

Atomenergia a 21. században

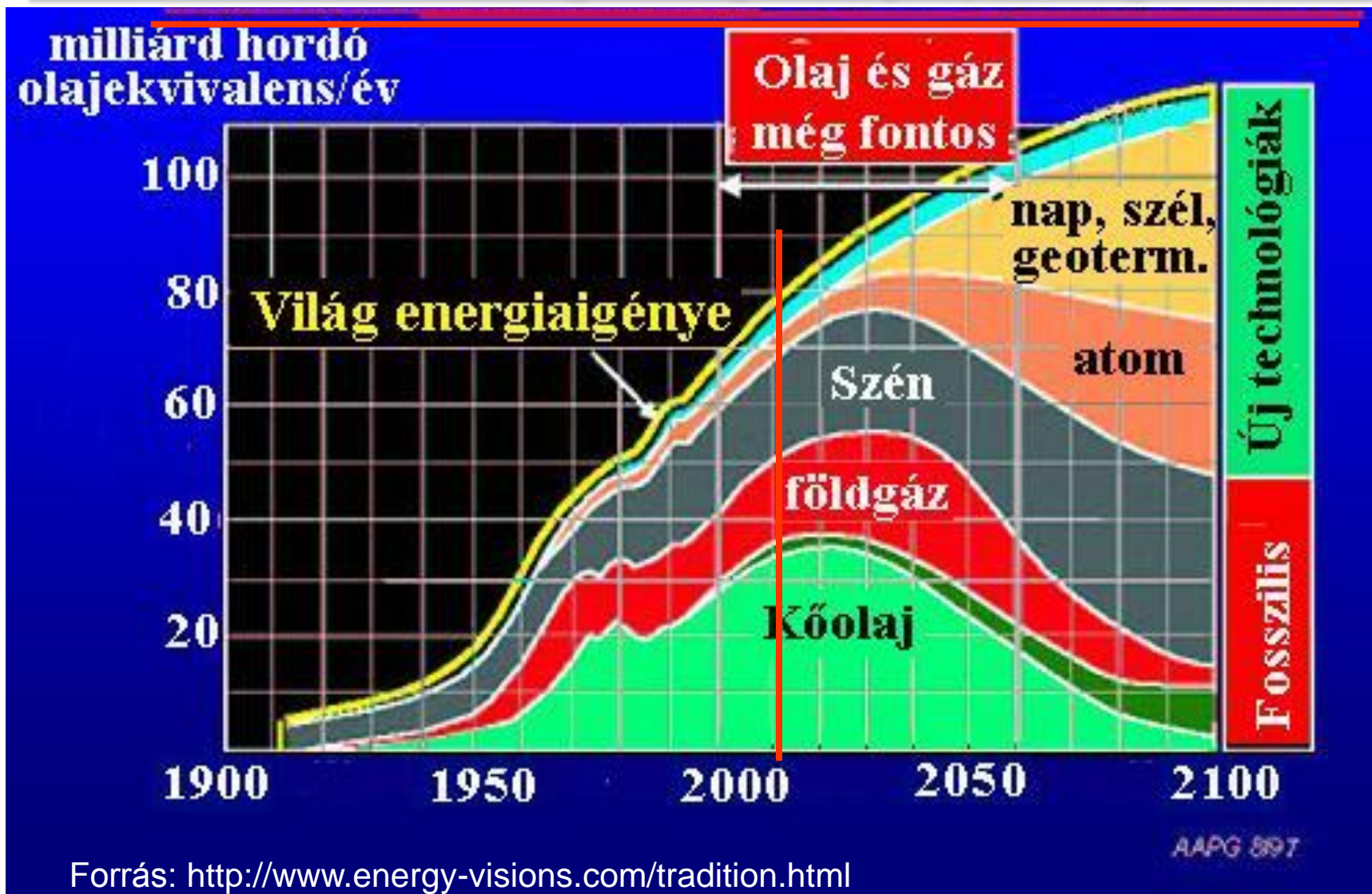
Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technikai Intézet

Atomenergiáról – mindenkinek
OAH – TIT Stúdió Ismeretterjesztő konferencia

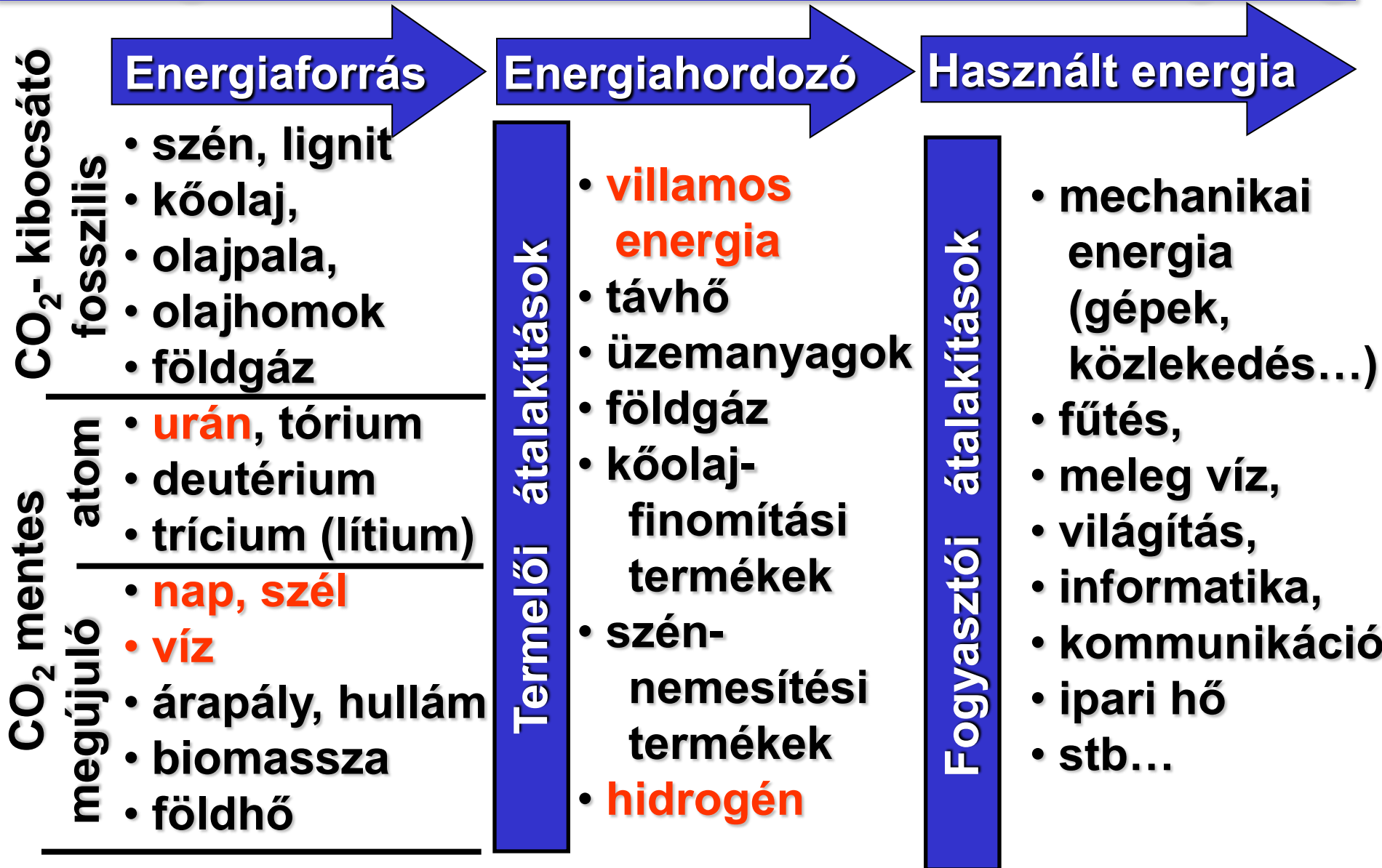
Tartalom

- **Energia → villamosenergia → atomenergia**
- **Az atomenergia fő irányai a 21. században**
- **Atomenergia Fukushima után**
- **Új építések Európában és a világon**
- **Atomreaktorok generációi**
- **Mennyire drága az atom, a nap- és a szélenergia?**

