

AZ „ÚT” A FÚZIÓS ERŐMŰHÖZ, AVAGY AZ ITER-EN INNEN ÉS TÚL

Dunai Dániel

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Fúziós Plazmafizika Laboratórium, Budapest

E-mail: dunai.daniel@ek.hun-ren.hu

Mi is az ITER?

Az ITER latinul annyit tesz, hogy „út”, és valóban: az *International Thermonuclear Experimental Reactor* most épülő fúziós berendezés lehet az út a fúziós különszám megelőző cikkeiben bemutatott fizikai kísérletek mai valóságából az energiatermelő fúziós erőművek jövőbeni világába. Az ITER fő célja annak igazolása, hogy a mágneses összetartás koncepciója plazmafizikai és műszaki szempontból alkalmas lehet jövőbeli fúziós erőművek tervezésére és megvalósítására. A korábbi JET és a többi jelenlegi tokamak-kísérlet a koncepció számos elemének működőképességét egyenként már bizonyította. Az ITER feladata azonban ennél jóval ambiciózusabb: nemcsak a korábbi eredményeket kell egyetlen, nagy léptékű berendezésben integráltan demonstrálnia, hanem a fő célja az erőművekhez nélkülözhetetlen még hiányzó fizikai kísérletek elvégzése és technológiai képességek kifejlesztése. Kutatási terve öt fő pontban [1] foglalja össze azokat a célokat, amelyeket a kisebb kísérleti berendezéseken mindeddig nem sikerült együttesen elérni:

1. *Reaktorreleváns plazmakonfiguráció hosszú távú fenntartása, amiben a plazmafűtés jelentős része a fúziós reakciókból ered:* az ITER célja olyan deutérium-trícium-plazma létrehozása, amelyben a fúziós reakciók során keletkező alfa-részecskék fűtése már meghatározó szerepet játszik. A fúziós szaknyelvben a Q mérőszámot használják a fúziós reakciókban keletkező teljesítmény és a plazmába betáplált külső fűtési teljesítmény arányának leírására. A tervezett $Q = 10$ állapotban a fúziós reakciókban keletkező alfa-részecskék fűtési teljesítménye már meghaladja a külső plazmafűtést, ami fontos, a jövőbeli önfenntartó fúziós plazmák irányában tett lépés.
2. *500 MW fúziós teljesítmény elérése:* Az előző pontban leírt $Q = 10$ elérése, ami 50 MW külső plazmafűtés mellett 500 MW fúziós teljesítményt jelent. A most ismert ütemterv szerint [2] az ITER az 500 MW-os nagy

teljesítményű kísérleteiben a fúziós plazmát 300–500 másodpercig, vagyis kb. 8 percig tudja majd fenntartani. A JET fúziós rekordteljesítménye 16 MW volt, és ezt a teljesítményt is egy rövidebb tranziens plazma-állapotban érték el. A számokból jól látható, hogy az ITER nagyságrendi ugrás az eddigi berendezésekhez képest. A közel 8 perc egy erőmű szintjén nem tűnik soknak, de a plazma energiavesztességét jellemző karakterisztikus időnél mintegy két nagyságrenddel hosszabb, és már lehetővé teszi a plazmaprofilok közel stacionárius állapotának kialakulását és vizsgálatát. Az ITER kutatási programjának [2] egyik hosszú távú célja a 3000 másodperces, $Q \geq 5$ plazmaüzem kifejlesztése is. Fontos megjegyezni, hogy az ITER nem termel a keletkező hőből elektromos áramot, ennek a lépésnek a megvalósítása majd a demonstrációs fúziós reaktorok feladata lesz.

3. *Egy fúziós erőmű technológiáinak integrált demonstrációja és tesztelése:* Az ITER egyik fő célja, hogy átvezessen a mai, kisebb kísérleti fúziós berendezésektől a jövő demonstrációs fúziós erőműveinek a világába. A fizikusok és mérnökök a fúziós erőművekben ténylegesen várható körülményekhez hasonló plazma-állapotokat tanulmányozhatnak, és kifejlesztik majd a későbbi erőműveknek megfelelő plazmarecepteket is. Emellett olyan technológiákat tesztelnek, amelyek az erőművekhez alapvetőek: óriási szupravezető mágneseket, a plazmafűtési és -szabályozási rendszereket, a vákuumtechnikát, a plazmadiagnosztikákat és a mai berendezéseken a JET-en kívül alig létező távirányított karbantartást, amelyek fejlett robottechnikai megoldásokat igényelnek.
4. *A tríciumtenyésztés vizsgálata:* az ITER különböző lítiumtartalmú teszt-köpenymodulokon vizsgálja majd, hogyan lehet a fúziós neutronok segítségével tríciumot előállítani. Ez azért fontos, mert egy jövőbeli D-T fúziós erőműnek a saját üzemanyagát magának kellene megtermelnie. Az ITER azonban nem lesz tríciumönellátó; csak a különböző tenyésztési koncepciókat teszteli. Ahogy e tematikus szám mérnöki problémákat felvillantó cikkében *Vízváry Zsolt* is megjegyzi, a tríciumtenyésztő köpeny azért is kulcsfontosságú, mert egy későbbi erőműben a keletkező hő is leginkább innen kell majd elvezetni, és végül a ma is használt hagyományos turbinákat hajtják majd meg a fúzióban termelt hővel. Fontos megjegyezni, hogy a tríciumtenyésztés érdemi teszteléséhez hosszan fenntartott nagy fúziós teljesítményű



Dr. Dunai Dániel fizikusi PhD fokozatát 2010-ben szerezte az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Számos fúziós berendezés plazmadiagnosztikai rendszereinek tervezésében, gyártásában, telepítésében és üzemeltetésében, a JET, valamint a MAST, majd később a MAST-U tokamak-kísérleteiben vett részt. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Fúziós Plazmafizika Laboratórium (EK FPL) tudományos főmunkatársa, kísérleti plazmafizikus. Szakterülete a fúziós plazmadiagnosztikák fejlesztése, szélplazmabeli fizikai jelenségek elemzése. Az EK FPL-ben az ITER optikai pelletdiagnosztikái, a fúziós reaktorok optikai diagnosztikái fejlesztése és a MAST-U nyálábemissziós spektroszkópia diagnosztikai projektek vezetője.

plazmák kellene. Ezek várhatóan csak a kísérleti program végén lesznek elérhetőek, így ezt a célt az ITER csak viszonylag későn és várhatóan korlátozottan tudja csak teljesíteni. A EUROfusion konzorcium éppen ezért egy kisebb berendezés építését is javasolta (EU Volumetric Neutron Source), amelyen a tríciumtenyésztési koncepciókat rugalmasabban és akár korábban is lehetne tesztelni.

5. *A fúzióerőmű-méretű kísérlet biztonságos működésének demonstrálása:* Az ITER működésének egyik elsődleges célja annak demonstrálása, hogy a 150 millió fokos plazma és a fúziós reakciók erőműméretben is szabályozhatók úgy, hogy a környezetet érő hatások elhanyagolhatók maradjanak. Igazolni kell a fúziós plazma megbízható szabályozhatóságát, illetve a tríciumkészlet, a radioaktív anyagok és a neutronok által aktivált szerkezeti elemek biztonságos kezelését. A nukleáris hatóságok előírásainak megfelelően meg kell mutatni, hogy az esetleges üzemzavarok környezeti következményei korlátozottak maradnak.

