

Ondrejcsik László,¹  Hábermayer Tamás,²  Révai Róbert,³ 
Vass Gyula⁴ 

Az ITER nemzetközi mágneses fúziós kutatási-fejlesztési projekt bemutatása szervezeti és működési aspektusból

Presentation of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) Research and Development Tokamak Project from an Organisational and Operational Perspective

Ahhoz, hogy bolygónk és az emberiség jövőbeni energiaszükségletét ideális módon és mértékben tudjuk kielégíteni, változatos termelési módszereket kell alkalmaznunk és nagymértékben törekednünk kell a nem megújuló energiaforrásoktól való függetlenedésre. A fúziós energia mint új, szénmentes bázisenergia-forrás – amely egyebek mellett nem termel nagy felezési idejű radioaktív hulladékot sem – pozitív tényezőként járulhat hozzá a jövőben az energiaszektor egyes részei problémáinak megismeréséhez, kutatásához és feltárásához.

Az ITER (Nemzetközi Termonukleáris Kísérleti Reaktor) az egyik legígéretesebb projekt, amely a fenntartható fúziós energia elérését célozza. A szerzők ebben a cikkben az ITER projekt eredetét, kulcsfontosságú alapító tagjait, valamint a tokamak kialakítását vizsgálják, amely megteremti a szükséges feltételeket az ITER tudományos és kísérleti céljainak eléréséhez. Továbbá kiemelik a reaktor különböző komponenseiben bekövetkezett legújabb technológiai fejlesztéseket, és megvizsgálják, hogyan működhet hatékonyan az ITER különféle körülmények között. Bemutatják a nukleáris fúzió alapelveit, és hogy miként keletkezik és

¹ Doktori hallgató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: laszlo.ondrejcsik@katved.gov.hu

² Tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet, e-mail: dr.habermayer.tamas@katved.gov.hu

³ Kórházigazgató, Budapesti Bajcsy-Zsilinszky Kórház és Rendelőintézet, e-mail: robert.revai@bm.gov.hu

⁴ Tanszékvezető egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Tűzvédelmi Műszaki Tanszék, e-mail: vass.gyula@uni-nke.hu

marad meg az energia a fúziós folyamat során. A tanulmány ezután tárgyalja az ITER és az új energiaforrások fejlesztése közötti kritikus kapcsolatot. Végül a cikk a fúziós energia jövőbeli kilátásait vizsgálja, összehasonlítva azt a jelenlegi energiaforrásokkal, és értékeli potenciális szerepét a globális energiapalettán.

Kulcsszavak: ITER, fúziós energia, nukleáris fúzió, a jövő energiája, tokamak

Ideally, in order to meet the future energy needs of our planet and humanity, we have to use a variety of production methods and seek to become largely independent of non-renewable energy sources. As a new source of carbon-free baseload electricity, producing no long-lived radioactive waste, fusion can make a positive contribution to addressing resource availability, carbon dioxide emissions reduction, and the disposal and safety issues of fission waste.

ITER (initially the International Thermonuclear Experimental Reactor) is the most promising project to achieve fusion energy. In this article, the origins of the ITER project, its key founding members, and the design of the tokamak, which creates the necessary conditions for achieving ITER's scientific and experimental goals will be discussed. In addition, the technological improvements in several different aspects and how it can function under different situations will be introduced. The principle of nuclear fusion and how the energy is created and conserved in the whole process will also be explained. The study then discusses the critical link between ITER and the development of new energy sources. Finally, the article examines the future prospects of fusion energy, comparing it with current energy sources and assessing its potential role in the global energy mix.⁵

Keywords: ITER, fusion energy, nuclear fusion, future energy, Tokamak

Bevezetés

Bolygónkon alapvetően két típusú energiát különböztetünk meg, a nem megújulót és a megújulót. Az előbbi elsősorban a fosszilis tüzelőanyagokon (szén, kőolaj, földgáz) alapszik, az utóbbi pedig többek között a nap-, szél-, víz- és atomenergiát foglalja magában. A szén, a kőolaj és a földgáz tudatos technológiai felhasználásával a történelem során számos alkalommal a társadalom nagy léptékű és mára állandósult fejlődését értük el. Ezeknek a nem megújuló forrásoknak viszont véges a készlete, és a hasznos élettartamuk is rövid.⁶ Emiatt és az elmúlt évtizedek egyre rohamosabb fejlődésével párhuzamosan is fogalmazódott meg az igény új energiaforrások iránt.