Távlati energiaigény prognózis



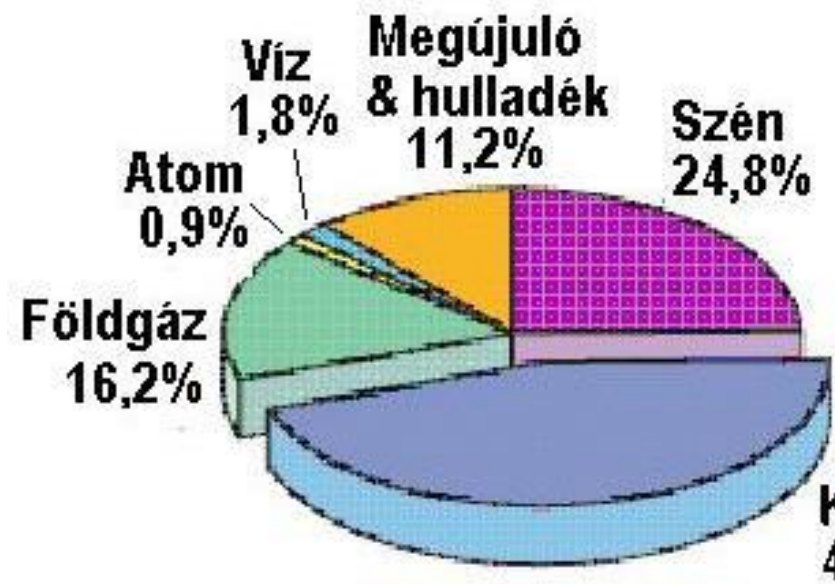
Energiaforrástól a használt energiáig



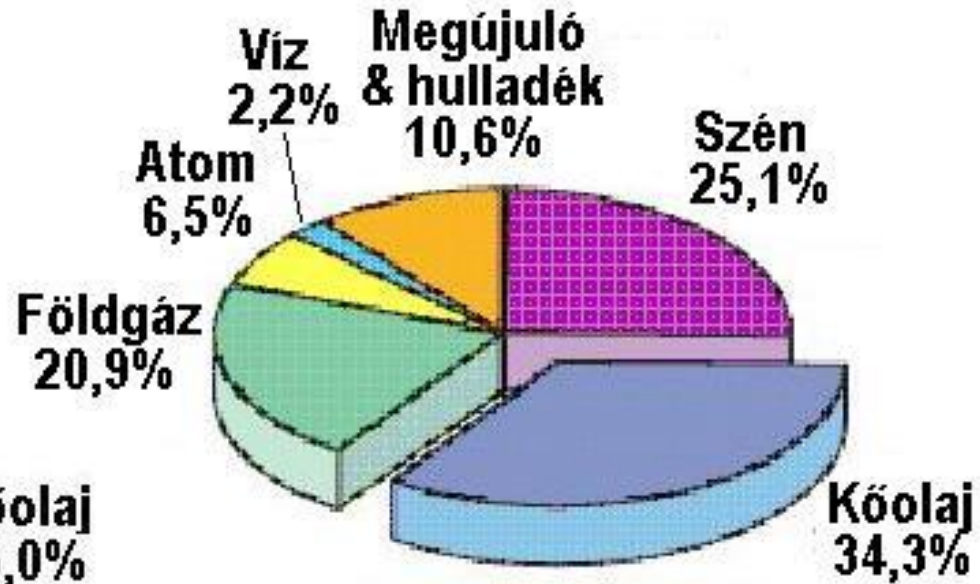
Energiaforrások megoszlása

1973

2010



6 035 Mtoe



11 059 Mtoe

Mtoe = megatonna olajkvivalens

Az atomenergia részesedése a villamosenergia-termelésből

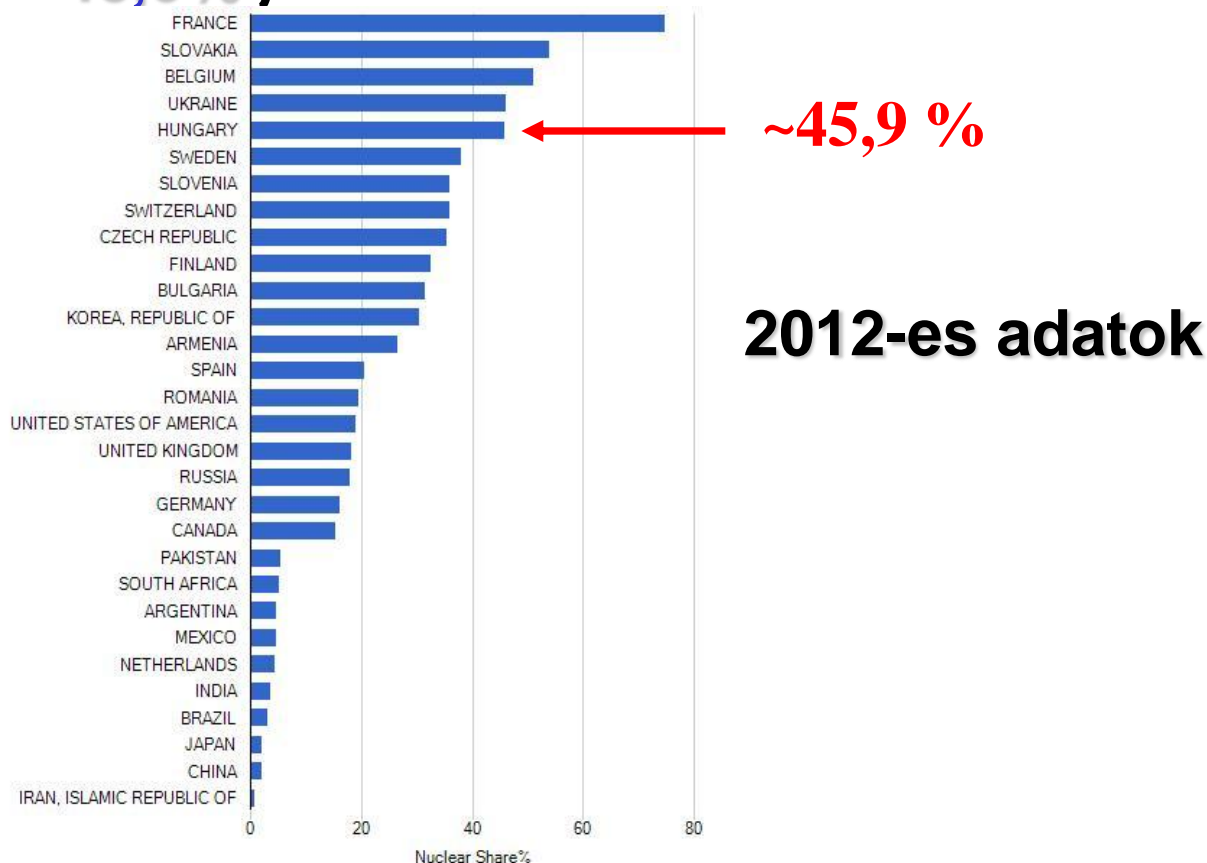
Összes energiából részesedés \neq villamos energiából részesedés

A világon: **14,11%**

Európában: **34,8%**

Magyarországon: **45,9%**

az atomenergia részesedése



Forrás: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx>

Atomerőművek 2012-ben

2012. december 31-én:

- **440** atomerőművi blokk **üzemel** 30 országban
(Paks: **4** blokk)
- Teljes beépített teljesítmény **374 411** MWe
(Paks: **2 000** MWe)
- **68** atomerőművi blokk áll **építés** alatt.

2012: **2 új blokk** csatlakozott a hálózatra (Dél-Korea)

3 új építés kezdődött:

- Oroszország,
- Egyesült Arab Emírátságok,
- Koreai Köztársaság (Dél-Korea)

Forrás: Alexander Bychkov (Nemzetközi Atomenergia Ügynökség főigazgató-helyettese) előadása

Atomenergia 2011-2012-ben

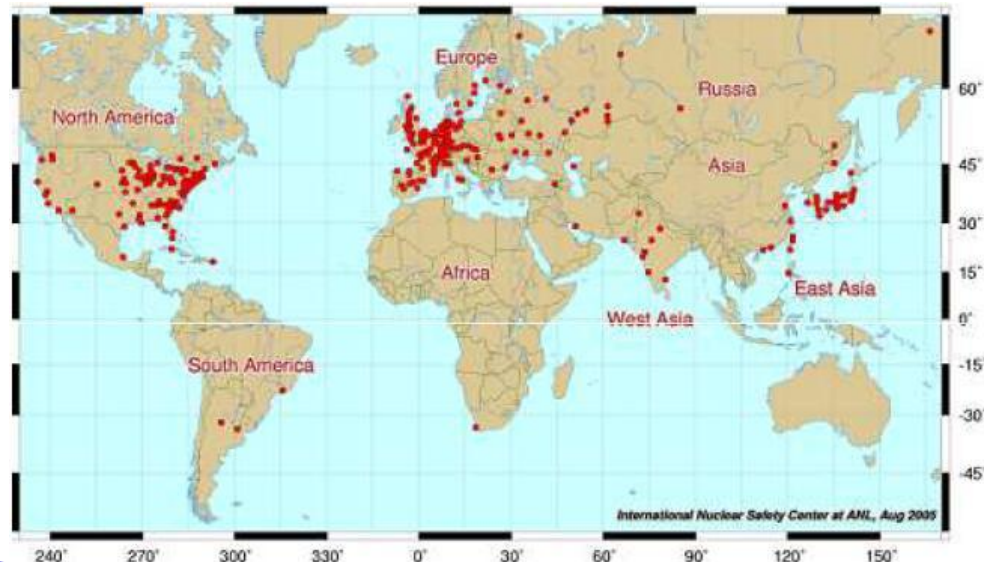
Működő reaktor: 440
Többségük az északi féltekén!

68 új reaktorblokk épül

Fukushima után:

a) Streszeszt szinte mindenütt

b) További tervek



Építési terveket tovább folytatók

- Kína, India,
- Oroszország,
- USA
- Egyes EU országok (Finnország, Franciaország, Románia, Anglia + ...)
- **30+** új belépő ország (!!)

