

A fúziós energia nemzetközi energiapolitikai aspektusai

Lezárás dátuma: 2014. november 05.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
Miért a fúziós energia?	4
A fúziós energia tulajdonságai és felhasználása.....	6
Út az EUROfusion-höz az Európai Fúziós Fejlesztési Megállapodáson (EFDA) keresztül	8
Az EFDA TIMES modell	9
Horizont 2020 és a „Road Map”.....	10
ITER - Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor	12
DEMO	16
Fusion for Energy	17
US ITER	18
ITER Oroszország	21
ITER Japán	23
Magyarországi kutatások	24
Befejezés	25
Bibliográfia.....	27

Bevezetés

Energetikai kérdések hálózzák be világunk politikai és gazdasági döntéseit, melyek egyaránt befolyásolják a társadalom különböző szintjeit. Nem elég lokális szinten belelátni a folyamatokba, globálisan kell értékelni az eddigi eredményeket és tervezni a jövőre nézve. A világ országainak együtt kell cselekednie ahhoz, hogy a folyamatosan növekvő energiaigényeket környezettudatosan, fenntarthatóan, társadalmilag elfogadottan elégítse ki.

Az atomenergiát a politika erőszertetettel használja eszközként céljai elnyerése érdekében. Magyarország esetében a paksi atomerőmű bővítése és az általa kiváltott reakciók egyértelműen mutatják, hogy sok esetben szakmailag nem kompetens emberek ítélkeznek egyes döntések felett, nem tudományos megalapozottságú érveket használnak stratégiai eszközként. Az emberek nagy része befolyásolható, ha környezetüket, létüket veszélyeztető kérdés merül fel. Érdekek ütköznek: helyi és közérdekek. Tényként kezelhetjük, hogy a reaktorok megépítése a „szükséges rossz”, viszont egyelőre ennél hatékonyabb és környezetbarátabb villamosenergia-termelő bázis nem létezik. A magyar gazdaság számára létkérdés, hogy versenyképes és megfizethető áron elérhető energiaforrás álljon rendelkezésre, ahogy a világon bárhol, viszont ehhez mindenkinek más feltételek adottak.

A Paksi Atomerőmű bővítése egy komplex kérdés-és problémakört ölel fel. Mind környezeti, mind gazdasági és politikai oldalról érik támadások a beruházást. Be kell látni, hogy a hazai villamosenergia-igények a következő évtizedekben növekedni fognak, mellyel párhuzamosan több energiatermelő bázist kell bezárni azok elavultsága és környezetszennyező hatása végett Magyarországon. Az energiahiány kialakulását már most el kell kezdeni megelőzni, melyre a reaktorok megépítése opcióként szolgálhat.

A munkám bevezető részében le kell szögezmem, hogy a paksi bővítésről a továbbiakban nem fog szó esni, melynek hátterében több tényező sorakozik fel. Először is, nem szeretnék politikai elemzésekbe belebocsátkozni, melyet a téma egyértelműen megkíván. Másrészt, az atomenergián belül különbséget kell tennünk fissziós és fúziós energia között. Két különböző terület, különböző működési elv és fejlesztési mutatók, illetve politikai megítélés. A Paksi Atomerőmű egy fissziós erőmű, így egyértelműen nem tartozik a munkám fő tárgyához.

A környezeti fenntarthatóság megteremtése és a globális felmelegedés megállítása korunk legnagyobb kihívásai közé tartoznak. Tanulmányomban nem célom ítélkezni, tényekre kívánom alapozni munkámat, melynek középpontjában a fúziós energia és a hozzá kapcsolódó kérdéskörök sorakoznak fel. A fúziós energia az energetika egy kevésbé tárgyalt területe

hazánkban, annak ellenére, hogy a jövőben olyan energiaforrást fog jelenteni, mely gyökeresen átformálja a villamosenergia-ellátottságot és napjaink energiaforrásait háttérbe szoríthatja. Több aspektust kell áttekinteni ahhoz, hogy megérthessük jelenlegi szerepét, így a gazdasági, a nemzetközi energiapolitikai és műszaki területeket. A műszaki, technikai oldal azért kihagyhatatlan, mert anélkül értelmezhetetlenné válna az előző két terület. De mindemellett a fúziós energiapolitika legfontosabb tulajdonsága, hogy nemzetközi erőket mozgat meg egy cél elérése érdekében: a világ legtisztább, legnagyobb teljesítményű erőművének megépítése, a fúziós energia tényleges kihasználása.

Miért a fúziós energia?

A téma legfőbb jellegzetessége, hogy köztes helyet foglal el a társadalomtudományok és a természettudományok között. Célom, hogy egy mérnöki folyamatot mutassak be nemzetközi energiapolitikai oldalról. A fizikai oldal ismertetését a tudósokra hagyom, de ennek ellenére a fúziós energia kivitelezésének alapvető monumentumait lehetetlen lenne kihagyni, egyszerűen értelmezhetetlenné válna a munkám. Ahogy a nyelvészetben vagy a társadalomtudományok területén, itt szintén találkozni fog az olvasó idegen kifejezésekkel, rövidítésekkel, melyeket mindig kellő hosszúságú és mélységű magyarázat fog követni. Természetesen fel lehet tenni a kérdést, hogy a téma miért fontos számunkra, hiszen nem a mi feladatunk egy atomenergiái kérdéskör feldolgozása. De a fúziós energiának a megvalósítása globális szinten érinti az emberiséget, egy geopolitikai kérdéskör részét képezi, melyet ugyanúgy elemzésre szorul. A legtöbb könyvvel és elemzéssel ellentétben nem csak a múlt kerül bemutatásra, hanem a jelen és a jövő a legmeghatározóbb. A jövőt érintő dolgok nem jósolhatóak meg biztosra, magának a fúziós erőműnek a működése ugyanúgy egy papíron lefektetett terv, ahogy az Európai Unió további bővítési elképzelése, melynek sikeres kivitelezését sok tényező fogja befolyásolni a következő évtizedekben: pénz, politika és a kutatás gyorsasága. A fúziós energia Földön történő megvalósítása versenyt generál a nagyhatalmak között annak ellenére, hogy elsősorban egy szövetség keretében valósulnak meg a fejlesztések és kivitelezések. Hatalmas gazdasági érdekek húzódnak meg a nemzetközi projekt háttérében. Nem szabad elfelejtenünk, hogy minden résztvevő fél a lehető legtöbbet próbál profitálni a közös munka gyümölcséből. Az első villamosenergia-hálózatra termelő erőmű beindítását követően az államok megépíthetik saját konstrukciójukat a meglévő technológiai tudással a birtokukban. De több kérdés felmerül az első működő erőművel kapcsolatban: mennyibe fog kerülni az áram és ki fogja a bevételeket kezelni? Ezekre a kérdésekre egyelőre még nem adható válasz, viszont már most látható, hogy

nemzetközi verseny fog kialakulni egy fúziós erőmű birtoklásáért annak alacsony költségű üzemeltetése végett.

A társadalmi-gazdasági vetületen túl a környezetre gyakorolt szerepét ugyanúgy kell nézni. Jelenleg arra kell törekednünk, hogy minél előbb sikeresen fel tudjuk venni a harcot a globális felmelegedéssel szemben, azaz visszaszorítsuk az üvegházhatást okozó gázok kibocsátott mennyiségét. A következőkben különféle alternatívákat mutatok be röviden, hogyan alakulhatna a világ energiaforrásaiból származó villamosenergia-mennyiség a század végéig fúziós energiával együtt vagy anélkül. Ezek csak lehetőségek, elképzelések biztos számadatok nélkül.

Az első forgatókönyv alapján, ha nincsen éghajlatvédő politika a világon, azaz nem limitáljuk a szén-dioxid-kibocsátást és a fosszilis energia olcsó marad, akkor sem a fúziós energia, sem a megújuló energia nem lesz képes felvenni a versenyt a környezetre ártalmas széntüzelésű erőművekkel, nem juthatnak vezető szerephez. Annak ellenére, hogy olcsón előállítható a fúziós erőmű üzemanyaga, maga a konstrukció drága lenne a kivitelező országnak. Ez a scenárió viszont a legrosszabb alternatívát nyújtana, ami a környezetszennyezést illeti. Másodsorban a Föld széntartalékai sem kimeríthetetlenek, nem tudni, hogy a szénbányászat meddig lenne fenntartható 2100-at követően. Amennyiben a fordítottja valósul meg, azaz korlátozzák a szén-dioxid-kibocsátást, akkor mind a fúziós, mind a megújuló energia elnyomja a fosszilis energiahordozókat, azaz akár a szénfelhasználás nullára redukálódhat, míg a fúzióból, maghasadásból, vízből, szélből származó energiák veszik át a vezetést.

De olyan eshetőségre is számíthatunk, mely alapján a fúziót nem sikerül megvalósítani, illetve ehhez társulhatna a szén-dioxid-kibocsátás korlátozása. A maghasadással működő erőművek nagyobb szerephez juthatnak ennek következtében, melyet a megújuló energiák követnének a sorban. Végül egy utolsó opció felvázolásaképp: fúziós kísérlet megbukik, maghasadásos reaktorokat leállítják és betiltják működésüket, mindemellett korlátozzák a szén-dioxid-kibocsátást. Egyértelműen a megújuló energiák és a fosszilis energiák (szén-dioxid elkülönítő és tároló technológiával) veszik át a vezető szerepet az energiatermelésben.¹

Erre az évszázadra nézve sok lehetőséggel kell számolnunk, majd eldől, mely változat nyer végérvényességet. Munkámban a fúziós energia megvalósulásának forgatókönyvét kísérem nyomon, bemutatva annak jelentőségét és a beléfectetett munka nagyságát a második

¹ Európai Bizottság: *A biztonságos szén-dioxid- elkülönítés és tárolás biztosítása Európában*. 2. o., Forrás: http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/factsheet_ccs_hu.pdf Letöltve: 2014. október 31.

világháborút követően egészen 2050-ig. A továbbiakban a találgatásokat, elképzeléseket hátrahagyva tényekre építem elemzésemet, így bizonyítva a fúziós energia megvalósításának fontosságát.

