

A fúziós atomerőmű védőközegeiben keletkező fotonukleáris folyamatok és azok sugárvédelmi aspektusai

Veres Árpád

MTA Izotópkutató Intézet, H-1525 Budapest, P.O.B. 77

e-mail: veres@iki.kfki.hu

A kézirat beérkezett: 2010.01.25., közlésre elfogadva: 2010.02.22.

Title – Photonuclear processes produced by shields of fusion power plants and its radiation safety aspects

Abstract – A major effort is underway around the world directed to the control and application of thermonuclear processes. The primary motivation is the production of clean, cheap power in controlled thermonuclear power plants. The deuterium-tritium (DT) fusion process appears to be the most promising for this purpose. The intent of this paper is to point out that the major personnel shielding problems in the use of intense DT reactions might be associated with the primary and secondary hard γ -rays rather than with the 14.1 MeV neutrons produced in the blanket materials. In addition to the 14.1 MeV neutron produced in the DT reaction, 16.7 MeV γ -rays are also produced with a small probability. The primary problem is not the γ -rays themselves, but rather the photo neutrons which they produce.

Keywords – DT fusion, thermonuclear process, laser driven fusion power plants, magnetic and inertial confinement, photo neutrons

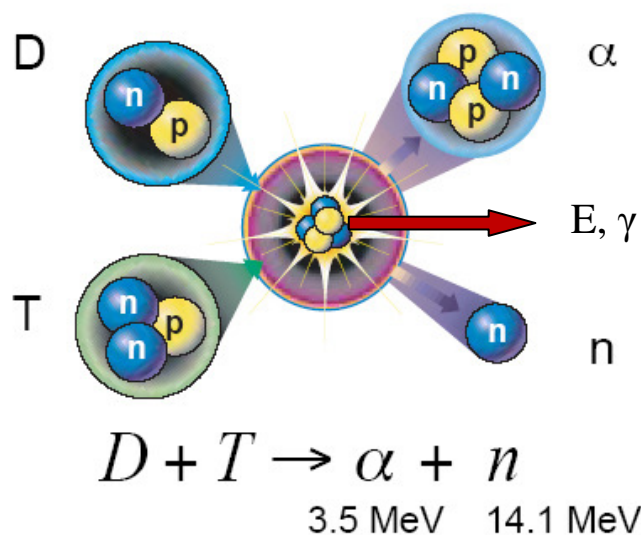
Kivonat - A világon igen nagy anyagi és szellemi erőfeszítéssel folynak kísérletek a könnyű atommagok termonukleáris folyamatainak atomerőműi alkalmazására. Elsődleges motiváció, a tisztább és olcsóbb energia előállítása szabályozott termonukleáris atomerőművekben. Erre a célra a deutérium-trícium (DT) reakció tűnik a legmegfelelőbbnek. A cél rámutatni, hogy az intenzív DT reakciók alapvető személyi sugárvédelmi problémái, főleg a fúzió köpeny anyagában keletkező primer és szekunder kemény γ -sugárzásokhoz kapcsolhatók és kevésbé a fúzió 14,1 MeV-s neutronjaihoz. Ráadásul a DT reakcióban a 14.1 MeV neutron mellett, kis valószínűséggel 16,7 MeV-s γ kvantumok is keletkeznek. Azonban elsődleges problémát nem ezek jelentik, hanem az általuk keltett foto-neutronok.

Kulcsszavak – DT fúzió, termonukleáris folyamat, lézerrel hajtott fúziós erőművek, mágneses bezárás és inerciális bezárás, foto-neutronok

BEVEZETÉS

Az atomerőműi villamos-energia termelés nagymennyiségű veszélyes nukleáris hulladék keletkezésével jár. Ha a maghasadással működő atomerőművek csak a mai szintnek (16 %) megfelelő arányban veszik ki részüket a világ villamos-energia előállításából, akkor is 2015 évre, várhatóan több mint 250 ezer tonna kiégett fűtőelem (benne hosszú életű aktinoida, hasadási termék és 2000 tonna plutónium) nukleáris hulladék keletkezik. Ennek a veszélyes hulladéknak a transzmutációval történő jelentős csökkentésére, gyorsítóval (spallációs neutronforrással) hajtott szubkritikus atomerőműi fejlesztések folynak világszerte.

A másik nukleáris energiatermelő módszer, amellyel szintén igen nagy anyagi és szellemi erőfeszítéssel folynak kísérletek a könnyű atommagok fúziós, (termonukleáris) folyamatainak atomerőműi alkalmazása. Itt az elsődleges motiváció, a tisztább és olcsóbb energia előállítás szabályozott termonukleáris atomerőművekben. Jelen munka célja a deutérium-trícium (DT) fúzióját követő effektusok várható hatásainak vizsgálata, a sugárvédelmi teendők optimális szempontjainak a kialakításához szükséges teendők meghatározása. Az 1. ábrán szemléltetjük a fúzió folyamán lejátszódó alapvető folyamatokat.



