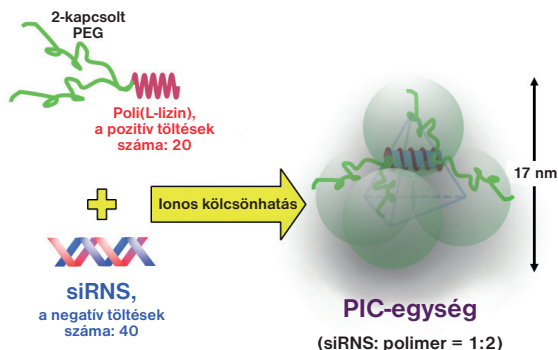


jegyzendő, hogy ezek a PMN-alapú MRI-kontrasztanyagok hasznosak lehetnek abban is, hogy megbecsüljük, mennyire hatékonyak a nanohordozók az egyes betegekben, hiszen a tumorok mikrokörnyezetében (gondoljunk például az ér- és stromális permeabilitásra) különbségek lehetnek. A gyógyszer-célbajuttatás (terápia) és a monitorozás (diagnosztika) kombinációs módszere a „teranosztika”, ami új kutatási terület, és növekvő figyelmet kap [10].

Az is igazott, hogy polimer micellák képződhetnek ionos kölcsönhatás révén is ellentétesen töltött polielektrolitok között, feltéve, hogy legalább a párok egyike blokk-kopolimer, amely töltött vagy nem töltött hidofil szegmensekből áll. Mivel ily módon a micellák polion-komplexált magja el van szigetelve a külső környezettől, a nem töltött hidofil héjjal elkerülhető a polion-komplex további progresszív aggregációja és így kicsapódása. Ezen elgondolás alapján 1995-ben előállítottuk az első monodiszperz polimer micellát, és elneveztük polioionos komplex micellának (PIC) [11]. Említésre méltó ebben az önfelépülő rendszerben a molekuláris felismerés szempontjából, hogy a PIC-micellák ellentétes töltésű, egyelő hosszúságú töltött szegmensekből álló blokk-kopolimerekből történő képződése folyamán szigorú lánc-hossz-felismerés történik [12]. Ez egy új molekuláris felismerési mechanizmusnak a megnyilvánulása, ami a töltött szegmensek micelláris magban való homogén eloszlásának és a külső héj/belső mag érintkezési felület világos fázis elkülönülésének követelményén alapul.

A PIC-micellák azért fontosak a nanomedicinában, mert alkalmassá teszik a „mágikus lövedék” PMN-eket elektromos töltéssel rendelkező biomolekulák, például fehérje- és nukleinsavgyógyszerek szállítására. Ennek lehetőségét az 1990-es évek végétől a 2000-es évek elejéig végzett vizsgálatainkban mutattuk ki [13–17], és a PIC-micellák ma már széleskörűen elfogadottak, mint a nanomedicina számára hasznos nanohordozók. Újabban szigorú részecskekонтроllt dolgoztunk ki a PIC-micellákra, és sikeresen igazítottuk méretüket az antitestekéhez (PIC-egység) (2. ábra) [18]. Az antitestekkel összemérhető méretnek köszönhetően a PIC-egységek könnyen elérhetik a tumor mély részeit, míg a véráramban levő oligonukleotid gyógyszerekkel ismétlődve kötődve és azoktól disszociálva, megvalósul a molekulárisan célba juttatott gyógyszeres kezelése a *makacs* rákok, például a rosszindulatú glioblasztóma (agydaganat) vagy a strómagazdag hasnyálmirigyák esetében. Továbbá a PIC-egység nagy biztonsága és könnyű képződése miatt már elérte a GMP-t (jó gyártási gyakorlat)



**2. ábra. PIC-egység képződése siRNS és 2-kapcsolt PEG-polikation blokk-kopolimer töltés-egyeztetett kölcsönhatásával**

kiegítő gyártási állapotot, és a klinikai tesztek 2019-ben elkezdhethetnek Japánban.

