

# A nukleáris üzemanyag-kazetták gyártásának technológiai lépései

Kirchkeszner Csaba

Miniszterelnökség, A Paksi Atomerőmű Kapacitásának Fenntartásáért Felelős Államtitkárság  
1055 Budapest, Bihari János utca 5.

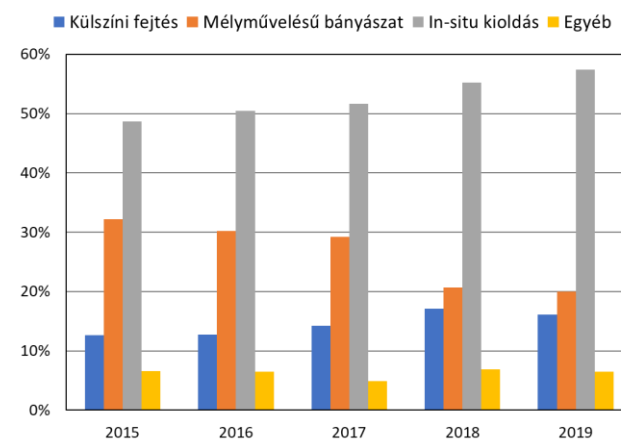
Az atomerőművek jelentős szerepet játszanak a nukleáris technológia békés célú alkalmazásának előmozdításában, valamint az emberiség folyamatosan növekvő villamosenergia-igényének kielégítésében, és a villamos energia tekintetében az ellátásbiztonság megteremtésében. Manapság a nukleáris alapú villamosenergia-termelésben az egyik legnagyobb szerepet a nyomottóizes reaktorttal szerelt atomerőművek kapják, melyek alapvetően uránalapú nukleáris üzemanyagot használnak. A nukleáris üzemanyagciklust vizsgálva általában kevés szó esik annak nyitászakaszáról, ami a biztonságos és békés célú atomenergia alkalmazásának kulcsa. Cikkemben a nukleáris üzemanyagciklusnak az uránkitermeléstől az üzemanyag-kazettáig tartó folyamatát, valamint vegyipari és kohászati sokszínűségét kívánom bemutatni hozzájárulva ezzel ahhoz, hogy részletesebb képet kapjunk a nukleáris üzemanyag-kazetták gyártásáról.

## Az uránbányászattól a sárga pogácsáig

A nukleáris üzemanyagciklus az urántartalmú ércek kitermelésével kezdődik, melynek alapvetően három módja ismert: a mélyművelésű bányászat, a külszíni fejtés és az ún. *in-situ* kioldás, másik nevén fúrólukás perkolációs kioldás. A mélyművelésű bányászat és a külszíni fejtés során kitermelt érceket őrlik, majd az őrleményt hidrometallurgiai eljárásnak (savas vagy lúgos feltárásnak) vetik alá [1,2]. Ezután a szilárd-folyékony kétfázisú rendszert – pl. ülepítéssel – elválasztják egymástól, amikor is a feldolgozás szempontjából értékes urántartalmú vegyületek a folyadékfázisban dúsulnak. A továbbiakban ezt a folyadékfázist tisztítják és urántartalmát dúsítják ioncserés vagy oldószeres extrakciós eljárással [2]. Az ioncserélő oszlopról eluált (leoldott), vagy az oldószeres extrakció során kapott urántartalmú oldatból az uránt túlnyomórészt  $U_3O_8$  tartalmú urán-oxid formájában választják le, mely az  $U_3O_8$  mellett más sztöchiometriai összetételű urán-oxidokat és az anyag jellegzetes színét adó jellemzően uranil- és uranátokat is tartalmaz. Az így kapott anyagot nevezik sárga pogácsának (*yellow cake*) [1].

Évről évre egyre kisebb részarányt képvisel a mélyművelésű és a külszíni fejtésű uránkitermelés, ezek helyét egyre inkább átveszi a fúrólukás perkolációs (*in-situ*) kioldási technológia (1. ábra) [3]. E technológia lényege, hogy az urántartalmú hordozó kőzetbe fúrólukon keresztül oxidáló- és kioldóreagenst injektálnak, majd egy másik fúrólukon keresztül a felszínre hozzák a hordozó kőzetből kinyert urántartalmú oldatot, amit a már korábban ismertetett eljárásoknak vetnek alá. Ezen belül manapság egyre nagyobb az  $O_2$ - $CO_2$  alapú *in-situ* kioldási eljárás térhódítása, melynek lényege, hogy  $O_2$  és  $CO_2$  gázt pumpálnak az urántartalmú homokkőbe, majd az oxigén erős oxidálószerként az urántartalmú kőzetben található négy vegyértékű uránt hat vegyértékű uránra oxidálja, mely a  $CO_2$ - $H_2O$  reakcióban képződő karbonátokkal ( $CO_3^{2-}$ )

és hidrogén-karbonátokkal ( $HCO_3^-$ ) reagálva  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$  vá alakul [4].