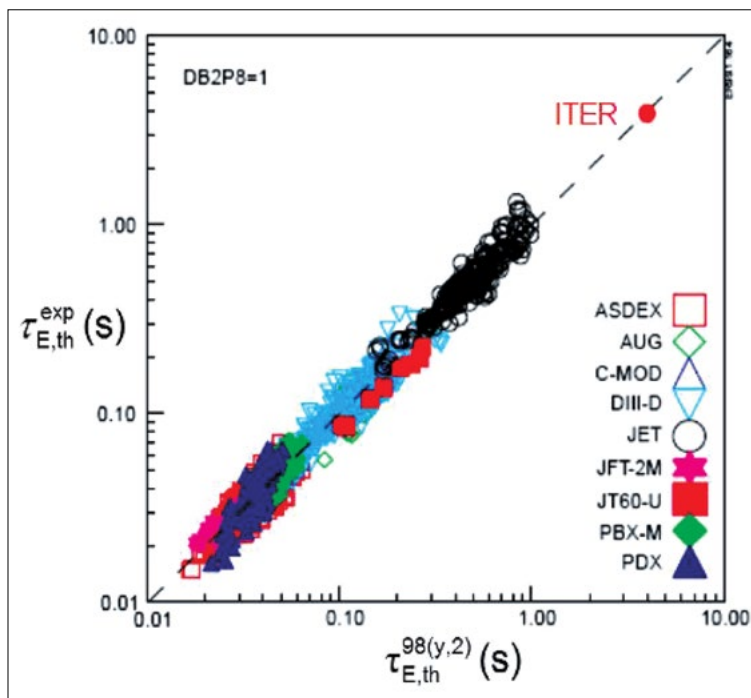
Ha a célokat már megfogalmaztuk, ezek egy adott technológiai fejlettségi szint mellett nagyrészt meghatározzák azt is, hogy milyen – és mindenekelőtt mekkora – berendezést kell építenünk. De hogyan lehet megtervezni egy olyan kísérletet, amely szinte minden fontos paraméterében jelentősen meghaladja elődeit, és ezzel gyakorlatilag egy új berendezésszortályt teremt? Egy ideális világban vesszük a fizikai egyenleteket, amik leírják a plazma viselkedését, vesszük a technológiai korlátokat (pl. mekkora mágneses teret tudunk létrehozni

egy adott szupravezetőmágnes-technológiával) és pontosan kiszámítjuk a szükséges plazmakonfigurációt, ami megadja a berendezés méretét is. A probléma az, hogy jelenleg nincs olyan konzisztens kódrendszerünk, ami a fúziós plazmát és a környezetével való kölcsönhatásokat pontosan leírja. Egy fúziós erőműhöz azt kell elérnünk, hogy elég nagy sűrűségű (n) plazmát, elég magas hőmérsékleten (T) elegendően hosszú ideig (τ_E) tudjunk elszigetelni a környezettől. A kritikus értékek közötti összefüggést a Lawson-kritérium fogalmazza meg:

$$n T \tau_E \geq 3 \cdot 10^{21} \text{ keV s m}^{-3}.$$

A környezettől való elszigetelés hatékonyságát az *energia-összetartási idő* (τ_E) fizikai mennyiséggel jellemezzük. A τ_E értékét a plazmafizikában a fő veszteségi forrás, azaz a turbulens folyamatok határozzák meg – ahogy azt *Cziegler István* ebben a számban található cikke részletesebben is bemutatja. Akkor mi alapján tudunk vagy merünk úgy egy új, az eddigieknél sokkal nagyobb berendezést tervezni, ha nem tudjuk pontosan modellekkel alátámasztani a működését?

A válasz természetesen az, hogy korábbi kísérletek eredményeiből indulunk ki. A fúziós fizikusok a különböző méretű tokamakberendezések kísérletileg meghatározott energia-összetartási idejét adatbázisban gyűjtötték össze, majd statisztikai regresszióval vizsgálták, hogy ez az érték hogyan függ a berendezés működési és geometriai paramétereitől [3]. A fúziós kutatások nemzetközi együttműködését jól példázza, hogy elkészült egy három kontinens berendezéseinek eredményeit összegző adatbázis. Az ITER fizikai tervezése során több empiri-



1. ábra. A több berendezésen mért kísérleti τ_E energia-összetartási idő az ITER IPB98(y, 2) skálázási összefüggése alapján számított értékek függvényében. Az ábra az ITER-re várható energia-összetartási időt is feltünteti (Forrás: F. Wagner [4], fig. 10)

kus energia-összetartási skálázást vizsgáltak; ezek közül az IPB98($y, 2$) összefüggést választották az ITER teljesítmény-előrejelzéseinek referenciaskálázásaként [3]:

$$\tau_{E,th} = 0,0562 I_p^{0,93} B_t^{0,15} \bar{n}_{e,19}^{-0,41} P_{loss}^{-0,69} R^{1,97} \kappa^{-0,78} \varepsilon^{0,58} M^{0,19}.$$

Az összefüggésben I_p a plazmaáram, B_t a toroidális mágneses tér, $\bar{n}_{e,19}$ az elektronsűrűség, P_{loss} a plazma veszteségi teljesítménye, M az ionok izotóptömege, míg a fő geometriai paraméterek közül κ a plazmakeresztmetszet megnyúlása, $\varepsilon = a/R$ pedig az inverz sugárány, ahol R a tórusz nagysugara és a a kissugara. Ez jól láthatóan nem egy, a fizikusok által is szépnek tartott képlet, hanem egy tapasztalati eredmény.

Az 1. ábra a különböző tokamakokon mért energia-összetartási időket hasonlítja össze az IPB98($y, 2$) skálázás alapján számított értékekkel [4]. Az ábrán használt ITER referenciaparaméterek mellett a skálázás mintegy 3,7 másodperces energia-összetartási időt jelez.

Az 1. ábrát nézve az látszik, hogy az ITER-ben várt τ_E kb. háromszorosa a legjobb JET-eredménynek. Ez soknak tűnhet, de a skálázás lefelé közel két nagyságrendben működik. Hasonló, skálázáson alapuló megközelítést használnak máshol is, például a repülőgépek tervezésében a szélcsatornák használatával. A kisebb modellre ható erők gondos mérése révén itt is képesek lehetünk előrejelezni a teljes méretű repülőgépre ható erőket. A kulcskérdés az lesz, hogy van-e olyan fizikai jelenség, ami a kisebb berendezéseken nem jelent meg, ezért nem is része a skálázásnak, de az ITER-nél fontos szerepet játszik. Ezt egyelőre nem tudjuk másként kideríteni, mint hogy megépítjük a berendezést. Az ITER célkitűzései között elsőként felsorolt első pont, azaz, hogy a fúziós reakcióból származó alfa-részecske legyen a fő plazmafűtés éppen egy olyan lényeges fizikai különbség, amely megváltoztathatja a skálázást is.

Az 1988-ban kezdődött ITER tervezése nem egészen úgy alakult, ahogy az előbbi rész sugallja, vagyis hogy a fizikai számításokból megszülettek a konkrét berendezés paraméterei, és a mérnökök megtervezték az eredményként kapott berendezést. Az elmúlt 40 évben a felhasználható technológia és a fizikai modellek párhuzamosan fejlődtek, és a közben keletkezett tokamak kísérleti eredményeknek gyakran keresztülhúzták az addigi tervezés eredményeit. Az ITER elég különleges berendezés ahhoz, hogy egy kicsit részletesebben megvizsgáljuk a történetét.