A leírt kutatási eredmények az orvostudományok, a kémia, a gyógyszerészet és a mérnöki tudományok összességén alapuló interdiszciplináris tudományterület, a nanomedicina területére esnek. A gyógyszerfejlesztés növekvően szerteágazó területté válik: a hagyományos kis molekulájú gyógyszerek mellett megjelennek a bioszimiláns gyógyszerek (pl. antitestek, gén- és nukleinsav-gyógyszerek), és sok ilyenre van szükség a bioeloszlás optimalizálása, illetve a célsejt- és szerv-szelektivitás növelése érdekében. Reméljük, hogy az általunk kezdeményezett PMN-ek – molekuláris szerkezetük sokoldalúsága révén – jelentős mértékben hozzájárulhatnak ezen új gyógyszerek alkalmazásához.

**IRODALOM**

[1] Kataoka K. et al.: J. Control Release (1993) 24, 119.  
 [2] Kaaoka K. et al.: Drug Deliv. Rev. (2001) 47, 113.  
 [3] Cabral, H. et al.: Chem. Rev. (2018) 118, 6844.  
 [4] Cabral, H, Kataoka, K.: J. Control. Release (2014) 190, 465.  
 [5] Murakami, M. et al.: Science Translational Medicine (2011) 3, 64ra2.  
 [6] www.nanocarrier.co.jp/en/research/pipeline/index.html  
 [7] Cabral, H. et al.: Nature Nanotech. (2011) 6, 815.  
 [8] Matsumoto, M. et al.: Nature Nanotech. (2016) 11, 533.  
 [9] Mi, P. et al.: Nature Nanotech. (2016) 11, 724.  
 [10] Cabral, H. et al.: Acc. Chem. Res. (2011) 44, 999.  
 [11] Harada, A. et al.: Macromolecules (1995) 18, 5294.  
 [12] Harada, A., Kataoka, K.: Science (1999) 283(5398), 65.  
 [13] Kataoka, K. et al.: Macromolecules (1996) 29, 8556.  
 [14] Katayuse, S., Kataoka, K.: Bioconjugate Chem. (1997) 8, 702.  
 [15] Harada, A., Kataoka, K.: Macromolecules (1998) 31, 288.  
 [16] Oishi, M. et al.: Biomacromolecules (2003) 4, 1426.  
 [17] Katsushima, K. et al.: Nature Commun. (2016) 7, 13616.  
 [18] Watanabe, S. et al.: Nature Commun. (2019) 10, 1894.

## Csak a fúzió termelhet elég energiát<sup>3</sup>

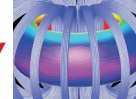
**A** csillagok magjában lejátszódó folyamatok utánzása új, biztonságos és fenntartható energiaforráshoz vezet, amelyből jelentős elektromos energiát nyerhetünk: ennek demonstrálására szerveződött az ITER program.

Akármilyen scenáriókat vetítenek is elének és akármilyen energiatakarékossági intézkedéseket léptetnek is életbe, egy dolog biztos: egyre több „tisza energiát” kell termelnünk a 21. század folyamán, hogy kielégítsük bolygónk szakadatlanul növekvő népességének igényeit. Az évszázad végén, amikor már több mint tíz-

milliárdan élhetnek a Földön, az energiaszükséglet a háromszorosára nő. A világ energiafelhasználásában az elektromos energia mai kb. 20 százalékos részesedése 50 százalékra ugrik. Ennek a szükségletnek a kielégítése az emberiség egyik legfélelmetesebb kihívása.

Nem dúskálunk a lehetőségekben. A fosszilis üzemanyagok égetése, amely lökést adott a 19. századi ipari forradalomnak, és egészen mostanáig megteremtette civilizációnk gazdasági, technológiai és társadalmi fejlődését, ma már bolygónk környezeti és éghajlati egyensúlyát veszélyezteti. A megújuló energiának, bár sok szempontból nagyon vonzó, és támogatni kell az előállítását, természetéből adódó korlátai vannak – különösen azért, mert az energiatermelés nem koncentráldódik és nem folyamatos.