A fúziós energia tulajdonságai és felhasználása

Sokakban felmerülhet a kérdés, aki nem mérnökként olvassa munkámat, hogy pontosan mit értünk fúziós energia alatt. A legegyszerűbben a következőképpen összegezhető: a Napban és csillagokban lezajló folyamat, melynek a Földön történő megvalósítása kimeríthetetlen energiaforrást jelentene. Olyan berendezésre van szükség, mely képes a fúziós plazmát csapdában egyben tartani. Erre megoldást az 1950-es években egy orosz kutatóintézet talált (Igor Yevgenyevich Tamm és Andrei Sakharov), akik kifejlesztették a tokamakot, mely egy tároló berendezés szerepét tölti be, és képes a több mint 100 millió °C-os plazma befogására.² A fejlesztés azért kiemelten fontos, mert ekkora hőmérsékletet más ismert szilárd anyag nem képes megtartani. Magát a fűtőanyagot, mely deutérium és trícium (két hidrogén-izotóp) összetételéből áll, kell felmelegíteni 150 millió °C-ot meghaladóan, mely a forró plazmát fogja alkotni.³ A deutérium széles körben rendelkezésre álló forrás, mely mindenfajta vízből desztillálható, ezáltal ártalmatlan a környezetre nézve. A deutériumot ma kereskedelemileg tengervízből állítják elő az egész világon különböző, de viszonylag egyszerű folyamatokon keresztül. A trícium ezzel ellentétben csak elenyésző mennyiségben fordul elő a természetben. A fúziós reakció során a lítiummal érintkezésbe lépve előállítható. A lítium szintén bőségesen megtalálható a földkéregben, mely előreláthatólag 1000 évig kitart. Kiváló példával lehet szemléltetni a fúziós üzemanyagok felhasznált mennyiségét: egy 45 literes vízzel teli kád és egy laptop töltőjében található lítium egyenértékű 40 tonna szénnel, mely 200 ezer kW/h villamos energiát biztosítana.⁴ Évente kevesebb mint 40 kg deutériumra lesz szükséges egy gigawatt fúziós energia előállításához. Ezek a számadatok azért fontosak számunkra, mert láthatóvá teszik egy jövőbeli fúziós erőmű üzemanyagfelhasználásának hatékonyságát.

Az oroszok után a tokamak kísérleti megépítésére először az Amerikai Egyesült Államokban, Princetonban került sor (Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR), majd Európán belül az angliai Culhamban, ahol a Közös Európai Tórusz (Joint European Torus - JET) található. A JET ma a

² CCFE: *The tokamak*. Forrás: <http://www.ccf.ac.uk/Tokamak.aspx> Letöltve: 2014. október 3.

³ ITER Organization: *ITER: the world's largest Tokamak*. Forrás: <http://www.iter.org/mach> Letöltve: 2014. március 29.

⁴ Arnoux, Robert (2008): *Of bathtubs and laptop batteries*. ITER Newslines. Forrás: <https://www.iter.org/newslines/45/686> Letöltve: 2014. április 10.

világ legnagyobb fúziós kísérlete. Mindegyik a 70-es és 80-as években kezdte meg működését, végül a TFTR-t 1998-ban leállították.

A fúziós energia megvalósítása egy rendkívül hosszú távú vállalkozás, mely hatalmas összegű ráfordítási költségeket von maga után. Amennyiben a kitűzött célokat sikerül elérni, akkor megéri a sok pénzt, időt és energiát befektetni. A maghasadással (fissziós) működő reaktorral összehasonlítva több előnye van. Mindkettő nukleáris energia, de technológiájuk nagyon különböző. A két energiaforrás egyike sem termel üvegházhatást okozó gázokat, de a magfúzió a maghasadással ellentétben nem állít elő hosszú élettartamú radioaktív hulladékot, az égésterméke az ártalmatlan hélium. A fúziós energia gyakorlatilag korlátlanul a rendelkezésünkre fog állni kereskedelmi forgalomba hozatalakor, mellyel forradalmasítani fogja az energiarendszerünket. Viszont meg kell említeni, hogy nagyon alacsony, alacsony vagy közepes radioaktivitású mellékterméket a fúziós reaktorok is termelnek, mert a trícium gáznemű radioaktív anyag, mely a közbűlő üzemanyag. Ez úgy következhet be, hogy a szerkezeti elemeket a keletkezett neutronok felaktiválják. Ezek viszont viszonylag rövid felezési idejű izotópok.⁵ Minden hulladék anyagot kezelni, csomagolni és a tárolni fognak. A hagyományos reaktorokkal ellentétben mindezt a helyszínen teszik meg, mert a legtöbb radioizotóp felezési ideje nem haladja meg a tíz évet. Száz éven belül az anyagok radioaktivitását jelentős mértékben lecsökkentik, melyet követően újra felhasználhatókká válnak egy másik erőműben.⁶ Ma a fúziós kutatások fontos részét képezik ennek a száz éves időtartamnak a jövőbeli jelentős mértékű lecsökkentése.

A fejezet célja a fúziós energia tulajdonságainak és felhasználásának általános bemutatása volt, hogy bizonyítsam annak fontosságát. A következőkben a fúziós kutatások szervezeti felépítését, jelenleg konstrukció alatt álló megvalósításokat és különböző országok részvételét tekintjük át, mely egyben hozzájárul a létrejött nemzetközi kapcsolati háló ismertetésére.

⁵ Berta Miklós, Horváth András (2009): *Fúziós energiatermelés*. Fizika és Kémia Tanszék, Széchenyi István Egyetem. Forrás: [http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/att_files/eloadasok/\\$File/berta.pdf?OpenElement](http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/att_files/eloadasok/$File/berta.pdf?OpenElement) Letöltve: 2014. április 12.

⁶ ITER: *ITER and the environment*. Forrás: <http://www.iter.org/fag#What kind of nuclear waste will be produced by ITER and in what quantity> Letöltve: 2014. április 12.

Út az EUROfusion-höz az Európai Fúziós Fejlesztési Megállapodáson (EFDA) keresztül

A fúziós energia megvalósítása, kivitelezése egy együttműködés keretében valósul meg Európán belül, mely több mint fél évszázados múlttal rendelkezik. A főbb keretet többek között az Euratom, majd 1999-től az Európai Fúziós Fejlesztési Megállapodás (European Fusion Development Agreement, EFDA) biztosította, mely utóbbi feladatkörét 2014. október 09-től az EUROfusion (Európai Konzorcium a Fúziós Energia Fejlesztésére) vette át, azaz felügyeli és irányítja az európai fúziós kutatásokat, melynek a Magyar Euratom Fúziós Szövetség (MEFSZ) szintén tagja.

A fúziós kutatások és fejlesztések az 1957-ben aláírt „Római Szerződésekre” vezethetők vissza, mely szerződés létrehozta az Európai Atomenergia-közösséget, azaz az Euratomot. Az Euratom Programnak két kiemelt területe van: maghasadás és sugárvédelem, illetve a fúziós kutatás, a mágneses térben létrehozott fúzió, mint energiaforrás.⁷ Konkrét feladatai egyikének tették a közös vállalkozások létrehozását, mely az európai atomenergia-ipar fejlődése érdekében döntő jelentőséggel bíró projektek megvalósítását célozza meg. Ennek keretében alakult meg a már említett JET, melynek tevékenységét az 1999-ben létrejött EFDA vette át, továbbá a nemzetközi összefogással megvalósuló ITER fúziós energia-program.

Az ITER (Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor) megállapodás 2006-os aláírása után a Tanács 2007 áprilisában létrehozta a Fusion for Energy (F4E) közös vállalkozást, melynek szerződésben foglalt időtartama harmincöt év. Feladata az ITER programban az európai részvétel koordinálása. *„Egyik legfontosabb feladata, hogy az európai ipari és kutatási szervezetekkel együttműködve csúcstechnológiát képviselő alkotóelemek széles választékát fejlessze ki és állítsa elő az ITER-projekt számára.”*⁸ Tagjai között találjuk az EU 28 tagállamát, Svájcot, illetve az Euratomot, melynek képviseletében az Európai Bizottság jár el. Ennek a szervezetnek a megjelenésével az EFDA szerepe megváltozott és tevékenységét átszervezték. 2008 januárjában került feladatkörükbe az ITER működésére történő felkészülés, illetve a fúziós fejlesztések érdekében a meglévő tudás megszilárdítása, továbbfejlesztése. A kitűzött célok elérése érdekében a szakemberek kitaníttatása rendkívül fontossá vált, így ennek koordinálását az EFDA kapta meg és az EUROfusion örökölte tovább. Jelenleg két telephellyel

⁷ European Commission: *Horizon 2020: Euratom*. Forrás:

<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/euratom> Letöltve: 2014. április 3.

⁸ Europa.eu: *Fusion for Energy*. Forrás: [http://europa.eu/about-](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm)

[eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm) Letöltve: 2014. április 1.

rendelkezik: az egyik Németországban, Garching-ban található, a másik Nagy-Britanniában, Culham-ban, ahol maga a JET is, mely létesítményt az EUROfusion nevében a Culham Center for Fusion Energy (CCFE) üzemelteti és tartja karban. Az EUROfusion keretét biztosítja a JET működésének, melyhez mintegy 30 laboratórium csatlakozott az EU-ban, és több mint 300 tudós végez rajt kísérleteket.⁹ Az ő munkájuk feletti koordináció szintén az EUROfusion feladatkörébe tartozik.

A fúziós kísérletek nem merülnek ki a JET-ben, illetve az ITER-ben. Jelenleg Európában 14 működő vagy építés alatt álló kísérlet folyik.¹⁰ Legtöbbjük oktatási céllal épült, melyek a jövő generációjának gyakorlati helyéül fognak szolgálni a már említett szakmai tudás megalapozása és fejlesztésének célja érdekében. Mindegyik kísérlet más területeken próbálja ki magát, hogy végül a legjobb megoldást tudják kiválasztani a jövőbeni erőmű számára, ezért vannak kis-és közepes méretű tokamakok az európai fúziós programban. Tehát különböznek méretükben, formájukban, fűtési rendszerükben. Érdemes kiemelni a Csehországban megépített úgynevezett COMPASS-D (COMPact ASSEMBly) eszközt. Egy gömb tokamakról van szó, mely az egyetlen az Európai Unióba belépő új országokban. Emiatt a jövőben Csehország regionális központi szerephez juthat mind a kutatások, mind az új tudósok képzése területén. A cseh tokamak ITER-szerű konfigurációval rendelkezik, rajta kívül csak a JET és a német ASDEX-U tokamak alkalmas a magas plazma-megfogásra. Ezen felül a csehek egy méretében kisebb tokamakot, a CASTOR-t (Czech Academy of Sciences TORus) üzemeltettek 1977 és 2006 között. Érdekessége, hogy egyike volt a legelső működő tokamakoknak, és a 60-as évek elején építették meg Moszkvában, melyet 1975-ben adományoztak Csehországnak. Leállításának oka a COMPASS üzembe állítása volt.¹¹

Az EFDA TIMES modell

Azzal kapcsolatban, hogy a fúzió milyen gazdasági potenciállal rendelkezik, az EFDA lefuttatott egy szimulációt a fúzió társadalmi-gazdasági előnyeiről. A projekt 2004-ben kezdődött és a TIMES elnevezést kapta, mely a The Integrated MARKAL-EFOM System rövidítéséből ered. 2100-ra a Föld népessége az előrejelzések alapján eléri 10 milliárdot és a globális gazdaság hétszeresére fog növekedni. A kérdés az, hogyan tud a világ energiaellátása felfejlődni 2100-ra. Az EFDA TIMES energia modell a teljes energetikai rendszer egy globálisan hosszú távú parciális egyensúlyi modellje, mely tizenöt régióra osztja fel a világot.