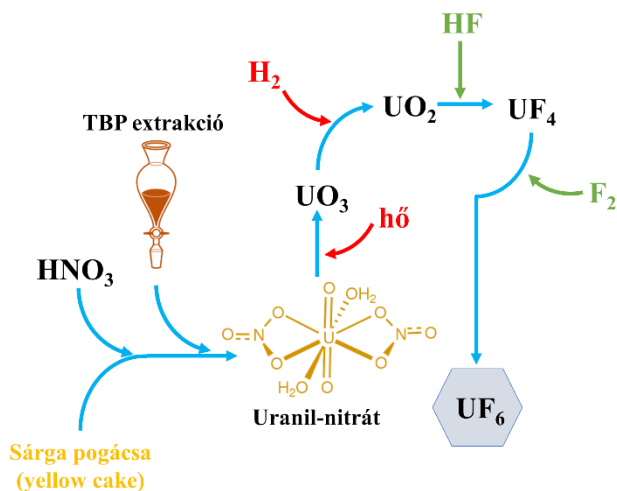


1. ábra: A főbb uránkitermelési technológiák alakulása a világban 2015 és 2019 között [3]

## Hogyan lesz a sárga pogácsából urán-hexafluorid a konverzió során?

A sárga pogácsa különböző összetételű urán-oxidokat és szennyezőket tartalmaz, tehát nem egykomponensű anyag. Ennél fogva további elválasztási és konverziós műveletekre van szükség, melyeket általában külön konverziós üzemekben hajtanak végre. A konverziós üzemekben a sárga pogácsában található uránvegyületeket (főleg – 60–85 %-ban – oxidokat) salétromsavval reagáltatva vízben jól oldódó uranil-nitráttá ( $UO_2(NO_3)_2$ ) alakítják, majd a reakcióelegyből az uranil-nitrátot tributil-foszfátot (TBP) tartalmazó szerves oldószerrel (például kerozinnal, *n*-hexánnal) nyerik ki (2. ábra) [5]. Az urántartalmú extraktumot töményítik, majd denitrálási lépéssel előállítják az urán-trioxidot ( $UO_3$ ). Az urán-trioxidot hidrogénezési reakcióban urán-dioxidá redukálják kb. 590°C hőmérsékleten, majd az urán-dioxidot hidrogén-fluoriddal (300°C hőmérsékleten) reagáltatva kapják az urán-

tetrafluoridot ( $\text{UF}_4$ ). Azonban az urán-tetrafluorid további fluorozására van szükség, amihez már a hidrogén-fluoridnál agresszívebb fluorozószer szükséges, ami maga a fluor. Az  $\text{UF}_4$  direkt fluorozásával (kb.  $1600^\circ\text{C}$  hőmérsékleten) urán-hexafluoridot ( $\text{UF}_6$ ) kapunk [5]. Az előállított  $\text{UF}_6$  gáz halmazállapotú, így ezt egy hűtőrendszeren átvezetik, aminek hatására az  $\text{UF}_6$  szilárd formában kicsapódik. Így az urán-hexafluoridot megfelelő - jellemzően rozsdamentes acél - tartályokban, szilárd halmazállapotú anyagként a légköri nyomásnál alacsonyabb nyomáson szállítják az urándúsító üzembe.



