

Optikai diagnosztikai rendszerek fúziós erőműveken

Katona Imre^{1, 2}, Dr. Nagy Balázs Vince²

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és
Gépészeti Informatika Tanszék 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Az Európai Unió (EU) hosszú távú fúziós energiastratégiája egy demonstrációs fúziós reaktor (DEMO) fejlesztését irányozza elő, mint egy technológiai lépést a kísérleti ITER és a későbbi kereskedelmi fúziós erőművek között. A jelenlegi tervek szerint a DEMO-nak a 21. század közepére több villamos energiát kellene a hálózatra juttatnia, mint amennyit felhasznál. Emellett az alapcél mellett el kell érnie a trícium-önellátást, bizonyítania kell a biztonságos üzemeltetést, és be kell mutatnia a gazdaságos üzemeltetés lehetőségét is. Az EU DEMO jelenlegi alapkoncepciója egy tokamak típusú fúziós reaktor. Ugyanakkor az erőművi környezet a jelenlegi fúziós berendezésekhez képest nagyságrendekkel nagyobb hő- és sugárzási terhelést fog jelenteni a plazma közvetlen környezetében üzemelő eszközöknek. A berendezés megfigyeléséhez és vezérléséhez szükséges diagnosztikai eszközöknek ehhez mérten megbízhatónak és ellenállónak kell lenniük. A különböző fizikai elven működő plazmadiagnosztikák közül az egyik legkritikusabb az optikai diagnosztikák tervezése és integrálása.

A cikk célja a várható optikai diagnosztikai rendszerek, kihívásai és lehetséges megoldásai ismertetése, valamint a kapcsolódó magyar kutatási célok bemutatása.

Bevezetés

Az európai fúzióenergia-stratégia kulcsfontosságú következő mérföldköve a DEMO erőmű megvalósítása, amely a jelenlegi kísérleti berendezések és a jövőbeli kereskedelmi reaktorok közötti átmenetet biztosítja. A DEMO célja nem csupán a nettó villamosenergia-termelés demonstrálása, hanem az önellátó tríciumtermelés megvalósítása és a hosszú távú üzemeltetés technológiai bizonyítása. A biztonságos és stabil üzemhez elengedhetetlen a plazma állapotának folyamatos nyomon követése és szabályozása, ami megbízható diagnosztikai rendszereket igényel. Az erőművi környezet viszont óriási kihívást jelent a tervezőknek, mert olyan nagy neutron- és gammadózist, illetve bizonyos helyeken akkora hőterhelést kapnak az eszközök, amelyekkel nincs még tapasztalat a jelenlegi fúziós berendezéseken. A mostani megoldások többsége nem alkalmazható, ezért innovatív megoldásokat kell kifejleszteni a problémák orvosolására. [1, 2]

Tervezett diagnosztikai rendszerek

Mivel a DEMO elsődleges célja nem a kutatás, hanem az energiatermelés demonstrálása, ezért jóval kevesebb diagnosztikai rendszerrel lesz felszerelve, mint a most épülő Nemzetközi Termonukleáris Kísérleti Reaktor (ITER). Ezek a rendszerek viszont mind a berendezés biztonságos üzemeltetéséhez kapcsolódnak, tehát fokozottan megbízhatónak kell lenniük. Ennek érdekében fontos, hogy minden vezérléshez szükséges jel legalább két különböző diagnosztikai rendszerből legyen származtatva. Ezért a DEMO-n különböző, eltérő elven működő diagnosztikai rendszerek lesznek alkalmazva, mint például: mágneses elven, mikrohullámú sugárzáson, hőáram mérésen, illetve optikai elven alapuló diagnosztikák.

A diagnosztikák alapkövetelménye, hogy valós idejű rendszerekként folytonos információt adjanak a központi vezérlő rendszernek, ami a megfelelő beavatkozó rendszereken keresztül (fűtésteljesítmény, üzemanyag-

pótlás, áramhajtás, ...) biztosítja a folytonos és stabil fúziós teljesítményt, ami a stabil energiatermelés alapja.