<sup>3</sup> <http://www.lactualitechimique.org/Seule-la-fusion-peut-repondre-au-defi-energetique-l-humanite-affronte>



## Maghasadás

Mi maradt akkor? A nukleáris energia, pontosabban a *maghasadásból* (nukleáris fisszióból) származó energia.

Ma a fissziós erőművekből adódik a világ elektromos energiájának kb. 10 százaléka. (Franciaország a kivételek taborát erősíti: 58 reaktorának köszönhető az ország elektromos energiájának több mint 75 százaléka. Nálunk a Paksi Atomerőmű adja a Magyarországon megtermelt elektromos energia több mint felét, de importra is szorulunk.)

A maghasadás legnagyobb előnye, hogy szén-dioxid vagy más, üvegházhatást okozó gázok termelése nélkül nyújt lehetőséget jelentős energia-alapterhelés kiszolgáltatására. Az az ásványi forrás azonban, amelyen alapszik (az urán), korlátozottan áll rendelkezésre: a mai technológiák mellett két-háromszáz évig lehet elég. Rengeteg kihívással is szembe kell néznünk; a két legfontosabb a biztonság folyamatos növelése és a nukleáris hulladék hosszú távú kezelése. „Hosszú távon” több százézer évet kell értenünk a legkisebb hasadási termékek esetében.

Néhány ország számára a maghasadásból származó energia felhasználása értékes átmeneti megoldás, amely semmiképpen sem lehet hosszú távú. A maghasadáson alapuló energiatermelés – az urándúsítástól az újrafelhasználásig és a hulladéktárolásig – nemcsak tudományos, műszaki szakértelmet és fejlett ipari infrastruktúrát, hanem erős állami intézményeket, független ellenőrzést és tartós politikai stabilitást is igényel. Ma kevés ország rendelkezik ezzel a tőkével vagy kevés képes megfelelő garanciát vállalni az atomerőművek működtetéséért. És hányan állíthatják, hogy évezredekig át fenntartják azt a rendszert, amelyet a hosszú felezési idejű/nagy aktivitású nukleáris hulladék kezelése megkíván?

Szerencsére nem csak maghasadással juthatunk atomenergiához.

## Magfúzió

A maghasadással ellentétben a *fúzióban* könnyű atommagok vesznek részt, és ezek egyesüléséből képződnek a nehezebb atommagok. Maghasadáskor és magfúziókor is sok energia keletkezik; mindkét folyamat látványosan illusztrálja Einstein híres egyenletét:  $E = mc^2$ .

A fúzió a csillagok magjának erőműve: emiatt világít a Nap öt-milliárd éve. Az 1920-as években vetődött fel (Jean Perrin, Arthur Eddington), hogy a csillagok magjában fúzió játszódik le. A következő évtizedekben a hidrogénfúziós folyamatok felismerése és értelmezése (Hans Bethe) vezetett ahhoz a nagy ívű elképzeléshez, hogy ha sikerülne mesterséges fúziós reakciókat létrehozni, akkor új, fenntartható energiaforrás állna rendelkezésre, amellyel sok energiát termelhetnénk (ahogy mondják, lehozhatnánk a Napot a Földre).

A Nap és a csillagok belsejében a gravitációs erők teremtik meg a fúzióhoz szükséges hőmérsékletet és nyomást. Ezt a csillagbéli folyamatot nem tudjuk megvalósítani a Földön. De utánzóhatjuk.

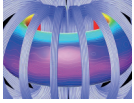
A fizikusok megállapították, hogy egy forró, kis sűrűségű ionizált gázban (plazmában) – amely azonos arányban tartalmazza a hidrogén deutérium- és tríciumizotópját, és amelyet erős mágneses tér tart össze – lejátszódhatnak a fúziós reakciók. A „kis sűrűség” ebben az esetben nagy vákuumot jelent – ez a sűrűség egymilliószor kisebb a Föld légkörének sűrűségénél. A „forró” pedig kb. 150 millió °C-t, ami tízszer melegebb a Nap magjánál. . .