Atomenergiát „kivezetők”

Németország (importőr lett)
Svájc (2034, 20,7Mrd CHF)
Japán
Spanyolország (távlatilag)

Atomenergia 2011-2012-ben (folyt.)

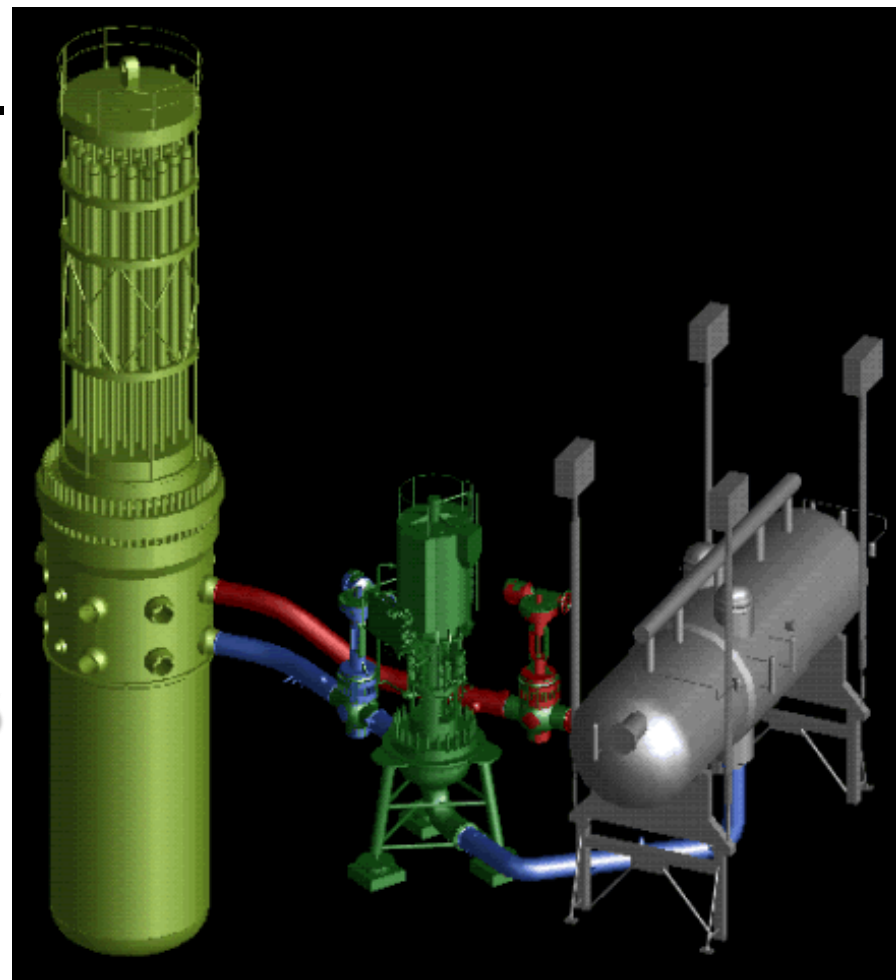
- Meglévő erőművek **üzemidő-hosszabbítása**
 - Új erőművek **építése**
 - 3. generációs erőművek **fejlesztése**, az épülő erőművek között már vannak ilyenek is
 - 4. generációs erőművek **kutatása**
 - **Hulladék**-kérdéssel kapcsolatos **kutatások**
-

Hazánk is érintett:

- **üzemidő-hosszabbítás** (Paks)
- meglévő kapacitás **távlati pótlása** 2 új blokkal (Paks)
- **Kutatásokban** való erőteljes részvétel (KFKI-AEKI, BME, NUBIKI)

Üzemidő-hosszabbítás

- A legtöbb, atomenergiát alkalmazó országban a blokkok üzemidő-hosszabbítását tervezik. (pl. USA 71 blokk 2011. szept.)
- Kiugró nagyberuházás nem kell az üzemidő-hosszabbításhoz.
- A paksi főberendezések is alkalmasak a 30+20 éves üzemre.
- Gondosan vezetett, összesen 50 éves üzemidőt szem előtt tartó karbantartási programot kell vinni Pakson.
- Új gépészeti vagy erősáramú technológiára nincs szükség.
- **Az üzemidő-hosszabbításhoz jelentős szakember-utánpótlásra lesz szükség**
- **A nukleáris képzésben részesülő mérnököknek, fizikusoknak bőven lesz munkájuk!**



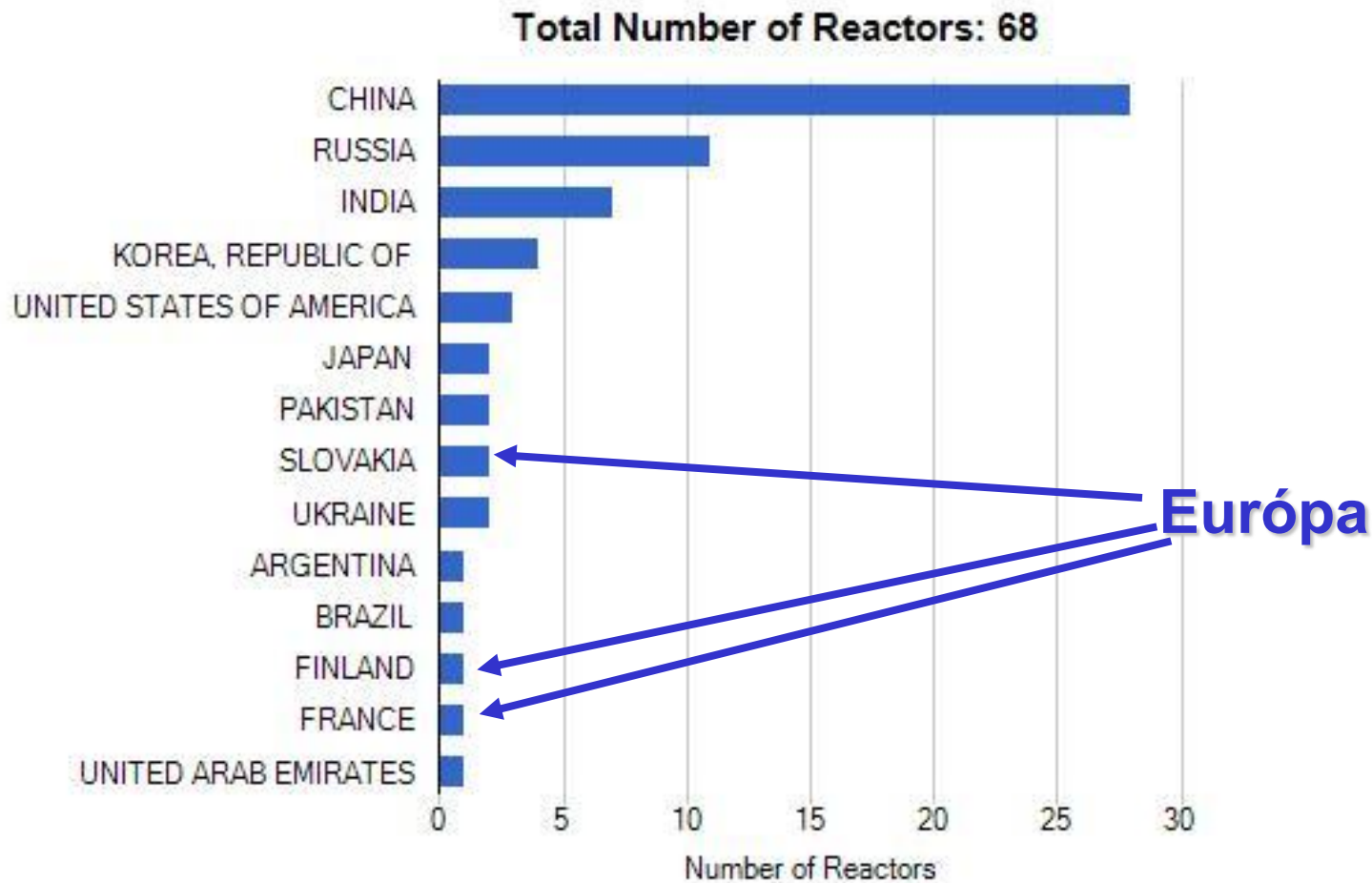
Épülő atomerőművek 2012-ben



Forrás: <http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/rdresults.aspx?id=27569&ExampleId=62>

Épülő atomerőművek 2012-ben

A világon: **68** új blokk
Európában: **4** új blokk



Forrás: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByCountry.aspx>



| 2020 | 2030 | 2050 |
|-------|--------|--------|
| 60 GW | 200 GW | 400 GW |

- Szédületes **kínai** tempó
 - **28 blokk** építés alatt, rövidesen még több indul,
 - tervek: 5-6x növelni a nukleáris kapacitást:
 - egyre inkább önellátók reaktor tervezésben és kivitelezésben, nukleáris üzemanyagciklusban,
 - zömmel nyomottvizes épül (kooperáció+saját gyártás)
 - most épülő típusok (4-18 elemű sorozatokban):
 - több **nyugati** gyártó típusai - AP1000, EPR, CANDU
 - az **orosz** gyártó típusa - VVER
 - honosított **kínai** sorozat - CNP-300, -600, -1000, ACNP
 - új **kínai** sorozat CPR-1000, ACPR-1000
 - egyéb (HTR, kis moduláris reaktor, gyorsreaktor...)