Az ITER rövid története

Az ITER története kicsit hasonlít a teljes fúziós kutatás történetéhez, amennyiben egy szokatlanul hosszú távú kutatásról van szó, út közben megtorpanásokkal és néha visszalépésekkel. Ha azt mondjuk, hogy az ITER létrejöttéhez vezető politikai folyamatot még Ronald Reagan amerikai elnök és Mihail Gorbacsov szovjet főtitkár indította el 1985-ben [5], akkor valószínűleg az ifjabb olvasók csak történelemórai emlékeikben keresgélnek a nevek után. Aligha van olyan tudományos berendezés, amit ma-

napság építenek, de a megépítését 40 éve döntötték el. Itt párhuzam vonható akár a teljes fúziós kutatással is. Azt hiszem, egyedülálló, hogy van egy olyan kutatási terület, amely már több mint 70 éve egy egyértelmű céllal zajlik országokon és kontinenseken átívelő módon, nevezetesen, hogy békésen is hasznosítani lehessen a magfúzió energiáját, ami a csillagok energiatermelését is biztosítja. Szintén jól példázza az ITER a fúziós kutatások azon sajátosságát, hogy már szinte a kezdetek óta politikai blokkokon átívelő együttműködésben zajlott. Ennek egyik oka persze az volt, hogy a kutatók, vagy inkább az őket felügyelő (tudomány-) politikusok felismerték, hogy rövid távon nem várható, hogy a fúzió meghatározó energiaforrás lesz, és így nem fenyegetett az a veszély sem, hogy a hidegháború idején a másik oldal esetleg versenyelőnybe kerül ezen a kutatási területen. Ennek a nemzetközi együttműködésnek az eredménye volt, hogy 1985-ben, amikor a hidegháború már oldódott, és a két nagy blokk politikusai demonstrálni akarták, hogy képesek összefogni egy jobb jövőért, a fúziót választották jól kommunikálható közös célként.

Tehát amikor az ITER felépítéséről elvi döntés született, akkor a JET (Joint European Torus) még csak két éve üzemelt, és a kutatók éppen csak elkezdték belakni. 1985-ből nézve a későbbi D-T kampányok sikerei, amelyeket Horváth László ebben a számban megjelent cikke is részletez, még csak a távoli jövőnek tűnhettek. Ma szinte csodálhatjuk azt a bátorságot, amellyel az akkori döntéshozók támogatták a fúziós kutatásokat, főleg a következő évtizedek tükrében. Az ITER együttműködéshez Európa (Euratom) és Japán is csatlakozott az induláskor. Amikor elvi döntés született az ITER tervezéséről és építéséről, a berendezés mérete, anyaga és technikai részletei még nem látszottak.

A JET már önmagában is óriási ugrás volt az ismeretlenbe: amikor 1973-ban megkezdték a tervezését, a legnagyobb működő tokamakok plazmatérfogata még csak körülbelül 1 m^3 volt, míg a JET-et mintegy 100 m^3 -es plazmára tervezték. Az ITER legalább ennnyire ambíciózus lépést jelent. A többszöri áttervezés után kialakult mai berendezés mintegy 840 m^3 plazmát tart majd mágneses csapdában, és elkészültekor nemcsak a világ legnagyobb tokamakja, hanem számos műszaki paraméterében is rekordméretű berendezés lesz.

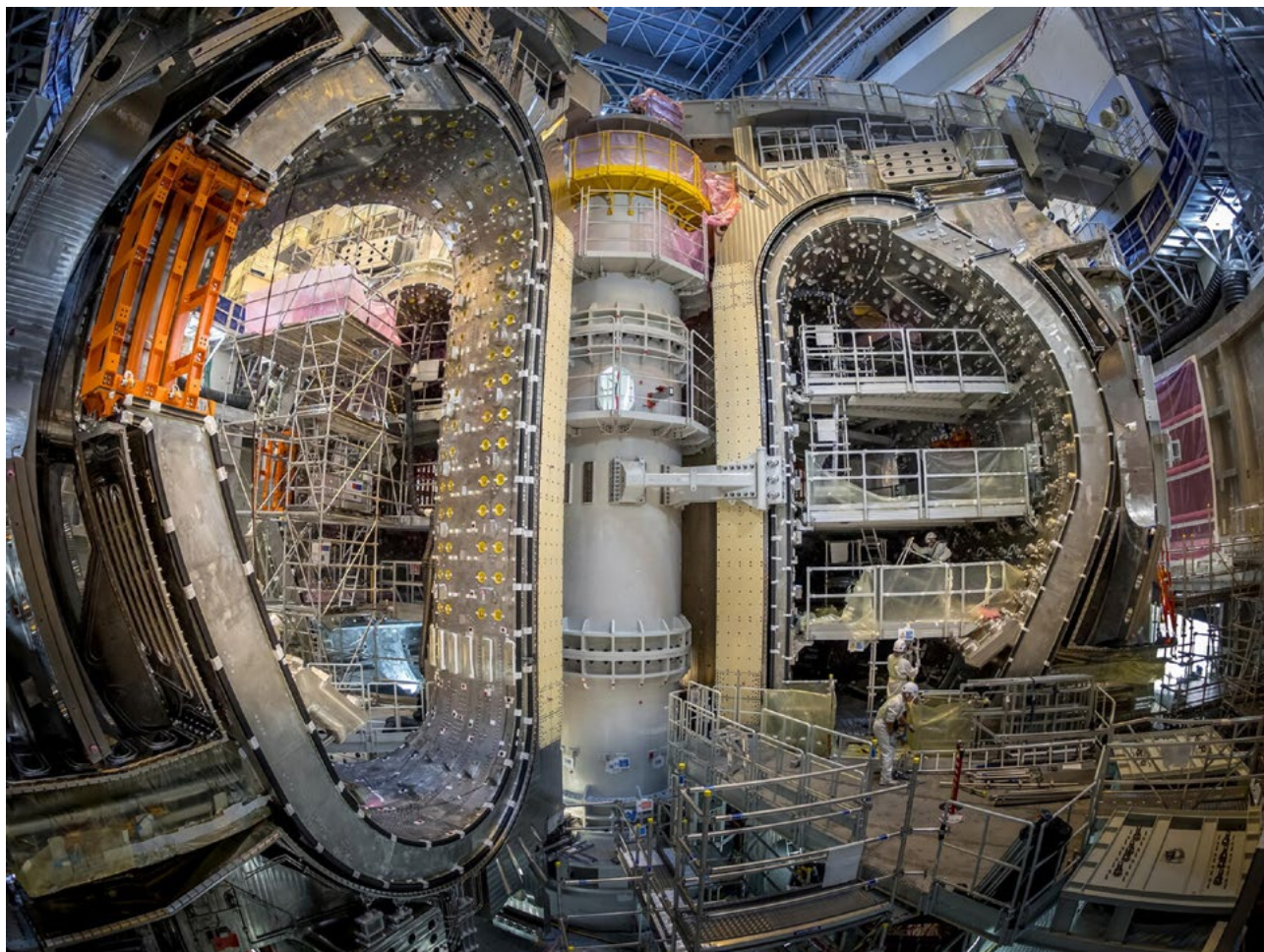
Hosszú és kacsringós út vezetett az 1988-ban megkezdett első koncepció tervektől addig, amíg 2010-ben tényleg elkezdődhetett az építkezés. Itt nem célunk a teljes folyamat felidézése történelmi hűséggel, de érdekességnek mindenképp megjegyzendő, hogy az USA 1998-ban gyakorlatilag kivonult az ITER projektből, hivatalosan elsősorban finanszírozási és költségvetési okokra hivatkozva. A megmaradt három partner a Szovjetunióból lett Oroszország, az Európai Gazdasági Közösségből lett Európai Unió, valamint Japán egy kisebb ITER tervezését és építését döntötte el. Ennek a berendezésnek a koncepció tervei 2001-re készültek el, és lényegében ezt a koncepciót hívjuk ma ITER-nek. George W. Bush elnök 2003-ban jelentette be, hogy az USA ismét csatlakozik

az ITER megépítéséről folyó nemzetközi tárgyalásokhoz. 2003-ban csatlakozott a projekthez Kína és Dél-Korea, majd 2005-ben India is. Így az ITER egy egyedülálló kutatási projekt lett, ami a bolygó lakosságának felét és a megtermelt GDP háromnegyedét fogja össze.

