11. Előadás: Magfúzión alapuló elektromos energiatermelés elve és gyakorlati megvalósítás tervei: TOKAMAK, ITER

11.1. Magfúzió fizikai alapjai

(http://hu.wikipedia.org/wiki/Magfúzió) (http://magfuzio.hu/) (https://www.euro-fusion.org/)

11.1.1. Magfúzió, sokféle. Pl: D +T → ^{4}He (3,5 MeV) + n → (14,1 MeV) (legstabilabb: vas, nikkel)

11.1.2. Felfedezése: 1919 Henry Russell, 1939 Hans Bethe; 1948 Lyman Spitzer (**stellarator**) mágneses tér hatása a plazmára: toroid-alakú cső körül elektromos tekercsek. Energiaforrás. lézer

11.1.3. Plazma állapot és annak jellemzése: 100 millió K. D-T plazma. Töltött részecskék Larmor-mozgása. Csapda: „mágnese tükör – torroid mágnese tér”

11.1.4. Először: Magfúziós nukleáris fegyverek Szabályozott magfúzió megvalósításának lehetősége

11.1.5. Jelenleg üzemelő leghatékonyabb plazmafúziós berendezések: JET, DIII-D, EAST, TFTR, K-Star, JT-60, TCV és T-15 Legjobb Q=0,2.

11.2. TOKAMAK és története (http://hu.wikipedia.org/wiki/Tokamak)

11.2.1. 1960 moszkvai Kurcsatov intézet**.** Tórusz alakú plazmát erős mágneses térrel összetartó csavart erőtér: Mágneses és elektromos tér összegzés. Plazmaáram fenntartása. Transzformátor

11.2.2. 1969. Plazmahőmérséklet maghatározás: Lézer Doppler mérésekből, Thomson szórásból

11.2.3. 1975: 3 méter sugarú torroid. Q=Pf/Pv. Itt Pf a fúziós teljesítmény, Pv pedig a veszteségi teljesítmény

11.2.4. 1980-tól **két óriás tokamak**: Princetonban a **Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR)**; angliai Culhamban (Oxford mellett) **Joint European Torus (JET)**

11.2.5. Fontos paraméterek:

11.2.5.1. 10^{-5} bar hidrogén plazmára van szükség; ezért a vákuum. (kb. 10^{-8} mBar).

11.2.5.2. Speciális kamra tisztaság: speciális kamratisztítási eljárások. Külső nyomás: 10 tonna/m^2.

11.2.5.3. Plazma egyben tartás problémája Nagy és speciális alakú, folyamatosan szabályozandó mágnese tér biztosítása: B= 1-5 T. tekercsáram: MegaAmper.

11.2.5.4. Nagy disszipált teljesítmény (100 MW) elvezetése.

11.2.5.5. Óriási erőhatások a szupravezető tekercsekben a hirtelen változó óriási áram miatt változó elektromágneses tér és a meglevő mágnese tér között.

11.2.5.6. Lavinakisülés biztosítása a torusz vonalában.

11.2.5.7. Magas hőmérséklet (100 Millió K) „előállítása”: Plazmafűtés. Folyamatos rászabályozás. Plazma „ráfűtés”: atomnyaláb fűtés. Más fűtés: Ion Cyclotron Resonance Heating, Electron Cyclotron Resonance Heating,, → 100 millió K.

11.2.5.8. Plazma sűrűség biztosítása: gázszeleppel szabályozni a plazmába juttatott hidrogén gázt. (a hidrogén gázt folyékony héliummal hűtik (H jégdarabok), hogy ne tudjon „rögtön” ionizálódni)

11.2.5.9. A falba csapódó ionok Fe atomokat „ütnek ki” szennyezik a vákuumot és 26-szoros ionizáció következik be a Fe atomok esetében: Limitek, divertorok használata

11.2.5.10. Speciális módszerek (1980-as évek), amelyekkel egy fúziós plazma extrém paramétereit mérni lehet. Tokamak diagnosztikai rendszere (40 különböző, nagy dinamikájú mérendő mennyiség)

11.2.5.11. 1982 Garching (Németország) High confinement, H-mode felismerése. A divertor szerepe a plazma egyben tartásában. Egytranszport gát a plazma szélén. A plazmaparaméterek élőidejű vezérlését is igénylik.