A nap által kibocsátott energia a jelenlegi energiaszükségletünk elsődleges forrása. Mivel a nap energiája főként nukleáris reakciókból származik, a kutatások ebbe az irányba indultak el. Történelmünk során háborús célra is felhasználták ugyan, de a tudóstársadalom

⁵ GENG 2022.

⁶ International Atomic Energy Agency 1997.

tovább gondolkodott ezen az azonnal kitörő energiaformán, és elkezdte tanulmányozni az irányított nukleáris reakciókat.⁷

Ez az energia a következő nukleáris reakciók egyikén keresztül szabadulhat fel:

- Nukleáris hasadás, vagyis a nehezebb atommagok hasítása, amely hatalmas mennyiségű energiát termel.
- Nukleáris fúzió, amikor könnyebb atommagok ütköznek, és óriási energiát hoznak létre.
- Nukleáris bomlás, amely során az atommagok spontán bomlása közben energia szabadul fel.

Az alapvető különbség az, hogy maghasadás során akkor szabadul fel energia, amikor egy nehéz magot neutronok hasítanak szét. Ez a jelenlegi atomerőművek és atombombák energiaforrása. Fúziós energia pedig két hidrogénatom egyesülésekor keletkezik, amely az összes csillagot hajtó energia (Napunkat is beleértve).⁸

1978-ban kezdődött a nemzetközi tokamakreaktor nukleáris fúziós projektjének szervezése, amely az ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor – Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor; „az út” latinul) alapját képezte. Ezután a világ elsőrangú vezetői az 1985-ös találkozón fejezték ki érdeklődésüket a nemzetközi együttműködésen alapuló nukleáris fúziós projektek iránt.⁹

Az ITER projekt legnagyobb célja olyan fúziós erőművek létrehozása, amelyek hatékonyan képesek biztosítani a nukleáris erőművek által termelt, azonos szintű energiát. A nemzetközi nukleáris fúziós kutatások célja a Nap fúziós folyamatának földi reprodukálása az energia előállítás érdekében. Ennek eredményeként a szabályozott termonukleáris fúziós energia nagyszabású alkalmazása alapvetően megoldaná az emberiség energiaválságát. A projekt tervei szerint a fő reaktor megépítését és az első plazma létrehozását követően az ITER a legnagyobb mágnesesen korlátozott plazmafizikai technikává és a világ legnagyobb kísérleti fúziós tokamakreaktorává válik.

A közlemény elkészítéséhez szükséges tudományos művek kvantitatív és kvalitatív felkutatása után azok elsősorban nemzetközi viszonylatban voltak fellelhetők, ám a csekély mértékű hazai releváns szakirodalmat szintén szerepeltettük.¹⁰

Ebben a cikkben ismertetjük, hogy milyen műszaki projekt áll az ITER mögött, és hogyan válhat ez a projekt a jövő energiaforrásává. A cikk tárgyalja a nukleáris energia előnyeit más új energiaforrásokkal összehasonlítva, különböző szempontok alapján. Jelen cikkben a szerzők a nukleáris energetika jövőjével, a fúziós energia elemzésével foglalkoznak. A tanulmány keretei között a szerzők javaslatként vázolják fel az ITER eddigi tudományos tevékenységéből adódó eredmények jövőbeni alkalmazhatóságát, az annak előnyeiből származó tudományos és társadalmi értékeket.¹¹

⁷ REINDERS 2021.

⁸ MAGUREAN et al. 2019; WAN 2017; FOCARDI–ROSSI 2010.

⁹ IKEDA 2009

¹⁰ GUSZNEJOV et al. 2011.

¹¹ ALMÁSI–KÁTAI–URBÁN–VASS 2021; KÁTAI–URBÁN 2023; HOFFMANN et al. 2015; HORVÁTH et al. 2018.