2. ábra: Az  $\text{U}_3\text{O}_8 \rightarrow \text{UF}_6$  konverzió sematikus folyamatábrája

Felmerül a kérdés, hogy miért urán-hexafluoridot állítunk elő, miközben ez a vegyület sem fizikai-kémiai tulajdonságait tekintve, sem technológiai szempontból nem mondható „barátságos” vegyületnek, hiszen rendkívül mérgező és nagyon korrozív anyag. Azonban van két jó tulajdonsága. Az egyik, hogy szűk hőmérséklettartományon belül transzformálható az egyik halmazállapotból a másikba, mivel légköri nyomáson, könnyen gázzá alakítható, ha hőmérsékletét  $56,4^\circ\text{C}$  fölé emeljük [5], és folyadékká alakítható  $1,5$  bar nyomáson és  $64^\circ\text{C}$

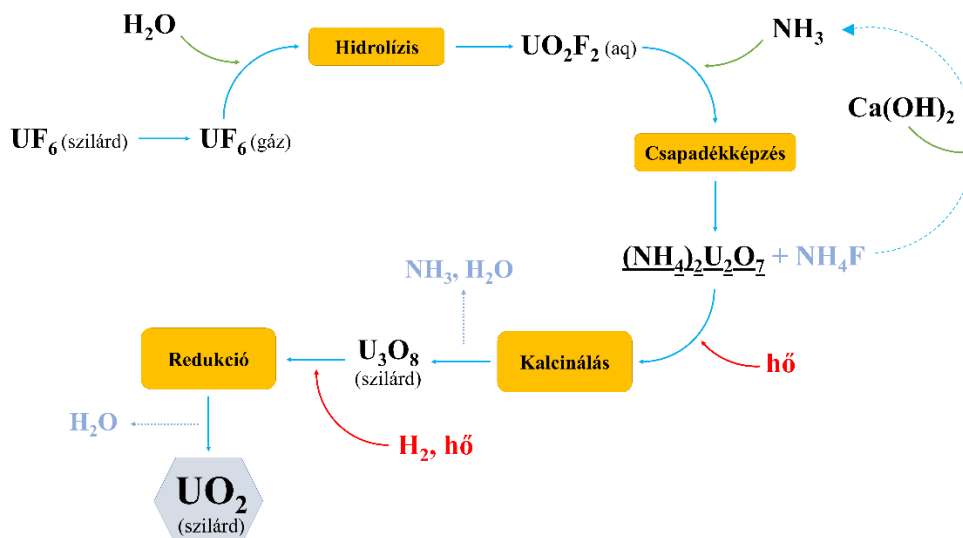
hőmérsékleten. Szobahőmérsékleten és légköri nyomáson pedig szilárd halmazállapotú. A másik nagy előnye, - aminek az urándúsítás szempontjából van jelentősége ( $^{235}\text{U}^{19}\text{F}$  és  $^{238}\text{U}^{19}\text{F}$ ) [6] - hogy a fluornak csak egy stabil izotópjá ( $^{19}\text{F}$ ) van a természetben.

## Urándúsítás

A természetben előforduló urán  $^{235}\text{U}$ -tartalma mindösszesen kb.  $0,7\%$ , azonban a napjainkban elterjedt nyomott könnyűvízes reaktorral szerelt atomerőművek üzemeltetéséhez jellemzően  $4-5\%$ -os dúsítású  $\text{UO}_2$ -ra van szükség. Tehát a nukleáris üzemanyagciklus konverziót követő jelentős és meghatározó lépése az urándúsítás, melynek során növelik az  $\text{UF}_6$ -ban található  $^{235}\text{U}$  izotóp koncentrációját. Az 1940-es évektől kezdődően napjainkig számos urándúsítási technológiát dolgoztak ki. Mivel az uránizotópok kémiaiailag azonosan viselkednek, ezért dúsításuk főleg az eltérő tömegük alapján történik. Három főbb dúsítási eljárást különböztetünk meg: a gázdifúziós, a gázcentrifugás és a lézeres eljárást [7].

Napjainkban ipari méretekben majdnem kizárólag a gázcentrifugás dúsítást alkalmazzák, melynek lényege, hogy a konverzió során előállított  $\text{UF}_6$ -ot egy szilárd-gáz fázisátalakítási műveletet követően gázként bevezetik egy meghatározott szögsebességgel forgó gáztömör hengerbe [6,7,8]. Az elválasztás színteréül szolgáló centrifugában a  $^{238}\text{U}$  izotópot tartalmazó  $\text{UF}_6$  molekulákra nagyobb centrifugális erő hat, így azok a gázcentrifuga hengeresen testének szélén, míg az  $^{235}\text{U}$  izotópot tartalmazó  $\text{UF}_6$  molekulák a henger középvonalában dúsulnak fel. A dúsítás hatásfokának növelésére több ezer centrifugát kapcsolnak össze recirkulációs kaszkádba [7,8]. A gázcentrifugás eljárás nagymértékű térhódításának oka, hogy a gázdifúziós eljárással szemben jóval kisebb az energiaigénye, továbbá kisebb léptékben is gazdaságos.

