

# Koreai Nemzeti Fúziós Program

Konzulens: Dr. Pokol Gergő

## Absztrakt

Az alábbi dolgozat célja, hogy bemutassa a KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) projekt keretében megépített fúziós reaktor felépítését, működését és a kutatás során felmerülő, megoldásra váró problémákat. Az első fejezet a fúziós energiatermelés rövid történeti áttekintése után a Koreai Nemzeti Fúziós Program céljait és eddigi eredményeit ismerteti. A dolgozat második fejezetében a magfúzió elméleti alapjainak és egy lehetséges, jövőbeli fúziós erőmű felépítésének ismertetése után kerül sor a KSTAR projekt keretében megépített kísérleti reaktor elemeinek és működésének részletes bemutatására, különös tekintettel a plazma állapot létrehozására és szabályozására. Itt kerül sor a reaktor segédrendszereinek: a fűtési rendszernek, a szabályozó és vezérlő rendszernek, a diagnosztikának és az elektromos táp-rendszernek és a bennük alkalmazott technológiáknak az ismertetésére is. Mindezek mellett a harmadik fejezetben a dolgozat kitekintést nyújt a fúziós energiatermelés jelenéről és jövőjéről, mind Korea, mind a világ energiatermelésének szempontjából.

*Kulcsszavak: fúziós energiatermelés, fúziós reaktor, Korea, tokamak*

## A fúziós energiatermelés története, programok

A nukleáris energia hasznosításának kezdete a II. világháborúig nyúlik vissza, miután Szilárd Leó és Enrico Fermi először igazolták kísérletileg a nukleáris láncreakció megvalósíthatóságát (1942). A háború során az Egyesült Államok bevetette az atombombát, majd a háború után nem sokkal Obnyinszkban megépült az első, fissziós elven energiát termelő közszolgálati atomerőmű (1954), ezzel kezdetét vette a nukleáris energia békés célú, energetikai hasznosítása.

A fúziós energia a hidegháborús fegyverkezési verseny során került előtérbe a hidrogén-bomba révén, ennek következtében minden ezzel kapcsolatos kutatást sokáig szigorú titok övezett. A szabályozott nukleáris fúzió hivatalosan egy 1958-as genovai atomenergetikai konferencián került a nyilvánosság elé, mely nagy lökést adott a tudományterületnek és megindította a fúzióval foglalkozó országok kutatói közötti együttműködést.

A Koreai Köztársaságban először a '70-es években kezdtek fúziós és plazma kutatással foglalkozni, laboratóriumi körülmények között. Sorra jöttek létre a nukleáris fúzióval foglalkozó intézetek, megépültek az első tokamakok. A kormány 1995-ben indította el a KSTAR nevű projektet, melyben nagyjából 30 iparág működött közre a tokamak tervezésében, gyártásában és összeszerelésében. Ennek köszönhetően Ko-

rea 2003-ban csatlakozhatott az ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) programhoz, mely manapság a legjelentősebb nemzetközi tokamak kutatás-fejlesztési projekt (helyszíne a franciaországi Cadarache).<sup>1</sup>

2005-ben a Dél-Koreai Nemzeti Tudományos Tanács elfogadta a Koreai Nemzeti Fúziós Programot, melynek gerincét a KSTAR, ITER és DEMO projektek adják, és amely a fúziós energiatermeléssel kapcsolatos kívánatos fejlődési stratégiát fogalmazza meg. Egy évre rá a kongresszus ezt törvényi szintre emelte, azóta a fúziós fejlesztések prioritást élveznek Korea nemzeti energiastratégiájában. A jelenlegi cél egy ipari igényeket is kielégítő fúziós erőmű kifejlesztése a 2040-es évtizedben (DEMO).<sup>1</sup>

A 2006-ban indult DEMO (DEMONstration Power Plant) a KSTAR és az ITER jövőbeli eredményeire épít, azoknak egy továbbfejlesztett változata lesz és a remények szerint már képes lesz villamos energia stabil előállítására is. A DEMO-val szembeni főbb elvárások a következők: 60 éves élettartam mellett 1-1,5 GWe-t legyen képes előállítani évente; D-T üzemanyag felhasználása mellett a fúzió legyen önfenntartó; a tokamak állandósult állapotban működjön; a trícium újraképződés és a hulladékkezelés legyen megoldott és ne keletkezzen erősen sugárzó radioaktív hulladék. Ezen követelmények teljesüléséhez az alábbi négy területen szükséges kutatás-fejlesztési előrelépés: plazmaösszetartás és szabályozás, nukleáris energia konverziója a köpenyben, plazma és trícium önfenntartása, újraképződése és megbízható szerkezeti anyagok használata. A nagy hőmérsékletű plazma összetartására és a plazmaáram irányítására vonatkozó fejlesztések a KSTAR kapcsán mehetnek végbe, ahol a cél egy hosszú impulzusú és nagy teljesítményű fejlett tokamak (AT – *advanced tokamak*) létrehozása, mely képes nagy mennyiségű plazma megbízható szabályozására is.<sup>1</sup> A fennmaradó területek fejlesztésére az ITER és a kapcsolódó egyéb fúziós programok hivatottak. Ezen felül szükséges még a plazma viselkedésének mélyebb vizsgálata, mely az erőműben lejátszódó fúziós folyamat pontosabb szimulációját segítené elő.