Az ITER bemutatása

Az ITER a világ egyik legambiciózusabb energiaprojektje. Az ITER egy nemzetközi kutatási-fejlesztési (K+F) tokamak- (mágneses fúzió) projekt, amelynek célja a jövőbeli villamos erőművek technológiájának kifejlesztése a mai plazmafizikai ismereteink továbbfejlesztésével. Az ITER-ben végrehajtandó kísérlet kulcsfontosságú a fúziós tudomány fejlődéséhez és a jövő fúziós elven működő erőműveinek előkészítéséhez.

Dél-Franciaországban 33 nemzet működik együtt a világ legnagyobb tokamakjának, egy mágneses fúziós berendezésnek a megépítésén, amely arra hivatott, hogy a világ számára megvalósítsa azt a hatalmas, szén-dioxid-mentes és biztonságos energiaforrást, amely ugyanazon az elven alapul, amely alapján a Napunk és a csillagok is élnek, működnek.

Az ITER elsődleges célja az égő plazmák vizsgálata és bemutatása – a plazmákban a fúziós reakciók során keletkező héliummagok energiája elegendő a plazma hőmérsékletének fenntartásához, ezáltal csökkentik vagy megszüntetik a külső fűtés szükségességét. Az ITER tesztelni fogja továbbá a fúziós reaktorhoz elengedhetetlen technológiák (például a távoli karbantartás és a plazmából történő energiaelszívás rendszerei) lehetőségeit és azok projektbe való integrálhatóságát.

Mérnökök és tudósok ezrei járultak hozzá az ITER tervezéséhez azóta, hogy 1985-ben először merült fel a fúzióval kapcsolatos közös nemzetközi kísérlet ötlete. Az ITER tagjai mára már két évtizedes együttműködésben dolgoznak az ITER kísérleti fúziós reaktorának megépítésén és működtetésén.

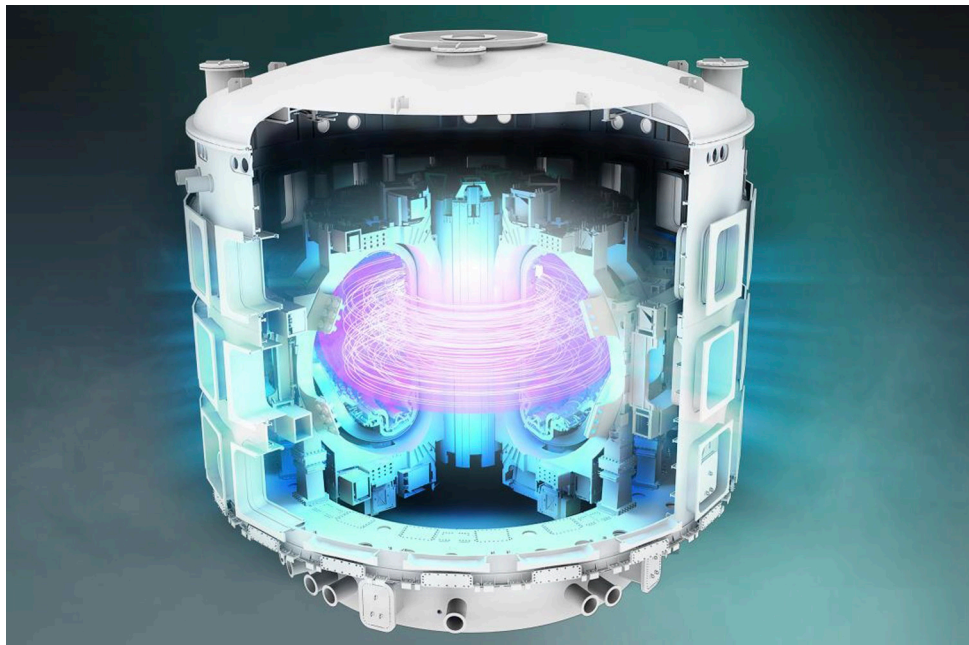
A fúzió a Nap és a csillagok energiaforrása. A csillagok magjában uralkodó hatalmas hő és gravitáció hatására a hidrogén atommagok összeütköznek, nehezebb héliumatommá fuzionálnak, és e folyamat során hatalmas mennyiségű energia szabadul fel.