⁹ EFDA: *What EFDA does*. Forrás: <http://www.efda.org/efda/activities/> Letöltve: 2014. április 1.

¹⁰ EFDA: <http://www.efda.org/efda/organisation/experiments/>

¹¹ Tokamak Department: *Tokamak Castor and its History*. Forrás: <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/index?m=castor> Letöltve: 2014. április 1.

Az vizsgált időszak 2000-től 2100-ig terjed, mely további 12, változó hosszúságú egységekre került felosztásra (5, 5, 5, 15, 5, 15, 6, 13, 8, 11, 10 és 9 év).¹² Ennek segítségével tudják elemezni a fúziós energia belépésének hatásait a század a második felében. Ezen felül a modellezők meg tudják vizsgálni a klímaváltozás következményeit, illetve az energia és környezetvédelmi politikák alakulását. A modellezésnél az előbb felsoroltakon kívül figyelembe kellett venni, hogy a technológiák különböző időszakokban különböző teljesítményt nyújtanak. Ez a megújuló technológiák esetében egyértelmű, de a hő-és villamos energia igényeket is a napszakok határozzák meg. Ennek okán három évszakra (tél, nyár, köztes) határoztak meg hat időszakot és két napszakot.¹³

Az európai szervezetek által létrehozott számítógépes modell eredményei alapján, 2100-ra a fúzió fogja kitenni világszerte a villamosenergia-piac 36 százalékát. Az éghajlatváltozás visszaszorítása érdekében a világ kormányainak szükséges lépéseket kell megtenniük, és ha azt feltételezzük, hogy ez teljesülni fog, akkor a szén és más fosszilis tüzelőanyagok használata visszaszorul. Ennek következtében az energiaellátás megoszlása teljesen más képet fog mutatni, így a modell alapján a fúziós energia adja a legnagyobb részt, azt követik a megújuló energiaforrások, a vízenergia és a nukleáris maghasadás 20-30 százalékkal.¹⁴ A fúziós energiafelhasználás mértéke a következő század elejére viszont kormányzati döntéseken fog múlni és a megfelelő érdekképviselőten a már meglévő energetikai cégek esetében.

Horizont 2020 és a „Road Map”

Az Európai Uniónak kiemelt célja, hogy a kontinens versenyképességét globális szinten növelje. Az Európa 2020 stratégia alappillérei között foglal helyet a Horizont 2020 keretprogram, mely egy kutatás- és innováció finanszírozási eszköz az „Innovatív Unió” elnevezésű kezdeményezésen belül. Közel 80 milliárd eurót biztosít támogatási alapnak hét éven keresztül.¹⁵

Az Euratom nukleáris kísérletei során azon dolgozik, hogy minél nagyobb mértékben növelje a nukleáris biztonságot és hosszú távon hozzájáruljon az energiarendszer széntelenítéséhez. A Horizont 2020 három prioritása kiemelendő: kiváló tudomány, az ipari vezető szerep, és társadalmi kihívások. Az első pillérben foglaltaknak a célja, hogy a magas kockázattal járó

¹² Cabal, H.; Lechón Y.: *EFDA World Times energy model. Model documentation*. EFDA. 13.

¹³ Cabal, H.; Lechón Y.: *EFDA World Times energy model. Model documentation*. EFDA. 13.

¹⁴ EFDA (2012): *36% of the electricity market for fusion*. Forrás: <http://www.efda.org/2012/05/36-of-the-energy-market-for-fusion/> Letöltve: 2014. április 12.

¹⁵ European Commission: *What is Horizon 2020?* Forrás: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020> Letöltve: 2014. április 3.

kutatási tevékenységeket, melyek magas megtérülést ígérőek, nagymértékben finanszírozza az Európai Unió. Továbbá, a kiváló kutatókat és kutatócsoportokat ösztönözni új technológiák kifejlesztésére, ezért karrierjük fejlesztése és az országok közötti együttműködés, innováció területén dolgozók cseréje kiemelten támogatottá vált az új programon belül. „Az ipari vezető szerep” egyértelműen jelzi, hogy Európa az alap-és ipari technológiák területén világviszonylatban kíván sereghajtóvá válni, ezért a kutatás és a fejlesztés nagymértékű támogatást fog élvezni az elkövetkező hét évben. A harmadik, egyben utolsó pillér a „társadalmi kihívások”, melyből az Euratomnak a következő csoportokban célzott támogatások válnak felhasználhatóvá: az első a „biztonságos, tiszta és hatékony energia”, a második az „éghajlatváltozás, erőforrás-hatékonyság és nyersanyagok”.¹⁶ A Bizottság 2013 végén két évre előre megállapította a költségvetést, mely megközelítőleg 15 milliárd eurót tesz ki, csak 2014-re nézve 7,8 milliárd euró. Az első pillér 3 milliárd euróval részesül a legnagyobb támogatásban, a második pillérnek 1,8 milliárd eurót, míg a harmadik pillérnek 2,8 milliárd eurót állapítottak meg.¹⁷

A hatékony kutatási tevékenység elvégzése érdekében egyszerűbb szabályozási rendszert vezettek be. Az egyetemek, kutatóintézetek és vállalatok az Unió összes országában könnyebben jutnak ezután hozzá a finanszírozásokhoz. Az európai fúziós kutatási programot, mely a Horizont 2020-hoz kapcsolódik, az EFDA dolgozta ki 2012-ben, ez az úgynevezett „Ütemterv a fúziós energia megvalósításához”, azaz a Roadmap. Az újonnan létrehozott szerv (EUROfusion) feladata lesz ennek az ütemterv menetrendszerinti végrehajtása.

Francesco Romanelli, az egykori EFDA vezető igazgatója leírja egyik tanulmányban, hogy verseny alakult ki a világon a fúziós energiatermelés mielőbbi megvalósítása érdekében. De Európa nem hajlandó vágtába kezdeni, hogy Kína agresszív programját túlszárnyalja, akik 2050 előtt a fúziós villamosenergia-termelést be akarják kapcsolni a rendszerbe. Európa jelenleg vezető pozíciót tölt be a kutatásokban és nagy technikai előnnyel rendelkezik, de ezzel párhuzamosan nagy elvárásokat támasztottak irányába a nemzetközi partnerek, melyet az ITER megépítése generált. Az ütemterv központi helyét ezáltal az ITER és annak sikereses kivitelezése foglalja el. A technikai ütemterv elkészítésére az Európai Bizottság kérte fel az

¹⁶ Bay Zoltán: *Horizon 2020 program*. Forrás: <http://www.bayzoltan.hu/bay-hunor/horizon-2020-program>
Letöltve: 2014. április 4.

¹⁷ European Commission (2013): *Horizon 2020 launched with €15 billion over first two years*. Forrás: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/horizon-2020-launched-%E2%82%AC15-billion-over-first-two-years>
Letöltve: 2014. április 3.

EFDÁ-t, akik három fő szakaszt különítettek el: 2014-2020, 2021-2030, 2030-2050.¹⁸ Erre azért volt szükség, hogy az mindenképpen beleférjen Horizont 2020 pénzügyi ütemtervébe és keretibe. Nyolc célorientált megközelítés ölt testet nyolc küldetésben (Missions). Fontos a kiemelt kockázatok minél nagyobb szintű mérséklése, melyet 2020-ig el kell érni. Ebben nyújt segítséget a JET többek között azzal, hogy feltárja az ITER rendszerek működését az ellenőrző rendszerek segítségével. De ez szükségessé tette a JET működésének meghosszabbítását. 2014. június 6-án írta alá az Európai Biztosság és a CCFE a JET-létesítményekre vonatkozó új szerződést, mely értelmében 2018-ig hosszabbították meg azok működését 283 millió euró hozzáadott támogatási összeggel. Ezáltal az új EUROfusion konzorcium, mely magában foglalja az összes Európai Unió tagállam és Svájc fúziós kutatólaboratóriumait és intézeteit, a 2014-2018-as programidőszakban tovább használhatja a JET-et.¹⁹

A következő fejezetben az ITER bemutatására kerül sor bővebben, mely magának az ütemtervnek a legfontosabb eleme, és minden tekintetben mérföldkőnek fog számítani a fúziós technológia tekintetében. Ismertetése jól szemlélteti a befektetett nemzetközi energia nagyságát.

ITER - Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor

Az ITER a világban betöltött szerepének a bemutatását jól ismert emberektől származó idézetekkel vezetném be. II. Albert monacói herceg a következőt mondta beszédében a 2010-es Nemzetközi Fúziós Energia Napokon: „Az ITER projekt nagy ígéreteket tartogat a jövő generációi számára, melyet két kulcsszó foglal keretbe: „innováció” és „haladás”.²⁰ A Nemzetközi Energiaügynökség ügyvezető igazgatója, Maria van der Hoeven a 2013-as monacói találkozón: „A fúziós energiában benne van a lehetőség, hogy játékváltó legyen a következő generáció számára.[...] A társadalmi elfogadottság megszerzése a kulcs.” Daniel T. Allen, az Aliier LLC elnöke kifejtette, hogy „Ez nem egy technológia, melyet fejlesztenünk KELL. Fúzió egy olyan technológia, melyet MUSZÁJ fejlesztenünk.”²¹ Végül Lev Andreevich

¹⁸ FuseNet (2014): *The EFDA roadmap: Fusion Electricity to the European grid by 2050!* Forrás: <http://fusenet.eu/node/360> Letöltve: 2014. október 22.

¹⁹ European Commission (2014): *EU gave a new financial boost to fusion research.* Forrás: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/eu-gave-new-financial-boost-fusion-research> Letöltve: 2014. október 20.

