

Új eredmények a reaktorhőre, és a hasadási potenciálokra Fukushima tükrében

Krasznahorkay Attila
MTA Atomki, Debrecen

The logo of the Hungarian Academy of Sciences (MTA) Atomic Energy Research Institute (Atomki). It features the word "atomki" in a bold, stylized, lowercase font, with "MTA" in a smaller, uppercase font positioned above the "ki" part. The logo is set against a light gray rectangular background.

atomki^{MTA}

ATOMKI, Debrecen

Az Atomki látképe Debrecen központjában

4 főosztály:

- **Atommagfizika**
- Atomfizika
- Alkalmazott fizika
- Gyorsító centrum

Mérete: 100 kutató, 100 mérnök+ egyéb

www.atomki.mta.hu



Az MTA Atomki K=20-as ciklotronja, mint az alap- és alkalmazott kutatások egyik legfontosabb eszköze



A gyorsított nyalábok paramétere

<u>Gyorsított részecske</u>	<u>Energia [MeV]</u>	<u>Intenzitás [μA]</u>
proton	2.5 – 18	40
deuteron	1 - 10	40
He-3	4 - 26	10
alfa rész.	2 - 20	20

A kivont nyaláb energia feloldása: $< 3 \cdot 10^{-3}$

Az analizált nyaláb energia feloldása: $< 10^{-3}$

Nyalábcsatornák száma: 8 vízszintes + 1 függőleges

Legfontosabb kutatási területek

Atommagfizika

Orvosi alkalmazások

Ipari alkalmazások

Mag- és asztrofizikai Laboratórium

<http://www.atomki.hu/muszerek/muszerek.html#magal>

NEKIFUT, Stratégiai Kutatási Infrastruktúra

- **Hasított pólusú mágneses spektrométer protonok, illetve nehézionok mérésére**
- Nagy szórókamra Si detektor teleszkópokkal
- DIAMANT, könnyű töltött-részecske detektor rendszer
- Obelisk repülési idő spektrométer hasadási termékek mérésére
- CLOVER típusú gamma spektrométerek BGO anti-Compton árnyékolóval
- 2 darab Canberra GR10024 N-típusú 100% relatív hatásfokú koaxiális HPGe detektor
- GL2015R típusú LEPS-alacsony energiás gamma spektrométer
- Nagyenergiás (5-20 MeV) elektron-pozitron pár spektrométer
- Szupravezető mágneses elektron spektrométer
- ELENA neutron repülési-idő spektrométer
- Leybold UNIVEX 350 vákuumpárologtató

Hasított pólusú mágneses spektrométer

A spektrométer K értéke	80 (26)
A fókuszsík szöge	45°
A fókuszsík hossza	120 cm
Si detector hossza	72 cm
felbontása	1 mm
Az eltérítési sugár	40 - 90 cm
Maximális térerősség	1.6 (0.8) T
Maximális térszög	5.4 msr
$E_{\max}/E_{\min}$	4.8
Vízszintes nagyítás	0.34
Függőleges nagyítás	1.7 - 3.3
$\Delta x/\Delta E/E$	10 mm/%
Energiafeloldás $\Delta E/E$	1×10^{-3}

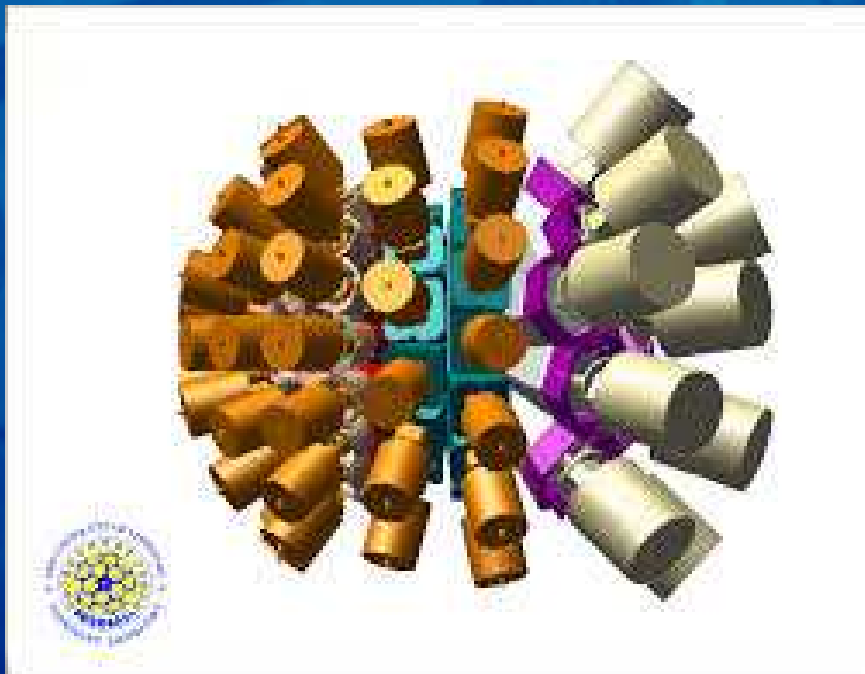


A szuper- és hyperdeformált állapotok kutatása

A magszerkezet-kutatás legnagyobb erőpróbája

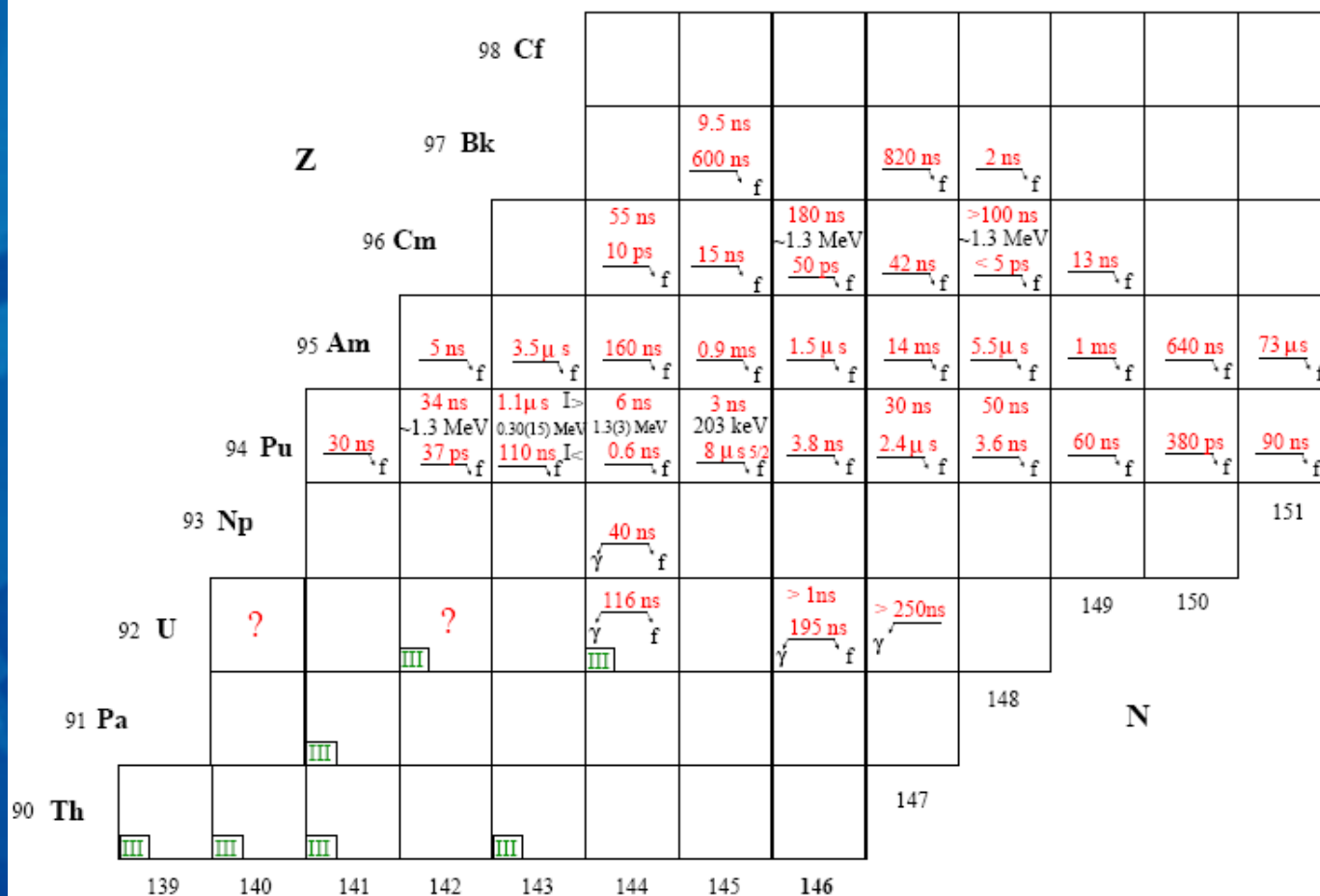
Európa legnagyobb γ -spektrométere az EUROBALL spektrométer CLOVER és CLUSTER detektorokkal