A 20. századi fúziós tudomány laboratóriumi körülmények között a leghatékonyabb fúziós reakciót két hidrogénizotóp, a deutérium (D) és a trícium (T) közötti reakcióban határozta meg, mivel a DT fúziós reakció a „legalacsonyabb” hőmérsékleten produkálja a legnagyobb energiakitermelést. A laboratóriumi fúzió megvalósításához három feltételnek kell teljesülnie: nagyon magas hőmérséklet (150 000 000 °C nagyságrendű), megfelelő plazmarészecske-sűrűség (az ütközések valószínűségének növelése érdekében) és megfelelő exponálási idő (a tágulásra hajlamos plazma meghatározott térfogaton belül tartásához).

Szélsőséges hőmérsékleten az elektronok elválnak az atommagoktól, és a gáz plazmává válik – ezt gyakran az anyag negyedik állapotaként említik. A fúziós plazmák biztosítják azt a környezetet, amelyben a könnyű elemek összeolvadhatnak és energiát nyerhetnek. Egy tokamakberendezésben erős mágneses tereket használnak az ilyen módon kialakult plazma szabályozására. A tokamakot először szovjet kutatók fejlesztették ki az 1950-es évek végén, és világszerte a mágneses fúziós berendezés legígéretesebb konfigurációjaként fogadták el.

Az ITER-tokamak olyan kísérleti gép, amelyet a fúziós energia hasznosítására terveztek. A tokamak (1. ábra) belsejében az atomok fúziója során keletkező energia hő formájában elnyelődik az edény falaiban. A hagyományos erőművekhez hasonlóan a fúziós erőmű is

ezt a hőt használja fel, először gőz formájában, hogy a turbinák és a generátorok meghajtásával villamos energiát állítson elő.



1. ábra: Tokamak

Forrás: What is a tokamak? [é. n.]

A tokamak szíve a fánk alakú vákuumkamra. Belsejében, extrém hő és nyomás hatására, a gáznemű hidrogén-üzemanyag plazmává alakul, aminek során a hidrogénatomok összeolvadhatnak és energiát nyerhetnek. Az edény körül elhelyezett hatalmas mágnesetekercsek segítségével nyílik lehetősége a plazma töltött részecskéinek kontrollálására, ami abban játszik fontos szerepet, hogy a forró plazmát az edény falától távol tartsák. A „tokamak” kifejezés egyebek mellett egy orosz rövidítésből származik, amely a „mágnesetekercsekkel ellátott toroidális kamra” rövidítése.

Az ITER lesz a világ legnagyobb tokamakja, hatszor akkora plazmakamra-térfogatú és nagyságrendileg kétszer akkora lesz, mint a jelenleg működő legnagyobb ilyen berendezés. Az ITER-projekt 35 nemzet (egyesülés) együttműködésén alapul. Mint ITER-tagok Kína, az Európai Unió (az Euratomon keresztül), India, Japán, Korea, Oroszország és az Egyesült Államok egyesítette erőforrásait, hogy ezt a forradalmi technológiai újítást megvalósítsa, nevezetesen, hogy a Földön előállítsa a Napot és a csillagokat tápláló energiát. A 2006-ban megkötött ITER-megállapodás aláírójaként a hét tagország a projekt építésének, üzemeltetésének és leszerelésének költségeit megosztja egymás közt. Osztóznak továbbá a kísérleti eredményeken és a gyártási, építési és üzemeltetési fázisok során keletkező szellemi tulajdonon is. Az építési költségek legnagyobb részét (45,6 százalék) Európa állja; a fennmaradó részen Kína, India,

Japán, Korea, Oroszország és az Egyesült Államok (egyenként 9,1 százalék) egyenlő arányban osztozik. A tagok nagyon kevés pénzbeli hozzájárulást nyújtanak a projekthez, ehelyett ugyanis azok túlnyomó részét, mintegy 90 százalékát a kész alkatrészek, a beépítésre váró rendszerek és berendezések vagy egyenesen épületek, funkcionális építmények formájában használják fel a projektben.

Az ITER-szervezet külön (technikai-műszaki jellegű) együttműködési megállapodást kötött Ausztráliával (az Ausztrál Nukleáris Tudományos és Technológiai Szervezeten [ANSTO] keresztül) 2016-ban és Kazahsztánnal (a kazahsztáni Nemzeti Nukleáris Központon keresztül) 2017-ben. Egyetértési megállapodás van érvényben a Thaiföldi Nukleáris Technológiai Intézettel (2018), valamint Kanadával (2020).