Ez egyrészt biztosítja, hogy az anyagi, technikai és technológiai erőforrások elérhetőek legyenek a projektben, másrészt már a korai időben látszott, hogy ez bonyolult szervezeti struktúrát és lassú döntéshozatali mechanizmusokat jelent majd. Az első ilyen kritikus döntés a helyszín kiválasztása volt. Az eredeti négy partnerből Japán és az EU is erősen lobbizott, hogy az ITER helyszíne az ő területükön legyen, és egy közel két évig tartó patthelyzet alakult ki. A kompromisszumot végül az jelentette, hogy az ITER az EU-ban, azon belül a franciaországi Cadarache-ban épülhet meg, Japán viszont jelentős kompenzációt kapott. Japán nagyobb részvételt kapott az ITER beszállításaiban, és az EU támogatta, hogy az ITER első főigazgatója japán legyen. Ennek a politikai és tudományos kompromisszumnak a részeként született meg a *Broader Approach*, vagyis az EU és Japán közös, Japánban megvalósított fúziós kutatási programja. A program nem egyszerűen a helyszín elvesztéséért adott „kárpótlás” volt: célja az ITER tudományos tá-

mogatása, technológiai kockázatainak csökkentése és a későbbi DEMO erőmű fejlesztésének felgyorsítása lett. Egyik fő eleme a *JT-60SA* szupravezető tokamak megépítése volt, amiről *Szepesi Tamás* írt részletesebben ebben a különszámban. Itt talán érdemes rögzíteni, hogy az EU nagy sikere volt, hogy az ITER végül Európában épül meg. Az akkori politikai szándék az volt, hogy ha a reaktorméretű berendezés itt épül először, akkor ez a tudományos presztízsen túl a helyi ipart is versenyelőnybe hozhatja, és végül az EU ipara lehet az, ami a fúziós energiát kommercializálja a világban. Erre a gondolatra még visszatérünk később.

Az ITER Organization 2007. október 24-én hivatalosan is megalakult. Ez a szervezet felelős a teljes berendezés műszaki integrációjáért, a központi tervezésért, az engedélyezésért, az összeszerelés koordinációjáért, majd végül az ITER üzemeltetéséért is. A tagállamok nem egyszerűen pénzhozzájárulást fizetnek a szervezetnek, a kialakított struktúra ennél sokkal bonyolultabb. A hét ITER-tag mindegyike létrehozott egy saját ügynökséget (*domestic agency*), amely az adott tag természetbeni hozzájárulásait szervezi meg, és közvetlenül szerződik a kutatóintézetekkel és ipari beszállítókkal. Az ITER Organization szerződéseiben rögzíti a szállítandó rendszerek



2. ábra. Az ITER tokamak összeszerelése. A kilenc vákuumkamra-sektormodulból már hat a végleges pozíciójába került, a legutóbbit, az 1. számú sektormodul a 2026. július 27-éről 28-ára virradó éjszaka emelték be (Forrás: ITER Organization – ITER Image Galleries)

követelményeit, míg egy adott helyi ügynökség felelős azok megtervezéséért, legyártásáért és beszállításáért. Európa ügynöksége a barcelonai székhelyű Fusion for Energy, amely az európai beszállítások mellett – a fogadó fél képviselőjeként – az ITER-telephely épületeinek és infrastruktúrájának nagy részéért is felel. Ez a rendszer lehetővé teszi, hogy a tagok hozzájárulásuk jelentős részét ne pénzben, hanem saját iparuk és kutatóintézeteik által előállított berendezések formájában teljesítsék. Ez két dolgot is jelent. Egyrészt az ITER teljes építési költsége nehezen határozható meg egyetlen számmal, mert a tagok természetbeni hozzájárulásainak valós költségei eltérőek, és nem mind jelennek meg közvetlenül az ITER központi költségvetésében. Másrészt ez a struktúra nem kizárólag a lehető legalacsonyabb építési költségre optimalizált, hanem arra is, hogy a tagok ipara és kutatóintézetei közvetlenül részt vegyenek a technológia fejlesztésében. Egyszerű példa, hogy az ITER vákuumkamrája kilenc, egyenként 40°-os szektorból áll; négy szektort Dél-Koreában, öt szektort az EU-ban gyártottak. Vagy hogy az ITER 18 beépítendő toroidális szupravezető tekercsét, valamint egy tartaléktekercset Európa és Japán gyártotta 10–9 megosztásban. Ezek rendkívül komplex és nagy precizitást igénylő alkatrészek, és több helyen is létre kellett hozni a megfelelő gyártási kapacitást.

Összegzésként elmondható, hogy az emberiség által megépíteni próbált talán legkomplexebb berendezést úgy építjük, hogy 7 különböző helyen gyártanak alkatrészeket, amelyeket egy központi helyen szerelnek össze, és azt várjuk, hogy problémamentesen elsőre működjön együtt. Ez sajnos nem sikerült mindig, és nem kell jövőbe látó varázsgömb ahhoz, hogy azt mondjam, később is lesznek még nehézségek ebből a szervezeti struktúrából.

Az ITER építése

2010-ben megkezdődött a létesítmények építése. A berendezés óriási részegységeit a fentiek szerint a tagországok gyártották természetbeni hozzájárulásként, majd Franciaországba szállították. Az építkezést és az összeszerelést több tényező is jelentősen késleltette. Az eredeti 2010-es ütemterv szerint az ITER első plazmája 2019-ben jött volna létre. Az Európai Bizottság későbbi, a késés okait elemző értékelése szerint a fő problémák között szerepelt, hogy a 2010-es tervek nem voltak elég kidolgozottak, így a gyártási terv nem volt reális. Emellett a lassú és bonyolult döntéshozatal és a nem megfelelő koordináció, az ITER Organization és az ügynökségek viszonya is megjelentek az okok között.

A 2011-es fukusimai balesetet követően az ITER-re is kiterjedtek a nukleáris létesítmények kiegészítő biztonsági felülvizsgálatai, amelyek főleg a tervezési alapon túli események hatását vizsgálták. Bár az ITER már eleve szigorú földrengésvédelmi követelmények alapján épült, a Fukushima jelentette megnövekedett nukleáris biztonsági és hatósági követelmények további tervezési munkát és módosításokat igényeltek. A tokamak épületének (Toka-

mak Complex) szerkezeti kialakítását is érintő módosítások kihatottak az építkezés elhúzódására és az európai hozzájárulás költségeinek növekedésére is.