11.2.5.12. Eredmények: 1985-tól International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) szervezése,

11.2.5.13. 1990-től új diagnosztikai eljárások

11.2.5.14. Energia kinyerés a plazmából: sugárzással, részecskék által

11.3. Új stellarator az USA-ban, Németországban, Japánban (1990-től)

11.3.1. Helically Symmetric Experiment (HSX) USA

11.3.2. Wendelstein 7-X, Németország 5,5 méteres nagysugárral 2013-tól Max-Planck-Institut für Plasmahysik, Greifswald

11.3.3. Large Helical Device, (LHD) Japán 3.9 méteres nagysugárral 1998-ban

11.4. International Thermonuclear Experimental Reactor -ITER

11.4.1. 1985-2014 Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor. Ez egy **JET-hez hasonló felépítésű tokamak.** 2006-tól 7 résztvevő ország: Franciaország, USA, Oroszország, Japán, Kanada, Kína, Dél-Kórea, *India*.

11.4.2. ITER adatok és ütemezés http://hu.wikipedia.org/wiki/ITER

11.4.2.1. Az egész berendezés és a szupravezető tekercsek egy 25 m átmérőjű kriosztátban kapnak helyet, melyet kb. 5 K-re hűtenek. Így biztosítható az 5.3 T toroidális mágneses tér.

11.4.2.2. A nagyon nagy teljesítményű neutron fluxus **a szerkezeti elemeken roncsolást okoz.**

11.4.2.3. **A roncsolás mellett a másik komoly nehézség, hogy a neutronok szerkezeti elemekben magreakciókat is létrehoznak, aktiválják a berendezést. A számítások szerint ez jelentős lesz és ezért már a tiszta deutérium üzem után sem léphet többet ember a berendezés belsejébe.**

11.4.2.4. **A nagyteljesítményű DT üzem után a berendezésből esetleg kiszerelt alkatrészek is sugározni fognak, tehát az atomerőművekhez hasonlóan sugárzástól védő melegkamrákban távvezérléssel lehet majd rajtuk szerelési műveleteket végezni. Az ITER tehát egy igazi nukleáris berendezés lesz, megalkotása jelentős részben mérnöki feladat és nem csak a kreatív fizikusok területe.**

11.4.2.5. Az ITER-ben első plazmát csak 2019 végén lehet bekapcsolni.

11.4.2.6. **Az ITER 2019 és 2027 között kísérletek és továbbfejlesztések lépcsőin keresztül fokozatosan fog eljutni a deutérium-trícium kísérletekig.**

11.4.2.7. **Most úgy látják, hogy az eredetileg tervezett 2.6 milliárd euró helyett az ITER 6.2 milliárd euróba fog kerülni az Európai Uniónak.**

11.4.2.8. 2030 után **egy vagy több demonstrációs erőmű épülne, amely(ek)ben a tervek szerint már** fúziós villamos energiát termelnének, azonban esetleg még nem optimális módon.

11.4.2.9. **Az ITER előkészítése kapcsán magyar intézmények az európai építésű diagnosztikai elemek több mint felében szerepet játszanak**

11.4.2.10 **„Begyújtás”:** Kicsi, mm nagyságú deutérium-trícium kapszulákat lézerekkel begyújtanak, **akárcsak egy hidrogénbombát. De:** A szükséges sűrűség a **szilárdtest sűrűség ezerszerese,** tehát egy lefagyasztott DT gömböt **a kezdeti méretének tizedére kell összenyomni. „Gyufa”:** Franciaországban **Laser Megajoule (LMJ).** Amerikában **National Ignition Facility (NIF**) Ez egy 192 lézernyalábból álló berendezés. 10 méter átmérőjű vákuumkamrában lesz összenyomva és felrobbantva egy mm méretű DT kapszula. (Sajnos a lézerek hatásfoka igen alacsony.)

11.4.3. DEMO 2050 (2050 körül ez lenne első fúziós erőmű.) Tervezett lépések:

A tervek szerint 500 MW fúziós teljesítményt demonstrálna kb. 50 MW fűtés mellett 500 másodperc hosszú impulzusban. A teljesítménymérleg (Q=konstrukció által termelt energia/működtetéséhez szükséges energia) = 10, ami közel áll ahhoz, ami iparilag hasznosítható lenne.

Hivatkozások: www.jet.efda.org (http://en.wikipedia.org/wiki/EFDA)

[1] Zoletnik Sándor: „Útban a JET-től az ITER felé” (http://magfuzio.hu/utban-a-jet-tol-az-iter-fele/)

[2] Magfúzió wikipédia http://hu.wikipedia.org/wiki/Magfúzió http://magfuzio.hu/

[3] TOKAMAK wikipédia http://hu.wikipedia.org/wiki/Tokamak

[4] ITER wikipédia http://hu.wikipedia.org/wiki/ITER

Pécs, 2015. április 18. Összeállítottal dr. Német Béla