Fúziós energia, reakció nélkül nem lenne élet a Földön. A fúzió az univerzum energiaforrása, amely a Nap és a csillagok magjában zajlik. Amit fényként látunk és melegként érzünk, az a Napunk magjában bekövetkező fúziós reakció eredménye: a folyamatban a hidrogénmagok egymással való ütközése és héliumatomokká történő egyesülése hatalmas mennyiségű energia felszabadulásával jár. Az univerzumban ez a gravitációs erők különféle hatásai révén végbement folyamat a hidrogénfelhők hatalmas csillagtestekké alakulásához vezetett, amelyeknek a belsejében lévő extrém sűrűségben és hőmérsékletben fúzió zajlik.

Az atomok sebessége hőmérsékletfüggő: minél forróbbak, annál gyorsabban mozognak. A Nap magjában, ahol a hőmérséklet eléri a 15 000 000 °C-ot, a hidrogénatomok folyamatos izgalmi állapotban vannak. Amikor nagyon nagy sebességgel ütköznek, a pozitív töltésű magjaik között létező természetes elektrosztatikus taszítás legyőzhetővé válik, aminek következtében az atomok fúzióba lépnek egymással. A könnyű hidrogénatomok fúziója egy nehezebb elemet, héliumot eredményez. A keletkező héliumatom tömege azonban nem pontosan az eredeti hidrogénatomok összegét adja – valamennyi tömeg ugyanis elveszett az óriási mennyiségű energia keletkezésekor.

Minden másodpercben a Napunk 600 millió tonna hidrogént alakít át héliummá, ezzel hatalmas mennyiségű energiát felszabadítva. A fúzió Földön való eléréséhez azonban más megközelítés vált szükségsszerűvé. A 20. századi fúziós tudomány – laboratóriumi környezetben – a legköltséghatékonyabb fúziós reakciónak két hidrogénizotóp, a deutérium (D) és a trícium (T) közötti reakciót (DT fúzió) azonosította.¹² A DT fúziós reakció a legmagasabb energiaszintet produkálja relatíve alacsony hőmérsékleteken. Ez 150 000 000 °C-ot jelent, ami tízszer magasabb a Napban zajló hidrogénreakció hőmérsékleténél.¹³

A fúziós tudomány középpontjában a plazmafizika áll. Extrém hőmérsékleteken az elektronok elválnak a magoktól, és a gáz plazmává alakul. A töltött részecskékből (pozitív magokból és negatív elektronokból) álló plazmák nagyon ritka környezetet teremtenek, sűrűségük a levegő sűrűségének közel egymilliomod része, ám a fúzió létrejöttéhez, az energiatermeléshez ez a környezeti paraméter elengedhetetlen. A fúzió három feltétel együttes teljesüléséhez kötött: nagyon magas hőmérséklet (a magas energiájú ütközések kiváltásához), elegendő plazmarészecske-sűrűség (az ütközések valószínűségének növeléséhez) és megfelelő záridő

¹² BRADSHAW et al. 2011.

¹³ AYMAR 1997.

(a kitágulásra hajlamos plazma meghatározott, szabályozott térfogattartományban történő tartásához).

Az ITER-ben a fúziót a fentebb is említett tokamakberendezésben érik el, mágneses mezőket használva a forró plazma ideális állapotának fenntartásával, ahol is a plazma részecskéit különböző módszerek segítségével hevítik, egyben felgyorsítják. A tokamak mágneses hatásának kitett elektromos töltöttségű héliumatommag a plazma környezetében marad, ahol folyamatosan melegíti, gyorsítja a részecskéket. Azonban a termelt energia körülbelül 80 százalékát az atommag mágneses erővel szembeni semleges neutronja szállítja el a plazmából. Ezek a neutronok elnyelődnek a tokamak falába, ahol kinetikus energiájuk hővé alakul. Az ITER-ben ezt a hőt a tartály falain keringő hűtővíz fogja meg, amely végül hűtőtoronyokon keresztül oszlik el. A jövőben (a 2050-es és az azt követő évekre) tervezett fúziós erőművekben ezt a hőt gőz előállítására használják majd, turbinákon és generátorokon keresztül elektromos áram termelése céljára.