Várható optikai diagnosztikai rendszerek

Bolometria: A plazma által kibocsátott elektromágneses sugárzás (IR-től lágy röntgen hullámhossz tartományig) teljesítményét méri fólia vagy képalkotó bolométerekkel. Az egyes csatornák jeleiből 2D/3D emisszivástérképek állíthatók elő, ami alapján a teljesítménymérleg és a sugárzási hűtés kvantitatívan jellemezhető.

Thomson szórás: A (klasszikus) Thomson-szórás diagnosztika rövid lézerpulzusnak a szabad elektronokon szórt spektrumából egyszerre határozza meg az elektronhőmérséklet- és elektronsűrűség-profilokat; a spektrális alak/ szélesedés elektronhőmérséklet függő, míg az abszolút intenzitás elektronsűrűség-arányos. A kollektív Thomson-szórás (CTS) variánsa a sűrűségfluktuációkon szórt mikrohullámú/távoli-IR sugárzásból a gyors ionok tér- és sebességeloszlására ad információt, kiegészítve a klasszikus Thomson-szórás diagnosztikát reaktoros eszközökben.

Polarimetria: A polarimetria egy olyan a fúziós plazmafizikában gyakran alkalmazott diagnosztikai módszer, amely a plazmán áthaladó polarizált fénysugár polarizációs síkjának elfordulását méri. Ez az elfordulás – főként a Faraday-effektus révén – közvetlenül kapcsolódik a plazma elektronsűrűségéhez és a mágneses tér vonalkintegrált értékéhez, így a módszer lehetőséget ad ezek térbeli eloszlásának rekonstruálására.

A DEMO-n az ITER-hez hasonló elven működő vagy toroidálisan elhelyezett polarimétereket, vagy poloidálisan elhelyezett polarimétereket terveznek alkalmazni.

Spektroszkópiai elven működő diagnosztikák

A fúziós reaktorokban a divertor hőterhelésének csökkentése érdekében fokozott központi sugárzási hányadra van szükség.

A DEMO reaktort várhatóan $P_{\text{rad,mag}}/P_{\text{fűtés}} \approx 0,6-0,8$ sugárzási hányaddal kell üzemeltetni, hogy csökkentsék a separatrixon átjutó sugárzási teljesítményt a divertor felé. Technikailag a központi sugárzás szabályozását xenon- vagy kriptongáz bejuttatásával érik el, amelyek sugárzó szennyezőanyagként viselkednek a plazmában. Ugyanakkor a stabil H-módú üzemhez a separatrixon átjutó teljesítménynek meg kell haladnia a H-mód küszöbértékét ($P_{\text{sep}} > P_{\text{LH}}$), ezért a központi sugárzási teljesítmény nem lehet túl magas. Mindkét – a fűtési és a sugárzási – teljesítmény pontos mérésére szükség van ezen ellentmondó követelmények teljesítéséhez. A fűtési teljesítmény neutronfluxus és a kiegészítő fűtési teljesítmény alapján becsülhető, míg a magból származó központi sugárzást sugárzásmérési és spektroszkópiai eljárásokkal lehet meghatározni.

A központi plazmasugárzás mérésére tervezett fő diagnosztikai módszer a bolometria, amelynek detektorait a korábbi ITER-hez képest védettebb, távolabbi helyre, deutériumgázzal töltött optikai csövekben kell elhelyezni.

A jelenlegi koncepció szerint mind az ekvatoriális, mind a vertikális portokból kb. 10-10 elkülönített látóirányt kell kialakítani egy poloidális síkban, hogy egy durva radiális profilt kapjunk. Mivel a detektorok hosszú távon stabil abszolút kalibrációja nem lehetséges, a relatív kalibrációt a

$$P_{\text{sep}} = P_{\text{fűtés}} - P_{\text{rad,mag}} \quad (1)$$

menyiség elemzésével végzik, az ún. H-L átmenetek során, amelyeknek minden sikeres plazmapulzusban legalább egyszer bekövetkeznek. Mivel a plazmapulzusok végén a kiegészítő fűtést lekapcsolják, a plazmateljesítmény a H-mód fenntartásához szükséges küszöb alá esik, így minden sikeres kisülésben természetes módon bekövetkezik egy H-L átmenet.

