

Nukleáris üzemanyagciklus

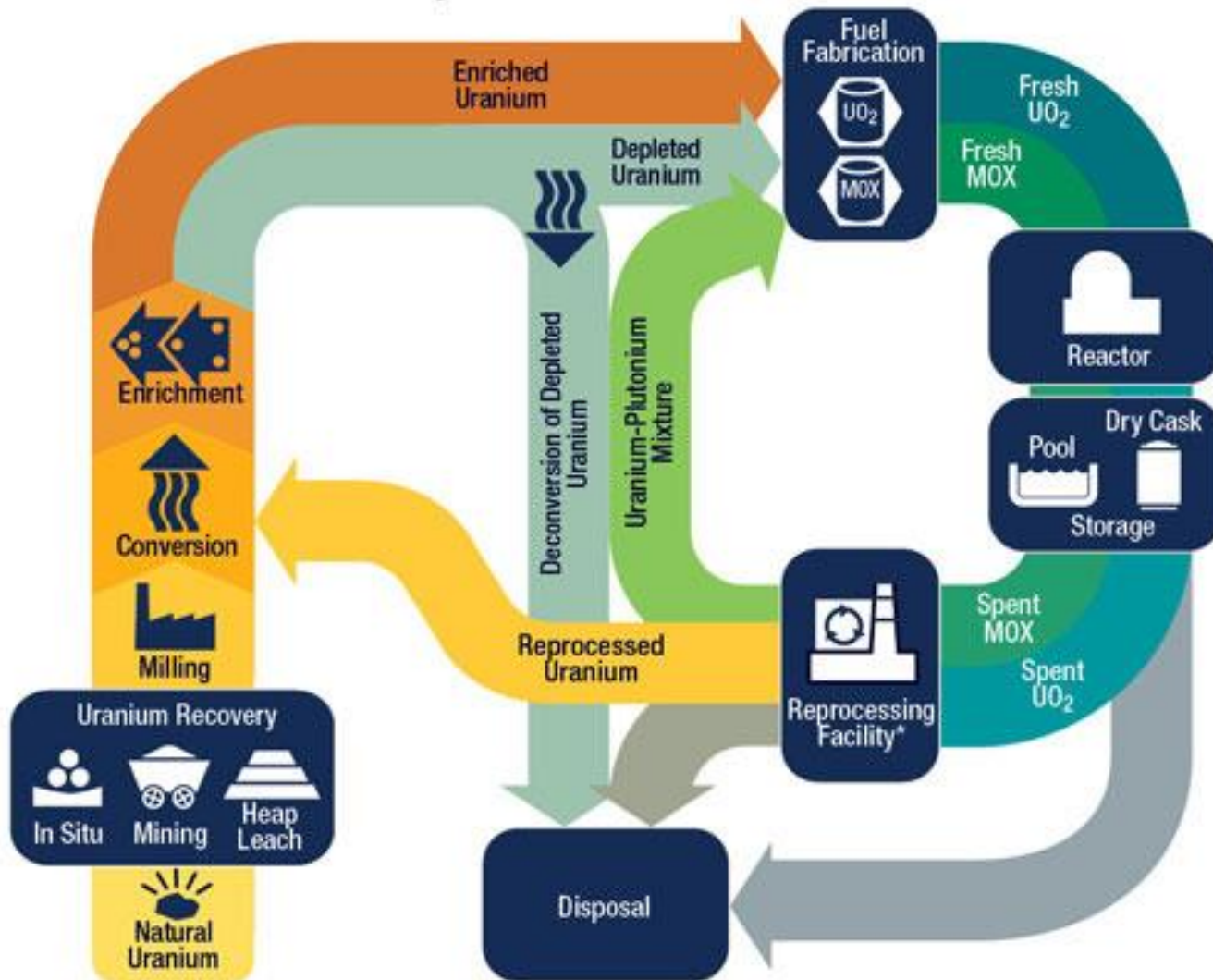
Izotópdúsítás

Szieberth Máté

BME NTI

2024. április 18.