²⁰ ITER (2010): *A great promise for future generations.* Forrás: <https://www.iter.org/newsline/155/505> Letöltve: 2014. április 12.

²¹ ITER (2013): *World fusion community gathers in Monaco.* Forrás: <http://www.iter.org/newsline/292/1787> Letöltve: 2014. április 12.

Artsimovitch (1909-1973) szovjet fizikust idézném: „A fúzió készen lesz, amikor a társadalomnak szüksége van rá.”²²

A Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor a valaha létező legnagyobb tudományos vállalkozás, mely hét tag (Európai Unió, Amerikai Egyesült Államok, India, Kína, Dél-Korea, Japán, Oroszország) által fog megépülni Candarache-ban, Dél-Franciaországban. A nemzetközi kutatóberendezés kivitelezésének tervezett időtartama harminc év, melyből csak a tíz éves építési szakasz fog közel 13 milliárd Euróba kerülni.²³ Az Európai Unió az építkezési folyamat költségeinek 45,5 százalékát állja, míg a többi hat tag egyenként 9,1 százalékkal veszi ki részét. Közel 90 százalékból természetbeni fizetéssel váltják ki a hozzájárulást, azaz alkatrészeket, épületegységeket szállítanak a helyszínre.²⁴ Ennek alapjául szolgál a közel 140 megkötött beszerzési megállapodás (PA). Ezek a dokumentumok szabályozzák a műszaki előírásokat és a különböző irányítási követelményeket. Létezik az úgynevezett ITER elszámolási egység (IUAs), mely a PA értékeket fejezi ki.²⁵ Ennek a valutának kidolgozására éppen a természetbeni fizetések miatt volt szükség, mely hatékonyan semlegesíti a piaci ingadozásokat. Az ITER működési fázisában (2019-2037) a részesedési arányok változni fognak, mely értelmében az EU kifizetési arány 34 százalékra, Japán és az Amerikai Egyesült Államok 13 százalékra, végül Dél-Korea, India, Oroszország és Kínáé megemelkedik 10 százalékra.²⁶

Az ITER kivitelezésének szempontjából a 2020-2030 közötti időszak fog összpontosított erőfeszítéseket megkövetelni a tudósok és mérnökök részéről. Egyelőre azzal számolnak, hogy minden a terv szerint fog működni, mind időrendileg mind pénzügyileg. Ezért elkezdődtek a szerződésmegkötések, melyek a fő elemekre vonatkoznak, mint a toroid mező mágnesek, tárolóedény. Ezen felül beindultak a K+F tevékenységek, melyek a fűtési és diagnosztikai rendszerekre koncentrálnak. Ezek szakszerű összehangolásáról, kezeléséről a Fusion for Energy (F4E) gondoskodik, mely az ITER belső ügynöksége.

Az ITER-nek elektromos ellátásra lesz szüksége, melyet a már meglévő hálózatról fognak biztosítani (120-620 MW), és várhatóan nem okoz fennakadást a helyi felhasználók körében.

²² Smith, Llewellyn Chris: *The path to Fusion Power*. Oxford. Chair ITER Council. Forrás: <http://energyseminar.stanford.edu/sites/all/files/eventpdf/Energy%20%2B%20Fusion%20-%20Dynasty%20Chris%20Llewelly%20Smith.pdf> Letöltve: 2014. április 12.

²³ ITER: *Facts & Figures*. Forrás: <http://www.iter.org/factsfigures> Letöltve: 2014. október 25.

²⁴ ITER: ITER Cost. Forrás: <http://www.iter.org/faq> Letöltve: 2014. április 15.

²⁵ Dulong, Krista: *Sharing the ITER pie*. Forrás: <http://www.iter.org/newsline/96/1318> Letöltve: 2014. április 15.

²⁶ ITER: ITER Cost. Forrás: <http://www.iter.org/faq> Letöltve: 2014. április 15.

Ezen felül 3 millió köbméter vizet fog évente igénybe venni a működési fázisában a tokamak, melyet a közelben lévő Canal de Provence fog adni földalatti alagutakon történő szállítással.²⁷

Sokakban felmerülhet a kérdés, hogy mi fog történni, ha az ITER-t elindítják. De ez bekapcsolás percéig rejtély marad, hiszen a kísérleteknek pont ez a lényege. Eddig még senki nem állított elő forró, sűrű és tartós plazmát, mely fenn tudná magát tartani, a fizikusok csak megjósolni tudják az atomi részecskék viselkedését. Viszont, ahogy minden berendezésnél, fenntartását nem sikerül megvalósítani, és egyelőre az ITER esetében sem világos, hogy képes lesz-e elég energiát termelni ennek a célnak eléréséhez. Az előirányzott időterv sem biztos, hogy tartani tudja magát, már most úgy tűnik, hogy három-négy éves késésben van a 2020-ra tervezett „start”.²⁸ De a technológiai fejlesztéseket érthető módon nem lehet időpontra megvalósítani, más kérdés, hogy a politikusok hozzáállása mennyire lesz türelmes. A 2013 júniusában az ITER Tanácsa Tokióban tartotta gyűlését, mely nem ment teljesen zökkenőmentes. A tanács koreai tagja a megbeszélés egy pontján kiviharzott, de az amerikaiak is kifejezték nem tetszésüket. Tudni kell, hogy a DOE (Department of Energy) ekkora megvonta a finanszírozást a MIT-hez (Massachusetts Institute of Technology) tartozó tokamaktól annak érdekében, hogy az ITER költségeihez nagyobb mértékben tudjon hozzájárulni. Viszont a Kongresszus tagjai az ITER-nél tett látogatást követően elégedetlenségüket fejezték ki: „*ITER az egész hazai programot fel fogja emészteni.*”²⁹ Porkoláb Miklós a bostoni MIT Plazmafizikai Intézetének igazgatója nagy veszteségnek nevezte ezt a döntést, hiszen 2014 májusa után már csak két magfúziós kísérleti helyszín fog maradni az Amerikai Egyesült Államokban (Princeton Egyetem, General Atomics). Maria Zuber, a MIT alelnöke így nyilatkozott az európai projektről: „*borzasztó csúszásban van és arcátlanul meghaladja a költségvetést, és ők azok, akiket jutalmaznak.*”³⁰ A tokiói találkozón Osamu Motojima, az ITER főigazgatója kísérlete, hogy meggyőze a hazai ügynökségeket egy centralizáltabb, ezáltal egy hatékonyabb szervezeti felépítésről megbukott. Problémát jelent, hogy valamennyi tagállam nem tud egy csapatként együttműködni, melyet minél előbb

²⁷ ITER: *ITER and the environment*. Forrás:

<http://www.iter.org/faq#What kind of nuclear waste will be produced by ITER and in what quantity>
Letöltve: 2014. április 12.

²⁸ KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker. Forrás:

http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1
Letöltve: 2014. április 12.

²⁹ Jones, M. Richard (2012): *Skeptical Appropriators Question FY 2013 DOE Office of Science Budget Request*. AIP. Forrás: <https://www.aip.org/fyi/2012/043.html> Letöltve: 2014. április 13.

³⁰ Jonson, Y. Carolyn: *Fusion program at MIT is ending*. The Boston Globe. Forrás: <http://www.bostonglobe.com/metro/2013/05/19/fusion-energy-research-mit-shut-down-people-lose-their-jobs/x8CDMwIk26faDd9FmwlrTQ/story.html> Letöltve: 2014. április 13.

orvosolnia kell a rendszernek. 2013 októberében a Tanács egy rendkívüli ülést hívott össze, melyen eldőlt, hogy az amerikai hozzájárulás 4 milliárdról 6,5 milliárd amerikai dollárra nő, illetve, hogy mind az ITER-t, mind a MIT tokamakot finanszírozni fogják a továbbiakban. Viszont ezt az ITER minél előbbi sikereihez kötötték, máskülönben az Amerikai Egyesült Államok szerepe veszélyben lehet a projekten belül.³¹

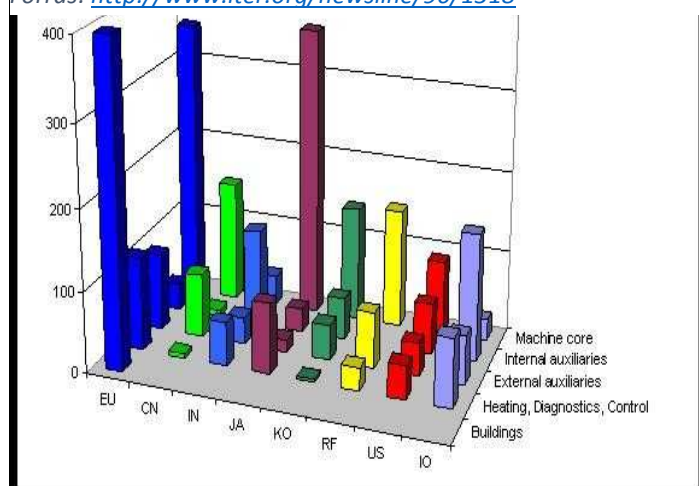
Az ITER központi irányítását egy számítógépes rendszer fogja működtetni, melynek neve „codac” és százhuszezernyi információáradatot fog figyelemmel kísérni, többek között a plazahőmérsékletet, az elektromágneses aktivitásban bekövetkező ingadozásokat.³² Meg kell említeni, hogy a kezdetektől fogva a mágnes technológia megtervezése és megépítése tartozik a legbonyolultabb feladatok közé. Ahhoz, hogy központi mágneses tekercs kibírja a plazma kilövéseit, szupravezető kábelek segítségével valósul meg. Egy kábel körülbelül 1000 szupravezető szálból áll. Az ITER tekercsei közel 80 ezer kilométernyi, 0,8 mm-es átmérőjű szupravezető szálból fognak elkészülni, mely 18 darab torodiális tekercset tesz ki.³³ Ez olyan termelési kapacitást igényel, melynek egyedüli elvégzésére egy ország sem képes, ezért az ITER együttműködésben résztvevő országok mindegyike kiveszi részét annak gyártásában. Hatalmas mennyiségű anyagot vesznek fel a mágnesek, melyet több különböző országban állítanak elő. Ez egyfajta logisztikai rémálom is egyben. De ezen felül minden ország más mintákkal dolgozik, mely egyes esetekben versenyt okozott, kampány alakult ki a saját fejlesztésük kínálatára.

³¹ KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker. Forrás: http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1 Letöltve: 2014. április 12.

³² KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker. Forrás: http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1 Letöltve: 2014. április 12.

³³ Magfuzio.hu: *A külső mágneses tér előállítás*. Forrás: <http://magfuzio.hu/tanulmanyok/a-kulso-magneses-ter-elovallitas/> Letöltve: 2014. április 14.

1. ábra: Tagországok természetbeni hozzájárulása az ITER építéséhez
 Forrás: <http://www.iter.org/newsline/96/1318>



Az ITER megépítésének valódi árát senki nem tudja megmondani, a becslések folyamatosan növekednek, egyszerűen előre kiszámíthatatlan a végösszeg. Húsz milliárd dollárban határozták meg, viszont ez ugyanúgy csak egy viszonyítási érték, de már ezzel is a világ legdrágább tudományos műszerének számít. Amennyiben sikerül megvalósítani a

fúziós elméleteket, és a Földön sikerül egy csillagot „működtetni”, akkor a világ energiaproblémái több millió évre megoldódnak. Mindemelllett, visszafordíthatja bolygónkat a környezeti pusztulástól. Érdekesség, hogy a kilencvenes években a jövőbeni energiával kapcsolatos aggodalmak főleg gazdasági vonatkozásúak voltak, és csak a klímaváltozás előtérbe kerülése tette környezeti projektté az ITER megépítését. A következő évtizedek nagy feladata lesz, hogy az olajt helyettesíteni tudjuk, azt követően a földgázt, mert ma a kettő együtt minden ország energiafelhasználásának 60 százalékát adja. Németország esete speciális, hiszen a 2020-as évekre a tervek szerint leállítják az összes atomerőművet, ezáltal marad az olaj, földgáz, szén, biomassza, szél- és napenergia. Utóbbi két százalékát adja az ország energiatermelésébe, összesen 12 százalékot tesznek ki a megújuló energiaforrások, mely érték emelkedhet, de csak további pár százalékkal.³⁴ A szélerőművek és az országon átívelő elektromos vezetékek folyamatos építése több milliárd eurós összegre rúgnak.

DEMO

A DEMO fúziós energiatermelés megvalósításának utolsó bástyája, melynek megépülésével megvalósul a közel egy évszázados kutatások gyakorlati eredménye. Az utolsó kísérleti létesítmény a fúziós erőművek megépítése előtt az ütemterv alapján. A végleges tervek az ITER-en és más fúziós kísérletek eredményein múlnak. Az F4E alá fog tartozni a program kutatási és fejlesztési tevékenységeinek előkészítése többek között azzal, hogy tanulmányokat készít, fejleszt a prototípust. Két gigawatt elektromos energia előállítására lesz képes a tervek szerint.³⁵ A DEMO építésének a 2030-as évek elején el kell indulnia, mert csak így valósítható

³⁴ KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker. Forrás: http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1 Letöltve: 2014. április 13.

³⁵ CCFE: *Achieving fusion power*. Forrás: http://www.ccf.ac.uk/Fusion_power.aspx Letöltve: 2014. április 5.

meg fúziós energia 2050-ig. Ezért kezdődik meg 2020 után a DEMO mérnöki kivitelezése, az ITER-rel párhuzamosan válik központi fontosságúvá. Egyelőre sok innovációs kérdés előtt állnak a kutatók, mint például a trícium előállításának, „tenyésztésének” technológiai megoldása.

Feltehetjük a kérdést: a fúziós energia olcsó lesz nekünk? A válasz attól függ, honnan közelítjük meg. Az évtizedek előrehaladtával az olaj ára egyre magasabb lesz, így ahhoz képest olcsóbb lehet a fúziós energia. A szén a klímaváltozás miatt nem a legjobb megoldást fogja nyújtani olcsósága ellenére sem. Összességében nem egy olcsó energiaforrásról beszélünk, de megújuló energiával nem lehet pótolni a kieső energiamennyiséget. Gigawattban és terra wattban kell nézni a felmerülő lehetőségeket! A másik lehetséges opció több száz hagyományos nukleáris reaktornak a megépítése, de nem szabad megfeledkeznünk arról sem, hogy a fűtőanyagként szolgáló uránkészletünk véges és a jelenlegi technológiával egy évszázadon belül teljesen kimerülhet. Látható, hogy a fúziós energia megvalósulása egyre sürgetőbbé válik.

Fusion for Energy

Az előzőekben már többször említésre került az F4E, most megnézzük bővebben céljait, tevékenységi köreit. Az Euratom Szerződés hatálya alatt jött létre. Fő feladata, hogy biztosítsa Európa hozzájárulását az ITER-hez, illetve az úgynevezett „tágabb megközelítésű megállapodás” irányítása, melyet az Európai Unió Japánnal kötött meg. Végül a DEMO létrehozásának előkészületei is az ő felelősségi körükbe tartozik. Mindemellett, ők a felelősök a high-tech elemek tervezésének, a K+F-ének és a gyártásának előkészítésért és koordinálásáért, mint a mágnes, vagy hulladékkezelés és tárolás, radiológiai védelem.³⁶ 2007. április 19-én hozta létre a Tanács 35 éves időtartamra, helyszínéül Spanyolországot jelölték ki.³⁷ A jelenlegi tagok között a 27 Európai Unió tagállam, az Euratom és Svájc található. A legfőbb szerve az Igazgatótanács, mely az F4E munkáját felügyeli, a Végrehajtó Bizottság (EXCO) tizenhárom tagja az ő munkájukat segíti (pl. szerződések odaítélésével), a Műszaki Tanácsadó Testület (TAP) pedig tanácsokkal látja el mind az Igazgatótanácsot, mind az igazgatót az F4E technikai és tudományos tevékenységeivel kapcsolatban.³⁸ Az igazgatótanács tagjai évente legalább kétszer üléseznek, melynek során ajánlásokat tesznek és döntéseket

³⁶ Fusion for Energy: *ITER-Our contribution*. Forrás:

<http://fusionforenergy.europa.eu/understandingfusion/ourcontribution.aspx> Letöltve: 2014. április 6.

³⁷ Europa.eu: *Fusion for Energy*. Forrás: [http://europa.eu/about-](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm)

[eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm) Letöltve: 2014. április 6.

³⁸ Fusion for Energy: *Organisation structure*. Forrás:

<http://fusionforenergy.europa.eu/aboutfusion/orgstructure.aspx> Letöltve: 2014. április 6.

hoznak meg. Ők nevezik ki az igazgatót és fogadják el a költségvetést, illetve az éves munkaprogramot. Minden tag két főt delegál, így Magyarországot Zoletnik Sándor (KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet) és Tóth-Vizkelety Barbara (Nemzeti Innovációs Hivatal) képviseli. A Végrehajtó Bizottság 13 külső szakértője ezzel szemben évente hatszor ül össze.

US ITER

Érdemes kitekinteni a tengeren túlra. Az 1950-es években merült fel először a fúziós energiatermelés gondolata, mely a Manhattan Projektből kutatásaiból eredt. Az egész világot foglalkoztatta az elképzelés és megkezdődtek az erőfeszítések a kutatások területén, hogy megtalálják a megoldást. Érdekesség, hogy 1951-ben, Juan Perón argentin elnök kijelentést tett arra vonatkozóan, hogy Huemul szigetén megépítették a világ első termonukleáris reaktorát. De tény, hogy ebben az időben a fúziónak csak amerikai tudományos életben volt helye, ez pedig a hidrogénbombának, más néven fúziós bombának a fejlesztése volt. Első kísérleti robbantására csak 1952-ben került sor. A Times magazin címlapjára került a hír, ahol Perón magasztalta a reaktort, viszont részleteket nem árult el. A projekt vezetőjének Ronald Richter csehszlovák kutatót nevezte meg, aki a Harmadik Birodalom idején Németországban végzett katonailag szponzorált kutatásokat.³⁹ Hamar kétségeket ébresztetett a reaktor valóságossága, sokan örültek, vagy örült zseninek gondolták, végül tisztázódott, hogy teljes mértékben átverésről van szó. Természetesen, az argentin kormánynak ez megalázó volt, az amerikai kutatók viszont profitáltak az esetből, mert ösztönözte őket egy valódi termonukleáris reaktor megtervezésére. Erre 1968-ban került sor, de nem az Amerikai Egyesült Államokban, hanem a Szovjetunióban, mely nagy áttörés volt a mágnesesen zárt fúzióban, ezt a zárt eszközt nevezték el tokamaknak. Ezután verseny vette kezdetét a teljesítménynövelés tekintetében. Az idő és a technológiai fejlődés előrehaladtával került az érdeklődés középpontjába a fúziós energia társadalmi hasznossági aspektusa. Az 1970-es években vált az amerikai energiapolitika részévé a fúziós energiatermelés hazai hasznosítása. Ezt a fajta érdeklődést az évtizedben zajló energiaválság generálta, melynek elmélyülésével Jimmy Carter államapparátus kiemelt fontossággal kezelte a fúziós energiát az 1980-as Mágneses Fúziós Energia Műszaki törvényben (HR 6308).⁴⁰ Az Energiaügyi Minisztérium (Department of Energy) hatálya alá

³⁹ KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker. Forrás: http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1 Letöltve: 2014. április 12.

⁴⁰ National Research Council: *A Review of the DOE Plan for U.S. Fusion Community Participation in the ITER Program*. The National Academy Press, Washington, D.C., 2009., 5.

helyezte a mágneses fúziós kutatásokat, fejlesztéseket és demonstrációs programokat. A törvény kitűzött nemzeti célnak határozta meg egy 2000-re elkészült, sikeresen működő mágneses fúziós demonstrációs erőmű meglétét az Amerikai Egyesült Államokon belül. Az elnök hitt annak teljesülésében, mert az addigi kutatások nagyon biztató eredményekkel szolgáltak. Carter a következőt mondta a törvény aláírása előtt: „*Nemzetünk vitathatatlan vezetője ezen fejlett technológiai fejlesztésnek, és a HR 6308 segít nekünk, hogy ez így maradjon.*”⁴¹ A törvény hozzájárult a pénzügyi támogatási alap jelentős megnövekedéséhez. Előírta, hogy az akkori fúziós program pénzügyi alapját hét éven belül kell megduplázni, továbbá a program sikeressége megkívánja, hogy a kormány, az egyetemek, vállalatok és nemzeti laborok között minél előbbi kooperáció alakuljon ki. Kiemelte a nemzetközi együttműködések fontosságát, melyből minden nemzet kamatoztatni tud, ahogy ők is. Célként fogalmazta meg a fúziós energia nagyobb mértékű társadalmi ismertetését, illetve az Amerikai Egyesült Államok vezető szerepének fenntartását a mágneses fúzió területén.⁴² 1974-ben a mágneses fúziós energia kutatás és fejlesztésére fordított összege 43,4 millió dollárt tett ki, ez 1977-re 316,3 millió dollárra növekedett meg. 1983-ban 444 millió dollárt fordított az állam a fúziós kutatásokra.⁴³ Viszont a törvény hatályba lépését követően, az energiaválság mérséklődött, melynek következtében a törvényben foglalt ajánlásokat az amerikai kormány soha nem hajtotta végre. Az 1985-ös genfi csúcstalálkozón csatlakozott az EK-hoz, Japánhoz és a Szovjetunióhoz annak érdekében, hogy együttesen tervezzenek meg egy tokamak kísérleti reaktort, mellyel lefektették az alapjait a mai ITER projektnek.