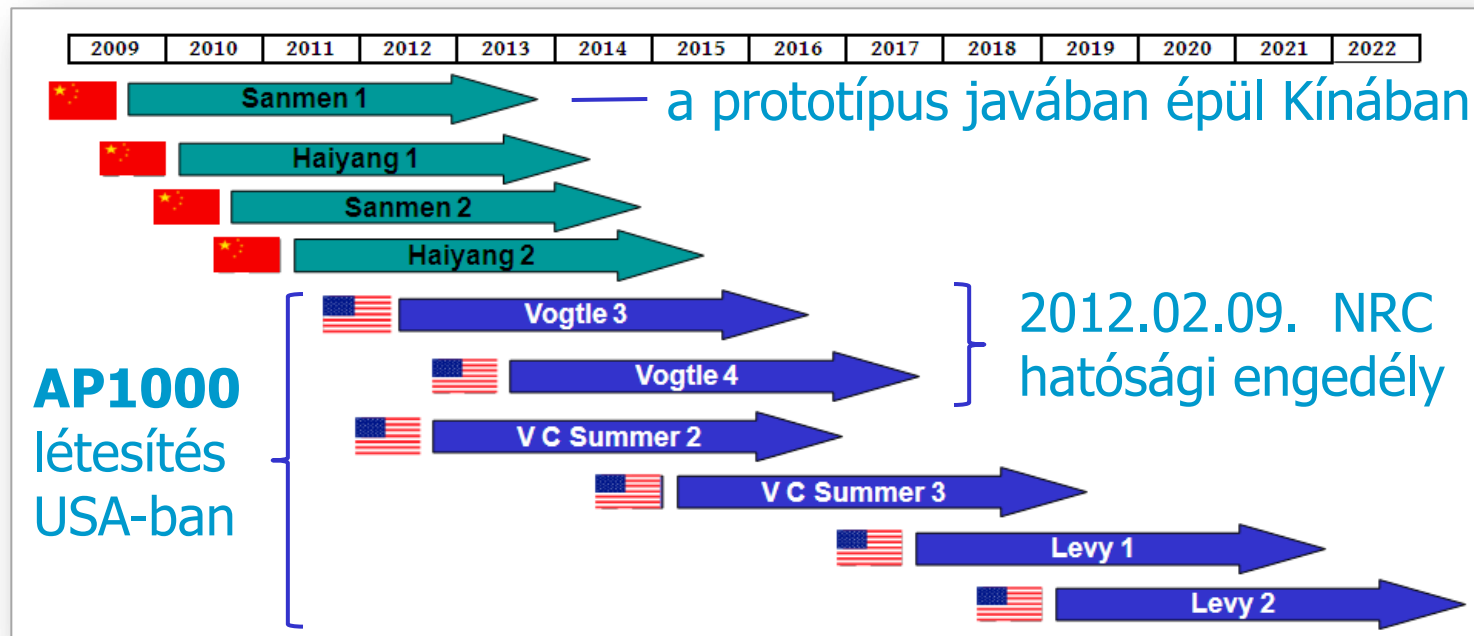
Atomerőmű fejlesztések



- Az **orosz** nukleáris technológia
 - Oroszország sem állt meg, **halad** előre
 - a nukleáris energiatermelés közel **duplázódik 2020-ig**,
 - nukleáris termékek, szolgáltatások exportja nemzeti cél,
 - világelső a gyorsreaktorok technológiájában.
 - **belföld**
 - 21 új blokk(!), 9 hazai telephelyen 2030-ig
 - új kiépítések (Leningrád-II, Novovoronyezs-II, Kola-II, Kurszk-II)
 - zöld mezős beruházások (Balti)
 - gyorsreaktor (Belojarszk), úszó atomerőmű (Viljucsinszk)
 - **külföld**
 - sok futó projekt (**kínai, indiai, török, vietnami, fehérorosz, jordán**)
 - Rosatom Overseas megalapítása (orosz bázisú multinacionális konglomerátum létrehozása külföldi terjeszkedésre), vegyes vállalatok alapítása (pl. Atomenergomas-Alstom), intenzív cégvásárlások (pl. Skoda JS, Nukem),
 - betörni az EU-ba (**cseh, szlovák, magyar, bolgár?, brit?** beruházások)

Atomerőmű fejlesztések

- Az **amerikaiak** 30 év után újra belekezdtek

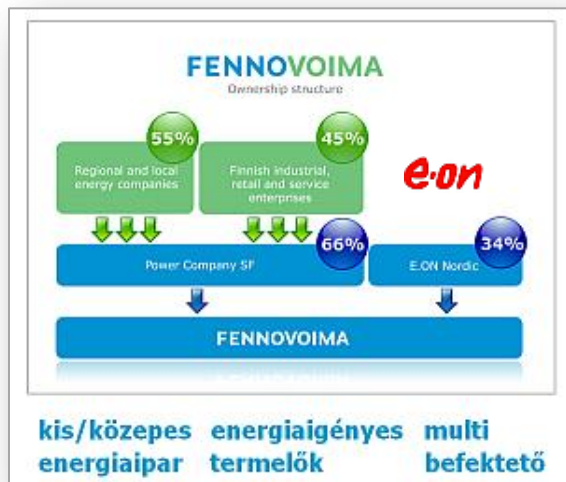


Vogtle-3
földmunka



Atomerőmű fejlesztések

- Három **finn** atomerőmű létesül
 - TVO
 - **Olkiluoto-3** szerelés végefelé
AREVA-Siemens – EPR prototípus
jelentős késében, drágulásban
 - **Olkiluoto-4** tenderezés előtt, jelöltek:
AREVA – EPR, GE Hitachi – ESBWR
KHNP – APR1400, MHI – APWR
Toshiba – ABWR
 - Fennovoima: **finn-(német?)** beruházás



Pyhäjoki telephely
tavaly kiválasztva,
jelöltek:
AREVA – EPR
Toshiba – ABWR
Rosatom – VVER



Atomerőmű fejlesztések

EE

LT

LV

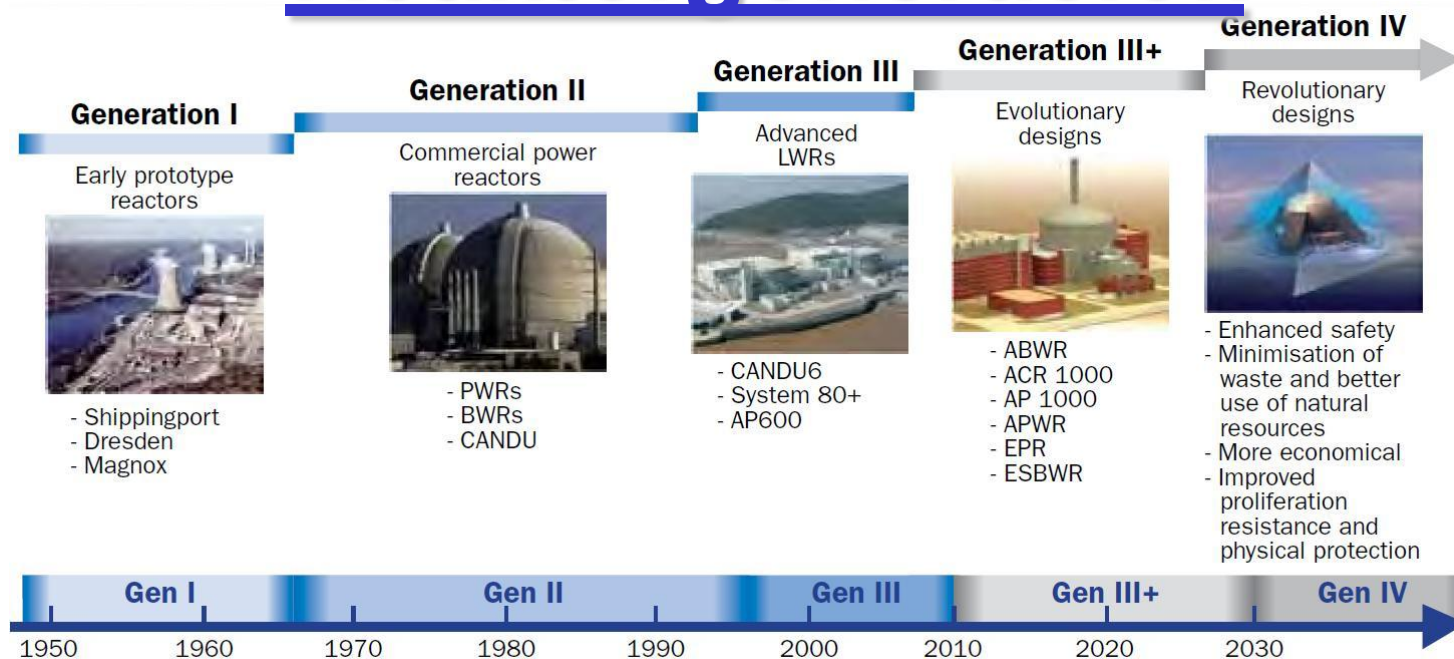


HITACHI



- A **balti** vezetők közös atomerőművet akarnak
 - **észt, lett, litván** miniszterelnök **sürgeti** az építést
 - a térség áramimport- és orosz gáz függő
 - GE Hitachi, 1350 MW, ABWR (továbbfejlesztett forralóvízes)
 - a litván Visaginas telephelyen épül,
 - a szállító részt vesz a finanszírozásban,
 - **koncessziós megállapodás** márciusban aláírva
 - építést ~2014-ben kezdik, a blokk 2020-2021 körül indul,
 - további nemzetközi kapcsolódások
 - **EU** csatlakozás feltételeként Litvánia leállította két RBMK reaktorát, számára pénzügyi támogatást helyeztek kilátásba leszerelésre, pótlásra
 - **a lengyelek** a projektből 2011-ben kiszálltak (van visszaútjuk)
 - **az oroszok** már javában építik a litván határnál (Kalinyingrád) saját, 2017-ben induló, zömmel áramexportra szánt Balti Atomerőművüket.