1. ábra. A deutérium-trícium fúzió szemléltetése. Középpontban, a fúzióban létrejött ${}^5\text{He}$ 17,6 MeV gerjesztett állapotban van, amelyből $\alpha + n$ emisszióval és E energia kibocsátással bomlik, de igen kis (2×10^{-5}) gyakorisággal 16,7 MeV energiájú γ -kvantum emisszió is [1] létre jöhet, s ekkor az ${}^5\text{He}$ alapállapotáról történik a neutron kibocsátás és a 0,9 MeV energiával mélyebben fekvő ${}^4\text{He}$ keletkezik, (lásd 4. ábrán a nívósémát).

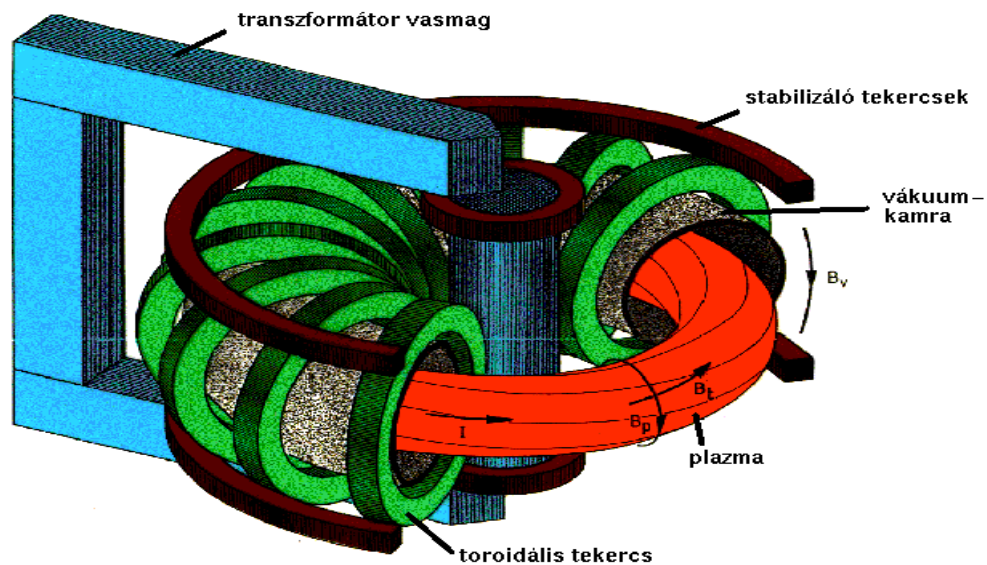
Mielőtt rátérnénk a DT reakcióból eredő másodlagos foto-nukleárisfolyamatok hatásainak tanulmányozására, tekintsük át a fúziós erőmű kifejlesztésére tett fontosabb erőfeszítéseket. A sugárvédelmi számításoknál ugyanis ezekre a paraméterekre is támaszkodunk.

I. FÚZIÓ LÉTREHOZÁSÁRA VÉGZETT FŐBB FEJLESZTÉSI MÓDSZEREK ÉS BERENDEZÉSEK

Az atommagok fúziójához le kell győzni a pozitív protonok tasztító erejét (Coulomb gát), $E_{\text{Coulomb}} = 3 \times k_B \times T/2$, ahol k_B a Boltzmann állandó. Könnyű magok, így a deutérium és trícium esetében az optimális érték 13,6 keV, ami ~ 158 millió K° hőmérsékletnek felel meg. Tehát a reakció létrejöttéhez a DT keveréket plazma állapotba kell hozni (nagy sűrűség és több millió hőfok), amelyben a részecskék mozgási energiája lényegesen nagyobb, mint az elektronok kötési energiája, ezért az állapotban nem lesznek sem atomok, sem molekulák, hanem csak atommagok és elektronok keverékéből áll a plazma. Ilyen plazmaállapot kialakulására jelenleg három bezárási (confinement) módszer ismert. Az egyik a Gravitációs bezárás, amely csak asztrofizikai környezetben fordul elő. A másik a Mágneses bezárás és a harmadik az Inerciális bezárás. A két utóbbi módszer alapvető eltérését szemléltetjük röviden.

I.1. Mágneses bezárás

A mágneses bezárásnál külső mágneses tér tartja egyben, nyomja össze a deutérium-trícium keveréket és fűti fel a plazmát a fúzióhoz szükséges hőmérsékletre. Azonban ez a külső mágneses tér gátolja azt a plazmában jelen levő belső Lorentz mágneses-térerőt, amely részt vesz a forró plazma kialakulásában. Ezért a plazma elérhető részecskesűrűsége igen kicsi: 10^{18} - 10^{22} m⁻³, a lineáris mérete, pedig nagyon nagy: 0,1-10 m (2. ábra).