Az 1990-es évekre a világon a fúziós kutatások mérföldköhöz érkeztek, mert két tokamak berendezésnek sikerült több mint 10 megawattnyi kontrollált fúziós energiát előállítaniuk néhány másodperces időszakra.⁴⁴ A kettő közül az egyik a Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) volt, mely Princetonban, New Jersey államban található. A másik, pedig a már kielemezett JET volt Nagy-Britanniában. Az ITER egyszerűen csak egy ötlet volt, kidolgozott rajzok sora a kezdetekben, melyet négy ország osztott meg egymás között. 1994-ben a republikánus forradalom negatív folyamatot indított el a Kongresszus törvényhozói körében,

⁴¹ Jimmy Carter: "Magnetic Fusion Energy Engineering Act of 1980 Statement on Signing H.R. 6308 Into Law.," October 7, 1980. Online by Gerhard Peters and John T. Woolley, The American Presidency Project. Forrás: <http://www.presidency.ucsb.edu/ws/?pid=45231> Letöltve: 2014. április 09.

⁴² Journal of Fusion Energy: Magnetic fusion energy engineering act of 1980. Volume 1, Issue 2, pp 149-150

⁴³ Freeman, Marsha: The U.S. Fusion Program- And Who Tried to Kill It. In: *21st Century Science & Technology*. 2009-2010. 19-24. http://www.21stcenturysciencetech.com/Articles_2010/Winter_2009/Who_Killed_Fusion.pdf

⁴⁴ National Research Council: *A Review of the DOE Plan for U.S. Fusion Community Participation in the ITER Program*. The National Academy Press, Washington, D.C., 2009., 6.

akik a nemzetköziség ellenzőivé kezdtek válni. Ez főleg olyan tudományos projekteket érintett, melyek nem nyújtottak közvetlen hasznot az országnak. A tíz milliárdos költség sok volt ahhoz képest, hogy a hálózatba energiát nem termel majd az ITER. A szkepticizmus növekedésével egyre több tudós lobbizott a projekt és az Amerikai Egyesült Államok részvétele ellen. Két kutató a Texasi Egyetemről 1996-ban létrehozott egy számítógépes modellezést, mellyel kimutatták, hogy a reaktornak nincs esélye arra, hogy a hozzá fűzött reményeket megvalósítsa.⁴⁵ A Kongresszust ezután nem tudták meggyőzni az együttműködés tagjai, hogy az adófizetők pénzét hasznos projektre költik el. Úgy gondolták, hogy az ITER soha nem fog felépülni, ezért megvonták az összes pénzügyi finanszírozást. 1998-ban a Kongresszus elrendelte, hogy a DOE mondja vissza a 1985-ben kötött nemzetközi együttműködést, melynek következtében az Amerikai Egyesült Államok 1999-ben kilépett, a San Diegóban üzemelő irodájukat bezárták, továbbá az amerikai fizikusoknak utasításba adták ki, hogy nem vehetnek részt a kutatásokban. Stefano Chiochio, a Technical Integration Division feje az ITER-en belül a következőképpen emlékezett vissza: „Úgy gondoltuk, hogy ez jelenti az ITER végét.”⁴⁶ Az Amerikai Egyesült Államok kilépésével azonban a projekt tervezése nem állt le. A későbbiekben az ITER projekt változtatásokat irányzott elő, melyeket az Amerikai Egyesült Államok szorgalmazott, mely hozzájárult, hogy a DOE Fúziós Energia Tudományos Tanácsadó Bizottsága nyitottá vált az ITER tárgyalásokban való újboli részvételre. 2003. január 30-án jelentette be az akkori amerikai elnök George W. Bush az Egyesült Államok újboli csatlakozási szándékát az együttműködéshez. Spencer Abraham energiaügyi miniszter 2003 novemberében már úgy nyilatkozott, hogy a DOE tudományos hivatalának elkövetkező húsz éves létesítményfejlesztési tervében az ITER a legfőbb prioritást fogja élvezni.⁴⁷ 2006. november 21-én írták alá a Nemzetközi Fúziós Energia Megállapodást.

Ma az Amerikai Egyesült Államokban az ITER projekt 40 államot és több mint 300 céget és egyetemet vonz be a kutatásokba.⁴⁸ Az ITER konstrukciós költségek mindösszesen csak 10 százaléka terheli az Egyesült Államokat, de annál nagyobb előnyöket biztosít számára, hiszen a technológia, valamint a tudományos adatok mind a birtokukba kerül. Ezen felül az egyetemek

⁴⁵ Browne, Malcolm W. (1996): *Cold Calculations Chill the Hot Pursuit of Cheap Fusion Power*. The New York Times. Forrás: <http://www.nytimes.com/1996/12/10/science/cold-calculations-chill-the-hot-pursuit-of-cheap-fusion-power.html> Letöltve: 2014. április 13.

⁴⁶ KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker. Forrás: http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1 Letöltve: 2014. április 12.

⁴⁷ National Research Council: *A Review of the DOE Plan for U.S. Fusion Community Participation in the ITER Program*. The National Academy Press, Washington, D.C., 2009., 7.

⁴⁸ US ITER: <https://www.usiter.org/>

és laboratóriumok lehetőséget kapnak modellezésre és az alkatrészek legyártása egyúttal. A minőségbiztosítási program az ő hatáskörükbe tartozik. 2013 decembere óta több mint 572 millió dollárt kaptak az amerikai cégek és egyetemek, illetve a US Department of Energy 40 államban található laboratóriumai.⁴⁹

Két cég neve merül fel, akik hozzájárulnak a mágneses rendszerek fejlesztéséhez a US ITER szerződések esetében. Az első a High Performance Magnetics, mely Tallahassee-ban, Floridában található. A másik cég a General Atomics, San Diegóban. A két vállalat azért került említésre, hogy látható legyen, mely cégek dolgoznak be az ITER projektbe. A meglévő vállalatok, melyek kiterjesztették termelési körüket a US ITER szerződések következtében: Oxford Superconducting Technologies (Carteret, New Jersey) és Luvata Waterbury, Inc. (Waterbury, Connecticut). A termelési struktúra átalakult, az ITER előtt ezek a cégek világméretű termelése egy évben 20 tonnát ért el szupravezető huzalból. A US ITER szerződés hatására az előbb említett két vállalat képes ugyanebből 5 tonnát előállítani egy hónap alatt. A Luvata 200 új munkahelyet teremtett a szerződéssel. A másik vállalat, az OSTC, mely valamivel több mint 16 ezer kilométernyi szupravezető huzalt gyártott le az ITER-nek, a 2009-es szerződés megkötését követően 60 új munkavállalót alkalmaztak, és több millió dollár értékben történt befektetés új vezetékekbe.⁵⁰

Az ITER kísérleti fúziós eszköz részére a US ITER már legyártotta a saját részét képező mennyiséget az alacsony hőmérsékletű, hélium hűtött szupravezető vezetékeket. Ebből csak magában az ITER-ben 100 ezer kilométert fognak beépíteni, melynek szerepe a hatalmas toroidális, azaz körgyűrű alakú mágneses mező létrehozásában van, mely a több mint 100 millió Celsius-fokos plazmát a tokamak belsejében tudja tartja.⁵¹

ITER Oroszország

A nem európai államok közül az Egyesült Államok mellett mindenképp meg kell említeni Oroszországot, mely technikai és tudományos fölényének köszönhetően kulcsfontosságú szerepet tölt be az ITER projektben. Az ITER Russia esetében a legfényesebb példa a szupravezető szál gyártósor felállítása Glazovban (Chepetsky Mechanical Plant, Republic of

⁴⁹ US ITER (2014): *News Update*. Forrás: <https://www.usiter.org/media/newsletterFebruary2014.pdf> Letöltve: 2014. április 7.

⁵⁰ Greenwald, John (2012): *New Jersey firm creates jobs and vital components for world-leading experiment*. Forrás: <http://www.pppl.gov/news/2012/07/new-jersey-firm-creates-jobs-and-vital-components-world-leading-experiment> Letöltve: 2014. április 7.

⁵¹ Bardoel, Agatha (2012): *US Production of Miles of Superconducting Wire is Under Way for ITER's Super-Sized Toroidal Field Magnets*. Forrás: https://www.usiter.org/media/features/supersized_toroidal_field_magnets.shtml Letöltve: 2014. április 7.

Udmurtia). Az első iparszerű előállítására már a késő 60-as években sor került a Kazah Köztársaság területén. A 90-es évek elején, miután a Szovjetunió összeomlott és súlyos gazdasági válságba sodródott az ország, gyakorlatilag aláasta az összes volt szovjet köztársaságot. Ennek következtében a szupravezető anyagok iránti kereslet drasztikus mértékben lecsökkent és ezáltal a termelés szinte teljes mértékben megszűnt. A moszkvai Bochvar Intézet volt az, akinek sikerült megőrizni, sőt frissíteni a nióbbium-ón és nióbbium-titán szupravezető szálak gyártási technológiáit. A gyártásuk folytatódott, de az épp arra volt elegendő, hogy Oroszország korlátozott szükségleteit kielégítse. Az ITER projektben való részvétel hozta el az ország számára az ébredést, mely megkövetelte a termelési infrastruktúra újboni létrehozatalát. A Chepetsky Mechanical Plant kezdte meg a gyártást, mely a Rosatom állami vállalat irányítása alá tartozik, mára elérte, hogy a legmagasabb világszínvonalon állítják elő őket. A kezdetekkor felléptek technológiai és szervezési problémák, de azok a kemény munkának köszönhetően hamar megoldódtak, és így 2009 óta a ChMP rendszeres gyártója a szupravezető szálaknak az ITER részére. Ezen felül Oroszország köteles legyártani 179 panelt a „takaró” részére, mely 40 százalékát teszi ki az összesnek, majd ennek a 40 százalékát fogja orosz berillium befedni. Az előbb leírtak lényege, hogy az ITER részére a berilliumnak sokkal kifinomultnak kell lennie, magasabb minőségi paraméterekkel kell rendelkeznie ahhoz képest, amit valaha ezzel az anyaggal tettek. Ez pedig hozzájárul egy magasabb szint felé történő technológiai elmozdulásnak.

