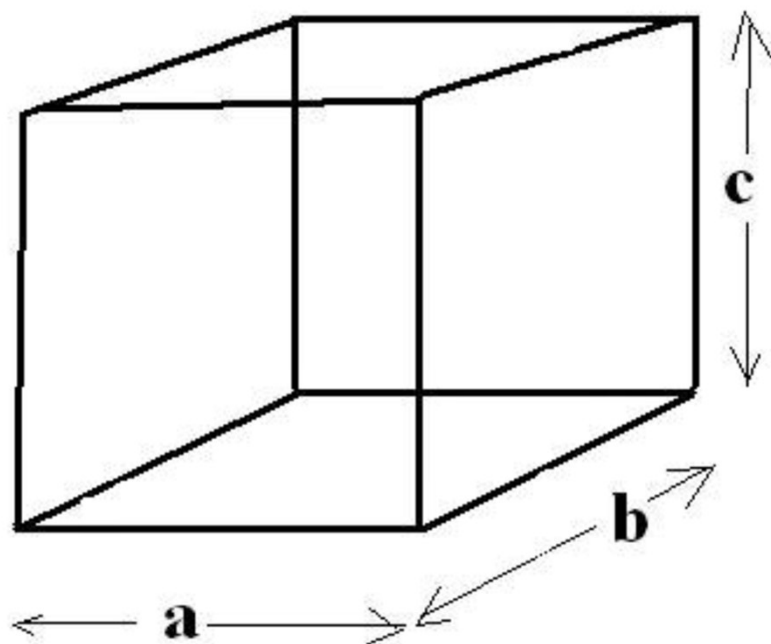
Transzport megoldása pontforrásra

$$\phi(r) = S_0 e^{-r/L} / 4\pi r D$$

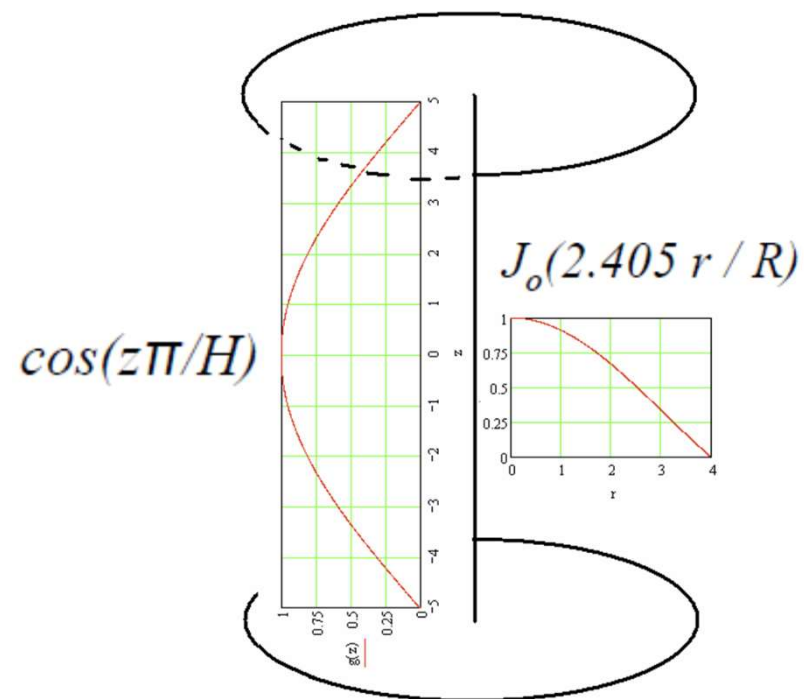
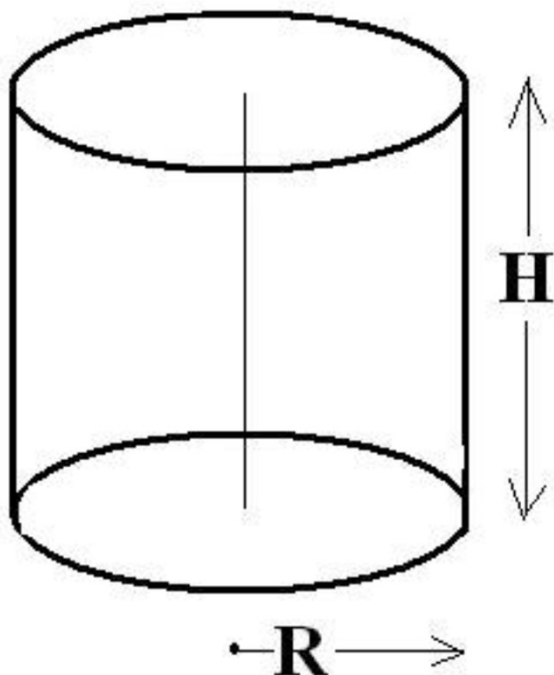