2. ábra. A tokamak reaktor fontosabb részei: plazma, toroidális tekercs, vákuumkamra transzformátor vasmag [2].

A külső mágneses tér gátló hatásának csökkentésére, az elmúlt több mint négy évtized alatt, óriási kutatás-fejlesztési kísérleteket folytattak a világ számos nagy berendezésén. A hatvanas években kifejlesztett tokamak mellett, további a mágneses bezárású fúzióhoz szükséges körülmények kialakítását vizsgáló berendezések még az alábbiak:

JET (European) | JT-60 | Large Helical Device (Japan) | KSTAK (Korea) | EAST (China) | T-15 (Russia) | Tore Setupra (France) | DIII-D | TFTR | NSTX | ULCEAT | Alcator C-Mod | LDX (all USA) | H-INF (Australia) | MSAT | START (UK) | ASDEX Upgrade (Germany) | TCV (Switzerland).

Az eddigi legsikeresebb mágneses bezárású fúziós berendezés-típusnak a tokamak [2] bizonyult. Ez egy tórusz alakú, mindenhol azonos keresztmetszetű plazma, erős (5 kA-5 MA) toroidális irányú plazmaárammal. A helikális mágneses térszerkezetet a plazmagyűrűben, körben folyó árammal állítják elő. Ezek közül is a JET (Joint European Torus) elnevezésű konfiguráció jutott legközelebb a gyakorlati hasznosításhoz.

2005. június 28-án jelentették be, hogy Cadarache-ban (dél-franciaország) építik meg az ITER-t (International Thermonuclear Experimental Reactor), a világ legnagyobb mágneses fúziós berendezését. Elkészültek az ITER mérnöki tervei (1998), de a megépítésének elkezdését a becsült 10 milliárd dolláros költség miatt 2008-ra halasztották. Résztvevő országok: EU (benne 7 magyar int. 21 fő), Japán, Kína, Orosz, USA, és Dél-Korea.

A berendezés alapadatai: 500 MW fúziós teljesítmény; 500-1000 s hosszú impulzusok. Elektromos energiát nem fog termelni, és tríciumból sem lesz önfenntartó. A fűtési teljesítmény 60 %-ának ($Q = 0.6$) megfelelő fúziós teljesítményt érnek el a DT plazmában. A különböző trícium-termelési eljárásokat, és az alfa-részecskék plazmafűtő hatását tesztelhetik vele (DEMO).

1.2. Inerciális bezárás

Az inerciális bezárási módszernél a DT keveréket tartalmazó, néhány mm átmérőjű, golyócskát lézernyalábok nyomják össze néhány μm átmérőre és fűtik fel, majd gyújtják be. Itt semmi sem gátolja a plazma kialakulását. A plazmabezárás ideje azonos a részecske tehetetlenségi (inercia) idejével, innen az elnevezés is. Ezért a részecskesűrűség nagyon nagy: 10^{31} - 10^{33} m^{-3} és a lineáris méret, pedig igen kicsiny: 1-100 μm (3. ábra). Az inerciális bezárású fúziós lézerek erőműi használata a néhány joule energiától a több-tíz kilo joule energia előállításáig az 1980-as évek elejétől gyorsan fejlődtek. Itt jegyezzük meg, hogy két felfedezés forradalmasította a fény-lézerek alkalmazhatóságát:

- Az egyik felfedezés (1974), lézernyaláb fókuszálása plazmába [3], ami a gyorsítótér gradiensének a nagymértékű növekedését eredményezte.
- A másik (1994), a lézerimpulzus időtartamának nyújtása majd összenyomása, „csörpölése” [4, 5], ami csökkenti GW/cm^2 intenzitásoknál a drága erősítőoptika súlyos károsodását.

Ezek alapján számos nagyberendezést fejlesztettek ki, közöttük az USA National Ignition Facility (NIF) ultra nagy lézere [6]. A berendezés feladata fúziós energia kísérletek végzése volt. Inerciális bezárást használtak az extrém nagy sűrűség ($1000 \text{ g}/\text{cm}^3$) DT keverék előállítására. A target kamra centrumába helyezett kapszula (3. ábra) felfűtéséhez ion és nehézion nyalábot is használtak, a gyújtást lézernyalábbal végezték.

A target kamra átmérője 10 méter, 192 összenyomó lézerrel. Mindegyik lézernyaláb 305 méter hosszú, a gyújtó lézer 500 TW. A programot 2002-ben indították, gyújtási terv 2010 év. Tervezett költség 2,2 milliárd Euro.