A Rosatom kulcsfontosságú partner a nemzetközi termonukleáris kísérleti reaktor építésében. Az oroszok múltbeli szerepe kiemelt az ITER történetében. Nemcsak azért, mert az ITER elsősorban a szovjet-korszak tokamak reaktorának technikáján alapszik, hanem mert 1985-ben Jevgenyij Velikhov atomfizikus a Szovjetunió nevében felvetette egy közös termonukleáris reaktor létrehozatalának gondolatát. A hidegháború időszakában nemcsak európai és japán, hanem amerikai tudósokkal egyaránt kapcsolatba lépett. A technológia területén úgy tűnik készen álltak nyugat fele nyitni. Ezt megerősítette a még szintén 1985-ben Genfben tartott amerikai-szovjet csúcstalálkozó, ahol a felek megállapodtak a fúziós energia fejlesztésében. 1986-ban, ezennel Rejkjavikban született megállapodás az ITER létesítmény közös megépítéséről, majd 1992-ben kezdte el az amerikai, orosz, japán és európai tudósok dolgozni

a reaktoron.⁵² Oroszország csúcstechnológia formájában veszi ki részét ma az ITER megépítéséből.

2010. szeptember 05-én adták át a legújabb tokamakot a világon. A KTM (Kazakhstan Tokamak for Material) Kelet-Kazahsztánban, Kurchatovban épült meg. Tulajdonságai közé sorolható, hogy meglehetősen kicsi és gömb alakú szerkezetről beszélünk. Ez a közép-ázsiai ország nem ITER tag, viszont az Euratom megkötött vele egy speciális fúziós kutatási együttműködési megállapodást.⁵³ A 2000-es évek elején merült fel az ötlet a megépítéséről, melynek fő céljai között szerepelt többek között a tudomány és technológia fejlesztése Kazahsztánban; a kazah részvétel támogatása az ITER projektben, mint Oroszország partnere.⁵⁴

ITER Japán

Japán szerepvállalása az ITER-programban szintén kiemelkedő. A tervek szerint a JT-60SA első plazma 2019-re várható. A JT-60SA elnevezésű fúziós kísérlet célja, hogy az ITER-t támogassa, továbbá az ITER után épülő fúziós erőművek működését, azzal, hogy megvizsgálja, hogyan lehetne a legjobban optimalizálni azt. A legfontosabb célja, hogy eldöntse, melyik a gyakorlatban elfogható DEMO plazma terv, mely megbízható plazmaellenőrzési rendszerrel rendelkezik. Érdekessége, hogy egy közös nemzetközi kutatás és fejlesztési projekt része, melyben Európa és Japán működik együtt. Naka-ban fog üzemelni, mely Tokió közelében fekszik.⁵⁵ Egy már létező konstrukcióra (JT-60SA) épül rá, melynek tulajdonosa és üzemeltetője a Japán Atomenergia-ügynökség lesz. Az Euratom és Japán 2007-ben kötött egy tíz évre szóló megállapodást az ITER projekttel kapcsolatosan, mely a DEMO építéséhez elengedhetetlen új anyagok, illetve üzemeltetési forgatókönyvek kidolgozását vonja maga után feladatként. A „tágabb megközelítés” megállapodás (Broader Approach Agreement) keretében három, Japánban sorra kerülő kutatási projektet tartalmaz. Az első projekt a nemzetközi fúziósanyag-besugárzó berendezés (IFMIF/EVEDA) tervezésére irányul, a második a „Satellite Tokamak”, azaz a JT-60SA programhoz kapcsolódik, végül a harmadik a Nemzetközi Fúziósenergia-kutatási Központtal kapcsolatos. Erőforrások tekintetében az Európai Unió

⁵² Reznichenko, Andrei (2013): Rosatom's new ideas for clean-energy nuclear reactor. The Telegraph. Forrás: <http://www.telegraph.co.uk/sponsored/rbth/business/9940781/rosatom-nuclear-plans.html> Letöltve: 2014. április 7.

⁵³ Arnoux, Robert (2010): *Trial start-up of Kazakh Tokamak KTM*. ITER. Forrás: <https://www.iter.org/newsline/147/420> Letöltve: 2014. április 7.

⁵⁴ Kurchatov Institute, Efremov Institute (2000): *KTM project (Kazakhstan Tokamak for Material Testing)*. Forrás: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/csp_008c/pdf/ftp2_02.pdf Letöltve: 2014. április 9.

⁵⁵ JT-60SA: http://www.jt60sa.org/b/index_nav_1.htm?n1/introduction.htm Letöltve: 2014. április 5.

hozzájárulása főként természetbeni, melynek értéke megközelítőleg 340 millió eurót tesz ki.⁵⁶ A JT-60SA az ITER-hez képest korábban (2019) kezdi meg működését, mert annak tapasztalati és eredményei az ITER kísérletekhez nélkülözhetetlenek lesznek.

Magyarországi kutatások

Magyarországon már az 1950-es években megkezdődtek a fúziós kutatások, majd újboli folytatására 1979-ben került sor. Ekkor került hazánkba a Magyar Tokamak 1 (MT-1) berendezés, mellyel folytattak kutatásokat, viszont a felmerült technikai korlátok következtében azok akadályozottak voltak. Véglegesen 1998-ban állították le az MT-1-et. 1999-ben csatlakoztunk az európai fúziós kutatási programhoz, mely az Euratom fennhatósága alá tartozik. A Magyar Euratom Fúziós Szövetség (MEFSZ) vesz részt a munkákban, melynek során fission és fusion technológia elemek fejlesztésén dolgoznak.⁵⁷ Az ITER projektből szintén kiveszik a magyar kutatók a részüket. Ezt bizonyítja egy 2014 februári megállapodás, melynek során a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont más európai partnerekkel (Karlsruhe Institute of Engineering, Eindhoven University of Technology, Dutch Institute for Fundamental Energy Research, CCFE) együtt részt vesz a jülichi plazmafizikai kutatóintézet által vezetett projektben, melyre 4,9 millió eurót különített el az F4E. A cél a Franciaország területén található ITER fúziós kísérleti berendezéshez egy diagnosztika megtervezésére négy év leforgása alatt. Pontos feladatuk a töltés csere spektroszkópia diagnosztika kifejlesztése lesz (Charge Exchange Recombination Spectroscopy (CXRS), mely a vákuumkamrában lévő plazma összetételének és hőmérsékletének mérését fogja végezni.⁵⁸ Komplex fejlesztési munkára és tesztekre van szükség, mert ennek a rendszernek extrém hőmérsékleti körülmények között kell működnie, ahogy arról már az általános részben szó esett. Ezen felül a hozzá tartozó neutron fluxus, plazmasugárzás és az elektromágneses erő nagyban befolyásolja az alkatrészek kivitelezését. Figyelembe kell venni a tervezési döntéseknél, hogy a karbantartás és a fenntartás során szinte teljesen távirányítású eszközök vagy robotok által lesz megvalósítható.⁵⁹

⁵⁶ Europa.eu: *ITER: az Euratom és Japán megállapodása a fúziós atomenergiáról. A Tanács 2007/614/Euratom határozata (2007. január 30.)* Forrás:

http://europa.eu/legislation_summaries/energy/nuclear_energy/i23046_hu.htm Letöltve: 2014. április 5.

⁵⁷ Zoltnik Sándor: *Magyar fúziós kutatások rövid története*. Forrás: <http://magfuzio.hu/tanulmanyok/magyar-fuzios-kutatasok-rovid-tortenete/> Letöltve: 2014. március 29.

⁵⁸ Magfuzio.hu (2014): *Újabb ITER projekt magyar részvétellel*. Forrás: <http://magfuzio.hu/ujabb-iter-projekt-magyar-reszvetellel/> Letöltve: 2014. március 29.

⁵⁹ Jülich Forschungszentrum (2014): *Nuclear Fusion: Jülich's Role in ITER*. Forrás: <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/EN/2014/14-02-13iter.html> Letöltve: 2014. március 29.

A magyar kutatók jelentős mértékben kiveszik részüket a kutatásokból, együttműködnek nemzetközi partnereikkel és hozzájárulnak a fúziós energia kivitelezéséhez. Ezt mi sem bizonyítja jobban, minthogy a Horizont 2020 keretén belül az elkövetkező öt esztendőben évente közel 200 millió forintos támogatást kapnak a Magyar Tudományos Akadémia Wigner Fizikai Kutatóközpont kutatói.⁶⁰

Befejezés

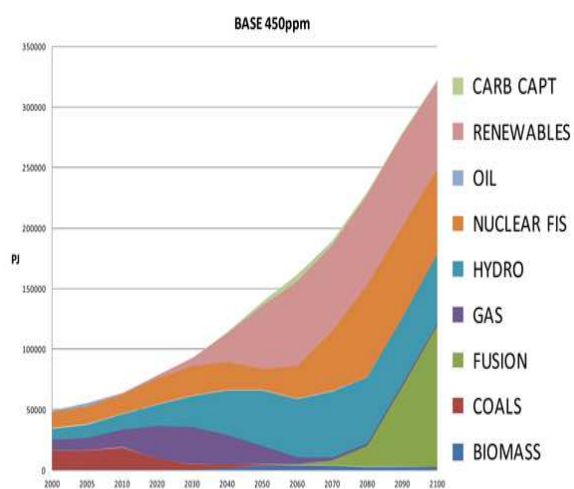
Felmerül a kérdés, hogy miért áldoznak hatalmas összegeket a fúziós programba, illetve miért siettetik annak megvalósulását, miért jött létre egy nemzetközi összefogás. A mozgatórugó mibenlétére kell először is megadnunk a választ. A XXI. századra egy olyan világ alakult ki, melynek energiaéhsége folyamatosan egyre nagyobb méreteket ölt. 2050-re az energia iránti kereslet várhatóan meg fog duplázódni, de már 2035-re 41 százalékos növekedéssel számol a BP Energy Outlook. Csak az elmúlt tíz évben 30-os volt ugyanez az érték.⁶¹ Mindennek háttérében a népességnövekedés és az egy főre jutó energiafogyasztás húzódik meg, koncentráltan a fejlődő országokban. Mindez a bolygónkra nézve fokozottabb szennyezettséget jelent, az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása sokszorosára növekedne, ha ugyanabban az arányban lennének a fosszilis üzemanyagok használatban, mint napjainkban. Ezért egyre égetőbb probléma, hogy ezeknek a helyét átvegyék a fúziós reaktorok, mely fenntartható és környezetbarát megoldást nyújt. Az elképzelések szerint, amennyiben 2050-ben a reaktorokat rá tudják kapcsolni villamosenergia-hálózatra, 2100-ra az energiatermelés 36 százalékát fogják adni.