A Gamma-sphere spektrométer (USA)

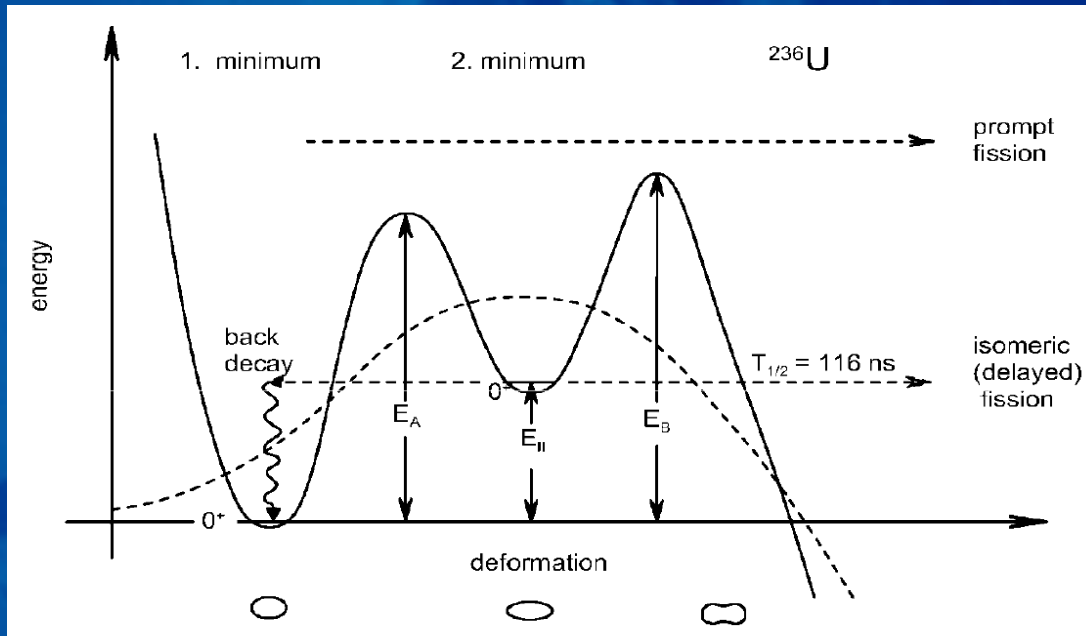


Erősen deformált állapotok kialakulása a maghasadás előtt

Island of (Superdeformed) Fission Isomers



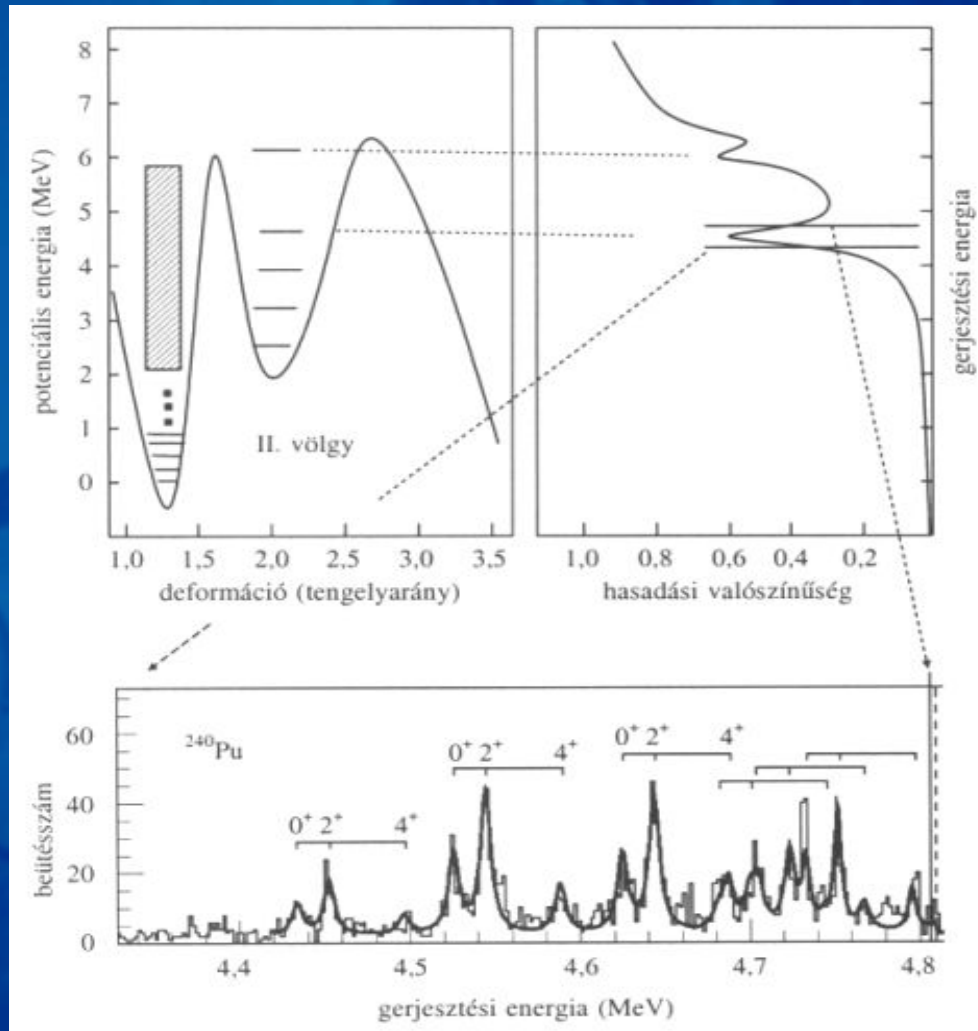
A hasadási gát “topológiája”



- Hasadási gát: potenciális energia a kvadrupó ldeformáció függvényében

- Lokális, 2. **minimum** jelenik meg az erős, „mikroszkópikus” héjeffektusok következményeként ($N=140$ mágikus szám)
- 2. völgy alapállapota: **hasadási izomer állapot** (ps-ms felezési idővel)

Hasadási rezonanciák



- 2. minimum erősen deformált állapotai
→ rezonanciák a hasadási valószínűségben:

- rezonancia energia: az SD és HD állapotok gerjesztési energiái

$$E_{\text{res}} \rightarrow E_{3\text{rd}}^* \\ \sigma(\theta)_{\text{frag}} \rightarrow J, K$$