3. ábra. Zártcsatolású, nehéz ion indirekt gyújtású target koncepció (IFE tervezés, LLNL). A kapszula (hohlraum) hossza 20 mm és az átlagos átmérője ~5 mm. A központba helyezett fűtőelem gömböcske

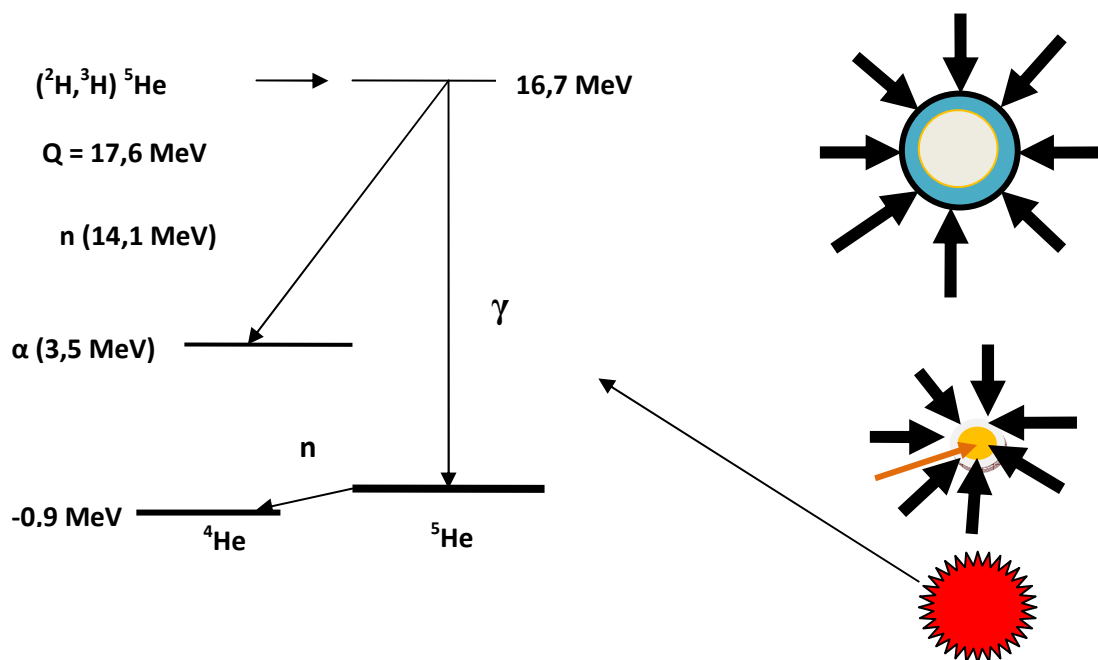
átmérője ~ 4.7 mm és a 0.2 mm vastag brómmal doppolt berillium gömbhéjon belül van a 0,32 mm vastag DT jégréteg (lásd 4. ábra).

További inerciális bezárású berendezések, amelyekből, évtizedes tapasztalatok alapján, a világon több mint 16 nagyberendezést teszteltek:

NIF | OMEGA | Novette laser | NIKE laser | Argus laser | Ciclop laser | Janus laser | Long path laser | 4p laser | Vulcan laser (all USA) | LMJ | Luli2000 (France) | Gekko XII (Japan) | ISKRA lasers (Russia) | Asterix IV laser (Czeh Republik). Non laser driven: Z-machine | PACER (USA).

Ezek a berendezések is számos, itt nem említett paraméter tesztelése folyt. Így a lézerrel hajtott inerciális erőmű működésére szolgáló DT keverék fúziójára több indirekt és direkt módszert dolgoztak ki. Az indirekt módszernél a kapszulába (hohlraum) helyezik a nagy nyomású DT keveréket tartalmazó gömböcskét (3. ábra) és ionnyalábbal fűtik fel a plazmahőmérsékletre.

A direkt módszer esetében a kapszula nélküli gömböcskéket lézernyalábokkal nyomják össze, felfűtve azt több tízmillió fokra és gyújtó lézer indítja a fúziót. A fúzió folyamatát és a keletkező ^5He bomlássémáját a 4. ábrán szemléltetjük.