A szennyező-bejuttatásos plazmaszabályozás gyors-visszacsatolású vezérléséhez megfelelő lehet a VUV-spektroszkópiával szélplazmában mérhető karakterisztikus spektrumvonalak intenzitása, hasonlóan az ITER-re tervezett rendszerhez. A VUV-spektroszkópia a magban és a plazma szélén is lehetővé teszi a szennyezők bejutásának detektálását is, mivel megjelennek a magasabb ionizációs fokú spektrumvonalak.

Röntgenspektroszkópia: Nagy felbontású röntgenspektroszkópiát is terveznek, amely a nagy rendszámú szennyezők (Xe, Kr, W) sűrűségével arányos jelet szolgáltat, bár lassabb válaszütemű, mivel a szennyezők diffúzióval jutnak el a magba. Például W Ne-szerű vonalai (1,3–1,5 Å), Xe H-szerű (0,39–0,4 Å) vagy Kr He-szerű (0,9 Å) vonalai alkalmazhatók.

Az ITER-en kialakított elrendezés elvét a DEMO-ban is adaptálni lehet, ahol egy központi látóirány elég lehet a szabályozáshoz.

A röntgensugaras és VUV-vonalak intenzitásának összehasonlítása alapján információ nyerhető a magban

felhalmozódó nehéz szennyezőkről, ami felhasználható a bolometriai jelek valós idejű ellenőrzésére.

Divertor-spektroszkópia: A tokamak divertor régiójában a leválás (detachment) olyan üzemiállapotot jelent, amely során a plazma céltárgyra jutó hő- és részecsketerhelése jelentősen csökken. Ennek elsődleges szerepe a divertorra jutó hőteljesítmény mérséklése, amely az EU DEMO koncepcióban alapvető megközelítés a divertor hosszú távú védelmére. A leválást a szél- és divertor plazmasugárzási hűtésének fokozásával, például szennyezőgáz-befecskendezéssel érik el. Fizikai hátterét a szennyezőanyagok által kiváltott sugárzási veszteségek és a térfogati rekombináció adják, míg az ion-semleges ütközések elsősorban a momentumkiegyenlítésben játszanak szerepet. A leválás kezdetén a külső divertor céltárgy előtt nagy sűrűségű, alacsony hőmérsékletű plazmazóna alakul ki, amely jól detektálható – a hidrogénizotópok magasabb Balmer-vonalainak intenzitás- és Stark-szélesedés-növekedésével - nagy felbontású látható (VIS) spektroszkópiával.

A divertor térségben koncentrálódik a plazma-fal kölcsönhatás, ahol nemcsak jelentős szennyezőáramok (erózió, lerakódás), hanem a legnagyobb hőfluxus is jelentkezik a céltárgyakon. Ezért a hosszú élettartamú diagnosztikai komponensek csak védett, divertoron kívüli helyeken biztosíthatók. A meglévő fúziós berendezések tapasztalataira támaszkodva vizsgálják, hogyan lehet a divertorleválás mérési és szabályozási módszereit a DEMO-ra adaptálni.

A DEMO-n ezek a mérések technikailag megvalósíthatók, ha az első tükröt ekvatoriális portba helyezik, és ferde látószöggel, a céltárgyakkal majdnem párhuzamos látóirányokban tekintenek le a divertor régióba. A plazmasűrűség és a hőmérséklet térbeli eloszlásának, valamint a spektroszkópiai jeleknek a részletes elemzése alapvető a DEMO divertor működésének megértéséhez. Ezek vizsgálatára a DEMO paramétereire szabott SOLPS fizikai szimulációk szolgálnak.

Vizsgálni kell továbbá a fényvisszaverődések hatását a divertor régióban, amely jelentősen csökkentheti a jel/zaj arányt a VIS spektroszkópia esetében. Tartalék lehetőségként felmerül a divertor VUV-spektroszkópia is, amely kevésbé érzékeny a falakról visszaverődő fényre, de nagyobb optikai és mechanikai kihívást jelent a megvalósítása.