- hasadványok szögeloszlása:
spin információ

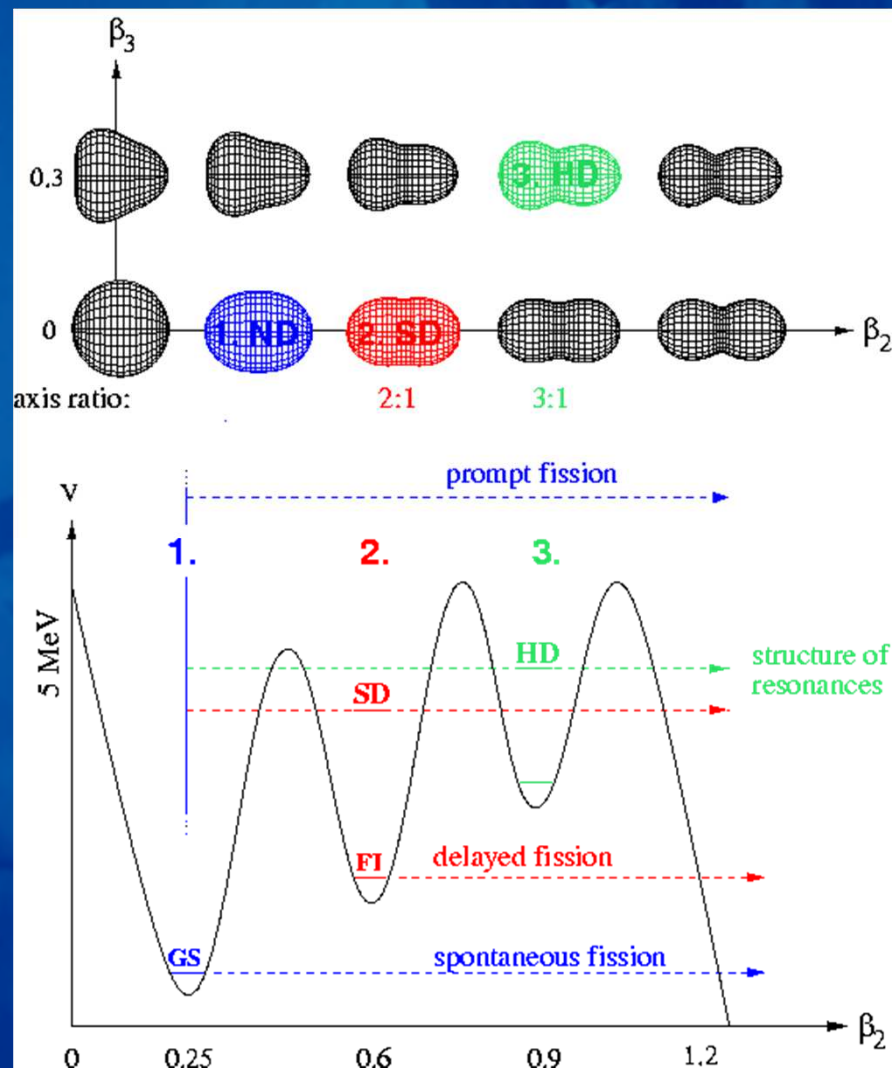
- rotációs
sávok:

$$E(J) = \frac{\hbar^2}{2\Theta} J(J+1)$$

MAGALAK

- nívósűrűség → völgyek mélysége

A három-völgyes hasadási gát



- **3. minimum** nagy oktapól (β_3) deformációknál (hiperdeformáció 3:1)

²³² U HD 68.9 a [Csi09]	²³³ U 1.59E5 a	²³⁴ U HD 2.45E5 a [Kr98,Kr99]	²³⁵ U 7.03E8 a	²³⁶ U HD 2.3E7 a [Csa05]
²³¹ Pa 3.24E4 a target	²³² Pa HD 1.31 d [Csi12]	²³³ Pa 27.0 d	²³⁴ Pa 1.17 min	²³⁵ Pa 24.2 min
²³⁰ Th HD 7.54E4 a [Bl87]	²³¹ Th HD 25.5 h [Bl87]	²³² Th 1.4E10 a	²³³ Th HD 22.3min [Bl87]	²³⁴ Th 24.1d

- A. Krasznahorkay *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 2073.
- A. Krasznahorkay *et al.*, Phys. Lett. **B461** (1999) 15.
- M. Hunyadi *et al.*, Phys. Lett. **B505** (2001) 27.
- M. Csatlós *et al.*, Phys. Lett. **B615** (2005) 175.
- A. Krasznahorkay in Handbook of Nuclear Chemistry. 2nd edition. Springer Verlag 1 (2011) 281-318.
- L. Csige *et al.*, Phys. Rev. C **85** (2012) 064306.



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY

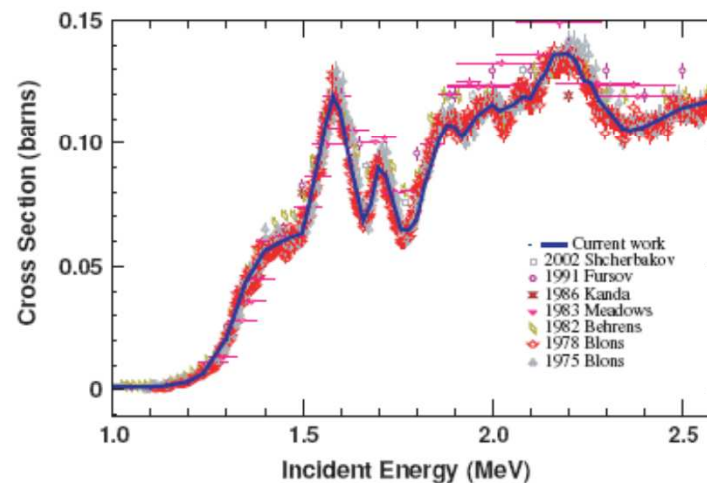
INDC(NDS)-447
Distr. G+TU

I N D C INTERNATIONAL NUCLEAR DATA COMMITTEE

Accelerator Driven Systems (ADS)

(Carlo Rubia)

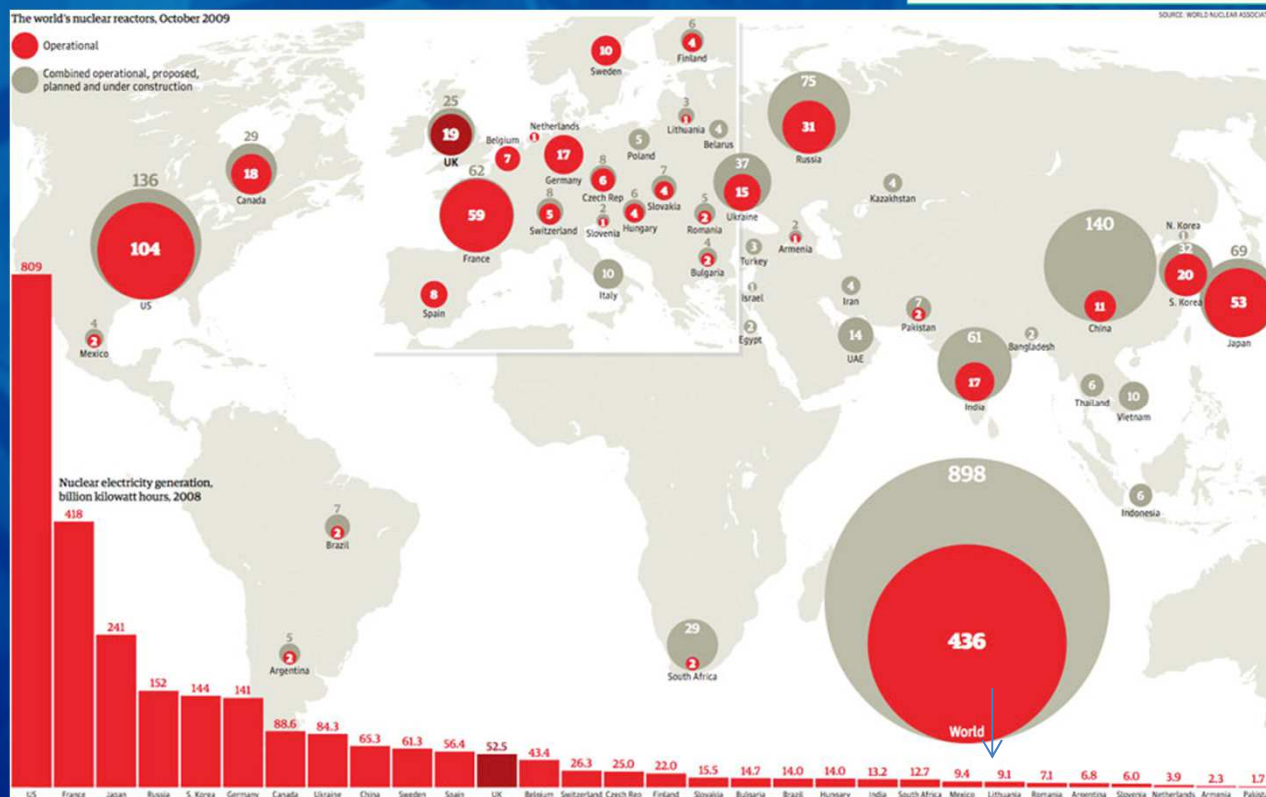
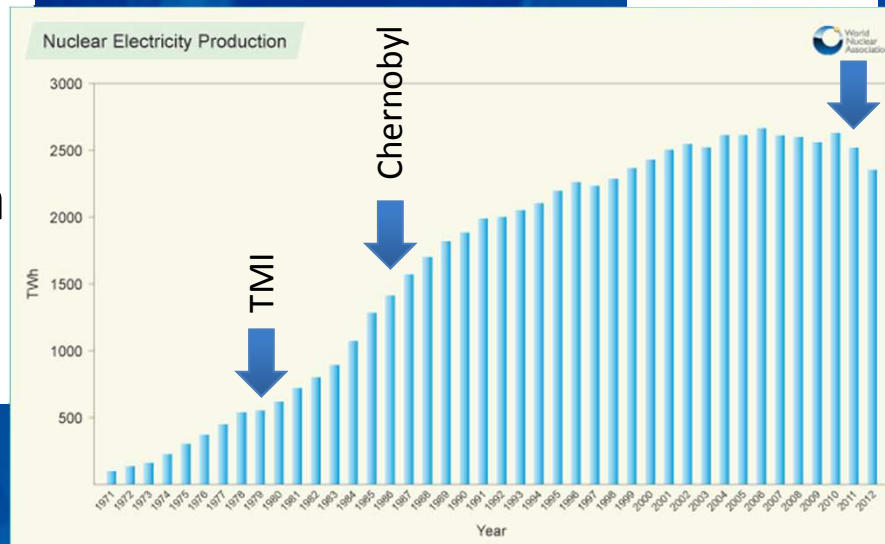
Evaluated Nuclear Data for Th-U Fuel Cycle