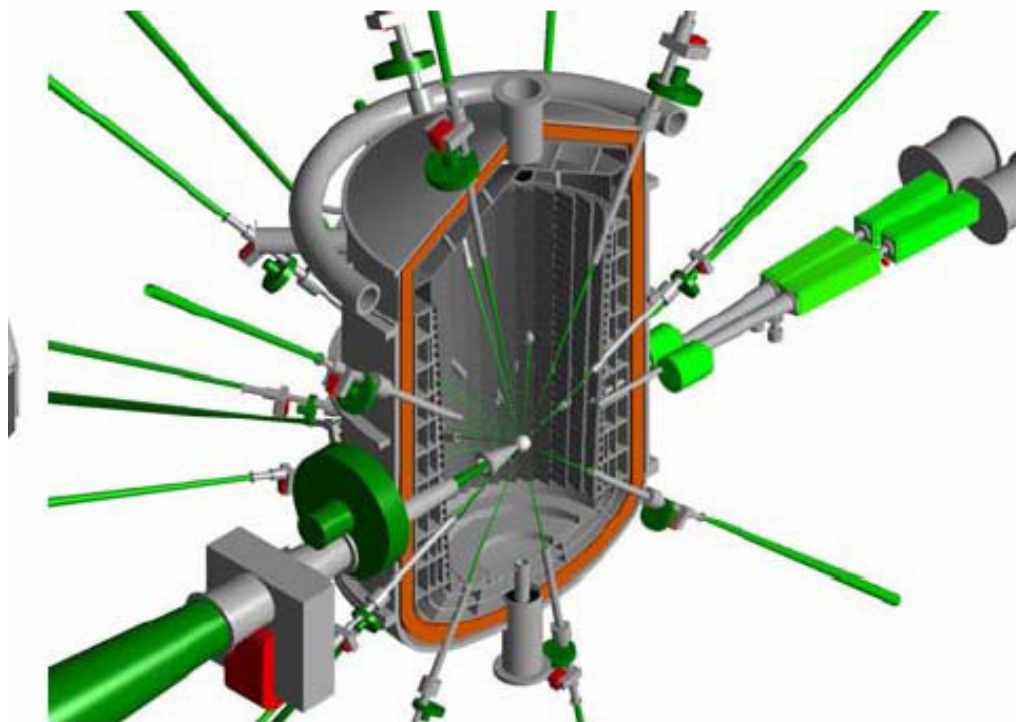
4. ábra. A DT reakcióban keletkező, gerjesztett ^5He bomlási sémája a baloldalon látható. A ~2 mm átmérőjű gömböcskében, 20 K°fokra hűtött, DT keverék (kék körgyűrű) van. Az összenyomás (~1 $\mu\text{m-re}$), gyújtás és robbanás folyamat rendkívül rövid idő (ns-ps) alatt megy végbe. Az összenyomó lézerek a vastag fekete nyilak, a gyújtólézer barna nyíl, a robbanást piros sűrűn fogazott gömbcsillag reprezentálja.

A 14,1 MeV neutron és 16,7 MeV γ -átmeneti gyakorisága között, mint említettük, igen nagy különbség van: ($\Gamma_\gamma/\Gamma_n = 2 \times 10^{-5}$). Jelenlegi becslések szerint, a direkt gyorsgyújtásos módszerrel, lézerrel hajtott fúziós atomerőművek 10-15 éven belül megjelenhetnek. Az eddigi fejlesztések során a fő hangsúlyt az energiatermelés határfokának növelésére helyezték. Kevesebb figyelmet kaptak viszont a másodrendű effektusok és sugárvédelmi kockázatainak az elemzése. A hűtőközegben lejátszódó másodlagos folyamatok hatásainak figyelemmel kísérése tehát alaposabb sugárvédelmi elemzéseket is igényel.

Attól, hogy napjainkban a NIF elérheti azt a pillanatot, amikor a fúziógyújtással több energiát állítanak elő, mint amennyi a gyújtáshoz kell, a kereskedelmi erőműfejlesztéseknek a felgyorsulása várható. Ehhez az 50 év során a kutatási eredményekben felhalmozódott tapasztalatok is hozzájárultak, melyek zömét alkalmazták a direkt gyújtások kidolgozásánál is.

Sikerült bemutatni, hogy a fúzióhoz szükséges lézerenergiában jelentős megtakarítás érhető el az úgynevezett „gyors gyújtás” technikával, amelynek egyik előnye, hogy a gömböcske összenyomásához kisenergiájú lézernyalábokat használtak. Ezzel az erőmű üzemeltetési költsége tizedére csökkenthető. A gyors gyújtást először 2002-ben a japán Osaka Egyetemen demonstrálták egy angol csapat részvételével [7].

A fenti kísérleti eredmények alapján tervezett japán KOYO-F fúziós erőmű négy egységből áll. Az egyik egység reaktormoduljának a keresztmetszete az 5. ábrán látható, az Osakai Egyetem „Institute of Laser Engineering” intézetének a koncepciója alapján [8].



5. ábra. A KOYO-F lézerrel hajtott erőmű négy gyorsgyújtású reaktormodul egyikének a keresztmetszeti nézete (Norimhatsu et al. [7]). A modul 32 összenyomó lézernyalábot, egy gyújtólézert, és két target belövőt tartalmaz. A láthatóság kedvéért a TD keveréket tartalmazó golyócska (középen), a modulméretarányhoz képest 150-szeres nagyítású.

