

A FÚZIÓ MÉRNÖKI KIHÍVÁSAI*

Vízváry Zsolt

United Kingdom Atomic Energy Authority, Egyesült Királyság

E-mail: Zsolt.Vizvary@ukaea.uk

Mára oda jutott a fúziós kutatás, hogy egyre inkább fúzióserőmű-prototípusokról beszélünk fúziós kísérletek helyett, és a plazmafizikai kutatások mellett egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a technológiai fejlesztések. Tehát a fúzió a tudományos kutatásból technológiai fejlesztéssé alakul, ezzel együtt fizikai kutatásból mérnöki kihívássá válik.

Az extrém fúziós körülmények következtében rengeteg mérnöki feladat áll előttünk. Talán a legelőrehaladottabb fejlesztési irány a mágneses összetartású fúziós kutatás. Ebben a koncepcióban rendkívül erős és folytonosan működő elektromágnesekre van szükség, még hozzá erőművi méretekben. A hosszú idejű, folyamatos működéséhez gyakorlatilag elengedhetetlen a szupravezető mágnesek alkalmazása, mivel a hagyományos vezetők ellenállási vesztesége rendkívül nagy villamosenergia-igénnyel és jelentős hőterheléssel járna. Nagy remény fűződik a magas hőmérsékletű szupravezetőkhöz (HTS – *high temperature superconductor*), hiszen azzal, hogy nem 20 K alatt, hanem 80 K körül tudnak működni, sok energiát (és pénzt) lehet spórolni. Azonban az ilyen szupravezető mágnesek építése még gyerekcipőben jár a fúziós igényekhez képest. A technológia fejlesztése rendkívül vonzó, hisz az ilyen mágnesek nemcsak a fúzióban tudnak energiát spórolni és költséget megtakarítani, de más iparágakban is (pl. orvostechika – MRI, CT stb.).

A legnagyobb energiamegtérüléssel járó és a legkönnyebben elérhető reakció a deutérium és trícium hidrogénizotópok (D-T) fúziója, melynek során egy héliumatom és egy nagy energiájú neutron keletkezik. A felszabaduló energia 80%-át a neutron hordozza. Ennek két nagyon fontos következménye van: 1) ahhoz, hogy a D-T fúzióból energiát termeljünk, a neutronok által elvitt energiának a nagy részét vissza kell nyernünk, 2) a neutronok szerkezeti anyagokra való hatásával foglalkozni kell. Fontos még azt is megjegyezni, hogy bár deutériumból van bőven a természetben, a trícium egy rendkívül ritka anyag, mert rövid felezési idejű (~12,3 év) izotóp. Az 1) problémára, a neutronenergia kinyerésére és a trícium üzemanyag gyártására választ adhat az, ha a fúziós reak-

torban lítiumot (vagy Li-alapú vegyületeket) tartalmazó, úgynevezett tenyésztőköpeny-elemeket helyeznek el. A neutron egyrészt a lítiumot hasítva tríciumot hoz létre, így a fúziós reaktor a trícium üzemanyag szempontjából önfenntartó lesz. Másrészt a neutronok energiájából és a tríciumátalakítási reakcióból felszabaduló hőt a köpeny-elemekből el kell vezetnünk, hogy a fúziós reaktor villamosenergia-termelését megoldjuk. A tríciumtenyésztő kazetták ennél fogva nagyon komplex mérnöki szerkezetek, amikre több koncepciót is kidolgoztak.