A nukleáris proliferáció (nem békés célú felhasználás) elleni küzdelemben az urándúsítás igen nagy hangsúlyt kap, hiszen egy igen érzékeny eljárásról van szó, ezért szigorú nemzetközi felügyelet alatt igyekeznek tartani.



3. ábra: Az urán-hexafluorid - urán-dioxid rekonverzió sematikus folyamatábrája

## Urán-dioxid előállítás urán-hexafluoridból (rekonverzió)

A dúsítást követően a dúsított urán-hexafluoridot kémiai úton vissza kell alakítani urán-dioxiddá. Ezt a lépést nevezik rekonverzióknak (3. ábra). Alapvetően két rekonverziós eljárást különböztetnek el: a nedves és a száraz rekonverziót [6]. Mivel a nedves rekonverzió az elterjedtebb, ezért jelen cikkben ezt a technológiát ismertetem. Ennek lényege, hogy a dúsított  $UF_6$ -ot hidrolízissel uranyl-fluoriddá ( $UO_2F_2$ ) alakítják, majd az uranyl-fluoridot ammónia hozzáadásával vízben rosszul oldódó csapadékká alakítják, ami aztán a reakcióközegetől könnyen – szűrővel – elválasztható [6]. Az orosz technológia során ez a csapadék az ammónium-diuranát (ADU,  $(NH_4)_2U_2O_7$ ), míg a nyugati rekonverziós technológiák esetén az ammónium-uranyl-karbonát (AUC,  $UO_2CO_3 \cdot 2(NH_4)_2CO_3$ ) [6,7]. Ennek megfelelően az orosz rekonverziós technológiát ADU-nak, míg a nyugati AUC-nak nevezik. A leszűrt csapadékot mossák, majd szárítják. Ezt követi az ADU vagy AUC csapadék magas hőmérsékleten történő égetése (kalcinálása), melynek során az  $U_3O_8$  képződik [6,8]. A kalcinálást követően az  $U_3O_8$ -ot magas hőmérsékleten hidrogénnel redukálják, aminek eredményeként előáll az  $UO_2$  [6,9]. A rekonverzió során kapott urán-dioxid szolgál a nukleáris üzemanyag-pasztillák alapjául.

## Nukleáris üzemanyag-pasztilla gyártása

A nukleáris üzemanyag-pasztillák gyártása alapvetően három fő technológiai lépést: a porkészítést, a formára sajtolást és a szinterelést foglalja magában, melyeket részletesebben a következőkben mutatom be [6].

### Porkészítés

A rekonverzió során előállított por igen kedvezőtlen porreológiai tulajdonságokkal rendelkezik, vagyis a folyási tulajdonságai nem megfelelőek, így tömöríthetősége is kicsi. Ezért ezt a porreológiai tulajdonságok javítása érdekében homogenizálják, granulálják, majd a kompaktálás előtt kenőanyagokat adnak hozzá [6,12].

### Formára sajtolás

A formára sajtolás során hidraulikus vagy mechanikus prések segítségével a pasztillához közeli formára sajtolják a port, vagyis előállítják az ún. zöld pasztillákat (*green pellets*). Az egyenletes sűrűség biztosítása érdekében a préselés kétoldaltól történik. A zöld pasztillák sűrűsége ekkor 5,5–6,0 g/cm<sup>3</sup> [6]. A homogén keverék előállítását alapvetően befolyásolja a végtermék minőségét.

### Szinterelés

A formára sajtolás után következik a zöld pasztillák szinterelése. A szinterelés (lényegében véve kerámiaégetés) egy olyan hőkezelési eljárás, melyet a főkomponens olvadáspontjánál kisebb hőmérsékleten végeznek, és melynek során az egymáshoz préselt porszemcsék a részecskék diffúziója (vándorlása) révén „összeragadnak”, vagyis porból szilárd anyaggá, szilárd pasztillává válnak [12]. A zöld pasztillák szinterelését folyamatos üzemű kemencében 1700 °C hőmérsékleten végzik redukáló (pl. hidrogén-nitrogén tartalmú) atmoszférában [6]. A

szinterelést követően a pasztilla nem teljesen szabályos hengeres alakú. A pasztilla hengeres profiljának kialakítása csiszolással történik.