Reaktorgenerációk



I.: 1970-es évek előtt, természetes uránnal működő reaktorok.

II.: A 70-es évektől kifejlesztett könnyűvízes reaktortípusok, **jelenleg** is alkalmazzuk őket. Zömük 2015-2030-ra tölti ki tervezett élettartamát.

III-III+: A jelenlegi reaktortípusok optimalizálása biztonsági és gazdaságossági szempontok szerint.

Készek a kereskedelmi forgalomra, **a piacon ezeket kínálják**

IV.: Jelenleg **fejlesztés alatt**, 6 fő típus vizsgálata nemzetközi projekteken. Céljuk fenntartható energiaforrás biztosítása (villamos- és hőtermelés, tengervíz sótelenítés), illetve a **hidrogéntermelés**.

A generációk jellemzői

- **Gen I**
 - korai prototípus reaktorok, már nem működnek
- **Gen II** Paks 1-4 is ilyen
 - a kilencvenes évekig épült kereskedelmi reaktorok
 - PWR/VVER, CANDU, BWR, AGR
 - megalapozott teljesítmény növelések (5-15%)
 - tervezett üzemidejük 30-40 év, meghosszabbítható (pl. +20 év)
- **Gen II+**
 - 2000 utáni modernizált Gen II reaktorokra (pl. kínai CPR-1000), melyek a drágább Gen III reaktorokkal versenyeznek,
 - a modernizációval javultak a biztonsági paraméterek és nőtt a tervezett élettartam (50-60 évre),
 - vitatható, hogy ide sorolhatók-e az évekre leállított majd újra kezdett beruházások kissé feljavított blokkjai (pl. Mochovce 3-4, VVER-440, Cernavoda 3-4, CANDU-6)

A generációk jellemzői

• Gen III

Legalább ilyen lesz a paksi bővítés!

– biztonság evolúciója (TMI, Csernobil és Fukushima tanulságai)

Nem utólagos intézkedés, már az eredeti tervekben!

- biztonsági rendszerek 300-400% tartalékolással,
 - redundáns (többszörös), diverz, fizikailag szeparált kialakítás,
 - passzív biztonsági rendszerek hányadának növekedése,
 - alacsonyabb zónaolvadási valószínűség,
 - súlyos baleset megelőzés, mérséklés eszközei a tervben,
 - külső hatások elleni fokozott védelem, hosszabb autonóm üzem.
- további javulás műszaki és gazdasági paraméterekben
- továbbfejlesztett üzemanyag-technológia,
 - kiváló termikus hatásfok,
 - szabványosított tervezés, kevesebb berendezés ,
 - kisebb karbantartási igények, könnyebb karbantarthatóság,
 - korszerű digitális irányítástechnika, ember-gép kapcsolat,
 - nagyobb egységteljesítmény (méretgazdaságosság),
 - gyorsabb, olcsóbb, korszerű építés, modulós szerelés.

• Gen III+

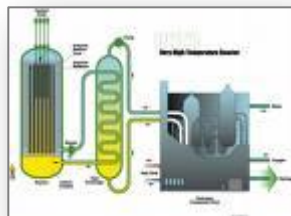
– jelentős továbblépések a biztonságban, gazdaságosságban

A generációk jellemzői

• Gen IV

– a korábbiak mellett minőségileg új célok:

- Még tovább javítani a nukleáris biztonságot
- „inherens” biztonsági megoldások (a fizikai elv védjen),
- fokozottan óvni az atomfegyver készítésére alkalmas anyagokat, technológiákat (atomsorompó),
- minimalizálni a radioaktív hulladékokat, hosszú felezési idejű izotópokat
- jobban kihasználni a természeti erőforrásokat (pl. természetes urán),
- érezhetően csökkenteni az építési költségeket,
- minél olcsóbban üzemeltetni,
- kiterjeszteni a nukleáris energia felhasználását (magas hőmérsékletű ipari hő, hidrogén/metán/etanol fejlesztése közlekedés és mezőgazdaság számára stb.)



Néhány Gen III típus

- AES-2006** VVER-1000 utód (Gidropress-Atomenergoprojekt, orosz)
- AP1000** Advanced Pressurized Water Reactor (Westinghouse, USA)
- APR-1400** Advanced Pressurized Reactor (KEPCO, délkoreai)
- APWR1700** Advanced Pressurized Water Reactor (Mitsubishi, japán)
- ATMEA1** G3+ Pressurized Water Reactor (AREVA+Mitsubishi)
- CPR-1000** Improved Chinese PWR (CNPEC, kínai)
- EPR** European Pressurized Water Reactor (AREVA, francia-német)

- ABWR** Advanced Boiling Water Reactor (GE-Toshiba, amerikai-japán)
- ESBWR** Economic Simplified Boiling Water Reactor (GE, amerikai)
- SWR-1000** Siedewasser Reactor (AREVA+Siemens, német-francia)

- ACR-700,-1000** Advanced CANDU Reactors (AECL, kanadai)
- GT-MHR** Gas Turbine Modular Helium Reactor (GA, amerikai)
- PBMR** Pebble Bed Modular Reactor (Eskom, amerikai-délafrikai)

nyomottvízes

forraló

egyéb

Új hazai blokk előfeltétele, időskála

parlament

kormány

minisztérium



Atomtörvény 7. § (2) Új nukleáris létesítmény és radioaktív hulladéktároló létesítését előkészítő tevékenység megkezdéséhez, illetőleg meglévő atomerőmű **további atomreaktort tartalmazó egységgel való bővítéséhez** az **Országgyűlés előzetes, elvi hozzájárulása szükséges.**

2009. március 30. - Az országgyűlés **330 igen, 6 nem és 10 tartózkodás** mellett **megadta az elvi hozzájárulást** a paksi atomerőmű telephelyén, új atomerőművi blokk vagy blokkok létesítésének előkészítését szolgáló tevékenység megkezdéséhez.



Teller

Lévai

MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő ZRt.

Paks-5

Paks-6

2007 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

évek

tanulmányok

engedélyek

tender

tervezés

építés

szereelés

üzembe
helyezés

Lehetséges típusok

AES-2006 (MIR-1200)

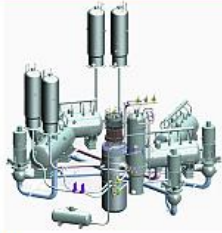
• Ma ajánlható 1200 MW-os VVER típus 

• Előnyök

- ismert technológia (hagyomány, tudás),
- jól illik a hazai hálózatba.

• Hátrányok

- MOX üzemanyag használata még nincs
- lassú (1500 ford/perc) turbina fejlesztés alatt.



APR1400

| 1970- | 1980- | 1990- | 2000- |
|---------|--------------|-------------|------------------|
| indulás | tudásgyűjtés | önállósodás | kitörés a piacra |

Westinghouse
CE Sytem 80+

Korean Standard NPP
KSNP, KSNP+

Optimized Power Reactor
OPR1000

Advanced Power Reactor
APR1400



AP1000

• Inkább innovatív, mint evolúciós terv 

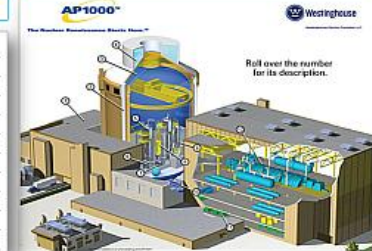
• Egyszerű, szabványos, passzív

• Előnyök

- jó ár, rövid építési idő,
- US NRC engedély,
- jól illeszthető hálózatba

• Hátrányok

- nincs 50 Hz-es turbina
- kampányhossz < 24 hó

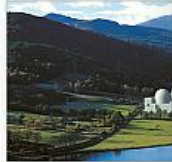


ATMEA1

• Közeljövő technológiája, 1000-



50-50% vegyesvállalat megbízható, közepes méretű G3+ atomerőmű szállítására



• Előnyök

- bevált megoldások,
- evolúciós konstrukció,
- jól illeszthető a hazai hálózatba.

• Hátrányok

- műszaki terv csak 2009 októberre készült,
- nincs még sehol engedélyezve.