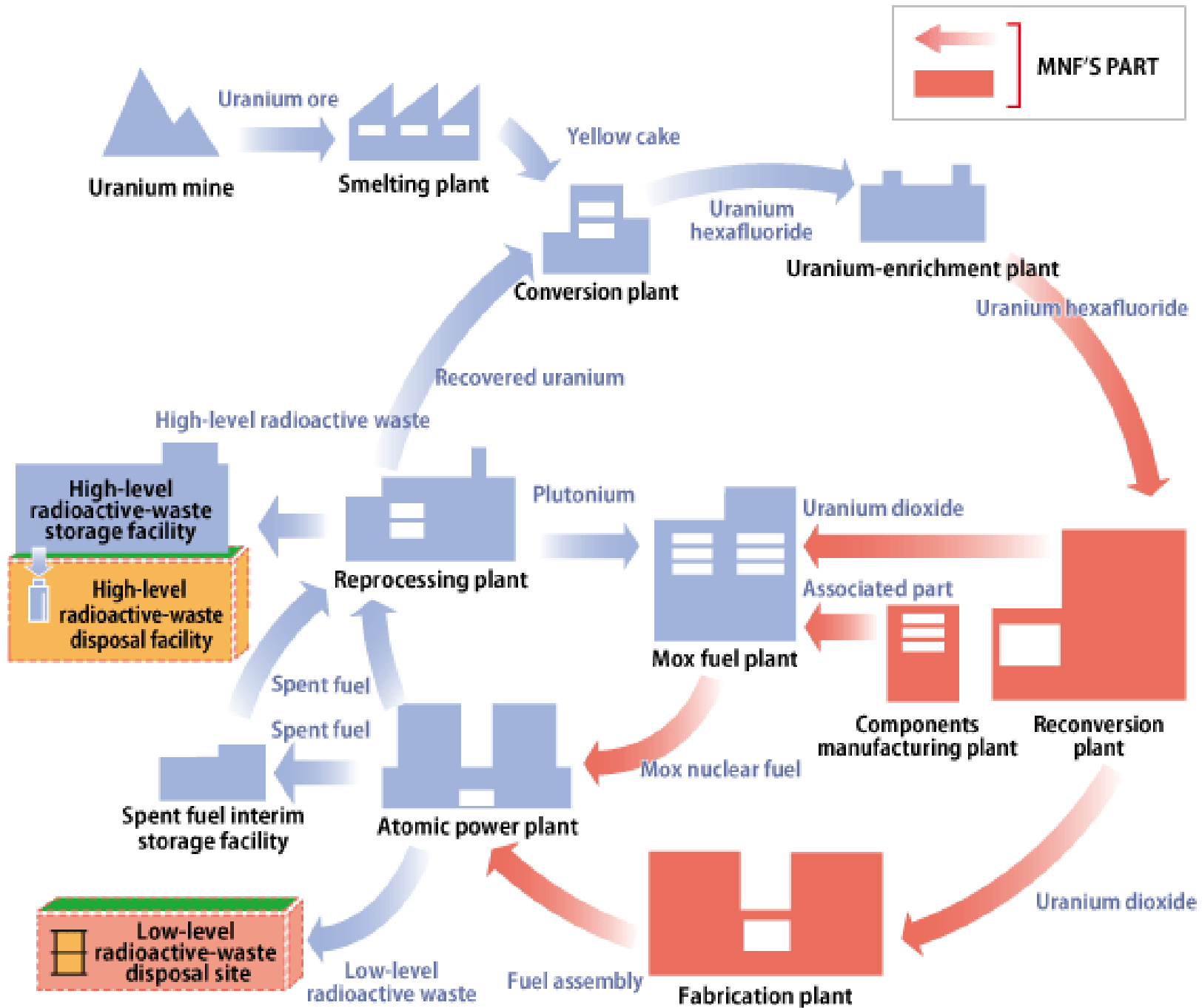
The Nuclear Fuel Cycle



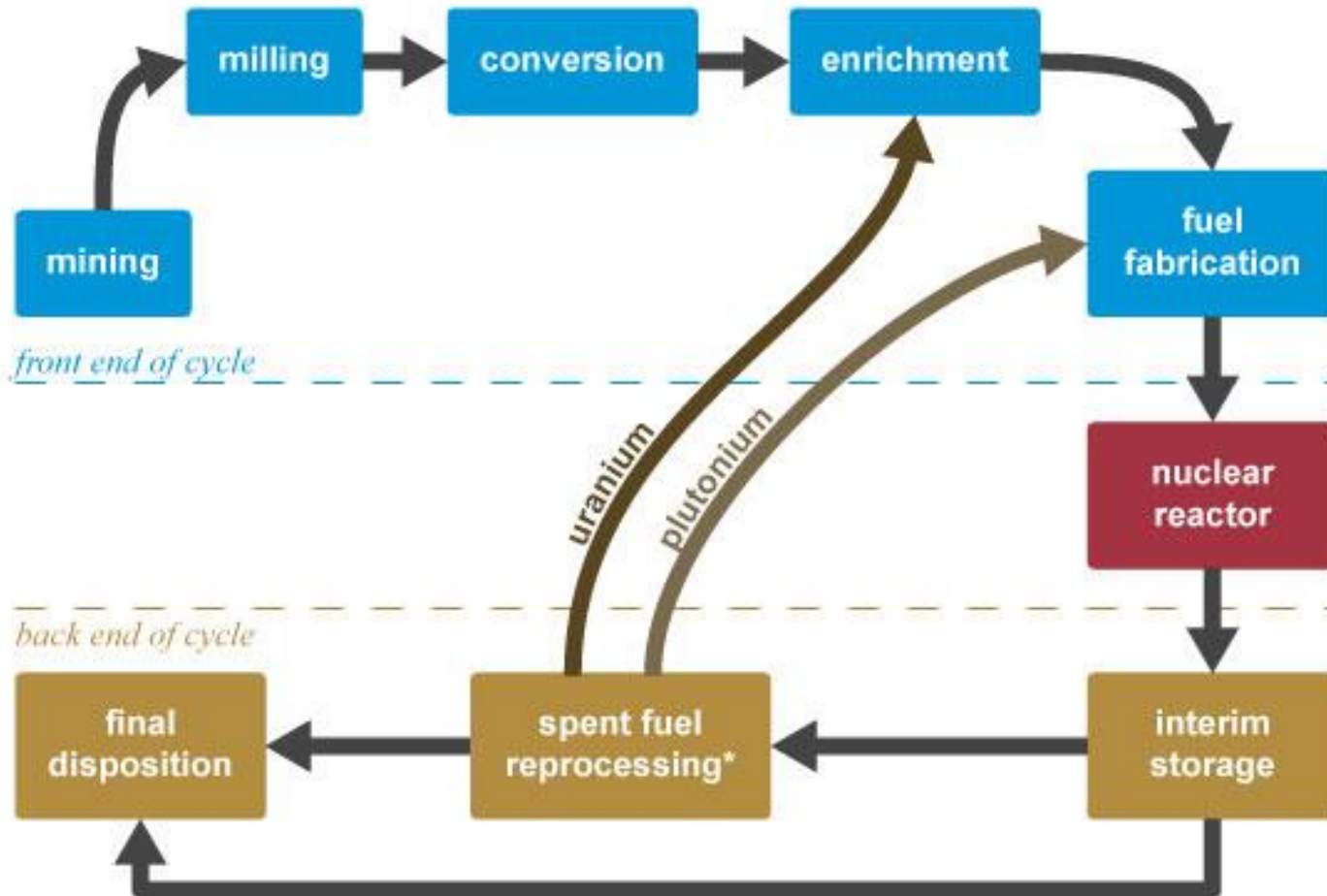
* Reprocessing of spent nuclear fuel, including mixed-oxide (MOX) fuel, is not practiced in the United States.

Note: The NRC has no regulatory role in mining uranium.

As of June 2017



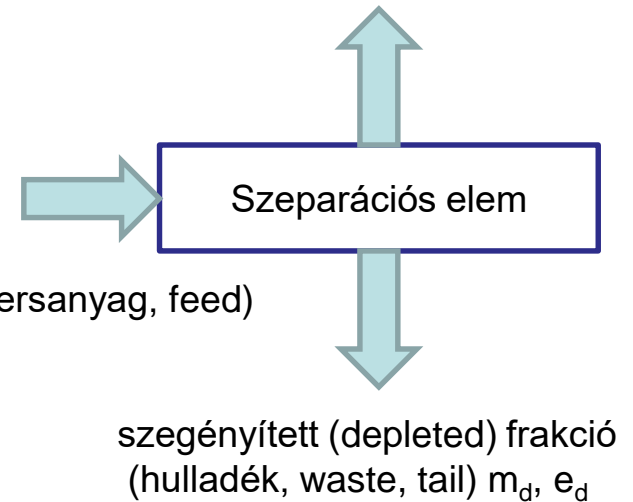
Nuclear fuel cycle



*Spent fuel reprocessing is omitted from the cycle in most countries, including the United States.

Matematikai leírás

- Szeparációs tényező: $\alpha = \frac{e/(1-e)}{e_d/(1-e_d)}$
- Szeparációs nyereség: $g=1-\alpha$ dúsított frakció (termék, product), m, e
- Tömegegyenletek:
 - Teljes: $m_0=m+m_d$
 - 235U: $e_0m_0=em+e_dm_d$Ezekből: $m = m_0 \frac{e_0 - e_d}{e - e_d}$
- e_d határozza meg a termék és a nyersanyag arányát!
 - pl: $e_d=0,25\%$: $m= 0,097m_0$



Szeperációs munka

- Szeperációs potenciál

$$V(x) = (2x - 1) \ln \frac{x}{1-x}$$

- $\Delta V \sim -\Delta S$
- Az entrópiaváltozáson keresztül a befektetendő munkával arányos