A leválás kontrolljának második lehetséges útja a céltárgyak hőmérséklet-eloszlásának termográfias megfigyelése, amely szintén optikai diagnosztikai rendszerekkel, ekvatoriális portba telepítve valósítható meg. E mérési módszer elsődleges szerepe a divertor lemezek védelmére, ezért a rendszer megbízhatóságának és hosszú távú használhatóságának részletes vizsgálata kiemelt jelentőségű.

A plazma sugárzási teljesítményének mérése szintén értékes jelekkel járulhat hozzá a plazma-instabilitások kontrolljához és a plazmapozíció szabályozásához. Ennek érdekében redundáns mérési csatornák telepítését tervezik mind az ekvatoriális, mind a vertikális portokba (például 2×10 vízszintes látóirány az ekvatoriális portban, valamint további 2×10 a vertikális portban), ami szélesebb radiális lefedettséget biztosít. A mérés – a detektorok további vizsgálatától függően – kombinálható a bolometriával is.

Limitér spektroszkópia: A spektroszkópiai és sugármérési feladatok közé tartozik az első fal védelmet ellátó limiterek állapotának monitorozása, amelyeket az első fal (köpeny) túlmelegedésének elkerülésére terveztek. Ehhez az ITER széles látószögű megfigyelőrendszeréhez hasonló megfigyeléseket terveznek, de korlátozott látótérrel, mivel az első tükrök távolabbi pozícióba kerülnek. [1]

Korlátok és kihívások

Korlátok

A DEMO jelenleg koncepcionális tervezési fázisban van, a legutolsó elfogadott konstrukciós változat 2019-ben került megjelenésre. Ez még nem tartalmazza a diagnosztikai rendszerek integrációját. Ennek következtében a tervezés jelenleg még rugalmas helyfoglalással történhet. Ez abban a kettősségen nyilvánul meg, hogy a tervezők számára relatíve sok hely áll rendelkezésre a portokon belül, viszont ennek ellenére konzervatív megközelítéssel kell a rendszerek befoglaló méretét meghatározni, mert az eddigi tapasztalatok alapján várhatóan a lehető legkisebb méretűre kell optimalizálni a diagnosztikai rendszereket.

Kihívások

Egy fúziós erőmű számos jelentős műszaki kihívást támaszt, amelyeket meg kell oldani, hogy a diagnosztikák megbízhatósága garantálva legyen. Ilyen kihívás például a diagnosztikai és szabályozórendszerek integrálása egy fúziós reaktorba.

Először is, a szaporítóköpenyben elérendő tríciumhozam (TBR) > 1 követelménye. Emellett az első fal és a divertor integritására, illetve a magas hőterhelésre és a neutronárnyékolásra vonatkozó elvárások jelentősen korlátozzák a diagnosztikai elemek elhelyezését a rendelkezésre álló helyet. Különösen azért, mert a diagnosztikai csatlakozók (port plugok) és egyéb nyílások számát korlátozni kell, ezeket pedig meg kell osztani a fűtési és villamos rendszerek, a robotikus karbantartás, a vákuumtechnika és más rendszerek elemeivel.

Másodszor, a berendezésen belüli (in-vessel) komponensek karbantartása a DEMO nukleáris környezetében kizárólag távvezérléssel, robotikus úton lehetséges, ami műszakilag rendkívül bonyolult, költséges és időigényes. Emiatt a DEMO magas rendelkezésre állása csak úgy biztosítható, ha az összes in-vessel komponens nagy megbízhatósággal és hosszú élettartamra készül, így minimalizálható a tervezett megelőző vagy nem tervezett karbantartási beavatkozások szükségessége.

A tervek szerint a diagnosztikai és szabályozó berendezések tipikus élettartamának meg kell haladnia a tenyésztőköpenyek tervezett cseréinek átlagos időközét. A cél, hogy a kezdeti tenyésztőköpeny két teljes üzemévnél (full power year, fpy) működést bírjon ki 20 dpa sugárkárosodás mellett. Ezzel, valamint a beépített mérőcsatornák redundanciájával, jelentősen csökkenthető a nem tervezett karbantartások igénye, amely a diagnosztikai és szabályozó komponensek meghibásodásából adódhat.