Transzport megoldása téglatestre

- Koszinusz fluxus profil

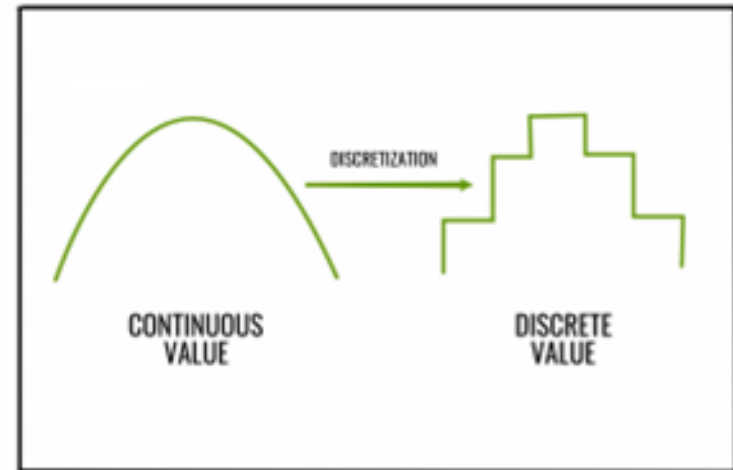


Transzport megoldása hengerre



Determinisztikus kód

- Egyenletrendszer numerikus megoldás
 - Matematikai közelítések
- Diszkretizálás
 - Energia
 - Tér
 - Egyebek (pl sokcsoport közelítés)
- Fluxus mint közeg
 - Adott térszre jellemző
 - Nem „halad”
 - Diszkrét ordináták módszere (irány bontás)
- Nagy memória igény de többnyire gyors(abb) mint Monte Carlo



Determinisztikus program példák

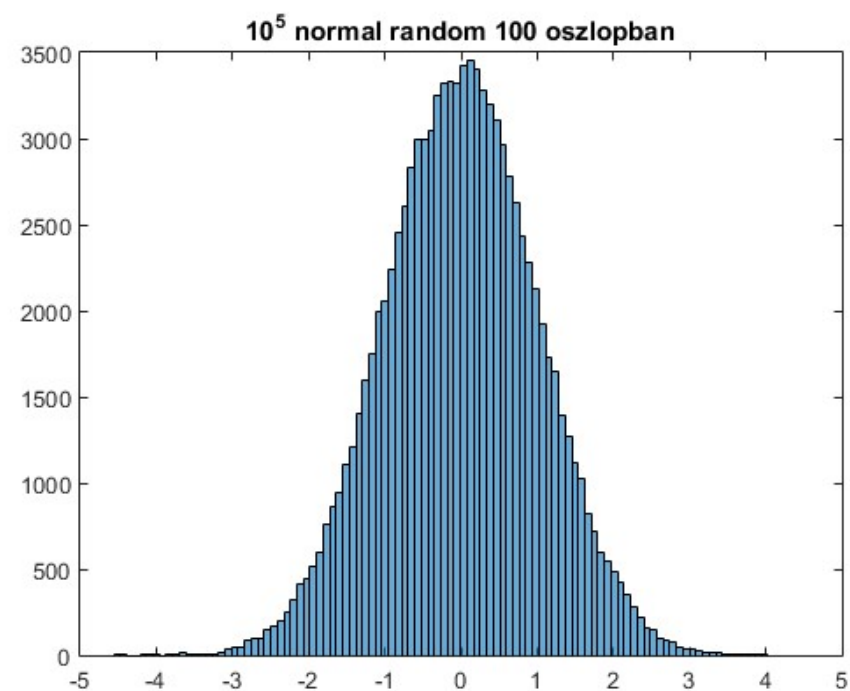
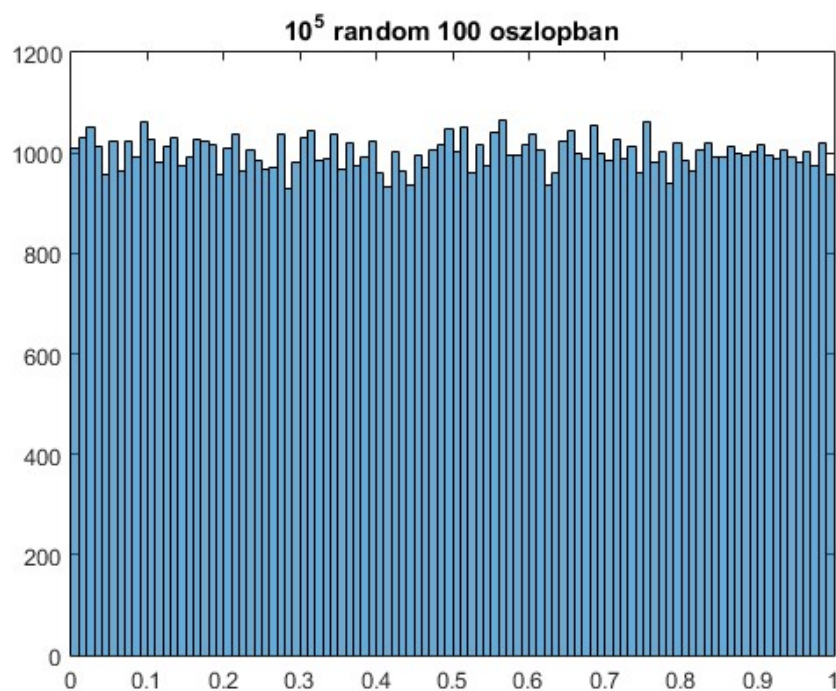
- DORT, TORT,ANISN, DENOVO Oak Ridge National Laboratory , USA
- PARTISAN Los Alamos National Laboratory , USA
- ATTILA Varex Imaging Corp. USA