- Szeperációs munka:

$$SW = mV(e) + m_d V(e_d) - m_0 V(e_0) \text{ [kg]}$$

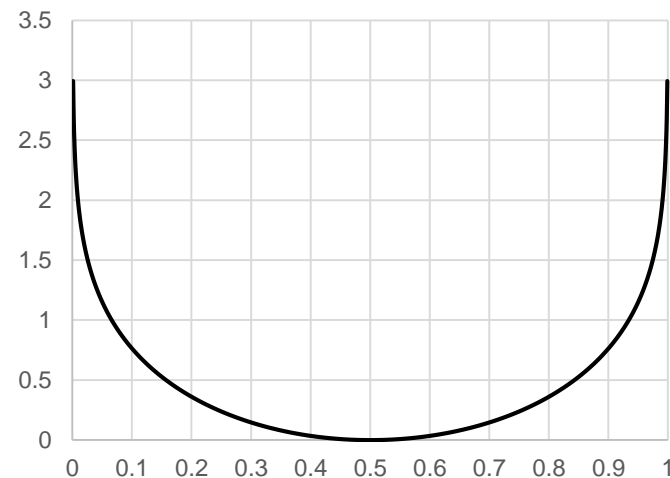
$$SWU = \frac{SW}{m} = V(e) + \frac{e - e_0}{e_0 - e_d} V(e_d) - \frac{e - e_d}{e_0 - e_d} V(e_0)$$

>

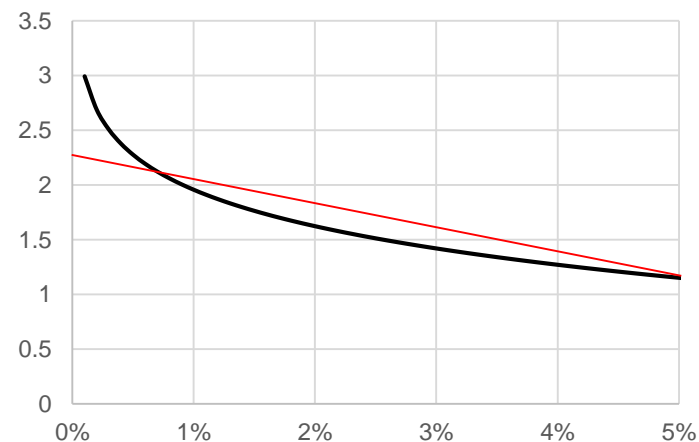
adott e mellett e_d függvénye

- A megrendelő SWU után fizet
- Dúsítási kapacitás: SWU/év

Szeperációs potenciál



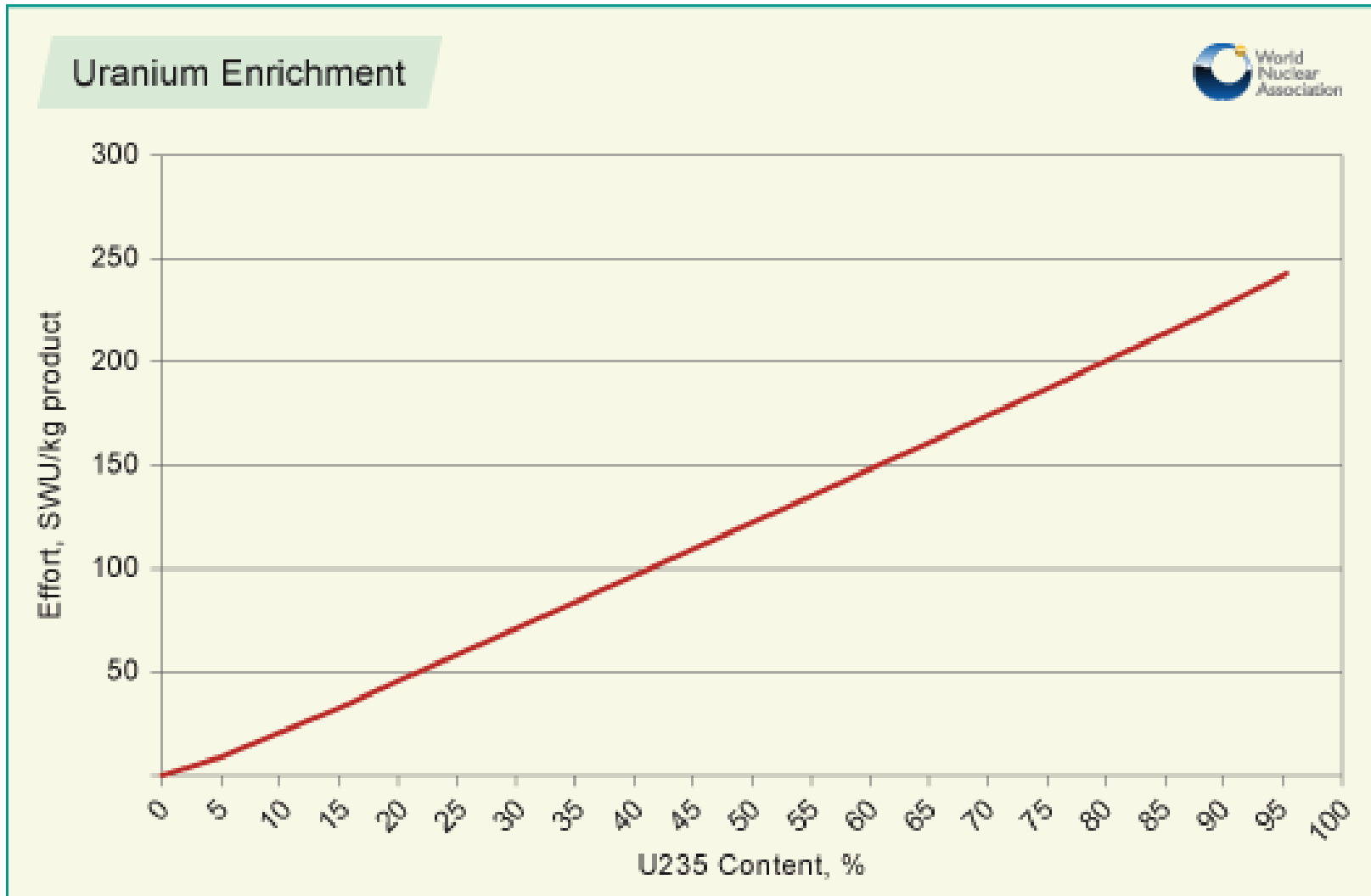
Szeperációs potenciál az U-dúsításra jellemző tartományban



Példák

- 1 GW_e LWR kezdeti töltetének igénye: $\sim 180 \cdot 10^3$ SWU (180 kSWU)
- 1 GW_e LWR évi igény: $\sim 70-90 \cdot 10^3$ SWU
(1,2 GW_e és 5% dúsítás esetén: $140 \cdot 10^3$ SWU)
- Energiaigény (gázdifúziós eljárásnál):
10 MSWU/év termeléshez ~ 2900 MW
villamosenergia-kapacitás szükséges
(~ 2500 kWh/SWU)
- Energiaigény (gázcentrifugás eljárásnál):
 $\sim 40-80$ kWh/SWU

