

A FÚZIÓS ENERGIATERMELÉS JELENLEGI HELYZETE ÉS TÁVLATAI

Zoletnik Sándor

kandidátus, KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet
zoletnik@rmki.kfki.hu

Magfúziós alapok

Már több mint fél évszázada ismert, hogy az atommagokat alkotó részecskék – a protonok és neutronok – legerősebben a közepes méretű (körülbelül 50-es tömegszámú) atommagokban kötődnek egymáshoz. Ennek megfelelően nagy atommagok kisebbre hasításával nagy mennyiségű kötési energiát lehet felszabadítani, mint azt a mai atomerőművekben teszik is. Hasonló módon energiát lehetne nyerni a kisebb atommagok egyesítéséből (fúziójából), ilyen folyamatok zajlanak a csillagokban is.

Sajnos az atommagok egyesítését akadályozza, hogy minden atommagban pozitív elektromos töltésű protonok ülnek, így a magok erősen taszítják egymást. Lassan (kis energiával) mozgó atommagok nem tudják legyőzni ezt a taszító gátat, és nem jön létre számottevő valószínűséggel magfúzió. Részecskegyorsítóban néhány tízezer voltos potenciálon felgyorsítva a legkönnyebb elemek atommagjai már képesek magfúziós reakciókra, így ezeket a folyamatokat az 1930-as évektől vizsgálni tudták, ezért ma már részletesen ismertek. Az eredmények azt mutatták, hogy a részecskeütközések nagyon kis részében (tipikusan 1/100 000) következik be magfúzió, leggyakrabban az elektro-

mos taszítás biliárdgolyók ütközésének módján löki szét a részecskéket, így szétosztja az energiát a gyorsítóból érkező gyors részecskék és a céltárgyban állók között. Egy fúziós reakcióban ugyan kb. ezerszer több energia szabadul fel, mint az ütköző részecske energiája, mégis a fenti számok alapján könnyen belátható, hogy gyorsítóval indukált magreakcióban a részecskenyaláb teljesítményének csak kicsi része (nagyágrendileg 1%) szabadul fel a fúziós folyamatokban, ezért energiatermelésre nem használható.

A helyzet gyökeresen megváltozik, ha nem gyors részecskéket lövünk álló céltárgyra, hanem minden részecske gyorsan mozog. Egyensúlyi állapotban a részecskék az ismert Maxwell-féle termikus sebességeloszlást fogják felvenni, és átlagosan nem fog energia átadódni a fúziós reakció nélküli ütközésekben. Szükséges tízezer elektronvoltos részecskeenergiának kb. 100 millió °C hőmérséklet felel meg. Ezen a hőmérsékleten a részecskék mozgási energiája lényegesen felette van az elektronok kötési energiájának, így a közegben nem lesznek atomok, hanem az szabad atommagok (ionok) és elektronok keverékéből fog állni. Ezt az állapotot hívjuk *plazmának*. A feladat világos: a fúziós energiatermeléshez 100 millió °C hőmérsékletű plazmát kell előállítani és egyben tartani. Ilyen magas hő-

mérsékleten természetesen semmilyen tartály nem alkalmazható, hanem mágneses terek szükségesek. Másik lehetőség, hogy nem tartjuk össze a forró anyagot, hanem robbanás-szerűen termelünk fúziós energiát.

A Napban az összetartást a hatalmas méret és a gravitációs nyomás biztosítja, így ott stabilan folyik magfúziós energiatermelés hidrogén atommagok héliummá alakításával. Sajnos a Napban egységnyi térfogatra igen kicsi fúziós teljesítmény jut, így földi körülmények között azok a folyamatok nem alkalmazhatók. A lehetséges magfizikai folyamatok közül fúziós erőműben a deutérium és a trícium (a hidrogén két nehéz izotópja) közötti magreakció lenne a legkönnyebben megvalósítható:



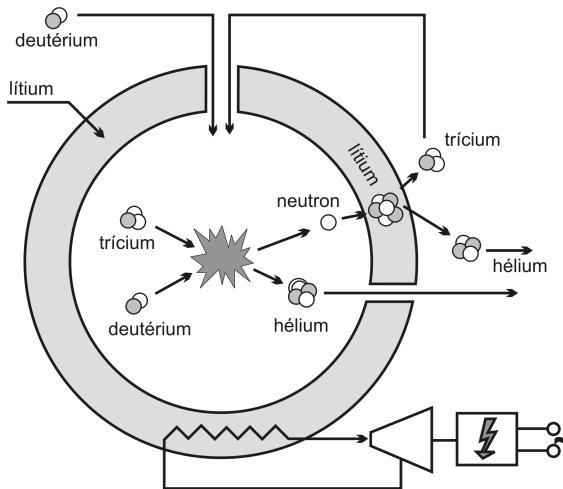
A zárójelbe tett mennyiségek a keletkező részecskék mozgási energiáját jelölik. Mint látható, az energia 80 %-át a neutron viszi el, amely szinte akadálytalanul elhagyja a közeget, és a plazma körüli szerkezeti elemekben lelassítva villamosenergia-termelésre hasznosít-

ható. A ${}^4\text{He}$ atommag (alfa részecske) elektromosan töltött, így nem képes gyorsan megszökni a mágneses térből, hanem energiáját a plazma fűtésére fogja fordítani. Ezzel a sugárzási és egyéb veszteségek ellensúlyozhatók, és a plazma maga fenn tudja tartani a szükséges hőmérsékletet. A rendszer túlmelegedni nem tud, mivel a fúziós reakciók valószínűsége egy optimális hőmérséklet felett csökken.

Alapanyagok, végtermékek, kockázatok

A DT reakció egységnyi tömegeből igen nagy mennyiségű energiát termel, egy 1 GW körüli elektromos teljesítményű reaktor évente csak néhány száz kg D és T alapanyagot igényelne.

Ebből a deutérium stabil izotóp, a természetes hidrogénben (pl. vízben) kb. 1/6000 arányban van jelen, tehát szinte korlátlan mennyiségben és egyenletesen elosztva áll rendelkezésre. A trícium ezzel szemben radioaktív, tizenkét év felezési idővel bomlik, ezért a természetben csak nagyon kevés található belőle. Lehetőség lenne viszont T előállítására lítiumból a fúzióban keletkező neutron felhasználásával.



1. ábra • DT reakcióval működő fúziós erőmű elvi vázlata

nálásával. A fent leírt elven alapuló berendezés elvi vázlatát mutatja az 1. ábra. Mint látható a folyamat alapanyagai végül deutérium és lítium, a keletkező anyag pedig kizárólag hélium. A lítium a földkéregben meglehetősen egyenletesen elosztva áll rendelkezésre, nem túl költséges anyag. A világ mai lítiumtermelése is kb. kétszáz fúziós erőmű ellátását tenné lehetővé, tehát ez szintén nem korlát. A héliumkibocsátás évtizedek alatt sem tudná észrevehetően megváltoztatni a légkör héliumkoncentrációját.

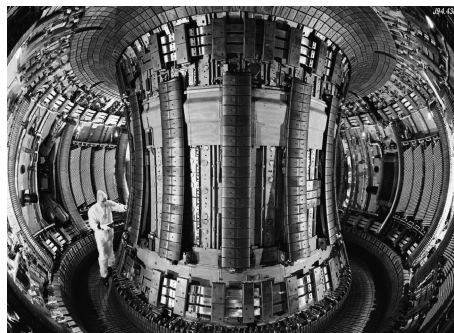
A reakcióban keletkező neutronok a reaktor szerkezeti anyagaiban szintén magreakciókat okoznának, és ezekben valamennyi sugárzó anyag is keletkezne. Ennek mennyisége és milyensége az anyagok megválasztásával befolyásolható. A legfrissebb tanulmány szerint (EFDA2005, 2005) acélszerkezet esetén a sugárzó anyagok kb. száz év alatt bomlanának a veszélyes aktivitás alá, tehát nem jelentenek beláthatatlan időkre problémát.