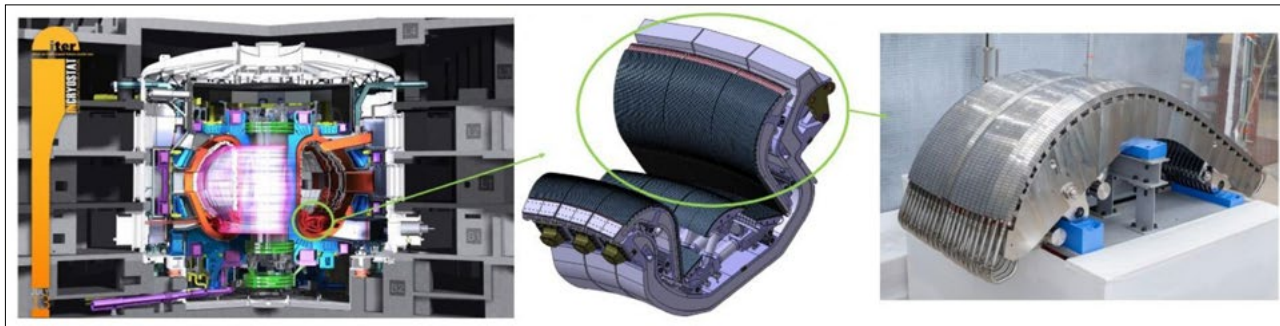
Ez azonban ismét egy olyan kulcsfontosságú technológia, amelynek fejlettségi szintje egyelőre még viszonylag alacsony. A jelenleg nemzetközi összefogásban épülő fúziós reaktor, az ITER egyik fő feladata pontosan ezeknek a lítiumalapú teszt-köpenymoduloknak a tervezése és tesztelése. Az ITER építésének késése miatt az elmúlt néhány évben más, kifejezetten a tríciumtenyésztő technológia kifejlesztését célzó programok indultak, mint pl. a LIBRTI az Egyesült Királyságban vagy az EU-VNS a Eurofusion kezdeményezésére. A tríciumtenyésztés fontos kérdése, hogy így megtermelhető-e és kinyerhető-e elegendő üzemanyag egy fúziós erőmű folyamatos működéshez. Mint minden mérnöki folyamatban, itt is vannak veszteségek, nem minden neutront tudunk tríciumtenyésztésre befogni, és a megtermelt tríciumot sem tudjuk 100%-os hatásfokkal kinyerni. A cél, hogy egy későbbi erőműben a tríciumtenyésztést arány (TBR – *tritium breeding ratio*) valahol 1,05 és 1,15 között legyen. További fontos kérdés, hogy hogyan kezeljük azt a radioaktív tríciumot, ami elvész a folyamatban.

A 2) probléma a neutron okozta anyagszerkezeti hibák kezelése. A neutronok nemcsak a tenyésztőköpenyekben lévő lítiummagokat alakítják át, hanem a reaktorban lévő összes szerkezeti anyagot is bombázzák. A nagyenergiás neutronok részben transzmutációt hoznak létre a szerkezeti anyagokban is, részben az egyes atomokat kilövik a kristályrácsban elfoglalt helyükről, így megváltoztatják az anyag fő mechanikai tulajdonságait. Az anyagskárosodás megértése, modellezése mellett új – neutronsugárzás-álló és -tűrő – anyagok fejlesztése is előtérbe került. A fúziós reaktorokban számos különleges fém és ötvözetet alkalmaznak, például volfrámot a plazmával érintkező felületeken, rezet és rézötvözeteket



Dr. Vízváry Zsolt Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) 1999-ben végzett gépészmérnökként, majd 2005-ben ugyanitt doktorált. Magfúziós pályafutását 2005-ben kezdte a JET ITER-like Wall projektjében, az EFDA (European Fusion Development Agreement) kiküldött szakértőjeként a BME képviseletében. 2009 óta a UKAEA alkalmazottja, 2019 óta a Főmérnöki Irodáján belül működő Modelllezési és Tervezési Csoport vezetője. Tokamak berendezések különböző komponenseinek elektromágneses, termikus és mechanikai modellezésével foglalkozik. Emellett csoportvezetői feladatokat és projektek műszaki irányítását, koordinálását végzi.

* Az Egyesült Királyság Atomenergia Hatósága (*United Kingdom Atomic Energy Authority*) hozzájárul ahhoz, hogy a Fizikai Szemle az alábbi képeket felhasználja Vízváry Zsolt „A fúzió mérnöki kihívásai” című cikkének publikálásához, az Egyesült Királyság Atomenergia Hatóságára való megfelelő hivatkozásával és az Egyesült Királyság törvényeivel összhangban. Ez az engedély nem kizárólagos, csak erre a konkrét felhasználásra korlátozódik, és nem foglalja magában a képek módosításának vagy más kiadványokban való felhasználásának jogát.