A következőkben áttekintem a fúziós energiatermelés alapjait, valamint egy fúziós erőmű alapvető berendezéseit a KSTAR projektet alapul véve, mely a Koreai Nemzeti Fúziós Program jelenleg talán legjelentősebb eleme. A harmadik fejezetben röviden értékelem az említett fúziós programok eredményeit és megvizsgálom, hogy milyen kilátásai vannak a fúziós energiának 2013-ban Koreában és a világon.

## A fúziós erőmű működése

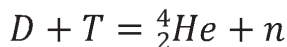
### A magfúzió elméleti háttere

Az atomenergia – mind a fúzió, mind a fission – azt használja ki, hogy az atom tömege kisebb, mint az alkotórészeinek összösszege. Amint azt Albert Einstein megfogalmazta, a tömeg-energia-ekvivalencia elv alapján a kötésből felszabaduló energia arányos a tömeg hiányával ( $E=mc^2$ ).

Míg a fissionál nehéz atommagok kettéhasításával nyerhetünk energiát, a fúziónál

<sup>1</sup> Myeun Kwon - Young Soon Bae – Seungyon Cho: Current Status of Nuclear Fusion Energy Research In Korea, *Nuclear Engineering And Technology*, 2009. 41. 4.

két könnyű atommag egyesítésével. Az energiatermelés szempontjából a célnak leginkább megfelelő könnyű atommagok a hidrogén két izotópjának, a deutériumnak és a tríciumnak a magjai – valószínűleg ezek lesznek a jövő fúziós erőműveinek az üzemanyagai. Ezek egyesülése során egy héliummag és egy neutron keletkezik:



A fúzió során az atommagot alkotó protonokat és neutronokat összekötő erős kölcsönhatás hatótávolsága a távolság csökkenésével rohamosan csökken, így egy bizonyos távolságon belül már az elektrosztatikus taszítás válik dominánssá. Ahhoz, hogy két atommag egyesülhessen és csak az erős kölcsönhatás legyen érvényben, le kell győzni ezt a taszítást. Ez elérhető azáltal, hogy az atomokat megfelelően nagy hőmérsékletre (néhány százmillió fokra) melegítjük fel: ekkor az atomok felbomlanak atommagokra és elektronokra, ezt az állapotot nevezzük plazmának. A nagy hőmérséklet következtében az atommagok hőmozgásból származó kinetikus energiája megfelelően nagy lesz, hogy felülmúlja az elektrosztatikus taszítást. Az optimális hőmérséklet eléréséig a megvalósuló fúziós reakciók száma arányos a plazma hőmérsékletével és sűrűségével.

A plazma és ezáltal a magfúzió létrejöttéhez tehát jelentős energiabefektetésre van szükség. Egy fúziós erőmű csak akkor üzemeltethető gazdaságosan, ha a termelt energia meghaladja a fúzióhoz szükséges befektetett energiát. Ezt a fúziós reaktor energiaszorzási tényezőjével szokás jellemezni:

$$Q = \frac{P_h}{P_f}$$

ahol  $P_f$  a külső plazmafűtés teljesítménye  
 $P_h$  a felszabaduló fúziós teljesítmény

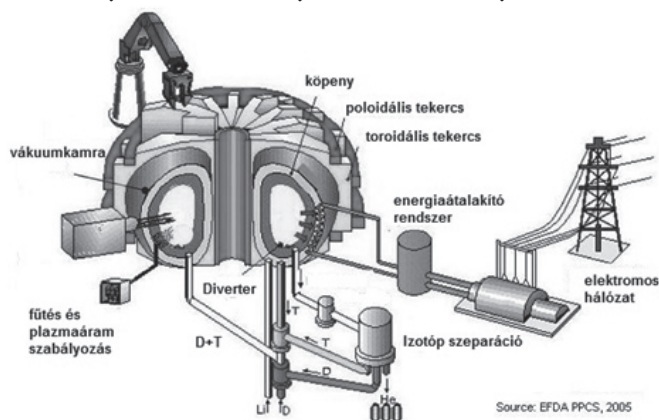
A külső fűtés eredményeképpen a fúzió során létrejövő héliummagok ( $\alpha$ -részecskék) nagy energiával ütköznek a plazmában található többi részecskével, ezáltal tovább melegítve a plazmát. Ha ezeket a plazma többi töltött részecskéjével együtt tudjuk tartani, az  $\alpha$ -fűtés meghaladhatja a veszteségeket. Ezen a ponton a további külső fűtés szükségtelenné válik, a plazma begyűjt ( $Q$  végtelenbe tart). A gyakorlatban ez 20 és 40 közötti  $Q$  értéket jelentene. A plazma az égési pontban stabil állapotban marad egészen addig, amíg az összetételt és más körülményeket fenn tudjuk tartani.