A fúziós erőművekkel kapcsolatos kockázatok közül elsősorban meg kell említeni, hogy megszaladás, leolvadás jellegű balesetek nem tudnak bekövetkezni, mivel a forró plazma bármilyen probléma esetén a másodperc töredéke alatt lehűl, és a fúziós reakció leáll. A keletkező neutronokkal szemben a berendezés körüli szokásos sugárvédelmi eljárások (például betonfal) tökéletes védelmet nyújtanak. A trícium mennyisége magában a plazmában igen kicsi, kevesebb mint 1 g. Számítások szerint a tríciumszaporító köpenyben, tárolókban, csővezetékekben összesen kb. 1 kg trícium lenne. Egy esetleges baleset során ennek, valamint a szerkezetek felaktiválódása során keletkező más mobilizálható radioaktív anyagoknak az épületből való kiszivárgása sem okozna olyan mértékű sugárzást, ami az erőmű területén kívül kitelepítést igényelne.

Hol tartunk ma?

Fúziós kutatások alapvetően két irányban folynak: összetartás nélküli folyamatokkal (inerciális fúzió) és mágneses összetartású plazmákkal. Az előbbi esetén a nyereséges működéshez a felfűtés előtt a DT üzemanyagot a szilárdtestűrűség kb. tízszeresére kell összenyomni, amelyet nagyteljesítményű lézerekkel, atomnyalábokkal vagy sugárzással próbálnak elérni. Ezek a kutatások várhatóan néhány éven belül be fogják mutatni, hogy egy kapszula felrobbantása lényeges energianyereséggel jár, azonban energiatermelési alkalmazásuk igen sok műszaki és gazdasági nehézséget mutat.

A mágnesesen összetartott plazmákkal folyó kísérletek az 1950-es évek óta folynak. Ez alatt számos különböző mágneses konfigurációt próbáltak ki, mai tudásunk szerint ezek közül kizárólag a tórusz alakú berendezések látszanak alkalmasnak energetikai alkalmazásra. Ezek közül is a tokamak nevű konfigurációt jutott legközelebb a gyakorlati hasznosításhoz (2. ábra). Ebben külső tekercek és a plazmában folyó áram mágneses terének eredője adja az összetartó mágneses



2. ábra • A világ legnagyobb tokamak berendezése, a Joint European Torus (JET) karbantartás idején

teret. Az eddigi kísérletek elsősorban a plazma előállítására, fűtésére, mérésére, valamint fizikájának megértésére vonatkoztak, a sugárzási problémák elkerülése érdekében általában tiszta deutériumplazmában. A mai legnagyobb berendezésekben az energetikai alkalmazáshoz szükséges hőmérsékletű és sűrűségű plazmát rutinszerűen elő tudják állítani, a JET tokamakon végzett DT kísérletekben a plazma fűtésére fordított teljesítmény kb. 60 %-át tudták a fúziós reakcióban elérni. A fúziós kutatások történetét foglalja össze nagyon olvasmányosan Kees Braams és Peter Stott könyve (Braams – Stott, 2002). Bár a fúziós plazmák fizikájának megértésében számos hiányosság akad még, a mai eredmények alapján már igen jó bizonyossággal meg lehetett tervezni egy berendezést, amely már reaktorméreteken és -teljesítményekkel lenne képes üzemelni. Ezt a berendezést ITER néven megtervezték, és hét partner (EU, USA, Oroszország, Japán, Kína, Dél-Korea, India) megállapodott a berendezés megépítéséről a franciaországi Cadarche-ban. Jelenleg az engedélyezési folyamat zajlik, és előreláthatóan 2008-ban kezdődik az építkezés. A tervek szerint az ITER 500 MW fúziós teljesítmény előállítását fogja demonstrálni maximum 75 MW fűtési teljesítmény mellett, 500-1000 másodperc hosszú impulzusokban. Elektromos energiát nem fog termelni, és tríciumból sem lesz önfenntartó. Ezzel szemben tesztelni fognak rajta különböző tríciumtermelési eljárásokat, valamint az alfa részecskék fűtőhatását a plazmára. Rövid impulzushossza miatt az ITER-kísérlet egy fontos technológiai kérdést nem tud tisztázni: a szerkezeti anyagok neutronok által történő roncsolását és az ennek ellenálló szerkezeti anyagok kiválasztását. Erre IFMIF néven egy speciális berendezés építése van tervbe

véve, amely egy gyorsító segítségével kis térfogatban olyan energiájú és dózisu neutronbesugárzást tenne lehetővé, amely egy energiatermelő fúziós reaktorban várható. Az IFMIF koncepciói tervei készen vannak, egy EU–Japán megállapodás keretében a közeljövőben kezdődne a mérnöki tervek kidolgozása. Az ITER és IFMIF kísérletek adnák a technológiai alapot az ez után építendő fúziós energiatermelő demonstrációs erőmű (DEMO) építéséhez.