A világ nukleáris energia felhasználása (forrás: IAEA, 2015)

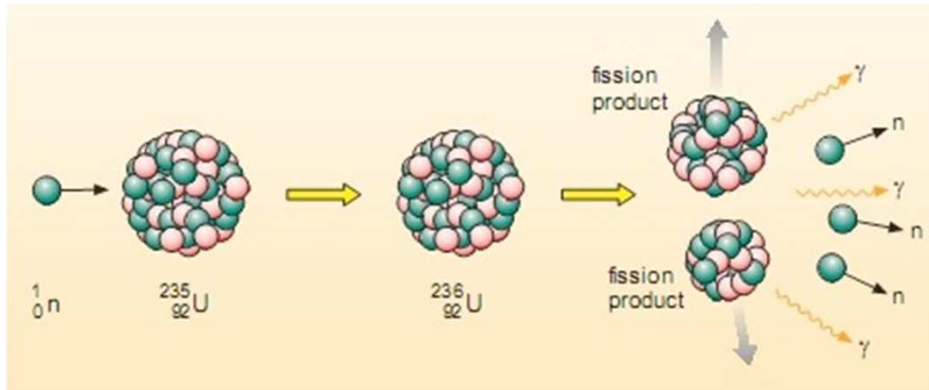
- 439 atomerőmű 30 országban
- A teljes elektromos energia 13.5%-a
- Jelenleg 14 országban összesen 69 új atomerőművet építenek

Fukushima

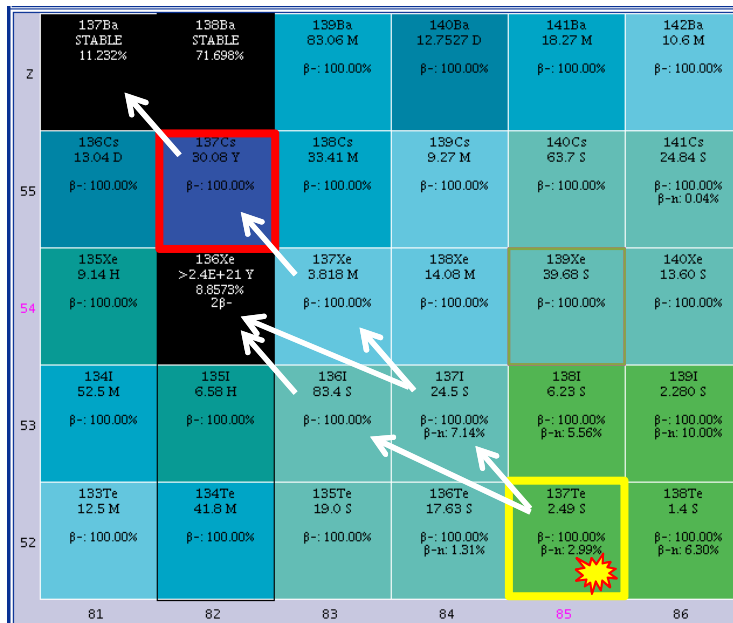
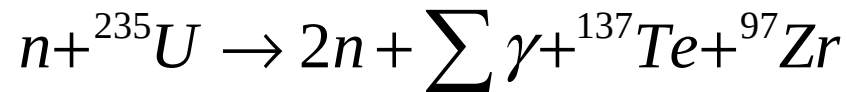


Forrás: WNA (2009)

Atommag hasadás és β -bomlás



- ^{235}U energia felszabadulás hasadásonként: 202 MeV
- 6.5% mint β/γ
- 4.5% mint ν_e



Minden hasadást átlagosan 6 β -bomlás követ

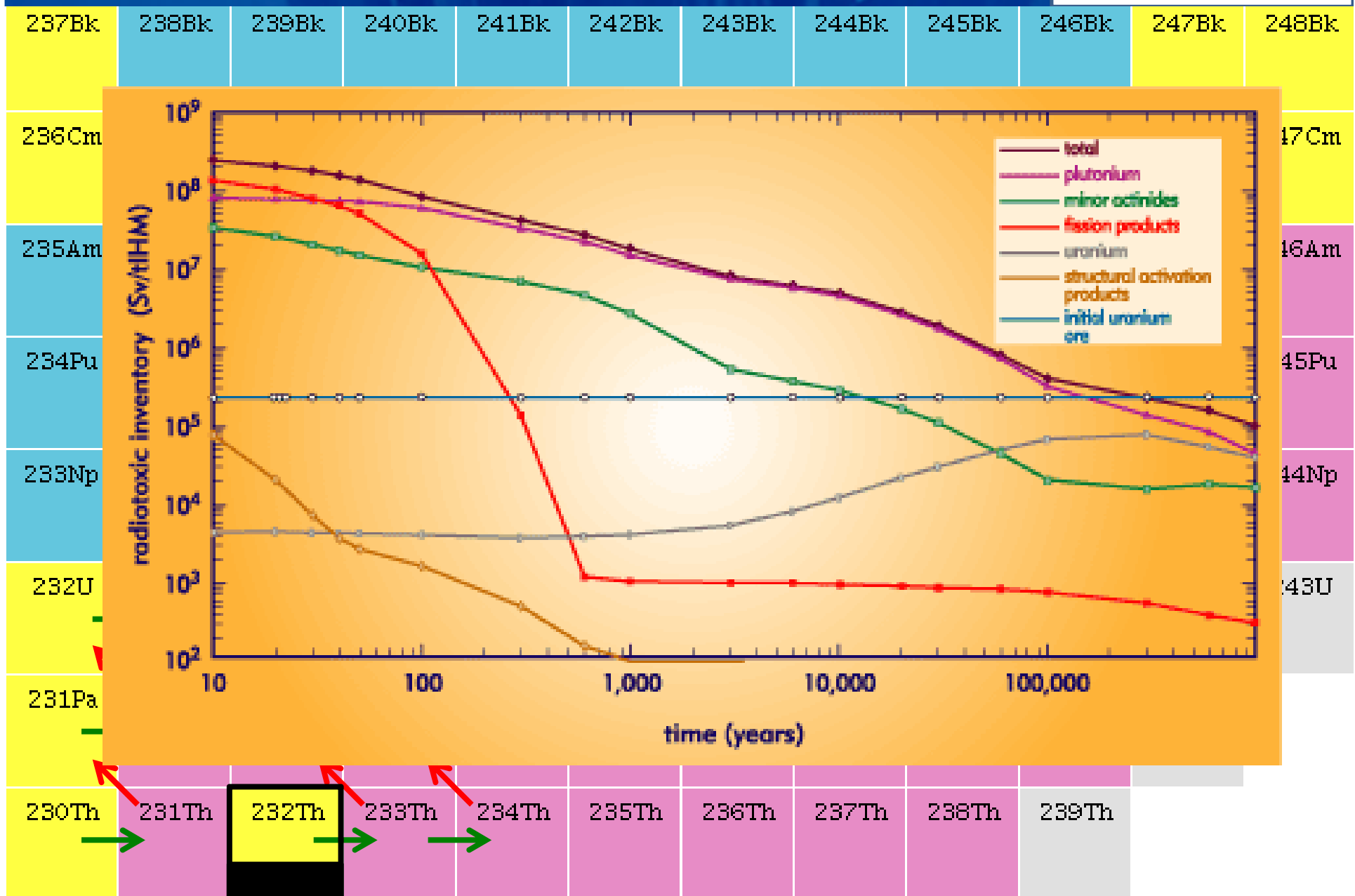
$$e^- + \bar{\nu}_e + \sum \gamma$$

Néha késleltetett neutron is keletkezik!