A fúzióknak sok előnye van:

- A fúziós reakció természeténél fogva biztonságos: az olyanfajta balesetek, amelyek egy fissziós erőműben előfordulhatnak – megszaladó láncreakciók, a mag leolvadása stb. – fizikailag lehetetlenek egy fúziós létesítményben.

**Az ITER szíve: balra a tokamak-komplexum (a 3 méter vastag, acélból és betonból készült henger veszi majd körül az ITER-tokamakot); jobbra a működéshez kapcsolódó ipari létesítmények 2018 decemberében** © ITER Organization, <http://www.iter.org/>





- Az üzemanyag lényegében kifogyhatatlan: a deutériumot ki lehet vonni a vízből (kb. minden hatezredik vízmolekulában van deutérium), de a tríciumot „tenyésztani” kell, pl. a fúzióból származó neutronok és lítiummagok reakciójával. Egy 1 GW-os fúziós reaktor esetében (amelynek teljesítménye megegyezik egy átlagos fissziós reaktoréval) csak 100 kg deutériumra és három tonna természetes lítiumra van szükség évi 7 milliárd kilowattóra termeléséhez.
- A környezetre gyakorolt hatás nagyon kicsi: nem keletkezik szén-dioxid és más üvegházhatású gáz.
- Nem keletkezik hosszú élettartamú/nagy aktivitású radioaktív hulladék.

Az 1950-es évek közepén már különböző alakú, méretű és teljesítményű fúziós berendezések – például „pinch” és mágneses tükrös berendezések, sztellarátorok, tokamakok<sup>4</sup> – működtek a Szovjetunióban, az Egyesült Államokban, Nagy-Britanniában, Németországban, Franciaországban és Japánban.

Ugyanebben az évtizedben fellebbent a fátyol a II. világháború előtti fúziós kutatást övező titokról. A Kelet és Nyugat közötti hidegháborús feszültség ellenére a szovjet fúziós fizikusok, akik a terület legjobbjai közé tartoztak, adataik mellett reményeiket és csalódásaikat is megosztották nyugati kollégáikkal. A nemzetközi együttműködés a fúziós kutatás fontos eleme lett, és mindmáig az maradt.

Az elképesztően bonyolult plazmafizikai kutatások és a fúziós berendezések létrehozásával és működtetésével járó műszaki kihívások közben világossá vált, hogy a fúzió használhatóságának demonstrálásához nagyon nagy berendezésre van szükség – akkorára, amelyet egyetlen ország sem képes egyedül megtervezni, megépíteni és működtetni.

Az európai JET (Joint European Torus) volt az első lépés a „nagy berendezés” felé. Ez az óriási tokamak 1983-ban jutott el az első plazmakisülésekhez. 1991-ben a JET már jelentős teljesítményt produkált. Az amerikai Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) is hasonló eredményeket mutatott.

A JET-ben és a TFTR-ben azonban több energia kellett a „fúziós tűz meggyújtásához”, mint amennyit a „tűz” leadott.

## Az ITER

1997-ben a JET már 16 MW-nál járt. Az ipari méretű fúziósenergia-termelés egyre megvalósíthatóbb célnak tűnt, és közben a JET-nél összehasonlíthatatlanul ambiciózusabb projekt körvonalazódott, ezúttal valóban nemzetközi szinten.

Az 1980-as években kezdeményezett ITER – latinul *út* – jelentős politikai és diplomáciai lökést kapott, amikor Ronald Reagan elnök és Mihail Gorbacsov, az SZKP főtitkára 1985-ben először találkozott Genfben, ahol megállapodott a fúziós energia előállítását célzó nemzetközi együttműködés fejlesztésében.

Az ITER, az eddigi legnagyobb tokamak ma már a megvalósulás felé halad. A nemzetközi együttműködésben heten vesznek részt (Kína, EU, India, Japán, Korea, Oroszország, USA). A létesítmény Franciaországban, Aix-en-Provence-től 40 km-re északra épül, és több mint 70 százaléka már elkészült.