1. ábra. Az ITER divertorának függőleges pajzsa, volfrám csempék, rézötvözet hűtőcsatornák acél kazettára szerelve (Forrás: ITER Organization, <http://www.iter.org/>)

a hőelvezetésben (1. ábra), valamint speciális acélokat a szerkezeti elemekben – ezért már a szükséges anyagjellemzők mérése szoba- és emelt hőmérsékleten (konceptiótól és anyagtól függően $\sim 200\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) is kihívás. A nagyenergiás fúziós neutronbesugárzás hatásainak mérése csak alacsony dózis mellett lehetséges, és ott is csak különleges, kisméretű mintákon. A magasabb dózis hatása majd csak a jövőbeli fúziós reaktorokból kivett mintákon lesz vizsgálható.

Az ilyen különleges anyagokból készült alkatrészek gyártása sem egyértelmű, az anyagválaszték növekedésével és a gyártási módszerek fejlődésével azonban újabb lehetőségek nyílnak.

Példa erre egy 3D nyomtatással készült fémalkatrész, amit a JET-hez (Joint European Torus) fejlesztettek. Egy bonyolult geometriájú apertúrára volt szükség annak teszteléséhez, hogy különböző tükröfelületeken milyen lerakódások keletkeznek a reaktor működése során. Mivel a fémek 3D nyomtatása (SLM – *selective laser melting* technológiával) még rendkívül új volt, egy technológiaminősítő programot is végre kellett hajtani, hogy

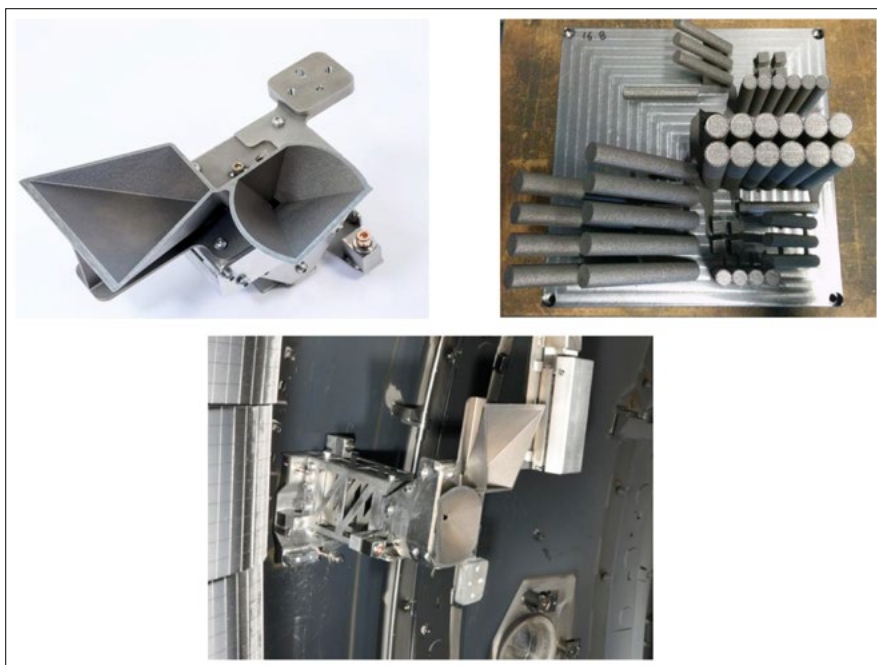
biztosítani lehessen azt, hogy az így gyártott alkatrész anyagjellemzői megfelelően közel legyenek az adott anyag névleges értékeihez. Ehhez próbadarabokat is készítettek az alkatrésszel együtt (2. ábra).

Szintén fontos kutatási irány a hatékony neutronelnyelő anyagok fejlesztése. Alapvetően nemcsak azt kell elérni, hogy a neutronok túlnyomó többsége a tríciumtenyésztő köpenyelemben hasznosuljon, hanem azt is, hogy a reaktoron kívülre ne tudjon kijutni, illetve védeni kell a kritikus reaktoralkatrészeket és berendezéseket is. Ehhez új, magas neutronelnyelési képességű anyagokra van szükség. Különösen fontos a korábban említett szupravezető mágneses tekercsek neutronárnyékolása, részben hőszigetelési szempontból is.