• Hátrányok

- nem EU/euro-atlanti
- olvadécsapda: nincs,
- repülő rázuhanásra nem

EPR

goldások ötvöze 
n sikeres 2G+ típus szintézise

(1300 MW, Framatome)

2, Civaux 1-2

- Konvoi (1300 MW, Siemens)
= Neckar 2, Emsland, Isar 2



• 1600 MW

• Előnyök

- engedélyezett,
- épülő típus,
- fajlagosan olcsó

• Hátrányok

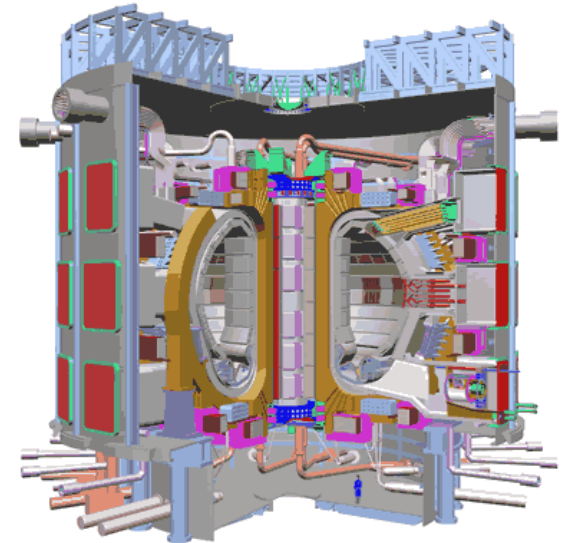
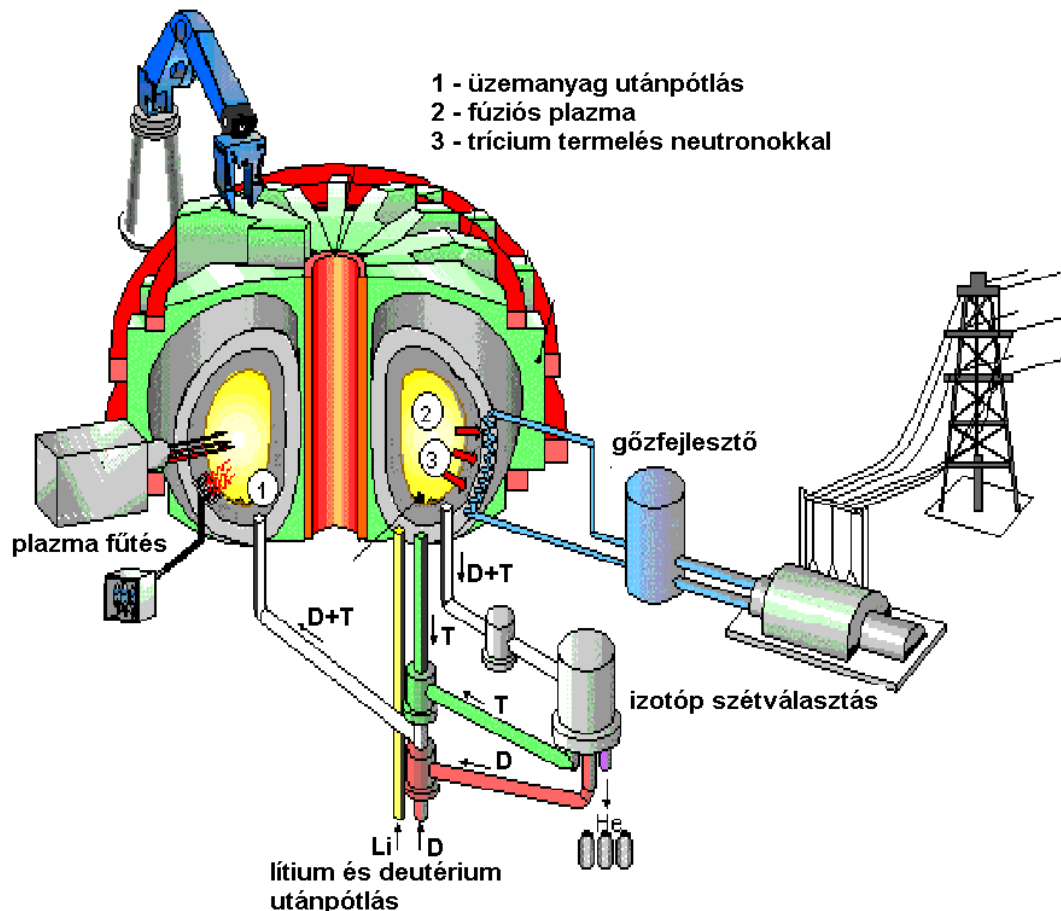
- nagy blokkméret a mai hazai hálózathoz
- nagy beruházási költség

Fúziós erőművek?

Az atomenergia felszabadításának másik útja: a magfúzió



Csak igen magas hőmérsékleten lehet megvalósítani (10-100 millió fok!) → az anyag plazma állapotban



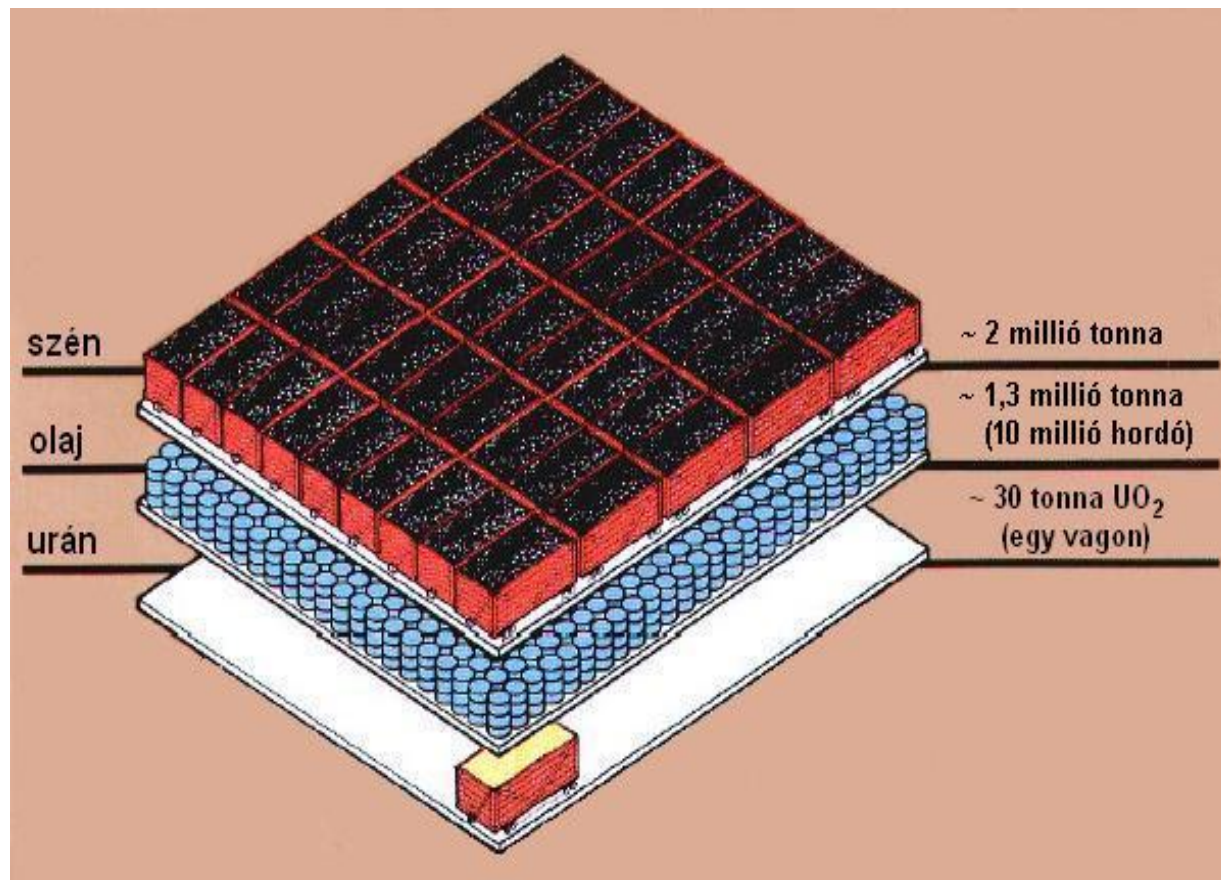
ITER –Cadarache (F)
Még csak kísérlet lesz,
energiát nem termel!
2030 előtt nem várható
energiatermelő erőmű

Atomenergia, de miért?