2016-ban egy új ütemtervet fogadtak el, amely szerint az ITER első plazmája 2025 decemberére tolódott. A tokamak tényleges összeszerelése 2020-ban tényleg el is indult. A Covid-19 világjárvány gyárleállásokat, munkaerő-korlátozásokat, szállítási nehézségeket és alapanyaghiányt okozott. Különösen érzékenyen érintette a vákuumkamra európai szektorainak gyártását, mivel ezek több országban, több beszállító együttműködésével készültek. A vákuumkamra gyártási késése értelemszerűen késeltet minden ráépülő szerelési lépést is. A 2025-ös első plazma már így sem volt tartható, de további két jelentős műszaki probléma is jelentkezett. A már leszállított vákuumkamraszektorok csatlakozó éleinél olyan méreteltérések voltak, amelyek megakadályozták volna a megfelelő összehesztést, így az első, már részben beépített szektormodult ki kellett emelni. A másik probléma, hogy a szupravezető mágneseket a melegebb vákuumkamra hőszigetelésétől védő, aktívan hűtött termikus árnyékolás csővezetékeiben apró korróziós repedéseket találtak. Több mint 20 kilométernyi hűtőcsövet használhatatlannak minősítettek, amelyet cserélni kellett. A vákuumkamra szerelése csaknem két évig állt, 2022-től 2024 szeptemberéig.

2024-ben a teljes kísérleti tervet átalakították, hogy a legfontosabb D-T plazmák a lehető legkisebb késedelmet szenvedjék. A korábbi rövid első plazma helyett a kísérleti program egy lényegesen teljesebb berendezéssel indulna. A jelenlegi terv szerint a „Start of Research Operations” 2034-ben, a deutérium-deutérium üzem 2035 körül, az első deutérium-trícium üzem pedig 2039-ben kezdődhet.

Jelenleg az építés és összeszerelés intenzíven folyik. A 2. ábrán látható, hogy 2026. július végére a kilenc vákuumkamra-szektormodulból hatot már beemeltek a végső helyére, ami a plazmakamra kétharmada. A központi szolenoid összeállítása is elkészült.

Az ITER számokban

Az eddigiekből is látszik, hogy az ITER egy hatalmas berendezés, amely magán a tokamakon kívül is nagy és összetett kiszolgáló berendezésekkel van körbevéve. A plazmafűtési rendszer, a kriogén kiszolgáló rendszer, a vákuumrendszer, a tríciumkezelő rendszer egyesével mind nagyobbak és költségesebbek, mint egy kisebb fúziós kísérlet, és mind speciális kutatás-fejlesztést igényelnek. Azok a szerencsések – magamat is beleértve –, akik személyesen láthatták az ITER berendezést építés közben, szembesülnek a kísérlet valódi méreteivel, amit nagyon nehéz szavakkal vagy akár a fényképeken érzékelteni. Néhány adat talán mégis segíthet ennek a vállalkozásnak a méreteit közelebb hozni az Olvasóhoz [6].

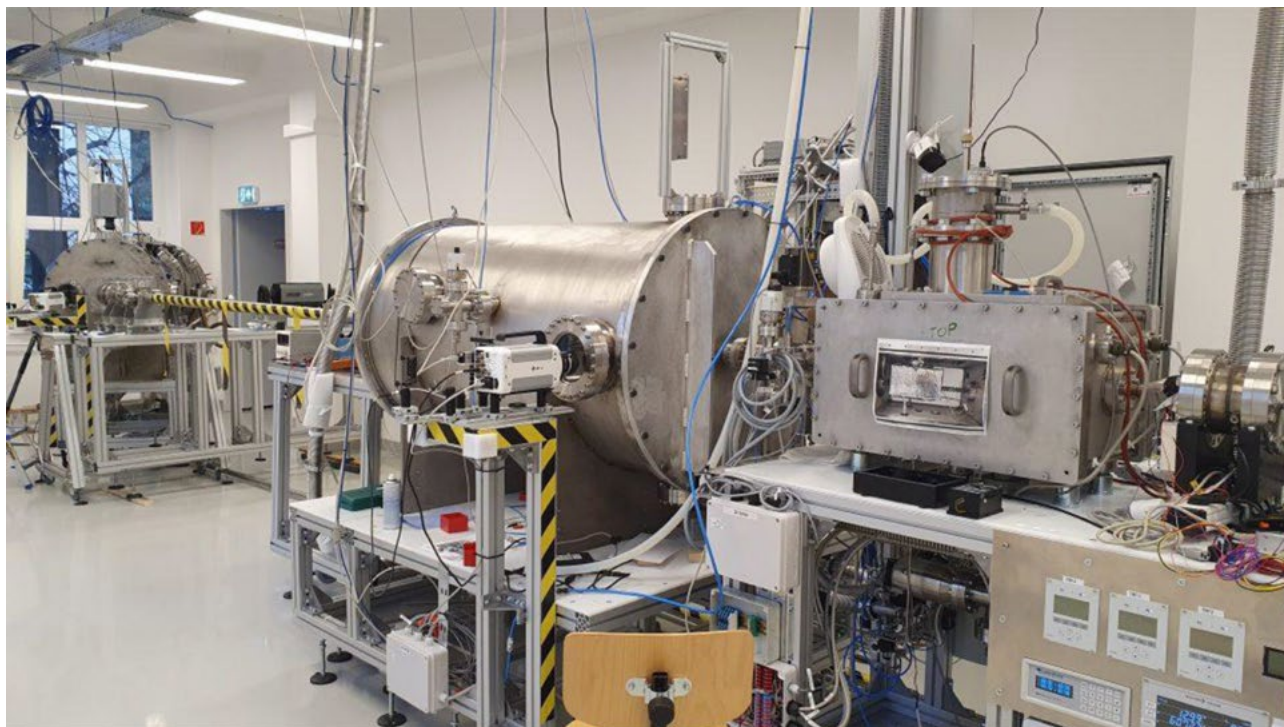
Az egyik gyakran felhozott példa, hogy a tokamak teljes tömege mintegy 23 000 tonna, vagyis körülbelül három Eiffel-torony acélszerkezetének felel meg. A be-

rendezés hozzávetőleg egymillió komponensből épül fel. A tórusz alakú plazma nagysugara 6,2 méter, térfogata pedig mintegy 840 m³, közel hatszorosa a jelenleg működő legnagyobb tokamak plazmatérfogatának. Az ITER-ben a plazma hőmérséklete 150–300 millió °C, a plazmában folyó áram pedig eléri a 15 millió ampert. Ha végiggondoljuk, mit is jelent ez a hőmérséklet, azt találjuk, hogy a nagy plazmaáramú ITER-plazmában összesen kb. fél gramm üzemanyag termikus energiája elérheti a 350 MJ értéket. Ezt a számot érzékletesebbé tehetjük, ha összehasonlítjuk a mindennapi életben közelebb álló energiafajtákkal. Ennek a fél gramm üzemanyagnak termikus energiáját mozgási energiával illusztrálva ez 9 db 100 tonnás mozdony 100 km/óra sebességre gyorsításhoz szükséges energiája, vagy ha helyzeti energiával, akkor ezzel egy T34-es tankot fel lehetne emelni a Kékes tetejére a tengerszintről, azaz kb. 1000 méter magasra.