A fúziós reakció energiapotenciálja a Földön ismert összes energiaforráshoz képest felülmúlhatatlan. Az atomok kontrollált fúziója közel négymilliószor több energiát szabadít fel, mint egy kémiai, például a szén, az olaj vagy a gáz elégetésével végbemenő reakció, és négyszer annyit, mint a nukleáris maghasadás.¹⁴

A fúziós energia előnyei

A következő évtizedek kulcsfontosságúak világunk számára az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése érdekében. Kutatók számításai szerint a 21. század végére az energia iránti kereslet megháromszorozódik, különösen a népességnövekedés, a fokozódó urbanizáció és a fejlődő országokban a villamosenergia-ellátáshoz való hozzáférés bővülése miatt. Az is világossá vált, hogy a 19. és a 20. század civilizációs fejlődését mozgató hagyományos fosszilis tüzelőanyagok által biztosított energiára a továbbiakban csak a fokozottabb üvegházhatás és a nagyobb mértékű környezetszennyezés árán lehet támaszkodni. Éppen emiatt az is megfogalmazódott, hogy égetően fontos egy új, nagyszabású, fenntartható és legfőképp szén-dioxid-mentes energiaforrás biztosítása. A kutatások bizonyítják, hogy ez nem más, mint a fúziós energia, amelynek további kutatását az alábbi előnyök és eddig elért eredmények teszik érdekessé a folytatásra.

Bőséges energia: Az atomok kontrollált fúziója – azonos tömeg mellett – közel négy-milliószor több energiát szabadít fel, mint egy kémiai reakció (például a szén, az olaj vagy a gáz elégetése), és négyszer annyit, mint a nukleáris fúziós reakciók. A fúziónak megvan az a potenciálja, hogy biztosítsa azt a bázisenergia-forrást, amely szükséges a városaink és az iparágaink áramellátásához.

Nincs CO₂: A fúzió nem bocsát ki káros anyagokat, például szén-dioxidot vagy más, üvegházhatású gázokat a légkörbe. Fő mellékterméke egy inert, nem toxikus gáz: a hélium.

„Az idő végtelenségéig”: Az ITER-ben zajló fúziós folyamatokhoz két elemre lesz szükség: deutériumra és tríciumra. A deutérium a víz minden formájából desztillálható, míg a trícium

¹⁴ JACQUINOT 1997.

a fúziós reakció során keletkezik, amikor a fúziós neutronok lítiummal lépnek kölcsönhatásba. (Földünk jelenleg ismert lítiumkészletei a fúziós erőművek működését több mint 1000 évig biztosítanák, míg a tengeri alapú lítiumkészletek esetében – amelyeket a fúziós reaktorokban Li-6 izotópként használnak – ez az időintervallum évmilliókat jelent.) A kihívás tehát nem a készlet kapcsán merül fel, a kritikus kérdés az, hogyan lehet megbízhatóan szaporítani és visszanyerni a tríciumot egy fúziós eszközben.

Nincs hosszú felezési idejű radioaktív hulladék: A nukleáris fúziós reaktorok nem termelnek magas aktivitású, hosszú felezési idejű radioaktív hulladékot. A fúziós reaktor egyes elemeinek aktiválódása várhatóan elég alacsony lesz ahhoz, hogy az anyagokat belátható időn, akár már 100 éven belül újrahasznosítsák vagy újrafelhasználják.

Korlátozott kockázati faktor: A fúzió nem alkalmaz fosszilis anyagokat, mint például az urán és a plutónium. Az ITER fúziós reaktorban egyáltalán nincsenek olyan dúsított, dúsítható anyagok, amelyeket nukleáris fegyverek előállításában lehetne felhasználni.

Nincs olvadásveszély: A Fukushima-típusú nukleáris baleset nem lehetséges egy fúziós tokamakeszközben. A fúzióhoz szükséges pontos körülményeket rendkívül precíz és nehéz folyamat során lehet elérni és fenntartani. Bármilyen zavar fellépése esetén a plazma másodpercek alatt lehül, és a fúziós reakció leáll. A fánk alakú edényben a fúziós folyamat bármelyik pillanatában csak néhány másodpercre elegendő üzemanyag van jelen, így a láncreakciós folyamat lehetőségének kockázata gyakorlatilag nulla.