1) **Sűrű** energia: maghasadáskor sokmilliószor annyi energia szabadul fel, mint a szén, olaj, vagy földgáz elégetésekor

Következmények:

- a) **Bányászat olcsó, kisebb kockázatú**
- b) **Szállítás olcsó**
- c) **Nagy tartalék készletek halmozhatók fel: független energia ellátás**
- d) **Hulladék kisebb mennyiségű**

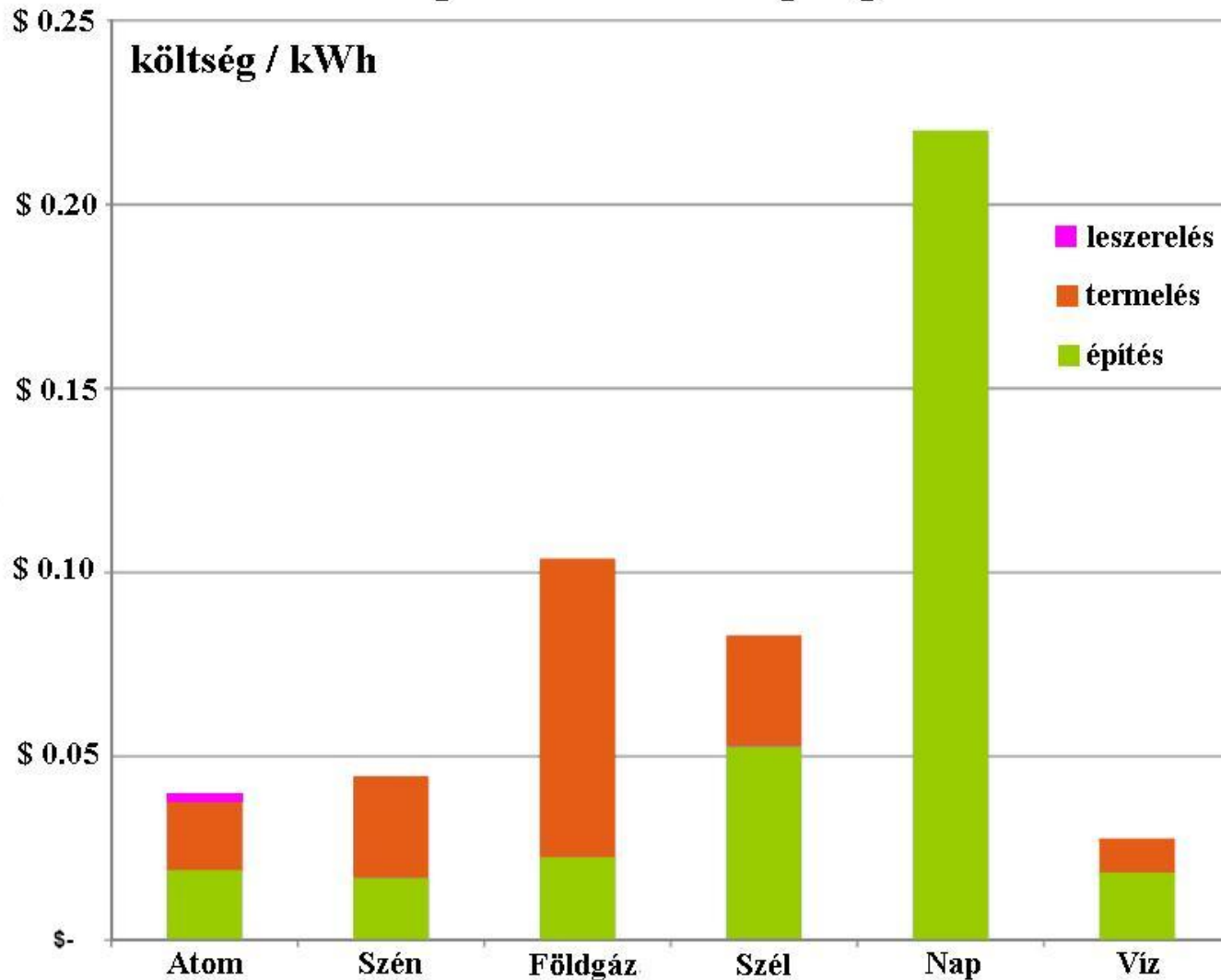


Atomenergia, de miért? (folyt.)

- 2) **Környezetbarát**: atomerőművekben nem keletkezik üvegházhatást okozó gáz (széndioxid, füstgázok).
Kyotó Egyezmény vállalásainak teljesítésében az atomerőműveknek nagy szerep juthat(na)
- 3) **Földrajzi** adottságoktól függetlenül telepíthető:
pl. vízerőmű, szélerőmű, napenergiával működő erőmű
nem ilyen
- 4) Pillanatnyi **klimatikus** hatásoktól függetlenül működik:
Alaperőműként üzemeltethető.
pl. szélerőmű, napenergiával működő erőmű nem ilyen
- 5) **Olcsó**: az összes többi energiatermelési móddal összehasonlítva az egyik legolcsóbb
(a széntüzelésű erőművek ill. a vízerőművek ilyen olcsók még)

A villamosenergia árának összetevői

Villamosenergia termelés költségmegoszlása kWh-ként



<http://nuclearfissionary.com/wp-content/uploads/2010/04/total-cost-electricity-production-per-kwh.jpg>

A napenergia ára

Mennyibe kerülne naperőművel előállítani a Paksi Atomerőmű által előállított energiát?

Paksi adatok:

Teljesítmény: 2000 MWe,
Éves energia: 15685 GWh/év
Kihasználtság: 89,5%

Naperőmű adatok (sajtóból):

Újszilvás:

Teljesítmény: 0,4 MWe,
Éves energia: 0,63 GWh/év
Létesítési költség: 618,5 MFt



A **TELJESÍTMÉNY** kiváltására $2000 \text{ MW} / 0,4 \text{ MW} = 5000 \text{ db}$ ilyen (újszilvási) erőművet kellene építeni.

Ennek költsége $5000 * 618,5 \text{ MFt} = 3093 \text{ milliárd Ft.}$

A napenergia ára (folyt.)

Újszilvás éves energiatermelése: 630 000 kWh = 0,63 GWh

Paks által évente megtermelt **ENERGIA**: 15685 GWh.

Ha tehát a blokkok által megtermelt **ENERGIÁT** szeretnénk kiváltani, akkor $15685 / 0,63 = 24897$ db ilyen naperőművet kellene építeni, és ennek az építési költsége **15400 milliárd Ft** lenne!

Mitől van ez a nagy különbség? A naperőmű nem mindig termel!!

Időbeli kihasználtság: $\frac{630000\text{kWh}}{400\text{kW}} = 1575\text{h}$ Egy évben van

$365 \cdot 24 = 8760$ h, tehát a kihasználtság: $\frac{1575}{8760} = 0,18$, azaz **18% !!**

A naperőmű működése során megtermelt **energia 82%-át el kellene tárolni** arra az időre, amikor nem működik! A tárolás költsége még nincs benne a 15400 milliárd Ft-ban!

Különböző becslések szerint a Paksi Atomerőmű 2000 MW-os teljesítményének majdani pótlását biztosító **két új blokk** létesítési költsége 3000-5000 milliárd Ft közé esik. Sok? És az ugyanennyi energiát termelő naperőmű létesítése?

A napenergia ára (folyt.)

Újszilvás éves energiatermelése: 630 000 kWh = 0,63 GWh

Paks által évente megtermelt **ENERGIA**: 15685 GWh.

Ha tehát a blokkok által megtermelt **ENERGIÁT** szeretnénk kiváltani, akkor $15685 / 0,63 = 24897$ db ilyen naperőművet kellene építeni, és ennek az építési költsége **15400 milliárd Ft** lenne!

Mitől van ez a nagy különbség? A naperőmű nem mindig termel!!

Időbeli kihasználtság: $\frac{630000\text{kWh}}{400\text{kW}} = 1575\text{h}$ Egy évben van

$365 \cdot 24 = 8760$ h, tehát a kihasználtság: $\frac{1575}{8760} = 0,18$, azaz **18% !!**

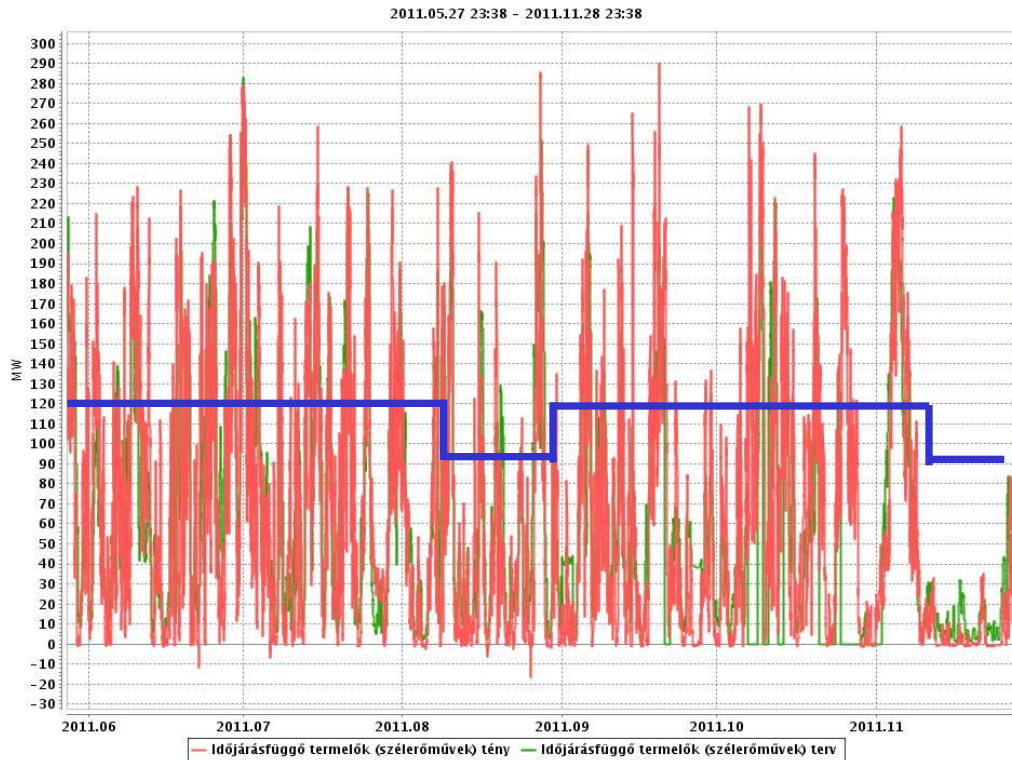
A naperőmű működése során megtermelt **energia 82%-át el kellene tárolni** arra az időre, amikor nem működik! A tárolás költsége még nincs benne a 15400 milliárd Ft-ban!