Mivel a begyűjtáshoz szükséges hőmérséklet 100-200 millió °C közötti, a forró plazma összetartása szilárd anyagok által nem lehetséges. Az viszont kihasználható, hogy a plazmában elektromosan töltött részecskéket vannak, ezáltal egy megfelelő irányú mágneses mezővel összetarthatjuk a plazmát.

## Egy fúziós erőmű főbb berendezései

A hagyományos nukleáris vagy fosszilis tüzelésű erőművekhez hasonlóan a fúziós erőmű is rendelkezni fog az alábbi részegységekkel: gőzfejlesztő, turbina, generátor. Az előzőekhez képest a lényegi eltérés annyi, hogy a víz vízgőzzé való elpárolásához felhasznált hőt a fúzió szolgáltatja. Az 1. ábra egy jövőbeli fúziós erőmű lehetséges felépítését mutatja. A deutérium-trícium üzemanyagot fagyott golyók formájában juttatják a plazmába, így ezek képesek eljutni egészen a plazma központjáig. A fúzió során keletkező szabad neutronok elhagyják a plazmát és az azt körülvevő ún. köpeny (*blanket*) részben lefékeződnek, azaz kinetikus energiájuk hővé alakul. A köpeny feladata ezen kívül a trícium-utánpótlás biztosítása, ezért lítiumot is tartalmaz, melyből nukleáris reakció révén keletkezik a trícium. A fúziós reakció végterméke a hélium, mely az ún. divertoron keresztül távozik a reakciótérből. Egyébként a köpenyben keletkező tríciumot egy ún. öblítógázzal (*flushing gas*), többnyire héliummal vezetik be az üzemanyagciklusba. A köpenyben és divertorban keletkező hő szintén hélium vagy víz segítségével kerül a gőzfejlesztőbe, ahonnan a turbinalapátokra ráengedve a gőz meghajtja a turbinát és a generátort, ezzel villamos áramot termelve. Mint minden erőmű esetén, itt is beszélhetünk önfogyasztásról, ám ez csupán a termelt energia kis részét jelenti, és többnyire a hűtőrendszer, a mágnesestekercsek és a plazmafűtés áramigényét jelenti. A reaktormag felépítése réteges: belülről kifelé haladva a plazmát a köpeny követi, mely szorosan kapcsolódik az egész plazmát és belső teret behatároló vákuumkamrához. A vákuumkamrán kívül találhatóak a tekercsek, melyek különlegesen alacsony hőmérsékletigényük miatt egy hideg teret biztosító kriosztátban (*cryostat*) vannak elhelyezve.

1. ábra: a jövő fúziós erőműjének sematikus rajza

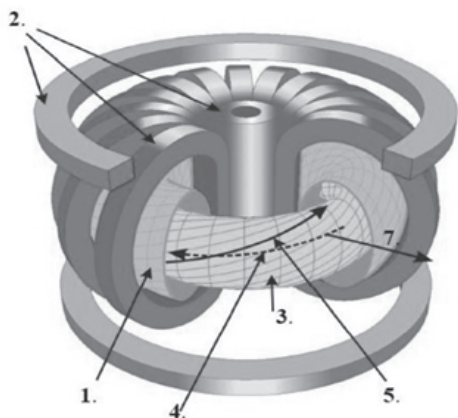


## A reaktor központi része

A plazma mágneses összetartására kétféle megoldást dolgoztak ki a szakemberek: az egyik az ún. sztellarátor elrendezés, a másik pedig a tokamak. Mindkettő lényege, hogy egy toroidális mezőt létrehozó tekercs segítségével toroidális alakban záródó plazmát

hozunk létre. A toroidális tértekercs mágneses tere és a plazma árama (sztellarátor esetén egy külső, helikálisan megtekert tekercs) miatti mágneses tér egy spirális alakú eredő mágneses teret hoz létre, mely így képes kiküszöbölni a plazmában lévő elektronok és ionok driftjének hatását és biztosítani a plazma összetartását. Mivel a dél-koreai fúziós kísérletekben jellemzően a tokamak elrendezést alkalmazzák (és nemzetközi viszonylatban is ez az elterjedtebb, fejlettségében nagyságrendekkel a sztellarátor előtt áll), ezért a következőkben csak ezt vizsgálom részletesebben.

**2. ábra: tokamak felépítése – (1) vákuumkamra, (2) belülről kifelé: szolenoid, toroidális tértekercs és poloidális tértekercs, (3) plazma, (4) plazmaáram, (5) mágneses erővonal**



A tokamak a fúziós reaktorok központi eleme, felépítése és fő részei az 2. ábrán láthatók. Amint az az ábrán is látható, az áramló plazma a vákuumkamra által meghatározott térrészben mozog anélkül, hogy hozzáérne annak falához. Ez amellet, hogy megolvasztaná és deformálná a köpeny acélburkolatát (és lehűtené a plazmát), a plazmából áramot juttatna a vezető falba, amely módosítaná az eredő mágneses tér jellegét, így a plazma instabilitása tovább nőne.