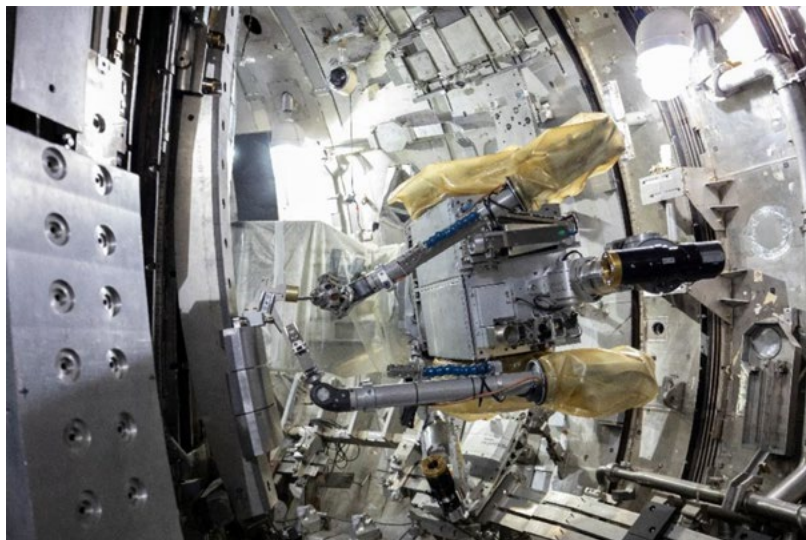
Az várható, hogy az első fúzióerőmű-prototípusok főleg a jól ismert, azaz a hagyományos atomerőművekben is használt acélfajtákkal fognak indulni. Bár ezek az anyagok várhatóan nem alkalmasak a hosszú távú üzemeltetésre, károsodásuk vizsgálata információt szolgáltat majd, hogy milyen módosítások a szükségesek az első kereskedelmi erőművek indulásához. A fúziós célokra már

kifejlesztettek speciális acélokat elsősorban a neutronaktiválódás csökkentésére (ferrites-martenzites acélok, Európában Eurofer97 vagy Japánban F82H), azonban ezek használhatósága pl. az üzemi hőmérséklet szempontjából még kérdéses, és valószínűleg további fejlesztést igényel (vagy újabb, más anyagok lesznek szükségesek).

Azonban nem szabad azt sem figyelmen kívül hagyni, hogy az új anyagok kifejlesztése, tesztelése, rendkívül költséges és időigényes, emiatt egyre nagyobb szerepet kap az anyagok mikroszerkezeti modellezése (*design by fundamentals*). A hosszú távú cél, hogy számítógépes modellezéssel előre jelezhető legyen az anyag viselkedése, és tulajdonságai, anyagjellemzői nagy pontos-



2. ábra. 3D nyomtatott alkatrész a JET-ben. Balra fent: az apertúra, jobbra fent: a próbadarabok, lent: a telepített alkatrész (Forrás: ©2016 UKAEA)



3. ábra. Alkatrész-telepítés robottechnikával (Forrás: ©2023 UKAEA)

sággal kiszámíthatók legyenek. Ez is egy olyan terület, ami nem csupán a fúzió számára lesz hasznos, hanem bármilyen olyan iparágban, ahol új anyagok fejlesztése szükséges (űrkutató, repülés, orvostudomány stb.). A számítástechnika további fejlődése is szükséges ahhoz, hogy ezekkel a mikroszerkezeti modellekkel a makroszkopikus viselkedés modellezése valósággá váljon, de a kezdeti lépéseket már megtettük ezen a területen is.

A plazmadiagnosztikai eszközöknek, amik segítenek a reaktor irányításában és szabályozásában, működniük kell a reaktorban uralkodó rendkívül mostoha körülmények között is. Ez leszűkíti a használható eszközök típusát és számát is. Ugyanakkor manapság minden mérnöki területen alapvetővé vált a modellezés (pl. végeselem-, áramlástan vagy sztochasztikus neutronmodellek). Kulcsfontosságúvá válik emellett a digitális iker (*digital twin*) fejlesztése, amely segítheti, kiegészítheti a diagnosztikai eszközöket. Digitális iker alatt olyan rendszerszintű szimulációt értünk, amely valós időben, a diagnosztikai mérések figyelembevételével párhuzamosan fut a reaktorral (erőművel), és szükség esetén be is tud avatkozni a rendszerbe (pl. vészleállítás).

