

A FÚZIÓ JÖVŐJE, AZ ITER JELENE

2018.11.22.

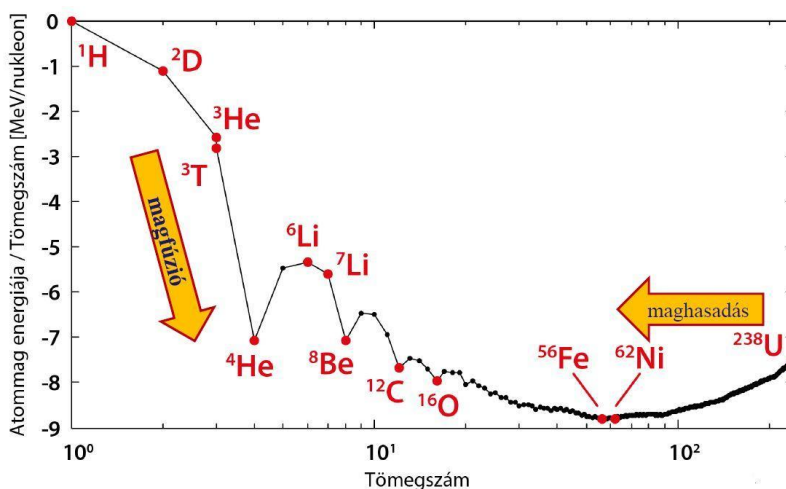
Az Energetikai Szakkollégium VET 125 emlékfélévének hatodik előadása során betekintést nyerhettünk a magfúzió alapuló energiatermelés világába. A fúzió fizikai alapjaitól kezdve Dr. Pokol Gergő, egyetemi docens, a BME Nukleáris Technikai Intézet munkatársa kalauzolt minket az érdekesebbnél érdekesebb témákon keresztül egészen az ITER kísérleti berendezésig. Megismerkedtünk a jövőbeli fúziós erőművek előnyeivel és hátrányaival, bemutatásra került a fúziós energiatermelés felé vezető út, és az előadó elemezte az egyes alternatívákat is.

A FÚZIÓ ÉS A FÚZIÓS ENERGIATERMELÉS ALAPJAI

Dr. Pokol Gergő előadását a Fúziós Ügynökség nagykonferenciáján hallottakkal kezdte. Számos előadó kiemelte, hogy az energiaszektor befektetői potenciálisan jövedelmező projektekbe fektetnek be leginkább, emiatt az egyik legfontosabb kérdéskör, hogy hogyan mutathatjuk meg, hogy egy fúziós erőmű igenis megtérülő befektetés. Számos másik előadás reflektált a magfúzió alapuló energiatermelés okaira; miért is szeretnénk fúziós erőművet létrehozni, ha a jövő villamosenergia-rendszerében nem biztos, hogy erre lesz szükség. Ezeket az aktuális igényeket és kérdésköröket jártuk körbe a fizika irányából elindulva részben energetikai aspektusokon keresztül.

A villamosenergia-termelésnek négy fő szempontja van: bőséges üzemanyag, tiszta technológiai folyamatok, amelyek nem károsítják a környezetet, biztonság és szabályozottság. Dr. Pokol Gergő elmondta, hogy a magfúzió mindegyik kritériumnak megfelelhet; az előadás folyamán bemutatta, hogy milyen szinten és milyen feltételek mellett. Ha az egy nukleonra eső kötési energia diagramját vizsgáljuk, feltűnik, hogy a görbe kezdetben nagyon meredek, magfúzióval fajlagosan sokkal több energiát tudunk felszabadítani, mint maghasadással, ezért a fúzió során a könnyű atommagok egyesítését