A fent említett toroidális tértekercsen kívül a tokamakban találhatóak a poloidális tértekercs, melyek a plazma függőleges irányú mozgatásáért felelősek. Ezen felül a tokamak közepében található egy központi szolenoid, mely egy transzformátor primerköreként funkcionál. A szekunder kör maga a plazma, melynek árama a primer körön létrehozott áramváltozással arányosan változtatható, az indukció elvének megfelelően.

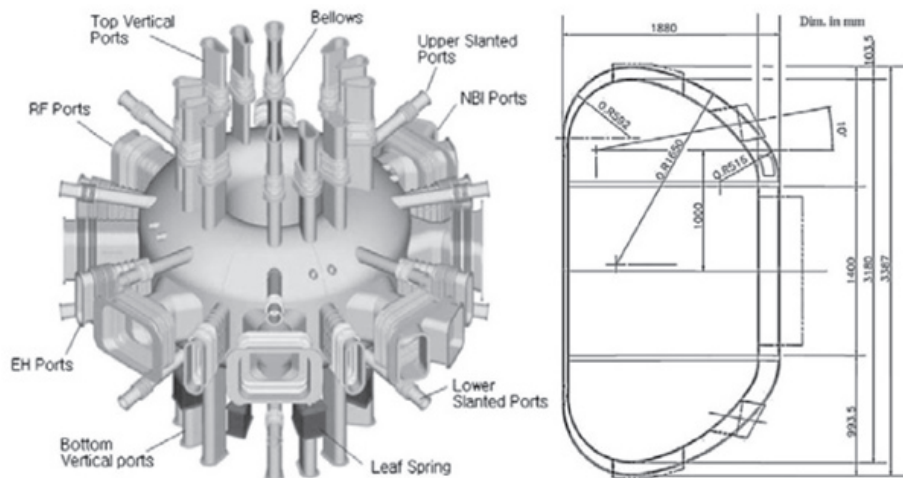
A KSTAR tokamak a világon az első tokamak, mely teljesen szupravezető mágnes-tekercsket alkalmaz a plazma összetartására és irányítására (szupravezetés nélkül a nagy tekercsáramok jelentős veszteséggel üzemelnének, lsd. 2.4. alfejezet). A mágnesrendszer 16 toroidális és 20 poloidális tértekercs (16 belső, 4 külső) tartalmaz, melyek belső hűtéssel ellátott szupravezetőkből állnak. A rendszerhez tartozik még 8 központi szolenoid tekercs is. A tekercs hűtését héliummal oldják meg, mely

az összes tekercsre vonatkoztatva 550 g/s-os hélium tömegáramot jelent.<sup>2</sup> Külső szimulációs vizsgálatok során a kutatók meghatározták a tekercsek működéséhez szükséges paraméterek kívánt értékeit és vizsgálták a folyamat során fellépő tranzienseket. A tekercsek gyártása sikeresen megtörtént és a mágneses tekercsrendszer eddig a várt eredményeket hozta a KSTAR tesztelés során.

Az 2. ábrán (1)-gyel jelölt, tórusz alakú vákuumkamra a fúziós reaktor legfontosabb eleme. Egyrészt a tokamak működéséhez szükséges vákuumot biztosítja, másrészt stabilizálja a reaktorszerkezetet, illetve a kivezetéseken keresztül kapcsolatot teremt a plazmát tartalmazó belső tér és a reaktor külső részei között.

A KSTAR vákuumkamrája egy duplafalú, D keresztmetszetű szerkezet, melyhez 72 kivezetés tartozik.<sup>3</sup> Ezek a kivezetések biztosítják a rendszer mérését és felügyeletét, a fűtést és a vákuum létrehozásához szükséges berendezések is itt csatlakoznak a kamrához. Mivel a reaktor felépítménye nagyrészt a vákuumkamrára támaszkodik, emiatt a kamra nagy szilárdságú rozsdamentes acélból készül és falát több helyen is bordák és gyűrűk merevítik. A KSTAR vákuumkamrájának térfogata eléri a 100m<sup>3</sup>-t is, ennél nagyobb méretű kamrák kialakítása és üzemeltetése még technológiai nehézségekbe ütközik.<sup>3</sup> Az ITER projekt várhatóan eredményes választ tud majd adni a nagyobb méretű vákuumkamrák működésével kapcsolatos kérdésekre is.

### 3. ábra: a KSTAR vákuumkamrájának sematikus és keresztmetszeti ábrája



A duplafalú vákuumkamrát kívülről egy újabb vákuumkamra burkolja, az ún. kriosztát. A kriosztát a mágneseket és egyéb alrendszereket magába foglaló belső térben biztosít vákuumot és abszolút nulla fokhoz közeli hőmérsékletű hideg teret. A vákuum

<sup>2</sup> Myeun Kwon - Young Soon Bae – Seungyon Cho 2009

<sup>3</sup> Uo.

köztudottan jó hőszigetelő, így a forró plazma és a szupravezető tekercsek között nincs hővezetés. A kriosztáton belüli jellemző nyomás legalább  $10^{-2}$  Pa nagyságrendű, de a KSTAR kriosztátjának tesztelése során sikerült elérni a  $10^{-6}$  Pa nagyságrendet is.<sup>4</sup> Bár a vákuum létrehozásával a hővezetést sikerült kiküszöbölni, a hősugárzás még így is jelentős mértékű hőt képes közölni a szupravezető tekercsekkel és környezetükkel, mely felveti a további hőszigetelés iránti igényt.