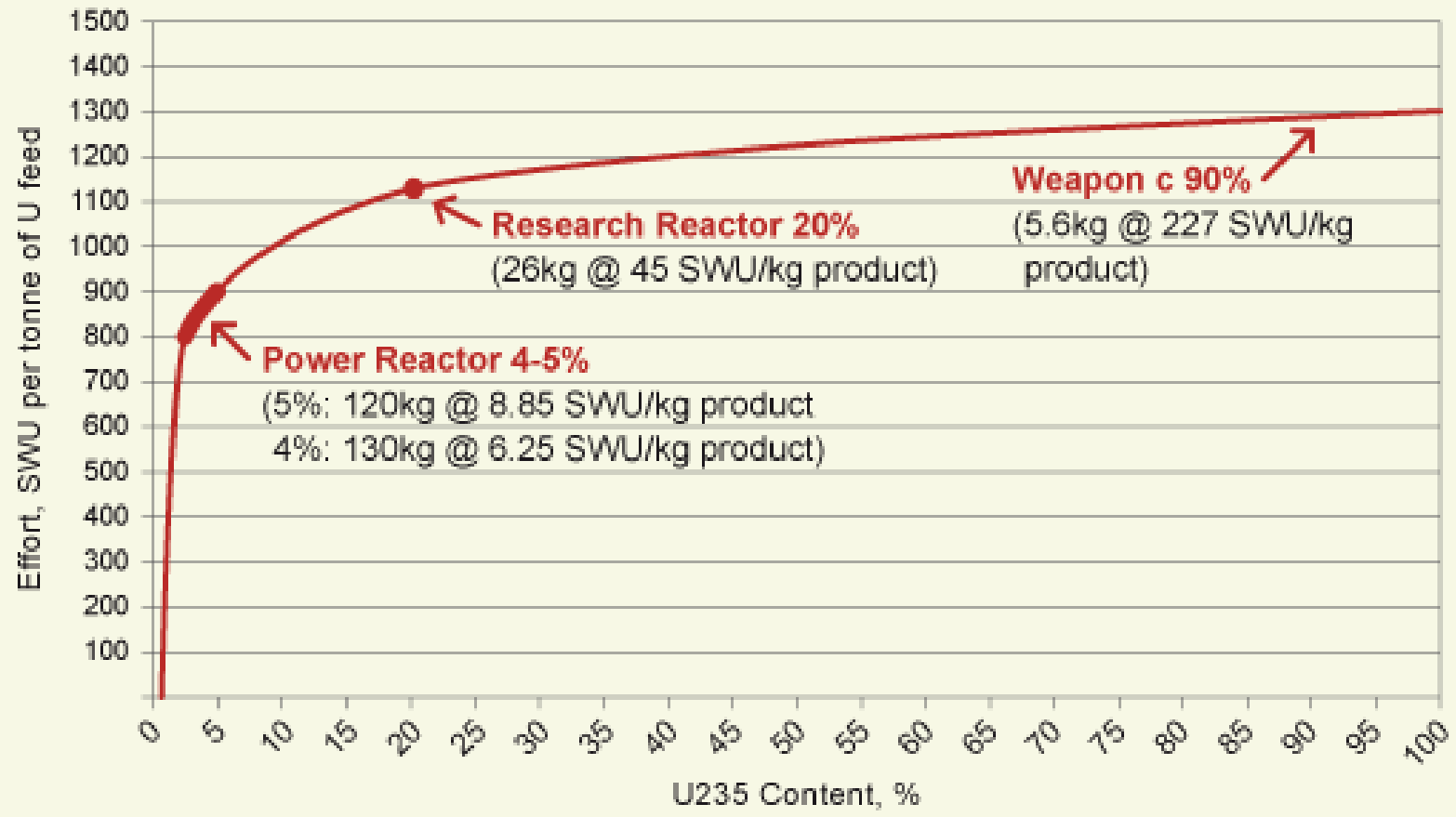
Egységnyi tömegű termék (dúsított urán) SWU igénye a dúsítás függvényében



Egységnyi tömegű betáplálás (1 tonna természetes urán) dúsításának SWU igénye a dúsítási szint függvényében



Uranium Enrichment and Uses

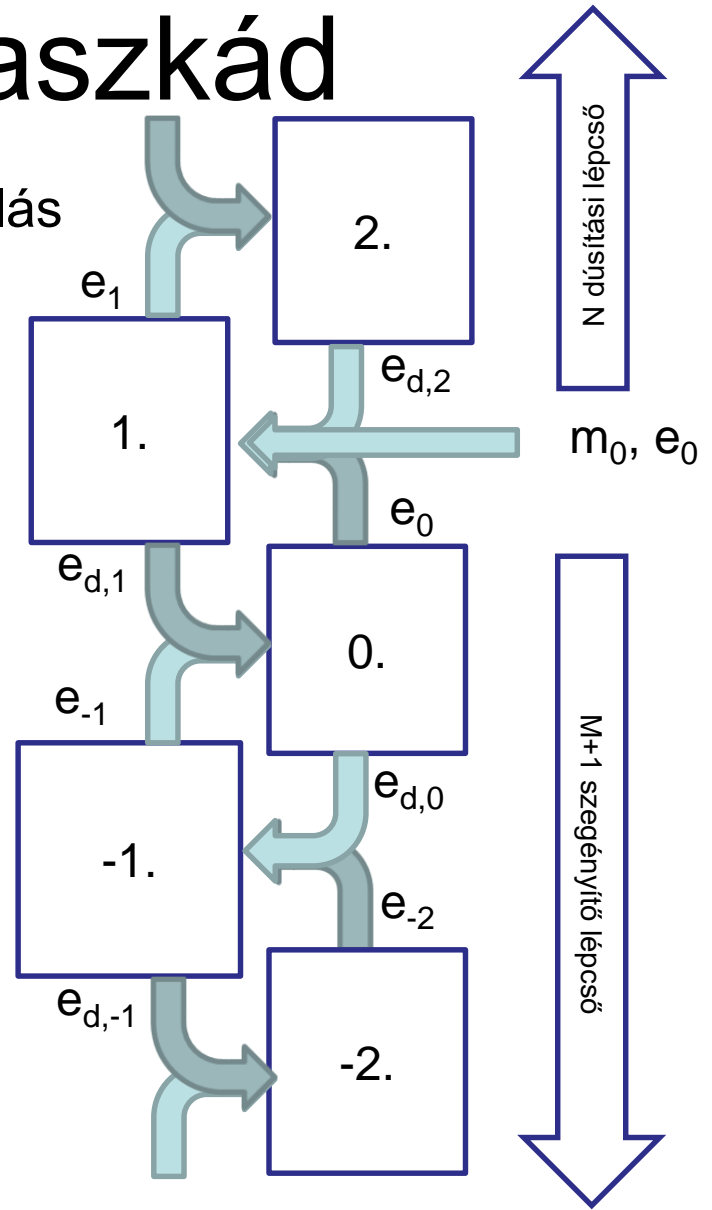


$m, e=e_N$

Recirkulációs kaszkád

- Lépcsők (fokozatok, szintek) – sorba kapcsolás
- Cellák – párhuzamos kapcsolás
- Betáplálás, termék, „hulladék”
- Dúsított áram, szegényített áram
- Ideális kaszkád: $e_n=e_{d,n+2}$
- Elemi dúsítási tényező: $\delta = \frac{e_n/(1-e_n)}{e_{n-1}/(1-e_{n-1})}$
- Lépcsők száma:

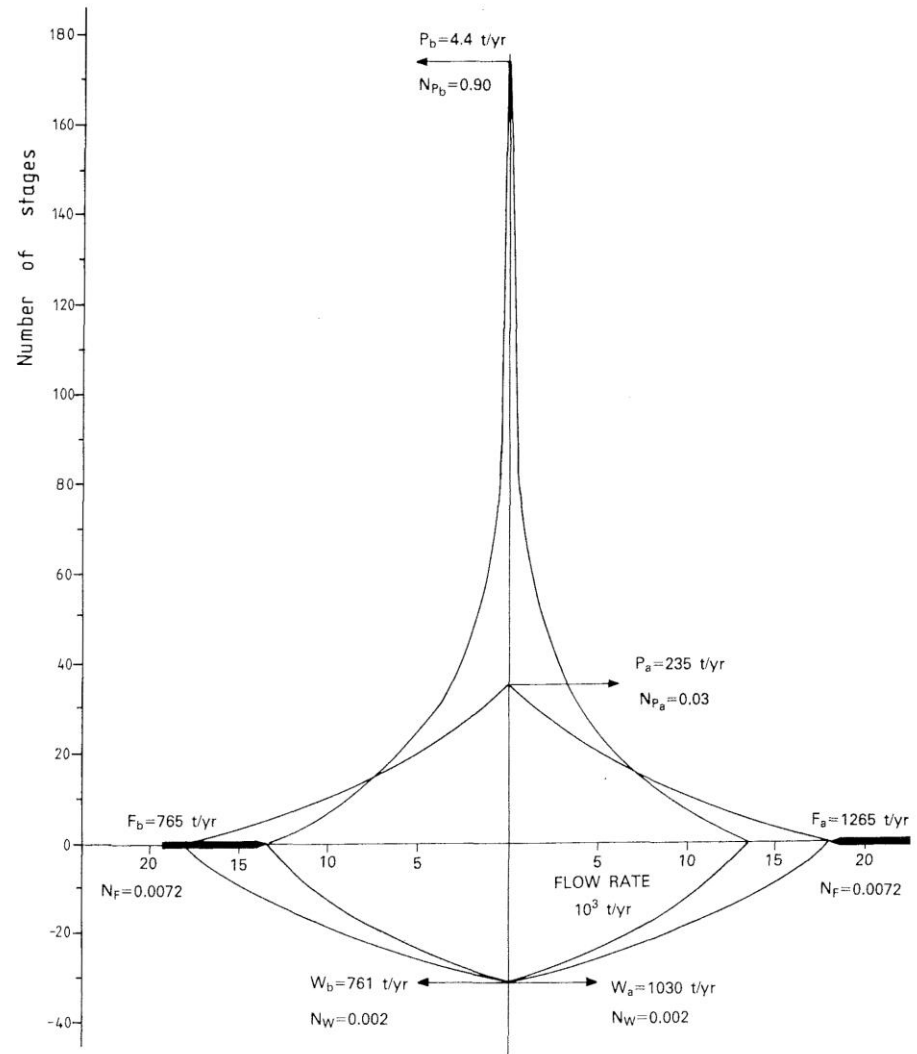
$$\alpha = \delta^{M+N+1}$$



$m_d, e_d=e_{d,-M}$

Optimális kaszkád

- Több lépcső magasabb dúsítást, kevesebb lépcső nagyobb tömegáramot eredményez
- Az egységek száma (terület) azonos
- A kaszkád átkonfigurálható
- Proliferációs kockázat!
- Sok reaktor-üzemanyag helyett, kevés fegyveralapanyag



Példa

- Betáplálás: természetes urán (0,71% ^{235}U)
- Termék: 80% dúsítású urán (80% ^{235}U)
- Dúsítási tényező: 0,0043

- Dúsítási lépcsők száma: ~ 3000
- Betáplálási áram / termék áram aránya: ~ 52000
- Következmény: sok lépcső → nagy berendezés
→ nagy energiaigény

Dúsítottsági fokozatok

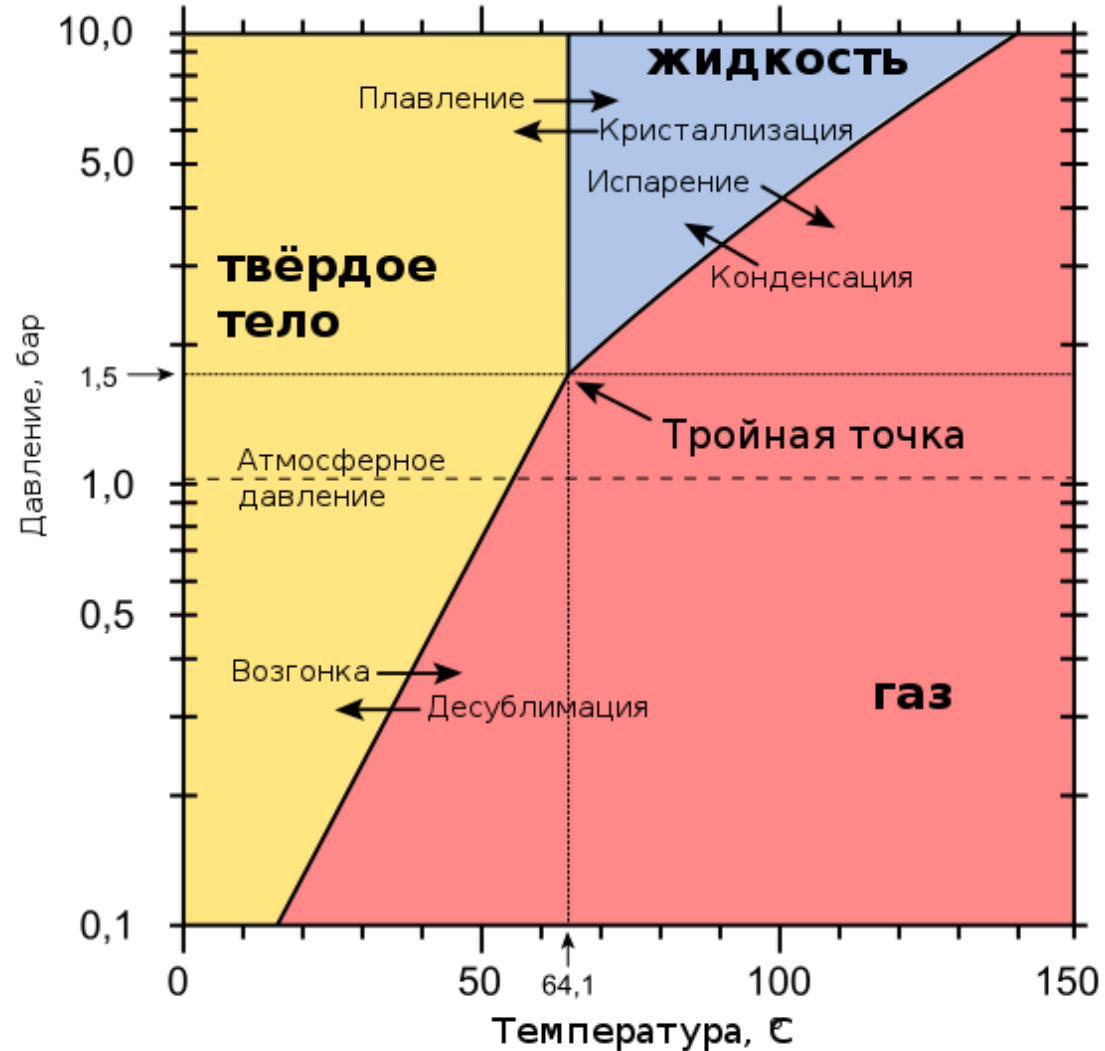
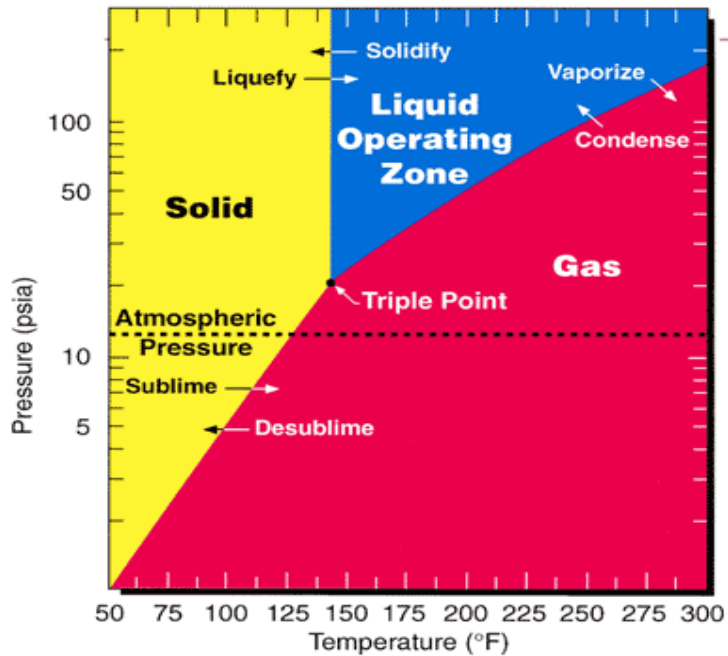
	Alacsony dúsítású urán (LEU)			
		LEU+	HALEU	
Besorolás	<5%	5%-10%	5%-19.75%	19.75%
Kémiai forma	Oxide	Oxide	Oxide, salt, metal	Metal
Felhasználás	Generation III	Generation III +SMR	Generation IV (+ SMR)	Kutatóreaktorok