Kereskedelmi fúziós erőművekről 2005-ben készült a legújabb és mindmáig legrészletesebb tanulmány a European Fusion Development Agreement szervezetben (EFDA2005, 2005). Négy tokamakváltozatot vizsgáltak, melyek különböző technológiai megvalósításokat reprezentáltak, valamint megkísérelték figyelembe venni a jövőbeli technológiai fejlődés hatását. Az eredmények szerint a fúziós energiatermelés költsége 3 és 9 eurocent közé becsülhető, tehát valahol a mai hagyományos erőművek és a megújuló források között lenne. Meg kell jegyezni, hogy a fúziós erőművek esetén a működtetési költség csak 10–15 % között van, ezzel szemben a tőkeberuházási költség 65–70 %. Ez utóbbit is néhány nagy alkatrész (szupravezető mágnes, vákuumrendszer) uralja, tehát a technológiai fejlődéssel és szériagyártással együtt jár a költségcsökkenés az idő előrehaladásával egyre olcsóbbá tenné ezt a megoldást. Meg kell még említeni, hogy a tokamakok mellett más toroidális konfigurációk fejlesztése is folyik, melyek potenciális előnyökkel kecsegtetnek, azonban még kb. egy generációval a tokamakok mögött járnak.

Mikor lesz fúziós erőmű?

A 2. ábra is érzékelteti, hogy a mai tokamakberendezések nagy méretűek és igen bonyo-

lultak. Az ITER berendezés a JET-nél kb. kétszer nagyobb lesz, a DEMO pedig még akár 50 %-kal ismét nagyobb lehet. Ilyen méretű és bonyolultságú berendezések tervezése, megépítése, kipróbálása egyenként kb. tíz évet igényel. Ennek megfelelően az ITER kísérlet indulását 2016-ra tervezik, először hidrogén-, majd deutériumplazmában. A nagyteljesítményű DT kísérletek valamikor a 2020-as évek elején kezdődhetnek csak. Ezzel párhuzamosan tervezik az IFMIF kísérletet, tehát a 2020-as évek közepére várható, hogy meglesz az összes technológiai információ, hogy a DEMO energiatermelő reaktor terveit befejezzék. Ennek megfelelően a DEMO indítása a 2030-as évek közepére, tehát mostantól kb. harminc évre várható. Ez a szám kísértetiesen emlékeztet az 1950-es évek végén elfogadott nézetre, amikor szintén harminc évre becsülték az első fúziós erőmű megvalósítását. Figyelembe kell azonban venni, hogy

a jelenlegi becslés teljesen más körülmények között született. Az 1950-es években még abban sem volt megállapodás, hogy milyen mágneses geometriát kellene használni nem is beszélve arról, hogy az akkori berendezésekben a maximális hőmérséklet a szükséges érték egy százalékát sem érte el. Evvel szemben ma a plazmák előállításának technikája kiforrott, a bizonytalanság inkább a tartós üzemeltetésben, az optimális szerkezeti anyagokban, a hűtési megoldásban van. A mai információk alapján jó – bár nem 100 % – eséllyel állíthatjuk, hogy három évtized múlva megkezdődhet a fúziós energiatermelés kora. Mivel a technológia elterjedése még ezután is évtizedeket fog igénybe venni, egészen biztos, hogy a fúziós energiatermelés a 21. század első felében nem fog jelentősen hozzájárulni a fosszilis energiahordozók pótlásához.

Kulcsszavak: *magfúzió, plazma, tokamak*

IRODALOM

A Conceptual Study Of Commercial Fusion Power Plants, EFDA-RP-RE-5.0 (a weben: www.efda.org)
http://www.efda.org/eu_fusion_programme/scien-

[tific_and_technical_publications.htm](#)
Braams, C. M (Kees) – Stott, Peter E. (2002): *Nuclear Fusion* – Institute of Physics Publishing, Bristol