Ezért a vákuumkamra és a kriosztát közé többrétegű, egyedi kialakítású acél hőárnyékoló pajzsot (*thermal shield*) helyeznek el, melyet ezüst bevonattal is ellátnak.<sup>4</sup> A KSTAR fejlesztése során az első kísérletek tárgya ez a hőárnyékoló pajzs volt. Végül is egy három rétegből álló hőtartó burkolat kifejlesztése mellett döntöttek, ami belülről kifelé haladva a vákuumkamra, a kriosztát és a kivezetések hőtartó burkolataiból áll. A KSTAR során kifejlesztett hőtartó burkolat várhatóan az ITER hőtartó burkolatának is a prototípusául szolgálhat majd.

## A reaktor segédrendszerei

A fúziós reaktor központi részét kiegészítő berendezéseket a reaktor segédrendszereinek nevezzük, ezek a következők: fűtési rendszer, szabályozó és vezérlő rendszer, diagnosztika és az elektromos táplálási rendszer.

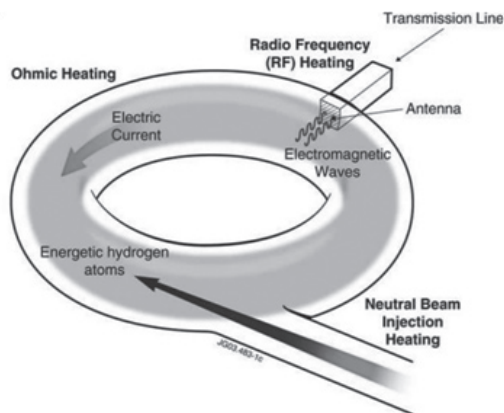
A fűtési rendszer a plazma külső fűtéséért és a plazmaáram beindításáért felel, egészen addig, amíg a plazma be nem gyújt, azaz nem válik önfenntartóvá a hőtermelés. Ekkor a külső fűtési rendszer használata minimalizálható, egyes remények szerint teljesen kiiktatható lesz. A plazmafűtés négyféleképpen valósítható meg: atomnyalábos fűtéssel (*Neutral Beam Injection - NBI*), ion ciklotron rezonanciával (*Ion Cyclotron Resonance Frequency - ICRF*), elektron ciklotron hullámmal (*Electron Cyclotron wave - EC wave*) és kisméretű hibrid hullámmal (*Lower-Hybrid wave - LH wave*).<sup>4</sup> Az utóbbi hármat gyakran nevezik együttesen rádiófrekvenciás besugárzásnak.

A semleges atomnyalábos fűtés során külső gyorsítóból származó deutérium ionokat lönek be a plazmába úgy, hogy az elektronjától megfosztott, felgyorsított iont egy gázkamrán vezetik keresztül, melyen áthaladva az ionhoz kapcsolódik egy elektron így a plazma felé tartó semleges részecske nem térül el a mágneses tér hatására és a plazmába jut. Mivel a gázkamrában a nagy impulzusú nyaláb az elektronfelvétel során gyakorlatilag megőrzi impulzusát, így a plazmába érkező nyaláb nagy kinetikus energiával bír. A plazmában ütközik a plazma részecskéivel, ezáltal energiáját részben hő formájában adja át, részben pedig további ütközéseket idéz elő a plazma részecskéi között, melynek hatására a plazma felmelegszik, és benne áram indul meg.

A rádiófrekvenciás besugárzás hasonló hatást ér el azáltal, hogy egy tokamakon kívüli oszcillátorból egy meghatározott frekvenciával juttat elektromágneses hullámokat a plazmába. Mivel a tokamak tekercseinek az üzeme impulzusszerű, megfelelően választott frekvenciával a töltött részecskék is eljuttathatóak a plazmába.

<sup>4</sup> Myeun Kwon - Young Soon Bae - Seungyon Cho 2009

#### 4. ábra: a plazma fűtésének különböző lehetőségei



Az első fúziós berendezés számára kifejlesztett integrált szabályozó és vezérlő rendszer a KSTAR számára készült. Ez két alrendszerre osztható: az integrált vezérlő rendszerre és a plazma vezérlőrendszerre. Az integrált vezérlő rendszer egy elosztott hálózati vezérlést valósít meg az erőmű minden infokommunikációs alrendszerének az integrálásával. Emellett képes az elektromos táprendszerben, fűtési rendszerben és a diagnosztikában valós idejű beavatkozások végrehajtására. A plazma vezérlőrendszere képes a plazma alakjának, pozíciójának, instabilitásainak és profiljának a módosítására.

A KSTAR első tesztüzeme során 5 hónapig megbízható működést valósított meg, különösen a vákuumképző és hűtési rendszerek esetén (a KSTAR szupravezetése miatt ezek jutottak főszerphez az első két hónap során, a megfelelő viszonyok kialakítása miatt).<sup>5</sup>

A diagnosztikai segédrendszer szerepe szintén jelentős, hiszen ennek köszönhetően tudjuk nagy pontossággal, folyamatosan mérni a forró plazma jellemzőit, ami a gépek védelme és a plazma irányítása miatt elengedhetetlen.