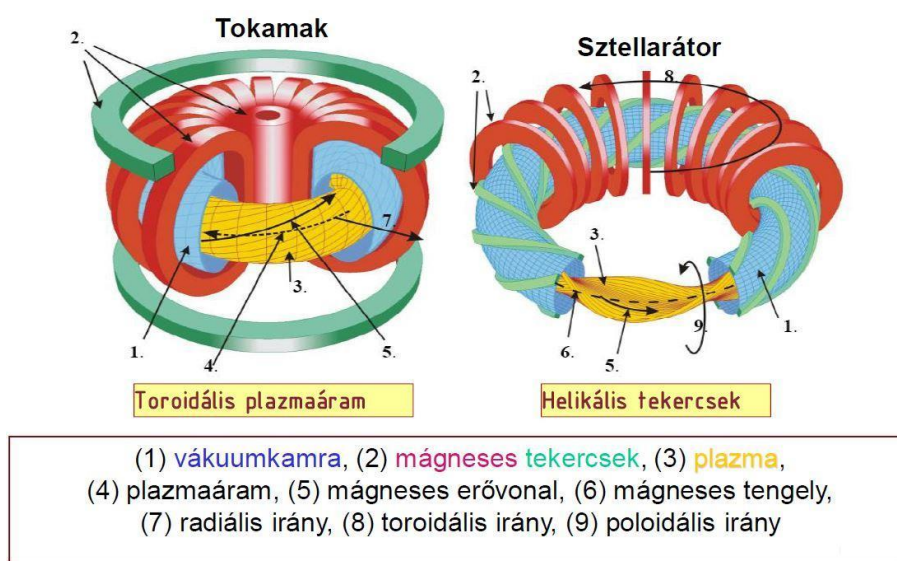
célozzuk meg. Ezáltal kis üzemanyag-mennyiséggel nagy mennyiségű energiát szabadíthatunk fel, például naponta néhány 100 g könnyű atommagból 1 GW energiát termelhetünk a magfúzió segítségével. Az elegendő üzemanyag-mennyiséghez meg kell vizsgálni, hogy milyen reakciókkal állíthatjuk elő a legtöbb energiát. A legideálisabb folyamat a fúziós energiatermelés céljából a deutérium-trícium (D-T) reakció, hiszen ebben az esetben szabadul fel a legtöbb energia és ehhez van szükség a legalacsonyabb ütköztetési energiabefektetésre. A deutérium nem drága, viszonylag könnyen beszerezhető – például nehézvíz, minden hétézredik vízmolekula egy nehézvíz molekula – és sok van belőle. Ezzel ellentétben a reakció másik eleme, a trícium már problémásabb, mivel radioaktívan bomlik és körülbelül 12 év a felezési ideje valamint csupán néhány 100 kg van belőle összesen a Földön. Ezek szerint valahogyan elő kell állítani a szükséges tríciumot; erre az elképzelések alapján van lehetőség a fúziós reaktor köpenyében, ahol neutront lítiummal ütköztetve – amiből szintén bőven van például a tengervízben – trícium és hélium keletkezik, ám ebben az esetben kerülni és kezelni kell a neutron aktiválódását a reaktor falával. Az üzemanyagciklus elindításához tehát kell egy kis mennyiségű trícium, amely a deutériummal ütközve héliumot és neutron részecskét hoz létre, amely felhasználható a lítiummal való ütköztetésre. A fúzió legnagyobb előnye a maghasadással szemben az, hogy a mellékterméke, a ^4He stabil izotóp, azaz nem radioaktív.



1. ábra: Kötési energia diagram

A deutérium-trícium gyorsítóval történő energiatermelésre tett kísérletekből hamar kiderült, hogy fúziós energia csak termikus közegben termelhető. A próbálkozások ezt követően a plazma halmazállapotban történő fúziót vették irányba. Ez nem más, mint az anyag légnemű halmazállapot utáni állapota nagymértékű melegítés hatására – univerzumunk látható anyagának többsége ilyen.