- HALEU: High Assay Low Enriched Uranium (kb. magas besorolású alacsony dúsítású urán)
- HEU: Highly Enriched Uranium (nagy dúsítású urán), > 19,75%, fegyvercélú (weapons grade)
- A civil felhasználású dúsítók általában max. 7 %-ra dúsíthatnak.
- HALEU előállítás jelenleg csak Oroszországban van. (USA-ban fejlesztések.)

Urándúsítási eljárások

- **Nyomásgradiens**
 - centrifuga
 - aerodinamikai
- **Diffúzió**
- **Kémiai, ioncserélős**
- **Optikai gerjesztés**
 - Atomi
 - Molekuláris
- **Elektromágneses**

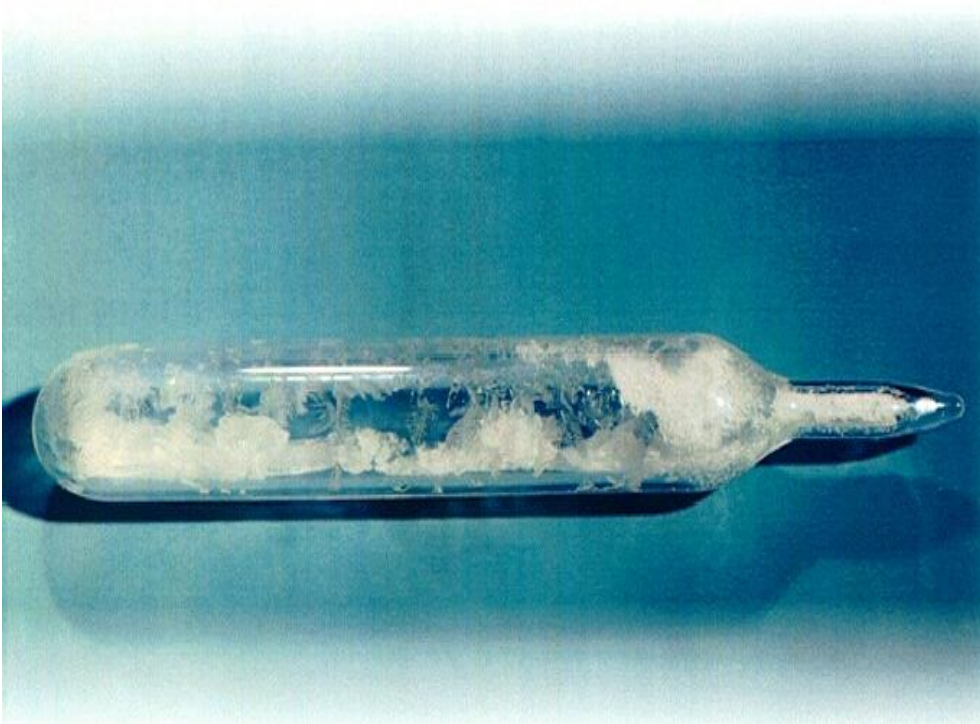
Urán-hexafluorid fázisdiagram



Urán-hexafluorid

- UF_6 – ^{19}F egyedüli fluor-izotóp
- Szeparációs tényező elméleti maximuma: 1,0043
(gondosan megválasztott és felügyelt gyakorlati körülmények esetén jól megközelíthető)
- Fizikai tulajdonságok:
 - Olvadáspont: $64\text{ }^\circ\text{C}$ ($p > 1,5\text{ bar}$ nyomás kell hozzá)
 - Légköri nyomáson a „forráspont” (szublimációs hőmérséklet): $56\text{ }^\circ\text{C}$
 - Sűrűség: $4,87\text{ g/cm}^3$ (szilárd), $3,86\text{ g/cm}^3$ (folyékony)
- Vegyi tulajdonságok:
 - mérgező
 - erősen korrozív
 - reakció a vízzel: $\text{UF}_6(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{UO}_2\text{F}_2(\text{s}) + 4\text{HF}(\text{g})$
 - a folyósav (HF) is erősen korrozív
- Ellenálló anyagok: alumíniumoxid, nikkel (nikkel-fluorid), fluorozott szénhidrogének (teflon)