A reaktor belső SiC falának védelmére keverő csatornákon folyékony fémet áramoltatnak. A gőzáramlás stagnálásának a megakadályozására három szinkronizált sűrű rotációs zsalu rendszert alkalmaznak, három szinkronizált lappal. A belső védőfelület hűtésére használt fémfolyadékot lépésről lépésre folyamatosan keverik belső hideg folyadékkal. Ennek a kamrának fontosabb jellegzetességei: 1) a függőleges pozicionálást alkalmazták a plafon mechanikus védelmére; 2) a kamra belső falában LiPb hűtő fémfolyadékot áramoltatnak; 3) a belső fal paneljai 30°-s szögben dőltek, hogy elkerüljék a kamra középpontjában keletkezett gőz stagnálását. Mindegyik nyalábnak van egy forgó kapu- és elektromágnes zárja, hogy a finom optikát megvédjék a semleges gőztől és ionoktól. A reaktor modul főbb paramétereit és az erőmű adatait az 1. táblázat tartalmazza.

1. Táblázat. A gyorsgyújtású reaktormodul és a fúziós erőmű főbb adatai.

Reaktormodul lézernyaláb főbb paramétereit			Az erőmű teljesítmény adatai	
Lézertípus	Összenyomó	Gyújtó	Teljesítmény	4×300 MW _e
Hullámhossz	3ω (343 nm, ns)	2ω (515 nm, ps)	Fúziós E/imp	200 MJ
Lézernyaláb szám	32	1 köteg (8)	Target erősítés	165
Energia/impulzus	1.1 MJ	0.1 MJ	Termál E./reak.	916 MW _t
Ciklussebesség	16 Hz	16 Hz	W _e /W _{th}	41.5 %

Ezekre, a tapasztalatokra alapozzák az „European High Power laser Energy Research” (HiPER) berendezést [9]. Gyorsgyújtásra Nd-üveglézer vákuumbeli 1053 nm hullámhosszú, ω-alapfrekvencia másod- (2ω, 515 nm) és harmad- (3ω, 343 nm) felharmonikusainak az alkalmazását is tervezik. A HiPER energiaerősítése alkalmas a gyors gyújtás és a fúziós erőmű működése közötti kritikus lépés megtételére. A programot tíz ország 26 intézményének együttműködésével kívánják megvalósítani. 2014-ig 3 éves program keretében 63 millió Eurót fordítanak a részegységek kidolgozására. Ezt követően 100 millió Eurót terveznek a működő prototípus létrehozására. A következő húsz évre, pedig 1,1 Mrd. Euró lenne a becsült költség.

A fúziós erőműfejlesztésekre fordított világméretű erőfeszítésekből ezzel a kis szelettel kívántunk rávilágítani, hogy mennyire a közeljövő nagy vívmányai közé tartoznak a fúziós erőművek. Fontos, hogy növeljük ezeknek, a nagyberendezéseknek a környezetvédelmi és sugárvédelmi szempontokat is figyelembevevő biztonságát, a másodlagos folyamatok figyelemmel kíséréssel is. A következő fejezetben, tehát becsléseinket és számításainkat ennek a bemutatására szánjuk.

II. REAKTORMODUL HŰTŐKÖZEGEIBEN KELETKEZŐ FOTONEUTRONOK ÉS γ-SUGARAK

A reakció végtermékében, mint említettük a ⁴He 3,5 MeV kinetikus energiával és a 14,1 MeV-s neutron dominál. A 16,7 MeV gamma legerjesztődés csak igen kis mértékben fordul

elő, ezért nagyon sok esetben ez utóbbi tagot a reakció ismertetése során gyakran figyelmen kívül is hagyják. Az erőmű sugárvédelme és a személyi sugárvédelem tervezésénél azonban ez már nem hanyagolható el. Egyrészt a reaktormodul belső védelem anyagában a 14,1 MeV-s neutronok nagyenergiájú gamma sugarakat keltenek az (n,γ) magreakciók révén, másrészt a hűtőfolyadék lítiumával reakcióba lépve trícium keletkezik.

II. 1. A fúzió keltette neutronok hűtőközegben kifejtett hatásai

A DT reakció során keletkező 14,1 MeV-es neutronok elleni belső védelem anyagának három fontos igényt kell kielégítenie. Először el kell nyelnie a neutronok kinetikus energiáját, másodsor támogatnia kell a trícium termelődését és végül fontos követelmény, hogy megfelelő sugárvédelmet biztosítson a neutronokkal szemben. Ezeknek megfelelően a blanket (belső köpeny) anyagát könnyű elemek, zömmel szilícium fém és szén ötvözetek alkotják (SiC). A belső hűtő folyadékban lévő Li fém a nagy neutron-abszorpciós hatáskeresztmetszete révén tríciumot (${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$) is termel. A belső köpeny SiC anyagának kiváló a szóródási hatáskeresztmetszete, hűtési és hőmérsékleti tulajdonságai, azonban a ${}^{12}\text{C}(n,\gamma){}^{13}\text{C}$ reakcióban, nagyenergiájú ($E_\gamma > 10$ MeV) gamma-kvantumok is keletkeznek. A nehéz elemekből álló külső burkolatban viszont ezek a nagyenergiájú gamma-sugarak ($\gamma, n, 2n, \dots$) reakciókkal foto-neutronokat hoznak létre. Ennek mértékét és hatását a következő alfejezetben elemezzük bővebben. A számításainknál a várható fúziós erőművek adataira kívánunk támaszkodni. A szekunder folyamatokból eredő adatokra támaszkodva a sugárvédelemre háruló szükséges teendőket körvonalazzuk.