Az üzemanyagpasztilla-gyártósor végén a gyártott pasztillák minőségét roncsolásmentes és roncsolásos eljárásokkal ellenőrzik. A roncsolásmentes vizsgálatok során főleg a pasztilla sűrűségét és geometriai paramétereit (jellemzően az átmérőjét) mérik, míg a roncsolásos eljárások során kémiai összetételét, homogenitását és szennyezőanyag-tartalmát vizsgálják.

## Üzemanyag-pálcák szerkezeti anyagainak gyártása

A nukleáris üzemanyag-pálcák anyagaként cirkóniumötvözeteket használnak, mivel ezeknek kicsi a termikusneutron-befogási hatáskeresztmetszete, valamint megfelelő mechanikai és korróziós tulajdonságokkal rendelkeznek. A cirkónium pálcaburkolatként történő alkalmazásával kapcsolatban figyelembe kell venni, hogy a cirkónium és a víz között lejátszódó reakció a hőmérséklet emelkedésével meghatározóvá válik, 1200 °C felett jelentősen felgyorsul nagymértékű hidrogéngáz- és hőfelszabadulás közben.

A cirkóniumot cirkonhomokból állítják elő, azonban a cirkonhomok nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkező hafniumot tartalmaz, ezért a cirkónium előállítását előtt a cirkonhomoktól a hafniumot – és az egyéb szennyezőket (pl. szilícium-tartalmú vegyületek) el kell választani [6, 13]. Ezt úgy végzik, hogy a cirkonhomokot nátrium-hidroxid-oldatban szuszpendálják, majd a szilikátok salétromsavval történő savanyítás hatására kavasavként kiválnak az oldatból. Ezután a szilikátoktól már megtisztított oldathoz tributil-foszfátot (TBP) és megfelelő szerves oldószert (pl. *n*-hexánt) adnak. Ennek hatására az eredetileg vizes oldatban található hafnium komplex vegyületet képez a TBP-vel, s a szerves oldószeres fázisba átoldódik. Így a visszamaradó vizes oldat már gyakorlatilag nem tartalmaz hafniumot. A cirkónium(IV)-nitráttartalmú vizes oldatból ammónia vizes oldatával csapadékként leválasztható a cirkónium(IV)-hidroxid, amit mosás és szárítás után magas hőmérsékleten kalcinálnak (kiégetik), így kapják a hafniummentes cirkónium-dioxidot. Ebből megfelelő kémiai reakcióval előállítható a cirkónium(IV)-klorid, majd ennek fémmagnéziummal történő redukációjával (ez az ún. *Kroll*-redukció), és megfelelő szeparációs műveletek elvégzése után áll elő a cirkóniumszivacs [6, 13].

A nukleáris célokra használt cirkóniumötvözetek tipikus összetétele több mint 95 m/m% cirkóniumot és kevesebb, mint 2 m/m% ónt, nióbiiumot, vasat, krómot, nikkelt és más fémeket tartalmaz, amelyeket a mechanikai tulajdonságok és a korrózióállóság javítása érdekében adnak hozzá [6].

A nukleáris minőségű cirkóniumötvözetek előállítását követően következik a megfelelő fémalkatrészek gyártása (pl. üzemanyag-pálca, pálcák záróelemei, távtartórácsok). Mivel az üzemanyag-pálca maga a második mérnöki gát, ezért nagyon fontos a pálcák szerkezeti integritása. A pálcagyártás legfontosabb műveletei a hidegalakítás, a hőkezelés és a felületkezelés [6]. A gyártás és a minőségellenőrzés során figyelembe kell venni, hogy a pálcák korrozív, magas hőmérsékletű, nagy nyomású és

erősen radioaktív környezetnek vannak kitéve, ezért fontos, hogy maguk a pálcák, a záróelemek és az egyéb szerkezeti elemek úgy készüljenek, hogy képesek legyenek a legnagyobb szerkezeti integritást biztosítani az üzemközben uralkodó környezeti körülményekkel szemben.