Egy nagy méreteket öltő összefogást láthattunk, mely mind technológiai, mind pénzügyileg nagy odaadást mutat egy energiabiztosabb jövő megteremtése érdekében. Sikereségét több tényező befolyásolja, nem lehet tudni, hogy a technikai fejlesztések olyan ütemben haladnak-e, ahogyan azt előirányozták, illetve a pénzügyi források megléte, a projekt államok általi biztos támogatása sem jelenthető ki előre. De jelen állás szerint egy gördülékenyen haladó összefogásról és fejlődésről beszélhetünk.

⁶⁰ Alternativenergia.hu (2014): *A fúziós energia fejlesztését célzó európai konzorcium jött létre*. Forrás: <http://www.alternativenergia.hu/a-fuzios-energia-fejlesztet-celzo-europai-konzorcium-jott-letre/69527> Letöltve: 2014. október 20.

⁶¹ BP (2014): *Energy Outlook 2035*. 9. o., Forrás: http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/Energy-Outlook/Energy_Outlook_2035_booklet.pdf Letöltve: 2014. április 3.

2. ábra: A világ energiafelhasználásának alakulása 2100-ig (Forrás: EFDA)



Bibliográfia

Arnoux, Robert (2008): *Of bathtubs and laptop batteries*. ITER Newslane

Forrás: <https://www.iter.org/newslane/45/686>

Letöltve: 2014. április 10.

Arnoux, Robert (2010): *Trial start-up of Kazakh Tokamak KTM*. ITER

Forrás: <https://www.iter.org/newslane/147/420>

Letöltve: 2014. április 7.

Bay Zoltán: *Horizon 2020 program*

Forrás: <http://www.bayzoltan.hu/bay-hunor/horizon-2020-program>

Letöltve: 2014. április 4.

Berta Miklós, Horváth András (2009): *Fúziós energiatermelés*. Fizika és Kémia Tanszék, Széchenyi István Egyetem

Forrás:

[http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/att_files/eloadasok/\\$File/berta.pdf?OpenElement](http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/att_files/eloadasok/$File/berta.pdf?OpenElement)

Letöltve: 2014. április 12.

BP (2014): *Energy Outlook 2035*.

Forrás: http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/Energy-Outlook/Energy_Outlook_2035_booklet.pdf

Letöltve: 2014. április 3.

Browne, Malcolm W. (1996): *Cold Calculations Chill the Hot Pursuit of Cheap Fusion Power*. The New York Times

Forrás: <http://www.nytimes.com/1996/12/10/science/cold-calculations-chill-the-hot-pursuit-of-cheap-fusion-power.html>

Letöltve: 2014. április 13.

Cabal, H.; Lechón Y.: *EFDA World Times energy model. Model documentation*. EFDA CCFE: *Achieving fusion power*

Forrás: http://www.ccf.ac.uk/Fusion_power.aspx

Letöltve: 2014. április 5.

CCFE: *The tokamak*

Forrás: <http://www.ccf.ac.uk/Tokamak.aspx>

Letöltve: 2014. október 3.

Dulon, Krista: *Sharing the ITER pie*

Forrás: <http://www.iter.org/newslane/96/1318>

Letöltve: 2014. április 15.

EFDA: <http://www.efda.org/efda/organisation/experiments/>

EFDA: *What EFDA does*

Forrás: <http://www.efda.org/efda/activities/>

Letöltve: 2014. április 1.

EFDA (2012): *36% of the electricity market for fusion*

Forrás: <http://www.efda.org/2012/05/36-of-the-energy-market-for-fusion/>

Letöltve: 2014. április 12.

Europa.eu: *Fusion for Energy*

Forrás: [http://europa.eu/about-](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm)

[eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm)

Letöltve: 2014. április 6.

Europa.eu: *Fusion for Energy*

Forrás: [http://europa.eu/about-](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm)

[eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm](http://europa.eu/about-eu/agencies/euratom_agencies/agencies_bodies/index_hu.htm)

Letöltve: 2014. április 1.

Europa.eu: *ITER: az Euratom és Japán megállapodása a fúziós atomenergiáról. A Tanács 2007/614/Euratom határozata (2007. január 30.)*

Forrás: http://europa.eu/legislation_summaries/energy/nuclear_energy/i23046_hu.htm

Letöltve: 2014. április 5.

European Commission (2013): *Horizon 2020 launched with €15 billion over first two years*

Forrás: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/horizon-2020-launched-%E2%82%AC15-billion-over-first-two-years>

Letöltve: 2014. április 3.

European Commission: *Horizon 2020: Euratom*

Forrás: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/euratom>

Letöltve: 2014. április 3.

European Commission: *What is Horizon 2020?*

Forrás:

Forrás: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/csp_008c/pdf/ftp2_02.pdf

Letöltve: 2014. április 9.

Freeman, Marsha: *The U.S. Fusion Program- And Who Tried to Kill It. In: 21st Century Science & Technology. 2009-2010. 19-24.*

http://www.21stcenturysciencetech.com/Articles_2010/Winter_2009/Who_Killed_Fusion.pdf

Fusion for Energy: *DECISION OF THE GOVERNING BOARD ADOPTING THE 2014 BUDGET OF FUSION FOR ENERGY*

Forrás:

<http://fusionforenergy.europa.eu/downloads/aboutf4e/decisions/2014%20Budget.pdf>

Letöltve: 2014. október 3.

Fusion for Energy: *ITER-Our contribution*

Forrás: <http://fusionforenergy.europa.eu/understandingfusion/ourcontribution.aspx>

Letöltve: 2014. április 6.

Fusion for Energy: *Organisation structure*

Forrás: <http://fusionforenergy.europa.eu/aboutfusion/orgstructure.aspx>

Letöltve: 2014. április 6.

Greenwald, John (2012): *New Jersey firm creates jobs and vital components for world-leading experiment*. Forrás: <http://www.pppl.gov/news/2012/07/new-jersey-firm-creates-jobs-and-vital-components-world-leading-experiment>
Letöltve: 2014. április 7.

ITER (2010): *A great promise for future generations*
Forrás: <https://www.iter.org/newsline/155/505>
Letöltve: 2014. április 12.

ITER (2013): *World fusion community gathers in Monaco*
Forrás: <http://www.iter.org/newsline/292/1787>
Letöltve: 2014. április 12.

ITER: ITER Cost
Forrás: <http://www.iter.org/faq>
Letöltve: 2014. április 15.

Jimmy Carter: "Magnetic Fusion Energy Engineering Act of 1980 Statement on Signing H.R. 6308 Into Law. ," October 7, 1980. Online by Gerhard Peters and John T. Woolley, The American Presidency Project

Jones, M. Richard (2012): *Skeptical Appropriators Question FY 2013 DOE Office of Science Budget Request*. AIP
Forrás: <https://www.aip.org/fyi/2012/043.html>
Letöltve: 2014. április 13.

Jonson, Y. Carolyn: *Fusion program at MIT is ending*. The Boston Globe
Forrás: <http://www.bostonglobe.com/metro/2013/05/19/fusion-energy-research-mit-shut-down-people-lose-their-jobs/x8CDMwik26faDd9FmwlrTO/story.html>
Letöltve: 2014. április 13.

Journal of Fusion Energy: Magnetic fusion energy engineering act of 1980. Volume 1, Issue 2, pp 149-150

Jülich Forschungszentrum (2014): *Nuclear Fusion: Jülich's Role in ITER*
Forrás: <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/EN/2014/14-02-13iter.html>
Letöltve: 2014. március 29.

KHATCHADOURIAN, Raffi (2014): *A Star in a Bottle*. The New Yorker
Forrás: http://www.newyorker.com/reporting/2014/03/03/140303fa_fact_khatchadourian?currentPage=all#editorsnote1
Letöltve: 2014. április 12.

Kurchatov Institute, Efremov Institute (2000): *KTM project (Kazakhstan Tokamak for Material Testing)*

Magfuzio.hu (2014): *Újabb ITER projekt magyar részvétellel*
Forrás: <http://magfuzio.hu/ujabb-iter-projekt-magyar-reszvetellel/>
Letöltve: 2014. március 29.

Magfuzio.hu: *A külső mágneses tér előállítása*

Forrás: <http://magfuzio.hu/tanulmanyok/a-kulso-magneses-ter-eloallitasa/>

Letöltve: 2014. április 14.

National Research Council: *A Review of the DOE Plan for U.S. Fusion Community Participation in the ITER Program*. The National Academy Press, Washington, D.C., 2009.

Reznichenko, Andrei (2013): Rosatom's new ideas for clean-energy nuclear reactor. The Telegraph.

Forrás: <http://www.telegraph.co.uk/sponsored/rbth/business/9940781/rosatom-nuclear-plans.html>

Letöltve: 2014. április 7.

Smith, Llewellyn Chris: *The path to Fusion Power*. Oxford. Chair ITER Council

Forrás:

<http://energyseminar.stanford.edu/sites/all/files/eventpdf/Energy%20%2B%20Fusion%20-%20Dynasty%20Chris%20Llewelly%20Smith.pdf>

Letöltve: 2014. április 12.

Tokamak Department: *Tokamak Castor and its History*

Forrás: <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/index?m=castor>

Letöltve: 2014. április 1.

US ITER (2014): *News Update*

Forrás: <https://www.usiter.org/media/newsletterFebruary2014.pdf>

Letöltve: 2014. április 7.

US ITER: <https://www.usiter.org/>

Zoletnik Sándor: *Magyar fúziós kutatások rövid története*

Forrás: <http://magfuzio.hu/tanulmanyok/magyar-fuzios-kutatasok-rovid-tortenete/>

Letöltve: 2014. március 29.