II.2. Gamma-sugárzás keletkezése és kölcsönhatásai

A 4. ábrán bemutatott γ, n átmenetek arányát, mint már említettük, Lauritsen és Ajzenberg-Selove [1] határozták meg. A mért átmeneti valószínűségi arány értékük: $\Gamma_\gamma/\Gamma_n = 2 \times 10^{-5}$, ami azt jelenti, hogy százezer DT reakcióból 2 esetben 16,7 MeV energiájú γ -kvantum kibocsátás előzi meg a 14,1 MeV-es neutronemissziót. Egy DT reakció esetén, 17,6 MeV (Q) energia felszabadításával (W_e/W_t) számolva az 1000 MW_e fúziós erőmű működéséhez másodpercenként 6×10^{20} DT reakcióra van szükség, így a 6×10^{20} 14.1 MeV-s neutron hozam mellett, $1,2 \times 10^{16}$ γ /s hozammal, 17,6 MeV γ -energiájú foton forrással is számolnunk kell.

Továbbá $E_\gamma > 10$ MeV kemény γ -sugarak is létre jönnek a védőköpeny könnyű elemekből álló anyagában lejátszódó neutronbefogási (n,γ) reakciókból. Ezek az E_γ energiák a 16,7 MeV értéket is meghaladhatják, mivel maximális energiájuk: a neutron 14,1 MeV + a neutron kötési energiájának az összege. Megbecsülhetjük, például az 5. ábra reaktormodul SiC, ill. Li₂C₂ (lítiumkarbid) könnyű fémötvözet anyagában az $E_\gamma > 10$ MeV várható gamma-hozamot. Bertozzi és munkatársai [10] a 14,1 MeV neutronnal meghatározott ${}^{12}\text{C}(n,\gamma){}^{13}\text{C}$ reakció totális hatáskereszténél négy nagyságrenddel kisebb értéket (10^{-4}) mértek a ${}^{13}\text{C}(\gamma,n){}^{12}\text{C}$ tükröreakció hatáskeresztmetszetére. Erre alapozva a 10 MeV feletti gamma-hozam: $E_\gamma \sim 6 \times 10^{16}$ γ /s becsülhető. A fúzióból eredő és a most becsült összes gamma-hozama, tehát $\sim 7,2 \times 10^{16}$ γ /s.

A könnyű elemekből álló belső védelem kiváló a neutronok rugalmatlan szóródásához, lassításához és abszorpciójához, majdnem hatástalan viszont, a kemény gamma sugarakkal szemben. Ebből az következik, hogy a belső sugárvédő fal vastagságától függően a gamma-sugarak intenzitása eléri, vagy meghaladhatja a DT reakcióból eredő neutronintenzitás értékét.

A nehéz elemeket tartalmazó külső védelem a nagyenergiájú gamma-sugarakkal szemben hatásos, de (γ, n) reakcióval foto-neutronokat termel. A nehéz elemekből álló védelmet úgy tervezik, hogy az mind a lágy mind a kemény gamma-sugarakat elnyelje. Azonban, mivel a foto-neutron keltés hatáskeresztmetszete kb. 3 %-a a gamma sugarak totális abszorpció hatáskeresztmetszetének, jelentős mértékű foto-neutron keletkezik. Így a külső védelemben keletkező foto-neutronok hozama elérheti a 10^{12} - 10^{14} n/s értéket, amely további külső védelmet igényel.

Ebből a rövid elemzésből is nyilvánvalóvá válik, hogy a foto-nukleáris folyamatok igen fontos szerepet játszanak a fúziós erőművek védelmének tervezésében. Ha a sugárvédelem kialakítása során ezeket a folyamatokat figyelmen kívül hagynák, váratlanul nagy neutron-intenzitás jelenhet meg a nehéz elemekből álló védelem külső falán. Ezeknek a folyamatoknak a figyelembevétele tehát a személyi sugárvédelem megtervezése során is fontos követelmény.