## Nukleáris üzemanyag-pálcák összeszerelése

A következőkben áttekintem a nukleáris üzemanyag-pálcák összeszerelésének lépéseit. Elsőként a cirkóniumötvözetből készült csövekre egy-egy alsó záróelemet hegesztenek (volfrámelektrodás, ellenállás vagy lézerhegesztési eljárással). Ezt követi az egyik végükön záróelemmel ellátott csövek roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálata. A hegesztés során felmerülő hibákat szemrevételezéssel (pl. varrat alaki hibái, felületi hibák), röntgenes (pl. gázzárványok, salakzárványok, fémes zárványok, repedések) és/vagy ultrahangos roncsolásmentes (pl. hossz-és keresztirányú hibák) módszerekkel mutatják ki [14]. A roncsolásos vizsgálatok során ellenőrzik például a szakítószilárdságot és a korróziós tulajdonságokat. Amennyiben a roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatok során mindent rendben találnak, betöltik az üzemanyag-pasztillákat a pálcákba, melyeket a pléumba történő rögzítéshez nikkel-acél rugóval látnak el. Ezt követően a pálcákat inert héliumgázzal töltik fel. A hélium töltőgáz nyomása az atmoszférikus nyomásnál magasabb az üzemanyag-pálcákban azért, hogy a pálcák ellenálljon a primer körben uralkodó nagy nyomásnak. Végül az üzemanyag-pálcákat a felső záródugó beheszesztésével lezárják.

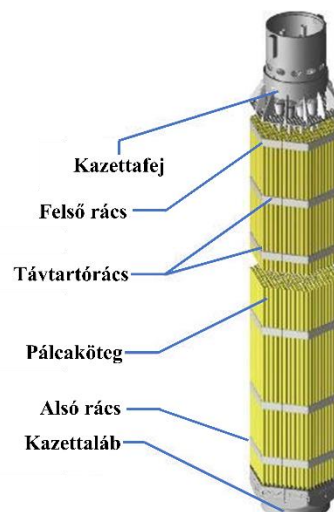
Az elkészült üzemanyag-pálcákat gamma-spektrometriás detektorcellán vezetik át állandó sebességgel. A neutronsugárzó kaliforniumforrásból emittált neutronok az  $^{235}\text{U}$  izotópokat elérve gammafoton-emisszió történik, amit detektálnak [6]. Mivel a pálcák állandó sebességgel halad keresztül detektorcellán, ezért egy folytonos gamma-sugárzási görbét kapunk, ami alkalmas arra, hogy az immár uránpasztillákkal töltött pálcákban lévő inhomogenitásokat (pl. különböző dúsítási fokú pasztilla, a pasztillák közötti rés) detektálják. A gamma-spektrometriás vizsgálatot követően vákuumkamrában elvégzik a gáztömörség-vizsgálatot. Ennek lényege, hogy a pálcát vákuumkamrába helyezik, szivárgás esetén a pálcaburkolatból a töltőgáz (hélium) kiszökik, ami héliumspecifikus gázdetektorokkal (pl. gázkromatográfiásan) detektálható [6].

## Nukleáris üzemanyag-kazetták összeszerelése

Az üzemanyag-pálcák összeszerelését, majd fent ismertetett vizsgálatait a nukleáris üzemanyag-kazetták szerelése követi, melyhez szükség van a kazettát alkotó szerkezeti elemek – például távtartórácsok, vezetősövek, alsó és felső kazettazáróelemek – gyártására (4. ábra). Ezek a szerkezeti elemek is, akárcsak az üzemanyag-pálcák, nukleáris ipari tisztaságú cirkóniumötvözetből készülnek. A kazetták összeszerelése vízszintes profilú összeszerelő padon történik [6]. Elsőként összeszerelik a kazettavázat, melynek fő elemei a távtartórácsok és a vezetősövek. Ezután a nukleáris üzemanyag-pálcákat a kazetta feji végének irányából „átfúzik” a távtartórácsokon. Ez a művelet

történhet géppel és manuálisan is. A művelet nagy energiabefektetést igényel, hiszen a távtartórácsokon történő „átfúzás” során jelentős a súrlódásból származó ellenállási munka [6]. Miután a pálcákat behelyezték a kazettavázba, következik a kazetta alsó és felső végzáróelemeinek felszerelése. Mivel a pálcák kazettába helyezésekor azok burkolata karcolódik – kis mennyiségű mechanikai szennyeződést okozva a pálcaburkolaton –, ezért az ilyen jellegű szennyeződések eltávolítására mechanikai tisztítást (lefúvatást, sótalanított vízzel történő mosást) alkalmaznak.