A DEMO bármely, előre helyezett (plazma felé néző) komponensének nukleáris terhelése (neutron-, gamma-sugárzás) jelentős hőterhelést, és anyagkárosodást eredményez. A diagnosztikai rendszerek plazmához legközelebbi komponensei az élettartama alatt pozíciótól

függően nagyságrendileg $5 \times 10^{21} / \text{cm}^2$ (külső középsík), illetve $2 \times 10^{22} / \text{cm}^2$ (belső középsík) neutronbesugárzást szenvednek, ami 25–100-szorosa az ITER várható értékeknek. Mivel ilyen nagymértékű sugárkárosodásra vonatkozóan diagnosztikai komponensek besugárzási tesztjei még nem történtek meg, ezek a szélsőséges körülmények jelentősen korlátozzák a választható anyagokat, és speciális konstrukciós megoldásokat tesznek szükségessé, mint például a komponensek távolabbi, védett helyekre való telepítése és aktív hűtés alkalmazása.

Továbbá, minden olyan in-vessel diagnosztikai front-end komponens, amelynek nyílt optikai útja („csatornája”) van a plazma felé, ki van téve a plazmában lezajló töltéscsere-reakciókból származó nagyenergiájú semleges részecskék bombázásának. Ezek a gyors semleges részecskék az optikai diagnosztikák tükreinek felületén eróziót okozhatnak, ami megnövekedett felületi érdességhez vezet, miközben a főfalból vagy a diagnosztikai csatornából származó fémrészecskék lerakódhatnak a tükrök felületén, tovább rontva annak reflexióját.

A Rayleigh-kritérium szerint a tükrök érdességének nagyságrendje $r \approx \lambda/8 \sin \delta$ lehet, mielőtt a reflexió észrevehetően csökkenne (ahol λ a hullámhossz, és δ a beesési szög a felület tangenséhez képest).

Mind az erózió, mind a lerakódás hatásait megvizsgálták a DEMO-hoz tartozó diagnosztikák első tükrein, és kimutatták, hogy ha az apertúra és a tükrök közötti csatornában gázt áramoltatnak, és a csatornában a hidrogéngáz sűrűsége $n = 3 \times 10^{19} / \text{m}^3$, a csatorna hossza $L = 1\text{--}2$ m, sugara pedig $\rho = 1\text{--}3$ cm, akkor az erózió és lerakódás hatása egy teljes üzemév alatt néhány nanométeres rétegvastagságra csökkenthető. Ezzel a kis mértékű tükröromlással az optikai elemek élettartama megfelelő lehet. Várhatóan ez lesz a reaktorkörnyezetben üzemeltetett optikai diagnosztikai rendszerek első tükrének a fő védelmi megoldása. [1, 3]

A csatornában lévő alacsony gázsűrűség némi gázkiáramlást eredményez a vákuumkamrába, de egy $\rho = 1\text{--}3$ cm sugarú csatorna esetén ez a kiáramlás lényegesen kisebb, mint a falról visszajövő semleges gáz beáramlásának plazmamértéke, így több ilyen kisméretű csatorna beépítése is megengedhető.

Összefoglalva, hosszú, gázzal feltöltött csatornák, L/ρ arányban körülbelül 40 (infravörös), 50 (látható), illetve 80 (vákuum-ultraibolya, VUV) hullámhossz-tartományban megfelelő védelmet nyújtanak az első tükrök eróziója és szennyeződése ellen.

A fentebb leírt peremfeltételek alapján a DEMO plazmaszabályozás diagnosztikai módszereit azok robusztussága szerint kell kiválasztani, a front-end elemeket védett, a plazmától távoli helyekre telepítve. Különösen fontos, hogy a köpeny és a divertor előtt nem lehet diagnosztikai elem; a köpenyen belül csak fémes komponensek, például mikrohullámú antennák, hullámvezetők és a gázzal töltött optikai csövek lehetnek. A köpeny mögött fém optikai tükröket, mágneses szenzorokat (fém és kerámia) és kábeleiket kell elhelyezni. A port plug régiókban további jelvezető és továbbító elemek (tükrölaborok, kábelezés) kapnak helyet, amelyek csatlakoznak a portzáró lemezeknél lévő átvezetésekhez (kábelek, csövek) és vákuumablakokhoz.