Összesen kb. 1000 atommag játszik szerepet a folyamatban!

Neutron befogás és radioaktív hulladékok

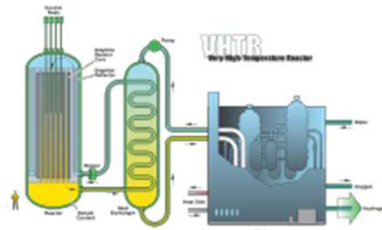
→ (n, γ)
 ↗ β -decay



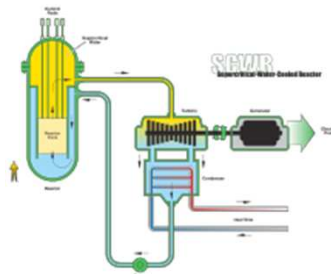
IV. Generációs reaktorok:

biztonságosabb, nagyobb hatásfokú, kevesebb hulladékot termel

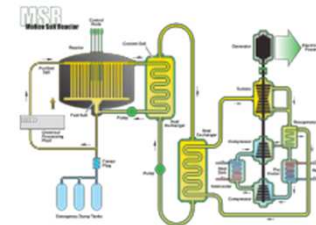
Very-High-Temperature Reactor (VHTR)



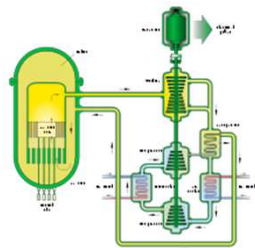
Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)



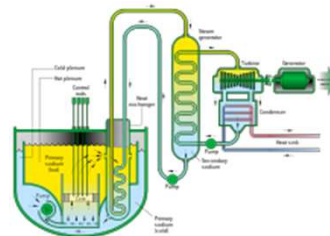
Molten Salt Reactor (MSR)



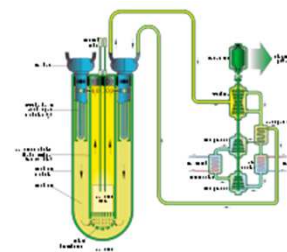
Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)



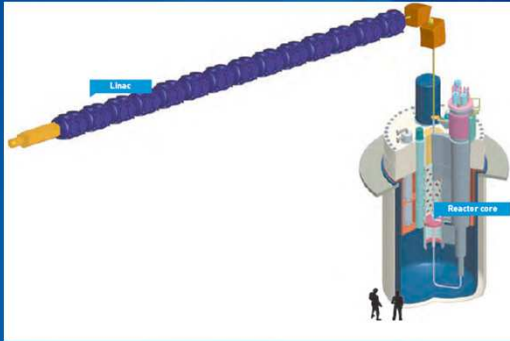
Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)



Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)



Gyorsítóval működő (ADS) , vagy hibrid rendszerek

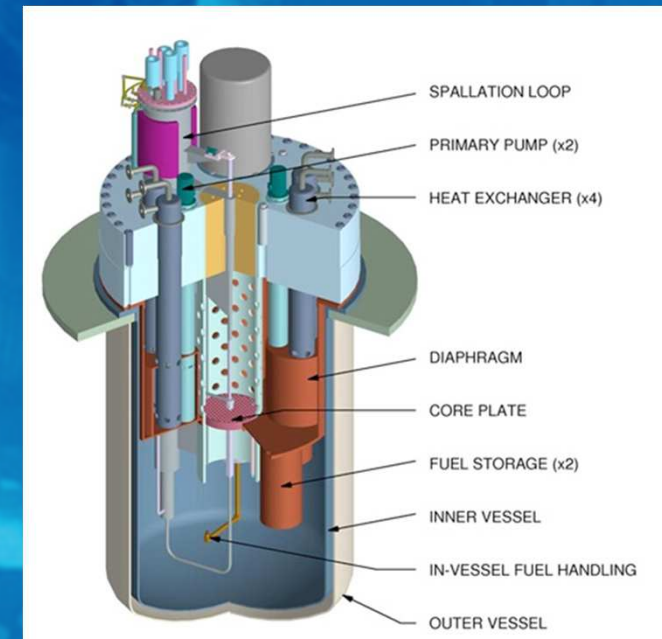


- Szubkritikus zóna (U/Pu vagy Th/U fűtőelemekkel)
- Proton gyorsító (a neutronok keltésére)
- Radioaktív hulladékból készített transzmütációs köpeny

EURATOM által támogatott kutatások:

Ipari Demonstrátor: MYRRHA/XT-ADS

- 2025 horizon
- MOX fűtőelemek
- 600 MeV p (linac/ciklotron)
- LBE spallációs target (window/less)
- LBE hűtés



Mindegyik rendszerhez szükségesek a jelenleginél pontosabb magadatok!!!

FUKUSHIMA: A reaktorhő szerepe



Reaktorok bomlási hője

- Fukushima: Daiichi reaktor “demonstrációja” a bomlási hő fontosságáról...
 - használt üzemanyag tárolása, szállítása → gazdaságossági szempontok
- Hasadás során felszabaduló energia: 8% hasadványok γ és β bomlása → **bomlási hő**
- Bomlási hő definíciója:

Összegző számítások

$$f(t) = \sum_i E_i \lambda_i N_i(t)$$

E_i Bomlási energia (γ és β)
 λ_i Bomlási állandó
 N_i Izotópok száma

Kísérleteink célja

$$\bar{E}_{\gamma,i} = \sum_j f_{\beta}(E_j) E_j$$

$$\bar{E}_{\beta,i} = \sum_j f_{\beta}(E_j) \langle E_{\beta j} \rangle$$

- $N_i(t)$ meghatározása csatolt, elsőrendű differenciál-egyenletekkel (1. lépés):

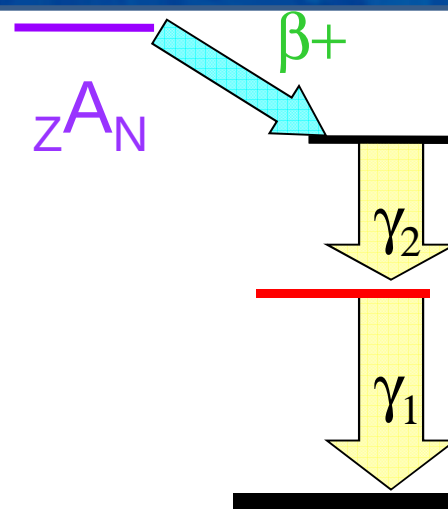
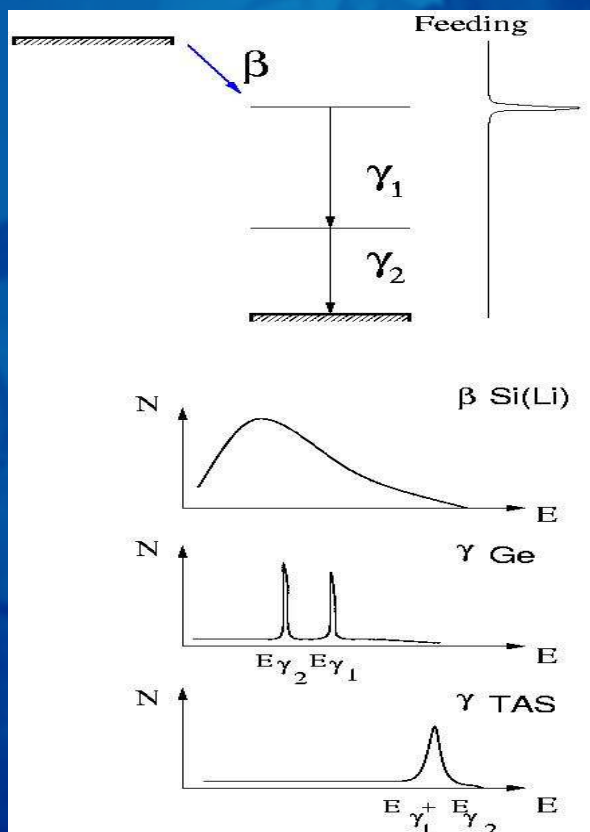
$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_i \varphi) N_i + \sum_{(j \rightarrow i)} f_{(j \rightarrow i)} \lambda_j N_j + \sum_{(k \rightarrow i)} \mu_{(k \rightarrow i)} \sigma_k \varphi N_k + y_i F$$

- Összegző számításhoz szükséges:
 Izotóp hozamok, élettartamok, átlagos γ és β energia, neutron befogási hatáskeresztmetszet, stb...