A plazmában tárolt hőenergia is eltörpül a toroidális tekercsek által létrehozott mágneses térben tárolt 41 GJ energia mellett. A szupravezető tekercsokat Nb₃Sn szálakból készítik, így az üzemi hőmérsékletük –269 °C (4 K) [8]. Az ITER-be több mint 100 000 km hosszú Nb₃Sn szálát építenek be, amivel tehát az Egyenlítő mentén több mint kétszer körbetekérhetnénk a Földet. A mágnesrendszer teljes tömege tízezer tonna, amelyből kb. 500 tonna a Nb₃Sn szál. A 17 méter magas, több mint 300 tonnás toroidális tekercsokat hozzávetőleg egy milliméteres helyzettűréssel kell beépíteni, miközben a végső finombeállítást tizedmilliméteres pontosságú hidraulikus eszközök és lézeres metrológiai eljárás-

sok segítik [7]. A vákuumkamra egy 1400 m³-es kettős falú acélszerkezet, amely egyszerre biztosítja a plazma nagyvákuumú környezetét, és részben a trícium és más radioaktív anyagok elsődleges határát. A vákuumkamarát és a teljes szupravezető mágnesrendszert körülveszi a kriosztát, ami a világ legnagyobb rozsdamentes acél nagyvákuumú nyomáskamrája. Ez egy 29 méter magas és kb. 29 méter átmérőjű vákuumkamra, amelynek a térfogata 16 000 m³. A szükséges hűtést a világ legnagyobb, egy helyre koncentrált kriogénrendszere biztosítja, amihez kb. 25 tonna héliumra lesz szükség. A CERN után ez a világ második legnagyobb kriogénrendszere. Az ITER telephelyének villamos teljesítményigénye normál üzemben körülbelül 110 MW, rövid, legfeljebb 30 másodperces csúcsokban pedig elérheti a 620 MW-ot. Külön érdekesség, hogy ezt közvetlenül a hálózatról nyeri majd, nincsenek helyi mechanikus energiatárolók, mint pl. a JET üzemelésnél is használt lendkerekes energiatárolók.

A Tokamak-, Diagnosztikai és Tríciumépületet egyesítő Tokamak Complex 120 méter hosszú, 80 méter széles, és körülbelül 80 méter magas [9]. Az épületek, gépek és berendezések teljes tömege eléri a 440 000 tonnát, amelyet a földrengésvédelem miatt kb. 500 szeizmikus alapozási izolátor választ el a talaj mozgásától. A felsorolást minden bizonnyal hosszan lehetne még folytatni, de amit érdemes kiemelni, hogy a felsorolt számok, méretek, anyagok egy része technológiafüggő, és nem biztos, hogy a későbbi erőművekre nézve is reprezentatív, másrészt ez azt is mutatja, hogy a fúziós kutatások jó ideig még a technológia csúcstermékeit igénylik majd.



3. ábra. Az ITER DMS Support Laboratory a HUN-REN Energiatudomány Kutatóközpontban [12]. A kép jobb oldalán a négyoszloptos kamrában történik a pellet fagyasztása. A bal oldali hátsó nagy kamrában tanulmányozzák a pellettörés folyamatának a részleteit

Magyar részvétel az ITER-ben

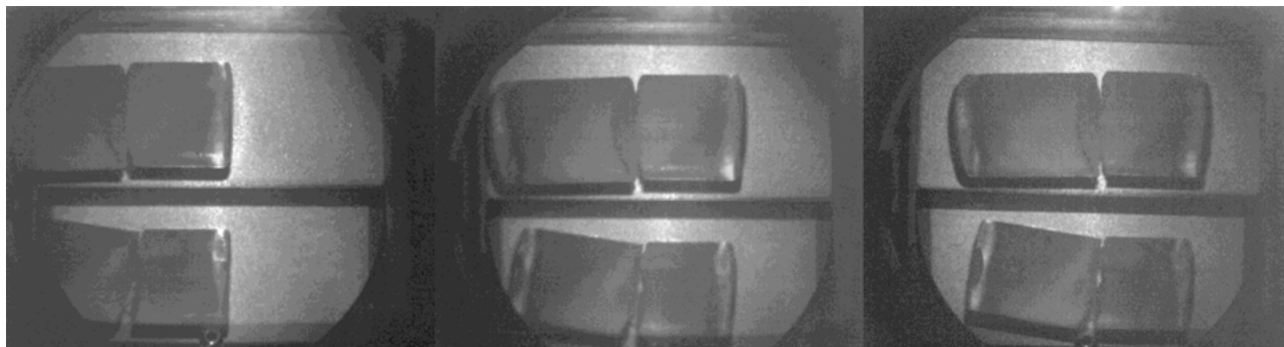
Magyarország az Európai Unió és az Euratom tagjaként természetesen részt vesz az ITER-projektben. A hazai részvétel fő központja a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (EK), amely az ITER diagnosztikai és üzemeltetési biztonsági rendszereihez kapcsolódó fejlesztéseken dolgozik. A kutatóintézeti munka mellett magyar kisvállalkozások is bekapcsolódtak az ITER számára készülő speciális mérő- és diagnosztikai rendszerek fejlesztésébe.

Kutatóintézeti oldalról az ITER hosszú tervezési szakaszában a hazai szakemberek több projektben is részt vettek (többek között a vákuumkamrában belüli diagnosztikai kábelezés és elektromos infrastruktúra tervezésében, a plazmadiagnosztikák fejlesztésében, szerkezeti és végelelemes elemzésekben), de a jelenlegi fő hozzájárulás a plazma vézleállításával kapcsolatos nemzetközileg is egyedülálló fejlesztéseket jelenti. A tokamak típusú fúziós koncepció (egyik) Achilles-sarka, hogy a plazma stabilitásának hirtelen elvesztése során, amit a fúziós szaknyelv plazmadiszrupciónak nevez, a fentebb említett termikus energia óriási hőterhelést ad a plazmát határoló fal elemeire, még hozzá rendkívül gyorsan, néhány miliszekundum alatt. Ennél is veszélyesebb, hogy a plazmaáram összeomlásakor az indukált toroidális elektromos tér közel fénysebességre gyorsított elektronnyalábokat (*runaway* elektronokat) eredményezhet, amelyek idővel valamely falelemnek ütközve rendkívül komoly helyi roncsolást, szélsőséges esetben akár hűtővízbetörést is okozhatnak.

A diszrupcióból eredő nehézségek erősen függenek a berendezések méreteitől. Míg a mai berendezések nagy részében a kísérleti plazmakísülések gyakran végződnek jelentős károsodás nélkül diszrupción, az ITER-ben egy nagy energiájú, megfelelően nem csillapított diszrupció akár hosszú javítási leállást és a kísérleti program további jelentős késését is okozhatja. A JET-en már felismerték ezt a problémát, és egy viszonylag egyszerű megoldást dolgoztak ki erre. Amikor plazmainstabilitást észleltek, akkor a plazma szélébe nagy mennyiségű gázt engedtek, ami egyszerre lehűti a plazmát, és a nagy rela-

tív sűrűség a *runaway* nyalábok kialakulását is megakadályozza. Az ITER már építési szakaszban volt, amikor a folyamatosan fejlődő számítógépes modellek azt mutatták, hogy itt ez a megoldás nem lesz elégséges, mert a gáz nem jut elég gyorsan elég mélyre a plazmában. A megoldást az USA-ban kifejlesztett törtpellet-belövés (*shattered pellet injection*, SPI) módszer szolgáltatta [10]. Ebben a megoldásban egy pezsgősdugó méretű fagyott hidrogénjég-darabot lönek ki nagy sebességgel, és a plazma szélén elhelyezett ferde fémlapra lövik. A széttörő pelletből különböző méretű és sebességű jégdarabok szóródnak a plazmamag irányába, és az elpárolgó gáz így nagyobb térfogatban hűti a plazmát. Az ITER-be a mai tervek szerint 27 ilyen belövőt építenének [11]. A jelenlegi elképzelés szerint egy nagy teljesítményű D–T plazma diszrupciójának csillapítására több pelletet juttatnának be pontosan időzített, meghatározott sorrendben: először nyolc tiszta hidrogénpelletet, majd rövid késleltetés-sel három neonadalékolt pelletet.