Költség: A jövőre tervezett fúziós reaktor teljesítménye valószínűleg hasonló lesz egy atomreaktoréhoz (ez körülbelül 1 és 1,7 gigawatt közötti). Az átlagos kilowattóránkénti költséget azonban még nem lehet tisztán megállapítani, mivel az működési tapasztalatokat igényel, amelyek csak az ITER néhány éves működtetése után állnak majd rendelkezésre. Mint az összes új technológia esetében, a költségek kezdetben itt is relatíve magasak lesznek, de a gazdaság működése számtalanszor bebizonyította, hogy ezt drasztikusabb visszaesés követi, végül pedig a csúcshoz képest alacsonyabb költségintenzitén stabilizálódik majd az érték.¹⁵

Befejezés, összegzés

Jelen cikk célja az volt, hogy az ITER nemzetközi szervezet keretein belül betekintést nyújtson a jövő energetikájával, a fúziós energiával kapcsolatos egyes kutatási-fejlesztési fázisokba, és bemutassa annak potenciális előnyeit. Az ITER eddigi tudományos eredményei során bebizonyosodott, hogy amint a nukleáris fúzió során a két hidrogénatom egyesüléséből származó fúziós energia, úgy a deutérium-trícium fúzió is nagy mennyiségű energiát szabadít fel. A deutérium-trícium reakció termékei nem radioaktívak, és a neutronaktivált reaktorszerkezeti anyagok csak kis mennyiségű, alacsony felezési idejű radioaktív anyagot termelnek, amelyek kezelése kiváltképp könnyebb. A fúziós reaktorok nem szennyeznek a környezetet kén- és nitrogén-oxidok kibocsátásával, és nem bocsátanak ki üvegházhatású gázokat sem. A fúziós üzemanyag-ellátás korlátlan, és az emberi civilizáció egész területén elérhető minden

¹⁵ ITER – The Way to New Energy [é. n.].

ország számára. A trícium csak nyomokban fordul elő a természetben, viszont neutronokkal történő besugárzással létrehozható. Ez a folyamat a reaktortartályon belül is végrehajtható, ahol a reaktor plazmája körüli lítiumrétegből tríciumot lehet előállítani, így nem szükséges az üzemanyagot a létesítményen kívül szállítani; ennek eredményeként válik a deutérium és a lítium a fúziós reaktorok fő üzemanyagává. Egy fúziós reakció egymilliószor több energiát használ fel, mint egy kémiai reakció, és 1 gramm elsődleges fúziós üzemanyag (deutérium és lítium) ugyanannyi energiát szolgáltat, mint 1 tonna szén. A tengervíz pedig több gigatonna deutériumot és lítiumot tartalmaz, ami hosszú időkre elegendő üzemanyagot biztosít a szükséges energia előállításához.¹⁶

Az ITER a tudomány jelenlegi állása szerint az emberiség történetében a legígéretesebb projekt a fúziós energia elérésére.¹⁷ A nukleáris energia világszerte hatékony és megbízható elektromosságot termel, és jelenleg több mint 400 üzemi reaktor működik több mint 30 országban. A tudósok eddig jelentős előrelépést értek el a nukleáris fúzió kutatásában és az ITER projektben. Bár az ITER kapcsán még mindig vannak megoldandó helyzetek, problémák, a nukleáris fúziós energiáról mégis teljes bizonyossággal kijelenthető, hogy a jövőt illetően a legideálisabb energiaforma, és a megvalósításához szükséges tudományos áttöréshez vezető utat a tokamakeszközökhöz hasonló mesterséges napok jelentik.