Miután a nukleáris üzemanyag-kazetta elkészült, az ellenőrzés következik, melynek során vizsgálják a kazetta főbb geometriai paramétereit annak érdekében, hogy majd a reaktorba behelyezve a kazettán belül megfelelő áramlási viszonyok alakulhassanak ki elkerülve ezzel a kazettákon belüli nagy hűtőközeg-hőmérsékletinhomogenitásokat [6]. Ekkor történik meg a szabályzó rudak vezetőcsöveinek ellenőrzése is a vezető csövek átjárhatóságának szempontjából.

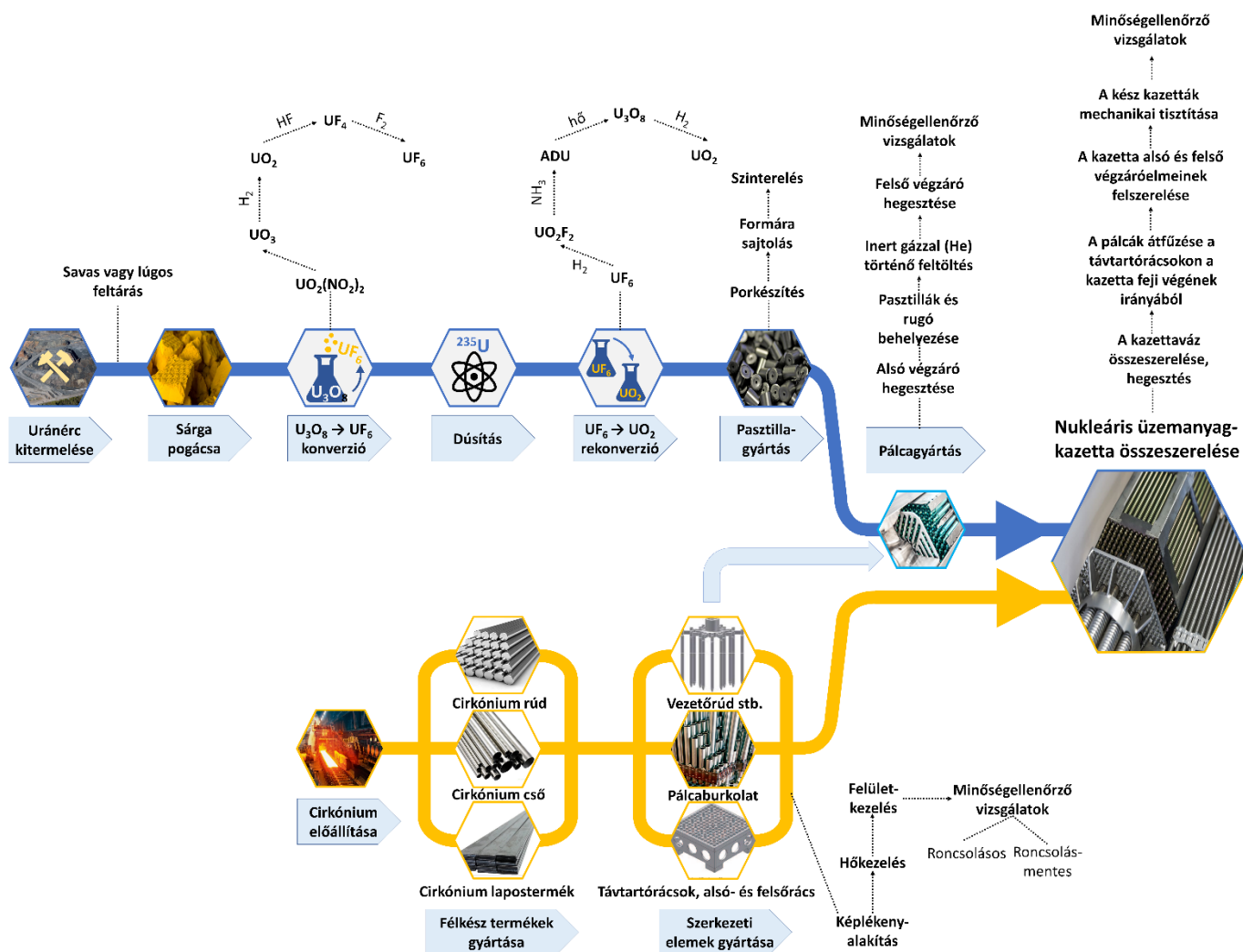


4. ábra: A nukleáris üzemanyag-kazetta felépítése (VVER-1200 kazetta)

A nukleáris üzemanyagciklus nyitászakaszának főbb technológiai folyamatait az 5. ábrán foglaltam össze, mely az uránkitermelésétől, annak feldolgozásán át, az üzemanyag-pasztillák gyártásán keresztül az üzemanyag-kazetták összeszereléséig mutatja a főbb lépéseket.