Monte Carlo módszer

- Numerikus megoldás
- Analitikus megoldás helyett kiviteleztetjük a számítógéppel
- Kis memória de nagy számítás / idő igény
- Kell
 - Elég pontosan leíró modell (geometria, kölcsönhatások, hatáskeresztmetszet)
 - Jó algoritmus
 - Jó (véletlen) számok
 - Pszeudo-véletlen (algoritmus generálta) számok
 - Valóban véletlen számok
 - Elég sok kísérlet (nagy számok törvénye)

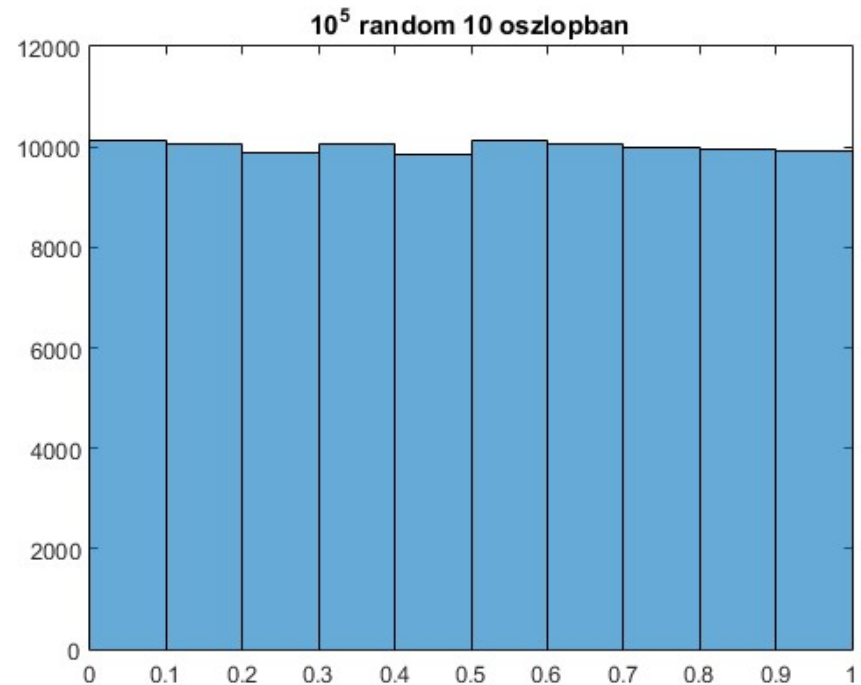
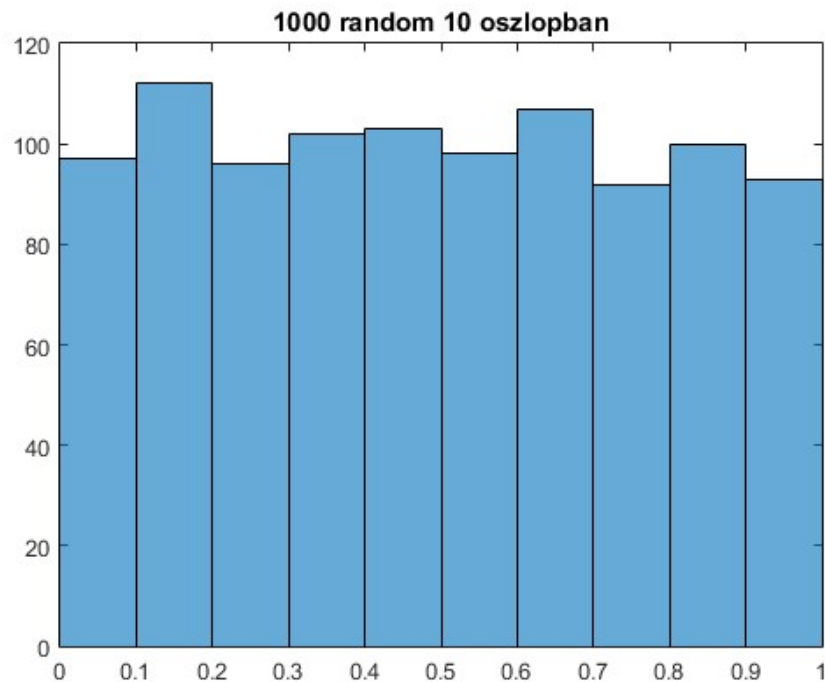
Véletlen számok eloszlása