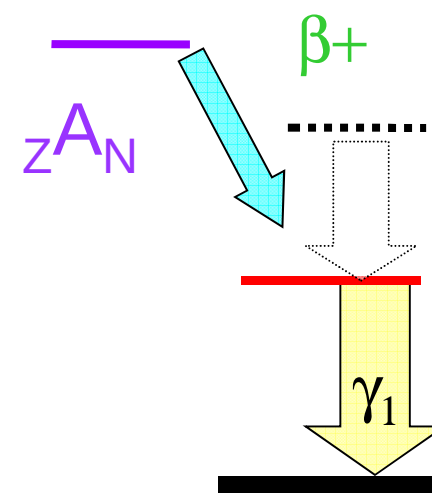
→ korábban: statisztikus módszer (empirikus: $P(t) = a x t^{-b}$)

A Pandemónium hatás

- *Nagy feloldású* detektor (pl. Ge) a bomlás által populált nívók feltérképezéséhez → a γ intenzitás-eloszlás alapján a β erősség meghatározás
- **Probléma:** nagyobb energián -nagy állapotsűrűség, nagy fragmentáció- nagy eséllyel “elvész” a γ , illetve nagy energiás γ szintén



Valós bomlás

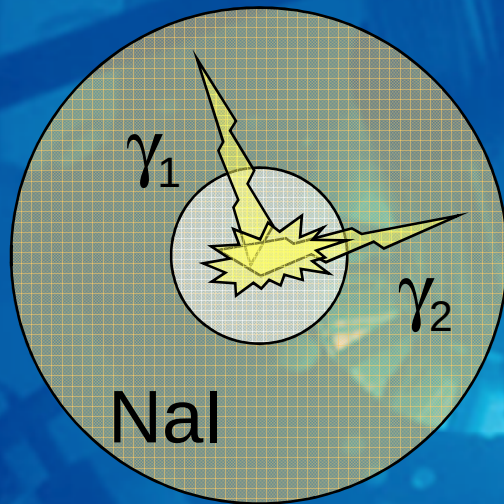


Észlelt bomlás

“Pandemónium hatás”

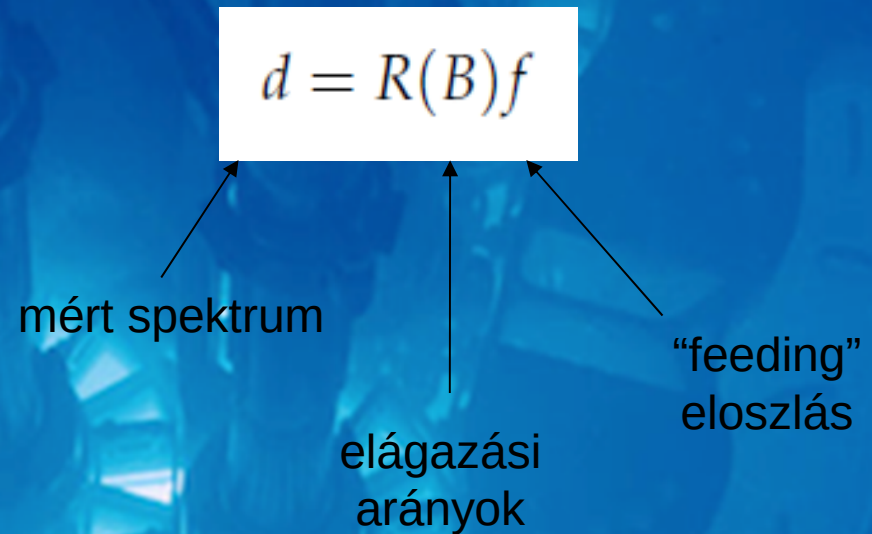
Teljes Abszorpciós Spektroszkópia

- Megoldás a Pandemónium-hatás problémára: *Teljes Abszorpciós Spektroszkópia*:
 - nagy feloldás helyett **nagy hatásfok** a teljes γ kaszkád észlelésére



TAS működése

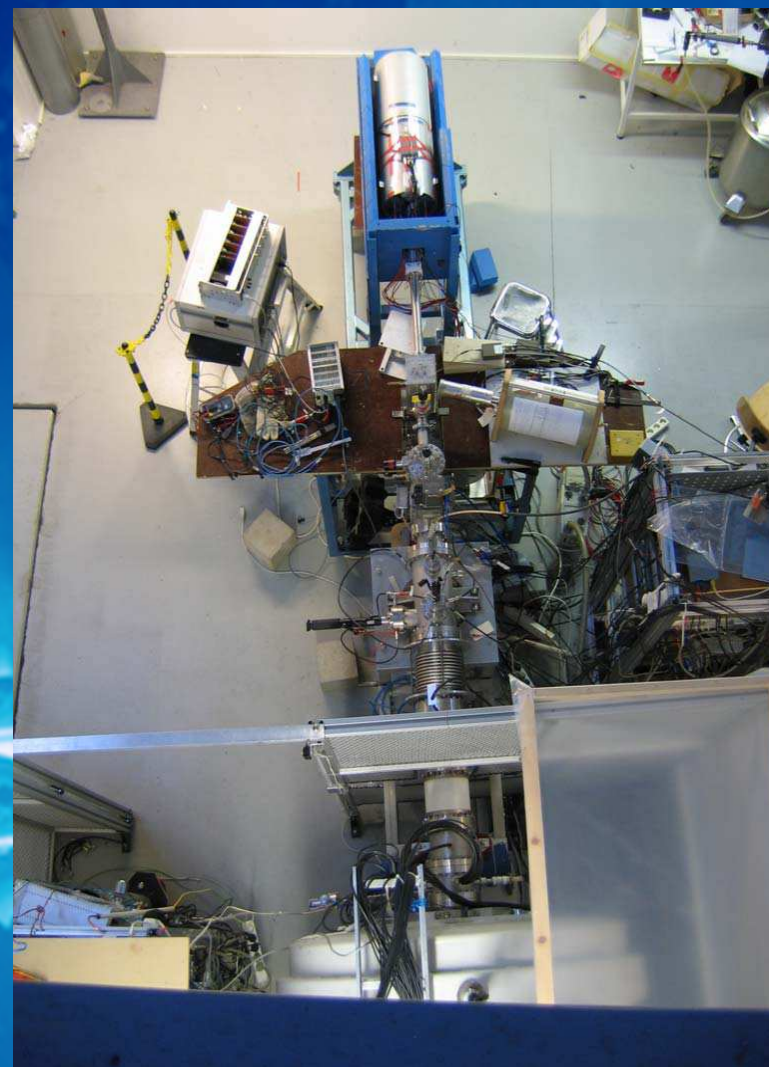
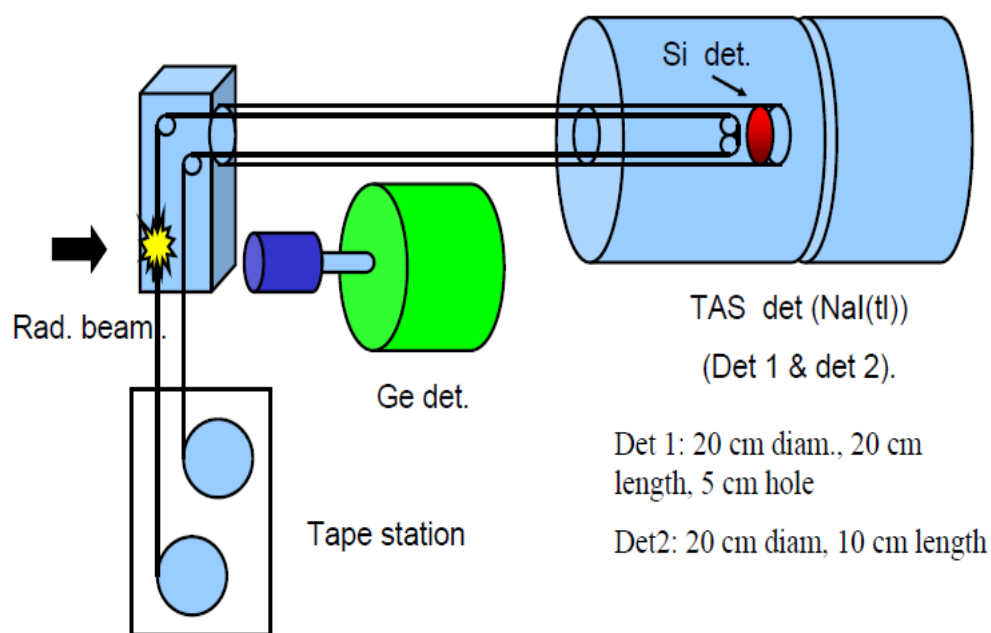
- De!! A TAS sem 100% hatásfokú, ismerni kell a detektor “válasz mátrixát”, $R(B)$ -t:



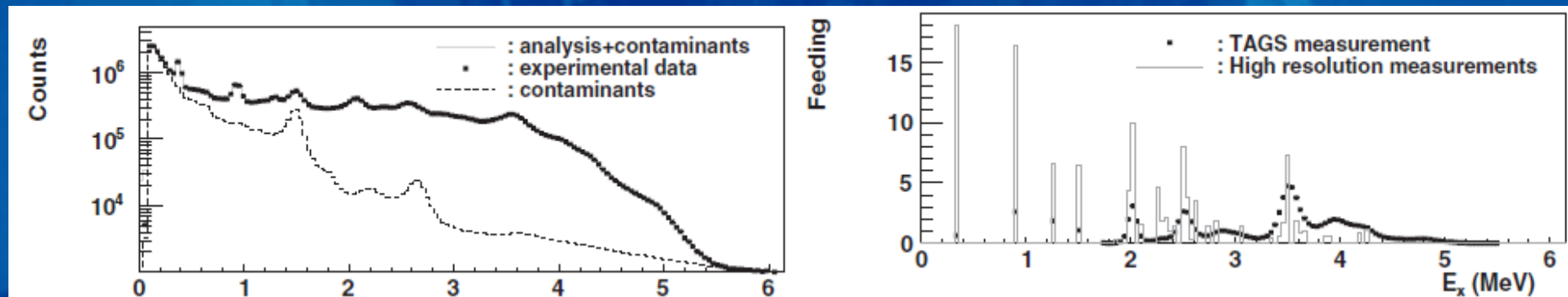
- $R(B)$:
 - Monte-Carlo (GEANT4)
 - Statisztikus módszerek az elágazási arányokra

Kísérlet: Jyvaskyla (Finnország)

- Motiváció: ellentmondások a 300-3000 s hűlési időtartományban!!
- IAEA által meghatározott prioritások:
102,104,105,106,107Tc; ^{105}Mo
- Jyvaskyla Egyetem: -39.3 fok februárban...
 - 30-50 MeV proton, 15 mg/cm² U céltárgy

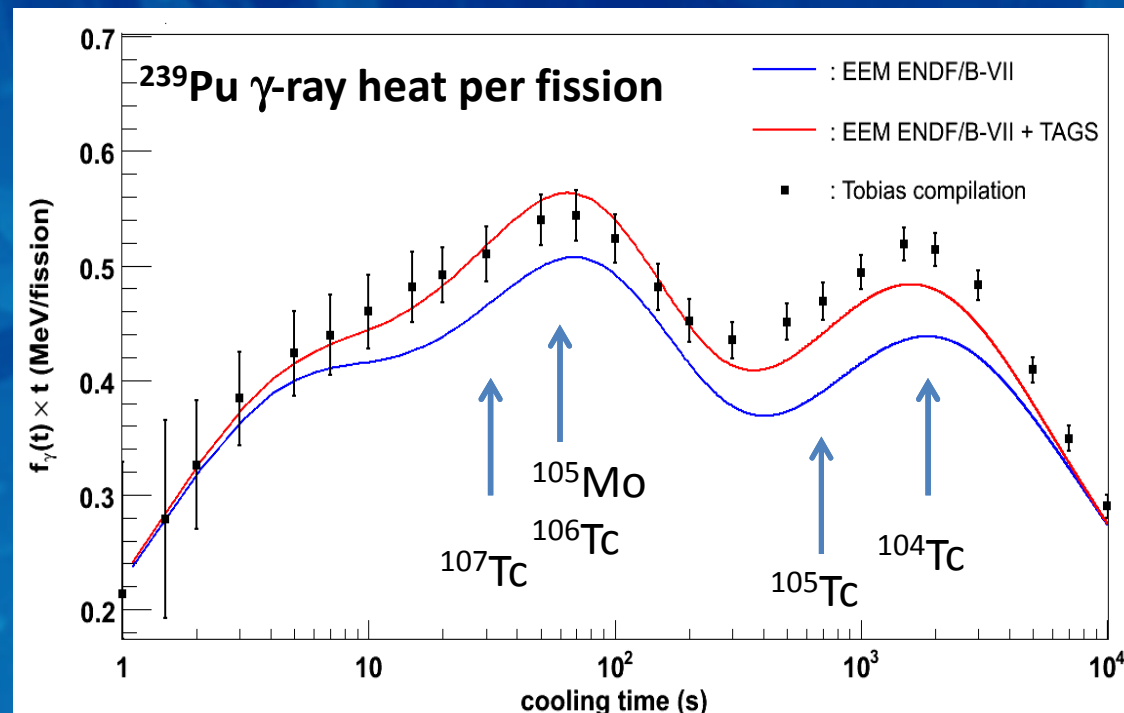


Eredmények



Nuclide	$T_{1/2}$ (s)	$\bar{E}_\gamma$	$\bar{E}_\gamma$	$\bar{E}_\beta$	$\bar{E}_\beta$
		ENDF	TAGS	ENDF	TAGS
^{101}Nb	7.1(3)	270(22)	445(279)	1966(307)	1797(133)
^{105}Mo	35.6(16)	552(24)	2407(93)	1922(122)	1049(44)
^{102}Tc	5.28(15)	81(5)	106(23)	1945(16)	1935(11)
^{104}Tc	1098(18)	1890(31)	3229(24)	1595(75)	931(10)
^{105}Tc	456(6)	668(19)	1825(174)	1310(205)	764(81)
^{106}Tc	35.6(6)	2191(51)	3132(70)	1906(67)	1457(30)
^{107}Tc	21.2(2)	515(11)	1822(450)	2054(254)	1263(212)

Értelmeztük a ^{239}Pu bomlási hőjében észlelt kísérleti–elméleti ellentmondásokat

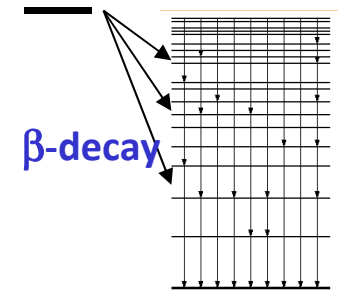


$$f_{\beta,\gamma}(t) = \sum_{i \in FP} \lambda_i \langle E_i^{\beta,\gamma} \rangle N_i(t)$$

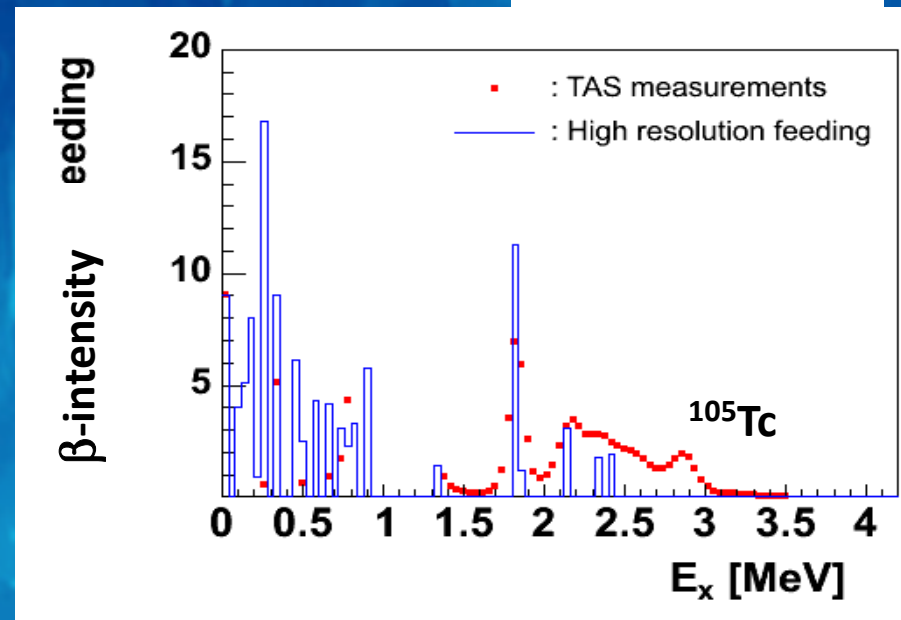
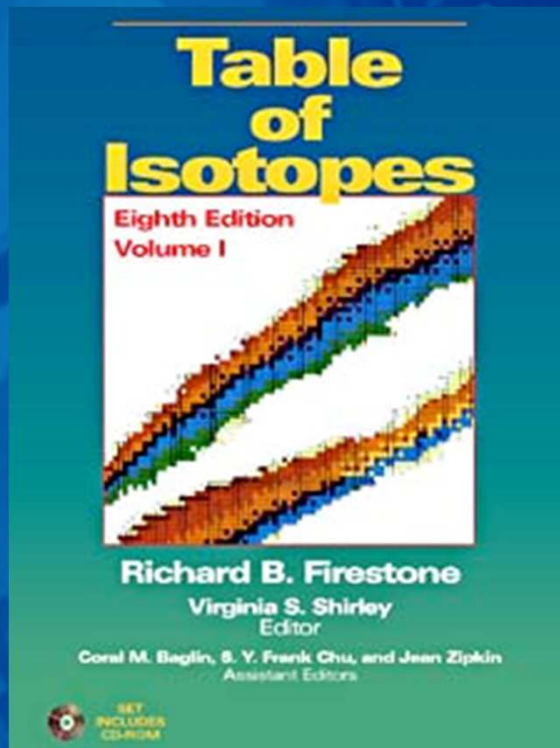
 Selected for a Viewpoint in *Physics*