A fúziós kutatás-fejlesztés egyik fontos területe a diagnosztika, mellyel eddig a KSTAR és az ITER kapcsán foglalkoztak a kutatók, de a jövőbe tekintve a DEMO is komoly mérési és diagnosztikai fejlesztéseket igényel majd.

A KSTAR diagnosztikáját három fázisban tervezik telepíteni: először az alapvető mérőberendezések kerülnek beszerelésre (plazma és mágneses diagnosztika), utána következnek a közepesen fontos mérőberendezések (reflektométer, FIR interferométer stb.) végül a haladó szintű diagnosztika kerül a helyére – mely az előzőekkel ellentétében nem alapkövetelmény és a megfelelő technológia sem áll még rendelkezésre hozzá.<sup>5</sup> Ez utóbbi valószínűleg az időközben felmerülő igények és lehetősége fényében fog alakulni.

AZ ITER diagnosztikája a KSTAR-ban kifejlesztettnek a felhasználásával, Koreában készül. A KSTAR-hoz hasonlóan három különböző fontosságú mérési csoportot jelöl

<sup>5</sup> Myeun Kwon - Young Soon Bae – Seungyon Cho 2009



meg: a legfontosabbak a gépek védelmével és a plazmairányítással kapcsolatos mérőeszközök, utána jönnek a magasabb szintű plazmairányításhoz szükséges mérőberendezések és végül a plazma teljesítményét és egyéb fizikai jelenségeket megértését segítő mérőberendezések.<sup>5</sup>

A tokamak fúziós kísérletekben mindig is nagy szerepet játszott az elektromos tápellátás technológiáinak és berendezéseinek a fejlődése. A plazma összetartásához a szupravezető toroidtekercsnek nagy erősségű mágneses mezőt kell létrehoznia, melyhez jelentős áramnak kell folynia a tekercsben. Az áramerősség négyzetével arányos veszteség pont a szupravezetéssel küszöbölhető ki, ekkor a tekercs ellenállása 0-ra csökken. A szupravezető tekercs jelenleg nagy-impulzusú módban üzemelnek, ennek további növelése és az esetleges állandósul állapot elérése a cél. A nagy áramok és az impulzusüzem miatt a szerkezeti anyagok ismétlődő hőigénybevételnek vannak kitéve, ami negatívan befolyásolja élettartamukat és szükségessé teszi a tokamak üzemeltetésével kapcsolatos további kutatást-fejlesztést. Valamint felveti a K+F igényt a szerkezeti anyagok terén is – szerencsére számos fúzió során használható szerkezeti anyaggal kapcsolatban (elsősorban acélok) folynak más alkalmazási területekhez kötődő kutatások, melyek eredményei természetesen fúziós célokra is felhasználhatók.

A fúziós kutatások hosszú távú sikerének egy másik záloga a megfelelő köpeny kialakítása, hiszen ez biztosítja a fúziós erőmű hosszú távú önfenntartó működését azzal, hogy lítium felhasználásával képes lesz a fúzióhoz szükséges trícium tenyésztésére, így biztosítva annak folyamatos újraképződését. Ez a DEMO fejlesztésénél alapkövetelménynek fog számítani, de már az ITER során is komoly erőfeszítések folynak e téren, hiszen az ITER egyik fő célja az energiaszorzási tényezővel releváns trícium termelő köpeny tesztelése és hitelesítése.<sup>6</sup>

## **A fúziós energia jelene és jövője a Koreai Köztársaságban és a világon**

Ha az energiatermelés hatékonysága szempontjából vizsgáljuk a befejezett és jelenleg is futó fúziós programokat, az alábbiakat érdemes megfontolnunk: 1983-ban elindított JET (Joint European Torus) 16,1 MW-os teljesítményt tudott fenntartani kb. egy másodpercre, mialatt a folyamathoz felhasznált energiának kb. ötödét tudta megtermelni ( $Q=0,2$ ). A várakozások szerint az ITER mintegy 500 MW-os teljesítményre lesz képes, melyet 400 másodpercen keresztül tud tartani, és a folyamat várhatóan nyereséges lesz, azaz kb. 10-szer annyi energiát fog termelni, mint felhasználni ( $Q=10$ ).<sup>7</sup> Bár nincs célként kitűzve, de a kutatók reménykednek abban, hogy az ITER során sikerül elérni a plazma begyújtását, ami után a reakció önellátóvá válna.