- Többféle eloszlás (p uniform, normális)



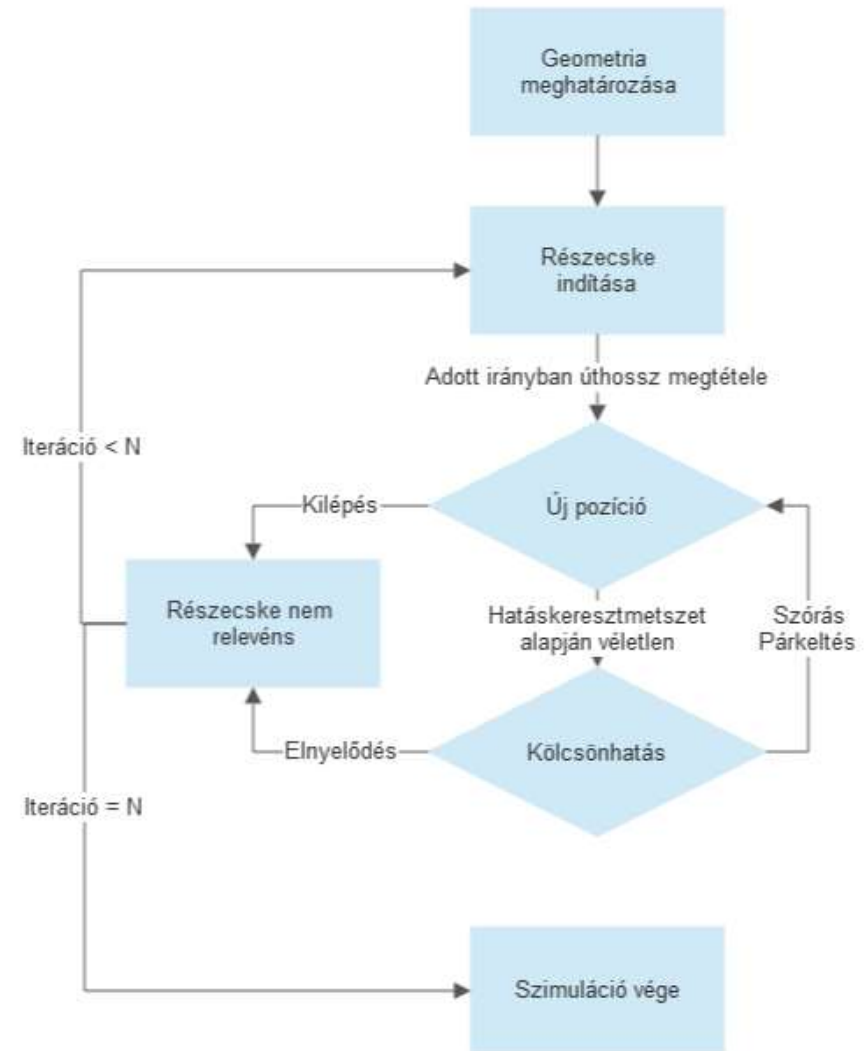
Nagy számok jelentősége

- Nagy kísérletszám szükséges a várható / átlagos eredmény közelítéséhez



Szimuláció folyamata

- Kezdeti feltételek (geometria)
- Részecske iteráció
 - Haladás
 - Kölcsönhatás
 - N db lefutás



Monte Carlo program példák

- MCNP Los Alamos National Laboratory , USA
- KENO Oak Ridge National Laboratory , USA
- MCBEND ANSWERS Software Service, UK
- SERPENT VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.
- FLUKA CERN és INFN Italy

Köszönöm a figyelmet