2018-ban az ITER egy nemzetközi szakértői munkacsoportot (Disruption Mitigation Task Force) hozott létre az SPI-alapú diszrupcióvédelmi rendszer fizikai alapjainak vizsgálatára és az ITER-kompatibilis technológia kifejlesztésére [10]. A magyar csoport egészen korán bekapcsolódott ebbe a munkába. Ebben 2020-tól több nyílt tenderen meghirdetett kutatási projektet nyert el az EK és az együttműködő partnerei. Az ITER részben finanszírozta, hogy Budapesten egy olyan labor épüljön fel, amely alkalmas a pelletfagyasztás, -kilövés és a pellettörés fizikai és technológiai problémáinak kutatására. Az itt elért eredmények fontos és közvetlen alapokat adnak a végső rendszer tervezéséhez. Az EK büszkesége, hogy a 3. ábrán látható laborban sikerült az ITER-re tervezett nagy méretű pelletet először sikeresen létrehozni és sikeresen kilőni [12]. Ez a kutatási irány folytatódik a jövőben is, és számos sikeres alprojekt is indult, pl. egy pelletkilövésre alkalmas szelep fejlesztése. A hazai kutatók hosszú távon is meghatározó szereplők lesznek az ITER-ben ezen a területen. Az egyik különálló feladat lett a munkacsoportban a kilőtt pellet megfigyelése, amelynek kifejlesztésében a szerző 2020-tól központi szerepet vállalt.



4. ábra. Az ITER DMS Support Laboratoryban készített neonpellet mérése, amelyet az OPD mérőrendszer három nagy felbontású CMOS kamerája rögzített kis idő késésekkel. A pelletet egy, a vákuumkamrába beépített tűkőr segítségével szemből és alulról egyszerre rögzítjük, így a 3D-s mozgás is visszaállítható. A pellet kilövésakor eltört, de a diagnosztika megfigyelőkamerájában a két fél még egész közel van egymáshoz, és a törés jól látható

ITER – optikai pelletdiagnosztika

Ahogy az előző részben láttuk, a törtpellet-belövő rendszer egy védelmi eszköz. Működtetése hasonló az autóban a légzsákokhoz, normális esetben nem kell használni, de ha szükség van rá, akkor biztosnak kell lennünk abban, hogy a rendszer működik. A jelenlegi laborkísérletek viszont azt mutatják, hogy a pellet néha eltörik vagy elfordul kilövés közben, és nem éri el a törőfelületet. A kilőtt pelletek monitorozására és a kontrollrendszerhez való közvetlen kapcsolat biztosítása végett az ITER egy optikai pelletdiagnosztika (OPD) kifejlesztését indítványozta [10]. Az OPD technikai specifikációi rendkívüliek. A diagnosztikának a fentebb említett 800 m/s sebességgel repülő pelletet kell megfigyelnie egy 10 cm-es ablakon át egy megfigyelésre kialakított vákuumkamrában, a kilövéstől kb. 1,5 méterre. A feladat egyik nehézsége, hogy a diagnosztikának valós idejű információt kell adnia a pellet repülési adatairól, pontosabban a detektálás után alig 1 milliszekundumon belül kell a kontrollrendszert értesítenie a pellet sikeres kilövéséről. Emellett meg kell mérni a pellet méretét, sebességét és a repülési pályát is, amely adatokból meg kell állapítani, hogy a pellet eljut-e megfelelő módon a törőfejre, és ezáltal a pellet sikeresen tudja-e hűteni a plazmát. Ugyanakkor a rendkívüli rövid válaszidő lehetővé teszi, hogy a kontrollrendszer egy másik pelletet indítson a sikertelen kilövés esetén. A feladat az elérhető technológia korlátait feszegeti egy labormérés esetén is, de az ITER-nél extrém környezeti feltételeknek is meg kell felelni. Sugárzásálló optika és a nagy teljesítményű impulzuslázerek mellett a megoldás kulcsát a magyar Fusion Instruments Kft. által kifejlesztett valós idejű nagy érzékenységu detektorteknológia adja. Az OPD egy tesztpéldánya már 2023-ban elkészült, és sikeresen teszteltük valós pelletekkel az EK SPI laborjában. Az OPD működését szemléltetve a 4. ábrán egy törött neonpellet képei látszanak a diagnosztika nagy felbontású kamerájának képein. Jelenleg az ITER-kompatibilis prototípus példány tervezése és gyártása zajlik. Az OPD projekt egy jó példa arra is, hogy a hazai kutatóintézetek és a high-tech ipari háttér összekapcsolódva nemzetközi szinten is versenyképes fejlesztői csapatot tudnak alkotni. A projektben az egyedi sugárzásálló optika tervezését az Optimal Optik Kft., a valós idejű algoritmusok fejlesztését gépi tanulás alapján a Cursor Insight Kft., míg a sugárzásálló optikai szálrendszer tesztpéldányainak gyártását az OMI Optika Kft. végezte.

Kitekintés az ITER jelenlegi helyzetére a fúziós kutatásokban

Ahogy láttuk, az ITER szükségességének gondolata már több mint 40 éve megszületett. A 2000-es években aztán az ötlet egy akkori technológiával megépíthető berendezés terveivé formálódott. Miután 2007-ben tényleg létrejött az ITER szervezet, a 2010-es évek már

az építkezésről szóltak. A világ azonban nagyot fordult ezekben az évtizedekben, ami hatással van erre az óriás vállalkozásra is. 2006-ban írták alá az ITER-megállapodást a felek. Akkor még nem látszott, hogy 20 évvel később az USA és Kína vetélkedése határozza meg egyre inkább a globális tudománypolitikát. Oroszország 2022-ben háborút indított Ukrajna ellen, amit nyugati technológiaexport szankciói követtek. Az Egyesült Királyság a Brexit döntésével kilépett az EU-ból, és ezzel automatikusan az ITER együttműködésből is kiesett. Anglia jelentős tudományos és technológiai központ a fúziós kutatásokban, így a befizetések mellett az ottani fúziós közösség támogatásának hiánya is hátrányosan érintette az európai beszállításokat. Ezek a tényezők hivatalosan és közvetlenül nem okoztak nyílt törést a projektben, de természetesen jelentősen hátráltatják. Egyes ITER-partnerek késedelmes befizetései és a késedelmes beszállítások miatt a szervezet olyan nehéz anyagi helyzetbe került, hogy a jelen cikk írásának idején jelentős elbocsátások történnek az ITER szervezeténél, és csak reméljük, hogy ez nem okoz majd további csúszásokat.