III. A FÚZIÓS ERŐMŰVEK SUGÁRVÉDELMÉNEK MÉRÉSTECHNIKAI ÉS INTÉZKEDÉSI FELADATAI

A fentiekből is következően a fúzió erőművek sugárvédelmi feladataival számos NAÜ rendezvény keretében folytak elemzések. Így főleg az ITER és más mágneses bezárású berendezés alkatrészének és a fúziós folyamatok kialakításának a tanulmányozására 1980-tól számos NAÜ rendezvény (1980, Bécs, Ausztria; 1983, Ispra, Olaszország; 19986, Culham, UK; 1989, Jacson Hole, USA; 1993, Toronto, Kanada; 1996, Naka, Japán; 2000, Cannes, Fr. O.; 2006, Bécs, Ausztria) keretében vitatták meg a különböző biztonsági problémákat.

A 2006-os NAÜ rendezvényen [11] vitatott témák különösen az alábbi területekre irányultak:

- Az erőmű biztonsági kérdései
- A fúzió specifikus működés biztonságos feltételeinek követelményei
- A reaktormodul tartályok tesztelési kérdései
- Trícium-készletezés biztonsági feltételei
- leszerelés és hulladék elhelyezésének biztonságos, sugár- és környezetvédelmi követelményei

A beszámolók túlnyomó része az ITER mágneses bezárású fúziós berendezés kapcsán kialakítandó körülmények kialakításával, a szükséges fejlesztési lehetőségek ismertetésével foglalkoztak.

A lézerrel hajtott fúziós erőműveknél hasonló jellegű tanulmányok készültek a berendezések lényegesen eltérő paraméterinek a figyelembevételével. Különösen a reaktor-modul és plazmaméretekből adódó nagy eltérések igényelnek egyedi vizsgálatokat.

Ezzel a rövid áttekintéssel a fúziós erőművek jelenlegi helyzetén túlmenően az üzemelés során felmerülhető néhány olyan fontos gyakorlati lépés szükségességére kívántam felhívni a

figyelmet, amelyek a „big science” és „high technology” területeket igénylő fúziós erőmű fejlesztések során érhetően kevesebb figyelmet kaptak.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

A deutérium és trícium fúzió során keletkező részecskék másodlagos fotonukleáris-reakcióinak hatásairól kitűnt, hogy az erőmű során azok nem hanyagolhatók el és folyamatos sugárvédelmi vizsgálatokat igényelnek.

A sugar- és környezetvédelmi ellenőrzések során, a keletkező trícium készlet nyomon követésére, annak környezeti emissziójának folyamatos mérésére és nyilvántartására less szükség.

A személyi sugárvédelemben a szerelő, karbantartó személyzet dózisterhelésének az ellenőrzésére kell koncentrálni. Rendszeres mérés szükséges a trícium inkorporációjának, az okozott belső dózisterhelésnek a vizeletből történő meghatározására.

A fotoneutronok külső védelmében nincs szükség rutin és folyamatos in-situ eljárásokra, az inkább a tervezés során igényel nagyobb figyelmet.

A külső dózis meghatározására olyan személyi dozimétert kell alkalmazni, amely a fotoneutronokból eredő dózisok becslését is lehetővé teszi.

Ezeken felül még számos módszerrel lehet javítani a sugárvédelem hatékonyságát. Fontos lenne az is, hogy a kereskedelmi erőmű megjelenésekor már ezekben, a kérdésekben is jól képzett szakember gárdával rendelkezünk.

Irodalom.

[1] T. Lauritsen and F. Ajzenberg-Selove, Nucl. Phys. **78**, 6 (1966)

[2] Zoletnik Sándor: Fúziós energia és technológia,
http://rmki.kfki.hu/~zoletnik/Bolyai_Zoletnik

[3] T. Tajima, J. M. Dawson: Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979).

[4] M. D. Perry, G. Mourou: Science **274**, 917, (1994).

[5] Szipócs R. Ferencz K. Spielman Ch. Krausz F. Optic Letters **19**, 201-203, (1994).

[6] J. D. Lindl et al. „The US ICF Ignition Program and the Inertial Fusion Program”, Preprint UCRL-JC-152987, 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St. Petersburg, 07-11-2003 – 07-11-2003.

[7] R. KODAMA et al., “Fast Heating Scalable to Laser Fusion Ignition” Nature, 418, 6901 (2002).

[8] T. Norimatsu, Y. Kozaki, N. Miyanaga, J. Kawanaka, H. Azechi, T. Johzaki, and K. Tomabechi: FT/P5-39, norimatsu@ile.esakia-u.ac.jp

[9] S. Atzeni et al. „Fast ignator target studies for the HiPER project”, *Physics of Plasmas* **15**, 056311 (2008)

[10] W. Bertozzi, P. T. Demos, S. Kowalski. F. R. Paolini, C. P. Sargent, and W. Turchinetz, *Nucl. Instr.& Meth.* **33**, 199 (1965)

[11] B. N. Kolbasov, *IOP electronic journals, Nucl. Fusion* **47**, (2007)