Urán-hexafluorid



Ampullába zárt kristályok szobahőmérsékleten

Urán-hexafluorid

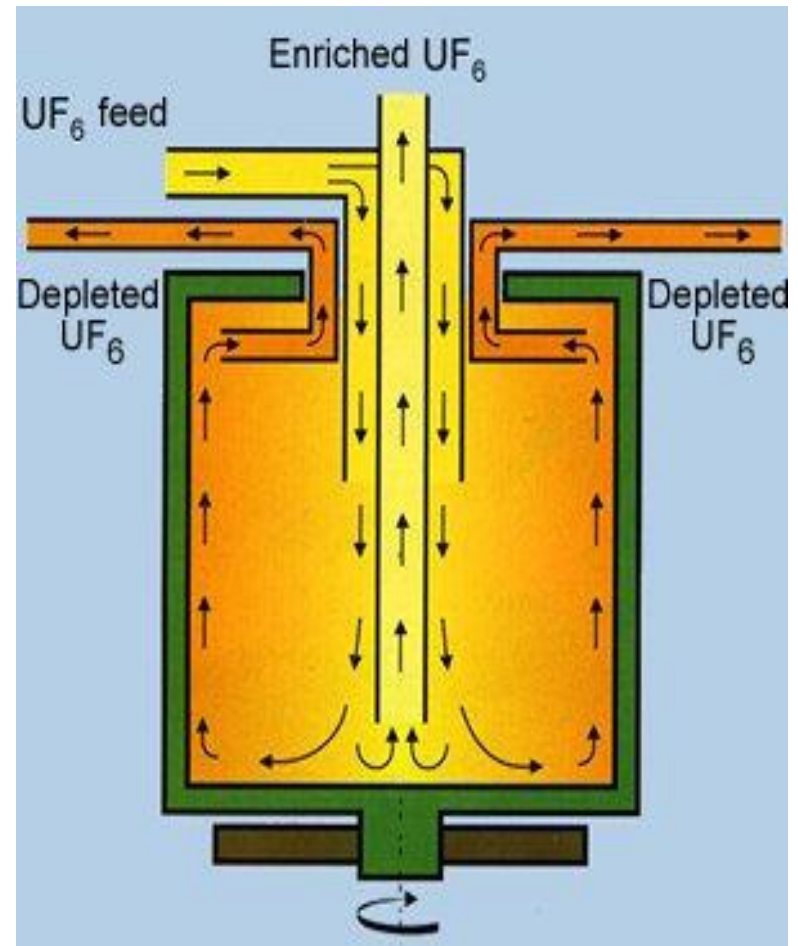
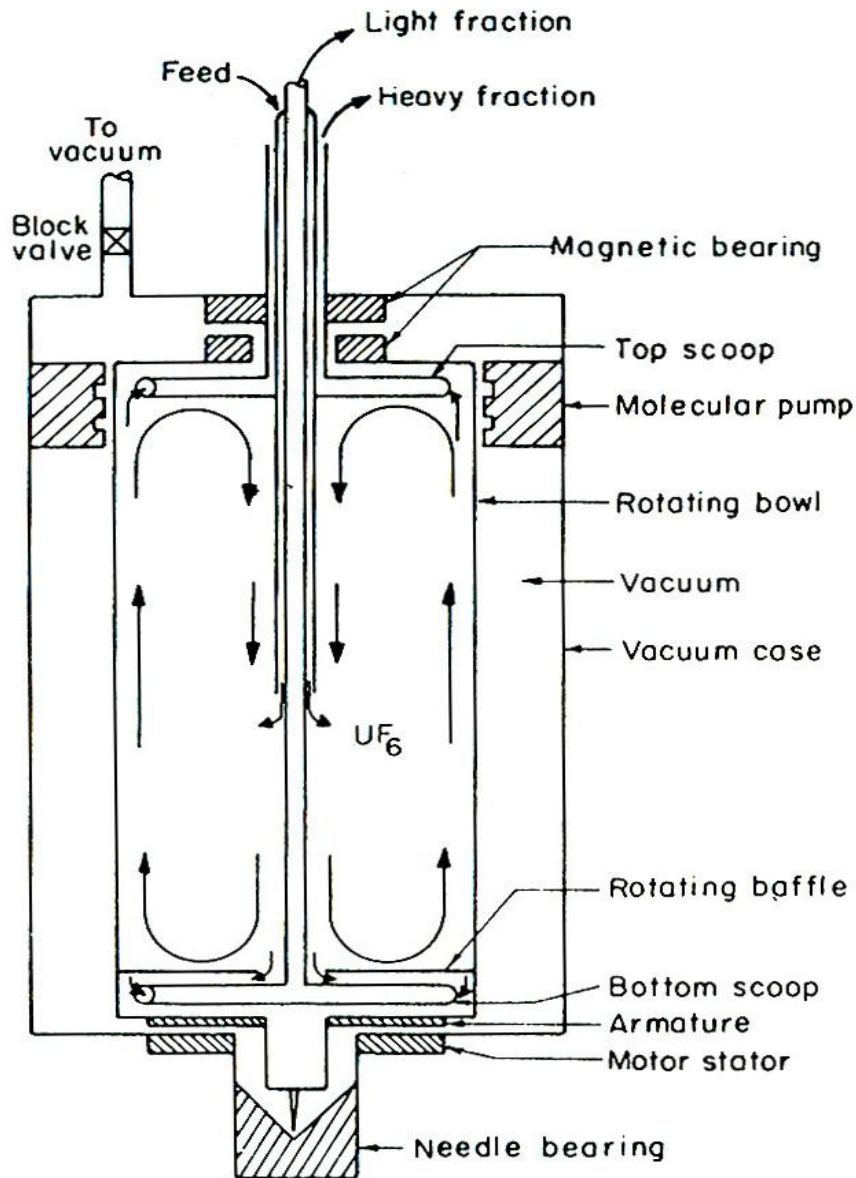


Szegényített urán-hexafluorid tárolására használt konténer (~1,2 m átmérő)

Gázcentrifugás eljárás

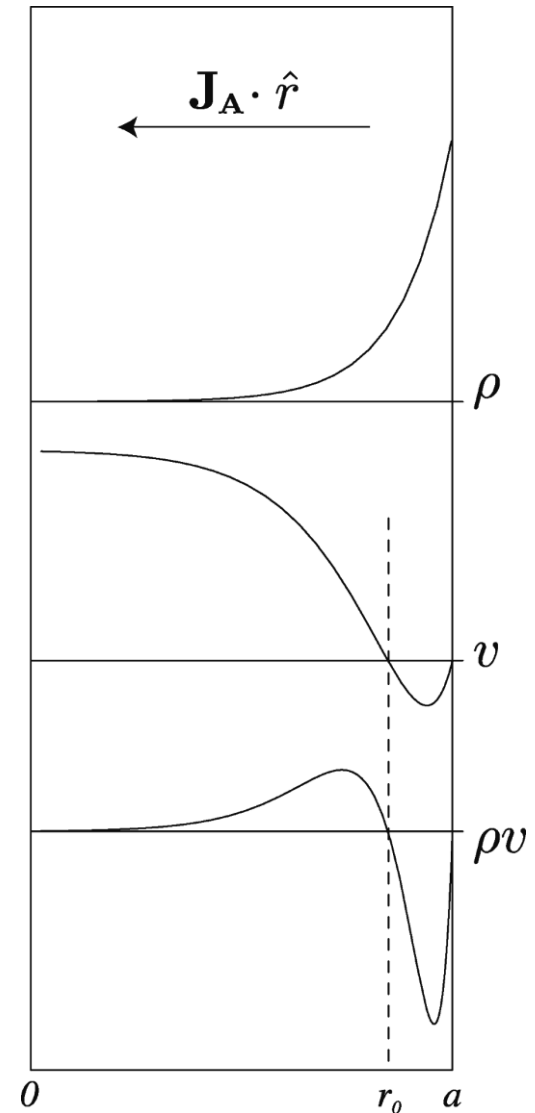
- Gázdiffúziós eljárás hátrányai:
 - Alacsony szeparációs tényező
 - Nagy energiaigény
- Másik gyakorlatilag használt módszer: gázcentrifuga
 - az elv a 40-es évek óta ismert
 - a Manhattan Project-ben elvetették (a diffúziós módszer technológiailag egyszerűbbnek tűnt)
 - Németországban is fejlesztették
 - a technológia a háború után Oroszországba került
 - 60-as évektől: második generációs technológia
 - ma már világviszonylatban ez a domináns eljárás