A. Algora, A. Krasznahorkay et al., *Physical Review Letters* 105 (2010) 202501.

Új, pontosabb adatok szükségesek mind a hasadási
potenciálokra mind a β -bomlásra.
A tét a reaktorok biztonsága !!!



(*)



(*) legújabb adatok: <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>

Photofission experiments

Part. 1.

Attila Krasznahorkay
Inst. for Nucl. Res., Hungarian
Acad. of Sci. (ATOMKI)
Debrecen, Hungary



Physics goals

1. High-resolution photo-fission studies in actinides as a function of the photon energy → study of the fission resonances, investigation of 2nd, 3rd potential minima, mapping the fission barrier
2. Angular distribution measurements for the fission fragments. → Study of the J^π and K-values of the resonances
3. Mass and charge distribution measurements for the fission fragments → study of the clusterization before fission
4. Study of the ternary fission probability as a function of the photon energy → direct proof for highly deformed states
5. Study of the true ternary fission. → clusterization



Köszönöm a figyelmet!

SÚLYOS ÜZEMZAVAR (PAKS 2003)

1. A feladat

A II. Blokk 270 db kazettájának tisztítása *gyorsan*, a karbantartás ideje alatt

- régi kazetták: több éves hűlési idő, „hideg” (60 db)

- **frissen kiégett kazetták: „forró” kötegek, $P_{th} \sim 250 \text{ kW}$ (!!)** 210 db

Az I. Blokk kazettáinak tisztítása: „forró” üzemanyag

A III. Blokk kazettáinak tisztítása: „forró” üzemanyag

2. A terv

FRAMATOM ANP ~ Siemens: 2001. évi tisztítás, további referenciák (?)

Oxálsavas mosás + ultrahangos kezelés, vizes öblítés – szerződés a II. blokkra

tisztításnál: 250 m³/h, hűtésnél 20 m³/h szivattyúk

tartály: 30 kazetta

helye: II. blokk pihentető medence melletti 1.sz. szerelőakna, 10 m víz alatt

végrehajtó: FANP, egyes feladatoknál: PA Rt

Engedélyeztetés: PA Rt Biztonsági Igazgatóság (BIG)

Országos Atomenergia Hivatal (OAH)

Gyorsított eljárás: korábbi „sikerek”

besorolás miatt NEM nukleáris (reaktor) jellegű berendezés



KÖZVETLEN KÁROK

Mind a 30 kazetta tönkrement

Az urántabletták kiszóródtak (kis részben elporladtak)

Kazetta-anyag: Zr-törmelék

Radioaktív szennyezettség:

hasadási termékek: Cs, I-131, ...

urán

transzuránok: Pu

Helyek: tisztító tartály

szereelőakna

pihentető medence

II.Blokk tartálya részben szennyeződött

primerköre? 3. és 5. hurok használva

ERKÖLCSI KÁROK

Volt

egy jó hírű atomerőművünk ...

KÖZVETETT KÁROK

termelés kiesés, 50 Mft/nap május 5. után

helyreállítás – HÁP

többi blokk ciklusa megváltozott

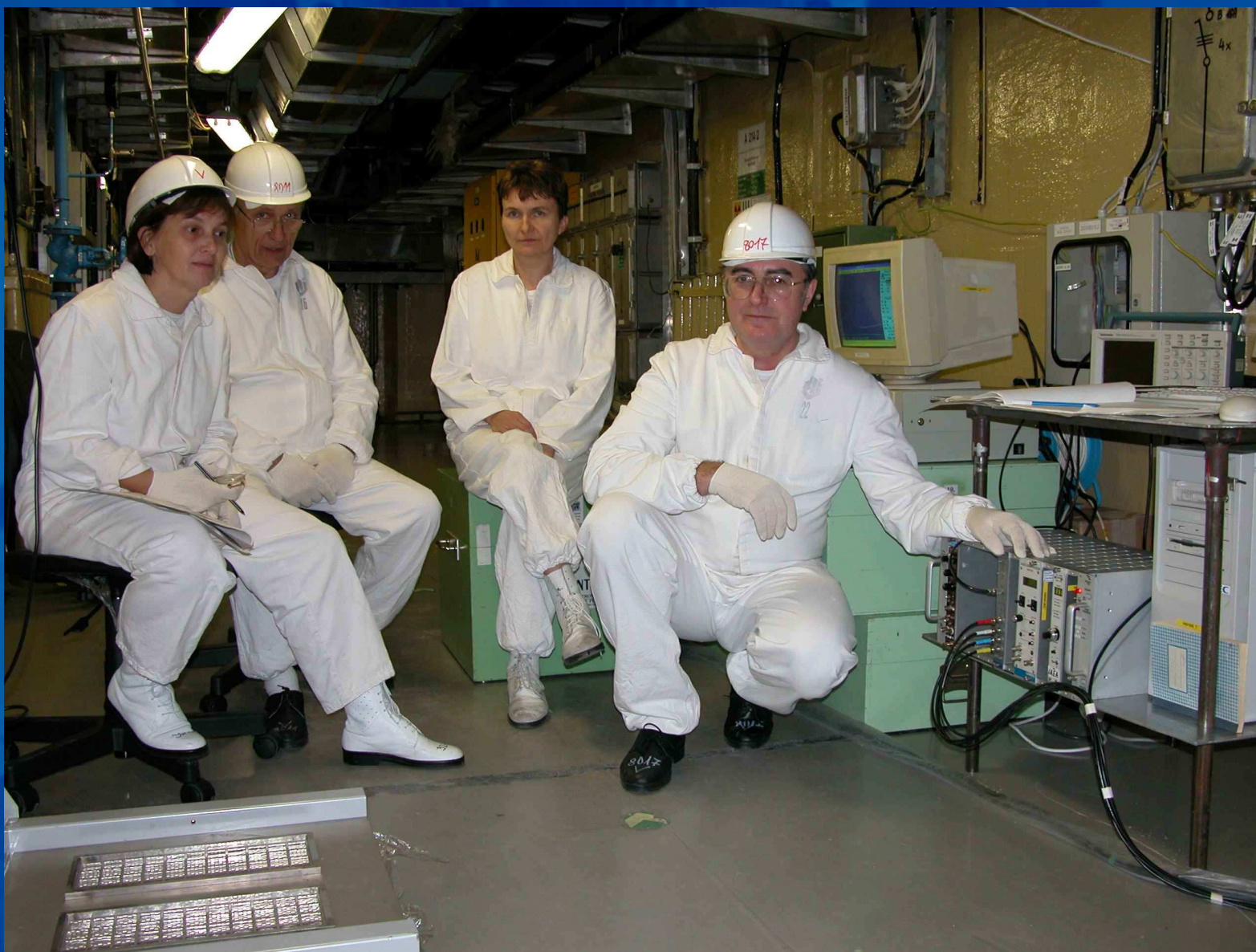
I. és III. reaktorok kazettái szennyezettek

új fűtőelemek gyors beszerzése

„Nem fogunk minden üzemzavart ilyen olcsón megúszni ! ”

Szatmáry Z., 2003.06.18. MTA

Σ ~ -50 milliárd HUF??



2015.03.06.

Dr. Krasznahorkay Attila