Felhasznált irodalom

- ALMÁSI Csaba – KÁTAI-URBÁN Lajos – VASS Gyula (2021): *Ipari és közlekedési balesetek okainak vizsgálata, különös tekintettel a természeti katasztrófák hatásaira*. Online: <https://www.vedelem.hu/letoltes/document/487-ipar1.pdf>
- AYMAR, Robert (1997): The ITER Project. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 25(6), 1187–1195. Online: <https://doi.org/10.1109/27.650895>
- BRADSHAW, Alexander Marian – HAMACHER, Thomas – FISCHER, Ulrich (2011): Is Nuclear Fusion a Sustainable Energy Form? *Fusion Engineering and Design*, 86(9–11), 2770–2773. Online: <https://www.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.11.040>
- FOCARDI, Sergio – ROSSI, Andrea (2010): *A New Energy Source from Nuclear Fusion*. Online: <https://www.lenr-canr.org/acrobat/FocardiSanewenergy.pdf>
- GENG, Shuaibo (2022): An Overview of the ITER Project. *Journal of Physics: Conference Series*, 2386, 012012. Online: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2386/1/012012>
- GUSZEJNOV Dávid – POKOL Gergő – PUSZTAI István (2011): A RENATE atomnyaláb diagnosztika szimuláció általánosítása és alkalmazása az ITER diagnosztikai nyalábjára. *Nukleon*, 4(87). Online: https://www.nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_4_2_87_Guszejnov.pdf
- HOFFMANN Imre et al. (2015): Iparbiztonság Magyarországon. *Védelem Online*, 22(1), 549. Online: <https://www.vedelem.hu/letoltes/anyagok/549-dr-hoffmann-imre-dr-levai-zoltan-dr-katai-urban-lajos-dr-vass-gyula.pdf>
- HORVÁTH Hermina et al. (2018): *Iparbiztonságtan II*. Budapest: Dialóg Campus. Online: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/handle/20.500.12944/18851>
- IKEDA, Kaname (2009): ITER on the Road to Fusion Energy. *Nuclear Fusion*, 50(1), 014002. Online: <https://www.doi.org/10.1088/0029-5515/50/1/014002>

¹⁶ SHARMA–VARSHNEY 2019; STACEY 2018; TOSCHI 1997.

¹⁷ International Atomic Energy Agency 1997.

- International Atomic Energy Agency (1997): *Fusion Energy 1996: Proceedings of the Sixteenth International Conference on Fusion Energy*. Vienna: International Atomic Energy Agency. Online: <https://www.inis.iaea.org/records/8f1g0-3rp07>
- JACQUINOT, Jean (1997): *Plasma Heating and Current Drive Systems for ITER and Future Fusion Devices*. In 17th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering (Cat. No.97CH36131). San Diego, CA: IEEE, 399–404. Online: <https://doi.org/10.1109/FUSION.1997.687064>
- KÁTAI-URBÁN Maxim (2023): Veszélyes üzemek biztonságával foglalkozó mértékadó tudományos szakirodalom áttekintő értékelése. *Polgári Védelmi Szemle*, 15(DAREnet projekt különszám), 340–351.
- MAGUREAN, Ancuta M. et al. (2019): Einstein's Equation in Nuclear and Solar Energy. In VIZUREANU, Petrica (szerk.): *Thermodynamics and Energy Engineering*. [H. n.]: IntechOpen. Online: <https://doi.org/10.5772/intechopen.90574>
- REINDERS, Lodewijk Johannes (2021): *The Fairy Tale of Nuclear Fusion*. [H. n.]: Springer. Online: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64344-7>
- SHARMA, Jyoti – VARSHNEY, Sanjeev Kumar (2019): Mega Science and International Relations: A Case of 'International Nuclear Fusion Research and Engineering (ITER)'. *Science Diplomacy Review*, 1(4), 3–13. Online: <https://www.ris.org.in/sites/default/files/2021-09/SDR%204%20-%20November%20issue%20-%20for%20printand%20upload-min.pdf>
- STACEY, Weston M. (2018): *Nuclear Reactor Physics*. [H. n.]: Wiley. Online: <https://doi.org/10.1002/9783527812318>
- TOSCHI, Roberto (1997): Nuclear Fusion, an Energy Source. *Fusion Engineering and Design*, 36(1), 1–8. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82762-3.50006-9>
- WAN, Baonian (2017): *Man-Made Sun. East Fully Superconducting Tokamak Fusion Test Device*. Zhejiang Province, China: Zhejiang Education Publishing House.

Internetes források

- ITER – The Way to New Energy [é. n.]. Online: <https://www.iter.org/>
- What is a tokamak? [é. n.]. ITER – The Way to New Energy. Online: <https://www.iter.org/machine/what-tokamak>