Gázcentrifugás eljárás



Eloszlások a centrifugában

- Változó sűrűség (ρ), axiális sebesség (v) és tömegáram (ρv) gradiens
- A dúsított frakció kinyerése az alacsony nyomás miatt nem középen optimális
- Ez korlátozza a nagy sebességű centrifugák hatásfokának növelését ($\sim v^2_{kerületi}$ nem $\sim v^4_{kerületi}$)



Gázcentrifugás eljárás

Gázmolekulák sűrűségeloszlása gravitációs térben:

$$N(h)/N(0) = \exp - (mgh/RT)$$

$$[N_1(h)/N_1(0)]/[N_2(h)/N_2(0)] = \exp - [(m_1-m_2)gh/RT]$$

$$[R(h)/R(0) = \exp - [(m_1-m_2)gh/RT]$$

A termék / betáplálás koncentráció aránya:

$$x_P/x_F \approx e^{\delta n'}$$

ahol n a sorba kapcsolt centrifugák száma,

$$\delta = (M_H - M_L) 10^{-3} v_r^2 r^2 / 2RT$$

Itt M_H és M_L a molekulák tömege, r a centrifuga sugara, v_r a forgás szögsebessége.

A szeparáció tényező $\approx 1 + \delta$

Gázcentrifugás eljárás

- Legfontosabb jellemzők:
 - magasság: 1-2 m (de létezik 13 m-es is)
 - átmérő: 0,1-0,2 m
 - fordulatszám: 50000-90000 (!) fordulat/perc
 - $v_r \cdot r \approx 800$ m/s (szilárdsági határ)
 - tipikus szeparációs tényező: 1,4 – 3,9 /lépcső
 - termU \rightarrow 3% dúsU (0,2% dús. maradék): ~10 lépcső (gázdifúziónál: ~1300 lépcső)
 - termU \rightarrow 80% dúsU (0,2% dús. maradék): ~45 lépcső (gázdifúziónál: ~3600 lépcső)

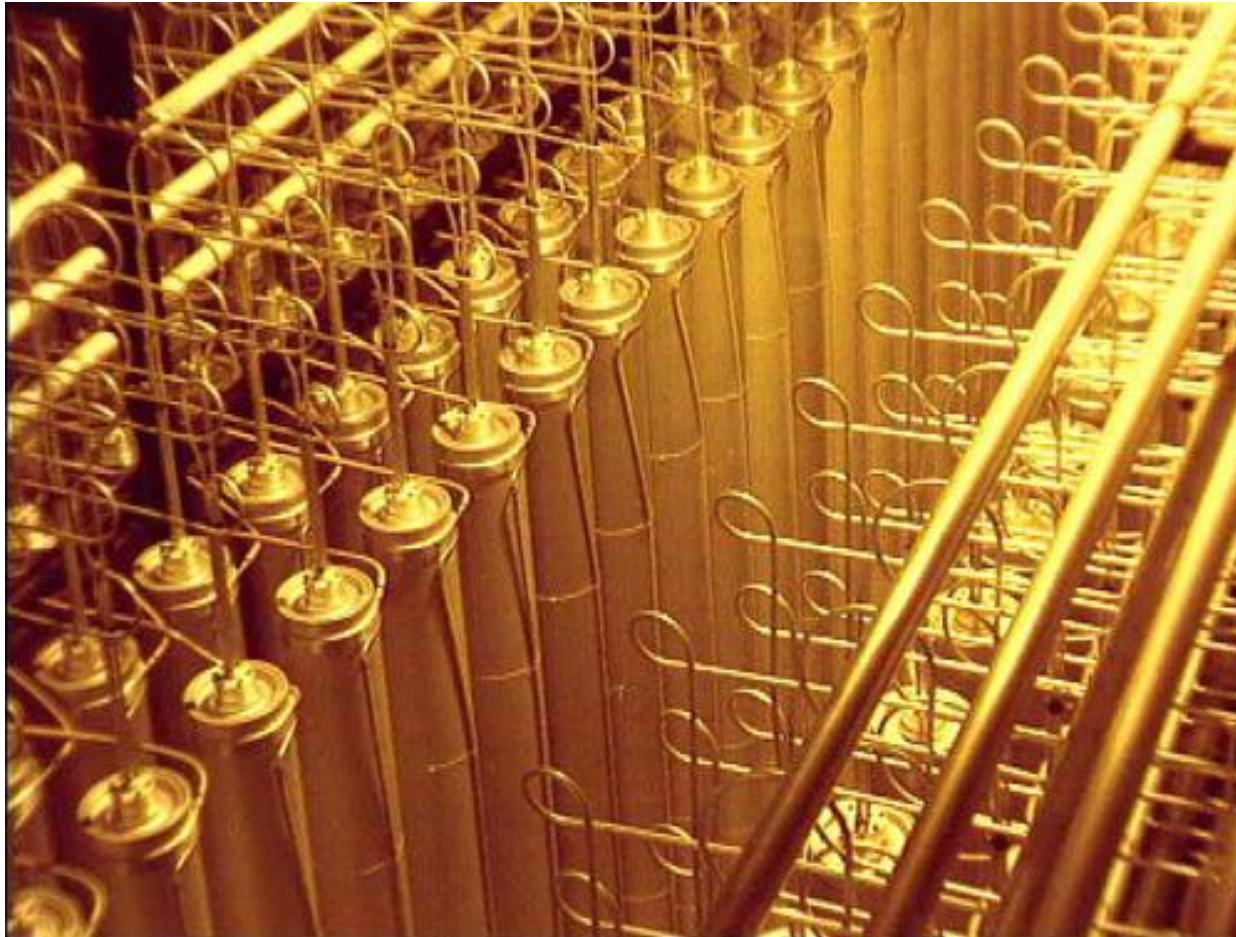
Gázcentrifugás eljárás

- További jellemzők:
 - energiafogyasztás: 40-80 kWh/SWU (3%-a a gázdifúziós eljárásénak)
 - elhanyagolható környezeti hőterhelés
 - kis kapacitású (néhány MSWU/év) dúsítómű építése is gazdaságos
 - könnyen bővíthető párhuzamos kapcsolással
 - jelentős fenntartási költség a centrifugák gyakori cseréje miatt (a centrifugák gyártása azonban a helyszínen (a dúsítóműben) megoldható)
 - összességében jóval olcsóbb a gázdifúziós eljárásnál (az ár ~25-ös faktorra esett 1980 óta)

Gázcentrifugás eljárás



Gázcentrifugás eljárás



Működő gázcentrifugás dúsítóművek

- Jelentősebb kapacitások
 - Oroszország (TENEX: Angarsk, Novouralsk, Zelenogorsk, Seversk, teljes orosz kapacitás: 26 MSWU/év, a világkapacitás közel 40%-a)
 - URENCO (Európában 14 MSWU/év, Egyesült Államokban 4,7 MSWU/év):
 - Hollandia (Almelo)
 - Nagy-Britannia (Capenhurst)
 - Németország (Gronau)
 - Egyesült Államok (New Mexico)
- Kisebb kapacitások
 - Kína
 - Japán
 - Egyesült Államok (Idaho Falls-ban épül, AREVA tulajdon marad)
 - Irán