Különböző becslések szerint a Paksi Atomerőmű 2000 MW-os teljesítményének majdani pótlását biztosító **két új blokk** létesítési költsége 3000-4000 milliárd Ft közé esik. Sok? És az ugyanennyi energiát termelő naperőmű létesítése?

A szélenergia ára

Már vannak szélerőműveink, le tudunk vonni következtetéseket!

Mosonszolnok szélerőmű-park: 52 GWh/év, 9 Mrd Ft létesítés
Paks: 15685 GWh/év ~ 300 ilyen szélerőmű-park. ~ 2700 Mrd Ft



Szélerőműveink teljesítménye
2011.05.27 - 2011.11.28

(Átlagos kihasználás: 26,4 %)

**a Paksi Atomerőmű
teljesítménye
(„alaperőmű”)**

Forrás: <http://www.mavir.hu/web/mavir/szeltermeles>

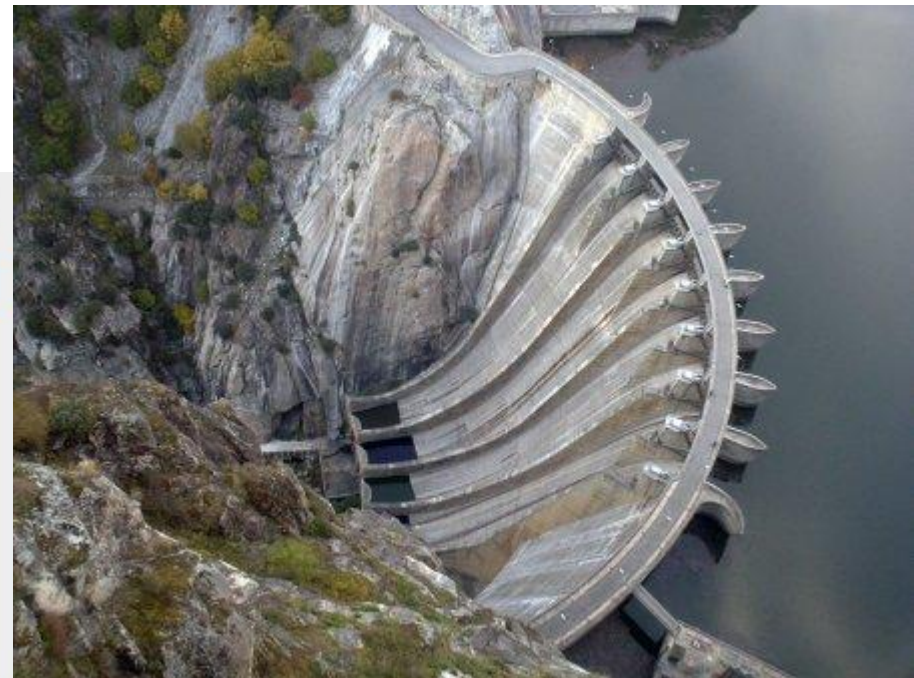
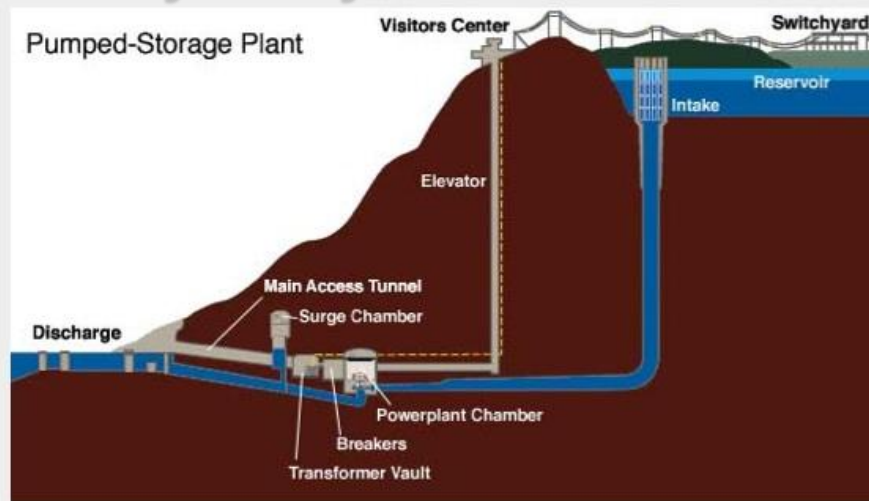
**Szélenergia részarányának lényeges növelése:
csak ENERGIATÁROLÁSSAL!**

Energiatárolás nagy mennyiségben

- Villamos energia formájában nem lehet (akkumulátorok, kémiai)
- Vízenenergia (megvalósítható, jelenleg legolcsóbb)
- Hidrogén-gazdaság (még kutatás alatt áll)

Vízenenergia: **tározós erőmű** (70% visszanyerhető energia)
többlettermelés idején felpumpáljuk a vizet,
hiány esetén leengedjük, áramot fejlesztünk. $E = mgh$

Természeti adottságok kellene!
Magas hegyek, nagy völgyek
Komoly környezeti hatások!



Banqiao (1975) : 171 000 halott, 11 millióan veszítették el hajlékukat

Hidrogén-gazdaság

Elve:

- A többlet energiával hidrogént fejlesztünk: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
- A hidrogéngázt eltároljuk (energia-”**hordozó**”, nem forrás!)
- Amikor szükséges, speciális gázturbinás erőműben elégetjük, villamosenergiát állítunk elő (vagy speciális gázhajtású autókat hajtunk meg vele stb.)

Előnye: nincs üvegház-gáz kibocsátás (csak víz keletkezik)

Hátránya:

- Az elektrolízises hidrogén-fejlesztés hatásfoka nagyon rossz (sok a veszteség)
- **Magas hőmérsékleten** ($>1000 \text{ C}$) katalizátorokkal jobb, de még így sem éri meg villamosenergiát tárolni, legfeljebb az **ipari hőt** hasznosítani.
- A H_2 tárolása gáz formájában veszélyes (robbanásveszély)

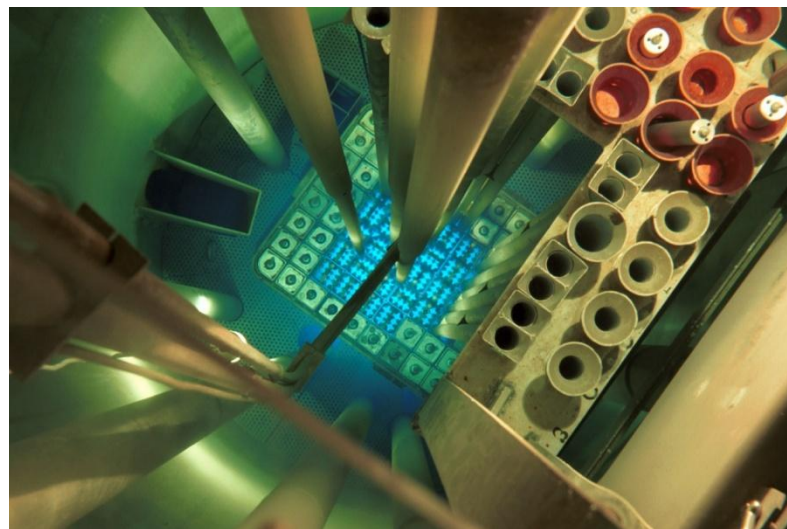


Következtetés: 2000 MW alaperőművi villamosenergia termelést **nem lehet** nap- vagy szélerőművekkel kiváltani!

Új „nukleáris” diplomások iránti igény

- A francia AREVA és EdF, a belga Suez, az amerikai GE és Westinghouse cégek egyenként körülbelül **évi 500-500** új mérnököt terveznek felvenni a következő 10 évben, ami összesen 20-25 000 fő fiatal műszaki szakembert igényel egy évtized alatt!
- Finnországban az új blokk építéséről szóló döntés óta kb. megtízszereződött a nukleáris energetikát tanuló egyetemi hallgatók száma!
- Új blokkok esetleges építése további igénynövekedést okoz!
- Ez igaz Magyarországra is!

Az atomenergiának világméretekben és Magyarországon is világos és biztos jövőképe van, Fukushima ellenére. Érdeemes ebben az irányban továbbtanulni!



„...majdnem mindaz, amit hozzáadtunk az emberek kényelméhez, a felismert fizikai törvények hatására következett be.”

(Wigner Jenő, Nobel-díjas fizikus)

Köszönöm a figyelmet!