A fúzióknak még nincsenek ipari szabványai. Több fronton tesznek erőfeszítéseket a fúziós szabványok létrehozására mind Európában, mind Amerikában. Alapvető cél, hogy a drága, különleges anyagokból épült reaktor ne menjen tönkre. Azonban a jelenlegi atomerőművekre vonatkozó szabványok túlságosan szigorúak, hiszen a fúziós reaktor nem tud kritikus állapotba kerülni. A jelenlegi fúziós reaktorok tervezésénél általában a nyomástartó edények szabványait használják, de pont az új típusú anyagok és gyártástechnológiai megoldások miatt még sok mérnöki adat hiányzik. Az alkatrészek terhelése is sokszor nem megszokott, hisz nem csupán nyomással (vagy vákuummal) és hőmérséklettel kell számolni, hanem elektromágneses erővel is, amelyek bonyolultabb feszültségállapotokat okozhatnak, és ezeket a terhelési ciklusnál is figyelembe kell venni.

Bár magából a fúziós reakcióból nem keletkezik sugárzó hulladék, a reaktor szerkezeti anyagai aktiválódnak a neutronok bombázása következtében. Továbbá, a működés során a reaktor falában valamennyi trícium is elnyelődik (ennek egy része ugyan visszanyerhető). Ezek miatt nyilvánvaló, hogy a reaktor karbantartása csak robotokkal végezhető el. Már a JET-et is úgy tervezték, hogy a D-T kísérleti kampányok után minden vákuumedényen belüli művelet távolról, robotkarokkal végezhesse el (3. ábra). Ez a fajta karbantartás olyan infrastruktúrát igényel, amit már a reaktor tervezése során figyelembe kell venni. A vákuumedényben lévő alkatrészeket úgy kell tervezni, hogy a robotkarok, szerszámok

csatlakozni tudjanak azokhoz, továbbá elegendő hely legyen a reaktor körül a szükséges szerszámok, alkatrészek szállításához. A felaktiválódott vagy tríciumot tartalmazó alkatrészek szállítása kizárólag konténerekben történhet a radioaktív alkatrészek javítására vagy tárolására alkalmas létesítményhez.

Hasonló a helyzet a reaktor (erőmű) életútjának végén. Ez szintén egy új terület, még soha nem szedtek szét fúziós reaktort kizárólag robotokkal. A JET 2023-ban befejezte működését. Jelenleg zajlik a JDR (*JET decommissioning and repurposing*) projekt, ami az első kísérlet egy fúziós reaktor leszerelésére, és rengeteg tanulságot, valamint információt szolgáltathat jövőbeli reaktorok tervezéséhez – hiszen csakúgy, mint a karbantartást, a leszerelést is már a tervezéskor figyelembe kell venni.

A fentiekből látható, hogy még rengeteg technológia mérnöki fejlesztésére van szükség ahhoz, hogy a fúziós erőművek valósággá váljanak. Azonban az is látható, hogy ezek a fejlesztések nemcsak a fúzió számára hasznosak, hanem más, hasonló vagy akár hétköznapi innováció táptalajául is szolgálhatnak. Ezek a technológiai „spin-off”-ok már rövid távon is meg tudnak térülni (és gazdaságélénkítő hatásuk lehet). Ez is lehet az oka, hogy a fúzió iránti érdeklődés megnövekedett. Ezt jelzi az is, hogy az állami kutatóintézetek mellett megjelentek a fúziós magáncégek is az egész világon. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) adatai alapján ma jelenleg 16 reaktor épül világszerte, ebből 11 állami és 5 magánjellegű, ugyanakkor a jövőben 61 reaktort terveznek, amiből csupán 15 állami, a többi 46 magánfinanszírozású.

A fúziós energia valósággá válásához jól képzett, tehetséges fizikusokra és mérnökökre is szükség van a világ minden táján, így Magyarországon is. A magyar kutatók már eddig is számos megépült és jövőben építendő reaktorhoz járultak hozzá, és remélhetőleg ez a részvétel tovább erősödik majd a jövőben.