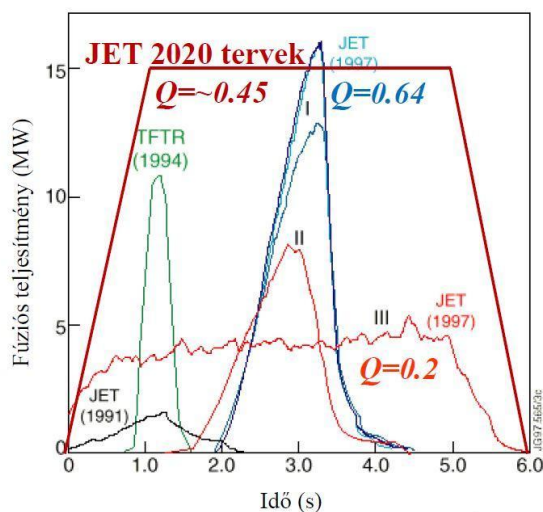
A fúzióhoz szükséges körülbelül 200 millió Celsius-fok hőmérsékleten a plazma kedvezőtlenül viselkedik: a forró híg plazmában az ionok és az elektronok szabad úthossza nagy, így a rendszer gyakorlatilag ütközésmentes. Ezt a problémát oldja meg a mágneses összetartás, amely a Lorentz-erőn alapul. Megfelelő mágneses behatás az erővonalak mentén csavarpályára kényszeríti a részecskéket (kis átmérőjű spirálpályán mozgó elektron körül nagyobb átmérőjű spirálpályán mozog az ion), így azok nagyságát nem, csak az irányukat változtatja.. Akkor működik igazán jól és biztonságosan egy ilyen berendezés, ha a reakciótérben ritka gáz, nagy vákuum van. A mágneses összetartás megvalósításához toroidális geometria használandó. Legelterjedtebb berendezéstípusai a tokamak, amely ilyen toroidális tértekercek és a központi szolenoid által hajtott plazmaárammal működik és éri el a kívánt helikálisan felcsavart mágneses teret, és a sztellarátor, ami különleges formájú tekercek segítségével éri el ugyanazt a mágneses teret.



2.ábra: A tokamak és a sztellarátor

A plazma mágneses összetartása így már működik, azonban a közepen lévő transzformátor réztekercseinek nagy fogyasztása és melegedése miatt szupravezető tekercsre van szükség, a plazma saját maga által keltett mágneses tér pedig az összetartó mágneses térrel erősen nemlineáris rendszert alkot. A létrehozott plazmában a részecskék közti átlagos szabad úthossz habár kicsi, de nem elhanyagolható (10-1000 m). Emiatt a plazmában nem diffúzív, hanem konvektív transzport alakul ki, így a kis instabilitások miatt örvények jönnek létre, ez a plazma turbulencia, amely szélessávú zajt kelt.

A fúziós reaktorok energiaszorzozási tényezőjét Q -val jelölik; ez adja meg a felszabaduló fúziós teljesítmény és a külső plazmafűtés teljesítményének hányadosát. Az eddigi kísérleti rekord 1997-ben volt, a JET fúziós kísérleti berendezésnél 0,64-es szorzozási tényezőt mértek. A tervek szerint a 2020-ra úgy szeretnék 0,45-ös arányt elérni a JET-tel, hogy ne csak tranzienst, hanem 4 másodpercig stacioner állapotú legyen a folyamat. A fúziós plazma energiamérlegét javíthatjuk az alfa-részecskék kihasználásával, ugyanis a reakcióban felszabaduló energia 20%-át ezek viszik el. Ha össze tudjuk őket a plazma többi részecskéjével tartani, akkor az ütközés által képesek lesznek fűteni a plazmát. Megfelelő körülmények között tehát a plazma begyűjthet, és az égési pontban stabil állapotban maradhat. Tehát ha a mágnesesen összetartott plazma begyűjt, akkor akár pozitív energiamérleget is ki lehet hozni, viszont impulzusüzemben nem tudjuk teljesen megspórolni a felfűtés költségét.