## Összefoglalás

Összefoglalásként elmondható, hogy a nukleáris üzemanyagciklus nyitászakaszának megfelelő minőségű végigvitele alapvető fontosságú, hisz az annak eredménytermékeként előálló üzemanyag-kazetta a nukleáris biztonság egyik kulcsfontosságú tényezője. A nyitászakasz így magában foglalja az urán kitermelésétől a konverziós, a dúsítási és a rekonverziós technológiai folyamatokon át az üzemanyag-kazetták gyártásának folyamatát. A cikkben bemutatott különféle vegyipari, izotópdúsítási és kohászati technológiák változatos és magas színvonalú sora és megalapozott egymásra épülésük biztosítja a kiváló minőségű üzemanyag-kazetták gyártását, amelyek alapvetően hozzájárulnak a nyomottvízes atomerőművek (pl. a Paksi Atomerőmű) megfelelő minőségű és mennyiségű nukleáris üzemanyaggal történő ellátásához.



5. ábra: A nukleáris üzemanyagciklus nyitószakaszának részletei az uránkitermeléstől az üzemanyag-kazetták gyártásáig

## Irodalomjegyzék

- [1] Zagyvai P., Kókai Zs., Hózer Z., Breitner D., Fábíán M., Török Sz., Börscsök E. (2013): A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai. Magyar Tudományos Akadémia, Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest
- [2] Török T. I. (2006): Kémiai metallurgiai módszerek alkalmazása néhány precipitációs és felülettechnikai rendszerben. PhD disszertáció. Miskolci Egyetem, Miskolc
- [3] Red Book – Uranium Resources, Production and Demand (2020). Nuclear Energy Agency (NEA), International Atomic Energy Agency (IAEA)
- [4] C. R. Edwards, A. J. Oliver (2000): Uranium Processing – A Review of Current Methods and Technology. *JOM*, 52. pp. 12–20.
- [5] Manual on Safe Production, Transport, Handling and Storage of Uranium Hexafluoride (1994). International Atomic Energy Agency (IAEA) Tecdoc-771
- [6] Quality and Reliability Aspects in Nuclear Power Reactor Fuel Engineering (2015). International Atomic Energy Agency (IAEA) NF-G-2.1
- [7] Hadnagy L. (2009): Az urán és energetikai alkalmazásai. NÜO Továbbképzés, Balatonfüred
- [8] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx> (Az utolsó megtekintés időpontja: 2021. november 22.)
- [9] J. B. S. Neto, E. F. U. de Carvalho, R. H. L. Garcia, A. M. Saliba-Silva, H. G. Riella, M. Durazzo (2017): Production of uranium tetrafluoride from the effluent generated in the reconversion via ammonium uranyl carbonate. *Nuclear Engineering and Technology*, 49. pp. 1711–1716.
- [10] S. Manna, P. Karthik, A. Mukherjee, Joydipta B., S. B. Roy, J. B. Joshi (2012): Study of calcinations of ammonium diuranate at different temperatures. *Journal of Nuclear Materials*, 426. pp. 229–232.
- [11] J.A. Seneda, F.F. Figueiredo, A. Abrao, F.M.S. Carvalho, E.U.C. Frajndlich (2001): Recovery of uranium from the filtrate of 'ammonium diuranate' prepared from uranium hexafluoride. *Journal of Alloys and Compounds*, 323–324. pp. 838–841.
- [12] Török T., Ferenczi T., Szirmai G. (2011): Pometallurgia. Poranyagok gyártása és feldolgozása. Nemzeti Tankönyvkiadó és Miskolci Egyetem, Budapest, Miskolc
- [13] L. Xu, Y. Xiao, A. van Sandwijk, Q. Xu, Y. Yang (2015): Production of nuclear grade zirconium: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 466. pp. 21–28.
- [14] [http://www.sze.hu/~hargitai/Anyagvizsgalat%202012/7\\_hegeszthetoseg\\_2012.pdf](http://www.sze.hu/~hargitai/Anyagvizsgalat%202012/7_hegeszthetoseg_2012.pdf) (Megtekintés időpontja: 2021. október 26.)