A DEMO plazma üzemi határértékekhez közeli, megbízható szabályozása (pl. sűrűség-, sugárzási-, felfelületi terhelési határ) csak akkor valósítható meg, ha pontos és megfelelő időbeli felbontású információk állnak rendelkezésre a plazma állapotáról a különböző régiókban (mag, perem, x-pont, divertor). A szükséges térbeli lefedettséget elegendő számú egyedi látóirány és csatorna kiépítésével lehet biztosítani.

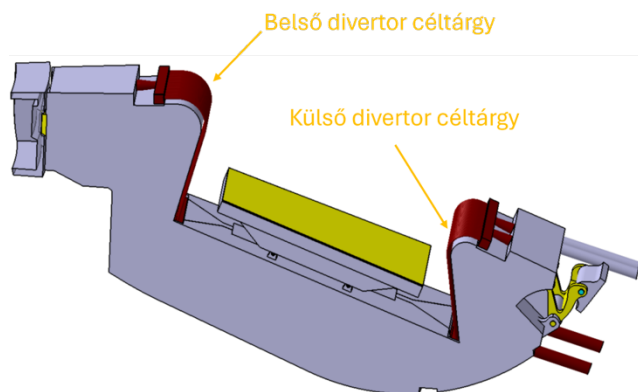
Magyar fejlesztésű Optikai diagnosztikai rendszerek a DEMO-n

A Fúziós Plazmafizikai Laboratórium vezeti a közeli UV tartománytól a láthatón át az infravörös tartományokat lefedő spektroszkópiai rendszerek tervezését.

Ez a fejlesztés három fő diagnosztikai rendszert foglal magában több alrendszerrel:

- Divertor-megfigyelés
- Limiter-megfigyelés
- Pelletmegfigyelés

A divertor-megfigyelésen belül két darab külön alrendszerrel van szó, amelyek a belső és a külső divertor céltárgyak megfigyelésére szolgálnak. A divertor céltárgyak kapják a legnagyobb hőterhelést a berendezésben. Céljuk az el nem égett üzemanyag, az égéstermék, illetve a szennyezők elszívása a plazmából. A megfigyelések tartománya lefedi a közeli UV-tól az infravörös hullámhosszig az elektromágneses sugárzás hullámhossz-tartományát.



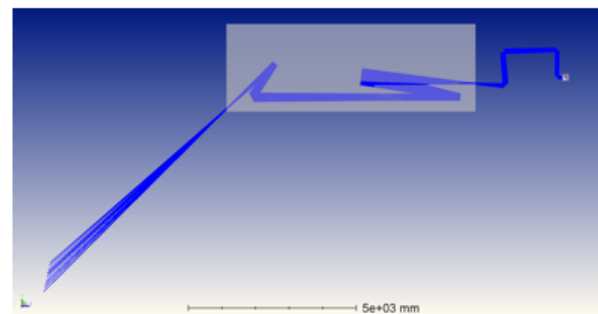
1. ábra: Divertor céltárgyak elhelyezkedése

A mérések céljai:

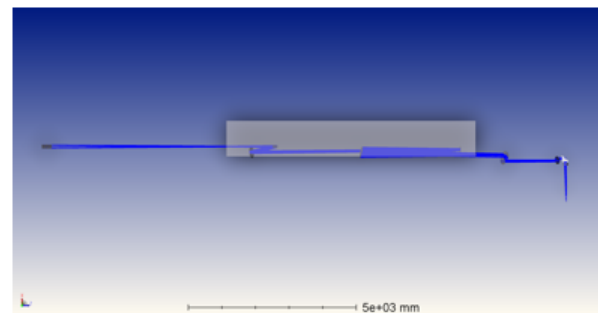
1. Plazmaleválás-ellenőrzés. Mért paraméterek: olyan spektrális vonalak, amelyek megjelenése egyértelműen jelzi a hideg plazma semleges részecskesűrűségű régiójának létezését.
2. Divertor W-erózió: belső és külső céltárgy-felület. Olyan spektrális vonalak észlelése, amelyek erős volfrámfluxusra utalnak a céltárgyból a divertorplazmába. Mérési tulajdonság: a volfrámvonalak intenzitása a hidrogénizotópok vonalaihoz képest.
3. Termográfia a divertor falán, 500°C és 1200°C között: belső és külső céltárgyak felületén. Mérési tulajdonság: relatív fotonszám a hullámhosszok között.
4. Plazmahőmérséklet a divertor céltárgyak közelében: belső és külső céltárgyakkal párhuzamos nézetek.

Mérési tulajdonság: Doppler-szélesedés és/vagy vonalintenzitás-arányok (relatív fotonszám a hullámhosszok között).

5. Szélplazma-jelenségek észlelése: A divertor plazma megfigyelése az X-pont közelében. Mérési tulajdonság: a szennyezőkből vagy hidrogénizotópokból származó spektrális vonalak radiális intenzitáseloszlása.
6. Plazmainstabilitások detektálása: a DEMO üzeme nem tűr jelentős plazmainstabilitásokat; ha mégis előfordulnak, azokat a berendezés védelme érdekében detektálni kell. A DEMO-szinten előforduló instabilitások esetén tett intézkedéseket meg kell vitatni, hogy lehetővé váljon az az instabilitások észlelésére vonatkozó diagnosztikai követelmények meghatározása.



Oldalnézet



Felülnézet

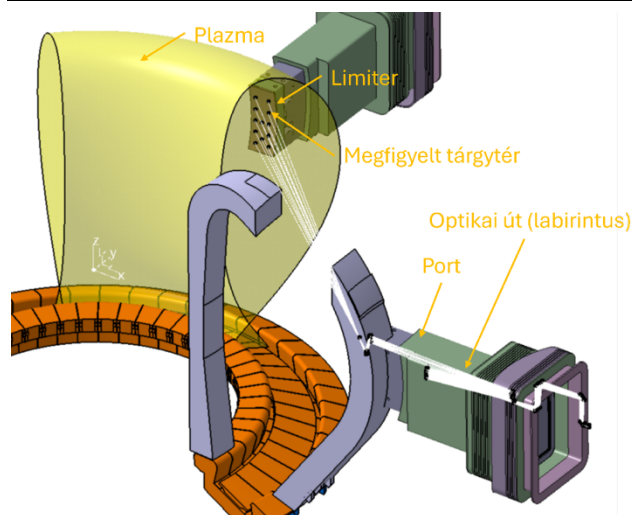
2. ábra: Belső divertor céltárgy monitoring optikai út [4]

Limiter monitoring:

A limiter célja a plazma méretének korlátozása, a plazma-fal kölcsönhatás térbeli behatárolása (a limiterre), ill. a limiter „mögötti” komponensek védelme a plazmától.

A limiter monitoring diagnosztikának a jelenlegi tervek szerint a külső középsíkbeli limiterről (OML) kell a következő információkat szolgáltatnia:

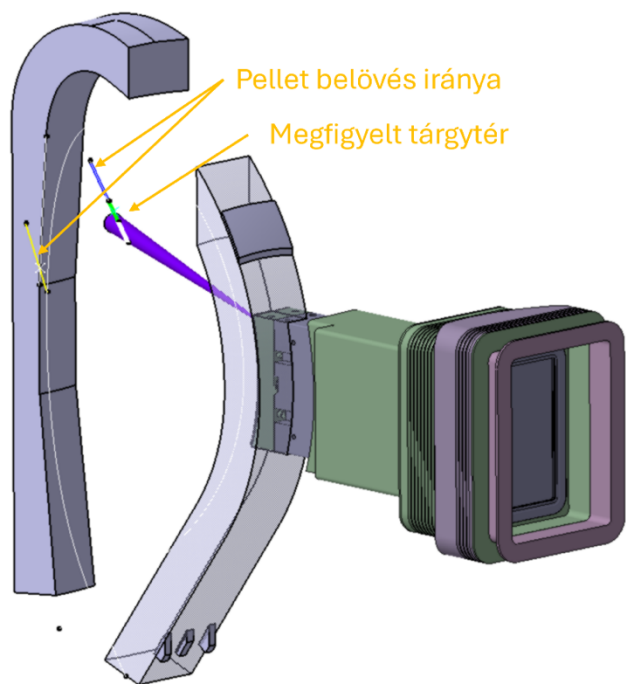
1. Valós idejű hőmérsékletmérés a plazma felfutás/leállás során
2. Valós idejű D-alfa sugárzásmérés a felfutás/leállás során
3. A diagnosztikából nyerhető további információk:
4. Valós idejű limiter hőmérséklet működés közben
5. Valós idejű D-alfa sugárzás működés közben
6. A limiter helyzetének megerősítése
7. Limiter erózió / hibák
8. A toroidális szimmetria megerősítése
9. A normálistól eltérő események észlelése



3. ábra: Limiter monitoring optikai terv

Pellet monitoring:

- A pellet magplazmába érkezésének észlelése és annak meghatározása, hogy ép vagy törött állapotban érkezett-e. A pellet teljes elvesztése a pelletbelövés leggyakoribb hibatípusának tekinthető.
- A pellet által a magplazmába juttatott tömeg 10 %-os pontossággal történő mérése (várhatóan ez a mérés más módszerekkel is lehetséges, pl. reflektometriával a sűrűség mérése révén.)



4. ábra: Pellet monitoring

A diagnosztikai rendszerek látómezejének (field of view, FOV) meghatározása különböző fizikai modelleken alapuló numerikus szimulációk segítségével történik, európai kutatóintézetek együttműködésében. Többek között a divertor-spektroszkópiához kapcsolódó előzetes plazmaszimulációkat az olaszországi University of Milano-Bicocca kutatói végezték el. [5]

A pelletbelövési folyamatokhoz kapcsolódó modelleket a Spanyol Nemzeti Fúziós Laboratórium (CIEMAT) fejleszti, míg a divertor-spektroszkópiai méréseket támogató neutronszimulációk kidolgozása a portugál Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) közreműködésével valósult meg. [4]

A munkacsoport úttörő fejlesztési iránya még a deutériumgázzal töltött optikai csövek, illetve diagnosztikákhoz kapcsolódó gázzal töltött befoglaló dobozok gépészeti oldalról történő fejlesztése. Szimulációk már korábban bizonyították, hogy ez lehet a megoldás a tükrök megfelelő élettartamának eléréséhez, de a mechanikai integráció még nem készült el. Miután az egyes diagnosztikák helyfoglalás szinten megtervezésre kerültek, egy hely optimalizálási feladat van tervben, amely a diagnosztikák integrálhatóságát hivatott vizsgálni, és javítani.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton szeretnék kifejezni hálájukat Dr. Dunai Dánielnek, a HUN-REN Energiatudományi Központ tudományos főmunkatársának, aki a szakterület kiemelkedő ismerőjeként támogatásával elősegítette a cikk létrejöttét.

A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem támogatása alapján valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Biel, W. et al. *Diagnostics for plasma control– From ITER to DEMO*. Fusion Engineering and Design 146 465-472. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.092>
- [2] Leipold, F., et al. *Cleaning of first mirrors in ITER by means of radio frequency discharges*. Review of Scientific Instruments, 87, 11D439 (2016). <https://doi.org/10.1063/1.4962055>
- [3] Tokar, M. *Assessment for erosion of and impurity deposition on first mirrors in a fusion reactor*. Nuclear Fusion, 58. (2018) <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aac95c>
- [4] Katona, I., Dunai D. *Engineering considerations for optical diagnostics of European DEMO*. (2025) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.115292>
- [5] Siccino M, et al. *Overview of the physics and diagnostics modelling activities for the EU-DEMO divertor*. p. 40-41. (2019)