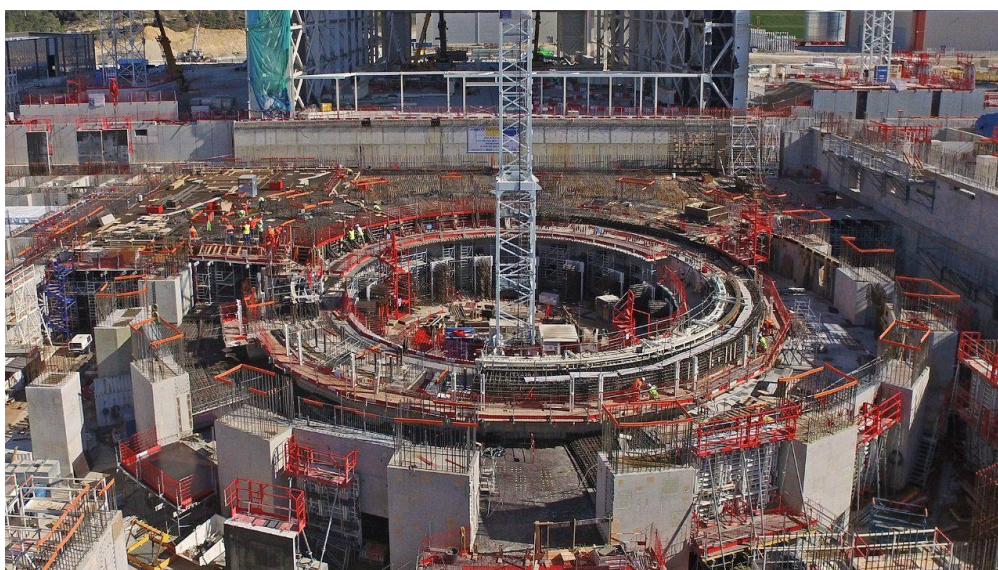
3.ábra: Energiaszorzozási tényező diagram

EURÓPAI FÚZIÓS KUTATÁSOK

Az európai fúziós kutatások a mágneses összetartású berendezéseket veszik figyelembe. Az egyik legismertebb kísérleti berendezés az ITER, mely világméretű összefogással épül a francia Cadaracheban. A kutatás célja a 10-szeres energiasokszorozás elérése és a reaktortechnológiák tesztelése. A kitűzött beindítási időpont 2025. november 25. 12:00. A másik nagy projekt, az EUROATOM program célja 100 MW elektromos áramot termelni a hálózatra a DEMO fúziós reaktorral, melyet az ITER után fognak megépíteni, az abból szerzett tapasztalatok alapján. Ez a tervek szerint 2050 körül fog bekövetkezni. A fúziós energiatermeléshez vezető úton halad tehát az EU-DEMO, előrehaladását pedig számos párhuzamosan futó kutatás és fejlesztés segíti; ilyenek az ITER, a hatékonyabb alapanyagkutatás, általánosan alacsonyabb beruházási költségek és innovációk. De mik a konkrét célok?

A plazma üzemállapotainak kutatásával annak egy reaktor-kompatibilis állapotát szeretnék kifejleszteni. Ezzel lehetőség nyílna állandósult állapotú tokamak üzemmódra, és magas lesugárzott energiahányad mellett is jó összetartás lenne elérhető. Ilyen alternatív plazmaszenárió például a szuper H mód. A hővezető rendszerek fejlesztését a divertor hőterhelésének kezelése motiválja elsősorban, melynek megoldásában az alapelképzelés a plazma lecsatolt üzemállapota. A reaktor felépítésénél létfontosságú a megfelelő anyag kiválasztása. Ennek érdekében olyan neutronsugárzásnak ellenálló anyagok után kutatnak, amely erős, nem aktiválódik és ellenáll a magas hőmérséknek. Az egyik lehetséges megoldást a ferrites-martenzites acélok nyújtják, ezeket az EUROFER kutatja. A trícium-önellátás kutatásának célja, hogy a fúziós erőműben neutron felhasználva a köpenyben meg kell termelni az elégetett trícium mennyiségét és ezt követően pedig önellátóvá kell tenni a reaktort; ezt vizsgálják az ITER tesztköpeny-moduljaiban és a DEMO teljes tríciumtermelő köpenyében. Az inherens biztonság kiemelkedő fontosságú; nem elég, hogy a fizikai folyamatok biztonságosak, a passzív biztonsági filozófiát is érvényesíteni kell egészen a kezdetektől indulva. Ennek egyik sarokpontja a tríciumkezelés, ebben van még hova fejlődni. A DEMO rendszerszintű tervezése és részrendszereinek fejlesztése során az a cél,