A KSTAR-ban először 2008-ban sikerült megvalósítani a plazma állapotot. Mivel a KSTAR a világ első teljesen szupravezető tokamakja, megépítésére és összeszerelésére nem létezett követendő séma. A célravezető technológiák és stratégiák, az elemek összeépítésének megfelelő módja a projekt alatt kristályosodtak ki. Ezek az értékes ismeretek a világon egyedülállóak és útmutatóként szolgálhatnak a jövő fúziós erőmű-

<sup>6</sup> ITER Organization, <http://www.iter.org>

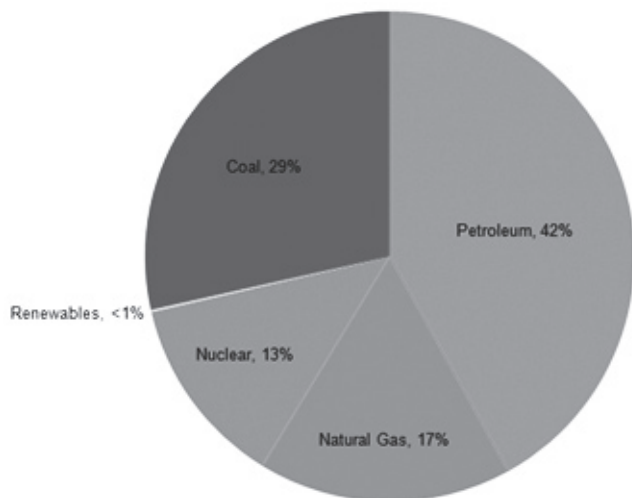
<sup>7</sup> Myeun Kwon - Young Soon Bae – Seungyon Cho 2009

veinek építéskor. Szerelés tekintetében az ITER is 100%-ban a Koreában felhalmozott ismeretekre fog támaszkodni. Manapság a plazma teljesítménye és az impulzus hosszúsága szempontjából a KSTAR áll a legközelebb a DEMO által kitűzött célokhoz, de a DEMO által kitűzött célok eléréséhez még hosszú az út. Egyelőre a KSTAR által megvalósítani kívánt, állandósult állapotú és nagy teljesítményű működés sem biztosított. A KSTAR elsősorban a segédrendszerek területén szorul alapos fejlesztésre, mint amilyen a plazmafűtés és a plazmában fellépő áram irányítása. Emellett a fúziós plazmáról alkotott modell és szimuláció is fejlesztésre szorul a pontosabb vizsgálat és a várható kísérleti eredmények pontosabb becslése miatt.

A fenti sorok bizonyítják, hogy Korea elkötelezett a fúziós energiatermelés irányába, és úgy tűnik a tudomány és politika náluk széles körben egyetért abban, hogy az ország energiaellátásának jövője nem képzelhető el a fúziós energiatermelés nélkül. Ha megvizsgáljuk a Koreában felhasznált primerenergia megoszlását a 2011-es évre (5. ábra), talán érthetővé válik az is, hogy miért gondolják így.

Korea szegényes adottságokkal rendelkezik a konvencionális szénhidrogének terén, de a felhasznált primerenergia 59%-át mégis az importált kőolaj és a földgáz teszik ki. A majd 30%-nyi kőszén túlnyomó része is külföldről érkezik az országba.<sup>8</sup> A nukleáris energia részaránya emellett elenyészőnek mondható, az alig mérhető megújulókról nem is beszélve (ez utóbbi kettő tekinthető saját forrásnak). Ezek Koreát a világ egyik legnagyobb energiaimportőrévé teszik, hiszen a sűrűn lakott, fejlett iparú ország kis mérete ellenére a világ tizedik legnagyobb energiafogyasztója.

**5. ábra: A Koreai Köztársaság primerenergia felhasználásának megoszlása 2011-ben**



Source: U.S. Energy Information Administration

<sup>8</sup> US Energy Information Administration: Analysis/ Korea, South <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=KS> (Utolsó letöltés: 2013.11.12.)

A fúziós energiatermelés rendszerbe illesztése megnövelné a nukleáris energia részarányát, ezáltal csökkentené az ország energiafüggőségét, ami napjaink energetikájának egyik fő iránya. Nem elhanyagolható szempont az sem, hogy a fúziós energiatermelés környezeti terhelése minimális, tiszta energiaforrásnak számít, emiatt a társadalmi elfogadottsága is várhatóan magas lenne. Emiatt a fúziót szokás globálisan is a jövő energiájának is nevezni, mely megoldaná az emberiség energiagondjait azzal, hogy olcsó és tiszta energiát biztosítana fenntartható módon.

Mindezek ellenére azonban én úgy gondolom, hogy a fúziós energiatermelés a belátható jövőben nem jelent valós alternatívát sem Korea, sem a világ számára.

A fúzió elméleti háttere jól kidolgozott, működőképessége tudományosan igazolható és az eddigi kísérletek is azt támasztják alá, hogy a magfúzió alkalmas energia termelésére. A gond a gyakorlati megvalósítással és a fúzió hatékonyságával van: jelenleg még messze vagyunk attól, hogy egy fúziós reaktor önfenntartó legyen és energetikai szempontból megfelelő méretekkel is stabilan és üzembiztosan működjön. Ennek legfőbb műszaki okai a szerkezeti anyagok elégtelensége, valamint a trícium szaporításának problémája, amint arról az előző fejezetben is szó volt. A fúziós programok ütemezése ráadásul igencsak kockázatosnak mondható, hiszen sokszor még nem létező, kifejlesztésre váró technológiákat kezelnek tényként az ütemterv egy későbbi fázisának megtervezése során. A fúzióval kapcsolatban a „hogyan?” mellett mindig előkerül egy másik kulcskérdés is: a „mikor?”.