Várhatóan 2025-ben állítja elő az első plazmakisüléseket, és 2035-ben indul be a teljes energiatermelés. 15–20 éves működési ideje alatt a projekt feltárja az „égő plazmák” ma még ismeret-

<sup>4</sup> Tokamak: toroidalnaja kamera sz magnytitimi katuskami, tóruszkamra mágneses tekercsekkel.

<sup>5</sup> Vértes Attila (szerk): Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.

## A kémia központi szerepet játszik majd az ITER sikerében

*Bernard Bigot*

Fizikai kémikusi végzettségemnél fogva, a Kémia Háza Alapítvány elnökeként és minden idők legnagyobb és legambiciózusabb energiatermelő projektjének 2015-ben kinevezett főigazgatójaként büszkén jelentem ki, hogy a kémia központi szerepet játszik majd az ITER sikerében. Rendkívül szigorúan szabályozott kémiai folyamatokat kell üzembe helyeznünk a szükséges izotópok szétválasztása és újrafelhasználása, a nagy tisztaságú anyagok és a leghatékonyabb katalizátorok előállítása érdekében. Az ITER követelményei és minőség-ellenőrzési eljárásaink szigorú előírásai elkerülhetetlenül ösztönözni fogják ezt a területet, és nagy lehetőségeket kínálnak mind a kutatás, mind az ipar számára.

len területeit, validálja a fúziós erőmű technológiáinak integrált működését, az új anyagokat, a kísérleti tríciumtenyésztési technológiákat, és „felrajzolja” egy fúziós erőmű biztonsági karakterisztikáit. Az ITER lesz az első fúziós berendezés, amely már valóban energiát termel: 50 MW fűtőteljesítmény betáplálása mellett 500 MW fúziós teljesítményt ad le.

Mivel az ITER tagországai lényegében „természetbeni juttatással” járulnak hozzá a rendszer fejlesztéséhez, az ipar a legkülönbözőbb területeken tehet szert kompetenciára és tapasztalatra: ilyen például a kriogenika, a vákuumtechnológiák, a szupravezetők, az legmodernebb robotika és a távoli kezelés, a teljesítményelektronika, az ultranagy frekvenciás jelátvitel.

Az ITER konstrukciója közben az ITER-tagok már a következő generációs berendezés, a DEMO előkészítésén dolgoznak. Ma még nem tudjuk, hogy a DEMO-t nemzetközi együttműködésben, de kevesebb résztvevővel, vagy „országos szinten” építik-e meg. Mindenesetre 2040 körül a DEMO – amely az ITER működéséből szerzett tapasztalatokon alapuló ipari prototípus lesz – beléphet a műszaki tervezés fázisába, és megnyithatja az utat a fúziós rendszerek fejlődése felé.

Ha az ITER beváltja a hozzáfűzött reményeket, a 21. század második felének elején rákapcsolhatják a hálózatra az első fúziós erőművet.

## Magyar fúzió

A magyar szakemberek régóta részt vesznek a magfúziós kutatásokban. „A fúziós álom”-ról Zoletnik Sándor, akit húsz éve „Mr. Fúzió”-nak is hívtak, érdekes fejezetet írt Vértes Attila tudománytörténeti könyvébe<sup>5</sup>. 2019-ben négy MTA-kutatóintézet, egy egyetem és tizenegy ipari vállalkozás megalapította a Magyar Magfúziós Technológia Platformot. A szervezet célja a magfúziós energetikai kutatások jobb koordinálása és a magyar ipari részvétel fokozása.

Az ITER építésén ma is dolgoznak magyar mérnökök, akiknek arról kell gondoskodniuk, hogy az ITER-be építendő kábelek megfelelően működjenek – egészen a projekt végéig. A már évek óta üzemelő német W7-X sztellarátornál magyar videodiagnosztikai rendszer „közvetítette” az első plazmakisüléseket. Magyar és nemzetközi kutatócsoportok hazai fejlesztésű mérőberendezéseket használnak például a JET, a dél-koreai KSTAR és a kínai EAST berendezés mellett. A Wignerben fejlesztik azt a kamerarendszert, amely első európai mérőeszközként kerül az idén elinduló JT-60SA nevű EU-Japán tokamakra.