Van egy másik döntő változás is: a 2020-as évektől részben a fúziós kutatások sikerei miatt (pl. a 2021-es JET deutérium-trícium kampány), részben a klímaváltozás miatt megjelenő társadalmi igény és talán nem utolsósorban a 2020-as évek elején elérhető olcsó tőke együttesen azt jelentették, hogy magántőke is a fúziós energiatermelés lehetősége felé fordult. Az állami fúziós kutatási programokhoz mérhető nagyságrendű magántőke áramlott az addig elsősorban alapkutatási területként működő, így viszont fokozatosan iparaggá váló szegmensbe. Ez jelentős változás, mert a magáncégek befektetőinek a 20 éves időskála nem túl vonzó, így a cégeknek gyorsabb haladást kell felmutatni. A céges honlapokon feltűnő ígéretek skálája a nagyon optimistától gyakran az inkább irreális felé mutat. Van néhány ténylegesen nagyon komolyan vehető fúziós magánvállalkozás, amelyek mögött legtöbbször valamilyen állami vagy egyetemi háttérrel találkozunk, és természetesen van sok valós teljesítményt alig felmutató cég, akik jelentős zajt generálnak a területen.

A fúziós kutatás helyzetének megváltozását jelzi az is, hogy az ITER mellett a nagy szereplők párhuzamosan új, nagyméretű fúziós berendezések tervezésébe és építésébe kezdtek. Ezek a berendezések nem részei az ITER projektnek, hanem az egyes országok és szereplők ITER mellett futó saját fúziós programjainak részei. Kína most építi a BEST tokamakot, amely kisebb mint az ITER, de D-T működésre tervezik. Az USA-ban egy magáncég (Commonwealth Fusion Systems) épít egy kisebb, de az ITER-nél modernebb mágnesetchnológiát alkalmazó berendezést (SPARC), amelyet aztán a tervek szerint egy erőmű építése követne (ARC). Az Egyesült Királyság a Brexitet követően ugyan kiesett az ITER együttműködésből is, de az angol kormány jelentős fúziós programot indított. Ennek központi eleme a STEP szférikus tokamakkonceptióra épülő prototípus fúziós

erőmű, amelynek célja a nettó villamos teljesítmény hálózatra táplálása mellett saját trícium-üzemanyagának tenyésztése is. Németországban eközben – az ITER-beli részvétel mellett – egy másik irányban indult jelentős kezdeményezés: Bajorország, a Max Planck Plazmafizikai Intézet, a Proxima Fusion és az RWE 2026-ban megállapodott az Alpha nevű demonstrációs sztellarátor közös előkészítéséről. A tervek szerint a berendezés Garchingban, az IPP tudományos vezetésével épülne meg, és egy későbbi sztellarátoralapú fúziós erőmű technológiai előfutára lenne. Ezek arra utalnak, hogy az ITER-ben megvalósuló együttműködés mellett megindult a verseny nemcsak a fúziós elsőségért, hanem az ipari háttér megteremtéséért is.

Az ITER szerepe azonban megkérdőjelezhetetlen ebben a folyamatban. Mindegyik fenti projekt sok részében közvetlenül használja az ITER számára kifejlesztett technológiát és tervezési tapasztalatot. Az ITER együttműködés egyik fontos eleme, hogy a projektben létrejövő tudományos és technológiai eredmények az ITER-tagok között megoszthatók, így az itt felhalmozott tudás közvetlenül beépülhet a tagok saját fúziós programjaiba.

Az ITER volt az első fúziós berendezés, ahol a nukleáris biztonság és a nukleáris hatóságok előírásai adták közvetlenül a tervezés alapjait. Itt ültek asztalhoz először kísérleti fizikai háttérrel jövő szakemberek és tárgyaltak az általában a maghasadásos erőművekhez szokott hatósági szakértőkkel. Az azóta különböző országokban létrejött speciálisan a fúziós erőművekre létrehozott szabályozás is részben ezekből a tapasztalatokból származik. Az ITER-nél alakult ki először az igény, hogy legyenek a megszülető fúziós iparra szabott szabványok, amelyeket a későbbi fúziós erőművek bizonyára használnak majd. Az ITER az első berendezés, amely folytonos üzemű tríciumfeldolgozó üzemet igényelt, és amely biztosítja a folytonos üzemanyag-ellátást a berendezésben. A neutronárnyékolás, a távvezérelt robotika és a vezérlőrendszerek mind olyan fejlesztések, amelyeket közvetlenül használnak majd a fúzióban az ITER-en kívül is. Így ha azt a kérdést tesszük fel, hogy

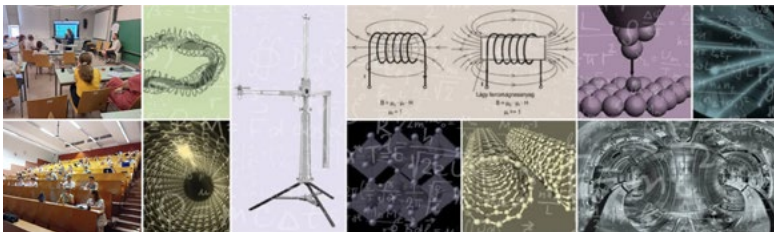
az ITER sikeres lesz-e, sok szempontból már az. Kis túlzással azt is mondhatjuk, ha egy plazmakisülés sem lenne benne, akkor is.

Külön európai szempontból is megvizsgálhatjuk ezt a kérdést. Az EU jelentős erőforrásokat áldozott arra, hogy itt épüljön az ITER, és hogy jelentős részben itt teremődjön meg a fúziós ipar is. Az utóbbi években felpörgő globális fúziós verseny, különösen a kínai technológia gyors fejlődése kétségessé teszi, hogy ez a cél maradéktalanul teljesülhet-e. Mindenesetre az EU kutatási programjainak elsőrendő céljának kell lennie az ITER mihamarabbi befejezése és hasznosítása, hogy az erre már elköltött források minél hamarabb hasznosuljanak. Emellett azt is látni kell, hogy az ITER európai építése nem teremti meg automatikusan a versenyképes fúziós ipart, és nem biztosítja a technológiai fölényt sem. Az EU-nak és a tagállami kormányoknak már most világos programot kell kidolgozniuk arra, hogy az ITER eredményeire építve, de az ITER-en kívül és után hogyan jöhet létre egy fúziós erőművet felépíteni és üzemeltetni képes kompetencia. A magáncégek, az állami és az EU-s intézmények hatékony együttműködésére lesz szükség, ha versenyben akarunk maradni. A hazai szereplőknek pedig biztosítaniuk kell, hogy a magyar tudomány és ipar is ott legyen, amikor ezek a keretek formálódnak.

Irodalom

1. <https://www.iter.org/few-lines>
2. Loarte A., et al. (2025): *Plasma Phys. Control. Fusion*, 67, 065023.
3. International Atomic Energy Agency, ITER-FEAT Outline Design Report. ITER EDA Documentation Series No. 18, IAEA, Vienna (2001).
4. Wagner F., et al. (2013): *EPJ Web of Conferences*, 54, 01007.
5. <https://www.iter.org/about/history>
6. <https://www.iter.org/facts-figures>
7. <https://www.iter.org/node/20687/aligning-building-size-components-millimetric-precision>
8. <https://www.iter.org/machine/supporting-systems/cryogenics>
9. <https://www.iter.org/project/projects-underway/tokamak-complex>
10. <https://www.iter.org/node/20687/technology-advances>
11. <https://www.iter.org/node/20687/final-design-review-major-step-forward>
12. <https://www.ek.hun-ren.hu/en/2022/10/21/iter-pellet-fusion/>

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jelen van a -on!



<https://www.facebook.com/people/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/100057390380604/>