Bár jelen körülmények között nehéz bármit is jósolni, a kutatók a legoptimistább forgatókönyvvel számolva 2050-re teszik az első fúziós alapon villamos energiát előállító, ipari szintű erőművek létrejöttét.<sup>9</sup> Ez a forgatókönyv azonban csupán technológiai szempontokat vesz figyelembe, számos más, a fúzió jövőjét komolyan befolyásolni képes hatást nem. Ilyenek például a finanszírozási rendszer, a politikai és társadalmi rendszerek esetleges megváltozása. Ezek a hatások nem hagyhatók figyelmen kívül, hiszen a fúziós kutatások eddig is csak példátlan nemzetközi együttműködéssel tudtak megvalósulni és valószínűleg így lesz ez a jövőben is. Kijelenthető, hogy egyedül egyik ország, így Korea sem lesz képes eljutni a fúzió kereskedelmi szintű felhasználásáig. A megfelelő pénzügyi alap egy elmélyülő és időben elnyúló globális pénzügyi válság hatására szintén komoly veszélybe sodorhatja a fúziós programokat.

A lehetséges negatív befolyásoló tényezőkön felül további probléma, hogy a fúziós energiatermelés lehetőségeit a jelenkori energiapiaci szerkezeti viszonyok között szokás vizsgálni.<sup>10</sup> A jelenlegi tendenciák és tények ismeretében kijelenthető, hogy a szénhidrogén alapú energiatermelés jelentősége nagymértékben csökkenni fog, mire a fúziós erőművek ideális esetben üzembe állhatnak (2050). Tétélezzük fel, hogy addig nem fog bekövetkezni egy világméretű társadalmi, politikai, gazdasági válság mely átrendezné bolygónk társadalmi és gazdasági rendszereit és valahogy sikerül megoldani a túlnépesedő emberiség egyre növekvő energiaigényével járó problémákat. Ez esetben a maitól jelentősen eltérő energiaszerkezetet feltételezhetünk, növekvő megújuló

<sup>9</sup> Vernon, C.: *Will Nuclear Fusion Fill the Gap Left by Peak Oil?* The Oil Drum: Europe, 2007. január 11. <http://www.theoil Drum.com/node/2164> (Utolsó letöltés: 2013.11.04.)

<sup>10</sup> Vernon 2007

részarányal és egyéb alternatív technológiák létét sem zárhatjuk ki (pl. hidrogénre, biometanolra épülő technológiák, esetleg valami ma még ismeretlen). A fúzió így egy teljesen más környezetben száll majd versenybe és könnyen elképzelhető, hogy pénzügyileg nem lesz versenyképes az akkor már meglévő, de most még csak alternatív energiatermelési megoldásokkal szemben.<sup>10</sup> Egy nagyméretű, összetett, globális válság energiapiacra, energiagazdálkodásra gyakorolt hatásait pedig felbecsülni is nehéz lenne, nem is beszélve ebben az esetben a fúzió lehetőségeiről.

Arra, hogy érdemes-e mindezek ellenére folytatni a fúziós kutatásokat, csak az idő adhat választ. Amit addig egyéb alternatívák hiányában tehetünk, hogy ha már megjósolni nem tudjuk a jövőt, legalább megpróbáljuk tevékenyen alakítani azt: például a fúziós technológia fejlesztésével. A tisztább és élhetőbb jövőért való felelősségvállalásnak ez is egy módja, olyan lehetőség, melyről luxus lenne lemondanunk.

## Irodalom

- ITER Organization <http://www.iter.org>
- Myeun Kwon - Young Soon Bae – Seungyon Cho: Current Status of Nuclear Fusion Energy Research In: Korea, *Nuclear Engineering And Technology* 2009. 41. 4.
- Pokol Gergő: Korszerű nukleáris energiatermelés, *egyetemi jegyzet*, BME NTI, 2013
- US Energy Information Administration: Analysis/ Korea, South <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=KS> (Utolsó letöltés: 2013.11.12.)
- Vernon, Chris: *Will Nuclear Fusion Fill the Gap Left by Peak Oil?* The Oil Drum: Europe, 2007. január 11. <http://www.theoil Drum.com/node/2164> (Utolsó letöltés: 2013.11.04.)

## Abstract

The purpose of this study is to present the set-up and the operation of the fusion reactor built under the KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) project, and to display the problems emerged during the project. Chapter one starts with a brief review of the fusion energy production, which is followed by the goals and results of the Korean National Fusion Program. Chapter two contains the principles of fusion and a possible set-up of a future operational fusion reactor. The elements and operation of the KSTAR experimental reactor are also discussed here, with an emphasis on creating and controlling the plasma. The chapter ends with a study on the technology used in the ancillary systems of the reactor: the heating system, the operation and control system, the diagnostics and the electric power system and power supply system. Furthermore, an outlook of the present and future of fusion energy production in Korea and worldwide is given in chapter three.

*Keywords: fusion energy production, fusion reactor, Korea, tokamak*