hogyan az ITER építési tapasztalatait felhasználják. Így lehetővé válhat a fűtések hatásfokának javítása és a leállási idők minimalizálása nagy, cserélhető elemekkel. Kérdéses, hogy kell-e egyáltalán folytonos működés? Szabályozó funkcióban rövidebb működés is elég lehet, és megfelelően méretezett szekunder-körben pedig lehetne az újraindításhoz szükséges hőt tárolni. Ami a költséghatékony technológiákat illeti, az előzetes számítások szerint az alapkonceptió sem reménytelenül drága. Habár a beruházási költség magas, a külső költség alacsony, a cél az energiaár versenyképességét javító technológiák felfedezése – ilyen lehet például a magashőmérsékletű szupravezető technológia. A sztellarátorok területén is folynak a kutatások, elsősorban a HELIAS elnevezésű sztellarátor koncepciójának a fejlesztése a cél, amely egyelőre szép eredményeket szolgáltat. Gyakran felmerülő gondolat, hogy a fúziós reaktorok túl nagyok, és vajon lehetne-e gyorsabban eredményeket elérni kisebb berendezésekkel? Egyedül az MIT egyik programja foglalkozik ezzel kérdéskörrel úgy, hogy az elképzelésük nem áll túlságosan messze a valóságtól. Eszerint magashőmérsékletű szupravezetőkkel erősebb mágneses tér hozható létre, így a berendezés összességében kisebb lenne. Az ötlet hátulütője, hogy a reakcióban keletkező neutronok miatt a köpenyeknek ugyanannyi hely kell azok elnyelése miatt, ilyen méretskálán pedig kritikus a hőelvezetés megfelelő megoldása.



4.ábra: Az ITER jelenlegi állapota

Összefoglalásként tekintünk vissza az ideális energiaforrás négy fő szempontjára, és vizsgáljuk meg ezek alapján a fúziós energiatermelést. *Van bőséges üzemanyag?* Igen, hiszen rendkívül kevésre van szükség az adott reakcióhoz, melyek közül a legcélszerűbb pedig a D-T fúziója, hiszen deutérium bőségesen van mindenhol, ahol van víz. Trícium viszont gyakorlatilag nincsen a természetben, így azt lítiumból kell kitenyészteni, amely szintén elérhető. *Tiszta?* Az energiatermeléshez szükséges reakciókban nem keletkeznek radioaktív izotópok, de a felaktiválódással és a tríciumszivárgással vigyázni kell. *Biztonságos?* Láncreakció és megszaladás nincsen, a remanens hő leálláskor passzívan kezelhető. A radioaktív anyag viszont jelen van, így a működés során minden fázisban fenn kell tartani a mérnöki gátakat. *Szabályozott?* A plazma teljesítménye perces időskálán változtatható, de ezt tolerálnia kell a technológiának. A stabil üzemállapotokat még kutatják, és a folyamatos működés sem triviális. Mindezek ismeretében Dr. Pokol Gergő szerint, az első erőművek a 2050-es, 2060-as években épülnek majd meg, egy optimista verzióban pedig a 2100 előtti években terjed el a fúziós energiatermelés – ha megéri.

Molnár Martin

Az Energetikai Szakkollégium tagja